



Study of geopolymer mortar containing Ferrock materials and hybrid fibers in different ratios

Bardia Kashefi¹ , Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad^{2*}

¹ M.Sc. student of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Technical Faculty, University of Guilan, Rasht, Iran.

² Associate professor, Department of Civil Engineering, Technical Faculty, University of Guilan, Rasht, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 2024.08.13

Revised: 2025.03.12

Accepted: 2025.12.14

Keyword:

Geopolymer mortar

hybrid fibers

Ferrock

slag

glass fibers

polypropylene fibers

*Corresponding Author:

Seyed Hosein Ghasemzadeh
Mousavinejad

Email:

h.mosavi@guilan.ac.ir

ABSTRACT

In the direction of sustainable development and Reduction of greenhouse gases caused by Portland cement production, scientists have introduced various alternatives to traditional Portland cement, including Geopolymers and Ferrock, which is made from recycled materials and is carbon-negative, meaning it absorbs carbon dioxide. As a result, it is considered an environmentally friendly material. Additionally, incorporating Fibers into concrete can enhance its compressive, tensile, and erosion resistance. This study conducted experiments by adding Ferrock materials in amounts ranging from 10% to 40% to a slag-based geopolymer, using glass and polypropylene Fibers to determine the optimal mix. The results indicated that the compressive strength of samples containing Ferrock, and hybrid Fibers increased by 26.6% over time compared to samples without Fibers. It was also concluded that Glass Fibers exhibit 84.6% greater impact load strength than polypropylene Fibers at 0.5 percent and have a 23.1% higher flexural strength in comparison to hybrid Fiber samples.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Concrete is the second most widely used substance after water. However, due to the presence of cement in its design, it is also the fourth largest producer of CO₂ emissions. Research indicates that cement production is projected to increase by 25% by 2050. Notably, cement emits a significant amount of CO₂ during its production process. According to research from Mainz University, approximately 4.5 billion tons of cement are produced annually, resulting in a CO₂ footprint of 2.7 billion tons per year. Considering this, many alternatives to Portland cement have been introduced such as Geopolymers and Ferrock which is One of the innovative alternatives. Consequently, in pursuit of sustainable development, scientists have worked tirelessly to reduce greenhouse gas emissions. Several relevant studies are summarized in the table below.

Table 1. Literature review

Year	Researcher(s)	Review
1957	Joseph Davidovits	Geopolymer was discovered
2002	David Stone	Ferrock was first made using waste steel dust and silica
2017	Lanuza, et al.	Ferrock was found to be five times stronger under compression than Portland cement, and it also absorbs CO ₂ . However, substituting metakaolin for Fly ash in the mix can increase emissions.
2020	Niveditha, et al.	Carbon curing duration and air curing duration were finalized to 4 days and 3 days respectively for Ferrock blended concrete to achieve better compressive strengths
2020	Kavita Singh	The addition of Ferrock instead of cement at a level of 15 percent results in improved strength
2023	Agarwal and Jaysawal	The accepted reaction steps for the Ferrock process are: $\text{Fe} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeCO}_3 + \text{H}_2\uparrow$ The optimal constituents for composing Ferrock are: 60% iron powder, 20% Fly ash, 10% limestone, 8% metakaolin, and 2% oxalic acid.

This study aims to identify the best ratio of Ferrock materials in Geopolymer cement, supplemented with hybrid fibers such as glass and polypropylene fibers.

Methodology

The slag-based geopolymer samples were composed with a sand-to-cement ratio of 2, and a SiO₂/Na₂O of 2, using a sodium hydroxide molarity of 10. Compression samples were cast into 5 cm x 5 cm molds, flexural samples into 16 cm x 4 cm x 4 cm molds, and the cylindrical samples into 15 cm x 30 cm molds. Specimens were prepared using slag, washed sand aggregates that meet ASTM C33 guidelines, 6 mm polypropylene fibers, and 6 mm chopped AR glass fibers. The Ferrock materials included: 45-micron iron powder, fly ash, limestone, metakaolin, and oxalic acid in the ratios mentioned above in table 1.

The first step in testing the specimens was to determine the optimal mixing solution for sodium hydroxide and Sodium silicate. After 7 days of air curing, the results indicated that a ratio of 2 was the optimal solution. Subsequently, the second step involved adding Ferrock materials to the mix at percentages of 10%, 20%, 30%, and 40%, followed by analysis after 7 days of curing under water and air. This time, the compression results indicated that adding 20% Ferrock materials to the mix yielded the best performance.

In the final step, glass and polypropylene fibers were added to the mix containing 20% Ferrock at varying percentages from 0% to 0.5% for each fiber type in mixes 1 to 6. The tests conducted in this step included compression strength tests, flexural strength tests, water absorption tests, density measurements, electric resistance tests, ultrasonic tests to determine static and dynamic modulus of elasticity and drop weight impact tests. The final mix design is presented in table 2.

Table 2. final step mix design

Nº #	Name	Slag (kg/m^3)	Ferro ck (kg/m^3)	sand (kg/m^3)	Hydr oxide sodiu m (kg/m^3)	Silicat e sodiu m (kg/m^3)		Propo rtion of SiO2 /Na2 O	Glass fibers (kg/m^3)	Polyp ropyl ene fibers (kg/m^3)
1	G0PP 0.5	528	132	1320	88	176		2	0	13
2	G0.1P P0.4	528	132	1320	88	176		2	0.9	10.4
3	G0.2P P0.3	528	132	1320	88	176		2	1.8	7.8
4	G0.3P P0.2	528	132	1320	88	176		2	2.7	5.2
5	G0.4P P0.1	528	132	1320	88	176		2	3.6	2.6
6	G0.5P P0	528	132	1320	88	176		2	4.5	0

Results and discussion

The results from the final compressive strength tests indicated that using hybrid glass-polypropylene fibers in the third mix increases strength by up to 26.6% as compared to Ferrock samples without fibers. Additionally, it was concluded that extending the curing period can increase strength. However, according to Niveditha, et al more than 3 days of air curing can decrease the strength results. In the flexural strength test results showed an increase in strength by adding 20% of Ferrock materials. That is also critical to point out that Vijayan, et al thought that increasing Ferrock percentage in the mix decreases the flexural strength. The next test was water absorption which indicated good and durable quality for all the samples. The water absorption rate was under 5%. The density of the third mix was denser than others, which also indicates a better compressive strength as it was also seen in the compression result. Although all the samples are acceptable according to Tahir, et al.

The electric resistance test indicated that the first mix with 0.5% polypropylene fiber and no glass fiber shows a better result which demonstrates that the first mix is corrosion resistant. The ultrasonic pulse velocity was between 3.5 to 4.5 km/s , which shows the good quality of the mix. Although the purpose of this test was to find the best elasticity modulus. In this regard the sixth mix comes out to be the best, thanks to having glass fibers instead of polypropylene fibers. For the impact test, cylindrical specimens were cut out to 15 cm x 6.5 cm. The results demonstrated that the increase of glass fibers can make the specimens stronger against impact load.

Conclusion

Based on the results from 7 tests on 78 specimens, the following conclusions can be made:

- ✓ The addition of Ferrock materials in the second step did not show any improvement as compared to the first step.
- ✓ In the final step, 20% of Ferrock increased strength at length.
- ✓ Flexural strength of specimens with one fiber was higher than that of hybrid fiber specimens.
- ✓ Increasing the percentage of Ferrock materials increases the flexural strength of specimens.
- ✓ The Fly ash in specimens reduced the water absorption rate creating durability against water.
- ✓ A denser mix results in greater compressive strength.
- ✓ Glass fibers can increase the specimen's strength against impact load better than polypropylene fibers.



بررسی ملات ژئوپلیمری حاوی مواد فراک و الیاف هیبریدی با درصدهای مختلف

بردیا کاشفی^۱ ID، سید حسین قاسم‌زاده موسوی‌نژاد^۲ ID*

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳

کلید واژگان:

ملات ژئوپلیمری
الیاف هیبریدی
فراک
سرباره
الیاف شیشه
الیاف پلی پروپیلن

*نویسنده مسئول:

سید حسین قاسم‌زاده موسوی‌نژاد

پست الکترونیکی:

h.mosavi@guilan.ac.ir

در جهت توسعه پایدار و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از سیمان پرتلند محققین مصالح ترکیبی نوینی را به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند معرفی کردند. همچون ژئوپلیمرها و فراک که ترکیبی از مواد بازیافتی می باشد و بجای انتشار کربن دی اکسید آن را به خود جذب کرده و به همین دلیل دوست دار محیط زیست می باشد. یکی دیگر از راه های رسیدن به مقاومت فشاری و سایشی و حتی کششی بالا استفاده از الیاف در بتن است. در این تحقیق نیز تلاش شده است تا با افزودن مواد فراک به میزان ۱۰ تا ۴۰ درصد وزن سرباره به طرح بهینه ملات ژئوپلیمری پایه سرباره و حاوی الیاف شیشه و پلی پروپیلن طرح بهینه به دست آید. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می دهد که با گذشت سن نمونه ها مقاومت فشاری طرح حاوی مواد فراک و الیاف هیبریدی افزایش ۲۶٫۶ درصد نسبت به نمونه های بدون الیاف خواهد داشت. همچنین ۰٫۵ درصد الیاف شیشه در برابر ضربه ۸۴٫۶ درصد مقاومت بهتری نسبت به ۰٫۵ درصد الیاف پلی پروپیلن داشته و در برابر کشش، نسبت به طرح هیبریدی ۲۳٫۱ درصد عملکرد بهتری نشان داد.



مقدمه

بتن پس از آب دومین ماده‌ی پرمصرف بر روی کره زمین است اما به خاطر وجود سیمان در طرح اختلاطش چهارمین منبع اصلی تولید کربن دی اکسید مقصر ۸ درصد گازهای گلخانه ای زمین نیز به شمار می‌رود. بر طبق مقاله ای از دانشگاه مینز آلمان در سال ۲۰۲۱، سالانه ۴٫۵ میلیارد تن در جهان سیمان تولید می‌شود و در نتیجه به ازای آن سالانه حدود ۲٫۷ میلیارد تن کربن دی اکسید وارد جو کره زمین می‌شود و این میزان به تنهایی نیمی از گازهای گلخانه ای حاصل از حمل و نقل سالیانه را شامل می‌شود [۱].

همچنین در سال ۲۰۱۶ طی تحقیقاتی که ته هیونگ کیم و همکاران انجام دادند به این نتیجه رسیدند که بتن در طول ساخت، اجرا و نگهداری میزان بسیار زیادی گاز کربن دی اکسید از خود ساطع می‌کند که در نهایت باعث افزایش گرمایش زمین و میزان باران های اسیدی می‌شود [۲].

لذا در جهت توسعه پایدار محققین مختلفی سعی کردند تا از انتشار هر چه بیشتر این گازها به محیط زیست جلوگیری کنند و در همین راستا جایگزین های زیادی برای سیمان پرتلند معرفی شد همانند ژئوپلیمرهایی که که ابتدا در سال ۱۹۵۷ توسط دکتر ویکتور گلوخوفسکی در شوروی سابق بصورت یک فرضیه با نام "سیمان خاکی" مطرح شد اما برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ توسط محقق فرانسوی به نام جوزف دیویدوویتس کشف شد [۳]. ژئوپلیمر به واسطه مصرف انرژی کمتر سبب کاهش انتشار گاز کربن دی اکسید می‌شود و با اضافه کردن مواد افزودنی مانند سرباره کوره ذوب سرب حتی میتوان مقاومت و کارایی آن را نیز نسبت به بتن ساخته شده با سیمان افزایش داد. همچنین باعث کاهش تولید انرژی، کاهش خزش و دوام بالا در محیط مه‌اجم نیز می‌شود. ملات ژئوپلیمری بر پایه سرباره به ملاتی گفته می‌شود که سرباره ماده اصلی در ساخت آن باشد. گرچند در مراحل ابتدایی توسعه ژئوپلیمر، دیویدوویتس از خاک رس کائولین به عنوان منبع آلومینو سیلیکات استفاده می‌کرد اما در دهه ۷۰ میلادی وی شروع به آزمایش بر روی محصولات فرعی صنایع، همچون خاکستر بادی و سرباره به عنوان منبع جایگزینی برای آلومینا و سیلیکا کرد.

از دیگر مصالح جایگزین و نوآورانه می‌توان به فراک اشاره کرد که توسط دیوید استون در سال ۲۰۰۲ کشف شد و ترکیبی از مواد بازیافت شده فولاد و سیلیس می‌باشد که بجای انتشار کربن دی اکسید آن را به خود جذب کرده و به همین دلیل دو ست دار محیط زیست می‌باشد. فراک همچنین مقاومت بسیار بالایی در برابر خوردگی، حرارت، فشار و... از خود نشان داده است و نسبت به سیمان پرتلند سنتی ۵ برابر مقاوم تر بوده و حتی مقاومت آن در آب دریا نیز افزایش پیدا می‌کند [۴]. در رابطه با رفتار ملات فراک تقریباً هیچ مقاله ای موجود نمی‌باشد اما بتن ساخته شده از فراک طبق تحقیقات پراشاند و همکاران در سال ۲۰۱۹ نیز نشان داده است که می‌تواند دو برابر از بتن معمولی ساخته شده از سیمان پرتلند مقاوم تر عمل کند [۵]. همچنین در سال ۲۰۲۰ نیودیتا و همکاران طی عمل آوری این بتن در هوا و کربن دی اکسید به این نتیجه رسیدند که به ترتیب ۳ روز و ۴ روز بهترین مدت عمل آوری فراک می‌باشد [۶].

همچنین طبق تحقیقات ک، سینگ در سال ۲۰۲۰ مقاومت فشاری بتن ساخته شده از فراک پس از ۷ روز، ۲۸ روز و ۵۶ روز نشان داده است که مقاومت و دوام فراک تا زمانی که حداکثر ۱۵ درصد فراک جایگزین سیمان شود بهتر از بتن سنتی خواهد بود [۷]. ویژایان و همکاران در سال ۲۰۲۰ با مقایسه بین بتن ساخته شده با فراک و سیمان پرتلند و جایگزینی فراک به جای سیمان پرتلند در درصد های ۴، ۸ و ۱۲ درصد جرم حجمی بتن در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که جایگزینی ۸ درصدی فراک بهترین مقاومت را از خود بروز می‌دهد [۸]. در سال ۲۰۲۳ آگاروال و همکاران در طی یک تحقیق موردی در رابطه با فراک و بررسی های مختلف به این نتیجه رسیدند که استفاده از فراک به عنوان ملات تشکیل دهنده بتن سبز به میزان ۳۰ درصد از انتشار گاز کربن دی اکسید در محیط می‌کاهد و همچنین فراک در هنگام ساخت انرژی کمتری نسبت به سیمان سنتی مصرف

می‌کند [۹]. همچنین در جدول ذیل نیز مشخصات مواد تشکیل دهنده ایده‌آل برای ساخت فراک با در صد آورده شده است:

جدول ۱. مواد تشکیل دهنده فراک [۹]

مواد تشکیل دهنده	درصد
پودر آهن	۶۰
خاکستر بادی	۲۰
پودر سنگ آهک	۱۰
متاکائولن	۸
اسید اگزالیک	۲

با استناد به این مقاله واکنش شیمیایی قابل قبول برای ساخت فراک به این صورت می‌باشد [۹].



همانگونه که مشخص است، پسمانده فولاد با آب و کربن دی‌اکسید واکنش شیمیایی نشان داده و باعث ایجاد ماتریس کربنات آهن می‌شود. در سال ۲۰۲۳ نیز پراویتا و همکاران با اضافه کردن ملات فراک به بتن خود تراکم به میزان ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۵ درصد و از نتایج مشخصات مکانیکی نمونه‌ها به این نتیجه رسیدند که مقدار ۱۵ درصد فراک در نمونه‌های بتن خود تراکم چسبندگی مطلوبی از خود بجا گذاشت در حالی که افزودن مقدار ۱۰ درصد فراک نیز تاثیر بسزایی در خصوصیات نمونه‌های سخت شده را در مدت زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روز گذاشت و همچنین مقاومت کششی ناشی از خمش نمونه‌ها را تا ۲۰ درصد افزایش داد. همچنین آزمایش امواج صوتی بر روی نمونه‌ها نشان داد که افزودن فراک به بتن خود تراکم تا میزان ۱۵ درصد وزن بتن نتیجه فوق‌العاده‌ای را نشان خواهد داد [۱۰].

محققین برای تقویت هر چه بیشتر بتن در برابر تنش و کرنش از الیاف در بتن استفاده کردند. از ترکیب شدن بیش از یک نوع الیاف با یکدیگر الیاف هیبریدی ساخته می‌شود که نه تنها مقاومت بتن را در برابر تنش و کرنش، بلکه میزان جذب انرژی و مقاومت بتن را در برابر ضربه، ساییش و برش نیز تا حد قابل توجهی افزایش می‌دهد [۱۱]. در تحقیقی در سال ۲۰۲۲ توسط نصیر عباس و همکاران بر روی مشخصات مکانیکی بتن ژئوپلیمری پایه خاکستر بادی به همراه الیاف شیشه‌ای و مقایسه آن با بتن معمولی ساخته شده با سیمان پرتلند مشخص شد که بتن ژئوپلیمری پایه خاکستر بادی به همراه الیاف شیشه‌ای پس از ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز عمل‌آوری مقاومت فشاری کمتری نسبت به بتن معمولی از خود نشان دادند. همچنین نمونه‌های ژئوپلیمر بدون الیاف کارایی بیشتری را نسبت به بتن‌های ژئوپلیمر حاوی الیاف شیشه و معمولی بدون الیاف از خود نشان دادند که این موضوع به دلیل جدا شدن دانه‌های بتن و افزایش مقاومت در برابر روان شدن بتن اتفاق افتاد. گرچند نتایج در نهایت نشان داد که

بتن ژئوپلیمری پایه خاکستربادی به همراه الیاف شیشه‌ای از بتن معمولی بسیار اقتصادی‌تر و نیز مقرون به صرفه می‌باشد [۱۲].

همچنین در سال ۲۰۲۳ گولر و فوندا آکبولوت مقاومت فشاری، خمشی و مشخصات فیزیکی ملات ژئوپلیمری حاوی الیاف بازالت و فولادی در برابر حرارت بالا را آزمایش کردند و نتایج نشان داد که ملات های حاوی الیاف مقاومت فشاری و خمشی بالایی را در حرارت بروز می‌دهند. همچنین وجود الیاف ها باعث کاهش ترک های ریز در بتن می‌شود. البته در نهایت به این نتیجه رسیدند که ترکیب دو الیاف بازالت و فولاد و استفاده از آنها به عنوان الیاف هیبریدی تاثیر بسیار بهتری خواهد گذاشت تا استفاده از هر کدام به صورت جداگانه [۱۳].

با توجه به اینکه فراک در دنیا موضوع تازه ای می‌باشد در این مقاله سعی شده است تا با جایگزینی این ماده در در صد های متفاوت با سرباره کوره آهن‌گدازی و همراه الیاف شیشه خرد شده و الیاف پلی پروپیلین به نسبت حجم کل ملات از لحاظ مقاومت های مکانیکی مورد ارزیابی قرار داده و در نهایت به این سوال پاسخ داده که استفاده از این ماده چسبنده در ساخت ملات نیازها و انتظارات را برآورده خواهد کرد.

۲- روش شناسی

مصالح مورد استفاده در این تحقیق آزمایشگاهی عبارت است از:

۱-سیمان سبز (سرباره کوره آهن گدازی) از شرکت بنا بنیان زیست فناور که از الک با مش $40\mu m$ عبور کرده

۲- ماسه شسته ۰-۳ تهیه شده از کارخانه قطعات پیش‌ساخته شمال مطابق با استاندارد ASTM C33 [۱۴].

۳- الیاف پلی پروپیلین ۶ میلی‌متری به نسبت حجم کل ملات

۴- الیاف شیشه ۶ میلی‌متری خرد شده مقاوم در برابر قلیا که از بازرگانی رضوان پلیمر تهران تهیه شده است.

۵- مواد تشکیل دهنده فراک شامل :

✓ پودر آهن ۴۵ میکرونی که ماده اصلی تشکیل دهنده فراک می‌باشد و از ۹۷,۵ در صد آهن، ۱,۲ در صد کربن و ۱,۱ درصد منگنز تشکیل شده است.

✓ خاکستر بادی

✓ پودر سنگ آهک

✓ متاکائولن

✓ اسید اگزالیک

همچنین برای ساخت محلول قلیایی از هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم مایع استفاده شد.

۲-۱- ساخت گام های ۲۱ (شاهد)

برای ساخت گام ۱ ابتدا مانند جدول ۲ یکبار برای طرح B1 نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم را برابر با ۱,۵ و یکبار هم برای طرح B2 نسبت مذکور ۲ در نظر گرفته شد. دلیل استفاده از سرباره بجای خاکستر بادی آلومینا سیلیکای بالای آن و نیاز کمتر به آب و همچنین مقاومت مکانیکی بالاتر آن بوده است. ابتدا به گونه ای ۴۰۰ گرم هیدروکسید و آب به میزان ۱ لیتر را هم زده تا هیدروکسید کاملاً حل شود و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط گذاشته میشود تا خنک شود. سپس مقاومت فشاری هر یک از دو طرح در سن ۷ روز عمل‌آوری محیط پس از قالب برداری مورد ارزیابی قرار داده و طرح با مقاومت بیشتر را ملاک قرار داده تا در طرح های بعدی استفاده شود. ملات ژئوپلیمری حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی در قالب‌هایی به ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر ریخته شدند. نسبت ماسه به مواد سیمانی ۲ و نسبت مواد محلول به مواد سیمانی نیز ۰,۵ در نظر گرفته شد. همچنین نسبت آب شیشه به هیدروکسید سدیم ۲ و مولاریته محلول هیدروکسید سدیم ۱۰ در نظر گرفته شد. سپس در استامبولی ماسه را با آب به صورت اشباع درآورده و با آماده کردن سرباره، آن را با ماسه اشباع شده ترکیب کرده و

در نهایت محلول را به همراه سیلیکات سدیم اضافه کرده و آنقدر هم زده تا مصالح کاملاً ترکیب شوند و ملات حاصل شود. برای ساخت گام ۲ نیز از مواد فراک به میزان ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد سرباره مصرفی در طرح B2 گام اول افزوده شد. B1 و B2 صرفاً نام طرح می‌باشد.

جدول ۲. طرح اختلاط گام ۱

شماره طرح	نام طرح	سرباره (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	نسبت مواد محلول به سیمان	نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم	هیدروکسید سدیم (kg/m^3)	سیلیکات سدیم (kg/m^3)
۱	B1	۶۶۰	۱۳۲۰	۰٫۵	۱٫۵	۱۰۶	۱۵۸
۲	B2	۶۶۰	۱۳۲۰	۰٫۵	۲	۸۸	۱۷۶

پس از ساخت گام ۱ و قالب برداری، نمونه‌ها به مدت ۷ روز در دمای محیط عمل‌آوری شدند. در گام ۲ نیز از مواد فراک به میزان ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد در طرح B2 گام پیشین جایگزین سرباره شد که طرح اختلاط آن به شرح ذیل می‌باشد. لازم بذکر است که R نسبت سیلیکات به هیدروکسید و F فراک می‌باشد.

جدول ۳. طرح اختلاط گام ۲

شماره طرح	نام طرح	سرباره (kg/m^3)	فراک (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	هیدروکسید سدیم (kg/m^3)	سیلیکات سدیم (kg/m^3)
1	2RF10	۵۹۴	۶۶	۱۳۲۰	۸۸	۱۷۶
2	2RF20	۵۲۸	۱۳۲	۱۳۲۰	۸۸	۱۷۶
3	2RF30	۴۶۲	۱۹۸	۱۳۲۰	۸۸	۱۷۶
4	2RF40	۳۹۶	۲۶۴	۱۳۲۰	۸۸	۱۷۶

در گام ۲ نیمی از نمونه‌ها ابتدا به مدت ۷ روز در محیط و نیمی دیگر در آب عمل‌آوری شدند و سپس تحت فشار قرار گرفتند تا نتایج مقاومت فشاری گام ۲ حاصل شود.

۲-۲- ساخت گام ۳ (نهایی)

با توجه به نتایج گام ۲ که در بخش سوم ارائه خواهد شد، برای ساخت گام ۳ و نهایی از طرح 2RF20 گام پیشین که بهینه بود کمک گرفته و در این گام با افزودن نسبت‌های مختلفی از الیاف شیشه به جای الیاف پلی‌پروپیلن به صورت هیبریدی به گونه‌ای که مجموع درصد آن‌ها ۰٫۵ درصد از حجم کل ملات باشد ساخته شد و در جدول ۴ نشان داده شده است. بدین صورت که پس از اتمام ساخت ملات، آن را در قالب‌های ۵×۵×۵ سانتی‌متر برای نمونه‌های فشاری، قالب‌های ۱۶×۴×۴ سانتی‌متر برای نمونه منشوری و ۱۵×۳۰ برای نمونه استوانه‌ای جهت انجام آزمایش ضربه ریخته و پس از صاف نمودن سطح با مال و وایبره کردن، نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تا زمان آزمایش در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. همچنین لازم به ذکر است که نمونه‌های گام ۳ با توجه به نتایج گام ۲ در دمای محیط عمل‌آوری شدند. در اینجا G نماینده الیاف شیشه و PP نیز نشانگر الیاف پلی‌پروپیلن موجود در طرح می‌باشد.

جدول ۴. طرح اختلاط گام ۳

شماره طرح	نام طرح	سرباره (kg/m^3)	فراک (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	الیاف پلی پروپیلین (kg/m^3)	الیاف شیشه (kg/m^3)	نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم	سیلیکات سدیم (kg/m^3)	هیدروکسید سدیم (kg/m^3)
1	G0PP0.5	528	132	1320	13	0	2	176	88
2	G0.1PP0.4	528	132	1320	10.4	0.9	2	176	88
3	G0.2PP0.3	528	132	1320	7.8	1.8	2	176	88
4	G0.3PP0.2	528	132	1320	5.2	2.7	2	176	88
5	G0.4PP0.1	528	132	1320	2.6	3.6	2	176	88
6	G0.5PP0	528	132	1320	0	4.5	2	176	88

همچنین ترکیب شیمیایی الیاف شیشه مورد استفاده به شرح ذیل می‌باشد.

جدول ۵. ترکیب شیمیایی الیاف شیشه

ترکیب شیمیایی	Na ₂ O + K ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	ZrO ₂	CaO
الیاف شیشه (%)	14.7	0.4	61.2	0.1>	0.1>	16.8	5.6

❖ آزمایش‌هایی که در این تحقیق بر روی نمونه‌های گام ۳ انجام شدند نیز به ترتیب ذیل می‌باشند:

۳-۲- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بتن از مهم‌ترین شاخص‌های تعیین مقاومت می‌باشد که برطبق استاندارد ASTM C109 [۱۵] بر روی نمونه استاندارد با استفاده از دستگاه جک ملات شکن با اعمال بار بر روی سطوح انجام می‌گیرد.

۲-۴- مقاومت کشش ناشی از خمش

مقاومت کشش ناشی از خمش بتن، یکی از معیارهای سنجش مقاومت کششی تیر بتنی نیز می‌باشد که برای انجام آن از نمونه‌های ملات به ابعاد ۱۶×۴×۴ سانتی متر استفاده شد. این آزمایش بر اساس آیین‌نامه ASTM C348-21 [۱۶] انجام شد. نمونه‌ها در گام ۳ پس از گذشت ۲۸ روز به صورت افقی روی دو نقطه پایینی دستگاه قرار گرفتند و سپس نیرویی از طریق یک نقطه تماس بالایی دستگاه به بالای نمونه‌ها در وسط دهانه وارد شد و این فشار تا زمان شکسته شدن نمونه‌ها ادامه یافت.

۲-۵- جذب آب

آزمایش جذب آب جهت تعیین مقدار آب جذب شده به عنوان معیار دوام بتن و ملات به کار گرفته می‌شود. این آزمایش براساس استاندارد ASTM C948 [۱۷] انجام می‌گیرد. در این آزمایش ابتدا نمونه‌های مکعبی ۵×۵×۵ در سن ۲۸ روز را وزن کرده سپس با قرار دادن آن‌ها در آب و اندازه‌گیری آب جذب شده پس از خارج کردن از آب و خشک کردن سطوح به طور کامل در زمان‌های متناوب و تا رسیدن به وزن تقریباً ثابت، نمونه‌ها را

به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه‌ای اون خشک کرده و پس از خروج نمونه‌ها مجدداً آنها را تا رسیدن به وزن تقریباً ثابت وزن کرده و با قرار دادن نتایج در فرمول ذیل درصد جذب آب محاسبه شد.

نمونه مرطوب = m

نمونه اولیه = m_0

(۲)

$$\text{درصد آب جذب شده} = \frac{m-m_0}{m_0} \times 10$$

۲-۶- چگالی حجمی

در این آزمایش از استاندارد ASTM C948 [۱۷] برای تعیین وزن مخصوص ملات استفاده شد. در این آزمایش ابتدا نمونه‌های ۵×۵×۵ سانتی‌متری در سن ۲۸ روز را در آب و در دمای 23 ± 2 قرار داده سپس بر روی ترازو قرار داده تا وزن نمونه‌ها (m) را که در آب به صورت غوطه‌ور نگه داشته شده اندازه‌گیری کرده و سپس با استفاده از فرمول زیر چگالی حجمی محاسبه گردید که آن حجم نمونه‌ها (V) می‌باشد.

$$\rho = m/V$$

(۳)

۲-۷- مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی یکی از تست‌های غیرمخرب بتن جهت تعیین مقاومت الکتریکی براساس استاندارد ASTM C1876-19 [۱۸] می‌باشد به طوری که هرچه مقاومت الکتریکی بالاتر باشد، نفوذ پذیری آن نیز کمتر خواهد بود. بدین منظور از نمونه‌های ۵×۵×۵ سانتی‌متری در سن ۲۸ روزه برای انجام این آزمایش استفاده شد.



شکل ۱. آزمایش مقاومت الکتریکی

۲-۸- التراسونیک

آزمایش التراسونیک (شکل ۲) نیز یکی دیگر از تست‌های غیرمخرب بتن می‌باشد که بر مبنای اندازه‌گیری سرعت پالس با استفاده از تکنیک‌های فرا صوتی انجام می‌شود. این آزمایش براساس استاندارد ASTM C597 [۱۹] انجام می‌گیرد. در اینجا برای بدست آوردن مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی نمونه‌های ۵×۵×۵ سانتی‌متری در سن ۲۸ روزه از دستگاه التراسونیک استفاده شد بدین صورت که با بدست آوردن سرعت عبور امواج (U) و قرار دادن آنها در فرمول‌های زیر به مدول الاستیسیته دست پیدا می‌کنیم [۲۰].

$$E_d = \left[\frac{U^2 \rho}{g} \right] \times 10^{-2} \quad (۴)$$

E_d (GPa) مدول الاستیسیته دینامیکی

U = سرعت عبور امواج آلتراسونیک

g = گرانش زمین

ρ = چگالی

$$E_s = 1.25E_d - 19$$

(۵)

E_s (GPa) مدول الاستیسیته استاتیکی

E_d (GPa) مدول الاستیسیته دینامیکی



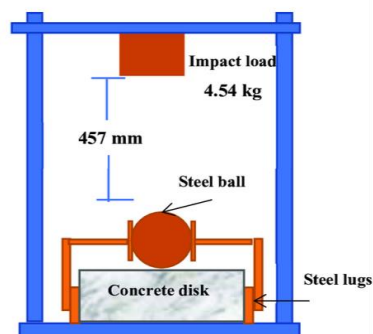
شکل ۲. انجام آزمایش التراسونیک

۲-۹- مقاومت ضربه

آزمایش سقوط وزنه با ضربات تکرار شونده (drop weight impact test) در شکل ۳ از ساده ترین انواع آزمایشات ضربه می باشد که براساس استاندارد ACI 544-2R [۲۱] انجام می شود و برای تخمین مقاومت بتن های الیافی بسیار مناسب است. بر اساس این استاندارد یک وزنه استاندارد با وزن ۴,۵ کیلوگرم از ارتفاع ۴۵۷ میلی متری بر روی یک گوی فولادی به قطر ۶۳,۵ میلی متر سقوط کرده و هر بار با اینکار به نمونه ضربه وارد می کند. این ضربات تا رسیدن به اولین ترک (N1) و سپس گسیختگی نهایی (N2) تکرار می شود. نمونه استاندارد مورد استفاده در این آزمایش آزمونه های دیسکی به قطر ۱۵۰ و ضخامت ۶۵ میلی متر می باشند که از نمونه های استوانه ای ۱۵×۳۰ سانتی متری در سن ۲۸ روز پس از قالب برداری بریده شده بودند.



شکل ۴. نمونه ای از طرح B2 پس از ضربه



شکل ۳. استاندارد مقاومت ضربه

۳- یافته‌ها

۳-۱- نتایج مقاومت فشاری گام‌های شاهد (۱ و ۲)

همانگونه که ذکر شد در گام ۱ نمونه‌ها به مدت ۷ روز در محیط عمل‌آوری شدند که نتایج آن‌ها بدین صورت می‌باشد.

جدول ۶. نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه گام ۱

تنش (MPa)	نام طرح	ردیف
47.5	B1	1
55.1	B2	2

از نتایج مشخص است طرح B2 با نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر با ۲ مقاومت بهتری از خود نشان داد و بهینه بود لذا برای ساخت طرح اختلاط گام ۲ از همین طرح کمک گرفته شد. پس از ساخت گام ۲ نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در قالب ماندند و سپس خارج شدند تا به مدت ۷ روز هم در محیط و هم در آب عمل‌آوری شده و نتایج ذیل به دست آید.

جدول ۷. نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه گام ۲

ردیف	نام طرح	تنش (مگاپاسکال)	
		عمل‌آوری در آب	عمل‌آوری در محیط
1	2RF10	39.8	42.9
2	2RF20	44.5	46
3	2RF30	36.4	37.2
4	2RF40	32.8	35.2

همانگونه که مشاهده می‌شود بر طبق نتایج گام ۲ طرح 2RF20 در عمل‌آوری محیط نتیجه مطلوب‌تری از خود به جا گذاشت که این موضوع ثابت می‌کند که مواد فراک موجود در ملات مقاومت بهتری از خود تحت عمل‌آوری در محیط نسبت به آب نشان داده است. اگر چه طبق تحقیقات پرا شانت و همکاران، فراک دو برابر از

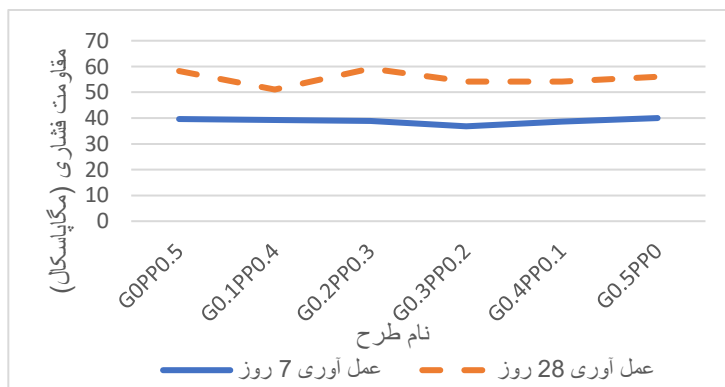
سیمان پرتلند مقاوم تر است [۵] اما مقایسه بین گام شاهد و گام ۲ نشان می‌دهد که افزودن مواد فراک به جای سرباره کوره آهن گدازی باعث کاهش مقاومت تا ۳۶،۱ درصد در طرح 2RF40 شده است. طبق نتایج ویژیان و همکاران جایگزین کردن مواد فراک با سیمان پرتلند به میزان ۸ درصد در ۲۸ روز بهترین نتیجه را نشان داد و این در حالی است که بالاترین مقاومت فشاری نمونه با ۸ درصد جایگزینی ۳۷،۸۷ مگاپاسکال در محیط بود و هر چه میزان فراک را افزایش دادند، از مقاومت نمونه‌ها کاسته شد. در این مقاله بهترین مقاومت ۴۶ مگاپاسکال بوده که نشان می‌دهد افزودن در صد فراک به جای سرباره به میزان ۲۰ درصد نتیجه بهتری به ارمغان خواهد آورد [۸]. طبق نتایج کارتیگا و همکاران بر روی مقاومت فشاری نمونه های مکعبی ۲۸ روزه نشان داد که ۱۰ درصد از فراک به جای سیمان مقاومت ۴۴،۱ مگاپاسکال را نشان خواهد داد که این مورد در سن ۷ روز عمل آوری، ۲۴،۵ مگاپاسکال بوده و به تدریج افزایش پیدا کرد در حالی که در این تحقیق مقاومت ۴۶ مگاپاسکال تنها در ۷ روز بدست آمد [۲۲]. البته که این موارد می‌تواند ناشی از وجود سرباره به جای سیمان پرتلند باشد.



شکل ۵. نمونه‌ها

۳-۲- نتایج مقاومت فشاری گام ۳

برای آزمایش گام نهایی ابتدا مقاومت فشاری نمونه‌ها در ۷ و سپس در ۲۸ روز عمل آوری در محیط پس از قالب برداری محاسبه شدند که نتایج آن مطابق با شکل ذیل می‌باشد.



شکل ۶. نتایج مقاومت فشاری گام ۳

همانگونه که مشخص است طرح G0.2PP0.3 مقاومت ۲۸ روز بهتری نسبت به دیگر طرح‌ها داشته که این موضوع می‌تواند ناشی از این باشد که هیبریدی کردن الیاف پلی‌پروپیلین و الیاف شیشه در کنار هم به میزان برابر

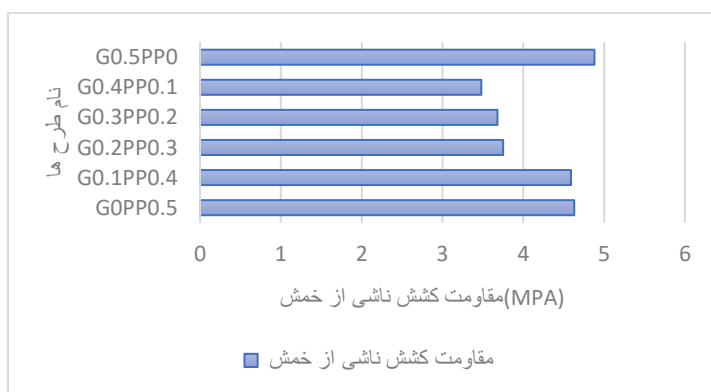
نتیجه مطلوب تری را در درازمدت نسبت به گام ۲ به همراه دارد چرا که استفاده از الیاف هیبریدی باعث افزایش مقاومت فشاری تا میزان ۲۶,۶ درصد شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که هر چه سن عمل‌آوری نمونه بیشتر باشد مقاومت نیز افزایش پیدا می‌کند و ۲۸ روز بهترین سن برای فراک می‌باشد در حالی که نیودیتا و همکاران در تحقیقات خود ۳ روز را بهترین سن عمل‌آوری برای انجام آزمایش خطاب کردند و اذعان داشتند که با افزایش سن از مقاومت نیز کاسته می‌شود [۶]. لازم بذکر است که نیودیتا و همکاران تنها بر روی فراک با درصدهای متفاوت از این پژوهش تحقیق کردند. وجود الیاف و نسبت آب به سرباره نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. طرح‌های G0.5PP0 و G0PP0.5 نیز در مقاومت فشاری نتیجه مطلوبی را بجا گذاشته‌اند که نشان دهنده عملکرد خوب این الیاف‌ها به تنهایی می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است که عدم توزیع یکنواخت الیاف پلی پروپیلین باعث کاهش مقاومت در برخی از طرح‌ها شده و وجود الیاف در نمونه‌ها باعث ایجاد تخلخل و در نتیجه کاهش مقاومت شده که این مورد با تحقیقات بهرامی و همکاران مطابقت دارد [۲۳].

۳-۳- نتایج مقاومت کشش ناشی از خمش گام ۳

پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری گام ۳ در سن ۲۸ روز آزمایش خمش سه نقطه‌ای با شکست نمونه‌ها به ابعاد ۴×۴×۱۶ سانتی متر در برابر کشش ناشی از خمش بررسی شد و نتایج مطابق جدول ۸ استخراج شدند.

جدول ۸. نتایج مقاومت کشش ناشی از خمش ۲۸ روزه گام ۳

نام طرح	خمش (MPa)
G0PP0.5	4.63
G0.1PP0.4	4.59
G0.2PP0.3	3.75
G0.3PP0.2	3.68
G0.4PP0.1	3.48
G0.5PP0	4.88



شکل ۷. مقاومت کشش ناشی از خمش گام ۳

با توجه به این نتایج می‌توان گفت که مقاومت کشش ناشی از خمش نمونه‌ها فقط با یک نوع الیاف عملکرد بهتری نشان داد. به طوری که در طرح G0PP0.5 با وجود ۰,۵ درصد الیاف پلی پروپیلین و در طرح G0.5PP0 نیز

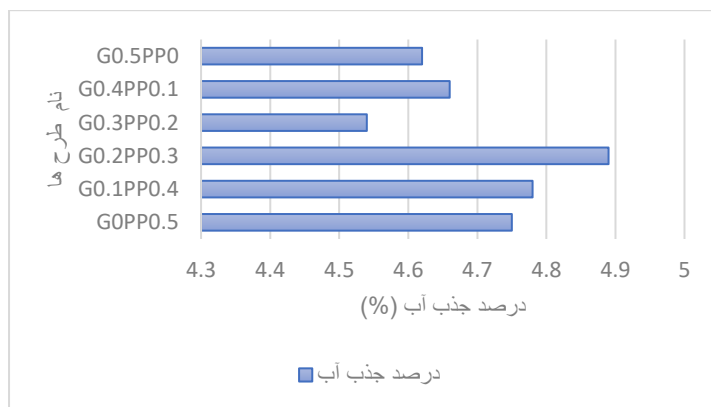
وجود ۰,۵ درصد الیاف شیشه به ترتیب ۱۹ و ۲۳ درصد نتیجه بهتری نسبت به طرح های هیبریدی بجا گذاشته است. طبق تحقیقات ویژایان و همکاران، مقاومت کشش ناشی از خمش نمونه حاوی ۸ درصد فراک ۴,۶۷ مگاپاسکال اعلام شده است که با افزایش درصد فراک مقاومت نیز کاهش پیدا کرده است [۸] اما در اینجا با وجود مواد فراک به میزان ۲۰ درصد و ۰,۵ درصد الیاف شیشه جایگزین ملات نتیجه ۴,۸۸ مگاپاسکال را نشان میدهد که نشانگر بهبود مقاومت با افزایش میزان فراک در طرح می باشد.

۳-۴- نتایج جذب آب گام ۳

در آزمایش جذب آب گام ۳ نیز با وزن کردن نمونه ها و درصد گیری، مقدار جذب آب هر طرح در جدول ۹ آمده است.

جدول ۹. نتایج جذب آب گام ۳

نام طرح	جذب آب (%)
G0PP0.5	4.75
G0.1PP0.4	4.78
G0.2PP0.3	4.89
G0.3PP0.2	4.54
G0.4PP0.1	4.66
G0.5PP0	4.62



شکل ۸. درصد جذب آب گام ۳

در این آزمایش، طرح G0.3PP0.2 درصد جذب آب کمتری داشت چرا که نسبت به دیگر طرح ها آب کمتری را به خود جذب می کند. این نتایج رابطه مستقیم با میزان ۱۵ درصد خاکستریادی در فراک دارند چرا که براساس تحقیقات گلووسکی افزایش خاکستریادی باعث کاهش جذب آب می شود [۲۴].

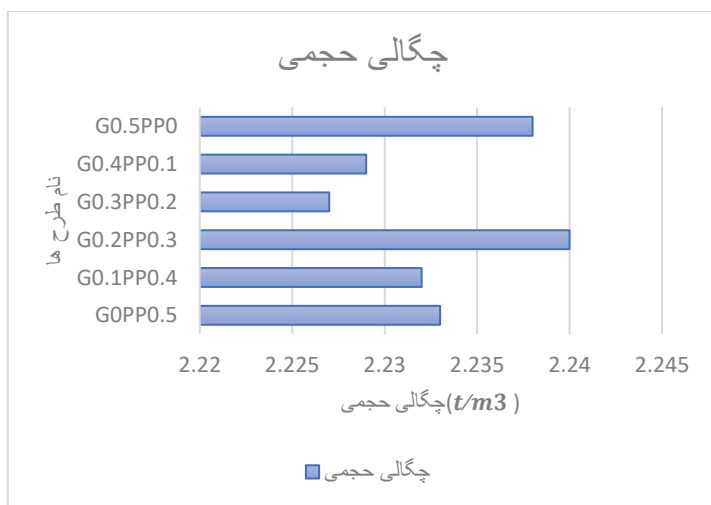
در سال ۲۰۲۳ نیز محرر به این نتیجه رسید که جایگزینی ۵ درصد از پودر سیلیس با سیمان باعث ۲۰ درصد کاهش جذب آب می شود و فراک نیز از مواد بازیافتی سیلیس و آهن می باشد [۲۵]. درصد جذب آب زیر ۵ درصد بمعنای کیفیت خوب و دوام بالایی نمونه ها می باشد [۲۶].

۳-۵- نتایج چگالی حجمی گام ۳

همچنین در آزمایش چگالی حجمی گام ۳ با استفاده از فرمول مربوطه نتایج زیر حاصل شد.

جدول ۱۰- نتایج چگالی حجمی گام ۳

نام طرح	چگالی حجمی (t/m^3)
G0PP0.5	2.233
G0.1PP0.4	2.232
G0.2PP0.3	2.240
G0.3PP0.2	2.227
G0.4PP0.1	2.229
G0.5PP0	2.238



شکل ۹. چگالی حجمی گام ۳

طبق این نتایج طرح G0.3PP0.2 چگالی کمتری از خود نشان داد هرچند که تمامی طرح ها چگالی قابل قبولی داشتند چرا که براساس تحقیقات طاهر و همکاران محدوده چگالی قابل قبول برای ملات ژئوپلیمر از $2 t/m^3$ به بالا می باشد و هرچه چگالی بیشتر باشد مقاومت فشاری نیز بهتر می باشد همانگونه که طرح G0.2PP0.3، چگالی و مقاومت بهتری داشت [۲۷]. طبق بررسی سنی و نعمت زاده در سال ۲۰۲۲ جایگزینی

پودر مرمر با سیمان باعث افزایش چگالی و کاهش جذب آب می شود که در اینجا نیز شاهد همین نتیجه از فراک بودیم [۲۸].

۳-۶- نتایج مقاومت الکتریکی گام ۳

در آزمایش مقاومت الکتریکی پس از اعمال ولتاژ به الکتروود و جریان عبوری از آن که در جدول ۱۱ آورده شده است نتایج زیر بدست آمد.

جدول ۱۱. نتایج مقاومت الکتریکی گام ۳

نام طرح	ولتاژ (v)	جریان عبوری (mA)	مقاومت الکتریکی (Kohm.cm)
G0PP0.5	40.5	1.27	159.4
G0.1PP0.4	40.5	1.28	158.2
G0.2PP0.3	40.5	1.3	155.8
G0.3PP0.2	40.5	1.36	148.9
G0.4PP0.1	40.5	1.37	147.8
G0.5PP0	40.5	1.43	141.6

بر این اساس می توان اینگونه نتیجه گرفت که طرح G0PP0.5 گام ۳ مقاومت الکتریکی بهتری داشته و جریان کمتری را از خود عبور داده است پس در معرض خوردگی قرار ندارد.

۳-۷- نتایج التراسونیک گام ۳

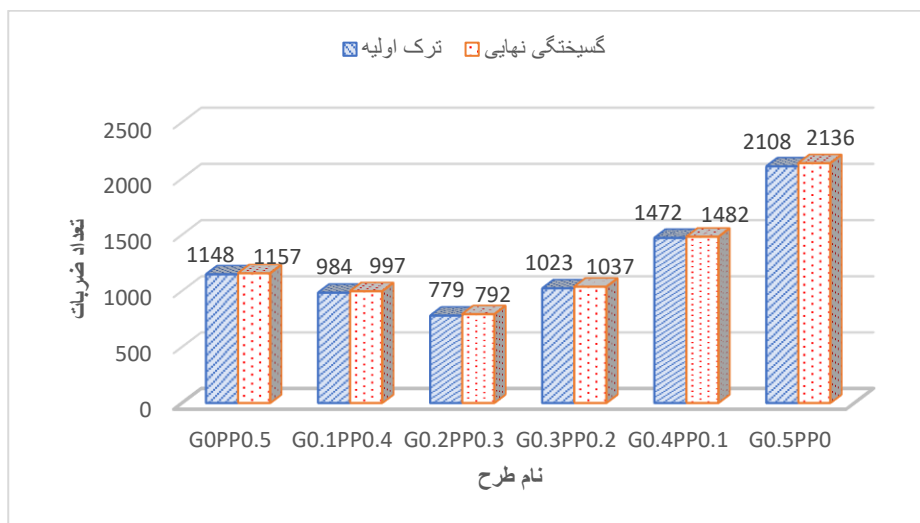
جدول ۱۲. نتایج التراسونیک گام ۳

نام طرح	سرعت عبور امواج (u)	مدول الاستیسیته دینامیکی (GPa)	مدول الاستیسیته استاتیکی (GPa)
G0PP0.5	3.65	29.87	18.33
G0.1PP0.4	3.67	30.20	18.75
G0.2PP0.3	3.68	30.37	18.96
G0.3PP0.2	3.70	30.70	19.37
G0.4PP0.1	3.73	31.20	20
G0.5PP0	3.87	33.58	22.97

همانگونه که از جدول ۱۲ مشخص است در طرح G0.5PP0 مدول به مراتب بهتری به دست آمد. نتایج بدست آمده نشان می دهند میزان الیاف شیشه بیشتر نسبت به طرح های پیشین نه تنها باعث افزایش چشمگیری در مقاومت فشاری شده بلکه مدول الاستیسیته بهتری نیز از خود به جا گذاشته است. همچنین با توجه به سرعت جریان پالس می توان گفت که طرح ها از کیفیت خوبی برخوردار هستند چرا که میزان جریان ۳،۵ الی ۴،۵ کیلومتر بر ثانیه "خوب" و زیر ۲ نیز "ضعیف" تلقی می شود [۲۹].

۳-۸- نتایج سقوط وزنه با ضربات تکرارشونده گام ۳

برای آزمایش ضربه نیز از نمونه های ۱۵۰ در ۶۵ میلی متر استفاده شد و با سقوط وزنه فولادی، ترک اولیه و گسیختگی نهایی بر اساس تعداد ضربات دریافتی نمونه تا زمان شکست انجام شد و نتایج طبق شکل ۱۰ به دست آمد.



شکل ۱۰. مقاومت ضربه گام ۳

همانطور که مشخص است فاصله بین ترک اولیه تا گسیختگی نهایی حدود ۱۰ ضربه بوده است و همانند مدول الاستیسیته الیاف شیشه باعث چقرمگی بیشتر و در نتیجه افزایش مقاومت ضربه می‌شود که این مورد با نتایج پوآر و همکاران مطابقت دارد [۳۰]. همانگونه که مشخص است طرح G0PP0.5 با الیاف پلی پروپیلین ۱۱۵۷ ضربه را تحمل کرده ولی با هیبریدی شدن الیاف در طرح G0.1PP0.4 شاهد کاهش ۱۳٫۸ درصدی بوده ایم و این کاهش مقاومت در طرح G0.2PP0.3 به عدد ۳۱٫۵ درصد کاهش نسبت به طرح G0PP0.5 رسید البته که در طرح G0.3PP0.2 با افزایش درصد الیاف شیشه نسبت به پلی پروپیلین مقاومت مجدداً افزایش داشته و نسبت به طرح G0.2PP0.3 شاهد افزایش ۳۰٫۹ درصدی هستیم که در طرح G0.4PP0.1 به ۸۷٫۱ درصد افزایش و در طرح G0.5PP0 با الیاف شیشه به ۱۶۹٫۶۹ درصد افزایش نسبت به طرح G0.2PP0.3 هیبریدی و ۸۴٫۶ درصد افزایش نسبت به طرح G0PP0.5 رسیدیم که نشان می‌دهد که با افزایش هر چه بیشتر درصد الیاف پلی پروپیلین از سختی نمونه‌ها کاسته شده است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که هیبریدی کردن الیاف‌های مختلف باهم لزوماً باعث افزایش مقاومت ضربه نخواهد شد.

۴- نتیجه‌گیری

در نهایت پس از ساخت ۷۸ نمونه و انجام مطالعات آزمایشگاهی ذکر شده می‌توان به نتایج ذیل دست یافت.

۱. افزودن مواد فراک به طرح‌های گام ۲ چه در شرایط محیط و چه در آب نتایج مقاومت فشاری چندان بهتری نسبت به نمونه شاهد (بدون فراک) در بر نداشت و حتی با اینکه افزودن مقدار ۲۰ درصد نتیجه مطلوب گذاشت اما همچنان نمی‌توان گفت که حداقل با این مقادیر فراک مقاومت بهتری نسبت به نمونه شاهد داشته است.
۲. در گام ۳ و با هیبریدی کردن الیاف به صورت جایگزینی ۰٫۳ الیاف پلی پروپیلین با ۰٫۲ الیاف شیشه و البته ۲۰ درصد فراک در طولانی مدت مقاومت بهتری مشاهده شد.

۳. با گذشت سن نمونه‌ها، مقاومت فشاری افزایش پیدا کرده است.
۴. مقاومت کشش ناشی از خمش با یک الیاف به تنهایی نسبت به طرح‌های هیبریدی تا ۲۳ درصد عملکرد بهتری نشان داد.
۵. با بررسی تحقیقات پیشین مشخص شده است که با افزایش در صد مواد فراک در طرح‌ها، مقاومت کشش ناشی از خمش نیز بهبود پیدا می‌کند.
۶. طبق نتایج درصد جذب آب نمونه‌ها مقدار نسبتاً یکسانی داشته و همگی زیر ۵ درصد بوده‌اند ولی طرح ۴ دوام بهتری از خود نشان داد.
۷. طرح ۳ با الیاف شیشه ۰٫۲ در صد و پلی‌پروپیلین ۰٫۳ در صد چگالی حجمی و مقاومت فشاری بهتری نسبت به دیگر طرح‌ها داشت چرا که چگالی هرچه بیشتر باشد مقاومت فشاری نیز بهتر است.
۸. با توجه به نتایج مقاومت الکتریکی طرح حاوی الیاف پلی‌پروپیلین نسبت به طرح‌های دیگر در برابر جریان عبوری مقاوم تر است.
۹. طرح‌های حاوی الیاف شیشه نسبت به طرح حاوی الیاف پلی‌پروپیلین به میزان ۸۴٫۶ در صد مقاومت ضربه بهتری را نشان داده است و باعث افزایش سختی نیز شده است.

با توجه به نتایج و داشته‌ها می‌توان گفت که افزودن مواد فراک به ملات ژئوپلیمری باعث کاهش انتشار گاز کربن دی‌اکسید در محیط می‌شود و همچنین در هنگام ساخت انرژی کمتری مصرف می‌کند لیکن این موضوع باعث نمی‌شود باقی فاکتورهای مهم را در نظر نگیریم و آن نیز این است که مواد فراک تاثیر آن چندانی در مقاومت ملات ژئوپلیمری نداشته است گرچه نسبت به سیمان پرتلند مقاومت بسیار بهتری ارائه می‌کند. با این وجود تحقیقات نشان داد که افزودن مواد فراک به میزان ۲۰ درصد به ملات ژئوپلیمری از خاصیت چسبندگی بهتری برخوردار است. افزودن الیاف به ملات نیز همچون گذشته نشان داد که سختی نمونه‌ها را افزایش داده و مقاومت بهتری در برابر ضربه خواهد داشت با این که در این تحقیق الیاف شیشه نتایج به مراتب بهتری را نسبت به الیاف پلی‌پروپیلین نشان داد و مشخص می‌کند که هیبریدی کردن این دو الیاف همیشه راه خوبی برای رسیدن به مقاومت ایده‌آل نمی‌باشد.

۵- فهرست منابع

- [1] Maslyk, M., Gäb, T., Matveeva, G. N., Opitz, P., Mondeshki, M., Krysiak, Y., Kolb, U., & Tremel, W. (2021). Multistep crystallization pathways in the Ambient-Temperature synthesis of a new Alkali-Activated binder. *Advanced Functional Materials*, 32(7). <https://doi.org/10.1002/adfm.202108126>.
- [2] Kim, T. H., Chae, C., Kim, G. H., & Jang, H. J. (2016). Analysis of CO2 emission characteristics of concrete used at construction sites. *Sustainability*, 8(4), 348. <https://doi.org/10.3390/su8040348>.
- [3] Davidovits, J. (2013). Geopolymer Cement a review. Geopolymer Science and Technics, Technical Paper #21, Geopolymer Institute Library. https://www.researchgate.net/profile/Joseph-Davidovits/publication/306946529_Geopolymer_Cement_a_review_2013/links/5bf2cb7c299bf1124fde4512/Geopolymer-Cement-a-review-2013.pdf.
- [4] Lanuza, A., Achaiah, A. T., Bello, J., & Donovan, T. (2017) Ferrock. <https://www.academia.edu/download/101231063/USC-Ferrock-Final-Paper-4.24.17.pdf>.

- [5] Prashanth, M., Gokul, & Shanmugasundaram, M. (2019). Investigation on Ferrock based mortar an environment friendly concrete. Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3461209>.
- [6] Niveditha, M., Manjunath, Y. M., & Prasanna, S. (2020). Ferrock: A Carbon Negative Sustainable Concrete. International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology, 11(4), 90–98. <https://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/IJSCET/article/download/8084/4103>
- [7] Singh, K. (2020). compressive strength study of green concrete by using ferrock. Multidisciplinary International Research Journal of Gujarat Technological University, 2(2). <https://www.gtu.ac.in/GTU-ResearchJournals/News/5%20Engineering.pdf>.
- [8] Vijayan, D. S., Dineshkumar, Sivasuriyan, A., & Janarathanan, T. S. (2020). Evaluation of ferrock: A greener substitute to cement. Materials Today: Proceedings, 22, 781–787. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.147>.
- [9] Agarwal, S., & Jaysawal, D. (2023). Ferrock Material: a case study. International Journal of Research in Civil Engineering and Technology, 4(2), 1–3. https://www.researchgate.net/profile/Devesh-Jaysawal/publication/373195323_Ferrock_material_A_case_study/links/64df2da4caf5ff5cd0c3f309/Ferrock-material-A-case-study.pdf.
- [10] Pravitha, J. J., Merina, R. N., & Subash, N. (2023). Mechanical properties and microstructural characterization of ferrock as CO₂-negative material in self compacting concrete. Construction & Building Materials, 396, 132289. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132289>.
- [11] Aswani, E., & Karthi, L. (2017). A literature review on fiber reinforced geopolymer concrete. Int. J. Sci. Eng. Res, 8(2), 408. https://www.researchgate.net/profile/Lathi-Karthi/publication/315790514_A_Literature_Review_on_Fiber_Reinforced_Geopolymer_Concrete/links/58e522f5aca2727858c91b45/A-Literature-Review-on-Fiber-Reinforced-Geopolymer-Concrete.pdf.
- [12] Abbas, S. N., Qureshi, M. I., Abid, M. M., Zia, A., & Tariq, M. A. U. R. (2022). An Investigation of mechanical properties of fly ash based geopolymer and glass fibers concrete. Sustainability, 14(17), 10489. <http://dx.doi.org/10.3390/su141710489>.
- [13] Güler, S., & Akbulut, Z. F. (2023). The single and hybrid use of steel and basalt fibers on high-temperature resistance of sustainable ultra-high performance geopolymer cement mortars. Structural Concrete, 24(2), 2402–2419. <https://doi.org/10.1002/suco.202201026>.
- [14] ASTM Standard C33 (2003). Specification for concrete aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, <https://www.astm.org/c0033-03.htm>.
- [15] ASTM Standard C109/C109M-11 (2011). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Specimens), Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA. https://www.astm.org/c0109_c0109m-11.html.
- [16] ASTM Standard C348-21 (2021). Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://www.astm.org/c0348-21.html>.
- [17] ASTM Standard C948 (2023). Standard Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://www.astm.org/c0948-81r23.html>.

- [18] ASTM Standard C1876-19 (2019). Standard Test Method for Bulk Electrical Resistivity or Bulk Conductivity of Concrete, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
<https://www.astm.org/c1876-19.html>.
- [19] ASTM Standard C597-22 (2022). Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI:10.1520/ C0597-22.
<https://www.astm.org/c0597-22.html>.
- [20] Rahman, M., Usman, M., & Al-Ghalib, A. (2012). Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC). Construction & Building Materials, 36, 630–637. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.116>.
- [21] ACI Committee. (1978). Measurement of properties of fiber reinforced concrete. *ACI Journal*, 75(7).
<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=10941>.
- [22] Karthika, S., Rose, A. L., & Priyadarshini, G. (2021, October). Sustainable Development on Ferro Rock Mortar Cubes. In Journal of Physics: Conference Series (2040,1,012020). IOP Publishing.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2040/1/012020/meta>.
- [23] Salimbahrami, S. R., Shakeri, R., & Habibi Hajikolae, B. (2021). Proposed Mix Design of Recycled Concrete Used in Urban Concrete Tables Using Neural Network. *Karafan Journal*. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128404>. (in persian)
- [24] Golewski, G. L. (2023). Assessing of water absorption on concrete composites containing fly ash up to 30 % in regards to structures completely immersed in water, Case Studies in Construction Materials, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02337>.
- [25] Moharrer, A. (2023). Investigating the Effect of Silica Fume Waste Powder of Sand Blasting as Cement Replacement in the Rheological and Mechanical Properties of Concrete. *Karafan Journal*. https://karafan.tvu.ac.ir/article_178547.html. (in persian)
- [26] Wilson, M. L., & Tennis, P. D. (2021). Design and control of concrete mixtures. Portland Cement Association.
https://books.google.com/books/about/Design_and_Control_of_Concrete_Mixtures.html?id=61yDzwEACAAJ.
- [27] Wazien, A. W., Abdullah, M. M. A. B., Razak, R. A., Rozainy, M. M. R., & Tahir, M. F. M. (2016). Strength and density of geopolymer mortar cured at ambient temperature for use as repair material. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (133,1,012042). IOP Publishing.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/133/1/012042/meta>.
- [28] Hasani, S. M. R., & Nematzadeh, M. (2022). Compressive Behavior and Durability of Concrete Containing Waste Aggregates as A Replacement of Coarse Aggregates and Marble Powder as a Replacement of Cement. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(1), 83-105.
https://karafan.tvu.ac.ir/article_147492.html?lang=en. (in persian)
- [29] Whitehurst, E. A., (1951). Soniscope tests on concrete structures. *Journal of American concrete institute*, 47, 443-444. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/12004>.
- [30] Pawar, M. S., Shirsat, A. K., & Bhalchandra, S. A. (2021). Impact resistance of glass fiber reinforced concrete. *Int. Res. J. Eng. Technol*, 8, 3441-3445.
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.24480.71686>.