JWPU
Journal of Al-Wataniya Private University
ISSN: 3105-2150

Volume (3) Number (1)
Available: https://wpu.edu.sy/wpuj/index.php/wpuh/en

Green Mortar with Glass Powder

Dr. Ruba Alsaeed [1,*], Dr. Heba Aljaddou [1] ,Ghosoun Hakawati [1]

ABSTRACT

The search for new sustainable building materials is a major focus in civil engineering. Recent research trends include numerous attempts to add glass powder to concrete mixes, but the results of these studies have varied, necessitating further investigation. This research aims to develop a new methodology for studying the effect of glass powder on mortar properties, specifically its strength and workability. The study focuses on the impact of partially replacing cement with ground glass powder on concrete's compressive and flexural strength. Several mixes, with varying percentages of glass powder (5%, 10%, 20%, and 30%), were prepared and compared to a reference sample without glass. Tests were conducted at 7 and 28 days .

The results showed a decrease in compressive strength at the 5% and 10% replacement levels due to a reduction in the amount of active cement and the absorption of some mixing water by the glass, which weakened the hydration reactions. At 20%, the strength improved slightly due to the onset of the pozzolanic reaction, but the values remained lower than those of the reference sample. Similarly, flexural strength initially decreased at 5% and then gradually increased at 10% and 20% due to improved internal distribution and the emergence of the pozzolanic reaction of the glass with hydration products.

KEYWORDS: Green Concrete, Glass Powder, Compressive Strength, Flexural Strength.

Submitted on January 1, 2025; Revised on February 27, 2025; Accepted on March 18, 2025.
© 2025 Al-Wataniya Private University. This work is licensed under the Creative Commons Attribution–NonCommercial–NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) license.

1 Faculty of Civil Engineering, Al-Wataniya Private University, Hama, Syria

* Corresponding author. E-mail address: ruba.alsaeed@wpu.edu.sy

خلطات مونة خضراء باستخدام مطحون الزجاج

د. ربا السعيد، د. هبة الجدوع، غصون حكواتي

الملخص

لا يزال البحث عن مواد بناء جديدة مستدامة من أبرز الاهتمامات في الهندسة المدنية. من بين الاتجاهات البحثية الحديثة، ظهرت محاولات عديدة لإضافة مسحوق الزجاج إلى الخلطة الخرسانية، لكن نتائج هذه الأبحاث تباينت فيما بينها مما استدعى المزيد من الدراسات.

يهدف هذا البحث إلى تطوير منهجية لدراسة تأثير مسحوق الزجاج (كمادة مضافة إلى المونة، من خلال تقييم خصائصها من حيث المقاومة وقابلية التشغيل). هدف هذا البحث إلى دراسة تأثير استبدال جزئي للإسمنت بمسحوق الزجاج المطحون على خواص الخرسانة، لا سيما مقاومتها على الضغط والشد بالانعطاف. تم إعداد عدة خلطات تحتوي على نسب مختلفة من مسحوق الزجاج (5%، 10%، 20%، و30%)، ومقارنتها بعينة مرجعية خالية من الزجاج. أجريت الاختبارات عند عمر 7 و28 يوماً.

أظهرت النتائج انخفاضاً في مقاومة الضغط عند النسب 5% و10% نتيجة تقليل كمية الإسمنت الفعّال وامتصاص الزجاج لجزء من ماء الخلطة، مما أضعف تفاعلات الإماهة. عند نسبة 20%، تحسنت المقاومة نسبياً نتيجة بدء فعالية التفاعل البوزولاني، إلا أن القيم بقيت أقل من العينة المرجعية.

فيما يتعلق بمقاومة الشد، أظهرت النتائج سلوكاً مشابهاً، حيث سُجل انخفاض طفيف عند 5% ثم ارتفاع تدريجي عند 10% و20% بسبب تحسن التوزيع الداخلي وظهور دور المواد البوزولانية الناتجة عن تفاعل الزجاج مع نواتج الإماهة.

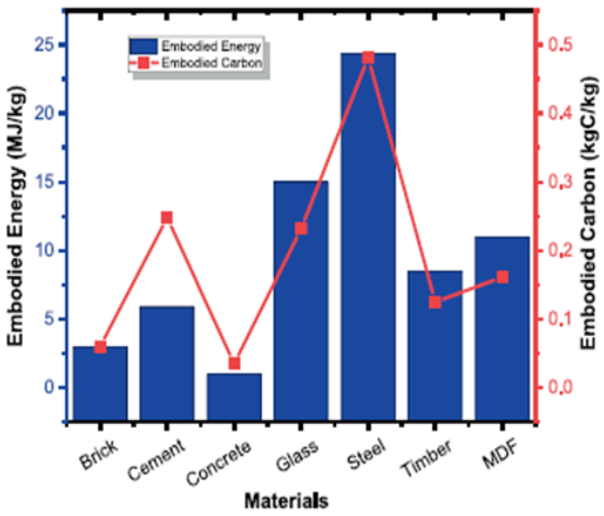
الكلمات المفتاحية: الخرسانة الخضراء، مطحون الزجاج، المقاومة على الضغط، المقاومة على الشد.

1. مقدمة

تعتبر الخرسانة أكثر استدامة من حيث استهلاك الطاقة وانبعاثات الكربون لكل حجم مقارنة بمواد البناء الأخرى مثل الفولاذ الشكل (1) [1]. ومع ذلك، فإن الاستهلاك الكبير للخرسانة مقارنة بمواد البناء الأخرى قد ألغى هذه الميزة المستدامة. يساهم إنتاج الأسمنت البورتلاندي العادي (Ordinary Portland Cement -OPC) الذي يعد المادة الرابطة الرئيسية في الخرسانة بنحو 8–10٪ في انبعاثات الكربون البشرية في العالم ويستخدم حوالي 3٪ الطاقة في العالم [2].

يُعتقد ان انبعاثات الكربون العالمية هي المحرك الرئيسي لتغير المناخ العالمي، وهي لا تنجم عن تلوث المركبات على الطرق السريعة أو حرائق الغابات فقط، ولكن أيضا عن إنتاج الأسمنت في مصانع الأسمنت. ويرجع هذا إلى الغازات المسببة للانحباس الحراري العالمي عند عملية التصنيع. يتم إنتاج حوالي 1.89 مليار طن من الأسمنت، المكون الرئيسي للخرسانة، في جميع أنحاء العالم كل عام.

إن صناعة الخرسانة هي أكبر مستهلك للركام الطبيعي والمياه العذبة [3,4] سيؤدي الإنتاج الأعلى للخرسانة للاستخدام المستقبلي إلى استنزاف كبير للموارد الطبيعية وتلوث البيئة [5,6]. لذلك، فإن الحاجة إلى الخرسانة الخضراء ضرورية لتلبية المتطلبات المستقبلية للخرسانة مع الحفاظ على الموارد الطبيعية. كما أن الزيادة العالمية في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بسبب الاستهلاك العالي للطاقة تُشير إلى ضرورة تركيز المجتمع على المباني منخفضة الكربون وذات كفاءة طاقية عالية. هناك حاجة لأن يكون المتخصصون في صناعة البناء والحكومات على دراية جيدة بطرق هندسة بيئة مستدامة. يُعتبر الزجاج مادة بناء جذابة جداً، توفر فرصاً لتطوير مبانٍ مبتكرة وموفرة للطاقة



الشكل (1): الطاقة المستهلكة والكربون المنتج لمواد البناء [7]

يمكن تصنيف الخرسانة الخضراء على أنها أي خرسانة تستهلك الطاقة وتنتج كربون أقل مقارنة بخرسانة OPC التقليدية. بالإضافة إلى ذلك، فإن الخرسانة الخضراء تتضمن بشكل أساسي مواد نفايات مختلفة إما كمواد رابطة او مواد تجميعية أو كلاهما. لذلك يمكن أن تكون الخرسانة الخضراء في أنواع مختلفة مثل الخرسانة مع الاستبدال الجزئي أو الكلي لـ OPC كمادة رابطة، أو الخرسانة التي تتضمن النفايات والمواد المعاد تدويرها كمواد تجميع [7,8]. وبصرف النظر عن قضايا الاستدامة، فإن الحاجة إلى وجود خرسانة قوية ومتينة دفعت إلى تطوير الخرسانة الخضراء التي يمكنها مقاومة الحمل والقوى المختلفة في البيئة. ستضمن احتمالات الخرسانة الخضراء لإنتاج خصائص ممتازة مقارنة بخرسانة OPC التقليدية انخفاض تكلفة الصيانة، والإكمال السريع للإنشاءات، وإطالة عمر الخدمة.

تمت مناقشة استخدام مكونات بديلة مختلفة لإنتاج الخرسانة الخضراء جنباً إلى جنب مع تأثيراتها الناتجة على خصائصها. من أجل استخدام الموارد الطبيعية بشكل أكثر فعالية والحفاظ على البيئة من النفايات، يمكن استخدام النفايات كمواد مضافة. بدلاً من استخدام 100% من الأسمنت البورتلاندي، يتم تصنيع الخرسانة الخضراء باستخدام 25% إلى 100% من الرماد المتطاير مثلاً. وهذا يؤدي الى تقليل كمية انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. زيادة استخدام الوقود المستخرج من النفايات في صناعة الأسمنت، مما يقلل من الطلب على الوقود الأحفوري.

في أوروبا، يُنتج أكثر من 1.2 مليون طن من نفايات المباني سنويًا، وتشكل نفايات الزجاج 0.6% فقط منه [9]. معظم المصنعين لا يعيدون تدوير زجاج النفايات، لذا إعادة الاستخدام مهمة. الزجاج مادة صلبة وخاملة، تصلح كركام في الخرسانة، مما يحسن من مظهرها. المشاكل المرتبطة بتفاعل القلوي–سيليكا يمكن الحد منها باستخدام زجاج ناعم. (زجاج مسحوق ومطحون الى حبيبات صغيرة اقل من 75–100) ميكرو متر في الحجم [10].

في الولايات المتحدة، قُدّرت قيمة صناعة الزجاج وحدها بحوالي 31 مليار دولار، بينما بلغت الإيرادات العالمية لهذا القطاع حوالي 130 مليار دولار في عام 2019. كانت قد قدرت بعض الدراسات بحلول عام 2025، ونظراً لتوسع الطلب على الزجاج في الولايات المتحدة، انه من المتوقع أن تصل إيرادات قطاع الزجاج المسطح إلى 44 مليار دولار[11.12] . ومن المتوقع أن تتجاوز قيمة صناعة الزجاج 180 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2027[13.14].

تتمثل إحدى الفوائد البيئية لإعادة صهر كسر الزجاج في أنها تقلل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون طوال عملية الإنتاج مقارنة بصنع الزجاج من المواد الخام الجديدة. ومع ذلك، تستهلك عملية إعادة الصهر قدراً كبيراً من الطاقة وتطلق قدراً كبيرًا من الغازات الدفيئة [15]. علاوة على ذلك، يمكن أن تقلل من تكلفة واستهلاك المواد الخام. يبدو أن تخطي مرحلة إعادة الصهر عن طريق إعادة الاستخدام بدلاً من إعادة التدوير يمكن أن يكون أكثر فائدة لكل من الاقتصاد والبيئة[15].

تدخل المركبات التالية في تركيب الزجاج: رمل السيليكا أو ثاني أكسيد السيليكون SiO_2، كربونات الصوديوم أو رماد الصودا (Na_2CO_3)، كربونات الكالسيوم او الحجر الكلسي ($CaCO_3$)، إضافة إلى بعض الأكاسيد المعدنية للحصول على ألوان معينة. تم اقتراح استخدام مسحوق نفايات الزجاج كمادة بوزولانية في السبعينيات بسبب تزايد نفايات الزجاج التي تم تكديسها دون استخدامات أو معالجة أو التي تُركت كبقايا للهياكل التالفة في الحروب أو الانفجارات [16,17]. والسبب وراء عدم إمكانية إعادة تدوير الزجاج هو شوائبه وألوانه المتنوعة مما يؤدي إلى العديد من المشاكل البيئية [18,19]. يتم إنتاج أكثر من مليون طن من نفايات الزجاج حول العالم كل عام [20]. يمكن إعادة تدوير هذه الكمية الضخمة لإنتاج زجاج جديد أو إعادة استخدامها في صناعات أخرى. يمكن استخدام هذه النفايات الصلبة في صناعة الخرسانة في قطاعات مختلفة مثل مواد البناء والأرصفة والرمل والأسمنت ومكونات الخرسانة وغيرها [21,22].

يعد البحث عن استخدام نفايات من صناعات مختلفة لاستبدال بعض أو كامل نسبة الأسمنت في إنتاج الخرسانة موضع اهتمام الكثير من الباحثين [23,24,25]. وبالتالي، فإن الاستفادة من استخدام الزجاج المهدر في الخرسانة يمكن أن يساعد في تقليل التلوث البيئي والحفاظ على الموارد الطبيعية وإنتاج خرسانة أكثر اقتصادا واستدامة [26,27].

استبدل Khatib وآخرون (2012) الأسمنت بمطحون الزجاج بنسب 10%، 20%، 30% و40%، وأظهروا أن استخدام مطحون الزجاج يسهم في زيادة قابلية تشغيل البيتون الطري مع ارتفاع نسبته. كما بينت النتائج أن مقاومة البيتون تنخفض بشكل طردي مع زيادة نسبة مطحون الزجاج [28]. وعلى النقيض من ذلك، أظهرت دراسة Vijayakumar وآخرون (2013) تحسنًا ملحوظًا في مقاومة البيتون للضغط [29].

في دراسة أجراها ammash وآخرون (2009) [30]، تم التوصل إلى أن زيادة نسبة الزجاج تؤدي إلى انخفاض في مقاومة الشد والضغط. بينما أظهرت دراسة Mageswari و Vidivelli (2010) أن الاحتياج المائي للخلطة البيتونية يتناقص، مما يقابله تحسن في مقاومة الضغط والشد بشكل طردي مع زيادة نسبة مطحون الزجاج في الخلطة [31].

بسبب النتائج المختلفة تم في هذا البحث استخدام مطحون الزجاج والبحث في تأثيره على خصائص المونة الاسمنتية ليكون نواة لابحاث تالية متعلقة بتاثير مطحون الزجاج على الخلطات البيتونية.

2. مواد البحث وطرائقه

1.2. الاسمنت

تم استخدام الاسمنت البورتلاندي العادي من النوع الأول (OPC) في جميع الخلطات الخرسانية، وهو

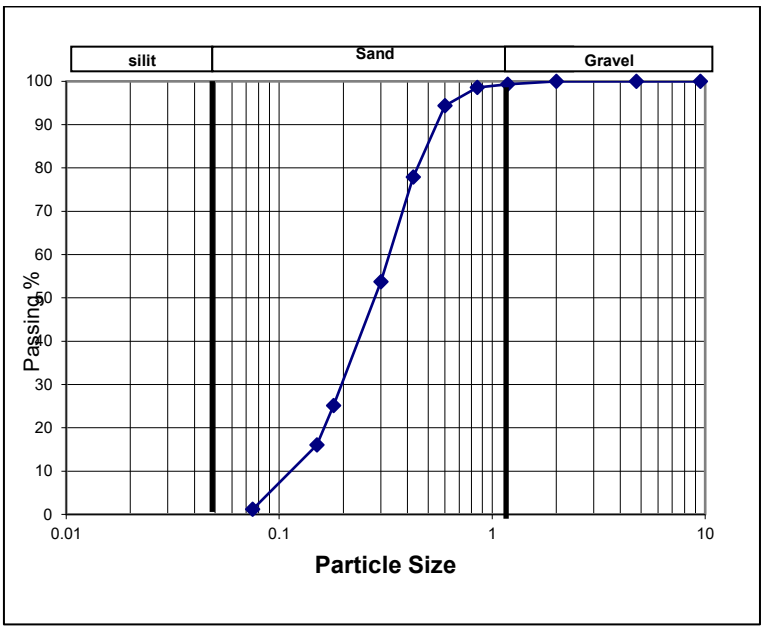
مطابق للمواصفات.ASTM C150-1992 وتعرض الخصائص التركيبة الكيميائية لهذا الاسمنت في الجدول.1:

الجدول (1): الخصائص الكيميائية للإسمنت المستخدم

Sio_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O
20.3	4.8	4.9	63	3.4	0.36

2.2. الرمل

تم استخدام رمل ناعم بحجم جزيئات يتراوح بين 0.075 – 0.6 مم. وكان المكافئ الرملي 75٪. والوزن النوعي 2.6. يوضح الشكل 2 منحنى التحليل الحبي المستخدم.



الشكل (2): منحني التحليل الحبي للرمل المستخدم في الخلطة

3.2. مطحون الزجاج

تم استخدام عينات زجاجية من نفايات الجامعة وهي عينات شفافة غير ملونة تم فرزها من حاويات الجامعة، وتم طحن العينات في معمل الاسمنت في حماه. يبين الجدول 2 التركيب الكيميائي لمسحوق الزجاج:



الشكل (3): جهاز طحن الزجاج، عينة من الزجاج المطحون

الجدول (2): التركيب الكيميائي لمسحوق الزجاج

Composition	Sio_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
%	70	2.56	1.53	11.9	0.66	13	0.48	0.07

4.2. تصميم عينات المونة

استُخدم مسحوق الزجاج لاستبدال الأسمنت جزئيًا بنسب 5%، 10%، 20%، و30% وزنًا، كما هو موضح في الجدول3 دون استخدام أي نوع من الملدنات، في قوالب للمونة 160 mm×40×40. احتوت جميع نسب الخليط على نفس محتوى المادة الرابطة. وحُفظت نسبة الماء إلى المادة الرابطة (W/Bعند 0.6). استُخدم خلاط دوار لخلط المواد المكونة

الجدول (3): مواصفات وأرقام الخلطات

الخلطة	الوصف
NA	خلطة بالمكونات العادية (اسمنت–رمل–ماء)
M1	5% بودرة زجاج بديل الاسمنت
M2	10% بودرة زجاج بديل الاسمنت
M3	20% بودرة زجاج بديل الاسمنت
M4	30%بودرة زجاج بديل الاسمنت

بعد تجهيز الخلطة تم صبها في القوالب المعدنية وفق المواصفة القياسية ASTM C172 تركت العينات لتجف خلال 24 ساعة ضمن شروط حفظ نظامية .بعد فك القوالب المعدنية تم وزن العينات وحفظت بعدها في أحواض نظامية للماء الدافئ حتى درجة حرارة 2 ± 23 درجة مئوية وفق المواصفة ASTM 192. قبل تنفيذ الاختبار تم إخراج العينات لتجفيفها بالشروط النظامية ووزنها لدراسة تأثير التغيرات في الوزن النوعي. يبين الجدول. 4 الاوزان في الخلطة:

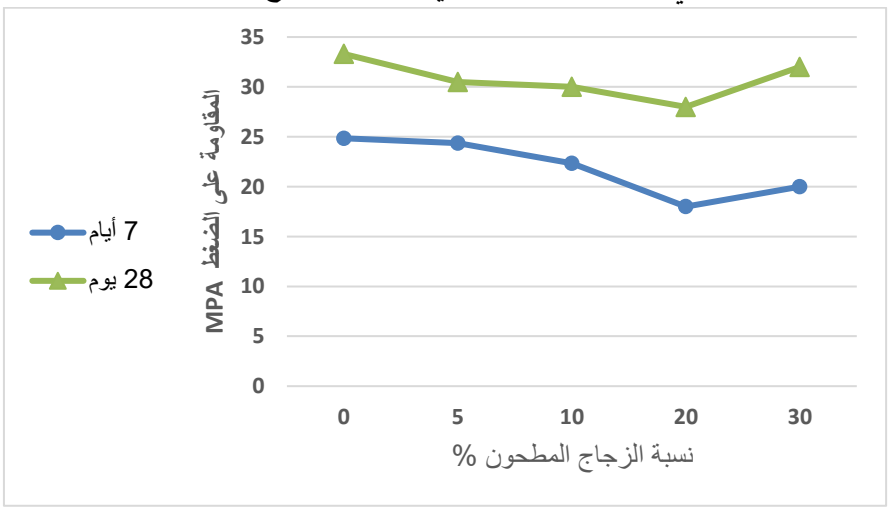
الجدول (4): أوزان المكونات في الخلطات

رقم العينة	رمل	ماء	زجاج	اسمنت
1	1500	300	0	500
2	1500	300	25	475
3	1500	300	50	450
4	1500	300	100	400
5	1500	300	150	350

3. النتائج والمناقشة

1.3. المقاومة على الضغط

نفذت عملية الكسر على الضغط لثلاث عينات، أخذ بعدها وسطي المقاومة. تمت دراسة المقاومة على الضغط على عمر 7 و28 يوما لغاية اعداد البحث، وأبدت العينات انخفاضا في المقاومة عند عمر 7 وكذلك كانت النتائج كالتالي 33.3، 30.5، 30، 28، 32 MPa للعينات العينة المرجعية، 5%،10%، 20% و30 % على التتالي عند عمر 28 يوماً. ويبين الشكل النتائج كاملة.



الشكل (4): المقاومة على الضغط

السبب الرئيسي لانخفاض المقاومة في البداية هو:

1. التأثير المخفف (Dilution Effect): عندما نستبدل جزءًا من الإسمنت بمسحوق الزجاج، فاننا نقلل من كمية الإسمنت الفعلية في الخلطة. الإسمنت هو المادة الرابطة الأساسية التي تتفاعل مع الماء بسرعة (تفاعل الإماهة) لتكوين هيدرات سيليكات الكالسيوم (C-S-H)، وهي المادة الهلامية المسؤولة عن اكتساب المقاومة الأولية والمبكرة. بتقليل كمية الإسمنت، يقل معدل تكوّن هذه المادة في الأيام الأولى، مما يؤدي إلى مقاومة ضغط أقل مقارنة بالخلطة المرجعية (0% زجاج).
2. بطء التفاعل البوزولاني: صحيح أن مسحوق الزجاج مادة مفيدة، ولكنه يساهم في المقاومة عبر التفاعل البوزولاني. هذا التفاعل بطيء جدًا مقارنة بتفاعل الإسمنت. في هذا التفاعل، يتفاعل السيليكا النشطة (SiO_2) الموجودة في الزجاج مع هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$ وهو ناتج ثانوي من تفاعل الإسمنت — لإنتاج المزيد من هيدرات سيليكات الكالسيوم (C-S-H) التي تزيد المقاومة.

المعادلة الكيميائية للتفاعل البوزولاني

$$CA(OH)_2 + SiO_2 \rightarrow C\text{-}S\text{-}H\ (GEL)$$

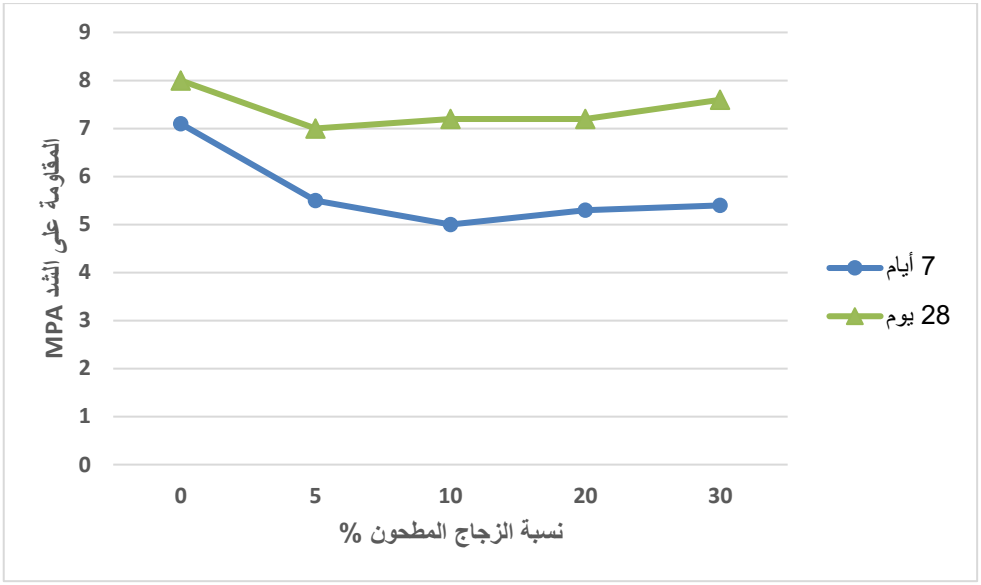
في الأسابيع الأولى من عمر المونة، لا يكون هذا التفاعل قد نشط بما يكفي لتعويض النقص في المقاومة الناتج عن تقليل كمية الإسمنت.

أما عند النسب الأعلى (مثل 20% و30%)، تصبح كمية مسحوق الزجاج كافية لبدء إنتاج كمية مؤثرة من هيدرات سيليكات الكالسيوم (C-S-H) الإضافية. هذه المادة الجديدة تملأ الفراغات الشعرية في هيكل المونة وتزيد من كثافتها وترابطها الداخلي، مما يؤدي إلى زيادة المقاومة.

تأثير الملء: حبيبات الزجاج المطحونة ناعمة جدًا، وغالبًا ما تكون أنعم من حبيبات الإسمنت. تعمل هذه الحبيبات الدقيقة كـ "حشو" يملأ الفراغات الميكروسكوبية بين حبيبات الإسمنت والرمل. هذا التأثير الفيزيائي يجعل بنية المونة أكثر كثافة وأقل مسامية، مما يساهم بشكل مباشر في زيادة مقاومة الضغط. عند نسبة 30%، يكون تأثير الملء هذا قد أصبح كبيرًا ومؤثرً

2.3. المقاومة على الشد بالانعطاف

الشكل يبن نتائج تجارب المقاومة على الشد، انخفضت قيمة المقاومة بشكل طفيف عند النسبة 5% ثم عادت للازدياد عند النسبة 10 و20 %. حيث بلغت قيم المقاومة 7.2، 7.2 و7.6 MPA للنسب 5، 10 و20% على التتالي وذلك عند عمر 28 يوم. إن السلوك كان مماثلا تقريبا للسلوك عند المقاومة على الضغط.



الشكل (5): المقاومة على الشد بالانعطاف

مسحوق الزجاج المطحون يزيد من مساحة السطح النوعية، مما يؤدي إلى امتصاص مزيد من الماء، وزيادة الفراغات الدقيقة أحيانًا نتيجة توزيع غير متجانس. الفراغات الإضافية تعني مناطق ضعف التي تقلل مقاومة الشد.

مع نسب 5 و10%، يكون هذا التخفيض غير مصحوب بإفادة كافية من النشاط البوزولاني، مما يؤدي إلى تقليل تكوّن الهيدرولوكسيد–السيليكات الكالسيوم (C-S-H) وهو مركب رئيسي في تعزيز قوة الخرسانة، عند استبدال نسبة صغيرة من الإسمنت بمسحوق الزجاج يحدث غالبًا نتيجة فقد جزئي في المواد الرابطة (الإسمنت)، يقابله تحسن طفيف من النشاط البوزولاني وملء الفراغات الدقيقة عند زيادة نسب الاستبدال. التوازن بين هذين الأثرين يؤدي إلى انخفاض محدود وغير مؤثر بشكل كبير على أداء الخرسانة.

3.3. درجة امتصاص المياه

تم قياس الوزن الرطب المشبع والجاف للعينات ولحساب امتصاص المياه وفق المعادلة التالية:

$$\frac{Set\ Weight\ -\ Dry\ Weight}{Dry\ Weight} \times 100$$

لا توجد قيمة "مثلى" واحدة لدرجة امتصاص الماء تنطبق على جميع المواد الإسمنتية (مثل المونة والخرسانة). القيمة المثالية أو النطاق المقبول لامتصاص الماء يعتمد بشكل كبير على عدة عوامل: نوع المادة: خرسانة عادية، خرسانة عالية الأداء، مونة ترميم كل مادة لها خصائصها ومتطلباتها.

التطبيق المقصود وظروف التعرض: التعرض للماء/الرطوبة: مثل الأساسات، الأقبية، المنشآت البحرية، محطات معالجة مياه الصرف الصحي، الأرصفة، الجسور. التعرض للمواد الكيميائية العدوانية: مثل الأحماض، الكبريتات، الكلوريدات (مثل أملاح إزالة الجليد). التعرض لدورات التجمد والذوبان: في المناطق ذات المناخ البارد.

بشكل عام، بالنسبة لمعظم المواد الإسمنتية، فإن انخفاض نسبة امتصاص الماء مرغوب فيه دائمًا لأنه يشير إلى مادة أكثر كثافة وأقل نفاذية مع بنية مسامية أدق. يمكن أن تتراوح قيم امتصاص الماء للخرسانة التقليدية على نطاق واسع، ولكنها غالبًا ما تقع في نطاق 4% إلى 10% أو أكثر. النتائج مبينة في الجدول (5):

الجدول (5): أوزان نتائج تجربة الامتصاص

رقم العينة	الوزن المشبع	الون الجاف	درجة امتصاص المياه
1	547	491.9	7
2	537	485.4	10
3	549	498.5	10
4	531	487.5	8.9
5	517	471.1	9.7

4. الاستنتاجات والتوصيات

يتفق البحث مع الأبحاث التي أكدت انخفاض المقاومة على الضغط والشد عند زيادة نسبة الزجاج المطحون عند عمر 7 و28 يوماً، تنخفض المقاومة بنسب بسيطة

تشير الدراسة إلى أن نسبة 20% تؤدي إلى تحقيق مقاومة قريبة من المرجعية، وهو ما يتوافق مع بعض الدراسات التي تشير إلى أن المقاومة تزداد عند هذه النسبة في المراحل المتأخرة (56–90 يوم). في المقابل، فإن النسب 5% و10% لا تظهر نفس النتائج المبكرة، حيث إن التأثير البوزولاني لم يتطور بعد. ويعود الانخفاض في المقاومة عند النسب الصغيرة إلى تقليل كمية الإسمنت دون تعويض كافٍ من النشاط البوزولاني. أما التحسن النسبي عند نسبة 20% فيُعزى إلى زيادة تكوين جزيئات C-S-H وتقليل الفراغات الدقيقة، وذلك بفضل اختيار الحجم والطحن المناسبين لمسحوق الزجاج.

هناك اتجاه عام متشابه بين مقاومة الضغط والشد: كلاهما ينخفض عند 5% ويظهر تحسنًا ملحوظًا بعد 20%، مما يشير إلى أن الآليات الأساسية التي تؤثر على ترطيب الأسمنت وتكوين بنية المونة تؤثر على كلتا الخاصيتين. الهدف هو أفضل أداء مكافئ، لذلك ينصح ان تكون نسبة الاستبدال 20 %

هو الأمثل، مع مراعاة طحن الزجاج جيداً وضبط نسبة الماء إلى الإسمنت. إن استبدال 20 % من الأسمنت بـ (GP- Glass Powder) يؤدي إلى خفض إجمالي انبعاثات CO_2 من 475 إلى -$kgCO_2$ eq 414 لكل m^3 [32].

المراجع

[1] B. V. V. Reddy and K. S. Jagadish, "Embodied energy of common and alternative building materials and technologies," *Energy and Buildings*, vol. 35, no. 2, pp. 129–137, 2003, doi: 10.1016/S0378-7788(01)00141-4.

[2] J. S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, and E. M. Gartner, "Sustainable development and climate change initiatives," *Cement and Concrete Research*, vol. 38, no. 2, pp. 115–127, 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.008.

[3] S. Karthik, P. Rao, P. Awoyera, R. Gobinath, and R. Karri, "Alkalinity and strength properties of concrete containing macro silica and ground granulated blast furnace slag," *IET Digital Library*, p. 4, 2018.

[4] P. Murthi, P. Awoyera, P. Selvaraj, D. Dharsana, and R. Gobinath, "Using silica mineral waste as aggregate in a green high strength concrete: Workability, strength, failure mode, and morphology assessment," *Australian Journal of Civil Engineering*, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1080/14488353.2018.1472539.

[5] V. Karthika, P. O. Awoyera, I. I. Akinwumi, R. Gobinath, R. Gunasekaran, and N. Lokesh, "Structural properties of lightweight self-compacting concrete made with pumice stone and mineral admixtures," *Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials*, vol. 48, pp. 208–213, 2018.

[6] S. Anandaraj, J. Rooby, P. O. Awoyera, and R. Gobinath, "Structural distress in glass fibre-reinforced concrete under loading and exposure to aggressive environments," *Construction and Building Materials*, vol. 197, pp. 862–870, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.090.

[7] G. P. Hammond and C. I. Jones, "Embodied energy and carbon in construction materials," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Energy*, vol. 161, no. 2, pp. 87–98, 2008, doi: 10.1680/ener.2008.161.2.87.

[8] P. O. Awoyera, J. O. Akinmusuru, and J. M. Ndambuki, "Green concrete production with ceramic wastes and laterite," *Construction and Building Materials*, vol. 117, pp. 29–36, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.108.

[9] C. Frassine, C. Rohde, and S. Hirzel, "Energy saving options for industrial furnaces: The example of the glass industry," in *ECEEE Industrial Summer Study Proceedings*, 2016.

[10] V. Corinaldesi, G. Gnappi, G. Moriconi, and A. Montenero, "Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars," *Waste Management*, vol. 25, no. 2, pp. 197–201, 2005.

[11] M. Garside, "Glass industry statistics & facts," *Statista*, 2019.

[12] C. Perry, *Glass Sector: Joint Industry—Government Industrial Decarbonisation and Energy Efficiency Roadmap Action Plan*. London, U.K.: *BEIS*, 2017.

[13] G. Vinci, F. D'Ascenzo, A. Esposito, M. Musarra, M. Rapa, and A. Rocchi, "A sustainable innovation in the Italian glass production: LCA and Eco-Care matrix evaluation," *Journal of Cleaner Production*, vol. 223, pp. 587–595, 2019.

[14] Q. Wu, L. Zeng, and Q. Zhou, "Phase I monitoring of optical profiles with application in low-emittance glass manufacturing," *Journal of Quality Technology*, vol. 50, pp. 262–278, 2018.

[15] E. Dawood and M. Abdullah, "Performance of green RPC containing nanoparticles and reinforced with hybrid fibers used for repairing damaged concrete," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 13, Art. no. e00428, 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00428.

[16] M. Barbuta, R. Bucur, A. A. Serbanoiu, S. Scutarasu, and A. Burlacu, "Combined effect of fly ash and fibers on properties of cement concrete," *Procedia Engineering*, vol. 181, pp. 280–284, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.390.

[17] L. F. Jochem, C. A. Casagrande, L. Onghero, C. Venâncio, and P. J. P. Gleize, "Effect of partial replacement of the cement by glass waste on cementitious pastes," *Construction and Building Materials*, vol. 273, Art. no. 121704, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121704.

[18] R. Wattanapornprom and B. Stitmannaithum, "Comparison of properties of fresh and hardened concrete containing finely ground glass powder, fly ash, or silica fume," *Engineering Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 35–48, 2015, doi: 10.4186/ej.2015.19.3.35.

[19] J. Khatib, A. Jahami, A. Elkordi, and O. Baalbaki, "Structural performance of reinforced concrete beams containing plastic waste caps," *Magazine of Civil Engineering*, vol. 91, no. 7, pp. 73–79, 2019, doi: 10.18720/MCE.91.7.

[20] N. D. Bheel, S. K. Mahro, Z. H. Shaikh, R. A. Abbasi, I. A. Shar, and A. A. Dayo, "Effect of waste glass powder on the fresh and hardened properties of concrete," *ResearchGate*, 2020.

[21] J. M. Khatib, A. Jahami, A. Elkordi, H. Abdelgader, and M. Sonebi, "Structural assessment of reinforced concrete beams incorporating waste plastic straws," *Environments*, vol. 7, no. 11, Art. no. 96, 2020, doi: 10.3390/environments7110096.

[22] S. Nasier, "Utilization of recycled form of concrete, e-wastes, glass, quarry rock dust and waste marble powder as reliable construction materials," *Materials Today: Proceedings*, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.381.

[23] M. Belouadah, Z. E. Abidine Rahmouni, and N. Tebbal, "Experimental characterization of ordinary concretes obtained by adding construction waste (glass, marble)," *Procedia Computer Science*, vol. 158, pp. 153–162, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.09.038.

[24] R. S. Al-Kizwini, "Reuse plastic and glass wastes as a partial replacement of concrete components," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 1109–1120, 2020.

[25] H. Al jaddou, "Environmental Costs and the Importance of Environmental Impact Assessments for Projects", *Journal of Al-Wataniya Private University*, vol. 2, no. 2, pp. 69–82, Dec. 2024, doi: 10.5281/zenodo.19643875.

[26] J. Khatib, A. Jahami, A. El Kordi, M. Sonebi, Z. Malek, R. Elchamaa, and S. Dakkour, "Effect of municipal solid waste incineration bottom ash (MSWI-BA) on

the structural performance of reinforced concrete (RC) beams," *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2021, doi: 10.1108/JEDT-01-2021-0068.

[27] B. Balasubramanian, G. V. T. Gopala Krishna, V. Saraswathy, and K. Srinivasan, "Experimental investigation on concrete partially replaced with waste glass powder and waste e-plastic," *Construction and Building Materials*, vol. 278, Art. no. 122400, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122400.

[28] J. M. Khatib, E. M. Negim, H. S. Sohl, and N. Chileshe, "Glass powder utilisation in concrete production," *European Journal of Applied Sciences*, vol. 4, no. 4, pp. 173–176, 2012.

[29] G. Vijayakumar, H. Vishaliny, and D. Govindarajulu, "Studies on glass powder as partial replacement of cement in concrete production," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 3, no. 2, 2013.

[30] H. K. Ammash, S. M. Muhammed, and A. H. Nahhab, "Using of waste glass as fine aggregate in concrete," *Al-Qadisiya Journal for Engineering Sciences*, vol. 2, no. 2, 2009.

[31] M. Mageswari and B. Vidivelli, "The use of sheet glass powder as fine aggregate replacement in concrete," *The Open Civil Engineering Journal*, vol. 4, pp. 65–71, 2010.

[32] G. M. S. Islam, M. H. Rahman, and N. Kazi, "Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice," *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 6, no. 1, pp. 37–44, 2017, doi: 10.1016/j.ijsbe.2016.10.005.