تقييم أثر زوايا دوران الفجوات الهوائية في الطوب الاسمنتي المفرغ على أدائه الحراري

د.م. أنس حسن قرمو

الملخص

إن التزايد المضطرد في عدد سكان العالم، رافقه زيادة في الطلب على الطاقة بأنواعها، لاسيما الطاقة الحرارية اللازمة لأغراض التدفئة والتكييف في المباني السكنية، فكان لابد من البحث عن حلول لتقليل من الطاقة المهدورة، يتمثل أحد محاور البحث في تحسين مواصفات جدران المباني السكنية، وأهم مكونات جدران المباني المطلوب تحسينها هو الطوب الاسمنتي المفرغ (البلوك المفرغ) المستخدم في بناء جدران المباني السكنية، وهو محور هذه الدراسة.

تم في هذا البحث دراسة تأثير زاوية دوران الفجوات الهوائية وتوضعها في الطوب الاسمنتي المفرغ على أدائه الحراري، أجريت هذه الدراسة بطريقة النمذجة العددية باستخدام برنامج ANSYS، حيث تمت دراسة ثلاثة نماذج من الطوب الاسمنتي يحتوي كل منها على سبع فجوات هوائية ذات شكل بيضوي، أُعطي كل نموذج زاوية دوران محددة لفجواته بالنسبة لطول الطوبة، حيث كانت زاوية دوران النموذج الأول 0° وللنموذج الثاني 45° وللنموذج الثالث 90°، تم تصميم النماذج باستخدام برنامج WORKS SOLID ومن ثم تصديرها لبرنامج النمذجة ANSYS، تم البدء بالنمذجة الحرارية بأخذ الشروط الحدية الموافقة لأجواء مدينة حمص السورية في فصلي الصيف والشتاء، ودراسة ست حالات نمذجية. بينت نتائج النمذجة بأن النموذج الأول يحقق أفضل أداء حراري في كلا الفصلين، حيث تفوق على النموذجين الثاني والثالث من ناحية التدفق الحراري ومعامل التوصيل الحراري المكافئ والمقاومة الحرارية، فكانت المقاومة الحرارية للنموذج الأول أكبر من مقاومة النموذج الثاني والثالث في فصل الصيف بنسبة 21.72% و 37.36% على التوالي، وفي فصل الشتاء بنسبة 17.049% و 34.19% على التوالي، أي أن النموذج ذي الفجوات بزاوية دوران 0° هو النموذج الأفضل حرارياً.

وبينت نتائج البحث أن انتقال الحرارة بالحمل له أثر هام على انتقال الحرارة الإجمالي في العينات المدروسة. وبالنتيجة كلما زادت زاوية دوران الفجوات الهوائية كلما قلت المقاومة الحرارية للطوب الاسمنتي المفرغ المستخدم في بناء جدران المباني السكنية، وبالتالي زيادة الفقد الحراري.

الكلمات المفتاحية: الطوب الاســـمنتي المفرغ – زاوية دوران الفجوات – النمذجة الحرارية – الفجوات البيضوية.

Evaluating the effect of rotation angles of air voids in hollow cement bricks on their thermal performance

Dr. Anas Qarmo

Abstract

The steady increase in the world's population has been accompanied by a rise in the demand for all types of energy, particularly thermal energy needed for heating and cooling in residential buildings. Therefore, it became necessary to find solutions to reduce wasted energy. One area of research focuses on improving the specifications of residential building walls, and the most important component of these walls requiring improvement is the hollow cement brick (hollow block) used in their construction, which is the focus of this study.

This research studied the effect of the rotation angle and position of air voids in hollow cement bricks on their thermal performance. This study was conducted using numerical modeling with the ANSYS program, where three cement brick models were studied, each containing seven oval-shaped air voids. Each model was given a specific rotation angle for its voids with respect to the length of the brick, where the rotation angle of the first model was 0º, for the second model 45º, and for the third model 90º. The models were designed using the SOLID WORKS program and then exported to the ANSYS modeling program. The thermal modeling was started by taking the limiting conditions corresponding to the atmosphere of the Syrian city of Homs in the summer and winter seasons, and six model cases were studied. The modeling results showed that the first model achieved the best thermal

performance in both seasons, outperforming the second and third models in terms of heat flow, equivalent thermal conductivity, and thermal resistance. The thermal resistance of the first model was 21.72% and 37.36% higher than the second and third models, respectively, in summer, and 17.049% and 34.19% higher in winter. This indicates that the model with 0º rotation angle gaps is the thermally superior model. The research also revealed that convection heat transfer has a significant impact on the overall heat transfer in the studied samples. Consequently, the greater the rotation angle of the air gaps, the lower the thermal resistance of the hollow cement bricks used in residential building walls, thus increasing heat loss.

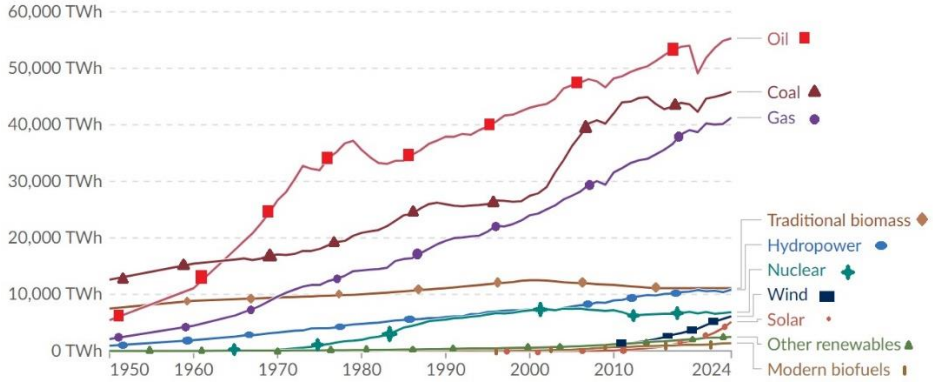
Key Words: Hollow cement bricks - angle of rotation of gaps - thermal modeling - oval gaps.

1.مقدمة:

تُعدّ الطاقة أحد الركائز الأساسية للتنمية في المجتمعات الحديثة، وترتبط ارتباطاً وثيقاً بالتطور الصناعي والتقني الذي يشهده العالم. أدى هذا التطور المتسارع إلى زيادة مطّردة في الطلب على مصادر الطاقة، ما أسهم في ارتفاع تكاليفها بشكل ملحوظ. وفي المقابل بدأت تظهر بوضوح مشكلة تناقص الموارد التقليدية للطاقة، وخاصة المصادر الأحفورية، الأمر الذي دفع الدول إلى تبنّي سياسات واستراتيجيات تهدف إلى ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءتها في مختلف القطاعات.

تُعد مسألة استهلاك الطاقة في المباني من أبرز القضايا التي تواجه دول العالم اليوم، إذ يمثل هذا القطاع النسبة الأكبر من إجمالي استهلاك الطاقة مقارنةً بقطاعات النقل أو الصناعة. ولم تكن الجمهورية العربية السورية بمعزل عن هذه التحديات، حيث يبرز فيها قطاع المباني بوصفه أحد أهم القطاعات التي تتطلب حلولاً فعّالة لتقليل الهدر الطاقي. يوضّح الشكل (1) الزيادة

العالمية في استهلاك الطاقة بأنواعها خلال الفترة الممتدة بين عامي 1950 و 2024 [1]، كما يبين الجدول (1) استهلاك الطاقة على مستوى العالم وبعض القارات وبعض البلدان الكبيرة. [2]



الشكل (1) يظهر الزيادة العالمية في استهلاك الطاقة (المقدرة بالتيرا واط ساعي) بأنواعها خلال الفترة الممتدة بين 1950 و 2024 [1]

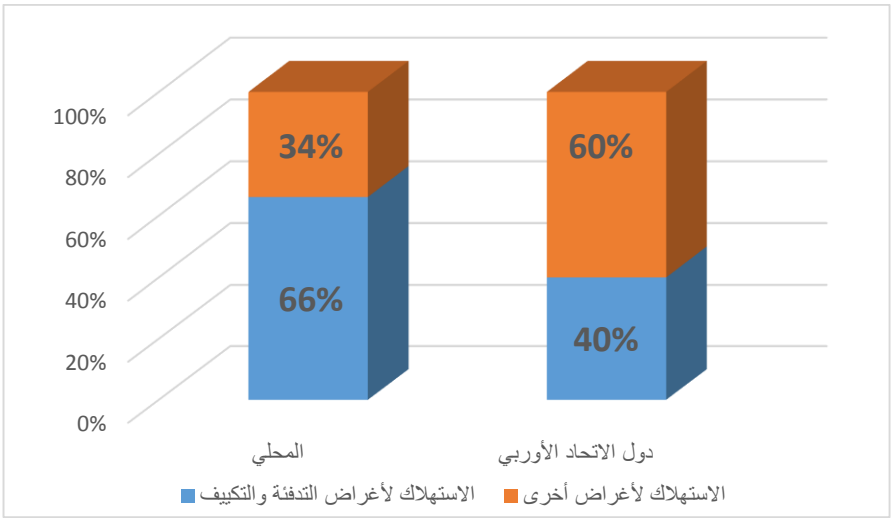
يتسم المناخ في بلدنا بوجود فترتين موسميتين رئيسيتين هما الصيف الحار والشتاء البارد، واللتان يجب دراستهما، في حين فترات الاعتدال المناخي، الربيع والخريف، تكون الشروط المناخية فيها مريحة نسبياً. أن التغيرات المناخية العالمية، ولا سيما ظاهرة الاحتباس الحراري، ساهمت في زيادة حدة الابتعاد عن درجات الحرارة الطبيعية بين الفصول (زيادة درجات الحرارة صيفاً وانخفاضها شتاءً). ونتيجة لذلك، يتم الاعتماد على منظومات التدفئة والتبريد الميكانيكية والكهربائية لضمان راحة المستخدمين وتوفير بيئة داخلية مستقرة في المباني. أن الاعتماد المتزايد على هذه المنظومات، أدى إلى ارتفاع كبير في معدلات استهلاك الطاقة ضمن قطاع الأبنية، وخاصة خلال العقدين الأخيرين. وتشير الدراسات إلى أن النسبة الأكبر من الطاقة المستهلكة في المباني السورية تُستخدم لأغراض التبريد صيفاً والتدفئة شتاءً، وهو ما يرتبط مباشرةً بطبيعة المناخ المحلي وعدم تطبيق تقنيات العزل الحراري في المباني [3].

الجدول (1) استهلاك الطاقة على مستوى العالم وبعض القارات وبعض البلدان الكبيرة المقدرة بالتيرا واط ساعي [2]

المكان	2024	2020	2010	2000

العالم	176,737	157,994	141,602	110,416
الولايات المتحدة الأمريكية	26,529	24,630	25,954	26,546
الصين	48,987	41,494	29,056	11,800
المملكة المتحدة	1937	1,983	2,475	2,664
قارة أوربا	19800	22,086	24,879	24,501
قارة أفريقيا	6140	5,413	4,460	3,197
قارة آسيا	97,910	84,083	64,320	36,891

يوضّـــح الشـــكل (2) توزع اســـتهلاك الطاقة لأغراض التدفئة والتكييف في الجمهورية العربية السورية ودول الاتحاد الأوروبي، مبيناً التفاوت في نسب الاستخدام وفعالية أنظمة العزل الحراري في كل منطقة.



الشكل (2) يبين توزع استهلاك الطاقة لأغراض التدفئة والتكييف محلياً ودول الاتحاد الأوروبي [4],[5]

انطلاقاً من المعطيات السابقة أصبح لزاماً علينا الاهتمام بالمواضيع التي تهدف لترشيد استهلاك الطاقة في المباني، لاسيما الطاقة الحرارية المصروفة لأغراض التدفئة والتكييف، وتبرز

لدينا هنا مفاهيم ترشيد الطاقة من خلال تطبيق تقنيات الجدران الذكية للمباني، من خلال تحسين هذه الجدران سواءً من ناحية مواد الصنع أو من الناحية التصميمية لها.

تم في هذا البحث إجراء دراسة على أحد المكونات المستخدمة في جدران المباني وهو الطوب الاسمنتي المفرغ، ودراسة أحد أهم العوامل التي تلعب دوراً أساسياً في عملية انتقال الحرارة بين طرفي الطوب المفرغ، وهو زاوية دوران الفجوات الهوائية الموجودة في الطوب الاسمنتي المفرغ بالنسبة لطولها، بهدف معرفة سلوك انتقال الحرارة بين طرفي الطوبة في حال تغير زاوية دوران الفجوات.

2. أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث في دراسة سلوك انتقال الحرارة بين طرفي الطوب الاسمنتي المفرغ، وذلك عند زوايا مختلفة لفجواته، حيث سيؤثر اختلاف زوايا ميل الفجوات على انتقال الحرارة بين طرفي الطوبة كماً وكيفاً.

يقدم هذا البحث وصفاً لعملية انتقال الحرارة بين طرفي الطوب الاسمنتي المفرغ، من أجل حالات مختلفة لتوضع وميل زوايا فجوات الطوب في فصلي الصيف والشتاء، بطريقة النمذجة العددية باستخدام برنامج النمذجة الحرارية ANSYS، بهدف تقييم أثر تغيير زوايا ميل الفجوات على الخصائص الحرارية والطاقية.

ويهدف البحث ايضا للإجابة على عدة تساؤلات جوهرية تتعلق بالأداء الحراري للطوب الاسمنتي المفرغ عند تغيير زوايا ميل فجواته، ومنها:

1- تحديد كيف تؤثر زوايا ميل الفجوات على عملية انتقال الحرارة بين طرفي الطوب الاسمنتي المفرغ.

2- تحديد مدى تأثير زوايا ميل الفجوات على زيادة أو نقصان انتقال الحرارة بالحمل داخل الفراغات مقارنةً مع انتقالها بالتوصيل.

3- معرفة تغير قيم التدفق الحراري الكلي بين طرفي الطوبة مع تغير زوايا الفجوات.

4- تحديد الزاوية التي تحقق أكبر مقاومة حرارية، وبالتالي أفضـــل كفاءة طاقية للطوب الاسمنتي المفرغ.

5- تحديد أياً من الفصـــلين الشـــتاء أم الصـــيف يكون لتغيير الزوايا فيه أثراً أكبر في انتقال الحرارة.

3.الدراسات المرجعية:

شهدت الأدبيات العلمية خلال العقدين الماضيين وفرةً من الدراسات والأبحاث التي تناولت تقييم الأداء الحراري لمكونات البناء الأساسية، بهدف فهم سلوكها الحراري، ومن ثم تحديد السبل الكفيلة بتحسين هذا الأداء بما يحقق متطلبات العزل الحراري ويلبي المعايير والمواصفات المعتمدة في هذا المجال. ويُعد الطوب الإسمنتي المفرغ من أبرز هذه المكونات التي حظيت باهتمام الباحثين، نظراً لدوره المحوري في تكوين جدران الأبنية وتأثيره المباشر على الكفاءة الحرارية لها.

ركزت بعض الدراسات على تحسين الأداء الحراري للطوب الإسمنتي من خلال تطوير مواد تصنيعه، وذلك باقتراح خلطات إسمنتية مركبة تتضمن مواد إضافية تسهم في زيادة المقاومة الحرارية. وأولت دراسات أخرى اهتماماً بتحسين الأداء الحراري عبر تعديل عامل الشكل، حيث تناول عدد من الباحثين تصاميم مختلفة للفجوات الهوائية داخل الطوب الإسمنتي، ودراسة السلوك الحراري لكل تصميم لتحديد الشكل الأكثر كفاءة حرارياً. واتجهت دراسات أخرى لتحسين عامل الشكل من خلال تغيير أبعاد الفجوات الهوائية وتحليل تأثير كل حالة على حدة، إضافة إلى دراسة تأثير اتجاه توضع الفراغات الهوائية سواء كانت شاقولية أو أفقية.

ومن أبرز الأبحاث التي تناولت هذا المجال نذكر:

1- أجرى أوربان عام 2011 وذلك في الولايات المتحدة الأمريكية دراسة بحثية تناولت تأثير إضافة مواد عازلة إلى فجوات الطوب الإسمنتي (تم وضعها ضمن الفراغات الهوائية)، حيث اقترح ستة نماذج مختلفة للطوب الإسمنتي وقام بتحليلها باستخدام أسلوب الدراسة العددية. وأظهرت

نتائج الدراسة أن الطوب منخفض الكثافة يُعد أكثر ملاءمة من الطوب عالي الكثافة من حيث إمكانية تحسين أدائه الحراري [6].

2- في عام 2017، أجرى الغامدي والحارثي في جامعة ام القرى في المملكة العربية السعودية دراسة عددية تناولت تحليل ثلاثة نماذج من الطوب المفرغ، اختلفت فيما بينها في هندسة الفجوات الداخلية. وشملت الأشكال المدروسة فجوات سداسية، وأخرى ذات شكل مُعين، إضافة إلى فجوات مستطيلة. وأظهرت نتائج الدراسة أن تغيير شكل الفجوات يؤثر في قيمة الإيصالية الحرارية، إلا أن هذا التأثير كان محدوداً، إذ سُجل انخفاض في الإيصالية الحرارية بنسبة 8% للنموذج ذي الفجوات السداسية، وبنسبة 6% للفجوات ذات الشكل المُعين، بالمقارنة مع الشكل المستطيل. [7].

3- في عام 2017، قام وانغ وزانغ بدراسة تأثير العوامل التصميمية على الأداء الحراري للطوب المفرغ، وذلك في جامعة جيانغسو في الصين، حيث أُجريت الدراسة باستخدام أسلوب التحليل العددي بالاعتماد على برنامج MATLAB. وأظهرت نتائج الدراسة أن المقاومة الحرارية للطوب تتحسن مع زيادة عدد صفوف الفجوات، وكذلك مع تقليل عرض الأعصاب الفاصلة بينها [8].

4- قدم قرمو وزملائه في جامعة حمص في سوريا العام 2021 بحثاً عمل فيه على دراسة تحسين الأداء الحراري لطوب اسمنتي مفرغ مُصنع من إعادة تدوير الأنقاض، حيث قام بتحسين الأداء الحراري للطوب عن طريق اقتراح بعض الخلطات المكونة له واختبار كل خلطة على حدى لتحديد الخلطة الأفضل، عن طريق تحديد معامل التوصيل الحراري لكل خلطة تجريبياً، واستخدم بعض المواد العازلة لتحسين الخواص الحرارية للطوب، من أهمها حبيبات الستيريوبور السائبة وحبيبات البوليسترين. وقام الباحث بتحسين الأداء الحراري للطوب الاسمنتي عن طريق اعتماد اشكال مختلفة لفجوات الطوب، مع المحافظة على أحجام الفجوات الهوائية الموجودة فيه، واقتراح ستة أشكال لمقاطع الفجوات وهي: الدائرية، البيضوية، المستطيلة، المربعة، السداسية والمثلثية، كما عمل الباحث على دراسة عامل آخر هو ترتيب الفجوات، فتم دراسة نوعين من الترتيب هما

الترتيب المتوازي والترتيب الشطرنجي، حيث تم دراسة كل شكل من أشكال الفجوات المقترحة بترتيبين مختلفين، وبالتالي تم دراسة اثنا عشر نموذجاً، ستاً منها ذات ترتيب متوازي والستة الباقية ذات ترتيب شطرنجي. اعتمدت دراسة تحسين عامل الشكل على النمذجة العددية، حيث تم ادخال البيانات للبرنامج التي تم الحصول عليها بشكل تجريبي من خلال مرحلة الدراسة المتعلقة بتحسين الخلطة، فتم ادخال أفضل نتيجة تجريبية.

بينت نتائج الدراسة أن النموذج الأفضل هو النموذج ذو الفجوات البيضوية وترتيب شطرنجي، حيث حقق وفراً طاقياً نسبته 62.79% شتاءً و 63.09% صيفاً بالمقارنة مع العينات المتوافرة في السوق المحلية. [9].

4. طرائق البحث:

تم الاعتماد في هذا البحث على الطرق العددية (النمذجة العددية)، باستخدام برنامج نمذجة ومحاكاة معتمد عالمياً من معظم الشركات والمؤسسات البحثية، وهو برنامج انسيس ANSYS بالإضافة لسيرفراته، وذلك لإجراء نمذجة حرارية للتصاميم المدروسة، ومن أجل تصميم النماذج هندسياً فقد تم الاعتماد على برنامج سوليد وركس SOLID WORKS لهذا الغرض.

1.4.افتراضات الحل

تم في البداية افتراض بعض الشـــروط، واخذها بعين الاعتبار من أجل صـــحة اجراء النمذجة والبدء بالحل، وهي:

افتراضات تصميمية:

تم تصميم النماذج بالاعتماد على الفرضيات التالية:

1- شكل مقطع الفجوات هو بيضوي.

2-الأبعاد الخارجية لجميع العينات متساوية، وهي مشابهة لأبعاد الطوب المنتشرة في الأسواق المحلية، وهي (40X20X15 cm).

3- نسبة الفراغات الهوائية تساوي % 34 من مجمل حجم النموذج في جميع العينات.

4- عدد الفجوات الهوائية في جميع النماذج متساوي وهو 7 فجوات.

5- مساحة سطح مقاطع كل فجوة $31.5\ cm^2$ وحجمها $582.85\ cm^3$ متساوي في جميع النماذج.

افتراضات حرارية:

تم وضع بعض الافتراضات التي تتعلق بالأمور الحرارية وهي:

1- تم اجراء هذه الدراسة بالاعتماد على الشروط الحرارية التصميمية لمدينة حمص.

2- شكل انتقال الحرارة في النماذج هو بالتوصيل في الجزء المصمت، وبالحمل الحر ضمن الفجوات الهوائية.

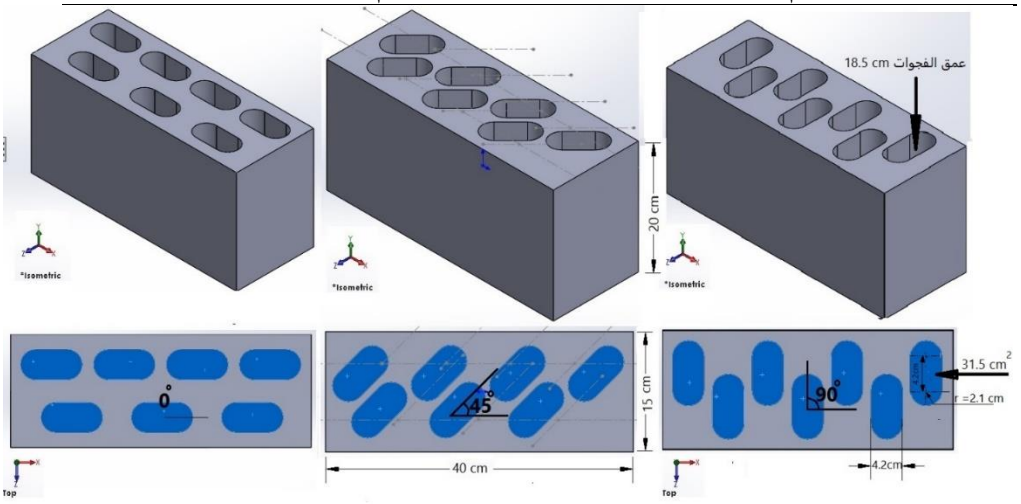
3- انتقال الحرارة يتم من الطرف ذو درجة الحرارة الأعلى إلى الطرف ذو دجة الحرارة الأدنى.

4- حالة انتقال الحرارة مستقرة.

2.4. مراحل العمل

1- اقتراح وتصميم النماذج:

تم تجهيز ستة نماذج هندسية (ثلاث عينات مكررة) وذلك بالاعتماد على برنامج سوليد وركس SOLID WORKS ، والنماذج المقترحة كانت على شكل طوب اسمنتي مفرغ، الفراغات كانت على شكل فجوات ذات مقطع بيضوي، كل نموذج كان يحتوي على سبعة فجوات، تشترك جميع النماذج في نفس مساحة المقطع ونفس الحجم، أما الأبعاد الخارجية للنماذج المقترحة فكانت 40X20X15 cm وهي ذات الأبعاد المعتمدة في معظم معامل تصنيع وإنتاج الطوب الاسمنتي، وكان الاختلاف بين النماذج هو زاوية دوران الفجوات الهوائية بالنسبة لطول الطوبة، حيث تم تصميم نموذجان لكل زاوية دوان، وكانت على النحو الآتي: نموذجان بزاوية دوران 0° ونموذجان بزاوية 45° والنموذجان الأخيران بزاوية 90° ، ويبين الشكل (3) النماذج المقترحة في الدراسة.



الشكل (3) يبين نماذج الطوب المقترحة التي تم تصميمها باستخدام برنامج SOLID WORKS

2- تصدير النماذج لبرنامج ANSYS

بعد الانتهاء من تصـــميم النماذج باســـتخدام برنامج SOLID WORKS ، يتم حفظ الملفات وتحضـيرها للمرحلة الثانية وهي تصـديرها لبرنامج النمذجة والمحاكاة، حيث تم حفظ كل ملف بصيغتين، الصيغة الأولى هي صيغة الحفظ التقليدية للبرنامج وهي (SLDPRT)، والثانية هي الصـيغة التي يمكن من خلالها تصـدير الملف لبرنامج النمذجة بسـهولة وهي (X_T)، حيث تم حفظ الملفات في مكان مخصـــص، ثم تم فتح أحد ســـيرفرات برنامج النمذجة ANSYS Workbench وتم اجراء اسـتيراد الملف المطلوب (Import)، وبذلك تم اسـتيراد الملف وتعريفه ببيئة العمل الجديدة، وهي بيئة عمل برنامج النمذجة المستخدم.

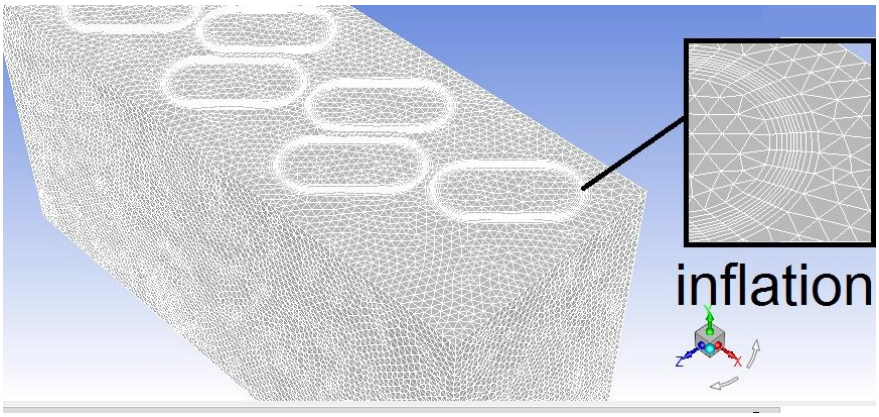
3- تقطيع النموذج باســـتخدام أداة التقطيع الشـــبكي (mesh) الخاصـــة ANSYS Workbench

تم تطبيق عملية التقطيع الشبكي للنماذج المدروسة باستخدام أداة التقطيع الشبكي (mesh) الخاصة بـ ANSYS Workbench. في هذه العملية تم تقطيع النموذج إلى خلايا

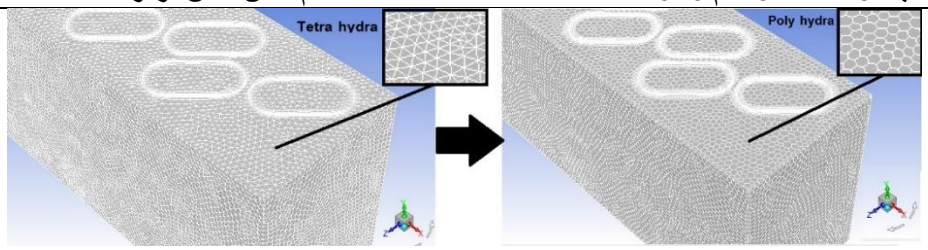
رباعية الوجوه من نوع (Tetra hydra)، ومن أجل تعزيز دقة الحسابات تم تطبيق تقنية التنعيم (inflation) على الطبقات القريبة من الجدار الملامس للمائع، وهو ما يساعد في تحسين دقة محاكاة التدرجات الحرارية وسرعات الجريان قرب السطح، وبالتالي تحسين موثوقية نتائج المحاكاة للمجالات الديناميكية الحرارية.

بعد إتمام عملية التقطيع الشبكي الأولية، تم تحويل خلايا (Tetra hydra) إلى خلايا (poly hydra) وذلك في عملية لاحقة باستخدام برنامج ANSYS Fluent. ويهدف هذا التحويل إلى تحسين جودة التقطيع الشبكي من خلال تقليل عدد الخلايا اللازمة لتغطية المجال المدروس مع الحفاظ على دقة النتائج. بالإضافة إلى ذلك، يوفر هذا النوع من الخلايا (poly hydra) استقراراً أكبر وأداءً محسناً في العمليات الحسابية مقارنة بالخلايا التقليدية ذات الأوجه الرباعية (Tetra hydra)، مما يؤدي إلى تقليل الوقت اللازم لإتمام الحسابات وتحسين الكفاءة العددية.

يوضح الشكل (4) عملية تقطيع أحد النماذج المدروسة بالإضافة لعملية التنعيم التي جرت بالقرب من الجدار الملامس للمائع، كما يوضح الشكل (5) عملية تحويل الخلايا من نوع (Tetra hydra) إلى (poly hydra).



الشكل (4) عملية تقطيع أحد النماذج المدروسة بالإضافة للتنعيم بالقرب من الجدار الملامس للمائع



الشكل (5) عملية تحويل الخلايا من نوع (Tetra hydra) إلى (poly hydra)

4- تحديد طريقة الحل:

من أجل تحديد طريقة الحل يجب معرفة طريقة انتقال الحرارة عبر النماذج المدروسة، حيث تم اعتبار أن انتقال الحرارة في الجزء الصلب يحصل بالتوصيل الحراري، أم في الفجوات الهوائية فيتم انتقال الحرارة بالحمل الحر.

تم اعتماد المعادلات الرياضية المستخدمة في جميع برامج النمذجة العددية، حيث يعتمد برنامج النمذجة عليها بشكل أساسي لإيجاد الحلول وهي [9]:

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

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

على المحور Y

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

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

على المحور Z

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

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 m^2/s .

λ: معامل التوصيل الحراري W/m.K

Cp: السعة الحرارية J/kg.K

ρ: الكثافة kg/m^3

تم دراسة الحمل الحر ضمن الفجوات الهوائية بالاعتماد على معادلة كمية الحركة على المحور Y والمذكور سابقاً وهي:

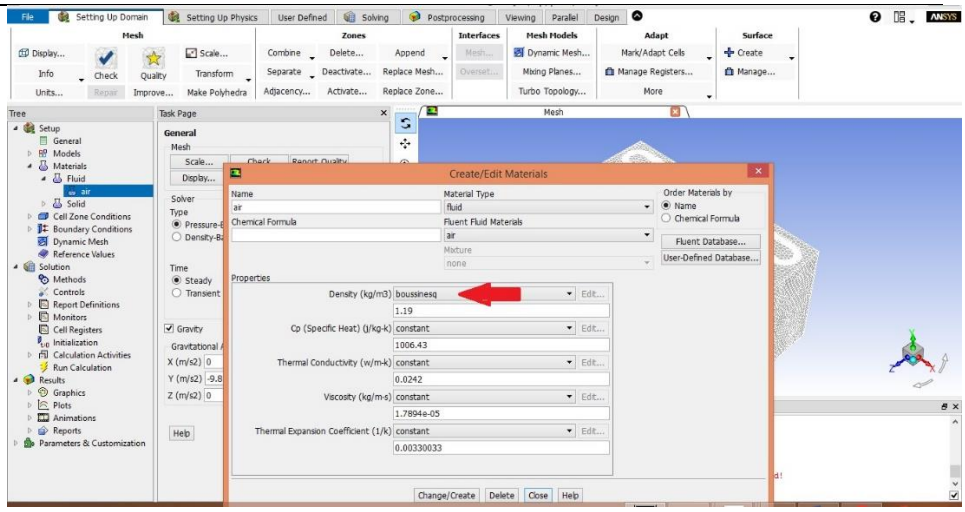
على المحور Y

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

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

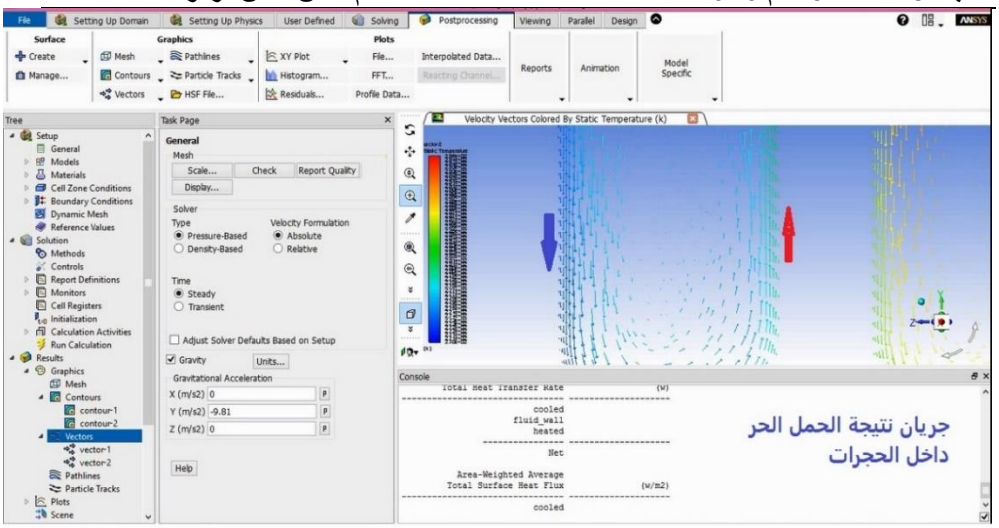
إن الحد الأيمن من المعادلة هو المسؤول عن الحل بالحمل الحر، وهو ضمن نموذج حل يدعى boussinesq يعتمده برنامج الأنسيس لحلول الحمل الحر، لأن الحمل الحر ناتج عن وجود فرق في الكثافات ووجود قوى الطفو الناتجة عن وجود فرق في الكثافات، وإن نموذج boussinesq يربط تغيرات الكثافة مع تغيرات درجة الحرارة على المحور الموجودة عليه الجاذبية g وهو المحور Y ، أما المحاور التي ليس لها علاقة بالجاذبية لا تدخل بالموضوع، لأن حركة الهواء بالحمل الحر الناتجة عن فرق الكثافات وتكون ضمن الحجرة الهوائية وفق المحور Y وتلعب الجاذبية دوراً ضمن هذا المحور.

ويبين الشكل (6) خيار النموذج boussinesq حيث يكون هذا النموذج موجود بشكل افتراضي ما لم يتم تبديل طريقة الحل واستخدام نموذج حل آخر (في حال وجود احمال قسرية على سبيل المثال).



الشكل (6) يبين ضبط خيار نموذج الحل boussinesq

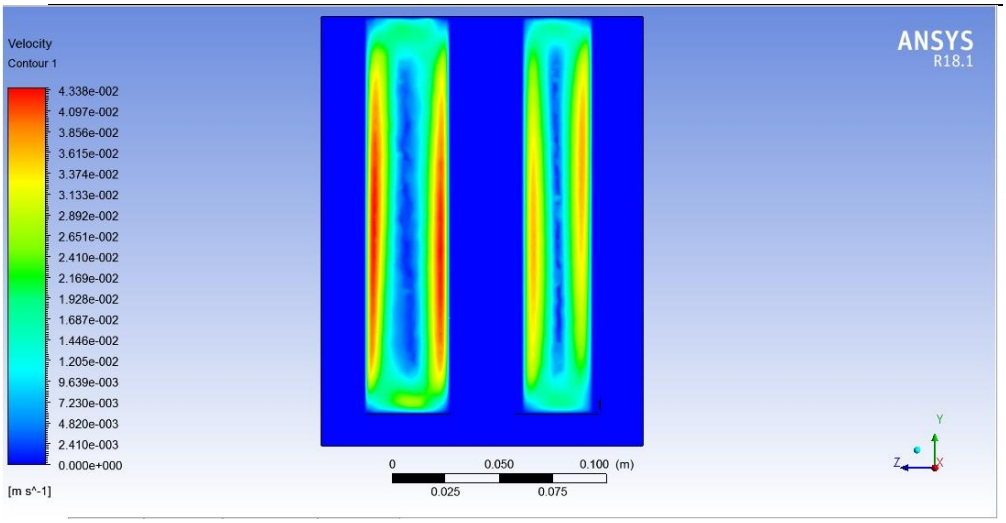
يحدث جريان للهواء داخل الفجوات الهوائية ضـمن الطوب، ويكون الجريان نتيجة فرق كثافات الهواء الناتج عن فرق درجات الحرارة في الهواء ضـمن الفجوات، فيتحرك الهواء السـاخن باتجاه الأعلى وفي ذات الوقت يتحرك الهواء البارد باتجاه بالأسـفل (في الجهة المقابلة ضـمن الفجوة) وبذلك يتشكل لدينا تيارات هوائية ناتجة عن حركة الهواء بالحمل الحر، ويبين الشكل (7) تيارات الحمل الحر، وتدل ألوان الأسهم على درجة حرارة التيار الهوائي ضمن الفجوات.



الشكل (7) يبين حركة الهواء داخل الفجوات نتيجة تيارات الحمل الحر

نلاحظ من الشكل أن الأسهم ذات درجات الحرارة الأعلى تتجه نحو الأعلى، والأسهم الأبرد تتجه نحو الأسفل، مشكلةً بذلك تياراً هوائياً ضمن الفجوة ناتج عن حركة الهواء بالحمل الحر.

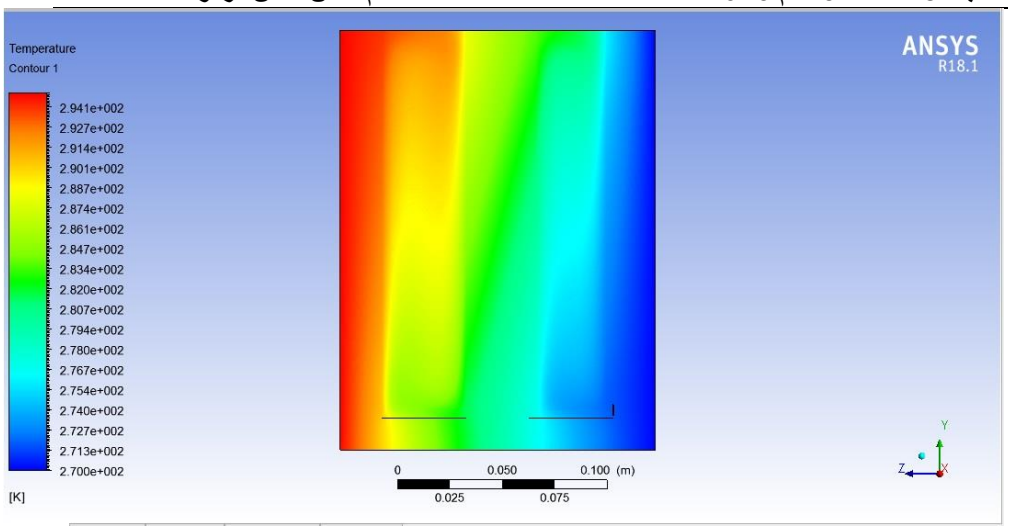
كما يبين الشكل (8) مخطط سرعة جريان الهواء ضمن مقطع الطوب الذي يحتوي على فجوات زاوية دورانها 0° والمدروسة في شروط فصل الشتاء، حيث تدل الألوان على سرعة جريان الهواء ضمن الفجوات.



الشكل (8) يبين مخطط سرعة جريان الهواء في مقطع طوب زاوية دوران فجواته 0° والمدروسة في شروط فصل الشتاء

نلاحظ من الشكل أن سرعة حركة الهواء داخل الفجوات تزداد كلما ابتعدت من المركز، وتتناقص السرعة كلما اقتربت منه حتى تصبح شبه معدومة في منتصف الفجوة، هذا يعني أن شكل الجريان هو محيطي بالقرب من جدران الفجوات الهوائية.

يبين لنا الشكل (9) التدرج الحراري ضمن مقطع الطوب الذي يحتوي على فجوات زاوية دورانها 0° والمدروسة في شروط فصل الشتاء، حيث يدل التدرج اللوني على تغيير درجة الحرارة.



الشكل (9) يبين التدرج الحراري ضمن مقطع الطوب الذي يحتوي على فجوات زاوية دورانها 0° والمدروسة في شروط فصل الشتاء

نلاحظ من الشكل (9) أن درجات الحرارة ضمن الجزء العلوي من الفجوات أعلى منها في الجزء السفلي، وهذا نتيجة تيارات الحمل الحر التي تعمل على رفع الهواء الساخن إلى الأعلى نتيجة فرق الكثافة.

5- تحديد خصائص المواد

بعد الانتهاء من عملية تقطيع النموذج تم حفظ النموذج بصيغتين الأولى صيغة (mesh) والثانية صيغة Fluent تمهيداً لتصديره إلى سيرفر آخر من سيرفرات برنامج ANSYS، حيث تم تصدير النموذج إلى برنامج ANSYS Fluent من ثم تحويل خلاياه إلى poly hydra كما ذكرنا في الخطوة السابقة، تم بعد ذلك ضبط خصائص المواد المكونة للطوب، والمواد هي الجزء الصلب من الطوب (خلطة الطوب الاسمنتية)، والهواء الموجود داخل الفجوات.

تم الاعتماد في تحديد خواص الجزء الصلب على نتائج دراسة تجريبية سابقة تم فيها تحديد الخواص بشكل تجريبي بالاعتماد على خلطات الطوب الخاصة بالسوق المحلية [9]، فتم وضع

قيمة لمعامل التوصيل الحراري بلغت 0.5101 W/m.K وقيمة الكثافة بلغت 1667.58 kg/m^3 وبلغت السعة الحرارية التي تم اعتمادها 1022 J/kg.K، أما خصائص الهواء فقد تم وضع قيم خاصة بفصل الصيف وأخرى خاصة بفصل الشتاء بما يتوافق مع أجواء مدينة حمص السورية (وفقاً لكود العزل الحراري السوري) وفيه درجة الحرارة التصميمية في فصل الصيف 38°C وفي فصل الشتاء 3°C− أما درجات حرارة الارتياح الحراري فهي 24−25°C صيفاً 22°C ، فتم وضع معامل تمدد حجمي بلغ $3.3X10^{-3}$ صيفاً و $3.54X10^{-3}$ شتاءً، وكثافة ثابتة بلغت 1.19 kg/m^3 ، أما باقي الخصائص فيقوم البرنامج باختيارها بشكل تلقائي وفقاً لعملية النمذجة الحاصلة.

6- تحديد الشروط الحدية

تم تحديد الشروط الحدية في عملية النمذجة الحالية، وهي درجات الحرارة التشغيلية في الصيف والشتاء، حيث كانت درجة الحرارة التشغيلية في فصل الصيف 304 K وفي فصل الشتاء282.5 K ، وتم أيضاً تحديد درجات الحرارة المعتمدة بين طرفي الطوب المدروس في فصلي الشتاء والصيف، ففي فصل الشتاء، الشروط الحدية هي درجة حرارة الارتياح الحراري داخل المبنى وهي 22 ° C ، ودرجة الحرارة التصميمية في فصل الشتاء في مدينة حمص وهي 3 ° C- ، أما في فصل الصيف فدرجة حرارة الارتياح الحراري داخل المبنى 24 ° C ، ودرجة الحرارة التصميمية هي 38 ° C .

الجدول (2) يبين الشروط الحدية المستخدمة في النمذجة

الموافقة لظروف مدينة حمص وفقاً لكود العزل الحراري السوري [10]

الفصل	درجة الحرارة الداخلية [°C]	درجة الحرارة الخارجية [°C]
الصيف	24	38
الشتاء	22	−3

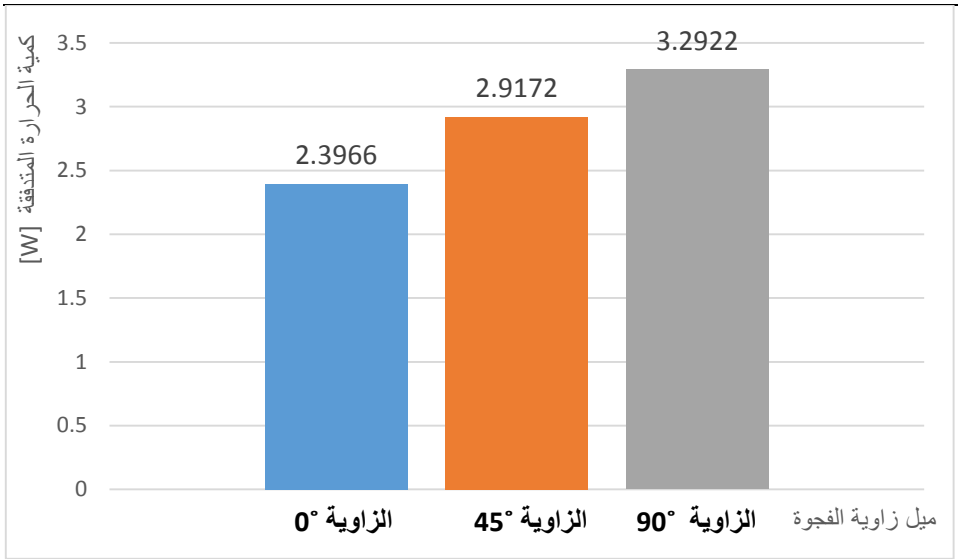
7- البدء بإجراء الحل والانتظار حتى الوصول إلى تقارب مناسب

بعد استكمال كامل اعدادات البرنامج وتحديد طريقة الحل وخصائص المواد والشروط الحدية، تم الانتقال إلى تبويب الحل والضغط على الزر الخاص بالبدء بالحل وذلك بعد تحديد

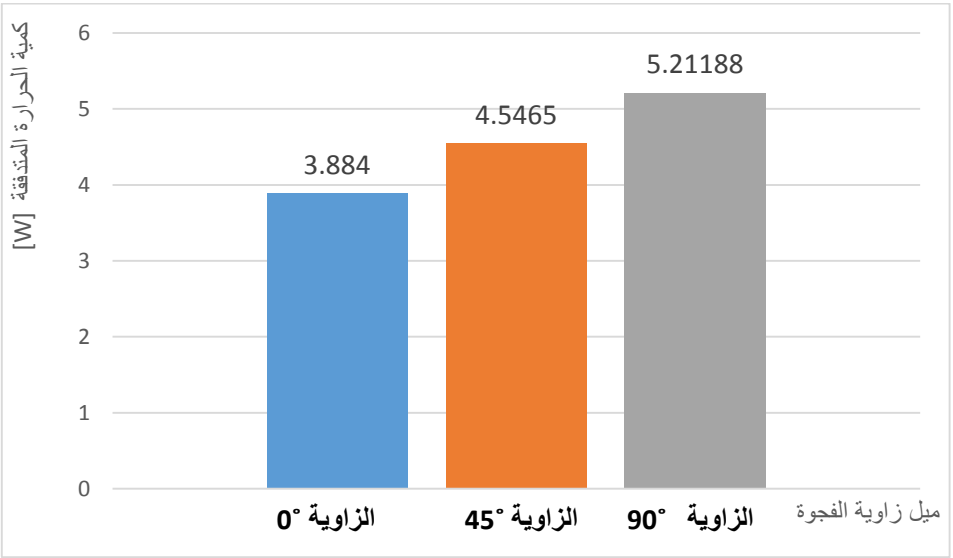
عدد الحلول، حيث استمرت عملية النمذجة فترة زمنية طويلة لكل نموذج مدروس حتى الوصول إلى تقارب مقبول، وتم الوصـــول إلى التقارب المطلوب وهو من مرتبة 10^{-14} في معادلة الطاقة والوصول لمرتبة 10^{-12} في معادلة الاستمرار ولمرتبة 10^{-12} في معادلات كمية الحركة، ويعتبر هذا التقارب جيد ومقبول في حلول النمذجة الحرارية. كُررت هذه العملية على كل نموذج من النماذج المدروسة في فصلي الصيف والشتاء، أي تمت هذه الإجراءات ستة مرات.

5. النتائج والمناقشة:

بعد الانتهاء من عملية النمذجة لجميع النماذج المدروســة، تم التأكد من صــحة الحل من خلال قيم التقاربات وقيمة توازن الطاقة، من ثم تم النظر إلى التدفقات الحرارية لجميع النماذج المدروسة في فصلي الصيف والشتاء، والتي تم الاعتماد عليها في تقييم كل نموذج، فتم تحديد كمية الحرارة العابرة لكل نموذج بشــكل مطلق، وتم تحديدها بالنســبة لواحدة المتر المربع، وذلك في فصلي الصيف والشتاء، حيث يعرض الشكلين (10) و (11) التدفق الحراري عبر كل نموذج في فصلي الصيف والشتاء على التوالي.

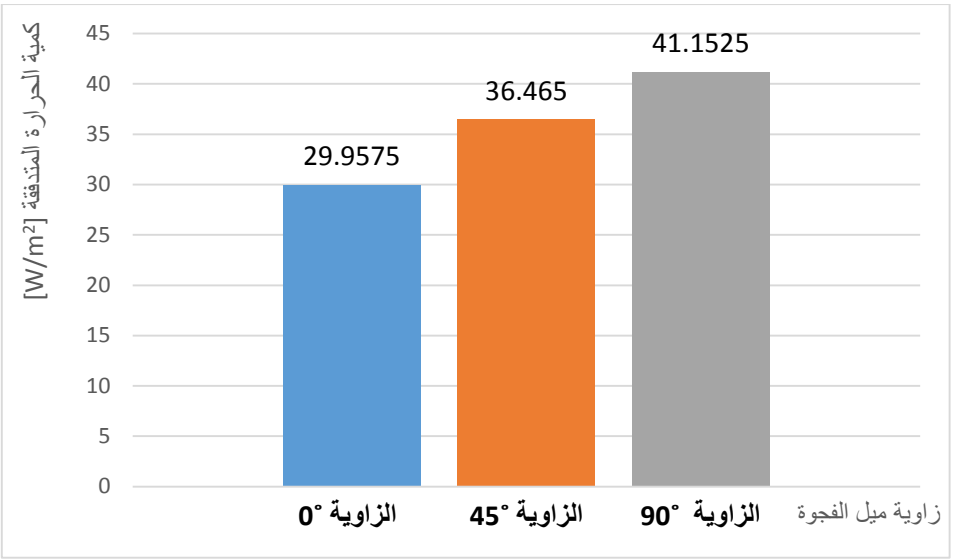


الشكل (10) يبين التدفق الحراري الحاصل عبر كل نموذج في فصل الصيف

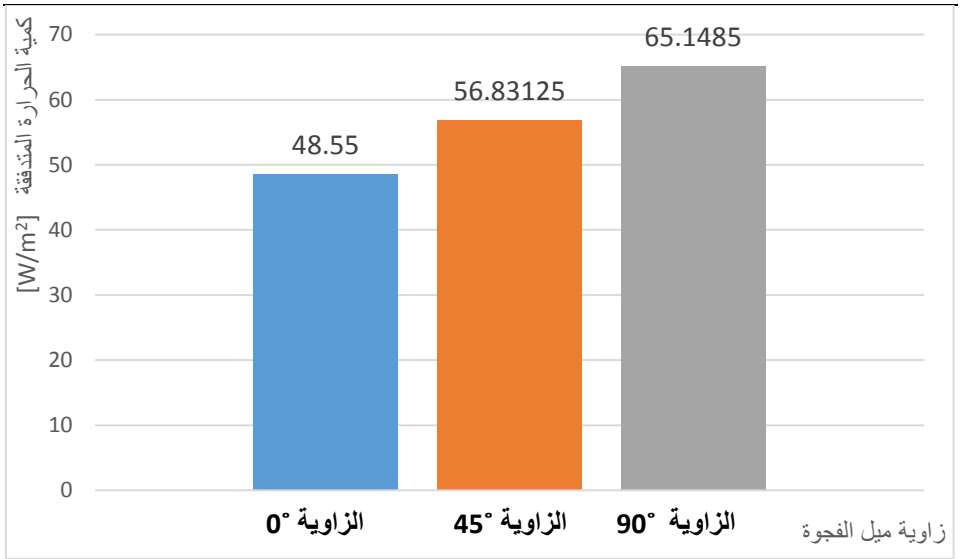


الشكل (11) يبين التدفق الحراري الحاصل عبر كل نموذج في فصل الشتاء

يبين الشكلين (12) و (13) كمية الحرارة العابرة للمتر المربع الواحد للنماذج المدروسة في فصلي الصيف والشتاء على التوالي.



الشكل (12) يبين التدفق الحراري الحاصل بالنسبة للمتر المربع الواحد في فصل الصيف



الشكل (13) يبين التدفق الحراري الحاصل بالنسبة للمتر المربع الواحد في فصل الشتاء

أظهرت نتائج النمذجة الحرارية للنماذج المدروسة، بأن الطوبة الاسمنتية ذات فجوات بزوايا ميل 45° يتدفق عبر طرفيها كمية حرارة تفوق تلك التي لها فجوات بزوايا ميل 0°، وأن الطوبة الاسمنتية ذات فجوات بزاوية ميل 90° يتدفق عبر طرفيها كمية حرارة تفوق كلاً من الطوب ذو زوايا الميل 45° و 0° وذلك في فصلي الشتاء والصيف، حيث بلغ التدفق الحراري عبر الطوب المدروس في فصل الصيف عبر كل نموذج 2.3966W و 2.9172W و 3.2922W للطوب ذو فجوات بزوايا ميل 0° و45° و 90° على الترتيب، كما بلغ ذلك التدفق في فصل الشتاء وبنفس الترتيب 3.884W و 4.5465W و 5.21188W ، وبذلك نجد بأن زاوية ميل 0° للفجوات تحقق أفضل أداء حراري من حيث عزلها للحرارة، لأن الحرارة المتدفقة عبر طرفيها هي الأقل من بين النماذج المدروسة، وتليها الطوبة ذات الفجوات المائلة بالزاوية 45° من ثم تأتي الطوبة ذات الفجوات بزاوية ميل 90° .

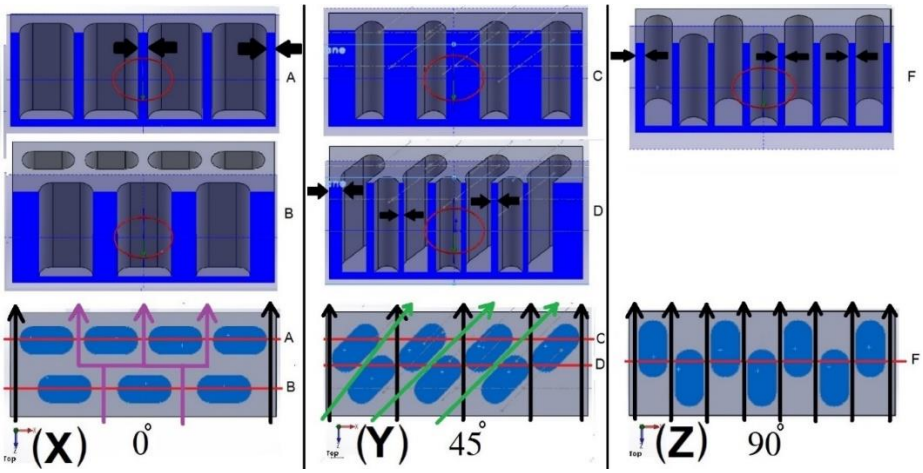
تم الاعتماد على عدة عوامل من أجل تحليل النتائج، وإيجاد تفسيرات لقيم التدفقات الحرارية للنماذج المدروسة، ومن أهم تلك العوامل:

1- عدد الأعصاب التي تنقل الحرارة بالتوصيل بين طرفي كل نموذج.

2- طول وشكل مسار انتقال الحرارة بالتوصيل ضمن الأعصاب التي تقوم بتوصيل الحرارة.

3- عدد صفوف الفجوات الهوائية بين طرفي النموذج.

4- مجموع مساحات مقاطع الأعصاب الكلية التي تنتقل عبرها الحرارة بالتوصيل بين طرفي النماذج المدروسة.



الشكل (14) يبين مقاطع عرضية مأخوذة للنماذج المدروسة، ومسارات انتقال الحرارة في كل نموذج

تم أخذ مقاطع في كل نموذج مدروس، وذلك من أجل سهولة فهم وتحليل العوامل المذكورة.

نجد من خلال الشكل X (14) أن عدد الأعصاب التي تقوم بتوصيل الحرارة بين طرفي الطوب في النموذج ذو فجوات مائلة بزاوية 0° ومن خلال رسم مساراتها هو خمسة أعصاب، حيث تنتقل الحرارة إلى الطرف الثاني عبر هذه الأعصاب، بينما نجد أن عدد الأعصاب في النموذج ذو الفجوات المائلة بزاوية 45° والمبين بالشكل Y (14) هو ثمانية أعصاب، خمسة منها مباشرة وثلاثة مائلة، وتم تحديدها من خلال رسم مسارات تلك الأعصاب، بينما بلغ عدد الأعصاب في النموذج ذو زوايا ميل فجوات 90° درجة ثمانية أعصاب جميعها مباشرة. من خلال دراسة عامل عدد الأعصاب التي تقوم بنقل الحرارة بالتوصيل نجدا بأن أفضل نموذج يحقق أكبر مقاومة حرارية هو النموذج ذو زاوية ميل فجوات 0° لأن عدد أعصابه هو الأقل وهو خمس أعصاب،

يليه النموذج ذو الفجوات بزوايا دوران 45º حيث يمتلك ثمانية أعصاب، ويليه النموذج ذو الفجوات المائلة بزاوية 90º والذي يملك ثمان أعصاب، ومن خلال ملاحظة أن عدد الأعصاب في النموذج الثاني والثالث متساويان حيث يملك كل منهما ثمانية أعصاب إلا أن النموذج ذو الفجوات بزاوية 45º فيه ثلاث أعصاب مائلة وهذا يعطيه أفضلية على النموذج الثالث ذو الفجوات المائلة بزاوية 90º .

أما من ناحية طول مسار انتقال الحرارة، فبالنظر للشكل (14) يمكن القول أن النموذج الذي زوايا دوران فجواته 0º درجة هو الأفضل من هذه الناحية، لأن مسارات انتقال الحرارة فيه هي الأطول، وشكل مساراته المتعرجة يعمل على تشتيت الحرارة المنتقلة بالتوصيل وتوزيعها بعدة اتجاهات وفقاً لاتجاهات التعرج في المسار، بالإضافة إلى أن الحرارة المنتقلة بالتوصيل سيذهب قسم كبير منها ويصطدم بجدار الفجوات الهوائية ليتحول انتقال الحرارة لشكل ثاني ضمن الفجوة الهوائية (بالحمل الحر)، وبذلك يتولد لدينا مقاومة حرارية إضافية هي مقاومة الهواء لانتقال الحرارة للطرف الاخر ضمن الفجوات الهوائية. يأتي في المرتبة الثانية من هذه الناحية هو النموذج ذو فجوات بزوايا دوران 45º درجة، حيث تكون فيه المسارات طويلة ومائلة بالنسبة لاتجاه انتقال الحرارة، وهذا يعمل على تشتيت الحرارة المنتقلة على طرفي العصب الذي تمر منه بسبب ميوله عن اتجاه انتقال الحرارة الفعلي، كما يعمل على نقل جزء كبير من الحرارة إلى جدران الفجوات وبالتالي إلى داخل الفجوات ليتحول انتقال الحرارة إلى شكل ثاني من أشكال انتقال الحرارة (بالحمل الحر)، وإن وجود الهواء داخل الفجوات يعمل على تشكيل مقاومة حرارية إضافية. وجاء في المرتبة الثالثة والأخيرة من هذه الناحية هو النموذج الذي يحتوي على فجوات زوايا دورانها 90º ، حيث تكون فيه مسارات انتقال الحرارة مباشرة وهي الأقصر.

بالنسبة لعدد صفوف الفجوات الهوائية للنماذج المدروسة، فيظهر لنا مباشرةً من خلال الشكل (14) أن النموذج الأول ذو فجوات زاوية دورانها 0º يمتلك صفين من الفجوات الهوائية وهذا يعمل على مضاعفة طبقات الهواء التي تزيد من المقاومة الحرارية للنموذج ككل، على خلاف النموذجين الباقيين اللذان يملك كل منهما صف فجوات واحد، يكون هذا الصف مائلاً في

النموذج الثاني ذو فجوات مائلة بالزاوية°45 ، بينما يكون بشكل متراصف مع وجود تقدم وتأخر في الفجوات في النموذج ذو الفجوات المائلة بزاوية °90 درجة، وبالتالي فإن النموذج الأول هو الأفضل والذي يمتلك صفين من الفجوات الهوائية.

تم حساب مجموع مساحات مقاطع الأعصاب الكلية التي تنتقل عبرها الحرارة بالتوصيل في كل نموذج، وهذه المساحة تعطينا تصوراً واضحاً لأي النماذج الذي يتم عبره انتقال أكبر كمية حرارة بالتوصيل. فبلغت في النموذج الأول $0.0208\ m^2$ ، وبلغت هذه المساحة في النموذج الثاني $0.027275\ m^2$ ، وبلغت المساحة في النموذج الثالث $0.0282\ m^2$ ، أي أن النموذج الأول هو النموذج الأفضل من هذه الناحية، وهذا ما يعطيه تفوقاً من ناحية مقاومته لانتقال الحرارة.

بالمحصلة ومن خلال دراسة العوامل المذكورة نجد أن تفوق النموذج الأول ذو فجوات مائلة بزاوية °0 أمر طبيعي وذلك لتفوقه على باقي النماذج من خلال العوامل الهندسية التي تم دراستها.

تم حساب معامل توصيل الحرارة المكافئ (يتم اعتبار انتقال الحرارة للجملة كاملةً بالتوصيل) والمقاومة الحرارية للنماذج المدروسة بالاعتماد على نتائج النمذجة الحرارية (التدفق الحراري لكل نموذج)، وعلى العلاقات التالية:

- **المقاومة الحرارية.**

$$Q = \frac{\Delta T}{R} \quad \Rightarrow \quad R = \frac{\Delta T}{Q}$$

حيث:

Q : التدفق الحراري عبر المتر المربع الواحد و تقدر بـ $[W/m^2]$

ΔT : فرق درجات الحرارة بين طرفي الجدار وتقدر بـ [K]

R : المقاومة الحرارية وتقدر بـ $[m^2.K/W]$

تم ترتيب النتائج في الجدول (3)

الجدول (3) يبين معاملات التوصيل الحراري المكافئة والمقاومات الحرارية للنماذج المدروسة

الرقم النموذج	زاوية ميل الفجوة	النمذجة في فصل	التدفق الحراري $[w/m^2]$	المقاومة الحرارية للنموذج $[m^2.K/W]$
1	0°	الصيف	29.9575	0.4673
		الشتاء	48.55	0.5149
2	45°	الصيف	36.465	0.3839
		الشتاء	56.83125	0.4399
3	90°	الصيف	41.1525	0.3402
		الشتاء	65.1485	0.3837

نلاحظ من خلال نتائج الجدول (3) أن قيمة معامل التوصـــيل الحراري المكافئ لأي نموذج في فصل الصيف تختلف عنها في فصل الشتاء بالرغم من أن معامل التوصيل الحراري للمادة الصلبة (المادة البيتونية) ثابتة، على سبيل المثال في النموذج ذو فجوات مائلة بزاوية 90° ، فنلاحظ قيمة معامل التوصـيل الحراري المكافئ في فصـل الصـيف 0.4409 W/m.K بينما كانت في فصـــل الشـــتاء 0.3909 W/m.K . ونلاحظ أيضـــاً أن قيمة المقاومة الحرارية لأي نموذج من النماذج المدروسة في فصل الصيف تختلف عن قيمتها في الفصل الشتاء، وذلك مع المحافظة على خواص المادة الصلبة المكونة للطوب.

6. الاستنتاجات والتوصيات:

من خلال ما تم تحقيقه بالبحث يمكن صياغة بعض الاستنتاجات على النحو الآتي:

1- أدى تغيّر زاوية دوران الفجوات الهوائية ذات الشكل البيضوي في الطوب الاسمنتي المفرغ، إلى تغيّر في قيم التدفق الحراري ومعامل التوصـــيل الحراري المكافئ والمقاومة الحرارية لهذا الطوب.

2- تفوق النموذج الأول ذو الفجوات المائلة بزاوية 0° درجة على النموذجين الثاني والثالث التي لها زوايا ميل فجوات 45° و 90° درجة من حيث التدفق الحراري، حيث كان التدفق الحراري عبر النموذج الأول $29.9575W/m^2$ صيفاً و $48.55W/m^2$ شتاءً، بينما كان التدفق الحراري عبر النموذج الثاني $36.465W/m^2$ صيفاً و $56.83W/m^2$ شتاءً، وكانت في النموذج الثالث $41.1525W/m^2$ صيفاً و $65.1485W/m^2$ شتاءً، وبالتالي النموذج الأول الأفضل الذي فيه التدفقات الحرارية أقل.

3- أظهرت النتائج أن زيادة زاوية دوران الفجوات من 0° إلى 45° ثم إلى 90° تؤدي إلى زيادة تدريجية في كمية الحرارة المنتقلة بين طرفي الطوبة، سواء في فصل الصيف أو الشتاء، وهو ما يعكس تراجع الكفاءة الحرارية مع زيادة زاوية الدوران.

4- لعب انتقال الحرارة بالحمل دوراً أساسياً في عملية انتقال الحرارة الكلية ضمن النماذج المدروسة، حيث أن تغيير زوايا دوران الفجوات الهوائية يؤدي إلى تغيير سلوك انتقال الحرارة بالحمل.

5- أدى تغيير الشروط الحدية والعوامل التشغيلية في عملية النمذجة الحرارية لكل النماذج المدروسة إلى تغيير قيم معاملات التوصيل الحراري المكافئة بين الصيف والشتاء، بالرغم من ثبات معامل التوصيل الحراري للجزء الصلب، مما أدى إلى تغيير المقاومة الحرارية للنموذج ذاته بين الصيف والشتاء، وهذا يبين الدور الهام لعملية انتقال الحرارة بالحمل في النماذج المدروسة.

6- بناءً على ما سبق، يمكن اعتبار التحكم بزاوية دوران الفجوات الهوائية أحد الحلول الفعّالة والبسيطة لتحسين الكفاءة الطاقية للطوب الإسمنتي المفرغ، دون الحاجة إلى تغيير المواد أو زيادة التكاليف الإنتاجية، الأمر الذي يجعله مناسباً للتطبيق في الأبنية السكنية ضمن الظروف المناخية المحلية.

التوصيات:

من خلال ما سبق يمكن أن نوصي بما يلي:

1- استخدام النموذج ذو فجوات بزاوية دوران 0° درجة والذي يحقق أفضل أداء حراري من ناحية مقاومته الحرارية.

2- ضرورة إجراء دراسات من هذا النوع مع الاهتمام بتحسين المقاومة الحرارية للمادة الصلبة المكونة للطوب.

3- ضرورة اجراء دراسات تهدف للتأكد من المقاومة الميكانيكية الجيدة للنماذج المقترحة.

7. المراجع

1- **Statistical Review of World Energy (2025)** - *Energy Institute, https://ourworldindata.org/grapher/global-energy-consumption-source?time=1950..2024*

2. Ritchie H, Rosado P, and Roser M. 2025- **Global Energy Databases-** *https://ourworldindata.org/energy.*

3. Al-Auqeily W. and Al-Yousif I**.,** 2015- **Reduction cooling load using intelligent envelope system.** *Journal of the Technological University of Engineering Sciences, 7(2), page 154-175* .

4. Qarmo A et al. 2016- **Determination of Mechanical and Thermal Characteristics of some Waste Materials in Order to Be Used for Thermal Insulation Purposes.** *Research Journal of Aleppo University, Engineering Science Series (2), 2016.129.*

5. Giama E and Papadopoulos A**.,** 2007- **Environmental performance evaluation of thermal insulation materials and its impact on the building.** *Journal of Building and Environment,* 42(5), 2178-2187.

6. Urban B , 2011 - **Arranging Insulation For Better Thermal Resistance In Concrete And Masonry Wall Systems.** *Nordic Symposium on Building Physics, Vol.3.*

7. Alghamdi A and Alharthi H. 2017 - **Multiscale 3D Finite-Element Modeling Of The Thermal Conductivity Of Clay Brick Walls**. *Construction and Building Materials, Vol.157, Page 1-9.*

8. Wang Q and Zhang Y. 2017 - **Influence Of Hollow Block's Structural Configuration On The Thermal Characteristics Of Hollow Block Wall**. *Procedia Engineering Vol 205, Page 2341-2348.*

9. Qarmo A. et al 2021- **The study of improving thermal performance of bricks manufactured from the recycling of rubble.** *PhD thesis, Homs University.*

10. Syrian Arab Code for the design and implementation of installations in reinforced concrete.