دراسة تأثير اختلاف تصميم مقاطع الجدران في المباني المطبوعة بطابعة ثلاثية الأبعاد على الأداء الحراري للبناء

د.م. أنس قرمو

الملخص

في ظل التوجه العالمي نحو دمج تقنيات البناء الحديثة مع تطبيق المعايير الهندسية الفعالة لترشيد الطاقة برزت طرق جديدة وحديثة لإشادة الأبنية توفر الوقت وتؤمن إمكانيات تحكم في البناء لا توفرها الطرق التقليدية الأخرى، ومن أهم هذه الطرق هي طريقة البناء باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، التي يمكن من خلالها التحكم بأدق التفاصيل الهندسية لتحقيق أفضل النتائج من كافة النواحي. عند تطبيق هذه التقنيات، يجب أن تحقق الأبنية أهم المعايير البيئية ومن أهمها شروط الكفاءة الحرارية.

تم في هذا البحث إجراء دراسة حرارية لستة نماذج جدران وفق الشروط التصميمية الحرارية لمدينة حمص، يحتوي خمساً منها على فجوات ذات شكل هندسي محدد وبأبعاد وشروط محددة، شكل الفجوات المدروسة هي (مثلثي – دائري – بيضوي – سداسي – مربع) بالإضافة لنموذج مصمت لا يحتوي على فجوات كنموذج مرجعي. 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 للتصاميم المدروسة، أعطت النمذجة النتائج التالية: حقق النموذج الجدار ذو الفجوات البيضوية وفراً طاقياً على باقي النماذج ذات الفجوات بنسب % 15.54 و % 21.36 و % 18.28 و % 22.19 على كل من المثلثي والدائري والسداسي والمربع على الترتيب، وحققت جميع النماذج ذات الفجوات (المثلثي والدائري والبيضوي و السداسي والمربع) وفراً طاقياً على النموذج المصمت المرجعي بلغت نسبه % 42.97 و % 38.75 و % 51.83 و % 41.06 و 38.09 % على الترتيب، وبذلك كان النموذج ذو الفجوة البيضوية هو الأفضل بين النماذج المدروسة.

الكلمات المفتاحية: طباعة الجدران ثلاثية الأبعاد– فجوات الجدران – النمذجة الحرارية – الوفر الطاقي.

Studying the effect of varying wall section designs in 3D-printed buildings on the building's thermal performance

Dr.Anas Qarmo

Abstract

With the global trend towards integrating modern construction technologies with the application of efficient engineering standards for energy conservation, new and modern building construction methods have emerged. These methods save time and provide construction control capabilities not offered by traditional methods. One of the most important of these methods is construction using 3D printing technology, which allows for precise control over engineering details to achieve optimal results in all aspects. When applying these technologies, buildings must meet the most important environmental standards, most notably thermal efficiency requirements.

This research conducted a thermal study of six wall models according to the thermal design requirements of Homs city. Five of these models contained cavities of a specific geometric shape with defined dimensions and conditions. The shapes of the studied cavities were triangular, circular, oval, hexagonal, and square. A solid model without cavities was included as a reference model. The study was conducted using numerical modeling on a 1 m² area using the ANSYS computer modeling software. The studied models were designed using SOLIDWORKS software and then exported to the modeling software. After completing the numerical modeling of the studied designs, the modeling yielded the following results: The oval gap wall model achieved energy savings over the other gap models by percentages of 15.54%, 21.36%, 18.28%, and 22.19% for the triangular, circular, hexagonal, and square models, respectively. All gap models (triangular, circular, oval, hexagonal, and square) achieved energy savings over the reference solid model by percentages of 42.97%, 38.75%, 51.83%, 41.06%, and 38.09%, respectively. Thus, the oval gap model was the best among the studied models.

Key Words: 3D wall printing - wall gaps - thermal modeling - energy savings..

1.مقدمة:

شـهد قطاع البناء خلال العقد الأخير تحولاً جذرياً بسـبب ادخال تقنيات الطباعة ثلاثي الأبعاد في مجال التشييد البناء، حيث لم تعد الطباعة مقتصرة على النماذج الأولية والأجزاء الصـناعية الصـغيرة، بل امتد تطبيقها ليشـمل إنشـاء وحدات سـكنية ومبانٍ متكاملة.

ظهرت أولى المحاولات التجريبية للطباعة ثلاثي الأبعاد في البناء في بدايات العقد الأول من القرن الحادي والعشـرين، حين قدم الباحث B. Khoshnevis أفكار أولية لهذه التقنيات، وبذلك يكون هو من وضـع حجر الأسـاس لاسـتخدام الطابعات الضخمة لإنتاج الجدران الخرسانية بصورة آلية ومتواصلة [1]. ومنذ ذلك الوقت تطورت هذه التقنية بشـكل ملحوظ، لكن الانتشـار التجاري الحقيقي بدأ بعد عام 2014 مع قيام شـركات مثل Winsun الصـينية بطباعة منازل باسـتخدام طابعات عملاقة، بالإضـافة للصـين فقد انتشـرت هذه التقنية في هولندا، الإمارات العربية المتحدة والولايات المتحدة الأمريكيـة، لتتحول هـذه الأفكـار من مجرد فكرة بحثيـة إلى أداة عمليـة لإنتـاج منـازل اقتصادية وسريعة التنفيذ.

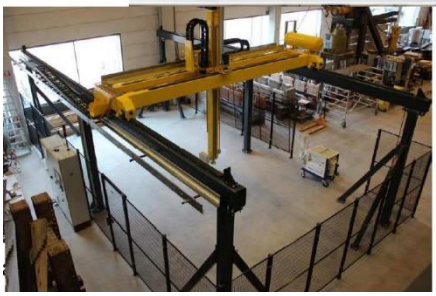
تكمن أهمية الطباعة ثلاثية الأبعاد في البناء في أنها تقدم حلولاً مبتكرة لتقليل الزمن اللازم للبنـاء، وخفض تكـاليف العمـالـة، وتقليل الهـدر في المواد، مع القدرة على تشـكيل تصـاميم معقدة وهياكل غير تقليدية يصـعب تنفيذها بالطرق التقليدية. كما أنها تدعم التوجهات العالمية نحو الاسـتدامة، من خلال تقليل اسـتهلاك الطاقة والمواد، وإمكانية دمج مواد بناء جديدة وصديقة للبيئة ضمن الخلطة المستخدمة.

من الناحية التقنية، تعتمد الطابعات الإنشـائية على مبدأ البثق، حيث يتم دفع مادة البناء (عادة خليط إسـمنتي خاص أو مزيج جصـي –أسـمنتي) عبر فوهة متحركة

تتحكم بها ذراع روبوتية أو رافعة جسرية. يتم صب المادة طبقة فوق طبقة وفق المسار الرقمي المبرمج مسبقاً، مما يشكّل الجدران أو العناصر الإنشائية تدريجياً.

تتكون طابعة الجدران ثلاثي الأبعاد من **عدة أنظمة أهمها:**

النظام الميكانيكي: يتكون من ذراع روبوتية أو جسر متحرك ثلاثي المحاور (X, Y, Z) يحدد مسار الطباعة.



الشكل (1) يبين بعض نماذج طابعات الجدران ثلاثي الأبعاد [1]

رأس الطباعة: توزع مونة البناء بشكل منتظم، مع إمكانية التحكم بسماكة وعرض الطبقة كما هو مبين في الشكل (2).

الشكل (2) يبين رأس الطباعة في طابعة الجدران ثلاثي الأبعاد [1]

وحدة خلط وضخ المواد: تضمن توفير خليط متجانس يتمتع بلزوجة وخواص تصلب مناسبة للطباعة.

نظام التحكم الرقمي: يعتمد على ملفات CAD ويترجمها إلى أوامر حركة دقيقة.

أما خطوات عملية الطباعة فتتضمن:

التصميم الرقمي: يتم إعداد نموذج ثلاثي الأبعاد باستخدام برامج التصميم (CAD).

إعداد المواد: تجهيز خلطة البناء الخاصة (إسمنت + إضافات كيميائية لضبط زمن التصلب والسيولة).

عملية البثق: تقوم الفوهة ببثق المادة على هيئة طبقات متتالية وفق المسار المحدد.

التصلب التدريجي: كل طبقة تكتسب صلابة كافية لتحمل الطبقات التالية. [1]

إحدى الخصائص البارزة للجدران المطبوعة ثلاثياً هي إمكانية التحكم في شكل المقطع العرضي للجدار، بما في ذلك وجود تجاويف داخلية أو أعصاب تقوية، ما يسمح بزيادة الصلابة الميكانيكية وتخفيف الوزن وتحسين العزل الحراري في آن واحد.

من أهم شروط نجاح هذه التقنية هو تطوير "حبر" بناء يتمتع بقابلية مناسبة للضخ وقابلية للبناء الرأسي دون أن ينهار، بالإضافة إلى القوة والمتانة بعد التصلب. كما

أن تصميم النموذج الرقمي أمر بالغ الأهمية، حيث يتيح الحرية في إنشاء أشكال هندسية معقدة غير تقليدية يصـــعب تنفيذها بالطرق التقليدية، بما في ذلك تصـــميم التجاويف الداخلية ونظم العزل المدمجة.

يُعَد انتقال الحرارة عبر الجدران المطبوعة ثلاثياً أحد أهم التحديات التي تؤثر بشـكل مباشـر على الراحة الحرارية داخل المباني وكفاءتها الطاقية. فالجدار ليس مجرد عنصـر إنشـائي فحسـب، بل هو عنصـر فاعل في ضـبط الحمل الحراري على أنظمة التدفئة والتبريد. وتتحكم عدة عوامل في السـلوك الحراري لهذه الجدران، منها سـماكة الطبقات، شكل التجاويف الداخلية، نوع المادة المستخدمة، والتصميم الهندسي للأعصاب الفاصـلة بين الطبقات. وبالتالي، فإن تحسـين أداء الجدران من الناحية الحرارية يعد هدفاً محورياً في البحوث المرتبطة بتطوير تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في البناء.

وعلى الرغم من تزايد الدراسـات التي بحثت في الجوانب الميكانيكية والمتانة الإنشـائية للجدران المطبوعة، فإن الدراسـات التي ركزت على الأداء الحراري ما تزال محدودة نسـبياً. وعليه، تأتي هذه الدراسـة لتسـد فجوة معرفية مهمة، إذ تهدف إلى تحليل تأثير اختلاف تصـميم مقاطع الجدران المطبوعة ثلاثياً على انتقال الحرارة باسـتخدام النمذجة العددية والمحاكاة الحرارية. وتكمن أهمية هذا البحث في أنه يربط بين الجانب الهندسي للشكل الداخلي للجدار وبين الأداء الحراري للمبنى، بما يساهم في وضع أسس تصميمية تحقق توازناً بين العزل الحراري والمتطلبات الإنشائية.

2. أهمية البحث وأهدافه:

تنبع أهمية هذا البحث من خلال التوجه العالمي نحو دمج تقنيات البناء الحديثة مع تطبيق المعايير الهندسـية الفعالة لترشـيد الطاقة، وذلك من خلال دراسـة واختبار

مجموعة من التصـــاميم والنماذج المختلفة لجدران أبنية مطبوعة ثلاثية الأبعاد بهدف تحديد النموذج الأمثل الذي يحقق أعلى كفاءة حرارية وأفضل أداء وظيفي.

يهدف البحث بشكل أساسي إلى:

1- اختيار النموذج الهندســي الأفضــل من الناحية الحرارية لجدران بناء مطبوعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد من بين عدة نماذج يتم دراســتها بالنمذجة الحرارية وفق الشــروط التصميمية لمدينة حمص.

2- تحديد كمية الحرارة المتدفقة من كل نموذج يتم دراســته وتحديد معامل انتقال الحرارة الكلي لكل نموذج.

3- اجراء تقييم لنتائج النمذجة للتصاميم المدروسة وتفسير هذه النتائج.

4- حســاب نســبة الوفر الطاقي الذي يحققه النموذج الأفضــل نســبةً لباقي النماذج ذات الفجوات.

4- حســـاب نســـبة الوفر الطاقي لكل نموذج بالنســـبة لنموذج مرجعي لا يحتوي على فجوات.

3. الدراسات المرجعية:

أُجريت العديد من الدراســات التي تناولت انشــاء الأبنية بتقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد، فمنها من كانت أهداف دراســته تتعلق بالخواص الميكانيكية والانشــائية للجدران المطبوع، ومنهم من اهتم بجوانب أخرى، ونذكر من تلك الدراسات:

قام خوشــنيفيس B. Khoshnevis في عام 2004 بتقديم أول تصــور تقني لطريقة البناء بالطباعة ثلاثية الأبعاد، حيث ركّزت دراســته على إمكانية التنفيذ والتطبيق الصــناعي، دون التطرق بشــكل عميق للجوانب الحرارية. لكن هذه الدراســة كانت بمثابة

الأساس الذي دفع لاحقاً إلى البحث في تحسين مقاطع الجدران بما يتناسب مع متطلبات العزل. [2]

أجرى بينغ اوو ورفاقه P. Wu et al في عام 2016 دراسة مرجعية شاملة، راجع فيها الكثير من الأبحاث والدراسات المتعلقة بتشييد الأبنية بتقية الطباعة ثلاثية الأبعاد، ووجد الباحث أن بناء المنازل بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد هي عملية مجدية من الناحية الاقتصادية لما فيها من ميزات من توفير في مواد البناء والاستغناء عن العمالة البشرية وسهولة وديناميكية في تطبيق تصاميم مختلفة من مقاطع الجدران التي ليس من الممكن تطبيقها بشكل تقليدي، كما شدد الباحث على ضرورة اجراء دراسات لاحقة تعتني بالجانب الحراري وتقليل التدفق الحراري عبر الجدران المطبوعة عبر دراسة الأحبار (مواد البناء) ودراسة التصاميم الهندسية لمقاطع الجدران. [3]

في دراسة أجراها بوسويل ورفاقه R. A. Buswell et al في عام 2018 من جامعة باث (المملكة المتحدة)، تم تقييم الخصائص الحرارية للجدران المنشأة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد من الخرسانة الإسمنتية، حيث أظهرت النتائج أن وجود تجاويف هوائية داخلية يؤدي إلى تقليل قيمة انتقال الحرارة بشكل ملحوظ، ما يشير إلى إمكانية تحسين الأداء الحراري من خلال التحكم في شكل المقطع العرضي للجدار. [4]

قام باول وزملائه Paul S Ch et al في 2018 بدراسة استعراضية، استعرض فيها تقنية طباعة الجدران ثلاثية الأبعاد من عدة جوانب، فعرض بعض النماذج للطابعات الثلاثية، وشرح طرق عملها واليتها وأجزاءها ومراحل الطباعة باستخدامها، من ثم ذكر مزايا العمل بهذه التقنية، وتوصل لنتائج أن استخدام هذه التقنية لها أثر إيجابي على الصعيد البيئي والتقليل من استنزاف مواد البناء وقلة الايدي العاملة، وشدد على ضرورة استكمال الدراسات من النواحي الحرارية والمتانة والميكانيكية وحبر الطباعة (مواد البناء). [1]

في عام 2021 قام سانتوس ورفاقه P. Santos et al بإجراء دراسة عددية لعدة نماذج من الجدران الافتراضية المطبوعة بتقنية الطباعة ثلاثي الأبعاد، وركزت الدراسة على الأداء الطاقي لكل نموذج من النماذج المقترحة. اعتمد الباحثون في الدراسة على برنامج EnergyPlus لإجراء الدراسة الحرارية، ووجد الباحثون أن الجدران المنشأة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد تحقق أداء طاقي جيد وأن هذه التقنية سيكون لها أثر إيجابي على البيئة من خلال الوفر الطاقي، وأوصى الباحثون بدراسة المزيد من النماذج لمقاطع الجدران والمزيد من المواد التي تطبع بها هذه الجدران لتحقيق أفضل أداء طاقي ممكن، وأوصوا باستخدام برامج محاكاة أخرى لإجراء دراسات عددية في هذا المجال.[5]

4. طرائق البحث:

تم في هذا البحث الاعتماد على الطرق العددية لإنجاز هذه الدراسة، فتم استخدام برنامج النمذجة انسيس ANSYS وسيرفراته لنمذجة النماذج المدروسة حرارياً، كما تم الاعتماد على برنامج سوليد وركس SOLID WORKS لتصميم النماذج قبل تصديرها لبرنامج الأنسيس، وتمت الدراسة على عدة مراحل سنتناولها فيما يلي.

1.4. بعض الاعتبارات التي تم أخذت بعين الاعتبار عند النمذجة:

1.1.4. الاعتبارات من حيث الأبعاد والمساحات والحجوم:

1- تمت الدراسة على متر مربع واحد لجميع النماذج. و كانت الأبعاد الخارجية لجميع النماذج المقترحة متساوية، وهي 1X1X0.15 m .

2- نسبة الفراغ الهوائي في جميع النماذج المقترحة متساوية وهي 19.5 % .

3- مساحة سطوح الفجوات المقترحة متساوية.

4- عمق الفجوات في جميع النماذج المقترحة متساوية وهو 1 m .

5- جميع فجوات النماذج المقترحة تقع في نفس المجال وهو الثلث الثاني من سماكة الجدار، أي على بعد 5 cm من كل طرف من أطراف الجدار.

2.1.4. الاعتبارات الحرارية:

1- انتقال الحرارة بين طرفي الجدار مستقر.

2- ثلاثي الأبعاد.

3- انتقال الحرارة من السطح الساخن إلى السطح البارد.

4- انتقال الحرارة في الجزء المصمت هو انتقال حرارة بالتوصيل، وانتقال الحرارة ضمن الفجوات هو انتقال حرارة بالحمل.

5- الشروط الحدية الحرارية وفقاً لشروط مدينة حمص وفقاً لكود العزل الحراري السوري.

6- تم اعتبار درجتي حرارة الجو المحيط الخارجية والداخلية مساويتان لدرجتي حرارة سطحي النماذج الساخن والبارد على الترتيب.

7- تم اهمال انتقال الحرارة بالإشعاع لأن مجال درجات الحرارة الذي نعمل فيه منخفض وبالتالي سيكون تأثير الاشعاع صغير جداً لذلك يتم اهماله (عادةً يتم اهمال تأثير الاشعاع عندما يكون مجال درجات الحرارة المعمول به دون 200 c°)

8- خواص كل من المادة الصلبة والهواء لجميع العينات لها نفس القيمة:

a- معامل التوصيل الحراري والكثافة والسعة الحرارية للمادة الصلبة.

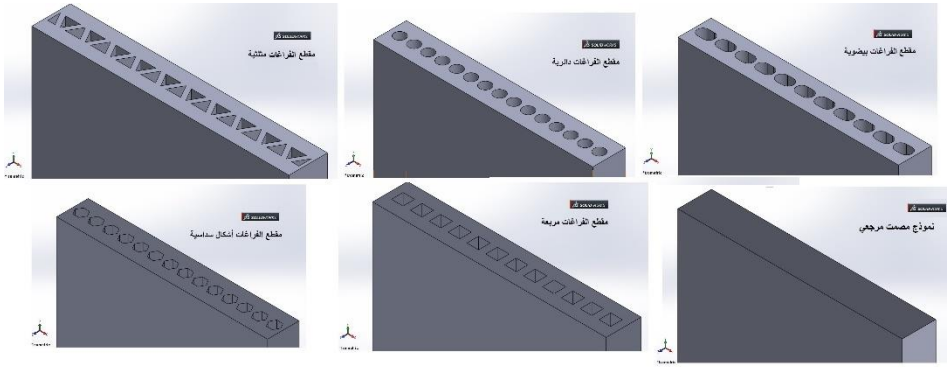
b- كثافة الهواء وتمدده الحجمي.

c- درجتي حرارة سطحي العينة ودرجة الحرارة التشغيلية ودرجة الحرارة الوسطية.

2.4. تصميم النماذج المدروسة:

تم اقتراح ستة نماذج خمسة منها يحتوي على فجوات بأشكال هندسية، والسادس هو نموذج مصمت لا يحتوي على أي فجوة أو فراغ (تم دراسته كنموذج مرجعي)، وتم

تصـميم هذه النماذج بالاعتماد على برنامج سـوليد وركس SOLID WORKS ، ويبين الشكل (3) النماذج المصممة المدروسة.



الشكل (3) يبين النماذج الجدران المدروسة وهي: مثلثية – دائرية – بيضوية – مربعة – سداسية – مصمت

3.4. النمذجة الحرارية:

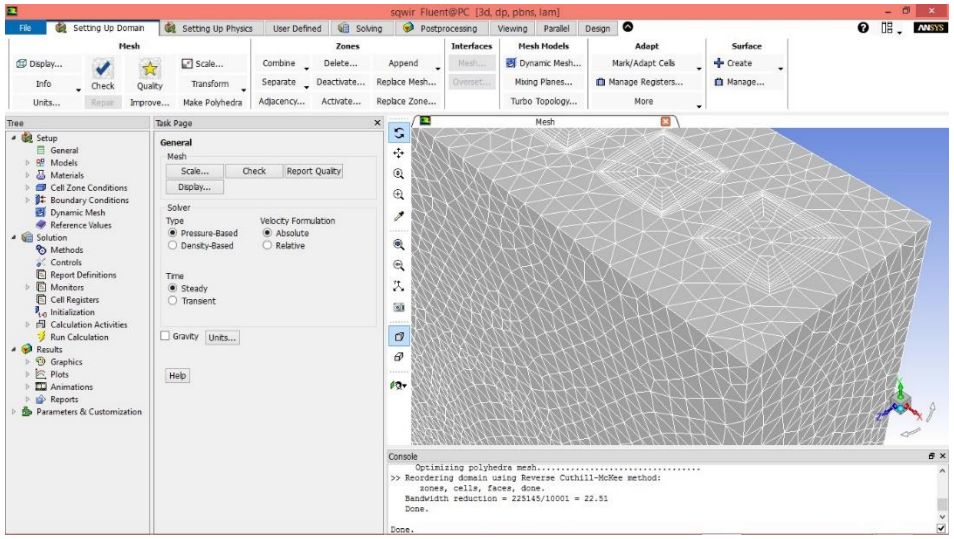
بعد الانتهاء من تصـميم النماذج، تم اجراء عملية تصـدير النماذج من برنامج السـوليد وركس إلى برنامج النمذجة ANSYS، وتم ذلك على عدة مراحل، وبالاسـتعانة بعدة سيرفرات من برنامج الانسيس، لأن عملية النمذجة تمر بمرحلتين رئيسيتين هما:

1- اعداد النموذج. 2- البدء بالحل.

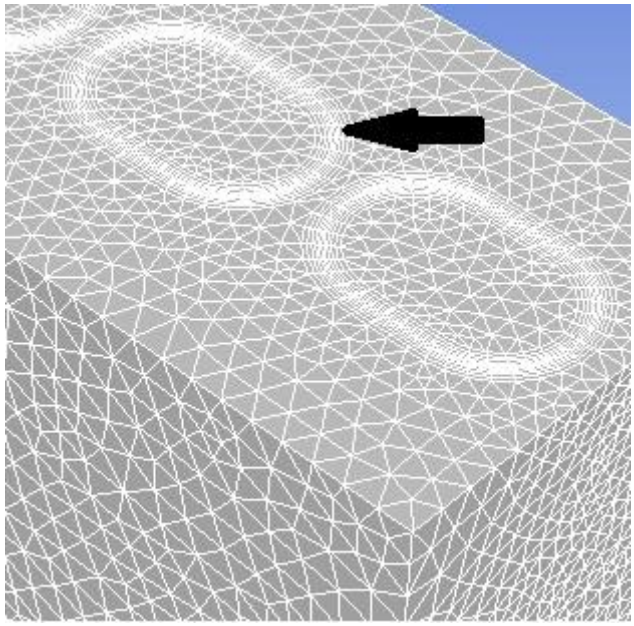
1.3.4. إعداد النموذج والبدء في الحل:

مرحلة إعداد النموذج فيها يتم تجهيز النموذج وتهيئته وتهيئة بيئة البرنامج ليقوم بالنمذجة، وتتضمن إدخال المعطيات اللازمة، كالشروط الحدية وتعريف الأسطح الداخلية والخارجية للنموذج وتحديد معادلات الحل وتحديد طريقة الحل ونموذج الحل بالإضـافة لبعض المعطيات الأخرى المطلوبة في الحل.

تم بدايةً تصـــدير كل نموذج على برنامج ANSYS Workbench فجرى فيه عملية تقطيع النموذج الى خلايا رباعية الوجوه (Tetra hydra) وتســمى هذه العملية بـ (mesh) حيث تم فيها تحديد نوع الخلايا وأحجامها يبين الشـــكل (4) عملية تقســـيم النموذج إلى خلايا رباعية، من ثم تم اجراء تنعيم للخلايا بجوار الجدار الملامس للمائع (inflation) كما هو مبين في الشكل (5)، وتم تعريف جميع الأسطح الخارجية والداخلية والهواء داخل الفجوات في كل نموذج، بالإضـــافة لبعض الإجراءات الخاصـــة في هذا السيرفر.

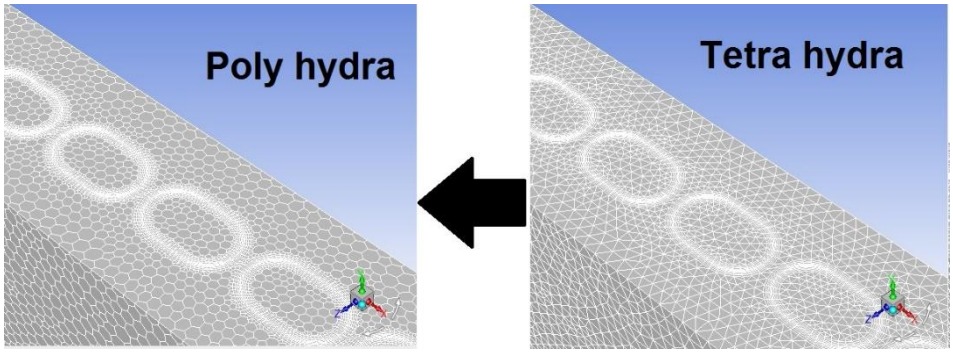


الشكل (4) يبين عملية تقطيع النموذج الى خلايا من نوع (Tetra hydra)



الشكل (5) يبين عملية تنعيم الخلايا بجوار الجدار الملامس للمائع (inflation)

تم بعد ذلك حفظ الملف وتصديره لسيرفر آخر وهو ANSYS Fluent حيث تم فيه تحويل نوع الخلايا من (Tetra hydra) إلى (Poly hydra) كما هو مبين في الشكل (6) وذلك لتحسين نوع الخلايا والحصول على دقة في الحل وتقليل كلفته الحسابية.



الشكل (6) تحويل الخلايا mesh من نوع Tetra hydra الى Poly hydra

تم بعد ذلك تحديد الشـروط الحدية أي درجة حرارة السـطحين السـاخن والبارد، ودرجة الحرارة التشـغيلية، معامل التمدد الحجمي للهواء، كما تم تحديد خصـائص المادة (الاسـمنت) وهي معامل التوصـيل الحراري والسـعة الحرارية والكثافة، من ثم تم تحديد خصـائص الهواء داخل الفجوات كالكثافة والتمدد الحجمي له وبعض الخواص الأخرى اللازمة، تم الاعتماد على تحديد الخواص المتعلقة بالجو بالاعتماد على درجات الحرارة في مدينـة حمص صـيفاً وفقاً لكود العزل الحراري السـوري، وتبع ذلك تحديد بعض الاعدادات الاخرى ليتم بعدها الانتقال على قسـم الحل، فتم تحديد عدد الحلول والضـغط على زر البدء بالحل، ليبدأ بعدها البرنامج بالحل.

الجدول (1) يبين بعض الخصائص الأساسية المستخدمة في الحل،
والمتعلقة بمادة حبر الطباعة (الاسمنت)

العينة	معامل التوصيل الحراري [w/m.K]	السعة الحرارية [J/kg.K]	الكثافة $[kg/m^3]$
جميع النماذج	1.4	900	2200

الجدول (2) يبين الشروط الحدية المستخدمة في الحل وفقاً لدرجات الحرارة في مدينة حمص صيفاً
بالاعتماد على كود العزل الحراري السوري [6]

الفصل	درجة الحرارة الداخلية [c°]	درجة الحرارة الخارجية [c°]	معامل التمدد الحجمي
الصيف	22	38	$3.3X10^{-3}$

تم استخدام المعادلات التالية في النمذجة [7]:

1- مبدأ حفظ الكتلة (معادلة الاستمرار):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla.\left(\rho \vec{V}\right)=0$$

يمثل الحد الأول في المعادلة المعدل الزمني بينما يمثل الحد الثاني المقدار الحملي ويعطى المؤثر ∇ بالعلاقة: $(\frac{\partial}{\partial x}\vec{\imath} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{\jmath} + \frac{\partial}{\partial z}\overrightarrow{k})$ و u و v و w تمثل مركبات السرعة على المحاور x و y و z على الترتيب.

2- مبدأ حفظ كمية الحركة (معادلة كمية الحركة):

على المحور X

$$\boldsymbol{\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right)} = -\boldsymbol{\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)}$$

على المحور Y

$$\boldsymbol{\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right)} = \boldsymbol{\rho . g . \beta . (T - T_\infty) + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)}$$

على المحور Z

$$\boldsymbol{\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)}$$

μ: اللزوجة الحركية m^2/Sec

β**:** عامل التمدد الحجمي $\beta \approx \frac{1}{T_\infty}$

T_∞: درجة الحرارة التشغيلية (المميزة) $T_\infty = \frac{T_H - T_C}{2}$ تقدر بـ K.

P: الضغط Pa.

3- مبدأ حفظ الطاقة (معادلة الطاقة):

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\frac{\lambda}{Cp.\rho}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$$

$\frac{\lambda}{Cp.\rho}$: يمثل هذا الحد الانتشارية الحرارية.

λ: معامل التوصيل الحراري W/m.K

Cp: السعة الحرارية J/kg.K

ρ: الكثافة kg/m^3

2.3.4. اجراء الاختبارات:

تم البدء بالحل العددي وفقاً للمراحل المذكورة سابقاً، حيث استمرت عملية الحل فترة زمنية طويلة حتى تم الوصول إلى قيم التقاربات المطلوبة، وعند الوصول لتلك التقاربات تم حفظ ملف النمذجة وأخذ النتائج المطلوبة منه. ويبين الشكل (7) التقاربات التي تم الوصول إليها في نمذجة أحد النماذج المدروسة.

iter	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	energy	surf-mon-1
7830	5.7248e-12	9.5536e-12	2.5532e-11	1.7248e-11	8.4955e-14	-5.2912e-02
7831	5.6373e-12	9.5442e-12	2.5524e-11	1.6373e-11	8.0042e-14	-5.2912e-02
7832	5.6227e-12	9.5448e-12	2.5519e-11	1.6227e-11	8.7248e-14	-5.2912e-02
7833	5.6179e-12	9.5473e-12	2.5515e-11	1.6179e-11	8.6373e-14	-5.2912e-02
7834	5.6125e-12	9.5327e-12	2.5512e-11	1.6125e-11	8.6227e-14	-5.2912e-02

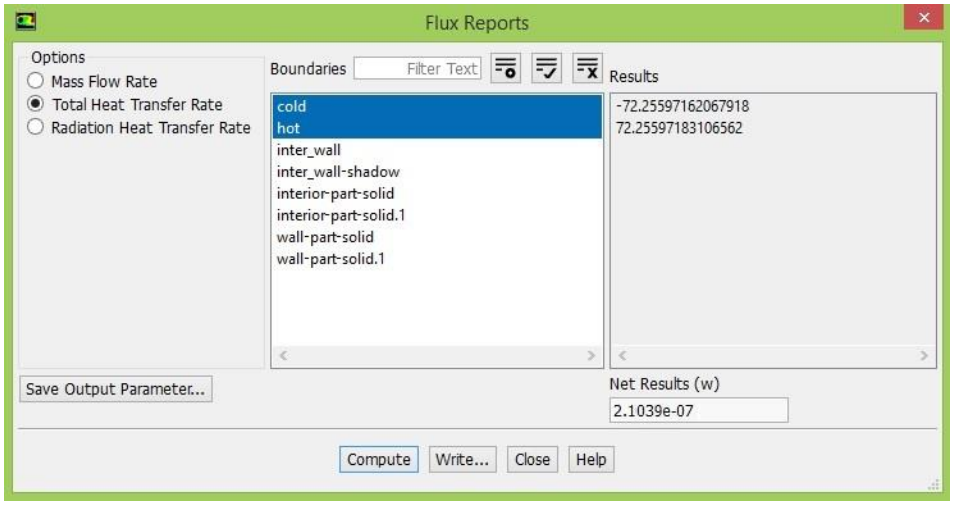
ويبين الشكل (7) التقاربات التي تم الوصول إليها في نمذجة أحد النماذج المدروسة

استمرت عملية الحل العددي للنماذج المقترحة فترة زمنية طويلة حتى الوصول إلى تقاربات جيدة، اختلفت هذه الفترة بين نموذج وآخر، ووصـــلت التقاربات في نهاية الحل إلى قيم مقبولة.

5.النتائج والمناقشة:

بعد الانتهاء من عملية النمذجة وانتهاء البرنامج من الحسابات العددية والوصول إلى تقاربات جيدة، أعطى البرنامج رسالة تشير إلى انتهائه من النمذجة، ليتم الانتقال بعدها إلى مرحلة قراءة النتائج وتقييمها.

تم تقييم النماذج المدروسة على أساس كمية الحرارة المتدفقة عبر كل نموذج، فتم اخذ قراءات لكميات الحرارة المتدفقة لكل نموذج وذلك من الخيارات الخاصة بذلك من خلال البرنامج، حيث يقوم البرنامج بحساب هذه الكمية بالإضافة لإظهار توازن الطاقة في كل نموذج من النماذج المدروسة. ويبين الشكل (8) توازن الطاقة في أحد النماذج المدروسة بعد الانتهاء من الحل.



الشكل (8) 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^{-7} ، وهذا يعطي مؤشر إلى أن عملية النمذجة سليمة، حيث يتم التأكد بالعادة من جودة عملية النمذجة من خلال الفرق في كمية الحرارة بين الطرف الساخن والطرف

البارد، فكلما كان العدد صـــغير كلما كانت النمذجة أكثر صـــحةً. تم أيضـــاً إيجاد كمية الحرارة المتدفقة عبر النموذج المصـمت بشـكل حسـابي بالاعتماد على نفس البارامترات، حيث انتقال الحرارة فيه يحدث بالتوصـيل فقط، فبلغت كمية الحرارة المتدفقة عبره حسـابياً $149.3333\ W/m^2$ ، وبمقارنة القيمة الحسابية مع القيمة التي تم الحصول عليها من البرنامج وهي $150.0166124\ W/m^2$ نجد بأن الفرق صـــغير جداً، وأن نســبة الخطأ هي $0.445\ \%$ وهي نسبة صغيرة، يمكن اعتماد النمذجة بناءً عليها.

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

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

حيث:

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

U: معامل انتقال الحرارة الكلي يقدر بـــ $[W/m^2.K]$

A: مساحة سطح العينة التي تعبر الحرارة بين طرفيها تقدر بـ $[m^2]$

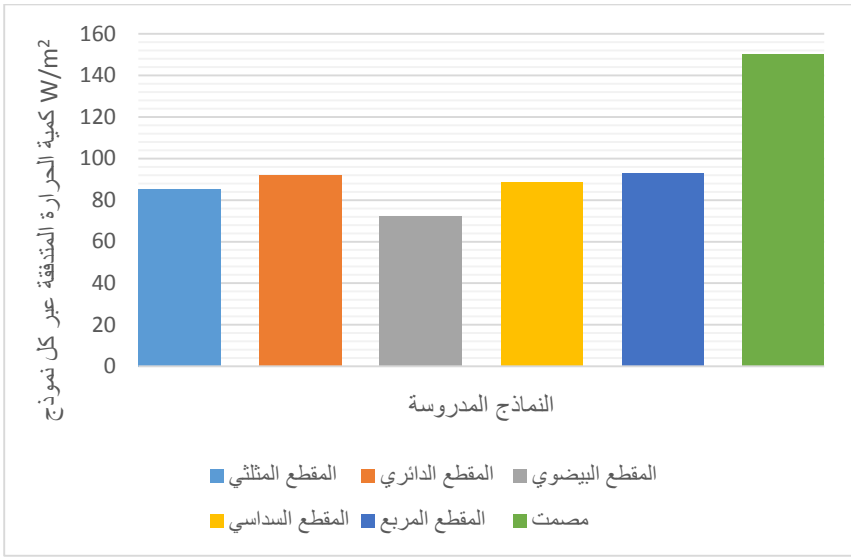
ΔT: فرق درجات الحرارة بين طرفي الجدار (T_h-T_C) يقدر بـ [K]

رتبت نتائج كمية الحرارة المتدفقة عبر كل نموذج المقروءة من البرنامج، ومعامل انتقال الحرارة الكلي الذي تم حسابه في باستخدام المعادلة السابقة لكل نموذج في الجدول (3) وفق الآتي:

الجدول (3) يبين كميات الحرارة المتدفقة عبر النماذج ومعامل انتقال الحرارة الكلي لكل نموذج

الرقم النموذج	النموذج	كمية الحرارة المتدفقة عبر النموذج [W/m^2]	معامل انتقال الحرارة الكلي [$W/m^2.K$]
1	مقطع الفراغات مثلثية	85.55191424	5.347
2	مقطع الفراغات دائرية	91.88510732	5.743
3	مقطع الفراغات بيضوية	72.25597	4.516
4	مقطع الفراغات سداسية	88.42128352	5.526
5	مقطع الفراغات مربعة	92.86441547	5.804
6	مصمت	150.0166124	9.376

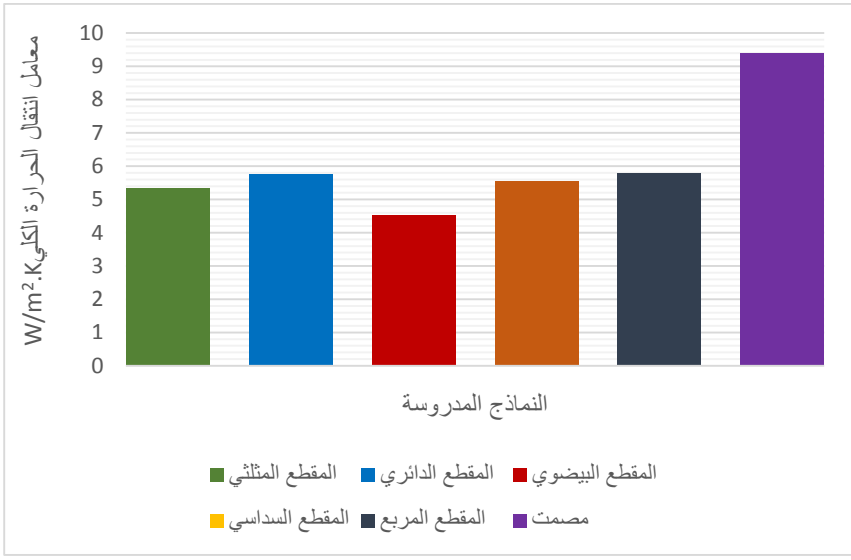
وتم اجراء مقارنة بين النماذج من خلال كمية الحرارة المتدفقة عبر كل نموذج والمبينة في الشكل (9).



الشكل (9) يبين مقارنة بين النماذج المدروسة من خلال كمية الحرارة المتدفقة عبر كل نموذج

تم مناقشـــة المقارنة بين النماذج التي تحتوي على فجوات فقط، فنلاحظ من خلال المقارنة في الشـكل السـابق أن النموذج الذي يحوي فتحات بيضـوية الشـكل هو النموذج الذي يحدث عبره أقل تدفق حراري، أي أنه الأفضل من بين النماذج المدروسة، وقد بلغت كمية الحرارة المتدفقة عبره $72.26\ W/m^2$ ، بينما كان النموذج الأسوأ هو النموذج الذي يحتوي على فراغات مربعة الشـــكل حيث بلغت كمية الحرارة المتدفقة عبره $92.86\ W/m^2$ ، وبالتالي كمية الحرارة المتســـربة عبر الجدران هي الأكبر، وتراوحت كميات الحرارة المتدفقة عبر باقي العينات بين أعلى قيمة وأصغر قيمة اللتان تم ذكرهما.

إن مقارنة نتائج معامل انتقال الحرارة الكلي لكل نموذج يظهر لنا مخططاً شـريطياً مشـابهاً لمخطط مقارنة كميات الحرارة، حيث يبين الشـكل (10) مقارنة بين النماذج من حيث معامل انتقال الحرارة الكلي.



الشكل (10) مقارنة بين النماذج من حيث معامل انتقال الحرارة الكلي.

من أجل إيجاد تفسير لتفوق النموذج ذو الفتحات البيضوية على باقي النماذج حرارياً (الأقل تدفقاً للحرارة عبره) تم اللجوء لتحليل تأثير عامل الشكل الهندسي للفجوات، وذلك لمعرفة أياً من النماذج تنتقل عبره الحرارة بالتوصيل أكثر من الآخر، حيث أن لانتقال الحرارة بالتوصيل الدور الأكبر في تحديد كمية الحرارة الكلية المنتقلة عبر كل نموذج، نظراً لارتفاع عامل التوصيل الحراري للمادة الصلبة مقارنةً مع معامل انتقال الحرارة للهواء الموجود في الفجوات الهوائية، لذلك كان لابد من التركيز على العوامل المؤثرة على انتقال الحرارة بالتوصيل، وبما أن معامل التوصيل الحراري ثابت لجميع العينات وباقي الخواص الفيزيائية (الكثافة والسعة الحرارية) الداخلة في الحساب ثابتة، كما أن سماكة النماذج المدروسة ثابتة وبارامترات الداخلة في الحسابات ثابتة (درجات الحرارة الداخلية والخارجية)، لم يبقى لنا إلا دراسة عامل مساحة السطح الذي تعبر منه الحرارة من الطرف الساخن الى الطرف البارد، حيث تختلف هذه المساحة من نموذج إلى آخر، وذلك وفقاً لمساحة سطح الأعصاب التي تنقل الحرارة وعددها، وإن ما يحدد مساحة

سطح كل عصب هو عرضه وارتفاعه، وعندما نريد معرفة المساحة الكلية نضربها بعدد الأعصاب، ولدراسة ذلك تم أخذ مقاطع افقية ومقاطع رأسية للنماذج في المنطقة التي تكون الأعصاب العرضية فيها أقل سماكةً وهي منطقة خط التناظر الافقي للمسقط الافقي(مستوي القطع A–A)، وتم فيها تحديد عرض الأعصاب وارتفاع الأعصاب وعدد الأعصاب ومساحة مقطع كل عصب ومساحة مقاطع الأعصاب الكلية بالإضافة لنسبة المادة الصلبة منسوبة لمساحة كامل المقطع في هذا المقطع وتم ترتيب هذه القراءات في الجدول (4)، ويبين الشكلين (11) و(12) المسقط الافقي للنماذج والمسقط الرأسي لها مقطوعاً على الترتيب ويظهر فيها الأعصاب ومكان تحديد عرض الأعصاب.

الجدول (4) يبين معلومات الأعصاب للنماذج المدروسة

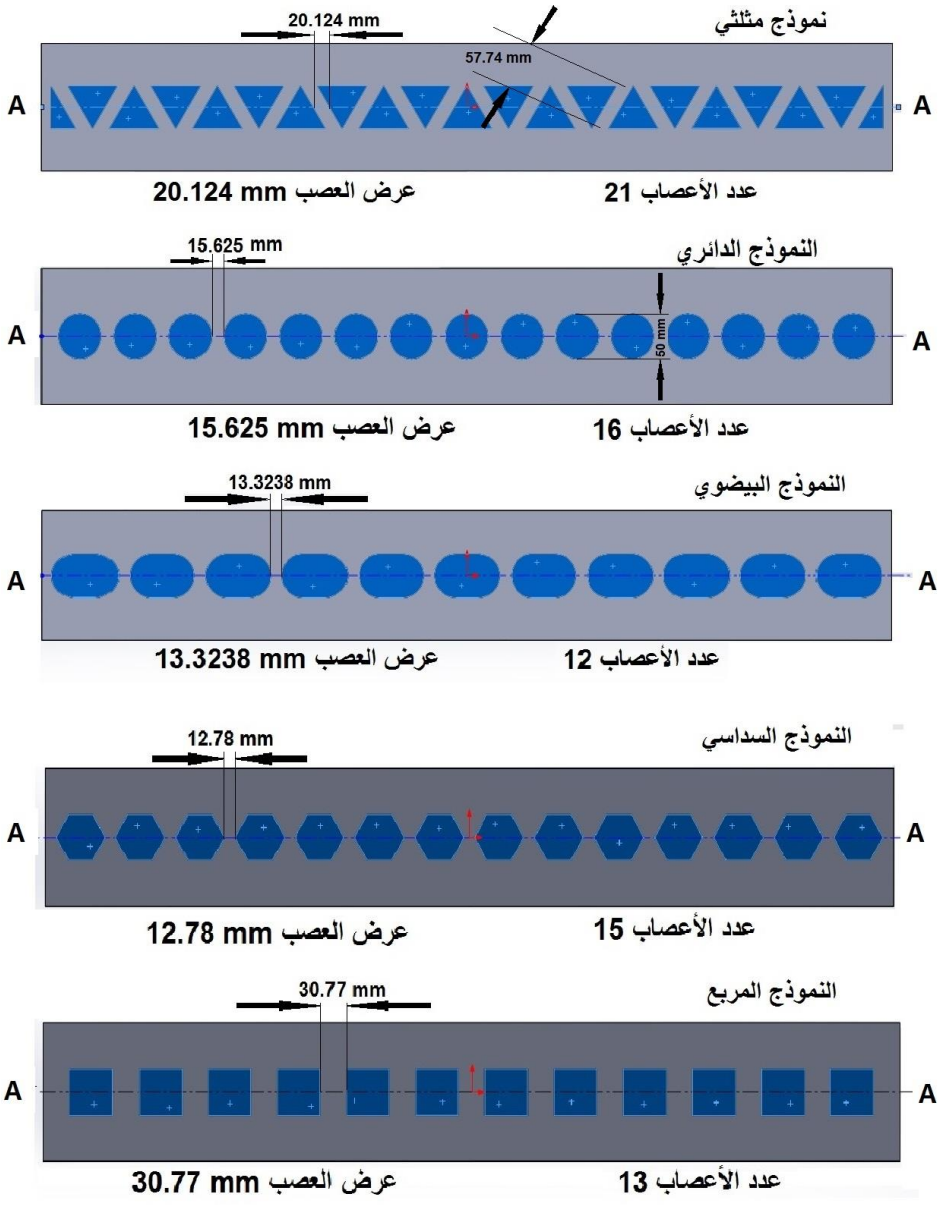
الرقم النموذج	النموذج حسب شكل الفراغ	عرض كل عصب m	ارتفاع الأعصاب m	عدد الأعصاب في النموذج	مساحة مقطع العصب m^2	مساحة مقاطع الأعصاب الكلية m^2	نسبة المادة الصلبة في المقطع %
1	مثلثي	0.020124	1	21	0.020124	0.4226	42.26
2	دائري	0.015625	1	16	0.015625	0.25	25
3	بيضوي	0.0133238	1	12	0.0133238	0.15988	15.988
4	سداسي	0.01278	1	15	0.01278	0.1917	19.17
5	مربع	0.03077	1	13	0.03077	0.4	40
6	مصمت	1	1	1	1	1	100

بمقارنة بيانات الجدول (4) للنماذج المدروسة مع بعضها البعض (النماذج التي تحتوي على فجوات فقط)، وبالنظر للعمود الخاص بعرض الأعصاب نجد بأن النموذج ذو فتحات سداسية الشكل هو الذي يحوي الأعصاب الأقل عرضاً، وبالتالي فإن مساحة مقطع هذا العصب هي الأقل من بين النماذج، يأتي بعده العصب بالنموذج ذو الفتحات البيضوية الذي يزيد عرضه عن السداسي بفارق بسيط، وبالتالي مساحة مقطعة تزيد عن مساحة مقطع البيضوي (الارتفاع موحد)، وبالرغم من ذلك فإن كمية الحرارة المتدفقة عبر النموذج البيضوي هي الأقل، وذلك لأنه يجب الأخذ بعين الاعتبار عدد أعصاب لكل نموذج لكي نعرف مساحة جميع أعصاب النموذج مجتمعة، فنلاحظ من عمود عدد الأعصاب أن النموذج البيضوي يحوي أعصاب أقل من النموذج السداسي، وبحساب مجموع مساحات مقاطع الأعصاب لكل نموذج بنفس الطريقة نجد بأن مساحة مقاطع الأعصاب للنموذج البيضوي الكلية هي الأصغر من بين جميع النماذج المدروسة،

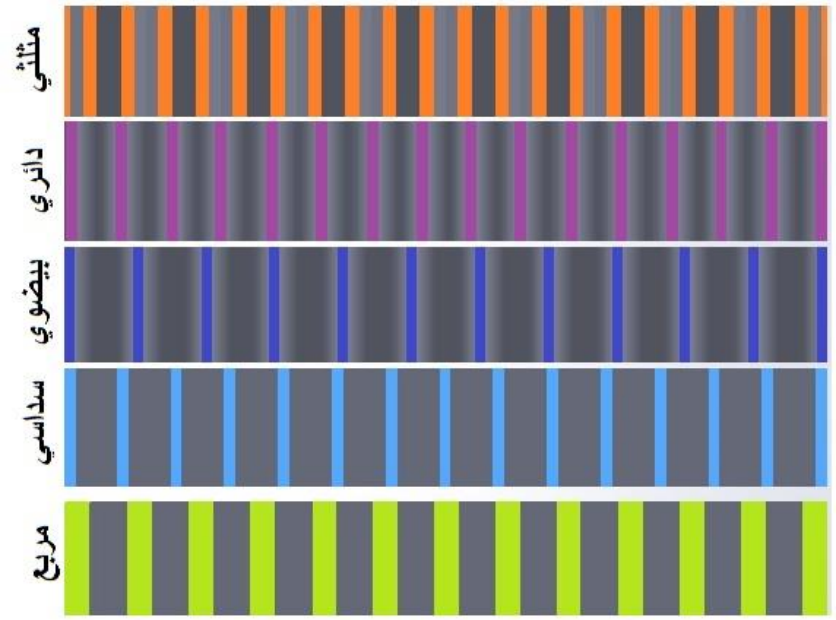
ويعتبر هذا سبب رئيسي في انخفاض تدفق النموذج البيضوي، إلا أن المساحة الكلية التي يعبر منها التيار الحراري لا يمكن اعتبارها دائماً العامل الذي يحدد كمية الحرارة العابرة، لأنه يوجد عوامل هندسية أخرى تلعب دوراً كبيراً في تحديد ذلك، مثل طول العصب الذي يعبر خلاله التيار الحراري، فكلما طال هذا المسار كلما ازدادت صعوبة انتقال التيار الحراري عبره لاسيما في حالة الأعصاب المحاطة فجوات هوائية، حيث تأخذ من الأعصاب قدر لا بأس فيه من الحرارة وتعمل على تشتيتها وتقليل وصولها للطرف الآخر، ونجد هذه الحالة في النموذج ذو الفجوات المثلثية، فبالرغم من أن مساحة مقطع الأعصاب الكلية هي الأكبر بين جميع النماذج المدروسة إلا أن هذا النموذج يأتي بالمرتبة الثانية كأفضل نموذج حراري، كون أن الأعصاب مائلة بزاوية 60° وهذا يعمل على زيادة طول العصب (57.74mm في النموذج المثلي و 50mm في باقي النماذج) وبالتالي زيادة مسار الحرارة العابرة، بالإضافة لذلك زيادة المساحة الجانبية للفجوات التي تلامس العصب، فجميع العوامل المذكورة فيما يخص طول العصب تلعب دوراً هاماً في تحديد كمية الحرارة الكلية العابرة عبر كل نموذج مدروس.

إن ما يحدد انتقال الحرارة هو جميع العوامل المذكورة مجتمعةً، إلا أنه دوماً يطغى عامل على عامل آخر في كل دراسة وفقاً للتصاميم وخصوصية الشكل الهندسي لكل نموذج من الفجوات، لذلك عند الدراسة تتم المفاضلة بين العوامل المدروسة بشكل نسبي ليحدد كل عامل دوره في طريقة وشكل وكمية انتقال الحرارة في كل نموذج.

نجد في حالة النموذج المصمت أن كمية الحرارة العابرة هي كبيرة مقارنةً بجميع النماذج، كونه لا يحتوي على فجوات وأن انتقال الحرارة يتم بالتوصيل بشكل كامل، وقد تم دراسة هذا النموذج لغايتين الأولى لمقارنة نتائجه مع نتائج باقي النماذج والغاية الثانية هي للتأكد من صحة عملية النمذجة وقد تم التأكد من ذلك كما ذكرنا سابقاً.



الشكل (11) يبين المسقط الافقي للنماذج المدروسة مبين عليها بعض عناصر الشكل الهندسي



الشكل (12) يبين جزء من المقطع الرأسي لكل نموذج من النماذج المدروسة

6. الاستنتاجات والتوصيات:

في ضوء نتائج الدراسة الحالية، يمكن استخلاص مجموعة من الاستنتاجات على النحو الآتي:

1. تفوق نموذج الجدار ذو شكل فجوات بيضوي من الناحية الحرارية على جميع النماذج التي تحتوي فجوات بأشكال اخرى، وحقق وفراً طاقياً (وفر حراري) بنسبة % 15.54 و % 21.36 و % 18.28 و % 22.19 على كل من المثلثي والدائري والسداسي والمربع على الترتيب، أي أن النموذج الأفضل حرارياً هو النموذج الذي يحتوي على فجوات بيضوية الشكل.

2. حققت جميع النماذج التي تحتوي على فجوات وهي (المثلثي والدائري والبيضـــوي و السداسـي والمربع) وفراً طاقياً على النموذج المصمت المرجعي بنسبة % 42.97 و % 38.75 و % 51.83 و % 41.06 و 38.09 % على الترتيـب، أي أن للفجوات دور أساسي في تحقيق الوفر وتقليل التدفق الحراري عبر الجدران وفقاً لشكل كل الفجوة.

3. يلعب الشـكل الهندسـي للفجوات ومفردات هذا الشـكل دوراً اسـاسـياً في تحديد الكفاءة الحرارية للجدران المطبوعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد.

4. لا يحدد أحد عناصـــر الشـــكل الهندســـي بمفرده كفاءة انتقال الحرارة عبر أي نموذج مدروس، وان من يقوم بذلك هي العناصـــر مجتمعة، كل عنصـــر بنســـبة معينة تبعاً لخصوصية الشكل الهندسي.

التوصيات:

من خلال ما سبق يمكن أن نوصي بما يلي:

1- اسـتخدام الشـكل البيضـوي لفجوات الجدران عند بناء الجدران بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد لما يتمتع هذا الشكل من خواص تزيد من الكفاءة الحرارية للجدار.

2- ضرورة التأكد من الخواص الميكانيكية للجدران وإجراء دراسات في هذا الخصوص لتحديد مدى متانتها ميكانيكياً.

3- ضرورة اجراء دراسات تهدف لتحسين خواص حبر الطباعة (الاسمنت المستخدم في طباعة الجدران) الحرارية والميكانيكية.

4- دراسة تأثير توضع الفجوات بشكل عرضي في الجدران من الناحية الحرارية ومقارنة نتائجها بنتائج التوضع الشاقولي للفجوات.

7. المراجع

1. Paul S Ch et al. 2018- **A Review of 3D Concrete Printing Systems and Materials Properties: Current Status and Future Research Prospects**. Rapid Prototyping Journal, *(2018) 24 (4):Page 784–798.*
2. Khoshnevis B. 2004- **Predicting Compressive Strength of Recycled Concrete for Construction 3D Printing Based on Statistical Analysis of Various Neural Networks.** *Journal of Building Construction and Planning Research, Automation in Construction, 13, Page 5-19.*
3. Wu P et al. 2016- **A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry**. *Automation in Construction, ScienceDirect, ELSEVIER. Volume 68 ,April 2016 Page 21–31*.
4. Buswell R A et al. 2018 - **3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research**. *Cement and Concrete Research, ScienceDirect, ELSEVIER. Volume 112, October 2018, Pages 37-49.*
5. Santos P et al. 2021- **Energy Performance of 3D-Printed ConcreteWalls: A Numerical Study**. *Buildings 2021,* 11*(10), 432 Pages 22.*
6. **Syrian Arab Code for the design and implementation of installations in reinforced concrete.**
7. **Qarmo** A. **2021- The study of improving thermal performance of bricks manufactured from the recycling of rubble.** *PhD thesis, Pages 147-148.*