

ألواح الملح الصخري وتوظيفها في التشكيل الفراغي في العمارة الداخلية المستدامة

أ. د. / ايمان محمد فرج

elsahli@albahith.edu.ly

em.elsahli@academy.edu.ly

أسماء أبوبكر عبدالعالي الفار

ayaalf62@gmail.com

الملخص:

يسلط هذا البحث الضوء على أهمية دمج الاستدامة البيئية بالعمارة الداخلية المعاصرة من خلال إعادة اكتشاف وتطوير الخامات الطبيعية المحلية وقد نجحت الدراسة في تقديم حلول مبتكرة لمشكلة محدودية الاستغلال التصميمي للملح الصخري الطبيعي الناتج عن طبيعته الهشة وحساسيته العالية للرطوبة، وذلك عبر معالجته برانتج الإيبوكسي .

أثبتت المنهجية التجريبية المخبرية القائمة على عينات من ملح منطقة "أبو كماش" إمكانية إنتاج ألواح هجينة مستقرة ومتينة، تتمتع بخصائص بصرية وجمالية فائقة كنفاذية الضوء والتنوع الملسمي واللوني البلوري ولا يقتصر هذا التوظيف لـ ألواح الملح على تحقيق إيقاعات تشكيلية وديكورية مرنة كالمقاطع والكسوات داخل الحيز الفراغي فحسب، بل يمتد أثره الإيجابي ليشمل البعدين السيكلوجي والفسيلوجي للمستخدم ، فالخامة تعمل ديناميكياً على إطلاق الأيونات السالبة وتنقية الهواء الداخلي، مما يقلل التوتر ويدعم مفاهيم "العمارة العلاجية" والتصميم البيوفيلي، تفتح هذه النتائج آفاقاً واعدة للاستثمار الأخضر والتصنيع التجاري عبر تحويل الموارد المحلية إلى عناصر معمارية ذات قيمة اقتصادية وبيئية مضافة .وتؤكد الدراسة أن التوظيف الذكي لهذه المواد يقلل الاعتماد على الأنظمة الميكانيكية المستهلكة للطاقة ويسهم في خلق بيئات داخلية صحية.

الكلمات المفتاحية: ألواح الملح الصخري ، التشكيل الفراغي ، العمارة الداخلية المستدامة.

Abstracts:

This research highlights the significance of integrating environmental sustainability into contemporary interior architecture through the rediscovery and development of local natural materials. The study successfully provides innovative solutions to the limited design utilization of natural rock salt—originally caused by its fragile nature and high sensitivity to moisture—by treating it with epoxy resin.

Utilizing laboratory-based experimental methodology on salt samples from the 'Abu Kammash' region, the study demonstrates the feasibility of producing stable and durable hybrid panels. These panels exhibit superior optical and aesthetic properties, including light permeability and diverse crystalline textures and colors. The application of these salt panels extends beyond achieving flexible formal and decorative rhythms, such as partitions and wall claddings within the interior space; it also positively impacts both the psychological and physiological dimensions of the user. The material dynamically releases negative ions and purifies indoor air, thereby reducing stress and supporting the concepts of 'therapeutic architecture' and biophilic design

المقدمة:

تعد الاستدامة البيئية في العمارة الداخلية المعاصرة توجهاً حتمياً لتقليل الانبعاثات الكربونية وتحسين جودة الحياة الفراغية، مما دفع بالمصممين إلى إعادة اكتشاف المواد الطبيعية المحلية وتطويرها بما يتوافق مع المعايير البيئية الحديثة ويزر الملح الصخري كأحد الخامات الطبيعية الواعدة نظراً لخصائصه الفيزيائية والبيولوجية الفريدة، وقدرته العالية على تنقية الهواء وتنظيم الرطوبة داخل الفراغات المغلقة بشكل ديناميكي مستمر حيث إن دمج هذه الخامة في بيئة التصميم الداخلي لا يسهم فقط في تحقيق التوازن البيئي والحراري، بل يفتح آفاقاً جديدة للاستدامة تعتمد على تقليل الاعتماد على الأنظمة الميكانيكية المستهلكة للطاقة وبالتالي، يصبح توظيف ألواح الملح الصخري ركيزة أساسية لدعم التوجهات المعمارية الخضراء التي تسعى لخلق بيئات داخلية صحية ومتوافقة بيئياً مع محيطها الخارجي.⁽¹⁾

يأخذ التشكيل الفراغي في العمارة الداخلية أبعاداً جمالية ووظيفية متقدمة عند دمج الخامات الذكية والطبيعية، حيث توفر ألواح الملح الصخري إمكانات تشكيلية متميزة تتيح للمصمم التلاعب بالكتل، الفراغات، والأسطح بطرق مبتكرة وجذابة وتلعب الخصائص البصرية للملح الصخري، مثل نفاذية الضوء الطبيعي والصناعي وتدرج ألوانه الناتجة عن الشوائب المعدنية، دوراً جوهرياً في صياغة هوية الفراغ وإبراز قيمته التشكيلية والتعبيرية بشكل غير نمطي كما أن

توظيف هذه الألواح في القواطع، الكسوات الجدارية، والوحدات البنائية الداخلية يسهم في خلق إيقاعات بصرية تتفاعل مع الإضاءة لتعزز من الإحساس بالاتساع والعمق الفراغي و هذا التوظيف التشكيلي لا يقتصر على الجانب الجمالي البحت، بل يمتد ليشكل أداة مرنة في يد المصمم لإعادة صياغة العلاقات الفراغية وتوجيه حركة المستخدمين بكفاءة.⁽²⁾

يرتبط البعد السيكلوجي والفيولوجي للمستخدمين ارتباطاً وثيقاً بتركيبية المواد المكونة للمحيط الداخلي، حيث يمتلك الملح الصخري قدرة مثبتة على تحسين الحالة النفسية والصحية من خلال إطلاق الأيونات السالبة التي تقضي على الملوثات حيث يسهم هذا التأثير البيولوجي الإيجابي في تقليل مستويات التوتر والإجهاد لدى شاغلي الفراغ، مما يجعله خامه مثالية لتطوير بيئات علاجية وسكنية وتعليمية تركز على مفاهيم التصميم البيوفيلي والرفاهية الإنسانية ومن خلال دمج ألواح الملح في التشكيل المعماري الداخلي، يتم تفعيل الحواس المختلفة للمستخدم عبر التفاعل مع الملمس الطبيعي، الدفء اللوني، والنقاء الهوائي، مما يعزز الرابطة بين الإنسان والطبيعة.⁽³⁾

مشكلة البحث:

تكمن مشكلة البحث في محدودية الاستغلال الاستثماري والتصميمي للملح الصخري الطبيعي في مجال العمارة الداخلية والاستدامة البيئية، نظراً لطبيعته الفيزيائية الهشة، وحساسيته العالية للمؤثرات الجوية كالأمطار والرطوبة، مما يؤدي إلى تفتته وصعوبة تشكيله هندسياً كخامة إنشائية أو ديكوريه مستدامة في الفراغات الداخلية.

فالتساؤل الرئيسي:

كيف يمكن توظيف ألواح الملح الصخري المعالج بالأبيوكسي في التشكيل الفراغي لتحقيق متطلبات العمارة الداخلية المستدامة؟

أهمية البحث:

- 1_ إثراء المكتبة الأكاديمية ببحث يدمج الخامات الطبيعية (الملح الصخري) بالأبيوكسي لابتكار مواد هجينة متطورة.
- 2_ تزويد المصممين بخامة ديكورية مبتكرة تتميز بمرونة التشكيل الفراغي، والجمال البصري، ونفاذية الضوء العالية.

3_ دعم توجه "العمارة العلاجية" عبر استغلال خواص الملح الطبيعي في تنقية الهواء وتحسين جودة الحياة الداخلية.

4_ فتح آفاق للتصنيع التجاري والاستثمار الأخضر من خلال تحويل الملح الصخري المحلي إلى ألواح ديكورية ذات قيمة مضافة.

أهداف البحث:

- 1_ تقييم مدى كفاءة الألواح المصنعة في تحقيق معايير العمارة الداخلية المستدامة.
- 2_ بحث فرص توظيف الألواح المصنعة كبديل بيئي محلي في الفراغات المعمارية المختلفة.
- 3_ إنتاج مادة هجينة متطورة للتصنيع الديكوري من خلال تحديد المعايير التقنية المثلى لدمج الملح الصخري بالأيبوكسي وإنتاج ألواح مستقرة.

الفروض:

يؤدي توظيف ألواح الملح الصخري المعالج بالأيبوكسي في التشكيل الفراغي إلى تحقيق حلول تصميمية مبتكرة تدعم معايير الاستدامة في العمارة الداخلية.

حدود البحث:

1. الحدود الموضوعية :

تقتصر الدراسة على دراسة الخصائص الفيزيائية والجمالية لـ ألواح الملح الصخري، وبحث طرق توظيفها في التشكيل الفراغي (كقواطع وكسوات)، وقياس أثرها بيئياً وصحياً وفق معايير العمارة الداخلية المستدامة.

2. الحدود المكانية:

تتركز الدراسة على الفراغات المعمارية الداخلية التي تتطلب كفاءة بيئية وصحية عالية (مثل الفراغات السكنية، العلاجية، أو بيئات العمل)، مع الاعتماد على خامات الملح الصخري المتوفرة محلياً وإقليمياً.

3. الحدود الزمنية:

تغطي الدراسة الفترة الزمنية الحالية في الفصل الدراسي 2026 لمواكبة أحدث التقنيات والدراسات والأبحاث المرتبطة بمعالجة وتوظيف هذه الخامات في الفراغ الداخلي.

مصطلحات البحث:

1. ألواح الملح الصخري :

هي وحدات بنائية مصنعة أو مستقطعة من كتينات الهاليت الطبيعي (كلوريد الصوديوم النقي)، تتميز بتركيب بلوري وكثافة نوعية تسمح بتشكيلها على هيئة بلاطات أو ألواح ذات سماكات متعددة، وتستخدم كعناصر إنشائية أو تكميات جدارية للاستفادة من خصائصها الفيزيائية الضوئية والبيئية.⁽⁵⁾

الملح الصخري: رواسب كيميائية تتشكل نتيجة لتبخر محلول ملحي مشتق عادة من مياه البحر.⁽⁶⁾

التعريف الإجرائي: هي بلاطات وأسطح مصنعة من خامة الملح الصخري الطبيعي بسماكات مدروسة، تُدمج في عناصر العمارة الداخلية (كالقواطع والكسوات) لاستثمار خصائصها التشكيلية والبيئية في هذا البحث.

2. التشكيل الفراغي :

هو عملية تنظيم وإعادة صياغة العلاقات بين الكتل والأسطح والفراغات داخل حيز معين، باستخدام عناصر التصميم وأسسها (كالخط، واللون، والإيقاع، والانتزان) لتحقيق أهداف وظيفية وجمالية تعبر عن هوية الفراغ المعماري وتوجه سلوك مستخدميه.⁽⁷⁾

كما عرفه النجار بأنه: الصياغة الهندسية والفنية التي يقوم بها المصمم لتحويل الفراغ المصمت من مجرد حيز ثلاثي الأبعاد إلى بيئة ديناميكية متكاملة، من خلال التحكم في المحددات الأفقية والرأسية والمؤثرات البصرية كالضوء والظل.⁽⁸⁾

التعريف الإجرائي: هو الأسلوب التطبيقي الذي يتم عبره صياغة وتنظيم ألواح الملح الصخري داخل الحيز الداخلي (سواء كقواطع، أو جدران مضيئة، أو مجسمات) لخلق علاقات جمالية ووظيفية مبتكرة.

3. العمارة الداخلية المستدامة :

منهج فكري وتطبيقي في تصميم وتخطيط الفراغات الداخلية يهدف إلى تقليل الأثر البيئي السلبي للمباني، من خلال الاستخدام الكفء للطاقة والموارد، واعتماد خامات محلية متجددة وصديقة للبيئة، مع ضمان بيئة داخلية صحية وخالية من الملوثات.⁽⁹⁾

كما عرفه العامري بأنه : فرع من فروع التصميم المعماري يركز على تحقيق التوازن بين متطلبات الإنسان وشروط البيئة داخل الفراغ، عبر دمج التكنولوجيا الذكية والمواد الطبيعية لتقليل الاستهلاك الميكانيكي للطاقة وتحسين جودة الحياة والأداء البيئي للمبنى.⁽¹⁰⁾

التعريف الإجرائي: هي المنظومة التصميمية التي تسعى لتحسين جودة الهواء، الترشيح الحراري والضوئي، وتحقيق الرفاهية الصحية داخل الفراغ في هذا البحث عبر التوظيف الذكي لألواح الملح الصخري.

مادة الايبوكسي:

هو عبارة عن مركب كيميائي سائل لزج متبلر (بوليمر صلب بالحرارة)، يتكون من جزأين أساسيين هما الراتنج (Resin) والمصلد أو المقسي (Hardener)، وعند خلطهما يحدث تفاعل كيميائي حراري يؤدي إلى تحول المادة من الحالة السائلة إلى مادة صلبة شديدة الالتصاق والصلابة، وتتميز بمقاومة عالية جداً للاحتكاك، الرطوبة، الكيماويات، والعوامل الجوية.⁽¹¹⁾

كما عرفه حسنين بأنه: مادة بوليميرية متصلبة حرارياً (Thermosetting Polymer) تمتلك خواصاً ميكانيكية وتركيبية متميزة؛ حيث يشكل شبكة فراغية ثلاثية الأبعاد بعد التصلب تمنحه متانة عالية ومقاومة ممتازة للصدمات والشد، ويُستخدم كمادة أساس (Matrix) في صناعة المتراكبات المدعمة بالمواد النانوية والميكروية لتعزيز الخواص الحرارية والكهربائية.⁽¹²⁾

التعريف الإجرائي: "الإيبوكسي هو مادة سائلة شفافة أو ملونة تخطط بنسب وزنية محددة مع المصلد الخاص بها، وتُسكب أو تُدهن على الأسطح والفراغات الداخلية المعالجة مسبقاً، لتتحول خلال فترة زمنية محددة إلى طبقة صلبة، ملساء، خالية من الفواصل، وعازلة تماماً للرطوبة والعوامل البيئية.

الدراسات السابقة:

الدراسة الاولى: عبدالله ، تقى، 2020، (نظم الاستدامة في العمارة):

ملخص الدراسة:

يتناول البحث مفهوم النظم المستدامة كأحد المفاهيم المؤثرة في عملية التصميم المعماري، إذ تعرف على انها "تكامل الانظمة الطبيعية مع الانماط الانسانية وفق منهج تصميمي متعدد الابعاد لإعطاء الاستمرارية والتفرد للنتاج"، وبذلك تتحدد المشكلة البحثية في (قصور التصور

النظري لنظم الاستدامة في العمارة وعلاقتها بالتصميم المعماري)، ويهدف البحث إلى توضيح استراتيجية نظم العمارة المستدامة فضلاً عن مبادئها وأبعادها، وبناءً عليه يفترض البحث أن لمؤشرات النظم المستدامة أثر إيجابي في صياغة النصوص المعمارية. ولغرض معالجة القضية البحثية وتحقيق أهداف البحث والتحقق من فرضيته تم أولاً بناء إطار معرفي، ثم إطار نظري شامل لنظم العمارة المستدامة استخلص من الطروحات المعمارية والطروحات السائدة ليتجسد بصيغته النهائية في ثلاثة مفردات رئيسية، وهي: استراتيجية نظم العمارة المستدامة، ومبادئ نظم العمارة المستدامة، وإبعاد نظم العمارة المستدامة، ثم عمل دراسة استكشافية تقيم مستوى جودتها، وأخيراً تم التوصل إلى مجموعة من الاستنتاجات التي نصت على وجود علاقة تعالقية بين ثنائية "نظم العمارة، ونظم الاستدامة"، ومن الناحيتين: "الهندسية، والوظيفية"؛ نظراً لأثرهما كمدخل بيئية وبيومناخية وإيكولوجية إذ تكمن فلسفتها في محاكاتها للنظم الطبيعية شكلياً وعملياً مما ينسق العلاقات الفراغية بين المبنى والبيئة المحيطه به ويضمن ديموميته. (13)

أوجه التشابه:

1. يلتقي البحثان في السعي لتحقيق "الاستدامة والديمومة" كمنهج أساسي في العملية التصميمية.
2. يتفقان في فلسفة دمج عناصر الطبيعة ومحاكاتها وظيفياً وجمالياً لتنسيق العلاقة بين الفراغ والإنسان.
3. يشتركان في الربط بين الجانب التشكيلي (الهندسي) والأداء البيئي والصحي (الوظيفي) للمنتج المعماري.

أوجه الاختلاف:

تركز الدراسة المرجعية على "إطار نظري شمولي" لعمارة البيئة الخارجية، بينما تركز دراستي على "تطبيق عملي تخصصي" لمادة معينة داخل الفراغ المعماري الداخلي.

الدراسة الثانية: فيسبنا بونجيركاروف Iorian Musso ، 2021 ، (الملح كخامة بناء الوضع الحالي والفرص المستقبلية).

ملخص الدراسة:

هدفت الدراسة إلى تحديد مواد الملح المستخدمة في البناء عبر التاريخ، وتحليل خصائصها الفيزيائية والميكانيكية، وتحديد التطبيقات الواعدة في قطاع البناء واعتمدت الدراسة على منهج المراجعة الأدبية، وتصنيف مواد الملح إلى ثلاث مجموعات رئيسية: الملح الخام، والملح المركب، والملح المُعالج. خلصت الدراسة إلى أن الملح استخدم كخامة بناء لقرون طويلة وله إمكانيات مستقبلية واعدة، وأوصت باستخدام الملح في الخلطات مع مواد أخرى لزيادة كفاءة الموارد، وتحليل الأداء الحراري والرطوبي للمواد الملحية، وتطوير هياكل مؤقتة مثل الأجنحة والمعارض، واستخدامه كمادة حشو للجدران في المناخات الجافة والحارة، وتعديله بتقنيات البناء المختلفة كالطباعة ثلاثية الأبعاد.⁽¹⁴⁾

أوجه التشابه:

1. يشترك البحثان في اتخاذ "الملح" كمادة ومحور أساسي بالدراسة لاستكشاف إمكانياتها في قطاع البناء والعمارة.
2. يتفقان في السعي نحو توظيف خامات بيئية بديلة ومستدامة لرفع كفاءة المواد وتحقيق معايير العمارة المستدامة.
3. يلتقي البحثان في استشراف حلول مبتكرة للملح؛ حيث ذكرت الدراسة (المُعالج والطباعة ثلاثية الأبعاد) وتناولت أنت (الألواح والتشكيل الفراغي).

أوجه الاختلاف:

تبحث الدراسة المرجعية في الخصائص الهيكلية والميكانيكية للملح للاستخدام الإنشائي الخارجي (كالحشو والأجنحة)، بينما يركز بحثي على الخصائص الجمالية والبيئية للملح لتوظيفه في "التشكيل الفراغي الداخلي".

الدراسة الثالثة: بونجيركار و Musso ، 2022 ، (الأداء الحراري والرطوبي للملح لتطبيقات الأسطح الداخلية).

ملخص الدراسة:

هدفت الدراسة إلى إجراء بحث أساسي حول الأداء الحراري والرطوبي للملح لتطبيقات الأسطح الداخلية في ستة ظروف مناخية مختلفة حيث استخدمت الدراسة نماذج محاكاة (باستخدام برامج WUFI®Pro و WUFI®Plus) وقياسات ميدانية وأظهرت النتائج أن الملح يوفر أفضل

استجابات حرارية ورطوبة في المناخات الحارة الجافة، وأسوأها في المناخات الحارة الرطبة وفي المقارنة مع الجبس، تبين أن الملح يستهلك طاقة أعلى قليلاً (للتدفئة والتبريد وإزالة الرطوبة) بسبب موصلية حرارية أعلى ومقاومة رطوبة حيث توصلت هذه الدراسة الي سد الفجوة المعرفية حول الأداء الحراري والرطوبي للملح وأظهرت إمكانيات استخدامه في التطبيقات الداخلية.⁽¹⁵⁾

أوجه التشابه:

1. يتفق البحثان في التركيز على توظيف الملح في "التطبيقات والأسطح الداخلية" للمباني وليس الاستخدام الإنشائي الخارجي.

2. يشترك البحثان في دراسة الخصائص الحرارية والبيئية للملح لتحديد مدى ملاءمته لمعايير العمارة المستدامة.

3. يلتقي البحثان في تقديم مادة الملح كخامة واحدة ومبتكرة في التصميم الداخلي لم تكن مستغلة بالشكل الكافي سابقاً.

أوجه الاختلاف:

تعتمد الدراسة المرجعية على "المحاكاة الرقمية والقياس الفيزيائي" للأداء الحراري والرطوبي، بينما يركز بحثي على "التشكيل الفراغي والجمالي" والتوظيف المعماري لألواح الملح الصخري.

الجانب النظري:

تعد العمارة المستدامة والتصميم الداخلي البيئي من أهم الركائز لمواجهة التحديات البيئية المعاصرة ولا تقتصر الاستدامة على تقليل استهلاك الطاقة في تشغيل المبنى فحسب، بل تمتد لتشمل الدورة الحياتية الكاملة للمواد المستخدمة في الفراغات الداخلية، حيث يقضي الإنسان معظم وقته، مما يجعل جودة البيئة الداخلية أمراً حاسماً للصحة والكفاءة البيئية.⁽¹⁶⁾

مفهوم الاستدامة في المباني وأهم معاييرها:

الاستدامة في المباني هي منظومة متكاملة تهدف إلى تقليل الأثر البيئي السلبي للمنشآت وتحسين كفاءة استهلاك الموارد مثل الطاقة والمياه والمواد. تعتمد المباني المستدامة على عدة معايير رئيسية يتم تقييمها عبر أنظمة عالمية مثل (LEED) أو (BREEAM):⁽¹⁷⁾

- **كفاءة الطاقة:** استخدام أنظمة الإضاءة الذكية والتوجيه الجغرافي الصحيح لتقليل الاعتماد على التكييف والإنارة الاصطناعية.

- إدارة الموارد المائية: تدوير المياه الرمادية واستخدام تقنيات ترشيد الاستهلاك.
- جودة البيئة الداخلية (IEQ): توفير التهوية الطبيعية الكافية، والتحكم الحراري، والاعتماد على الإضاءة النهارية المتوازنة.
- استدامة موقع البناء: الحفاظ على النظام البيئي المحيط وتقليل الانبعاثات الناتجة عن عمليات التشييد.



الصورة رقم (1) توضح شهادات LEED العالمية

المصدر: شبكة الانترنت

معايير الاستدامة في الخامات الداخلية:

التصميم الداخلي المستدام يركز بشكل مكثف على "التأثير المباشر" للمواد على المستخدمين وعلى البيئة. ولتحقيق الاستدامة في الخامات الداخلية، يجب مراعاة المعايير التالية:

1. تقييم الدورة الحياتية للمادة (Life Cycle Assessment – LCA)

يجب تتبع الأثر البيئي للخامة بدءاً من استخراج المواد الخام، مروراً بالتصنيع والنقل، وصولاً إلى طريقة التخلص منها أو إعادة تدويرها (Cradle to Cradle). ويُفضل دائماً استخدام المواد المحلية لتقليل انبعاثات الكربون الناتجة عن عمليات الشحن والنقل.⁽¹⁸⁾

2. المواد المتجددة والمعاد تدويرها

الاعتماد على خامات سريعة التجدد في الطبيعة (مثل البامبو والفلين والأخشاب المعتمدة من مصادر مستدامة) أو خامات مدمج بها نسب عالية من المواد المعاد تدويرها كالزجاج والبوليمرات المعالجة بطرق بيئية نظيفة.⁽¹⁹⁾

3. انخفاض المركبات العضوية المتطايرة (Low-VOCs)

تعتبر جودة الهواء الداخلي معياراً ذهبياً للاستدامة. الخامات الداخلية (كالدهانات، المواد اللاصقة، والورنيش) يجب أن تكون خالية أو منخفضة الانبعاثات الكيميائية السامة لحماية صحة المستخدمين وتقادي ما يعرف بـ "متلازمة المباني المريضة".⁽²⁰⁾

4. الكفاءة الحرارية والبصرية للمادة

اختيار خامات داخلية تساعد في العزل الحراري أو تعزز من توزيع الإضاءة الطبيعية (مثل استخدام الزجاج الذكي والمواد العاكسة بطرق مدروسة) يساهم بشكل مباشر في خفض استهلاك الطاقة الكلي للمبنى.⁽²¹⁾

طبيعة الملح الصخري وخصائصه المادية

1. التركيب الكيميائي والبلوري:⁽²²⁾⁽²³⁾

يعرف الملح الصخري كيميائياً بـ كلوريد الصوديوم (NaCl)، وهو مركب أيوني يتكون من أيونات الصوديوم الموجبة (Na^+) والكلوريد السالبة (Cl^-) المرتبطة بروابط أيونية، تترتب هذه الأيونات في شبكة بلورية مكعبة، حيث يكون كل أيون صوديوم محاطاً بستة أيونات كلوريد والعكس صحيح، مما يمنح البلورات شكلها المكعب المميز.

البلورات الصافية تكون شفافة وعديمة اللون، بينما يظهر الملح الصخري باللون الأبيض أو الوردي نتيجة الشوائب المعدنية كالأنهيدريت والجبس والدولوميت والكالسيت.

2. الخصائص الفيزيائية:

تتميز ألواح الملح الصخري بمجموعة من الخصائص الفيزيائية التي تجعلها خامة فريدة للتصميم الداخلي. تتراوح الكثافة الظاهرية للملح بين 2.17 إلى 2.25 غ/سم³، وتكون المسامية منخفضة نسبياً (أقل من 3.8% إلى 17%) نتيجة لغياب الفراغات المفتوحة داخل المادة. وتتراوح الموصلية الحرارية للملح بين 6-6.5 واط/م.ك، وتتراوح السعة الحرارية النوعية بين 0.853 و 1.224 جول/(غ.ك)، وتزيد هذه القيم بوجود الشوائب.

تشير هذه الخصائص إلى قدرة الملح على تخزين الحرارة وإطلاقها ببطء، مما يجعله مادة مناسبة لتطبيقات التخزين الحراري في المباني.

3. الخصائص الرطوبية:

يعتبر الملح الصخري مادة مسترطبة (Hygroscopic)، مما يعني قدرته على امتصاص الرطوبة من الهواء المحيط وإطلاقها عند تغير الظروف. وقد حددت الدراسات النقطة الحرجة لذوبان الملح عند رطوبة نسبية 75.3% ودرجة حرارة 20 درجة مئوية. فوق هذه النسبة، تبدأ بلورات الملح بالذوبان وتتحول إلى محلول ملحي (Brine)، وعند انخفاض الرطوبة، يتبخر الماء وتتبلور الأملاح مجدداً، وهذه العملية المتكررة تولد روابط قوية بين البلورات، وهو ما استُخدم تاريخياً لإنشاء مواد صلبة وممتنة. وهذه الخاصية تجعل الملح قادراً على تنظيم الرطوبة في الفراغات الداخلية، مما يساهم في تحسين جودة الهواء الداخلي.

التصنيفات المختلفة لمواد الملح في البناء:

صنفت الدراسات السابقة مواد الملح المستخدمة في البناء إلى ثلاث مجموعات رئيسية:

1. مواد الملح الخام (Raw Salt Materials):⁽²⁴⁾

تشمل كتل الملح الصلبة ذات المحتوى الأعلى من كلوريد الصوديوم (تصل إلى 95%)، المستخرجة مباشرة من بحيرات الملح القريبة أو مناجم الملح. استخدمت هذه الكتل تاريخياً في تشييد المباني في المناطق ذات المناخ القاسي والجاف والقريبة من مصادر الملح، كمدينة تغزة في مالي ومدينة دالول في إثيوبيا، حيث بنيت المنازل والمساجد من كتل الملح وسُقفت بجلود الإبل ومن أشهر الأمثلة المعاصرة فندق "بالاسيو دي سال" في بوليفيا، المبني من أكثر من مليون كتلة ملح مستخرجة من سطح سالار دي أويوني.

2. مواد الملح المركبة (Composite Salt Materials):⁽²⁵⁾

تتكون من خلط الملح مع مواد محلية أخرى لتحسين خواصه الميكانيكية. ومن أهم الأمثلة مادة "كارشيف" في واحة سيوة المصرية، وهي كتل ملح غنية بالصلصال والرمل تُجفف تحت أشعة الشمس وتستخدم كطوب في تقنية البناء "كرشي". وقد أثبتت الدراسات أن حركة الماء بين كتل الملح والطين تؤدي إلى تكوين بلورات ملح جديدة تزيد من المقاومة الميكانيكية للبناء و تشمل أيضاً الخلطات الحديثة كخرسانة الملح (ملح مع إسمنت) وخططات الملح والنشا المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد.

3. مواد الملح المُعالجة (Processed Salt Materials):

تُنتج هذه المواد عبر عمليات تصنيعية كالكبس أو الصهر أو التبلور الموجه. ومن الأمثلة المهمة ألواح الملح المُتبلورة التي تنتج عن طريق نمو بلورات الملح على قواعد معدنية مغمورة في أحواض التبخر، حيث يحدث التبلور بفعل الطاقة الشمسية والرياح، وهو ما طُبّق بنجاح في مشروع أبراج LUMA لإنتاج ألواح تغطي جدران المصاعد، كما تشمل المواد المُضغوطة التي تُكبس مع إضافات بسيطة لتحسين مقاومتها للرطوبة.⁽²⁶⁾

الخصائص التشكيلية والجمالية لألواح الملح الصخري:

1. الشفافية والنفذية الضوئية:

تتميز بلورات الملح الصخري بقدرتها على نقل الضوء ونشره، حيث تعمل كمواد شبه شفافة تسمح بمرور الضوء مع توزيعه بشكل متجانس، مما يخلق أجواء إضاءة ناعمة ومريحة داخل الفراغ. هذه الخاصية تجعل ألواح الملح مثالية لاستخدامها كفواصل داخلية، أو كسوة جدارية تنشر الضوء الطبيعي وتقلل الحاجة للإضاءة الصناعية، أو كعناصر إضاءة زخرفية تخلق تأثيرات بصرية فريدة.⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾



الصورة (2) توضح بلورات الملح الصخري

المصدر: شبكة الانترنت

2. التنوع اللوني والملمسي:

يظهر الملح الصخري بألوان متعددة تتراوح بين الأبيض النقي، والوردي، والأحمر، والبرتقالي، وذلك وفقاً لنوع الشوائب المعدنية الموجودة في الرواسب الملحية و يوفر هذا التنوع اللوني إمكانيات تشكيلية واسعة للمصممين، حيث يمكن توظيف الألوان المختلفة في خلق تباينات

بصرية وتوزيعات لونية في الفراغات الداخلية. كما تتنوع ملامس سطح الملح بين الناعم المصقول والخشن الطبيعي، مما يضيف ثراءً حسيًا للفراغات. (29)(30)

3. القابلية للتشكيل والتصنيع:

يمكن تشكيل الملح الصخري بطرق متعددة، ففي شكله الخام يمكن قطعه ونحته مباشرة لتشكيل كتل بناء أو عناصر زخرفية أما في شكله المُعالج، فيمكن استخدام تقنيات الكبس لصنع ألواح وبلاطات موحدة الأبعاد، أو تقنيات التبلور الموجه لزراعة ألواح بأحجام وسماكات محددة وقد أثبتت التجارب المعاصرة إمكانية دمج الملح مع تقنيات التصنيع المتقدمة كالطباعة ثلاثية الأبعاد باستخدام خلطات الملح والنشا، مما يفتح آفاقاً جديدةً للتشكيل الفراغي المعقد. (31)(32)

الأداء الحراري والرطوبي في الفراغات الداخلية (33)(34)

1. تنظيم الرطوبة النسبية:

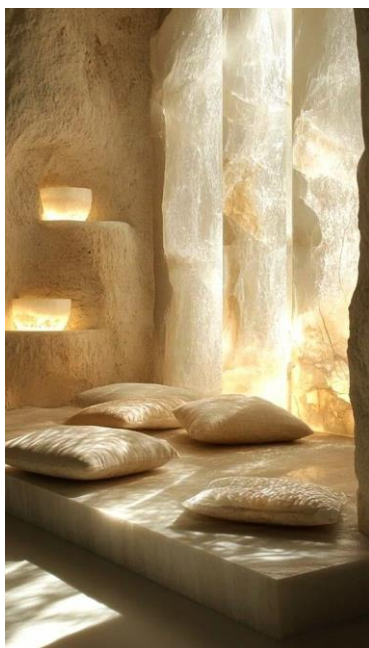
أظهرت الدراسات العلمية قدرة ألواح الملح الصخري على تنظيم الرطوبة النسبية في الفراغات الداخلية بفعل خواصها المسترطبة، فعند ارتفاع الرطوبة النسبية عن 75.3%، تبدأ بلورات الملح السطحية بالذوبان وامتصاص الرطوبة الزائدة من الهواء، وعند انخفاض الرطوبة، تتبلور مجدداً وتطلق الرطوبة، مما يحافظ على مناخ داخلي مستقر، هذا السلوك الذاتي في تنظيم الرطوبة يساهم في تحسين جودة الهواء الداخلي ويقلل من مخاطر نمو العفن والفطريات، خاصة وأن الملح يمتلك خصائص مضادة للبكتيريا.

2. الأداء في الظروف المناخية المختلفة:

أظهرت الدراسات المقارنة أن أداء الملح يختلف باختلاف الظروف المناخية. فقد وفر الملح أفضل استجابات حرارية ورطوبة في المناخات الحارة الجافة، حيث يكون قادراً على امتصاص الرطوبة النادرة والحفاظ على مناخ داخلي معتدل، بينما كان أداؤه الأسوأ في المناخات الحارة الرطبة نتيجة لارتفاع الرطوبة النسبية لفترات طويلة وقد أظهرت المقارنات مع مادة الجبس أن الملح يستهلك طاقة أعلى قليلاً في التدفئة والتبريد وإزالة الرطوبة بسبب موصليته الحرارية الأعلى ومقاومته للرطوبة، مما يستدعي تصميم الغلاف الحراري بعناية عند استخدام الملح في التشطيبات الداخلية.

3. التأثير على استهلاك الطاقة:

تشير الدراسات إلى أن استخدام ألواح الملح ككسوة داخلية يمكن أن يسهم في تقليل استهلاك الطاقة في المباني، خاصة في المناخات الحارة الجافة حيث تعمل كتلة الملح كخازن حراري يمتص الحرارة أثناء النهار ويطلقها ليلاً، مما يقلل من أحمال التبريد والتدفئة ومع ذلك، يجب مراعاة أن الملح قد يزيد من احتياجات إزالة الرطوبة في المناخات الرطبة بسبب امتصاصه للماء، لذلك يُوصى باستخدام الملح مع أنظمة تهوية ميكانيكية ذات استرداد حراري لتحقيق التوازن بين الراحة الحرارية وكفاءة الطاقة.



الصورة (3) (4) توضيحاً استخدام ألواح الملح الصخري في التصميم الداخلي

المصدر: شبكة الانترنت

تحديات استخدام ألواح الملح الصخري وحلولها (35)(36)

1. قابلية الذوبان في الماء:

يمثل ذوبان الملح عند تعرضه للرطوبة العالية التحدي الأكبر لاستخدامه في التشطيبات الداخلية، حيث يمكن أن يؤدي إلى تآكل الأسطح وفقدان الخواص الميكانيكية. وللتغلب على هذه المشكلة، تم تطوير عدة استراتيجيات تشمل:

- إضافة مواد مانعة للتسرب كالإيبوكسي أو البارافين عبر غمر الألواح في هذه المواد لتصبح مقاومة للماء.

· التحكم في الظروف البيئية الداخلية من خلال أنظمة تكييف وتهوية تحافظ على الرطوبة النسبية دون المستوى الحرج.

· استخدام الملح في أشكال مركبة مع مواد أخرى كالجبس أو الصلصال، حيث تزيد هذه الإضافات من مقاومته للرطوبة وتحسن خواصه الميكانيكية.

2. الفعالية في البيئات الداخلية:

أظهرت الدراسات الميدانية التي أجريت على ألواح الملح المركبة (كمادة الملح-الجبس) أن أداءها في تنظيم الحرارة والرطوبة يختلف باختلاف الظروف البيئية، حيث تتفاعل أسطحها ببطء مع تغيرات البيئة الداخلية مقارنة بمواد أخرى كالجبس ومع ذلك، فقد أثبتت القياسات أن ألواح الملح قادرة على الحفاظ على درجات حرارة ورطوبة سطحية أقل استقراراً، مما يسهم في توفير مناخ داخلي معتدل، خاصة في الفراغات السكنية غير المكيفة.

3. التوافق مع العمارة الحديثة:

يتطلب استخدام الملح في المشاريع المعاصرة تطوير تقنيات تصنيع وتطبيق تضمن استدامته على المدى الطويل. وقد أثبتت مشاريع رائدة كأبراج LUMA أن ألواح الملح المُنتجة بتقنية التبلور الموجه يمكن أن تحصل على شهادات الجودة والمعايير الفنية (كشهادة ATEX الفرنسية) التي تسمح باستخدامها في المباني العامة كتشطيب داخلي آمن، كما أظهرت مشاريع أخرى كجناح لا سال إمكانية دمج الملح مع تقنيات التصنيع الرقمي، عبر استخدام قواعد من الأكريليك المعاد تدويره والراتنجات الحيوية لنمو بلورات الملح عليها، مما يُنتج ألواحاً ذات جودة عالية ومتانة مناسبة.

تطبيقات معاصرة لألواح الملح في العمارة الداخلية

1. أبراج LUMA في آرل، فرنسا: (37)

يعد مشروع أبراج LUMA من تصميم فرانك جيري أشهر التطبيقات المعاصرة لألواح الملح في العمارة الداخلية. تم إنتاج أكثر من 4116 لوحاً ملحيّاً بزراعة البلورات على قواعد معدنية في أحواض الملح بمنطقة كامارج، حيث تنمو البلورات بفعل الشمس والرياح خلال 14 يوماً فقط، غطت هذه الألواح جدران مصاعد البرج، وتمتاز بشفافيتها وقدرتها على نشر الضوء بشكل ناعم،

مما يضفي جواً فريداً على الفراغات الداخلية. وحصلت الألواح على شهادة ATEx، مما يثبت جدواها كخامة تشطيب داخلي آمنة ومستدامة في المباني العامة.



الصورة (5) (6) توضحان برج ارل بفرنسا

المصدر: شبكة الانترنت

2. جناح لا سال، إسبانيا: (38)

صمم مكتب CHS+R arquitectos جناحاً في منتزه خليج قادس الطبيعي بهدف إحياء التراث الملحي للمنطقة. استخدم المشروع ألواحاً ملحياً تم تطويرها عبر زراعة البلورات على قواعد من الأكريليك المعاد تدويره والمغطاة بطبقة من الراتنج الحيوي ، يتميز الجناح بدمج تقنيات التصنيع الرقمي مع العمليات التقليدية، حيث تُستخدم شبكات من الألياف الزجاجية لجمع الملح من أحواض التبلور، مما ينتج عنه قوام فريد وألواح ذات شفافية عالية. كما يعمل الجناح كأداة للتحويل الاجتماعي من خلال ربط المجتمع المحلي بموارده الطبيعية.

3. فنادق ومنتجعات الملح العلاجية: (39)

انتشر في السنوات الأخيرة استخدام كتل الملح الوردي في تشطيب جدران غرف العلاج والاسترخاء في المنتجعات الصحية والفنادق الفاخرة حول العالم، وذلك للاستفادة من خصائص الملح العلاجية في تنقية الهواء وتحسين جودة التنفس وتُستخدم أيضاً ألواح الملح كخلفيات مضيئة في التصميم الداخلي، حيث توضع مصادر إضاءة خلفها لخلق مشاهد ضوئية ناعمة ومريحة. وقد أثبتت هذه التطبيقات أن ألواح الملح يمكن أن تسهم في تحسين الصحة النفسية والجسدية للمستخدمين من خلال تنقية الهواء من الملوثات وتوفير أجواء هادئة ومريحة.

الجانب التطبيقي:

المنهجية التطبيقية:

تعتمد الدراسة التطبيقية على منهجية تجريبية مخبرية تهدف إلى إعادة تدوير وتوظيف الملح الصخري الخام كمادة أساسية في التصميم الداخلي المستدام، وذلك من خلال معالجته براتج الإيبوكسي لرفع كفاءته الميكانيكية والجمالية. وقد مرت التجربة بالمراحل المتسلسلة التالية:

المرحلة الأولى: جمع المادة الخام وتجهيزها (Field Collection & Preparation):

في هذه المرحلة البادئة، تم التركيز على توفير الملح الصخري الخام من بيئته الطبيعية في دولة ليبيا، وتحديدًا من منطقة (أبو كماش - زوارة)، نظراً لتمييز الأملاح في هذه المنطقة بنقاء نسبي وخصائص طبيعية ملائمة للتشكيل. تم فرز الملح وتنظيفه من الشوائب العالقة للحفاظ على لونه الطبيعي وخصائص الشفافية المطلوبة في المنتج النهائي.



صورة (7) (8) (9) توضح عملية جمع الملح الصخري

المصدر: تصوير الباحث

المرحلة الثانية: تحضير المادة الرابطة وعملية الخلط (Matrix Preparation & Mixing)

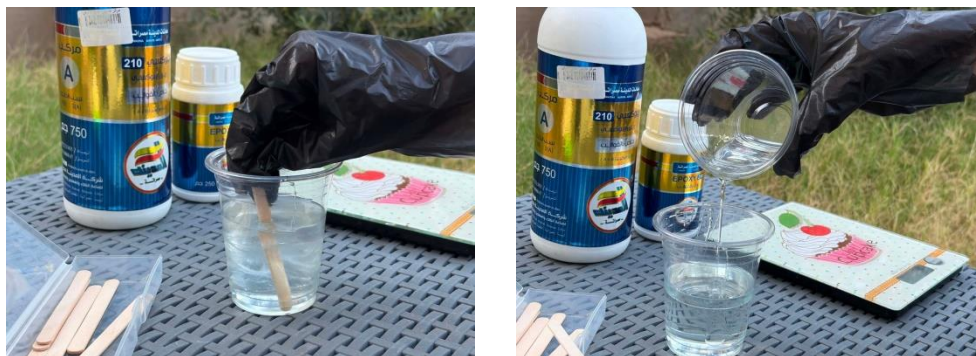
لضمان تماسك جزيئات الملح الصخري، تم استخدام راتنج الإيبوكسي الشفاف كمادة رابطة (Binder) تطلبت عملية التحضير دقة عالية في نسب الخلط بين المركبين الأساسيين وفقاً للخطوات التالية:

1. تحديد النسب: تم قياس 120 ml من المادة الأساسية. (Epoxy Resin - A)
2. إضافة المصلب: تم قياس 40ml من مادة المصلب (Hardener - B) ، لضمان تحقيق النسبة المعيارية (3:1) التي تضمن التصلب المثالي دون حدوث هشاشة أو لدونة زائدة.

3. الخلط الميكانيكي البطيء : دُمج المركبان معاً ميكانيكياً وبشكل بطيء ومستمر لمدة قاربت 10 دقائق؛ لتفادي تولد فقاعات هوائية كثيفة الناتجة عن سرعة التقليب، ولضمان حدوث التفاعل الكيميائي المتجانس بين المركبين.



الصورة (10) (11) توضح تحديد وقياس النسب
المصدر: تصوير الباحث



الصورة (12) (13) توضح طريقة خلط السائلين
المصدر: تصوير الباحث

المرحلة الثالثة: صب العينة وتوزيع الطبقات (Molding & Layering Process)

استُخدم في هذه المرحلة قالب من السيليكون (Silicone Mold) مرن ودائري الشكل بقطر هندسي يبلغ 20 cm، لضمان سهولة استخراج العينة لاحقاً. وقد تمت عملية التشكيل وفق التتابع الطبقي التالي:

- الطبقة التمهيديّة: صُبت كمية قليلة مبدئية من خليط الإيبوكسي النقي في قاع القالب لتشكيل قاعدة صلبة ومستوية.

- طبقة الحشو (الملح الصخري): وُزعت طبقة متجانسة وكثيفة من الملح الصخري الخام فوق القاعدة بالتساوي لتشغل الفراغ الداخلي للقلب.
- الطبقة الرابطة النهائية: صُبت الكمية المتبقية من الإيبوكسي لتغمر حبات الملح بالكامل، مما يضمن تغلغل المادة السائلة في المسامات البينية للملح الصخري لتشكيل كتلة مصمتة.

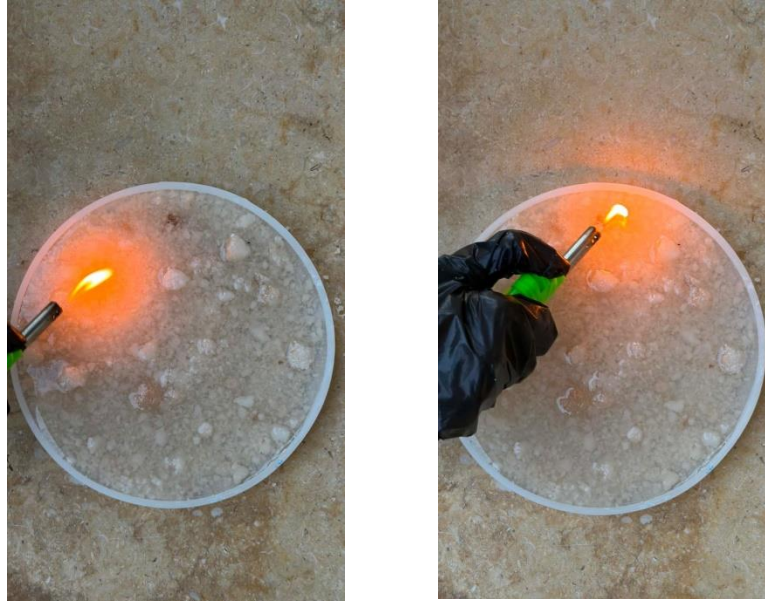


الصورة (14) (15) (16) توضح صب الطبقات للتجربة

المصدر: تصوير الباحث

المرحلة الرابعة: المعالجة الحرارية السطحية وإزالة الفقاعات (De-airing & Thermal Treatment)

نظراً للزوجة الإيبوكسي وعشوائية فراغات الملح، تتشكل بعض الفقاعات الهوائية المحبوسة التي قد تؤثر سلباً على الشفافية والصلابة. لتفادي ذلك، تم تمرير مصدر حراري مباشر بحركات سريعة ومنظمة فوق السطح الخارجي للقلب حيث ساعدت هذه التقنية على تقليل التوتر السطحي للإيبوكسي، مما سمح للفقاعات بالصعود إلى السطح والانفجار، وبالتالي الحصول على قالب نقي وخالٍ من العيوب الهيكلية.



الصورة (17) (18) توضح المعالجات السطحية

المصدر: تصوير الباحث

المرحلة الخامسة: الجفاف والإنضاج البيئي (Curing State)

تُترك القالب بعد المعالجة السطحية ليمر بمرحلة التصلب والإنضاج الكيميائي (Curing) لمدة 24 ساعة كاملة. جرت هذه العملية في ظروف بيئية طبيعية ومستقرة داخل المختبر (تحت درجة حرارة الغرفة العادية)، مع تجنب تعريض العينة لأي تيارات هوائية باردة أو حرارة مفرطة قد تسبب تشقق القالب أو انحناءه أثناء التفاعل الطارد للحرارة.

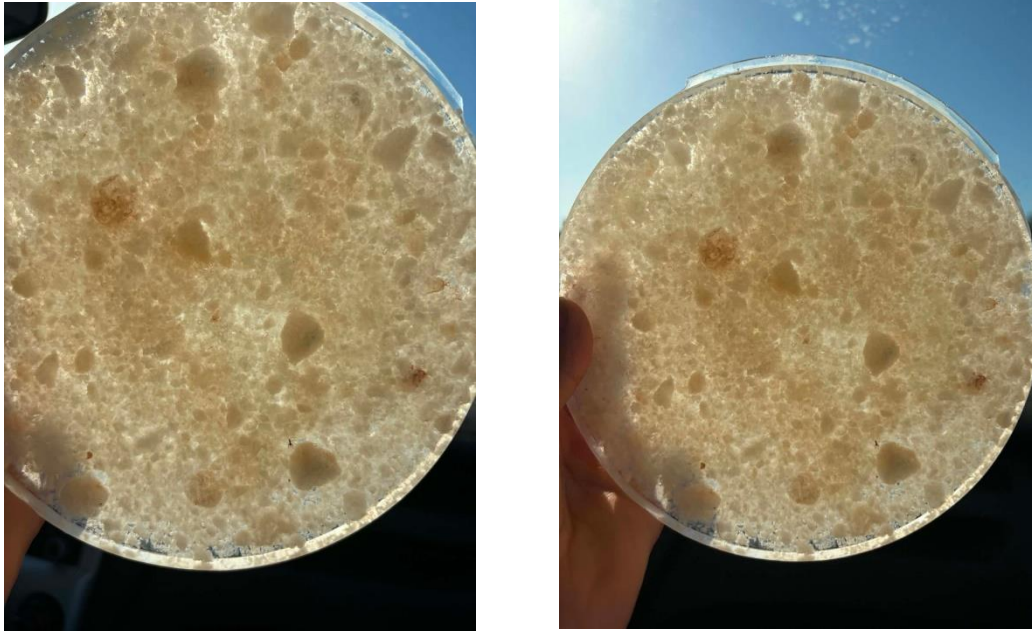


الصورة (19) (20) توضح التجربة في مرحلة التجفيف

المصدر: تصوير الباحث

المرحلة السادسة: الاستخراج والتشطيب النهائي (Demolding & Finishing)

بعد التحقق من التصليب التام للمادة، تم استخراج اللوح الدائري للملح المعالج من قالب السيليكون بسلاسة. وللوصول إلى القيمة الجمالية والنفعية العليا، خضع اللوح لعملية **السنفرة والتلميع الميكانيكي (Sanding & Polishing)** باستخدام درجات سنفرة متدرجة النعومة؛ وذلك لإزالة الحواف الحادة، وتسوية السطح، وإبراز التكوينات البلورية الساحرة للملح الصخري المندمج مع الإيبوكسي الشفاف.



الصورة (21) (22) توضح الخامة الهجينة المبتكرة لالواح الملح الصخري

المصدر:؛ تصوير الباحث

أمثلة تصويرية لاستخدام الواح الملح في التصميم الداخلي وقطع الأثاث:



الصورة (23) توضح قطع أثاث من المادة المبتكرة

المصدر: الذكاء الاصطناعي



الصورة (24) توضح قطع أثاث من المادة المبتكرة

المصدر: الذكاء الاصطناعي



الصورة (25) توضح قطع اثاث من المادة المبتكرة

المصدر: الذكاء الاصطناعي



الصورة (26) توضح قطع اثاث من المادة المبتكرة

المصدر: الذكاء الاصطناعي

الاستنتاجات:

1_ استنتج البحث أن معالجة الملح الصخري الخام المستخرج محلياً بواسطة سكب راتنج الإيبوكسي بنسب دقيقة (1:3) يسهم في تلافي عيوبه الطبيعية كالهشاشة، ويُنتج مادة متراكبة مصمتة وعازلة تماماً للرطوبة والعوامل الجوية.

2_ تؤكد الدراسة أن الخصائص الفريدة للألواح المصنعة، مثل تدرج ألوان الشوائب المعدنية ونفاذيتها العالية للضوء الطبيعي والصناعي، تمنح المصمم أداة تشكيلية مرنة لخلق إيقاعات بصرية تتفاعل مع الإضاءة وتعزز عمق الفراغ واتساعه.

3_ تضح من نتائج البحث أن توظيف هذه الألواح يحقق معايير العمارة العلاجية، حيث يتكامل أثرها الجمالي مع قدرتها البيولوجية على تحسين جودة الهواء الداخلي وإطلاق الأيونات السالبة، مما يقلل إجهاد المستخدمين ويعزز رفاهيتهم الصحية.

4_ أثبت الجانب التطبيقي جدوى الاعتماد على الملح الصخري المحلي (خاصة من منطقة أبو كماش - زوارة)، وهو ما يقلل من الطاقة المستهلكة في عمليات النقل والشحن، ويفتح آفاقاً واعدة لتحويل المواد الخام إلى منتجات ديكورية ذات قيمة اقتصادية مضافة.

5_ أظهرت التجربة أن المادة المطورة تمتلك مرونة هندسية عالية تسمح بدمجها كبديل بيئي في المحددات الفراغية المختلفة، سواء تم توظيفها كقواطع داخلية، كسوات جدارية، أو وحدات بنائية تخدم الجانبين الوظيفي والجمالي بذكاء.

التوصيات:

1_ نوصي بتبني نتائج هذا البحث من قبل الجهات الاستثمارية لتحويل الملح الصخري المحلي من مجرد خامة خام إلى ألواح تشطيب ديكورية مصنعة تدعم التوجه نحو التصنيع الأخضر.

2_ يُوصى مهندسو الديكور والمصممون بتوسيع نطاق استخدام ألواح الملح الصخري المعالجة في بيئات العمل، والمصحات، والفراغات السكنية للاستفادة من خواصها الديناميكية في تنظيم الرطوبة وتنقية البيئة الداخلية.

3_ توصي الدراسة بضرورة استكشاف تقنيات تصنيع متقدمة ومكملة، مثل استخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد والروبوتات في تشكيل خلطات الملح المعالج لإنتاج مجسمات وتشكيلات فراغية معقدة هندسياً.

4_ توصي الباحثين بإجراء دراسات مستقبلية مطولة تركز على قياس الأداء الحراري والرطوبي الدقيق لهذه الألواح الهجينة عبر فصول السنة المختلفة لضمان استقرار جودتها على المدى الطويل.

5_ يُوصى بضرورة مرافقة التصاميم التي تعتمد على ألواح الملح لأنظمة تكييف وتهوية ذكية (مع استرداد حراري)، لضمان بقاء مستويات الرطوبة النسبية تحت النقطة الحرجة لحماية الأسطح من التسيل والذوبان.

6_ توصي الدراسة بفتح قنوات بحثية جديدة بمدارس الفنون والعمارة تركز على ابتكار مواد متراكبة من خامات بيئية محلية ودمجها بالبوليمرات الحديثة، لإثراء المكتبة الأكاديمية وحلول الاستدامة.

ت

المراجع (References):

1. العبيدي، أحمد زيدان، (2022). (الخامات الطبيعية المستدامة وأثرها في رفع كفاءة البيئة الداخلية للمباني). رسالة دكتوراه غير منشورة، كلية الهندسة، جامعة بغداد، ص. 84.
2. منصور، رانيا فاروق، (2024). (الديناميكية التشكيلية للشفافية والنفاذية الضوئية في العمارة الداخلية المعاصرة). مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية، الجمعية العربية للحضارة والفنون الإسلامية، مجلد 9، عدد 43، منشور، ص. 112.
3. سليمان، مها محمود، (2023). (التصميم البيوفيلي والرفاهية النفسية في الفراغات الداخلية: توظيف المواد الطبيعية كمدخل علاجي). رسالة ماجستير منشورة، كلية الفنون التطبيقية، جامعة حلوان، ص. 67.
4. الراوي، يوسف كمال، (2021). (الصخور التبخيرية وتطبيقاتها الحديثة في البناء والتصميم). دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع، الطبعة الأولى، منشور، ص. 142.
5. شرف الدين، أمنية جلال، (2023). (الخامات البيئية الواعدة وأثرها في استدامة التصميم الداخلي). رسالة دكتوراه غير منشورة، كلية الفنون التطبيقية، جامعة حلوان، ص. 95.
- 6/ محسن الشغدري – 2020_ كتاب بعنوان (جيولوجيا الخامات والاستكشاف المعدني) -

<https://www.academia.edu>

7. عبد الهادي، حازم محمد، (2020). (فلسفة التشكيل الفراغي في التصميم الداخلي المعاصر). دار الفكر العربي، منشور، ص. 78.
8. النجار، دينا عبد الرزاق، (2024). (الديناميكية التشكيلية للمحددات الفراغية في بيئات العمل الحديثة). رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الفنون الجميلة، جامعة الإسكندرية، ص. 54.
9. سالم، علي عبد الرزاق، (2022). (العمارة الداخلية المستدامة: المبادئ والتطبيقات). مؤسسة المعارف الأكاديمية، منشور، ص. 210.
10. العامري، هناء صالح، (2025). (معايير العمارة الخضراء وتقييم الأثر البيئي للمواد في التصميم الداخلي). رسالة دكتوراه منشورة، كلية الهندسة، جامعة عين شمس، ص. 118.
11. شحاتة، حسن أحمد، (2018)، تكنولوجيا مواد البناء والتشطيبات الحديثة، دار الكتب والوثائق القومية، تخصص الهندسة المعمارية والإنشائية، مصر، الطبعة الأولى، ص. 142.
12. نحو، حسنين محمد، (2022)، دراسة تأثير مضافات مختلفة على الصفات الحرارية والكهربائية والميكانيكية لمتراكبات ايبوكسي، كلية الهندسة - الجامعة المستنصرية، تخصص هندسة المواد، العراق، رسالة ماجستير، ص. 28.
13. عبدالله سعدون، تقى محمود، 2020، بحث بعنوان (نظم الاستدامة في العمارة) ، بحث منشور ، المجلة العراقية لهندسة العمارة والتخطيط <https://www.researchgate.net>
14. Pungercar, V., & Musso, F. (2021). Salt as a Building Material: Current Status and Future Opportunities. The Plan Journal. Retrieved from: <https://www.theplanjournal.com>
15. Pungercar, V., & Musso, F. (2021). Salt as a Building Material: Experimental Study on Hygrothermal Performance. TUM Media Archive. Retrieved from: <https://mediatum.ub.tum.de>
16. محمود، خالد علي، 2020، التصميم الداخلي المستدام: دمج المواد الذكية والبيئية في الفراغات الإدارية، رسالة ماجستير، غير منشورة، مكتبة كلية الفنون الجميلة بجامعة الإسكندرية، صفحة 112.
17. السيد، ياسمين أحمد، 2022، معايير العمارة الخضراء وتأثيرها على تقييم المباني المستدامة، بحث، منشور، مجلة الهندسة والعلوم التطبيقية، المجلد 14، الإصدار 2، صفحة 45-60.
18. النجار، سمر محمد، 2021، تقييم الدورة الحياتية للخامات الداخلية وأثرها على جودة الهواء الداخلي، رسالة دكتوراه، غير منشورة، مكتبة كلية الهندسة بجامعة عين شمس، صفحة 88.
19. عثمان، طارق سعيد، 2019، تكنولوجيا المواد المستدامة في العمارة المعاصرة، كتاب، منشور، دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع، القاهرة، صفحة 215.
20. النجار، سمر محمد، 2021، تقييم الدورة الحياتية للخامات الداخلية وأثرها على جودة الهواء الداخلي. مرجع سابق.

21. محمود، خالد علي، 2020، التصميم الداخلي المستدام: دمج المواد الذكية والبيئية في الفراغات الإدارية، رسالة ماجستير، غير منشورة، مكتبة كلية الفنون الجميلة بجامعة الإسكندرية، صفحة 112.
22. Pungercar, V., & Musso, F. (2021). Salt as a Building Material: Current Status and Future Opportunities. مرجع سابق.
23. <https://www.theplanjournal.com> ، مرجع سابق.
24. <https://www.theplanjournal.com> ، مرجع سابق.
25. Pungercar, V., & Musso, F. (2021). Salt as a Building Material: Current Status and Future Opportunities. مرجع سابق.
26. Surfaces Reporter. (2021). Local Salt, Algae and Sunflowers Wrap The Interiors of Frank Gehry's Arles Tower. Surfaces Reporter Magazine. Retrieved from: <https://surfacesreporter.com>
27. Prieto, C. (2023). Delving into the Aesthetics of Rock Salt Crystallization. ArchDaily. Retrieved from: <https://www.archdaily.com>
28. The Role of Sustainable Transparent Materials in Smart Architecture. (2024). ERJ Journal, Article 361611. Retrieved from: <https://erj.journals.ekb.eg>
29. Surfaces Reporter. (2021). Local Salt, Algae and Sunflowers Wrap The Interiors of Frank Gehry's Arles Tower. Surfaces Reporter Magazine. Retrieved from: مرجع سابق.
30. Prieto, C. (2023). Delving into the Aesthetics of Rock Salt Crystallization. ArchDaily. Retrieved from: <https://www.archdaily.com> .
31. Atelier Luma. (2023). The LUMA Tower's Wall of Salt: Low-tech Production of Crystallized Salt Panels for a Demanding Architectural Application. Atelier Luma. Retrieved from: <https://companion.atelier-luma.org>
32. Pungercar, V., & Musso, F. (2021). Salt as a Building Material: Current Status and Future Opportunities. The Plan Journal. Retrieved from: <https://www.theplanjournal.com> .
33. Pungercar, V., & Musso, F. (2022). Hygrothermal Performance of Salt (NaCl) for Internal Surface Applications in the Building Envelope. Materials, 15(9), 3266. DOI: 10.3390/ma15093266
34. Pungercar, V., & Musso, F. (2021). Salt as a Building Material: Experimental Study on Hygrothermal Performance. TUM Media Archive. Retrieved from: <https://mediatum.ub.tum.de>.

Pungercar, V., & Musso, F. (2021). Salt as a Building Material: Current Status and .35
Future Opportunities. The Plan Journal. Retrieved from:
<https://www.theplanjournal.com> . مرجع سابق.

Pungercar, V., & Musso, F. (2021). Salt as a Building Material: Experimental Study .36
on Hygrothermal Performance. TUM Media Archive. Retrieved from:
<https://mediatum.ub.tum.de> . مرجع سابق.

Atelier Luma. (2023). The LUMA Tower's Wall of Salt: Low-tech Production of .37
Crystallized Salt Panels for a Demanding Architectural Application. Atelier Luma.
Retrieved from: <https://companion.atelier-luma.org> . مرجع سابق.

CHS+R arquitectos, Montes, C., Alda, F., Orive, J., & Del Rio Bani. (2025). La Sal .38
Pavilion. Divisare. Retrieved from: <https://divisare.com>

Pungercar, V., & Musso, F. (2021). Salt as a Building Material: Current Status and .39
Future Opportunities. The Plan Journal. . مرجع سابق.