مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٨)العدد (٨) ٢٠٢٤
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (8) No. (8) 2024

استخدام بعض المخلفات الصناعية في تحضير نوع جديد من الخرسانة الجيوبوليميرية المدعمة بجسيمات نانوية

د. عبد الرزاق حمال *

د. روللي ماردللي **

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٤/١/١١ . قُبِل للنشر في ٢٠٢٤/٧/١٨)

□ ملخّص □

إن ازدياد الطلب على الاسمنت البورتلندي العادي يؤدي لاستهلاك كميات متزايدة من موارد الطاقة ويسبب العديد من المشاكل البيئية أبرزها زيادة انبعاثات غاز ثنائي أكسيد الكربون، مما دفع الباحثين للبحث عن بدائل للإسمنت البورتلندي مثل الخرسانة الجيوبوليميرية وهي موضوع هذا البحث.

تم في هذه الدراسة تحضير أنواع مختلفة من الخرسانة الجيوبوليميرية من النفايات الصناعية المتمثلة بالرماد المتطاير والنفايات الزجاجية والرمل، حيث أجريت دراسة توصيفية لكل منهما وحضرت مزائج من الرماد المتطاير مع النفايات الزجاجية والرمل بنسب مزج مختلفة، حضر الجيوبوليمير بإضافة المحلول القلوي المنشط المكون من هيدروكسيد الصوديوم مع سيليكات الصوديوم بنسبة محددة لمزيج المواد الأولية، بعد تجانس المزيج تم صبه ضمن قوالب بأبعاد محددة لإجراء الاختبارات اللاحقة.

تم اختبار مقاومة الضغط للخرسانة المحضرة ومقارنتها مع الخرسانة التقليدية، بينت النتائج أنه تزداد المقاومة بازدياد نسبة النفايات الزجاجية لتبلغ ذروتها عند نسبة 20% من وزن الرماد، أما الاضافة بنسبة أعلى من 30% يؤدي لتناقص المقاومة بشكل ملحوظ نتيجةً لعدم ارتباطها مع مكونات الخرسانة.

كما تم أيضا تحضير السيلكا النانوية ودراسة مواصفاتها واضافتها للخرسانة الجيوبوليميرية فأثبتت التجارب بأن السيلكا النانوية المحضرة في هذا البحث لها قدرة كبيرة على رفع مقاومة الخرسانة الجيوبوليميرية، وهذه الزيادة متناسبة طرداً مع نسبة الإضافة، كما تفوقت مقاومة الخرسانة الجيوبوليميرية على الخرسانة العادية الحاوية على الاسمنت البورتلندي وخاصة في عمر 28 يوم وذلك في جميع نسب الإضافة المدروسة.

الكلمات المفتاحية: الجيوبوليمير–الرماد المتطاير– تقنية النانو– النفايات الزجاجية.

*مدرس متمرن في قسم العلوم الأساسية، كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية، جامعة حلب

**مدرس متمرن في قسم التبريد والتكييف، الكلية التطبيقية، جامعة حلب

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (٨)العدد (٨) ٢٠٢٤
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (8) No. (8) 2024

Use of Some Industrial Waste in The Preparation of a New Type of Geopolymer Concrete Reinforced with Nanoparticles

Abdulrazzaq Hammal*
Rolly Mardelly**

(Received 11/1/2024 . Accepted 18/7/2024)

□ ABSTRACT □

The increase in demand for ordinary Portland cement leads to the consumption of increasing amounts of energy resources and causes many environmental problems, the most notable of which is the increase in carbon dioxide emissions, Which prompted researchers to search for alternatives to Portland cement, such as geopolymer concrete, which is the subject of this research.

In this study, different types of geopolymer concrete were prepared from industrial waste represented by fly ash, glass waste, and sand. A characterization study was conducted for each of them, and mixtures of fly ash with glass waste and sand were prepared at different mixing ratios. Geopolymer was prepared by adding the activated alkaline solution consisting of sodium hydroxide with sodium silicate was prepared in a specific proportion to the mixture of raw materials, After the mixture becomes homogeneous, It was poured into molds with specific dimensions to conduct subsequent tests.

The compressive strength of the prepared concrete was tested and compared with traditional concrete. The results showed that the strength increases with the increase in the percentage of glass waste, reaching its peak at 20% by weight of the ash. However, adding a percentage higher than 30% leads to a noticeable decrease in the strength due to its lack of bonding with the concrete components.

Nano-silica was also prepared, its specifications were studied, and it was added to geopolymer concrete. Experiments proved that the nano-silica prepared in this research has a great ability to increase the strength of geopolymer concrete, and this increase is directly proportional to the addition ratio. The strength of geopolymer concrete also exceeded ordinary concrete containing Portland cement, especially at the age of 28 days, in all the addition rates studied.

Keywords: Geopolymer–fly ash-nanotechnology- waste glass

* Trained teacher Dept. of Basic Science, Faculty of Electrical engineering, University of Aleppo
** Trained teacher Dept. of Refrigeration and air conditioning, Applied Faculty, University of Aleppo

1-المقدمة Introduction

تستخدم الخرسانة على نطاق واسع في جميع أنحاء العالم حيث يشكل الأسمنت البورتلاندي العادي (**OPC**)، المادة الرابطة الأساسية للخرسانة، لكن الاستهلاك المتزايد للخرسانة يتطلب انتاج كميات كبيرة من الاسمنت البورتلندي مما يؤدي لزيادة استهلاكموارد الطاقة وازدياد انبعاث غاز ثنائي أكسيد الكربون وما يسببه من تداعيات بيئية كبيرة، حيث تساهم صناعة الإسمنت بنسبة تتراوح بين ٥ و ٧٪ من إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية في الغلاف الجوي[١].

أجريت العديد من الدراسات حول إمكانية الاستبدال الجزئي للإسمنت بمواد اسمنتية مختلفة أولى الدراسات التي تم اجراؤها حول استخدام بدائل للإسمنت البورتلندي كانت في عام ١٩٣٠ عندما تم دراسة الخلائط المكونة من خبث الفرن العالي ومحلول KOH، أجريت دراسة في عام ١٩٥٩ تم من خلالها لأول مرة إنتاج مواد رابطة باستخدام مصدر لسيليكات الألمنيوم (الغضار) مع منشطات قلوية، ثم طورت مادة رابطة جديدة دعيت "تربة–الإسمنت"، بحيث أشارت كلمة التربة إلى الصخور الخام، وكلمة اسمنت إلى تمتعها بخواص رابطة كالإسمنت. فيعام ١٩٨٠، تمت دراسة نواتج عملية تنشيط خبث الفرن العالي بالمحلول القلوي المنشطووجد بأنها تتكون من هيدرات سيليكات الكالسيوم وهيدرات سيليكات الصوديوم والألمنيوم، وإن الغضار المنشط بالقلويات يعطي هيدرات سيليكات الألومنيوم (الزيوليت). في عام ١٩٨٤، تم تحضير مواد رابطة عن طريق مزجالغضار الكاؤوليني مع الحجر الكلسي والدولوميت ثم المعالجةبالمحاليل القلوية المنشطة،سميتالمواد الرابطة الناتجة للمرة الأولى "الجيوبوليمير" بسبب تركيبها البوليميري [6-2].

بعد إجراء عدد كبير من الدراسات والأبحاث تبين بأن الخرسانة الجيوبوليميرية تتمتع بخصائص ميكانيكية وقوة ارتباط أفضل من الخرسانة التقليدية، حيث كان ازدياد مقاومة الضغط مع الزمن للخرسانة الجيوبوليميرية أسرع من الخرسانة التقليدية، فيمكن للخرسانة الجيوبوليميرية أن تصل مقاومة الضغط فيها إلى ٦٠ ميجا باسكال بعد يوم واحد من الصب، علاوة على ذلك، يمكن للخرسانة الجيوبوليميرية أن تحقق ٩٠٪ من مقاومتها للضغط في غضون7 أيام، وبناءً على مقاومة الضغط المتوسطة المقاسة للخرسانة الجيوبوليميرية ومقارنة قيمها مع تلك للخرسانة التقليدية، يمكن تصنيف الخرسانة الجيوبوليميرية على أنها خرسانة عالية الأداء[9-7].

وتزدادمقاومة الضغط للخرسانة الجيوبوليميرية بزيادة محتوى خبث الفرن العالي حتى $500kg\backslash m^3$، أما انخفاض نسبة الألمنيوم في الخبث يؤدي إلى انخفاضمقاومة الضغط للخرسانة الجيوبوليميرية.كما أن زيادة تركيز محلول NaOH في المحلول القلوي المنشط حتى14M يزيد من مقاومة الضغط للخرسانة الجيوبوليميرية.لدى دراسة تركيب المحلول القلوي المنشط تبين بأن زيادة النسبة (سيليكات الصوديوم: هيدروكسيد الصوديوم) من ١,٧٥: ١ إلى ٣,٢٥: ١ تسبب زيادة طفيفة في مقاومة الضغط للخرسانة الجيوبوليميرية، بالإضافة لما سبق إن الخرسانة الجيوبوليميرية المعالجة بالحرارة تحقق مقاومة ضغط بشكل أسرع من تلك التي تم معالجتها بدرجة حرارة الغرفة في الأعمارالمبكرة للصب، ومع ذلك، في الأعمارالمتأخر، تنخفض بشكل طفيفمقاومةالضغط للخرسانة الجيوبوليميرية المعالجة بالحرارة[12-10].

العديد من الدراسات بينت بأن الخرسانة الجيوبوليميرية تظهر قدرة أفضل على مقاومة التشقق والتآكل، مما يجعلها خياراً مثالياً للاستخدام في بيئات صعبة مثل المحيطات أو المناطق ذات الظروف الجوية القاسية.بالإضافة إلى ذلك، يمكن استخدام الخرسانة الجيوبوليميرية في تطبيقات الإصلاح والترميم بفضل قدرتها على التصاق قوي ومتين مع

الأسطح القديمة. وبشكل عام، تظهر الخرسانة الجيوبوليميرية خصائص ميكانيكية والتصاق وربط أفضل من الخرسانة التقليدية، مما يجعلها خياراً جيداً لمجموعة متنوعة من التطبيقات الإنشائية والإصلاحية[18-13].

في هذه الدراسة تم استخدام الرماد المتطاير كمادة أولية في صناعة الخرسانة الجيوبوليميرية، والرماد المتطاير هو عبارة عن جسيمات لاعضوية معدنية دقيقة ناتجة عن احتراق مسحوق الفحم الحجري في محطات توليد الطاقة الكهربائية وغيرها من العمليات الصناعيةمثل تقطير البترول،وصناعةالإسمنت والصناعات المعدنية، يتكوّن الرماد المتطاير من أكاسيد لا عضوية موجودة في الفحم والتي تنصهر وتتبلور خلال عملية احتراق الفحم، وتعتبر من بقايا مواد احتراق الفحم، يتكوّن الرماد المتطاير بصورة أساسية من مواد غضارية وبيريت وكالسيت وفلدسبار تصل نسبتها إلى 95%،ويُعتبر ثنائي أكسيد السيليسيوم SiO_2 بشكله البلوري وغير المتبلوّر المكوّن الرئيس فيه، بالإضافة إلى أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 وأكسيد الكالسيوم CaO. كما يحتوي على أكسيد الصوديوم Na_2O وأكسيد البوتاسيوم K_2O **[19-21].**

يعتمد التركيب الكيميائي للرماد المتطاير على التركيب الكيميائي للفحم الخام، وعلى التقنية المتبعة لحرقالفحم في محطة توليد الطاقة الكهربائية وخاصة فيما يتعلق بعملية الترطيب ووسائل الترشيح المتبعة. ومن ناحيةأخرى فإن كمية المواد البلورية المتشكلة مقارنة مع الطور الزجاجي تعتمد بشكل كبير جداً على شروط عملية احتراق الفحم فإذا تم حرق الفحم عند درجة حرارة أعلى من 1200^oCبزمن تبريد قصير جداً، فإن الرماد الناتج سيكون غني بالطور الزجاجي المتشكل، في حين يؤدي التبريد التدريجي لحبيبات الرماد إلى تشكيل مركباتبلورية للكالسيوم مثل سيليكات الكالسيوم $CaSiO_3$[19-21].

يصنف الرماد المتطاير إلى صنفين رئيسين هما CوF وذلك اعتماداً على التركيب الكيميائي للأكاسيد الرئيسة كما هو موضح بالجدول رقم (1)

الجدول رقم (1) تصنيف الرماد المتطاير[19]

المكون (%)	الصنف C	الصنف F
$(Fe_2O_3 + Al_2O_3 + SiO_2)$	50.0	70.0
SO_3	>5.0	<5.0
الرطوبة	3.0	3.0
الفاقد بالحرق L.O.I	6.0	6.0

ينتجالرمادالمتطايرمنالصنف F عناحتراقالفحمالحجريوالأنتراسيت،ويمتازبأنهذوبنية سيليكاتية أو ألومينوسيليكاتية لا تمتلك خواص إسمنتية بحد ذاتها، ولكن بوجود الماء يمكن أن تتفاعل معهيدروكسيد الكالسيوم عند درجة الحرارة العادية لتعطي مركبات تمتلك خواص إسمنتية، أما الرماد المتطايرمن الصنف C فإنه ينتج عن احتراق الفحم الحجري و الليغنييت، و يمتاز بأنه يحوي على نسبة مرتفعة من أكسيدالكالسيوم أو كربونات الكالسيوم، وهذا الصنف يملك خواص بوزولانية وبعض الخواص الإسمنتية**[19-21].**

كما أن حبيبات الرماد المتطاير هي حبيبات ناعمة جداً وذات شكل كروي، حيث يتراوح قطر حبيبات الرماد المتطاير بين μm(1-100)، وقطر حبيبات القسم الأكبر منه أقل من 25μm، كماأنهيملكسطحاًنوعياًعالياًبحدودcm^2/gr (6000 – 2000) وهذا يضيف ميزة اقتصادية مهمة لاستخدامه مباشرةً في

الصناعة دونالحاجةإلىطحنه، كما أنه يساعد على التقليل من انبعاث الغازات الناتجة عن عملية الحرق بشكل كبير **[19-21]**.

2-أهمية البحث وأهدافه

يعتبر الرماد المتطاير والنفايات الزجاجية من النفايات الصناعية الأكثر انتشاراً في العالم، تأتي أهمية البحث لكونه يحقق هدفين الأول هو التخلص من مخلفات صناعية منتشرة بشكل واسع في جميع أنحاء العالم، والهدف الثاني هو انتاج نوع من خرسانة الجيوبوليميرالتي تعتبر مادة بناء مبتكرة وَصديقة للبيئة وَبديل لِخرسانة الإسمنت البورتلندي تساهم بتخفيض الطلب على الإسمنت البورتلندي المسؤول عن انبعاثات ثنائي أكسيد الكربون العالية ومخاطر بيئية عديدة.

3-القسم العملي

3-1-الأجهزة والكواشف المستخدمة

3-1-1-الأجهزة.

- جهاز التحليل بالأشعة السينية التألقية(XRF)، والذي يعمل بجهد (50 kv)، صنع شركة Panalytical. كلية العلوم الهندسية -جامعة بايروث-ألمانيا.
- جهاز حيود الأشعة السينية (XRD)، بفلتر من النيكل Ni، وإشعاع CuK_{α}، وطول الموجة (λ=1.5405 A°)، يعمل عند (40kv&20 mA) صنع شركة Panalytical. كلية العلوم الهندسية جامعة بايروث-ألمانيا.
- فرن كهربائي يعمل حتى درجة الحرارة 1700°C مزود بعدّة أنظمة تسخين، من إنتاج شركة Carbolite الانكليزية. الهندسة المدنية-جامعة حلب.
- مجهر القوة الذرية Nano surf -AFM كلية العلوم-جامعة حلب.
- جهاز تحديد التدرج الحبيبي ذو المناخل القياسية، صنع شركة Retchطراز(AS.200).
- فرن تجفيف يعمل حتى الدرجة 200°C انتاج شركة JANAT.
- ميزان تحليلي حساس من نوع Denver Instrumentنموذج AA-200حساسيته ±0.1mg أمريكي.

3-1-2-المواد الكيميائية

- حمضكلورالماء(HCl 36%)من انتاج شركةSigma-Aldrich
- هيدروكسيد الصوديوم (NaOH 98%)من انتاج شركةSigma-Aldrich
- سيليكات الصوديوم السائلةمن انتاج شركةSigma-Aldrich.

3-2-طرائق العمل

3-2-1-جمع عينات من الرماد المتطاير وتحليلها

جمعت عينات من الرماد المتطاير من مصفاة بانياس، حدد التركيب الكيميائي للرماد المتطاير المطحون باستخدام الأشعة السينية (XRF) وفق الخطوات الآتية:

طحن 25gمن الرماد المتطاير الجاف بمطحنة السحق لمدة 5min، ثم أخذ 10gمنه ومزجت مع 3gمن مسحوق حمض البور بشكل جيد ووضع المزيج بقالب من الألمنيوم، ثم ضغطت العينة بقوة حوالي 150 KN، وبعد

عملية الضغط تم الحصول على عينة بشكل قرص دائري بقطر 30mmوبسماكة 5mm، نقلت العينة مع الحامل إلى حجرة التحليل (وهي الطريقة المتبعة في تحليل المواد الصلبة بهذا الجهاز وفق الارشادات المرفقة مع الجهاز). حددت الأطوار باستخدام جهاز حيود الأشعة السينية XRDالذي يضم فلتر من النيكل وإشعاع Cu Kα1 وطول موجة (λ=1.5405A°).

3-2-2-جمع عينات من نفايات الزجاج وتحليلها

جمعت عينات من الزجاج المكسر من إحدى ورش الزجاج، ثم طحنت بواسطة مطحنة بورسلانية مع كرات طاحنة مختلفة الاحجام وذلك لحجم حبيبي أقل من١٠٠ميكرون. حدد التركيب الكيميائي للزجاج المطحون باستخدام الأشعة السينية (XRF) بنفس الطريقة المتبعة لتحليل الرماد المتطاير.

3-2-3-تحضير جسيمات السيلكا النانوية

تم تحضير جسيمات السيلكا النانوية بطريقة Sol-Gelبأخذ 25gr من سيليكات الصوديوم السائلة وإضافة75ml من الماء المقطر مع التحريك بواسطة محرك مغناطيسي حتى تمام التجانس، ثم يضاف محلول من حمض كلور الماء بتركيز ١٠% على شكل قطرات مع التحريك السريع حتى لحظة تشكل هلام متجمد، يغسل الهلام بالماء المقطر للتخلص من بقايا الحمض الفائض، ثم يجفف الهلام لمدة ٢٤ ساعة عند درجة الحرارة 60ºCدرجة مئوية، ثم عولجت حرارياً عند الدرجة 900ºCلمدة 30minليتشكل بنتيجتها جسيمات من السيلكا SiO_2ذات لون أبيض وفق المعادلةالآتية:

$$H_2SiO_3 \rightarrow H_2O\uparrow + SiO_2$$

3-2-4-جمع عينات من الرمل وتوصيفها

جمعت عينات الرمل من منطقة النبك بطريقة الأرباع، حيث أخذت من عدة مستويات في كومة الرمل ثم مزجت العينات مع بعضها بشكل جيد ثم تم إجراء التحليل الكيميائي للرمل المدروس باستخدام الأشعة السينية (XRF).

كما حدد التوزع الحجمي الحبيبي للرمل المدروس وفق مايلي: تؤخذ كمية 100g من الرمل ويتم فرزها بواسطة مناخل قياسية مع هزاز كهربائي لمدة 15min، ومن ثم يؤخذ الرمل المتبقي على كل منخل ويحدد وزنه، تحسب النسبة المئوية للمتبقي على المنخل من العلاقة التالية:

$$\text{النسبة المئوية للمتبقي\%} = \frac{\text{وزن المتبقي على المنخل}}{\text{وزن الرمل الكلي}} \times 100$$

3-2-5-تحضير الخرسانة الجيوبوليميرية

تم تحضير الخرسانة الجيوبوليمير وفق المراحل الآتية:

- تحضير مزائج من المواد الأولية (الرماد المتطاير، النفايات الزجاجية، الرمل)كما في الجدول رقم (٢).

-

الجدول رقم (٢) مزائج المواد المستخدمة لدراسة تأثير إضافة النفايات الزجاجية

العينة	نسبة النفايات الزجاجية إلى الرماد	الرماد المتطاير gr	النفايات الزجاجية gr	الرمل gr
G0	0%	50	0	150
G1	10%	45	5	150
G2	20%	40	10	150
G3	30%	35	15	150
G4	40%	30	20	150
G5	50%	25	25	150

- تحضير المحلول القلوي المنشط (AS)الذي يتكون من هيدروكسيد الصوديوم مع سيليكات الصوديوم بنسبة مزج وزنية تعادل ($Na_2SiO_3/NaOH = 2.5$)، مع إضافة كمية مناسبة من الماء بحيث يصبح تركيز (NaOH)14M
- أضيف المحلول المنشط لكل مزيج مع التحريك السريع لمدة 15min وذلك بنسبة وزنية تعادل (محلول منشط/رماد متطاير = 0.4).
- صب المزيج المتجانس ضمن قوالب محددة القياسات ليتصلب من خلال تفاعل البلمرة اللاعضوية، ومن ثم إجراء الاختبارات الميكانيكية اللاحقة (مقاومة الضغط–ومقاومة الانحناء).
- أضيف المحلول المنشط لكل مزيج بنسبة وزنية تعادل AS/Fa =0.4 [10-12]
- تم اجراء خلط سريع للمكونات لمدة 15mim حتى الحصول على مزيج متجانس، صب المزيج ضمن قوالب بأبعاد محددة خاصة بالاختبارات اللاحقة.

3-2-6-تحديد مقاومة الضغط للخرسانة الجيوبوليميرية المحضرة

تم إجراء اختبار مقاومة الضغط عند أعمار2,7,28يوماً للخرسانة الجيوبوليميرية المحضرة، وذلك بتحضير عينات موشورية بأبعاد ٤٠mm×٤٠×١٦٠ طبقاً للمواصفة القياسية EN 196-1:2005، حيث يتم تطبيق الضغط بشكل متوازٍ وتكون سرعة تطبيق الحمولة بمعدل (2400 ± 200 N/S)حتى انهيار العينة، تم حساب مقاومة الضغط (R_C) من العلاقة التالية:

$$\mathbf{R_C = F_C/1600}$$

حيث:

$\mathbf{R_C}$ مقاومة الضغط بواحدة(N/mm^2).

$\mathbf{F_C}$ الحمولة التي حصل عندها الانهيار وتقدر(N).

مساحة تطبيق الحمولة بـ mm^2($40\ mm \times 40\ mm = 1600\ mm^2$).

تمت مقارنة النتائج مع عينة قياسية (**OPC**) تحتوي على الاسمنت البورتلندي العادي حضرت بمزج جزء واحد من الاسمنت البورتلندي العادي مع ثلاثة أجزاء من الرمل القياسي.

3-2-7-تأثيرإضافة السيلكا النانوية على مواصفات الخرسانة الجيوبوليميرية

لدراسة تأثير لإضافة السيلكا النانوية المحضرة على الخواص الميكانيكية للخرسانة الجيوبوليميرية تم تشكيل مزائج من المواد الأولية مع نسب متزايدة من السيلكا ثم تحضير الجيوبوليمير بنفس الطريقة واجراء اختبار مقاومة الضغط والمقارنة، حيث يوضح الجدول رقم (٣) تركيب المزائج المدروسة:

الجدول رقم (٣) مزائج المواد المستخدمة لدراسة تأثير إضافة السيكا النانوية

العينة	الرماد المتطاير gr	النفايات الزجاجية gr	الرمل gr	السيليكا النانوية gr
GS1	50	0	150	2
GS2	45	5	150	4
GS3	40	10	150	6
GS4	35	15	150	8
GS5	30	20	150	10

3-3-النتائج والمناقشةResults and Discussion

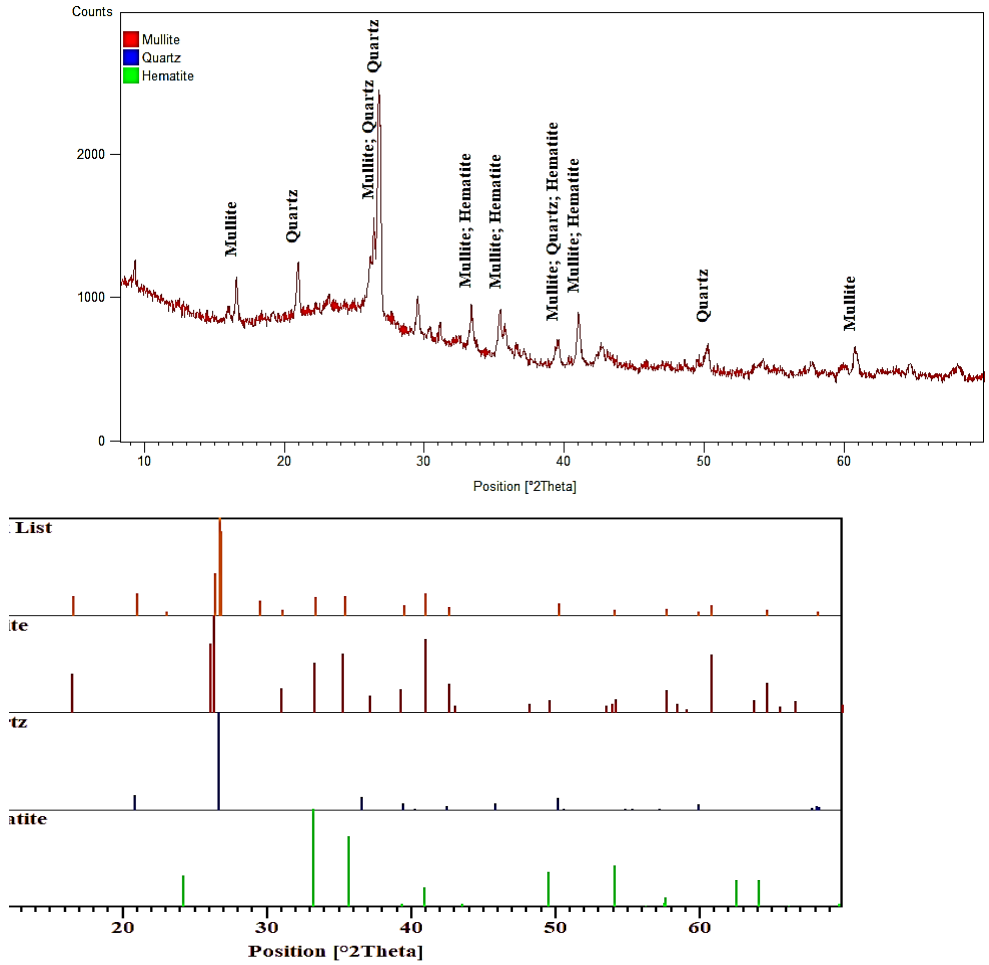
3-3-1-التركيب الكيميائي والطوري للرماد المتطاير

تبين نتائج التحليل الكيميائي للرماد المتطاير المدروس في الجدول رقم (٤) أنه يحويبشكل رئيس على ثنائي أكسيد السيليسيوم SiO_2بنسبة49.10%، ويشكل أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 المكوّن الثاني ذي النسبة الأعلى بحوالي 16.18%، ويحتوي على أكسيدالحديد Fe_2O_3 بنسبة 11.33%، من ناحيةٍ أخرى نلاحظ احتواء الرماد المتطاير على أكسيد الكالسيومCaO وبنسبة 8.14% وتشكل نسبة أكسيد المغنيزيوم MgO3.95%، بالإضافة إلى أكسيد الصوديوم0.25%والبوتاسيوم بحوالي 3.3%بينما نلاحظ أن مجموع الأكاسيد الثلاثة $SiO_2+Fe_2O_3+Al_2O_3$=76.61وبالتالي يمكن تصنيفه من الصنف F وفق المواصفة الأمريكية (ASTM-C618)

الجدول رقم (4)التركيب الكيميائي للرماد المتطاير بواسطة الأشعة السينية التألقية XRF

المكون	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	SO_3	Cl	K_2O	Na_2O	L.O.I	الرطوبة
(%)	49.10	16.18	11.33	3.95	8.14	0.38	0.02	3.3	0.25	6.75	12.00

يوضح طيف حيود الأشعة السينية XRDفي الشكل رقم (1) لعينة الرماد المتطاير وجود مزيج من المولييت والكوارتز والهيماتيت بشكل رئيس وهذا يتوافق مع نتائج التحليل الكيميائي الواردة في الجدول رقم (2)، وقد تم الحصول على هذه النتائج من خلال مقارنة قمم الإمتصاص لطيف العينة المدروسة مع البطاقات المرجعية المرفقة في مكتبة الجهاز.



Compound Name	Chemical Formula	Score	Ref. Code
Mullite	$3Al_2O_32SiO_2$	48	00-006-0258
Quartz	SiO_2	37	01-079-1906
Hematite	Fe_2O_3	7	01-085-0599

الشكل رقم (1) طيف حيود الأشعة السينية XRD للرماد المتطاير و طيوف الـ XRD المرجعية

3-3-2-التركيب الكيميائي للنفايات الزجاجية

بينت نتائج التحليل الكيميائي للنفايات الزجاجية المدروسة في الجدول رقم (5)أنها تحوي على نسبة مرتفعة من ثنائي أكسيد السيليسيوم SiO_2الذي يمثل المركب الرئيسي فيها، بالإضافة لوجود أكاسيد أخرى بنسب متفاوتة التي تشكل مع ثنائي أكسيد السيليسيوم بنية الشبكة الزجاجية.

الجدول رقم (5) التحليل الكيميائي بتقنية XRF للنفايات للزجاجية المدروسة

المكون	النسبة (%)
SiO_2	٧٢,٤٥
Al_2O_3	١,١٧
Fe_2O_3	٠,٠٥
CaO	٨,٤١
MgO	٣,٢٨

SO_3	٠,١٤
K_2O	٠,١٢
Na_2O	١٤,٣٨
الفاقد بالحرق	٠,٠٣

3-3-3-مواصفات جسيمات السليكا المحضرة

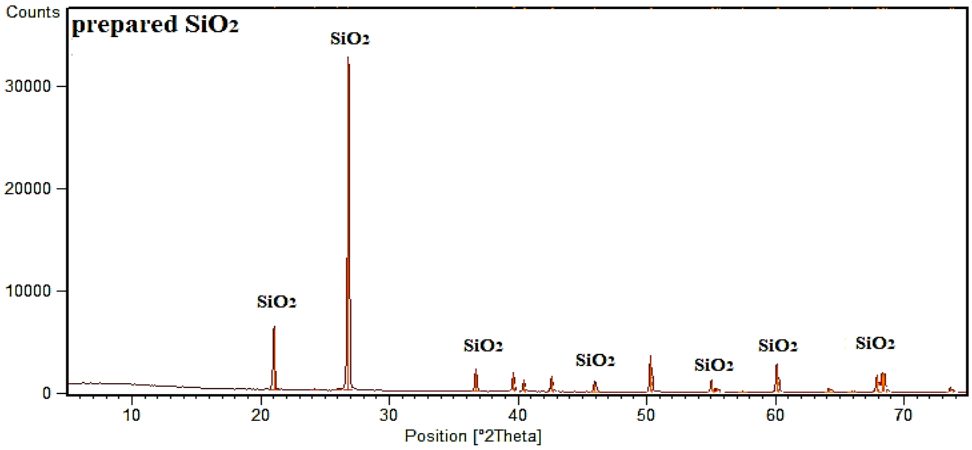
يوضح الشكل رقم (2) هلام السيلكا الذي تم تحضيره وجسيمات السيلكا بعد التجفيف والمعالجة الحرارية.

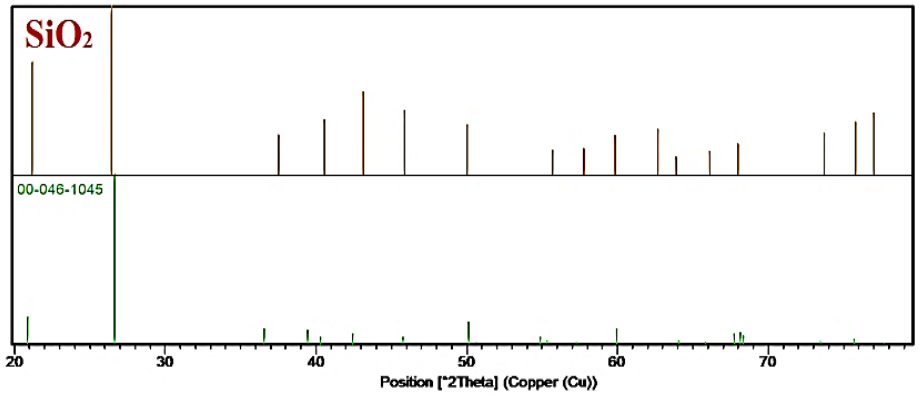
جسيمات السيليكا النانوية

هلام السيليكا

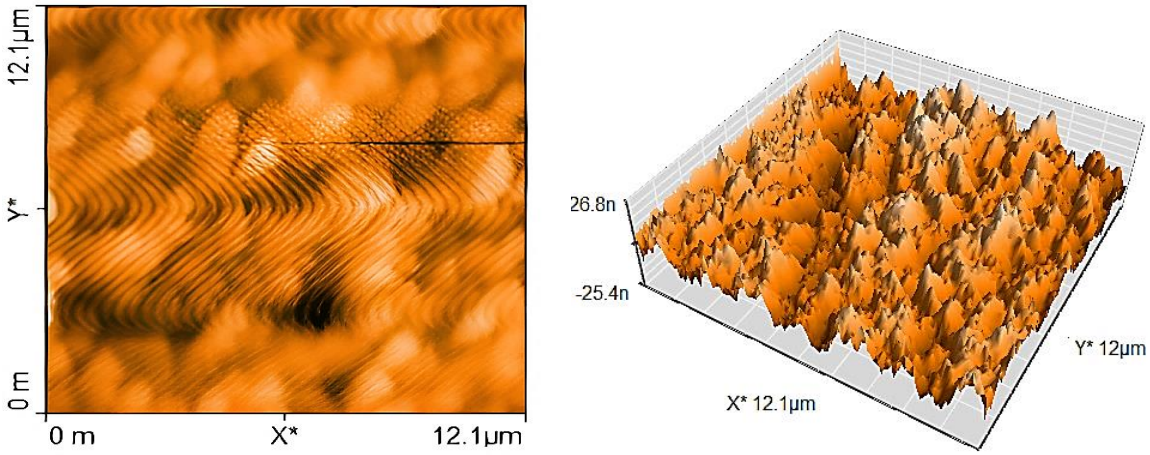
الشكل رقم (2) هلام السيلكا وجسيمات السيلكا النانوية المحضرة

لدى المقارنة بين طيف XRDللسيلكا المحضرة وطيف XRD المرجعي في الشكل رقم (3) يلاحظ التوافق التام بين قمم طيف السيلكا المحضرة والكود المرجعي رقم\ ١٠٤٥-٠٤٦-١٠٠، وهذا يدل أيضاً على نقاوة السيلكا المحضرة، كما دلت نتائج التحليل بمجهر القوة الذرية AFM لسطح عينة السيلكا المحضرة على تجانس سطح العينة والحصول على بنى نانوية يصل حجمها حتى 90nmالشكل رقم (٤)





الشكل رقم (٣) طيف XRD لبنية السيلكا المحضرة والكود المرجعي للسيلكا



a صورة ثنائية البعد للسيليكا المحضرة **bصورة ثلاثية البعد للسيليكا المحضرة**

الشكل رقم (٤) صور مجهر AFM ثنائية وثلاثية الأبعاد لعينة السيلكا

3-3-4-مواصفات الرمل المستخدم

بينت نتائج الاختبارات للرمل الخام والموضحة في الجدول رقم (٦) بأنه يحتوي على نسبة 92.62%من ثنائي أكسيد السيليسيوم SiO_2بالإضافة لمجموعة من الشوائب أهمها أكسيد الحديد، أكسيد الألمنيوم، وأكسيد الكالسيوم وغيرها.

الجدول رقم (٦) التحليل الكيميائي للرمل المستخدم

المكون	%

SiO_2	92.62
Al_2O_3	1.29
Fe_2O_3	1.26
CaO	5.77
MgO	0.43
SO_3	0.01
K_2O	0.21
Na_2O	0.06
L.O.I	1.04

أما التوزع الحجمي الحبيبي للرمل المدروس فكان وفق الجدول رقم (٧)

الجدول رقم (٧) التوزع الحجمي الحبيبي للرمل المستخدم

فتحة المنخل mm	النسبة المئوية المتبقية على المنخل (%)
>2	0.00
1	0.41
0.710	5.12
0.600	6.02
0.500	7.62
0.425	9.84
0.300	19.11
0.200	24.47
0.090	23.32
<0.090	4.10
المجموع	100

3-3-4-مقاومة الضغط للخرسانة الجيوبوليميرية المحضرة

دلت النتائج في الجدول رقم (٨) على أن مقاومة الضغط للخرسانة الجيوبوليميرية المحضرة من الرماد المتطاير فقط أقل من المقاومة للخرسانة العادية عند الأعمار المدروسة، وإن إضافة النفايات الزجاجية يزيد من المقاومة بشكل ملحوظ خاصة في العينة G2المكونة من الرماد المتطاير مع النفايات الزجاجية بنسبة 20%، حيث يعود تفسير هذه النتيجة لتفاعل الشبكة الزجاجية للنفايات مع المحلول القلوي المنشط وتشكيل نسبة إضافية من السيليكات المنحلة التي تتفاعل مع مكونات المواد الأولية لتزيد من الربط الكيميائي بين المكونات، أما زيادة نسبة النفايات الزجاجية عن 30% (من وزن الرماد المتطاير) يعطي مفعول معاكس لكونه يبقى حراً دون ارتباط وبالتالي يؤدي لتخفيض قيمة مقاومة الضغط للخرسانة الناتجة.

الجدول رقم (٨) تأثير إضافة النفايات الزجاجية على مقاومة الضغط للخرسانة الجيوبوليميرية

العينة	مقاومة الضغط (N/mm^2)		
	بعد ٢ يوم	بعد ٧ يوم	بعد ٢٨ يوم
الخرسانة العادية القياسية OPC	**51.87**	**66.75**	**86.77**
G0	31.43	61.32	79.61
G1	35.21	63.11	81.37
G2	48.22	67.32	84.12
G3	40.21	62.32	81.43
G4	29.24	55.19	75.65
G5	22.34	43.98	67.45

بينت نتائج الاختبار أن الخرسانة الجيوبوليميرية التي تحتوي في تركيبها على السيلكا النانوية تتمتع بمقاومة أعلى من الخرسانة العادية كما في الجدول رقم (٩)، حيث تزداد مقاومة الضغط بازدياد نسبة السيلكا النانوية المضافة،

تعزى هذه النتيجة لتفاعل جسيمات السيلكا النانوية مع المحلول القلوي المنشط وتشكل سيليكات ذوابة تربط بين مكونات المزيج، وبسبب حجم الجسيمات الصغير يكون سطحها النوعي كبير بالتالي تفاعلها سريع وتزيد من سرعة الارتباط، تستمر الزيادة في مقاومة الضغط بازدياد نسبة السيلكا المضافة بشكل مستمر لكن تكلفة انتاج السيلكا النانوية بالمقارنة مع تكلفة بقية المكونات وتكلفة الخرسانة العادية هي من يحدد نسبة الإضافة التي نتوقف عندها.

الجدول رقم (٩) تأثير إضافة السيلكا النانوية على مقاومة الضغط للخرسانة الجيوبوليميرية

العينة	مقاومة الضغط (N/mm^2)		
	بعد ٢ يوم	بعد ٧ يوم	بعد ٢٨ يوم
الخرسانة العادية القياسية OPC	**51.87**	**66.75**	**86.77**
GS1	43.27	67.22	88.21
GS2	56.12	69.29	90.32
GS3	58.46	74.87	97.12
GS4	63.10	78.12	101.66
GS5	65.24	79.01	105.44

4-الاستنتاجات

يمكن تحضير أنواع مختلفة من الخرسانة الجيوبوليميرية باستخدام الرماد المتطاير مع النفايات الزجاجية، حيث تزداد مقاومة الضغط للخرسانة المحضرة بازدياد نسبة النفايات الزجاجية التي تتفاعل مع المحلول المنشط القلوي لتعطي سيليكات ذوابة تزيد من ارتباط المكونات وتشكيل الجيوبوليمير لتبلغ ذروتها عند نسبة 20% من وزن الرماد، أما إضافة النفايات الزجاجية بنسبة أعلى من 30% يؤدي لتناقص المقاومة بشكل ملحوظ نتيجةً لعدم ارتباطها مع مكونات الخرسانة.

كما أثبتت التجارب بأن السيلكا النانوية المحضرة في هذا البحث لها قدرة كبيرة على رفع مقاومة الخرسانة الجيوبوليميرية، وهذه الزيادة متناسبة طرداً مع نسبة الإضافة، كما تفوقت مقاومة الخرسانة الجيوبوليميرية على الخرسانة العادية الحاوية على الاسمنت البورتلندي وخاصةً في عمر 28 يوم وذلك في جميع نسب الإضافة المدروسة.

5-المراجع

1. Van Oss HG, Padovani AC. Cement manufacture and the environment: part I: chemistry and technology. J Ind Ecol 2002;6(1):89–105.

2. Shi C, Roy D, Krivenko P. Alkali-activated cements and concretes. CRC Press; 2003.

3. Purdon AO. The action of alkalis on blast-furnace slag. J Soc Chem Ind 1940;59 (9):191–202.

4. Glukhovsky VD, Rostovskaja GS, Rumyna GV. High strength slag-alkaline cements. In: 7th International Congress on the Chemistry of Cement, vol. 3, 1980. p. 164–168.

5. Davidovits J. Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process. Google atents, 18-Sep-1984.

6. Phoo-ngernkham T, Hanjitsuwan S, Damrongwiriyanupap N, Chindaprasirt P. Effect of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on strengths of alkali activated high calcium fly ash containing Portland cement. KSCE J Civ Eng 2017;21(6):2202–10.

7. Miyamoto T, Torii K, Akahane K, Hayashiguchi S. Production and use of blast furnace slag aggregate for concrete. Nippon Steel Sumitomo Met Tech Rep 2015; 109:102–8.

8. Phoo-ngernkham T, Maegawa A, Mishima N, Hatanaka S, Chindaprasirt P. Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA–GBFS geopolymer. Constr Build Mater 2015; 91:1–8.

9. Xu H, Van Deventer JSJ. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. Int J Miner Process 2000;59(3):247–66.

10. Zuo, J., Li, H., Dong, B., Wang, L., 2020. Effects of metakaolin on the mechanical and anticorrosion properties of epoxy emulsion cement mortar. Appl. Clay Sci. 186, 105431.

11. Zhu, H.J., Liang, G.W., Zhang, Z.H., Wu, Q.S., Du, J.Z., 2019. Partial replacement of metakaolin with thermally treated rice husk ash in metakaolin-based geopolymer. Constr. Build. Mater. 221, 527–538.

12. Ricciotti, L., Occhicone, A., Petrillo, A., Ferone, C., Cioffi, R., Roviello, G., 2020. Geopolymer-based hybrid foams: Lightweight materials from a sustainable production process. J. Clean. Prod. 250, 11

13. Aziz IH, Abdullah MMAB, Salleh MAAM, Azimi EA, Chaiprapa J, Sandu AV. Strength development of solely ground granulated blast furnace slag geopolymers. Constr Build Mater 2020;250:118720.

14. Aliabdo AA, Elmoaty AEMA, Emam MA. Factors affecting the mechanical properties of alkali activated ground granulated blast furnace slag concrete. Constr Build Mater 2019;197:339–55.

15. Nath P, Sarker PK. Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. Constr Build Mater 2014;66:163–71.

16. S, Rajasekaran C. Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag. Constr Build Mater 2017;146:615–20.

17. Patel YJ, Shah N. Enhancement of the properties of ground granulated blast furnace slag based self compacting geopolymer concrete by incorporating rice husk ash. Constr Build Mater 2018;171:654–62.

18. Fang G, Ho WK, Tu W, Zhang M. Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature. Constr Build Mater 2018;172:476–87.

19. ASTM C 618, Standard Specification for Fly Ash and Raw or Claimed Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, pp. 310–312.

20. U. Kant., V. K .Saxena., A .Sarkar., K. Varma., K. K. Mishra., 2012- Characterization of Coal Ash from a Captive Power Plant for Potential End Uses. Proceedings of the Euro Coal Ash 2012, Conference,Thessaloniki Greece, September 25-27 2012.

21. Ubbrico .P., Bruno. P., Traini. A., Calabrese. D.,2001- Fly Ash Reactivity Formation of Hydrate Phases. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 66 (2001) 293.305.