تأثير استخدام مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية (GFRP Waste) على مقاومة الانضغاط للخرسانة الإسمنتية

إعداد الطالب:

لمك بسَّام الجداوي

المشرف العلمي:

الدكتور عامر الشيخ

قسم الهندسة الكيميائية
كلية الهندسة الكيميائية والبترولية
جامعة حمص

المشرف المشارك:

الدكتور عبد الناصر الأعرج

قسم الهندسة الكيميائية
كلية الهندسة الكيميائية والبترولية
جامعة حمص

الملخص

تُعدّ مخلفات المواد المركبة، ولا سيما مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية(GFRP) ، من التحديات البيئية المتزايدة نظراً لصعوبة إعادة تدويرها بوسائل تقليدية، مما يستدعي البحث عن حلول بديلة ومستدامة لإعادة توظيفها. يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير إضافة مخلفات GFRP المطحونة

على مقاومة الانضغاط للخرسانة الإسمنتية، وذلك من خلال برنامج تجريبي مخبري منظّم شمل مرحلتين أساسيتين. في المرحلة الأولى، تم استخدام المخلفات كبديل جزئي عن وزن الإسمنت، بينما في المرحلة الثانية استُخدمت كمادة مضافة مع تثبيت كمية الإسمنت في الخلطة.

تم تحضير خلطة خرسانية مرجعية بعيار إسمنت قدره $400\ \frac{kg}{m^3}$، واعتماد نسب إضافة تراوحت بين $(0 - 12.5)$ % من مخلفاتGFRP ، مع اختبار مقاومة الانضغاط لعينات مكعبية عند أعمار 7 و28 يوماً وفق المواصفات القياسية المعتمدة. أظهرت النتائج أن إضافة مخلفات GFRP بنسبة منخفضة، ولا سيما عند نسب منخفضة، أدت إلى تحسن طفيف أو محافظة على مقاومة الانضغاط مقارنة بالخلطة المرجعية، خصوصاً في حالة تثبيت كمية الإسمنت، في حين أدى ارتفاع نسبة الإضافة إلى تراجع ملحوظ في المقاومة.

تشير نتائج هذا البحث إلى إمكانية الاستفادة من مخلفات GFRP كنسبة محدودة في الخلطات الخرسانية دون التأثير السلبي الكبير على الخواص الميكانيكية، مما يفتح المجال أمام تطبيقات إنشائية صديقة للبيئة تسهم في تقليل الأثر البيئي للمخلفات الصناعية.

الكلمات المفتاحية :الخرسانة الإسمنتية، مخلفاتGFRP ، الإيبوكسي، مقاومة الانضغاط، الاستدامة.

Abstract

Composite material wastes, particularly glass fiber reinforced epoxy (GFRP) waste, represent a growing environmental challenge due to the difficulty of recycling thermoset polymers using conventional methods. This study investigates the effect of incorporating ground GFRP waste on the compressive strength of cement concrete through a structured experimental program conducted in two main phases. In the first phase, GFRP waste was used as a partial replacement of cement by weight, while in the second phase it was added to the concrete mixture while maintaining a constant cement content.

A reference concrete mix with a cement content of 400 kg/m³ was prepared, and GFRP waste was incorporated at proportions ranging from 0% to 12.5%. Compressive strength tests were carried out on cubic specimens at curing ages of 7 and 28 days in accordance with relevant standards. The results indicated that low GFRP waste contents, particularly at ---%, resulted in comparable or slightly improved compressive strength compared to the reference mix, especially when the cement content was kept constant. However, higher replacement or addition levels led to a noticeable reduction in compressive strength.

The findings of this study demonstrate the potential feasibility of utilizing limited amounts of GFRP waste in concrete mixtures without significant deterioration in mechanical performance, offering an environmentally sustainable approach for recycling industrial composite waste in construction applications.

Keywords: Cement concrete, GFRP waste, epoxy, compressive strength, sustainability.

المقدمة

يشهد قطاع الإنشاءات في العقود الأخيرة توسعاً ملحوظاً ترافق مع زيادة كبيرة في استهلاك المواد الإسمنتية، الأمر الذي أدى إلى تفاقم المشكلات البيئية المرتبطة بإنتاج الإسمنت من حيث استنزاف الموارد الطبيعية وارتفاع انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. وبالتوازي مع ذلك، برزت مشكلة تراكم المخلفات الصناعية، ولا سيما مخلفات المواد المركبة المدعمة بالألياف الزجاجية(GFRP) ، الناتجة عن صناعات متقدمة مثل صناعة شفرات العنفات الريحية، والتي تُعد من أكثر المخلفات صعوبةً في إعادة التدوير بسبب طبيعة راتنجات الإيبوكسي الحرارية غير القابلة للانصهار.

في هذا السياق، اتجهت الأبحاث الحديثة إلى استكشاف إمكانية إعادة توظيف المخلفات الصناعية والليفية ضمن الخلطات الخرسانية، سواء كمواد مالئة أو كبدائل جزئية عن مكونات الخرسانة التقليدية، بهدف تحقيق فوائد بيئية واقتصادية مع المحافظة على الأداء الميكانيكي المطلوب. وقد أظهرت العديد

من الدراسات أن إضافة ألياف أو مخلفات ليفية إلى الخرسانة يمكن أن تؤثر بشكل مباشر على خواصها الميكانيكية، ولا سيما مقاومة الانضغاط، ومقاومة الشد، والمتانة طويلة الأمد، إلا أن طبيعة هذا التأثير تعتمد بشكل أساسي على نوع المادة المضافة، شكلها، حجمها، ونسبة إضافتها.

تركزت معظم الدراسات السابقة على استخدام الألياف الزجاجية أو البوليمرية المصنعة حديثاً، في حين أن الدراسات المتعلقة باستخدام مخلفات المواد المركبة المطحونة، وخاصة مخلفات GFRP المحتوية على راتنجات إيبوكسي متصلبة، ما تزال محدودة نسبياً، وخصوصاً فيما يتعلق بدراسة تأثيرها على مقاومة الانضغاط للخرسانة عند استخدام استراتيجيات مختلفة للإضافة، مثل الإحلال الجزئي للإسمنت أو الإضافة المباشرة مع تثبيت محتواه.

بناءً على ما سبق، تأتي هذه الدراسة لتسد فجوة بحثية قائمة من خلال تقييم تأثير إضافة مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية المطحونة على مقاومة الانضغاط للخرسانة الإسمنتية، وذلك عبر مرحلتين تجريبيتين متميزتين: الأولى تعتمد على تقليل كمية الإسمنت واستبداله جزئياً بالمخلفات، والثانية تعتمد على تثبيت كمية الإسمنت وإضافة المخلفات كمادة مضافة. وتهدف هذه المقارنة إلى تحديد السلوك الميكانيكي للخرسانة الناتجة، وتحديد النسب المثلى الممكنة للإضافة دون التأثير السلبي الكبير على مقاومة الانضغاط، بما يدعم التوجه نحو حلول إنشائية أكثر استدامة وصديقة للبيئة.

حظي استخدام المواد المركبة والبوليمرات المدعمة بالألياف باهتمام واسع في مجال هندسة الخرسانة خلال السنوات الماضية، نظراً لقدرتها على تحسين بعض الخواص الميكانيكية للمواد الإسمنتية، ولا سيما مقاومة الشد والانحناء، إضافة إلى دورها في الحد من تطور التشققات. وقد ركزت العديد من الدراسات على استخدام الألياف الزجاجية وألياف الكربون سواء على شكل أقمشة أو ألياف قصيرة، مع تسجيل اختلافات واضحة في الأداء تبعاً لنوع الألياف وطريقة استخدامها.

GFRP: Glass Fiber Reinforced Polymer

أظهرت دراسة Park **et al. (2020)** أن نوع الألياف المستخدمة في المواد المركبة يلعب دوراً حاسماً في السلوك الميكانيكي، حيث أظهرت الألياف الزجاجية صلابة أقل مقارنةً بالألياف الكربونية عند تعزيز العناصر الخرسانية بمونة مقواة بالنسيج، ويُعزى ذلك إلى ضعف الترابط البيني بين الألياف الزجاجية والمصفوفة مقارنةً بألياف الكربون [1]. وتنسجم هذه النتائج مع ما توصل إليه **Baker (2019)**، الذي بيّن أن الألياف الزجاجية لم تُحقق تحسناً يُذكر في مقاومة الانضغاط عند استخدامها كلفافات خارجية، في حين كان تأثيرها أكثر وضوحاً في تحسين مقاومة الشد والانحناء، مقابل تفوق واضح لألياف الكربون في تحسين مقاومة الانضغاط.[2]

في المقابل، تشير دراسات أخرى إلى أن فعالية الألياف الزجاجية قد تتحسن عند استخدامها على شكل ألياف قصيرة موزعة داخل المصفوفة بدلاً من استخدامها كتعزيز خارجي. فقد أظهر Reis **(2005)** أن إضافة ألياف زجاجية قصيرة إلى الخرسانة البوليمرية الإيبوكسية أدت إلى تحسن ملحوظ في مقاومة الانضغاط وزيادة في المطيلية، على الرغم من ملاحظة انخفاض طفيف في معامل المرونة، مما يعكس سلوكاً شائعاً في المواد المركبة حيث يتم تحقيق زيادة في القوة على حساب الصلابة.[3]

وبصورة مشابهة، بيّنت دراسة Subandi **et al. (2019)** وجود نسبة مثلى لإضافة الألياف الزجاجية إلى الخرسانة الإسمنتية، حيث أدى استخدام نسبة 0.25% من وزن الإسمنت إلى تحقيق أعلى مقاومة انضغاط، في حين أن تجاوز هذه النسبة أدى إلى تراجع المقاومة بسبب تكتل الألياف وضعف الالتصاق داخل المصفوفة الإسمنتية [7]. تؤكد هذه النتائج أهمية التحكم بنسبة الإضافة لتحقيق التوازن الأمثل بين تحسين الأداء الميكانيكي والحفاظ على تجانس الخلطة.

من جهة أخرى، اتجهت دراسات حديثة إلى معالجة البعد البيئي من خلال إعادة تدوير مخلفات المواد المركبة بدلاً من استخدام الألياف البكر. فقد تناولت دراسة **Meira Castro (2013)** إمكانية استخدام نفايات GFRP المعاد تدويرها ميكانيكياً كحشوة أو بديل جزئي للركام في المونة البوليمرية، وأظهرت النتائج تحسناً في الخواص الميكانيكية عند نسب إضافة منخفضة، مع تسجيل نسب مثلى تعتمد على حجم الجسيمات المضافة [5]. كما أشار الباحث إلى أن المساحيق الناعمة جداً قد تسهم في تحسين قابلية التشغيل، في حين أن الجسيمات الأكبر قد تُظهر تأثيراً تقوياً أفضل.

وفي السياق نفسه، أظهرت دراسة **Dehghan (2017)** أن تأثير مخلفات GFRP المعاد تدويرها يعتمد بشكل كبير على شكلها الفيزيائي، حيث لم يُظهر مسحوق GFRP الناعم تحسناً واضحاً في الخصائص الميكانيكية، بينما أدت التكتلات المحتوية على ألياف قصيرة إلى تحسن طفيف في مقاومة الانضغاط ونمط الفشل، إضافةً إلى وجود مؤشرات على تفاعل بوزولاني للألياف الزجاجية داخل المصفوفة الإسمنتية وفق فحوص.[8] SEM

كما دعمت دراسة **Syafwand et al. (2022)** مفهوم "النسبة المثلى"، حيث أظهرت أن إضافة الألياف الزجاجية إلى الخرسانة البوليمرية الإيبوكسية أدت إلى زيادة كبيرة في مقاومة الانضغاط حتى نسبة 6% من وزن الراتنج، قبل أن تبدأ المقاومة بالانخفاض عند نسب أعلى.[6]

من ناحية شمولية، قدمت دراسة **Siddika et al. (2020)** مراجعة شاملة أكدت على الكفاءة العالية للمواد المركبة المدعمة بالألياف في تعزيز الهياكل الخرسانية، مع الإشارة إلى أن الواجهة البينية بين المادة المركبة والخرسانة تُعد نقطة ضعف محتملة تتحكم في نمط الفشل النهائي، وهو عامل يجب أخذه بعين الاعتبار عند دمج مواد مركبة أو مخلفاتها داخل المصفوفة الإسمنتية.[4]

تناولت الدراسة، التي أجراها **Shui-Chuen Kou(2009)** ، استخدام مخلفات الزجاج المعاد تدويرها كبديل جزئي للركام الطبيعي في الخلطات الخرسانية، مع التركيز على تأثير ذلك على الخصائص الميكانيكية والمتانة.[9]

تم تحضير خلطات خرسانية باستخدام نسب مختلفة من الزجاج المعاد تدويره كبديل عن الركام الناعم، ثم أُجريت اختبارات مقاومة الانضغاط، الامتصاص، والكثافة بعد فترات معالجة مختلفة.

النتائج الرئيسية:

- أظهرت الخرسانة المحتوية على نسب منخفضة من الزجاج المعاد تدويره أداءً مقارباً للخرسانة التقليدية.
- عند زيادة نسبة الإحلال، لوحظ انخفاض تدريجي في مقاومة الانضغاط، نتيجة ضعف الترابط البيني بين الزجاج والمصفوفة الإسمنتية.
- أكدت الدراسة أن ضبط نسبة الإضافة عامل حاسم لتحقيق توازن بين الاستدامة والأداء الميكانيكي.

تدعم هذه الدراسة مفهوم النسبة المثلى للإضافة الذي يعتمد عليه البحث الحالي، حيث أن مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية قد تُحسن الأداء عند نسب محددة، بينما تؤدي الزيادات المفرطة إلى تراجع الخصائص الميكانيكية.[9]

بحثت دراسة José Ricardo Correia (2011) بشكل مباشر في إمكانية إعادة استخدام مخلفات البوليمرات المقواة بالألياف الزجاجية (GFRP) داخل الخرسانة الإسمنتية، مع تقييم تأثيرها على الخصائص الميكانيكية وسلوك الفشل.[10]
تم طحن مخلفات GFRP ميكانيكياً واستخدامها كبديل جزئي عن الركام الناعم في الخرسانة بنسب مختلفة. أُجريت اختبارات مقاومة الانضغاط، الشد، والانحناء.

النتائج الرئيسية:

- أظهرت الخلطات المحتوية على نسب منخفضة من مخلفات GFRP تحسناً طفيفاً في مقاومة الانضغاط.
- لوحظ أن وجود الألياف الزجاجية القصيرة ساهم في تحسين نمط الفشل من هش إلى أكثر مطيلية.
- عند زيادة نسبة المخلفات، بدأت مقاومة الانضغاط بالانخفاض نتيجة ضعف التجانس وصعوبة الدمك.[10] .

بينما ركزت دراسة Takashi Ochi (2007) على استخدام ألياف بوليمرية معاد تدويرها (PET) كألياف تسليح للخرسانة، بهدف تحسين الخصائص الميكانيكية مع تحقيق فائدة بيئية.[11] تم تحضير خلطات خرسانية بألياف PET معاد تدويرها بنسب مختلفة، وأُجريت اختبارات مقاومة الانضغاط، الشد، والانحناء، إضافة إلى مراقبة التشققات.

النتائج الرئيسية:

- لم تُظهر مقاومة الانضغاط تحسناً كبيراً عند زيادة محتوى الألياف، بل لوحظ أحياناً انخفاض طفيف.
- في المقابل، تحسنت مقاومة الشد والانحناء بشكل واضح نتيجة قدرة الألياف على كبح التشققات.
- أكدت الدراسة وجود نسبة مثلى للألياف تحقق أفضل توازن بين الخصائص الميكانيكية وقابلية التشغيل[11] .

استناداً إلى ما سبق، يتضح أن معظم الدراسات السابقة إما ركزت على استخدام ألياف بكر أو على إعادة تدوير مخلفات GFRP ضمن مونة أو خرسانة بوليمرية، في حين ما تزال الدراسات التي تقارن

بين إحلال الإسمنت جزئياً بمخلفات GFRP وإضافتها مع تثبيت محتوى الإسمنت محدودة. من هنا، تأتي هذه الدراسة لتسد فجوة بحثية واضحة من خلال تقديم مقارنة تجريبية مباشرة بين هاتين الاستراتيجيتين، مع تقييم تأثير نسب مختلفة من مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية على مقاومة الانضغاط للخرسانة الإسمنتية.

هدف البحث

يهدف هذا البحث إلى:

- دراسة تأثير إضافة مخلفات صناعة الإيبوكسي المدعمة بالألياف الزجاجية على الخواص الميكانيكية للخرسانة الإسمنتية.
- تحديد مدى إمكانية تعزيز مقاومة الانضغاط للخرسانة باستخدام هذه المخلفات.
- اختبار إمكانية تقليل كمية الأسمنت في الخلطة الخرسانية بإضافة نسبة معينة من مخلفات الإيبوكسي دون التضحية بالمقاومة.
- المساهمة في إيجاد حل بيئي مستدام للاستفادة من المخلفات الصناعية الضارة والتخلص الآمن منها.

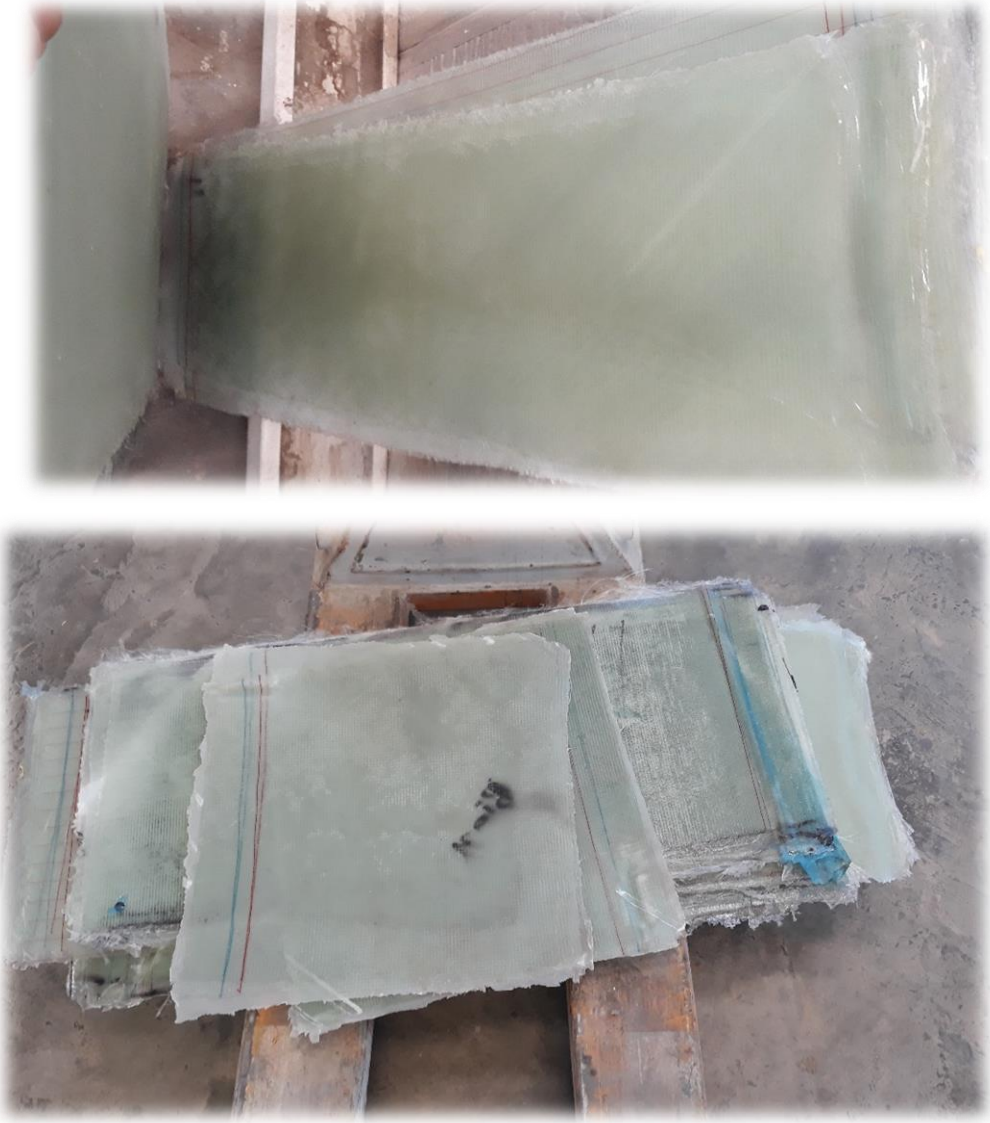
اتُّبع في هذا البحث المنهج التجريبي الوصفي، حيث شملت خطوات البحث الرئيسية ما يلي:

تحضير المواد :جُمعت مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية :(GFRP Waste) وهي المادة الأساسية قيد الدراسة في هذا البحث، والتي تمثل تحدياً بيئياً وفرصة هندسية في آن واحد، بالإضافة إلى المواد التقليدية للخرسانة (أسمنت، ورمل، وحصى).

المصدر والتركيب :تم الحصول على المخلفات من عمليات القطع والتشذيب الناتجة عن تصنيع مكونات كبيرة من المواد المركبة (شفرات العنفات الريحية). تتكون هذه المخلفات بشكل أساسي من ألياف زجاجية من نوع (E-Glass)مطمورة ضمن مصفوفة من راتنج الإيبوكسي المتصلب (Thermoset Epoxy Resin).الإيبوكسي المستخدم في هذه الصناعات هو من النوع عالي الأداء، يتميز بقوة رابطة عالية ومقاومة كيميائية جيدة، وبعد تصلبه يصبح مادة غير قابلة للانصهار، مما يعقد عملية إعادة التدوير.

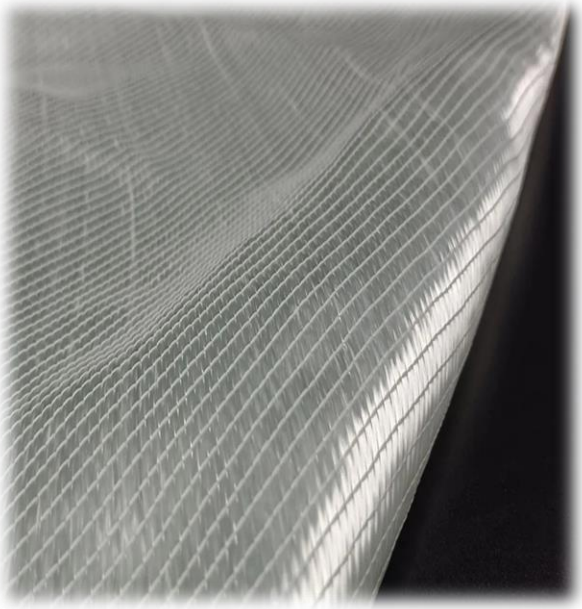
فحص التوافقية والاندماج:

- قبل الاختبارات، تم التأكد من توافقية المخلفات مع الخرسانة من خلال فحص قابلية التشغيل (Slump Test)، الملاحظة البصرية للتجانس، واختبارات مبكرة لقوة الانضغاط.
- الهدف كان التأكد من عدم وجود تكتل للألياف أو تأثير سلبي على الترابط بين المصفوفة الإسمنتية والمخلفات.



الشكل (1) صور للمخلفات قبل الطحن والتنعيم

- **أنواع الألياف الأصلية :**
  - **أنسجة ثلاثية المحاور (Triax):** مثل PGTEX Glass Triax +45°/− 45°/0° 1215 g/m².
  - **أنسجة ثنائية المحاور (Biax):** مثل PGTEX Glass Biax +45°/−45° 808 g/m².
  - **أنسجة أحادية الاتجاه (UD):** مثل PGTEX Glass UD 0° 1200 g/m².





الشكل (2) صور لأشكال مختلفة من منتجات الألياف الزجاجية

الراتينج الأصلي المستخدم:

نظام الإيبوكسي :(Epoxy System) على الرغم من أن المادة المضافة هي "مخلفات"، فمن الضروري فهم خصائص المكونات الأصلية لهذه المخلفات. الراتنج المستخدم في صناعة شفرات العنفات الريحية هو نظام إيبوكسي عالي الأداء. تم الحصول على النشرة الفنية لنظام مشابه وهو Araldite® LY 1568مع المقسيات Aradur® 3489/3492من شركة Huntsman، والذي يمثل خصائص هذا النوع من المواد:

- ✓ الراتنج :(Araldite® LY 1568) راتنج إيبوكسي أساسي يتميز بلزوجة منخفضة (1300–1500 cps)مما يسهل عملية تشريب الألياف.
- ✓ المقسي :(Aradur® 3489/3492) يوفر النظام نوعين من المقسي للتحكم بزمن التفاعل، مما يعطي مرونة كبيرة في عمليات التصنيع.
- ✓ الخصائص الميكانيكية بعد التصلب :يتميز النظام بعد تصلبه بخصائص ميكانيكية ممتازة.

المواد التي تم الحصول عليها (خليط الايبوكسي والالياف الزجاجية) من شركة WDRVM المجمع السوري الأوربي للصناعات الثقيلة https://wdrvm.co/ المتخصص بصناعة توربينات الرياح [التوربينات الموجودة على استرد حمص طرطوس]وهي شركة متخصصة بالمواد المركبة والراتنجات والالياف الزجاجية وهي أساس صناعتها

كما تم إجراء جميع هذه الاختبارات ضمن مقر الشركة .

- **تصميم الخلطات** :أُعدّت خلطة خرسانية مرجعية أساسية، ثم تم تعديلها في مرحلتين *(1)* : المرحلة الأولى تضمنت تقليل كمية الأسمنت تدريجيًا وإضافة مخلفات الإيبوكسي بنسب متفاوتة بين 0.5% و12.5%، *(2)*المرحلة الثانية تم خلالها تثبيت كمية الأسمنت مع تطبيق نفس نسب الإضافة من المخلفات.

يوضح الشكل أدناه عيار الاسمنت ومكونات الخلطة الاسمنتية بدقة، تم الحصول على الحصويات من مرملة power petonفي حسياء الصناعية

الغاية:					
رقم التجربة:	ref	عدد العينات:	5	الأبعاد (cm):	15*15*15
تاريخ التجربة:	01/03/2024	درجة الحرارة:			
الحجم المطلوب (m^3):		0.02		الهبوط (cm):	

الحصويات					
حجم الحصويات المطلوب (kg)		النسبة %	الوزن للمتر المكعب (kg)	المورد	المادة
بحص	12.5	34.44%	625	حسياء	بحص
سرك	7.8	21.49%	390	حسياء	سرك
بودرة	9.2	25.34%	460	حسياء	بودرة
رمل	6.8	18.73%	340	حسياء	رمل
36.3			1815		المجموع

الإضافات		الإسمنت			
الكمية (g)	نسبة الإضافات %		حجم الإسمنت الكلي (kg)	المورد	العيار للمتر المكعب (kg)
0	0		8	حماة ٣٢,٥	400

الإسمنت المطلوب (kg)
8

الماء		
W/C %	كمية الماء للمتر المكعب (L)	كمية الماء المضاف (L)
50.00%	200	4

ماء (l)	حصويات $(\frac{Kg}{m^3})$	مخلفات GFRP (gr)	الإسمنت (kg)	نسبة الإضافة(%)	رمز الخلطة
4.00	36.3	0	8	0	**REF**
4.25	36.3	40	7.96	0.5	**L1**
4.25	36.3	200	7.8	2.5	**L2**
4.55	36.3	400	7.6	5.0	**L3**
4.60	36.3	600	7.4	7.5	**L4**
4.70	36.3	800	7.2	10.0	**L5**
4.96	36.3	1000	7	12.5	**L6**

جدول(1) تصميم الخلطات الخرسانية للمرحلة الأولى (تقليل كمية الإسمنت)

ماء (l)	حصويات $kg)($	مخلفات GFRP gr	الإسمنت $kg)($	نسبة الإضافة (%)	رمز الخلطة
4.00	36.3	0	8	0	**REF**

LJ1	0.5	8	40	36.3	4.20
LJ2	2.5	8	200	36.3	4.22
LJ3	5.0	8	400	36.3	4.35
LJ4	7.5	8	600	36.3	4.45
LJ5	10.0	8	800	36.3	4.60
LJ6	12.5	8	1000	36.3	4.80
L2J	2.5	8	200	36.3	4.25

جدول (2) تصميم الخلطات الخرسانية للمرحلة الثانية (تثبيت كمية الإسمنت).

- **صب وتشكيل العينات** :صُبّت الخلطة في قوالب مكعبة الأبعاد (15×15×15 سم) مع الاهتزاز لضمان التماسك. حُضرت ثلاث عينات على الأقل لكل نسبة إضافة ولكل فترة معالجة لإحصاء النتائج .
- **المعالجة (التصلب)** :تم معالجة العينات في غرفة ترطيب مسيطرة على درجة حرارتها، حيث نُبقِّيها بالماء يوميًا لمدة 7 أيام لمجموعة أولى، ولمدة 28 يومًا لمجموعة ثانية، وفقًا للمعايير القياسية.

توصّف المواصفة القياسيّة السورية [م. ق.س. 1996/1675]،

- **اختبار مقاومة الانضغاط** :بعد انتهاء كل فترة معالجة، أُجري اختبار مقاومة الانضغاط على العينات باستخدام آلة اختبار الضغط، وسُجل المتوسط الحسابي لقوى الانهيار لكل مجموعة. تم تسجيل متوسط ثلاث عينات لكل نسبة إضافة وعمر معالجة لضمان دقة النتائج وتقليل



التباين

الشكل (3) صور اختبار الكسر للعينات

الأدوات المستخدمة

تم استخدام الأدوات والمعدات التالية لضمان دقة التجارب:

رقم	الأداة	الاستخدام
1	**خلاطة ميكانيكية**	لضمان خلط متجانس للإسمنت، الركام، الماء، ومخلفاتGFRP
2	**قوالب مكعبة (15×15×15 سم)**	صب عينات مقاومة الانضغاط
3	**جهاز اهتزاز القوالب**	إزالة الفراغات الهوائية وتحقيق كثافة عالية للخرسانة
4	**حوض معالجة الماء**	معاملة العينات وفق فترة 7 و28 يوماً عند درجة حرارة ثابتة 20±2°م
5	**جهاز اختبار مقاومة الانضغاط (Compression Testing Machine)**	قياس قوة الانضغاط للعينات بعد المعالجة
6	**موازين دقيقة**	وزن المكونات بدقة لضمان نسب إضافات صحيحة
7	**أدوات قياس (مساطر، شرائط قياس، أدوات تقليب)**	لضمان الدقة في التحضير والتجهيز

تحليل البيانات :تمت مقارنة النتائج بين نسب الإضافة المختلفة والفترات الزمنية لتحديد أثر الإضافة على مقاومة الانضغاط، بالإضافة إلى تقييم إمكانية تقليل الأسمنت مع استبداله بمخلفات الإيبوكسي.

المرحلة	مقاومة الانضغاط 28 أيام (Mpa)	مقاومة الانضغاط 7 أيام (Mpa)	نسبة الإضافة %	الخلطة
تقليل	28.8	17.6	0	REF
تقليل	25.4	14	0.5	L1
تقليل	28.7	17.7	2.5	L2
تقليل	20.4	15.5	5	L3
تقليل	17	12	7.5	L4
تقليل	17.1	---	10	L5
تقليل	15	---	12.5	L6
تثبيت	28.8	17.6	0	REF

LJ1	0.5	12.47	24.4	تثبيت
LJ2	2.5	18.5	29.98	تثبيت
LJ3	5	11.3	22.75	تثبيت
LJ4	7.5	10.41	15.46	تثبيت
LJ5	10	12.5	16.74	تثبيت
LJ6	12.5	8.6	14.6	تثبيت
L2J’	2.5	19.85	29.4	تثبيت

جدول(3) قيم مقاومة الانضغاط للعينات عند 7 و 28 يوماً

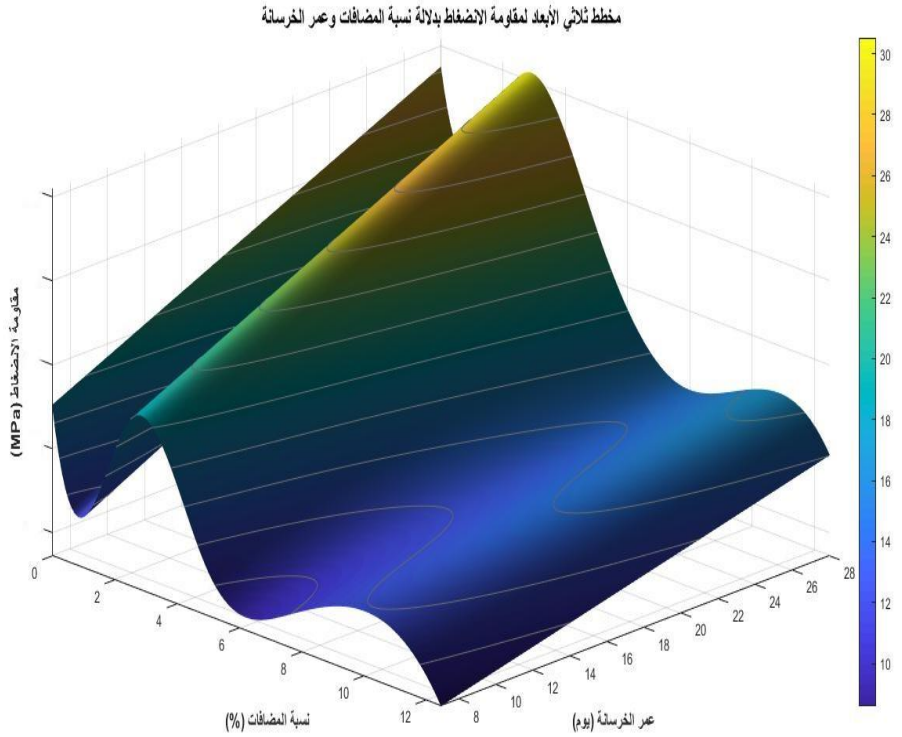
النتائج والمناقشة:

أظهر تحليل نتائج اختبارات مقاومة الانضغاط للخلطات الخرسانية المدروسة أن إضافة مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية (GFRP Waste) تؤثر بشكل واضح على الأداء الميكانيكي للخرسانة، ويعتمد هذا التأثير بشكل أساسي على نسبة الإضافة وآلية إدخالها ضمن الخلطة.

بينت النتائج أن نسب الإضافة المنخفضة أدت إلى تحسن أو ثبات مقاومة الانضغاط مقارنة بالخلطة المرجعية، خاصة في حالة تثبيت كمية الإسمنت، حيث سُجّلت أعلى قيم للمقاومة عند عمري 7 و28 يوماً. ويُعزى هذا السلوك إلى الدور المالئ للمخلفات وتحسين التراص الحبيبي داخل المصفوفة الإسمنتية.

في المقابل، أظهرت نسب الإضافة المرتفعة انخفاضاً ملحوظاً في مقاومة الانضغاط، وخصوصاً عند **تقليل كمية الإسمنت**، نتيجة ضعف الترابط بين عجينة الإسمنت والمادة المضافة، وازدياد احتمالية تشكل فراغات داخل الخرسانة.

بناءً على ما سبق، يمكن اعتبار أن إضافة مخلفات GFRP بنسبة محدودة ومع تثبيت محتوى الإسمنت تمثل خياراً عملياً وواعداً لتحقيق توازن بين الأداء الميكانيكي والاستفادة من المخلفات الصناعية، مما يدعم التوجه نحو حلول إنشائية أكثر استدامة دون التأثير السلبي على جودة الخرسانة.

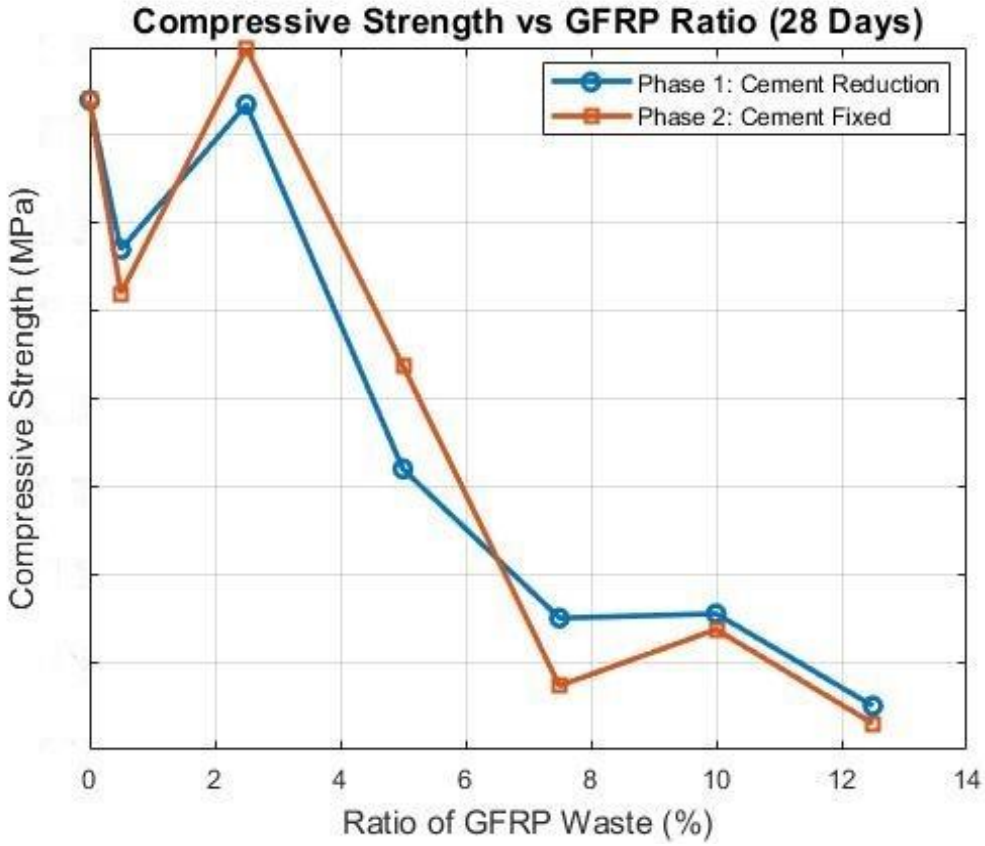


الشكل (4) مخطط ثلاثي الأبعاد لمقاومة الانضغاط بدلالة نسبة المضافات وعمر العينة

يوضح هذا المخطط الثلاثي الأبعاد تأثير نسبة المادة المضافة وعمر الخرسانة على مقاومة الانضغاط. يمثل أحد المحاور نسبة المضافات، بينما يمثل المحور الثاني عمر الخرسانة (7 و28 يومًا)، ويبين المحور الثالث قيمة مقاومة الانضغاط.

نلاحظ من المخطط أن مقاومة الانضغاط تزداد مع زيادة نسبة المضافات حتى تصل إلى أعلى قيمة عند النسب المنخفضة ثم تبدأ بالانخفاض عند النسب الأعلى. وهذا يدل على وجود نسبة مثالية من المضافات تعطي أفضل مقاومة للخرسانة.

كما يظهر المخطط أن مقاومة الانضغاط عند عمر 28يومًا أعلى من مقاومتها عند عمر 7أيام لجميع الخلطات، ويعود ذلك إلى استمرار تفاعل الإماهة وتطور بنية الخرسانة مع الزمن



الشكل (5) مخطط ثنائي الأبعاد لمقاومة الانضغاط بدلالة نسبة المضافات للمرحلتين

شرح الرسم:

- المحور الأفقي: نسبة الإضافة(%)
- المحور الرأسي: مقاومة الانضغاط(MPa)
- الخط الأزرق: المرحلة الأولى (تقليل الإسمنت)
- الخط الأحمر: المرحلة الثانية (تثبيت الإسمنت)

الرسم يوضح كيف أن المرحلة الثانية تحافظ على مقاومة الانضغاط بشكل أفضل عند النسب المثلى، بينما المرحلة الأولى تتدهور بسرعة مع زيادة النسبة

الاستنتاجات النهائية

1. أثبتت نتائج الدراسة التجريبية أن إضافة مخلفات الإيبوكسي المدعم بالألياف الزجاجية (GFRP Waste)تؤثر بشكل مباشر على مقاومة الانضغاط للخرسانة، ويتحدد هذا التأثير تبعاً لنسبة الإضافة وطريقة إدخالها ضمن الخلطة الخرسانية.
2. أظهرت الخلطات التي تحتوي على نسبة إضافة منخفضة **2.5%** مع تثبيت كمية الإسمنت أفضل أداء ميكانيكي، حيث سجلت مقاومة انضغاط مساوية أو أعلى من الخلطة المرجعية عند عمري 7 و28 يوماً.
3. بينت نتائج المرحلة التي تم فيها تقليل كمية الإسمنت أن استبدال الإسمنت بمخلفات GFRP يؤدي إلى انخفاض تدريجي في مقاومة الانضغاط عند نسب الإضافة المتوسطة والمرتفعة، مما يحد من فعالية هذا الأسلوب في التطبيقات الإنشائية.

4. تبين أن نسب الإضافة المرتفعة (5%<) تؤدي إلى تراجع واضح في مقاومة الانضغاط، ويُعزى ذلك إلى ضعف التوافق بين عجينة الإسمنت والمادة المضافة، وزيادة احتمالية تشكل الفراغات داخل البنية الخرسانية.

5. تؤكد نتائج البحث أن مخلفات GFRP يمكن أن تلعب دور مادة مالئة محسّنة للتراص الحبيبي عند نسب محدودة، دون أن تعمل كمادة رابطة بديلة للإسمنت.

6. يبرز البحث إمكانية الاستفادة من مخلفات المواد المركبة في الخرسانة كحل جزئي يجمع بين تحسين الاستدامة البيئية والحفاظ على الأداء الميكانيكي المقبول للخرسانة.

التوصيات العملية

1. يوصى باعتماد نسبة منخفضة من مخلفات GFRP مع تثبيت كمية الإسمنت في حال الرغبة باستخدام هذه المخلفات في الخلطات الخرسانية دون التأثير السلبي على مقاومة الانضغاط.

2. عدم استخدام مخلفات GFRP كبديل مباشر للإسمنت في الخلطات الخرسانية الإنشائية، خاصة عند نسب إضافة مرتفعة، نظراً لتأثير ذلك السلبي على المقاومة الميكانيكية.

3. ضرورة التحكم الجيد بحجم وتدرج جسيمات المخلفات المضافة، لما لذلك من تأثير مباشر على قابلية التشغيل والبنية الداخلية للخرسانة.

4. يوصى بإجراء عمليات خلط ميكانيكي كافية لضمان التوزع المتجانس للمخلفات داخل المصفوفة الإسمنتية وتجنب تكتل الألياف.

5. إمكانية الاستفادة من نتائج هذا البحث في التطبيقات غير الإنشائية أو الخرسانة ذات المتطلبات الميكانيكية المتوسطة، مع مراعاة الضوابط الفنية المناسبة.

مقترحات لدراسات مستقبلية

1. دراسة تأثير إضافة مخلفات GFRP على خصائص أخرى للخرسانة، مثل مقاومة الشد والانحناء، والمتانة، والنفاذية، ومقاومة العوامل البيئية.
2. بحث تأثير استخدام مواد مضافة كيميائية (ملدنات أو ملدنات فائقة) لتحسين التوافق بين مخلفات GFRP وخلطة الإسمنت.

المراجع

1. **Park, J.**, Kim, S., Lee, H., & Choi, Y. (2020). *Experimental Study of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beam Strengthened with Prestressed Textile-Reinforced Mortar*. Journal of Composites for Construction, ASCE, 24(6), 04020145.

2. **Baker, J.A.** (2019). *Comparison of Carbon and Fiberglass on Concrete Strength*. California Polytechnic State University, San Luis Obispo.

3. **Reis, J.M.L.** (2005). *Assessment of Fracture Properties of Epoxy Polymer Concrete Reinforced with Short Carbon and Glass Fibers*. Cement and Concrete Composites, 27(5), 555–564.

4. **Siddika, A.**, Karim, M.R., & Hossain, K.M.A. (2020). *Performances, Challenges and Opportunities in Structures by Using FRPs – A State-of-the-Art Review*. Journal of Building Engineering, 32, 101637.

5. **Meira Castro, A.C.** (2013). *Sustainable Waste Recycling Solution for the Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Materials Industry*. Journal of Cleaner Production, 59, 106–115.

6. **Syafwand, F.**, Rahman, M., & Ahmad, S. (2022). *The Effect of the Utilization of Sokkatile Waste as a Cored Aggregate and the Addition of Fiber Glass as a Mixed Material of Epoxy Resin on the Compressive Strength of Polymer Concrete*. Construction and Building Materials, 320, 126197.

7. **Subandi, S.**, Prasetyo, A., & Hadi, M. (2019). *Effect of Additional Fiber Glass on Concrete Performance*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 536, 012034.

8. **Dehghan, A.** (2017). *Recycled Glass Fiber Reinforced Polymer Addition to Portland Cement Concrete*. Materials & Design, 118, 164–174

9. **S. C. Kou**, C. S. Poon, *Properties of concrete prepared with recycled glass aggregate*, 2009.

10. **J. R. Correia**, N. M. Almeida, J. R. Figueira, *Reusing GFRP waste in concrete*, 2011.

11. **T. Ochi**, S. Okubo, K. Fukui, *Recycled PET fiber as concrete-reinforcing fiber*, 2007.