SEBHA UNIVERSITY CONFERENCE PROCEEDINGS, VOL.03 NO. 2 2024
DOI: 10.51984/SUCP.V3I2.3379

وقائع مؤتمرات جامعة سبها
Sebha University Conference Proceedings

Confrence Proceeeding homepage: http://www.sebhau.edu.ly/journal/CAS

# الخصائص الميكانيكية والحرارية للخرسانة المدعمة بمسحوق الزجاج لإنتاج خرسانة صديقة للبيئة بنموذج فويط.

*عبد المطلب بن فريد[1.2] و محمد بشير بويجرة [1.2] و محمد شاطبي[1.2] و زواوي ربيع حراث [1.2]

[1] مخبر الهياكل والمواد المتقدمة في الهندسة المدنية والأشغال العمومية، كلية التكنولوجيا لجامعة جيلالي اليابس سيدي بلعباس، سيدي بلعباس 22000، الجزائر.
[2] الوكالة الموضوعاتية للبحث في العلوم والتكنولوجيا، الجزائر العاصمة 16000، الجزائر

**الملخص**

الأسمنت هو مادة أساسية في تركيب الخرسانة، والتي تُعد الأكثر شيوعًا في مجال البناء مقارنة بالهياكل المعدنية والخشبية وغيرها. ومع ذلك، يُعتبر إنتاج الأسمنت أحد العوامل الرئيسية في زيادة انبعاثات ثنائي أكسيد الكربون وارتفاع درجات الحرارة العالمية نظرًا للأفران عالية الحرارة المستخدمة في تصنيعه. أظهرت دراسات وتجارب مخبرية أن مسحوق الزجاج الناعم يمكنه تعزيز الخصائص الميكانيكية والحرارية للخرسانة إلى حد ما. في هذه الدراسة، سنتناول الخرسانة العادية الممزوجة بمسحوق الزجاج الناعم، ولتحقيق تجانسها، سيتم استخدام طريقة التجانس المطورة لنموذج فويت لاستخلاص الخصائص الميكانيكية والحرارية لهذه الخرسانة الصديقة للبيئة. بالإضافة إلى ذلك، سيتم استخدام النموذج الرياضي لبرنولي لحساب انحناء رافدة خرسانية صديقة للبيئة. أظهرت النتائج تحسنًا في الخصائص الميكانيكية مثل معامل المرونة ومعامل التمدد الحراري بشكل ملحوظ، حيث يمكن استخدام ما يصل إلى 35% من الزجاج الناعم كبديل للإسمنت مع تحسن معقول في هذه الخصائص. يُعد الانحناء ظاهرة ميكانيكية وحرارية هامة في دراسة الهياكل الخرسانية، خاصة الروافد المستخدمة في الأبنية والجسور والمنازل. أثبتت النتائج أنه باستخدام نموذج برنولي لحساب انحناء الروافد، تزداد الفوائد الاقتصادية والبيئية كلما زادت نسبة مسحوق الزجاج الناعم، حيث يقل الانحناء ويُساهم في تحقيق ديمومة الخرسانة وحماية النظام البيئي من خلال إعادة تدوير مخلفات الزجاج، التي تحتوي على مادة السيليكا المهمة في تركيب الأسمنت.

**الكلمات المفتاحية:**

نموذج فويط (فويت).
الخصائص الميكانيكية والحرارية.
الخرسانة الصديقة للبيئة.
النموذج الرياضي لبرنولي.
حساب احناء رافدة.

# Mechanical and Thermal Properties of Glass Powder Reinforced Concrete for Eco-Friendly Production Using the Voigt Model.

*Abdelmoutalib BENFRID [a,b],Mohamed BACHIR BOUIADJRA [a,b] ,Mohammed CHATBI [a,b] and Zouaoui Rabie HARRAT [a,b].

[a] Laboratory of Structures and Advanced Materials in Civil Engineering and Public Works, Faculty of Technology, Djillali Liabes University, Sidi Bel Abbes, Sidi Bel Abbes 22000, Algeria.
[b] The Thematic Agency for Research in Science and Technology, Algiers 16000, Algeria.

**ABSTRACT**

Cement is a fundamental material in concrete composition, making concrete structures the most common in construction compared to metal, wood, and other structures. However, cement production is also a major contributor to increased carbon dioxide emissions and global warming due to the high-temperature kilns used in its manufacturing. Laboratory studies and experiments have shown that fine glass powder can enhance the mechanical and thermal properties of concrete to some extent. In this study, we will examine ordinary concrete mixed with fine glass powder, and to achieve homogeneity, the Voigt model's homogenization method will be used to extract the mechanical and thermal properties of this eco-friendly concrete. Additionally, Bernoulli's mathematical model will be applied to calculate the deflection of an eco-friendly concrete beam.

**Keywords:**

Voigt Model.
Mechanical and Thermal Properties.
Eco-friendly Concrete.
Bernoulli's Mathematical Model.
Deflection of Beam.

*Corresponding author:
E-mail addresses: benfridabdelmoutalib2050@gmail.com ,(M. B. BOUIADJRA) mohamedbachirbouiadjra@gmail.com ,( M. CHATBI) chatbi_mohammed@yahoo.com ,(Z. R. HARRAT) harrat.rabie@gmail.com

*Article History : Received 20 June 2024 - Received in revised form 04 September 2024 - Accepted 06 October 2024*

The results indicated a significant improvement in mechanical properties such as the modulus of elasticity and thermal expansion coefficient. Up to 35% of fine glass powder can be used as a substitute for cement, with reasonable improvements in these properties. Deflection is a critical mechanical and thermal phenomenon in the study of concrete structures, particularly in beams used in buildings, bridges, and individual houses. The results also showed that using Bernoulli's model to calculate beam deflection reveals that increasing the proportion of fine glass powder reduces deflection. This leads to economic benefits and significant environmental advantages, including the durability of concrete and the preservation of the ecosystem through the recycling of glass waste, which contains silica, an essential component in cement composition.

**1. المقدمة**

تُهيمن المنشآت الخرسانية بشكل كبير على أنظمة وطرق الإنشاء في العصور القديمة والحديثة، متفوقة على طرق البناء الأخرى مثل الإنشاءات بالحجارة المرصوفة أو الهياكل المعدنية والخشبية. تُعد الخرسانة الوسيلة الأساسية في البناء في بعض الدول العربية، لا سيما في المساكن الفردية، وتُستخدم أيضًا في بناء الجسور، الكباري، السدود، الخنادق، نظم الصرف الصحي، محطات تحلية المياه، والعديد من المجالات الأخرى. تُعرف الخرسانة بأنها خليط من الركام (الحصى والرمل) يتماسك بواسطة الأسمنت الهيدروليكي عند تفاعله مع الماء.

يتم إنتاج الخرسانة وفقًا لمعايير محددة تتحكم في خصائصها ونسب مكوناتها، بحيث تصبح مادة متصلبة وقوية تشبه الحجر بعد مرور 28 يومًا. وبما أن صلابة الخرسانة تعتمد على الأسمنت باعتباره الرابط الأساسي، فإنه من الضروري الإشارة إلى أن عملية تصنيع الأسمنت تتطلب درجات حرارة عالية، مما يؤدي إلى إنتاج كميات كبيرة من الحرارة وانبعاث غازات سامة، من بينها ثاني أكسيد الكربون، الذي يُلحق أضرارًا كبيرة بالغلاف الجوي والبيئة المحيطة. هذه العملية تُسهم أيضًا في ظهور أمراض نباتية وحيوانية في المناطق القريبة من مصانع الأسمنت. تعتبر هذه الآثار البيئية السلبية لمادة الأسمنت واحدة من أهم المشكلات البيئية المعاصرة.

أظهرت عدة بحوث تجريبية سابقة أن مسحوق الزجاج يساهم في تحسين الخصائص الميكانيكية جيدًا والحرارية بعض الشيء. نذكر منها:

كل منإبراهيم خليل ونزار ف. العبيدي(2018) [1] فاما بدراسة خصائص الخرسانة المستدامة عالية القوة باستخدام مخلفات مسحوق الزجاج المعاد تدويره كبديل جزئي للأسمنت. تم تصنيف مسحوق الزجاج كمادة بوزولانية طبيعية من فئة (N) وفقًا للمواصفة ASTM C618، بنعومة تبلغ حوالي 7340 سم²/جم. تم إعداد خلطات خرسانية تحتوي على نسب مختلفة من مسحوق الزجاج (10%، 15%، 20%، 25%، 30%) لدراسة خصائصها الميكانيكية مثل مقاومة الضغط، مقاومة الشد الانشطاري، قوة الانثناء، ومعامل المرونة عند عمر 60 يوماً. أظهرت النتائج تحسنًا في الخصائص الميكانيكية مع زيادة نسبة مسحوق الزجاج حتى 15%، حيث بلغت أعلى نسبة زيادة عند هذه النسبة: 13.29% في مقاومة الضغط، 36.27% في مقاومة الشد، 34.68% في قوة الانثناء، و8.2% في معامل المرونة. بالإضافة إلى ذلك، تمت دراسة تثبيط تآكل الفولاذ منخفض الكربون والفولاذ المقاوم للصدأ (316 و304) في حامض الهيدروكلوريك باستخدام يوديد البوتاسيوم وتقنيات فقدان الوزن والاستقطاب الكهروكيمياوي

اجرى محمد ماهر ياسين وفريقه (2019) [2] دراسة حول استخدام مخلفات الزجاج كبديل جزئي للأسمنت في الخرسانة، حيث وجدوا أن استبدال جزء من الأسمنت بمسحوق الزجاج يمكن أن يحسن من قوة الخرسانة بنسبة تصل إلى 20%، مع تحسين قوة ومعامل المرونة. كما لاحظوا انخفاضًا في نسبة امتصاص الماء مع زيادة محتوى مسحوق الزجاج. يشير البحث إلى أن استخدام مخلفات الزجاج في الخرسانة يمكن أن يوفر التكاليف ويعزز الفوائد البيئية

في دراسة لزينب علي حسين وندى مهدي فوزي الجلاوي [3] (2022) حول خصائص الخرسانة المسحوقة التفاعلية باستخدام مسحوق الزجاج المعاد تدويره. تهدف الدراسة إلى استخدام مسحوق الزجاج كبديل جزئي للأسمنت في إنتاج خرسانة مسحوقة تفاعلية، مما يقلل من النفايات ويحسن الاستدامة البيئية. تمت دراسة تأثير استبدال جزء من الأسمنت بمسحوق الزجاج بنسبة 20% على خواص ميكانيكية مثل الكثافة الطازجة، قوة الشد الانشطاري، مقاومة الصدم، ونسبة الفراغات للخرسانة المسحوقة التفاعلية التي تحتوي على 1% من الفولاذ الدقيق. أظهرت النتائج زيادة في الكثافة الطازجة وقوة الشد الانشطاري، بالإضافة إلى انخفاض نسبة الفراغات مقارنة بالخلطة المرجعية.

إيلاف خالد دهام ورفاقه (2022) [4] قاموا بدراسة تأثير مخلفات الزجاج على خواص الخرسانة التقليدية وذاتية الدمك. أظهرت الدراسة أن العديد من العوامل المرتبطة بأسلوب الحياة قد تؤدي إلى التلوث البيئي نتيجة لسوء إدارة النفايات، وأن تدوير واستخدام الزجاج بشكل صحيح يمكن أن يحمي البيئة. تمت دراسة الجوانب الاقتصادية والفيزيائية لاستخدام مسحوق مخلفات الزجاج كبديل جزئي للأسمنت في الخرسانة، وأظهرت الاختبارات تحسنًا في مقاومة الضغط للخرسانة بعد 28 يومًا، حيث كانت النتائج أعلى من الخرسانة التقليدية، مما يشير إلى أن مخلفات الزجاج يمكن استخدامها بنجاح كبديل فعّال للأسمنت لزيادة قوة ضغط الخرسانة

إلهام عبد المجيد إبراهيم وداليا حكمت حميد[5] قامتا بدراسة تأثير مخلفات الزجاج على خواص مسحوق مخلفات الخرسانة الخلوية. تضمنت الدراسة تحضير خلطات من مسحوق مخلفات الخرسانة الخلوية (الثرموستون) بنسب مختلفة من مسحوق مخلفات الزجاج، وقياس بعض الخواص الميكانيكية والفيزيائية للمادة المركبة الناتجة. أظهرت النتائج أن المسامية والامتصاصية لمسحوق نفايات الثرموستون تناقصت مع زيادة نسبة الزجاج، في حين زادت الكثافة والانضغاط والصلابة بزيادة نسبة الزجاج، حيث انخفضت المسامية من 63.38% إلى 28.74%، والامتصاصية من 46.88% إلى 16.78%، بينما زادت الكثافة من 1.351 إلى 1.712 جم/سم³، والانضغاط من 9.7 إلى 13.8 ميجا باسكال، والصلابة من 22.7 إلى 99.7,

محمد كريم عبد [6]أجرى دراسة حول تأثير الألياف الزجاجية على الخرسانة ذاتية الدمك (SCC)، مستخدمًا أربع خلطات بنسب خلط (1:1.75:2) ونسبة ماء إلى أسمنت (0.4) مع ملدن فائق بنسبة 5% ومسحوق الحجر الجيري بكمية 100 كغ/م³، ونسب ألياف زجاجية (0، 1، 3، 5) %. أظهرت

اختبارات التدفق الهبوطي، الصندوق L، والقمع V تحسنًا في قابلية التشغيل. أما الخواص الميكانيكية مثل مقاومة الضغط وقوة الشد الانقسامي وقوة الانثناء، فقد زادت مع زيادة نسبة الألياف الزجاجية. تشير النتائج إلى أن إضافة الألياف الزجاجية تحسن من أداء الخرسانة ذاتية الدمك في التطبيقات الهندسية.

محمد تي نوار ورفاقه [7] قاموا بدراسة الخواص الميكانيكية وسلوك مقاومة الصدمات للخرسانة ذاتية الرص الصديقة للبيئة باستخدام مسحوق نفايات الزجاج والألياف البلاستيكية من زجاجات البولي إيثيلين تيريفثاليت. تم استبدال الأسمنت بنسبة 15% بمسحوق الزجاج مع نسب مختلفة من الألياف البلاستيكية (0%، 0.5%، 0.75%، 1%، 1.25%، 1.5%). أظهرت النتائج أن قابلية التدفق للخرسانة تنخفض مع زيادة الألياف البلاستيكية، بينما زادت مقاومة الانضغاط قليلاً حتى نسبة 0.75% من الألياف. بعد هذه النسبة، انخفضت مقاومة الانضغاط بحوالي 15.2%. تحسنت قوة الانثناء بشكل ملحوظ مع زيادة الألياف، وظهرت أفضل النتائج عند نسبة 1.5% من الألياف.

أوهم جمعة سلمان[8]وزملاؤه أجروا دراسة حول إعادة تدوير مخلفات الزجاج في الخرسانة كبديل جزئي للأسمنت أو الركام الناعم، بهدف إنتاج خرسانة خضراء بخصائص مميزة. استخدموا الزجاج المعاد تدويره، الذي يحتوي على نسبة عالية من 2SiO، بنسبة 5%، 10%، 15%، و20% من وزن الأسمنت أو الركام الناعم. أظهرت النتائج أن مقاومة الضغط تزداد مع زيادة محتوى الزجاج حتى 10% ثم تنخفض عند استخدامه كبديل للأسمنت، بينما تنخفض في البداية ثم تزداد مع زيادة محتوى الزجاج عند استخدامه كبديل للركام الناعم. كما أظهرت نتائج اختبار الهبوط أن قابلية تشغيل الخرسانة تزداد بزيادة محتوى الزجاج في الحالتين

شذى حسن حسن ووفاء سامي ناصيف قامتا بدراسة تأثير مخلفات الخرسانة والزجاج المعاد تدويره على خصائص قوة الخرسانة الخضراء التفاعلية. نظرًا لتزايد كميات النفايات الناتجة عن أعمال البناء والهدم، تم استخدام الزجاج القديم والخرسانة كمكونات معاد تدويرها كركام ناعم. تم تحضير سبعة مخاليط خرسانية مختلفة، حيث تم استخدام الرمل الزجاجي كخليط مرجعي، واستُبدل جزئيًا بالركام المعاد تدويره بنسبة 25%، 50%، و75%. أظهرت النتائج أن مقاومة الخرسانة تنخفض مع زيادة نسبة الركام الناعم المعاد تدويره، وكانت أفضل نسبة استبدال هي 25% لكلا المادتين من مخلفات الخرسانة والزجاج [9].

محمد ف. الدين عباس، هادي عباس، ورائد م. عبد الله [10]قاموا بدراسة استخدام مخلفات الزجاج (WG) كركام ناعم في الخلطة الخرسانية. تم استخدام مخلفات الزجاج بعد طحنها لتلائم مواصفات الرمل العراقي رقم 45، واستبدالها بالرمل بنسب مختلفة (0%، 33%، 66%، 100%). أظهرت النتائج أن استخدام مخلفات الزجاج يقلل بشكل كبير من قوة الضغط ومن وزن الوحدة. كما أظهرت الدراسة أن استخدام مخلفات الزجاج يمكن أن يخفض تكلفة إنتاج الخرسانة، مما يجعلها خيارًا بيئيًا واقتصاديًا مناسبًا

تُظهر هذه الدراسات أن استخدام مسحوق الزجاج كبديل جزئي للأسمنت يمكن أن يُعزز خصائص الخرسانة، حيث يحتوي مسحوق الزجاج على مادة السيليكا التي تُعزز التفاعل القلوي الهيدروليكي للإسمنت. تشير العديد من الدراسات المخبرية إلى أن إضافة السيليكا يمكن أن تزيد من صلابة الخرسانة، مما يجعلها مادة بناء أكثر كفاءة وصديقة للبيئة.

هناك أيضًا أعمال ونماذج رياضية قام بها بعض الباحثين لنمذجة التجانس بين الخرسانة العادية ودقائق الزجاج الناعم. من بين هذه النماذج:

قام بن فريد عبد المطلب وزملاؤه [11] بتطبيق نموذج هيشلي لنمذجة تجانس الخرسانة ودراسة انحناء لوح خرساني مدعم بجزيئات الزجاج الدقيقة. أظهرت النتائج تحسنًا في الخصائص الميكانيكية لانحناء اللوح الخرساني، بالإضافة إلى تحسن نسبي في مقاومة الانحناء الميكانيكي مع زيادة نسبة مسحوق الزجاج في الخلطة الخرسانية.

كما قام بن بختي عبد الجليل [12]بمقارنة نتائج تجريبية مع نموذج رويس-فويط الكلاسيكي، حيث أظهرت النتائج تقاربًا كبيرًا بين النتائج التطبيقية والنظرية

شاطبي محمد[13]قام بدراسة انحناء بلاطة خرسانية مدعمة بالنانو سيليس تحت تأثير تجمع السيليس الموضعي، باستخدام نموذج فويط المطور.

وفي دراسة أخرى، قام حرات[14]بدراسة أسلوب تجمع السيليس في زوايا الركن باستخدام نموذج حديث مطور من نموذج فويط للنانو سيليس لرافدة خرسانية، مع مراعاة تأثير الزيادات في نسب السيليس

يجدر بالذكر أن النموذج الأولي للعالم فويط تم تطويره عام 1889، ويعتمد على افتراض أن المادة الأساسية والمادة المدعمة مرتبة في اتجاه متوازٍ لتحقيق تجانس متكامل بينهما [15].

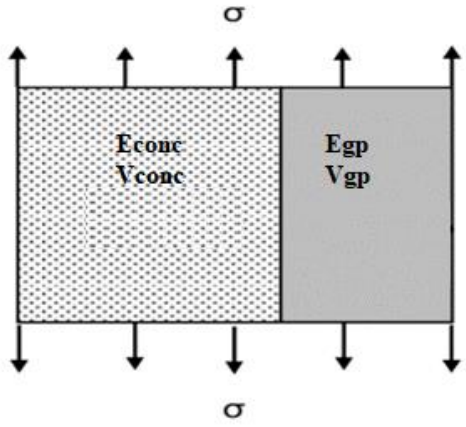
وعادة ما يحتوي الهيكل الخرساني على أعمدة وروافد أو لوحات أو بلاطات، لذا تم اختيار الرافدة في هذا البحث لاستخدام نموذج برنولي الرياضي لاستنتاج الانحناء والعزوم والإجهادات العادية والقصية [16].

في هذه الورقة البحثية، نطرح المشكلة المتمثلة في تحديد المعاملات الأساسية أو الخصائص الميكانيكية والحرارية باستخدام نموذج فويط المطور، الذي قمنا بتعديله لتحقيق التجانس بين الخرسانة العادية ومسحوق الزجاج الناعم كبديل للأسمنت البورتلاندي العادي. بالإضافة إلى ذلك، ندرس سلوك الانحناء لرافدة خرسانية بناءً على فرضية برنولي. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو محاكاة التجارب باستخدام نموذج رياضي لتسهيل التنبؤات بسلوك الخرسانة، خاصة في حال الرغبة في تطبيق مشروع تجريبي. نتبع في هذه الدراسة منهجية تعتمد على استخدام نموذج فويط وتطبيقه في نمذجة رياضية، مع مقارنة النتائج الحالية بالنماذج السابقة للتحقق من دقة وفعالية النموذج.

.2 نموذج فويط (فويت)لتحقيق التجانس بين الخرسانة ومسحوق الزجاج الناعم

ان العمل بهذا النموذج هو صيغ رياضية محضة ثم المقارنة مع احد المراجع بتعريف النموذج نتبع الخطوات الاتية :

$$X_{voigt} = n1\frac{X_{g\,p}*V_{g\,p}}{V} + n2\frac{X_{conc}*(1-V_{g\,p})}{V} \ldots\ldots 1$$




**الشكل 01:** نموذج فويط ( فويت) و علاقته بإجهادات الشد .[17]

الخصوصية عامة مهما كانت : **X**

خصوصية الخرسانة تأخذ رمز:**conc**

خصوصية مسحوق الزجاج تأخذ رمز:**gp**

خصوصية الخليط بنموذج فويط تأخذ رمز**Voigt**

التناسبية الحجمية :**V**(%)

- معامل المرونةElasticity Modulus E

$$E_{voigt} = n1\frac{E_{g\,p}*V_{g\,p}}{V} + n2\frac{E_{conc}*(1-V_{g\,p})}{V} \text{.....2}$$

- معامل القص أو كولومبG

$$G_{voigt} = \frac{E_{Voigt}}{2(1+n)} \text{.....3}$$

- معامل الانضغاط أو التضاغط K

$$K_{voigt} = \frac{E_{Voigt}}{3(1+2n)} \text{.....4}$$

- نسبية بواسون n

$$v_{voigt} = (n1.v_{g\,p}.V_{g\,p}) + (n2.v_{conc}.(1-V_{g\,p})) \text{...5}$$

- نسبية التمدد الحراري **a**

$$a_{voigt} = n1 * a_{g\,p} * V_{g\,p} + n2 * a_{conc} * (1-V_{g\,p}) \text{.6}$$

- الكثافة **D**

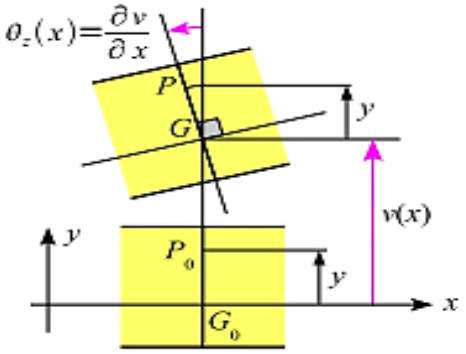
$$D_{voigt} = n1\frac{D_{g\,p}*V_{g\,p}}{V} + n2\frac{D_{conc}*(1-V_{g\,p})}{V} \text{.....7}$$

- الكثافة الحرارية l

$$l_{voigt} = n1\frac{l_{g\,p}*V_{g\,p}}{V} + n2\frac{l_{conc}*(1-V_{g\,p})}{V} \text{.....8}$$

## 2. النموذج الرياضي للانحناء بعلاقة أوفرضية برنولي

فرضية برنولي تضع التخمين الاتي أنه رغم التشوه فأن المقطع المأخوذ يبقى قائما على المحور المحايد للرافدة [18]. الشكل 02 يوضح فرضية برنولي.




**الشكل 02:** نموذج وفرضية برنولي. [18]

- التشوه الزاوي $\theta_z = \frac{\partial v}{\partial x}$
- علاقة العزم بالتشوه الزاوي .....9
- الانحناء ( deflexion انحناء ) الرافدة غير الزاوي يرمز له Py) .....10 $EI_z \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = p_y$

## 3. النتائج لنموذجي فويط (فويت) والانحناء للر افدة باستخدام نظرية برنولي .....11

لأجعل النموذج الرياضي فعالا وناجحا لا بد من مقارنته مع النموذج التجربي – الرياضي المفهرس تحت رقم [12] حيث قام عبد الجليل بن بختي بإنتاج خرسانة بنظام **ATSM**

حيث قام هذا الأخير بمقارنة نتائج تجريبية مع نموذج رويس – فويط الرياضي الذي استخلصه العالم هيلس ستنة 1958.النتائج معروضا مفصلا في الجدول رقم 01

بقية الخصائص الميكانيكية معددة في الجدول رقم 02 التمدد الحراري والكثافتين الحرارية والكثافة العادية الفيزيائية لتذكر في الجدول رقم 03.

يوضح الجدول رقم 04 فعالية المواد المستنبطة من المراجع الفيزيائية لمسحوق الزجاج و طبيعة الاسمنت المستعمل و كذا تصلد الخرسانة،

نشير الى اننا استخدمنا المدة 28 يوم لاختبارات الضغط لعمل بن بختي.[12]

**جدول 1: مقارنة وتفعيل نموذج فويط (فويت ) المطورمع نتائج بن بختي عبد الجليل [12].**

| $V_{gp}$ (%) التناسبية الحجمية | E [12] (GPas) [12] معامل المرونة التجريبي | E [12] (GPas) معامل المرونة [12] رويس- فويط | E( Present) (GPas) معامل المرونة فويط المطور (نتائج البحث) |
|---|---|---|---|
| 00% | 38.32 | 43.00 | 40.00 |
| 05% | 38.20 | 43.13 | 38.57 |
| 10% | 37.89 | 43.41 | 37.89 |
| 15% | 37.32 | 43.80 | 37.37 |
| 20% | 37.24 | 44.29 | 37.26 |
| 25% | 37.01 | 44.89 | 37.08 |
| 30% | 37.01 | 45.52 | 37.01 |
| 35% | 33.67 | 46.25 | 33.66 |

**جدول 2: الخصائص الميكانيكية بنموذج فويت (فويت ) المطور.**

| $V_{gp}$ (%) التناسبية الحجمية | $\nu$( Present) (------) نسبية بواسون (نتائج البحث) | G( Present) (GPas) معامل القص فويت المطور (نتائج البحث) | K( Present) (GPas) التضاغط فويت المطور (نتائج البحث) |
|---|---|---|---|
| 00% | 0.30 | 15.38 | 8.29 |
| 05% | 0.27 | 15.12 | 8.33 |
| 10% | 0.25 | 15.20 | 8.36 |
| 15% | 0.24 | 15.03 | 8.38 |
| 20% | 0.23 | 15.14 | 8.49 |
| 25% | 0.22 | 15.21 | 8.59 |
| 30% | 0.21 | 15.30 | 8.69 |
| 35% | 0.18 | 14.31 | 8.30 |

**جدول 3: الخصائص الميكانيكية المتبقية و الكثافة الفيزيائية و الحرارية اضافة الى معامل التمدد الحراري و الكثافة الحرارية بنموذج فويت (فويت ) المطور.**

| $V_{gp}$ (%) التناسبية الحجمية | a( Present) $(°C^{-1})*10^{6}$ نسبية التمدد فويت المطور (نتائج البحث) | D( Present) $(Kg/m^{3})$ الكثافة فويت المطور (نتائج البحث) | l( Present) (W/m.°K) ك. الحرارية فويت المطور (نتائج البحث) |
|---|---|---|---|
| 00% | 1.000 | 2350.00 | 10.00 |
| 05% | 0.972 | 2219.01 | 09.34 |
| 10% | 0.964 | 2119.73 | 08.91 |
| 15% | 0.954 | 2069.45 | 08.55 |
| 20% | 0.958 | 2022.36 | 08.27 |
| 25% | 0.961 | 1977.12 | 08.01 |
| 30% | 0.963 | 1941.24 | 07.79 |
| 35% | 0.882 | 1716.31 | 06.77 |

تأخذ الفعاليات للمواد المستعملة كما هي موضحة في الجدول الاتي رقم 4.

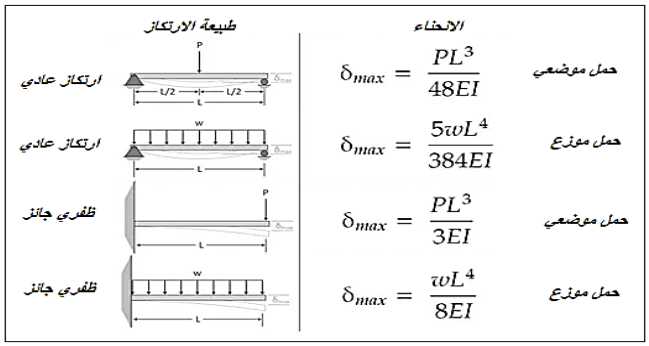
**جدول 4: الفعاليات المعطاة نيتا 1 و نيتا 2 حسب كل نسبة حجمية وخصائص المادة.**

| $V_{gp}$ (%) | n1 (-----) | n2 (-----) |
|---|---|---|
| 00% | 1 | 1 |
| 05% | 0.987 | 0.932 |
| 10% | 0.979 | 0.881 |
| 15% | 0.879 | 0.851 |
| 20% | 0.871 | 0.816 |
| 25% | 0.841 | 0.787 |
| 30% | 0.812 | 0.765 |
| 35% | 0.781 | 0.662 |

في حساب الانحناء وبحسب **Albert (1988) [19]** نعتبر ما يلي:

- رافده ذات الطول 3 متر مع أن عرض الرافدة هو 30 سنتمتر وارتفاعها هو 40 سم مكونة من الخرسانة العادية ثم نسب متفاوتة من غضار او مسحوق الزجاج.
- نعتبر رافده خرسانية عادية التموضع مع حمل موزع ومرة أخرى حمل موضعي.
- وكذلك رافده خرسانية ذات ظفري جائز مع حمل موزع ومرة أخرى حمل موضعي.
- الحمل الموزع يؤخذ 1 كيلو نيوتن في المتر , و الحمل الموضعي 1 كيلو نيوتن.

النتائج لقيم الانحناء موضحة في الجدول 5. الشكل رقم 03 يوضح قيم الانحناء الاعظمي.




**الشكل 03:** طبيعة الارتكاز و القيمة الأعظمية للانحناء مع نوع الحمل [20] .

**جدول 5: قيم الانحناء الأعظمي في كل حالة.**

| $V_{gp}$ (%) عادية التموضع | y1 (mm) حمل موزع | y2 (mm) حمل موضعي |
|---|---|---|
| 00% | 0.0165 | 0.0879 |
| 05% | 0.0171 | 0.0911 |
| 10% | 0.0174 | 0.0928 |
| 15% | 0.0176 | 0.0941 |
| 20% | 0.0177 | 0.0944 |
| 25% | 0.0178 | 0.0948 |
| 30% | 0.0179 | 0.0950 |
| 35% | 0.0196 | 0.1040 |
| $V_{gp}$ (%) ظفري جائز | y1 (mm) حمل موزع | y2 (mm) حمل موضعي |
| 00% | 0.1582 | 1.4069 |
| 05% | 0.1641 | 1.4584 |
| 10% | 0.1671 | 1.4846 |
| 15% | 0.1693 | 1.5051 |
| 20% | 0.1698 | 1.5097 |
| 25% | 0.1707 | 1.5171 |
| 30% | 0.1710 | 1.5197 |
| 35% | 0.1881 | 1.6711 |

### 4. مناقشة النتائج

تحليل هذه النتائج يتطلب دراسة دقيقة لكل جزء من نتائج هذا البحث كما يلي:

وفقًا للجدول رقم 01، وبتحليل فعالية المواد بناءً على المراجع الفيزيائية لهيكلة المواد كما هو موضح في الجدول 04، نلاحظ أن فعالية الخرسانة العادية ومسحوق الزجاج الناعم تتناقص تدريجيًا حتى تصل إلى ذروتها عند 30%، ثم تنخفض بشكل مفاجئ بعد هذه النسبة. يرجع ذلك إلى التفاعل القلوي بين الهدرجة الإسمنتية والسيليس الموجود في مسحوق الزجاج الناعم، مما يؤدي إلى تقليل فعالية الروابط الكيميائية وظهور شقوق كبيرة تشكل خطرًا على التماسك والتجانس.

كما يظهر في الجدول رقم 01، فإن معامل المرونة الذي يتطابق بشكل وثيق مع النموذج التجريبي هو نموذج فويط المطور، والذي يعكس بشكل كبير نتائج التجارب التي أجراها الدكتور بن بختي. على العكس، فإن نموذج رويس فويط، الذي يعتمد على دالة خطية متزايدة، لا يتطابق مع النتائج التجريبية كما هو موضح في نفس المرجع. نموذج فويط ساعد في تحديد القيمة القصوى لمعامل المرونة، والتي تظل مقاربة ومحسنة عند إضافة مسحوق الزجاج الناعم بنسب متفاوتة، حيث تعتبر النسبة المثلى ثلاثين بالمائة كبديل للأسمنت البورتلاندي العادي.

وفقًا للجدول رقم 02، نلاحظ انخفاضًا في قيمة معامل بواسون من 0.3 إلى 0.18. كما يوضح الجدول أن إضافة نسب مختلفة من الزجاج الناعم تؤدي

إلى تحسين الخصائص الميكانيكية، وخاصة معامل القص ومعامل الانضغاط، حيث تعزى هذه التحسينات إلى انخفاض نسبة بواسون ومعامل المرونة الذي يستمر في التزايد بشكل مستقر حتى يصل إلى الذروة عند 30 %.و استنادًا إلى نتائج الجدول رقم 03، نلاحظ أن الكثافة تنخفض مع زيادة مسحوق الزجاج، بينما يتناقص معامل الكثافة الحرارية ونسبة التمدد الحراري بشكل منتظم، مما يفسر تحسين الخصائص الحرارية للمزيج. وبالتالي، يمكن استخدام الزجاج كعازل حراري عند إضافته إلى الخرسانة.

من خلال الجدول رقم 05، نلاحظ أنه بغض النظر عن نوع الحمل أو نوع الارتكاز، فإن زيادة نسبة مسحوق الزجاج الناعم تؤدي إلى زيادة الانحناء بشكل طردي، ويرتبط ذلك بشكل مباشر بمعامل المرونة. قيمة الانحناء تظل منخفضة، مما يشير إلى أن تأثيرها على نسب التسليح الخرساني ليس كبيرًا.

**5. الخلاصة**

يمكن استخلاص النتائج التالية من هذا البحث:

1. استبدال الأسمنت: تتناقص فعالية الخرسانة والزجاج عند زيادة نسب مسحوق الزجاج الناعم وتقلص نسب الأسمنت، مما يتيح استبدال الأسمنت البورتلاندي العادي بنسبة تصل إلى 30%.

2. تحسين معامل المرونة: يستمر تحسين معامل المرونة حتى تصل نسبة مسحوق الزجاج الناعم إلى 30%. لذلك، يجب عدم تجاوز هذه النسبة للحفاظ على معامل المرونة في نطاقه الأمثل.

3. تحسين الخصائص الميكانيكية: مع انخفاض نسبة بواسون وتحسن معامل المرونة، تتحسن الخصائص الميكانيكية للخرسانة بشكل طردي.

4. تحسين الخصائص الحرارية: يساهم مسحوق الزجاج الناعم في تحسين الخصائص الحرارية والتبادل الحراري في المباني، مما يجعله مناسبًا للاستخدام في العزل الحراري للمباني والمنشآت الخرسانية.

5. تأثير محدود على الانحناء: لا يؤثر مسحوق الزجاج الناعم بشكل كبير على قيمة الانحناء، وبالتالي لا ينعكس سلبًا على التسليح الخرساني.

من الناحية البيئية والاقتصادية:

1. استثمار النفايات الزجاجية: يمكن استثمار مخلفات الزجاج في تحسين الأداء الخرساني، سواء من الناحية الحرارية أو الميكانيكية، مما يوفر بديلًا تقنيًا للإسمنت.

2. تحسين الوضع البيئي: تسهم رسكلة الزجاج في تقليل النفايات الزجاجية في المزابل والشوارع، وتعزيز فرص العمل من خلال إنشاء مصانع لإنتاج بديل الإسمنت بمسحوق الزجاج.

3. فائدة اقتصادية: توفر الرسكلة الاقتصادية من خلال تقليل الطاقة المطلوبة لإنتاج 30% من الأسمنت، مما يحافظ على 30% من مادة الكلس والطين الطبيعي للأجيال القادمة، ويعزز الوضع البيئي والحياة الإيكولوجية.

4. تقليل التلوث: يقلل استبدال 30% من الأسمنت بمسحوق الزجاج الناعم من انبعاثات الغازات الملوثة، ويوفر الطاقة، ويخفض من ارتفاع درجة الحرارة الجوية والأرضية.

5. الحد من الاحتباس الحراري: تساهم هذه التقنية في مواجهة ظاهرة الاحتباس الحراري والتغير المناخي، خاصة في بلدان المغرب العربي.

6. إضافة هامة للهندسة المدنية: تعد هذه التقنية إضافة لاستعمال مسحةق الزجاج الناعم كبديل للاسمنت اضافة هامة في علم الهندسة المدنية، حيث يمكن التكيف مع الأوضاع البيئية وتنسيقها مع التصاميم الهندسية والعمرانية.

7. نموذج فويط المطور: يمكن استخدام نموذج فويط المطور في أبحاث مستقبلية تتعلق بتجانس وهندسة المواد غير المتجانسة إذا كان المضاف مسحوقًا كروي الشكل، مع تحديد فعاليته بجهاز الكشف الفيزيائي.

8. تسهيل البحث: يسهم استنباط مثل هذه النماذج في تسريع البحث وتقليص الزمن التجريبي، لذا يجب دائمًا تطوير أنظمة محاكاة ونماذج رياضية قريبة من الواقع التجريبي لتسهيل عمل المهندسين.

**7.قائمة المراجع**


[1]- WASAN I. KHALIL AND NAZAR F. AL-OBEIDY . SOME PROPERTIES OF HIGH STRENGTH SUSTAINABLE CONCRETE CONTAINING GLASS POWDER WASTE. DIYALA JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES 2018, VOLUME 11, ISSUE 2, PAGES 24-32.

[2]- MOHAMED MAHIR YASSEN AND AL … EFFECTIVENESS OF GLASS WASTES AS POWDER ON SOME HARDENED PROPERTIES OF CONCRETE. AL-NAHRAIN JOURNAL FOR ENGINEERING SCIENCES 2019, VOLUME 22, ISSUE 1, PAGES 14-17.

[3]- ZAINAB ALI HUSSAIN AND NADA MAHDI FAWZI ALJALAWI,SOME PROPERTIES OF REACTIVE POWDER CONCRETE CONTAIN RECYCLED GLASS POWDER. JOURNAL OF ENGINEERING, 2022, VOLUME 28, ISSUE 10, PAGES 42-56.

[4]- ELAF KHALID DAHAMM AND AL … EFFECT OF WASTE GLASS ON PROPERTIES OF CONVENTIONAL AND SELF-COMPACTING CONCRETE, REVIEW. IRAQI JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, 2022, VOLUME 16, ISSUE 2, PAGES 129-133.

[5]- ELHAM ABD AL-MAJEED IBRAHIM DALYA HEKMAT HAMEED.EFFECT OF GLASS WASTE ON PROPERTIES OF CELLULAR CONCRETE WASTE POWDER. IRAQI JOURNAL OF MECHANICAL AND MATERIAL ENGINEERING, 2017, VOLUME 17, ISSUE 1, PAGES 76-86.

[6]- MOHAMMED KAREM ABD. EVALUATION OF USING GLASS FIBER ON PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE. JOURNAL OF KERBALA UNIVERSITY, 2013, VOLUME 11, ISSUE 1, PAGES 16-25.

[7]- MOHAMMED T. NAWAR AND AL …FRESH, MECHANICAL PROPERTIES AND IMPACT RESISTANCE BEHAVIOR OF ECO-FRIEND SELF-COMPACTED CONCRETE. AL-NAHRAIN JOURNAL FOR ENGINEERING SCIENCES, 2019, VOLUME 22, ISSUE 3, PAGES 208-212.

[8]- AWHAM JUMAH SALMAN AND AL …. RECYCLING OF WASTE GLASS IN CONCRETE AS PARTIAL REPLACEMENT OF CEMENT OR FINE AGGREGATE. JOURNAL OF UNIVERSITY OF BABYLON, 2020, VOLUME 28, ISSUE 2, PAGES 241-248.

[9]- SHATHA S. HASAN AND WAFAA SAMI NASAIF. INFLUENCE OF WASTE CONCRETE AND GLASS RECYCLED ON THE STRENGTH PROPERTIES OF GREEN REACTIVE POWDER CONCRETE. JOURNAL OF ENGINEERING, 2022, VOLUME 28, ISSUE 12, PAGES 56-66.

[10]- MOHAMMAD F. AL-DEEN ABBAS HADI ABBAS RAED M. ABDULAH. USING OF GLASS WASTES AS A FINE AGGREGATE IN CONCRETE MIXTURE. TIKRIT JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES, 2011, VOLUME 18, ISSUE 3, PAGES 81-87.

[11]- ABDELMOUTALIB AND AL THERMOMECHANICAL ANALYSIS OF GLASS POWDER BASED ECO-CONCRETE PANELS: LIMITATIONS AND PERFORMANCE EVALUATION. PERIODICA POLYTECHNICA CIVIL ENGINEERING. 67, 4 (JUN. 2023), 1284–1297.

VALBUSA,...DESCRIPTION MATERIELLE : 2 VOL. IN-8°.(1889)
[16]- S. P. TIMOSHENKO – RESISTANCE DES MATERIAUX, TOME 1. THEORIE ELEMENTAIRE ET PROBLEMES, DUNOD, 1968.
[17]- FATIMA AOUISSI. THESE DOCTORAT UNIVERSITE BLIDA 1 COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS PREDICTION ET OPTIMISATION.(2016)
[18]- YVES DEBARD. METHODE DES ELEMENTS FINIS : FLEXION DES POUTRES A PLAN MOYEN. INSTITUT UNIVERSITAIRE DE TECHNOLOGIE DU MANS DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE ET PRODUCTIQUE, 29 MARS 2011, HTTPS://IUT.UNIV-LEMANS.FR/.
[19]- ALBERT FUNTES. BETON ARMEE AUX ETATS LIMITE.(OPU-1988)
[20]- W. ANACH. BOOCK STRENGHTH OF MATERIALS, (EDITION SHAUMS OPU-1989).
[12]- ABDELDJALIL AND AL … VALIDATION OF THE RUEES-VOIGHT HOMOGENIZATION MODEL FOR GLASS POWDER-BASED ECO-CONCRETES. THE EURASIA PROCEEDINGS OF SCIENCE TECHNOLOGY ENGINEERING AND MATHEMATICS, 26, 93-99.(2023)
[13]- MOHAMMED CHATBI AND AL…BENDING ANALYSIS OF NANO-SIO2 REINFORCED CONCRETE SLABS RESTING ON ELASTIC FOUNDATION. STRUCTURAL ENGINEERING AND MECHANICS, AN INT'L JOURNAL VOL.84 NO.5 2022.12 685 - 697 (13PAGE).
[14]- ZOUAOUI RABIE HARRAT AND AL …ON THE STATIC BEHAVIOR OF NANO SI02 BASED CONCRETE BEAMS RESTING ON AN ELASTIC FOUNDATION. COMPUTERS AND CONCRETE V° 27 ,N°6, 575-583, TECHNO PRESS.(2021)
[15]- VOIGT. IL RISORGIMENTO DELL'ANTICHITA CLASSICA, OVVERO IL PRIMO SECOLO DELL'UMANISMO. TRADUZIONE ITALIANA, CON PREFAZIONE E NOTE DEL PROFESSORE D.