مركز الترجمة والتعريب والاهتمام باللغة العربية
GCC Centre for Translation, Arabisation and Promotion of Arabic

هياكلٌ ومبانٍ مستدامة

تأليف
علي رضا بهرامي

ترجمة
عبد الستار الحليمي

1448هـ/2026م
إصدار مركز الترجمة والتعريب والاهتمام باللغة العربية

علي رضا بهرامي

هياكلٌ ومبانٍ مستدامة

ترجمة
عبد الستار الحليمي

1448هـ/2026م
إصدار مركز الترجمة والتعريب والاهتمام باللغة العربية

العنوان الأصلي: Sustainable Structures and Buildings
المؤلف: علي رضا بهرامي Alireza Bahrami
الناشر: سبرينغر Springer

اسم الكتاب: هياكلٌ ومبانٍ مستدامة
ترجمة: م. عبد الستار الحليمي
الرقم الدولي: 978-99992-1-477-3
رقم الإيداع: 11018/ 2026
الطبعة الأولى: 1448 هـ - 2026 م
نُشِرَ في مسقط، سلطنة عُمان

الناشر:
مركز الترجمة والتعريب والاهتمام باللغة العربية
بمجلس التعاون لدول الخليج العربية

ص. ب (539) - مسقط - سلطنة عُمان
هاتف: 24968870 (968+) فاكس: 24607550 (968+)
البريد الإلكتروني: ctapa@gccsg.org
الموقع الإلكتروني:
https://gcc-sg.org/ar/JointGulf/Cooperation/GCCTAB/Pages/default.aspx

© جميع الحقوق محفوظة لمركز الترجمة والتعريب والاهتمام باللغة العربية التابع للأمانة العامة لمجلس التعاون لدول الخليج العربية، ويُمنَع استخدام أيٍّ من المواد التي يتضمنها الكتاب أو استنساخها أو نقلها كليًّا أو جزئيًّا في أي شكلٍ وبأية وسيلة، سواء بطريقة إلكترونية أو آلية، بما في ذلك الاستنساخ الفوتوغرافي أو التسجيل أو أي نظام من نظم تخزين المعلومات أو استرجاعها إلا بإذنٍ خطيٍّ من الناشر.

توطئة المترجم

يأتي هذا الكتاب ضمن حقل علمي وتطبيقي متنامي الأهمية، يتقاطع فيه الفكر الهندسي مع قضايا الاستدامة ومواد البناء والأنظمة الإنشائية والبيئة المبنية، وهو ما يجعله من الأعمال المرجعية المهمة للقارئ العربي المتخصص، سواء في المجال الأكاديمي أو المهني. وتنبع قيمة هذا العمل من تنوع موضوعاته، وتعدد زوايا النظر فيه، وارتباطه المباشر بالتحولات المعاصرة في ممارسات البناء والتصميم وتقييم الأداء البيئي للمنشآت.

وقد سعيتُ، بوصفي المترجم الرئيس لهذا العمل ومراجعه -وأتقدم بالشكر والامتنان لكل من ساهم معي في التعاون لترجمة المصطلحات التخصصية من باحثين ومترجمين ومهندسين- إلى أن تقوم الترجمة على مبدأين متلازمين: الأمانة العلمية للنص الأصلي، وسلامة الصياغة العربية من جهة أخرى. فالمقصود لم يكن نقل الألفاظ فحسب، بل نقل المعنى في سياقه العلمي، مع مراعاة خصوصية العربية في التركيب والبيان، وبما يحفظ وضوح الفكرة ودقة المصطلح وانسجام العرض.

ولما كان هذا الكتاب يضم موضوعات تخصصية دقيقة، فقد أوليتُ عناية خاصة بضبط المصطلحات الهندسية والعلمية، والعمل على توحيدها عبر الفصول قدر الإمكان، مع إثبات المقابِلات الأجنبية في المواضع التي تقتضيها المرجعية العلمية، تسهيلًا للرجوع إلى المصطلح

الأصلي، ودعمًا لدقة الفهم لدى القارئ المتخصص. وقد ذيّلت في بعض الهوامش بعضاً من المرئيات المتعلقة بمرادِفات بعض المصطلحات، كالعلمي البحت والدارج منها.

كما تطلّب العمل مراجعةً متأنيةً لكثير من التراكيب؛ لتأتي العربية واضحة ومبينة، بعيدة عن النقل الحرفي، وقريبة من مقصد المؤلفين ومضامين النصوص الأصلية. ونظرًا لتعدد المؤلِفين وتنوع الفصول واختلاف مجالاتها الجزئية، فقد استلزم إخراج هذا الكتاب بالعربية جهدًا إضافيًّا في المراجعة والتنسيق والتوحيد المصطلحي والأسلوبي؛ ليظهر العمل في صورة أكثر اتساقًا، ويؤدي وظيفته بوصفه مرجعًا عربيًّا يمكن الإفادة منه في الدراسة والبحث والممارسة المهنية. وآمل أن تُسهِم هذه الترجمة في توسيع دائرة الاطلاع العربي على الأدبيات المعاصرة في مجال الهياكل والمباني المستدامة، وأن تُقدم للقارئ مادةً علميةً نافعة تجمع بين القيمة المعرفِية والدقة الاصطِلاحِية، وتفتح المجال لمزيد من الاشتغال العربي الجاد على القضايا المرتبطة بالاستدامة في البيئة المبنية. والله من وراء القصد.

عبد الستار الحليمي.

تمهيد

يشجع هذا الكتاب على رصد الأساليب والتطورات المطلوبة للهياكل المتينة؛ حيث يتناول أهم المشكلات لإيجاد حلول مستدامة ومتقدمة لقطاع البناء والتشييد. ويعرض كيفية تحسين مهندسي الإنشاءات لتصميم الهياكل من أجل تحقيق مبانٍ ومواد بناء أكثر صداقةً للبيئة، بما يسهم في تحقيق أهداف التنمية المستدامة(SDGs) التي وضعتها الأمم المتحدة. وبتركيزه بشكل خاص على الحلول المستدامة، يقدم الكتاب إستراتيجيات وخططًا تهدف إلى استجلاءِ توصيات عالية الجودة في الهندسة المدنية.

تتمثل أهمية الهياكل والمباني ومواد البناء المختلفة في تحقيق الاستدامة في قطاع البناء والتشييد، حيث يجمع هذا الكتاب مجموعة معترف بها من الأفراد متنوعي المشارب الثقافية والتقاليد البنائية لمناقشة الحاجة إلى إعادة تقييم أساليب البناء المتبعة حاليًا والتفكير في استبدال العديد من المواد ضعيفة الأداء المستخدمة في الصناعة. ويعزز هذا الكتاب الجانبين النظري والعملي في تصميم المباني المستدامة من خلال تقديم أدوات عملية مهمة قد تؤثر في ممارسات البناء في كل من القطاعين العام والخاص. ويَحُثُّ لاستمرار الجهود الرامية لتحقيق أهداف التنمية المستدامة وتطبيقها على أرض الواقع.

وبوصفه بديلًا أكثر استدامة للصلب والخرسانة، أصبحت تقنية الخشب الرقائقي المتعامد (CLT ,rebmiT detanimaL-ssorC) تُستخدم بشكل متزايد في المباني متوسطة وعالية الارتفاع. ومع ذلك، فإن هذه التقنية تثير تساؤلات مهمة حول أداء هذه الهياكل في مقاومة الحرائق. وقد تبيَّن أن العديد من الهياكل المبتكرة تتمتع بأنماط تشوه قابلة للتنبؤ وذات قدرة لدنة دون أن تتسبب في أضرار بالخشب. واكتسبت الأقمشة والرقائق الهيكلية، وهي نوعٌ من المواد خفيفة الوزن، اهتمامًا متزايدًا بين المصممين والمعماريين، بفضل خصائصها الجمالية والوظيفية.

يتمتع الخيزران بإمكانية استخدامه بصفته مكوِّنَ شدٍّ في الخرسانة، بينما لا يزال التعامل مع مخلفات المناجم يعتمد على منهج خطي يقتصر على التخزين والطمر، ما يستوجب إعادة النظر في هذه الممارسات. ويمكن أن يكون توظيف مخلفات المناجم بصفتها مادة خام جديدة خطوةً نحو تحقيق الاقتصاد الدائري؛ حيث يسهم في تقليل استهلاك الموارد الطبيعية وخفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. ويمكن أن يسهم التحول من الطوب الطيني المحروق وطوب الأسمنت إلى طوب الجيوبوليمر إسهامًا كبيرًا في معالجة المشكلات القائمة المرتبطة بالسكن والنفايات الحيوية الزراعية.

تعاني الهياكل الخرسانية المسلحة من تطور تلقائي للشقوق الدقيقة نتيجة لانكماش الخرسانة والتعرض لعمليات التجمد والذوبان. وتعد الخرسانة المعالجة بالبكتيريا (etercnoC lairetcaB) نهجًا فعالًا لإصلاح الخرسانة وتعزيز متانتها وإطالة عمرها الافتراضي. وتوفر البنية التحتية لتصريف مياه الأمطار في المناطق الحضرية عددًا من الخدمات الأساسية؛ حيث تؤدي دورًا محوريًّا في تحقيق أهداف التنمية المستدامة من خلال معالجة التحديات الحضرية الحالية والمساهمة في بناء مستقبل أكثر استدامة.

تُستَكشف جميع الموضوعات المذكورة آنفًا وتُقَدَّم بشكل مفصل في هذا الكتاب. وقد أُعِدَّ هذا الكتاب خصيصًا لطلاب الهندسة والباحثين والمشتغلين المهتمين بتعزيز مفاهيم الاستدامة وتطبيقها في مختلف مراحل تخطيط المشاريع الإنشائية وتنفيذها وصيانتها مما يساهم في تطوير ممارسات البناء والهندسة المدنية بأسلوب أكثر كفاءة واستدامة.

علي رضا بهرامي

يافله، السويد

4202

شكر وتقدير

يتقدم المؤلفون بجزيل الشكر إلى لجنة البحث الإستراتيجي في الاستدامة الحضرية بجامعة يافله، السويد، على تمويل هذا الكتاب.

الفصل الأول

التنمية المستدامة في المباني الخشبية الشاهقة الحديثة

علي رضا بهرامي و س. م. بيوك رشيد

1.1 المقدمة:

يمكن تصميم وإنشاء المباني الشاهقة بدرجة متزايدة من التعقيد بفضل التقدم التكنولوجي. وتُصنَّف المباني التي يتجاوز ارتفاعها 25 مترًا على أنها «مبانٍ شاهقة». ويمكن افتراض أن المباني الأطول تتطلب مساحات أكبر ومرافق أكثر واستهلاكًا أعلى للطاقة وانبعاثات أكبر لثاني أكسيد الكربون (CO_2)، مما يؤدي إلى تأثير سلبي واسع في البيئة. وعادةً ما يكون إنشاء المباني الشاهقة مكلفًا، ويستغرق وقتًا طويلًا، ويتطلب قدرًا كبيرًا من العمالة. ومع ذلك، تتميز المباني الشاهقة بتأثيرها المباشر في البيئة المحيطة بسبب ارتفاعها وتصميمها المعماري.

كشف كلٌّ من بورجيسون وجوستافسون أن استهلاك الطاقة الأولية (المعتمدة أساسًا على الوقود الأحفوري) في إنتاج مواد البناء يكون أقل بنسبة تتراوح بين 60% و80% في الهياكل الخشبية مقارنةً بالهياكل الخرسانية. ووفقًا لأوليفر وآخرين، فإن استخدام بدائل الخشب يمكن أن يساهم في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية بنسبة تتراوح بين 14% و31%، بالإضافة إلى خفض استهلاك الوقود الأحفوري العالمي بنسبة تتراوح بين 12% و19%، وذلك من خلال استغلال 34% إلى 100% من النمو المستدام للأخشاب عالميًّا.

حتى الآن، لا تزال الخرسانة المسلحة والصلب والزجاج هي المواد الأكثر استخدامًا في بناء المباني الشاهقة لأسباب تاريخية. ففي أواخر القرن التاسع عشر، تأثرت العديد من المدن بحرائق واسعة النطاق، مما أدى إلى تبني تدابير السلامة من الحرائق في العديد من الدول حول العالم، بما في ذلك القوانين التي تقيد استخدام الهياكل الخشبية في بناء المباني الشاهقة. أخيرًا، أدى التطور السريع في تقنيات البناء، وظهور المنتجات الخشبية الهندسية الحديثة (مثل الخشب الرقائقي المتعامدCLT والخشب المصفح بالغراء Glulam)، إلى جانب تعديل قيود البناء، إلى عصر جديد ساهم في انتشار إنشاء المباني الخشبية متعددة الطوابق. وتساهم المباني الخشبية الشاهقة مباشرةً في تحقيق أهداف الاستدامة في قطاع البناء، عبر الجوانب البيئية والاقتصادية والاجتماعية للاستدامة.

كان تطبيق الخشب الرقائقي المتعامد CLT في أستراليا تدريجيًّا بسبب عدة عوامل، من بينها القضايا الثقافية والهيكلية والاقتصادية والصيانة. ومن العوامل الأكثر أهمية، المقاومة الثقافية التقليدية للتغيير في قطاع البناء، بالإضافة إلى المفاهيم الخاطئة لدى المشتغلين والمستخدمين حول الخشب الهندسي، حيث يُعتقد أنه يعاني من نفس العيوب التقليدية المرتبطة بالأخشاب، مثل القابلية العالية للاشتعال والتلف بسبب الآفات، وضعف العزل الصوتي، وارتفاع التكاليف، ومشكلات المتانة. وأشار الباحثون إلى أن العنصر البشري في التسويق يعد سببًا رئيسًا في تباطؤ تبني CLT، مؤكدين أن المشترين بحاجة إلى التحفيز لإدراك مزايا المنتج والرغبة في استخدامه. لتحقيق ذلك، يجب تطوير المنتجات بطريقة لا تلبي الاحتياجات فحسب، بل تحفز الطلب أيضًا.

تختلف وجهات النظر حول جودة الإنشاءات الخشبية وخصائِصها بين مختلف الدول، حيث يسود الاعتقاد الخاطئ بأن الهياكل الخشبية تتغير في الحجم بمرور الوقت، وأنها غير مستقرة أو متينة، وأنها ليست مقاومة للرطوبة والآفات، وقابلة للاشتعال بسهولة. وقد تشكلت هذه الانطباعات العامة نتيجة لممارسات البناء الرديئة، حيث فقدت المواد الخشبية خصائصها ومتانتها بسبب الإعداد غير الصحيح أو سوء الاستخدام.

وعلى الرغم من هذه التحديات، هناك اهتمام متزايد عالميًّا بالمباني الخشبية متعددة الطوابق. وبالمقارنة مع المواد التقليدية مثل الصلب والخرسانة، فإن مواد البناء الخشبية أظهرت تأثيرًا أقل بكثير في تغير المناخ.

يرجع الاهتمام المتزايد بالمباني الخشبية الشاهقة إلى استدامة الخشب وميزاته الأخرى المهمة؛ فالخشب هو المادة الإنشائية الوحيدة المستدامة التي تتطلب طاقة ضئيلة لمعالجتها. ويتميز بمقاومة حرارية تفوق مقاومة الصلب بـ 500 مرة، ومقاومة الخرسانة بـ 10 مرات، مما يجعله عازلًا حراريًّا فعالًا يقلل من الجسور الحرارية ويعزز قدرة الجدران على الاحتفاظ بالحرارة. إضافة إلى ذلك، تتميز المنتجات الخشبية بأداء صوتي ممتاز؛ حيث تفوق نتائجها في تقليل انتقال الضوضاء الناتجة عن الصدمات أداء الخرسانة. ومن الناحية الاقتصادية، فإن المنتجات الخشبية متينة، وخفيفة الوزن، وسهلة التركيب في مواقع البناء، مما يجعلها خيارًا مثاليًّا من الناحية المالية.

يخزن الخشب الكربون في جميع مراحله؛ حيث يتكون الخشب طبيعيًّا من الكربون الذي تمتصه الأشجار من الغلاف الجوي أثناء نموها. وتحقق المنتجات الخشبية تأثيرًا إيجابيًّا من حيث الكربون، وذلك بسبب تأثير الإحلال والتخزين الطبيعي للكربون.

وفقًا لتقرير الحالة العالمية للمباني والتشييد لعام 2020، لوحظت زيادة سنوية في استهلاك الطاقة في المباني؛ حيث ارتفعت انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بالطاقة إلى 9.95 جيجا طن CO_2 في عام 2019. وعند إضافة انبعاثات البناء إلى انبعاثات التشغيل، كان قطاع البناء مسؤولًا عن 38% من إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون المرتبطة بالطاقة على مستوى العالم.

ولتحقيق التزامات اتفاقية باريس وأهداف التنمية المستدامة، يجب على قطاع البناء والتشييد خفض انبعاثات الكربون. وقد وضعت الأمم المتحدة لوائح ملزمة قانونيًّا للحد من انبعاثات الغازات الدفيئة (GHG) وتنفيذ تدابير الاستدامة؛ استجابةً للتهديد المتزايد لتغير المناخ. وفي هذا السياق، يسعى الاتحاد الأوروبي إلى تحقيق الحياد المناخي بحلول عام 2050؛ حيث يركز الميثاق الأخضر الأوروبي على تحقيق هذا الهدف، تماشيًا مع التزام الاتحاد الأوروبي بالمناخ العالمي وفقًا لاتفاقية باريس.

يهدف هذا الفصل إلى دراسة استدامة المباني الخشبية الشاهقة الحديثة باستخدام تقنيات التقييم متعددة المعايير. ويعد تقييم تصميم هذه المباني أمرًا ضروريًّا لضمان تحقيق الاستدامة. يتمتع استخدام الخشب في البناء بتأثير بيئي إيجابي لعدة أسباب:

1) الخشب هو المادة الإنشائية الوحيدة المستدامة التي تتطلب طاقة ضئيلة لمعالجتها.
2) تحتوي جميع المنتجات الخشبية على الكربون.
3) أثناء التصنيع، ينتج الخشب انبعاثات غازات دفيئة أقل مقارنةً بالمواد الأخرى، ولا يطلق أي انبعاثات لثاني أكسيد الكربون أثناء استخدامه في البناء.
4) يمكن إعادة استخدام المنتجات الخشبية وإعادة تدويرها.

تعد دراسات التأثير البيئي للمباني جزءًا أساسيًّا من عمليات البناء الحديثة، حيث تُدمَج هذه الدراسات في تصميم المباني المستدامة لضمان تقليل الأثر البيئي وتحقيق كفاءة الموارد.

1.2 المباني الخشبية الشاهقة الحديثة

يُعد برج ميوسَّا (Mjøsa Tower)، وهو مبنى متعدد الاستخدامات مكوَّن من ثمانية عشر طابقًا في برومونـدال، النرويج، حاليًّا أطول مبنى خشبي في العالم. اكتمل بناؤه في مارس 2019، ويبلغ ارتفاعه 85.4 مترًا (الشكل 1.1). تضمُّ ناطحة السحاب فندقًا ومكاتب وشققًا سكنية. ويتكون الهيكل الحامل من خشب القشرة الرقائقي المصفح Kerto LVL، مع أعمدة وعوارض مصنوعة من الخشب المصفح بالغراء (Glulam). وتتألف الطوابق العشرة الأولى من وحدات خشبية مسبقة الصنع، في حين أن أسطح الطوابق العلوية مصنوعة من الخرسانة لتوفير الوزن المطلوب لتحقيق استقرار المبنى. وبالمقارنة مع مبنى خرساني مسلح بنفس الارتفاع، مكَّنت الأجزاء المسبقة الصنع من إكمال البناء بسرعة أكبر. وقد صُمِّمَ مبنى البرج بحيث يكون له أقل تأثير ممكن على البيئة؛ حيث أن معظم المواد المستخدمة جاءت من مواقع لا تبعد أكثر من ميلين عن الموقع.

في جامعة كولومبيا البريطانية في فانكوفر، كندا، يُعد بروك كومونز (Brock Commons) (الشكل 1.2) منشأة سكنية بارتفاع 53 مترًا، تتسع لـ 404 طلاب. يتكون المبنى الهجين لهذا المشروع الذي تبلغ مساحته 15,000 متر مربع من سبعة عشر طابقًا بأرضيات مصنوعة من الخشب الرقائقي المتعامد CLT، مدعومة بأعمدة من الخشب المصفح بالغراء (glulam)، إضافةً إلى أساس خرساني ونواتين خرسانيتين مكونتين من 18 طابقًا. يتكون السقف من عوارض فولاذية وألواح

معدنيــة. أمــا الغــلاف الخارجــي للمبنــى، فهــو عبــارة عــن نظــام لوحــات مســبقة الصنــع مكســوة بطبقــة مــن ألــواح الألياف الخشــبية المضغوطــة عاليًــا. وفقًــا للمصممــين، فــإن وزن المبنــى أقــل بمقــدار 7500 طــن مقارنــةً بنظــيره الخرســاني. وغُطِّيَــت العنــاصر الخشــبية الداخليــة بألــواح الجبــس لتتوافــق مــع لوائــح الحريــق، والتــي كانــت أكثر صــلادةً مــن تلــك المفروضة عــلى المبانــي الفولاذيــة أو الخرســانية المســلحة التقليديــة.

شكل 1.1 برج ميوسا، برومدال، النرويج

شكل 1.2 مبنى بروك كومنز نالوود، فانكوفر، كندا

شكل 1.3 تريت، بيرغن، النرويج

اكتمل بناء المبنى عام 2017 باستخدام وحدات مسبقة الصنع، وأُنهِيَت أعمال الإنشاء خلال 70 يومًا من وصول الأجزاء إلى الموقع.

في برغن، النرويج، يُعرف مبنى تريت (Treet) (الشكل 1.3)، والذي يعني «الشجرة»، بأنه مجمع سكني مكون من 14 طابقًا بارتفاع 49 مترًا، وقد اكتمل بناؤه عام 2015 بعد أربع سنوات من بدء تصميمه في عام 2011. يدعم الهيكل الحامل المصنوع من الخشب المغلف بالغراء 62 شقة معيارية مسبقة الصنع ذات جدران من الخشب الرقائقي المتعامدCLT. ويُعد الهيكل الخشبي المغلف بالغراء العنصر الوحيد الذي يمنح المبنى صلابة إنشائية، بينما تضيف الألواح الخرسانية في الطابقين السادس والحادي عشر مزيدًا من الاستقرار. ولمنع تدهور الخشب في الواجهة الخارجية للمبنى، غُطِّيَت أجزاء منه بالزجاج والمعادن.

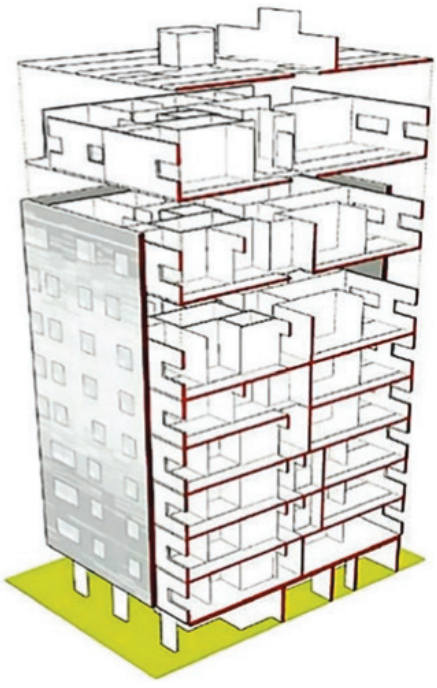
في ملبورن، أستراليا، اكتمل بناء مشروع تطوير فورتيه (Forte Development)، وهو مبنى مكون من تسعة طوابق بارتفاع 32.2 مترًا، عام 2012 (الشكل 1.4). وقد أصبح أول مبنى خشبي شاهق في البلاد. استُخدِمت جدران قصية مصنوعة من ألواح CLT في بناء المبنى، حيث كُدِّست الألواح بزاوية، ثم لُصِقَت على السطح وضُغِطَت هيدروليكيًّا. يضم المبنى أربعة منازل تاون هاوس و23 شقة سكنية. صُمِّمَت الشقق بحيث تكون مزدوجة الاتجاهات للاستفادة القصوى من الإضاءة الطبيعية، وطُوِّرت لتحقيق كفاءة حرارية، مما يقلل من استهلاك الطاقة اللازمة للتدفئة.

في هاكني، شمال شرق لندن، اكتمل بناء مبنى موراي جروف (Murray Grove Stadthaus)، وهو مبنى سكني مكون من تسعة طوابق بارتفاع 26 مترًا، عام 2009، ويضم 29 شقة سكنية

(الشكل 1.5). ويُعد هذا المبنى أول مبنى سكني شاهق في العالم يُبنَى بالكامل باستخدام ألواح خشبية مسبقة الصنع من الخشب الرقائقي المتعامد (CLT)، بما في ذلك نواته الإنشائية، والجدران الحاملة، والأرضيات، والسلالم، والمصاعد. وقد استُخدمت ألواح (CLT) في النواة الهيكلية للمبنى نظرًا لكثافتها العالية مقارنةً بالهياكل الخشبية التقليدية. وأضيفت طبقات عزل مستقلة لتحسين الأداء الصوتي.

يعرض الجدول 1.1 الاتجاه العالمي للمباني الخشبية الشاهقة. ويجري العمل حالياً على إنشاء المزيد من المباني الخشبية الشاهقة، مثل مشروع «تراس هاوس» في فانكوفر، كندا.

شكل 1.4 مبنى فورتِ، ملبورن، استراليا



شكل 1.5 مبنى موراي غروف ستاتهاوس، لندن، المملكة المتحدة

جدول 1.1 توجهات البناء للمباني الخشبية الشاهقة حول العالم

اسم المبنى	الموقع	الارتفاع (م)	الأدوار	سنة الانتهاء
تريت	برغن/النرويج	52.0	14	2014
برج ميوسّا	بروموندال/النرويج	85.4	18	2019
برج هوهو فيينا	فيينا/النمسا	84.0	24	2020
هاوت	أمستردام/هولندا	73.0	21	2021
حيبيريون	بوردو/فرنسا	57.0	18	2021
سيلفا	برغن/النرويج	52.0	18	2022
أسينت إم كي إي	بوردو/فرنسا	50.0	14	2022

1.3 انبعاثات الغازات الدفيئة (GHGs)

تساهم المباني مساهمةً كبيرةً في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وهو أمر جدير بالملاحظة نظرًا للتأثير البيئي الهائل الناجم عن عمليات تطوير المباني. تُنتج مواد البناء وتُنْشَأُ وتُستَخدمُ وتُهدَمُ على نطاق واسع، مما يؤدي إلى استهلاك عالمي ضخم للموارد وتوليد كميات كبيرة من النفايات. تتطلب أنشطة البناء والهدم حوالي 40% من إجمالي المواد الخام المستخدمة عالميًّا. بالإضافة إلى ذلك، فإن 32% من إجمالي الطاقة المستهلكة عالميًّا وثلث إجمالي انبعاثات الغازات الدفيئة ترتبط بأنشطة البناء. والمباني مسؤولة عن 35% من انبعاثات الغازات الدفيئة، و10% من الجسيمات المحمولة جوًّا، و25% من نفايات مدافن النفايات.

نظرًا لهذه التأثيرات البيئية السلبية، يجب إدخال أبدال مستدامة في قطاع البناء، مثل استخدام مواد أقل استهلاكًا للطاقة أو مواد معاد تدويرها أو قابلة للتحلل الحيوي. وفي هذا السياق، يلعب الاقتصاد الدائري لمواد البناء دورًا مهمًّا، حيث يساعد في تعظيم كفاءة استخدام المواد من خلال تدوير مخلفات البناء والهدم، وتقليل استهلاك الطاقة المعتمدة على الوقود الأحفوري والموارد الطبيعية.

في السنوات الأخيرة، اقترح الباحثون الخشب بوصفه مادة إنشائية ذات متطلبات طاقة أقل وانبعاثات كربونية منخفضة. يمكن استخدام حوالي 88% من الخشب في إنتاج الأخشاب أو غيرها من المنتجات مع الحد الأدنى من الهدر. يُعرف هذا النوع من إعادة الاستخدام بِالاقتصاد الدائري المغلق. في المقابل، يُستخدم خشب البناء والهدم أو نفايات ألياف الخشب في تصنيع منتجات الأخشاب الهندسية، وهو ما يُعرف بالاقتصاد الدائري المفتوح.

إلى جانب المنتجات الخشبية الهندسية، يمكن إنتاج مجموعة متنوعة من المنتجات الخشبية الصناعية، مثل ألواح الجسيمات والأرضيات الخشبية المصفحة. ومع ذلك، يُتَخلَّصُ من 63% من نفايات الخشب حاليًّا في مدافن النفايات أو حرقها دون تحويلها إلى طاقة. وعلى الرغم من أن الطمر والحرق لهما تأثيرات سلبية في البيئة وصحة الإنسان، إلا أنهما يحققان فائدة قليلة أو معدومة من حيث استرداد الطاقة. لذا، فإن إعادة استخدام نفايات الخشب وتقليلها وتدويرها، مثل استخدامها في الخرسانة الحيوية والمركبات الخشبية البلاستيكية، يمثل جزءًا من الاقتصاد الدائري الذي يمكن أن يسهم في تقليل التأثيرات البيئية.

لتحقيق التنمية المستدامة، هناك حاجة إلى تقييم منهجي لدراسة تأثير إنشاء المباني الهيكلية الخشبية، مما يسمح باتخاذ قرارات أكثر كفاءة وصديقة للبيئة.

1.4 معايير التقييم

حُدِّدت سبع خصائص لتمثيل كمية الخشب المستخدمة في البناء من أجل تقييم مختلف المباني الخشبية الشاهقة. يشمل التقييم الارتفاع المحقق بالمتر وعدد الطوابق، بالإضافة إلى مدة الإنشاء وكفاءة التكلفة، إلى جانب المعايير البيئية مثل تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون واستهلاك الطاقة.

بناءً على الدراسات السابقة والخبرات المكتسبة، قيَّمَ مؤلفو هذا الفصل أهمية المعايير الواردة في الجدول 1.2.

جدول 1.2

المعيار	القيمة المفضلة (أقصى/أدنى)	الأهمية	وحدة القياس	الوصف
استخدام الخشب	أقصى	0.2	م3/م2	مؤشر نسبي يعبر عن نسبة الهياكل الخشبية المستخدمة (م^3) لكل م^2 من المبنى. يفضل استخدام نسبة أعلى من الخشب.
ارتفاع المباني	أقصى	0.2	متر	الارتفاع المعماري للمبنى. الهدف هو تحقيق أطول المباني باستخدام الخشب، لذا فإن الارتفاع الأكبر مفضل.
عدد الطوابق	أقصى	0.1	عدد	عدد الطوابق في المبنى. قد يكون للمباني ذات الارتفاع نفسه عدد طوابق مختلف والعكس صحيح. كلما زاد عدد الطوابق، زادت المساحة القابلة للاستخدام في المبنى.
تكلفة البناء	أدنى	0.1	يورو/م2	نسبة تكلفة المشروع إلى إجمالي المساحة. كلما انخفضت التكلفة، كان المشروع أكثر كفاءة من حيث التكلفة.
مدة التنفيذ	أدنى	0.1	عدد الأيام لكل طابق	الوقت باليوم اللازم لتركيب الهياكل الحاملة لكل طابق. كلما قلّت مدة التنفيذ، كان البناء أكثر اقتصادًا.
تقليل انبعاث ثاني أكسيد الكربون	أقصى	0.2	طن	الحد من كمية انبعاثات ثاني أكسيد الكربون مقارنةً بمبنى خرساني مسلح. كلما زاد الفرق، انخفض التأثير البيئي للمباني الخشبية.
استخدام الطاقة	أدنى	0.1	ك.و.س/م2 سنوياً	معدل استهلاك الطاقة السنوي لكل متر مربع من المبنى. كلما انخفضت الكمية، كان المبنى أكثر كفاءة في استهلاك الطاقة، وأقل تأثيرًا سلبيًا على البيئة الطبيعية.

ملاحظة: أ **أقصى** – تعني أن القيمة الأعلى للمعيار مفضلة، **أدنى** – تعني أن القيمة الأقل للمعيار مفضلة.

وفقًا للتقييم العام لاستدامة المباني، يُعد مبنى بروك كومونز في كندا أكثر المباني استدامةً، بينما يحتل برج ميوسّا المرتبة الثانية بفارق بسيط في المؤشر.

تتوافق هذه النتائج مع الأبحاث السابقة التي أجراها توبيناية وآخرون، حيث صنَّفت الدراسة برج ميوسَّا بوصفه أفضل نظام في سبع فئات مختلفة. علاوةً على ذلك، يُلاحظ أن إضافة أدلة جديدة ساهمت في إعادة تقييم شامل للمباني، مما أدى إلى تغيير الترتيب النهائي. بالإضافة إلى ذلك، قد تتغير قيم بعض مؤشرات الاستدامة مع مرور الوقت، على سبيل المثال، قد يُبْنَى سوبر ماركت جديد أو روضة أطفال جديدة، مما يحسن إمكانية الوصول إلى المبنى. وبالتالي، فإنه من الضروري إجراء تحديثات دورية لتقييمات الاستدامة عند حدوث تغيرات في القيم الأساسية للمؤشرات.

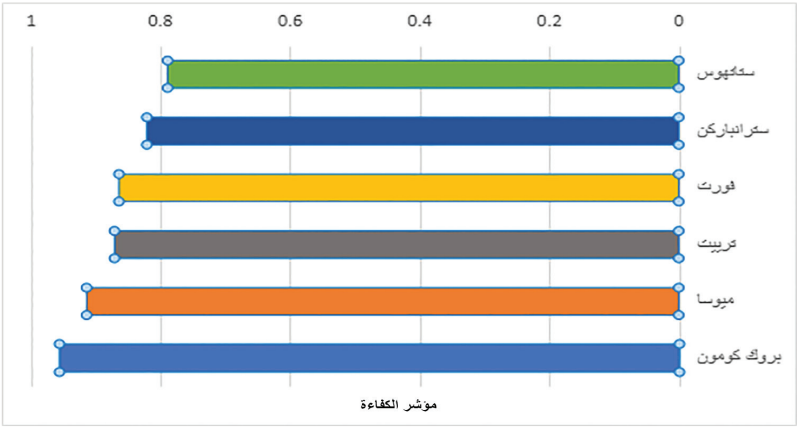
أكدت هذه الدراسة النتائج التي توصل إليها ليسكوفر وبريمروف، والتي أفادت بأن عمر المباني الخشبية ينعكس في تصميمها المعماري، ويزداد ارتفاع المباني مع تقدم السنوات. وَتبين أن المباني الأعلى ارتفاعًا، مثل بروك كومونز وبرج ميوسّا، حصلت على تصنيفات استدامة أعلى.

بناءً على مؤشرات الكفاءة المحسوبة، صُنِّفت المباني وفقًا لمؤشر الكفاءة؛ فكلما زادت الكفاءة، ارتفع التصنيف. ووفقًا للحسابات، يُعد بروك كومونز المبنى الأكثر ملاءمةً للبيئة عبر جميع فئات تصنيفات الاستدامة. فعلى الرغم من أنه احتل المرتبة الثانية من حيث المؤشرات البيئية، فقد تفوق على باقي المباني في المؤشرات الاجتماعية.

أما برج ميوسَّا، فقد احتل المرتبة الثانية، حيث لم يكن تصنيفه العام بعيدًا عن تصنيف بروك كومونز. يتمتع بروك كومونز بأداء

اقتصـــادي اجتماعـــي متفـــوق، في حـــين أن بـــرج ميوسَّـــا يتميـــز بأعـــلى أداء بيئـــي.

يُعرض التقييم العام لاستدامة المباني في الشكل 1.6.



شكل 1.6 النتائج العامة للقياس

1.5 تكلفة البناء

تُقَـــدَّرُ تكلفـــة إنشـــاء المبانـــي مـــن خـــلال قوائـــم المـــواد (BOMs) المســـتخلصة مـــن التصاميـــم المعماريـــة وبيانـــات تســـعير المـــواد مـــن قاعـــدة بيانـــات RSMeans، وهـــي قاعـــدة بيانـــات محدثـــة تقـــدِّم تقديـــرات تفصيليـــة لتكاليـــف البنـــاء. تشـــمل هـــذه القاعـــدة بيانـــات تكلفـــة المـــواد الإنشـــائية، والعمالـــة، والنقـــل، والتخزيـــن وفقًـــا للمتوســـط الصناعـــي المحـــلي. غالبًـــا مـــا تكـــون أنظمـــة تصميـــم الســـباكة وبرامـــج محـــاكاة الطاقـــة قـــادرة عـــلى تقديـــر اســـتهلاك الطاقـــة التشـــغيلي، مثـــل الاســـتهلاك اليومـــي للكهربـــاء، والغـــاز الطبيعـــي، والميـــاه.

صُمِّـــمَ مبنـــى خشـــبي ضخـــم شـــاهق بارتفـــاع 12 طابقًـــا ومســـاحة 8360م² ليكـــون أول مبنـــى شـــاهق مصنـــوع مـــن الخشـــب الرقائقـــي المتعامد

(CLT[1]) والخشب المصفّح بالغراء (Glulam[2]) في الولايات المتحدة. وكان من المخطط إنشاء هذا المبنى في بورتلاند، أوريغون، لكن عُلِّق المشروع بسبب نقص التمويل [3]. وبهدف إجراء مقارنة موضوعية، صُمِّمَ مبنى خرساني مسلح بنفس مستوى الحماية من الحرائق والعزل وكفاءة استهلاك الطاقة. وقد طوَّرت شركة LEVER Architecture في بورتلاند، أوريغون، كلا التصميمين، بمشاركة من KPFF Engineering في سياتل، حيث تولت الهندسة الإنشائية والتحليل الإنشائي الإضافي.

نظرًا لأن الخشب الرقائقي المتعامد (CLT) أخف وزنًا من الخرسانة، فإن الوزن الإجمالي للمبنى الخشبي كان أقل بنسبة 33% مقارنةً بالمبنى الخرساني المسلح.

لم يقدم المهندسون المعماريون والمقاولون تقديرات تفصيلية للتكاليف للمبنيين المخطط لهما، ولذلك استُخدِمَتْ بيانات RSMeans 2018، والتي تعرض معلومات عن تكلفة أكثر مواد البناء شيوعًا، لتحديد أسعار المواد والعمالة والتكاليف الإضافية المدرجة في قوائم

(1) رأي المترجم: جرت العادة في الأوساط العلمية والهندسية بالذات عدم تكرار ذكر المصطلحات المركبة الطويلة، والإكتفاء بذكرها في مقدمة الفصل، ويشار لها بالمختصر الأصلي لسهولة تداولها في الأوساط الهندسية والعملية. خصوصاً إذا كانت الكتب تخضَع لاشتراطات توفيرها في البيئات الرقمية ومحركات البحث SEO، وبالتالي سنكتفي بذكر المصطلح بدلاً من الاسم الكامل في بقية نصوص هذا الفصل.

(2) ملاحظة المترجم: تثار في ترجمة مصطلح Glulam إشكالية اصطلاحية تتعلق بمدى دقة المقابل العربي في تمثيل الطبيعة التصنيعية والوظيفية لهذه المادة. فبعض المرادفات، مثل الخشب المطلي بالغراء، تُطرح كبديل يتناول طبيعة الغراء السائلة قبل التحول للحالة الصلبة، تنصرف دلالتها إلى مجرد المعالجة السطحية، وهو معنى لا يعبّر عن البنية الحقيقية للمنتج؛ إذ إن الغراء في هذا النوع من الخشب لا يؤدي وظيفة الطلاء. كذلك يُطرح تعبير الخشب المغلّف بالغراء، والذي قد يُفهم منه معنى التغليف الخارجي، وهو أيضًا غير مطابق تمامًا للدلالة الفنية المقصودة. لذلك رُجِّح في هذه الترجمة استعمال الخشب المصفّح بالغراء، لأنه أقرب إلى توصيف عملية التصنيع نفسها، وأدق في نقل مفهوم الترصيف واللصق الطبقي الذي يقوم عليه هذا المنتج في الاستعمال الهندسي والإنشائي. إذا أن للغراء هنا وظيفة الربط البنيوي بين شرائح أو طبقات خشبية متراكبة تُكوِّن في مجموعها عنصرًا إنشائيًا واحدًا.

(3) Framework، إطار العمل – مشروع بناء خشبي شاهق [Framework]، (الولايات المتحدة، 2020)،

المـواد. وقُـدِّرت تكلفـة الخشـب الرقائقـي المتعامـد (CLT) بنـاءً عـلى تكلفـة الخشـب المصفّـح بالغـراء (Glulam)، بمـا في ذلـك بيانـات العمالـة والتكاليـف الإضافيـة المذكـورة في RSMeans بوصفهـا مصـدرًا بديـلًا. تعتمـد جميـع هـذه التكاليـف عـلى المتوسـط الصناعـي المحـلي للمـواد في بورتلانـد، أوريغـون.

قُدِّمـت تكاليـف البنـاء الملخصـة للمبنيـين الخشـبي والخرسـاني المسـلح مقسـمةً حسـب أنـواع التجميـع في الجـدول 1.3 والشـكل 1.7.

اسـتنادًا إلى بيانـات BOM المسـتمدة مـن التصاميـم وقاعـدة بيانـات RSMeans، مـن المتوقـع أن تكـون التكاليـف الأوليـة الإجماليـة للمبنـى الخشـبي أعـلى بنسـبة 88% مـن تكلفـة المبنـى الخرسـاني المسـلح في هـذه الدراسـة. يعـود ذلـك إلى ارتفـاع أسـعار خشـب CLT وخشـب Glulam بوصفهمـا منتجـات غـير تجاريـة مقارنـةً بالمـواد الشـائعة مثـل الفـولاذ والخرسـانة. وعـلى الرغـم مـن ازديـاد عـدد الـشركات المصنعـة لخشـب(CLT) بسـبب الطلـب المتزايـد في قطـاع البنـاء، إلا أن السـعر لا يـزال مرتفعًـا بسـبب قلـة الموردين في أمريـكا الشـمالية.

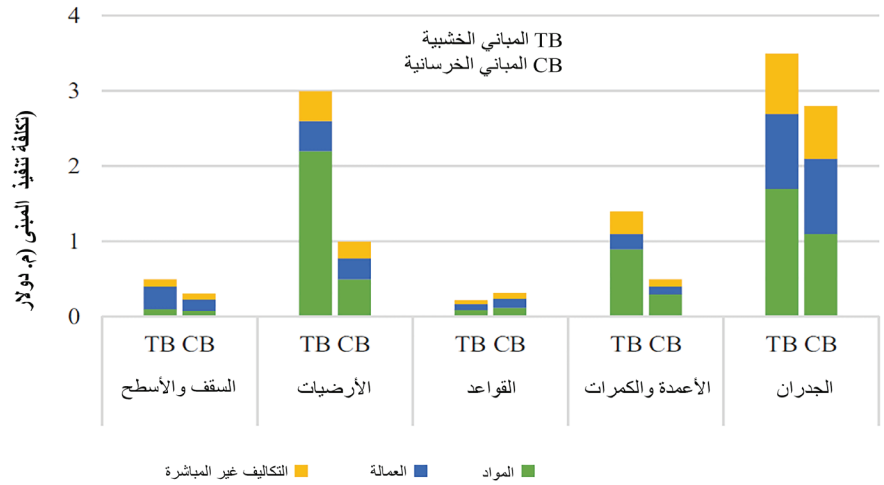
في المبانـي الخشـبية الضخمـة، يُسـتخدم خشـب CLT بشـكل أسـاسي في الأرضيـات والجـدران، بينمـا يُسـتخدم خشـب Glulam في الأعمـدة والعـوارض، في حـين تُسـتَخدم الخرسـانة الأرخـص تكلفـة في هـذه العنـاصر بالمبانـي الخرسـانية المسـلّحة.

إذا تَحقَّـقَ التسـويق الكامـل للمنتجـات الخشـبية الضخمـة، فمـن الممكـن أن تصبـح التكاليـف الأوليـة للمبانـي الخشـبية الشـاهقة أكثـر تنافسـية، خاصـة مـع تحقيـق وفـورات في الوقـت والتكلفـة أثنـاء الإنشـاء مقارنـةً بالمبانـي الخرسـانية المسـلحة التقليديـة.

جدول 1.3 تكاليف إنشاء مبنيين شاهقين خشبي وخرساني حسب نوع التجميع

نوع التجميع	المواد (دولار أمريكي)	العملة (دولار أمريكي)	تكاليف إضافية (دولار أمريكي)	الإجمالي (دولار أمريكي)
السقف والسطح				
مبنى خشبي ضخم	164,819	$240,260.00	$149,794.00	554,873
مبنى خرساني مسلح	98,952	$126,928.00	$80,347.00	306,227
الأرضية				
مبنى خشبي ضخم	2,138,568	$408,303.00	$428,117.00	2,974,988
مبنى خرساني مسلح	574,012	$236,041.00	$181,824.00	991,877
الأساسات				
مبنى خشبي ضخم	60,701	$50,489.00	$37,115.00	148,305
مبنى خرساني مسلح	84,444	$71,526.00	$53,035.00	209,005
الأعمدة والكمرات				
مبنى خشبي ضخم	936,605	$142,659.00	$170,023.00	1,249,287
مبنى خرساني مسلح	173,503	$57,780.00	$50,749.00	282,032
الجدران				
مبنى خشبي ضخم	1,708,566	$1,091,486.00	$750,321.00	3,550,373(1)
مبنى خرساني مسلح	1,110,229	$975,842.00	$635,150.00	2,721,221
الإجمالي				
مبنى خشبي ضخم				8,477,816
مبنى خرساني مسلح				4,510,002

(1) ملاحظة المترجم: وُجِد خطأ حسابي بالكتاب الأصلي، وجرى تصحيحه في الترجمة.



شكل 1.7 تكاليف الإنشاء الأولية حسب نوع التجميع للمباني الخشبية الشاهقة ومباني الخرسانة المسلحة

1.6 السلامة من الحرائق

قد تواجه المباني الخشبية الشاهقة مشكلات كبيرة من منظور السلامة من الحرائق، تشمل التحديات الإضافية الأساسية لهذه المباني ما يلي:

- **خطر قابلية الاشتعال:** الأسطح الداخلية المكشوفة الكبيرة من الخشب قابلة للاشتعال.
- **اندلاع الحريق إلى الخارج:** يمكن أن ينتشر الحريق عموديًّا عبر الواجهات القابلة للاشتعال أو الفراغات الهيكلية.
- **الحرائق أثناء البناء:** تمثل هذه مشكلة خاصة في الهياكل المصنوعة من الأخشاب خفيفة الوزن.
- **الاحتراق الكامل:** ما الذي يحدث بعد أن تنطفئ النيران من تلقاء نفسها؟
- **مقاومة الحريق:** تساعد في الأداء الإنشائي واحتواء النيران.

وُثِّقت مقاومة الحريق الممتازة للأخشاب الثقيلة توثيقًا موسَّعًا في الأدبيات العلمية. يعود هذا السلوك إلى معدل التفحم التدريجي والمتوقع

لسطح الخشب عند التعرض للنيران الشديدة، مما يتيح حساب مقاومة الحريق عن طريق طرح المساحة المتفحمة من المقطع العرضي الأصلي، مع طبقة رقيقة من الخشب المتأثر بالحرارة. توفر المكونات الإنشائية غير المحمية المصنوعة من الأخشاب الثقيلة مقاومة عالية للحريق، على سبيل المثال، أفضل بكثير من الفولاذ الهيكلي غير المحمي.

التغليف هو عملية إحاطة المواد القابلة للاشتعال بأسطح خشبية. وعلى الرغم من أن التغليف يمكن أن يحسن السلامة من الحرائق، إلا أنه لا يحل جميع المشكلات المرتبطة بحرائق المباني الخشبية. يتطلب التغليف الكامل إحاطة الخشب بطبقات كافية من المواد الواقية لمنع اشتعاله أو تفحمه، حتى في حالة الاحتراق الكامل داخل الحيز، مما يضمن مقاومة حريق مماثلة للمواد غير القابلة للاحتراق. يعمل التغليف الجزئي على إبطاء تطور الحريق على الأسطح الخشبية، ولكن نظرًا لوجود طبقات أقل، قد تسقط قبل احتراق النيران بالكامل، مما يترك الهيكل الخشبي مكشوفًا للنيران المتقدمة. في كلتا الحالتين، هناك معضلة جمالية لأن أصحاب المباني والمستخدمين والمعماريين يفضلون رؤية الخشب، في حين أن مهندسي الحريق قد يضطرون إلى تغطيته بالكامل.

يمكن تصميم المباني الخشبية لمقاومة الاحتراق الكامل فقط من خلال استخدام التغليف الكامل، الذي يمنع أي عنصر خشبي إنشائي من التعرض للتفحم طوال فترة تطور الحريق وامتداده وتلاشيه. يعتمد مستوى التغليف المطلوب على عدد من العوامل:

- شدة الحريق ومدته.
- سرعة انخفاض درجة الحرارة نتيجة التهوية أثناء مرحلة تلاشي الحريق.
- قدرة التكسيات على التحمل.
- التدخل بعد إطفاء الحريق.

يُعد نظام الرش الآلي خط الدفاع الأول في مكافحة الحرائق. تمثل فعالية نظام الرشاشات في المباني الخشبية الشاهقة مصدر قلق رئيسي للمصممين وواضعي اللوائح. تكون متطلبات مقاومة الحريق الإضافية منخفضة إذا ضُمِنَ عمل الرشاشات بشكل موثوق، ولكن إذا لم يكن ذلك مضمونًا، فإن المباني الخشبية تقع في فئة مختلفة وتتطلب احتياطات إضافية.

يجب تصميم المباني الخشبية الشاهقة مع مراعاة السلامة السلبية من الحرائق على جميع المستويات، بما في ذلك طرق الإخلاء ومقاومة الحريق والفجوات الخفية، وغيرها. لحماية الأسطح الخشبية من الحريق، يُرَكَّزُ الآن على استخدام التغليف. تشمل عدة خيارات ما يلي:

1) جميع الجدران والأسقف الخشبية مكشوفة.
2) جميع الجدران مكشوفة، بينما تُغَطَّى الأسقف.
3) جميع الأعمدة والعوارض مكشوفة، مع تأمين الجدران والأسقف.
4) استخدام طبقة واحدة من ألواح الجبس المحتوية على الجص لحماية الخشب (تغليف جزئي).
5) تغليف كامل باستخدام ألواح الجبس، لتغطية جميع العناصر الخشبية.

يعمل مصممو المباني الفولاذية والخرسانية المسلحة على أساس أنه إذا حُقِّقَ الفصل المناسب بين الفراغات، وصُمِّمَ الهيكل بمقاومة حريق كافية، فإن الحريق سينطفئ تلقائيًّا بمجرد استهلاك جميع المواد القابلة للاشتعال، وستَنخفض الحرارة المتبقية إلى درجة الحرارة المحيطة. تقِل احتِمالية هذا السيناريو في المباني الخشبية؛ حيث سيظل هناك بعض الوقود المتاح داخل العناصر الإنشائية الخشبية، مما قد يؤدي إلى استمرار التفحم البطيء لفترة طويلة بعد انطفاء النيران الرئيسية. في هذه الحالة، يمكن تحقيق مستوى مماثل من السلامة من الحرائق في المباني الخشبية الشاهقة مقارنةً بالمباني الفولاذية أو الخرسانية المسلحة فقط إذا صُمِّمَت لمقاومة الاحتراق الكامل.

1.7 ارتفاع المبنى

يُـدرِج الجـدول 1.4 ارتفاعـات مختلفـة للمبانـي، بـدءًا مـن المنخفضـة وصـولًا إلى الشـاهقة، إلى جانـب التوصيـات الخاصـة بالحمايـة السـلبية مـن الحرائـق بنـاءً عـلى وجـود أنظمـة الـرش وارتفـاع المبنـى. تُعـرَّف الصفـوف الموسـومة بـ «بـدون رشاشـات» و«رشاشـات عاديـة» وفقًـا للمعايـير العاديـة. وأُضِيْـفَ صـف إضـافي تحـت مسـمى «رشاشـات خاصـة» لإتاحـة المجـال للمصممـين لاتخـاذ احتياطـات إضافيـة، مثـل تركيـب خـزان ميـاه مخصـص داخـل المبنـى لضمـان توافـر الميـاه للرشاشـات حتـى في حـال تـضرر شـبكات الميـاه في الشـوارع جـراء هـزة أرضيـة أو انهيـار أرضي، ممـا يسـمح بزيـادة مسـاحة الخشـب المكشـوف في المبانـي الخشـبية الشـاهقة.

الجـدول 1.4 يقـدم اقتراحـات لاحتياطـات الحمايـة مـن الحرائـق وفقًـا لأنظمـة الرشاشـات وارتفـاع المبنـى.

الارتفاع	منخفض	متوسط	مرتفع	عالٍ	شاهق
الأدوار	2-1	5-3	8-6	15-9	+15
احتمالية الهروب	سريع	بطيء	هروب مدعوم	هروب مدعوم	صعب الهروب
بدون الرشاشات التلقائية	المساحات الداخلية مُعرّضة	لا يوجد خشب مكشوف	غير مسموح	غير مسموح	غير مسموح
رشاشات تلقائية عادية	المساحات الكبيرة مُعرَّضة	المساحات الداخلية معرَّضة	لا يوجد خشب معرَّض للاحتراق	مدعومة بأنابيب الهروب بالكامل	مدعومة بأنابيب الهروب بالكامل
رشاشات تلقائية متخصصة	المساحات الكبيرة معرَّضة	المساحات الكبيرة مهددة	المساحات الداخلية معرَّضة	لا يوجد خشب معرَّض	مدعومة بأنابيب الهروب بالكامل

تمثل الخيارات المدرجة في الجدول 1.4 أمثلة توضيحية لاستعراض التنوع في البدائل الممكنة. سيكون من الضروري لواضعي الأنظمة واللوائح في العديد من الدول استحداث معايير تمثل هذه المفاهيم بشكل عقلاني مع تزايد انتشار المباني الخشبية الشاهقة. ويمكن أن تساهم المزيد من الدراسات، بما في ذلك تقييم المخاطر الكمي، في تحسين تعريف هذه المعايير بشكل أدق.

تشكل فعالية أنظمة الرش التلقائية في المباني الشاهقة مصدرَ قلق رئيسي للمصممين والمهندسين. تكون متطلبات السلامة من الحرائق منخفضة في حال تأكّدنا من عمل أنظمة الرش بشكل موثوق، ولكن إذا لم يكن ذلك مضمونًا، فإن الهياكل الخشبية تقع ضمن فئة خاصة تتطلب احتياطات إضافية تفوق تلك المطلوبة للمواد غير القابلة للاحتراق.

1.8 الاستنتاجات:

تناول هذا الفصل النظرية والتطبيق في تقييم الاستدامة، إلى جانب المعرفة المتعلقة بالمباني الخشبية الشاهقة. فيما يلي ملخص لأهم النتائج التي تُوُصِّلَ إليها:

- تتيح التكنولوجيا الحديثة والمواد الخشبية الهندسية- مثل الخشب المصفّح بالغراء (Glulam) والخشب الرقائقي المتعامد (CLT) والخشب الرقائقي المصفّح (LVL)- إمكانية إنشاء مبانٍ خشبية شاهقة. بالمقارنة مع المباني الحديثة المصنوعة من الفولاذ والخرسانة، فإن للإنشاءات الخشبية مزايا عديدة. الخشب هو المادة الإنشائية الوحيدة المتجددة المتاحة حاليًّا، وَيتمتع بخصائص بيئية إيجابية.

- يتميز الخشب بكونه عازلًا حراريًّا ممتازًا، ويتطلب تصنيعه طاقة أقل مقارنةً بالخرسانة ومواد البناء الأخرى؛ حيث تعتمد طاقته الإنتاجية بشكل أساسي على الوقود الأحفوري؛ نظرًا لإمكانية التصنيع المسبق للمكونات وانخفاض تكاليف النقل وقصر مدة تنفيذ المشروعات، فإن البناء باستخدام الخشب يعد خيارًا اقتصاديًّا أكثر كفاءة.

- أتاح التقييم متعدد المعايير التوصل إلى استنتاج مفاده أن المباني الخشبية الأطول أكثر كفاءة من الناحيتين الاقتصادية والبيئية؛ حيث حصلت المباني الأكثر ارتفاعًا على تصنيفات أعلى.

- يدرك المصممون الذين يعطون الأولوية لأهداف الاستدامة أهمية تجدد الخشب وانخفاض بصمته الكربونية. كان هناك نقاش حول الفوائد البيئية وتخفيض انبعاثات الكربون الناجمة عن استخدام المنتجات الخشبية الضخمة الحديثة في المباني. ومع ذلك، فإن تكلفة الاستثمار في هذه المباني منخفضة أو معدومة الكربون آخذة في الارتفاع.

- وفقًا لبيانات RSMeans الخاصة بتكاليف البناء التجارية، يقدر أن تصميم المباني الخشبية الضخمة يتطلب تكلفة أولية أعلى بنسبة 26% مقارنةً بالمباني الخرسانية. نظرًا لعدم توفر بيانات تاريخية كافية حول تكاليف البناء والتشغيل لهذه المباني، لا تزال هناك حاجة إلى المزيد من الأبحاث والبيانات لتعميم هذه النتائج.

قَيَّمَ معظم الباحثين التأثيرات البيئية للمباني السكنية منخفضة الارتفاع، بينما ركز عددٌ قليلٌ جدًّا من الدراسات على المباني التجارية الشاهقة. تتطلب المباني التجارية الشاهقة كميات كبيرة

مـــن المـــواد والطاقـــة، وبالتـــالي هنـــاك حاجـــة إلى المزيـــد مـــن الأبحـــاث في هـــذا المجـــال لتحقيـــق اســـتدامة البنـــاء.

قـــدم هـــذا الفصـــل عـــددًا مـــن التوصيـــات لمعالجـــة المشـــكلات الحاليـــة المتعلقـــة بتصميـــم مقاومـــة الحرائـــق في المبانـــي الخشـــبية الشـــاهقة. وبنـــاءً عـــلى ارتفـــاع المبنـــى ومـــدى موثوقيـــة إمـــدادات الميـــاه لأنظمـــة الـــرش المطلوبـــة، يجـــب تقديـــم مســـتويات مختلفـــة مـــن الحمايـــة أو التغليـــف للهيـــكل الخشـــبي.

المراجع:

1. **Al-nassar, F.,** Ruparathna, R., Chhipi-Shrestha, G., Haider, H., Hewage, K., & Sadiq, R. (2016). Sustainability assessment framework for low rise commercial buildings: Life cycle impact index-based approach. *Clean Technologies and Environmental Policy, 18*, 2579–2590.
2. **Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC).** (2020). *Global status report for buildings and construction*. Available online: https://globalabc.org/news/launched-2020-globalsta-tus-report-buildings-and-construction. Accessed 18 Apr 2023.
3. **Balasbaneh, A. T.,** & Bin Marsono, A. K. (2017). Proposing of new building scheme and composite towards global warming mitigation for Malaysia. *International Journal of Sustainable Engineering, 10*(3), 176–184.
4. **Bergman, R.,** Puettmann, M., Taylor, A., & Skog, K. E. (2014). The carbon impacts of wood products. *Forest Products Journal, 64*(7/8), 220–231. https://doi.org/10.13073/FPJ-D-14-00047
5. **Börjesson, P.,** & Gustavsson, L. (2000). Greenhouse gas balanc-es in building construction: Wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives. *Energy Policy, 28*(9), 575–588.
6. **Buchanan, A. H.** (2017). Fire resistance of multistorey timber buildings. In *Fire science and technology 2015: The proceed-ings of 10th Asia-Oceania symposium on fire science and tech-nology* (pp. 9–16). Springer Singapore.
7. **Buchanan, A. H.,** & Abu, A. K. (2017). *Structural design for fire safety*. Wiley.
8. **Caldas, L. R.,** Saraiva, A. B., Lucena, A. F., Da Gloria, M. H. Y., Santos, A. S., & Toledo Filho, R. D. (2021). Building materials in a circular economy: The case of wood waste as CO2-sink in bio concrete. *Resources, Conservation and Recycling, 166*, 105346.

9. **Design Build Network.** (2019). *The world's tallest wooden buildings*. *The world's tallest wooden buildings*. worldconstructionnetwork.com
10. **European Commission.** EU climate action and the European green deal. Available online: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal_en. Accessed 19 Apr 2023.
11. **Framework.** (2020). *Framework*. https://www.frameworkportland.com/. Accessed 19 Apr 2023.
12. **Gu, H.,** Liang, S., & Bergman, R. (2020). Comparison of building construction and life-cycle cost for a high-rise mass timber building with its concrete alternative. *Forest Products Journal, 70*(4), 482–492.
13. **Kuzmanovska, I.,** Gasparri, E., Monne, D. T., & Aitchison, M. (2018, August). Tall timber buildings: Emerging trends and typologies. In *2018 world conference on timber engineering*.
14. **Lindholm, J.,** & Reiterer, S. M. (2017). *Marketing innovative products in a conservative industry: A look at cross-laminated timber*. Master's Thesis. https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1120866/FULLTEXT01.pdf
15. **Malabi Eberhardt, L. C.,** van Stijn, A., Nygaard Rasmussen, F., Birkved, M., & Birgisdottir, H. (2020). Development of a life cycle assessment allocation approach for circular economy in the built environment. *Sustainability, 12*(22), 9579.
16. **Oliver, C. D.,** Nassar, N. T., Lippke, B. R., & McCarter, J. B. (2014). Carbon, fossil fuel, and biodiversity mitigation with wood and forests. *Journal of Sustainable Forestry, 33*(3), 248–275.
17. **Quebec Wood Export Bureau (QWEB).** (2015). *Wood construction technologies in Quebec, Canada*. Retrieved from: http://www.quebecwoodexport.com/images/stories/pdf/Catalogue_AN_13-04-2016.pdf
18. **Rios, F. C.,** Grau, D., & Chong, W. K. (2019). Reusing exterior wall framing systems: A cradle-to-cradle comparative life cycle assessment. *Waste Management, 94*, 120–135.

19. **Skullestad, J. L.,** Bohne, R. A., & Lohne, J. (2016). High-rise timber buildings as a climate change mitigation measure–A comparative LCA of structural system alternatives. *Energy Procedia, 96*, 112–123.
20. **Sustainable Development Goals from United Nation.** https://sdgs.un.org/goals. Accessed 20 Apr 2023.
21. **Tupėnaitė, L.,** Žilėnaitė, V., Kanapeckienė, L., Sajjadian, S. M., Gečys, T., Sakalauskienė, L., & Naimavičienė, J. (2019). Multiple criteria assessment of high-rise timber buildings. *Engineering Structures and Technologies, 11*(3), 87–94.
22. **Tupenaite, L.,** Zilenaite, V., Kanapeckiene, L., Gecys, T., & Geipele, I. (2021). Sustainability assessment of modern high-rise timber buildings. *Sustainability, 13*(16), 8719.
23. **WSP.** (2018). *Tall timber: How high can CLT go?* Retrieved from https://www.wsp.com/en-RO/insights/tall-timber-how-high-can-clt-go
24. **Žegarac Leskovar, V.,** & Premrov, M. (2021). A review of architectural and structural design typologies of multi-storey timber buildings in Europe. *Forests, 12*(6), 757.

الفصل الثاني

الهياكل الغشائية فائقة الخفة نحو بيئة مستدامة

أليخاندرو كوميتي، هاريكرشنان فيجاياكوماران، محمد حسين نجابت ميمندي، لويس سيشاس، أدريان كابيو، دييغو ميسيروني، ماسيمو بيناسا، كريستوف بايش، ميغيل بيسا، آدم سي. باون، فرانشيسكو دال كورسو، وفيديريكو بوسي

2.1 المقدمة

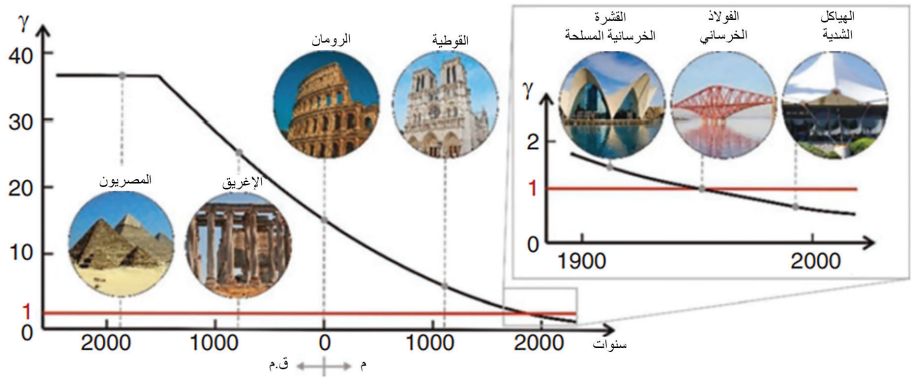
يشهد كوكبنا تفاقمًا مقلقًا في آثار التغير المناخي خلال العقود الأخيرة نتيجة العوامل البشرية المساهمة في تدهور البيئة. ويستلزم الحجم الحالي لهذه الأزمة العالمية اتخاذ إجراءات علاجية عاجلة وفورية لضمان بقاء محيط حيوي آمن للأجيال القادمة. وقد عَدَّت الأمم المتحدة التغير المناخي تحديًا محوريًّا يواجه الكوكب، إذ يؤثر جوهريًّا في جميع أهداف التنمية المستدامة (SDGs) التي وضعتها الأمم المتحدة. ومن بين الأهداف السبعة عشر للتنمية المستدامة المذكورة، تضطلع ممارسات تشييد المباني بدور مؤثر في تحقيق الهدف 11 (المدن والمجتمعات المستدامة) والهدف 12 (الإنتاج والاستهلاك المسؤولان)، مما يبرز الحاجة إلى إحداث تغيير جذري في قطاع البناء لتحقيق التحول نحو الطاقة النظيفة.

تتسم عمليات تشييد المباني وتشغيلها بأكبر بصمة بيئية مقارنةً بالقطاعات الأخرى؛ حيث تستهلك 36% من إجمالي الطاقة العالمية وتنتج 39% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وهي نسبة تتجاوز قطاع النقل (33%) والأنشطة الصناعية (29%). ويُظهر تقرير حديث لبرنامج الأمم المتحدة للبيئة أن بصمة الكربون الناتجة عن المباني في تزايد مستمر؛ حيث إن 28% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون

المرتبطة بالمباني تعود إلى استخدام المواد، مع توقع تضاعف الطلب على المباني والمساحات الأرضية بحلول عام 2060. وبناءً على ذلك، سيزداد الطلب على المواد بشكل كبير في البيئات الحضرية، خاصةً في قارتي آسيا وأفريقيا. في ظل هذه الظروف، تكتسب تقنيات البناء المبتكرة التي تستخدم مواد منخفضة الكربون أهميةً بالغة في تقليل الكربون المضمَّن في المواد بهدف خفض الانبعاثات الكربونية المرتبطة بقطاع البناء، وذلك من خلال: (1) تصاميم إنشائية خفيفة الوزن وفعالة في استخدام الموارد و(2) تقليل النفايات عن طريق إعادة الاستخدام والتدوير و(3) إطالة العمر الافتراضي للمنشآت و(4) تقليل عمليات النقل إلى الحد الأدنى. ومن ثم، فإن التحدي الرئيسي الذي يواجه قطاع البناء يتمثل في البحث عن تقنيات بناء جديدة وتنفيذها.

يتمثل أحد الحلول الممكنة لتحقيق بيئة مبنية مستدامة في اعتماد الهياكل الغشائية (الشديَّة). ويهدف هذا النوع من الإنشاءات إلى تحمُّل الأحمال الخارجية عبر عناصر إنشائية تعمل تحت إجهاد الشد، بخلاف الآليات الحاملة في الهياكل التقليدية؛ حيث تعتمد الأقواس على حالات ضغط، والإطارات على حالات انحناء، والجمالونات على حالات مركَّبة من الضغط والشد. وعليه، يمكن في بعض الحالات استبدال الإنشاءات الثقيلة والصلبة التي أُنجزت على مر التاريخ باستخدام كميات كبيرة من الخرسانة والصلب والحجر والخشب، بأغشية مشدودة خفيفة الوزن ومرنة. على مر القرون، تناقصت نسبة γ بين وزن الهيكل والحمولة التي يحملها، حيث وصلت هذه النسبة إلى نحو واحد صحيح مع ظهور الفولاذ الإنشائي، وانخفضت إلى ما دون 1.0 في حالة هياكل الشد (الشكل 2.1). وتشير النسبة الأقل إلى انخفاض وزن الهيكل وزيادة فعالية استخدام مواد البناء. بناءً على ذلك، وبالاعتماد على آلية تحمُّل

عاليــة الكفــاءة، تتطلــب الهيــاكل الغشــائية كميــة أقــل مــن المــواد، ممــا يقلــل الطاقــة والانبعاثــات المرتبطــة بتصنيــع هــذه المــواد ونقلهــا.

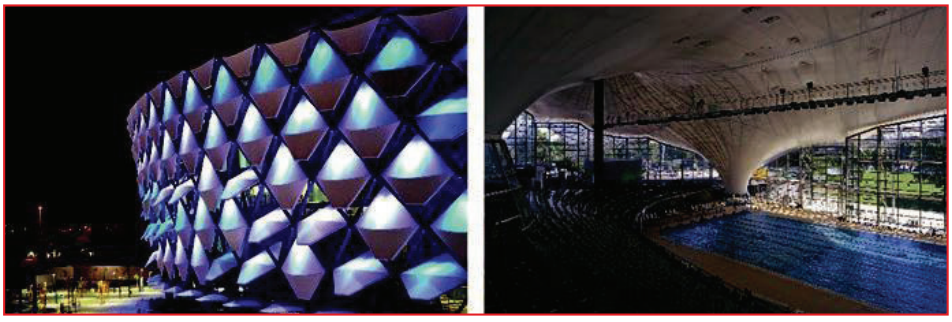


شــكل 2.1: تطــور نســبة γ بــين وزن الهيــكل والحمولــة التــي يحملهــا عــبر القــرون، ممــا يبــيّن كفــاءة الهياكل الغشــائية.

اســتغلَّت العديــد مــن الحضــارات القديمــة حــول العالــم بالفعــل كفــاءة هيــاكل الشــد. وتتضمــن الأمثلــة الأولى عــلى ذلــك صــواري القــوارب الشراعيــة لــدى المصريــين، والأســقف القابلــة للحركــة في المدرجــات الرومانيــة، وخيــام البــدو وقبائــل النافاهــو. ولــم تتحقــق إمكانيــة إنشــاء هيــاكل شــد واســعة النطــاق إلا في العــصر الحديــث نتيجــة التقــدم العلمــي والتكنولوجــي. طُوِّرت أوائــل المبانــي الشــدية الكبــيرة في النصــف الثانــي مــن القــرن العشريــن، ومــن بينهــا ملعــب ميونيــخ الأولمبــي (Olympiastadion) الــذي صممــه فــراي أوتــو، الــذي يُعــد مــن أكثــر هيــاكل الشــد شــهرةً في تلــك الحقبــة. لكــن في ذلــك الوقــت، كانــت هــذه الحلــول محصــورة في منشــآت مؤقتــة بســبب عــدم تطــور التقنيــات الماديــة، لــذا لــم تكــن هيــاكل الشــد جذابــة بعــد مــن حيــث المتانــة والاســتدامة. أمــا اليــوم، فــإن التطــورات في المــواد خفيفــة الــوزن تســمح بتصميــم هيــاكل شــد بعمــر افــتراضي يبلــغ نحــو 30 عامًــا، بفضــل الطــلاءات أو الرقائــق المحسَّــنة التــي تتمتــع بمقاومــة فائقــة للعوامــل الجويــة.

نتيجـةً لتحسـين متانـة هـذه الهيـاكل، تُسـتخدم الهيـاكل الغشـائية حاليًّـا في نطـاق واسـع مـن التطبيقـات الإنشـائية، مثـل التكسـية والأسـقف والواجهـات في المعـارض والمبانـي والملاعـب؛ حيـث تحقـق تصاميـم غلافيـة جميلـة مـع السـعي إلى تحسـين اسـتغلال المـوارد (الشـكل 2.2).

يهـدف هـذا الفصـل إلى تقديم أساسـيات الهياكل الغشـائية خفيفـة الوزن، والدلائـل التـي تُـبرز دورهـا في تحقيـق الإنشـاءات الخـضراء والمسـتدامة. تُعـرض المبـادئ الميكانيكيـة التـي تُعـرِّف كفـاءة آليـات التحمل الشـديِّ فيما يتعلـق بتقليـل الـوزن واسـتهلاك المـواد في القسـم 2.2. وتُناقـش الجوانـب التقنيـة المرتبطـة بتنفيذ الأغشـية خفيفـة الوزن، وأهميـة النمذجـة الميكانيكية الدقيقـة لتحقيـق الاسـتخدام الأمثـل للمـواد وضمـان التصميـم الآمـن،



شـكل 2.2: مثـالان لهيـاكل شـديَّة في انشـاءات واسـعة النطـاق. يسـارًا: ألـواح غشـائية مـن الزجـاج وPTFE للتظليـل الخارجـي في اسـتاد هـزاع بـن زايـد (© كريسـتوف بايـش/ شـلايش بيرغرمـان بارتنـر). يمينًـا: سـقف غشـائي لمركـز الألعـاب المائيـة الأولمبـي في ميونيـخ (©ميخائيـل تسيمرمان/شـلايش بيرغرمـان بارتنـر).

وذلـك في القسـم 2.3. أمـا في القسـم 2.4، فيُعالـج تقييـم كمـي لجوانـب الاسـتدامة. يحتـوي كل مـن هـذه الأقسـام عـلى وصـف للتحديـات والفـرص الحاليـة المرتبطـة بالجانـب الهنـدسي المعنـي. وفي الختـام، تُعـرض الاسـتنتاجات المتعلقـة بالهيـاكل الغشـائية خفيفـة الـوزن في القسـم 2.5.

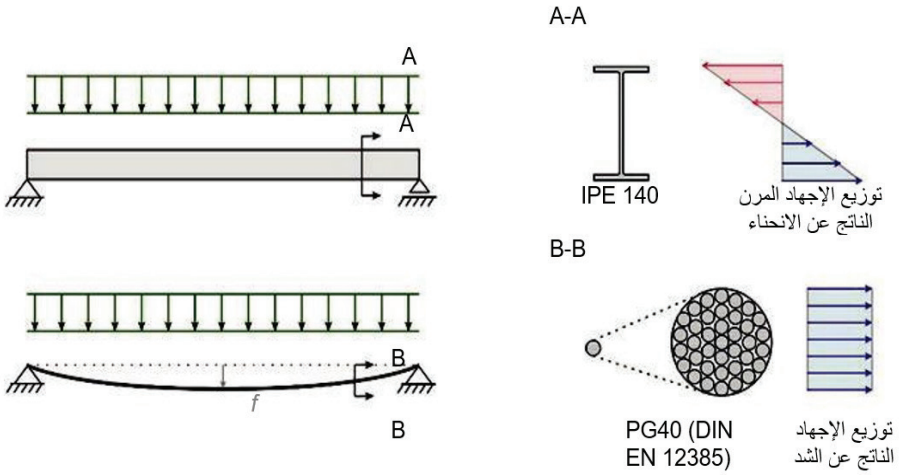
2.2 التصميم الهندسي للهياكل الغشائية فائقة الخفة

تُعد الهياكل الغشائية مجموعة متكاملة من العناصر الإنشائية خفيفة الوزن التي تجمع بين مبادئ العمارة الجمالية وتحسين استخدام المواد والكفاءة الهيكلية. وتبرز فائدة هذه الهياكل في الحالات التي يتعين فيها على التصميم تغطية بحور كبيرة بأقل وزن ممكن. ومن خلال البناء بشكل أفضل بمواد أقل، يمكن تحقيق فوائد بيئية تتمثل في خفض استهلاك الطاقة وتقليل انبعاثات الكربون أثناء الإنتاج والنقل والتركيب، مع توفير حل إنشائي اقتصادي في الوقت ذاته.

2.2.1 الكفاءة الإنشائية والمادية من خلال حالة الشد

تُصمم الهياكل الغشائية، على غرار فئة الهياكل الشدية التي تنتمي إليها، وفق مبدأ تحقيق أعلى كفاءة إنشائية ممكنة. إذ تُعد آليات التحمل المعتمدة على الانحناء والليِّ غير فعالة؛ نظرًا لكون المادة القريبة من المستوى المحايد لا تُستغل بالشكل الكافي. وعلى العكس من ذلك، تؤدي قوى الشد إلى توزيع إجهادات منتظم عموديًّا على المقطع العرضي؛ مما يسمح باستخدام كامل للمادة عبر السماكة، ويؤدي إلى تقليل كبير في الوزن

وبالحفاظ على حالة الشد الخالص، لا تحقق الهياكل الغشائية نسبًا منخفضة بين الوزن والحمولة فحسب، بل تقلل أيضًا من حالات عدم الاستقرار وتمركز الإجهادات التي تُعد من السمات الشائعة في الهياكل المعرضة للانضغاط أو تلك التي يهيمن عليها الانحناء.



شكل 2.3مقارنة بين آليات التحمل المرن للأحمال بالانحناء (أعلى) والشد (أسفل) في هيكل مرتكز على مفاصل وخاضع لنفس الحمل الموزع بانتظام

جدول 2.1: مقارنة بين مدى الكفاءة الهندسية والوزن لكل متر للحلول الإنشائية باستخدام عارضة على شكل I (I-beam) وكابل، المرتبطة بآليات التحمل عبر الانحناء والشد على التوالي.

الوصف	العارضة (I-beam)	الكابل
الامتداد	4.0 م	
الحمولة الرأسية المنتظمة	10.0 كيلو نيوتن/م	
معامل الاستغلال في حالة الحد النهائي	0.65	
المادة	فولاذ مطوي على الساخن	فولاذ مُجَلفن
العنصر التصميمي	مقطع IPE 140 مم (S355)	حبْل لولبي 1×37، قطر 20.1 مم ([PG40 [13])
الوزن لكل متر	12.9 كجم/م	1.9 كجم/م

لتوضيح كفاءة الشد مقارنة بالانحناء، افترض وجود بحر بطول l=4.0 أمتار مدعوم عند النهايتين ومُعرض لحمل موزع

بانتظام بمقدار q=10.0 كيلو نيوتن/متر، كما هو موضح في الشكل 2.3. يمكن الحصول على تصميم فعال لحالة الحد النهائي (ULS) في حالة الانحناء باستخدام جسر حديدي من نوع I فولاذ S355 بارتفاع 140 ملم، ومعامل العزم المرن $S=77.32\ cm^3$، ومساحة المقطع العرضي $A=16.4$ سم^2 ، ما يؤدي إلى نسبة وزن إلى طول قدرها 12.9 كغ/م. في المقابل، يمكن أن يتحمل نفس الحمل من خلال الشد الخالص باستخدام كابل فولاذي بقطر 20.1 ملم وبمقطع مفتوح لولبي (Galfan-PG40)، مع قوة تصميمية نهائية «كيلو نيوتن $F_{u,d}$=222» ، بافتراض نفس معامل الاستخدام α عند حالة الحد النهائي، وانحراف أقصى f يعادل ارتفاع الجسر I، بحيث تكون القوة الشدية في الكابل:

$$T \simeq \frac{ql^2}{8f} = \alpha F_{u,d}$$

يتميز هذا الحل الشدي بنسبة وزن إلى طول قدرها «1.9 كغ/م» ، مما يؤدي إلى توفير في الوزن بنسبة 85٪. وفُصِّلت المقارنة في الجدول 2.1، الذي يوضح، من خلال نسبة الوزن إلى الطول، كيف يستغل الحل القائم على كابل مرن المادة بشكل أفضل مقارنةً بالجسر الصلب. يعرض الشكل 2.3 توزيع الإجهادات في المقطع العرضي في كلا الحلّين.

تجدر الإشارة إلى أنه يمكن تحقيق وفورات إضافية في الكتلة إذا زِيْدَ الانحراف الأقصى f، مما يقلل من القوة الشدية القصوى في الكابل. فعلى سبيل المثال، فإن القيمتين «ملم f=200» و «ملم f=400» ستوفران تباعًا وفورات في الوزن بنسبة 93٪ و97.5٪) باستخدام كابلات Galfanجالفان من النوع PG20 وPG5.

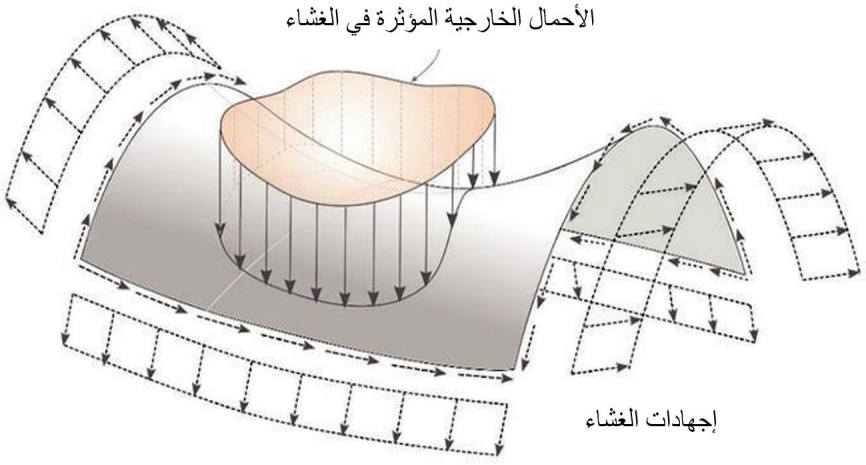
يمكن عَدُّ الهياكل الغشائية امتدادًا ثنائي الأبعاد للشبكات الكابلية المستمرة، وبالتالي فهي تمثل النسخة السطحية من الكابل أحادي

البعد المذكور أعلاه. تُصَمَّم هذه الهياكل للاستفادة من المعرفة الهندسية حول العلاقة بين طبيعة توزع الأحمال وحالات التشوُّه، مما يتيح مجموعة واسعة من الأشكال المعمارية والأساليب الإنشائية. تتكون مكونات الهيكل الغشائي بطريقة تُسند الأحمال بشكل أساسي إلى العناصر الحاملة بالشد، وهي:

1) الغشاء ثنائي الأبعاد مسبق الشد والمصنوع من نسيج مركب/ محبوك أو من رقائق بوليمرية؛
2) الكابلات والأربطة أحادية البعد المشدودة مسبقًا والتي تُشكِّل الحواف والقمم والوديان المحيطة بالغشاء.

تظهُر الأحمال الخارجية المؤثرة في عنصر الغشاء على هيئة إجهادات غشائية، كما هو موضح في الشكل 2.4، في حين تظهر الأحمال المؤثرة في الكابلات والأربطة على شكل قوى محورية. تعمل هذه العناصر الحاملة بالشَّد على نقل الأحمال إلى الإطار الإنشائي الداعم، والذي يتكوَّن من دعامات وأعمدة وعوارض، مصممة لتحمل قوى الضغط والانحناء والقص أو الالتواء.

يعتمد نقل الأحمال بكفاءة في الهيكل الغشائي على الشد المسبق للعناصر الحاملة بالشَّد، وهي بطبيعتها عناصر مرنة. وإذا لم تُشَد هذه العناصر مسبقًا أثناء التركيب، فإنها ستفقد شدَّها وتتعرض لإنزياحات كبيرة، مما يجعلها عرضة للانهيارات الإنشائية مثل التموج والانبعاج. واستنادًا إلى طريقة الشد المسبق لعناصر الغشاء، يمكن تصنيفها إلى هياكل غشائية مشدودة عند الحواف، وهياكل غشائية هوائية. تختلف آليات التحمل في هذين النوعين، وتختلف المبادئ الهندسية التي تحكم تصميم كل منهما. ويعتمد تحقيق تصميم فعَّال من حيث استهلاك الموارد بشكل كبير على فهم الفروقات الدقيقة بين هذين النظامين.



شكل 2.4: يحمِّل النظام الغشائي الأحمال على شكل إجهادات شدِّية موزعة على المستوى المماس للسطح الأوسط للغشاء.

2.2.2 الهياكل الغشائية المشدودة عند الحواف

تُشَدُّ الهياكل الغشائية المشدودة عند الحواف (الشكل 2.5) مسبقًا من خلال شد عناصر الغشاء على امتداد الحواف، والتي تكون إما مكونة من كابلات مرنة مشدودة أو من إطارات/عوارض صلبة.

يكمن الفرق الجوهري بين الهياكل الغشائية والهياكل الهندسية المدنية التقليدية المصنوعة من الخرسانة أو الفولاذ أو الخشب في أن قدرة التحمل في النوع الأول تنشأ من الانحناء أو التشكيل البنيوي التكيُّفي (form adaptation). ولمعرفة كيف يعمل هذا الانحناء أو التشكيل البنيوي، من المفيد استيعاب مفهوم الأسطح الدنيا المقيدة وآلية السلسلة الكاتينارية ذات الوزن الذاتي.

لنأخذ مثالًا على كابل أو حبل معلَّق بين نقطتي دعم (الشكل 2.3). الشكل المثالي الذي يتخذه الكابل أو الحبل المعلَّق تحت

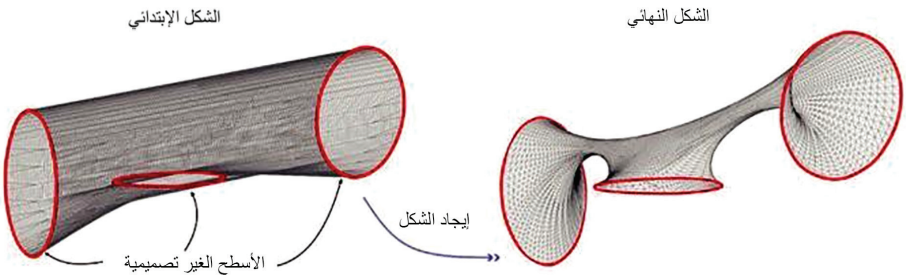
تأثير وزنه الذاتي ينتمي إلى فئة السلاسل الكاتينارية ذات الوزن الذاتي (catenary weighted). تتخذ الكابلات والحبال غير المشدودة هذا الشكل المنحني؛ لأن مقطعها العرضي لا يتمتع بأي صلابة انحنائية تُذكر، بخلاف العوارض. يعمل هذا الشكل على تحويل الوزن الذاتي إلى قوة شد تُنقل إلى نقاط الدعم على هيئة رد فعل عمودي. ومن الجدير بالذكر أيضًا، أنه وفقًا لمبادئ الطاقة، يتطابق شكل السلسلة الكاتينارية في حالة الاتزان مع الشكل الذي يحقق أقل طاقة كامنة ممكنة. وينطبق هذا المبدأ كذلك في حالات الشد المسبق أو عند تعليق أوزان. فحالة التشوه الناتجة تتكيَّف للوصول إلى الشكل المتزن، في حين تعمل الأحمال الخارجية على تعزيز الشد على طول العنصر البنيوي.

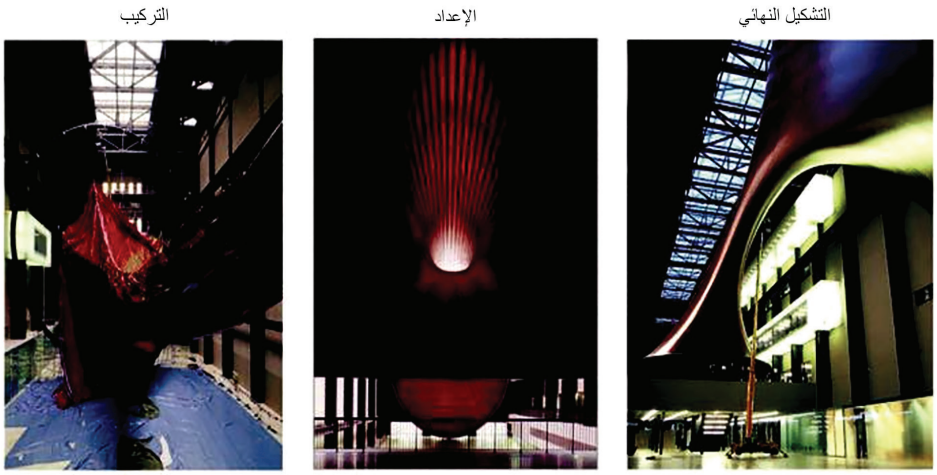
تعمل آلية الانحناء أو التشكيل التكيفي في الأغشية بطريقة مماثلة، باستثناء أن هذا التشكيل يُطلب من سطح ثنائي الأبعاد. تقع الأسطح المنحنية التي تتكوّن في الأغشية نتيجة الأحمال الخارجية – بما في ذلك الحالة الأبسط وهي الوزن الذاتي –ضمن فئة الأسطح الدنيا المستقرة والمقيدة. وهذا يعني أنه بالرغم من إمكانية قيام المصمم بتحديد المحيط ونقاط الدعم بوصفها قيود، فإن الشكل الناتج يكون محدودًا ضمن غلاف هندسي لا يمكن تجاوزه، ويعتمد على مقدار الشد المسبق في التصميم. وبالتالي، يجب التوصل إلى شكل الغشاء البنيوي عبر عملية تكرارية تأخذ في الحسبان التشوهات الكبيرة، بخلاف الطريقة المستخدمة في الهياكل الخرسانية أو الفولاذية أو الخشبية التقليدية، حيث يُجرَى التحليل البنيوي ضمن افتراضات التشوهات الصغيرة.

شكل 2.5: هيكل غشائي مشدود عند الحواف (قبة الألفية في لندن).

تُعرف عملية تحديد شكل العناصر الشدية في الهياكل الغشائية باسم البحث عن الشكل (form-finding). يُظهر الشكل 2.6 مثالًا توضيحيًّا لتطبيق عملية البحث عن الشكل في منشأة فنية غشائية.

ونظرًا لأن نظام الدعم الإنشائي يُصمَّم بالتوافق مع عناصر الشد في الهيكل الغشائي، فإن عملية البحث عن الشكل تلعب دورًا محوريًّا في تحسين الأداء البنيوي العام وتقليل الوزن. تتطلب الاستجابة غير الخطية هندسيًّا للهياكل الشدية الاعتماد على المحاكاة العددية وأساليب تحليلية خاصة مثل: طريقة الصلابة العابرة (transient stiffness method) أو طريقة كثافة القوى (force density method) أو طريقة الاسترخاء الديناميكي (dynamic relaxation method) لتحديد الشكل الأمثل. وتُستخدم بشكل شائع النماذج الفيزيائية التجريبية القائمة على أفلام الصابون، أو الأقمشة، أو الورق لمعايرة ومقارنة الأشكال المحسوبة عدديًّا.





شكل 2.6: عملية البحث عن الشكل والنتيجة النهائية لمنحوتة «مارسياس» للفنان أنيش كابور. تُتيح تقنية البحث عن الشكل التوصّل إلى التكوين النهائي بدءًا من شكل أولي خاضع لقيود (أعلى). تنفيذ المنحوتة الغشائية، ويظهر فيه عملية التركيب والشد، تفاصيل إعداد النماذج المسطحة، والتكوين النهائي (أسفل). المهندسون: شركة Arup؛ مقاولو تنفيذ المنحوتة: مجموعة Hightex، ألمانيا؛ هندسة الأغشية: شركة Tensys Consultants Ltd.

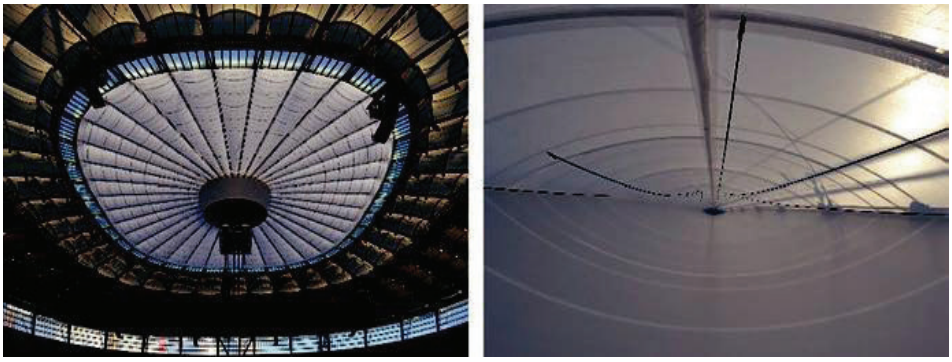
بالإضافة إلى ذلك، هناك عملية مهمة تُعرف باسم إعداد النماذج المسطحة (patterning)، وهي ضرورية لتصميم هذه الهياكل وتركيبها. ورغم أن هذه العملية غير شائعة في تقنيات البناء الأخرى، فإنها خطوة أساسية في تصميم الهياكل الغشائية لتحديد كيفية تحقيق الشكل الذي تُوُصِّلَ إليه من خلال

عملية البحث عن الشكل. ولتنفيذ هذه الخطوة، يجب تتبُّع شكل الغشاء المصمم وإعادته إلى هيئة غير مشدودة (unstressed configuration)، ثم تقسيمه إلى أجزاء مسطحة، لتحويل الشكل ثلاثي الأبعاد إلى عناصر ثنائية الأبعاد تقريبية. أثناء التنفيذ، تُجمَع القطع المقطوعة من الأغشية الخام عبر طرق ميكانيكية أو باستخدام اللحام. وبعد تفصيل الغشاء بالكامل، تتطلب عملية تركيبه إجراءات دقيقة يُشرف عليها مختصُّون مهرة لضمان تطبيق الشد المسبق تدريجيًّا، ومراعاة معايير التعامل مع المادة أثناء التنفيذ.

2.2.3 الهياكل الغشائية الهوائية

تعتمد الهياكل الغشائية الهوائية على ضغط الهواء لتحقيق الاستقرار الإنشائي. تتخذ هذه الهياكل عادةً شكل وسائد أو أغشية منتفخة يحافظ على شكلها من خلال ضغط داخلي. تُستخدم هذه الأنظمة في عناصر مثل الوسائد الهوائية المضغوطة والعوارض الهوائية والواجهات، كما هو موضح في الشكل 2.7. وتُستخدَم على نطاق واسع في تصميم خيام الفعاليات القابلة للنفخ والهياكل المؤقتة والمنشآت الفنية والمعمارية، نظرًا لما توفره من حلول فعالة بوزن مادي وتكلفة منخفضين للغاية.

وعلى عكس الأغشية المشدودة عند الحواف، تتكوَّن الهياكل الهوائية من ألواح مزدوجة أو متعددة الطبقات تُشَدُّ مسبقًا بفعل ضغط داخلي ناتج عن النفخ. ونتيجة لذلك، فإن هذا التكوين البنيوي يوفر صلابة إضافية ضد الأحمال من نوع الانحناء، بفضل طبيعتها المضغوطة.



صورة 2.7: مثال على هيكل غشائي هوائي يتضمن وسادة مصنوعة من نسيج مغطى بـ PTFE (يسار)، والمنظر الداخلي للوسادة المنتفخة (يمين). ملعب بي سي بليس، فانكوفر، كندا (© كريستوف بايش / Schlaich bergermann partner)

علاوة على ذلك، تختلف عملية البحث عن الشكل (form-finding) في الهياكل الغشائية الهوائية المنتفخة؛ حيث إن نمط القص والتوصيل للغشاء الرقيق هو ما يحدد شكله بدرجة كبيرة. عادةً ما يُجرَى تمرين بحث عن الشكل للتحقق مما إذا كان الشكل النهائي للغشاء المنتفخ تحت الضغط الداخلي المحدد يتوافق مع الشكل المستهدف في التصميم. وتُعَدَّلُ الأبعاد التصميمية لألواح الغشاء المضغوط عبر تكرار هذه الخطوة حتى يُتَوصَّل إلى الشكل المنتفخ النهائي المطلوب. وكما هو الحال في الأغشية المشدودة عند الحواف، تُنفَّذ خطوة إعداد النماذج المسطحة (patterning) والإجراءات المعقدة الخاصة بالتركيب أيضًا في حالة الأغشية الهوائية، حيث يُعَدُّ نمط كل وسادة هوائية فرديًّا.

2.2.4 تحديات تحسين التصميم الإنشائي وفرصه

على الرغم من أن هياكل الشد تعتمد على آلية فعالة في نقل الأحمال، إلا أن تحسينات تصميمية إضافية يمكن تحقيقها من خلال فهم متقدِّم لسلوك المواد المستخدمة في التصميم، إلى جانب تطبيق تقنيات التحسين المناسبة أثناء مرحلة التصميم البنيوي. يمكن لمثل هذه المقاربات

الشاملة أن تكون أداة قوية في المراحل الابتدائية والمفاهيمية والتصميمية لهياكل الأغشية، وقد تُمكِّن من تحديد حالات تصميم فعالة تفوق حتى تصوُّر المهندس المصمم.

تُعد استراتيجيات التحسين التي تستهدف الهندسة الشكلية للمنشأة وأبعاد العناصر والشكل والتوبولوجيا (التركيب البنيوي[1]) من مواضيع البحث النشطة في مجالات الهندسة الفضائية والميكانيكية والمدنية (24، 25). وفي السنوات الأخيرة، أثَّرت التطورات المتسارعة في مجال تعلم الآلة على ابتكار استراتيجيات جديدة لتحسين التصاميم الإنشائية، مثل: إعادة التمثيل العصبي للمعلمات (neural reparameterization، (26) وتمثيل الكثافة العصبي (neural density representation والتحسين البنيوي البايزي (Bayesian structural optimization). ومع ذلك، فإن الدراسات المتعلقة بتقنيات التحسين البنيوي المطبقة على الهياكل الغشائية لا تزال نادرة، مما يشير إلى وجود فجوة معرفية في هذا المجال. ومن خلال الاستفادة من التجارب الموازية في التخصصات المذكورة أعلاه، فإن السعي لسد هذه الفجوة المعرفية عبر اعتماد أساليب تحسين تقليدية ومعتمدة على تعلم الآلة يمكن أن يؤدي إلى مكاسب اقتصادية وبيئية كبيرة، من خلال تحقيق استغلال أكثر كفاءة للمواد.

وفي حين أن معظم أساليب التحسين البنيوي تفترض سلوكًا مرنًا للمواد، فإن المواد المستخدمة في الهياكل الغشائية لا تحتفظ بمثل هذا السلوك البسيط طيلة دورة حياتها؛ إذ تمر المواد الغشائية بظواهر مثل: الخضوع والاستجابات المعتمدة على الوقت ودرجة الحرارة والإجهاد الدوري والتلف،

(1) ملاحظة المترجم: أُثبت مصطلح التوبولوجيا هنا مع تفسيره بـ«التركيب البنيوي»، لأن المقصود في هذا السياق ليس الشكل الهندسي أو أبعاد العناصر فحسب، بل البنية التكوينية العامة للمنظومة من حيث توزيع العناصر واتصالها وعلاقاتها الداخلية، وهو المعنى المتداول في أدبيات التحسين الهندسي.

وكلها قد تؤثر تأثيرًا كبيرًا في الأداء الميكانيكي للمادة وللهيكل معًا. لذا، من الضروري تطوير نماذج رياضية قادرة على التنبؤ بدقة بهذه الاستجابات المعقدة للمواد المستخدمة في الهياكل الغشائية، لتكون مكمِّلة لأدوات التصميم المحوسب وتحسين الأداء البنيوي الشامل.

2.3 المواد الغشائية

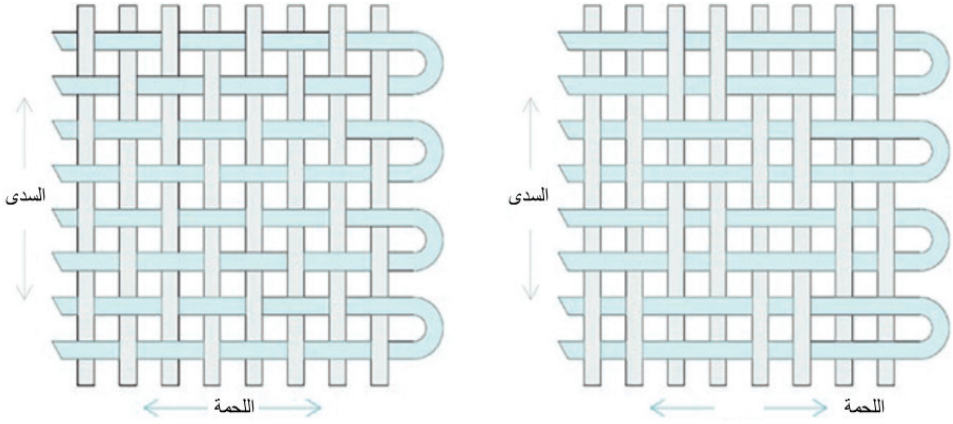
لتحقيق حلول تصميم مستدامة باستخدام تقنيات الأغشية والاستفادة الكاملة من مزاياها، يجب أن تقترن الكفاءة البنيوية الموضحة في القسم السابق بفهمٍ تفصيلي للخصائص والسلوكيات الجوهرية للمواد المستخدمة. يجب أن تكون المواد الغشائية مرنة بما يكفي للسماح بانزياحات مناسبة وتحقيق حالة إجهاد شدٍّ خالص تتوافق مع الأشكال التي تفرضها شروط الحواف. وبالتالي، يجب أن تكون صلابة الانحناء مهملة. وذلك باستخدام مواد مركبة ناعمة نسبيًّا أو مواد متجانسة ذات صلابة تقل بأكثر من مرتبة واحدة عن صلابة الخرسانة، وبمساكات منخفضة، غالبًا أقل من 1 ملم، مما يؤدي إلى توفير حل خفيف الوزن لتشكيل الغلاف الخارجي. تُنفّذ الهياكل الغشائية حاليًّا باستخدام تقنيتين رئيسيتين: الأقمشة والرقائق؛ حيث تُنتَج الأخيرة أساسًا من البوليمرات.

2.3.1 الأقمشة والرقائق

تُنسج الأقمشة بطرق مختلفة لإنشاء شبكة من الخيوط المتشابكة، حيث تُرتب الخيوط في اتجاهين متعامدين يُعرفان باسم السدى واللحمة. وذلك باستخدام تقنيات متعددة (يُعرض مثالان منها في الشكل 2.8). تُسبب تقنيات النسج المعتمدة لإنتاج القماش الأساسي تموُّجات في مسارات الألياف تختلف بين الاتجاهين المستويين، مما

يـؤدي إلى صلابـة ماديـة تعتمـد عـلى التقنيـة وسـلوك غـير خطـي متعامـد الخصائـص. وفي معظـم الأقمشـة، يكـون اتجـاه السـدى أكثـر قـوة وصلابـة مـن اتجـاه اللحمـة.

عـادةً مـا تُطـلَى الأقمشـة النسـيجية بطبقـة واقيـة لحمايـة القمـاش الأسـاسي مـن تأثـيرات الطقـس والعوامـل البيئيـة، وكذلـك لضمـان العـزل ضـد المـاء والهـواء. وتُشـكِّل طبقـة الطـلاء.



الشـكل 2.8: أكثـر ترتيبـين شـيوعًا للخيـوط في الأقمشـة: النسـج المسـطح (يسـارًا) والنسـج السـلالي (يمينًـا).

تلعـب طبقـة الطـلاء أيضًـا دورًا أساسـيًّا بصفتهـا عنـصرًا إنشـائيًّا، حيـث تعـزز مـن الصلابـة القصيـة المسـتوية للنسـيج، وتنقـل الإجهـادات بـين الألـواح المختلفـة مـن خـلال الوصـلات الملحومـة. وتُعـد أكثـر فئتـين اسـتخدامًا مـن الأقمشـة المنسـوجة همـا: أقمشـة البوليسـتر المطليـة ببـولي كلوريـد الفينيـل (PVC)، وأقمشـة الألـياف الزجاجيـة المطليـة ببـولي تترافلوروإيثيلـين (PTFE). ويكمـن الفـرق الأسـاسي بينهمـا في المتانـة. إذ يبلـغ العمـر الافـتراضي لـلأولى نحـو 20 إلى 25 عامًـا، بينمـا تصـل متانـة الثانيـة إلى 30 عامًـا. ويختلـف سـلوكها بعـد حـد الخضـوع؛ فأقمشـة البوليسـتر المطليـة بمـادة PVC تتميـز بمرونـة عاليـة وتتمـاشى بسـهولة

مـع الأشـكال التـي تتطلبهـا أغلفـة المبانـي المعـاصرة. أمـا أقمشـة الألياف الزجاجيـة المطليـة بمـادة PTFE، فهـي أكثـر هشاشـة بسـبب طبيعـة الزجـاج ممـا يتطلـب اتخـاذ احتياطـات إضافيـة أثنـاء مرحلـة التركيـب.

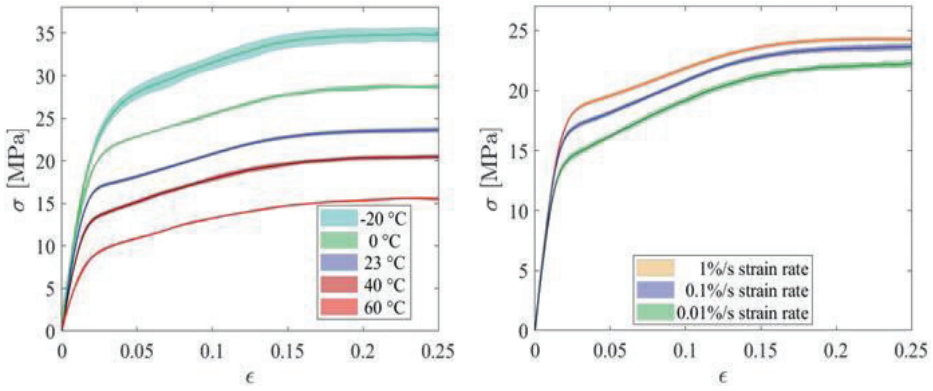
تشـير فئـة «الرقائـق» بشـكل أسـاسي إلى مـادة الإيثيليـن تترافلوروإيثيليـن (ETFE)، وهـو بوليمـر شـبه بلـوري مـن اللدائـن الحراريـة يُبثَـق لإنتـاج رقائـق متجانسـة. يبلـغ العمـر الافـتراضي المتوقـع لرقائـق ETFE نحـو 30 عامًـا، وتتشـابه هـذه المـادة في بنيتهـا الكيميائيـة مـع مركبـات PTFE، ممـا يمنحهـا خصائـص مقاومـة عاليـة للأشـعة فـوق البنفسـجية وقابليـة للسـحب وقـدرة عـلى إخمـاد اللهـب ذاتيًّـا بالإضافـة إلى نفاذيـة عاليـة للضـوء تفـوق تلـك التـي يتيحهـا الزجـاج. وتُعـد هـذه الخاصيـة الأخـيرة جذابـة بشـكل خـاص للتطبيقـات المعماريـة؛ حيـث توفـر المـادة إضـاءة طبيعيـة للأجـزاء الداخليـة مـن المبنـى مـا يجعلهـا بديـلًا خفيفًـا وأكثـر اسـتدامة مـن الزجـاج. ويسـهم ذلـك في تقليـل الـوزن الإجمـالي للغـلاف والهيـكل الداعـم ممـا يقلـل مـن الأثـر البيئـي والطاقـة المطلوبـة للإنتـاج (بنسـبة أقـل بحـوالي 10 مـرات مقارنـة بالزجـاج) والتركيـب (بنسـبة تـتراوح بـين 24% و70% أقـل مـن الزجـاج). وأخـيرًا، بـدأ الباحثـون في استكشـاف إمكانيـة دمـج خلايـا كهروضوئيـة أثنـاء عمليـة الإنتـاج، مـع نتائـج واعـدة في مجـال جمـع الطاقـة الشمسـية وتعزيـز التحـول نحـو الطاقـة النظيفـة.

2.3.2 الاستجابة الحرارية الميكانيكية للأغشية الإنشائية:

نظـرًا للطبيعـة البوليمريـة لهـذه المـواد، فـإن اسـتجابتها تعتمـد عـلى درجـة الحـرارة والزمـن. إذ تـؤدي معـدلات الانفعـال العاليـة ودرجـات الحـرارة المنخفضـة إلى زيـادة الصلابـة ومقاومـة الشـد في حـين أن معـدلات

الانفعال المنخفضة ودرجات الحرارة المرتفعة تُنتج استجابة أكثر ليونة كما هو موضَّح في الشكل 2.9 باستخدام رقائق ETFE مثالًا تمثيليًّا. وتُظهر الأغشية المصنوعة من مادة (ETFE) حساسية عالية تجاه التأثيرات الحرارية وسرعة الانفعال وهي تأثيرات لا تؤثر إلا بشكل متوسط على الاستجابة الميكانيكية للأقمشة. ووفقًا للبيانات التجريبية المعروضة في الشكل 2.9 وفي الأدبيات المرجعية فإن رقائق (ETFE) تُظهر انخفاضًا أوليًّا في معامل الصلابة بنسبة تقارب 35% عند الانتقال من درجة حرارة 23 مئوية إلى 60 درجة مئوية إلى جانب انخفاض في مقاومة الخضوع بنسبة 40%. أما أقمشة البوليستر المطلية بمادة (PVC) فتعاني من انخفاض في معامل الصلابة بنسبة 20% ضمن نفس النطاق الحراري.

وتؤدي الطبيعة اللزجة للأقمشة والرقائق إلى ما يُعرف بـ الاسترخاء الإجهادي مع مرور الوقت عند فرض إزاحة ثابتة. ويُلاحظ هذا السلوك بوضوح في الهياكل المشدودة على الحواف والتي قد تفقد مقدار الشد المسبق بمرور الزمن نتيجة لهذا التأثير. وبالمثل، فإن تطبيق إجهاد ثابت يؤدي إلى حالة معاكسة تُعرف باسم الزحف حيث يستمر التشوه بالازدياد تدريجيًّا مع مرور الوقت. وتظهر هذه الظاهرة في الهياكل الغشائية الهوائية؛ حيث يولِّد ضغط النفخ الثابت حالة إجهاد تعتمد على شكل الوسادة الهوائية. وإذا استمرت المادة في الانفعال نتيجة لزوجتها، فسيتغير شكل الغشاء مما يؤدي إلى انخفاض في الشد المسبق وبالتالي انخفاض في الصلابة الإنشائية للنظام.

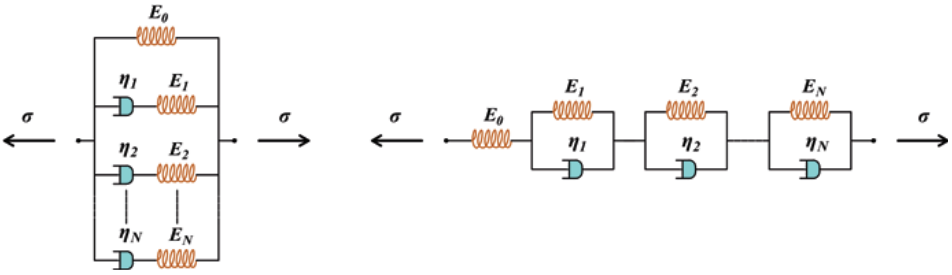


الشكل 2.9 منحنيات الإجهاد والانفعال أحادية المحور الهندسية لرقائق ETFE، تم قياسها تجريبيًا ضمن مشروع LIGHTEN . . تُظهر الاستجابة عند (يسارًا) درجات حرارة مختلفة بمعدل انفعال ثابت قدره 0.1%/ثانية، و(يمينًا) عند معدلات انفعال مختلفة بدرجة حرارة ثابتة تبلغ 23 درجة مئوية.

2.3.3 تحديات النمذجة التأسيسية وفرصها

تؤثر جميع التأثيرات المرتبطة بدرجة الحرارة والزمن، والتي سبق ذكرها، تأثيرًا كبيرًا على استجابة معظم مواد الأغشية ويجب أخذها في الحسبان من أجل الوصول إلى تصميم أمثل. ومع ذلك، نادرًا ما يُراعى ذلك حاليًّا في الممارسات التصميمية بسبب غياب الأكواد والمعايير الإنشائية الخاصة بالهياكل الغشائية إضافة إلى التوصيات الواردة في الوثائق المعيارية الأولية باعتماد نماذج مرنة خطية للتصميم. ويمكن أن تؤدي هذه المنهجيات المبسطة إلى تصاميم مبالغ فيها تستهلك مواد غير ضرورية أو إلى تصاميم غير آمنة كما أشار كلٌّ من كابيلو وباون. إن غياب الثقة في الأدوات التصميمية المتوفرة والنماذج المادية الدقيقة يُشكِّل عائقًا أمام انتشار تقنيات الأغشية، ويضعف من الأثر الإيجابي الذي يمكن أن تُحدثه الهياكل المشدودة في تحقيق ممارسات بناء مستدامة.

ولتحقيق الاستفادة الكاملة من الإمكانيات المعترف بها للهياكل الغشائية في خدمة القضايا البيئية ومن مرونة تطبيقاتها، يجب استحداث نماذج إنشائية شاملة تعتمد على سلوك حراري-لزوجي-مرن-لدن. وتُعد مسألة توصيف اعتماد الخصائص الميكانيكية لمواد الأغشية على الزمن ودرجة الحرارة – بما في ذلك سلوك الخضوع – من المواضيع ذات الاهتمام البالغ لدى المجتمع الهندسي. وتؤثر هذه الخصائص في تمثيل حالات التحميل التصميمية والتي يجب أن تتضمن في تعبيراتها ظروف الحرارة وسرعة التطبيق. وتمثِّل الحملات التجريبية الشاملة تحت ظروف متعددة خطوةً أساسية في تطوير نماذج سلوك مادي دقيقة عبر إستراتيجيات نمذجة متنوعة، بما في ذلك النُهج المعتمدة على البيانات والتي تُعد محورًا من محاور الأبحاث الحالية.



الشكل 2.10 نموذجان ريولوجيان عامّان ومشهوران لسلوك المواد اللزجة المرنة: نموذج فيشرت (يسارًا) ونموذج كلفن-فويت (يمينًا).

تُعد النماذج الريولوجية إحدى المقاربات التحليلية الفعالة لتمثيل السلوك المعقد، غير الخطي والمعتمد على الزمن، للأغشية اللزجة المرنة. وتُبنى هذه النماذج من خلال دمج عدد المتغير «N» من المخمِدات الخطية (dashpots) ذات اللزوجة η_i حيث $i = 1 \ldots N$، مع N+1 نابضًا ذا صلابة E_i حيث $i = 0 \ldots N$، سواء على التوالي أو بالتوازي، كما هو موضَّح في الشكل 2.10 .

وفي نموذج كلفن-فويت العام، يمكن التعبير عن العلاقة الزمنية بين الانفعال $\varepsilon(t)$ والإجهاد $\sigma(t)$ من خلال تعريف $D_i = E_{i-1}$ و $\tau_i = \eta_i / E_i$، وتطبيق مبدأ بولتزمان في التراكب كالتالي:

$$\varepsilon(t') = \int_0^{t'} \left[D_0 + \sum_{i=1}^{N} D_i \left(1 - e^{-\frac{t'-s}{\tau_i}} \right) \right] \frac{d\sigma(s)}{ds} \, ds$$

حيث يُمثِّل الحد $D_0 = {E_0}^{-1}$ الصلابة الفورية للمادة. ونظرًا لتأثير درجة الحرارة في لزوجة المواد، يمكن دمج هذا الاعتماد الحراري ضمن نموذج المواد الحرارية الريولوجية البسيطة، من خلال مبدأ التراكب الزمني-الحراري (Time-Temperature Superposition Principle). وتشير مساهمات حديثة في الأدبيات العلمية إلى بعض المحاولات لنمذجة مواد الأغشية باستخدام نماذج ريولوجية. ومع ذلك، لا تزال النتائج المتعلقة بمواد البناء غير ناضجة بما يكفي لاعتمادها في تصميم الهياكل الغشائية.

2.4 استدامة الهياكل الغشائية

رغم أن الفهم الشائع قد يربط البوليمرات بمواد ذات أثر بيئي عالٍ وتكلفة إنتاج مرتفعة، فهذان الجانبان يُعَدَّان أقل حدة في حالة الهياكل الغشائية البوليميرية مقارنة بالأنظمة الإنشائية التقليدية. تتناول الفقرات التالية موضوع استدامة الهياكل الغشائية من حيث: الطاقة الكامنة واستهلاك المواد وقابلية إعادة التدوير.

الجدول 2.2 الطاقة المطلوبة لتصنيع نفس الحجم من مواد مختلفة، مُطبَّعة بحسب القيمة المقابلة للفولاذ.

المادة	الطاقة النسبية لكل وحدة حجم	المادة	الطاقة النسبية لكل وحدة حجم
الفولاذ	1.00	البوليستيرين	0.14
الألنيوم	0.68	بولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE)	0.10
النايلون	0.23	بولي فينيل كلورايد (PVC)	0.10
البولي كربونات	0.20	بولي إيثيلين منخفض الكثافة (LDPE)	0.08
الأكريليك	0.19	البولي بروبيلين	0.08

2.4.1 الطاقة الكامنة واستهلاك المواد

في الجدول 2.2، تُعرَض الطاقة النسبية المطلوبة لإنتاج نفس الحجم من مواد مختلفة بالاعتماد على بيانات استهلاك الطاقة لإنتاج صفائح من تلك المواد. ويُظهر الجدول أن تكلفة التصنيع من حيث الطاقة للبوليمرات تقل عن 25٪ من نظيرتها للفولاذ.

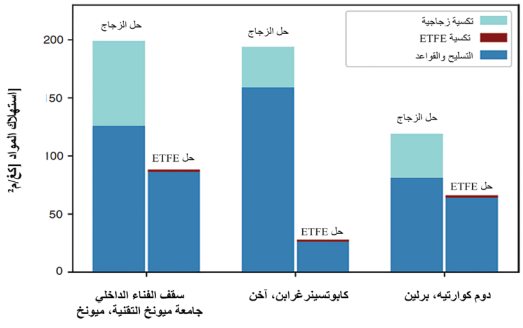
وعند مقارنة الطاقة الكامنة في الأغشية، فإن المرجع الأدق يكون لكل متر مربع من عناصر الغلاف الخارجي. فعلى سبيل المثال، تتراوح الطاقة الكامنة لعناصر أغشية إيثيلين رباعي فلورو الإيثيلين (ETFE) بين 27 و210 ميغا جول/م² (عند افتراض وزن مبالغ فيه يبلغ 1 كغ/م²). ويعتمد هذا الرقم على نوع الحل الإنشائي المُعتمد – سواء كان طبقة مفردة من الرقائق أو وسادة متعددة الطبقات – وكذلك على العوامل المُدرجة في حسابات الطاقة.

وعند مقارنة أنظمة (ETFE) بالتقنية الأكثر شيوعًا في التغليف الشفاف للأسطح والواجهات وهي الزجاج المسطح (Float Glass)، فإن لوحًا بسمك 6 مم من الزجاج يمتلك طاقة كامنة تبلغ 300 ميغا

جـول/م². وتـزداد فائـدة أنظمـة (ETFE) مـن حيـث الطاقـة الكامنـة بشـكل أكـبر عنـد النظـر في النظـام الهيـكلي ككل، إذ إن خفـة وزن هـذه المـادة تسـمح باسـتخدام هيـاكل داعمـة أخـف وزنًـا.

وفي هـذا السـياق، يُعـرض في الشـكل 2.11 رسـم بيانـي شريطـي يتضمن ثـلاث دراسـات حالـة مـن الأدبيـات العلميـة تتنـاول إنشـاء أسـقف شـفافة. ويُظهـر الرسـم وزن المـادة لـكل وحـدة مسـاحة في حـال اسـتخدام الزجـاج أو أغشـية (ETFE) بوصفهـا مـادةَ تغليـفٍ. ومـن الواضـح مـن النتائـج أن كفـاءة النظـام الإنشـائي المشـدود تـؤدي إلى تقليـل الـوزن الإجمـالي للمنشـأ؛ حيـث تـتراوح نسـبة خفـض اسـتهلاك المـواد بـين 45% و85% مقارنـة بالحلـول المعتمـدة عـلى الزجـاج.

وتتوفـر في الأدبيـات العلميـة تقييمـات إضافيـة لجوانـب أخـرى مـن الاسـتدامة المتعلقـة بهيـاكل وأقمشـة(ETFE). وقـد جـرت عـلى وجـه الخصـوص مقارنـات لتصاميـم واجهـات الملاعـب وأسـقف الأتريـة (Atria) التـي تعتمـد عـلى الهيـاكل المشـدودة مـع التقنيـات التقليديـة مـن حيـث البصمـة الكربونيـة واسـتهلاك الطاقـة الأوليـة أو عـبر إجـراء تقييـم دورة الحيـاة البيئيـة الكامـل. وقـد خلصـت جميـع هـذه الدراسـات إلى نتيجـة موحـدة مفادهـا أن الهيـاكل التـي تسـتخدم عنـاصر غشـائية تُعـد أكثـر صداقـة للبيئـة مـن أنظمـة الإنشـاء التقليديـة.



الشـكل 2.11 مقارنـة اسـتهلاك المـواد بـين حلـول الزجـاج وETFE في الأسـقف الشـفافة لثـلاث دراسـات حالـة مختلفة.

2.4.2 قابلية إعادة التدوير

بالإضافة إلى الجوانب المتعلقة بانخفاض الطاقة الكامنة واستهلاك المواد، تزداد استدامة الهياكل المشدودة من خلال إعادة استخدام مكوناتها وأغشيتها وهياكلها الفرعية وكذلك إعادة تدويرها. ويُعد الاتجاه الناشئ نحو إعادة استخدام الأقمشة التي وصلت إلى نهاية عمرها الافتراضي في بيئات أقل تطلبًا أحد أبرز الممارسات المستدامة. وعلى الرغم من أن إعادة الاستخدام تمثل وسيلة فعالة لتقليل البصمة الكربونية للأغشية إلا أن إعادة التدوير توفر في الوقت الراهن بُدُلًا أكثر تنوعًا. ومن المعروف أن اللدائن الحرارية (Thermoplastics) تفتقر إلى الروابط القوية بين سلاسلها البوليمرية؛ مما يجعلها قابلة لإعادة التدوير. وتُعد كل من أغشية إيثيلين رباعي فلورو الإيثيلين (ETFE) وأقمشة البوليستر المطلية ببولي كلوريد الفينيل (PVC) مؤهلة لهذا النوع من المعالجة، وهو ما يسهم في خفض الطاقة الكامنة لهذه المواد؛ حيث يمكن الاستغناء عن بعض مراحل الإنتاج الضرورية عند تصنيع المواد الخام البكر.

أما المواد النسيجية التقليدية، فغالبًا ما تكون عملية إعادة تدويرها معقدة نظرًا لصعوبة فصل مكوناتها إلى نسيج مطرز وطبقة طلاء وهو ما يجعل غشاء مثل الألياف الزجاجية المطلية بأغشية بولي رباعي فلورو الإيثيلين (PTFE) غير قابل لإعادة التدوير. ومع ذلك، بدأت الشركات المصنِّعة للأغشية والرقائق بالاهتمام بخيارات إعادة التدوير بل وتبنِّي نهج إنتاج أكثر استدامة. ومن الأمثلة على ذلك مشروع تيكسي لوب Texyloop الذي أطلقته شركة سيرج فيراري Serge Ferrari لاستعادة الأقمشة المقطَّعة وغير المستخدمة من أقمشة البوليستر المطلية بـ (PVC) بهدف تحويلها إلى مواد خام جديدة. ويُعد

مـشروع حديـث أطلقتـه شركـة بـولي لـوب Polyloop الناشـئة أحـد النماذج الواعـدة في مجـال إعـادة تدويـر مركبـات (PVC) واسـتخلاص بـولي كلوريـد الفينيـل منهـا.

وتُعـد هـذه الإجـراءات بسـيطة مـن حيـث المبـدأ، لكنهـا أساسـية في الحـد مـن إنتـاج المـواد الضـارة بطبقـة الأوزون مثـل انبعـاث R11 (ثلاثـي كلوروفلوروميثـان) وR22 (ثنائـي فلوركلوروميثـان) أثنـاء عمليـة البلمـرة. ووفقًـا لأحـدث مـا توصلـت إليـه الصناعـة، تُشـير إعلانـات المنتـج البيئيـة (EPD) الخاصـة بنظـام وسـائد (ETFE) الـذي تنتجـه شركـة فيكتـور فويلتيـك Vector Foiltec – الرائـدة في تصميـم وبنـاء أنظمـة (ETFE) إلى أن المـادة يُعَـادُ تدويرهـا إمـا لإنتـاج رقائـق جديـدة أو لتصنيـع مكونـات أخرى مـن مركبـات (ETFE) مثـل الأنابيـب والصمامـات، والتـي تُسـتخدم غالبًـا في الوسـائد الهوائيـة. وتُظهـر البيانـات أن إعـادة تدويـر رقائـق (ETFE) لإنتـاج مـادة جديـدة تُسـهم في خفـض انبعـاث R11 بنسـبة 47%، وتقلـل مـن اسـتهلاك الطاقـة العالمـي بنسـبة 14%. وتتفـوق رقائـق (ETFE) عـلى الزجـاج مـن حيـث قابليـة إعـادة التدويـر، إذ إن الزجـاج المسـتخدم في الأبنية يـكاد لا يُعـاد تدويـره بسـبب صعوبـة إزالـة طبقـات الطـلاء ولا تتجـاوز وفـورات الطاقـة التـي يوفرهـا سـوى 5% تقريبًـا.

2.4.3 التحديات والفرص المتعلقة بالخصائص الحرارية

يُعـد الأداء الحـراري مـن أبـرز العوائـق الحاليـة التـي تواجـه تكنولوجيـا الأغشـية في سـياق الاسـتدامة. فعـلى الرغـم مـن أن خفـة وزن نظـام التغليف تمنـح الحلـول الغشـائية العديـد مـن المزايـا، فَرِقّـة سـماكة المـواد الغشـائية تجعـل مـن موصليتهـا الحراريـة أعـلى مقارنـةً بالتقنيـات التقليديـة في البنـاء. فعـلى سـبيل المثـال، تـتراوح النفاذيـة الحراريـة لوسـادة (ETFE) بـين 2.9 و1.4 واط/م². كلفـن، حسـب عـدد الطبقـات المسـتخدمة، بينمـا

تحقق أنظمة الزجاج الحديثة قِيَمًا تتراوح بين 1.1 و2 واط/م². كلفن، بحسب المعالجات السطحية المطبقة. وفي الوقت الراهن، يحد ضعف الأداء الحراري لمادة إيثيلين رباعي فلورو الإيثيلين (ETFE) من استخدامها في الهياكل المشدودة لتطبيقات محددة مثل الردهات الداخلية وصالات الألعاب الرياضية وسقوف الملاعب والساحات والمباني الصناعية وغيرها من المنشآت التي لا تمثل فيها المتطلبات الحرارية أولوية. ولمعالجة هذا القصور، يمكن اعتماد عدة إستراتيجيات تهدف إلى التحسين أو التخفيف من هذا الأثر. من أبرزها استخدام هياكل غشائية متعددة الطبقات أو وسائد هوائية حيث توفِّر هذه الحلول طبقات فصل إضافية عن البيئة الخارجية وتستفيد من العزل الطبيعي الذي توفره طبقة الهواء. علاوةً على ذلك، أثبتت الدراسات أن توجيه تيارات الهواء – سواء كانت طبيعية أو مُولَّدة صناعيًّا – نحو سطح الأغشية يُسهم في تحسين أداء الطاقة للنظام وقد طُبِّق هذا النهج تطبيقًا ناجحًا في مشاريع كبرى، مثل مشروع خان شاطر في مدينة أستانا. ويمكن تحقيق تحسينات إضافية باستخدام ألوان مختلفة أو طلاءات عاكسة أو أنماط مطبوعة خصوصًا في حلول أنظمة إيثيلين رباعي فلورو الإيثيلين (ETFE) الشفافة وذلك بهدف ضبط خصائص الإشعاع الحراري بما يتوافق مع متطلبات المشروع المحددة.

2.5 الخلاصة

تُظهر الهياكل الغشائية إمكانات كبيرة في تحقيق الاستدامة؛ نظرًا لاعتمادها على آلية فعالة لتحمل الأحمال من خلال تقليل كمية المواد المستخدمة، وهي مواد قابلة لإعادة التدوير بدرجة عالية وتتميز بانخفاض الطاقة الكامنة فيها. ويُعد النضج الذي بلغته هذه التقنية من حيث التصميم الهندسي وخصائص المواد دلالة على كونها حلاً إنشائيًّا مستدامًا واعدًا، يلائم طيفًا واسعًا من التطبيقات في مجال هندسة المباني، بما في ذلك المرافق

كبيرة النطاق، ويتيح بذلك فرصة للحد من الأثر البيئي لقطاع الإنشاءات والمساهمة في تحقيق الأهداف المنصوص عليها في اتفاقية باريس للمناخ (COP21).

وقد أثبتت الهياكل المشدودة أنها تقنية موثوقة في البناء بفضل متانتها الكافية ومرونتها العالية في التكيُّف مع متطلبات الأغلفة المعمارية المختلفة سواء للمشاريع الصغيرة أو الكبيرة وفي مختلف المناخات. وتُشير التقدُّمات التقنية الأخيرة، إلى جانب إمكانيات إعادة التدوير، إلى احتمالية التوسع في استخدام هذه التكنولوجيا مستقبلًا لتحقيق منشآت أخف وزنًا وتصاميم أكثر وعيًا في استهلاك الموارد. وقد جرى استعراض أبرز الفرص والتحديات التي ينبغي التصدي لها من أجل مواصلة التقدم نحو تحقيق استدامة الهياكل الغشائية، وذلك في نهاية كل قسم سابق. وتشمل هذه التحديات: تحسين التصميم الهيكلي، وتطوير النماذج الرياضية التي تحاكي السلوك الحراري - اللزج - اللدن - المرن (Thermo-visco-elasto-plastic) للمواد، وزيادة إمكانات إعادة التدوير، وتعزيز الخصائص الحرارية. وستُسهم النتائج من معرفة إضافية وأدوات تصميم من خلال هذه الجهود البحثية في ترسيخ استخدام أمثل وآمن وواعٍ للموارد ضمن البيئة المبنية.

شكر وتقدير: يُعرب المؤلفون عن شكرهم للدعم المالي المقدم من برنامج الاتحاد الأوروبي للأبحاث والابتكار «أُفُق 2020» (Horizon 2020) في إطار منحة «ماري سكودوفسكا-كوري» ضمن الاتفاقية رقم 956547 لمشروع «LIGHTEN - الهياكل الغشائية فائقة الخفة نحو بيئة مستدامة».

المراجع

1. **Achintha, M.** (2010). Sustainability of glass in construction. In Sustainability of construction materials (pp. 79–104). Elsevier.
2. **Alongi, A., Angelotti, A., Rizzo, A., & Zanelli, A.** (2021). Measuring the thermal resistance of double and triple layer pneumatic cushions for textile architectures. Architectural Engineering and Design Management, 17, 334–346.
3. **Argyris, J., Is, D., & da Silva, V.** (1992). Constitutive modelling and computation of non-linear viscoelastic solids. Part II: Application to Orthotropic PVC-coated fabrics. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 98, 159–226.
4. **Argyris, J. H., & Scharpf, D. W.** (1972). Large deflection analysis of prestressed networks. Journal of the Structural Division, 98, 633–654.
5. **Barbero, E., & Tomblin, J**. (1993). Euler buckling of thin-walled composite columns. Thin-Walled Structures, 17(4), 237–258.
6. **Bischoff, M., Ramm, E., & Bieber, S.** (2018). Computational methods for Shell analysis. IBB-Universität Stuttgart.
7. **Bosi, F., & Pellegrino, S**. (2017). Molecular based temperature and strain rate dependent yield criterion for anisotropic elastomeric thin films. Polymer (Guildf), 125, 144–153.
8. **Bosi, F., & Pellegrino, S.** (2018). Nonlinear thermomechanical response and constitutive modeling of viscoelastic polyethylene membranes. Mechanics of Materials, 117, 9–21.
9. **Brinson, H. F., & Brinson, L. C.** (2008). Polymer engineering science and viscoelasticity: An introduction. Springer.
10. **Cabello, A., & Bown, A. C**. (2019). Using a nonlinear thermo-viscoelastic constitutive model for the design and analysis of ETFE structures. In Proceedings of IASS annual symposia. Vol. 2019. No. 23. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).
11. **Chandrasekhar, A., & Suresh, K.** (2021). TOuNN: Topology optimization using neural networks. Structural and Multidisciplinary Optimization, 63(3), 1135–1149.

12. **Crawford, R. J., & Martin, P.** (1998). Plastics engineering (3rd ed.) Elsevier Butterworth-Heinemann.
13. **Cremers, J.** (2013). Energy issues and environmental impact of membrane and foil materials and structures-status quo and future outlook. In Proceedings of the conference sb13, implementing sustainability—Barriers and chances, Munich, Germany (pp. 24–26).
14. **De Focatiis, D. S. A., & Gubler, L.** (2013). Uniaxial deformation and orientation of ethylene-tetrafluoroethylene films. Polymer Testing, 32, 1423–1435.
15. **Deutsches Institut für Bautechnik, Pfeifer Seil und Hebetechnik Gmbh.** (2018). European Technical Assessment ETA-11/0160 PFEIFER Wire Ropes.
16. **Drew, P.** (1979). Tensile architecture. Routledge.
17. **Felipe Gabaldón, Oceanographic, Valencia ES.** https://creativecommons.org/licenses/by/2.0.
18. **Finlay, T. C. R.** (2021). The carbon footprint of long span structures: Review of the millennium dome and subsequent tensile systems. In IASS annual symposium 2020/21 and the 7th international conference on spatial structures.
19. **Flor, J. F., Liu, X., Sun, Y., Beccarelli, P., Chilton, J., & Wu, Y.** (2022). Switching daylight: Performance prediction of climate adaptive ETFE foil façades. Building and Environment, 209.
20. **Galliot, C., & Luchsinger, R. H.** (2011). Uniaxial and biaxial mechanical properties of ETFE foils. Polymer Testing, 30, 356–365.
21. **George Gastin, Forthbridge, Edinburgh, SCO.**https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0.
22. Gobain, S. Thermal performance of glazing systems. https://www.saint-gobain-glass.co.uk/en-gb/glass- and- thermal- insulation. Accessed 3 Dec 2022.
23. **Haftka, R. T., & Gürdal, Z**. (2012). Elements of structural optimization. Springer Science & Business Media.
24. **Healey, T. J., Bin, C. Q., & Li, R**. (2013). Wrinkling behavior of highly stretched rectangular elastic films via parametric global bifurcation. Journal of Nonlinear Science, 23, 777–805.
25. **He, L., Li, Q., Gilbert, M., Shepherd, P., Rankine, C., Pritchard, T., & Reale, V.** (2022). Optimization-driven conceptual design of truss structures in a parametric modelling environment. Structure, 37, 469–482.

26. **Houtman, R.** (2013). TensiNet European design guide for tensile structures appendix 5: Design recommendations for ETFE foil structures. TensiNet Association.
27. **Hoyer, S., Sohl-Dickstein, J., & Greydanus, S**. (2019). Neural reparameterization improves structural optimization. http://arxiv.org/abs/1909.04240.
28. **Hu, J., Chen, W., Zhao, B., & Yang, D.** (2017). Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior. Construction and Building Materials, 131, 411–422.
29. **Hutchinson, J. W.** (1966). A survey of some buckling problems, AIAA Jn14, 1505.
30. **International Energy Agency and the United Nations Environment Programme.** (2018). 2018 Global Status Report: Towards a zero emission, efficient and resilient buildings and construction sector.
31. **Ju, G. T., & Kyriakides, S.** (1992). Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending—II. Predictions. International Journal of Solids and Structures, 29, 1143–1171.
32. **Kmet, S., Tomko, M., Soltys, R., Rovnak, M., & Demjan, I.** (2019). Complex failure analysis of a cable-roofed stadium structure based on diagnostics and tests. Engineering Fail Analysis, 103, 443–461.
33. **Kyriakides, S., & Ju, T**. (1992). Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending Part I: Experiments. International Journal of Solids and Structures, 29, 1117–1142.
34. **Lamnatou, C., Moreno, A., Chemisana, D., Reitsma, F., & Clariá, F.** (2018) Ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) material: Critical issues and applications with emphasis on buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 2186–2201.
35. **Li, J., Kwok, K., & Pellegrino, S.** (2016). Thermoviscoelastic models for polyethylene thin films. Mechanics of Time-Dependent Materials, 20, 13–43.
36. **Li, Y., & Wu, M**. (2015). Uniaxial creep property and viscoelastic–plastic modelling of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foil. Mechanics of Time-Dependent Materials, 19, 21–34.
37. **LIGHTEN MSCA Project.** (2020). www.lighten-itn.eu; https://cordis.europa.eu/project/id/956547. Accessed 1 Dec 2022.

38. **Maywald, C., & Riesser, F.** (2016). Sustainability – The art of modern architecture. In Procedia engineering (pp. 238–248). Elsevier Ltd.
39. **Meeks, W. H., & Perez, J.** (2011). The classical theory of minimal surfaces. Bulletin of the American Mathematical Society, 48(3), 325–407.
40. **Meng, L., & Wu, M.** (2016). Study on stress relaxation of membrane structures in the prestress state by considering viscoelastic properties of coated fabrics. Thin-Walled Structures, 106, 18–27.
41. **Moritz, K.** (2007). ETFE-Folie als tragelement. PhD dissertation, Technische Universtät Munich.
42. O2 Arena from the Emirates Air Line cable car. cc-by-sa/2.0 – © PAUL FARMER – geograph.org.uk/p/3018490.
43. **Osserman, R.** (2010). Mathematics of the gateway arch. Notices of the AMS, 57(2), 220–229.
44. **Otter, J. R. H., Cassell, A. C., Hobbs, R. E., & POISSON.** (1966). Dynamic relaxation. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 35(4), 633–656.
45. **Poirazis, H., Kragh, M., & Hogg, C.** (2009). Energy modelling of ETFE membranes in building applications. In 11th international IBPSA conference, Glasgow, Scotland (p. 144).
46. Polyloop startup. https://polyloop.fr/. Accessed 3 Dec 2022.
47. **Robinson, L. A.** (2004). Structural Opportunities of ETFE (ethylene tetra fluoro ethylene). MSc Thesis, Massachusset Institute of Technology.
48. **Robinson-Gayle, S., Kolokotroni, M., Cripps, A., & Tanno, S.** (2001) ETFE foil cushions in roofs and atria. Construction and Building Materials, 15(7), 323–327.
49. **Schek Heidelberg, H.-J.** (1974). The force density method for form finding and computation of general networks. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3(1), 115–134.
50. **Seidel, M.** (2009). Tensile surface structures: A practical guide to cable and membrane construction. Wiley.
51. **Serge Ferrari.** (2020). Corporate Social Responsibility Report 2020.
52. **Shin, D., Cupertino, A., de Jong, M. H. J., Steeneken, P. G., Bessa, M. A., & Norte, R. A.** (2022). Spiderweb Nanomechanical resonators via Bayesian optimization: Inspired by nature and guided by machine learning. Advanced Materials, 34, 2106248.

53. Stranghöner, N., Uhlemann, J., Bilginoglu, F., Bletzinger, K.-U., Bögner-Balz, H., Corne, E., Gibson, N., Gosling, P., Houtman, R., Llorens, J., Malinowsky, M., Marion, J.-M., Mollaert, M., Nieger, M., Novati, G., Sahnoune, F., Siemens, P., Stimpfle, B., Tanev, V., & Thomas, J.-C. (2016). Prospect for European guidance for the structural Design of Tensile Membrane Structures. Science and Policy Report (SaP-Report).

54. Suo, H., Angelotti, A., & Zanelli, A. (2015). Thermal-physical behavior and energy performance of air-supported membranes for sports halls: A comparison among traditional and advanced building envelopes. Energy and Buildings, 109, 35–46.

55. Saint-Gobain Glass. Thermal performance of glazing systems. https://www.saint-gobain-glass.co.uk/en-gb/glass-and-thermal-insulation. Accessed 3 Dec 2022.

56. Surholt, F., Uhlemann, J., & Stranghöner, N. (2022). Temperature and strain rate effects on the uniaxial tensile behaviour of ETFE foils. Polymers. https://doi.org/10.3390/polym14153156

57. Sustainable Development Goals from United Nation. https://www.un.org/sustainabledevelopment/. Accessed 3 Dec 2022.

58. Taylor, J. E. (1976). The structure of singularities in soap-bubble-like and soap-film-like minimal surfaces. Annals of Mathematics, 103(3), 489–539.

59. The LIGHTEN MSCA Project. (2020). www.lighten-itn.eu; https://cordis.europa.eu/project/id/956547. Accessed 1 Dec 2022.

60. Tian, G., Fan, Y., Wang, H., Peng, K., Zhang, X., & Zheng, H. (2020). Studies on the thermal environment and natural ventilation in the industrial building spaces enclosed by fabric membranes: A case study. Journal of Building Engineering, 32, 101651.

61. United Nations. (2021). 2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector.

62. Vanderplaats, G. N. (1982). Structural optimization-past, present, and future. AIAA Journal, 20(7), 992–1000.

63. Vector Foiltec, Asahi. (2018). Environmental product declaration – Texlon®-System with Fluon® ETFE FILM.

64. Vector Foiltec, Khan-Shatyr project. https://www.vector-foiltec.com/projects/khan-shatyr- entertainment-center- megatent/. Accessed 3 Dec 2022.

65. Vector Foiltec, Nowofol Kunststoffprodukte, Dyneon. (2021). Environmental product declaration – Texlon® system.

66. Ward, I. M., & Sweeney, J. (2012). An introduction to the mechanical properties of solid polymers (3rd ed.). Wiley.

67. Williams, C. J. K. (1990). Travelling waves and standing waves on fabric structures. Structural Engineer, 68(21), 432.

68. Zhang, Y., Zhang, Q., & Lv, H. (2012). Mechanical properties of polyvinyl-chloride-coated fabrics processed with precontraint® technology. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 31, 1670–1684.

69. Zhang, Y., Zhang, Q., Zhou, C., & Zhou, Y. (2010). Mechanical properties of PTFE coated fabrics. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 29, 3624–3630.

الفصل الثالث

تطوير خرسانة مستدامة باستخدام تسليح الخيزران المعالج

ت. فامسي ناغاراجو، علي رضا بهرامي

3.1 المقدمة

تُعد الخرسانة المادة التقليدية والأكثر شيوعًا في البنى التحتية المدنية. ورغم ضعفها في تحمل قوى الشد، فهي تتمتع بقوة عالية في مقاومة الضغط؛ مما يجعل قضبان الفولاذ من عناصر التسليح المعتادة لتوفير مقاومة الشد المطلوبة للخرسانة. غير أن لاستخدام الفولاذ بوصفه عنصرَ تسليحٍ عيوبًا كبيرة، منها ارتفاع التكلفة وعدم قابليته للتجدد. ويعد إنتاج الفولاذ من المصادر الملحوظة لانبعاث الغازات الدفيئة. لذلك، شرع بعض الباحثين والأكاديميين في اقتراح بدائل منخفضة التكلفة وصديقة للبيئة، باستخدام مواد محلية متوفرة بسهولة.

وقد تناولت العديد من الدراسات استخدام الألياف النباتية كوسيلة لتسليح الخرسانة ضمن هذا التوجه. ومن بين هذه الألياف التي تم اختبارها سابقًا: الجوت، وألياف جوز الهند، وألياف السيزال، وسعف النخيل، والخيزران. ورغم النتائج الإيجابية التي حققتها معظم هذه الدراسات، يظل للخيزران ميزة فريدة مقارنة بغيره من المواد الطبيعية المتجددة في هذا المجال.

ينتمي الخيزران الذي يُشبِه الخشب في مظهره إلى عائلة الأعشاب النجيلية (Poaceae)، ويتميَّز بسرعة نموه؛ إذ لا يستغرق سوى بضع سنوات ليبلغ قوته القصوى ويصل إلى حالته المثالية خلال خمس سنوات فقط. وتصل الحدود القصوى لمقاومة الشد لبعض أنواع

الخيـزران إلى مـا يعـادل معامـل مرونـة الفـولاذ الطـري، مـا يعنـي أن الخيـزران يمكنـه تحمُّـل أحمـال الشـد والضغـط بطريقـة مشـابهة لقضبان الفـولاذ وهـو مـا لا يتوفـر في معظـم مـواد التسـليح النباتيـة الأخـرى. عـلاوة عـلى ذلـك، يتطلَّـب إنتـاج مـتر مكعـب واحـد مـن الخيـزران طاقـة أقـل بخمسـين مـرة مقارنـة بالفـولاذ للحصـول عـلى نفـس مقاومـة الشـد ممـا يُعـزِّز مكانتـه بصفتـه خيـارًا مسـتدامًا. وقـد جذبـت هـذه الخصائـص الفريـدة اهتمـام العديـد مـن الدراسـات التـي تناولـت إمكانيـة اسـتخدام الخيـزران بصفتـه عنـصرَ تسـليحٍ في الخرسـانة.

أجـرى أمين وآخـرون دراسـة تجريبيـة لتقييم جـدوى اسـتخدام الخيزران تسـليحًا في مونـة الأسـمنت عـلى شـكل شـبكة منسـوجة. وأظهـرت النتائج أن إدخـال شـبكة الخيـزران حسَّـن تحسـينًا ملحوظًـا مـن مقاومـة المونة للشـد والانثنـاء والصدمـات إلى جانب زيـادة الليونـة والصلابة. وللحد مـن امتصاص الخيـزران للمـاء، طـلاهُ هارليمانـا وآخـرون بمزيج مـن البيتومـين والرمل قبل اسـتخدامه عنـصرَ تسـليح في مكونـات الأعمـدة والكمرات.

وأظهـرت الأدلـة التجريبيـة التـي قدَّمهـا «غوفينـدان» وآخـرون، أن عينـات الخرسـانة المسـلحة بالخيـزران أظهـرت قـدرة تحمـل نهائيـة أكـبر بأربـع مـرات مقارنـة بالخرسـانة غـير المسـلحة. إلا أن الدراسـة كشـفت أيضًـا أن الواجهـة الرابطـة بـين البامبـو والمونـة الأسـمنتية كانـت أضعـف، نتيجـة لنعومـة سـطح البامبـو ومحتـواه الرطوبـي، مـا أدى إلى انخفـاض قـدرة هـذه العينـات عـلى مقاومـة قـوى الشـد. وقـدَّم «راميـش» وآخـرون لمحـة موجـزة عـن اسـتخدام الخيـزران عنـصرَ شـدٍّ في العنـاصر الخرسـانية مثـل الكمـرات، والبلاطـات والألـواح والكتـل والمكوِّنـات المعرضـة لقـوى الإجهـاد والانفعـال.

وأفاد كلٌّ من «تشـيثامبارام» و«كومار» باسـتخدام ألواح خرسـانية مسـلّحة بالخيزران لتشـييد مسـاكن منخفضة التكلفـة في المناطق الجبليـة. حيث وُظِّفت

شرائح مغلفة بالبيتومين، وألواح بامبو خُشِّنت بالرمل (sand-blasted) لتشكيل عناصر الجدران والأسقف. ولتعزيز مقاومة هذه المكونات للأحمال الساكنة وأحمال الصدمات، طُبِّقَت طبقة لياسة إسمنتية بسمك موحَّد يبلغ 10 مم على كل وجه من وجوه الألواح. وقد أُجريت اختبارات تحميل لتقييم أداء هذه العناصر المركبة بشكل أفضل.

وقيَّمت «هيماسري» وآخرون الألواح الجدارية مسبقة الصنع والمسلحة بالخيزران بوصفها بديلًا لطوب الطين والمباني المبنية بالحجر في إنشاء مساكن منخفضة التكلفة في القرى. في حين درس «بوي» وآخرون مدى ديمومة الخيزران، وأكدوا أن تعرُّضه المتكرر لدورات البلل والجفاف لم يؤثر في مقاومته للشد أو معامل يونغ، وهما من الخصائص الأساسية لأي عنصر تسليح يدمج ضمن المقطع الخرساني. وقيَّمَ «مالي» و«داتا» القوة الإنشائية لأعمدة خرسانية مسلّحة بالخيزران المغلف بالبيتومين، بينما درس «سيزار» وآخرون أداء الكمرات الخرسانية المسلحة بالخيزران. وبالمقابل، درس «شنايدر» وآخرون قدرة هذه الكمرات على تحمُّل الأحمال الانحنائية عند استخدام الخيزران بصفتها عنصرَ تسليح رئيس إلى جانب الكيانات المصنوعة من الخيزران. وقد أشارت الدراسات السابقة إلى أن السبب الرئيس لفشل هذه العناصر الإنشائية هو ضعف الرابطة بين شرائح الخيزران والمونة الأسمنتية.

ومع ذلك، فإن الأدبيات المتوفرة حول أنجع أساليب معالجة البامبو لتحسين التماسك عند واجهة الاتصال بينه والمونة الأسمنتية لا تزال محدودة. وبناءً عليه، يهدف هذا الفصل إلى تعزيز قوة الرابطة ضمن مصفوفة الخرسانة المركبة والمكوّنة من البامبو والأسمنت. ويمكن تقييم مدى كفاءة سلوك البامبو المعالَج من خلال الأداء الإنشائي للكمرات الخرسانية المسلّحة به. ولغرض المقارنة، أُجريت اختبارات على الضغط

والشد لكمرات خرسانية مسلّحة بالحديد وأخرى مسلّحة بالبامبو، وذلك لتقييم سعة التحمل، والهبوط، والليونة، والصلابة، وقدرة امتصاص الطاقة لكل منها.

3.2 إمكانية الخيزران ومقوماته

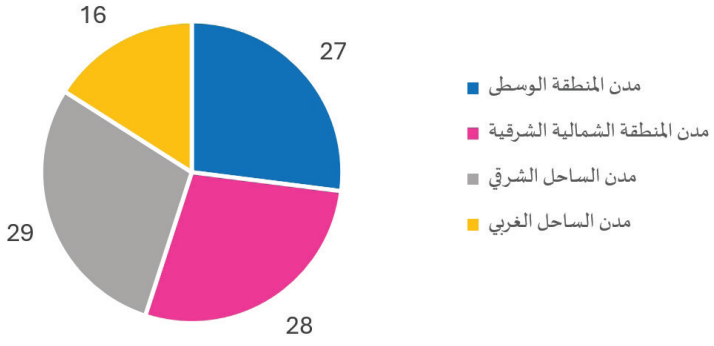
في قارة آسيا، وعلى الرغم من امتلاك الهند لاحتياطي خيزران يفوق بكثير ما تمتلكه الصين، إلا أن صادرات الصين تتجاوز صادرات الهند بشكل ملحوظ. ومع ذلك، هناك العديد من التحديات التي يتعين على صناعة الخيزران في الهند معالجتها بفعالية، من أبرزها: ضعف الوعي المجتمعي والحصاد غير المنظم في مناطق الخيزران الواسعة وغياب سياسات موحدة لزراعة الخيزران ووجود قيود على النقل ونقص المعرفة بكيفية اختيار الأنواع المناسبة حسب البيئة وعمر الزراعة، ومحدودية الوصول إلى الأسواق والفشل في تلبية متطلبات التقييس العالمي، وسوء إدارة الجودة وعدم الالتزام بالمعايير المعتمدة.

تتجاوز المساحة المغطاة بالخيزران في الهند التقدير السابق البالغ 8.96 مليون هكتار، لتصل إلى 13.96 مليون هكتار. وتشير هذه المساحة الكبيرة إلى زيادة ملحوظة في إنتاج الخيزران داخل الهند. ويوضح الشكل (3.1) التوزيع حسب الولايات لإنتاج الخيزران في الهند، مما يُظهر بصريًّا إنتاجية هذه الصناعة على مستوى البلاد.

من بين 160 نوعًا من الخيزران في الهند، لا تمتلك سوى أنواع قليلة منها تسلسل الحمض النووي (DNA bar-coding and sequencing)، الأمر الذي من شأنه أن يُساعد في تحديد الأنواع ودراسة أنماطها التركيبية. وتشمل التحديات الأخرى تفضيل

السوق للأثاث التقليدي في ظل طلب قوي على التصاميم العصرية يقابله ضعف في العرض. وغالبًا ما تكون المناطق التي يُزرع فيها الخيزران بعيدة عن منشآت التصنيع التي تستخدمه.

وتشمل التحديات الإضافية انشقاق السيقان (culm splits)، وجفاف الخيزران الذي يُقلّل من قيمته السوقية، وضعف السيقان الناتج عن الرطوبة الزائدة، والتعرض لغزو الفطريات. ويُعَدَّ تنوُّع مزارع الخيزران أمرًا بالغ الأهمية لسكان الريف في العديد من الولايات الهندية الذين يعتمدون عليه في حياتهم اليومية. وتشير بيانات التعداد السكاني لعام 2012 ، إلى أن حوالي 48 مليون أسرة تعيش في منازل جدرانها من الأعشاب أو القش أو الخيزران. وفي مناطق مثل أروناتشال براديش وآسام، يعيش أكثر من 60٪ من السكان في منازل بجدران من الخيزران. وتوجد تقنيات نسج جدران الخيزران في أنحاء متفرقة من العالم، بينما تستخدم مناطق أخرى جدرانًا مدعمة بالخيزران (bamboo infill walling) باستخدام طرق بناء مختلفة. وفي الوقت الراهن، يُنظر إلى الخيزران بوصفه مادة بناء واعدة تسهم في تحقيق التنمية المستدامة. وبفضل مزاياه البيئية والاجتماعية والاقتصادية، فهو يُعد خيارًا مرغوبًا للغاية في قطاع البناء الحديث.



الشكل 3.1 نسبة إنتاج الخيزران حسب المناطق في الهند.

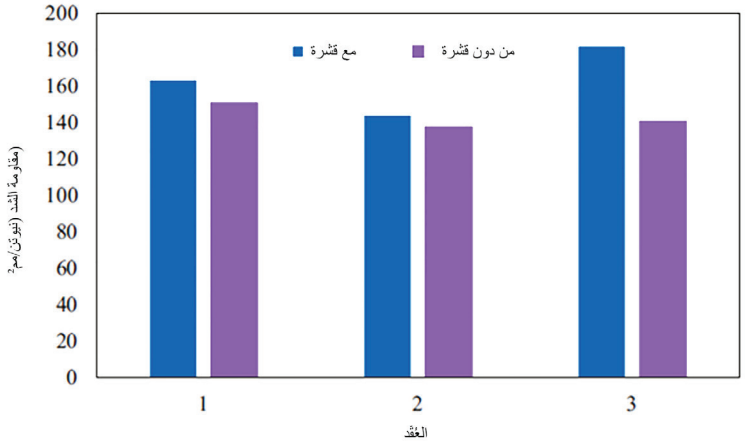
3.3 المنهجية

في هـذا البحـث التجريبـي عـلى العـوارض الخرسـانية، اسـتُخدِمَ الخيـزران بديـلًا عـن الحديـد. وقـد اختِـيرت سـيقان خيـزران «مـولاي»(Melocanna bambusoides) المتوفـرة محليًّـا وفقًـا لمعايـير محـددة، منهـا ألا يتجـاوز عمرهـا 5 سـنوات، وأن يكـون لونهـا بنيًّـا، وأن تُحصَـده قبـل موسـم الربيـع. بعـد ذلـك، اسـتُخدِمت مخرطـة لقـص شرائـح الخيـزران مـن السـيقان بالأبعـاد المطلوبـة. تبعًـا لذلـك، حُـدِّدت مقاومـة الشـد القصـوى ومعامـل المرونـة لعينـات الخيـزران باسـتخدام اختبـار الشـد. ثـم خضعـت العينـات لمعالجتـين تهدفـان إلى تحسـين أدائهـا. أولًا، غُمِـرَت عينـات الخيـزران في المـاء لمـدة 24 سـاعة، ثـم طُلِيـت بطبقـة مـن الجـير، وتُركـت لتجـف لمـدة 30 يومًـا، نظـرًا لإمكانيـة امتصاصهـا لمـا يصـل إلى 32٪ مـن وزنهـا مـاءً. بعـد ذلـك، غُلِّفـت مجموعـة مـن العينـات بطبقـة مـن البيتومـين، ومجموعـة أخـرى بطبقـة مـن راتنـج الإيبوكـسي، وأخـيرًا غُلِّفَـت جميـع العينـات بطبقـة مـن الرمـل الجـاف بهـدف تعزيـز الارتبـاط بـين الخيـزران والمونـة الأسـمنتية.

وقـد اسـتُخدِمَ في هـذه الدراسـة الأسـمنت البورتلانـدي العـادي مـن النـوع (Grade 53) والمتوفـر في الأسـواق المحليـة، والمتوافـق مـع المواصفـات القياسـية (IS 12269-1987) واسـتُخدِمَ الرمـل والـركام الخشـن ذوي الكثافـة النوعيـة 2.64 و2.69 عـلى التـوالي. واتُّبِعـت طريقـة تصميـم الخلطـة كمـا هـو موصـوف في المواصفـات الهنديـة IS 10262 و IS 456 . وقـد اعتُمِـدَت خرسـانة مـن الدرجـة M20 خـلال كامـل التجربـة. بلغـت نسـب مكونـات الخلطـة الخرسـانية لـكل مـتر مكعـب: 365 كجـم مـن الأسـمنت، و670 كجـم مـن الـركام الناعـم، و1250

كجم من الركام الخشن، مع نسبة ماء إلى أسمنت ثابتة قدرها 0.5. ونظرًا لاستخدام الأسمنت في الخلطة، فقد صُممت العناصر الخرسانية المسلحة بالخيزران لتكون مناسبة لاستخدامها بوصفها عناصر إنشائية في مشاريع الإسكان منخفض التكلفة. استوفت الخلطة الخرسانية الحد الأدنى من متطلبات محتوى الأسمنت، ولم تُستخدم أي إضافات كيميائية. صُبَّتْ الخلطة في قوالب تحتوي على هياكل خيزران وفق التصميم. قُسِّمَ الركام الخشن بنسبة 70:30 إلى مقاسين: 20 ملم و10 ملم. واختُبِرَت الخواص الإنشائية للخرسانة الناتجة من هذه الخلطة. وقد بلغ متوسط مقاومة الضغط للمكعبات بعد 28 يومًا 27 ميغا باسكال. كذلك، صُبَّت عينات على هيئة منشورات خرسانية بأبعاد 15 × 15 × 70 سم، وخضعت للاختبار بعد 28 يومًا. وحُدِّدت مقاومة الانحناء وفق المواصفات الواردة في IS 516-2004. الشكل 3.2 يوضح معالجة الخيزران، وصب واختبار العوارض الخرسانية المسلحة بالخيزران.

شكل 3,2: كمرات خرسانية مسلحة بالخيزران: (أ) معالجة الخيزران، (ب) صب واختبار الكمرات الخرسانية المسلحة بالخيزران.



الشكل 3.3: مقاومة الشد لشرائح الخيزران مع القشرة وبدونها.

3.4 نتائج اختبار الكمرات الخرسانية المسلحة بالخيزران

لتحديد القوة النهائية وخصائص المرونة لتسليح الخيزران، أُجريت اختبارات شد على شرائح الخيزران المستخرجة محليًّا. ولأجل ذلك، اختُبِرَت ثلاث عينات إجمالًا. يَعرض الشكل 3.3 تأثير العُقد في مقاومة الشد لشرائح الخيزران ذات العُقد المختلفة.

وفقًا للدراسة، فإن الخيزران أكثر عرضة للفشل عند العُقد. وأُخِذَت قياسات العرض والسماكة في ثلاث نقاط مختلفة على العينة، واستخدم المتوسط لتقدير القوة. أظهرت الاختبارات أن الفشل كان ناجمًا عن التشقق، وغالبًا ما حدث ذلك عند العُقد. وقد بلغ متوسط مقاومة الشد لشرائح الخيزران 171.22 نيوتن/مم².

3.4.1 نتائج اختبارات السحب

قُورِنَت فعالية الأنواع المختلفة من المعالجات على الخيزران في تعزيز قوة التماسك بين الخيزران المعالج ومونة الأسمنت. ولأغراض المقارنة، صُبَّت خمس أسطوانات: خيزران عادي وخيزران مغطى بالبيتومين

وخيـزران مغطـى براتنـج الإيبوكـسي وخيـزران مغطـى بالبيتومـين ومعالـج بالسـفع الرمـلي وخيـزران مغطـى براتنـج الإيبوكـسي ومعالج بالسـفع الرملي.

وأدخِلَـت شرائـح الخيـزران في أسـطوانات الخرسـانة بعمـق 100 ملـم. ووفقًـا لأغـاروال وآخريـن، حُسِـبَ إجهـاد التماسـك للعينـات. ووفقًـا للجدول 3.1، أظهـرت العينـات المصنوعـة مـن خيـزران مغطـى بالبيتومـين مـع السـفع الرمـلي ومـن خيـزران مغطـى بالإيبوكـسي مـع السـفع الرمـلي أعـلى متوسـط لمقاومـة التماسـك. تُبنـى قـوة التماسـك بـين تشـوهات القضيـب والخرسـانة المحيطـة مـن خـلال التداخـل الميكانيكـي والتلاصـق الكيميائـي والاحتـكاك. ومـع ذلـك، مـن المهـم ملاحظـة أن التلاصـق الكيميائـي عـادة ما يكـون أضعـف ويمكـن التغلـب عليـه بسـهولة.

جدول 3.1 نتائج اختبارات السحب

نوع المعالجة	سُمك الخيزران (مم)	عرض الخيزران (مم)	متوسط إجهاد الترابط (ميغا باسكال)
خيزران غير معالج	31.24	4.26	0.141
	36.07	5.18	
	39.82	4.15	
خيزران معالج بالبيتومين	29.23	3.71	0.257
	34.12	3.56	
	32.15	4.16	
خيزران معالج براتنج الإيبوكسي	37.91	5.12	0.314
	34.54	5.46	
	38.21	5.14	
خيزران معالج بالبيتومين + سفع رملي	42.14	3.85	0.518
	37.81	4.85	
	41.12	4.17	
خيزران معالج بالإيبوكسي + سفع رملي	33.45	5.22	0.572
	42.73	3.54	
	37.18	4.14	

لـذا غالبًـا مـا يُتَجاهَـل عنـد دراسـة قـوى التماسـك. وتبقـى العنـاصر الأخـرى، أي التداخـل الميكانيكـي والاحتـكاك، تعمـل معًـا لتكويـن رابطـة متماسـكة. وعنـد تحليـل الإجهـاد الناتـج، مـن المهـم التمييـز بـين مكوناتـه الطوليـة والشـعاعية. ويُعـد التداخـل الميكانيكـي هـو الآليـة الأهـم، إذ يُعَـدُّ العامـل الحاسـم في توليـد قـوة الربـط في القضبـان المشـوهة. وبالتـالي، فـإن أخـذ آليـة التداخـل الميكانيكـي بالحسـبان أمـر بالـغ الأهميـة عنـد دراسـة هـذه الظاهـرة.

وفي دراسـات أخـرى عـلى الكمـرات، اختِـيرت مـواد مختلفـة لاستكشـاف فعاليتهـا. عـلى سـبيل المثـال، اختِـيرَ خيـزران مغطـى بالبيتومـين ومعالـج بالسـفع الرمـلي، وخيـزران مغطـى براتنـج الإيبوكـسي ومعالـج بالسـفع الرمـلي، بنـاءً عـلى خصائـص كلٍّ منهمـا وفوائدهمـا المحتملـة. وعـلاوة عـلى ذلـك، فقـد اختِـيرَت هـذه المـواد تحديـدًا لتقييـم أدائهـا ومـدى ملاءمتهـا للسـياق المعنـي.

3.4.2 السلوك الحِمْلي والانحنائي للكمرات الخرسانية المسلحة بالخيزران

أخضِعَـت جميـع الكمـرات لاختبـارات بالحجـم الكامـل، وسُـجِّلَ سـلوكها مـن خـلال منحنيـات الحِمـل مقابـل الانحنـاء. يَسرد الجـدول 3.2 الأحمـال النهائيـة عنـد الفشـل وعـزوم الانهيـار النهائيـة والانحنـاءات القصـوى وأحمـال التَشَـقُّق الأوليـة لتلـك الكمـرات.

ويوضـح الجـدول 3.2 أن كل عينـة مـن الكمـرات الخرسـانية المسـلحة بالخيـزران أظهـرت أحمـالًا أعـلى للتَشَـقُّق الأولي والأحمـال النهائيـة مقارنـة بعينـة الضبـط. ويُعـزى ذلك بشـكل أسـاسي إلى تحسـن التفاعل بـين مكونات الخرسـانة والخيـزران في العنـصر المركـب، مـا أسـفر عـن توزيـع منتظـم للحمـل بـين المادتـين المتلامسـتين. وأظهـرت الكمـرات المسـلحة بالخيـزران والمُعالَجـة براتنـج الإيبوكـسي مقاومـة أعـلى للانحنـاء مقارنـةً بتلـك المطليـة

بالبيتومين، ويعود ذلك إلى الطبيعة اللاصقة الأقوى لراتنج الإيبوكسي، والتي عززت الاحتكاك بين الخيزران المعالج ومونة الخرسانة.

الجدول 3.2 نتائج اختبارات الحِمل والانحناء

العينة	الحمل النهائي للفشل P_u (KN)	عزم الفشل النهائي (KN. m)	الانحراف النهائي (mm)	حمل التشقق الأولي (KN)
كمرة خرسانية مسلحة بالفولاذ (C)	59.12	14.71	22.63	9
كمرة خرسانية مسلحة بخيزران مطلي بالبيتومين مع سفع رملي (B1)	44.17	9.43	21.16	7
كمرة خرسانية مسلحة بخيزران مطلي بالإيبوكسي مع سفع رملي (B2)	51.28	12.24	19.23	11

الجدول 3.3 نتائج سلوك الليونة والصلابة

العينة	الحمل الابتدائي Pi (kN)	الحمل النهائي Pu (kN)	Δx (mm)	Δy (mm)	معامل الليونة	الصلابة الابتدائية (mm/kN)	الصلابة النهائية (mm/kN)
C	9	59	1.21	21.23	17.70	7.44	2.56
B1	7	40	2.91	19.65	7.98	2.63	1.68
B2	11	51	2.17	17.32	9.08	6.69	2.44

3.4.3 الليونة والصلابة وامتصاص الطاقة في الكمرات الخرسانية المسلحة بالخيزران

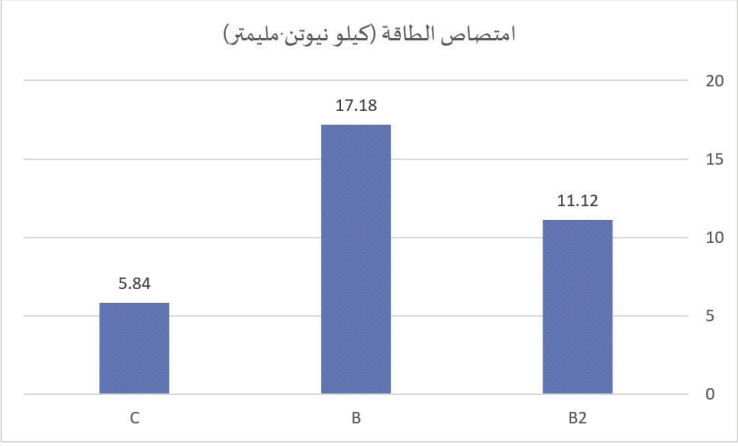
تُعدُّ كل من قابلية التشكُّل (الليونة) والصلابة وامتصاص الطاقة من الخصائص الميكانيكية الهامة التي تؤثر في استجابة الكمرات للإجهادات. يعرض الجدول 3.3 نتائج أول حمل تشقُّق (Pi) والحمل الأقصى النهائي (Pu) والانحناء عند أول تشقُّق (Δx) والانحناء عند التشقُّق النهائي (Δy) ومؤشر قابلية التشكُّل والصلابة الابتدائية والصلابة النهائية.

يُعدُّ مؤشر قابلية التشكُّل من العوامل الأساسية في تحديد الخصائص الميكانيكية للمواد ومدى ملاءمتها للاستخدام في مشاريع البناء وتطوير البنية التحتية. وقد تبين أن مؤشر قابلية التشكُّل للكمرات الخرسانية المسلحة بالخيزران أقل من نظيراتها المسلحة بالحديد (الجدول 3.3). وقد يُعزى ذلك إلى انخفاض مقاومة الشد للخيزران المستخدم، ما يؤثر بدوره في قابلية التشكُّل للمزيج الخرساني. إلا أن ذلك لا يُعد مشكلة كبيرة في التطبيقات الأخرى، مثل الأبنية منخفضة الأحمال، حيث لا تكون هناك حاجة مرتفعة لقابلية التشكُّل.

أما الصلابة، فهي خاصية تعبِّر عن مقاومة المادة للتشوه عند تعرضها للأحمال. وفي الكمرات الخرسانية المسلحة، تُقَدَّر الصلابة غالبًا من خلال ميل منحنيات الحِمل-الانحناء حتى نقطة الخضوع. وبحسب الجدول 3.3، أظهرت الكمرة الخرسانية المسلحة بالحديد صلابة أعلى مقارنة بالكمرات المسلحة بالخيزران حتى لحظة التشقُّق الأول. ما يدل على أن إدخال الخيزران قد ساهم في تقليل صلابة الخرسانة. ومع ذلك، فإن الكمرة ذات الصلابة العالية تُعَدُّ خيارًا مناسبًا في الحالات التي تتطلب استقرارًا أكبر وتحكمًا في الانحناء.

يُمكن حساب قيمة امتصاص الطاقة من خلال قسمة المساحة تحت منحنى الحِمل-الانحناء حتى الحمل الأقصى، على المساحة تحت المنحنى حتى أول حمل تشقُّق. وتُعرض بيانات امتصاص الطاقة لكل من الكمرات الخرسانية المسلحة بالحديد والخيزران في الشكل 3.4. وقد أظهرت الكمرات المسلحة بالخيزران «B1و B2» قدرة أعلى على امتصاص الطاقة مقارنة بالكمرة المرجعية المسلحة بالحديد، ويُحتمل أن يُعزى ذلك إلى خصائص الخيزران المعالج بالسفع الرملي، والذي يُحسِّن من خصائص تشتيت الطاقة ويُعزِّز من فعالية نقل الحمل بين الخيزران والخرسانة (حيث يزيد السفع الرملي من خشونة سطح الخيزران).

وعلى الرغم من أن الكمرات المسلحة بالخيزران المعالج (B1 وB2) أظهرت انحناءً ابتدائيًّا أعلى من الكمرة المرجعية، إلا أنها تظل خيارًا مقبولًا في بعض الحالات بديلًا عن الكمرات الخرسانية المسلحة بالحديد. غير أن تحسين الأداء وطول العمر التشغيلي يتطلب دراسة دقيقة لمتطلبات وخصائص معالجة الخيزران.



الشكل 3.4 امتصاص الطاقة لعناصر الخرسانة المسلحة بالحديد (القياسية) والمسلحة بالخيزران.

3.5 الخلاصة

مـن أجـل التحقـق مـن إمكانيـة اسـتخدام الخيـزران بصفتهـا مـادة تسـليح في الخرسـانة، أُجريـت دراسـة تجريبيـة عـلى عـدد مـن الكمـرات الخرسـانية. وقـد أظهـرت النتائـج أن مقاومـة الشـد لشرائـح الخيـزران المغطـاة بالقـشرة الخارجيـة كانـت أعـلى مـن تلـك المجـردة منهـا، وكانـت الشرائـح التـي تحتـوي عـلى عقدتـين أكثـر متانـة مـن تلـك التـي تحتـوي عـلى عقـدة واحـدة أو دون عقـد. وقـد بيَّنـت اختبـارات السـحب أن الكمـرات الخرسـانية المسـلحة بالخيـزران المعالـج بالسـفع الرمـلي أظهـرت مقاومـة أعـلى عنـد سـطح التلامـس في المركـب الخرسـاني، مقارنـة بالعينـات الأخرى التـي اسـتخدمت المـواد اللاصقـة فقـط. وأظهـرت الكمـرات الخرسـانية المسـلحة بالخيـزران والمغلفـة بالبيتومـين والمُعالجـة بالسـفع الرمـلي قـدرة أعـلى عـلى امتصـاص الطاقـة، مقارنـة بنظيراتهـا المغلفـة براتنـج الإيبوكـسي والمُعالجـة بالسـفع الرمـلي، وكذلـك مقارنـة بالكمـرات الخرسـانية المسـلحة بالحديـد التقليـدي. وقـد بـدأت الكمـرات المسـلحة بالخيـزران في التشـقق عنـد تحميلهـا بـأوزان تـتراوح بـين 11 كيلـو نيوتـن و18 كيلـو نيوتـن. أمـا للمنـازل السـكنية المؤقتـة والخفيفـة، وكذلـك في الـدول الناميـة التـي يُعـد توفـر حديـد التسـليح فيهـا محـدودًا أو مرتفـع التكلفـة، يُعتقـد أن الخيـزران قـد يُسـتخدم بديـلًا للحديـد. ومـع ذلـك، لا يمكـن الاسـتعاضة بـه بشـكل كامـل عـن قضبـان التسـليح مـا لـم تُسـتكمل الدراسـات اللازمة التـي تحـدد أفضـل أسـاليب اسـتخدامه لتعظيـم الاسـتفادة مـن إمكانياتـه بوصفـه مـادة مقاومـة في الخرسـانة المركبـة.

وفي المسـتقبل، سـيكون مـن المفيـد إجـراء مقارنـة شـاملة في التكاليـف بين اسـتخدام المـواد المحليـة والمـواد التقليديـة للبنـاء في مناطـق محـددة. وهنـاك حاجـة لإجـراء أبحـاث حـول أداء الجـدران الخرسـانية المسـلحة بالخيـزران المصنوعـة مـن كتـل محليـة الصنـع في المناطـق التـي يتوفـر فيهـا الخيـزران بكثـرة، بحيـث يُنظـر إليـه بديـلًا فعَّـالًا عـن الحديـد.

المراجع

1. **Agarwal, A., Nanda, B., & Maity, D.** (2014). Experimental investigation on chemically treated bamboo reinforced concrete beams and columns. *Construction and Building Materials, 71*, 610–617.
2. **Amin, K. F., Sharif, A., & Hoque, M. E.** (2021). Bamboo/bamboo Fiber reinforced concrete composites and their applications in modern infrastructure. In *Bamboo Fiber composites: Processing, properties and applications* (pp. 271–297).
3. **Archila, H., Kaminski, S., Trujillo, D., Zea Escamilla, E., & Harries, K. A**. (2018). Bamboo reinforced concrete: A critical review. *Materials and Structures, 51*, 1–18.
4. **Aziz, M. A., & Ramaswamy, S. D.** (1981). Bamboo technology for low cost constructions. In *Appropriate Technology in Civil Engineering: Proceedings of the conference held by the Institution of Civil Engineers, 14–16 April, 1980* (pp. 110–112). Thomas Telford Publishing.
5. **Bui, Q. B., Grillet, A. C., & Tran, H. D.** (2017). A bamboo treatment procedure: Effects on the durability and mechanical performance. *Sustainability, 9*(9), 1444.
6. **Chithambaram, S. J., & Kumar, S.** (2017). Flexural behaviour of bamboo based ferrocement slab panels with fly ash. *Construction and Building Materials, 134*, 641–648.
7. **Dwivedi, A. K., Kumar, A., Baredar, P., & Prakash, O.** (2019). Bamboo as a complementary crop to address climate change and livelihoods–insights from India. *Forest Policy and Economics, 102*, 66–74.
8. **Govindan, B., Ramasamy, V., Panneerselvam, B., & Rajan, D.** (2022). Performance assessment on bamboo reinforced concrete beams. *Innovative Infrastructure Solutions, 7*, 1–13.
9. **Harelimana, V., Zhu, J., Yuan, J., & Uwitonze, C.** (2022). Investigating the bamboo as alternative partial replacement of steel bars in concrete reinforcement members. *The Structural Design of Tall and Special Buildings, 31*(6), e1921.
10. **Himasree, P. R., Ganesan, N., & Indira, P. V.** (2023). Effect of opening on the performance of bamboo-reinforced concrete wall panels under one-way in-plane action. *Journal of Architectural Engineering, 29*(1), 04022036.

11. **Li, Z., Chen, C., Mi, R., Gan, W., Dai, J., Jiao, M., et al.** (2020). A strong, tough, and scalable structural material from fast-growing bamboo. *Advanced Materials, 32*(10), 1906308.
12. **Lima, H. C., Willrich, F. L., Barbosa, N. P., Rosa, M. A., & Cunha, B. S.** (2008). Durability analysis of bamboo as concrete reinforcement. *Materials and Structures, 41*, 981–989.
13. **Mali, P. R., & Datta, D.** (2020). Experimental evaluation of bamboo reinforced concrete beams. *Journal of Building Engineering, 28*, 101071.
14. **Manandhar, R., Kim, J. H., & Kim, J. T.** (2019). Environmental, social and economic sustainability of bamboo and bamboo-based construction materials in buildings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 18*(2), 49–59.
15. **Moroz, J. G., Lissel, S. L., & Hagel, M. D.** (2014). Performance of bamboo reinforced concrete masonry shear walls. *Construction and Building Materials, 61*, 125–137.
16. **Naik, T. R.** (2008). Sustainability of concrete construction. *Practice Periodical on Structural Design and Construction, 13*(2), 98–103.
17. **Parikh, N., Modi, A., & Desai, M.** (2016). Bamboo: A sustainable and low-cost housing material for India. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, ISSN, 2278-0181.
18. **Puri, V., Chakrabortty, P., Anand, S., & Majumdar, S.** (2017). Bamboo reinforced prefabricated wall panels for low cost housing. *Journal of Building Engineering, 9*, 52–59.
19. **Qaiser, S., Hameed, A., Alyousef, R., Aslam, F., & Alabduljabbar, H.** (2020). Flexural strength improvement in bamboo reinforced concrete beams subjected to pure bending. *Journal of Building Engineering, 31*, 101289.
20. **Ramesh, M., Deepa, C., & Ravanan, A.** (2021). Bamboo fiber reinforced concrete composites. In *Bamboo Fiber composites: Processing, properties and applications* (pp. 127–145).
21. **Rathour, R., Kumar, H., Prasad, K., Anerao, P., Kumar, M., Kapley, A., et al. (**2022). Multifunctional applications of bamboo crop beyond environmental management: An Indian prospective. *Bioengineered, 13*(4), 8893–8914.
22. **Reddy, A. N., & Meena, T.** (2017, November). An experimental investigation on mechanical behaviour of eco-friendly concrete. In *IOP conference series: Materials science and engineering* (Vol. 263, No. 3, p. 032010). IOP Publishing.

23. **Schneider, N., Pang, W., & Gu, M.** (2014, August). Application of bamboo for flexural and shear reinforcement in concrete beams. In *Structures congress 2014* (pp. 1025–1035).

24. **Shah, I., Jing, L., Fei, Z. M., Yuan, Y. S., Farooq, M. U., & Kanjana, N.** (2022). A review on chemical modification by using sodium hydroxide (NaOH) to investigate the mechanical properties of sisal, coir and hemp fiber reinforced concrete composites. *Journal of Natural Fibers, 19*(13), 5133–5151.

25. **Thyavihalli Girijappa, Y. G., Mavinkere Rangappa, S., Parameswaranpillai, J., & Siengchin, S**. (2019). Natural fibers as sustainable and renewable resource for development of eco-friendly composites: A comprehensive review. *Frontiers in Materials, 6*, 226.

الفصل الرابع

تنفيذ الاقتصاد الدائري بين قطاعي التعدين والإنشاءات: مسار واعد لتحقيق أهداف التنمية المستدامة

أيمن الماشي، رشيد حقو

4.1 المقدمة

ساد نموذج الإنتاج والاستهلاك أحادي الاتجاه على مستوى العالم على مدى المئة وخمسين عامًا الماضية. وفي هذا النموذج، الذي يُعرف بسلسلة التوريد أحادية المسار، تمرُّ السلع بعمليات صناعية لتحويل المواد الخام إلى منتجات نهائية تُبَاع وتُستَخدم ثم يُتَخلَّص منها لاحقًا بالحرق أو بوصفها مخلفات عند انتهاء عمرها الافتراضي. وغالبًا ما تُرمى المواد الخام التي جُمعت في الأصل من الطبيعة بعد استهلاك المنتج وهو ما يجعل هذا النموذج يُعرف أحيانًا باسم النموذج الخطي لأنه يتبع مسارًا مستقيمًا دون عودة. ومع تزايد النمو السكاني والتوسع العمراني والتصنيع المتسارع، بات من الواضح أن النموذج الاقتصادي الخطي لم يعد قابلًا للاستمرار لتحقيق التنمية المستدامة؛ فارتفاع الطلب على الموارد يؤدي بالضرورة إلى آثار بيئية سلبية. ونتيجة لذلك، بات مُشرّعُو السياسات والباحثون والشركات العالمية والمنفذون يولون اهتمامًا متزايدًا بالتحوُّل من النموذج الخطي الحالي إلى نموذج اقتصادي دائري.

وفي هذا السياق، نشرت مؤسسة «إلين ماك آرثر» (Ellen MacArthur Foundation) دراسة خلال المنتدى الاقتصادي العالمي لعام 2012، تناولت فيها الفوائد المحتملة للتحول إلى الاقتصاد الدائري (CE). وقدَّرت الدراسة أن بعض القطاعات الصناعية في الاتحاد الأوروبي قد تحقق وفورات سنوية تُقدَّر بحوالي 630 مليار دولار أمريكي. ولا تقتصر مزايا الاقتصاد الدائري

عـلى الفوائـد الاقتصاديـة فحسـب، بل تشـمل أيضًا مكاسـب بيئيـة واجتماعية كبـيرة. ومـن أبـرز مزايـاه قدرتـه عـلى فـك الارتبـاط بـين النمـو الاقتصـادي واسـتنزاف المـوارد، مـن خلال تقليـل الفاقـد، وذلك عـبر مجموعة مـن الآليات تشـمل المشـاركة والتأجـير وإعـادة الاسـتخدام والإصـلاح والتجديـد وإعـادة التدويـر ضمـن دورة مغلقة.

ولا يمكـن للمجتمعـات المعـاصرة أن تعمـل دون المعـادن. فقـد شـهد الطلـب العالمـي عـلى المـوارد الخـام توسـعًا كبـيرًا خـلال العقـود الأخـيرة ويُتوقـع أن يتضاعـف اسـتهلاك المـوارد بـين عامـي 2010 و2030. وأدت أهـداف التنميـة المسـتدامة للأمـم المتحـدة وتنفيـذ اتفـاق باريـس للمنـاخ الـذي تُبُنِّـيَ عـام 2015 إلى زيـادة الاعتمـاد عـلى مجموعـة متنوعـة مـن المعـادن اللازمـة للتطبيقـات منخفضـة الكربـون.

وَورد في المبـدأ الثامـن مـن مبـادئ المجلـس الـدولي للتعديـن والمعـادن (ICMM) فـإن عمليـات التعديـن ترتبـط باسـتخدام المنتجـات التـي تحتـوي عـلى معـادن وكذلـك التخلـص منهـا مـا يُسـهم في إشراك قطـاع التعديـن ضمـن الجهـود العالميـة لإغـلاق دورات المـواد مـن خـلال إعـادة التدويـر. ومـع ذلـك، مـن الـضروري أولًا دراسـة الإمكانـات المتاحـة عـلى مسـتوى مواقـع التعديـن قبـل توسـيع نطـاق مسـؤولية هـذا القطاع لتشـمل سلسـلة القيمـة بالكامـل. وفي المقابـل، يُعـد قطـاع البنـاء والتشـييد ركيـزة أساسـية في الحضـارة الحديثـة إلا أنـه يُخلـف أثـرًا بيئيًّـا سـلبيًّا رغـم مسـاهمته في حمايـة البيئـة مـن خـلال مفهـوم البنـاء المسـتدام. فالبنـاء التقليـدي غالبًـا مـا يُعطـي أولويـة لعوامـل الكلفـة والوقـت والجـودة دون إيـلاء اهتمـام كافٍ للأثـر البيئـي. بينمـا يسـعى البنـاء المسـتدام إلى الاسـتجابة للاحتياجات الاجتماعيـة مـع اتخـاذ التدابـير اللازمـة لتقليـل التأثـيرات الضـارة المحتملـة في البيئـة. ويمكـن أن يـؤدي تبنِّـي ممارسـات البنـاء المسـتدام إلى خفـض فعَّـالٍ في الأثـر السـلبي الناتـج عـن الأنشـطة الإنشـائية.

ومن المهم جدًّا إيجاد طرق ملائمة لتحقيق النمو الاقتصادي المنشود دون الإضرار بالبيئة. ولا يمكن تحقيق ذلك إلا من خلال تطبيق مفاهيم الاقتصاد الدائري في مختلف القطاعات وفي دورات متنوعة مثل دورة الرفع (Upcycle) ودورة الخفض (Downcycle). ويُعَدُّ هذا النهج عامل تمكين كبير لنجاح كل من قطاعي التعدين والإنشاءات في مسار الاستدامة. وفي هذا الفصل، سيُنَاقَش أثر تطبيق الاقتصاد الدائري بين قطاعي التعدين والإنشاء مع عرض دراسات حالة من دول وشركات مختلفة لتوضيح الرؤية بشكل أفضل. وسيُسَلَّط الضوء على عدد من التطورات التقنية والآفاق المستقبلية بهدف تقديم تصور أعمق حول هذا الموضوع.

4.2 إدارة نفايات المناجم والقضايا البيئية

4.2.1 صناعة التعدين وتوليد النفايات

يُعَدُّ قطاع التعدين جانبًا أساسيًّا في النمو الاقتصادي من خلال توفير المواد الخام والطاقة الحيوية للعديد من الصناعات. ومع ذلك، لا تزال أنشطته تُعَدُّ عائقًا أمام الموارد الطبيعية، لما لها من آثار بيئية سلبية. وفي هذا السياق، شهد العقد الماضي تجددًا في النقاش حول التعدين والاستدامة، نتيجة للقلق العام بشأن التدهور البيئي الناتج عن العمليات التعدينية المتنوعة.

تُعَدُّ نفايات المناجم أكبر تدفق نفايات في الاتحاد الأوروبي. حيث تنتج أنشطة التعدين سنويًّا كميات هائلة من نفايات المناجم. ووفقًا لمشروع «التعدين والمعادن والتنمية المستدامة»، يوجد حوالي 3500 منشأة نشطة لنفايات المعادن حول العالم، تتكوَّن أساسًا من المكبَّات والسدود. وتُنتَج أكثر من 100 مليار طن من النفايات الصلبة سنويًّا من عمليات التعدين عالميًّا، مما يشكل قضايا بيئية كبيرة تتطلب إستراتيجيات إدارة فعَّالة.

ويُقدَّر إجمالي كمية النفايات الناتجة عن تعدين المعادن عالميًّا بحوالي 4 جيجا طن/سنة. وفي الوقت نفسه، وسابقاً، سُجِّل إنتاج أكثر من 1.2 مليار طن من نفايات الرواسب في الاتحاد الأوروبي. ويُنصح بالاستفادة من نفايات المناجم نظرًا للتكاليف المالية والبيئية المرتبطة بإدارتها. بالإضافة إلى ذلك، تُعد هذه المخلفات مواد خام في تقنيات أخرى مثل قطاع البناء والتشييد.

4.2.2 المخاطر البيئية المرتبطة بنفايات المناجم

تتضمن إدارة نفايات التعدين التعرف على أنواع النفايات المختلفة وآثارها في البيئة والمجتمع ضمن إطار التخفيف من نفايات التعدين. وتشمل المخاطر البيئية المرتبطة بتوليد نفايات التعدين تكوُّن الحموضة وتسرب المعادن الثقيلة واستقرار مخلفات التعدين. وقد وقعت كوارث لسدود المخلفات في عدة دول. إذ يُعدُّ السد مساحة تخزين تشغل عدة كيلومترات مربعة من الأرض، وقد تتعرض لفشل يؤدي إلى كوارث بيئية. في عام 2008، وقع حادث انهيار سد في الصين أسفر عن وفاة 277 شخصًا. وانهار سد للمخلفات في البرازيل عام 2015، مما أدى إلى تسرب نحو 43.7 مليون متر مربع من الرواسب. وفي عام 2019، انهار سد لمخلفات الحديد في شركة فيل «Vale» وأسفر عن وفاة 206 أشخاص. علاوةً على ذلك، تتسبب صخور النفايات والمخلفات في مضاعفات صحية خطيرة للإنسان نتيجة تسرب الملوثات.

يُعَدُّ الصرف الحمضي للمناجم (AMD) من القضايا الكبيرة في أنشطة التعدين. حيث يتكوَّن الـ AMD نتيجة أكسدة الكبريتيدات في النفايات، مما يؤدي إلى إطلاق تركيزات عالية من الكبريتات والحديد والمعادن الثقيلة، وتتميز هذه المياه بحموضة عالية. ويؤثر الـ AMD سلبًا في

جودة المياه الجوفية ويَحُدُّ من استخدام المياه في المناطق المنخفضة. وتبقى سياسات إعادة التأهيل وتصميم مرافق معالجة المياه حلولًا مهمة لحماية البيئة المحيطة. إلا أن علاج AMD لا يزال مكلفًا، ويُقدَّر بحوالي 1.5 مليار دولار أمريكي سنويًّا، فيما تتجاوز المسؤوليات البيئية العالمية 100 مليار دولار أمريكي.

دُرِسَت طرق مختلفة للتخلص من المخلفات، بما في ذلك: التخلص التقليدي وإعادة استخدام المخلفات وإعادة تدويرها ومعالجتها، بالإضافة إلى الإدارة الاستباقية التي تلتزم بمبدأ ICMM رقم 8 (انظر الجدول 4.1). وتكمن الرسالة الأساسية في اعتماد نهج تكاملي لإدارة المخلفات من أجل تحسين النتائج البيئية والاجتماعية والاقتصادية. وبالتالي، فإن إعادة التدوير مخلفات المناجم وإعادة استخدامها تُعَدُّ تقنيات حديثة لمعالجة القضايا البيئية.

الجدول 4.1 مبادئ المجلس الدولي للتعدين والمعادن (ICMM)

رقم المبدأ	مجال المبدأ
1	الأعمال الأخلاقية
2	اتخاذ القرار
3	حقوق الإنسان
4	إدارة المخاطر
5	الصحة والسلامة
6	الأداء البيئي
7	حفظ التنوع البيولوجي
8	التصميم والاستخدام وإعادة الاستخدام والتدوير والتخلص من المواد بمسؤولية
9	الأداء الاجتماعي
10	إشراك أصحاب المصلحة

4.3 التثمين البيئي لنفايات المناجم في تطبيقات البناء

4.3.1 إعادة تدوير النفايات الصلبة الناتجة عن التعدين لاستخدامها في مواد البناء

في إطار أهداف التنمية المستدامة (SDGs) التي وضعتها الأمم المتحدة، وتنفيذ اتفاقية باريس، تستخدم معادن متنوعة في التقنيات الخضراء التي تراعي التطبيقات منخفضة الانبعاثات الكربونية. ويُعَدُّ تدوير نفايات المناجم متوافقًا تمامًا مع أهداف التنمية المستدامة للأمم المتحدة. إذ تُسهم عملية تثمين مخلفات التعدين بشكل ملحوظ في تحقيق الهدف 11 «مدن ومجتمعات محلية مستدامة»، والهدف 12 «الاستهلاك والإنتاج المسؤولان»، من خلال تقليل كمية النفايات الناتجة. أما في الوقت الحالي، فإن إدارة نفايات التعدين تعتمد على التفكير الخطي «استخراج – تصنيع – نفايات». ومن الضروري تبني نموذج الاقتصاد الدائري (CE) في قطاع التعدين لحل مشكلات التلوث البيئي وتقليل النفايات وتحقيق أرباح اقتصادية.

في سياق آخر، تتزايد وتيرة التوسع العمراني بشكل كبير، حيث يعيش 55٪ من سكان العالم في المناطق الحضرية، ومن المتوقع أن ترتفع هذه النسبة إلى 68٪ بحلول عام 2050، مما يؤدي إلى استهلاك هائل للمواد الخام اللازمة لإنتاج مواد البناء. ولتقليل هذا الأثر السلبي، استهدفت المفوضية الأوروبية خفض الانبعاثات الناتجة عن قطاع البناء بنسبة 90٪ بحلول عام 2050. ولذلك، فإن استخدام المخلفات بوصفها بدائل للمواد الخام في البناء يُعدُّ وسيلة فعالة لتحقيق أهداف الاقتصاد الدائري عبر إنتاج مواد بناء صديقة للبيئة منخفضة الطاقة المضمَّنة.

تُعـدُّ نفايـات المناجـم مصـدرًا مسـتدامًا للمـواد البديلـة في تطبيقـات البنـاء. حيـث تُثمَّـن هـذه النفايـات بصفتهـا مـادة أوليـة لإنتـاج الكلنكـر[1] والطـوب والـركام والمـلاط والخرسـانة والجيوبوليمـرات. وقـد جرت دراسـات موسـعة حـول إمكانيـة اسـتخدام نفايـات التعديـن والمخلفـات بوصفهـا مـواد رابطـة إسـمنتية. عـلى سـبيل المثـال، اسـتُخدمت نفايـات الفحـم بوصفهـا مـواد خـام لإنتـاج الكلنكـر، ممـا شـجَّع عـلى تقليـل اسـتهلاك الوقـود الأحفـوري في أفـران الاحـتراق. وتُعَـدُّ تطبيقـات السـيراميك بديـلًا مهمًّـا لتقليـل التكاليـف المرتبطـة بـإدارة مخلفـات المناجـم. ففـي روسـيا، أُعِيـدَ تدويـر نفايـات مناجـم الفحـم لإنتـاج الطـوب السـيراميكي. ويهـدف تطبيـق الطـوب المحـروق بشـكل رئيـسي إلى تثبيـت العنـاصر الملوثـة داخـل مصفوفـة السـيراميك.

درس شـو وآخـرون اسـتبدال الـركام الطبيعـي بـركام ناعـم وخشـن مـن مخلفـات الحديـد لإنتـاج الخرسـانة. بينمـا اسـتخدم فونتـس وآخـرون هـذه المخلفـات في إنتـاج بـلاط السـيراميك. واسـتخدم لام وآخـرون مخلفـات النحـاس بوصفهـا ركامًـا ناعمًـا لتصنيـع حجـارة رصـف خرسـانية. وفي دراسـة أحـدث، اختـبر هوينـه وآخـرون أداء عينـات خرسـانية دقيقـة الحبيبـات باسـتخدام مخلفـات النحـاس. بالإضافـة إلى ذلـك، دُوِّرَت نفايـات مناجـم الفوسـفات لاسـتخدامها بوصفهـا ركامًـا خشـنًا في الخرسـانة. وأعـاد سـيديرا وآخـرون تدويـر وحـل نفايـات التنجسـتن لاسـتخدامها في مـواد رابطـة مفعَّلـة قلويًّـا. وثُمِّنَـت كذلـك مخلفـات معدنيـة تحتـوي عـلى الرصـاص والزنـك لاسـتخدامها بوصفهـا ركامًـا في تركيـب المـلاط. وقـد اسـتُخدمت نفايـات التعديـن الناتجـة عن معـادن النحـاس والذهـب والحديد والبوكسـيت والفاناديـوم والزنـك والفوسـفات في إنتـاج الجيوبوليمـرات لاسـتخدامها في تطبيقـات البنـاء.

(1) ملاحظـة المترجـم: **الكلنكـر** هـو الناتـج المحـروق والمتلبـد مـن المـواد الخـام في صناعـة الإسـمنت، ويُطحـن لاحقًـا لإنتـاج الإسـمنت. واللفـظ نفسـه هـو الأكثـر شـيوعًا في الاسـتعمال العربـي.

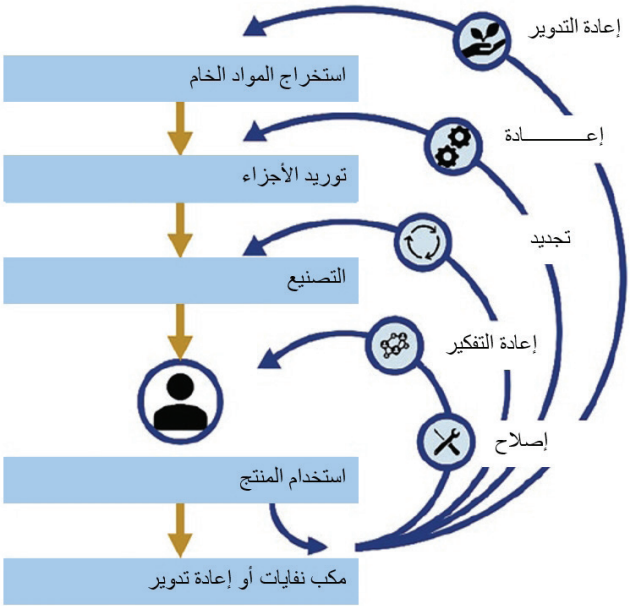
4.3.2 تطبيق مفهوم الاقتصاد الدائري في قطاع التعدين

ناقش ليونتيف مفهوم الاقتصاد الدائري لأول مرة في عام 1928 لكن أول تطبيق دولي فعلي له جاء عندما أقرَّ البرلمان الألماني قانونًا بشأن الاقتصاد الدائري في عام 1996. ومنذ أواخر تسعينيات القرن الماضي، أُطلق مفهوم الاقتصاد الدائري في الصين حلًّا للتحديات البيئية. ويُعرض التمثيل البصري لمفهوم الاقتصاد الدائري في الشكل 4.1. يحظى هذا المفهوم باهتمام كبير ضمن الأجندات السياسية في أوروبا بهدف تعزيز النمو الاقتصادي مع الحد من الآثار البيئية. ففي المملكة المتحدة من الممكن أن يسهم تطبيق الاقتصاد الدائري في خلق 50,000 وظيفة جديدة وجذب استثمارات تصل إلى 12 مليار يورو. لقد أحرز قطاع المعادن والتعدين تقدمًا ملحوظًا في تقييم أداء الاقتصاد الدائري فيما يتعلق بالتنمية المستدامة، وحظي قطاع البناء والتشييد باهتمام كبير في هذا السياق. ويمكن أن يؤدي إدخال نموذج الاقتصاد الدائري إلى قطاع التعدين إلى تحويله إلى صناعة أكثر استدامة. ويتمتع قطاع التعدين بإمكانات هائلة لاعتماد هذا النهج من خلال استغلال المواد الناتجة عن المخلفات في مختلف مراحل دورة الحياة وتطوير منتجات صديقة للبيئة. وعلى الرغم من أن تطبيق الاقتصاد الدائري لا يزال في مراحله الأولى، فإن التطورات والتأثيرات المرتبطة به في قطاع التعدين شهدت نموًّا ملحوظًا في السنوات الأخيرة. وتتركز الأجندة الحالية للاقتصاد الدائري على سلسلة توريد المواد وتدوير المخلفات لإعادة استخدامها بشكل مباشر وهما مبدآن أساسيان لنجاح تطبيق هذا المفهوم.

إن تطبيق مفهوم الاقتصاد الدائري في قطاعَيْ التعدين والبناء يمكن أن يسهم بشكل كبير في تحقيق الهدف الثاني عشر من أهداف التنمية المستدامة والمتمثل في الاستهلاك والإنتاج المسؤولين.

فمن خلال تبني هذا النهج، يمكن لهذين القطاعين الحد من النفايات وتقليل استهلاك الموارد مع تعزيز الكفاءة في استخدامها وتطبيق أنظمة مغلقة لتداول المواد. ويتحقق ذلك من خلال إعادة تدوير المواد والمنتجات واستخدام مصادر الطاقة المتجددة وتحسين تصميم المنتجات لتمديد عمرها الافتراضي.

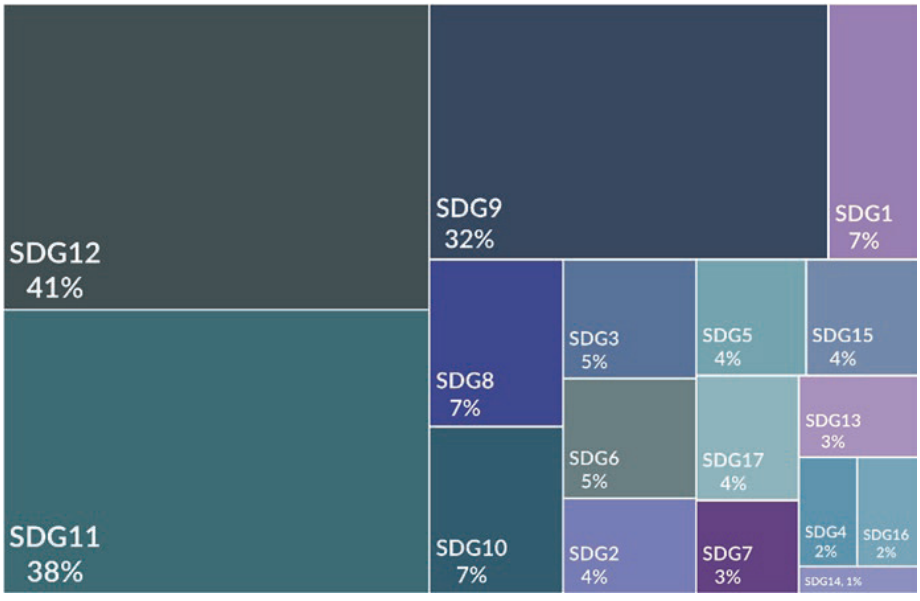
وفي قطاع التعدين، يُمكن استخدام المواد الناتجة عن النفايات بوصفها مصادر للمواد الخام الثانوية مما يقلل الحاجة إلى استخراج موارد جديدة من باطن الأرض وبالتالي يحدُّ من الأثر البيئي الناجم عن أنشطة التعدين. وبالمثل، في قطاع البناء يمكن أن يسهم استخدام المواد المعاد تدويرها وتقنيات البناء المعياري الجاهز في تقليل الهدر واستهلاك الموارد، فضلًا عن تقليص زمن البناء وتكاليفه.



الشكل 4.1 تمثيل مرئي لمفهوم CE

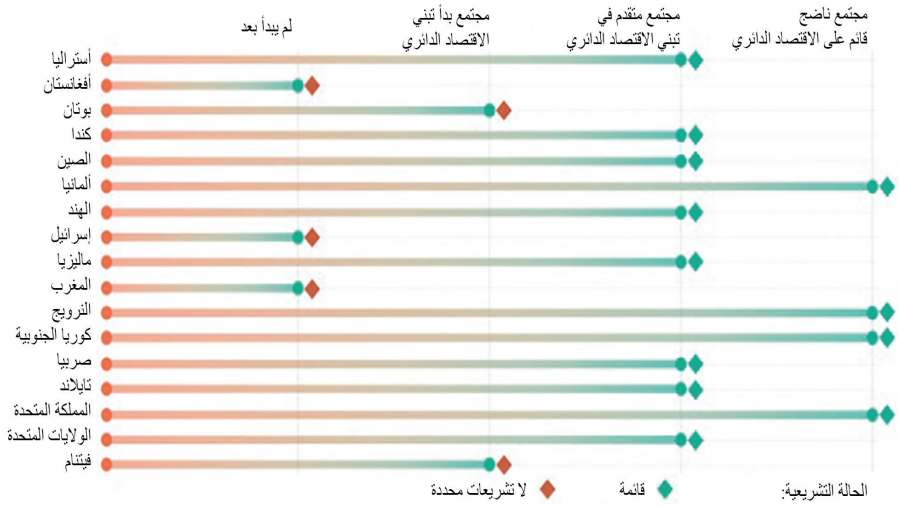
علاوة على ذلك، يمكن لتطبيق مفهوم الاقتصاد الدائري (renewable energy) أن يُحدث آثارًا إيجابية في عدة أهداف من أهداف التنمية المستدامة. فعلى سبيل المثال، يسهم استخدام مصادر الطاقة المتجددة في قطاعي التعدين والبناء في تحقيق الهدف السابع، المتعلق بالطاقة النظيفة والمتاحة بأسعار معقولة. ويدعم تطوير أنظمة مغلقة لتداول الموارد واعتماد تقنيات ذات كفاءة عالية في استخدام الموارد تحقيق الهدف التاسع الخاص بالصناعة والابتكار والبنية التحتية والهدف الحادي عشر المعني بالمدن والمجتمعات المستدامة من خلال تقليل الأثر البيئي للأنشطة الصناعية وتعزيز استدامة المناطق الحضرية. ويُسهم خفض استهلاك المياه ومعالجة مياه الصرف الصحي في تحقيق الهدف السادس المتعلق بالمياه النظيفة والصرف الصحي بينما يُعزز دعم فرص العمل اللائق وتوفير وظائف خضراء تحقيق الهدف الثامن الخاص بالعمل اللائق والنمو الاقتصادي. ويسهم الحد من انبعاثات الغازات الدفيئة وتبني ممارسات مستدامة لإدارة الأراضي في تحقيق الهدف الثالث عشر المتعلق بالعمل المناخي والهدف الخامس عشر المتعلق بالحياة على اليابسة من خلال التخفيف من آثار الأنشطة الصناعية في البيئة والحفاظ على التنوع البيولوجي. يوضح الشكل 4.2 النسبة المئوية لأهداف التنمية المستدامة التي تناولتها المشاريع المتعلقة بتطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري في إعادة استخدام مخلفات المناجم ضمن قطاع البناء. ويقدم الشكل 4.3 ملخصًا لحالة تطبيق مفهوم الاقتصاد الدائري في مختلف الدول حيث يتضح أن هناك توجهًا عالميًّا متزايدًا نحو هذا النهج وقد وصلت بعض الدول إلى مراحل متقدمة في التطبيق بينما لا تزال دول أخرى في بداياته. وترتبط هذه الفروقات بعدة عوامل من أبرزها وجود الأطر التشريعية والدعم المالي ومستوى الوعي الاجتماعي والاقتصادي بأثر الاقتصاد الدائري الإيجابي. وقد صُنِّفت الدول الموضحة في الشكل 4.3 إلى أربع فئات وفقًا لمستوى

تطبيق الاقتصاد الدائري. فدولٌ مثل ألمانيا والنرويج وكوريا الجنوبية والمملكة المتحدة تُعد من المجتمعات المتقدمة التي يقودها الاقتصاد الدائري وقد وصلت إلى مستويات متقدمة من التطبيق. أما أستراليا وكندا والصين والولايات المتحدة فتقع في مستوى متدنٍ؛ فإما أنها بدأت تطبيق الاقتصاد الدائري مؤخرًا وحققت نتائج ملحوظة أو أنها بدأت منذ سنوات دون أن تحقق نتائج كبيرة. وهناك عدد أقل من الدول مثل بوتان وفيتنام بادرت بتطبيق الاقتصاد الدائري من خلال عدد من السياسات والإجراءات وبدأت بتقليل استخدام الموارد وإعادة استخدامها في عدة مجالات اقتصادية مما أسهم في تحقيق تقدم ملحوظ. في المقابل، لا تزال دول مثل أفغانستان والأراضي المحتلة والمغرب في المراحل الأولى من تطبيق مفاهيم الاقتصاد الدائري مع وجود حالات فردية محدودة لإعادة تدوير الموارد تتم عبر مبادرات شخصية متفرقة.



الشكل 4.2: النسبة المئوية لأهداف التنمية المستدامة (SDGs) التي تناولتها المشاريع المرتبطة بتطبيق الاقتصاد الدائري (CE) لإعادة استخدام نفايات المناجم في قطاع الإنشاءات.

لقد أثبتت ممارسات الاقتصاد الدائري مثل إعادة استخدام مخلفات التعدين وتدويرها نجاحها في الحد من هدر الموارد. فعلى سبيل المثال، اعتمدت شركة أنجلو أمريكان (Anglo-American)، وهي شركة تعدين مقرها جنوب أفريقيا إستراتيجية صفر نفايات إلى المدافن (zero-waste-to-landfill) من خلال إعادة توظيف أو تدوير مخلفات التعدين. وللحد من كمية المخلفات الخطرة المرسلة إلى المدافن تستخدم الشركة محطةً للمعالجة الحيوية (bioremediation) تعمل على استصلاح التربة المتأثرة بانسكابات الهيدروكربونات مما يعزز الصحة العامة ويحمي الحياة على اليابسة وهو ما يتماشى مع الهدفين الخامس عشر والثالث من أهداف التنمية المستدامة. ويمكن لإعادة تدوير المعادن والمعادن الصناعية المستهلكة في نهاية دورة حياتها من خلال استرجاعها المعدني أن يمنحها دورة حياة جديدة. فعلى سبيل المثال، تمكنت شركة سوميتومو للتعدين (Sumitomo) من رفع معدلات استرجاع خردة النحاس بشكل كبير من خلال معالجة خردة النحاس عالية النقاء مباشرة في مصهرها ومصفاتها في طوكيو وذلك خلال الفترة ما بين عامي 2010 و2015. وأخيرًا، يمكن لممارسات استعادة الطاقة من خلال تحسين كفاءة الطحن والتكسير (Comminution) أن تسترجع الحرارة الناتجة عن عمليات التعدين وتحولها إلى طاقة قابلة للاستخدام.



الشكل 4.3 حالة تطبيق الاقتصاد الدائري في الدول. (البيانات من [28])

توجد العديد من السياسات العامة العالمية التي تدعم مبدأ الدائرية (circularity) في قطاع المعادن. ففي أوروبا، تقدِّم «خطة العمل للاقتصاد الدائري» إطارًا توجيهيًّا وتشجِّع على تبني أفضل الممارسات في خطط إدارة مخلفات التعدين ضمن دول الاتحاد الأوروبي. أما في كندا، فإن «خطة المعادن والمعادن الكندية» تركِّز على التقليل المستمر من البصمة البيئية لأنشطة التعدين من خلال دعم ممارسات الاقتصاد الدائري بما في ذلك تحويل مخلفات المناجم إلى منتجات ذات فائدة وتعزيز خطط إغلاق المناجم وإعادة تأهيل المواقع التعدينية بيئيًّا. وتتضمَّن الخطة أيضًا نهجًا منهجيًّا للتكيف مع تغيُّر المناخ. أما «مبادرة التعدين الأخضر»، فتهدف إلى تحسين كفاءة استخدام الطاقة وتعزيز الإنتاجية وتحسين إدارة النفايات والمياه. وتتمحور هذه المبادرة حول هدفين رئيسيين: تقليل الآثار البيئية الناتجة عن التعدين وتعزيز القدرة التنافسية لكندا في هذا القطاع.

تُعد أستراليا رائدة في تطوير مفهوم الاقتصاد الدائري ضمن المناطق الصناعية البيئية حيث أُعِيدَ أخيرًا تقييم الإستراتيجيات التنظيمية

الخاصة بإعادة تدوير المعادن استنادًا إلى مفهوم الاقتصاد الدائري بهدف مراجعة اللوائح وتطبيقها على مختلف مراحل دورة حياة المعادن بدءًا من الاستخراج وحتى التخلص النهائي. وتهدف خارطة طريق الاقتصاد الدائري التي وضعتها مؤسسة سيترا الفنلندية (Sitra) إلى تقليل الأثر البيئي وتعزيز الاستخدام المستدام للموارد غير المتجددة والاستفادة من التدفقات الجانبية للمواد. وتُعد مخلفات التعدين بما في ذلك الرواسب والطين والخبث والغبار والرماد مواد خام ثانوية يمكن توظيفها ضمن مسار نحو «صفر نفايات». أما في الصين، فقد أُطلقت مبادرة المدن التجريبية للتعدين الحضري (Urban Mining Pilot Cities) بهدف تقليل إنتاج النفايات القابلة لإعادة التدوير وتعزيز التنمية الحضرية المستدامة. وقد اختُبِرَ نموذج الاقتصاد الدائري القائم على مفاهيم «التقليل وإعادة الاستخدام والاستفادة من الموارد»، ضمن ست فئات من المدن التجريبية عبر 49 مدينة خلال الفترة ما بين 2010 و2015 بهدف تحسين التنمية الصناعية وتعظيم الاستفادة من الموارد. وفي المغرب، يمتلك قطاع التعدين ما نسبته 75٪ من احتياطيات الفوسفات العالمية، لكنه في الوقت ذاته ينتج كميات كبيرة من المخلفات. ولمواجهة هذا التحدي وتحقيق قيمة مضافة تعمل شركة تعدين الفوسفات على إعادة تدوير المنتجات الثانوية الناتجة عن استخراج الفوسفات لأغراض إنشائية وذلك باستخدام تقنيات متنوعة.

إن تبنِّي الدول لهذا النهج يُعد مؤشرًا مهمًّا، إلا أن دمج مفهوم الاقتصاد الدائري ضمن نماذج الأعمال وخطط العمل الخاصة بالشركات يمكن أن يكون ذا فعالية كبيرة على نحو موازٍ. فعلى سبيل المثال، تسترجع شركة بوليدن السويدية للتعدين (Boliden) المعادن من خبث الصهر والرماد المتطاير وتحولها إلى مواد إنشائية. وتعيد شركة تيك ريسورسز الكندية (Teck Resources) تدوير المخلفات

الناتجة عن إنتاج الرصاص والزنك لإنتاج مواد جديدة تُستخدم في قطاع البناء. أما الشركة الفنلندية الناشئة بيتولار (Betolar) فتستخدم مخلفات التعدين لإنتاج بديل إسمنتي منخفض الكربون مما يسهم في تقليل انبعاثات الكربون الناتجة عن صناعة الأسمنت.

على الرغم من التقدم المُحرز في تطبيق ممارسات الاقتصاد الدائري لإعادة استخدام مخلفات التعدين في قطاع البناء، لا تزال هناك تحديات ومعوقات تواجهها الدول والشركات على حد سواء. ومن أبرز هذه التحديات، غياب معايير موحدة وآليات اعتماد واضحة للمواد الخام الثانوية؛ حيث إن معايير الجودة والسلامة الخاصة بهذه المواد لا تكون دائمًا محددة أو متسقة، مما قد يشكّل عائقًا أمام استخدامها في أعمال البناء. ومن التحديات الأخرى، مسألة نقل مخلفات التعدين إلى مواقع البناء والتي قد تؤدي إلى زيادة في انبعاثات الغازات الدفيئة وارتفاع في تكاليف النقل. ويمكن التخفيف من هذه الإشكالية عبر توفير المواد من مصادر محلية إلا أن ذلك ليس ممكنًا دائمًا. وتوجد تحديات مالية مرتبطة بتطبيق ممارسات الاقتصاد الدائري؛ حيث قد تتطلب استثمارات مبدئية وخططًا طويلة الأجل. علاوة على ذلك، تختلف الأطر التنظيمية والسياسات بشكل كبير من دولة إلى أخرى، بل وأحيانًا بين المناطق داخل الدولة الواحدة مما قد يؤدي إلى حالة من عدم اليقين لدى الشركات التي تسعى إلى تطبيق ممارسات الاقتصاد الدائري. كما قد تُواجه هذه المبادرات حواجز اجتماعية وثقافية لاسيما في المجتمعات التي اعتمدت تاريخيًّا على التعدين بوصفه مصدرًا رئيسيًّا للتوظيف والتنمية الاقتصادية. وقد يتطلب الأمر وقتًا وجهدًا لبناء الثقة وكسب الدعم لتبني أساليب جديدة في إدارة المخلفات واسترداد الموارد.

4.3.3 التقدم التقني والآفاق المستقبلية

إن إعادة استخدام مخلفات التعدين في قطاع البناء ليست فكرة جديدة. إلا أن التطورات التقنية الحديثة جعلت من السهل تحويل هذه المخلفات إلى منتجات ذات فائدة.

فالتقنيات المتقدمة في المعالجة بما في ذلك العمليات الميكانيكية والحرارية والكيميائية تُستخدم حاليًّا لتحويل مخلفات التعدين إلى منتجات ذات قيمة مضافة. وتسهم هذه التقنيات في تطوير عمليات جديدة لتحويل المواد المهدرة إلى منتجات مفيدة، وتتيح تحسين تصميم المباني وطرق إنشائها باستخدام تلك المواد. ومن الأمثلة على ذلك، تحويل الرواسب المتبقية من التعدين إلى مواد بناء مثل الركام خفيف الوزن وكتل الرصف والطوب.

تُعد تقنية البوليمرات الجيولوجية (Geopolymer) من الأساليب الواعدة لإعادة استخدام مخلفات التعدين في قطاع البناء. وتعتمد هذه التقنية على استخدام مخلفات التعدين لإنتاج مواد رابطة جيولوجية يمكن أن تُستخدم بصفتها بديلًا عن الأسمنت التقليدي في إنتاج الخرسانة مما يُسهم في تقليل الأثر البيئي لصناعة الأسمنت ويوفر في الوقت ذاته سوقًا جديدًا لهذه المخلفات.

وتُستكشف تقنية النانو بوصفها وسيلة لإعادة استخدام مخلفات التعدين في قطاع البناء. وقد طُوِّرت عملية تعتمد على استخدام جسيمات نانو السيليكا المستخلصة من الرواسب التعدينية لاستبدال الأسمنت في الخرسانة. وتساعد هذه الطريقة في تحسين قوة الخرسانة ومتانتها مع تقليل أثرها البيئي.

تُعد الآفاق المستقبلية لتطبيق مفهوم الاقتصاد الدائري في إعادة استخدام مخلفات التعدين ضمن قطاع البناء واعدة للغاية. ومع

توجُّـه قطـاع البنـاء نحـو ممارسـات أكثـر اسـتدامة فـإن إعـادة اسـتخدام مخلفـات التعديـن يمكـن أن توفـر مصـدرًا قيِّمًـا للمـواد الخـام.

ويُسـهم دمـج التقنيـات الرقميـة مثـل الـذكاء الاصطناعـي وتعلُّـم الآلـة والطباعـة ثلاثيـة الأبعـاد في تحسـين كفـاءة إعادة اسـتخدام مخلفـات التعدين في البنـاء. إذ تتيـح هـذه التقنيـات تطويـر عمليـات جديـدة لتحويـل المخلفات إلى منتجـات ذات قيمـة مضافـة. بالإضافـة إلى تحسـين تصميم المبانـي وطُرق إنشـائها باسـتخدام هـذه المـواد. ومـن خـلال هـذا التوجُّـه يمكن للقطـاع أن يحقـق خطـوات كبـيرة نحـو تبنـي ممارسـات دائرية ومسـتدامة.

وتُعَـدُّ نمـاذج الأعمـال الدائريـة مـن الأسـاليب الواعـدة في تعزيـز إعـادة اسـتخدام مخلفـات التعديـن في قطـاع البنـاء. فمـن خـلال إنشـاء سلاسـل قيمـة جديـدة لهـذه المـواد توفـر هـذه النمـاذج مصـادر دخـل إضافيـة لصناعـة التعديـن مـع تقليـل الأثـر البيئـي المرتبـط بهـا.

لتقييـم الأثـر البيئـي لاسـتخدام مخلفـات التعديـن في قطـاع البنـاء يُعـد تحليـل دورة الحيـاة (LCA) أداة فعَّالـة. إذ يسـاعد هـذا التحليـل في تحديـد أكثـر الطـرق اسـتدامة لاسـتخدام هـذه المـواد، ويتيـح تحسـين اسـتخدامها في مشـاريع البنـاء. ويُسـتخدم تحليـل (LCA) أيضًـا للمقارنـة بـين الأثـر البيئـي لاسـتخدام مخلفـات التعديـن واسـتخدام المـواد الخـام التقليديـة.

ويمكـن لتحليـل تدفقـات المـواد (MFA) أن يُقيِّـم حركـة المـواد داخـل النظـام ويحـدِّد فـرص إعـادة الاسـتخدام والتدويـر. ويُسـتخدم تحليـل (MFA) لتحديـد مصـادر مخلفـات التعديـن ومصيرهـا والعمـل على تحسـين اسـتغلالها في قطـاع البنـاء.

أمـا تقنيـة البلـوك تشـين فبإمكانهـا أن توفّـر سـجلًّا شـفافًا وآمنًـا يوضـح مصـدر وجـودة المـواد الناتجـة عـن مخلفـات التعديـن ممـا يزيـد مـن قيمتهـا ويعـزِّز إمكانيـة إعـادة اسـتخدامها في مشـاريع البنـاء.

ويمكن لإنترنت الأشياء (IoT) أن يلعب دورًا محوريًّا في دعم إعادة استخدام مخلفات التعدين في قطاع البناء. فمن خلال ربط الأجهزة والأنظمة المادية عبر الإنترنت، يُمكن لإنترنت الأشياء تمكين تبادل البيانات والتشغيل الآلي بما يساهم في تحسين الكفاءة وتعزيز الممارسات المستدامة.

التوائم الرقمية هي نسخ رقمية مطابقة للأصول والأنظمة والعمليات الفيزيائية. وفي سياق الاقتصاد الدائري وإعادة استخدام مخلفات التعدين يمكن للتوائم الرقمية أن تُستخدم لمحاكاة وتحسين عمليات البناء بما في ذلك استخدام المواد الناتجة عن مخلفات التعدين، ومن خلال محاكاة أداء مواد البناء المصنوعة من مخلفات التعدين تحت ظروف بيئية مختلفة. وتُمكّن التوائم الرقمية من تحديد التركيبات المثلى للمواد بالإضافة إلى أفضل العمليات التصنيعية الممكنة مما يسهم في تعزيز كفاءة الاستخدام وتحقيق نتائج أكثر استدامة.

4.4 الخاتمة

يواجه العالم اليوم تحديات بيئية متزايدة بمرور الوقت باتت تُشكِّل تهديدًا وشيكًا للبشرية. ولا شك أن التصنيع يُعد خطوة كبرى نحو النمو الاقتصادي وتحسين جودة الحياة وله أثر إيجابي لا يمكن تجاهله. ومع ذلك، لا بد من التأكيد على الآثار السلبية المترتبة عليه على البيئة. ومن هنا تنشأ الحاجة إلى صيغة توازن واتفاق بين الجانبين تحفظ الفوائد وتُعالج الأضرار في آن واحد.

تُنتج عمليات التعدين كميات هائلة من المخلفات وقد تؤدي تراكماتها إلى مشاكل بيئية خطيرة مثل الانهيارات الأرضية وتدهور الأراضي الصالحة للزراعة وتصريف الأحماض من المناجم. لذا، فإن إعادة توظيف مخلفات التعدين لأغراض عملية تُعد أمرًا بالغ الأهمية.

ويُعد قطاع البناء من أبرز القطاعات المستهلكة للموارد الطبيعية مما يجعله مسؤولًا عن آثار بيئية كبيرة. وتتمثل إحدى الحلول الفعّالة في إقامة شراكات بين المنتجين الرئيسيين لمخلفات الصخور وبين مستهلكي المواد الخام مما يُسهم في تقليل الهدر واستهلاك الموارد الأولية ويدعم في الوقت ذاته النمو الاقتصادي وتحقيق أهداف التنمية المستدامة.

إن تطبيق مفهوم الاقتصاد الدائري بين هذين القطاعين الكبيرين – التعدين والبناء – لم يعد خيارًا بل ضرورة ملحّة في وقتنا الراهن. فهذا النهج يُعد التوجّه الأساسي لربط القضايا البيئية المذكورة سابقًا مع إفساح المجال لازدهار الأنشطة الاقتصادية والاجتماعية سواء على مستوى الشركات أو الدول. وبناءً عليه، بدأت عدة دول في سلوك مسار جديد نحو تحقيق الاستدامة من خلال تطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري. ومن الناحية التقنية، فإن تنفيذ هذا المفهوم لا يمكن أن يتم بشكل فعَّال إلا بتوظيف الأدوات والأساليب الملائمة. ويُعد تحليل دورة الحياة (Life Cycle Analysis, LCA) وغيره من التقنيات أدوات أساسية لتقييم الأثر البيئي لإستراتيجيات الاقتصاد الدائري وقياس مدى استدامتها.

وفي نهاية المطاف، فإن هذا التداخل بين الأطر النظرية والتطورات التقنية لن يكون ممكنًا دون وجود بيئة قانونية وإدارية داعمة؛ فالحاجة إلى تطوير الإجراءات الإدارية والتشريعات تتزايد بشكل ملحوظ، ومن الضروري توجيه دعوة للعمل في الدول التي لا تزال متأخرة في تنفيذ الاقتصاد الدائري خاصة في ضوء النجاحات التي حققتها الدول الرائدة في هذا المجال.

المراجع

1. **Abidin, N. Z.** (2009). Sustainable construction in Malaysia developers' awareness. http://eprints.usm.my/15580/1/Sustainable_Construction_In_Malaysia-Developers_Awareness.pdf. Accessed 2 Jan 2023.
2. **Andersen, M. S.** (2007). An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability Science, 2*, 133–140. https://doi.org/10.1007/S11625-006-0013-6
3. **Argane, R., Benzaazoua, M., Hakkou, R., & Bouamrane, A.** (2016). A comparative study on the practical use of low sulfide base-metal tailings as aggregates for rendering and masonry mortars. *Journal of Cleaner Production, 112*, 914–925. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.06.004
4. **Barreiro-Gen, M., & Lozano, R.** (2020). How circular is the circular economy? Analysing the implementation of circular economy in organisations. *Business Strategy and the Environment, 29*, 3484–3494. https://doi.org/10.1002/BSE.2590
5. **Desa, U. N.** (2018). Revision of world urbanization prospects (p. 16). UN Department of Economic and Social Affairs.
6. **El Machi, A., Mabroum, S., Taha, Y., Tagnit-Hamou, A., Benzaazoua, M., & Hakkou, R.** (2020). Valorization of phosphate mine waste rocks as aggregates for concrete. *Materials Today Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.404
7. **El Machi, A., Mabroum, S., Taha, Y., Tagnit-Hamou, A., Benzaazoua, M., & Hakkou, R.** (2021). Use of flint from phosphate mine waste rocks as an alternative aggregates for concrete. *Construction and Building Materials, 271*, 121886. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121886
8. **Ellen MacArthur Foundation.** (2012). *Towards the circular economy: Economic business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation.
9. **Fontes, W. C., Franco de Carvalho, J. M., Andrade, L. C. R., Segadães, A. M., & Peixoto, R. A. F.** (2019). Assessment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: From tailings-dams to "brown porcelain". *Construction and Building Materials, 206*, 111–121. https://doi.org/10.1016/J.

CONBUILDMAT.2019.02.052

10. **Ghosh, S. K.** (2019). Circular economy: Global perspective. In *Circular economy: Global perspective* (pp. 1–452). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1052-6/COVER
11. **Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., & Heinz, M.** (2015). How circular is the global economy? An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European Union and the world in 2005. *Journal of Industrial Ecology, 19*, 765–777. https://doi.org/10.1111/JIEC.12244
12. **Hill, J.** (2016). Circular economy and the policy landscape in the UK. In *Taking stock of industrial ecology* (pp. 265–274). Springer.
13. **Huynh, T. P., Nguyen, T. M., & Lam, T. K.** (2022). Utilization of high volumes of copper mine tailings in the production of fine-grained concrete. *Materials Today Proceedings, 65*, 543–548. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.03.089
14. **Ke, X., Zhou, X., Wang, X., Wang, T., Hou, H., & Zhou, M.** (2016). Effect of tailings fineness on the pore structure development of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials, 126*, 345–350. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.09.052
15. **Lam, E. J., Zetola, V., Ramírez, Y., Montofré, Í. L., & Pereira, F.** (2020). Making paving stones from copper mine tailings as aggregates. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 17*, 2448. https://doi.org/10.3390/IJERPH17072448
16. **Lèbre, É., Corder, G. D., & Golev, A.** (2017). Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource. *Minerals Engineering, 107*, 34–42. https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2016.12.004
17. **Leontief, W.** (1991). The economy as a circular flow. *Structural Change and Economic Dynamics, 2*, 181–212.
18. **Mabroum, S., Moukannaa, S., el Machi, A., Taha, Y., Benzaazoua, M., & Hakkou, R.** (2020). Mine wastes based geopolymers: A critical review. *Cleaner Engineering and Technology*, 100014. https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100014
19. **Malagón, B., Fernández, G., de Luis, J. M., & Rodríguez, R.** (2020). Feasibility study on the utilization of coal mining waste for Portland clinker production. *Environmental Science and Pollution Research, 27*, 21–32. https://doi.org/10.1007/S11356-019-05150-W/TABLES/11

20. **Manchisi, J., & Ndlovu, S.** (2021). Prediction of acid mine drainage formation. In *Acid mine drainage* (pp. 31–56). https://doi.org/10.1201/9780429401985-3
21. **M. Reuter, C. Hudson, A. van Schaik, K. Heiskanen, C. Meskers, C. Hagelüken** (2013). *Metal recycling: Opportunities, limits, infrastructure*. A report of the working group on the global metal flows to the international resource panel.
22. **Report to Congress: Wastes from the Extraction and Beneficiation of Metallic Ores, Phosphate Rock, Asbestos, Overburden from Uranium Mining and Oil Shale | US EPA.** (n.d.). https://www.epa.gov/hw/report-congress-wastes-extraction-and-beneficiation-metallic-ores-phosphate-rock-asbestos. Accessed 20 Dec 2022.
23. **Sedira, N., Gomes, J. C., & Luo, S.** (2023). Characterisation and development of alkali-activated binders from co-utilisation of tungsten mining waste mud and electric arc furnace slag for precast applications. *SSRN Electronic Journal*. https://doi.org/10.2139/SSRN.4371201
24. **Stolboushkin, A. Y., Ivanov, A. I., & Fomina, O. A.** (2016). Use of coal-mining and processing wastes in production of bricks and fuel for their burning. *Procedia Engineering, 150*, 1496–1502. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.07.089
25. **Taha, Y., Benzaazoua, M., Hakkou, R., & Mansori, M.** (2017). Coal mine wastes recycling for coal recovery and eco-friendly bricks production. *Minerals Engineering, 107*, 123–138. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.001
26. **Tayebi-Khorami, M., Edraki, M., Corder, G., & Golev, A.** (2019). Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations. *Minerals, 9*, 286–289. https://doi.org/10.3390/MIN9050286
27. **Wang, C., Harbottle, D., Liu, Q., & Xu, Z.** (2014). Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice. *Minerals Engineering, 58*, 113–131. https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2014.01.018
28. **Xu, F., Wang, S., Li, T., Liu, B., Li, B., & Zhou, Y.** (2021). Mechanical properties and pore structure of recycled aggregate concrete made with iron ore tailings and polypropylene fibers. *Journal of Building Engineering, 33*, 101572. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101572

الفصل الخامس

تصنيع الطوب الجيوبوليمري المستدام باستخدام رماد قش الأرز: بديل للطوب الطيني المحروق

ت. فامسي ناغاراجو، وعلي رضا بهرامي

5.1 المقدمة

يُستخدم الطوب المصنوع من الطين المحروق على نطاق واسع حول العالم مادةً إنشائيةً لا سيما في بناء المساكن. وتُعد الهند المورِّد الرئيس للطوب الطيني المحروق ضمن دول جنوب آسيا. غير أن أكثر الطرائق التقليدية شيوعًا في تصنيع الطوب تقوم إما على تدعيمه بالإسمنت أو حرقه في أفران عند درجات حرارة عالية تتراوح بين 800 و1200 درجة مئوية. وهي عمليات تتطلب قدراً كبيراً من الطاقة. وللتقليل من درجة الحرارة المطلوبة لإنتاج الطوب، استُخدِمت العديد من المخلفات المنشّطة كيميائيًّا كمكونات بديلة في عملية التصنيع. وبالمثل، أُضيفت منتجات ثانوية أخرى إلى الإسمنت لتقليل كميته وتحسين الاستدامة البيئية للمادة. ومع ان أن دمج المخلفات واستبدال الإسمنت بمنتجات ثانوية قد يُسهم في خفض درجات حرارة الإنتاج، فإن عملية البلمرة الجيوبوليمرية[1] (Geopolymerization) تُعد خيارًا أكثر ملاءمةً للبيئة؛ فهذه الطريقة تستهلك طاقة أقل وتنتج كميات أقل من ثاني أكسيد الكربون نظرًا لاعتمادها على درجات حرارة منخفضة نسبيًّا.

(1) ملاحظة المترجم: يُقصد بـ **البلمرة الجيوبوليمرية (Geopolymerization)** تفاعل كيميائي يجري في وسط قلوي بين مواد غنية بالسيليكا والألومينا، وينتج عنه تكوين بنية رابطة غير عضوية ذات خواص ميكانيكية جيدة، ويُستفاد منه في تصنيع مواد بنائية بديلة عن الأنظمة الإسمنتية أو الحرارية التقليدية.

تُنشَّـط المكونـات الغنيـة بالسـيليكا والألومينـا أثنـاء عمليـة البلمـرة الجيوبوليمريـة في بيئـة قلويـة. وتُعـد المـواد الطينيـة والرمـاد أمثلة عـلى المواد الأوليـة السـليكاتية الألومينيـة[1]. ومـن بين هـذه المـواد، يتميز الرمـاد المتطاير بكونـه غنيًّـا نسـبيًّا بالسـيليكا والألومينـا، فضـلاً عـن سـهولة توفـره في كثير مـن المناطـق. ولـه اسـتخدامات واسـعة في المنتجـات الأسـمنتية، وقـد وُضعت معايـير عديـدة لضمـان فعالية اسـتعماله في هـذه التطبيقـات. ومع ذلـك، فإن للرمـاد المتطايـر بعض المثالب؛ إذ أن زيادة نسـبته في الخرسـانة الإسـمنتية على الحـد الأمثل يـؤدي إلى انخفـاض المقاومـة الناتجـة. ولا يمكن اسـتخدام الرماد المتطايـر بنسـب عاليـة إلا إذا نُشِّـطَ في بيئـة قلوية. وعـلى الرغم مـن أن العديد من الدراسـات تناولـت الجيوبوليمـر القائمة على الرمـاد المتطايـر، إلا أن عملية تصنيـع الطوب عبر الكبـس أثناء التشـكيل لا تزال تواجه صعوبـات. ومن المواد الخـام المتوفـرة أيضًـا الطين الذي يمكن اسـتخدامه مـادةً أوليةً وأخـرى رابطة إسـمنتية مسـاعدة. ونظـرًا لاحتوائه على نسـب عالية مـن الألومينا والسـيليكا، فـإن الطين يمكن أن يكتسـب مقاومـة ميكانيكية جيدة من خـلال عملية البلمرة الجيوبوليمريـة التي تتطلب درجات حرارة أقل بكثـير مقارنة بالحرق التقليدي.

في البيئـة القلويـة، تُنشَّـط المـواد الأوليـة ممـا يفـضي إلى إنتـاج مقاومـة ضغـط كافيـة. ومـع ذلـك، أكّـد بيرنـال وآخـرون أن مقاومـة الضغـط الناتجـة تظهـر فروقـاً ملحوظـة تبعًـا لنشـاط المـواد الأوليـة حتـى عنـد اسـتخدام النـوع نفسـه منهـا. كمـا تؤثـر الخصائـص الكيميائيـة للجزيئـات ومسـاحتها السـطحية – التـي تختلـف بحسـب مصـدر المعـادن السـليكاتية الألومينيـة – في مـدى تفاعـل المـواد الأوليـة. ويتمثـل الاعتبـار الرئيـس عنـد اختيـار المـادة الأوليـة في معـدل التفاعـل، المرتبـط بوجـود السـيليكون والألومنيـوم في صورتهمـا غـير المتبلمـرة ضمـن المكونـات الخـام، وذلـك للوصـول إلى نتائـج متميـزة. ومـن ثـم، ينبغـي تقييـم صلاحيـة المـادة

(1) ملاحظـة المترجـم: المـواد **السـليكاتية الألومينيـة** هـي المـواد التـي تحتـوي عـلى نسـب معتـبرة من مركبـات السـيليكا والألومينا، وتُعد مناسـبة للتنشـيط القلوي والدخـول في تفاعلات البلمـرة الجيوبوليمرية.

الأولية في مرحلة مبكرة من خلال تقدير مستوى تفاعليتها. ويُعد الرماد المتطاير مادةً متفاعلة بطبيعته، في حين يصبح الطين متفاعلًا عادةً بفعل التنشيط القلوي أو المعالجة الحرارية. وغالبًا ما يُعالَج الطين بعد التكليس ضمن نطاق حراري يتراوح بين 27 و60 درجة مئوية. غير أن استخدام درجات حرارة مرتفعة في تكليس الطين يجعل العملية برمتها أقل جدوى من الناحية البيئية؛ لذا ينبغي اعتماد وسائل أخرى أكثر مراعاةً للبيئة لتجاوز هذه الفروق. وبناءً على ذلك، يلزم تعديل ظروف المعالجة الحرارية لتحويل الطين من مجرد مادة مالئة إلى مادة أولية صالحة لتكوين الجيوبوليمر.

ومن العوامل المهمة التي تؤثر في مقاومة الضغط أثناء عملية التحول الجيوبلمري نسبة الصوديوم إلى الألومنيوم (Na/Al)، ونسبة السيليكون إلى الألومنيوم (Si/Al)، والمولارية لهيدروكسيد الصوديوم (NaOH)، وظروف المعالجة الحرارية، وغيرها. وعند استخدام هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) وسيليكات الصوديوم (Na_2SiO_3) معًا بوصفهما منشطًا قلويًا، فإنهما يحققان تطورًا أفضل في المقاومة مقارنة باستخدام كل منهما على حدة. وعلى الرغم من أن الدراسات الأولية اعتمدت نسبة 2.5 للمنشِّط القلوي ثم رفعتها إلى 3، وهو ما أدى إلى إنتاج جيوبوليمر ضعيف، فقد وجد الباحثون أن نسبة سيليكات الصوديوم إلى هيدروكسيد الصوديوم (Na_2SiO_3/NaOH) المتعادلة أنتجت مصفوفة قوية في خلطات الجيوبوليمر القائمة على الرماد المتطاير الصناعي ورماد قش الأرز الزراعي. كما أن خرسانة الجيوبوليمر المعتمدة على الرماد المتطاير منخفض الكالسيوم تُظهر مقاومة ضغط أعلى عندما تتراوح نسبة المنشط القلوي إلى المادة الأولية بين 0.30 و0.45. إلا أن صناعة الطوب تتطلب خليطًا شبه جاف يمكن فكه من القالب مباشرة بعد التشكيل. ولذلك، لا بد من خفض نسبة المنشط القلوي إلى المادة الأولية، وهو ما يؤثر في مقاومة الضغط، غير أن هذا الأثر يمكن تعويضه بضغط

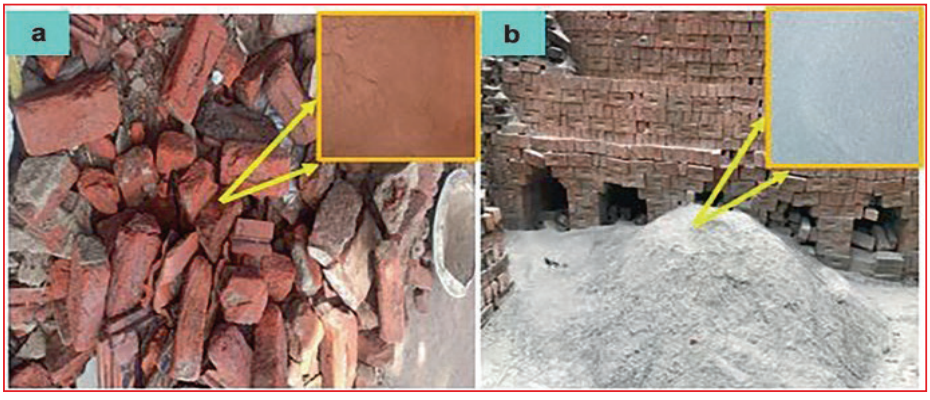
الكبس أثناء التشكيل. ويُعد ضغط الكبس، ولا سيما في عمليات التحول الجيوبوليمري، عاملًا مهمًا آخر يُغفل أحيانًا، رغم أنه قد يسهم في تحسين مقاومة الضغط. فعند انخفاض نسبة المنشط القلوي إلى المادة الأولية، يساعد الضغط على زيادة قابلية المواد الأولية للابتلال، مما يؤدي إلى زيادة الذوبان بدرجة أكبر، ومن ثم رفع مقاومة الضغط.

تتناول هذه الدراسة بحثًا تجريبيًّا حول كيفية تأثير نسبة رماد قش الأرز وتركيز محلول هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) ودرجة حرارة المعالجة في خصائص الطوب الجيوبوليمري. وتستفيد الدراسة من بقايا الطوب المكسور ورماد قش الأرز المتوفر في موقع أفران الطوب مادةً أوليةً لتطوير طوب جديد ومستدام يمكن استخدامه في مشاريع البناء.

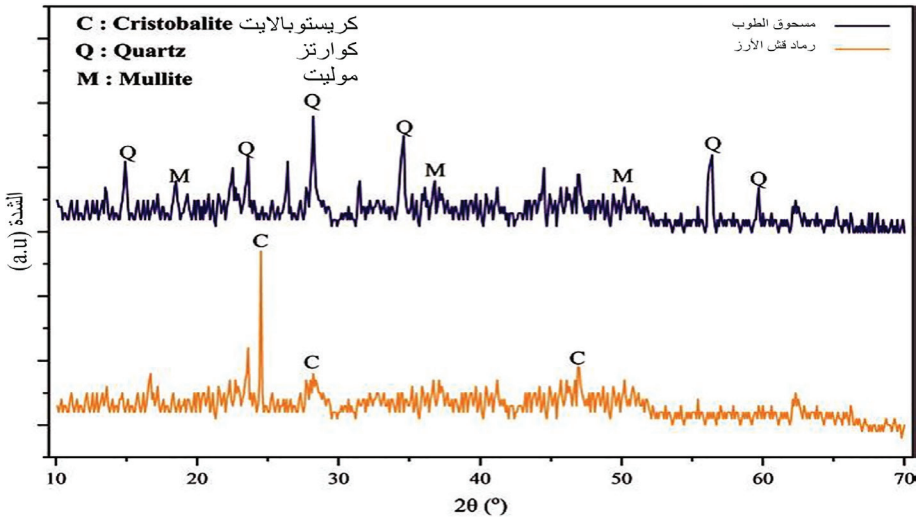
5.2 المنهجية

اعتمدت هذه الدراسة على استخدام رماد قش الأرز ومسحوق حُطام الطوب مادتين أوليتين إلى جانب هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) على شكل حبيبات وهلام سيليكات الصوديوم. وقد جُمِعَ حُطام الطوب ورماد قش الأرز من موقع فرن الطوب بالقرب من مدينة بيمافارام في الهند. وكُسِّر حُطام الطوب مبدئيًا باستخدام وحدة تكسير أولية ثم طُحِنَ للوصول إلى مسحوق ناعم قادر على النفاذ من خلال منخل بفتحات قطرها 300 ميكرومتر. وتُوضِّح الأشكال 5.1 و5.2 المواد الخام المجمَّعة من المواقع الميدانية بالإضافة إلى أنماط حيود الأشعة السينية (XRD). وحوفِظَ على نسبة هلام سيليكات الصوديوم إلى محلول هيدروكسيد الصوديوم عند 1.5 في حين شملت المواد القلوية محلولي هيدروكسيد الصوديوم بتركيزين قدرهما 3 و5 مولار. وضُبِطَت نسبة المُنشِّط القلوي إلى المواد الصلبة عند 0.45. ويعرض الجدول 5.1 المكونات الكيميائية لمسحوق الطوب ورماد قش الأرز.

في هذا العمل البحثي، خُلِطَت المواد الأولية لمدة خمس دقائق ثم أُضيف المحلول القلوي النشِط وأُجري التشكيل. وقد أُعِدَّت ست خلطات مختلفة، تحتوي على نسب متفاوتة من رماد قش الأرز وهي: 0%، 10%، 20%، 30%، 40%، و50% ضمن خلطات الجيوبوليمر المعتمدة على مسحوق الطوب المكسور. ورُمِّزَت هذه الخلطات المرجعية بالرموز M0 وM1 وM2 وM3 وM4 وM5، على التوالي. وضُغِطَت العينات يدويًّا باستخدام ضاغط خشبي لإنتاج طوب بأبعاد 190 × 90 × 90 ملم. ولمنع تبخر الماء، غُطِّيت العينات بعد التشكيل. وبعد مرور 24 ساعة في درجة حرارة الغرفة، أزيلَت القوالب وعُولِجَت مجموعة من العينات في درجة حرارة الغرفة لمدة 56 يومًا بينما عُولجت مجموعة أخرى داخل فرن بدرجة حرارة 100 درجة مئوية لمدة 24 ساعة. وهدفت الدراسة إلى فحص تأثير ظروف المعالجة وتركيز هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) في خصائص العينات. وقد أظهرت نتائج الدراسات أن خلطات الجيوبوليمر انخفضت فيها انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وتحسنت كفاءتها الطاقية وزادت فعاليتها الاقتصادية كلما انخفض تركيز محلول هيدروكسيد الصوديوم (NaOH).



الشكل 5.1 المواد الخام: (أ) مسحوق الطوب الناتج من الطوب المكسور، (ب) رماد قش الأرز في موقع فرن الطوب



الشكل 5.2 أنماط حيود الأشعة السينية (XRD) لمسحوق الطوب ورماد قش الأرز (RHA)

الجدول 5.1 المكونات الكيميائية لمسحوق الطوب ورماد قش الأرز

المادة	المكونات الكيميائية (%)					
	SiO_2	Al_2O_3	MgO	K_2O	CaO	Fe_2O_3
مسحوق الطوب	69.4	13.6	1.7	4.1	1.3	7.4
رماد قش الأرز	95.4	0.4	0.5	0.1	0.7	0.6

5.3 النتائج والمناقشة

5.3.1 الكثافة الحجمية والسلوك الميكانيكي لطوب الجيوبوليمر

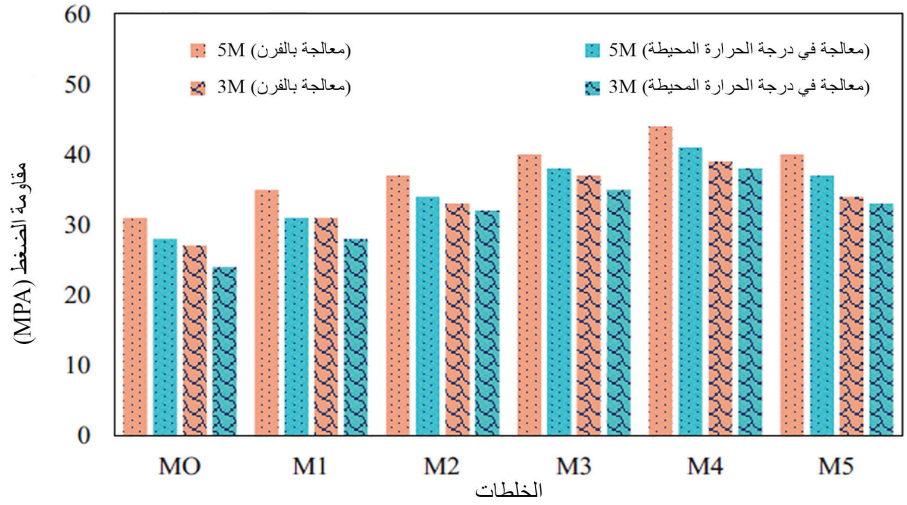
يُظهر الجدول 5.2 والشكل 5.3 الكثافة الحجمية ومقاومة الضغط لطوب الجيوبوليمر، على التوالي، وذلك بوصفها دالة لتغير تركيز محلول هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) ودرجة حرارة المعالجة. وتشير الرموز 3M و5 M في الجدول والشكل إلى نطاق التركيز بين 3 و5

مـولار مـن هيدروكسـيد الصوديـوم(NaOH) . وقـد تبـين أن كلًّا مـن تركيـز هيدروكسـيد الصوديـوم (NaOH) ودرجـة حـرارة المعالجـة مـن العوامـل الحاسـمة والمؤثـرة في تفاعـل البلمـرة الجيوبوليمريـة وكذلـك مـن منظـور الاسـتدامة. فكلمـا زادت القلويـة، زادت قابليـة ذوبـان عنـصري السـيليكون والألمنيـوم مـن المصـدر السـليكاتي الألومينـي.

في جميـع الخلطـات، تراوحـت كثافـة الطـوب بـين 1565 و1810 كجـم/م³. ولوحـظ أيضًـا وجـود زيـادة طفيفـة في الكثافـة عنـد اسـتخدام تركيـز أعـلى مـن هيدروكسـيد الصوديـوم (NaOH)، حيـث كانـت الكثافـة في الطوب المصنـوع باسـتخدام محلـول هيدروكسـيد الصوديـوم (NaOH) بتركيـز 5 مـولار أعـلى مـن تلـك المنتَجـة باسـتخدام 3 مـولار.

الجدول 5.2 الكثافة الحجمية لطوب الجيوبوليمر

الخلطات	الكثافة الحجمية (كجم/م³)			
	المعالجة في درجة حرارة الغرفة لمدة 28 يومًا		المعالجة في الفرن عند 100°م لمدة 24 ساعة	
	3M	5M	3M	5M
M0	1745	1790	1780	1810
M1	1725	1745	1750	1760
M2	1675	1705	1690	1740
M3	1615	1670	1630	1690
M4	1590	1635	1605	1675
M5	1565	1580	1585	1640



الشكل 5.3 مقاومة الضغط لطوب الجيوبوليمر

حُقِّقَت مقاومة ضغط مرتفعة عندما استُخدِمَ تركيز عالٍ من محلول هيدروسكيد الصوديوم (NaOH) حيث أظهرت المحاليل القلوية ذات التركيز 5 مولار أداءً أفضل مقارنة بتركيز 3 مولار. وقد بينت نتائج الدراسة الحالية أن تركيز 5 مولار كان أكثر فاعلية في تطوير المقاومة في حين أن المحاليل ذات تركيز 3 مولار كانت أقل فعالية في هذا الجانب وهو ما يتفق مع نتائج دراسات سابقة. تجاوزت جميع عينات الطوب الجيوبوليمري مقاومة الضغط المحددة لطوب الدرجة الأولى وفقًا للمواصفة الهندية IS 3495- 1976، والتي تبلغ 105 كجم/سم² (ما يعادل 10.29 ميغاباسكال). وقد سجلت الدراسة الحالية أعلى مقاومة ضغط وصلت إلى 44 ميغاباسكال (448.6 كجم/سم²)، وذلك عند استخدام محلول قلوي بتركيز 5 مولار ومعالجة حرارية في الفرن عند درجة حرارة 100°م لمدة 24 ساعة.

تقسم المعايير الهندية مقاومة الضغط إلى فئتين: الطوب الحامل والطوب غير الحامل. وعند مقارنة مقاومة الضغط لطوب الجيوبوليمر المصنَّع في هذه الدراسة باستخدام مخلفات الطوب الطيني مع المواصفة

القياسية، تبين أن جميع الخلطات ونِسَب الرماد أظهرت مقاومة تفوق الحد الأدنى للطوب الحامل >5) ميغاباسكال) مما يجعلها مناسبة للتطبيقات الإنشائية.

5.3.2 قدرة طوب الجيوبوليمر على امتصاص الماء

يوضح الجدول 5.3 نسب امتصاص الماء لطوب الجيوبوليمر وفقًا لتغير تركيز محلوله هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) وظروف المعالجة. وتُعد نسب السليكا/الألومينا (Si/Al)، والصوديوم/الألومينا (Na/Al)، وتركيز هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) من العوامل المؤثرة في مسامية الطوب ما يؤدي إلى تغيُّرات في معدل امتصاص الماء. فكلما كانت النسبة المولارية للمكونات متناسبة مع نسبة مثلى بين سيليكات الصوديوم إلى هيدروكسيد الصوديوم Na_2SiO_3/NaOH وظروف معالجة ملائمة، زاد عدد الروابط السليكاتية الألومينية المتكوِّنة مما يجعل الخليط أكثر كثافة ومتانة.

تُسهم النسب المرتفعة من رماد قش الأرز في تحسين ذوبانية عنصري الألومنيوم والسيليكون في الوسط القلوي، ويؤدي ارتفاع تركيز هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) إلى تكوين أطوار كثيفة تقلل من عدد المسام وتزيد من مقاومة الطوب لاختراق الماء. إضافة إلى ذلك، تعتمد عملية البلمرة الجيوبوليمرية الكاملة للخليط بشكل أساسي على كفاءة درجة حرارة المعالجة. وقد أُخِذَ كل من التركيز القلوي ودرجة حرارة المعالجة في الحسبان عند تقييم الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للطوب المُنتَج من مسحوق الطوب المكسور مع منشِّط قلوي. وأظهرت النتائج أن زيادة محتوى الإضافات وارتفاع المولارية وتحسين ظروف المعالجة حسَّنت من أداء الطوب فيما يخص امتصاص الماء، كما هو موضح في الجدول 5.3.

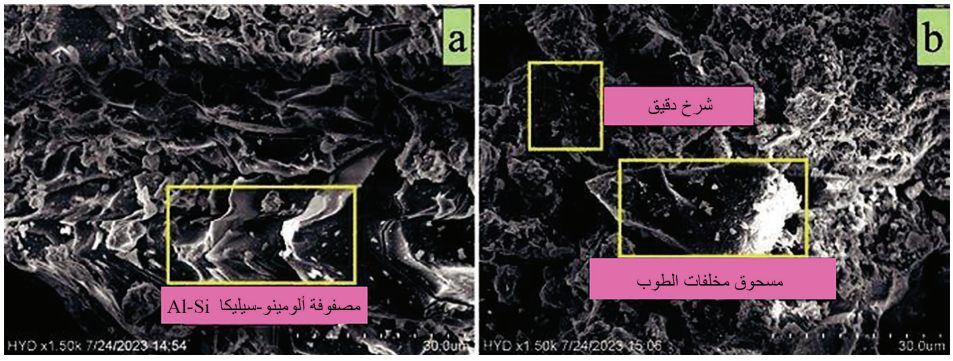
فعلى سبيل المثال، أظهرت الخلطات ذات النسب الأعلى من رماد قش الأرز انخفاضًا في امتصاص الماء تحت نفس ظروف المعالجة. وترتفع نسبة السيليكا على الألومينا Si/Al مع ارتفاع تركيز المحلول القلوي مما يزيد من تعقيد وكثافة البنية ويُقلل من المسامية. وقد أفاد معاذ وشريف استافا بأن الأطوار الكثيفة في هلام الجيوبوليمر يمكن أن تؤثر في متانة الطوب المدمج إذ تؤدي إزالة أحد المكونات الأساسية إلى إضعاف البنية الكثيفة وخلق العديد من الفراغات في الخليط. وأظهرت بعض الخلطات ذات المحتوى العالي من المنشِّط القلوي مسامية أكبر مما أدى إلى زيادة في امتصاص الماء. ورغم ذلك، أظهرت طوب الجيوبوليمر مستويات امتصاص ضمن النطاقات المرغوبة ولبَّت متطلبات المعايير الهندية 12894 IS-2002، حيث لم تتجاوز معدلات الامتصاص 15%.

5.3.3 السلوك الميكروي البنيوي لطوب الجيوبوليمر

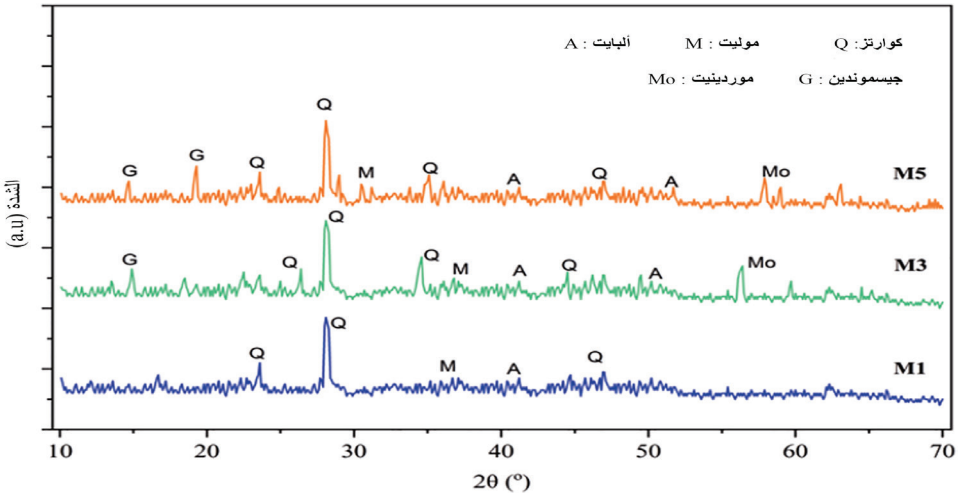
أُجرِيَ تحليل بالمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) على خلطتي طوب الجيوبوليمر M3 وM5 كما هو موضح في الشكل 5.4. وقد أظهر تحليل الملمس السطحي والبنية المورفولوجية لعَيِّنات الطوب جوانب مختلفة مثل التفاعل بين مسحوق الطوب ورماد قش الأرز داخل مصفوفة الجيوبوليمر. كشفت الصور المجهرية عن تكوُّن أطوار متقاربة ومترابطة بكثافة عالية.

الجدول 5.3 امتصاص طوب الجيوبوليمر للماء

الخلطات	امتصاص الماء (%)			
	المعالجة في درجة حرارة الغرفة لمدة 28 يومًا		المعالجة في الفرن عند 100°م لمدة 24 ساعة	
	3M	5M	3M	5M
M0	14.5	13.9	13.8	13.1
M1	13.5	13.2	13.1	12.3
M2	12.7	12.2	12.4	11.4
M3	12.1	11.7	11.3	10.9
M4	13.7	12.5	11.7	12.1
M5	14.8	13.8	12.8	12.4



الشكل 5.4 صور مجهرية (SEM) للخلطات: (أ) M3، (ب) M5



الشكل 5.5 أنماط حيود الأشعة السينية (XRD) لطوب الجيوبوليمر

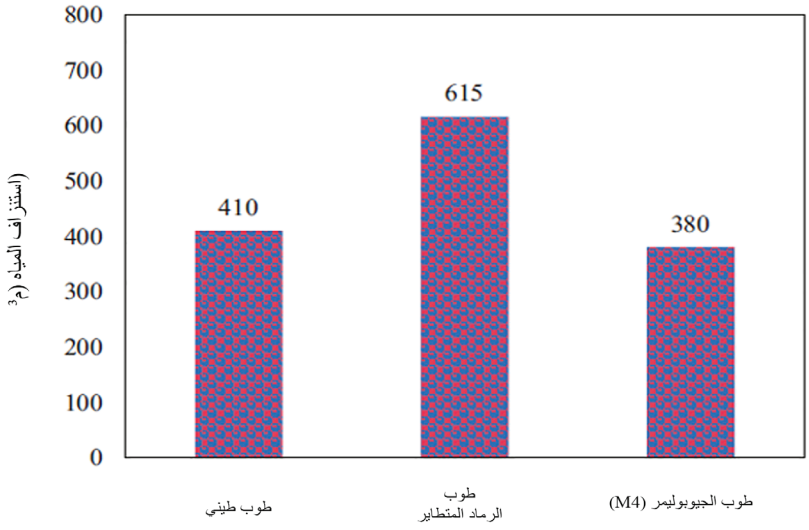
وساهم وجود السيليكا غير المتبلمرة في جزيئات رماد قش الأرز في تشكيل مصفوفة ألومينو-سيليكات قوية. ويُظهر الشكل أن تطوير مصفوفة جيوبوليمرية مدمجة جيدًا يمكن أن يُحسِّن من خصائص المسامية ويقلل من امتصاص الماء ويزيد من مقاومة الضغط. (الشكل 5.4)

يوضح الشكل 5.5 أنماط حيود الأشعة السينية (XRD) لطوب الجيوبوليمر عند نسبٍ متفاوتة من رماد قش الأرز بوصفه بديلًا لمسحوق الطوب، وقد لوحظت القمم الرئيسة ضمن المجال الواقع بين قيمتي 2θ البالغتين 22 و34. مثلت القمم الأشكال البلورية المختلفة (الكوارتز)، وأشارت إلى وجود أنواع أخرى من الجزيئات البلورية في مسحوق الطوب المكسور. بالإضافة إلى الألبايت ($NaAlSi_3O_8$)، ورُصِدَت آثار لمعادن أخرى مثل الأورثوكليز ($KAlSi_3O_8$) والجيسموندين ($CaAl_2Si_2O_8{\cdot}4H_2O$) داخل مصفوفة الجيوبوليمر. وعُثِرَ على شبكة سيليكات ألومين ثلاثية الأبعاد (N–A–S–H) في طوب الجيوبوليمر على شكل معدن الموردينايت ($Na_2Al_2Si_{10}O_{24}{\cdot}7H_2O$)، مما ساعد في تكوين أطوار كثيفة وزيادة مقاومة الضغط وتقليل امتصاص الماء.

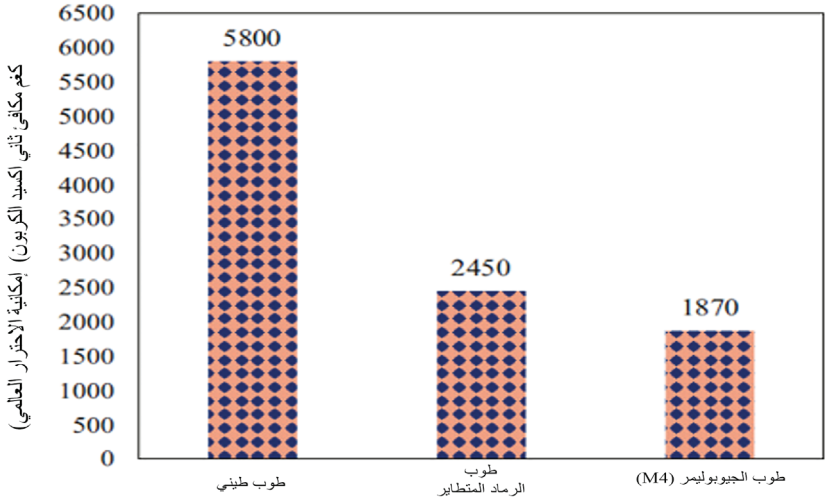
5.3.4 الجوانب البيئية لطوب الجيوبوليمر

أظهرت نتائجنا أن استخدام الطوب الطيني في بناء الجدران يُعد من أكثر الخيارات تأثيرًا في البيئة ويرجع ذلك إلى استخدام الفحم في عملية الحرق. أما الطوب المصنوع من المخلفات الزراعية، فيمتاز بأثر بيئي أقل. ويُعد احتراق الفحم المصدر الرئيسي لمعظم الانبعاثات الناتجة عن الطوب التقليدي وغالبًا ما يكون الفحم المستخدم منخفض الجودة ويحتوي على نسب عالية من الكبريت مما يفاقم التأثير

البيئي. في المقابل، يُسبب طوب الرماد المتطاير أيضًا تأثيرًا بيئيًّا كبيرًا نظرًا لاعتماد إنتاجه على الإسمنت بصفته مكونًا رئيسيًّا؛ حيث إن كل كيلوغرام من الإسمنت يُطلق ما يقارب 0.83 كجم من مكافئ ثاني أكسيد الكربون. وبالتالي، فإن كمية الإسمنت المستخدمة في تصنيع هذا النوع من الطوب تُسهم إسهامًا ملحوظًا في إجمالي الانبعاثات الكربونية. أما طوب الجيوبوليمر المستخرج من خلطات الكتلة الحيوية الزراعية، فله تأثير أقل وضوحًا في البيئة نظرًا لعدم حاجته إلى عملية الحرق. ومع أن مادتي هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) و سيليكات الصوديوم (Na_2SiO_3) تُعدَّانِ مكونات رئيسية في هذه العملية، وتُنتج كل منهما انبعاثات تعادل 1.88 و1.915 كجم من مكافئ CO_2 لكل كجم على التوالي؛ إلا أن خفض تركيز هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) إلى 3 مولار والحفاظ على نسبة سيليكات الصوديوم (Na_2SiO_3) إلى هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) عند 1.5 ساهم في تقليل الاستهلاك والانبعاثات المرتبطة بهذه المواد. ويُوضِّح الشكل 5.6 الإمكانات المتعلقة بالاحترار العالمي لكل نوع من أنواع الطوب مما يؤكد على الفعالية البيئية لطوب الجيوبوليمر بالمقارنة مع الطوب التقليدي.



الشكل 5.6 إمكانات الاحترار العالمي لأنواع الطوب المختلفة



الشكل 5.7 معدلات استنزاف المياه لأنواع الطوب المختلفة

يوضح الشكل 5.7 إجمالي استهلاك المياه في العملية بما يشمل إنتاج الطوب وأعمال البناء المرتبطة به. ونظرًا لاحتياج طوب الرماد المتطاير إلى كميات أكبر من المياه لعمليات المعالجة، فقد سُجل نقص ملحوظ في الموارد المائية. أما الطوب المصنوع من الطين والجيوبوليمر، فلم يحتوِ على إسمنت ضمن مكوناته وبالتالي لم تكن هناك حاجة لاستخدام المياه في معالجته. وكان محتوى الماء المستخدم في تشكيل طوب الجيوبوليمر أقل من الكمية المستخدمة في طوب الطين مما يجعله أكثر كفاءة في استهلاك المياه.

5.4 الخاتمة

ركز هذا الفصل على إمكانيات إعادة تدوير الطوب المكسور والمخلفات الزراعية من رماد قش الأرز لإنتاج مواد إنشائية من الجيوبوليمرات. ويمكن استخلاص النتائج التالية:

أدى إضافة رماد قش الأرز إلى خلطات الطوب الجيوبوليمري إلى انخفاض في الكثافة الحجمية بسبب خفة وزن رماد قش الأرز (منخفض الكثافة النوعية). وقد كانت أعلى كثافة حجمية مسجلة أقل من 1700 كجم م^3 وهي أقل بكثير من النطاق المحدد في المواصفة القياسية (1700–2100 كجم/م^3) مما يُسهم في إنتاج مواد خفيفة الوزن ومستدامة. عند زيادة نسبة رماد قش الأرز في خلطات الجيوبوليمر، زادت مقاومة الضغط زيادة ملحوظة. وأظهرَ ارتفاع التركيز القلوي ودرجة حرارة المعالجة روابط أقوى عند تركيز معين من المواد الأولية. وقد كان لكل من درجة حرارة المعالجة وتركيز هيدروكسيد الصوديوم(NaOH) تأثيراً كبيراً في امتصاص الماء بخلطات الطوب؛ حيث إن زيادة كثافة المصفوفة وتحقيق جيوبلمرة منتظمة عند درجات حرارة معالجة مرتفعة أدَّيَا إلى تقليل امتصاص الماء في العينات.

يُنتَج سنويًّا عدد كبير من الطوب التقليدي حول العالم مما يؤدي إلى انبعاث كميات ضخمة من الجسيمات العالقة وأول وثاني أكسيد الكربون. لذلك فإن التحول إلى استخدام طوب الجيوبوليمر بديلًا عن الطوب التقليدي يُعد خيارًا مستدامًا للتنمية المستقبلية. ويمكن استخدام طوب الجيوبوليمر المُعالج بالهواء في مجموعة واسعة من التطبيقات بما في ذلك أعمال البناء وألواح الجدران وأرصفة الطرق والأرضيات الصناعية وتبطين القنوات.

المراجع

1. **Abdullah, M. M. A., Ibrahim, W. M. W., & Tahir, M. F. M.** (2015). The properties and durability of fly ash-based geopolymeric masonry bricks. In *Eco-efficient masonry bricks and blocks* (pp. 273–287). Woodhead Publishing.
2. **Ahmad, M., & Rashid, K.** (2022). Novel approach to synthesize clay-based geopolymer brick: Optimizing molding pressure and precursors' proportioning. *Construction and Building Materials, 322*, 126472.
3. **Alhawat, M., Ashour, A., Yildirim, G., Aldemir, A., & Sahmaran, M.** (2022). Properties of geopolymers sourced from construction and demolition waste: A review. *Journal of Building Engineering, 50*, 104104.
4. **Alsalman, A., Assi, L. N., Kareem, R. S., Carter, K., & Ziehl, P.** (2021). Energy and CO2 emission assessments of alkali-activated concrete and Ordinary Portland Cement concrete: A comparative analysis of different grades of concrete. *Cleaner Environmental Systems, 3*, 100047.
5. **Bai, Y., Guo, W., Wang, J., Xu, Z., Wang, S., Zhao, Q., & Zhou, J.** (2022). Geopolymer bricks prepared by MSWI fly ash and other solid wastes: Moulding pressure and curing method optimisation. *Chemosphere, 307*, 135987.
6. **Bentz, D. P., Hansen, A. S., & Guynn, J. M.** (2011). Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes. *Cement and Concrete Composites, 33*(8), 824–831.
7. **Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., Mejia de Gutiérrez, R., Provis, J. L., & Delvasto, S.** (2012). Activation of metakaolin/slag blends using alkaline solutions based on chemically modified silica fume and rice husk ash. *Waste and Biomass Valorization, 3*, 99–108.
8. **Bong, S. H., Xia, M., Nematollahi, B., & Shi, C.** (2021). Ambient temperature cured 'just-add-water' geopolymer for 3D concrete printing applications. *Cement and Concrete Composites, 121*, 104060.
9. **Gharzouni, A., Ouamara, L., Sobrados, I., & Rossignol, S.** (2018). Alkali-activated materials from different aluminosilicate sources: Effect of aluminum and calcium availability. *Journal of Non-Crystalline Solids, 484*, 14–25.
10. **Hajimohammadi, A., Provis, J. L., & van Deventer, J. S.** (2011). The ef-

fect of silica availability on the mechanism of geopolymerisation. *Cement and Concrete Research, 41*(3), 210–216.

11. **He, J., Jie, Y., Zhang, J., Yu, Y., & Zhang, G.** (2013). Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites, 37*, 108–118.
12. **He, J., Zhang, J., Yu, Y., & Zhang, G.** (2012). The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study. *Construction and Building Materials, 30*, 80–91.
13. **Huo, W., Zhu, Z., Chen, W., Zhang, J., Kang, Z., Pu, S., & Wan, Y.** (2021). Effect of synthesis parameters on the development of unconfined compressive strength of recycled waste concrete powder-based geopolymers. *Construction and Building Materials, 292*, 123264.
14. **Joglekar, S. N., Kharkar, R. A., Mandavgane, S. A., & Kulkarni, B. D.** (2018). Sustainability assessment of brick work for low-cost housing: A comparison between waste based bricks and burnt clay bricks. *Sustainable Cities and Society, 37*, 396–406.
15. **Jumaa, N. H., Ali, I. M., Nasr, M. S., & Falah, M. W.** (2022). Strength and microstructural properties of binary and ternary blends in fly ash-based geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials, 17*, e01317.
16. **Jumaa, N. H., Ali, I. M., Nasr, M. S., & Falah, M. W.** (2022). Strength and microstructural properties of binary and ternary blends in fly ash-based geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials, 17*, e01317.
17. **Kaur, M., Singh, J., & Kaur, M.** (2018). Synthesis of fly ash based geopolymer mortar considering different concentrations and combinations of alkaline activator solution. *Ceramics International, 44*(2), 1534–1537.
18. **Kaze, C. R., Alomayri, T., Hasan, A., Tome, S., Lecomte-Nana, G. L., Nemaleu, J. G. D., et al.** (2020). Reaction kinetics and rheological behaviour of meta-halloysite based geopolymer cured at room temperature: Effect of thermal activation on physicochemical and microstructural properties. *Applied Clay Science, 196*, 105773.
19. **Kuranchie, F. A., Shukla, S. K., & Habibi, D.** (2016). Utilisation of iron ore mine tailings for the production of geopolymer bricks. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 30*(2), 92–114.

20. **Maaze, M. R., & Shrivastava, S.** (2023). Design development of sustainable brick-waste geopolymer brick using full factorial design methodology. *Construction and Building Materials, 370*, 130655.

21. **Nagaraju, T. V., Bahrami, A., Azab, M., & Naskar, S.** (2023). Development of sustainable high performance geopolymer concrete and mortar using agricultural biomass-a strength performance and sustainability analysis. *Frontiers in Materials, 10*. https://doi.org/10.3389/FMATS.2023.1128095

22. **Naik, T. R.** (2008). Sustainability of concrete construction. *Practice Periodical on Structural Design and Construction, 13*(2), 98–103.

23. **Nawaz, M., Heitor, A., & Sivakumar, M.** (2020). Geopolymers in construction-recent developments. *Construction and Building Materials, 260*, 120472.

24. **Ogundiran, M. B., & Kumar, S.** (2016). Synthesis of fly ash-calcined clay geopolymers: Reactivity, mechanical strength, structural and microstructural characteristics. *Construction and Building Materials, 125*, 450–457.

25. **Reddy, B. V., & Jagadish, K. S.** (2003). Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. *Energy and Buildings, 35*(2), 129–137.

26. **Sreekeshava, K. S., Arunkumar, A. S., & Ravishankar, B. V.** (2020). Experimental studies on polyester geo-fabric strengthened masonry elements. In *Advances in computer methods and Geomechanics: IACMAG symposium 2019 volume 1* (pp. 727–736). Springer Singapore.

27. **Verma, M., Dev, N., Rahman, I., Nigam, M., Ahmed, M., & Mallick, J.** (2022). Geopolymer concrete: A material for sustainable development in Indian construction industries. *Crystals, 12*(4), 514.

28. **Waheed, A., Azam, R., Riaz, M. R., & Zawam, M.** (2022). Mechanical and durability properties of fly-ash cement sand composite bricks: An alternative to conventional burnt clay bricks. *Innovative Infrastructure Solutions, 7*, 1–12.

الفصل السادس

حـــرائق الواجهات في المـــبـــاني العـــالـــيـة: التحـــديات والحلـــول المعتمدة على الذكاء الاصطناعي

أنكيت شارما، تيانهانغ زانغ، غوراف دويفيدي

6.1 المقدمة

اعتمدت الدول الأعضاء في الأمم المتحدة عام 2015 خطة التنمية المستدامة لعام 2030 التي تُعد إطارًا إستراتيجيًّا لتحقيق السلام والازدهار للإنسان وكوكب الأرض. وتدعو هذه الخطة إلى تفعيل شراكات عالمية من خلال أهداف التنمية المستدامة السبعة عشر، التي تمثل دعوة ملحَّة للعمل من الدول المتقدمة والنامية على حدٍّ سواء. ويُعنى الهدف الحادي عشر من هذه الأهداف بضمان أن تكون المدن والمستوطنات البشرية شاملة وآمنة ومرنة ومستدامة. وفي هذا السياق، تسعى صناعة البناء إلى توظيف تقنيات ومواد جديدة لمواكبة الطلب المتزايد على المباني الشاهقة وتحقيق الاستدامة فيها. إلا أن هذه الفئة من المباني تظل عرضة لمخاطر متعددة تتعلق بسلامة الحرائق، والتي تشمل عادة ما يلي:

- الانتشار السريع للنيران والدخان على المستويين الخارجي والداخلي
- صعوبة تنفيذ عمليات مكافحة الحريق والإنقاذ
- تعقيدات في عمليات الإخلاء الآمن لقاطني المبنى
- استمرار اشتعال الحريق لفترة زمنية
- تسرب الدخان إلى درج الطوارئ وامتلاؤه به
- انقطاع الكهرباء بسبب الأعطال

- فشل معدات الطهي والتدفئة في أداء وظائفها
- الإهمال والأخطاء البشرية في التعامل مع المواد القابلة للاشتعال أو في تخزينها

تُستخدم الواجهات أيضًا على نحوٍ متزايد لحماية هذه المباني من الرياح والأمطار وأشعة الشمس، وقد أصبحت جزءًا لا يتجزأ من المبنى. ويُظهر الشكل 6.1 بعض المباني المزوَّدة بواجهات.

وتُعد واجهة المبنى الشاهق من أكثر العناصر الإنشائية عرضةً للضرر لا سيما في حال نشوب الحرائق. قد حالت اعتبارات الجاذبية البصرية، وكفاءة الطاقة، وطبيعة المواد، ومتطلبات الاستدامة دون إيلاء إجراءات السلامة من الحرائق ما تستحقه من اهتمام. وازدادت هذه المشكلة تعقيداً مع تزايد عدد والمباني الشاهقة مما يرفع من احتمالية نشوب الحرائق ويضاعف آثارها.

كما يستخدم قطاع التشييد طيفًا واسعًا من المواد القابلة للاشتعال في واجهات المباني سعيًا إلى تحقيق الاستدامة والجدوى الاقتصادية، وهو ما يثير مخاوف متزايدة تتعلق بالسلامة من الحرائق. ورغم أن هذه الحوادث منخفضة التكرار نسبيًّا، فإنها تُفضي إلى خسائر جسيمة. وقد أثبتت حوادث كثيرة حول العالم بالفعل حجم مخاطر الحريق المرتبطة بهذه الواجهات (الشكل 6.2). ونظرًا إلى خطورة هذه الحوادث، ورغبةً في الإسهام في تحقيق أهداف التنمية المستدامة، ولا سيما الهدف الحادي عشر، تبرز حاجة ملحّة إلى دراسة حرائق الواجهات للحد من وقوعها مستقبلًا. غير أن سيناريوهات الحريق في هذه المباني قد تكون معقدة بسبب خصائصها الإنشائية المركبة ووجود مواد متنوعة قابلة للاشتعال فيها. ولا شك في أن إعادة تمثيل مثل هذه الحرائق تمثيلًا ماديًّا كاملًا أمر غير ممكن. ومن البدائل الممكنة تقييم هذه الحرائق المعقدة في المباني الشاهقة باستخدام الترتيبات التجريبية و/أو المقاربات

القائمة على النمذجة، إلى جانب تطوير معايير اختبار مناسبة. ويقدّم هذا الفصل عرضًا عامًا لخصائص حرائق المباني الشاهقة ومنهجيات اختبارها، مع تركيز خاص على الواجهات.

الشكل 6.1 نماذج من الواجهات المستخدمة شيوعًا في المباني الشاهقة (المصدر: صور Google)

الشكل 6.2 حادثة حريق برج غرينفيل في مدينة لندن، المملكة المتحدة (2017)

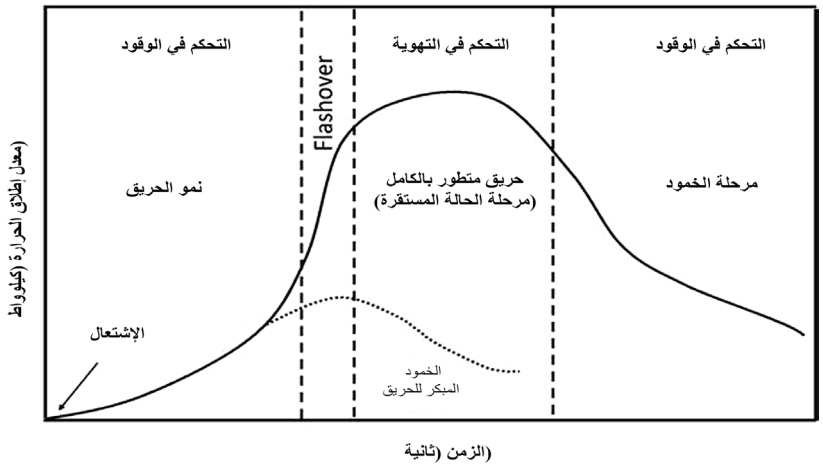
6.2 نمو الحريق: من حرائق الحيز الداخلي إلى الانتشار الخارجي

تُعد الحرائق من أشد حالات التحميل التي قد تتعرض لها أي منشأة، وتتوقف قدرة المنشأ على الصمود فيها على مدى كفاءة التخطيط المسبق لها. وقد أظهرت الحرائق الكبيرة السابقة بوضوح أن تصميم الواجهة قد يؤثر تأثيرًا كبيرًا في مسار انتشار الحريق ومعدله. ولفهم كيفية انتقال حرائق الحيزات الداخلية إلى الواجهات الخارجية، لا بد أولًا من فهم كيفية نشوء الحريق داخل الحيز المغلق ونموه وانتشاره، والأسباب المؤدية إلى حدوث الاشتعال الشامل (Flashover).

وعادةً ما يُوصف تطور الحريق من خلال منحنى زمني يعتمد على معدل إطلاق الطاقة أو الحرارة (HRR) ويُعرف بمنحنى نمو الحريق كما هو موضح في الشكل (6.3). ويتألف هذا المنحنى من أربع مراحل رئيسية:

- الاشتعال والنمو (Ignition and Growth)
- الاشتعال الكامل (Flashover)
- اندلاع الحريق (Fully Developed Fire)
- خمود الحريق (Fire Decay)

يبدأ الحريق في الحيز الإنشائي إذا اجتمعت العناصر الثلاثة المكوّنة لمثلث الحريق، وهي: الوقود والحرارة والأوكسجين، لتُطلق تفاعلًا متسلسلًا يؤدي إلى الاشتعال. وبمجرد نشوب الحريق فإن نموه اللاحق يتأثر بدرجة كبيرة بالخواص الفيزيائية والكيميائية للوقود مثل حرارة الاحتراق، ودرجة حرارة الاشتعال، والتركيب الكيميائي والكثافة، فضلاً عن تشكيله الهندسي من حيث الشكل والحجم وهو ما يُعرف بالحريق المُعتمد على الوقود (Fuel-Controlled Fire). ويُستَخدم عادة في توصيف هذا النوع من الحرائق معادلة قانون القدرة على النحو التالي:



الشكل 6.3 منحنى تطوّر الحريق ضمن الحيز الإنشائي الداخلي

$$Q = at^2 \qquad (6.1)$$

حيث تُعبِّر Q (بوحدة كيلوواط) عن معدل إطلاق الحرارة (HRR)، وتمثل t (بالثواني) الزمن في حين تشير α (بوحدة كيلوواط/ثانية²) إلى معامل نمو الحريق. يُعد معدل إطلاق الحرارة خاصية غير جوهرية لمادة الوقود ويتطلب تحديده إجراء اختبارات ميدانية إما عبر مقياس السعرات المعتمد على استهلاك الأوكسجين (وفق المعيار ASTM E1354)، أو باستخدام معدل الاحتراق الكتلي m (بوحدة كيلوجرام/ثانية) وفق العلاقة التالية:

$$Q = m\Delta H_c \qquad (6.2)$$

حيث تمثل ΔHc حرارة الاحتراق، وتقاس بوحدة كيلوجول لكل كيلوغرام (kJ/kg) . وقد يكون معدل إطلاق الحرارة[1] (HRR) منخفضًا جدًّا إلى حد 5 واط في حالة سيجارة مشتعلة، أو قد يتراوح بين 7 كيلوواط و2 ميغاواط في حال احتراق حوض سائل بقطر يتراوح بين 0.1 و1

(1) ملاحظة المترجم: معدل إطلاق الحرارة (Heat Release Rate, HRR): هو معدل انبعاث الطاقة الحرارية من الحريق مع الزمن، ويُستخدم بوصفه مؤشرًا أساسًا على شدة الحريق وتطوره.

مـتر. وتختلـف فـترة نمـو معـدل إطـلاق الحـرارة (HRR) بحسـب زمـن الوصـول إلى قيمـة 1055 كيلـوواط وتُصنَّـف إلى أربـع فئـات: نمـو فائـق السرعـة (75 ثانيـة) وسريـع (150 ثانيـة) ومتوسـط (300 ثانيـة) وبطـيء (600 ثانيـة). تتميَّـز هـذه المرحلـة بظهـور عمـود نـاري يصعـد إلى السـقف ومـن ثـم ينتـشر الحريـق عـلى هيئـة تيـار سـقفي يتبعـه تكـوُّن طبقـة دخانيـة. وتُعـرف المرحلـة الانتقاليـة القصـيرة بـين نمـو الحريـق وبلوغـه ذروتـه بالاشـتعال الشـامل (Flashover) حيـث ينتـشر اللهـب بسرعـة شـديدة ليشـمل كافـة المـواد القابلـة للاشـتعال ضمـن الحيـز. ويحـدث هـذا التحـول عندمـا تصـل درجـة حـرارة السـقف إلى نحـو 600 درجـة مئويـة أو عندمـا يتجـاوز الإشـعاع الحـراري المنبعـث نحـو أرضيـة الحجـرة 20 كيلـوواط لـكل مـتر مربـع. عنـد تجـاوز هـذه المرحلـة، يدخـل الحريـق مرحلـة التطـور الكامـل ويتحـوَّل مـن كونـه حريقًـا مُعتمـدًا عـلى الوقـود إلى حريـق خاضـع لظـروف التهويـة إذ إن جميـع الوقـود المتـاح يكـون قـد اشـتعل وتصبـح اسـتمرارية الحريـق مرهونـة بتوفُّـر الأوكسـجين أو التهوية. مـع انتهـاء احـتراق المـواد القابلـة للاشـتعال كافـة يعـود الحريـق إلى كونـه خاضعًـا للوقـود ويبـدأ منحنـى التراجـع نتيجـة انخفـاض حمولـة الوقـود تدريجيًّـا إلى أن ينطفـئ الحريـق كليًّـا بانعـدام مصـدر الوقـود.

يُعَـدُّ المنحنـى الموضـح في الشـكل (6.3) تمثيـلًا مثاليًّـا لتطـوُّر لحريـق ولا يُشـترط أن يـسري عـلى جميـع الفراغـات الإنشـائية إذ يخضـع لعـدة متغـيرات مـن أبرزهـا ظـروف التهويـة وحمولـة الوقـود المتاحـة وهـي عوامـل تؤثـر تأثـيرًا مبـاشرًا في نمـو الحريـق مـن خـلال تعديـل ذروة معـدل إطـلاق الحـرارة ومـدة الاشـتعال. وفي حـال عـدم توفـر تهويـة كافيـة أو كميـة مناسـبة مـن الوقـود خـلال مرحلـة النمـو فقـد لا يبلـغ الحريـق مرحلـة الاشـتعال الشـامل (Flashover) أو التطـور الكامـل (Fully Developed Fire) بـل قـد يشـهد انحسـارًا مبكـرًا دون أن يسـتهلك كامـل

محتويات الحجرة، كما هو مبين في الشكل (6.3).

وعادةً ما تتسبب حرائق الفراغات الداخلية في انتقال الحريق إلى الواجهات الخارجية ويعتمد ذلك على كمية الطاقة المنبعثة خلال مرحلة الحريق الكامل والتي بما أنها خاضعة للتهوية فإنها ترتبط بعامل التهوية (F_v) ويُشتق له التعبير الرياضي وفق الصيغة التالية:

$$F_V = A_0 H_0^{0.5} \qquad (6.3)$$

حيث تشير A_0 (بالمتر المربع) إلى مساحة فتحة التهوية وH_0 (بالمتر) إلى ارتفاعها. واستنادًا إلى عامل التهوية هذا يمكن حساب أقصى معدل لإطلاق الحرارة داخل الحيز الإنشائي خلال مرحلة الحريق الكامل التطور والذي يُرمز إليه بـ HRR_{in} (بوحدة كيلوواط) وفق المعادلة التالية:

$$HRR_{in} \qquad (6.4)$$

عندما يتجاوز معدل إطلاق الحرارة داخل الحيز المغلق (HRR) الحد الأقصى لمعدل الإطلاق الحراري في مرحلة الاشتعال الكامل (HRR_{in}) فإن ذلك يؤدي إلى امتداد ألسنة اللهب إلى خارج الفتحات مثل الأبواب والنوافذ ويُعبَّر عن معدل إطلاق الحرارة الناتج خارج الحيز بـ HRR_{ext} (كيلوواط).

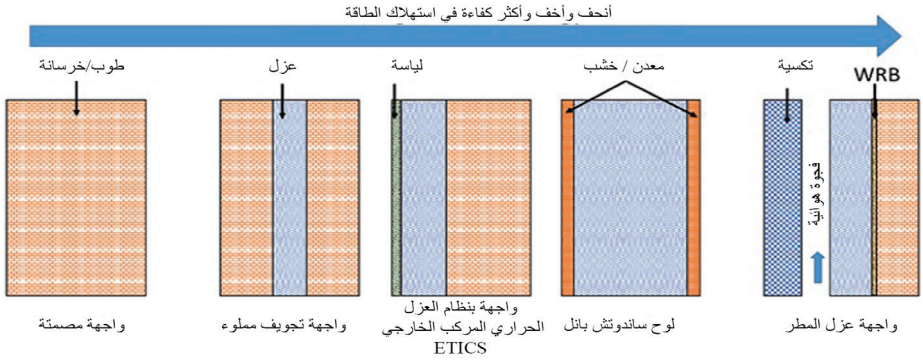
$$HRR_{ext} = HRR - HRR_{in} \qquad (6.5)$$

يؤثر معدل إطلاق الحرارة الخارجي (HRR_{ext}) مباشرة في واجهة المبنى وفي حالة المباني الشاهقة المزودة بواجهات قابلة للاحتراق. ويؤدي ذلك إلى تسارع في الانتشار الرأسي للنيران من طابق إلى آخر ويتوقف هذا السلوك على نوع نظام الواجهة المعتمد في المبنى. وتتناول الفقرة التالية بالشرح الأنظمة الشائعة الاستخدام في هذا السياق.

6.3 أنظمة الواجهات وأنماطها

طُوِّرَت أنظمة الواجهات الخارجية باستخدام أساليب وتقنيات هندسية متقدمة وأصبحت تتميز بدرجة عالية من التعقيد، وتشكل جزءًا كبيرًا من التكلفة الإجمالية للمبنى. وخلال السنوات الأخيرة، شهد تكوين هذه الأنظمة تحوُّلًا من النماذج البسيطة إلى أنظمة أكثر تعقيدًا وذلك بهدف تلبية متطلبات متعددة تشمل الحماية من الرياح والأمطار وأشعة الشمس إضافةً إلى تحقيق العزل الحراري ومنح المبنى طابعًا جماليًّا. ومع ذلك فإن هذا الاتجاه نحو أنظمة أكثر نحافة وخفة وكفاءة في استهلاك الطاقة قد أسهم في زيادة احتمالية نشوب الحرائق. وتُعرض في الشكل 6.4 الأنواع الشائعة من أنظمة الواجهات، والتي ستُتَناول تفصيليًّا فيما يلي.

1. الواجهات الأحادية الكتلة: تُعد من أبسط أشكال أنظمة الواجهات، وتتكوَّن من طبقة واحدة فقط من مادة غير قابلة للاشتعال مثل الخرسانة أو الطوب أو الستارة الزجاجية المعلَّقة.



الشكل 6.4 أنماط متعدّدة لأنظمة الواجهات

تتمثل أبرز المخاطر المرتبطة بهذا النوع من الواجهات في التهشم والتفكك السطحي الناتجين عن انتقال الحرارة من الحريق. إلا أن قابليتها للاشتعال تُعد منخفضة نظرًا لطبيعتها غير القابلة للاحتراق.

ورغم ذلك، فإن استخدامها لم يعد شائعًا في البنى التحتية الحديثة نظرًا لعدم قدرتها على تلبية متطلبات كفاءة الطاقة بسبب اقتصارها على مادة واحدة فقط. وبناءً عليه، طُوِّرت أنظمة واجهات أكثر تطورًا وتعقيدًا ستُتَناول في الأقسام اللاحقة.

2. **الواجهات المعزولة:** تُستخدم لتلبية متطلبات كفاءة الطاقة، حيث تُزوَّد بطبقة من مادة العزل الحراري موضوعة بين طبقتين من مواد قابلة للاشتعال. وتعتمد درجة القابلية للاشتعال في هذا النوع من الواجهات على طبيعة مادة العزل المستخدمة. وتُصنَّف هذه الواجهات إلى الأنواع التالية بناءً على نوع مادة الربط المستخدمة لحماية العزل:

i. واجهات مُبَطّنة بالعزل[1](Filled cavity Façades): تتكوَّن من مادة عازلة تُحقن أو تُركَّب بين طبقتين من المواد مثل جدران الطوب أو الخرسانة ما يحول دون تعرُّض مادة العزل مباشرة لألسنة اللهب. ويُشيع استخدامها في المباني منخفضة الارتفاع (أقل من 15–20 مترًا).

ii. واجهات أنظمة العزل الحراري الخارجية المركبة[2] (ETICS): وهي أنظمة تتكوَّن من مادة عازلة محصورة بين جدار داخلي سميك من الطوب أو الخرسانة وطبقة خارجية رقيقة يتراوح سمكها بين 2 إلى 12 ملم من الملاط تُستخدم لتوفير سطح خارجي نهائي يتمتع بخواص عازلة ومقاومة

(1) ملاحظة المترجم: تتداول الأوساط المهنية والسوقية العربية لهذا النظام تسميات من قبيل: جدارين بينهما عازل، والجدار المزدوج المعزول، وجدار التجويف المعزول. ويجدر التنبيه إلى أن هذه التسميات لا تُرادف ألواح الساندوتش بانل (Sandwich Panels)، إذ يشير هذا المصطلح إلى نظام آخر مغاير سيأتي بيانه لاحقًا.

(2) ملاحظة المترجم: أنظمة العزل الحراري المركبة الخارجية (External Thermal Insulation Composite Systems) ويُشار إليها في الاستعمال السوقي أحيانًا بمسميات أقرب إلى التداول، مثل: واجهات العزل الحراري الخارجي أو نظام العزل والتشطيب الخارجي، وهي تسميات وظيفية دارجة، وإن كانت التسمية الواردة في المتن أدق من الناحية الاصطلاحية.

للمـــاء. وتتميـــز هـــذه الأنظمـــة بقدرتهـــا عـــلى تعزيـــز العـــزل الحـــراري والحمايـــة مـــن العوامـــل الجويـــة مـــع إضفـــاء طابـــع تصميمـــي محسَّـــن عـــلى الواجهـــة الخارجيـــة. ومـــع ذلـــك فـــإن رقـــة طبقـــة الحمايـــة الخارجيـــة تجعلهـــا أكثـــر عرضـــة لانتقـــال النـــيران مقارنـــة بواجهـــات التجويـــف المملـــوء.

iii. الألـــواح الطبقيـــة[1] (Sandwich Panels): في هـــذا النـــوع مـــن الأنظمـــة تُوضَـــع مـــادة العـــزل الحـــراري بـــين طبقتـــين رقيقتـــين مـــن مـــواد مثـــل المعـــادن أو الخشـــب الرقائقـــي أو ألـــواح الجبـــس وذلـــك بهـــدف توفـــير واجهـــة ذات طابـــع جمـــالي وخمـــول حـــراري. تُســـتخدم هـــذه الألـــواح بشـــكل شـــائع كواجهـــاتٍ خارجيـــةٍ في المباني عاليـــة الارتفـــاع وتحظـــى بقبـــول واســـع بـــين المعماريـــين والمصممـــين نظـــرًا لمظهرهـــا الجـــذاب وتكلفتهـــا الاقتصاديـــة. وكمـــا هـــو الحـــال في أنظمـــة العـــزل الحـــراري الخارجيـــة المركبـــة (ETICS)، فـــإن هـــذه الأنظمـــة قـــد تُهـــدِد بالاحـــتراق إذا كانـــت نـــواة مـــادة العـــزل المســـتخدمة ذات طبيعـــة قابلـــة للاشـــتعال.

3. واجهـــات الحمايـــة مـــن المطـــر (Rainscreen Façades): واجهـــت أنظمـــة الواجهـــات الســـابقة مشـــكلة شـــائعة تمثّلـــت في تراكـــم الرطوبـــة عـــلى أســـطح الواجهـــات. ولمعالجـــة هـــذه الإشـــكالية جـــرى تطويـــر نظـــام واجهـــات الحمايـــة مـــن المطـــر والـــذي يتضمَّـــن وجـــود فجـــوة هوائيـــة صغـــيرة مخصصة للتهويـــة بـــين الواجهـــة الخارجيـــة وطبقـــة العـــزل. ويتكـــوَّن هـــذا النـــوع مـــن الواجهـــات عـــادة مـــن ثلاثـــة مكونـــات رئيســـية: الكســـوة الخارجيـــة مصحوبة بفـــراغ هوائـــي خلفهـــا، طبقـــة عـــزل حـــراري مســـتمرة (CI) وحواجـــز مقاومة للمـــاء والطقـــس (WRB) كمـــا هـــو مبـــيَّن في الشـــكل 6.4.

(1) ملاحظـــة المترجـــم: محليـــاً تُتداول تحت مســـمى الألـــواح المعزولـــة، والألـــواح المعدنية المعزولـــة. ولتفادي اللبـــس، ينبغـــي التفريـــق بينهـــا وبـــين الطوب المعـــزول بالفوم، إذ يشـــير الأخـــير إلى وحـــدات البنـــاء المعروفة، والتـــي تختلـــف في تكوينهـــا وطريقـــة اســـتخدامها عـــن ألـــواح الســـاندوتش بانـــل الخاصـــة بالواجهـــات.

i. الكسوة الخارجية والفجوة الهوائية: تُعدُّ الكسوة الخارجية العنصر الأبعد في تكوين نظام الواجهة وغالبًا ما يُشار إليها باسم «كسوة الحماية من المطر» نظرًا لوظيفتها الأساسية في حماية المبنى من تسرب مياه الأمطار. وتُستخدم في تصنيع هذه الكسوة مجموعة من المواد من أبرزها ألواح الألمنيوم المركبة (Aluminum Composite Panels, ACP) والصفائح عالية الضغط (High Pressure Laminates, HPL) واللدائن المقواة بالألياف (Fiber-Reinforced Plastic, FRP). تختلف طبيعة النواة الداخلية لهذه المواد بحسب مستوى الحماية المطلوبة من الحريق والتكلفة حيث قد تكون قابلة للاشتعال، أو مثبطة للَّهب أو مملوءة بمواد معدنية. تُثبَّت هذه الكسوة باستخدام أنظمة وصل متعددة ما يُنتج فجوة هوائية خلف الكسوة يتراوح عمقها بين 25 و100 ملم. وتؤدي هذه الفجوة وظيفتين أساسيتين: تصريف مياه الأمطار المتراكمة وتعزيز حركة تدفُّق الهواء الصاعد داخل الفجوة خلال الطقس الحار ما يسهم في طرد الرطوبة من الواجهة والحفاظ على جفافها.

ii. العزل المستمر (Continuous Insulation – CI): يُشكِّل هذا المكوِّن العنصر الثاني في نظام الواجهة ويقوم على تركيب طبقة من العزل الحراري على السطح الخارجي للهيكل الإنشائي للمبنى بهدف تعزيز القيمة الحرارية للمقاومة (R-value) للجدار الخارجي. وبالتالي تحسين كفاءة الطاقة من خلال تقليل الفاقد الحراري. تشمل المواد الأكثر شيوعًا المستخدمة في العزل الحراري المستمر كلاً من: البوليستايرين الممدد (Expanded Polystyrene, EPS)، والبولي أيزوسيانورات (Polyisocyanurate, PIR)، ورغوات الفينول (Phenolic Foams)، والصوف المعدني (Mineral Wool, MW). ويعتمد سُمك العزل

على النطاق المناخي الذي يقع فيها المبنى والقيمة الحرارية المستهدفة. ومن المهم التنبيه إلى أن استخدام مواد عازلة قابلة للاشتعال بالاقتران مع تكسية خارجية قابلة للاشتعال قد يفاقم الوضع في حال نشوب حريق.

iii. حاجز مقاوم للماء والعوامل الجوية (Weather/Water-Resistive Barrier – WRB: يُعد هذا المكوِّن العنصر الثالث في نظام الواجهة ويُرَكَّب مباشرة فوق الطبقة الخارجية لغلاف المبنى (sheathing) وتحت طبقة العزل الحراري المستمر. وتكمن وظيفته الرئيسة في الحد من تسرب الرطوبة إلى داخل هيكل المبنى مما يقي من التلف الناتج عن الرطوبة ويسهم في تنظيم الرطوبة النسبية داخل الفراغات الداخلية، بما يضمن تحقيق بيئة معيشية مريحة. ويشيع استخدام نوعين من المواد لتشكيل هذا الحاجز، هما الأغشية السائلة التي تُطبَّق مباشرة على الأسطح أو التكسيات المعمارية التي تُستخدم بصفتها حواجز مانعة لتسرُّب المياه والعوامل المناخية.

تُستخدم هذه الأنماط من الواجهات على نطاق واسع في المباني عالية الارتفاع لما تتمتع به من كفاءة حرارية مرتفعة وفعالية عالية في مقاومة العوامل المناخية فضلًا عن إسهامها في تعزيز الجانب الجمالي للواجهة المعمارية. وتُسهم الفجوة الهوائية الداخلية في معالجة مشكلات تراكم الرطوبة داخل أنظمة الجدران، غير أنَّه في حال اندلاع حريق يمكن أن تؤدي هذه الفجوة إلى تولّد تأثير المدخنة لا سيِّما عند اقترانها بواجهة قابلة للاشتعال مما يُسرِّع من انتقال النيران رأسيًّا إلى الطوابق العليا وفقًا لسيناريوهات الحريق التي ستُفَصَّل في القسم اللاحق.

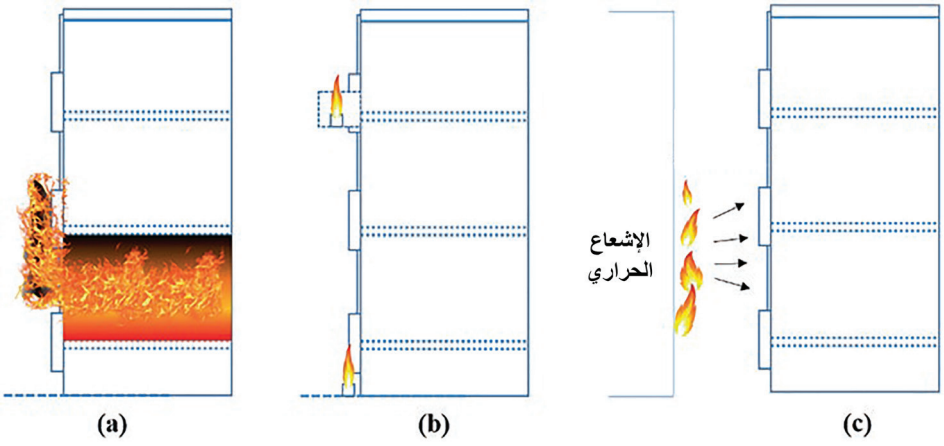
6.4 سيناريوهات الحريق التصميمية للواجهات - الحرائق الناشئة داخليًّا وخارجيًّا

يمكن أن تتسبَّب عدة سيناريوهات في نشوب حرائق الواجهات، ويمكن تصنيف هذه السيناريوهات ضمن فئتين رئيسيتين، كما هو مبيَّن في الشكل 6.5:

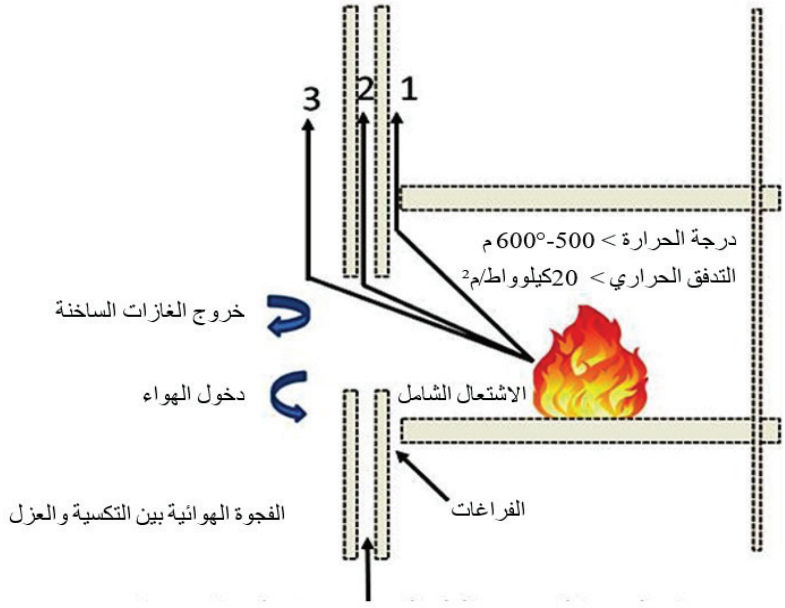
6.4.1 الحرائق الداخلية

تنشأ الحرائق داخل فراغات المبنى نتيجة لمصادر إشعال أو حرارة متعددة تختلف في الحجم والشدة ومدة التأثير بدءًا من شرارة بسيطة وصولًا إلى حرائق ناتجة عن سوائل شديدة القابلية للاشتعال. وتُعد البنى التحتية الحديثة بيئة محفزة لنشوء هذه الحرائق نظرًا لعوامل عدَّة من أبرزها: التعقيد المعماري للتصاميم كثرة المساحات المفتوحة نتيجة انخفاض مستويات التقسيم الداخلي ارتفاع الأحمال الحرارية الناتجة عن تعدد المواد القابلة للاحتراق وجود فراغات إنشائية غير مرئية وتغير خصائص مواد البناء المستخدمة. وقد أسهمت هذه العوامل مجتمعة في تقليص زمن الوصول إلى مرحلة الاشتعال الكلي (flashover)، وزيادة سرعة انتشار الحريق وتقليص الوقت المتاح للإخلاء ورفع مستويات التعرض للحرارة والغازات السامة. وقد بيَّنت تجارب ميدانية أجرتها مؤسسة «يو إل» (Underwriters Laboratories) أن زمن الاشتعال الكامل في الغرف الحديثة قد يكون أقل من خمس دقائق مقارنة بنحو ثلاثين دقيقة في الغرف التقليدية القديمة. وتُعد هذه الحرائق الداخلية سواء في مرحلة ما قبل الاشتعال الكامل أو ما بعده من أكثر سيناريوهات الاشتعال شيوعًا لحرائق الواجهات إذ تؤدي إلى تحطُّم النوافذ بفعل الضغط الحراري مما يسمح بخروج ألسنة اللهب واشتعال الواجهة الخارجية القابلة للاحتراق سواء عبر

اصطـدام مبـاشر بالواجهـة أو عـبر النفـاذ إلى الفجـوات الهوائيـة والمسـاحات الإنشـائية الخفيـة، كمـا هـو موضـح في الشـكل 6.6، وهـو مـا يـؤدي إلى انتشـار رأسي متسـارع للنـيران.



الشكل 6.5 سيناريوهات حريق الواجهة في حوادث حرائق المباني عالية الارتفاع



الشـكل 6.6 انتشـار الحرائـق الداخليـة مـن خـلال: (1) الفراغـات الخفيـة، (2) الفجـوة الهوائيـة، (3) الاصطـدام المبـاشر بواجهـة المبنـى الخارجيـة

6.4.2 الحرائق الخارجية

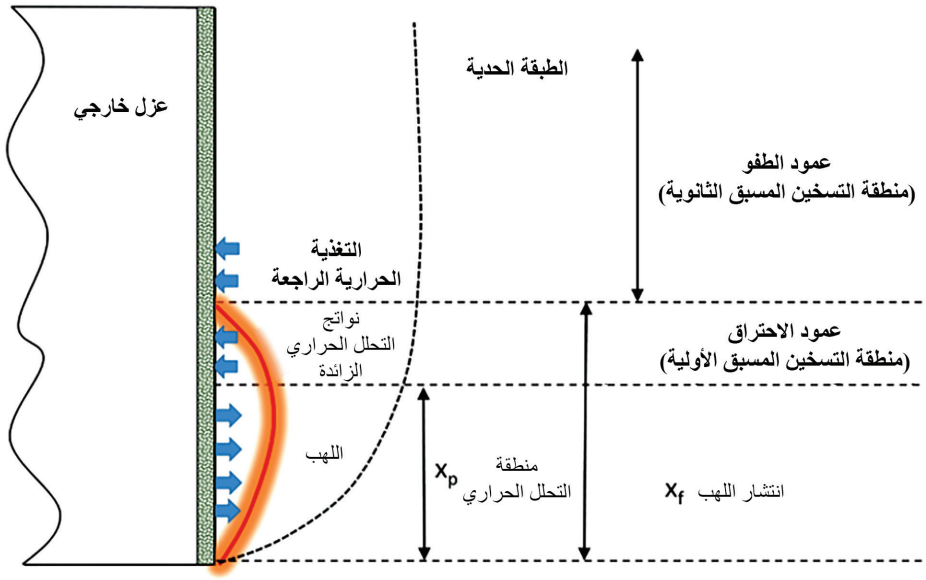
يمكن للحرائق الخارجية القريبة من النوافذ أو الشرفات أن تؤثر مباشرةً في الواجهة الخارجية من دون حاجة إلى حدوث الاشتعال الشامل. كما يمكن للمباني المجاورة المشتعلة أو للعناصر القابلة للاحتراق القريبة، مثل سيارة متوقفة أو حاويات النفايات، أن تتسبب أيضًا في نشوء حرائق الواجهات من خلال تسخينها بالإشعاع.

وثمة عاملان رئيسان قد يؤديان إلى سيناريوهات الحريق المشار إليها أعلاه، هما: استخدام المواد القابلة للاحتراق في نظام الواجهة، مثل التكسيات (Cladding) والعزل (Insulation) والفواصل (Joints) وغيرها، وغياب حواجز التجاويف الرأسية (Vertical Cavity Barriers) وموانع الحريق (Fire Stops) أو عدم كفايتها، بما لا يحول دون اختراق الحريق للتجويف وحدوث تأثير المدخنة (Chimney Effect)، كما سيُناقش في القسم التالي.

6.5 آلية الانتشار الرأسي للنيران عبر الواجهات

يُعرَّف انتشار اللهب بأنه العملية التي ينتقل فيها اللهب فوق سطح قابل للاشتعال يخضع لعملية التحلل الحراري، ويؤدي دور الوقود في استمرار الاحتراق. وتُعد جبهة اللهب المتحركة بمثابة حدٍّ غير مرئي يفصل بين الجزء المحترق من المادة القابلة للاشتعال والجزء الذي لم تطله النيران بعد. وتنتقل جبهة اللهب من خلال تسخين المادة غير المحترقة الواقعة في منطقة ما قبل التسخين وذلك بفعل الحرارة المنبعثة من منطقة التحلل الحراري وهي المنطقة التي يشهد فيها السطح الاحتراق الفعلي والتحلل الحراري للمادة. وتعتمد سرعة نمو الحريق بدرجة كبيرة على معدلات انتقال الحرارة وسرعة انتشار

اللهب، الأمر الذي يُبرز أهمية فهم آلية انتشار اللهب والعوامل المختلفة المؤثرة في معدله. وقد لوحظ أن معدل الانتشار الرأسي للنيران يزداد أسياً مع الزمن نتيجة لتأثير المضاعفة.



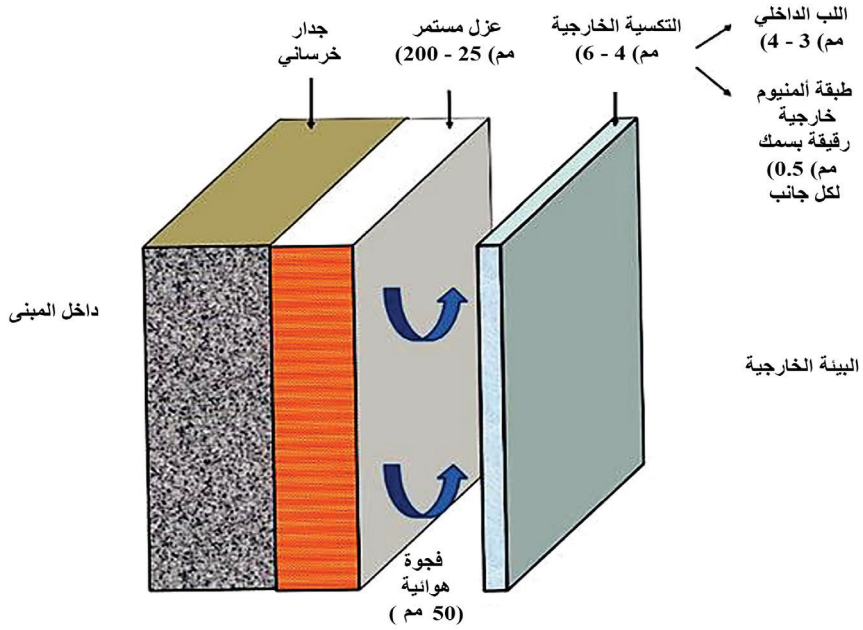
الشكل 6.7 آلية الانتشار الرأسي التصاعدي للنيران على واجهة المبنى

كما يبيِّن الشكل 6.7، تُلاحظ ثلاث مناطق رئيسة في الانتشار الصاعد للهب عبر الواجهات. تُعرف المنطقة الأولى بمنطقة التحلل الحراري وهي الموقع الذي تشهد فيه المادة احتراقًا فعليًّا يؤدي إلى انبعاث مواد طيَّارة قابلة للاحتراق والتي تحترق لتولِّد لهبًا مرئيًّا. تأتي بعدها المنطقة الواقعة بين نقطة التحلل الحراري (pyrolysis zone, $\varkappa_p$) وطول انتشار اللهب (Flame Propagation Length, $\varkappa_f$) وتُعرف بسحابة الاحتراق (Combusting Plume)؛ حيث ترتفع الغازات غير المحترقة نحو الأعلى بفعل قِوى الطفو، وتخضع للاشتعال وتؤدي في الوقت ذاته إلى تسخين الوقود الصلب غير المحترق الواقع فوق منطقة التحلل الحراري. أمَّا المنطقة الثالثة والأعلى ضمن هذا التوزيع، فهي

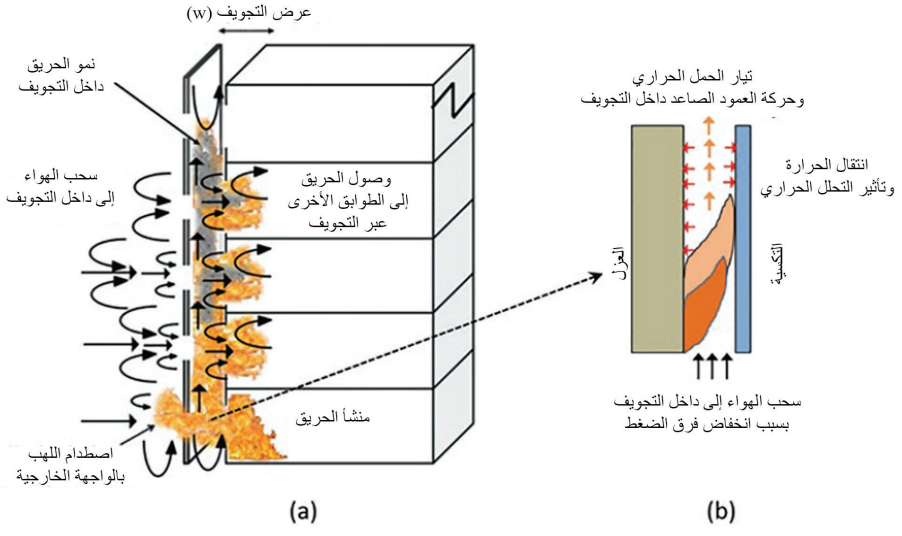
منطقة سحابة الطفو وتقع فوق نقطة (x_f) وتحتوي على نواتج احتراق ساخنة دون وجود لهب فعلي مرئي. وتعتمد سرعة انتشار اللهب على الواجهة بدرجة كبيرة على التدفق الحراري المؤثِّر في المادة غير المحترقة في منطقة الاحتراق والذي يُولَّد بواسطة اللهب الصادر عن منطقة التحلل الحراري. ففي الحالات التي يكون فيها اللهب صغيرًا ومتدفقًا بشكل صفحي تتبع سرعة الانتشار علاقة تربيعية مع الزمن ($xp, xf \propto t^2$) أما في حال اللهب المضطرب وواسع النطاق فإن معدل الانتشار يكون أعلى بكثير ويزداد أسياً مع الزمن.

6.6 ديناميكية الحرائق داخل الفجوات الهوائية

كما أُشير سابقًا تُصمَّم الفجوة الهوائية ضمن نظام الواجهة لتوفير التهوية الفعّالة وضمان دوران الهواء بطريقة منظمة كما هو مبيّن في الشكلين 6.8 و6.9. غير أن هذه الفجوة في حال نشوب حريق، قد تتحوّل إلى مسار عمودي شبيه بالمدخنة تُسهم في تسارع انتشار النيران نحو الأعلى بفعل ظاهرة تُعرف بـ«تأثير المدخنة». وفي كثير من الحالات قد يؤدي التعرض المباشر للنيران إلى نشوء حريق داخل الفجوة الهوائية نفسها. وفي الوقت الذي تكون فيه حرائق الحيز الداخلي محدودة عادة بكمية الوقود أو توفر التهوية فإن حرائق الفجوات لا تخضع لهذا القيد نظرًا لوفرة التهوية الناتجة عن تأثير المدخنة من البيئة المحيطة مما يجعل السيطرة عليها أكثر تعقيدًا وصعوبة. وعليه تبرز ضرورة دراسة هذا التأثير وتحليل المخاطر المرتبطة به ضمن أنظمة الواجهات.



الشكل 6.8 العناصر المكوّنة لتجميع واجهة المبنى



الشكل 6.9 (أ) ظاهرة تأثير المدخنة في حرائق الواجهات، (ب) مشهد تفصيلي مُكبَّر للعمليات الداخلية ضمن الفجوة الهوائية

يوضح الشكل 6.8 نموذجًا شائعًا لتجميع نظام الجدار الخارجي أو واجهة المبنى في الأبنية الشاهقة. بعد الجدار الخرساني، تُضاف طبقة من العزل الحراري بهدف رفع قيمة المقاومة الحرارية (R-value) وتحسين كفاءة الطاقة وتتراوح سماكتها ما بين 25 إلى 200 ملم. تليها فجوة هوائية بسماكة تبلغ 50 ملم ثم تُثبَّت طبقة من كسوة ألواح الألمنيوم المركبة (ACP) بسماكة تتراوح بين 4 إلى 6 ملم. وفي حال كانت طبقة العزل أو الكسوة الخارجية أو كلتاهما قابلتين للاشتعال فإن ذلك قد يهيِّئ ظروفًا مواتية لحدوث ما يُعرف بـ»تأثير المدخنة».

ويُظهر الشكل 6.9 آلية انتشار الحريق عبر تأثير المدخنة في نظام واجهة نموذجي حيث يمكن ملاحظة قوة الطفو التي تسحب اللهب صعودًا على طول الفجوة الهوائية. وقد تخرج النيران الناتجة عن الحريق الداخلي من فتحات الحيز الداخلي لتصطدم بتجميع الجدار الخارجي. ويمكن أن تدخل ألسنة اللهب إلى منطقة الفجوة مما يؤدي إلى تسخين الهواء المحصور داخلها إلى درجات تفوق درجة حرارة الجو المحيط وهو ما يؤدي إلى انخفاض في كثافة الهواء. وينتج عن ذلك حركة صاعدة بفعل الطفو أو ما يُعرف بتأثير المدخنة؛ مما يخلق حالة تشبه الفراغ داخل الفجوة بعرض w. وبفعل هذا التأثير، يُسحَب هواء نقي إلى الفراغ الهوائي المتكوِّن؛ الأمر الذي يؤدي إلى تسارع في معدل انتشار النيران على النحو التالي:

$$Y = f(\Delta T, h, w, U)$$

يشير ذلك إلى أن الفرق في درجات الحرارة عند ثبات ارتفاع الجدار الجانبي يمكن أن يولّد فرق الضغط اللازم ومعدل تدفق الهواء عبر الفجوة. وعند دراسة الحرائق في واجهات المباني، يصبح من الضروري تحليل الأثر التراكمي لعوامل متعددة مثل المواد المستخدمة وتصميم نظام البناء (بما في ذلك أبعاد المدخنة)، وشدة مصدر الاشتعال الأولي وذلك في إطار ترتيبات تجريبية مناسبة.

6.7 مواد الواجهة - السلامة من الحريق والسُميّة

تُقاس كفاءة المواد المستخدمة في الواجهات من حيث أدائها أثناء الحريق بمدى قابليتها للاشتعال ومدى سُميَّتها. فإذا كانت مادة الواجهة قابلة للاشتعال، فإنها تُسهم في انتشار الحريق إلى أجزاء أخرى من المبنى، مما قد يؤدي إلى احتراقه بالكامل. وقد تُنتِج بعض مواد الواجهات أدخنة سامة أثناء الحريق، ما يتسبب في عدد من الوفيات يفوق أحيانًا ما يسببه الحريق نفسه، نظرًا إلى سرعة انتشاره وما يفضي إليه من تفاقم الوضع.

ومن أكثر المواد استخدامًا في تركيب الواجهات البولي إيثيلين منخفض الكثافة (Low-Density Polyethylene, LDPE) في التكسية الخارجية. بالإضافة إلى مواد العزل الحراري المستمر مثل البوليستايرين الممدد (EPS)، والبولي إيزوسيانات (PIR) والصوف المعدني (MW) وغيرها. وتكمن الإشكالية في مادة LDPE في أن حرارة تكوين البولي إيثيلين مرتفعة جدًّا، في حين أن حرارة تكوين ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء منخفضة؛ مما يجعل عملية احتراق البولي إيثيلين تفاعلًا طاردًا للحرارة بدرجة كبيرة (43.3 ميجا جول/كغ). وعلاوة على ذلك، كما هو موضح في الجدول 6.1 يُلاحظ أن مواد العزل القابلة للاشتعال تمتلك قيمًا حرارية مرتفعة (R-values) وهو ما يفسر كثرة استخدامها في الأبنية الشاهقة ضمن نظم العزل المستمر حيث تُسهم في تحسين كفاءة الطاقة وتتماشى مع أهداف اتفاق باريس بشأن العمل المناخي من خلال تقليل استهلاك الطاقة. ومع ذلك، فقد أثبتت الحوادث السابقة أن هذه المواد تُسرِّع من انتشار الحريق على واجهات المباني وتُنتج أدخنة سامة كما تَجلّى بشكل مأساوي في حادثة برج غرينفيل عام 2017. ويمثل هذا تحديًا بالغ الأهمية لهدف التنمية المستدامة الحادي عشر، والذي يُركِّز على تعزيز سلامة الأبنية وجعلها أكثر أمانًا للسكان.

الجدول 6.1 أنواع العزل الحراري المستمر المستخدمة في تجميع أنظمة الواجهات

نوع العزل الحراري المستمر	للبوصةR-Value ($h.ft^{2.0}F/BTU$)	قابلية الاشتعال	نفاذية الماء
الصوف المعدني (Mineral Wool)	4.0	منخفضة	مرتفعة
رغوة البولي إيزوسيانات (PIR)	6.5	متوسطة	منخفضة
رغوة الفينول (Phenolic Foam)	8.0-5.0	متوسطة	منخفضة
البوليستايرين الممدد (EPS)	5.0	مرتفعة	منخفضة

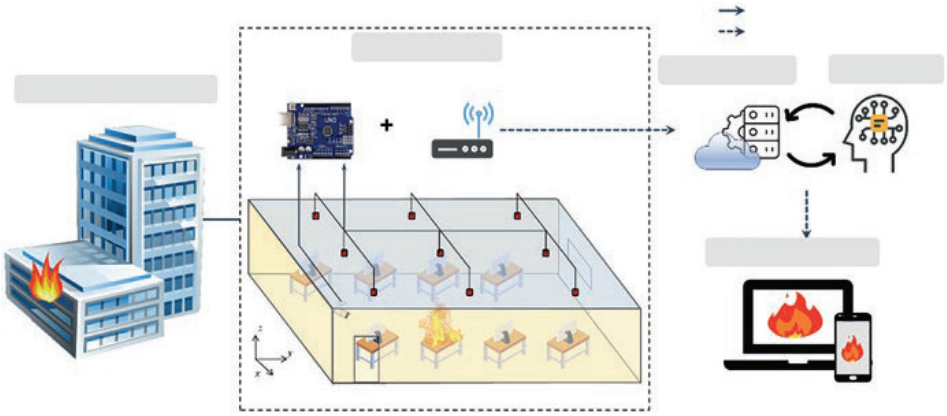
6.8 إطار الذكاء الاصطناعي / التعلم العميق للإنذار المبكر وتقييم أخطار الحريق

نظرًا لتعقيد سلوك حرائق الواجهات وتأثره بمجموعة واسعة من العوامل مثل، نوع المواد المستخدمة في الواجهة والظروف المناخية المحيطة ونمط نظام الواجهة المعتمد؛ فقد بُذِلَت جهود بحثية كبيرة لتطوير نماذج رياضية وفيزيائية تستوعب هذه المتغيرات وتُسهم في تعميق الفهم لظاهرة حرائق الواجهات، إلا أن الواقع العملي في حوادث الحريق الفعلية يكشف أن العديد من المعطيات الأساسية غالبًا ما تكون مجهولة أو غير قابلة للقياس، ما يحدُّ من إمكانية تطبيق المعادلات التجريبية التقليدية. وتعتمد دقة التقدير بدرجة كبيرة على مستوى معرفة القائمين بالتقييم وخبرتهم. ومع تسارع وتيرة انتشار حرائق المباني، فقد برزت الحاجة لتطوير أدوات تنبؤية فائقة السرعة تستجيب في غضون ثوانٍ معدودة وتوفِّر دقة عالية حتى في ظل محدودية البيانات المتاحة. ومن هنا، برز استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي (AI) والتعلم العميق (DL) في مجال أبحاث مكافحة الحرائق بوصفها أدواتٍ واعدةٍ في التعرف على حرائق المباني والتنبؤ بها بفعالية.

يعرض الشكل 6.10 إطاراً لتحديد سيناريو حريق الحيز الداخلي والتنبؤ بحدوث الاشتعال الكامل باستخدام حساسات إنترنت الأشياء (IoT)ونموذج مُدرَّب مسبقًا للتعلم العميق (DL) . وتُحقق عملية الكشف المبكر عن الحريق من خلال مستشعرات حرارية تعمل على جمع بيانات درجة الحرارة ضمن شبكة استشعارية قائمة على تقنيات إنترنت الأشياء. تُرسل هذه البيانات إلى خادم سحابي حيث تُخَزَّن وتُدَار وتُحَلَّل باستخدام محرك ذكاء اصطناعي يوظِّف شبكة عصبية التفافية طويلة وقصيرة الأمد[1] (Convolutional-LSTM) بهدف تحديد حالة الحريق في الزمن الحقيقي وإصدار إنذارات فورية لقاطني المبنى وفرق الإطفاء حول الأخطار المحتملة. ولتسهيل التفاعل السيبراني-الفيزيائي، طُوِّرَت واجهة استخدام (UI) لعرض بيانات الحريق بما يشمل القيم المقاسة ومخرجات التحليل المعتمدة على الذكاء الاصطناعي.

وقد تُحُقِّقَ من فعالية هذا النظام الذكي للتنبؤ بالحريق من خلال سلسلة اختبارات حريق متعددة النطاقات من بينها اختبار واسع النطاق داخل حجرة بأبعاد 7.5 (طول) × 3.4 (عرض) × 5.4 (ارتفاع) متر مكعب ونموذج مصغر بنسبة تقارب 1/5 من الحجم الفعلي. وأظهرت النتائج أن النظام قادر على تحديد سيناريو الحريق بدقة تتجاوز 85% بما في ذلك تحديد موقع الحريق ومعدل إطلاق الحرارة، ويمكنه التنبؤ بحدوث الاشتعال الكامل بفترة إنذار مبكر تصل إلى 20 ثانية. ويمثل هذا النظام أداة حيوية تتيح معلومات استباقية تُسهم في اتخاذ قرارات فعالة أثناء مرحلة ما قبل الاشتعال الكامل، وبالتالي الحد من احتمالية امتداد الحريق إلى واجهات المبنى.

(1) ملاحظة المترجم: يُقصد بشبكة التفافية (Convolutional-LSTM Network): نموذج هجين في التعلم العميق يجمع بين خصائص الشبكات الالتفافية في استخراج السمات المكانية، وخصائص شبكات الذاكرة الطويلة القصيرة الأمد في تحليل الأنماط الزمنية المتتابعة. ومن أهم تطبيقاتها: التنبؤ بالحرائق، وتحليل الصور الحرارية، ومعالجة سلاسل بيانات الحساسات، والإنذار المبكر في الأنظمة الذكية. وتختصر عادةً بـ (CNN)

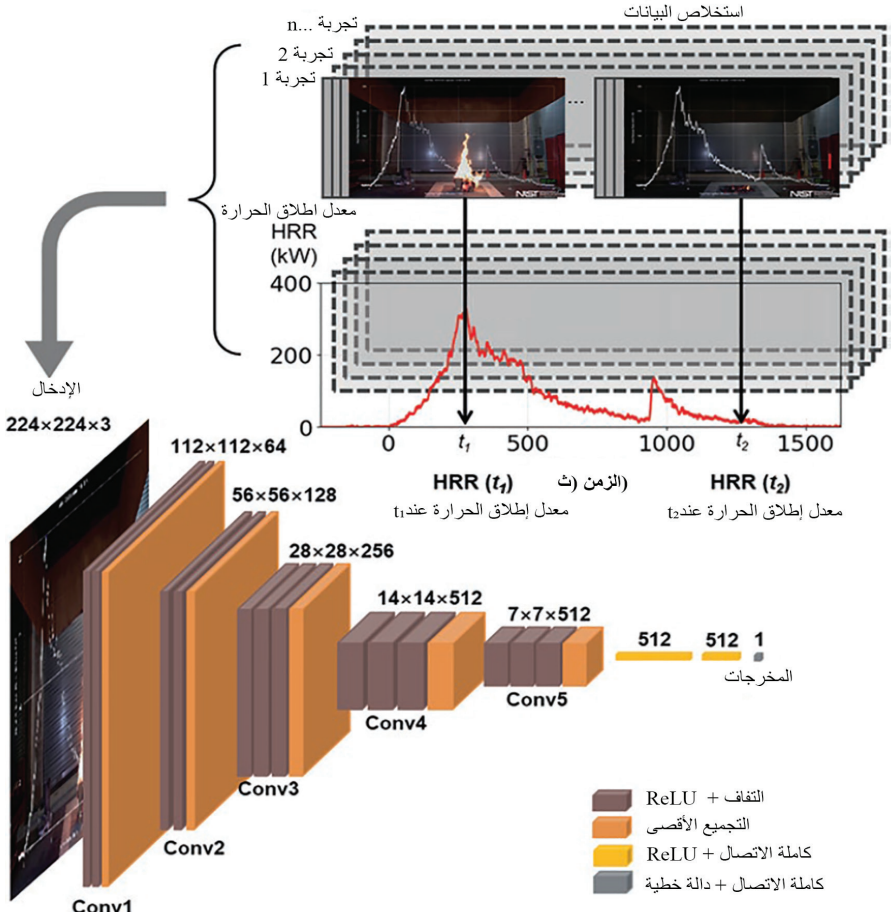


الشكل 6.10 الإطار العام لتحديد حرائق المباني والتنبؤ بها اعتمادًا على تقنيات إنترنت الأشياء ونموذج التعلم العميق

في مرحلة ما بعد الاشتعال الكامل، تسود النيران الخارجية؛ سواء اللهب المتدفق أو اللهب الصادر عن الواجهة. ومن الجدير بالذكر أن خصائص اللهب يصعب قياسها باستخدام مستشعرات الحرارة أو الغاز بينما تتوفَّر عادة صور لمشاهد الحريق. وعليه، يمكن استخدام تقنيات الرؤية الحاسوبية لتحليل خصائص حرائق الواجهات كما هو مبيَّن في الشكل 6.11. وقد أُنشئَتْ قاعدة بيانات موسَّعة تضم 112 اختبار حريق مأخوذة من قاعدة بيانات قياس الحرارة التابعة للمعهد الوطني الأمريكي للمعايير والتقنية (NIST) واعتمدت 69,662 صورة لمشاهد حرائق صُنِّفت حسب معدل إطلاق الحرارة اللحظي والمقاس باستخدام طريقة قياس الأكسجين لتدريب نموذج تعلم عميق مبني على الشبكات العصبية الإلتفافية (CNN).

يُستخدم نهج قياس الحرارة المعتمد على الصور وتقنيات الذكاء الاصطناعي لاحقًا لتقدير معدلات إطلاق الحرارة اللحظية (HRR) لاختبارات أُجريت في بيئات معملية مماثلة وجديدة وكذلك في حوادث حرائق واقعية. وتُظهر النتائج أن تقنية قياس حرارة الحريق المعتمدة على الصور قادرة على التنبؤ بدقة عالية بمعدلات إطلاق الحرارة

استنادًا إلى صور اللهب مع معامل تحديد يفوق 0.8 وذلك بغض النظر عن خلفية الصورة أو إعدادات الكاميرا أو زاوية التصوير. ويعتمد هذا النموذج البصري على صور اللهب فقط بوصفها مُدخلات؛ ما يوفر بديلاً عمليًّا لتقدير معدل إطلاق الحرارة عند تعذّر استخدام الأساليب الحرارية التقليدية. وفيما يخص مرحلة ما بعد الاشتعال الكامل، يمكن تثبيت النموذج المقترح على هاتف ذكي أو حمله بواسطة طائرة مسيَّرة بدون طيَّار (UAV) لالتقاط صور لواجهة الحريق والتنبؤ بمعدل إطلاق الحرارة لأغراض تقييم أخطار الحريق.



الشكل 6.11 أساليب الرؤية الحاسوبية لتحليل خصائص حرائق الواجهات

6.9 ملاحظات ختامية

في ضوء الحوادث الأخيرة المرتبطة بحرائق الواجهات، ومع الأهمية المتزايدة لتحقيق أهداف التنمية المستدامة الواردة في اتفاق باريس، تبرز الحاجة الملحَّة لإعطاء الأولوية لدراسة الآليات المتنوعة التي تسهم في نشوء هذا النوع من الحرائق. ويتطلب ذلك إجراء بحوث دقيقة وتحليلات معمَّقة لتحديد مواطن القصور إلى جانب تطوير معايير وأنظمة سلامة صارمة وتطبيقها للحد من المخاطر المرتبطة بحرائق الواجهات. ويمكن أن تشمل هذه الدراسات تحليل المواد المستخدمة في واجهات المباني وفحص تصميم الأبنية وأساليب تنفيذها والوقوف على الأسباب التي أدَّت إلى حرائق واجهات سابقة. ومن الضروري إشراك المعماريين ومالكي المباني وغيرهم من أصحاب العلاقة لضمان إدراكهم لأخطار هذه الحرائق واتخاذهم التدابير الوقائية الملائمة لمعالجتها.

وإلى جانب هذه الجهود، يمكن التوسُّع في استكشاف تقنيات ومواد مبتكرة من شأنها المساعدة في التخفيف من مخاطر حرائق الواجهات. فعلى سبيل المثال، يمكن لحلول الذكاء الاصطناعي أن تسهم في الكشف السريع والاستجابة الفاعلة لهذه الحرائق؛ إذ تتيح أنظمة الذكاء الاصطناعي من خلال تحليل بيانات المستشعرات والكاميرات تحديد موقع الحريق وشدَّته بدقة وسرعة مما يساعد فرق الإطفاء على اتخاذ إجراءات مناسبة في الوقت الحرج. وفي نهاية المطاف، فإن تبني نهج استباقي شامل يعالج السلامة من حرائق الواجهات من مختلف جوانبها من شأنه أن يسهم في حماية الأرواح والممتلكات وتعزيز مسارات التنمية المستدامة وبناء عالم أكثر أمانًا وقدرة على الصمود.

المراجع

1. **Ahrens, M.** (2016). *High-rise building fires*. www.nfpa.org/osds. Accessed 6 May 2023.
2. **Alpert, R. L., & Ward, E. J.** (1984). Evaluation of unsprinklered fire hazards. *Fire Safety Journal, 7*, 127–143. https://doi.org/10.1016/0379-7112(84)90033-X
3. **Anderson, J., Boström, L., Jansson McNamee, R., & Milovanović, B.** (2018). Experimental comparisons in façade fire testing considering SP Fire 105 and the BS 8414-1. *Fire and Materials, 42*, 484–492. https://doi.org/10.1002/FAM.2517
4. **Anderson, J., Boström, L., Jansson McNamee, R., & Milovanović, B**. (2018). Modeling of fire exposure in facade fire testing. *Fire and Materials, 42*, 475–483. https://doi.org/10.1002/FAM.2485
5. **Babrauskas, V.** (1996). Façade fire tests: Towards an international test standard. *Fire Technology, 32*, 219–230. https://doi.org/10.1007/BF01040215/METRICS
6. **Barbara Lane.** (2018). *Dr Barbara Lane's expert report | Grenfell Tower Inquiry*. Grenfell Tower Inquiry.
7. **Bonner, M., & Rein, G**. (2018). Flammability and multi-objective performance of building façades: Towards optimum design. *The International Journal of High-Rise Buildings, 7*, 363–374.
8. **Drysdale, D**. (2011). *An introduction to fire dynamics* (3rd ed.). Wiley.
9. Fire Calorimetry Database (FCD) | NIST. https://www.nist.gov/el/fcd. Accessed 1 May 2023.
10. **Gandhi, P., Jagdish, V., Karthikeyan, G., Chakravarthy, A., Nakrani, D., Ghoroi, C., & Srivastava, G.** (2017). Performance of glass-ACP façade system in a full-scale real fire test in a G+2 structure. *Procedia Engineering, 210*, 512–519. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.11.108
11. Goal 11 | Department of Economic and Social Affairs. https://sdgs.un.org/goals/goal11. Accessed 11 Feb 2023.
12. **Gollner, M. J., Overholt, K., Williams, F. A., Rangwala, A. S., & Perricone, J.** (2011). Warehouse commodity classification from fundamental principles. Part I: Commodity & burning rates. *Fire Safety Journal, 46*, 305–316.

13. **Guillaume, E., Fateh, T., Schillinger, R., Chiva, R., & Ukleja, S.** (2018). Study of fire behaviour of facade mock-ups equipped with aluminium composite material-based claddings, using intermediate-scale test method. *Fire and Materials, 42*, 561–577. https://doi.org/10.1002/FAM.2635
14. **Hu, L., Milke, J. A., & Merci, B.** (2017). Special issue on fire safety of high-rise buildings. *Fire Technology, 53*, 1–3. https://doi.org/10.1007/S10694-016-0638-7/METRICS
15. **Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall, J. R., Jr., Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M., Watts, J. M., Jr., & Wieczorek, C. J.** (2015). *SFPE handbook of fire protection engineering* (5th ed.). Springer.
16. **Jones, N., Peck, G., McKenna, S. T., Glockling, J. L. D., Harbottle, J., Stec, A. A., & Hull, T. R.** (2021). Burning behaviour of rainscreen façades. *Journal of Hazardous Materials, 403*, 123894. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123894
17. **Kawagoe, K.** (1958). *Fire behavior in rooms*. Report 27, Building Research Institute, Ministry of Construction, Tokyo, Japan.
18. **Khan, A. A., Lin, S., Huang, X., & Usmani, A**. (2021). Facade fire hazards of bench-scale aluminum composite panel with flame-retardant core. *Fire Technology, 1–24*. https://doi.org/10.1007/s10694-020-01089-4
19. **Khan, A. A., Lin, S., Huang, X., & Usmani, A**. (2023). Facade fire hazards of bench-scale aluminum composite panel with flame-retardant Core. *Fire Technology, 59*, 5–28.https://doi.org/10.1007/S10694-020-01089-4/FIGURES/9
20. **Kotthoff, I., & Riemeschspeer, J.** (2013). Mechanism of fire spread on facades and the new Technical Report of EOTA "Large-scale fire performance testing of external wall cladding systems". In *MATEC Web of Conferences, EDP Sciences* (p. 2010).
21. **Li, Y., Wang, Z., & Huang, X.** (2022). An exploration of equivalent scenarios for building facade fire standard tests. *Journal of Building Engineering, 52*, 104399. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104399
22. **Lugaresi, F., Kotsovinos, P., Lenk, P., & Rein, G**. (2022). Review of the mechanical failure of non-combustible facade systems in fire. *Construction and Building Materials, 361*, 129506. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129506
23. **McKenna, S. T., Jones, N., Peck, G., Dickens, K., Pawelec, W., Oradei, S., Harris, S., Stec, A. A., & Hull, T. R.** (2019). Fire behaviour of modern

façade materials – Understanding the Grenfell Tower fire. *Journal of Hazardous Materials, 368*, 115–123. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.12.077

24. **Mishra, S., Vishwakarma, P. K., Sharma, A., & Mishra, K. B.** (2021). Experimental investigation of small-scale CS2 (carbon disulphide) pool fires. *Process Safety and Environmental Protection, 145*, 203–210. https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2020.08.002
25. **Mizuno, T., & Kawagoe, K.** (1986). Burning behaviour of upholstered chairs. Part 3. Flame and plume characteristics in fire test. *Fire Science and Technology, 6*, 29–37. https://doi.org/10.3210/fst.6.29
26. **Orloff, L., Modak, A. T., & Alpert, R. L**. (1977). Burning of large-scale vertical surfaces. *Symposium (International) on Combustion, 16*, 1345–1354. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80420-7
27. **Ronchi, E., & Nilsson, D.** (2013). Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research. *Fire Science Reviews, 2*, 1–21. https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-7
28. **Sharma, A.** (2021). *Experimental and numerical investigations on external and internal fire spread in high-rise buildings*. PhD thesis, Indian Institute of Technology Roorkee. https://www.researchgate.net/publication/367389394_Experimental_and_numerical_investigations_on_external_and_internal_fire_spread_in_high-rise_buildings. Accessed 1 May 2023.
29. **Sharma, A., & Bhushan Mishra, K.** (2019). Experimental set-up to measure the maximum mass burning rate of storage tank fires. *Process Safety and Environmental Protection, 131*, 282–291. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.09.001
30. **Sharma, A., & Bhushan Mishra, K.** (2019). Numerical studies on different stairwell smoke extraction techniques in a high-rise building. In *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH9)* (Vol. 1, pp. 21–26). https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/K19-114
31. **Sharma, A., & Mishra, K. B.** (2021). Experimental investigations on the influence of 'chimney-effect' on fire response of rainscreen façades in high-rise buildings. *Journal of Building Engineering, 44*, 103257. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103257
32. **Sharma, A., & Mishra, K. B**. (2023). A numerical case study on optimizing the smoke extraction fans in a model high-rise building fire. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 405–417. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6945-4_29/TABLES/1

33. **Sharma, A., Vishwakarma, P. K., Mishra, S., & Mishra, K. B**. (2020). Visible length and thermal radiation of WCO biodiesel and ethanol pool fires. *Fuel, 280*, 118396. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118396
34. **Srivastava, G., & Gandhi, P. D.** (2022). *Performance of combustible façade systems used in green building technologies under fire*. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3112-2
35. **Sun, J., Hu, L., & Zhang, Y.** (2013). A review on research of fire dynamics in high-rise buildings. *Theoretical and Applied Mechanics Letters, 3*, 042001. https://doi.org/10.1063/2.1304201
36. The 17 GOALS | Sustainable Development. https://sdgs.un.org/goals. Accessed 11 Feb 2023.
37. **Wang, Z., Zhang, T., Wu, X., & Huang, X.** (2022). Predicting transient building fire based on external smoke images and deep learning. *Journal of Building Engineering, 47*, 103823. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103823
38. **Zhang, T., Wang, Z., Wong, H. Y., Tam, W. C., Huang, X., & Xiao, F**. (2022). Real-time forecast of compartment fire and flashover based on deep learning. *Fire Safety Journal, 130*, 103579. https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2022.103579
39. **Zhang, T., Wang, Z., Zeng, Y., Wu, X., Huang, X., & Xiao, F. (**2022). Building artificial-intelligence digital fire (AID-fire) system: A real-scale demonstration. *Journal of Building Engineering, 62*, 105363. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.105363

الفصل السابع

دراسة تجريبية حول المعالجة الذاتية للشقوق الدقيقة في الخرسانة باستخدام مزيج من البكتيريا الصديقة للبيئة

ر. أنجالي، س. أناندا كومار، جاسوانث جانغولو، ور. أبيرامي

7.1 المقدمة

تُعد الخرسانة من أكثر المواد استخدامًا في أعمال التشييد على مستوى العالم. غير أنها ضعيفة في مقاومة الشد ومحدودة المطاوعة ومقاومتها للتشققات ضعيفة. وتنشأ التشققات في الهياكل الخرسانية نتيجة عوامل متعددة منها الأحمال الخارجية والانكماش الناتج عن الجفاف وتأثيرات التجمُّد والذوبان. وتُهيئ هذه التشققات مسارات لنفاذ الرطوبة الخارجية وتسبب تآكل مواد التسليح، ما يؤدي إلى تدهور تدريجي في بنية المنشأة ويقلل من عمرها الافتراضي. لذلك تُعد المعالجة الفعَّالة لهذه التشققات أمرًا بالغ الأهمية للحفاظ على كفاءة المنشآت. تُحاكي آلية المعالجة الذاتية للخرسانة (Self-Healing Concrete, SHC) في مفهومها طريقة التئام الجروح في جسم الإنسان بمرور الوقت؛ إذ إن قدرة الخرسانة على معالجة التشققات ذاتيًّا تُعزز من متانة المنشأة واستدامتها وتُطيل من عمرها الخدمي. وقد بدأت دراسة الخرسانة ذاتية المعالجة تلقائيًّا منذ عام 1994 وتُعرَّف بأنها مادة خرسانية مركَّبة قادرة على إصلاح التشققات الدقيقة دون الحاجة إلى كشف خارجي أو تدخل بشري مباشر. وفي هذا السياق، يمكن استخدام مواد مثل الأسمنت أو الراتنجات لملء التشققات في الخرسانة. ويُعَدُّ حقن الأسمنت من الطرق الفعالة، إلا أنه يعجز عن اختراق التشققات الدقيقة التي يقل عرضها عن مليمتر واحد، مما دفع

الباحثين إلى إجراء دراسات عديدة على مستوى العالم لتجاوز هذه المشكلة. وقد كشفت هذه الدراسات أن الترسيب المعدني الناتج عن الكائنات الحية الدقيقة يمكنه المساهمة في إغلاق التشققات الخرسانية. وقد طُبِّق مفهوم التماسك الحيوي للخرسانة (biocementation) القائم على استخدام البكتيريا لتحقيق هذا الغرض. ويُعد التماسك الحيوي عملية اقتصادية وصديقة للبيئة؛ إذ تُنتج البكتيريا رواسب كربونات الكالسيوم في مناطق التشقق التي تُستخدم أيضًا في تطبيقات أخرى مثل، معالجة التربة والتخلُّص من المعادن الثقيلة وتثبيت التربة الرملية. وفي الآونة الأخيرة، استُخدِمت رواسب الكالسيوم الناتجة عن البكتيريا في تطبيقات هندسية متعددة ضمن تقنية تُعرف باسم «الترسيب الميكروبي المُحفَّز لكربونات الكالسيوم» (Microbial-Induced Calcite Precipitation, MICP) وقد أُثبت أن لهذه التقنية دورًا فعَّالًا في تعزيز متانة الخرسانة ومعالجة تشققاتها.

مقارنةً بالخرسانة التقليدية، تتميز الخرسانة المستدامة بانخفاض ملحوظ في استهلاك الطاقة أثناء عملية التصنيع، وبانبعاث كميات أقل بكثير من غاز ثاني أكسيد الكربون. ويظل الإسمنت البورتلاندي في الوقت الحاضر المكوِّن الأكثر استخدامًا في إنتاج الخرسانة، غير أن العديد من المناطق الجغرافية تشهد نضوبًا متسارعًا في موارد الحجر الجيري الضروري لإنتاجه، فيما تواجه المدن الحضرية الكبرى تراجعًا في توافر المواد الخام المخصصة للاستخدام ركامًا لإنتاج الإسمنت. وفي ضوء ذلك، تفرض متطلبات الاستدامة على قطاع التشييد تبني رؤية شاملة تراعي دورة الحياة الكاملة للمنشآت ابتداءً من مرحلة التشييد مرورًا بأعمال الصيانة ووصولًا إلى الهدم وإعادة التدوير.

تُستخدم عدة أنواع من البكتيريا من بينها (عصويات سوبتيليس Bacillus subtilis) و (عصويات سيريوس Bacillus cereus) و(العصوية

الكرويــة Bacillus sphaericus)، في عمليــات الترســيب المعدنــي مســتفيدة مــن قدرتهــا عــلى التكيــف مــع البيئــة الخرســانية عاليــة القلويــة بفضــل خصائصهــا المحبــة للقلويــات. وتعمــل البكتيريــا المحللــة لليوريا على ترســيب كربونــات الكالســيوم مــن خــلال إنتــاج إنزيــم اليوريــاز، الــذي يُحفّــز تحلــل اليوريــا إلى ثانــي أكســيد الكربــون والأمونيــا مــا يــؤدي إلى رفــع قيمــة الأس الهيدروجينــي (pH) وزيــادة تركيــز الكربونــات في الوســط البكتــيري. وقــد اســتُخدمت أعمــدة الرمــل وســطًا لترســيب كربونــات الكالســيوم باســتخدام تقنيــة الترســيب الحيــوي (Biodeposition) في تطبيقــات تشــمل تثبيت التربة ومعالجــة التشــققات الخرســانية. وتمثــل تقنيــة الترســيب الميكروبــي المُحفَّــز لكربونــات الكالســيوم (Microbially Induced Calcite Precipitation – MICP) منهجًــا مبتكــرًا لمعالجــة التشــققات وضمــان اســتمرارية الأداء الإنشــائي للخرســانة. وقــد أظهــرت دراســة لتضمــين بكتيريــا عصويــات ســبتيليس في الخلطــات الخرســانية تحســنًا ملحوظًــا في مقاومــة الضغــط إلى جانــب اكتســاب خاصيــة المعالجــة الذاتيــة الناتجــة عــن الترســيب المســتمر للكالســيت ($CaCO_3$). ويتحكــم في تكــوُّن الكالســيت أربــع متغــيرات أساســية هــي: قيمــة الأس الهيدروجينــي (pH)، وتركيــز الكالســيوم وتركيــز الكربــون غــير العضــوي الذائــب ووجــود مواقــع النــواة البلوريــة. وأجــرى ســلمسي ومصطفــى نجــاد دراســة لتقييــم تأثــير البكتيريــا في تحســين مقاومــة الإســمنت والمــلاط باســتخدام تراكيــز مختلفــة مــن البكتيريــا اللاهوائيــة مــن نــوع (الشــيوانيلا Shewanella)، ولاحظــا تحســنًا في المقاومــة في العينــات التــي اختبراهــا.

أُجريــت دراســة بحثيــة بهــدف تقييــم تأثــير أنــواع متعــددة مــن الكائنــات الحيــة الدقيقــة وخصائصهــا وكفاءتهــا، إلى جانــب تقديــم مراجعــة شــاملة لاســتخدامات الخرســانة الميكروبيــة. وقــد اســتُخدِمَ في هــذه الدراســة نوعــان مــن البكتيريــا همــا سبوروسارشــينا باســتيوري

Sporosarcina pasteurii وعصويات سبتيليسBacillus subtilis لمتابعة أثرهما في نفاذية الخرسانة ومعدلات التآكل والمقاومة الكهربائية النوعية، وذلك ضمن تصميمين مختلفين للخلطة الخرسانية. وأظهرت النتائج انخفاض معدلات امتصاص الماء ونفاذية الكلوريدات، وثبت أن بكتيريا سبوروسارشينا باستيوري Sporosarcina pasteurii تُحسِّن كلًا من مقاومة الضغط والمقاومة الكهربائية للخرسانة. وركَّزت الأبحاث على أنواع أخرى من البكتيريا المحللة لليوريا مثل العصوية الكروية Bacillus sphaericus وعصويات ميقاتيريومBacillus megaterium المعروفة بقدرتها العالية على مقاومة البيئات القلوية وامتلاكها خاصية تكوين الأبواغ التي تُمكِّنها من البقاء في ظروف انعدام المغذيات. ودُرِسَ كذلك تأثير مركبات الكالسيوم المختلفة – وهي أسيتات الكالسيوم ونترات الكالسيوم، وكلوريد الكالسيوم، وأكسيد الكالسيوم – في عملية الترسيب الميكروبي المُحفَّز للكالسيت[1] (MICP) باستخدام عصويات ألكالينيتريليكوس Bacillus alkalinitrilicus وعصويات سبتيليس Bacillus subtilis. ودُرِسَت النسبة المثلى لتحسين مقاومة الضغط باستعمال عصويات سبتيليس Bacillus subtilis مع إضافة مصادر خارجية للكالسيوم أو بدونها. وقد بيَّنت الأبحاث السابقة بوضوح أن البكتيريا توظِّف آليات التحلل اليوري ونزع النترات، والتحويل الأيضي للمركبات العضوية الداخلة في تكوين الخرسانة الميكروبية وفقًا لآلية MICP. وتطرح الدراسة الحالية بحثًا لقياس تأثير بكتيريا عصويات سبتيليس Bacillus subtilis وعصويات سيريوس Bacillus cereus في الخصائص الميكانيكية للخرسانة وقدرتها في المعالجة الذاتية للتشققات مقارنةً بالخرسانة التقليدية.

(1) ملاحظة المترجم: لم أجد شرحاً للآلية ضمن صفحات الكتاب، والمتاح في الأوساط العربية يصلح لإثبات التداول لا شرحاً علمياً. آلية الترسيب الميكروبي المحفز للكالسيت تقوم على تحفيز نشاط بكتيري يؤدي لتوليد أيونات الكربونات في وسط قلوي، ثم تتحد مع أيونات الكالسيوم لتكوين كربونات الكالسيوم التي تترسب داخل الشقوق والمسامات، لتسهم في سدها وتحسين خواص الخرسانة.

في السنوات اللاحقة، بدأ عدد من الباحثين العمل على هذا الموضوع حيث انطلقت الأبحاث حول الخرسانة ذاتية المعالجة (SHC) في عام 2006. وبعد إجراء تجارب مخبرية موسعة، اخْتيرت بكتيريا من جنس العصويات Bacillus بوصفها العامل الحيوي الأمثل لمعالجة الخرسانة ذاتيًّا.

7.2 المواد

7.2.1 الإسمنت، والبحص، والماء

استُخدم في هذه الدراسة إسمنت بورتلاندي عادي من الدرجة 43 وفقًا للمواصفات القياسية الهندية (IS 8112:1989) وتُعرض الخصائص الفيزيائية للإسمنت في الجدول 7.1. أما البحص الناعم، فكان بحد أقصى لحجم الحبيبات يبلغ 4.75 ملم في حين استُخدم الركام الخشن النافذ من منخل 20 ملم والمحتجز على منخل 12.5 ملم. وبلغت الكثافة النوعية للبحص الناعم والخشن 2.66 و2.74 على التوالي. واستخدم الماء المقطر في عمليات الخلط ومعالجة العينات وكذلك في تحضير محاليل الوسط المغذي[1] (Nutrient Broth) لسلالات البكتيريا إضافةً إلى صب ومعالجة العينات الميكروبية. وأُعِدَّت خلطات خرسانية قياسية من درجة M25.

7.2.2 اختيار البكتيريا

باستخدام عملية التمعدن الحيوي، أتاحت كائنات حية دقيقة تكوين الخرسانة الميكروبية مثل البكتيريا من جنس العصويات (Bacillus). وفي هذه الدراسة اخْتِيْرَ نوعان من هذه البكتيريا هما العصوية الرقيقة

(1) ملاحظة المترجم: يرد مصطلح **Nutrient Broth** في المصادر العربية بصيغ مثل: المرق الغذائي، والمرق المغذي، والوسط الغذائي السائل. وقد اختير هنا تعبير الوسط المغذي لملاءمته السياق العلمي وسلامته الأسلوبية.

(Bacillus subtilis) والعصوية الشمعية (Bacillus cereus) والمستحصلة من شركة مانيذارما الحيوية المحدودة (Manidharma Biotech Private Limited) في مدينة تشيناي. وتتسم هاتان السلالاتان بكونها عصوية الشكل موجبة لصبغة غرام، وقادرة على تحمُّل الظروف البيئية القاسية، بما في ذلك البيئات عالية القلوية في الخرسانة إذ إن تكوُّن كربونات الكالسيوم ($CaCO_3$) يُعد مؤشرًا على نشاط البكتيريا. حُفظت المزارع البكتيرية على في أوساط الأجار المغذي وأعيدت زراعتها في وسط معقم كل 20 يومًا لضمان بقائها نشطة.

الجدول 7.1 الخصائص الفيزيائية للإسمنت

الخاصية	القيمة
الكثافة النوعية	3.15
درجة القوام (%)	33
زمن الشك الابتدائي (دقيقة)	87
زمن الشك النهائي (دقيقة)	575

7.2.3 تحضير المحلول البكتيري

زُرِعَت بكتيريا العصوية الرقيقة(Bacillus subtilis) والعصوية الشمعية (Bacillus cereus) في وسط غذائي من نوع Lysogeny Broth (LB) وهو وسط غني بالعناصر الغذائية ويُستخدم أساسًا لنمو البكتيريا. لُقِّحَت السلالاتان في هذا الوسط لزيادة معدل نموهما. بعد ذلك، أُضيف 12.5 غرامًا من وسط LB إلى دورق مخروطي سعة 250 مل يحتوي على ماء مقطر. ويتكون وسط LB من 10 غرامات من التربتون[1] و5 جم من مستخلص الخميرة، و10 جم من كلوريد

(1) ملاحظة المترجم: يُتداول هذا المصطلح عربيًا بصيغ مثل: التربتون، والتريبتون، ويُشرح أحيانًا بأنه مهضوم كازين إنزيمي أو هاضم الكازين. وقد اختير هنا لفظ التربتون لشيوعه في الاستعمال المخبري

الصوديوم لكل لتر من الوسط. ثم أُغلِقت فوهة الدورق بسدادة قطنية وغُطِّيت بورق ثم رُبطت بإحكام باستخدام رباط مطاطي لضمان إحكام الغلق. بعد ذلك، عُقِّمَ المحلول في جهاز الأوتوكلاف[1] لمدة تتراوح بين 10 و20 دقيقة مع الحفاظ على درجة حرارة التعقيم عند 120°م لمدة 20 دقيقة ما أسفر عن محلول نقي خالٍ من الملوثات وبلون برتقالي صافٍ. أُضيفت البكتيريا إلى الوسط باستخدام حلقة التلقيح ثم تُرِكَ المحلول دون تحريك لمدة 24 ساعة في حجرة التدفق الصفائحي (Laminar Flow Chamber). ولوحظ أن المحلول البكتيري أصبح عكرًا وهو ما دلَّ على نمو البكتيريا بخلاف العينة الضابطة التي لم تُظهر تغيُّرًا مماثلًا. وبعد مرور 20 يومًا، أعيدت زراعة البكتيريا في وسط معقم جديد. ويوضح الشكل 7.1 خطوات تحضير المحلول البكتيري.

7.2.4 تحضير الخرسانة البكتيرية

7.2.4.1 تصميم الخلطة

يوضح الجدول 7.2 متطلبات المواد لكلٍّ من الخرسانة التقليدية والخرسانة البكتيرية. وقد اختِيرت أربع خلطات خرسانية لدراسة خصائص المعالجة الذاتية للخرسانة مع الحفاظ على نفس نسب الإسمنت والرمل والبحص الخشن والماء في جميع الخلطات. تمثل الخلطة الأولى نموذج الخرسانة الاسمية دون إضافة أي محلول بكتيري. أما الخلطة الثانية فقد أُضيف إلى الخلطة الأولى 250 مل من محلول بكتيريا العصويات الشمعية (Bacillus cereus). وبالمثل أُضيف 250 مل

(1) ملاحظة المترجم: يَرِد هذا الجهاز في المصادر العربية بصيغ مثل: الأوتوكلاف، وجهاز التعقيم بالبخار، وجهاز التعقيم بالبخار المضغوط، وأحيانًا الموصدة. وقد أُبقيت هنا صيغة الأوتوكلاف لكونها الأكثر شيوعًا في الاستعمال التقني

مـن محلـول بكتيريـا العصويـات الرقيقـة (Bacillus subtilis) إلى الخلطـة الأولى لتكويـن الخلطـة الثالثـة. وأخـيرًا، أُضيـف 250 مـل مـن محلـول بكتـيري يحتـوي عـلى كلٍّ مـن الجنسـين مـن البكتيريـا إلى الخلطـة الأولى لتكويـن الخلطـة الرابعـة.

الشـكل 7.1 تحضـير المحلـول البكتـيري: (أ) محلـول بكتـيري مُعـاد زراعتـه مـن Bacillus subtilis، (ب) محلـول بكتـيري مُعـاد زراعتـه مـن Bacillus cereus

الجدول 7.2 تصميم الخلطة للخرسانة الاسمية والبكتيرية

المواد	الخرسانة الاسمية (الخلطة 1)	مع العصويات الشمعية (الخلطة 2)	مع العصويات الرقيقة (الخلطة 3)	مع النوعين (الخلطة 4)
الإسمنت (كغ)	345	345	345	345
الرمل (كغ)	750	750	750	750
الركام الخشن (كغ)	1158	1158	1158	1158
الماء ($م^3$)	0.186	0.186	0.186	0.186
المحلول البكتيري المضاف	لا يوجد	Bacillus cereus	Bacillus subtilis	Bacillus subtilis + Bacillus cereus
كمية المحلول البكتيري (مل)	لا يوجد	250	250	250

7.2.4.2 الخلط

خُلِطَتْ الخرسانة باستخدام خلاط كهربائي ميكانيكي. ووُزِنَت الكميات المطلوبة من الإسمنت والركام الناعم والركام الخشن ورُتِّبَت في طبقات متجانسة ثم خُلِطَت خلطًا جافًّا للحصول على مزيج متجانس. بعد ذلك، أُضيفت الكمية المحددة من المحلول البكتيري مع الماء، واستمر الخلط لمدة تصل إلى 5 دقائق لضمان تحقيق التجانس التام. استُخدمت الخرسانة الطازجة مباشرة بعد ذلك لاختبار قابلية التشغيل قبل عملية الصب.

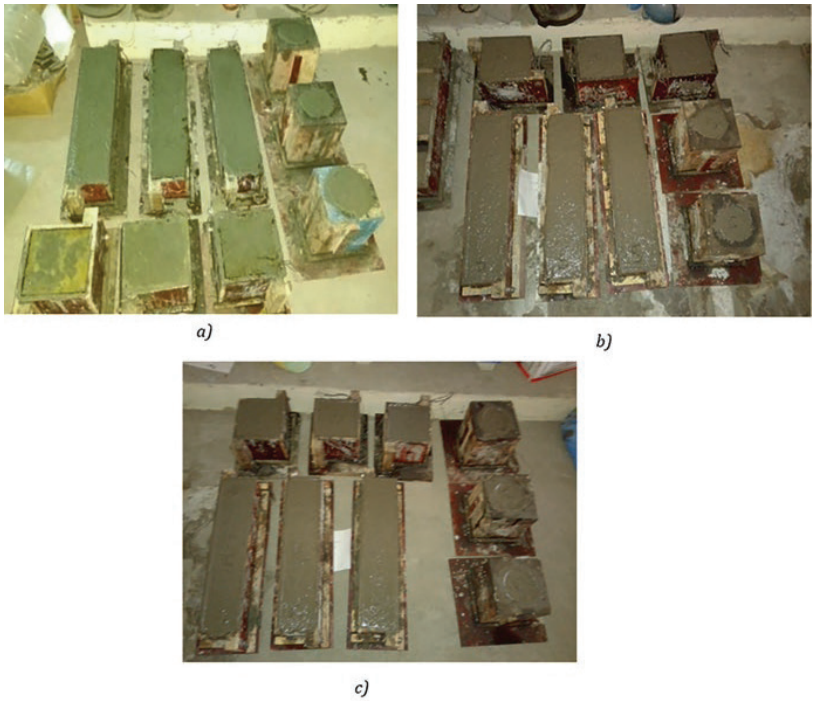
7.2.4.3 الصب

استُخدمت قوالب حديدية بأحجام مختلفة لعملية صب عينات الخرسانة المخصَّصة لاختبارات مقاومة الضغط ومقاومة الشد الانشطاري ومقاومة لانحناء. في البداية جرى فحص القوالب للتأكد من ثبات الوصلات ثم دُهنت بالزيت لتسهيل فكها. صُبَّت الخرسانة الطازجة المُحضَّرة في قوالب المكعبات والأسطوانات والمنشورية بأبعاد 150 × 150 × 150 مم، و150 × 300 مم، و100 × 100 × 500 مم على التوالي. ثم دُمِكت يدويًّا على ثلاث طبقات. وتُعرض العينات المُحضَّرة في الشكل 7.2.

7.3 التحقيق التجريبي

أُجريت سلسلة من التجارب لتحديد قيمة الهبوط، (ASTM-C143, 2000) على مقاومة الضغط (ASTM-C873, 2000 و ASTM-C943, 2000) ومقاومة الشد الانشطاري (ASTM-C496/C496M, 2000) ومقاومة الانحناء (ASTM-D790, 2000) لأنواع مختلفة من الخلطات سواء الخرسانة التقليدية أو الخرسانة البكتيرية مع فترات معالجة

بلغـــت 7 و14 و28 يومًـــا. ويوضِّـــح الشـــكل 7.3 تجهيـــزات الاختبـــارات التجريبيـــة. حيـــث جـــرى اختبـــار ثـــلاث عينـــات لـــكل تجربـــة لضمـــان دقـــة النتائـــج وقابليتهـــا للتكـــرار.



شـــكل 7.2 عمليـــة صـــب عينـــات الخرســـانة: (أ) عينـــات خرســـانية تحتـــوي عـــلى عصويـــات ســـبتيليس Bacillus subtilis، (ب) عينـــات خرســـانية تحتـــوي عـــلى عصويـــات ســـيريوس Bacillus cereus، (ج) عينـــات خرســـانية تحتـــوي عـــلى كلٍّ مـــن النوعـــين

7.4 النتائج والمناقشة

7.4.1 قيمة الهبوط

اســـتُخدم اختبـــار مخـــروط الهبـــوط لتحديـــد قابليـــة اســـتخدام خلطـــة الخرســـانة. وكان الشـــكل المطلـــوب للهبـــوط هـــو الهبـــوط الحقيقـــي بخـــلاف الهبـــوط القـــصّي أو الهبـــوط الانهيـــاري. وكلمـــا انخفضـــت قيمـــة الهبـــوط، كانـــت الخلطـــة غـــير قابلـــة للاســـتخدام؛ فالخرســـانة منخفضـــة الهبـــوط تكون

صلبة وجافة ويصعب التعامل معها، في حين أن الزيادة الكبيرة في قيمة الهبوط غالبًا ما تنتج عن ارتفاع محتوى الماء مما يؤثر في نهاية المطاف في مقاومة الخرسانة وقابليتها للاستخدام. ووفقًا للمواصفة الهندية IS 456:2000، تتراوح قيمة الهبوط بين 50 مم و100 مم في الكمرات والبلاطات الخرسانية المسلحة العادية. اختيرت أربع خلطات خرسانية وهي المزيج 1 والمزيج 2 والمزيج 3 والمزيج 4. حيث بلغت قيم الهبوط على التوالي 90 مم، 85 مم، 80 مم، و70 مم (الجدول 7.3). ووفقًا للمواصفة ASTM-C143، فإن قيمة الهبوط للخرسانة المستخدمة في الأعمال الإنشائية الأساسية للكمرات والبلاطات تتراوح بين 50 و100 مم. ويوضِّح الشكل 7.4 عملية قياس قيمة الهبوط.

الشكل 7.3 ترتيبات الاختبارات العملية: (أ) اختبار مقاومة الضغط، (ب) اختبار مقاومة الشد الانشطاري، (ج) اختبار مقاومة الانحناء

أدَّى إضافة 250 مل من بكتيريا العصوية الرقيقة(Bacillus subtilis) إلى الخلطة الخرسانية الاسمية إلى خفض قيمة الهبوط بنسبة 11.11% في حين أن إضافة 250 مل من بكتيريا العصوية الشمعية(Bacillus cereus) إلى الخلطة نفسها خفَّضت قيمة الهبوط بنسبة 5.55%. وقد أظهرت نتائج المرق البكتيري لبكتيريا العصوية الرقيقة(Bacillus subtilis) قابلية هبوط أفضل مقارنة ببكتيريا العصوية الشمعية(Bacillus cereus) . علاوة على ذلك، فإن إضافة 250 مل من المرق البكتيري المحتوي على مزيج من العصويات الرقيقة(Bacillus subtilis) والعصويات الشمعية(Bacillus cereus) إلى الخلطة الاسمية أدَّت إلى خفض كبير في قيمة الهبوط بنسبة 22.22%. وبناءً على النتائج، فإن التأثير المشترك للبكتيريا المختارة أسهم في إنتاج قيمة هبوط فعَّالة يمكن توظيفها بسرعة وبشكل اقتصادي. وفي حالة المزيج الرابع، كانت درجة تجانس الخرسانة الطازجة قبل التصلب جيدة، وكانت كمية المياه المطلوبة أقل مقارنة بالسيناريوهات الثلاثة الأخرى، وهو ما قد يحقق نتائج مستدامة وموفرة للتكلفة. ومن المعلوم أن انخفاض قيمة الهبوط يجعل الخرسانة أكثر صلابة وأقل قابلية للتشغيل، ولكن يجب ألا يكون الانخفاض مفرطًا حتى لا تتعذر عملية التنفيذ. وقد تميَّزَ المزيج الرابع بقوة ومتانة أعلى من باقي الحالات؛ إذ من المعروف أن زيادة قيمة الهبوط تؤدي عادة إلى انخفاض القوة والمتانة.

الشكل 7.4 قياس قيمة الهبوط الحقيقي

الجدول 7.3 قيمة الهبوط لأنواع خلطات الخرسانة المختلفة

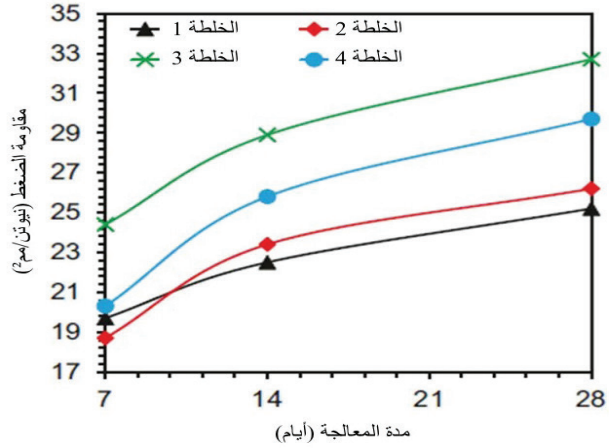
خليط الخرسانة	قيمة الهبوط (مم)
الخليط 1	90
الخليط 2	85
الخليط 3	80
الخليط 4	70

7.4.2 مقاومة الضغط

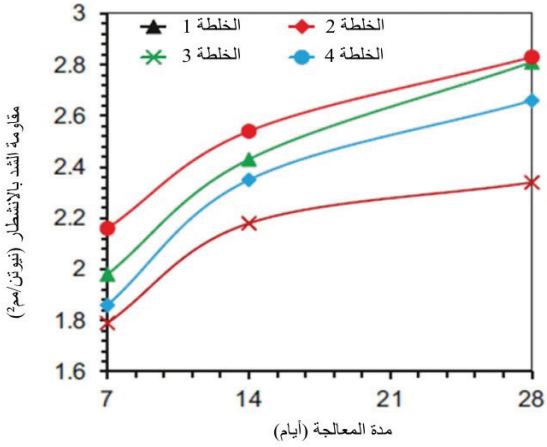
تُعَدُّ مقاومة الضغط من المؤشرات الأساسية لتقييم أداء الخرسانة. ويعرض الشكل 7.5 التأثيرات الفردية والمشتركة لكلا النوعين من البكتيريا على مقاومة الضغط في الخرسانة التقليدية. ويلاحظ أن بكتيريا العصوية الرقيقة (Bacillus subtilis) حققت نتائج أفضل من بكتيريا العصوية الشمعية(Bacillus cereus)؛ إذ رفعت مقاومة الضغط للخرسانة التقليدية من 25 ميغا باسكال إلى 33 ميغا باسكال أي بزيادة قدرها 29.8% في حين أن بكتيريا العصوية الشمعية (Bacillus cereus) سجلت زيادة محدودة بنسبة 4% في مقاومة الضغط بعد 28 يومًا من المعالجة.

أظهر التأثير المشترك لكلا النوعين من البكتيريا على الخرسانة التقليدية مقاومة ضغط أفضل بلغت 29.7 ميغا باسكال (أي بزيادة قدرها 17.9%) مقارنةً بالخرسانة المزوجة ببكتيريا العصوية الشمعية (Bacillus cereus) بعد 28 يومًا من المعالجة. إلا أن هذه القيمة كانت أقل قليلًا (بانخفاض قدره 9.17%) من مقاومة الضغط لعينة المزيج الثالث. ومن خلال هذه الدراسة، يتضح أن بكتيريا العصوية الرقيقة (Bacillus subtilis) منفردةً حققت مقاومة أعلى من المزج بين عصويات الرقيقة والعصويات الشمعية. فقد رفعت بكتيريا العصويات الرقيقة (Bacillus subtilis) مقاومة الخرسانة بشكل ملحوظ وسرَّعت من التئام الشقوق الدقيقة في العينات. ويُظهر الشكل

7.5 أن مقاومة الضغط بعد 7 أيام في عينات المزيج الثالث وبقية الحالات شهدت فروقًا واضحة وتكرر ذلك بعد 28 يومًا. وتُعد مقاومة الضغط عاملًا جوهريًّا لتحمل الأحمال الأكبر على المدى الطويل؛ إذ إن إضافة 250 مل من محلول بكتيريا العصويات الرقيقة (Bacillus subtilis) إلى الخرسانة القياسية يُحسِّن من استدامة المنشآت مما يتيح تقليل كمية الخرسانة وحديد التسليح المستعملة مع الحفاظ على نفس مستوى القوة والمتانة.



شكل 7.5 نتائج اختبار مقاومة الضغط



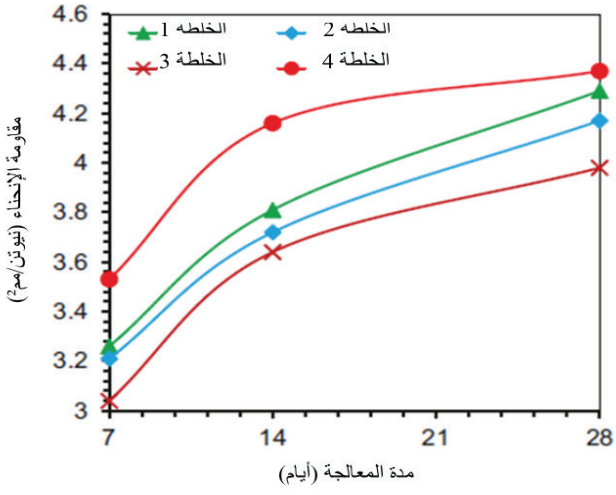
شكل 7.6 نتائج اختبار مقاومة الشد الانشطاري

7.4.3 مقاومة الشد الانشطاري

بغض النظر عن درجة الخرسانة، فإن سلوكها في مقاومة الشد يظل ضعيفًا إلا أنها تمتلك قدرًا من قوة الشد لا يصبح ملحوظًا إلا عند مقارنته بمقاومة الضغط. في هذه الدراسة، اختُبِرَ سلوك الشد في الخرسانة لأربعة أنواع مختارة من الخلطات (انظر الشكل 7.6). أظهرت الخلطة الخرسانية العادية (الخلطة 1) مقاومة شد انشطاري أفضل مقارنةً بالخلطات المحتوية على المرق البكتيري منفردًا (الخلطتان 2 و3). بعد 28 يومًا، بلغت مقاومة الشد الانشطاري للخلطات 1 و2 و3 و4 على التوالي: 2.81 ميغا باسكال، 2.66 ميغا باسكال، 2.34 ميغا باسكال، و2.83 ميغا باسكال. في الواقع، أدت إضافة بكتيريا العصويات الرقيقة والعصويات الشمعية (Bacillus subtilis + Bacillus cereus) بشكل منفرد إلى انخفاض مقاومة الشد الانشطاري للخرسانة بينما أظهرت الإضافة المشتركة للبكتيريا تحسنًا في المقاومة؛ إذ أزالت الفارق الكبير بين الخلطتين 1 و4. كان الفارق ضئيلاً من حيث القيمة بين أعلى مقاومة شد انشطاري (الخلطة 4) وبقية الحالات الثلاث، ولكنه أكثر وضوحًا من حيث النسبة المئوية. فقد بلغ التغير النسبي بين الخلطتين 4 و1 حوالي 0.71%، بينما بلغ بين الخلطتين 4 و2 نحو 6.39%. أما الفرق مع الخلطة 3 فكان كبيرًا، حيث وصل إلى 20.94% وهو ما يعد مؤشرًا جيدًا على الاستدامة. ومن حيث مقاومة الخرسانة أظهرت بكتيريا العصويات الرقيقة (Bacillus subtilis) قدرة أكبر على تحسين مقاومة الضغط لكنها أنتجت مقاومة شد انشطاري أقل مقارنة ببقية الحالات.

7.4.4 مقاومة الانحناء

حُـدِّدت مقاومـة الانحنـاء للخرسـانة مـن خـلال إجـراء اختبـارات مقاومة الانحنـاء لأربـع خلطـات مختلفـة. وقـد اتبعـت قيـم مقاومـة الانحنـاء المسـتخلصة نفـس النمـط الـذي لوحـظ في مقاومـة الشـد الانشـطاري (انظر الشـكل 7.7). ومـن بـين الخلطـات الأربـع، أظهـرت الخلطـة المحتويـة عـلى المزيـج البكتـيري مـن العصويـات الرقيقـة والعصويـات الشـمعية (Bacillus subtilis + Bacillus cereus) (الخلطـة 4) قيمـة جيـدة لمقاومـة الانحنـاء بلغـت 4.37 ميغـا باسـكال بعـد 28 يومًـا. وتبـين أن الخلطـة 1 حققـت مقاومـة انحنـاء قدرهـا 4.29 ميغـا باسـكال بعـد 28 يومًـا مـع زيـادة طفيفـة في المقاومـة بـين الخليطتـين 1 و4 بلغـت نسـبتها 1.86% وهـي زيـادة غـير كبـيرة. ومـع ذلـك، أظهـرت مقاومـة الانحنـاء عنـد عمـر 7 أيـام فروقًـا متوسـطة بلغـت 3.26 ميغـا باسـكال و3.53 ميغـا باسـكال. أمـا الإضافـة الفرديـة للمـرق البكتـيري، فقـد أضعفـت سـلوك الخرسـانة في مقاومـة الانحنـاء وهـو مـا ظهـر جليًّـا في الخلطتـين 2 و3 بقيـم مقاومـة بلغـت 4.17 ميغـا باسـكال و3.98 ميغـا باسـكال عـلى التـوالي.



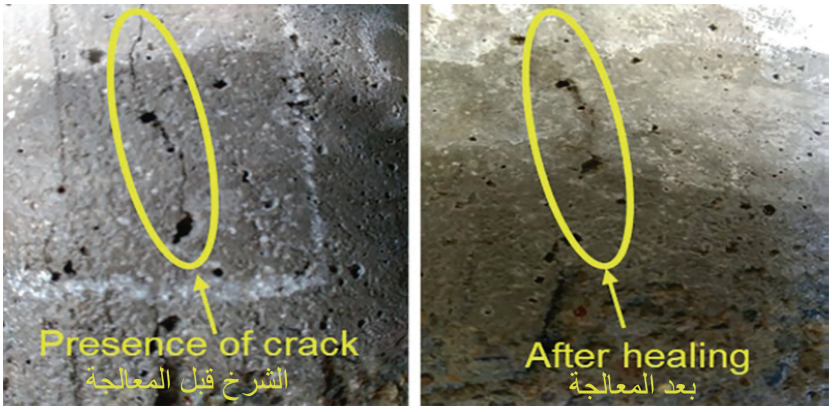
الشكل 7.7 نتائج اختبار مقاومة الانحناء

7.4.5 الخواص الذاتية الالتئام للخرسانة البكتيرية المركبة

تُعرف الخرسانة القادرة على الترميم الذاتي أو إصلاح التشققات بذاتها بالخرسانة ذاتية الالتئام أو ذاتية الإصلاح؛ إذ لا تقتصر وظيفتها على إغلاق الشقوق فحسب، بل تمتد لتشمل استعادة الخواص الميكانيكية للمنشأة بشكل جزئي أو كامل. وغالبًا ما تتكوَّن التشققات السطحية في الخرسانة نتيجة انخفاض مقاومتها للشد مقارنة بمواد البناء الأخرى. ونظرًا لقدرتها على السماح بمرور السوائل والغازات التي قد تحمل مركبات سامة، فإن هذه التشققات تُسهم في تدهور متانة الخرسانة. وفي حال امتداد الشقوق الدقيقة إلى حديد التسليح، فإن الضرر لن يقتصر على الخرسانة وحدها بل سيجعل حديد التسليح نفسه عرضة للتلف.

ومع ذلك، ما زالت الخرسانة ذاتية الالتئام في مراحلها الأولى من التطوير وتركِّز الدراسة الحالية على معالجة الشقوق الشدِّية في الخرسانة. في هذه الدراسة، روقبت الشقوق التي تكوَّنت في الخلطة رقم 4 بعد اختبار مقاومة الضغط بهدف تقييم خاصيتها الذاتية في الالتئام وذلك من خلال معالجة السطح المتشقق لمدة سبعة أيام. وقد تبيَّن أن الجمع بين نوعي البكتيريا العصويات الرقيقة والعصويات الشمعية (Bacillus subtilis + Bacillus cereus) عمل بصفته عاملًا ذاتيَّ الالتئام لإيقاف الشقوق الدقيقة. فعند تزويد الخرسانة البكتيرية بالماء تسلَّل عبر الشقوق مُهَيِئًا الظروف للبكتيريا الموجودة في الخرسانة لترسيب الكالسيت ما أدى إلى ملء تلك الشقوق. ويُظهر الشكل 7.8 أثر ترسيب الكالسيت في الملء قبل الالتئام وبعده؛ حيث يوضِّح الشكل شقًّا دقيقًا بعد إجراء اختبار مقاومة الضغط على الخلطة رقم 4 وهو ما يشير إلى فشل كتلة الخرسانة بعد بلوغها أقصى قوة لها. وقد ساهمت إضافة العصويات الرقيقة والعصويات الشمعية (Bacillus subtilis + Bacillus

cereus) في معالجة هذه الشقوق الدقيقة تلقائيًّا. وكشفت الدراسة أن الالتئام لم يقتصر على الشقوق الدقيقة بل شمل أيضًا تحسن قيمة الهطول ومقاومة الشد الانشطاري ومقاومة الانحناء للخرسانة. وتجدر الإشارة إلى أن الإجهادات الحرارية والأحمال المفاجئة تُعد من أبرز أسباب تكوُّن الشقوق الدقيقة في المنشآت إلا أن سيناريو الخلطة رقم 4 مثَّل في مثل هذه الحالات الخيار الأمثل والأكثر استدامة.



الشكل 7.8 الخرسانة البكتيرية المركبة قبل الالتئام وبعده

7.5 الاستنتاجات

هدفت هذه الدراسة إلى فحص قدرة الخرسانة على لَأْمِ الشقوق الدقيقة من خلال إضافة محلول بكتيري إلى الخلطة الخرسانية القياسية. استخدمت أربع خلطات خرسانية هي: الخرسانة الاسمية، والخرسانة مع بكتيريا العصويات الشمعية (Bacillus cereus) والخرسانة مع بكتيريا العصويات الرقيقة(Bacillus subtilis) وخرسانة مضاف إليها خليط من الجنسين معًا. بلغت كمية البكتيريا المضافة إلى الخلطة الاسمية في الخلطات 2–4؛ أي مقدار 250 مل. أُجريت اختبارات مخروط الهبوط ومقاومة الضغط والشد الانشطاري ومقاومة الانحناء لتحديد الخصائص

الميكانيكية للخلطات. وقد بلغت قِيَم الهبوط 90 مم، و85 مم، و80 مم، و70 مم على التوالي. ويُظهر الهبوط الجيد عادةً قيمة أقل مما يعكس قابلية توظيف الخرسانة. ومع ذلك، قدَّمت الخلطة 4 أفضل قيمة هبوط بفارق 22.22% عن الخلطة الاسمية. في اختبار مقاومة الضغط. وحققت الخلطة 3 أعلى مقاومة ضغط بزيادة قدرها 29.7% عن الخلطة العادية، بينما جاءت مقاومة الخلطة 4 أقل قليلًا من الخلطة 3. أما في اختبار الشد الانشطاري، فقد أظهرت الخلطة 4 أداءً ممتازًا، إلا أن الفارق بينها وبين الخلطة 1 كان طفيفًا؛ ولم يكن التأثير المشترك للبكتيريا كبيرًا على مقاومة الشد الانشطاري. وسجَّل اختبار مقاومة الانحناء اتجاهًا مشابهًا. ثبتت الخلطة 4 المحتوية على كلاً من بكتيريا العصويات الرقيقة والعصويات الشمعية (Bacillus subtilis + Bacillus cereus) قدرتها على لَأْمِ الشقوق الدقيقة في الخرسانة؛ حيث تسرب الماء عبر الشقوق مما أتاح للبكتيريا الموجودة في الخرسانة ترسيب الكالسيت وبالتالي ملء الشقوق. وقد أسهمت هذه الخلطات في تقليل الحاجة للتدخل الخارجي للكشف عن الأضرار الداخلية وإصلاحها (مثل الشقوق) وهو ما يُعَد فائدة كبيرة لقطاع البناء. وساعدت في الحد من تآكل حديد التسليح وتدهور الخرسانة وخفض التكاليف وتحسين المتانة مع إمكانية بقاء هذه الخلطات لعقود أو قرون. وتكمن الميزة الأهم في أن الخرسانة ذاتية الالتئام لا تتطلب استبدال السطح الخرساني خلال فترة خدمته فضلًا عن تقليل احتياجات الصيانة مقارنة بالخرسانة التقليدية حيث يجب عادةً ملء الشقوق وإغلاقها. فقد حسَّنت هذه الخرسانة من مقاومة الضغط؛ مما يمثل ميزة كبيرة للقطاع الصناعي أثناء عمليات البناء. وإلى جانب ذلك، يمكنها أن تسهم في معالجة أزمة البنية التحتية عبر خفض

التكاليف البيئية المرتبطة بأعمال الصيانة المتكررة مما يبرهن على أهميتها بصفتها موردًا مستدامًا مع تحقيق فوائد اجتماعية واقتصادية وبيئية من خلال تقليل أو إلغاء الحاجة للصيانة أو إطالة عمر المنشآت مما يحد من الاضطرابات ويخفض التكاليف واستهلاك المواد. وبالاعتماد على النهج المتَّبع في هذه الدراسة، يمكن توسيع نطاق العمل مستقبلًا لتقييم الخصائص الميكانيكية للخرسانة في وحدات أكبر مثل الكمرات والأعمدة والبلاطات تحت تأثير أحمال متنوعة.

المراجع

1. **Achal, V., & Mukherjee, A**. (2015). A review of microbial precipitation for sustainable construction. Construction and Building Materials, 93, 1224–1235. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.051
2. **Achal, V., & Pan, X**. (2014). Influence of calcium sources on microbially induced calcium carbonate precipitation by Bacillus sp. CR2. Applied Biochemistry and Biotechnology, 173(1), 307–317. https://doi.org/10.1007/s12010-014-0842-1
3. **Andalib, R., et al**. (2016). Optimum concentration of Bacillus megaterium for strengthening structural concrete. Construction and Building Materials, 118, 180–193. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.142
4. **Archana, G., Dhodapkar, R., & Kumar, A**. (2016). Offline solid-phase extraction for preconcentration of pharmaceuticals and personal care products in environmental water and their simultaneous determination using the reversed phase high-performance liquid chromatography method. Environmental Monitoring and Assessment, 188(9). https://doi.org/10.1007/s10661-016-5510-1
5. **ASTM C143**. (2000). Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete.
6. **ASTM C496/C496M**. (2000). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens; strength and density of preplaced-aggregate concrete in the laboratory.
7. **ASTM C873**. (2000). Standard test method for compressive strength of concrete cylinders cast in place in cylindrical molds.
8. **ASTM C943**. (2000). Standard practice for making test cylinders and prisms for determining strength and density of preplaced-aggregate concrete in the laboratory.
9. **ASTM D790**. (2000). Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials.
10. **Aytekin, B., Mardani, A., & Yazıcı, Ş**. (2023). State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties. Construction and Building Materials, 378, 131198.

11. **Bang, S. S., Galinat, J. K., & Ramakrishnan, V.** (2001). Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized Bacillus pasteurii. Enzyme and Microbial Technology, 28(4), 404–409. https://doi.org/10.1016/S0141-0229(00)00348-3
12. **Bang, S. S., Lippert, J. J., Yerra, U., Mulukutla, S., & Ramakrishnan, V.** (2010). Microbial calcite, a bio-based smart nanomaterial in concrete remediation. International Journal of Smart and Nano Materials, 1(1), 28–39. https://doi.org/10.1080/19475411003593451
13. **Bhaskar, S., Anwar Hossain, K. M., Lachemi, M., Wolfaardt, G., & Otini Kroukamp, M.** (2017). Effect of self-healing on strength and durability of zeolite-immobilized bacterial cementitious mortar composites. Cement and Concrete Composites, 82, 23–33. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2017.05.013
14. **Chiung-Wen, C., Aydilek, A. H., Seagren, E. A., & Lai, M.** (2011). Biocalcification of sand through ureolysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137(12), 1179–1189. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000532
15. **De Muynck, W., Cox, K., De Belie, N., & Verstraete, W**. (2008). Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. Construction and Building Materials, 22(5), 875–885. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.011
16. **De Rooij, M., Van Tittelboom, K., De Belie, N., & Schlangen, E. (Eds.).** (2013). Self-healing phenomena in cement-based materials: State-of-the-art report of RILEM technical committee 221-SHC (Vol. 11). Springer Science & Business Media.
17. **Jonkers, H. M**. (2007). Self healing concrete: A biological approach. In Self healing materials: An alternative approach to 20 centuries of materials science (pp. 195–204).
18. **Kaur, N. P., Majhi, S., Dhami, N. K., & Mukherjee, A.** (2020). Healing fine cracks in concrete with bacterial cement for an advanced non-destructive monitoring. Construction and Building Materials, 242, 118151. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118151

19. **Khaliq, W., & Ehsan, M. B**. (2016). Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. Construction and Building Materials, 102, 349–357. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006
20. **Kumar, A. P., Devi, A. R. A., Anestraj, S., Arun, S., & Santhoshkumar, A.** (2015). An experimental work on concrete by adding Bacillus subtilis. Indian Journal of Environmental Protection, 35, 911–915.
21. **Madhan Kumar, M., Vijaya Ganapathy, D., Subathra Devi, V., & Iswarya, N**. (2019). Experimental investigation on fibre reinforced bacterial concrete. Materials Today Proceedings, 22, 2779–2790. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.409
22. **McDonough, W. P.** (1992). The Hannover principles: Design for sustainability. EXPO 2000, Hannover, Germany. William McDonough & Partners.
23. **Mondal, S., & Ghosh (Dey), A.** (2018). Investigation into the optimal bacterial concentration for compressive strength enhancement of microbial concrete. Construction and Building Materials, 183, 202–214. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.176
24. **Naik, T. R**. (2008). Sustainability of concrete construction. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 13(2), 98–103.
25. **Nemati, M., & Voordouw, G.** (2003). Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ. Enzyme and Microbial Technology, 33(5), 635–642. https://doi.org/10.1016/S0141-0229(03)00191-1
26. **Pachaivannan, P., Hariharasudhan, C., Mohanasundram, M., & Anitha Bhavani, M**. (2020). Experimental anaylsis of self healing properties of bacterial concrete. Materials Today Proceedings, 33, 3148–3154. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.782
27. **Salmasi, F., & Mostofinejad, D.** (2020). Investigating the effects of bacterial activity on compressive strength and durability of natural lightweight aggregate concrete reinforced with steel fibers. Construction and Building Materials, 251, 119032. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119032
28. **Shivanshi, S., Chakraborti, G., Upadhyaya, K. S., & Kannan, N.** (2023). A study on bacterial self-healing concrete encapsulated in lightweight expanded clay aggregates. Materials Today: Proceedings. (In Press). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.541

29. **Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K., & Bang, S. S.** (1999). Microbiological precipitation of $CaCO_3$. Soil Biology and Biochemistry, 31(11), 1563–1571. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00082-6
30. **Van Tittelboom, K., & De Belie, N.** (2013). Self-healing in cementitious materials—A review. Materials, 6(6), 2182–2217.
31. **Van Tittelboom, K., De Belie, N., De Muynck, W., & Verstraete, W.** (2010). Use of bacteria to repair cracks in concrete. Cement and Concrete Research, 40(1), 157–166. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.025
32. **Wang, J., Ersan, Y. C., Boon, N., & De Belie, N**. (2016). Application of microorganisms in concrete: A promising sustainable strategy to improve concrete durability. Applied Microbiology and Biotechnology, 100(7), 2993–3007. https://doi.org/10.1007/s00253-016-7370-6
33. **Wang, J. Y., Soens, H., Verstraete, W., & De Belie, N**. (2014). Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. Cement and Concrete Research, 56, 139–152. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.009
34. **Whiffin, V. S., van Paassen, L. A., & Harkes, M. P**. (2007). Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. Geomicrobiology Journal, 24(5), 417–423. https://doi.org/10.1080/01490450701436505
35. **Wiktor, V., & Jonkers, H. M**. (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. Cement and Concrete Composites, 33(7), 763–770. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2011.03.012
36. **Worrell, E., & Galtisky, C**. (2004). Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for cement making. Lawrence Berkeley National Laboratory Publication LBNL-54036.
37. **Wu, M., Hu, X., Zhang, Q., Cheng, W., Xue, D., & Zhao, Y**. (2020). Application of bacterial spores coated by a green inorganic cementitious material for the self-healing of concrete cracks (Vol. 113). Elsevier.

الفصل الثامن

البُنية التحتية للصـرف الصحي الحضري نحـو مستقبل مستـدام

أحمد فردوسي وكوروش بهزاديان

8.1 المقدمة

لقد كان للبنية التحتية لتصريف المياه في المناطق الحضرية (Urban drainage Infrastructures, UDIs) الأثر البالغ في صحة الإنسان والبيئة، وفي جودة الحياة الحضرية داخل المدن وتطورها. وتمتد هذه البنية بتاريخها العريق منذ العصور التي كانت فيها المجاري التقليدية المكشوفة قائمة، وصولاً إلى الوقت الحاضر الذي أصبحت فيه معظم مكونات هذه البنى تحت سطح الأرض بعد أن حلت القنوات المغلقة والأنابيب محل المجاري والقنوات المكشوفة. وفي الواقع فإن تاريخ استخدام أنظمة تجميع مياه الأمطار يتزامن مع نشأة الحضارات قبل آلاف السنين. ورغم أن الهدف الرئيس من أنظمة الصرف هو جمع جريان المياه السطحية وتدفقات السيول، فإن بعض البلدان اعتمدت أنظمة الصرف المشتركة التي تنقل في الوقت ذاته مياه الجريان السطحي ومياه الصرف الصحي ضمن القنوات نفسها. ومع نمو المدن، ازدادت الحاجة إلى شبكات صرف صحي أكبر ما أدى إلى زيادة الاستثمارات في هذه البنية التحتية غير أن أداء أنظمة المجاري المشتركة أثبتت قصورًا ملحوظًا، وذلك بسبب تصريف مياه الصرف غير المعالجة إلى المجاري المائية المستقبلة والتي تُعد في كثير من الحالات المصدر الرئيس للمياه ضمن دورة الأيض المائي الحضري[1]

(1) ملاحظة المترجم: يَرِد هذا المفهوم في بعض الكتابات العربية بصيغ مثل: الأيض المائي الحضري، والاستقلاب المائي الحضري، كما يقترب منه في الاستعمال التطبيقي تعبير دورة المياه الحضرية، وهو الأكثر شيوعًا في الأدبيات العربية ذات الصلة بالتخطيط الحضري وإدارة المياه.

(Urban Water Metabolism). وبشكل عام، فإن الفيضانات والتعرية وتدهور جودة المياه والمشكلات البيئية تشكِّل مخاطر محتملة تهدد كفاءة شبكات الصرف الحضري وأدائها.

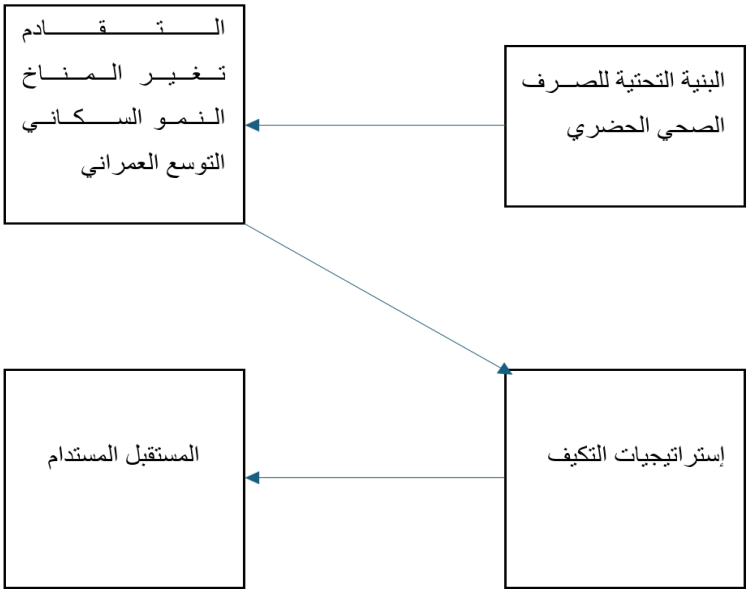
لا شك أن البنية التحتية للمياه بما تتضمنه من منشآت وعناصر متعددة تُعد عاملًا حيويًّا لتحقيق أهداف الأمم المتحدة لعام 2030، والمعروفة بأهداف التنمية المستدامة التي اعتُمِدت استنادًا إلى اتفاق عالمي، غير أن هذه البنية التحتية تواجِهُ ضغوطًا هائلةً من عوامل خارجية وفي مقدمتها التوسع العمراني والنمو السكاني والأهم من ذلك تغيُّر المناخ.

ورغم الأهمية البالغة للبنية التحتية للصرف الصحي الحضري في تحقيق أهداف التنمية المستدامة (SDGs)، فإن العوامل الخارجية مثل تغيُّر المناخ والنمو السكاني والتوسع العمراني قد تقوِّض الأداء المرضي لهذه البنية. ويُعرَّف تغيُّر المناخ بأنه التحولات المستمرة في بعض المتغيرات المناخية مثل معدلات هطول الأمطار ودرجات الحرارة إلا أن وتيرة هذا التغيُّر تسارعت بشكل ملحوظ خلال القرن الماضي نتيجة الأنشطة البشرية المرتبطة بانبعاثات الغازات الدفيئة الناتجة عن الوقود الأحفوري وتغيُّرات استخدام الأراضي. ومن بين العناصر المناخية المتأثرة بدرجات متفاوتة كل من درجة الحرارة، والهطول، والرطوبة النسبية، والإشعاع الشمسي الساقط. وإلى جانب ذلك، تشير التوقعات إلى ازدياد عدد سكان العالم، وتشيرُ دراساتٌ أخرى إلى أن نسبة أكبر من سكان العالم ستعيش في المناطق الحضرية. وتشكل هذه الضغوط تحديات كبيرة للبنية الطبيعية وتلك التي أنشأها الإنسان على حد سواء. فالبنية التحتية للصرف الصحي الحضري يمكن أن تسهم في تغيُّر المناخ من خلال

زيادة انبعاثات الغازات الدفيئة، والتحمُّض، والإثراء الغذائي[1] (Eutrophication). ويمكن أن تتأثر هي ذاتها بتغيُّر المناخ من خلال آثاره في الفيضانات الحضرية. ويُضاف إلى ذلك مشكلة تقادم البنية التحتية الحضرية القائمة، بما في ذلك شبكات الصرف الصحي وهو ما يهدد استدامتها. وكما هو موضح في الشكل (8.1)، فإن هذه الشبكات تواجه جملةً من العقبات، مثل تقادم البنية التحتية وتغيُّر المناخ والنمو السكاني والتوسع العمراني والتي ينبغي تجاوزها عبر إستراتيجيات التكيُّف لتحقيق مستقبل مستدام. أما الشكل (8.2)، فيُظهر بعض المشكلات التي نجمت عن سوء عمل شبكات الصرف الحضري في مدينة طهران بإيران والتي غالبًا ما تهدد نظام النقل والصحة العامة.

خلال العقد الماضي، تناولت العديد من الدراسات أثر تغيُّر المناخ والإستراتيجيات الممكنة للتكيُّف معه. ويُظهر استعراض هذه الدراسات أن معظمها أغفل دور تحقيق أهداف التنمية المستدامة وأثر التوسع العمراني، في حين ركزت غالبًا على أهمية تأثيرات تغيُّر المناخ في البنية التحتية للصرف الحضري. ومن الجدير بالذكر أن أداء شبكات الصرف الحضري الحالية يتأثر بتغيُّر المناخ وبالتوسع العمراني وأن تطبيق أنظمة صرف مستدامة يظل تحديًا كبيرًا في الحالات العملية. ويهدف هذا الفصل بشكل رئيس إلى استعراض آثار تغيُّر المناخ والتوسع العمراني على شبكات الصرف الصحي الحضري إضافة إلى الإستراتيجيات المحتملة للتكيُّف التي من شأنها التخفيف من هذه الآثار السلبية والمساهمة في الوصول إلى مستقبل مستدام.

(1) ملاحظة المترجم: يَرِد مصطلح Eutrophication في الأدبيات العربية بصيغ مثل: الإثراء الغذائي، وفرط المغذيات، وتخثث المياه. وقد آثرتُ هنا استعمال الإثراء الغذائي لكونه أوضح في السياق البيئي والهندسي، وللدلالة على زيادة المغذيات في المياه بما يفضي إلى نمو مفرط للطحالب والنباتات المائية وتدهور نوعية المياه.



الشكل 8.1 البنية التحتية للصرف الحضري: كيفية الوصول إلى مستقبل مستدام

الشكل 8.2 أمثلة على تدهور البنية التحتية للصرف الحضري في طهران، إيران

8.2 تغيُّر المناخ والنمو السكاني والتوسع العمراني

يُعد تغيُّر المناخ واحدًا من أبرز المشكلات العالمية المِلحَّة، ويُقصد به التغيرات طويلة الأمد والمستمرة في المناخ، سواء حدثت بشكل طبيعي أو نتيجة للأنشطة البشرية. ثاني أكسيد الكربون والميثان وأكسيد النيتروز وبخار الماء والغازات المفلورة من أهم الغازات المسؤولة عن ظاهرة الاحتباس الحراري. وتُعَدُّ الأنشطة البشرية السبب الرئيس وراء الزيادة العالمية في تركيزات الغازات الدفيئة؛ حيث كان لاستخدام الوقود الأحفوري وتغيُّرات استخدام الأراضي التأثير الأكبر في ارتفاع مستويات ثاني أكسيد الكربون على مستوى العالم. وتشمل الآثار الأخرى لتغيُّر المناخ تغيُّرات في أنماط الهجرة واندلاع حرائق الغابات وانقراض بعض الفصائل النباتية والحيوانية، فضلًا عن النزاعات الاجتماعية والسياسية. ويُظهر الشكل (8.3) بعض التغيرات الرئيسة الناجمة عن التحولات المناخية وما قد تسببه من تأثيرات على البنية التحتية الحضرية.

وعلى الجانب الآخر، تشير التوقعات إلى أن عدد سكان العالم سيبلغ نحو 9.8 مليار نسمة بحلول عام 2050 وتُظهر تقديرات أخرى أن ما يقارب 68% من سكان العالم سيعيشون في المناطق الحضرية. ومن ثم فإن تغيُّر المناخ والتوسع العمراني والنمو السكاني تُعد جميعها من أهم الضغوط العالمية الراهنة التي قد تُعرِّض أوضاع الأنظمة الطبيعية للخطر وتلك التي شيدها الإنسان، بما في ذلك البنية التحتية للصرف الصحي الحضري.

ارتفاع في مستوى سطح البحر وذلك بحسب المنطقة.	ارتفاع في متوسط درجات الحرارة العالمية وزيادة في الإشعاع الشمسي وذلك بحسب المنطقة.	ارتفاع أو انخفاض في كلٍّ من وتيرة هطول الأمطار وشدته، وذلك بحسب المنطقة.

الشكل 8.3 التغيرات المتوقعة في العوامل المناخية نتيجة تغيُّر المناخ

8.3 أهداف التنمية المستدامة (SDGs) والبنية التحتية للصرف الحضري (UDIs)

تُعرف الأهداف العالمية على أنها تسمية بديلة لأهداف التنمية المستدامة (SDGs)، التي أقرتها الجمعية العامة للأمم المتحدة في عام 2015. ويشتمل جدول أعمال 2030 للتنمية المستدامة على سبعة عشر هدفًا و169 غاية بدأ تنفيذها في الأول من يناير 2016. وقد وُضع إطار هذه الأهداف بطريقة تضمن قبولها علميًّا وسياسيًّا ومجتمعيًّا. والغاية النهائية من أهداف التنمية المستدامة هي توفير صحة مستدامة للجميع -بدءًا من الكوكب بشكل عام حتى المجتمعات المحلية- وذلك من خلال معالجة قضايا الفقر وعدم المساواة وتغيُّر المناخ وتدهور البيئة وتعزيز السلام والعدالة. ويمكن تصنيف الأهداف السبعة عشر في أربعة محاور رئيسية: محور الإنسان (الأهداف 1–6)، ومحور الازدهار (الأهداف 7–12)، ومحور الكوكب (الأهداف 13–15)، ومحور السلام والشراكات (الأهداف 16 و17). ويُلاحظ أن العديد من هذه الأهداف مترابطة؛ فعلى سبيل المثال، يؤثر القضاء على الجوع في منطقة ما مباشرة في معدلات الفقر فيها. وقد ورد ذكر المياه بشكل صريح في الهدف السادس (المياه النظيفة والصرف الصحي)، وهو هدف يدعم بدوره العديد من الأهداف الأخرى مثل الهدف الأول (القضاء على الفقر) والهدف الثاني (الأمن الغذائي) والهدف الثالث (الصحة) والهدف الرابع (التعليم) والهدف السابع (الطاقة) والهدف الثامن (النمو الاقتصادي) والهدف العاشر (العدالة والمساواة).

وحيث إن المياه تُجمع وتُعالج وتُوزَّع من خلال البنية التحتية للمياه، فإن اعتماد العديد من الأهداف وما يرتبط بها من غايات، أمر لا يمكن إنكاره. ويُعد التحكم في الفيضانات مهمة رئيسة أخرى للبنية التحتية للمياه والتي تُدار عادة عبر أنظمة الصرف لمياه الأمطار.

ويمكن للبنية التحتية للصرف الحضري أن تسهم في تحقيق الهدف الأول من خلال تقليل الكوارث المرتبطة بالمناخ على الفقراء، والهدف الثالث من خلال خفض معدلات الوفيات والأمراض الناتجة عن تلوث المياه أو القضاء عليها، والهدف السادس من خلال توفير المياه بتكلفة ميسَرة والحد من التلوث، والهدف التاسع عبر جعل البنية التحتية والصناعات أكثر كفاءة ومرونة وصديقة للبيئة، والهدف الحادي عشر من خلال معالجة المشكلات البيئية والمالية المرتبطة بالمياه في المدن، والهدف الثاني عشر عبر التحكم في تصريف الملوثات إلى المياه، والهدف الثالث عشر من خلال رفع مستوى الوعي العام حول آثار تغيُّر المناخ واستراتيجيات التكيُّف. ونظرًا لدور البنية التحتية للصرف الحضري في تجميع المياه وتوفيرها والتخفيف من الفيضانات ونقل المياه والمساهمة في معالجة مياه الصرف، فإنها تمثل عنصرًا محوريًّا في توفير مياه آمنة وميسَرة والحفاظ على النظم البيئية ودعم العديد من أهداف التنمية المستدامة ولا سيما سبعة أهداف رئيسة هي (1، 3، 6، 9، 11، 12، و13) وما يتبعها من غايات.

8.4 تأثيرات تغيُّر المناخ والتوسع العمراني في البنية التحتية للصرف الصحي الحضري (UDIs)

يستعرض الجدول (8.1) أبرز التأثيرات المحتملة لتغيُّر المناخ والتوسع العمراني في البنية التحتية للصرف الحضري (UDIs). إذ تتأثر سعة الشبكات الحالية وجودة المياه بهذه العوامل. وبشكل أكثر تحديدًا، يمكن أن تتولد الفيضانات نتيجة لارتفاع مستوى سطح البحر وزيادة معدلات الهطول المطري وكلاهما من الظواهر المرتبطة بتغيُّر المناخ. وإضافة إلى ذلك فإن التوسع العمراني الناجم عن ازدياد الرغبة في العيش داخل المدن، كما هو موضح في الجدول (8.1)، يزيد من مخاطر تكوُّن الفيضانات وما يرتبط بها من مآلات؛ فالفيضانات

تعرض الصحة العامة للخطر وتهدد أنظمة النقل العام وتزيد من الخسائر المالية وعدد الوفيات، وتؤدي إلى تصريف المياه غير المعالجة، مثل مياه الصرف الصحي ومياه المجاري، إلى الأوساط المائية المستقبلة كالأنهار والبحيرات والبحار. وبناءً على الجدول (8.1)، يمكن تصنيف تأثيرات تغيُّر المناخ والتوسع العمراني إلى أربعة محاور رئيسية تفرز بدورها عددًا من المشكلات.

الجدول 8.1 التأثيرات المحتملة لتغيُّر المناخ والتوسع العمراني على البنية التحتية للصرف الصحي الحضري

الخصائص	الأثر المحتمل
ارتفاع مستوى سطح البحر	زيادة احتمالية الجريان السطحي الحضري وحدوث الفيضانات.
تباينات في درجات الحرارة	تغير محتوى رطوبة التربة بما يؤثر في تكوُّن الجريان السطحي.
زيادة في معدلات هطول الأمطار	- تراجع جودة المياه. - زيادة حالات التحميل الزائد والتكاليف. - ارتفاع عدد العقد المتضررة بالفيضانات وتسرب المياه من فتحات المجاري. - زيادة في الترسبات.
التوسع العمراني والنمو السكاني	- توسُّع المناطق الحضرية وازدياد كثافتها مما يزيد من عدم نفاذية الأسطح وبالتالي من معدلات الفيضانات. - تغيُّرات في استخدامات الأراضي نتيجة إزالة المناطق النباتية. - تقليص المساحات المخصَّصة للتخزين المائي.

8.5 تحسين أداء البنية التحتية للصرف الصحي الحضري

يمكن تقسيم البنية التحتية للمياه إلى ثلاثة أنظمة فرعية رئيسة تشمل: أنظمة إمداد المياه وأنظمة مياه الأمطار وأنظمة مياه الصرف الصحي. ولا يخفى أن أي تطوير جديد أو إعادة تأهيل لأي من هذه البِنَى التحتية للمياه يُعد مكلفًا للغاية وقد يستغرق إنشاؤه سنوات.

ومن الواضح أن أي إخفاق فيها قد يؤدي إلى خسائر في الأرواح وأضرار بالممتلكات. ومن القضايا الأخرى أن كثيرًا من هذه البِنَى التحتية شُيِّد منذ سنوات طويلة مما يجعلها أكثر عرضة للتدهور.

لقد نوقشت في الأقسام السابقة تأثيرات تغيُّر المناخ والتوسع العمراني في البنية التحتية للصرف الحضري ودورها في تحقيق أهداف التنمية المستدامة. وقد تتسبب التأثيرات المحتملة لهذه العوامل في مشكلات تعيق تشغيل شبكات الصرف الصحي وتحقيق تلك الأهداف. ومن هنا فإن تكييف هذه الشبكات مع التغيرات المستقبلية يمثل حاجة ملحَّة. وتشير الدراسات إلى أن البنية التحتية للصرف الحضري لا تستطيع مواجهة آثار تغيُّر المناخ والتوسع العمراني وهو ما يستدعي تطبيق تدابير للتكيُّف. ومن الضروري أن تتضمن معايير التصميم المستقبلية موجبات مرتبطة بالتوسع العمراني والنمو السكاني وتغيُّر المناخ. وهناك أساليب أخرى للتحكم بالفيضانات كما هو مبين في الجدول (8.2)، يمكن أن تسهم في التخفيف من آثار الفيضانات وتقليل الضغوط المفرطة على شبكات الصرف الحضري نتيجة تغيُّر المناخ والتوسع العمراني.

8.6 الخلاصة

يمكن للبنية التحتية للصرف الحضري أن تسهم إسهامًا كبيرًا في تحقيق مستقبل مستدام للجميع إلا أنها تواجه ضغوطًا خارجية تتمثل في تغيُّر المناخ والتوسع العمراني والنمو السكاني. ولا تقتصر آثار هذه الضغوط في إعاقة أداء الوظائف الرئيسة للبنية التحتية بل تمتد لتقويض الجهود الرامية إلى بلوغ أهداف التنمية المستدامة. وقد تناول هذا الفصل متطلبات دمج أهداف التنمية المستدامة في شبكات الصرف الحضري واستعرض تأثيرات تغيُّر المناخ والتوسع العمراني

عليهـا إلى جانـب إسـتراتيجيات التكيُّـف التـي يمكـن توظيفهـا لمواجهـة هـذه التحديـات وإعـداد هـذه الشـبكات لتحقيـق الأهـداف العالميـة للأمـم المتحدة. ويبـدو أن دور البنيـة التحتيـة للـصرف الحـضري محـوري في تحقيق سـبعة مـن أهـداف التنميـة المسـتدامة (الأهـداف 1، 3، 6، 9، 11، 12، و13)، في حـين أن تغـيُّر المنـاخ والتوسـع العمرانـي يمكـن أن يُسَـبِّبَا مشـكلات متعـددة لهـذه الشـبكات. وقـد طُرحـت في الأدبيـات العلميـة إسـتراتيجيات متنوعـة للتكيُّـف تسـهم في التخفيـف مـن تلـك المشـكلات وإعـداد شـبكات الـصرف الحـضري للتغـيرات المسـتقبلية.

الجـدول 8.2 إسـتراتيجيات التكيُّـف لمواجهـة المشـكلات المسـتقبلية في البنيـة التحتيـة للـصرف الصحـي الحـضري

الأثر	إستراتيجية التكيف
زيادة معدلات الهطول	– يجب أخذ التغيرات المتوقعة في الهطول بالحسبان عند تصميم شبكات الصرف المستقبلية. – ينبغي تطوير الأجزاء غير القادرة على تحمُّل التصريف الزائد. – يجب تضمين تغيُّرات الهطول في نماذج المحاكاة.
التوسع العمراني	– استخدام الخرسانة النفاذة في المناطق الحضرية للتقليل من مياه الفيضانات والحد من تلوث المياه. – إدخال تعديلات على أنماط استخدام الأراضي والمسطحات.
التحكم بالفيضانات	– اعتماد حلول صديقة للبيئة (مثل الأسطح الخضراء والغطاء النباتي) والتحكم في مصادر المياه عبر إدارة الأحواض المائية – تطوير نماذج التنبؤ وأنظمة الإنذار؛ زيادة السعة التخزينية للسهول. – المحافظة على التربة.

المراجع

1. **Arnbjerg-Nielsen, K., Willems, P., Olsson, J., et al.** (2013). Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems: A review. *Water Science and Technology, 68*(1), 16–28.
2. **Azad, A., Mousavi, S. F., Karami, H., et al.** (2020). Properties of metakaolin-based green pervious concrete cured in cold and normal weather conditions. *European Journal of Environmental and Civil Engineering, 26*(6), 2074–2087.
3. **Behzadian, K., & Kapelan, Z.** (2015). Advantages of integrated and sustainability based assessment for metabolism based strategic planning of urban water systems. *Science of the Total Environment, 527*, 220–231.
4. **Dagbegnon, C., Djebou, S., & Singh, V. P.** (2016). Impact of climate change on the hydrologic cycle and implications for society. *Environment and Social Psychology, 1*(1). https://doi.org/10.18063/ESP.2016.01.002
5. **De Feo, G., Antoniou, G., Fardin, H. F., et al.** (2014). The historical development of sewers worldwide. *Sustainability, 6*(6), 3936–3974.
6. **Denchak, M.** (2019). Greenhouse effect 101. *Natural Resources Defense Council (NRDC).* Visited on May 29, 2022. Access link: https://www.nrdc.org/stories/greenhouse-effect-101
7. **Feng, Q., Yang, L., Deo, R. C., et al.** (2019). Domino effect of climate change over two millennia in ancient China's Hexi Corridor. *Nature Sustainability, 2*(10), 957–961.
8. **Ferdowsi, A., Nemati, M., & Farzin, S.** (2021). Development of dam-break model considering real case studies with asymmetric reservoirs. *Computational Engineering and Physical Modeling, 4*(4), 39–63.
9. **Ferdowsi, A., Valikhan-Anaraki, M., Farzin, S., & Mousavi, S. F.** (2022). A new combination approach for optimal design of sedimentation tanks based on hydrodynamic simulation model and machine learning algorithms. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 127*, 103201.
10. **Ferdowsi, A., Zolghadr-Asli, B., Mousavi, S. F., & Behzadian, K.** (2022). Flood risk management through multi-criteria decision-making: A review. In *Multi-criteria decision analysis* (pp. 43–54). CRC Press.
11. **Francisco, T. H., Menezes, O. V., Guedes, A. L., Maquera, G., Neto, D. C.,**

Longo, O. C., et al. (2022). The main challenges for improving urban drainage systems from the perspective of Brazilian professionals. *Infrastructures, 8*(1), 5.

12. **Grigg, N. S.** (2019). Global water infrastructure: State of the art review. *International Journal of Water Resources Development, 35*(2), 181–205.
13. **IPCC.** (2007). *Climate change 2007: The physical science basis.* In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, & H. L. Miller (Eds.), *Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press.
14. **IPCC.** (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects.* In *Contribution of Working Group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press.
15. **Kelley, C. P., Mohtadi, S., Cane, M. A., et al.** (2015). Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 112*(11), 3241–3246.
16. **Kondratev, K. I., Kondrat'ev, K. I., Kondratyev, K. Y., et al.** (2003). *Global carbon cycle and climate change.* Springer Science & Business Media.
17. **Kourtis, I. M., & Tsihrintzis, V. A.** (2021). Adaptation of urban drainage networks to climate change: A review. *Science of the Total Environment, 771*, 145431.
18. **Landa-Cansigno, O., Behzadian, K., Davila-Cano, D. I., & Campos, L. C.** (2020). Performance assessment of water reuse strategies using integrated framework of urban water metabolism and water-energy-pollution nexus. *Environmental Science and Pollution Research, 27*, 4582–4597.
19. **Lankester, P.** (2013). *The impact of climate change on historic interiors.* Doctoral dissertation, University of East Anglia.
20. **Morton, S., Pencheon, D., & Squires, N.** (2017). Sustainable Development Goals (SDGs), and their implementation: A national global framework for health, development and equity needs a systems approach at every level. *British Medical Bulletin, 124*, 1–10.
21. **Pausas, J. G., & Keeley, J. E.** (2021). Wildfires and global change. *Frontiers in Ecology and the Environment, 19*(7), 387–395.

22. **Raju, K. S., & Kumar, D. N.** (2018). *Impact of climate change on water resources.* Springer.
23. **Román-Palacios, C., & Wiens, J. J.** (2020). Recent responses to climate change reveal the drivers of species extinction and survival. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 117*(8), 4211–4217.
24. **Roshani, E., & Filion, Y. R.** (2015). Water distribution system rehabilitation under climate change mitigation scenarios in Canada. *Journal of Water Resources Planning and Management, 141*(4), 04014066.
25. **Sørup, H. J. D., Fryd, O., Liu, L., Arnbjerg-Nielsen, K., & Jensen, M. B.** (2019). An SDG-based framework for assessing urban stormwater management systems. *Blue-Green Systems, 1*(1), 102–118.
26. **UNDESAPD (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division).** (2019). *World urbanization prospects: The 2018 revision* (ST/ESA/SER.A/420). United Nations.
27. **United Nations.** (visited on 5 December 2022). Take action for the Sustainable Development Goals. Access link: https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/
28. **Vahedifard, F., Robinson, J. D., & Aghakouchak, A.** (2016). Can protracted drought undermine the structural integrity of California's earthen levees? *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 142*(6), 02516001.
29. **Willems, P., Arnbjerg-Nielsen, K., Olsson, J., & Nguyen, V. T. V.** (2012). Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Atmospheric Research, 103*, 106–118.
30. **Yazdanfar, Z., & Sharma, A.** (2015). Urban drainage system planning and design: Challenges with climate change and urbanization: A review. *Water Science and Technology, 72*(2), 165–179.
31. **Zhou, Q.** (2014). A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. *Water, 6*(4), 976–992.

مسرد المصطلحات

مسرد المصطلحات

يضم هذا المسرد أبرز المصطلحات العلمية والهندسية الواردة في فصول الكتاب، وقد أُعدَّ ليكون أداة مرجعية مكمِّلة للنص المترجم، تُيسِّر الرجوع إلى المقابلات العربية والإنجليزية للمفاهيم الأساسية التي تناولها المؤلفون. وقد روعي في ترتيبه أن يجيء بحسب ورود المصطلحات في الفصول، مع إثبات المقابل الإنجليزي إلى جانب المصطلح العربي، وإيراد شرح مبسط يوضح المقصود به في سياق الكتاب.

وحرصتُ، حيثما اقتضى السياق، على إيراد بعض المسميات العربية المتداولة في الأوساط المهنية والسوقية لعدد من المواد والأنظمة الإنشائية، على سبيل الإيضاح والربط بين الاصطلاح العلمي المعتمد والاستعمال العملي الشائع، دون أن يمس ذلك أولوية المصطلح الفني المثبت في متن الترجمة.

الفصل الأول:

التنمية المستدامة في المباني الخشبية الشاهقة الحديثة

Cross-Laminated Timber (CLT)
الخشب الرقائقي المتعامد

منتج خشبي هندسي يتكون من طبقات من الألواح الخشبية تُرصّ فوق بعضها باتجاهات متعامدة، ثم تُلصق لتكوين عنصر إنشائي بصلابة عالية. ويُستخدم في الجدران والأرضيات والأسقف في المباني الخشبية متعددة الطوابق. ويُتداول سوقيًا أيضًا باسم: ألواح CLT، أو الخشب المصفح المتعامد.

Glulam
الخشب المصفّح بالغراء

منتج خشبي إنشائي يُصنَّع من شرائح أو طبقات خشبية تُجمع وتُلصق بالغراء لتكوين عنصر واحد ذي قدرة عالية على التحمل. ويُستخدم غالبًا في الأعمدة والعوارض والعناصر الحاملة. سوقيًّا، يُتداول تحت مسمى الخشب الجلولام، وأحيانًا الخشب الملصوق طبقيًّا.

Greenhouse Gases (GHGs)
الغازات الدفيئة

الغازات التي تسهم في احتباس الحرارة في الغلاف الجوي، مثل ثاني أكسيد الكربون والميثان وأكسيد النيتروز. ويرد المصطلح في هذا الفصل عند الحديث عن أثر مواد البناء في الانبعاثات.

Sustainable Development Goals (SDGs)
أهداف التنمية المستدامة

مجموعة الأهداف التي اعتمدتها الأمم المتحدة لتحقيق تنمية أكثر توازنًا وشمولًا واستدامة على المستويات البيئية والاجتماعية والاقتصادية. ويُشار إليها في الكتاب بوصفها الإطار العام الذي تنتظم فيه قضايا البناء المستدام.

الفصل الثاني:

الهياكل الغشائية فائقة الخفة نحو بيئة مستدامة

Ethylene Tetrafluoroethylene (ETFE)
إيثيلين تترافلوروإيثيلين

مادة بوليمرية خفيفة وشفافة تُستخدم في الأغشية والوسائد الهوائية المعمارية. تمتاز بخفة الوزن، وبنفاذية ضوء عالية، وبمقاومة جيدة للعوامل الجوية، ولذلك تُعد بديلًا خفيفًا للزجاج في بعض التطبيقات. ويطلق عليه محلياً أغشية ETFE، أو وسائد ETFE في أنظمة الأسقف والواجهات الشفافة.

Polytetrafluoroethylene (PTFE)
بولي تترافلوروإيثيلين

مادة بوليمرية تُستخدم غالبًا بوصفها طبقة طلاء للتكسيات المعمارية، لما تتمتع به من مقاومة عالية للعوامل البيئية والحرارة والأشعة فوق البنفسجية. وكثيراً ما يختصر بمسمى طلاء PTFE، أو أغشية PTFE حسب طبيعة الاستخدام.

Thermoplastics
اللدائن الحرارية

مـواد بوليمريـة تُلَـيَّن بالحـرارة ويمكـن إعـادة تشـكيلها عنـد التسـخين. وتَـرِد في هـذا الفصـل عنـد الحديـث عـن بعـض المـواد الغشـائية والرقائـق المسـتخدمة في الهيـاكل خفيفـة الـوزن.

Topology
التوبولوجيا

ويُشـار إليهـا في بعـض السـياقات بـ**التركيـب البنيـوي**. والمقصـود بهـا هنـا تنظيـم المـادة أو توزيعهـا داخـل النظـام الإنشـائي عـلى نحـو يحقـق أفضـل أداء ممكـن مـن حيـث الكفـاءة والتحمـل.

الفصل الثالث:

تطوير خرسانة مستدامة بتدعيمها بالخيزران المعالج

Compressive Strength
مقاومة الضغط

مقـدار قـدرة المـادة أو العنـصر الإنشـائي عـلى تحمـل الأحمـال الضاغطـة قبـل التدهـور والفشـل. وهـو مـن أهـم المـؤشرات المسـتخدمة لتقييـم أداء الخرسـانة.

Curing Time
زمن المعالجة

المـدة التي تُـترك خلالها الخرسـانة أو المادة بعـد الصب أو التشـكيل في ظروف مناسـبة تسـمح بتطـور خواصهـا الميكانيكيـة والفيزيائيـة عـلى الوجـه المطلوب.

Flexural Strength
مقاومة الانحناء

قدرة العنصر أو المادة على مقاومة الإجهادات الناتجة عن الانحناء قبل حدوث الكسر أو الفشل.

Splitting Tensile Strength
مقاومة الشد بالانشطار

مؤشر يُستخدم لقياس مقاومة الخرسانة للشد بطريقة غير مباشرة، عبر تعريض العينة الأسطوانية (Sample Coring) لحمل بسبب انشطارها.

الفصل الرابع:

الاقتصاد الدائري بين قطاعي التعدين والإنشاءات

Acidification
التحمُّض

عملية بيئية تؤدي إلى زيادة الحموضة في الوسط البيئي، كالتربة أو المياه، نتيجة بعض الانبعاثات أو المخلفات الصناعية.

Circular Economy
الاقتصاد الدائري

نهج اقتصادي يقوم على تقليل الهدر وإطالة عمر المواد والمنتجات وإعادة الاستخدام والتدوير، بدلًا من النموذج الخطي القائم على الاستخراج ثم الاستهلاك ثم التخلص.

Eutrophication
الإثراء الغذائي

ظاهرة تنتج عن زيادة المغذيات في المياه، ولا سيما مركبات النيتروجين والفوسفور، بما يؤدي إلى نمو مفرط للطحالب والنباتات المائية، ثم إلى تدهور جودة المياه واختلال التوازن البيئي.

الفصل الخامس:

تصنيع الطوب الجيوبوليمري المستدام باستخدام رماد قش الأرز

Alkaline Activator
المنشِّط القلوي

مادة أو محلول قلوي يُستخدم لتحفيز تفاعل المواد الأولية الغنية بالسيليكا والألومينا في أنظمة الجيوبوليمر.

Fly Ash
الرماد المتطاير

ناتج دقيق ينتج عادة من احتراق الفحم، ويُستخدم في التطبيقات الأسمنتية والجيوبوليمرية بوصفه مادة غنية بالسيليكا والألومينا.

Geopolymer
الجيوبوليمر

مادة رابطة غير عضوية تنتج عن تفاعل مواد أولية سليكاتية ألومينية في وسط قلوي، وتُستخدم بديلًا منخفض الأثر البيئي لبعض الأنظمة الأسمنتية التقليدية.

Geopolymerization
البلمرة الجيوبوليمرية

وهي عملية التفاعل الكيميائي الذي تتكون بواسطتها البنية الرابطة للجيوبوليمر من مواد غنية بالسيليكا والألومينا في بيئة قلوية.

Rice Husk Ash
رماد قش الأرز

مادة ناتجة عن حرق قش الأرز، وتتميز بغناها بالسيليكا، ولذلك تُستخدم في بعض الخلطات الجيوبوليمرية والإنشائية.

Sodium Hydroxide (NaOH)
هيدروكسيد الصوديوم

مركب قلوي قوي يُستخدم منشطًا في بعض الخلطات الجيوبوليمرية.

Sodium Silicate (Na_2SiO_3)
سيليكات الصوديوم

مركب كيميائي يُستخدم في الأنظمة الجيوبوليمرية بوصفه منشطًا قلويًّا أو مادة رابطة مساعدة، ويُعرف شائعًا أيضًا باسم الزجاج المائي.

الفصل السادس:

حرائق الواجهات في المباني العالية: التحديات والحلول المعتمدة على الذكاء الاصطناعي

Aluminum Composite Panels (ACP)
ألواح الألمنيوم المركبة

ألواح تكسية تتكون عادةً من طبقتين رقيقتين من الألمنيوم وبينهما قلب داخلي. وتُذكر في هذا الفصل ضمن المواد التي قد تشكل خطر الاحتراق إذا كان القلب الداخلي قابلاً للاحتراق. ويُتداول محليًّا بعدة مسميات مثل: ألواح الكلادينج أو ألواح تكسيات الألمنيوم، وأحيانًا يشار إليها اختصارًا بـ ACP فقط.

High Pressure Laminates (HPL)
الصفائح عالية الضغط

ألواح تكسية تُصنع من طبقات مضغوطة من المواد الليفية والراتنجات. وتستخدم في الواجهات لما توفره من مظهر جيد ومقاومة مناسبة، غير أن مقاومتها للحريق ترتبط بتركيبها الداخلي. وتختصر في بيئة الصناعة والبناء تحت مسمى ألواح أو تكسيات HPL.

Fiber-Reinforced Plastic (FRP)
اللدائن المدعمة بالأليا

مواد مركبة تتكون من مادة لدنة مدعمة بألياف، وتستخدم في بعض تطبيقات الواجهات والعناصر الخفيفة. ويتداول تحت مسمى فايبر جلاس في بعض التطبيقات، مع أن هذا الاستعمال ليس مطابقًا دائمًا من الناحية الفنية.

Low-Density Polyethylene (LDPE)
البولي إيثيلين منخفض الكثافة

مادة بوليمرية تُستخدم في بعض أنظمة التكسية، وتُذكر في الفصل بسبب قابليتها العالية للاحتراق وطبيعتها الطاردة للحرارة عند الاحتراق.

Continuous Insulation (CI)
العزل المستمر

طبقة عزل تُثبت على السطح الخارجي للهيكل أو الجدار بصورة متصلة نسبيًّا، بهدف رفع كفاءة العزل الحراري وتقليل الفواقد الحرارية.

Expanded Polystyrene (EPS)
البوليسترين الممدد

مادة عزل خفيفة ذات بنية رغوية، تُستخدم في بعض الأنظمة الحرارية، ويُشار إليها في الكتاب لارتباطها بأداء الحريق في الواجهات.

Polyisocyanurate (PIR)
البولي أيزوسيانورات

مادة عزل رغوية ذات كفاءة حرارية مرتفعة نسبيًا، وتُعد من المواد الشائعة في تطبيقات العزل المستمر. وعادةً ما تُختصر تحت مسمى ألواح PIR.

Phenolic Foams
رغوات الفينول

مواد رغوية عازلة تستخدم في بعض نظم الواجهات، وتُذكر ضمن مواد العزل المستمر محليًّا يطلق عليها الفوم الفينولي، أو ألواح الفينوليك.

Mineral Wool (MW)
الصوف المعدني

مادة عزل غير عضوية تُستخدم في أنظمة الواجهات لما توفره من خصائص حرارية ومقاومة أفضل للحريق مقارنة ببعض المواد العضوية. وتُتداول سوقيًّا بمسمى الصوف السخري أو «روك وول» نطقًا مباشرًا للمسمى الإنجليزي.

Weather/Water-Resistive Barrier (WRB)
حاجز مقاومة الماء/الطقس

طبقة تُركَّب خلف التكسية أو فوق الغشاء الخارجي لحماية الجدار من تسرب المياه والعوامل الجوية. ويُسمى محليًّا غشاء العزل المائي، أو لفائف WRP، أو «ربر ممبرين» حسب طبيعة المنتج.

External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS)
أنظمة العزل الحراري المركبة الخارجية

أنظمة واجهات تجمع بين طبقات عزل وتشطيب خارجي، وتستخدم لتحسين الأداء الحراري للمبنى. ويُذكر المصطلح في الفصل ضمن أنظمة الواجهات التي تستلزم تقييمًا حريقيًّا دقيقًا.

Filled Cavity Façades
واجهات التجويف المملوء

أنظمة واجهات تحتوي على طبقات إنشائية وبينها مادة عازلة تملأ التجويف، بما يحد من تعرض العزل مباشرةً للهب.

Sandwich Panels
ألواح الساندوتش بانل

ألــواح مركبــة تتكــون مــن طبقتــين خارجيتــين وبينهمــا نــواة داخليــة عازلــة. وتُســتخدم في الواجهــات والأســقف الخفيفــة، ويختلــف أداؤهــا الحريقــي باختــلاف مــادة القلــب. وهــي تختلــف عــن الطــوب المعــزل بطبقة الفــوم الداخــلي المســتخدمة في البنــاء، إذ أنهــا تســتخدم تكسِــيةً للجــدران بــدلاً مــن الطــوب المســتخدم بصفتهــا وحــدة بنــاء.

Air Cavity
الفجوة الهوائية

الفــراغ الواقــع بــين طبقــات الواجهــة، ولا ســيما بــين التكســية والعــزل أو بــين التكســية والجــدار، والــذي قــد يســهم في التهويــة، لكنــه قــد يعمــل أيضًــا بوصفــه ممــرًّا لانتشــار الحريــق.

Chimney Effect
تأثير المدخنة

ظاهــرة حركــة الهــواء الســاخن صعــودًا داخــل التجاويــف الرأســية، بمــا قــد يعــزز انتقــال اللهــب والدخــان إلى أعــلى الواجهــة.

Pressure Drop
الهبوط الضغطي

الانخفــاض في الضغــط الــذي يســاهم في تحريــك الهــواء خــلال الفجــوات أو المجــاري، ويظهــر في تفســير تأثــير المدخنــة.

Flashover
الاشتعال الشامل

مرحلــة حرجــة في تطــور الحريــق ينتــشر فيهــا اللهــب بسرعــة داخــل الحيــز، وتشــتعل معظــم المــواد القابلــة للاحــتراق الموجــودة فيــه.

Heat Release Rate (HRR)
معدل إطلاق الحرارة

معدل الطاقة الحرارية المنبعثة من الحريق مع الزمن، ويُعد من أهم مؤشرات شدة الحريق وتطوره.

Heat Flux
التدفق الحراري

كمية الحرارة المنتقلة إلى وحدة المساحة، ويستخدم في الفصل لتوصيف تعرض مواد الواجهة للحرارة.

Fuel-Controlled Fire
التحكم في الحريق بالوقود

حريق يعتمد تطوره أساسًا على كمية الوقود وخصائصه.

Ventilation-Controlled Fire
التحكم في الحريق بالتهوية

حريق يصبح تطوره مقيدًا بكمية الهواء أو الأكسجين المتاح للاحتراق.

Fire Growth Curve
منحنى نمو الحريق

التمثيل البياني لتطور الحريق مع الزمن، من الاشتعال حتى الخمود.

Pyrolysis Zone
منطقة التحلل الحراري

المنطقة التي تتحلل فيها المادة حراريًّا قبل الاحتراق الكامل، وتنتج منها الغازات القابلة للاشتعال.

Preheating Zone
منطقة التسخين المسبق

المنطقة التي تُسخَّن فيها المادة غير المحترقة بفعل اللهب أو الغازات الحارة قبل اشتعالها.

Buoyant Plume
عمود الطفو

العمود الصاعد من الغازات الساخنة الناتجة عن الحريق بفعل فرق الكثافة والطفو.

Combusting Plume
عمود الاحتراق

منطقة صعود الغازات والمواد المتطايرة المحترقة فوق مصدر اللهب.

Vertical Cavity Barriers
حواجز التجاويف الرأسية

حواجز تُركَّب داخل التجاويف للحد من انتقال اللهب والحرارة والدخان رأسيًّا.

Fire Stops
موانع الحريق

عناصر أو مواد تُستخدم لسد الفتحات والتجاويف بغرض الحد من انتقال النار والدخان بين الفراغات.

Artificial Intelligence (AI)
الذكاء الاصطناعي

مجال تقني يُستخدم في هذا الفصل للتعرف على حالات الحريق والتنبؤ بها اعتمادًا على البيانات الحسية والنماذج المدربة.

Deep Learning (DL)
التعلم العميق

فرع من الذكاء الاصطناعي يعتمد على الشبكات العصبية متعددة الطبقات، ويُستخدم في هذا الفصل في التنبؤ بالحريق والإنذار المبكر.

Internet of Things (IoT) Sensors
حساسات إنترنت الأشياء

حساسات متصلة تجمع بيانات الحرارة أو غيرها من المؤشرات وترسلها إلى نظام ذكي لتحليلها.

IoT Sensor Network
شبكة حساسات إنترنت الأشياء

منظومة من الحساسات المتصلة التي تنقل بيانات الحريق بصورة آنية.

Convolutional-LSTM Network
شبكة LSTM التفافية

نموذج هجين يجمع بين التحليل المكاني والزمني للبيانات، واستُخدِم في هذا الفصل للتعرف على حالة الحريق والتنبؤ بالاشتعال الشامل.

الفصل السابع:

دراسة تجريبية حول المعالجة الذاتية للشقوق الدقيقة في الخرسانة باستخدام مزيج من البكتيريا الصديقة للبيئة

Self-Healing Concrete (SHC)
الخرسانة ذاتية المعالجة

خرسانة قادرة على معالجة الشقوق الدقيقة تلقائيًا دون تدخل خارجي مباشر، من خلال آليات طبيعية أو مُستحثَّة.

Autonomous SHC
الخرسانة ذاتية المعالجة الذاتية التفعيل

نوع من الخرسانة ذاتية المعالجة يعمل تلقائيًّا من دون حاجة إلى تدخل بشري أو تشخيص خارجي أثناء حدوث الشقوق.

Bacterial Concrete
الخرسانة المعالجة بالبكتيريا

خرسانة تُضاف إليها أنواع معينة من البكتيريا أو تُهيأ فيها ظروف مناسبة لعملها من أجل ترميم الشقوق وتحسين المتانة.

Biocementation
المعالجة الحيوية بالإسمنت

عملية تستخدم فيها البكتيريا لإنتاج راسب معدني، غالبًا كربونات الكالسيوم، يسهم في سد الشقوق أو تحسين خصائص المادة.

Biomineralization
التمعدن الحيوي

عملية حيوية تؤدي فيها الكائنات الحية الدقيقة إلى تكوين معادن أو ترسيبها في وسط معين.

Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP)
الترسيب الميكروبي المستحث للكالسيت

آلية حيوية-كيميائية تنتج فيها البكتيريا كربونات الكالسيوم داخل الشقوق أو المسام، بما يساعد على سدها وتحسين أداء الخرسانة.

Microbial Concrete
الخرسانة الميكروبية

تعبير عام يطلق على الخرسانة التي تدخل فيها الكائنات الدقيقة أو آلياتها الحيوية لتحسين الخواص أو معالجة العيوب.

Microbial Mineral Precipitation
الترسيب المعدني الميكروبي

ترسيب ناتج عن نشاط الأحياء الدقيقة، ويشكل الأساس العلمي لبعض آليات المعالجة الذاتية في الخرسانة.

Bacillus
الباسيلوس / جنس العصويات

جنس بكتيري يشمل عدة أنواع قادرة على تحمل البيئات القلوية، ولذلك يُستخدم في تطبيقات الخرسانة ذاتية المعالجة.

Bacillus subtilis
العصويات الرقيقة

نوع بكتيري شائع في دراسات الخرسانة ذاتية المعالجة، ويتميز بقدرته على المساهمة في ترسيب الكالسيت.

Bacillus cereus
العصويات الشمعية

نوع بكتيري استُخدم في هذا الفصل ضمن المزيج البكتيري المؤثر في معالجة الشقوق الخرسانية.

Bacillus sphaericus
العصويات الكروية الشكل

نوع بكتيري يُذكر ضمن الأنواع القادرة على العمل في البيئات القلوية والمستخدمة في آليات MICP.

Bacillus alkalinitrilicus
العصويات القلوية النتريلية

نوع بكتيري يُستخدم في بعض الدراسات المتعلقة بترسيب الكالسيت في البيئات القلوية.

Sporosarcina pasteurii
السبوروسارسينا الباستورية

نوع بكتيري معروف بفعاليته في آليات ترسيب الكالسيت، ويُستخدم على نطاق واسع في أبحاث الخرسانة الميكروبية.

Shewanella species
أنواع الشيوانيلة

بكتيريا لاهوائية ذُكرت في الفصل ضمن الدراسات التي بحثت أثر البكتيريا في تحسين مقاومة الإسمنت والمونة.

Urease
اليوريز

إنزيم تنتجه بعض البكتيريا، ويحفز التحلل المائي لليوريا، مما يهيئ الظروف المناسبة لترسيب كربونات الكالسيوم.

Ureolytic Bacteria
البكتيريا المحللة لليوريا

بكتيريا قادرة على إنتاج إنزيم اليوريز وتحفيز تفاعلات تقود إلى ترسيب الكالسيت.

Calcium Carbonate ($CaCO_3$)
كربونات الكالسيوم

الراسب المعدني الذي يتكون داخل الشقوق والمسامات، ويسهم في سدها وتحسين مقاومة الخرسانة.

Calcite
الكالسيت

أحد الأشكال البلورية الشائعة لكربونات الكالسيوم، ويُعد الناتج المطلوب في آلية MICP.

Calcium Nitrate
نترات الكالسيوم

مصدر آخر للكالسيوم يُستخدم في بعض الأنظمة أو التجارب الحيوية.

Cement Grout
الملاط الإسمنتي/المونة

مادة إسمنتية سائلة أو شبه سائلة تُستخدم لملء الشقوق، ويستخدم بشكل عام أكثر في الأرضيات عنه في الخرسانة. ويُتداول سوقيًا أيضًا باس: « الجروت الإسمنتي» أو المونة الإسمنتية. وفي كثير من الأحيان بالاسم التجاري للجِهة المُصنِّعة.

Compressive Strength
مقاومة الضغط

مقياس لقدرة الخرسانة على تحمل الأحمال الضاغطة، وهو من أهم المؤشرات التي قاستها الدراسة.

Concrete Permeability
نفاذية الخرسانة

مقدار سهولة مرور الماء أو السوائل أو الغازات داخل الخرسانة، وتتأثر بنشاط البكتيريا ومعالجة الشقوق.

Corrosion
التآكل

تلف يصيب حديد التسليح أو المواد المعدنية في الخرسانة نتيجة الرطوبة والأملاح والعوامل الكيميائية.

Serviceability of Concrete
قابلية الخرسانة للخدمة

قدرة الخرسانة أو العنصر الخرساني على أداء وظيفته المطلوبة ضمن الحدود المقبولة خلال عمره الخدمي.

Sustainable Concrete
الخرسانة المستدامة

خرسانة تُنتج أو تُستخدم بطرق تخفف استهلاك الطاقة أو المواد الخام أو الانبعاثات، أو تطيل العمر الخدمي للمنشأ.

Whole Life Cycle
دورة الحياة الكاملة

النظر إلى المادة أو المنشأ من مرحلة الإنتاج حتى الاستخدام والصيانة والهدم وإعادة التدوير.

Ordinary Portland Cement
الإسمنت البورتلاندي العادي

النوع التقليدي الشائع من الإسمنت المستخدم في الخلطات الخرسانية.

Nutrient Broth Solutions
محاليل المرق الغذائي

محاليل تُستخدم لتغذية البكتيريا وتنمية مزارعها في المختبر.

Nutrient Agar Slants
أوساط الأجار المغذية

أوساط مخبرية تستخدم لحفظ المزارع البكتيرية حية وإعادة زراعتها دوريًا.

الفصل الثامن:

البنية التحتية لتصريف مياه الأمطار في المناطق الحضرية نحو مستقبل مستدام

Urban Drainage Infrastructures (UDIs)
البنى التحتية لتصريف المياه في المناطق الحضرية

مجموعة المنشآت والعناصر التي تتولى جمع مياه الأمطار والجريان السطحي ونقلها أو تصريفها أو إدارتها داخل المدن.

Urban Water Metabolism
الأيض المائي الحضري

منظومة تدفق المياه داخل المدينة عبر مراحل الإمداد والاستخدام والتجميع والمعالجة وإعادة الاستخدام أو التصريف.

Climate Change
تغير المناخ

التغيرات طويلة الأمد في عناصر المناخ، مثل درجات الحرارة والهطول، سواء كانت طبيعية أم ناتجة عن الأنشطة البشرية.

Urbanization
التحضر

ازدياد التوسع العمراني ونسبة السكان المقيمين في المناطق الحضرية، وما يرافقه من ضغط على البنية التحتية.

Greenhouse Gases
الغازات الدفيئة

الغازات المسؤولة عن تأثير الاحتباس الحراري، مثل ثاني أكسيد الكربون والميثان وأكسيد النيتروز وبخار الماء وبعض الغازات المفلورة.

Greenhouse Effect
تأثير الغازات الدفيئة

الظاهـــرة التـــي تحتجـــز فيهـــا بعـــض الغـــازات الحـــرارة في الغـــلاف الجـــوي، بمـــا يســـهم في رفـــع درجـــات الحـــرارة العالميـــة.

Sustainable Development Goals (SDGs)
أهداف التنمية المستدامة

الأهـداف العالميـة التـي اعتمدتهـا الأمـم المتحـدة، ويـبرز في هـذا الفصـل ارتبـاط البنيـة التحتيـة المائيـة وتحقيـق عـدد منهـا، خاصـة الميـاه النظيفـة والـصرف الصحـي والمـدن المسـتدامة والعمـل المناخـي.

Sustainable Drainage
التصريف المستدام

نهـج لإدارة ميـاه الأمطـار والجريـان السـطحي بطريقـة تقلـل الأثـر البيئـي وتحسـن الأداء الحـضري وتدعـم الاسـتدامة.

Acidification
التحمُّض

زيـادة حموضـة الوسـط البيئـي، وهـو أحـد الآثـار البيئيـة التـي قـد ترتبـط ببعـض أنشـطة البنيـة التحتيـة أو تغـيرات المنـاخ.

Eutrophication
الإثراء الغذائي

زيـادة المغذيـات في الميـاه بمـا يـؤدي إلى نمـو مفـرط للطحالـب والنباتـات المائيـة وتدهـور نوعيـة المياه.

فهـرس
المحتويـات

فهرس المحتويات

توطئة المترجم..... 3

تمهيد 5

شكر وتقدير 9

الفصل الأول: التنمية المستدامة في المباني الخشبية الشاهقة الحديثة 11

1.1 المقدمة:..... 13

1.2 المباني الخشبية الشاهقة الحديثة 17

1.3 انبعاثات الغازات الدفيئة (GHGs)..... 23

1.4 معايير التقييم..... 24

1.5 تكلفة البناء..... 27

1.6 السلامة من الحرائق..... 31

1.7 ارتفاع المبنى 34

1.8 الاستنتاجات:..... 35

المراجع:..... 38

الفصل الثاني: الهياكل الغشائية فائقة الخفة نحو بيئة مستدامة 41

2.1 المقدمة..... 43

2.2 التصميم الهندسي للهياكل الغشائية فائقة الخفة..... 47

2.2.1 الكفاءة الإنشائية والمادية من خلال حالة الشد 47
2.2.2 الهياكل الغشائية المشدودة عند الحواف 51
2.2.3 الهياكل الغشائية الهوائية 55
2.2.4 تحديات تحسين التصميم الإنشائي وفرصه 56
2.3 المواد الغشائية 58
2.3.1 الأقمشة والرقائق 58
2.3.2 الاستجابة الحرارية الميكانيكية للأغشية الإنشائية: 60
2.3.3 تحديات النمذجة التأسيسية وفرصها 62
2.4 استدامة الهياكل الغشائية 64
2.4.1 الطاقة الكامنة واستهلاك المواد 65
2.4.2 قابلية إعادة التدوير 67
2.4.3 التحديات والفرص المتعلقة بالخصائص الحرارية 68
2.5 الخلاصة 69
المراجع 71
الفصل الثالث: تطوير خرسانة مستدامة باستخدام تسليح الخيزران المعالج 77
3.1 المقدمة 79
3.2 إمكانية الخيزران ومقوماته 82
3.3 المنهجية 84
3.4 نتائج اختبار الكمرات الخرسانية المسلحة بالخيزران 86
3.4.1 نتائج اختبارات السحب 86
3.4.2 السلوك الحِمْلي والانحنائي للكمرات الخرسانية المسلحة بالخيزران 88

3.4.3 الليونة والصلابة وامتصاص الطاقة في الكمرات الخرسانية المسلحة بالخيزران..... 90

3.5 الخلاصة 92

المراجع..... 93

الفصل الرابع: تنفيذ الاقتصاد الدائري بين قطاعي التعدين والإنشاءات: مسار واعد لتحقيق أهداف التنمية المستدامة..... 97

4.1 المقدمة..... 99

4.2 إدارة نفايات المناجم والقضايا البيئية 101

4.2.1 صناعة التعدين وتوليد النفايات..... 101

4.2.2 المخاطر البيئية المرتبطة بنفايات المناجم..... 102

4.3 التثمين البيئي لنفايات المناجم في تطبيقات البناء 104

4.3.1 إعادة تدوير النفايات الصلبة الناتجة عن التعدين لاستخدامها في مواد البناء...104

4.3.2 تطبيق مفهوم الاقتصاد الدائري في قطاع التعدين..... 106

4.3.3 التقدم التقني والآفاق المستقبلية..... 114

4.4 الخاتمة..... 116

المراجع..... 118

الفصل الخامس: تصنيع الطوب الجيولوجي المستدام باستخدام رماد قش الأرز: بديل للطوب الطيني المحروق.....121

5.1 المقدمة..... 123

5.2 المنهجية 126

5.3 النتائج والمناقشة 128

5.3.1 الكثافة الحجمية والسلوك الميكانيكي لطوب البوليمر الجيولوجي ... 128

5.3.2 قدرة طوب البوليمر الجيولوجي على امتصاص الماء 131

5.3.3 السلوك الميكروي البنيوي لطوب البوليمر الجيولوجي..... 132

5.3.4 الجوانب البيئية لطوب البوليمر الجيولوجي 134

5.4 الخاتمة..... 137

المراجع..... 138

الفصل السادس: حرائق الواجهات في المباني العالية: التحديات والحلول المعتمدة على الذكاء الاصطناعي 141

6.1 المقدمة..... 143

6.2 نمو الحريق: من حرائق الحيز الداخلي إلى الانتشار الخارجي..... 146

6.3 أنظمة الواجهات وأنماطها 150

6.4 سيناريوهات الحريق التصميمية للواجهات – الحرائق الناشئة داخليًّا وخارجيًّا 155

6.4.1 الحرائق الداخلية 155

6.4.2 الحرائق الخارجية 157

6.5 آلية الانتشار الرأسي للنيران عبر الواجهات..... 157

6.6 ديناميكية الحرائق داخل الفجوات الهوائية 159

6.7 مواد الواجهة – السلامة من الحريق والسُميّة..... 162

6.8 إطار الذكاء الاصطناعي / التعلم العميق للإنذار المبكر وتقييم أخطار الحريق...163

6.9 ملاحظات ختامية 167

المراجع..... 168

الفصل السابع: دراسة تجريبية حول المعالجة الذاتية للشقوق الدقيقة في الخرسانة باستخدام مزيج من البكتيريا الصديقة للبيئة 173

7.1 المقدمة 175

7.2 المواد 179

7.2.1 الإسمنت، والبحص، والماء 179

7.2.2 اختيار البكتيريا 179

7.2.3 تحضير المحلول البكتيري 180

7.2.4 تحضير الخرسانة البكتيرية 181

7.2.4.1 تصميم الخلطة 181

7.2.4.2 الخلط 183

7.2.4.3 الصب 183

7.3 التحقيق التجريبي 183

7.4 النتائج والمناقشة 184

7.4.1 قيمة الهبوط 184

7.4.2 مقاومة الضغط 187

7.4.3 مقاومة الشد الانشطاري 189

7.4.4 مقاومة الانحناء 190

7.4.5 الخواص الذاتية الالتئام للخرسانة البكتيرية المركبة 191

7.5 الاستنتاجات 192

المراجع 195

الفصل الثامن: البُنية التحتية للصرف الصحي الحضري نحو مستقبل مستدام... 199

8.1 المقدمة..... 201

8.2 تغيُّر المناخ والنمو السكاني والتوسع العمراني 205

8.3 أهداف التنمية المستدامة (SDGs) والبنية التحتية للصرف الحضري (UDIs).....206

8.4 تأثيرات تغيُّر المناخ والتوسع العمراني في البنية التحتية للصرف الصحي الحضري (UDIs) 207

8.5 تحسين أداء البنية التحتية للصرف الصحي الحضري..... 208

8.6 الخلاصة 209

المراجع..... 211

مسرد المصطلحات.....215

فهرس المحتويات 237

تم بحمد الله

بسم الله الرحمن الرحيم
مجلس التعاون لدول الخليج العربية

مركز الترجمة والتعريب والاهتمام باللغة العربية
GCC Centre for Translation, Arabisation and Promotion of Arabic

CTAPA@GCCSG.ORG | (+٩٦٨) ٢٤٩٦٨٨٥٩
@CTAPA_GCC | (+٩٦٨) ٢٤٦٧٥٥٠٠
ص.ب: ٥٣٩، الرمز البريدي: ١١٨، مسقط، سلطنة عُمان