

## دراسة مقارنة الخواص الحرارية والميكانيكية الأفضل للطوب الرغوي المحض ببودرة الألمنيوم وآخر بألفا أولفين سلفات كعوامل مفرغة

اعداد الباحث : د. أنس قرمو

### المخلص

في ظل التوجه العالمي المتزايد نحو الاستدامة البيئية وترشيد استهلاك الطاقة، يكتسب تطوير مواد بناء ذات خصائص حرارية وميكانيكية محسنة أهمية كبيرة، خاصة في سياق مرحلة إعادة الإعمار في الجمهورية العربية السورية. يهدف هذا البحث إلى دراسة تصنيع نوعين من الطوب الإسمنتي الرغوي خفيف الوزن باستخدام مادتين مولدتين للرغوة: بودرة الألمنيوم لإنتاج الطوب من نوع (Cellular Lightweight Concrete (CLC)، ومادة ألفا أولفين سلفات لإنتاج الطوب من نوع (Foam Concrete Blocks (FCB)، تم إعداد عدة عينات بنسب مختلفة من المواد المولدة للرغوة، وتم اختبارها تجريبياً لتحديد الكثافة، ومعامل التوصيل الحراري، ومقاومة الانضغاط.

أظهرت النتائج أن الطوب من نوع (FCB) يمتاز بكثافة أقل  $(711-401) \text{kg/m}^3$  مقارنةً بـ (CLC)  $(1004-598) \text{kg/m}^3$ ، مع انخفاض واضح في معامل التوصيل الحراري ليصل إلى  $0.09 \text{W/m.K}$  في (FCB)، مقابل  $0.21 \text{W/m.K}$  في (CLC)، مما يجعله أكثر كفاءة في العزل الحراري. في المقابل، تفوق (CLC) من حيث الخواص الميكانيكية، حيث بلغ إجهاد الكسر نتيجة الضغط حتى  $22.6 \text{kg/cm}^2$ ، مقارنةً بـ  $18.5 \text{kg/cm}^2$  في (FCB).

تُظهر الدراسة جدوى استخدام الطوب الرغوي في الأبنية الهيكلية غير الحاملة، مع إمكانية خفض الأوزان وتقليل استهلاك مواد البناء والطاقة. وتوصي الدراسة بتطوير الخلطات لتحسين المقاومة الميكانيكية، وتوسيع نطاق البحث لإدماج مزايا كلا النوعين ضمن خلطة هجينة، إلى جانب تشجيع الإنتاج المحلي لهذه المواد دعماً للاستدامة والاقتصاد الوطني.

## **Comparative Study of the Optimal Thermal and Mechanical Properties of Foamed Bricks Produced Using Aluminum Powder and Alpha-Olefin Sulfonate as Foaming Agents**

### **Abstract**

In light of the growing global emphasis on environmental sustainability and energy conservation, the development of building materials with enhanced thermal and mechanical properties is of critical importance—particularly within the context of the reconstruction phase in the Syrian Arab Republic. This study aims to investigate the production of two types of lightweight foamed concrete blocks using different foaming agents: aluminum powder for producing Cellular Lightweight Concrete (CLC), and alpha-olefin sulfonate for producing Foam Concrete Blocks (FCB). Several samples were prepared with varying proportions of foaming agents and experimentally tested to determine density, thermal conductivity, and compressive strength.

The results revealed that (FCB) exhibited lower density, ranging from 401 to 711 kg/m<sup>3</sup>, compared to (CLC), which ranged from 598 to 1004 kg/m<sup>3</sup>. (FCB) also showed significantly lower thermal conductivity values, reaching as low as 0.09 W/m·K, in contrast to 0.21 W/m·K for (CLC), making it more efficient in terms of thermal insulation. On the other hand, (CLC) demonstrated superior mechanical properties, with compressive strength reaching up to 22.6 kg/cm<sup>2</sup>, compared to 18.5 kg/cm<sup>2</sup> for (FCB).

This study highlights the viability of using foamed concrete blocks in non-load-bearing structural applications, offering the potential to reduce structural weight and minimize the consumption of construction materials and energy. The study recommends further development of mix designs to enhance mechanical strength and calls for expanded research into hybrid mixtures that integrate the advantages of both types. Additionally, it encourages local production of these materials to support sustainability and contribute to the national economy.

**Key Words: Cellular Lightweight Concrete (CLC), Foam Concrete Blocks (FCB), Thermal Conductivity of the Foam Concrete Block, Foam Concrete Block Testing.**

**مقدمة:**

تكتسب قضايا البيئة اهتماماً متزايداً في جميع أنحاء العالم بسبب التقلبات البيئية التي تجري في الآونة الأخيرة والسلوك البيئي السيئ الذي تنتهجه بعض الدول والذي أدى إلى التدهور على المستوى البيئي وظهور بعض الظواهر البيئية الخطيرة كظاهرة الاحتباس الحراري، وإن ازدياد عدد السكان العالمي جعل العالم أكثر وعياً لأهمية الاستدامة والحاجة إلى السلوك السليم لحماية البيئة [1].

تتوعدت سياسات دول العالم في تعاملها في هذا الملف، فمنها من اتبعت سياسات توليد الطاقة النظيفة للتقليل من انبعاثات الغازات الدفيئة، كاستثمار الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والمد والجزر وأنواع أخرى من الطاقات النظيفة، وبالتالي تقليل الغازات الدفيئة المنبعثة عن مولدات الطاقة ومحطات الطاقة التقليدية بشتى أنواعها، ودول أخرى اتبعت سياسات ترشيد استهلاك الطاقة للتقليل من الطاقة المصروفة في جميع المجالات، وكان هذا المحور بعدة طرق فبعض الدول اتبعت منهج تشجيع مواطنيها على استخدام الأجهزة المنزلية منخفضة الاستهلاك للطاقة (نظام انفيرتر) لتقليل استهلاك الطاقة المنزلية، وطبقت نفس السياسات على المعامل والمصانع والجهات الإنتاجية المستهلكة للطاقة، ودول أخرى اتبعت سياسة الترشيد من خلال التقليل من استهلاك الطاقة بطريقة الطاقة السلبية أي استخدام نظم ومعايير تعمل لتقليل الطاقة المصروفة بتوفير بنى تحتية صديقة للبيئة كإنشاء المباني الذكية التي تعمل على أقل استهلاك للطاقة وخاصة بما يخص التدفئة والتكييف، فكانت بطرق متنوعة فمباني تم انشائها وتطبيق عليها معايير العزل الحراري الجيد، ومباني أخرى تم انشاؤها بمواد متغيرة الطور بحيث تحقق شروط الراحة الحرارية، ومباني أخرى تم انشاؤها بمواد بناء ذات مواصفات جيدة من الناحية الحرارية

والتي تحقق شروط الراحة الحرارية كاستخدام مواد البناء الرغوية سواء أكانت خلطات اسمنتية أو استخدام أنواع مختلفة من الطوب الاسمّنتي الرغوي.

في ظل المرحلة الجديدة التي تشهدها الجمهورية العربية السورية (مرحلة إعادة الاعمار) كان لابد من التفكير بإعادة البناء على أسس علمية سليمة تضمن شروط السلامة وتؤمن الراحة للقاطنين في الأبنية ولاسيما الراحة الحرارية، وتجنبهم الاستهلاك الزائد في الطاقة لأغراض التدفئة والتكييف، وتجنبهم أيضاً استخدام وسائل عزل حراري تقليدي لاحقاً وبالتالي تكاليف تأسيسية زائدة، لذلك تم التفكير في استخدام مواد البناء الرغوية كالطوب الرغوي والخرسانة الرغوية واللّتان تعملان على العزل الحراري وتوفير شروط الراحة الحرارية للقاطنين في الأبنية.

وفي هذا البحث تم التطرق لإحدى تلك مواد البناء وهي الطوب الاسمّنتي الرغوي، حيث يتم إنتاج الطوب الاسمّنتي الرغوي بطرق كثيرة ومتنوعة ويتم استخدام مواد متنوعة لإنتاجه وفقاً للطريقة المتبعة في إنتاجه. إن استخدام الرغوة في إنتاج الطوب هو من يجعل طبيعة تركيبها خلوية ويتخللها فراغات هوائية، ويتم استخدام تلك الرغوة إما أثناء مرحلة التصنيع أو يتم إنتاجها بمرحلة سابقة من ثم يتم دمجها مع الخلطة المكونة للطوب، حيث في كل طريقة من طرق يتم استخدام مادة مولدة للرغوة مختلفة عن الأخرى، وسندرس في هذا البحث كلتا الطريقتين ونستخدم إحدى المواد التي تقوم بتوليد الرغوة في كل طريقة ونقوم بدراسة كل حالة.

#### أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث في هذا الوقت بالذات بربطه بعمليات إعادة الإعمار والتي يجب أن تكون على أسس علمية سليمة تأخذ بعين الاعتبار الاستدامة وترشيد الطاقة.

### يهدف البحث بشكل أساسي إلى:

- 1- دراسة تصنيع نوعين من البلوك الرغوي وهما البلوك الرغوي المضاف له بودرة الألمنيوم بعدة نسب والبلوك الرغوي المضاف له الرغوة بعدة نسب باستخدام ألفا ألفين سلفات.
- 2- تحديد كثافة الخلطات الخرسانية المدروسة تجريبياً.
- 3- دراسة الخواص الحرارية للعينات المصنعة تجريبياً وتحديد العينات الأفضل من هذه الناحية.
- 4- دراسة الخواص الميكانيكية للعينات المصنعة تجريبياً وتحديد العينات الأفضل من الناحية الميكانيكية.
- 5- مقارنة النتائج بخواص البلوك التقليدي.

### الدراسات المرجعية:

أُجريت الكثير من الدراسات والأبحاث التي تناولت موضوعات تتعلق بمواد البناء التي تعتمد على شكلها الرغوي في بنيتها، وقد أُجريت من عدة نواحي، فمن حيث طريقة إجراء البحث قام البعض بالدراسة بشكل تجريبي وأُجريت الاختبارات عليها تجريبياً، والبعض الآخر قام بالدراسة العددية (نمذجة). أما من حيث مواد البناء المدروسة فركزت بعض الدراسات على الخرسانة الرغوية ودراسات أخرى عملت على التركيز الطوب الاسمنتي الرغوي. وتناولت دراسات أخرى موضوعات المواد الداخلة في تركيبات كل من الخرسانة الرغوية والطوب الرغوي، فقامت دراسات على تجريب المواد الخام الجديدة ومنها من اعتمد على مواد معاد تدويرها والمواد المهذورة من بقايا الأبنية المهتمة كركام داخل في التركيبات الرغوية لمواد البناء. دراسات أخرى اختلفت بين بعضها من ناحية الهدف من الدراسة، فمنها كان هدفها معرفة الخواص الميكانيكية والخواص الفيزيائية الأخرى، والبعض الآخر كان الهدف منها معرفة خواصها الحرارية وآليات انتقال الحرارة ضمنها لتحديد معاملات التوصيل الحراري لها، وعلى هذا المنوال تمت الكثير من الدراسات، وسنستعرض فيما يلي بعض تلك الدراسات:

درس يانغ رفاقه [2] في عام 2020 خصائص الخرسانة الرغوية المحتوية على مسحوق الطوب الطيني المهودور المشتق من نفايات البناء والهدم، حيث عمل الباحثون على إضافة الطوب المهودور من نفايات البناء والهدم (CDW) للكتل الخرسانية الرغوية ، استخدام مسحوق الطوب الطيني (CBP) المشتق من نفايات الطوب الطيني، كمادة أسمنتية تكميلية (SCM)، لإعداد الخرسانة الرغوية، حُصرت الخرسانة الرغوية بكثافات مختلفة وبدائل CBP، واعتمد الباحثون على سلفات الألمنيوم في تكوين الرغوة التي جعلت الخليط رغوياً، حيث تمت إضافة نسب مختلفة من CBP، ثم حُدّد انكماش الجفاف، والخصائص الميكانيكية، وامتصاص الماء، وتوزيع المسام. أظهرت النتائج أن CBP يمتلك الخصائص الأساسية للخرسانة الرغوية، كما بينت الدراسة بأن الخرسانة الرغوية تتميز بكثافة منخفضة ووظائف ممتازة، وقد استُخدمت على نطاق واسع في تطبيقات البناء. وقد أظهرت النتائج أن استخدام CBP كـ SCM لتحضير الخرسانة الرغوية مستداماً وصديقاً للبيئة كما ووجدوا أيضاً أن استخدام CBP عالي النعومة كـ SCM مناسباً لتحضير الخرسانة الرغوية. على الرغم من أن CBP يمتلك بعض التأثيرات الإيجابية (مثل تأثير ملء الركام الدقيق النموذجي، إلخ)، إلا أن إضافة CBP تقلل من نواتج ترطيب المواد الأسمنتية. يُلاحظ انخفاض كبير في محتوى  $Ca(OH)_2$  عند إضافة CBP في المواد الأسمنتية. وبينت الدراسة أيضاً أنه ليس لإضافة CBP أي تأثير كبير على الكثافة الظاهرية الجافة للخرسانة الرغوية. تتشابه نسبة امتصاص الماء والمسامية وتوزيع المسام للخرسانة الرغوية مع CBP مع تلك الموجودة في المجموعة غير المستخدمة. سلوك انكماش الخرسانة الرغوية المستخدمة مع CBP أقل منه في المجموعة غير المستخدمة، وتتناقص قيمة الانكماش خطياً مع زيادة بدائل CBP. علاوة على ذلك، فإن تأثيرات استبدال CBP على سلوك انكماش الخرسانة الرغوية منخفضة الكثافة تكون أكثر وضوحاً من تأثير الخرسانة الرغوية عالية الكثافة. عندما تكون نسبة استبدالات CBP أقل من 15%، فإن إضافة CBP لها تأثير طفيف على قوة ضغط الخرسانة الرغوية المُجهزة، بل ويُلاحظ زيادة في قوة ضغط الخرسانة الرغوية عالية الكثافة بعد 28 يوماً

من المعالجة. ومع ذلك، فإن قوة ضغط الخرسانة الرغوية التي تحتوي على CBP بنسبة تصل إلى 30% أقل بكثير من قوة ضغط مجموعة المقارنة. ويكون تأثير استبدالات CBP على قوة ضغط الخرسانة الرغوية منخفضة الكثافة أكثر وضوحًا من تأثير الخرسانة الرغوية عالية الكثافة. يُحسّن إضافة محتوى مناسب من CBP قوة الضغط إلى نسبة محتوى الأسمنت في الخرسانة الرغوية، ويمكن ملاحظة كفاءة إعادة التدوير الممتازة والفوائد الاقتصادية والبيئية. من خلال النظر الشامل في خصائص الخرسانة الرغوية التي تحتوي على بدائل CBP، يُوصى باستبدال CBP بنسبة 15%.

عمل إبراهيم ورفاقه [3] في عام 2013 على دراسة قام فيها بإجراءات تجريبية شملت العمل على اختبار عينات خرسانية رغوية خفيفة الوزن قاموا بتصنيعها، واستخدموا في صناعتها مواد مهدورة من بقايا البناء كركام خشن، ركزت هذه الدراسة على أداء الخرسانة الرغوية خفيفة الوزن المُصنّعة من استبدال جزئي لطوب الطين المُهدر كركام خشن. هدف البحث إلى تحديد خصائص الخرسانة الرغوية خفيفة الوزن باستخدام الطوب الطيني المُهدر كمادة بديلة للحد من استنزاف الركام الخشن العادي من الجرانيت وتحديد فعالية الخرسانة بشكلها الرغوي. تم تحضير أربع نسب مئوية مختلفة من الخلطات الخرسانية باستخدام الركام الخشن الجديد، والتي تتكون من 25%، 50%، 75%، 100% من الطوب الطيني المُهدر. تم حقن الرغوة في خليط الخرسانة لإنتاج خرسانة خفيفة الوزن بنسب مناسبة. خضعت العينات لعدة اختبارات، بما في ذلك اختبار الضغط، واختبار امتصاص الماء، واختبار قابلية التشغيل، واختبار الكثافة. أظهرت النتائج المُحصَل عليها أن الخرسانة خفيفة الوزن المُنتجة باستخدام طوب الطين المُهدر بنسبة 25% أظهرت أعلى قوة ضغط بلغت 25 MPa، بكثافة  $1647 \text{ kg/m}^3$ .

درس ليو وأصدقائه [4] في 2014 بحثاً قاموا خلاله بتقييم التوصيل الحراري والخصائص الميكانيكية وخواص النقل للخرسانة الجيوبوليميرية الرغوية خفيفة الوزن، وكان الهدف من البحث بشكل رئيسي هو النتائج التجريبية المتعلقة بالتوصيل الحراري للخرسانة الجيوبوليميرية الرغوية

دراسة مقارنة الخواص الحرارية والميكانيكية الأفضل للطوب الرغوي المحضّر ببودرة الألمنيوم وآخر بألفا أولفين سلفات كعوامل مفرغة

وذلك بإضافة بعض المواد، وهي قشور زيت النخيل (OPSFGC)، باستخدام مواد مُهملة مثل الرماد المتطاير منخفض الكالسيوم (FA) ورماد وقود زيت النخيل (POFA) كماد أسمنتية، وقشور زيت النخيل (OPS) كركام خشن خفيف الوزن (LWA). تم تحضير ثلاثة خلطات من الخرسانة الجيوبوليمرية الرغوية خفيفة الوزن (OPSFGC) بكثافة  $1300-1500-1700 \text{ kg/m}^3$  باستخدام عامل رغوة اصطناعي؛ واستُخدمت خلطة مرجعية خالية من الرغوة ومواد تقليدية - البلوك والطوب - للمقارنة. كما ناقشت نتائج الاختبارات المتعلقة بالخواص الميكانيكية وخواص النقل. كانت الموصلية الحرارية لـ OPSFGC13، البالغة حوالي  $0.47 \text{ W/mK}$ ، أقل بنسبة 22% و 48% من مواد الجدران التقليدية، البلوك والطوب، على التوالي. يمكن تصنيف OPSFGC، بكثافة  $1300 \text{ kg/m}^3$  و  $1500 \text{ kg/m}^3$ ، كخرسانة إنشائية عازلة من الفئة الثانية، وتُصنف OPSFGC، بكثافة  $1700 \text{ kg/m}^3$ ، كخرسانة إنشائية من الفئة الأولى، بقوة ضغط وموصلية حرارية تبلغ حوالي  $25 \text{ MPa}$  و  $0.58 \text{ W/mK}$ ، على التوالي.

في عام 2021 درس الشليف و رفاقه [5] الطوب الخرسانى الرغوي من حيث قوة الضغط، وقد هدف هذا البحث إلى تحسين قوة ضغط الطوب الخرسانى الرغوي الحيوي (B-FCB) من خلال الجمع بين الاحتجاز الطبيعي لثاني أكسيد الكربون والتفاعل الحيوي لإنزيمات *B. tequilensis*. وقد استرشدت التجارب بطريقتين للتحسين، وهما عامل k2 ومنهجية سطح الاستجابة (RSM). وأجري تحليل عامل k2 لفحص العوامل المهمة؛ ثم أُجري تحليل RSM لتحسين قوة ضغط B-FCB. وقد تم تغيير أربعة عوامل بشكل انتقائي أثناء الدراسة، وهي الكثافة (D)، وتركيز *B. tequilensis* (B)، ودرجة الحرارة (T)، وتركيز ثاني أكسيد الكربون. وكانت قوة الضغط المثلى  $8.22 \text{ MPa}$  لـ (B-FCB)، كما استنتج من الشروط التالية: 10% ثاني أكسيد الكربون،  $3 \times 107$  خلية/mm من B، ودرجة الحرارة  $27^\circ \text{C}$  وكثافة  $1800 \text{ kg/m}^3$  D بعد 28 يوماً. أدى استخدام بكتيريا *تيكيلييسيس* في طوب الخرسانة الرغوية (B-FCB) إلى تحسين قوة الضغط بنسبة 35.5% مقارنةً بالطوب الخرسانى الرغوي (FCB) بعد 28 يوماً. وقد عكس تحليل البنية الدقيقة

باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، والأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDX)، وتحليل حيود الأشعة السينية (XRD) التغيرات في مستويات العناصر الكيميائية وترسب كربونات الكالسيوم ( $CaCO_3$ ) في مسام طوب الخرسانة الرغوية (B-FCB). ويعود ذلك إلى تفاعلات سطح بكتيريا تيكيلينسيس مع إنزيمي الكربونيك أنهيدراز (CA) واليوريز مع الكالسيوم في الأسمنت وثاني أكسيد الكربون المُختزن خلال فترة المعالجة.

درس كومار ورفاقه [6] في العام 2018 بحثاً تجريبياً حول السلوك الميكانيكي والحراري للخرسانة الرغوية. تمت دراسة خصائص مثل مقاومة الضغط والمقاومة الحرارية. استخدم الباحثون في صنع الخرسانة الرغوية الأسمنت، والرماد المتطاير، والماء، والفراغات الهوائية. عامل الرغوة المستخدم في إنتاج الرغوة هو كبريتات لوريل إيثر الصوديوم. وكانت عينات الخرسانة الرغوية تحتوي على نسبة هواء تتراوح بين 10% حتى 70%، مما نتج عنه مادة خفيفة الوزن، وقد أثر ذلك على خصائص مقاومة الضغط والمتانة. وعلى الرغم من أن البحث أثبت أن انخفاض نسبة الفراغات الهوائية المتصلة يُقلل من مقاومة الضغط، إلا أن زيادة الفراغات الهوائية أدت إلى زيادة المقاومة الحرارية. تم تحضير ست دفعات من الخرسانة الرغوية بنسب هواء متفاوتة تتراوح بين 15% و 17% و 20%. وتم استخدام مكعب وبلاطة الخرسانة الرغوية في اختبارات الضغط والحرارة. وتراوحت الكثافة الجافة للخرسانة الرغوية بين  $860 \text{ kg/m}^3$  و  $1245 \text{ kg/m}^3$ ، وتراوحت قوة الضغط بين 2.5 MPa و 6.5 MPa. وتم مقارنة الكثافة الجافة وقوة الضغط والتوصيل الحراري في هذا البحث مع الطوب الطيني. باستخدام كتل الخرسانة الرغوية بدلاً من الطوب الطيني، وبذلك يُمكن تقليل الحمل الميت للمبنى بنسبة 50% تقريباً. تتراوح الموصلية الحرارية للخرسانة الرغوية بين 0.021 W/mK و 0.035 W/mK. وفي النهاية بينت النتائج الرئيسية أن الخرسانة الرغوية تتمتع بإمكانيات جيدة للاستخدام في التطبيقات الإنشائية خفيفة الوزن للمباني منخفضة الارتفاع، نظراً لتطور خصائصها الميكانيكية وخصائص النقل ومقاومتها الحرارية.

دراسة مقارنة الخواص الحرارية والميكانيكية الأفضل للطوب الرغوي المحضّر ببودرة الألمنيوم وآخر بألفا أولفين سلفات كعوامل مفرغة

في العام 2018 درس وانغ ورفاقه [7] دمج طوب الرملي مع الخرسانة الرغوية ومواد التحكم في الرطوبة، تم تحضير خرسانة رغوية بخمس كثافات دون تلييد، ثم تم خلطها مع ملاط التحكم في الرطوبة لتحضير طوب الرملي (SBB). تم توصيف وتحديد قيم المعلمات المسامية الدقيقة للخرسانة الرغوية باستخدام برنامجي Image-pro Plus 6.0 و Matlab 2015a. ودرست آثار هذه المعلمات المسامية على خصائص الطوب. وتم تحقيق أفضل الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والتحكم في الرطوبة لطوب التنفس الرملي باستخدام Fca9 للخرسانة الرغوية. بلغت الكثافة الجافة المناسبة  $910 \text{ kg/m}^3$  ، مع قوة ضغط أعلى قدرها  $5.25 \text{ MPa}$ ، وبلغت الموصلية الحرارية  $0.08 \text{ W/mK}$ ، وبلغ أقصى امتصاص للرطوبة  $272.51 \text{ g/m}^3$  ، وأقصى امتصاص رطوبة  $143.09 \text{ g/m}^2$  ، مما يُمكن من استخدامها كمادة جدار لتقسيم المساحات وتحسين جودة الهواء الداخلي.

في العالم 2022 درس فيندو ورفاقه [8] كتل خرسانية رغوية خفيفة الوزن مُنتجة باستخدام البوليسترين الموسع (EPS). وقد ساهم ذلك في تقليل تأثير عمليات المحاجر والمعالجة على البيئة، كما أنه اقتصادي. بالمقارنة مع مواد أخرى مثل الفولاذ والخشب، يتميز استخدام الخرسانة الرغوية خفيفة الوزن بمزايا عديدة، بما في ذلك توفير التكاليف، وسهولة التطبيق. وبينت الدراسة أنه لا تُعتبر الخرسانة الخلوية خفيفة الوزن اختراعاً حديثاً، بل هي موجودة منذ فجر التاريخ. وقد استخدم فيها الأسمنت، والرمل المُصنَّع (M-Sand)، والرماد المتطاير (الفئة F)، وخبث فرن الصهر الحبيبي المطحون (GGBS)، وألياف البولي بروبيلين، وEPS، وعامل رغو من كحول البنزويل والماء. تُستخدم الخرسانة الخلوية خفيفة الوزن على نطاق واسع نظراً لانخفاض كثافتها. في هذا البحث، أُجريت اختبارات جودة المياه، ومقاومة الضغط، والتوصيل الحراري على كتل مُصلدة مُزودة بحبيبات البوليسترين الموسع (EPS). أدت إضافة الرماد المتطاير و GGBS إلى الخليط إلى تقليل استهلاك المياه من خلال تقليل الترطيب والبصمة الكربونية، مما أدى إلى انخفاض الانكماش، كما قلل من مقاومة ضغط الكتل بنسبة تتراوح بين 25% و 50% تُعرف

الخرسانة التي تقل كثافتها عن  $1800 \text{ kg/m}^3$  عادةً بالخرسانة خفيفة الوزن. يركز هذا البحث على أبحاث الخرسانة خفيفة الوزن المٌزودة بحبيبات البوليسترين الموسع (EPS).  
الأجهزة والمعدات المستخدمة:

تم استخدام مجموعة متنوعة من الأجهزة والمعدات خلال البحث الحالي. فقد استُخدمت بعض الأدوات لتجهيز المواد الأولية، بينما تم استخدام أدوات أخرى لتحضير العينات. كما تم استخدام معدات أجهز أخرى لإجراء الاختبارات على العينات المُعدة. وفيما يلي استعراض للأجهزة المستخدمة:

1- وعاء اسطواني للخلط: وهو عبارة عن وعاء بلاستيكي بسعة 50 | تتم فيه عملية الخلط ليحتوي جميع المكونات المكونة للخليط.

2- خلاط كهربائي (يدوي): تم استخدام الخلاط اليدوي المبين في الشكل (1) من أجل خلط مكونات الخليط، وهو خلاط يعمل على الطاقة الكهربائية ويعمل بعدة سرعات مختلفة وذلك حسب متطلبات العمل.

3- قوالب صب العينات البيتونية: وهي عبارة عن قوالب يتم فيها صب الخليط من أجل أن تأخذ شكلاً معيناً، وفي هذا البحث تم استخدام نموذجين من القوالب بأبعاد مختلفة، النموذج الأول بأبعاد  $21 \times 21 \times 6 \text{ cm}$  وهذه الأبعاد هي أبعاد العينات التي يمكن لجهاز قياس الموصلية الحرارية اختبارها كما هو مبين في الشكل (2). والنموذج الثاني هو عبارة عن قالب خشبي أيضاً لكن بأبعاد مختلفة عن النموذج الأول حيث تكون أبعاده  $40 \times 20 \times 15 \text{ cm}$  وهذه الأبعاد هي الأبعاد المناسبة لجهاز اختبار الضغط.

دراسة مقارنة الخواص الحرارية والميكانيكية الأفضل للطوب الرغوي المحضّر ببودرة الألمنيوم وآخر بألفا أولفين سلفات كعوامل مفرغة



الشكل (2) يبين القالب الخشبي المستخدم  
لصب العينات ذات النموذج الأول

الشكل (1) ويبين الخلاط الكهربائي اليدوي

4- مولد الرغوة: وهو جهاز استخدامه أساسي في تصنيع البلوك الرغوي، حيث يقوم

بإنتاج فقاعات هوائية دقيقة تدمج في خليط الاسمنت لتكوين بنية خلوية خفيفة الوزن، حيث يتكون مولد الرغوة من عدة مكونات وهي خزان محلول المادة الرغوية والذي يحتوي على المادة الرغوية الممزوجة بالماء- مضخة تدفع المحلول من الخزان إلى وحدة الخلط- ضاغط هوار مهمته التزويد بالهواء المضغوط اللازم لتكوين الرغوة- وحدة خلط تمزج المحلول مع الهواء المضغوط لإنتاج الرغوة بالإضافة لفوهة اخراج تقوم بإخراج الرغوة المتكونة لتضاف الى خليط الاسمنت.

أما مبدأ عمله فيعتمد على مزج محلول المادة الرغوية مع الهواء المضغوط داخل وحدة الخلط مما ينتج فقاعات هوائية دقيقة، ثم ضخ الرغوة المتشكلة عبر فوهة الخروج الى الخلطة الخرسانية. ويبين الشكل (3) مولد الرغوة.

5- ميزان الكتروني: تم استخدام ميزان الكتروني دقيق لتحديد وزن العينات المدروسة

والتي تم تحضيرها، حيث تصل دقة الميزان المستخدم هي  $g \pm 5$  ، ويبين الشكل (4) الميزان المستخدم.



الشكل (4) ميزان الكتروني المستخدم  
لوزن العينات



الشكل (3) يبين مولد الرغوة المستخدم

## 6- بياكوليس:

من أجل تحديد أبعاد العينات بعد أن تم تجهيزها بشكل نهائي.

7- جهاز قياس الموصلية الحرارية: لتحديد الموصلية الحرارية للعينات التي تم تحضيرها تم استخدام جهاز قياس موصلية حرارية المبين في الشكل (5)، يعمل هذا الجهاز على مبدأ التدفق الحراري عبر العينة التي يتم فحصها، وبتحديد درجتي حرارة سطحي العينة ومعرفة كمية الحرارة المتدفقة عبر العينة ومعرفة مساحة سطح العينة وسماكتها يتم تطبيق قانون فورييه لمعرفة معامل التوصيل الحراري للعينة التي يتم فحصها والموضح بالعلاقة التالية [9],[10].

$$Q = A \cdot \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\delta} \rightarrow \lambda = Q \cdot \frac{\delta}{A \cdot \Delta T} \quad (1)$$

حيث:

Q: التدفق الحراري يقدر بـ W.

$\Delta T$ : فرق درجة حرارة سطحي العينة ( $T_H - T_C$ )، يقدر بـ  $^{\circ}C$ .

$\lambda$ : عامل التوصيل الحراري يقدر بـ W/mK.

A: مساحة سطح العينة تقدر بـ  $m^2$ .

$\delta$ : سماكة العينة تقدر بـ m.

$$Q=V.I \quad (2)$$

حيث:

$V$ : جهد تغذية المنبع الحراري يقدر بـ  $V$ .

$I$ : شدة تيار تغذية المنبع الحراري يقدر بـ  $A$ .

8- جهاز اختبار اجهاد الكسر الناتج عن الضغط: جهاز اختبار اجهاد الكسر الناتج

عن الضغط هو جهاز هيدوليكي يحتوي على فكين أحدهما ثابت والآخر متحرك، يتم وضع العينة المراد اختبارها بين الفكين ويتم تطبيق ضغط هيدوليكي على الفك المتحرك فنضغط العينة ويرافق ذلك ارتفاع في ضغط الزيت داخل الدارة الهيدوليكية للجهاز والذي يعمل بدوره على تحريك ابرة ساعة الضغط للجهاز وتتم القراءة عند انهيار العينة، ويتم عندها تحديد اجهاد الكسر

الناتج عن الضغط للعينة التي يتم اختبارها حيث يتم تطبيق العلاقة التالية:

$$\sigma = \frac{F}{Ad} \quad (3)$$

حيث:

$\sigma$  : اجهاد الكسر الناتج عن الضغط [ $\text{kg/cm}^2$ ]

$F$ : الحمل الأقصى الذي تتحمله العينة [ $\text{kg}$ ]

$Ad$ : مساحة سطح التحميل [ $\text{cm}^2$ ]



الشكل (6) جهاز اختبار اجهاد الكسر



الشكل (5) جهاز قياس الموصلية الحرارية

الناتج عن الضغط

### طرائق البحث:

#### تحضير العينات:

تم تحضير نوعان من الخلطات للعينات المدروسة، الاختلاف بينهما هو نوع المادة المولدة للزرغوة المستخدمة في كل منهما، فقد تم تحضير نوع CLC والنوع الثاني FCB بالإضافة لاختلاف طريقة تحضير العينات التي تم تحضيرها كانت بأبعاد مختلفة بحيث تكون أبعادها متناسبة مع الأجهزة التي سيتم اختبارها بها، فكانت الأبعاد  $(0.21 \times 0.21 \times 0.02)$  cm للعينات التي سيتم اختبارها حرارياً، و  $(20 \times 20 \times 40)$  cm للعينات التي سيتم اختبارها ميكانيكياً.

**1- تحضير عينات CLC:** تم تحضير عدد من عينات البلوك من نوع CLC والذي يعتمد على بودرة الألمنيوم كمادة مولدة للزرغوة. حيث تم وضع كمية من الاسمنت البورتلندي بنسبة 55% من الوزن الجاف من مجمل الكمية المراد تحضيرها في برميل بلاستيكي، من ثم وضع رمل ناعم بنسبة 35% من الوزن الجاف وازضافة جبر بنسبة 8% (محفر للتفاعل) وتم بعدها خلط المكونات الجافة بشكل جيد ومستمر حتى يتم تجانس الخليط، وتم بعدها البدء بإضافة الماء بشكل بطيء مع التحريك باستخدام خلاط كهربائي وذلك حتى وصول الخليط الى

قوام متوسط قابل للانسكاب، وتم بعد ذلك إضافة بودرة الألمنيوم بدرجة نسب بحيث نحصل على عدة عينات تختلف كل منها عن الأخرى بنسبة بودرة الألمنيوم حيث كانت النسب -0.4-0.2) % (0.6-0.8-1 من الوزن الجاف مع الاستمرار بالخلط، من ثم إضافة الجبس بنسبة تتراوح ما بين 1-2% والخلط لمدة تتراوح ما بين الدقيقة والدقيقتين، وتم بعدها مباشرة صب الخليط في قوالب خشبية بأبعاد معينة مناسبة للاختبارات التي ستجري على العينات، حيث تكون الجدران الداخلية للقوالب مطلية بالزيت من أجل أن يشكل عازلاً بين البلوك والقالب بعد جفافه وعدم التصاقه، إن هذه العملية هي عملية كيميائية فيزيائية دقيقة تولد فقاعات هواء مستقرة ضمن مزيج اسمنتي، فمنذ اللحظة الأولى لإضافة مسحوق الألمنيوم والقلويات (الاسمنت والجير) يبدأ تفاعل كيميائي طارد للحرار يؤدي الى توليد تلك الفقاعات الدقيقة وهي عبارة عن غاز الهيدوجين. حيث يتمدد المزيج ليقوم بملء القالب بشكل كامل خلال فترة تتراوح ما بين 30-60 دقيقة، ويترك المزيج في القالب لمدة 24 ساعة ليتم بعدها إخراجها من القالب بدون تشوه، ويتم وضعه في الشمس ليجف بشكل كامل لمدة 28 يوم وبذلك نضمن جفاف العينات بشكل كامل.

## 2- تحضير عينات FCB:

تمت عملية تحضير عينات الطوب FCB على مرحلتين، الأولى هي تحضير الرغوة، والثانية هي تحضير الخليط وإضافة الرغوة، حيث يعتمد وجود الفراغات ضمن البلوك في هذا النوع على طريقة ميكانيكية (بالخلط الميكانيكي)، فقد تم تحضير الرغوة بوضع الماء في مولد رغوة كهربائي (مولد رغوة يتم استخدامه في مغاسل السيارات) وتم بعد ذلك إضافة مادة الفا الفين سلفات بتركيز 94% وهي مادة تستخدم في صناعة مواد التنظيف مهمتها تشكيل الرغوة لها، من ثم تم تشغيل مولد الرغوة لفترة زمنية مع مراقبة الرغوة الناتجة بشكل دوري حتى اكتمال تشكيل الرغوة، وبالتزامن مع تحضير الرغوة تم تحضير خليط في برميل حيث تم وضع الجبس بنسبة 85.7% من الوزن الجاف وإضافة نسبة 14.3% من اسمنت بورتلندي وتحريك المزيج الجاف حتى تجانسه بشكل جيد، وتم بعدها إضافة الماء للخليط بشكل بطيء والمزج باستخدام خلاط،

واستمرت عملية إضافة الماء والخلط حتى الوصول الى مزيج متوسط القوام وقابل للانسكاب حيث تم التوقف عن إضافة الماء مع الاستمرار بعملية الخلط حتى تجانس المزيج بشكل جيد، تم بعدها توزيع الخليط في عدة أوعية وذلك من أجل إضافة الرغوة، حيث تم إضافة الرغوة التي تم تحضيرها بمولد الرغوة للمزيج لكل وعاء بنسبة مختلفة عن الوعاء الاخر بحيث كل عينة تختلف عن العينة الأخرى بنسبة الرغوة المضافة حيث كانت النسب % (10-15-20-25-30) وكانت عملية إضافة الرغوة مترافقة مع عملية الخلط بالخلاط حيث استمرت عملية الخلط حتى الحصول على تجانس جيد، وتم بعدها مباشرة صب الخليط في قوالب خشبية بأبعاد معينة مناسبة للاختبارات التي ستجري على العينات، حيث تكون الجدران الداخلية للقوالب مطلية بالزيت من أجل أن يشكل عازلاً بين البلوك والقالب بعد جفافه وعدم التصاقه، تم اخراج العينات من القوالب بعد نصف ساعة من عملية الصب حيث حصلت العينات على قوام جيد متصلب لدرجة مناسبة لإخراجها دون حدوث تشوهات، وتم نشرها في الشمس حتى تجف بشكل جيد لمدة 28 يوم لضمان جفافها بشكل جيد.



الشكل (7) عملية انتاج الرغوة ومزجها مع الاسمنت

دراسة مقارنة الخواص الحرارية والميكانيكية الأفضل للطوب الرغوي المحضّر ببودرة الألمنيوم وآخر بألفا أولفين سلفات كعوامل مفرغة



الشكل (8) يبين العينات الناتجة

### اجراء الاختبارات:

بعد جفاف العينات بشكل كامل والتي بلغ عددها عشرة عينات من نوع CLC وعشر عينات FCB تم البدء بإجراء الاختبارات وتحديد مواصفات العينات المدروسة وقد جرت الاختبارات التالية:

1- تحديد الكثافة: تم تحديد كثافات العينات عن طريق تحديد حجم ووزن العينات، حيث تم تحيد أحجامها عن طريق معرفة أبعادها (الطول x العرض x الارتفاع)، أما أوزانها فقد تم تحديدها باستخدام ميزان الكتروني دقيق، ومن خلال تحديد الحجم والوزن وتم تطبيق قانون حساب الكثافة وهو:

$$\rho = \frac{G}{V} \quad (3)$$

حيث:

$\rho$ : كثافة العينة بعد الجفاف وتقدر بـ  $\text{kg/m}^3$ .

G: وزن العينة ويقدر بـ  $\text{kg}$ .

V: حجم العينة ويقدر بـ  $\text{m}^3$ .

تم تحديد كثافة العينات من نوع CLC حيث بلغت (1004,936,804,717,598)

$\text{kg/m}^3$  للعينات ذات نسب بودرة المنيوم % (0.2-0.4-0.6-0.8-1) على الترتيب.

وبلغت الكثافات للعينات من نوع FCB  $kg/m^3$  (711,613,563,480,401) ذات نسب رغوة % (10-15-20-25-30) على الترتيب.

2- قياس الموصلية الحرارية: تم تحديد معامل التوصيل الحراري باستخدام جهاز قياس الموصلية الحرارية المبين في الشكل (5) وقد بلغ معامل التوصيل الحراري لعينات CLC  $W/m.K$  (0.51,0.45,0.37,0.29,0.21) للعينات ذات نسب بودرة المنيوم -0.4-0.2) % (0.6-0.8-1) على الترتيب.

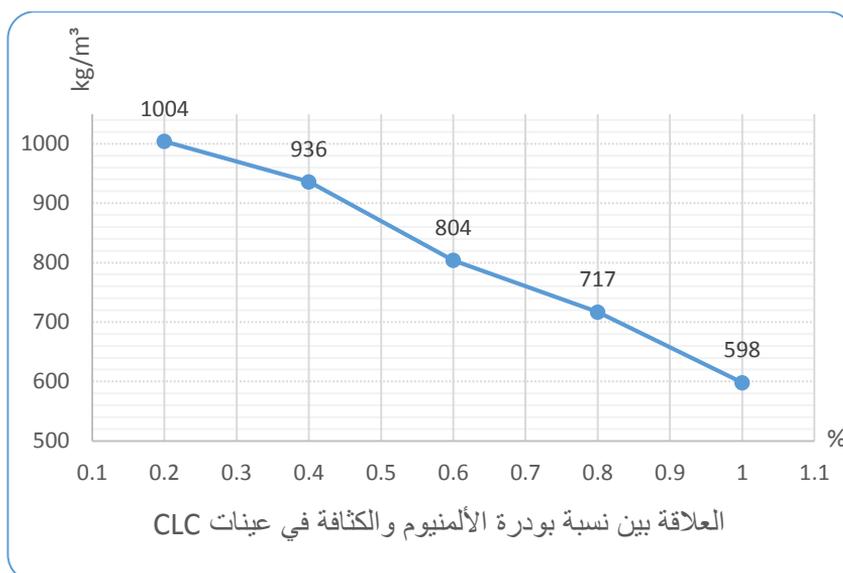
بينما كان معامل التوصيل الحراري لعينات FCB (0.27,0.23,0.15,0.13,0.09)  $W/m.K$  ذات نسب رغوة % (10-15-20-25-30) على الترتيب.

3- تحديد إجهاد الكسر الناتج عن الضغط: تم اخضاع جميع العينات لجهاز تحديد إجهاد الكسر الناتج عن الضغط الواضح في الشكل (6).

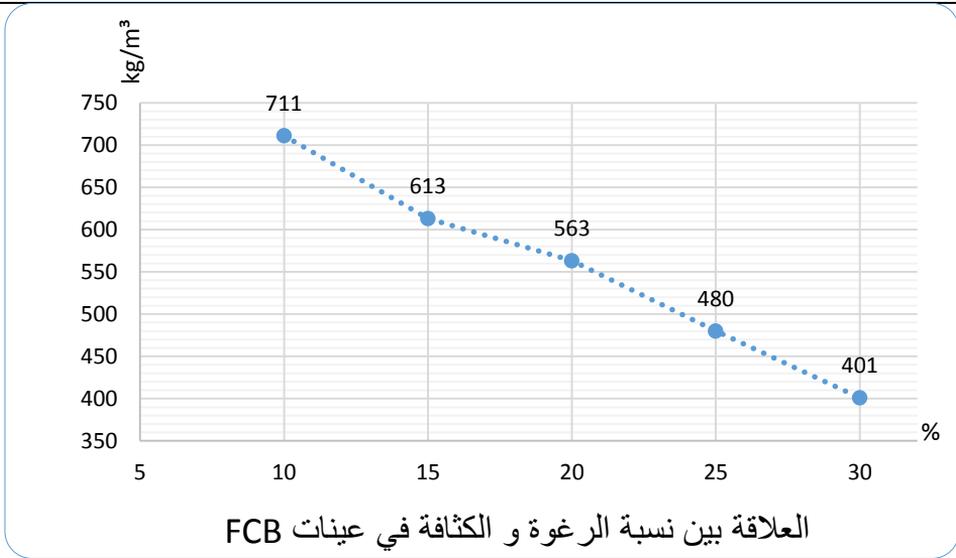
بلغ إجهاد الكسر الناتج عن الضغط لعينات CLC (22.6,18.4,17.5,15.2,14.1)  $kg/cm^2$  للعينات ذات نسب بودرة المنيوم % (0.2-0.4-0.6-0.8-1) على الترتيب. وقد بلغ هذا الإجهاد في عينات FCB  $kg/cm^2$  (18.5,14.2,11.1,8.4,6.2) ذات نسب رغوة % (10-15-20-25-30) على الترتيب.

### النتائج والمناقشة:

بعد الانتهاء من الاختبارات على جميع عينات CLC و FCB وبالنظر الى نتائج هذه الاختبارات، أظهرت نتائج تحديد الكثافة لعينات CLC المدروسة تغيراً في الكثافة وذلك مع تغير نسبة بودرة الألمنيوم المضافة للعينات، ويبين الشكل (9) العلاقة بين نسبة بودرة الألمنيوم المستخدمة والكثافة الناتجة.



الشكل رقم (9) مخطط يبين العلاقة بين نسبة بودرة الألمنيوم والكثافة في عينات CLC عند النظر على المخطط المبين في الشكل (9) نجد بأن الكثافة تتخفض بزيادة نسبة بودرة الألمنيوم المضافة للخليط، حيث بلغت الكثافة  $1004 \text{ kg/m}^3$  عند نسبة 0.2% بودرة ألمنيوم وقد بلغت الكثافة  $598 \text{ kg/m}^3$  عند نسبة 1% ، ويمكن تفسير ذلك بأنه بزيادة بودرة الألمنيوم تزداد الغازات التي تنتج عن تفاعل بودرة الألمنيوم بالخليط والتي تبقى ضمن المزيج على شكل فقاعات هواء منتشرة ضمن المزيج وبالتالي تقل نسبة المادة الاسمنتية مع ازدياد في نسبة الهواء ضمن الخلطة وهذه النسبة المتزايدة من الهواء تعمل على تقليل الكثافة للعينة.



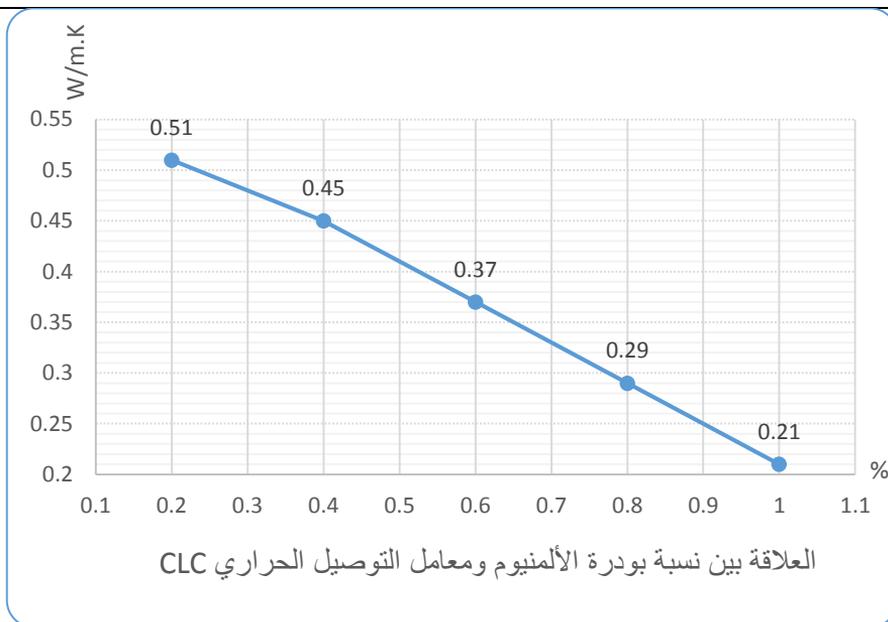
الشكل رقم (10) مخطط يبين العلاقة بين نسبة الرغوة والكثافة في عينات FCB

يُظهر الشكل (10) انخفاضاً واضحاً في كثافة العينات عند زيادة نسبة الرغوة المضافة للخليط، حيث تعمل زيادة نسبة الرغوة على زيادة كمية الهواء ضمن الخليط على شكل فقاعات هوائية متوزعة ضمن العينة والذي يعمل بدوره على خفض كثافة العينة ككل، فقد بلغت الكثافة 711 kg/m<sup>3</sup> عند نسبة رغوة 10% ، كما بلغت 401 kg/m<sup>3</sup> عند نسبة 30%.

من الملاحظ أن انخفاض الكثافة في عينة FCB يفوق انخفاضها في عينة CLC، وهذا يعطي عينة FCB ميزة خفة الوزن مقارنةً مع عينة CLC ويعتبر كلا النوعين يملكان أوزان خفيفة والتي تعمل بدورها على تخفيض الحمولات على الأبنية وبالتالي تقليل كميات مواد البناء المستخدمة.

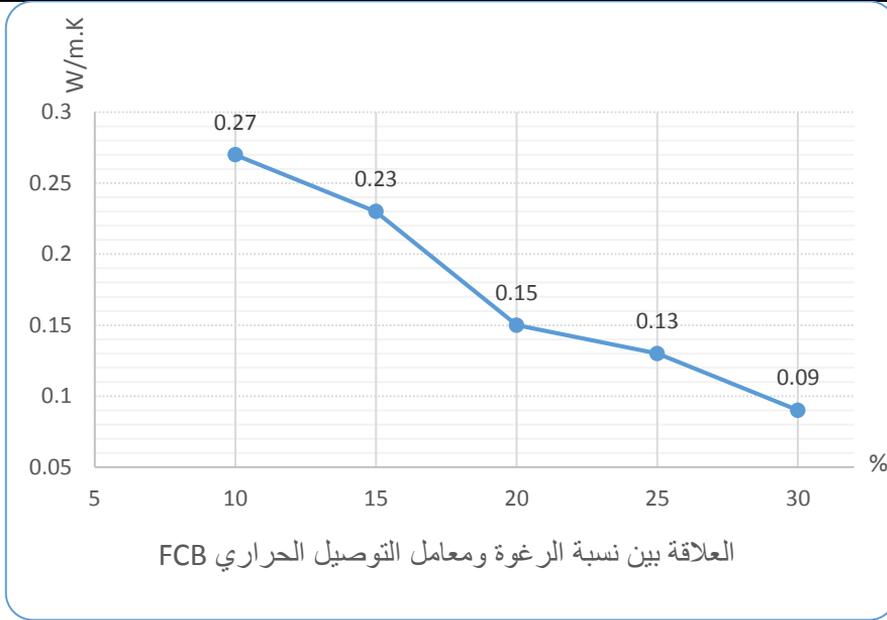
تم رسم مخطط العلاقة التي تربط بين نسبة بودرة الألمنيوم المضافة ومعامل التوصيل الحراري في الشكل (11)، والعلاقة التي تربط نسبة الرغوة المضافة ومعامل التوصيل الحراري في الشكل (12).

دراسة مقارنة الخواص الحرارية والميكانيكية الأفضل للطوب الرغوي المحضّر ببودرة الألمنيوم وآخر بألفا أولفين سلفات كعوامل مفرّغة



الشكل رقم (11) مخطط يبين العلاقة بين نسبة بودرة الألمنيوم ومعامل التوصيل الحراري في عينات CLC

يُظهر الشكل (11) الخاص بعينات CLC أن معامل التوصيل الحراري ينخفض بزيادة نسبة بودرة الألمنيوم المضافة للعينات، فقد بلغ معامل التوصيل الحراري في عينات CLC  $0.51 \text{ W/m.K}$  عند نسبة بودرة ألمنيوم مضافة  $0.2\%$ ، كما بلغ  $0.21 \text{ W/m.K}$  عند نسبة  $1\%$ ، ويفسر ذلك أنه كلما زادت نسبة بودرة الألمنيوم يزداد وجود الفقاعات الهوائية ضمن التركيب الهيكلي للعينات المدروسة، وإن زيادة وجود هواء في بنية العينات يعمل على زيادة المقاومة الحرارية وعلى تغيير طبيعة انتقال الحرارة ضمن مسام العينة من التوصيل الى الحمل وهذا يعمل على زيادة المقاومة الحرارية ضمن الفجوات كونها ممتلئة بالهواء ذو معامل التوصيل الحراري المنخفض وبالتالي ينتج عن ذلك معامل توصيل حراري اجمالي منخفض للعينة ككل.



الشكل رقم (12) مخطط يبين العلاقة بين نسبة الرغوة ومعامل التوصيل الحراري في

عينات FCB

نجد من الشكل (12) الخاص بعينات FCB نجد بأن معامل التوصيل الحراري ينخفض بزيادة نسبة الرغوة المضافة للخليط حيث بلغ معامل التوصيل الحراري  $0.27\text{W/m.K}$  عند نسبة رغوة مضافة 10%، بينما بلغ  $0.09\text{W/m.K}$  عند نسبة 30%. وتفسير ذلك هو زيادة نسبة الفقاعات الهوائية ضمن العينات والذي يعمل بدوره على زيادة المقاومة الحرارية للعينة ككل من خلال معامل توصيل حراري منخفض للهواء وتغير طبيعة انتقال الحرارة من انتقالها بالتوصيل الى انتقالها بالحمل عبر الهواء ذي معامل التوصيل الحراري المنخفض.

من أجل اجراء مقارنة للنتائج من حيث معامل التوصيل الحراري لعينات CLC مع عينات FCB نقوم باجراء هذه المقارنة في المنطقة التي تتساوى فيها الكثافات في كلا النوعين من العينات حيث أن هذه المنطقة تمتد بين الكثافتين  $(711-598)\text{kg/m}^3$ ، فنجد أن معامل التوصيل الحراري للعينة ذات الكثافة  $711\text{kg/m}^3$  يبلغ  $0.286\text{W/m.K}$  في عينات CLC بينما بلغ

دراسة مقارنة الخواص الحرارية والميكانيكية الأفضل للطوب الرغوي المحضّر ببودرة الألمنيوم وآخر بألفا أولفين سلفات كعوامل مفرغة

المعامل  $0.27W/m.K$  في عينات FCB. وعند كثافة  $598kg/m^3$  بلغ معامل التوصيل الحراري في عينات CLC  $0.21W/m.K$  بينما بلغ هذا المعامل عند نفس الكثافة في عينات FCB  $0.19W/m.K$ . من خلال مقارنة معاملات التوصيل عند ذات الكثافات نجد بأن معامل التوصيل الحراري لعينات FCB أخفض منه في عينات CLC ويمكن أن يعود السبب لهذه النتيجة بأن معامل التوصيل الحراري للخلطة الاسمنتية دون فقاعات هواء في FCB أخفض منه في خلطة CLC كون احتواء الأول على نسبة جبس مرتفعة تصل الى 85% من مجمل الخليط الجاف حيث يعد معامل التوصيل الحراري للجبس منخفض نسبةً للمكونات الباقية، كما أن بودرة الألمنيوم المستخدمة في CLC قد يبقى منها جزء غير متفاعل والذي يعمل بدوره على زيادة الناقلية الحرارية كونها بودرة معدنية تملك معامل توصيل حراري مرتفع. وعند مقارنة المعامل بشكل مطلق للعينات نجد فرقاً كبيراً في معامل التوصيل الحراري لصالح FCB لذات الأسباب المذكورة سابقاً بالإضافة لنسبة الهواء الكبيرة ضمن العينات على شكل فقاعات التي تصل لـ 30% والتي تظهر أيضاً من خلال الكثافة المنخفضة للعينة ذات أقل معامل توصيل حراري. بعد ذلك تم تبيان العلاقة التي تربط بين نسبة بودرة الألمنيوم وبين إجهاد الكسر الناتج عن الضغط في عينات CLC والمبينة في الشكل (13)

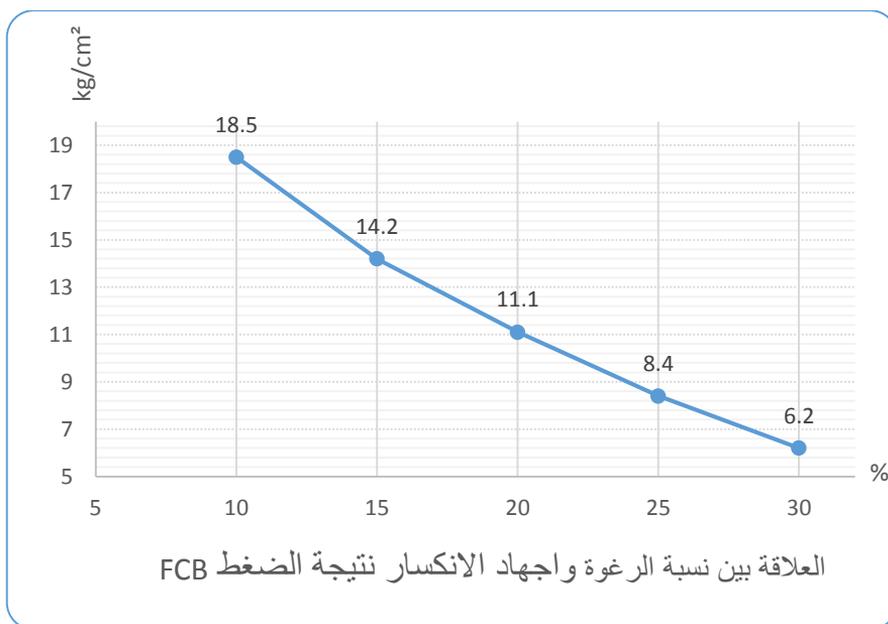


الشكل رقم (13) مخطط يبين العلاقة بين نسبة بودرة الألمنيوم واجهاد الانكسار نتيجة الضغط في عينات CLC

يُظهر الشكل (11) الخاص بعينات CLC أن مقاومة الكسر الناتجة عن الضغط في العينات تتغير بتغير نسبة بودرة الألمنيوم المضافة للعينات، فنجد أنخفاض في تلك المقاومة مع زيادة في نسبة بودرة الألمنيوم، فقد بلغت مقاومة الكسر  $22.6 \text{ kg/cm}^2$  عند نسبة بودرة المنيوم 0.2% وهبطت هذه المقاومة إلى  $17.5 \text{ kg/cm}^2$  عند نسبة 0.6% واستمرت هذه المقاومة بالهبوط حتى بلغت  $14.1 \text{ kg/cm}^2$  عند نسبة 1% من بودرة الألمنيوم. يمكن تفسير ذلك بأن زيادة نسبة بودرة الألمنيوم تعمل على زيادة نسبة فقاعات الهواء في العينات على حساب المادة الصلبة (المادة الرابطة) وذلك يقلل الروابط في بنية العينات ويزيد من نقاط الضعف من الناحية الميكانيكية، حيث تضعف البنية الهيكلية للعينات مع زيادة نقاط الضعف الناتجة عن زيادة فقاعات الهواء في العينات.

دراسة مقارنة الخواص الحرارية والميكانيكية الأفضل للطوب الرغوي المحضّر ببودرة الألمنيوم وآخر بألفا أولفين سلفات كعوامل مفرغة

من حيث طبيعة الانكسار عند انهيار العينات نتيجة الضغط، تم ملاحظة أنه في العينات ذات نسب منخفضة من بودرة الألمنيوم تنكسر العينات بشكل فجائي يمتد على شكل شقوق طولانية ممتدة موازية لمحور الضغط ثم تنهار العينة بشكل كامل، أما في العينات ذات نسب مرتفعة من بودرة الألمنيوم فإن الانكسار يبدأ تدريجياً بشكل انهيارات موضعية ذات طبيعة لدنة وتستمر بذلك حتى تنهار العينة بشكل كامل، ومع أن طبيعة الانهيار في الحالة الثانية يكون أفضل من حيث طبيعته إلا أن هذا الانهيار يحدث عند قيم منخفضة بشكل كبير مقارنة بقيم الانهيار في الحالة الأولى، أي أنه انخفاض نسبة البودرة تؤدي بالضرورة إلى زيادة متانة العينات.



الشكل رقم (14) مخطط يبين العلاقة بين نسبة الرغوة واجهاد الانكسار نتيجة الضغط

في عينات FCB

من خلال الشكل (14) الذي يبين العلاقة بين نسبة الرغوة واجهاد الانكسار نتيجة الضغط في عينات FCB نجد بأن سلوك الانكسار للعينات مشابه لسلوك الانكسار في عينات CLC حيث

ينخفض اجهاد الكسر نتيجة الضغط مع زيادة نسبة الرغوة المضافة للعينات فقد كان اجهاد الكسر في العينات التي فيها نسبة الرغوة 10% هو  $18.5\text{kg/cm}^2$  وانخفض هذا الاجهاد ليصبح  $11.1\text{kg/cm}^2$  عند نسبة رغوة تبلغ 20% واستمر هذا الهبوط في الاجهاد مع استمرار زيادة نسبة الرغوة ليصبح  $6.2\text{kg/cm}^2$  عند نسبة رغوة بلغت 30%. التفسير في ذلك مشابه لذلك الحاصل في عينات CLC مع وجود اخلاف واضح من حيث القيم، حيث نجد عند المقارنة أن عينات FCB أقوى بشكل واضح من عينات CLC سواءً أكانت المقارنة عند كثافات متشابهة أو المقارنة بشكل مطلق، حيث كانت أكبر مقاومة انكسار بالطلق في عينة CLC  $22.6\text{kg/m}^2$  التي تحمل نسبة بودرة ألمنيوم 0.2%، يمكن تفسير ذلك من خلال نسبة الاسمنت العالية في عينات CLC والتي تبلغ 55% مقارنةً مع عينات FCB والتي تبلغ فيها نسبة الاسمنت 14.3%، حيث يعمل الاسمنت كمادة رابطة تزيد من متانة العينات.

من خلال مناقشة النتائج بالمجمل يمكن ملاحظة تفوق عينات FCB على عينات CLC من ناحية انخفاض الكثافة (انخفاض الوزن) والعزل الحراري، بينما تفوقت عينات CLC على عينات FCB من ناحية مقاومتها للكسر.

#### الاستنتاجات والتوصيات:

من خلال الدراسة التي تمت أصبح من الممكن صياغة بعض الاستنتاجات على النحو الآتي:

1. أكدت الدراسة نجاح تصنيع نوعين من البلوك الرغوي خفيف الوزن باستخدام بودرة الألمنيوم للنوع الأول وألفا ألفين سلفات للنوع الثاني.
2. بينت نتائج تحديد الكثافة أن البلوك من نوع FCB أقل كثافة من بلوك CLC وأن كثافة كلا النوعين منخفضة مقارنةً بالبلوك التقليدي حيث تراوحت الكثافة في النوع CLC بين (1004-598) $\text{kg/m}^3$  بينما تراوحت في البلوك من النوع FCB بين (711-401) $\text{kg/m}^3$  وتعد هذه

الكثافات منخفضة مقارنةً مع كثافة البلوك التقليدي التي تبلغ كثافته  $1600\text{kg/m}^3$  [11]. وبالتالي انخفاض وزن بلوك CLC الى 37% من وزن البلوك التقليدي، ونخفاضه إلى 25% في FCB وبالتالي استخدام هذه الأنواع يعمل على خفض أوزان الجدران والتقليل من كميات حديد التسليح ومواد المونة.

3. بينت الدراسة أن معامل التوصيل الحراري للبلوك FCB أقل من البلوك CLC بالتالي FCB يمتلك مقاومة حرارية أكبر، كما بينت أن معامل التوصيل الحراري لكلا النوعين منخفض مقارنةً بالبلوك التقليدي، حيث تراوح معامل التوصيل الحراري بين  $(0.21-0.51)\text{W/m.K}$  في النوع CLC بينما تراوح بين  $(0.09-0.27)\text{W/m.K}$  في النوع FCB، وإن هذا المعامل يبلغ في البلوك التقليدي  $1.2\text{W/m.K}$ .

4. أظهرت نتائج الاختبارات الميكانيكية أن عينات CLC أكثر متانة من عينات FCB حيث تراوح إجهاد الكسر نتيجة الضغط في CLC بين  $(14.1-22.6)\text{kg/cm}^2$  بينما تراوح في عينات FCB  $(6.2-18.5)\text{kg/cm}^2$  إلا أن كلا النوعان أقل مقاومة من البلوك التقليدي والذي يتراوح إجهاد الانكسار له بين  $(30-70)\text{kg/cm}^2$ .

5. تفوقت عينة CLC على FCB من الناحية الميكانيكية بينما كانت FCB هي الأفضل من الناحية الحرارية لذلك عندما يُراد تحديد الأفضل تجب المفاضلة وفقاً لأهمية الخاصية المرادة أي المقاومة الحرارية أم الميكانيكية.

#### التوصيات:

من خلال ما سبق يمكن أن نوصي بما يلي:

- 1- اجراء أبحاث تحسن المقاومة الميكانيكية عن طريق إضافة مواد مصلبة أو ما شابه للخلطات.
- 2- عدم استخدام هذه الأنواع من البلوك لبناء جدران حمالة والاقتصر في استخدامها على جدران الأبنية الهيكلية والجدران الداخلية للتقطيع.

3- العمل على دراسة خلطات تضم النوعين السابقين من المواد المولدة للرغوة للاستفادة من ميزة كل نوع.

4- اجراء دراسة نمذجية ومحاولة الاستفادة من نتائجها لتطوير الخواص الأساسية.

5- تشجيع الشركات على البدء بإنتاج البلوك الرغوي وتعريفهم بإيجابياته.

6- تشجيع الباحثين ومراكز الأبحاث والشركات العامة والخاصة على البدء بشكل جدي بإجراء أبحاث مشابهة تشجع الاستدامة وترشيد الطاقة.

7- توفير الدعم المادي للباحثين الشباب لتشجيعهم على البحث في هذا المجال والعمل على توفير جميع مستلزمات الأبحاث العلمية اللازمة كأجهزة قياس ومعدات اخرى.

## Referencesالمراجع

1. Qarmo A and Esteifi K., 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.*
2. YANG D et al. 2020 - **Properties of the foam concrete containing waste brick powder derived from construction and demolition waste.** *Science Direct, Journal of Building Engineering, Volume 32, November 2020, 101509.*
3. IBRAHIM N et al. 2013- **Performance of Lightweight Foamed Concrete with Waste Clay Brick as Coarse Aggregate.** *Science Direct, Journal of APCBEE Procedia ,Volume 5, January 2013, Pages 497-501.*
4. LIU M et al. 2014- **Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete.** *Journal of Energy and Buildings, Volume 72, April 2014, Pages 238-245.*
5. ALSHALIF A et al. 2021- **Optimization of Bio-Foamed Concrete Brick Strength via Bacteria Based Self-Healing and Bio-**

- 
- Sequestration of CO<sub>2</sub>**, *Journal of Materials* , Volume 14, Issue 16, August 2021, 20 Pages.
6. Kumar N et al. 2018- **Experimental Study on Mechanical and Thermal Behavior of Foamed Concrete**. *Science Direct, Journal of Materials Today: Proceedings, Volume 5, Pages 8753-8760*.
  7. Wang X et al. 2018- **Incorporation of sand-based breathing bricks with foamed concrete and humidity control materials**. *Science Direct, Journal of Construction and Building Materials, Volume 175, June 2018, Pages 187-195*.
  8. Vindo B et al. 2022- **Lightweight concrete blocks produced using expanded polystyrene and foaming agent**. *Science Direct, Journal of Materials Today: Proceedings, Volume 52, Part 3, Pages 1666-1670*.
  9. Qarmo A, Bakir M and Saleh F. 2019- **Design and manufacture a thermal conductivity measurement device with an Arduino controller to manage data input and output operations**. . *magazine.albaath-univ, 41(2019), Pages 113-140*.
  10. Al Khaled B. 2019- **Improving Thermal Insulation of Walls Using New Models of Bricks**. *Study prepared to earn Master's degree in Mechanical Power Engineering, Al Baath University*.
  11. **Syrian Arab Code for the design and implementation of installations in reinforced concrete**.