SJSI

مقال مراجعة

Materials Engineering and Nanotechnology for Enhancing Structure Resistance to Seismic Activity

دور هندسة المواد والتقانة النانوية في تحسين مقاومة المنشآت للزلازل

المؤلفون:
راما قصار بني المرجة
يمن الأتاسي

الجهة: المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
التواصل: yomen.atasi@hiast.edu.sy

تاريخ التقديم: ١٠ نيسان ٢٠٢٣
تاريخ القبول: ١٥ نيسان ٢٠٢٣

ABSTRACT

In the aftermath of the catastrophic and devastating earthquake that struck Syria in past February, it was necessary to re-evaluate the mechanisms used to protect our facilities in light of this type of natural disaster. Hence, it was necessary to integrate the efforts of specialists and researchers from various related specialties to put together a sum-up of their experiences to help improving the standards used when reconstructing buildings again on modern scientific grounds. In this context, materials engineering in general and nanotechnology in particular play an important role in providing a wide variety of new engineering materials and innovative solutions that contribute to improving the endurance of structures and buildings to cracks and raise the efficiency of their resistance to collapse. This article aims to present diverse and integrated approaches offered by materials science and nanotechnology in the field of earthquake-resistant construction. Some of these approaches are currently applied in a number of countries known for their almost continuous exposure to earthquakes, such as Japan, while others are still under engineering research and development. Thus, the article sheds light on emerging and promising research axes in the field of new materials and opens the way for researchers interested in gaining knowledge.

Key Words: mechanical properties, Materials engineering, Nanomaterials for construction, Earthquake−resistant structures

الملخص

إثر كارثة الزلزال المدمر التي ألمت بسورية مؤخراً في شهر شباط الماضي، كان لا بدّ من إعادة تقييم الآليات المتبعة لحماية منشآتنا في مواجهة مثل هذا النوع من الكوارث الطبيعية. ومن هنا كان لا بدّ من تكامل جهود المختصين والباحثين من اختصاصات متنوعة ذات صلة لوضع خلاصة ما لديهم من خبرات لتساعد في تحسين المعايير المتبعة عند إعادة إعمار المباني من جديد على أسس علمية حديثة. وفي هذا السياق، تؤدي هندسة المواد بشكل عام والتقانة النانوية بشكل خاص دوراً مهماً في توفير تنوع كبير من المواد الهندسية الجديدة والحلول المبتكرة التي تسهم في تحسين مقاومة المنشآت والمباني للتصدعات وترفع من كفاءة مقاومتها للانهيار. يهدف هذا المقال إلى تقديم مقاربات متنوعة ومتكاملة يقدمها علم المواد والتقانة النانوية في مجال البناء والإعمار المقاوم للهزات الأرضية. بعض هذه المقاربات مطبق حالياً في عدد من الدول المعروفة بتعرضها شبه المستمر للزلازل مثل اليابان وغيرها،

وبعضها الآخر ما يزال قيد البحث والتطوير الهندسي، وبهذا يضيء المقال على محاور بحثية بازغة وواعدة في مجال المواد الجديدة ويفتح المجال للباحثين المهتمين بالاطلاع.

الكلمات المفتاحية: الخصائص الميكانيكية، هندسة المواد، المواد النانوية للبناء، المنشآت المقاومة للزلازل.

مستويات حماية المنشآت من الزلازل

من المهم بداية تصنيف أضرار الزلزال المؤثرة على المنشآت حسب درجة خطورتها وإمكانية المعالجة اللاحقة، وذلك لاختيار الطريقة المثلى لحماية أجزاء المنشأة المختلفة وتقليل الأضرار. عند حدوث الزلازل تتعرض الأبنية لإجهادات قص زلزالية تسبب تصدعات على مستوى العناصر الإنشائية مؤدية إلى انهيار المبنى انهياراً كاملاً وملحقة أضراراً في الأرواح والممتلكات، أو قد يقتصر الأمر على التصدعات في العناصر الإنشائية من دون حدوث الانهيار، الأمر الذي يمنح فترة كافية للسكان للهرب، ولكنّ المنشأة تصبح غير آمنة ويجب إخلاؤها بعد الزلزال مباشرة. تقتصر أحياناً الأضرار على العناصر غير الوظيفية إنشائياً كالجدران الجانبية والشُرف، وتحتاج المنشآت في هذه الحالة إلى إعادة ترميم قبل إعادة السكان إليها. أما الحالة الأخيرة، فقد تحدث الأضرار في الكساء الخارجي والداخلي للمبنى. وهكذا ووفقاً لتصنيف الأضرار في المنشآت يمكن حماية المنشآت على المستويات المختلفة. وفيما يلي تعريف بمستويات الحماية المختلفة للمنشآت، ثم تقديم موجز لمقاربات هندسة المواد في تطوير مواد هندسية جديدة داعمة.

حماية العناصر الإنشائية

العناصر الإنشائية هي الأجزاء التي تحمل أجزاء المنشأة الأخرى وتتحمل الإجهادات المختلفة، وإن انهيار هذه العناصر يؤدي إلى سقوط المنشأة أو جعلها غير موافقة للشروط الإنشائية المسموح بها. إضافة إلى ذلك، فإن هذه الأجزاء تكون على تماس مباشر مع التربة المحيطة وتخضع لظروف هذه البيئة وطبيعتها. يعتمد تكوين هذه العناصر على طبيعة التربة التي ستُقام عليها المنشأة، وتتكون عادة من حديد التسليح والخرسانة. وفي بعض الأحيان، قد تتوضع بشكل أوتاد من الخرسانة أو الحديد أو الخشب. تتمثل خطورة انهيار مثل هذه العناصر الإنشائية في الانهيار الكلي للمنشأة وعدم صلاحيتها. ويمكن أن يحدث الانهيار بشكل تدريجي مع مرور الزمن نتيجة إضافة أحمال زائدة غير مدروسة، وعدم الكشف الدوري على المباني، وتسرب المياه إلى أساسات المنشأة إما بمرور سيل مياه تحتي أو نتيجة خلل في تمديدات أنابيب المياه في المنشأة، أو التعرض الدوري لأحمال قص مثل الهزات الأرضية الخفيفة أو الانفجارات أو غيرها... ينص الكود السوري للأحمال اللحظية التي تكون فيها الإجهادات أصغر من ٥٥% من مقاومة الكسر fc على أن معامل التشوه الطولي الكلي (معامل يونغ) لمادة البناء يجب أن يكون: $Eco=5700(fc)^{1/2}$. بناء على ما سبق، تقترح هندسة المواد مقاربات مختلفة في حماية العناصر الإنشائية تقوم على تحسين معامل التشوه الطولي وذلك بتحسين خلطة الخرسانة وزيادة مقاومتها. أو بزيادة مقاومة المادة المركبة (خرسانة/قضبان حديد التسليح) بإضافة مادة بينية وتحسين الالتصاق بين المكونين وذلك لضمان توزع منتظم للإجهادات وانتقال جيد للإجهاد بين أجزاء المادة المركبة، كما أنه يساهم في تعزيز مقاومة المادة المركبة لانتشار الشروخ التي تفتح على قضبان التسليح. يمكن أيضاً حماية هذه العناصر باستبدال نوع الإسمنت بآخر مقاوم للماء وذي معامل امتصاص ماء منخفض ويؤدي هذا دوراً في تحسين مقاومة العنصر الإنشائي للماء المتسرب من الوسط المحيط أو ذلك المتسرب من أنابيب المياه في المنشأة. أخيراً، يمكن حماية العنصر الإنشائي بإضافة مواد معدنية لدنة إلى الخلطة الخرسانية تبدد الطاقة المسببة لانتشار الشقوق في الإسمنت. أخيراً، تمكن زيادة مقاومة العناصر الإنشائية للزلازل بتحسين أنواع حديد التسليح المستخدم، ويمكن التقليل من عدد الشقوق في الإسمنت ومقاومة انتشارها فيه باستخدام الإسمنت ذاتي الترميم. تضمّ الفقرة 2 تفصيلاً للمقاربات المختلفة مع ذكر للمواد الهندسية الداخلة في حماية العناصر الإنشائية.

حماية العناصر غير الوظيفية إنشائياً

تشمل العناصر غير الوظيفية إنشائياً جميع الجدران الجانبية والفواصل والشرف والتي لا تتحمل الإجهادات الناتجة عن وزن المنشأة نفسها. تتعرض هذه العناصر إلى إجهادات قص نتيجة حدوث الزلازل ويمكن أن تنهار وتسبب خسارة في الأرواح والعتاد، كما تتأثر هذه العناصر

بحركة العناصر الإنشائية وتتشوه بتأثير هذه الحركة. تقترح هندسة المواد إمكان زيادة مقاومة هذه الأجزاء للزلازل عن طريق استخدام مواد مركبة بوليميرية أو معدنية بدلاً عن البلوك، كما يمكن أيضاً استخدام مواد مركبة زجاج/معدن قادرة على تحمل مثل هذه الإجهادات. يمكن عن طريق خفض وزن هذه الأجزاء تقليل شدة القوة المطبقة عليها ومن ثمّ زيادة مقاومتها. هذا بالإضافة إلى أهمية ذلك في تقليل الأحمال المطبقة على العناصر الإنشائية وتقليل الكتلة المعرضة للقوى الزلزالية.

حماية الإكساء

لا تشكل عادة حماية الإكساء هاجساً بالنسبة للمهندسين بشكل عام، ويبقى جلّ الاهتمام لجهة حماية العناصر الإنشائية يليها العناصر غير الوظيفية إنشائياً، إلا أن الإحصاءات أثبتت أهمية حماية إكساء المنشآت في حالات الزلازل، فهي تقلل كثيراً من عدد ضحايا سقوط أحجار الإكساء أثناء الزلزال وتقلل كلفة تأهيل البناء للسكن بعد الزلزال. ينصح المهندسون المدنيون مثلاً بعدم استخدام الأحجار في الكسوة الخارجية للمنشآت وكذلك عدم استخدام السيراميك في كسوة الأسقف والتقليل من عدد الأسقف المستعارة في الممرات وأماكن الاحتماء في حال الخطر. ولتحقيق حد أدنى من الحماية للإكساء تقدّم هندسة المواد حلولاً تعتمد على تطوير لواصق تحسن الالتصاق بين مادة الإكساء وبقية عناصر المنشأة لا سيما الإسمنت. وفي حالة المنشآت ذات الكسوة الزجاجية، فيجب تطوير أنواع من الزجاج المقسى Tempered glass الذي يتبعثر إلى قطع رملية صغيرة عند تعرضه للإجهاد دون تشكّل شظايا ذات أطراف حادة أو قطع ثقيلة خطرة. إضافة إلى ذلك، يمكن تطوير مواد مركبة بوليميرية ذات ألفة جيدة مع أسطح البناء تؤمن الحماية للجدران الخارجية من العوامل الجوية وتؤمن المظهر الجمالي للمنشأة. أخيراً، يمكن تطوير بعض أنواع الإسمنت التي لا تحتاج إلى إكساء بسبب سطوحها الملساء القابلة للتلوين والمقاومة للعوامل الجوية. تضمّ الفقرة ٤ تفصيلاً لهذه المقاربات مع ذكر للمواد الداخلة في حماية الإكساء.

حماية كامل المنشأة

تقوم مقاربة هندسة المواد في حماية كامل المنشأة على مواد التخميد المختلفة والتي توضع بشكل وسادة تحت العناصر الإنشائية في المباني والجسور. أما في حالة تطبيق طرائق الفصل الإنشائي تصبح الحاجة إلى مفاصل ذات مقاومة اهتراء وتحمل للإجهادات والعوامل المحيطة من الأهمية بمكان. كما يمكن الاعتماد على مواد خلائطية تمنع تربة المنشأة من التميع في حال حدوث الزلازل. كذلك يمكن تطوير أنواع الإسفلت ذي التشققات المنخفضة بتأثير قوى القص وذلك لتأمين سلامة الطرقات والجسور في حالات الكوارث. تضم فقرة لاحقة عرضاً للمواد الهندسية المستعملة في حماية كامل المنشأة.

المواد الهندسية المستعملة في حماية العناصر الإنشائية

الإسمنت المركب Cementitious composites

يجري تحسين أداء الإسمنت بإضافة مواد مركبة إليه لجعله مقاوماً للماء وللكيماويات بالإضافة إلى زيادة خصائصه الميكانيكية. فمثلاً، يجري العمل عالمياً على تطوير إسمنت مقاوم للزلازل بإضافات زهيدة الثمن. طور الباحثون في جامعة كولومبيا نوعاً من الإسمنت اللدن وذلك بإضافة ألياف بوليميرية وهباب الفحم إلى خلطات الإسمنت بنسب تصل إلى ٧٠%. بالإضافة إلى انخفاض تكلفة إنتاج الإسمنت الملحوظ في هذه الحالة، فإن استخدام هذا الإسمنت يجعل المنشأة مقاومة للزلازل حتى شدة تسعة على مقياس ريختر. كما تعمل مراكز البحث في اليابان على تطوير مقاومة الإسمنت للزلازل بإضافة ألياف الكربون أو الأراميد إلى الخرسانة. كما تتميز هذه الطريقة بإمكانية استخدامها لتدعيم أساسات المنشآت القائمة وليس فقط المنشآت قيد الإنشاء. حيث يمكن تغطية الأعمدة والأساسات الضعيفة بطبقة من الخرسانة المقواة بالألياف لزيادة تحملها للحمولات المختلفة. فيما يلي مجموعة من الأمثلة على عمليات التطوير على خلطات الإسمنت [1].

أثبت بحث أجري في جامعة ميشيغان أهمية إضافة ألياف قصيرة إلى تركيب الخرسانة لجعلها أكثر لدونة وقدرة على تحمل حمولات الشد. إن إضافة الألياف القصيرة بنسب تصل إلى ٢% حجماً فقط تجعل من الشقوق الميكروية في الخرسانة شقوقاً مغلقة وتمنع انتشار الشقوق عبرها مما يعني تحمل حمولات أكبر، هذا ولا تؤثر هذه الإضافة على العمليات الأخرى لتحضير الخرسانة وصبها بل تساعد على تكديسها أثناء الصب دون الحاجة إلى الهزازات [2]. بناء على التقرير التقني الأوروبي فإن إحاطة أساسات المنشآت بالخرسانة المقواة بنسيج من الألياف تبدي مقاومة للانهيار أكبر بمرتين من مثيلاتها غير المقواة، كما تتميز بمقاومتها الكبيرة للتعب. ويمكن استخدام هذه الخرسانة المقواة بالألياف لتقوية أساسات المنشآت المعرضة للانهيار بعد الزلازل أو الهزات الأرضية. كما أن تقوية الخرسانة بألياف البولي أميد

(النايلون ٦) مع مواد تقوية نانوية كالسيليكا يعزز من المقاومة الميكانيكية للخرسانة والعازلية الحرارية للمنشآت، مما يؤكد على أهمية هذه الإضافات للحصول على خصائص خرسانة أفضل [3]. وتجدر الإشارة إلى وجود بعض المنتجات التجارية لهذا الغرض مثل SikaWrap®−350G. جرى اختبار خلائط الإسمنت المقوى بألياف الـ pva والمقوى بإضافة خلائط تذكّر الشكل لتشكيل وصلات الجسور beam column joint. أثبتت الخلائط المركبة مع ألياف الـ pva القصيرة قدرتها على مقاومة الأحمال مقارنة بالخرسانة التقليدية بالإضافة إلى قابلية أفضل على التشوه اللدن. كذلك أثبتت الخلائط المقواة بألياف خلائط تذكّر الشكل أهميتها في ترميم الشقوق المتشكلة بعد الهزات الأرضية والزلازل. كما أثبتت الدراسة أن الوصلات مسبقة الصنع تعطي أداء أفضل حيث يكون السطح البيني بين مادة التقوية والمادة الرابطة أقوى وأكثر ثباتاً. إذ أثبتت الدراسة أن العينات قابلة للتمدد ٢,٤ بالمئة وأن إجهاد الكسر حوالي 2.6 MPa [4]. جرى في أحد مراكز الأبحاث في اليابان تطوير مادة مركبة صديقة للبيئة من التربة المقواة بقش الأرز وألياف الجوت والقنب وشبكة بوليميرية. جرى استخدام الألياف القصيرة. لوحظ أن مقاومة مادة البناء هذه للضغط تكون أكبر، كما أن ألياف الجوت أعطت أفضل أداء لجهة خفض انتشار الشقوق بالإضافة إلى زيادة اللدونة وتقليص التقلص بعد الصب. أما عن إضافة مقويات بشكل شبكة بوليميرية فإنه يزيد المتانة [5]. وإن إضافة أكاسيد معدنية أو لا معدنية إلى الخرسانة يحسن من مقاومتها الميكانيكية بالإضافة إلى خصائص أخرى مثل زيادة مقاومة الكيماويات ومنع نفاذ الماء والكلور المسببين لصدأ حديد التسليح. من جهة أخرى، تبيّن أنّ إضافة حبيبات المعادن كالنحاس مثلاً يمنع انتشار الشقوق ضمن الخرسانة عن طريق تبديد طاقة انتشار الشق بالامتصاص اللدن. وهكذا، نجد أن إضافات بسيطة إلى خلطات الإسمنت والخرسانة التقليدية تساهم في جعل المنشآت مقاومة للإجهادات الناتجة عن الزلازل والانفجارات وغيرها.

الإسمنت المقاوم للماء

يمكن بإضافات بسيطة إلى الخرسانة مثل إضافة أكسيد التيتانيوم جعل الخرسانة مقاومة للماء. وهذا يحمي أساس المنشأة من المياه المتسربة من الوسط المحيط ويقلل من امتصاص الماء. شوهد في زلزال ٦ شباط في سورية أن السبب الرئيس لتهدم إحدى المنشآت السكنية في حماة هو تسرب المياه من أنابيب مياه الشرب دون الفحص الدوري للمنشأة بالرغم أن تصميم المنشأة كان مناسباً لمقاومة الشدة الزلزالية، إلا أن امتصاص الماء أدى إلى ضعف بنية الأساس نتيجة ضعف بنية الخرسانة وتآكل حديد التسليح غير الظاهر عيانياً. يمكن تحقيق الهدف نفسه بإضافة أكاسيد معدنية كارهة للماء أو هباب الفحم إلى تركيب الخرسانة أو طلاء الأساس من الخارج بطبقات بوليميرية مضاف لها تلك المكونات اللاعضوية. بحسب إمكانية تجفيف الماء في التربة توجد مقاربتان: الأولى هي أن يتم تجفيف التربة بشكل كامل من المياه ومنعه من العبور مجدداً بجوار أساسات المنشأة قيد الإنشاء، وعندها يكون بناء الأساسات تقليدياً. أما المقاربة الثانية فهي التجفيف المؤقت للماء لحين انتهاء أعمال إنشاء الأساسات ثم إعادته إلى مجراه الطبيعي وفي هذه الحال يجب أن تكون خلطات الخرسانة المستخدمة في صب الأساسات مقاومة للماء وللكبريتات. إن إضافات مثل مركبات السيلان وستيارات الزنك تحسن مقاومة الخرسانة للماء، كما أثبتت الدراسات أن هذه الإضافات تلعب دوراً مهماً في زيادة مقاومة الخرسانة للضغط وتعزز من عازليتها الحرارية. ولا تتجاوز نسب هذه الإضافات 0.3% وزناً من خلطة الخرسانة. تجعل هذه الإضافات من الخرسانة كارهة للماء ولا تسمح بدخول الماء إلى مساماتها الداخلية. وحتى مع التدفق المستمر للمياه لا يتجاوز عمق اختراق المياه ميليميتراً واحداً، كما أن هذه الإضافات تغير من بنية الشقوق المجهرية في الخرسانة وتشكل طبقة داخلية كارهة للماء. وأثبتت مركبات السيلان تفوقها في هذا المجال كما تثبت الدراسات المرجعية [6].

الطبقات البينية بين الإسمنت وحديد التسليح

إن ضعف الترابط السطحي بين حديد التسليح والإسمنت يؤدي إلى سهولة انتشار الشقوق في الخرسانة إلى حديد التسليح وتسرب مسببات التآكل المختلفة إليه. كما يمنع توزيع الإجهادات عبر الخرسانة إلى جميع القضبان المستخدمة في التسليح مؤدياً إلى انخفاض المتانة. عليه لا بد من زيادة الترابط السطحي بين مكونات الخرسانة المسلحة. يمكن تحقيق ذلك بإضافة عوامل توتر سطحي إلى تركيب الإسمنت تحسن من خصائص الارتباط. مثل إضافة أكسيد السيليسيوم النانوي الذي يخفض المسامات في الإسمنت ويحسن الترابط البيني، أو يمثل الحل الأقل عملانية طلاء قضبان التسليح بمادة رابطة تساهم في الترابط السطحي. لنذكر أنه يمكن تخميل سطح قضبان حديد التسليح عن طريقة الأكسدة المصعدية، إلا أنه يمكن الاستغناء عن ذلك

وخفض كلفته في حال كان تركيب الخرسانة المستخدمة مناسباً ويؤمن حماية جيدة لقضبان التسليح. للتأكيد على أهمية السطح البيني بين الخرسانة وحديد التسليح، يمكن ملاحظة أنه مع تطور الإنشاءات منذ 1900 وحتى الوقت الحالي، تغير شكل قضبان التسليح من قضبان ذات مقاطع مربعة أو دائرية وسطوح ملساء إلى مقاطع متغيرة الشكل وسطوح أكثر خشونة وذلك بهدف زيادة الترابط بين الخرسانة وقضبان التسليح [7]. يتألف السطح البيني من ثلاث طبقات مختلفة واحدة في الفولاذ والثانية في الخرسانة والثالثة بينهما. بالنسبة إلى سطح الفولاذ نلاحظ وجود ثلاثة أنواع مختلفة من الطبقات السطحية وهي: طبقة الفولاذ والتي تتشكل على سطحها مجموعة من الأكاسيد أو الهيدروكسيدات عند تماسها مع وسط الخرسانة القلوي. وتعمل هذه الطبقة على تخميل السطح وسمكها بضعة نانوميترات مؤلفة بالعادة من طبقتين تحوي الداخلية منهما شوارد الحديد الثنائي أما الطبقة الخارجية فتحوي شوارد الحديد الثلاثي. تتحمل هذه الطبقة حمولات الشد بشكل أكبر من حمولات الضغط، حيث تتكسر هذه الطبقة وعند التماس مع سطح الخرسانة تبدأ بالتآكل. طبقة من أكاسيد الحديد سمكها بضعة ميكرونات. تتشكل هذه الطبقة أثناء عمليات التصنيع وهي تختلف في بنيتها ومنشئها عن نواتج التآكل، فهذه الطبقة قَصِفة وتكون بشكل حبيبات أنبوبية. إن قصافة هذه الطبقة يسهل من تشكل الشقوق ضمنها وكسرها أثناء عمليات النقل، وفي بعض الأحيان يجري التخلص منها وتصبح سماكتها صغيرة بحدود ٢ ميكرون. إنّ وجود هذه الطبقة يؤدي إلى تشكيل فراغات على السطح الفاصل بين الحديد والخرسانة تسمح بمرور محلول الخرسانة في مراحل الصب الأولى إلى طبقة الفولاذ ويؤدي هذا إلى تغيرات في طبيعة السطح. وأثبتت الدراسات أن هذه الطبقة لا تشكل حماية فعلية للفولاذ من التآكل. طبقة الصدأ السطحي تتشكل عند هذه الطبقة مجموعة من الأكاسيد والهيدروكسيدات المستقرة ترموديناميكياً كبداية للتآكل، كما يُشاهد تشكل بعض أكاسيد الحديد المائية (تحتوي على الماء في بنيتها). تتشكل هذه الطبقة نتيجة تعرض الفولاذ لظروف البيئة المحيطة والتخزين في موقع الإنشاء. أما بالنسبة للسطح البيني في جهة الخرسانة فيكون مكوناً بشكل رئيس من الإسمنت وذا كثافة أقل من باقي أجزاء الخرسانة مع وجود العديد من المسامات والشقوق، كما أن هذا الجزء يتصلب بشكل أسرع ويؤثر على التركيب الكيميائي للطبقة السطحية لقضبان الحديد، كما توجد العديد من المسامات الميكروية عند الطبقة البينية. يمكن تخفيض المسامات عند الطبقة البينية بإضافة حبيبات نانوية إلى الخرسانة تملأ المسامات في الطبقة البينية. أخيراً لا بد من الإشارة إلى أن خصائص الطبقة البينية تتغير مع الزمن [7]. أثبت Karka وزملاؤه أن السطح البيني بين حديد السليح والخرسانة يتقادم مع الزمن فاقداً القدرة على الالتصاق. ومؤدياً إلى انخفاض متانة الخرسانة المسلحة. ويحدث التقادم عن طريق كربنة الخرسانة وتآكل الحديد نتيجة وجود شوارد الكلور [8]. أثبتت محاكاة الطبقة البينية باستخدام طريقة العناصر المنتهية أن الطبقة البينية تساهم في المقاومة الميكانيكية، وأن قوة الارتباط تتناسب عكساً مع قطر قضبان التسليح وطرداً مع مقاومة الخرسانة، كما لا تتأثر بسماكة طبقة الخرسانة المحيطة بقضبان التسليح [9]. وهذه النتيجة الأخيرة ناجمة عن اعتبار أن سماكة الطبقة البينية أصغر بكثير من أبعاد مكونات الخرسانة المسلحة. أثبتت دراسة أخرى أجراها Jian وزملاؤه أن تعريض الخرسانة المسلحة للأحمال المختلفة يؤدي إلى انسحاب قضبان التسليح من الحاضنة ويزداد هذا مع ازدياد الحمل المطبق وازدياد زمن التعريض. حيث أوضح اختبار الزحف أن الطبقة البينية تكون مستقرة في بداية زمن الزحف ثم تبدأ بالانهيار تدريجياً حتى الوصول إلى حد أعظمي لا تنسحب بعده قضبان التسليح من الخرسانة [10]. نعزو ذلك إلى الزمن اللازم لانتشار الشقوق من الخرسانة إلى السطح البيني وقدرة الحمل على التغلب على قوى الالتصاق السطحية وتشكيل سطوح جديدة. وتؤيد نمذجة اختبار سحب قضبان التسليح من الخرسانة باستخدام طريقة العناصر المنتهية هذه النتيجة [11].

المعادن

يعتبر الحديد المعدن الأكثر استخداماً في المنشآت. يمكن للمعالجة الحرارية المعتدلة أن تحسن الخصائص الميكانيكية للحديد المستخدم في التسليح، كما يمكن للمعالجة الميكانيكية مثل طريقة التقسية بالتشوه تحسين مقاومة المعدن للأحمال الميكانيكية المختلفة. وأيضاً تحسين الخصائص الميكانيكية لحديد التسليح بإضافة عناصر خلائطية كالنيكل. من جهة أخرى، يجب الاهتمام بالمواد المالئة للحام في حالات استخدام اللحام لربط قضبان التسليح. فمن المعروف أن لحام قضبان التسليح يخفض من مقاومتها للضغط وعند اللحام يجب أن تكون المادة المالئة للحام ذات مقاومة ميكانيكية أعلى من القضبان الملحومة، فهي تتعرض لإجهادات قص أكبر. بشكل عام يستخدم

الفولاذ الإنشائي (ذو نسبة كربون منخفضة/ الفولاذ الكربوني) لتقوية الخرسانة في المنشآت، فهو أرخص ثمناً وأكثر توفراً مقارنة بغيره من أنواع الفولاذ. ويبقى الاهتمام بطريقة توزيع قضبان التسليح في الخرسانة وطريقة ربطها معاً لجعل المنشآت أكثر مقاومة للزلازل. في حالة المنشآت المهمة يمكن إضافة عناصر خلائطية إلى الفولاذ الإنشائي خصوصاً النيكل بنسب تتراوح بين ١ و ٢% والذي يزيد المتانة ومقاومة الصدم ويجعل الفولاذ مناسباً أكثر لمقاومة الزلازل. كما تتميز هذه الخلائط بمقاومتها المرتفعة للتآكل والصدأ [12]. أما بالنسبة للمواد المالئة للحام Flux فأشهر ما هو مستخدم هو الألمنيوم، مع الإشارة أناستخدام خلائط الألمنيوم سيلكون (سيليكون بنسبة ٧% وزناً) هو أعلى مقاومة من خلائط الألمنيوم. توجد بعض الأنواع التجارية مثل النوع: T6 المتوافق مع متطلبات لحام قضبان التسليح في المنشآت المقاومة للزلازل وفق الكود D1.8 Structural Welding Code – Seismic Supplements. وهذه المادة المالئة هي خليطة منغنيز ألمنيوم مع إضافات مثل النيكل والكربون والسيليكون والفوسفور والكبريت (منتج شركة HOBART Fabshield XLNT-6)

المواد المستخدمة لحماية العناصر غير الوظيفية إنشائياً

المواد النانوية

طوّرت جامعة Leeds, UK نوعاً من المواد البوليميرية النانوية التي جرى إضافتها إلى الخرسانة بحيث تتحول هذه الإضافات الصلبة تحت تأثير الاهتزاز الزلزالي إلى مواد سائلة تتسرب إلى الشقوق التي تولدت أثناء الاهتزاز ثم تتصلب فيها وتمنع من تشكل التصدعات في البناء. جرى تطبيق هذه المواد الجديدة وتضمينها في بيوت بُنيت لتكون ذاتية الترميم ومقاومة للزلازل في اليونان عام ٢٠١٠ [13].

المواد المركبة البوليميرية

تتمتع هذه المواد بكثافة منخفضة وبخصائص ميكانيكية نوعية مرتفعة. يمكن استخدام فوم البوليستايرن لإنشاء الجدران الداخلية والشُرف بديلاً عن البلوك. يؤمن فوم البولي ستايرن عزلاً حرارياً وصوتياً للجدران بالإضافة إلى أن الحطام الناتج عن فوم البولي ستايرن لا يسبب الأذى المباشر. يمكن أيضاً استخدام مواد مركبة من الريزينات وألياف الزجاج التي تؤمن خصائص ميكانيكية مميزة عند سماكات منخفضة بالإضافة إلى سهولة التشكيل والنقل والصيانة. يخفض استخدام بلوكات الإيبوكسي المقواة بالخشب وزن الجدران الداخلية ويقلل من تأثير قوى القص عليها ويعطيها طابعاً جمالياً. أثبتت الدراسات أن إضافة فوم البولي ستايرين إلى خلطات البلوك يكسبها كثافة أقل، وقدرة على امتصاص الصدمات، وعازلية حرارية وصوتية [14]. كما أن الخرسانة الحاوية على فوم البولي ستايرين ذات وزن أقل بـ ٨٨% من الخرسانة التقليدية وذات مقاومة شد حوالي 0.3 MPa، وهي واسعة الانتشار في أوروبا منذ تطويرها من قبل شركة BASF عام ١٩٥٠. ويمكن استخدام هذه البلوكات طولياً أو عرضياً كما يمكن نشرها بالمناشير اليدوية لتناسب المقاسات [15]. تجدر الإشارة إلى أن هذا النوع من البلوك يغني عن استخدام العوازل الصوتية والحرارية في الجدران المصبوبة [14].

المواد المعدنية

يمكن استخدام البلوك المحضّر من فومات معدنية عوضاً عن جدران البلوك التقليدية ، حيث تتمتع هذه الفومات بكثافة منخفضة وسهولة في التركيب. جرى العمل على العديد من الفومات المعدنية لغرض خفض وزن المنشآت وزيادة امتصاص الطاقة لا سيما تلك الناتجة في حالة الزلازل. وضعت لذلك العديد من براءات الاختراع لتحديد تصاميم وتراكيب مختلفة من الفومات المعدنية [16]. وجدت دراسة أن استخدام فوم الألمنيوم في إطارات المنشآت يمكن أن يخمد الإجهادات إلى ٥٥% فقط، نتيجة الامتصاص اللدن للطاقة [17].

المواد الزجاجية

من المهم تذكر أن واجهات بعض المباني والمحال التجارية تتكون بشكل رئيسي من الزجاج، ويجب أن يتمتع هذا الزجاج بمقاومة للصدمات والاهتزازات الزلزالية. يمكن أيضاً استبدال جدران البلوك الداخلية بجدران مركبة ذات رابط زجاجي مقواة بألياف معدنية، كما في بعض المكاتب التجارية. إن هذه الجدران سهلة الفك والتركيب ويمكن أن تتمفصل مع الجوائز الرئيسية في المبنى مما يخمد من أثر الاهتزازات المختلفة. إن إضافة الألومينا النانوية إلى الزجاج مع المعالجة الحرارية يزيد المقاومة الميكانيكية للزجاج كما يؤدي إلى عدد كبير من الشقوق في حالة الكسر مما يقلل من حجم القطع المتناثرة ويجعلها أصغر ويقلل من الجروح والأضرار الناجمة عن الكسر. إن أحد التصاميم المستخدمة في المنشآت هي التصاميم ذات الإطارات الخشبية والواجهات الزجاجية، وبحسب التصميم الإنشائي تتميز هذه

المنشآت بمقاومة الزلازل. لتحقيق هذا الغرض، لا بد من تطوير أنواع من الزجاج المقاوم ميكانيكياً ومقاوم للفروقات الحرارية بين داخل وخارج المنشأة [18]. يمكن استخدام الزجاج المقوى بالألياف المعدنية لمقاومة الهزات الزلزالية حيث تؤمن الألياف حماية الزجاج من الانهيار القصف وتؤمّن تماسك البنية في حالة الزلازل [19]، وله العديد من الأنواع التجارية. يؤمن الزجاج المقسّى مقاومة أكبر بأربع مرات من الزجاج العادي، كما يتميز بحطام ناعم وذي حواف غير حادة. يُستخدم هذا النوع من الزجاج لحماية شاشات الموبايلات وفي زجاج السيارات وأبواب الغسالات والأفران. إن استخدام هذا الزجاج في المباني يؤمن حماية ضد الهزات الزلزالية إلى حد ما ويؤمن حماية الأرواح في حال التحطم بدون شظايا [20].

الخرسانة ذاتية الترميم

توجد العديد من التقنيات التي تجعل من الخرسانة ذاتية الترميم، منها ما يعتمد على كبسولات أو ألياف تطلق مواداً تتصلب وتملأ فراغات الشقوق في الخرسانة أو على نوع من البكتيريا يشكل راسباً يملأ الشقوق في الخرسانة. ومنها ما يعتمد على التفاعلات الكيميائية المرمّمة بوجود الماء. لا يُستخدم هذا النوع من الإسمنت عادة في أساسات المنشآت فهو يحمي فقط من الشقوق الصغيرة والمجهرية إلا أنه أكثر استخداماً في الخرسانة المستخدمة في الجدران الجانبية والشرف. في الحقيقة لا تزال مثل هذه الأنواع من الخرسانة ذاتية الترميم قيد الدراسات في المختبرات ولم تبصر النور تجارياً بعد أو على الأقل لنقل لم يجر حتى الآن استخدامها بكميات كبيرة أو على منشآت قائمة. على الرغم من أهمية هذه الإضافات في زيادة المقاومة الميكانيكية للمادة بنسبة ١٥% [21]. ربما يرجع السبب في ذلك إلى ارتفاع ثمن المواد المضافة لجعل الإسمنت ذاتي الترميم فهو يعادل حوالي ٤٠ دولاراً للمتر المكعب. أخيراً، تحتاج معظم طرائق جعل الخرسانة ذاتية الترميم إلى تنشيط حراري أو كيميائي [18, 22]. في هذه الحالة نقترح استخدام الخرسانة المركبة مع خلائط تذكر الشكل والتي تمتص أكبر قدر ممكن من الطاقة وتمنع انتشار الشقوق في الخرسانة.

الخرسانة المركّبة

يمكن صناعة بلوكات من الخرسانة المركّبة لتكون بديلاً ذا وزن أخفض من الخرسانة التقليدية ومقاومة أكبر لانتشار الشقوق والسقوط في حال حدوث الزلازل لبناء الجدران الداخلية. يمكن استخدام عدد من الإضافات البسيطة منخفضة الثمن ولكن ذات أثر كبير وواضح. كمثال على ذلك، استخدمت الخرسانة المركّبة مع الخشب كبديل منخفض الوزن ومنخفض التكلفة ومقاوم للزلازل مقارنة بالخرسانة التقليدية. أثبتت التجارب المخبرية أهمية إضافة نشارة الخشب إلى خلطات الخرسانة بنسب تصل حتى ٤٠% وزناً في زيادة معامل القص بنسبة ١٠% [23]. نشير هنا إلى أن كلفة تحضير البلوك في هذه الحالة أقل من حالة الخرسانة التقليدية، كما أن البصمة الكربونية لصناعة البلوك تصبح أخفض في هذه الحالة ولا تحتاج هذه الإضافات إلى تعديلات على خطوط إنتاج البلوك التقليدي، وعليه فإن الفائدة المرجوة من مثل هكذا إضافات تكون كبيرة.

حماية الإكساء

اللواصق

يمكن اعتماد اللواصق السيليكونية بشكل أساسي بديلاً عن الملاط لتثبيت الكساء الخارجي أو الداخلي. لهذه اللواصق قدرة على تخميد الاهتزازات بالإضافة إلى قدرتها على الارتباط بسطوح الإسمنت والمعادن ومقاومة العوامل الجوية، مما يخفف من إمكانية سقوط قطع الكساء عند حدوث الزلازل. يمكن التحكم بتركيب اللواصق السيليكونية لجعلها متوافقة مع العديد من المواد والسطوح كما يمكن زيادة قوى الالتصاق بتقوية اللاصق باستخدام حبيبات السيليكا النانوية والتي تعزز من الارتباط السطحي بين اللاصق وأحجار الكساء الحاوية على أكاسيد السيليسيوم. يمكن استخدام لواصق الإيبوكسي المقواة بالأخشاب كبديل أقل ثمناً مقارنة باللواصق السيليكونية ويمكن تدعيمه بإضافة السيليكا أو الأكاسيد المعدنية واللامعدنية. وتوجد العديد من المنتجات التجارية لهذا الغرض مثل منتجات Kerakoll. ويختلف تركيب اللاصق باختلاف نوع التطبيق [24].

مواد مركبة للإكساء الخارجي

تكون المواد المركبة البوليميرية مناسبة لاستخدامها بشكل بلاطات أو طلاءات أو كساءات للمنشآت المختلفة. إن الكثافة المنخفضة لمثل هذه المواد المركبة يجعل تأثرها بالقوى الزلزالية منخفضاً كما يقلل الخطر المرتبط بسقوطها. أخيراً تتميز مثل هذه المواد بمقاومة جيدة للعوامل الجوية وسهولة الاستبدال والصيانة. يمكن تحسين مقاومة كربونات الكالسيوم المستخدمة للكساء الخارجي للعوامل الجوية وزيادة مقاومتها الميكانيكية بإضافة أكاسيد السيليكون والتيتانيوم كما يمكن

أيضاً استخدام الأخشاب للإكساءات الخارجية للمباني. نجد حالياً في السوق السورية أنواعاً من الإكساءات البوليميرية العازلة للحرارة والمقاومة للعوامل الجوية وتلك المقواة بألياف الزجاج. ويمكن استخدام هذه الأنواع في عمليات الإكساء الخارجي.

إسمنت لا يحتاج إلى إكساء

عملياً يحتاج إسمنت الإنشاءات إلى كساء نظراً لضعف مقاومته للعوامل الجوية. إن إضافة أكسيد التيتانيوم إلى تراكيب الإسمنت يزيد من مقاومة الإسمنت للعوامل الجوية. كما أن إضافة بعض الملدنات البوليميرية إلى تركيبة الإسمنت يحسن من لزوجته وقابلية سطحه للتشكيل وإمكانية تلوينه. كما ينصح بمحاولة استخدام الجدران مسبقة الصنع في هذه الحالة حيث أنها لا تحتاج إلى ملاط (طينة) قبل الدهان ويمكن كسوتها بكربونات الكالسيوم الملونة أو الدهان مباشرة كما أن مقاومتها الميكانيكية ومقاومتها للعوامل الجوية أكبر حيث تتصلب ضمن الأفران ولا تعتمد على الأخطاء البشرية في تقدير نسبة المياه المضافة إلى الخرسانة للتقسية.

مواد لحماية المنشأة

المخمدات

تملك مواد البناء الشائعة من الخرسانة المسلحة تواتر طنين طبيعي قريب من تواتر الزلازل المسجلة في العالم بشكل عام ولذلك يمكن عزل المنشآت باستخدام مخمدات اهتزاز تخفض من التواتر الذي تتعرض له المنشأة عند حدوث زلزال [25]. إن إضافة مخمدات الاهتزاز يزيد الكلفة التقديرية للبناء حوالي ٢٠%، إلا أنه لا يمكن الاستغناء عن ذلك في المناطق النشطة زلزالياً وذلك لحماية الأرواح قدر الإمكان، وعادة ما تستخدم في المنشآت الحيوية كالمشافي والمدارس. توجد طريقتان لتخميد الاهتزازات الناتجة عن الزلازل؛ التخميد الفعال باستخدام سوائل هيدروليكية وحساسات ومضخات، وفي هذه الحالة يمكن تطوير أنواع سوائل الهيدروليك لتحمل زمني أطول بإضافة عوامل تعليق وتشتيت ومحسنات لزوجة. أما في حالة التخميد بالسوائل المغنطيسية فإن استخدام معلقات أكسيد الحديد النانوي أو معلقات الكوبالت أثبتت جدارتها كسوائل مغنطيسية لكبح الاهتزازات. من جهة أخرى، يعتمد التخميد غير الفعال أو السلبي على وسائد مطاطية تحيط بأساسات المنشأة وتحيط بوسائد من الرصاص، وفي هذه الحالة من المفيد استخدام فوم البولي يوريتان المقوى بألياف الزجاج، أو المطاط الطبيعي لما له من مقاومة عوامل جوية مهمة. كما يمكن تطوير هذه الخلائط المطاطية بما يتوافق مع تردد الزلازل وشدتها في المنطقة. كما يمكن الاستغناء عن الرصاص الذي يمكن أن يتسرب إلى التربة ويشكل خطراً على البيئة بفومات مطاطية مقواة بألياف الكربون أو بالحبيبات النانوية. إضافة إلى ذلك تُستخدم خلائط تذكر الشكل لهذا الغرض في المنشآت المهمة والاستراتيجية. في بعض الحالات يعتمد التخميد على مفاصل معدنية يمكن تطوير سطح هذه المفاصل عن طريق طلاء السطح بمواد سيراميكية مثل نتريد السيليكون أو التيتانيوم لجعلها مقاومة للاحتكاك والعوامل الجوية. يمكن استخدام فوم البولي يوريتان لعزل المنشآت الخشبية وامتصاص الهزات الزلزالية، وقد أثبت كفاءته أيضاً بوصفه عازلاً حرارياً وزلزالياً في آن معاً وتفوق على الصوف الصخري في كلا الأمرين معاً [26]. أما بالنسبة إلى المنشآت المبنية من الخرسانة المسلحة فإن مخمدات الاهتزاز المحيطة بأساسات المنشأة ذات أهمية كبيرة في مقاومة الزلازل. فمثلاً يمكن استخدام المخمدات الصفائحية من المعدن والمطاط الطبيعي. حيث أثبت المطاط الطبيعي فعاليته في تخميد الاهتزازات في اليابان حيث جرى تدعيم ٣٥٠٠ منشأة بمخمدات من المطاط الطبيعي حيث صمدت المباني المخمدة في مواجهة زلزال ٢٠١١ (زلزال في البحر بشدة ٩ درجات على مقياس ريختر). ويتمتع المطاط بالتصاق جيد مع سطوح المعادن المختلفة، ومقاومة تعب كبيرة، ومقاومة كبيرة للإجهادات. ويمكن إضافة أسود الكربون إلى خلطات المطاط الطبيعي لزيادة المرونة [25]. تعد الفومات المعدنية إحدى المخمدات المهمة ذات القدرة على امتصاص كميات كبيرة من طاقة الاهتزاز الزلزالية إلا أنها لا تستخدم في المنشآت إلى حد الآن. إلا أن ذلك قد يكون ممكناً في المستقبل. فمثلاً جرى مناقشة اختبار فوم الألمنيوم لامتصاص الاهتزازت المؤثرة على إطارات من الصلب وجرى شرح أهمية التقسية السابقة لفوم الألمنيوم لتعزيز المرونة وتشكيل مخمد ذي كفاءة عالية في مؤتمر XIX ANIDIS Conference, Seismic Engineering in Italy في إيطاليا. كما أن حلقات البطاء للأحمال الدورية (عدد الدورات ١٠) تبدي سلوكاً متماثلاً دون حدوث تشوهات دائمة في المادة نتيجة الاهتزازات [27]. وجد Ghiani وزملاؤه نتائج مماثلة عند دراستهم العددية لمخمدات فوم الألمنيوم [17]. توجد أنواع أخرى من المخمدات مثل المخمدات الريومغنطيسية Magnetorheological، وهي مخمدات سائلة تعتمد في سلوكها

على تغير الخصائص الريولوجية (لزوجة وانسياب) عند تطبيق حقل مغنطيسي عليه فيتغير السلوك من نيوتوني إلى لانيوتوني. عادة ما تتكون هذه المخمدات من حبيبات مغنطيسية من كربونيل الحديد وأحد أنواع الزيوت السيلكونية اللزجة. جرت عدة دراسات عددية على هذا النوع من المخمدات مثل الدراسة التي جرت في إطار مشروع Eurocores S3T الأوروبي وذلك على منشآت مخمدة بمخمد نصف فعال ريومغنطيسي. ولا يُستخدم هذا النوع من المخمدات في الإنشاءات حتى الآن وذلك نظراً للصعوبات المتمثلة في تسرب السائل واهتراء أسطح المكابس نتيجة وجود حبيبات صلبة مغنطيسية [28].

خلائط مقاومة تميع التربة

يشكل نوع التربة عاملاً أساسياً في مقاومة الزلازل، ويتغير سلوك بعض أنواع الترب مع الزلازل مما يؤدي إلى تخميد أقل للشدة الزلزالية وضرر أكبر. فمثلاً تحدث ظاهرة تميع التربة في أنواع الترب الرملية المتوسطة والناعمة، وتحدث نتيجة تحرك طبقات التربة الناجمة عن الزلازل أو الانفجارات وانفصال الرابطة بين الحبيبات الرملية وتحول سلوك التربة إلى ما يشبه سلوك السائل [29]. يُلاحظ هذا النوع من تميع التربة في المناطق المحيطة بمحافظة حلب في سورية. ولتجنب آثار تميع التربة يمكن إضافة مواد خلائطية إلى تربة المنشأة قبل الشروع بالبناء لأننا عادة غير قادرين على تغيير موقع البناء. يمكن إضافة الحصى أو الجص أو الإسمنت لتحسين مقاومة التربة، كما توجد أنماط مختلفة لتحسين استقرار التربة منها: إضافة أكسيد الكالسيوم Lime، بعض الأملاح الشرهة للمياه التي تمتص المياه وتمنع تجمده في التربة في حالات البرودة الشديدة، كما تؤدي إضافة هباب الفحم إلى تحسين كفاءة التربة ويحسن من مقاومتها مقارنة ببقية الإضافات كما أنه زهيد الثمن وسهل التوافر، فهو يعمل على زيادة تماسك الحبيبات الرملية مع بعضها وذلك بوجود عوامل تنشيط بكمية منخفضة، تمكن الاستفادة من رماد قشر الأرز ولا ننصح باستخدامها في حالتنا لأننا لا نزرع الأرز، بل يمكن استخدام القار وهو منتج ثانوي عن عمليات تكرير النفط والذي يغلق المسام ويدخل بين فراغات التربة مسبباً تقويتها، من المفيد أيضاً رفع أو خفض درجة حرارة التربة لما له من أثر في خفض محتوى الماء في التربة إلا أنه من العمليات الصعبة [29, 30]. من الجدير بالذكر أن مختلف عمليات تحسين التربة تعتمد على خفض نسبة الماء والرطوبة في التربة وربما في المستقبل يمكن الاستفادة من البوليميرات فائقة الامتصاص في خفض رطوبة التربة في مراحل البناء الأولى.

الخاتمة والتوصيات

كما يظهر مما سبق فإنّ لهندسة المواد والتقانة النانوية دوراً مهماً في تطوير منشآت لها قدرة على مقاومة الزلازل على مختلف المستويات، بدءاً من حماية أساسات المنشآت أو العناصر غير الإنشائية وحتى الكساء الداخلي والخارجي. يمكن تطوير مختلف المواد الهندسية بما يتناسب مع المتطلبات الإنشائية وفق الكود السوري، كما يمكن تعديله ليتماشى مع متطلبات كودات الزلازل العالمية. تبقى من الأهمية بمكان إجراء دراسة جدوى اقتصادية لاستعمال هذه المواد الهندسية الجديدة، ودراسة إمكان تحضيرها محلياً مما يخفّض من التكلفة. إنّ نظرة سريعة للمواد الهندسية الجديدة المقترحة تبين إمكان تصنيع العديد منها محلياً، الأمر الذي يبعث على الأمل في فتح فرص عمل جديدة وإنعاش الاقتصاد، سيّما وأنّ العديد من هذه المواد يمكن استعمالها كمواد بناء لأغراض عامة وليس فقط للحماية من الزلازل وهي ترفع من كفاءة أداء المنشأة من الناحيتين الميكانيكية والجمالية. يشكل هذا المقال دعوة للتعاون والتشبيك بين المختصين والمعنيين من اختصاصات متعددة كالهندسة المدنية والمعمارية وهندسة المواد والمهتمين بالتقانة النانوية بغرض تبادل الخبرات وخلق لغة حوار مشتركة تسمح بالوصول إلى حلول عملية وفعالة عند إعادة بناء ما دمره الزلزال. وأخيراً وليس آخراً، ركّز هذا المقال على تطوير مواد جديدة للبناء مقاومة للزلازل، ولكن هندسة المواد والتقانة النانوية يقدمان حلولاً جديدة وجذابة أيضاً في مجال مواد البناء الجديدة لأغراض العزل الحراري أو النوافذ الذكية ذات الشفافية والتلون القابلين للتغيير والضبط، والواجهات الزجاجية ذاتية التنظيف وغيرها الكثير. وربما كان هذا المقال بمثابة فاتحة لعرض المزيد من المواد الجديدة الواعدة التي تقدمها العلوم متعددة الاختصاصات مثل علوم وهندسة المواد والتقانة النانوية لإيجاد حلول عصرية وعملية وصديقة للبيئة في شتى المجالات الحياتية.

References:

1. **Ghanem, S. Y., & Bowling, J. Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Concrete. (2017)**
2. **Li, V. C. Bendable composites: ductile concrete for structures. *Structure Magazine* (2006)*, July*, *4548*.**
3. **Bournas, D. Innovative materials for seismic and energy retrofitting of the existing EU buildings. Publications Office of the European Union: Luxembourg. (2018)**
4. **Chen, W., Feng, K., Wang, Y., Cui, S., & Lin, Y. Seismic Performance of a Novel Precast Beam-Column Joint Using Shape Memory Alloy Fibers-Reinforced Engineered Cementitious Composites. Buildings (2022), 12(9), 1404.**
5. **Mohammad, S. & Islam K. L. Sixth International Earth building Conference, Earth USA, Fiber reinforced composite soil as an earthquake resistant building material. (2011)**
6. **Shan, C., Yang, Z., Su, Z., Rajan, R., Zhou, X., & Wang, L. Preparation and characterization of waterproof autoclaved aerated concrete using molybdenum tailings as the raw materials. Journal of Building Engineering (2022), 49, 104036.**
7. **Wu, J. A Multi-Physics Corrosion Induced Deterioration Framework for Durability Performance Management of Reinforced Concrete Structures. Stanford University, (2020).**
8. **Karka, B. R., Bruno, B., Ngarmaïm, N., & Rimbarngaye, A. The Effects of Degradation Phenomena of the Steel-Concrete Interface in Reinforced Concrete Structures. Journal of Materials Science and Chemical Engineering (2023), 11(3), 1-21.**
9. **Hu, Z., Shah, Y. I., & Yao, P. Experimental and numerical study on interface bond strength and anchorage performance of steel bars within prefabricated concrete. Materials (2021), 14(13), 3713.**
10. **Jian, X., Zhang, N., Liu, H., Zhao, Z., Lei, M., & Chen, Z. Interface slip of steel–concrete composite beams reinforced with CFRP sheet under creep effect. Scientific Reports (2022), 12(1), 22375.**
11. **Richard, B., Ragueneau, F., Cremona, C., Adelaide, L., & Tailhan, J. L. A three-dimensional steel/concrete interface model including corrosion effects. Engineering Fracture Mechanics (2010), 77(6), 951-973.**
12. **металлургия и термическая обработка металлов, москва, 1955.**
13. **https://www.upi.com/Science_News/2007/04/03/Scientists-to-build-self-healing house/44701175607880, Accessed 2023/03-29.**
14. **Arul V. M. J., Girinath R., Arun K., Brindha M. An Experimental study of clay brick using polystyrene, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) (2019), 2395-0072.**
15. **Rauf, M. A., Shah, A., Qazi, E. H., & Tahir, M. Evaluation of Expanded Polystyrene based Blocks for Lightweight Structures in the seismic prone areas, (2011).**
16. **Afsaneh R. Composite metal foam and methods of preparation thereof, US20140091241A1, Advanced Materials Manufacturing, LLC, (2016).**
17. **Ber, B., Premrov, M., Sustersic, I., & Dujic, B. Innovative earthquake resistant timber-glass buildings. Natural Science (2013), 5(08), 63.**
18. **https://www.buildingglassfactory.com/news/What-is-wired-glass-What-is-the-advantages-of-wiredglass.html#:~:text=Wired%20and%20meshed%20glass%20is,inexpensive%2C%20widely%20used%20architectural%20glass.**
19. **Hageman, J. M. Contractor's Guide to the Building Code. Craftsman Book Company, (2008).**
20. **Frazier, J. A. Self-Healing Concrete in Commercial Construction, (2017).**
21. **Amran, M., Onaizi, A. M., Fediuk, R., Vatin, N. I., Muhammad Rashid, R. S., Abdelgader, H., & Ozbakkaloglu, T. Self-healing concrete as a prospective construction material: a review. Materials (2022), 15(9), 3214.**
22. **Dominguez-Santos, D., Mora-Melia, D., Pincheira-Orellana, G., Ballesteros-Pérez, P., & Retamal-Bravo, C. Mechanical properties and seismic performance of wood-concrete composite blocks for building construction. Materials (2019), 12(9), 1500.**
23. **Direct Adhered Ceramic Tile, Stone, Masonry Veneer, and Thin Brick Facades – Technical Manual.**
24. **Fukahori, Y. (2014). Use of natural rubber (NR) for vibration isolation and earthquake protection of structures. In Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber (pp. 371-381). Woodhead Publishing.**
25. **Szczepański, M., Migda, W., & Jankowski, R. Experimental study on dynamics of wooden house wall panels with different thermal isolation. Applied Sciences (2019), 9(20), 4387.**
26. **de la Peña, A., Sato, A., Latour, M., & Rizzano, G. Conceptual design of anti-seismic devices with metal foam core for CBFs. Procedia Structural Integrity (2023), 44, 2144-2151.**

27. Ghiani, C., Linul, E., Porcu, M. C., Marsavina, L., Movahedi, N., & Aymerich, F.. Metal foam-filled tubes as plastic dissipaters in earthquake-resistant steel buildings. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (2018, September) (Vol. 416, No. 1, p. 012051). IOP Publishing.

28. Lenggana, B. W., Ubaidillah, U., Imaduddin, F., Choi, S. B., Purwana, Y. M., & Harjana, H. Review of magnetorheological damping systems on a seismic building. Applied Sciences (2021), 11(19), 9339.

29. Makusa, G. P. Soil stabilization methods and materials. Lulea University of Technology, (2012).

30. Afrin, H. A review on different types soil stabilization techniques. International Journal of Transportation Engineering and Technology (2017), 3 (2), 19-24.

تضارب المصالح

يصرح الباحثان أنه لا يوجد أي تضارب مصالح بشأن المقال المنشور.