

The Effect of Iron Slag and Polypropylene Fibers on the Strength and Impact Characteristics of Geopolymer Mortar based on Zeolite Clay Activated with Sodium Alkali Substances

Mohammad Arif Koshyar

PhD Candidate, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Koshyar1363@gmail.com

Omid Rezaifar*

Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

orezayfar@semnan.ac.ir

Mohammad Arif Koshyar, Mohammad Kazem Sharbatdar

Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

msharbatdar@semnan.ac.ir

Research paper

Abstract:

In light of the adverse ecological outcomes of cement production, researchers are exploring alternative materials that can replace cement in construction while maintaining environmental compatibility. An alternative strategy is the use of soil base materials containing aluminum silicate with alkaline activators and industrial waste. This study aims to evaluate the strength and durability properties of geopolymer mortar relative to cement and clay-based mortars. Eight mixing designs were employed, including two for cement and clay-based mortars for comparison, and six for geopolymer mortars. The geopolymer mortars tested comprised 0%, 30%, and 40% slag, with 0.1% polypropylene fibers used in three designs. A 12 M concentration of sodium hydroxide solution and a sodium silicate to sodium hydroxide ratio of 2.5 were utilized in this study. The samples were subjected to compressive and tensile strength evaluations at 7, 28, 54, and 90-day intervals. Additionally, water absorption, capillary water absorption, and impact resistance tests were performed after 28 days. The compressive strength test conducted after 28 days revealed that geopolymer mortars that contained either 30% or 40% slag, along with polypropylene fibers, achieved 53% and 73% of the compressive strength of the cement sample, respectively. This increase represented a 3.6 to 9-fold improvement over clay-based samples. The tensile strength of the geopolymer samples was found to be 53% and 63% of the strength of the cement, but 5 and 9.5 times higher than the clay-based sample, respectively. The results showed that the use of polypropylene fibers in geopolymer samples containing 30 and 40% slag reduced water absorption, but compared to cement samples, they absorbed 95 and 72% more water after 72 hours. The coefficient of capillary absorption in all geopolymer samples was high, but the use of fibers in the sample containing 40% slag resulted in a 1% reduction in this coefficient compared to the non-fiber sample. Cracking resistance tests were conducted on the geopolymer samples, which showed that the samples containing 30 and 40% slag with fibers achieved 40 and 73% of the cracking resistance of the cement sample, respectively. The destruction resistance of the sample containing 30% slag with fibers was approximately 46% of the cement resistance, while the model containing 40% slag with fibers exhibited a 15% improvement relative to the cement sample.

Keywords: Geopolymer, Clinoptilolite soil, Slag, Alkaline Activators, Compressive and Tensile Strength, Water Absorption, Impact Resistance, Polypropylene Fibers

*Corresponding Author: Omid Rezaifar

koshyar, M. A., rezaifar, O., Sharbatdar, M. K. The Effect of Iron Slag and Polypropylene Fibers on the Strength and Impact Characteristics of Geopolymer Mortar based on Zeolite Clay Activated with Sodium Alkali Substances. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2023; 8(1): 97-76. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2023.387727.13122538-5828>

© 2023 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

تأثیر سرباره آهن و الیاف پلی پروپیلن بر مشخصات مقاومتی و ضربه ملات ژئوپلیمری پایه خاک رس زئولیتی فعال شده با مواد قلیایی سدیمی

محمد عارف کوشیار

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

koshyar1363@gmail.com

امید رضایی فر

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

orezayfar@semnan.ac.ir

(نویسنده مسئول)

محمد کاظم شربتدار

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

msharbatdar@semnan.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

امروزه با درک اثرات مخرب سیمان و ایجاد آلاینده‌گی محیط زیست، دانشمندان در صدد دریافت روش‌های مختلف به منظور جایگزینی سیمان، توام سازگار با محیط زیست می‌باشند. یکی از این روش‌ها، استفاده از مواد پایه خاک حاوی الومینوم سیلیکاتی با فعال کننده‌های قلیایی و ضایعات صنعتی می‌باشد. هدف اصلی این تحقیق بررسی مشخصات مقاومتی و دوام ملات ژئوپلیمر و مقایسه آن با ملات پایه سیمانی و گلی خاک رس بود. برای این هدف هشت طرح اختلاط ملات مدنظر گرفته شد. دو طرح آن به ملات‌های پایه سیمانی و گلی به منظور مقایسه و شش طرح آن به ملات ژئوپلیمری اختصاص داده شد. ملات ژئوپلیمری با ۰، ۳۰ و ۴۰ درصد سرباره که در سه طرح آن ۰/۱ درصد الیاف پلی پروپیلین به صورت حجمی استفاده گردیده مدنظر گرفته شد. غلظت محلول هیدروکسید سدیم ۱۲ مولار و نسبت سیلیکات سدیم بر هیدروکسید سدیم ۲/۵ بودند. نمونه‌ها از نظر مقاومت فشاری و کششی در سنین ۷، ۲۸، ۵۴ و ۹۰ روز آزمایش شدند و پس از ۲۸ روز نیز آزمون جذب آب، جذب آب موئینگی و مقاومت در برابر ضربه انجام شد. نتایج آزمون مقاومت فشاری ۲۸ روزه نشان داد که نمونه‌های ژئوپلیمری حاوی ۳۰ و ۴۰٪ سرباره با الیاف پلی پروپیلین به ترتیب ۵۳ و ۷۳٪ مقاومت نمونه سیمانی و ۳/۶ و ۹ برابر نسبت به نمونه پایه رسی بیشتر شدند و مقاومت کششی نمونه‌های مورد نظر ۵۳ و ۶۳٪ مقاومت نمونه سیمانی را کسب کردند و نسبت به نمونه پایه رسی ۵ و ۹/۵ برابر بیشتر شدند. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف پلی پروپیلین در نمونه‌های ژئوپلیمری حاوی ۳۰ و ۴۰٪ سرباره باعث کاهش جذب آب گردید ولی در مقایسه با نمونه سیمانی، پس از ۷۲ ساعت ۹۵ و ۷۲٪ آب بیشتری جذب کردند. ضریب جذب موئینگی در تمامی نمونه‌های ژئوپلیمری رقم بالایی را نشان داد اما استفاده از الیاف در نمونه حاوی ۴۰٪ سرباره باعث کاهش ۱٪ این ضریب نسبت به نمونه غیرالیافی آن گردید. نتایج مقاومت ترک خوردگی نمونه‌های ژئوپلیمری در آزمایش ضربه نشان داد که نمونه‌های حاوی ۳۰ و ۴۰٪ سرباره با الیاف به ترتیب ۴۰ و ۷۳٪ مقاومت ترک خوردگی نمونه سیمانی را کسب کردند. مقاومت انهدام نمونه حاوی ۳۰٪ سرباره با الیاف حدود ۴۶٪ مقاومت سیمانی را به دست آورد اما مقاومت انهدام نمونه حاوی ۴۰٪ سرباره با الیاف، ۱۵٪ بیشتر از نمونه سیمانی شد.

کلمات کلیدی: ژئوپلیمر، خاک کلینوپتولولیت، سرباره، فعال کننده‌های قلیایی، مقاومت فشاری، کششی، جذب آب، ضربه، سرباره، الیاف پلی پروپیلین

سیمان در جهان از نگاه تولید در رده اول مصالح ساختمانی قرار دارد [۱]. کارخانه‌های تولید سیمان به صورت تدریجی افزایش بی‌پیشینه را نشان می‌دهند طوریکه تولید این ماده در سال ۲۰۰۵ به ۲/۳۱، در سال ۲۰۱۷ به ۴/۱۳ و در سال ۲۰۲۱ به ۴/۴ بیلیون تن رسیده است که این مقدار اکثراً در کشورهای پیشرفته دنیا با در نظر داشت تقاضاهای روز افزون آن‌ها در حال افزایش می‌باشد [۲]. با این حال فرایند تولید سیمان پر هزینه بوده، تولید آلودگی فوق‌العاده گاز دی‌اکسید کربن را نیز دارا می‌باشد [۱] که در مجموع ۵ تا ۷ درصد از انتشار جهانی گاز دی‌اکسید کربن توسط کارخانه‌های تولید سیمان ایجاد می‌شود که با تولید هر تن سیمان حدود ۹۰۰ کیلوگرم در جو منتشر می‌گردد [۲]. بنابراین، به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و دستیابی به توسعه پایدار زیست محیطی، لازم است جایگزین‌های برای سیمان پرتلند ایجاد شود تا هم انتشار CO_۲ و هم مصرف انرژی کاهش. قابل ذکر است که ملات پایه سیمانی یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی به‌شمار رفته که در بخش‌های مختلف ساختمان با نسبت‌های معین ماسه قابل استفاده بوده که اکثراً از نسبت ۱:۲ برای چسبانیده آجرهای ساختمان و از نسبت ۱:۴ برای سنگ کاری استفاده می‌گردد. این ملات‌ها دارای مقاومت فشاری قابل‌بالای بوده اما مستعد ترک خوردن بعد از خشک شدن را دارا هستند [۳] و اخیراً، محققین نشان داده‌اند که افزودن الیاف‌های مختلف مانند الیاف فولادی، بازالت، شیشه، کربن، الیاف لونیتریل پلی‌آکری، الیاف پلی‌پروپیلن و غیره در ملات و بتن باعث کاهش شکل‌گیری ترک‌ها می‌گردد همچنین از زمانه‌های قدیم و قبل از به میان آمدن سیمان از ملات‌های پایه کاهگلی در صنعت ساخت و ساز استفاده وافر صورت گرفته که از ترکیب خاک محلی، آب و کاه تهیه می‌گردید و این ملات در همه جا قابل دسترس و به صرفه می‌باشد و از نگاه سرعت اعمار نسبت به سازه‌های خشتی و سنگی در رده اول قرار دارد ولی مشکل اساسی این ملات تقبض زیاد و فرسایش آن در برابر بارندگی عنوان می‌گردد و ضرورت به مصارف اضافی جهت عایق نمودن دیوارها و سقف‌ها دارد. ملات پایه گلی در حال حاضر نیز جهت اندود کاری در ساختمان‌های گلی قدیمی و همچنین برای بازسازی ساختمان‌های تاریخی مورد استفاده وسیع قرار می‌گیرد. جهت افزایش مقاومت مکانیکی ملات پایه گلی و کاهش ترک‌ها از کاه استفاده شده و در این اواخر الیاف‌های مصنوعی نیز در تهیه ملات استفاده گردیده که از جمله آن‌ها الیاف پلی‌پروپیلن جایگاه خوبی را دارد [۴]. ملات‌های پایه سیمانی اثرات منفی محیط زیستی داشته و ملات‌های گلی نیز مقاومت‌های پائینتری را نشان داده‌اند لذا برای جایگزینی مشکلات یاد شده باید راه حل جستجو کرد و در دهه‌های گذشته، مطالعات زیادی بر روی مواد سیمانی جهت جایگزینی سیمان پرتلند انجام پذیرفته است. یکی از جایگزین‌های بالقوه کامپوزیت‌های پایه سیمانی، ژئوپلیمرها هستند.

ژئوپلیمرها مواد معدنی هستند که از آلومینوسیلیکات با فعال کننده‌های قلیایی به دست می‌آیند. فعال کننده‌های قلیایی می‌توانند بر پایه سدیم، پتاسیم و کاربنات باشند. ژئوپلیمرها را می‌توان به صورت یک سیستم دوجزئی معدنی که شامل یک بخش جامد واکنش پذیر سیلیکات و آلومینیوم و یک بخش محلول فعال ساز قلیایی مدنظر گرفت [۵] که ملکول‌های معدنی توسط کران‌های کوولانسی به هم مرتبط شده‌اند و این مولکول‌ها از یک اتم سیلیکان یا آلومینیوم تشکیل شده که توسط چهار اتم اکسیژن به هم وصل گردیده و چهار وجهی را تشکیل می‌دهند که در یک شبکه سه‌بعدی به یکدیگر وصل شده و اتم اکسیژن را به اشتراک می‌گذارند. مواد اولیه ژئوپلیمری می‌توانند منشأ طبیعی مانند کائولین، زئولیت، خاکستر آتشفشانی یا پوزولان‌های طبیعی و یا منشأ مصنوعی مانند متاکائولین، خاکستر بادی، سرباره کوره بلند و خاک‌های کلسینه شده داشته باشند. تحقیقات زیادی بر روی بتن و ملات‌های ژئوپلیمری انجام شده است و نتایج قابل قبول از نگاه مقاومت‌های فشاری، کششی، مقاومت در برابر مواد شیمیایی، حرارت، ضربه و غیره به دست آمده است. مارش و همکاران در تحقیق شان خاک‌های رس مونتوریلونیت و ایلیت را توسط غلظت‌های مختلف هیدروکسید سدیم فعال ساختند و نمونه‌های به دست آمده را در اون تا حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت نگهداری کردند که نمونه

مونتموریلونیت ژل N-A-S-H را تشکیل داده و نمونه‌های ساخته شده از خاک ایلیت ایجاد تخلخل زیاد را شاهد بوده اند [۶].

بعقوبی و همکاران گزارش داده اند که استفاده از خاک رس دریایی با ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ خاکستر بادی و سرباره با فعال کننده‌های قلیایی در ساخت ملات ژئوپلیمری، مقاومت فشاری قابل قبولی را به دست آوردند [۷]. ژانگ و همکاران تحقیق را جهت مطالعه تأثیر شرایط نگهداری بر ریزساختار و عملکرد مکانیکی ژئوپلیمرهای حاوی خاک هالوسیت انجام دادند و بیان داشتند که نگهداری نمونه‌ها تحت شرایط محیط عادی، ریزساختار و مقاومت فشاری خوبی از خود نشان داده اند و مقاومت ۲۸ روزه، ۵۲ مگاپاسکال به دست آمده است اما افزایش درجه حرارت مقاومت فشاری را کاهش داده است [۸]. یمچیلو و همکاران گزارش دادند که ملات ژئوپلیمری پایه خاک‌های ضایعاتی پروژه‌های ساختمانی نیز مقاومت خوبی را از خود نشان داده اند [۹]. عبدالکریم و همکاران ثابت ساختند که خاک طبیعی لوم که حاوی مقدار مناسب آلومینیوم و سیلیکات هستند خواص فیزیکی و مکانیکی خوبی را به دست آوردند [۱۰].

ملات و خمیر ژئوپلیمری پایه خاک کائولینیت که با فعال کننده‌های پایه سدیم و پتاسیم با نسبت‌های مختلف مواد فعال کننده تهیه شده‌اند و در شرایط محیط طبیعی و حرارتی نگهداری شده مقاومت‌های فشاری و خواص فیزیکی قابل قبولی را نشان دادند [۱۱-۱۵]. استوکيو و همکاران خواص مکانیکی و ریزساختاری ملات ژئوپلیمری پایه متاکائولن که با ۱۰٪ خاکستر لجن فاضلاب جایگزینی شده بود مطالعه کردند و مقاومت ۵۰ مگاپاسکال را بعد از ۲۸ روز گزارش کردند و همچنان کاور و همکاران خاکستر بادی را با ۴٪ نانومتاکائولن جایگزین نمودند و مقاومت حدود ۵۳ مگاپاسکال را به دست آوردند [۱۶-۱۷]. الووا و همکاران ملات ژئوپلیمری پایه زئولیت را با نسبت‌های مختلف ماسه، غلظت محلول هیدروکسید سدیم، درجه حرارت نگهداری نمونه و همچنان تأثیر مواد ضد خوردگی از طریق مقاومت فشاری را ارزیابی کردند و نشان دادند که نسبت محلول/ زئولیت برابر ۰/۵، درجه حرارت جهت نگهداری نمونه‌ها در حدود ۶۰°C، غلظت ۱۴ مولار محلول هیدروکسید سدیم، نسبت محلول سیلیکات سدیم/ هیدروکسید سدیم برابر ۳:۳، نسبت ماسه/ زئولیت ۱:۳ نتایج بهینه در طرح اختلاط ملات می‌باشد [۱۸]. نیکولوف تحقیقات خود را روی ملات‌های ژئوپلیمری پایه زئولیتی انجام داد. خمیر و ملات ژئوپلیمر پایه زئولیت با سه نوع فعال کننده قلیایی هیدروکسید سدیم، سیلیکات سدیم و کاربونات سدیم تهیه شد و پیشنهاد نمود این که استفاده از هیدروکسید سدیم نتایج بهتر را نشان داده و ملات مذکور در حالیکه دارای مقاومت فشاری کمتری است ولی برای اندود کاری مناسب تلقی می‌گردد [۵]. عرفانی منش و شربتدار نیز خمیر، ملات و بتن ژئوپلیمری با فعال کننده کربنات سدیم را تهیه کردند که پایه آن سرباره بوده و با ۲۵ و ۵۰٪ زئولیت جایگزین شده است و با ملات و بتن معمولی مقایسه کردند و اعلام داشتند که نتایج مقاومت فشاری و ریزساختاری نمونه‌های ژئوپلیمری نسبت به نمونه‌های پایه سیمانی بهتر بودند [۱۹]. دالوند و همکاران مقاومت سازه‌ای و ضربه‌ای ملات ژئوپلیمری حاوی الیاف را مورد مطالعه قرار دادند و نتایج آن را با ملات معمولی سیمانی مقایسه نمودند و ابراز داشتند که مقاومت انهدام ملات ژئوپلیمری نسبت به ملات معمولی ۲۵٪ افزایش را نشان داده است [۲۰].

چنانچه ذکر گردید ملات‌های ژئوپلیمری با پایه‌های مختلف مواد معدنی و مصنوعی قابل تهیه بوده که هدف این تحقیق نیز استفاده همزمان مواد طبیعی و ضایعاتی بوده است تا در پروژه‌های مختلف بخصوص برای ساخت خانه‌های ارزانه‌قیمت در مناطق غیر شهری بعنوان ملات برای پوشش دیوارهای معمولی و یا دیوارهای سبک پیش ساخته قابل استفاده باشند. لذا هدف این تحقیق استفاده خاک رس طبیعی زئولیتی نوع کلینوپتولولیت (حاوی آلومینیوم و سیلیکات) با سرباره کوره ذوب آهن اصفهان در تهیه ملات ژئوپلیمری بوده که خاک مذکور با ۳۰ و ۴۰٪ سرباره جایگزین شده که در سه طرح مخلوط آن نیز الیاف پلی پروپیلن با ۰/۱٪ حجمی استفاده گردید و با فعال کننده‌های قلیایی پایه سدیم نیز فعال گردیدند. به منظور مقایسه ملات پایه سیمانی و گلی نیز ساخته شده‌اند و آزمایشات مقاومت فشاری، کششی، جذب آب، جذب آب موئینه و مقاومت مقابل ضربه روی ملات‌ها انجام گرفت.

جدول ۲- آنالیز شیمیایی XRF خاک رس کلینوپتیلولیت و سرباره کوره بلند کارخانه ذوب آهن اصفهان

ترکیبات	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	So ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
سرباره (%)	۳۵/۸۵	۳۷/۷۱	۱۳/۳۹	۱/۰۱	۹/۱۰	۲/۵۲	۰/۴۸	۰/۸	۱/۴۱
کلینوپتیلولیت (%)	۷۱/۱۳	۰/۱	۱۱/۶۸	۱/۳۸	۱/۸	<	۰/۶۵	۱/۸۴	۱۰

جدول ۳- مشخصات الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده

مساحت مخصوص سطح	۲۰۰ m ² /kg
قطر الیاف	۱۸ میکرومتر
طول الیاف	۶ میلی متر
وزن مخصوص	۰,۹۱ kg/Lt
درصد خلوص	%۹۸

جدول ۴- مشخصات طرح مخلوط ملات سیمانی برای یک متر مکعب

طرح	نماد اختصاری	آب (kg)	سیمان (kg)	ماسه (kg)
SA ^۲ /۵ C ^{۱۰۰} W/C ^۰ /۶	OPC	۳۰۷	۵۱۲/۱۹	۱۲۸۰

جدول ۵- مشخصات طرح مخلوط ملات گلی برای یک متر مکعب

طرح	نماد اختصاری	آب (kg)	خاک (kg)	درصد حجمی الیاف
PP ^۰ /۱ W/CL ^۰ /۳	CLPP	۴۸۰	۱۶۱۵/۴	۰/۱

جدول ۶- مشخصات طرح های مخلوط ملات ژئوپلیمری برای یک متر مکعب

طرح	نماد اختصاری	فعال کننده قلیایی			خاک کلینوپتیلولیت (kg)	سرباره (kg)	درصد سرباره (%)	ماسه (kg)	آب (kg)	درصد حجمی الیاف (%)	وزن الیاف (kg)
		محلول سدیم هیدروکسید (۱۲ مولار) (kg)	محلول سیلیکات سدیم (kg)	(kg)							
S0SA2.5 SS/HS 2.5	S0	۸۷/۸	۲۱۹/۵	۵۱۲/۱۹	۰	۰	۱۲۸۰	۱۹۹	۰	۰	۰
S30SA2.5 SS/HS2.5	S30	۸۷/۸	۲۱۹/۵	۳۵۸/۵	۱۵۴	۳۰	۱۲۸۰	۱۴۸	۰	۰	۰
S40SA2.5 SS/HS2.5	S40	۸۷/۸	۲۱۹/۵	۳۰۷/۳	۲۰۵	۴۰	۱۲۸۰	۱۱۷	۰	۰	۰
S0 SA2.5 SS/HS 2.5 PP 0.1%	SOPP	۸۷/۸	۲۱۹/۵	۵۱۲/۱۹	۰	۰	۱۲۸۰	۱۹۹	۱/۱	۱	۱

۱	/۱	۱۴۸	۱۲۸۰	۳۰	۱۵۴	۳۵۸/۵	۲۱۹/۵	۸۷/۸	S30PP	S30SA2.5 SS/HS2.5 PP 0.1%
۱	/۱	۱۱۷	۱۲۸۰	۴۰	۲۰۵	۳۰۷/۳	۲۱۹/۵	۸۷/۸	S40PP	S40SA2.5 SS/HS2.5 PP 0.1%

S سرپاره مصرفی، عدد بعد آن درصد جایگزینی با خاک، SA ماسه، عدد بعد از آن نسبت خاک بر ماسه را نشان می‌دهد، SS سیلیکات سدیم، HS هیدروکسید سدیم، عدد بعد از آن‌ها نسبت سیلیکات بر سدیم، PP الیاف پلی‌پروپیلن و عدد بعد از آن مقدار استفاده الیاف به درصد حجمی، W/C نسبت آب برسیمان و عدد بعد از آن نسبت آب برسیمان، C سیمان، عدد بعد از C مقدار مصرف سیمان به درصد، W/CL نسبت آب بر خاک سفالی، عدد بعد از آن نسبت آب بر خاک. CL خاک رس سفالی و OPC ملات پایه سیمانی.

۳- ساخت و انجام آزمایشات

۳-۱: شیوه ساخت، ابعاد و عمل‌آوری نمونه‌ها

ساخت ملات‌ها بر اساس استاندارد ASTM C192 [۲۲] انجام پذیرفته است. در تهیه ملات ژئوپلیمری که با سرپاره و الیاف پلی‌پروپیلن ساخته شده‌اند ابتدا خاک رس کلینوپیتیلولیت در مخلوط کن (Mixer) ریخته شده و بعداً مقدار معین سرپاره نظر به طرح‌های مخلوط مشخص شده، به آن اضافه گردیده و به مدت یک دقیقه باهم مخلوط شدند تا به صورت همگن درآیند. در مرحله بعدی مقدار ماسه مورد نیاز در میکسر افزوده شده و به مدت یک دقیقه دیگر با سرعت استاندارد باهم مخلوط شدند. در مرحله بعدی محلول سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم که باهم آمیخته شده بودند به صورت تدریجی در ملات مذکور افزوده گردید و به مدت دو دقیقه دیگر مخلوط شدند. به مدت نیم دقیقه اطراف تحناتی میکسر که مواد در آنجا به خوبی باهم مخلوط نشده بودند توسط بیلچه دستی با ملات یکجا گردیده و بازم به مدت یک دقیقه مرحله برهم زدن ملات باهمدیگر به پیش برده شد. در طرح‌های دارای الیاف، مقدار الیاف پلی‌پروپیلن مورد نظر محاسبه شده در آب اضافی که جهت کارایی ملات مدنظر گرفته شده بود برای یک دقیقه مخلوط شدند تا تارهای الیاف از هم جدا و در تمامی قسمت‌های آب پراکنده شوند که در نهایت آب اضافی با الیاف نیز به صورت تدریج در ملات ژئوپلیمری افزوده شدند و زمان مخلوط کردن ملات نیز تا سه دقیقه دیگر توسط میکسر به انجام رسید. آماده سازی ملات پایه سیمانی با مخلوط سیمان با ماسه و آب و همچنان نمونه گلی با خاک رس سفالی، آب و مقدار ۰/۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن به شیوه مناسب آماده شدند. تهیه ملات‌های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. ملات‌های تهیه شده در قالب‌هایی که توسط روغن چرب شده بودند در سه مرحله ریخته شدند که در مرحله اول یک سوم تمامی قالب‌ها توسط ملات‌ها پر گردید و توسط میله فلزی استاندارد به تعداد ۲۵ ضربه، ضربه زده شدند. ابعاد نمونه‌ها مطابق استانداردهای ASTM برای آزمایشات مقاومت فشاری، جذب آب مغروق، جذب آب موئینه ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر، برای آزمایش کششی ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر، برای آزمایش مقابل ضربه ۶۴×۱۵۰ میلی‌متر مدنظر گرفته شده است. تعداد آزمایشات مقاومت فشاری، کششی و ضربه سه نمونه و برای آزمایشات جذب آب و جذب آب موئینه به تعداد ۲ نمونه ساخته شدند. عمل‌آوری ملات‌های تهیه شده ژئوپلیمری بعد از این‌که در قالب‌ها ریخته شدند توسط پلاستیک مخصوص پوشانیده شدند تا عمل ژئوپلیمراسیون از اثر ایجاد حرارت داخلی به صورت درست انجام پذیرد و تمامی نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در قالب‌ها نگهداری شدند و بعد از آن در آب با درجه حرارت ۲۰°C تا روزهای آزمایش قرار داده شدند. نمونه‌های پایه سیمانی ۲۴ ساعت بعد از ریختن در قالب‌ها تا روزهای آزمایش در آب قرار داده شده و نمونه‌های گلی در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند.



شکل ۲- تهیه ملات‌های پایه ژئوپلیمری، سیمانی و گلی

۲-۳-انجام آزمایشات

۱-۲-۳-آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه‌ها یکی از مهمترین آزمایشات بوده که خواص مختلف مواد، ارتباط نزدیکی با این آزمایش دارد و به عنوان آزمایش پایه محسوب می‌شود. کنترل کیفیت ملات و بتن، روند فعالیت‌های پیوستگی مواد چسباننده با سنگ دانه‌ها و غیره با استفاده از این آزمایش بررسی می‌گردد. آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر مطابق استاندارد ASTM C109 [۲۳] در روزهای ۷، ۲۸، ۵۴ و ۹۰ روز انجام پذیرفت. سرعت بارگذاری در این آزمایش بالای تمامی نمونه‌ها حدود 0.15 MPa/sec مدنظر گرفته شد. آزمایش مقاومت فشاری توسط دستگاه اتوماتیک Toni Technic که قدرت بارگذاری 2000 kN را دارا بود صورت پذیرفت. مقاومت فشاری نمونه‌ها در هر سن، به صورت میانگین مقاومت‌های سه نمونه همان سن محاسبه شد. مراحل ساخت، ریختن و عمل‌آوری ملات‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- مراحل ریختن، عمل‌آوری ملات‌ها و دستگاه آزمایش

۳-۲-۲-آزمایش مقاومت کششی

مقاومت کششی نمونه‌ها به صورت کششی غیر مستقیم یا دونیم شدن آزمون‌های استوانه‌ای (برزیلی) مطابق استاندارد ASTM C496 [۲۴] به ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر انجام پذیرفت. مقاومت کششی یکی از عوامل موثر برای شکست اجزای سازه‌های محسوب می‌شود. مطابق استاندارد یاد شده، مقاومت کششی از دونیم شدن نمونه استوانه‌ای که بار به صورت خطی در بعد ارتفاعی نمونه که به حالت خوابیده در دستگاه قرار داده می‌شود، به دست می‌آید و توسط رابطه (۱) که توسط استاندارد یاد شده پیشنهاد گردیده و بر حسب مگاپاسکال محاسبه می‌گردد.

$$T = \frac{2P}{\pi Ld} \quad (1)$$

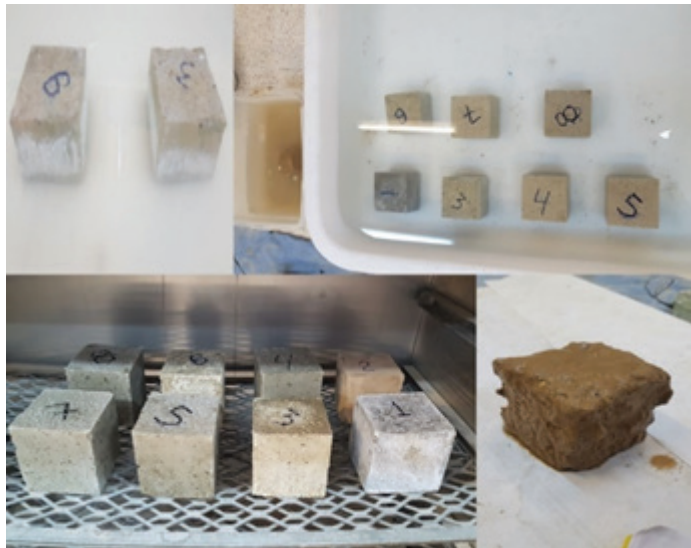
T نشان دهنده مقاومت کششی نمونه، P حداکثر نیرویی که توسط دستگاه بر حسب نیوتن بدست می‌آید، L طول یا ارتفاع نمونه بر حسب میلی‌متر و d قطر نمونه بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

۳-۲-۳-آزمایش درصد جذب آب

جذب آب نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C642 [۲۵] انجام شدند و نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر برای این آزمایش مدنظر گرفته شدند. سفارش استاندارد مذکور طوری است که نمونه‌ها می‌توانند به اشکال مکعبی، استوانه‌ای، به صورت تیر و یا هر شکل دیگر باشند اما حجم هر نمونه نه باید از ۳۵۰ سانتی‌متر مکعب و وزن آن‌ها از ۸۰۰ گرم کمتر باشند. نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز از عمل‌آوری وزن شدند و بعد از آن در داخل اون به مدت ۲۴ ساعت در درجه حرارت ۱۱۰°C قرار داده شدند و وزن آن‌ها بعد از سرد شدن در درجه حرارت محیط ۲۰°C آزمایشگاه ثبت شدند و با وزن اولیه مقایسه گردیدند. مراحل خشک کردن نمونه‌ها تا زمانی انجام پذیرفت که تفاوت وزن متوالی نمونه‌ها بعد از خشک شدن تا ۰/۵٪ رسید و این وزن، وزن خشک نمونه‌ها تلقی شدند. بعد از آن هر یکی از نمونه‌ها در برهه زمانی ۱۰ دقیقه، ۳۰ دقیقه، ۱ ساعت، ۲ ساعت، ۲۴ ساعت، ۴۸ ساعت و ۷۲ ساعت در داخل آب قرار داده شدند و بعد از سپری شدن زمان‌های یاد شده، نمونه‌ها از آب بیرون شدند و توسط پارچه جذب، آب سطحی آن‌ها خشک شدند تا حالت SSD را اختیار کنند و وزن آن‌ها در بازه‌های زمانی یادداشت شدند. جذب آب نمونه‌ها توسط رابطه (۲) مطابق استاندارد ASTM C642 محاسبه شده است.

$$\text{Absorption after immersion}(\%) = \frac{Bt - A}{A} * 100 \quad (2)$$

در رابطه فوق A وزن خشک نمونه‌ها بعد از حرارت دهی آن‌ها در اون، B_t وزن نمونه‌های مغروق با سطح SSD بعد از مدت زمان t می‌باشد. روند آزمایش نمونه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- آزمایش جذب آب نمونه‌ها

۳-۲-۴- آزمایش درصد جذب آب موئینه

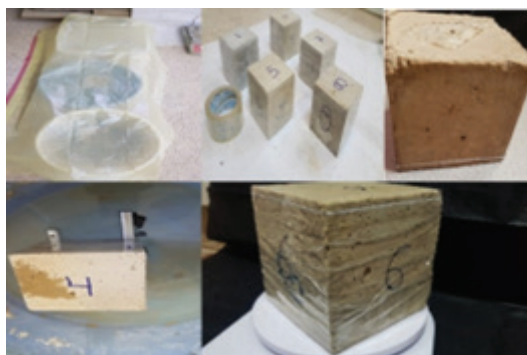
جذب آب موئینه یکی از پارامترهای دوام بتن و ملات را نشان می‌دهد که نفوذ آب و یون‌های مخرب را در داخل بتن و ملات بررسی می‌کند و این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C1585 [۲۶] انجام شد. در این آزمایش صرفاً یک سطح نمونه به عمق معین ۵ الی ۱۰ میلی‌متر داخل آب قرار داده می‌شود و سطوح دیگر آن‌ها توسط پلاستیک و یا هر مواد غیر قابل نفوذ رطوبت پوشانیده می‌شوند. ظرفی که آزمایش در آن انجام شود باید با اندازه کافی بزرگتر از ابعاد نمونه‌ها بوده و در هنگام آزمایش نیز قسمت فوقانی یا باز ظرف توسط پلاستیک پوشانیده شود تا از نفوذ رطوبت محیط به نمونه جلوگیری صورت گیرد. مکعب‌های ۱۰۰×۱۰۰×۱۰ میلی‌متر به منظور انجام این آزمایش آماده شدند که بعد از عمل‌آوری ۲۸ روزه، نمونه‌ها از آب بیرون کشیده شده و به حالت SSD رسانیده شده و وزن گردیدند. نمونه‌ها در داخل اون به مدت ۲۴ ساعت در حرارت ۱۱۰°C نگهداری شدند و بعد از گذشت زمان فوق وزن آن‌ها دوباره ثبت گردید. حرارت دهی نمونه‌ها تا زمانی ادامه یافت تا تفاوت وزن متوالی نمونه‌ها بعد از خشک شدن به ۰/۵٪ رسید و این وزن، وزن خشک نمونه‌ها تلقی شدند. سپس اطراف نمونه‌ها توسط چسب غیر قابل نفوذ رطوبت پوشانیده شدند و به عمق ۵ میلی‌متر داخل آب قرار گرفتند. زمان قرارگیری سطوح نمونه‌ها در آب به عمق یاد شده به ثانیه ثبت شده که از ۱۰ الی ۸۶۴۰۰ ثانیه یعنی ۲۴ ساعت مدنظر گرفته شد. در زمان‌های مشخص شده تفاوت اوزان نمونه‌ها ثبت شدند. اندیس موئینگی در حقیقت شیب اولیه رابطه بین جذر دوم زمان و درصد رطوبت حجمی جذب شده توسط نمونه‌ها می‌باشد. درصد جذب توسط رابطه (۳) زیر محاسبه می‌گردد.

$$I = \frac{m_t}{a * d} \quad (3)$$

در رابطه فوق I جذب آب، m تغییر در جرم نمونه در زمان t به گرم، a مساحت قسمت برهنه نمونه به mm² و d چگالی آب به gr/mm³ می‌باشد.

جذب آب موئینه اولیه که به واحد (mm/sec^{1/2}) نشان داده می‌شود و از شیب اولیه I و جذر دوم زمان بدست می‌آید که این شیب

بعد از اطلاعات قرائت شده و انتقال آن در نمودار و اجرای عمل رگرسیون به دست می‌آید و بررسی آن مقاومت و دوام مقابل آب را نشان می‌دهد [۲۷] و همچنان نوع مواد اولیه در ساخت نمونه‌ها بالای جذب آب تاثیر مستقیم دارد و به هر اندازه که مقدار جذب آب کمتر باشد نشان دهنده کیفیت عالی مواد می‌باشد [۲۸]. مراحل انجام جذب آب موئینه در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- روند آزمایش جذب آب موئینه

۳-۲-۵- آزمایش ضربه

آزمایش مقاومت ضربه ملات‌های تهیه شده مطابق روش پیشنهادی کمیته ACI 144 [۲۹] که از اثر سقوط وزنه می‌باشد انجام شد. ابعاد نمونه‌ها به صورت دیسک‌های کوچک استوانه‌ای ۶۴×۱۵۰ میلی‌متر مدنظر گرفته شده است. نمونه‌های تهیه شده اولاً توسط قالب‌های استوانه‌ای استاندارد به ابعاد ۳۰×۱۵۰ میلی‌متر ریخته شدند و بعد از عمل‌آوری ۲۸ روزه به وسیله تیغه الماسی به دیسک‌های کوچک بریده شدند که طول (ارتفاع) هر دیسک به ۶۴ میلی‌متر می‌رسید. روش آزمایش مقاومت ضربه طوری است که دیسک‌های آماده شده داخل دستگاه خاص که برای این آزمایش طراحی شده قرار گرفته و در قسمت فوقانی آزمونه‌ها توپ یا گلوله فولادی به قطر ۶۳.۵ میلی‌متر قرار می‌گیرد و یک چکش به وزن $۴/۵۴ \text{ Kg}$ به طور مکرر از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متر بر روی دیسک مذکور رها می‌شود. تعداد ضربات یادداشت شده و اولین ترک و انهدام که در نمونه‌ها از اثر سقوط وزنه به مشاهده رسد ثبت می‌گردد. در هر آزمایش و هر ردیف از آزمونه‌های آماده شده تعداد ضربات که موجب رخ دادن اولین ترک گردد و با چشم مشاهده شود، به عنوان مقاومت اولین ترک و تعداد ضربات که از اثر آن‌ها انهدام آزمونه‌ها رخ بدهد به نام مقاومت انهدام در نظر گرفته می‌شود. نمونه‌های آماده شده برای آزمایش مقاومت ضربه در شکل ۶ و دستگاه آزمایش ضربه در شکل ۷ نشان داده شده‌اند.



شکل ۶- نمونه‌های آزمایشی ملات سیمانی، رسی و ژئوپلیمری مقاومت ضربه

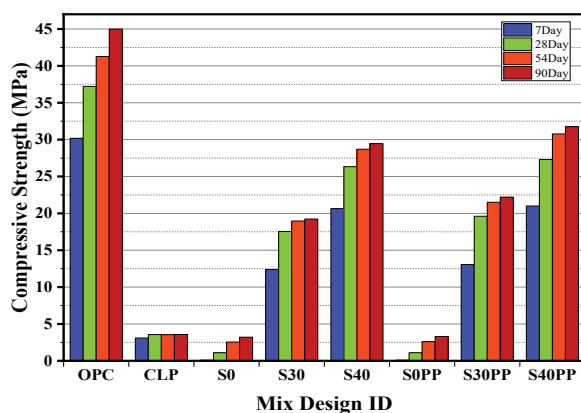


شکل ۷- دستگاه آزمایش ضربه

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول ۷ و شکل ۸ آورده شده است. وجود سرباره در نمونه‌های ژئوپلیمری باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها گردید چنانچه نتایج نشان می‌دهد، مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمونه‌های S30 با ۳۰٪ سرباره برابر ۱۷/۵ مگاپاسکال بوده که نسبت به آزمونه مرجع ملات ژئوپلیمری یعنی S۰ که دارای مقاومت فشاری ۱/۱ مگاپاسکال می‌باشد ۱۵/۴ برابر افزایش نشان داد. بدین معنی که در حقیقت در آزمونه‌های مذکور ژل بیشتر C-H-C و C-A-S-H تولید شده و باعث افزایش مقاومت گردیده است. با افزایش درصد سرباره و جایگزینی خاک کلینوپتولولیت با این ماده، مقاومت فشاری نیز افزایش قابل ملاحظه را نشان داد. طوریکه مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمونه S40 برابر ۲۶/۳ مگاپاسکال که نسبت به آزمونه‌های مرجع S0 و S30 به ترتیب ۲۴ و ۱/۵ برابر افزایش داشته و دلیل افزایش مقاومت، تولید مقدار ژل قابل ملاحظه C-H-C و C-A-S-H می‌باشد. پس اثبات گردید که نسبت سرباره بر خاک روی مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری تاثیر مثبت را دارا می‌باشد [۱۹]. مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمونه‌های شاهد پایه سیمانی OPC و گلی با الیاف پلی‌پروپیلن CLPP به ترتیب ۳۷ و ۳/۵ مگاپاسکال بدست آمده است. افزایش مقاومت فشاری آزمونه سیمانی در طرح اختلاط وابسته به مقدار سیمان بوده که این امر نتایج را دست خوش تغییرات کرده و ژل بیشتری در نمونه‌ها تولید شده است. استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در ملات‌های پایه ژئوپلیمری باعث تغییرات مثبت در نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها گردیده [۱] و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمونه‌های S0PP، S30PP و S40PP که حاوی الیاف هستند به ترتیب ۱/۱، ۱۹/۶ و ۲۷/۳ مگاپاسکال بدست آمده است. نتایج نشان داد، استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن بر روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمونه S0PP نسبت به آزمونه S0 بدون اثر بوده ولی در روزهای ۵۴ و ۹۰ تاثیر آن قابل رویت گردیده است اما در آزمونه‌های حاوی ۳۰ و ۴۰٪ سرباره به ترتیب ۱۳ و ۳/۷٪ افزایش مقاومت را نشان می‌دهد. وجود الیاف پلی‌پروپیلن در آزمونه حاوی ۴۰٪ سرباره نسبت به آزمونه مرجع همان طرح (S۴۰)، مقاومت فشاری را در روزهای ۷، ۲۸، ۵۴ و ۹۰ به ترتیب ۱/۷، ۳/۷، ۷/۲ و ۷/۸٪ افزایش داد که این خود حسن استفاده از الیاف را هویدا می‌سازد. ملات‌های ژئوپلیمری پایه خاک رس کلینوپتولولیت که با ملات‌های پایه سیمانی و پایه گلی مقایسه شده‌اند، از نگاه مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری حاوی ۳۰ و ۴۰٪ سرباره مقاومت به مراتب بیشتر از ملات گلی CLPP را بدست آورد و در مقایسه با ملات پایه سیمانی OPC نیز مقاومت قابل قبول را از خود نشان داده طوریکه مقاومت ۹۰ روزه طرح‌های اختلاط S30PP و S40PP به ترتیب ۵۰ و ۷۰٪ مقاومت ۹۰ روزه ملات پایه سیمانی را به دست آورده‌اند. آزمایش فشاری آزمونه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸- آزمایش مقاومت فشاری ملات

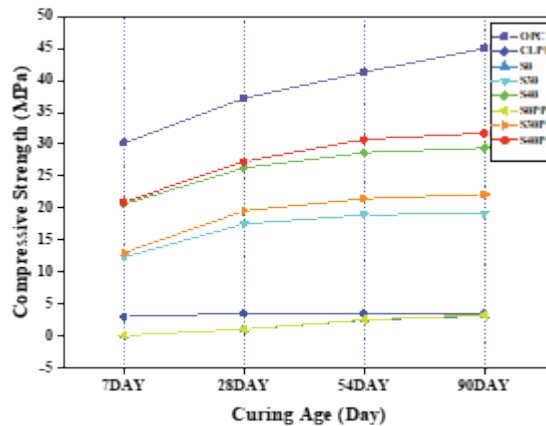
روند رشد نمونه‌های ساخته شده نظر به زمان با در نظر داشت نوع ملات از همدیگر متمایز می‌باشند. طوریکه در شکل ۱۰ نشان داده شده است آزمایش‌های ساخته شده گلی CLPP بعد از گذشت ۷ روز و خشک شدن کامل آن‌ها به مقاومت فشاری ثابت رسیدند و بدین معنی که بعد از سپری شدن زمان معین و خشک شدن کامل نمونه‌ها، مقاومت فشاری افزایش را شاهد نبوده است. رشد مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری در روزهای ۷ و ۲۸ به صورت جهشی افزایش یافته و بعد از ۲۸ روز افزایش مقاومت روند آرام‌تر داشته و شیب نمودار هم صادق بر این موضوع می‌باشد. چنانچه ملاحظه می‌گردد افزودن الیاف پلی پروپیلن در آزمایش‌های ژئوپلیمری S40PP و S30PP تا حدی مقاومت فشاری را افزایش داده ولی روند رشد دراز مدت آن‌ها نیز مانند آزمایش‌های غیر الیافی بوده و شیب آرام را نشان می‌دهند. رشد مقاومت فشاری آزمون OPC نظر به زمان افزایش قابل ملاحظه را نشان داده و شیب نمودار رشد مقاومت آن نیز به صورت جهشی ادامه یافته است.

جدول ۷- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها

شماره	نماد اختصاری	مقاومت فشاری (MPa)			
		۷ روزه	۲۸ روزه	۵۴ روزه	۹۰ روزه
۱	OPC	۳۰	۳۷	۴۱	۴۵
۲	CLPP	۳/۱	۳/۵	۳/۵	۳/۵
۳	S0	۰/۱	۱/۱	۲/۵۵	۳/۲۱
۴	S30	۱۲/۳۸	۱۷/۵۵	۱۸/۹۷	۱۹/۲۳
۵	S40	۲۰/۶۴	۲۶/۳۳	۲۸/۷	۲۹/۴۵
۶	S0PP	۰/۱۱	۱/۱	۲/۶	۳/۳
۷	S30PP	۱۳/۰۶	۱۹/۶۱	۲۱/۵۱	۲۲/۲۱
۸	S40PP	۲۱	۲۷/۳۱	۳۰/۷۷	۳۱/۷۶



شکل ۹- آزمایش مقاومت فشاری ملات



شکل ۱۰- روند افزایش مقاومت فشاری ملات

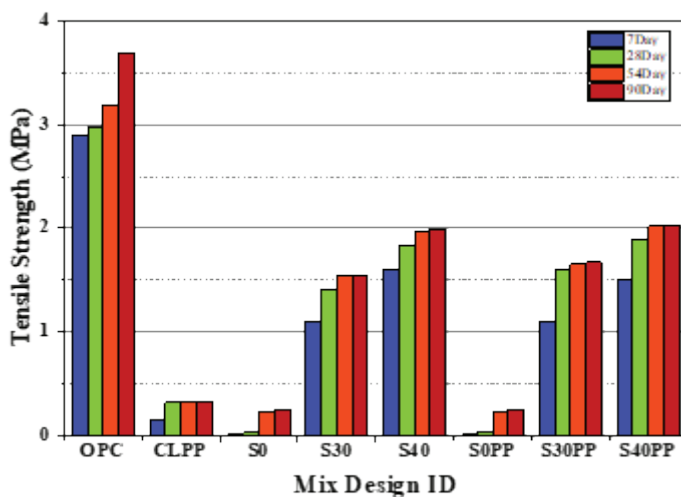
۲-۴- مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها در روزهای ۷، ۲۸، ۵۴ و ۹۰ با در نظر داشت طرح‌های اختلاط صورت پذیرفته که نتایج آن‌ها در جدول ۸ و شکل ۱۱ آورده شده است. در نمونه‌های ژئوپلیمری نسبت سرباره بر خاک کلینوپتولولیت، مقاومت کششی تاثیر مثبت را نشان داده است. مقاومت کششی آزمون شاهد و بدون سرباره S₀ بعد از ۲۸ روز برابر ۰/۲۶ مگاپاسکال بدست آمده است. با افزایش سرباره، مقاومت‌های کششی نیز روند افزایشی داشته که مقاومت‌های کششی ۲۸ روزه آزمون‌های S₃₀ و S₄₀ به ترتیب ۱/۴۱ و ۱/۸۳ مگاپاسکال بدست آمده است که نسبت به نمونه S₀، به ترتیب ۵۴ و ۷۰ برابر افزایش را نشان داده و به همین ترتیب مقاومت کششی آزمون S₄₀ نسبت به آزمون S₃₀ حدود ۲۸٪ بیشتر شده است. چنانچه نتایج نشان می‌دهد، استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها گردیده طوریکه طوریکه مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های S₃₀PP و S₄₀PP به ترتیب برابر ۱/۶ و ۱/۹ مگاپاسکال بدست آمده که نسبت به آزمون‌های غیر الیافی S₃₀ و S₄₀ به ترتیب ۱۳ و ۳/۸٪ افزایش را نشان می‌دهند. برعکس موجودیت الیاف در آزمون شاهد ژئوپلیمری S₀PP روی مقاومت کششی ۲۸ روز تاثیر نداشته و برخلاف ۱۱/۵٪ کاهش را نسبت به آزمون S₀ داشته اما بعد از ۵۴ و ۹۰ روز تاثیر آن مشاهده گردیده است. مقاومت کششی ۲۸ روزه آزمون گلی از خاک رس سفالی با الیاف پلی‌پروپیلن CLPP برابر ۰/۳۲ مگاپاسکال بدست آمده. بعد از سپری شدن ۲۸ روز، افزایش مقاومت کششی در آزمون‌های CLPP مشاهده نشده و مانند نتایج مقاومت فشاری حالت ثابت را اختیار کرده است. مقاومت کششی ۲۸ روزه آزمون پایه سیمانی OPC برابر به ۲/۹۸ مگاپاسکال ثبت شده که نسبت به تمامی نمونه‌های طرح اختلاط، بیشترین مقاومت را

نشان می‌دهد. آزمون‌های ژئوپلیمری حاوی ۳۰ و ۴۰٪ سرباره با الیاف پلی‌پروپیلن یعنی S30PP و S40PP مقاومت کششی ۲۸ روزه قابل قبول را از خود نشان داده اند که نسبت به نمونه CLPP به ترتیب ۵ و ۵/۹ برابر افزایش داشته و همچنان این آزمون‌ها توانسته اند به ترتیب ۵۳ و ۶۳٪ مقاومت کششی ملات پایه سیمانی را بدست آورند.

شماره	نماد اختصاری	مقاومت کششی (MPa)			
		۷ روزه	۲۸ روزه	۵۴ روزه	۹۰ روزه
۱	OPC	۲/۹	۲/۹۸	۳/۱۹	۳/۷
۲	CLPP	۰/۱۵	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۲
۳	S0	۰/۰۰۳۱	۰/۰۲۶	۰/۲۳	۰/۲۵
۴	S30	۱/۱	۱/۴۱	۱/۵۵	۱/۵۵
۵	S40	۱/۶	۱/۸۳	۱/۹۷	۱/۹۹
۶	S0PP	۰/۰۰۳۱	۰/۰۲۳	۰/۲۲	۰/۲۵
۷	S30PP	۱/۱	۱/۶	۱/۶۵	۱/۶۷
۸	S40PP	۱/۵	۱/۹	۲/۰۲	۲/۰۳

جدول ۸- نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها

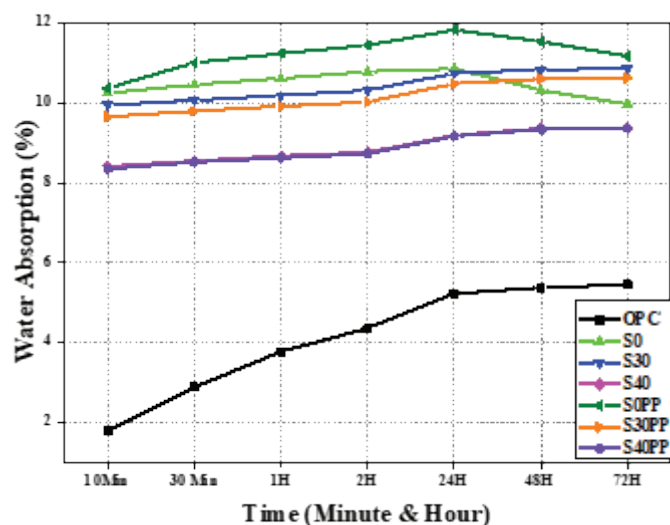


شکل ۱۱- نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها

۳-۴- درصد جذب آب

جذب آب یکی از عوامل مهم در دوام بتن و ملات تلقی می‌گردد که تعداد زیادی از محققین درصد جذب آب را بالای ۱۰٪ گزارش داده اند [۳۰]. نتایج جذب آب نمونه‌ها در جدول ۹ و شکل ۱۲ نشان داده شده است. جذب آب ملات پایه سیمانی OPC در ۱۰ دقیقه اول ۱/۷۸٪ و بعد از ۷۲ ساعت به ۵/۴۴٪ رسیده است که نسبت به تمامی طرح‌ها، جذب آب کمتری را نشان داده و از نگاه

طبقه بندی در گروه مواد با جذب آب کم قرار گرفته است. آزمون‌های گلی با الیاف پلی‌پروپیلن CLPP از نگاه جذب آب در رده ضعیف‌ترین نمونه‌ها قرار گرفتند و از همان لحظه اول که آزمون‌ها در آب قرار داده شدند، ذرات تشکیل دهنده آن‌ها در آب شروع به حل شدن کردند و وزن آن‌ها از اثر جذب آب نه تنها که افزایش را نشان نداد بلکه کاهش وزن بوقوع پیوست که روند مذکور یک امر طبیعی در نمونه‌های پایه خاکی تلقی می‌شود و در نهایت آزمون‌های ساخته شده گلی از ادامه آزمایش جذب آب خارج گردیدند. نتایج جذب آب نمونه‌های ژئوپلیمری از همدیگر متفاوت بوده ولی در مجموع جذب آب تمامی نمونه‌ها در ۱۰ دقیقه اول بین ۸ الی ۱۰٪ را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که نمونه‌های ژئوپلیمری در گروه با جذب آب بالا قرار دارند. جذب آب آزمون S۰ در ۱۰ دقیقه اول ۱۰/۲۴٪ بوده که بعد از سپری شدن ۲۴ ساعت به ۱۰/۸۵٪ رسیده که در این مدت جذب آب آن‌ها تکمیل شده و بعد از ۲۴ ساعت وزن آزمون‌ها کاهش یافته و علت وارفتن لایه‌های سطحی آزمون‌ها در آب بررسی شدند که در نهایت بعد از ۷۲ ساعت جذب آب آن به ۹/۹۷٪ رسیده است. آزمون SOPP در ۱۰ دقیقه اول ۱۰/۳۷٪ جذب آب داشته که نسبت به آزمون S0 در عین زمان ۱/۱٪ افزایش را نشان داد و همچنان مانند آزمون S0 در ۲۴ ساعت اولیه ۱۱/۸۲٪ آب را جذب کرد و بعد از آن وزن آزمون کاهش یافت که در نهایت درصد جذب آب نهایی آزمون SOPP بعد از ۷۲ ساعت برابر به ۱۱/۱۷٪ ثبت شد که نسبت به آزمون S0 حدود ۱۲٪ افزایش را نشان داده است. آزمون S۳۰ که حاوی ۳۰٪ سرباره می‌باشد جذب آب ۱۰ دقیقه اول آن ۹/۹۴٪ و بعد از ۷۲ ساعت میزان جذب آب به ۱۰/۸۵٪ رسیده است و در آزمون S30PP جذب آب در ۱۰ دقیقه اول ۹/۶۵٪ و بعد از ۷۲ ساعت ۱۰/۶۲٪ به دست آمد و نشان داد که آزمون S۳۰PP نسبت به آزمون S۳۰ در ۱۰ دقیقه و ۷۲ ساعت به ترتیب ۲/۹ و ۲/۱٪ آب کمتر را جذب کرده است. آزمون S۴۰ نیز در ۱۰ دقیقه و ۷۲ ساعت به ترتیب ۸/۴۰ و ۹/۳۶٪ آب را جذب نموده در حالیکه آزمون S۴۰PP در عین زمان‌ها ۸/۳۴ و ۹/۳۵٪ جذب آب داشته و چنانچه بررسی می‌گردد جذب آب آزمون S40PP نسبت به آزمون S40 در ۱۰ دقیقه و ۷۲ ساعت به ترتیب ۰/۷ و ۰/۱٪ کاهش را نشان می‌دهد. از نتایج جذب آب نمونه‌های ژئوپلیمری چنین برداشت می‌گردد که موجودیت الیاف پلی‌پروپیلن در ترکیب آزمون‌ها نتایج مختلف را نشان می‌دهد بطوریکه در آزمون SOPP نسبت به آزمون S0 باعث افزایش اما در آزمون S30PP نسبت به آزمون S30 جذب آب را کاهش داده است ولی در آزمون S40PP نسبت به آزمون S۴۰ جذب آب خیلی‌ها کاهش نیافته و نمودارهای آن‌ها حدوداً روی هم قرار گرفته اند. در مجموع می‌توان گفت، در نمونه‌های حاوی سرباره، استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن باعث کاهش جذب آب می‌گردد [۳۱]. آزمون S30 در مقایسه با آزمون S40 در ۱۰ دقیقه اول حدود ۱۸٪ جذب آب بیشتری داشته و می‌توان نتیجه گرفت به هر مقدار که سرباره با خاک کلینوپتولولیت جایگزین گردد ساختار منافذ کاهش یافته و در نهایت نمونه‌ها آب کمتری را جذب می‌کنند. آزمون‌های ژئوپلیمر S30PP و S40PP در مقایسه با آزمون CLPP در جایگاه عالی قرار گرفته و در جریان آزمایش کاهش جرم، وزن و ابعاد در آن‌ها بوقوع نه‌پیوسته ولی در مقایسه با نمونه OPC بعد از ۷۲ ساعت به ترتیب ۹۵ و ۷۲٪ آب بیشتری را جذب کرده اند. ملات‌های ژئوپلیمری نسبت به ملات پایه سیمانی آب بیشتری را جذب می‌کنند [۳۲]. چنانچه از نمودار جذب آب در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود بیشترین جذب آب این نمونه‌ها در همان ۱۰ دقیقه اول بوقوع پیوسته و بعد از آن شیب ملایم را پیموده است اما نمونه سیمانی در ابتدا، جذب آب کمتری داشته ولی شیب نمودار نظر به زمان حالت تندتری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- نتایج آزمایش جذب آب نمونه‌ها

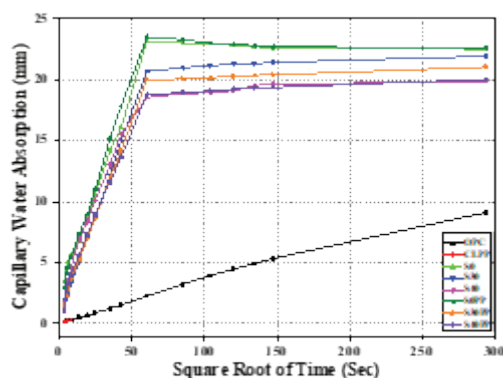
جدول ۹- نتایج جذب آب نمونه‌ها (%)

شماره	نماد اختصاری	۱۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	۱ ساعت	۲ ساعت	۲۴ ساعت	۴۸ ساعت	۷۲ ساعت
۱	OPC	۱/۷۸	۲/۸۷	۳/۷۶	۴/۳۴	۵/۲۲	۵/۳۷	۵/۴۴
۲	CLPP	۵	۷	۰	۰	۰	۰	۰
۳	S0	۱۰/۲۴	۱۰/۴۵	۱۰/۶۱	۱۰/۷۸	۱۰/۸۵	۱۰/۳۱	۹/۹۷
۴	S30	۹/۹۴	۱۰/۰۶	۱۰/۱۸	۱۰/۳۱	۱۰/۷۴	۱۰/۸۳	۱۰/۸۵
۵	S40	۸/۴۰	۸/۵۴	۸/۶۶	۸/۷۶	۹/۱۸	۹/۳۵	۹/۳۶
۶	S0PP	۱۰/۳۷	۱۱/۰۰	۱۱/۲۳	۱۱/۴۴	۱۱/۸۲	۱۱/۵۳	۱۱/۱۷
۷	S30PP	۹/۶۵	۹/۷۹	۹/۹۱	۱۰/۰۲	۱۰/۴۸	۱۰/۶۰	۱۰/۶۲
۸	S40PP	۸/۳۴	۸/۵۱	۸/۶۱	۸/۷۲	۹/۱۶	۹/۳۳	۹/۳۵

۴-۴- جذب آب موئینه

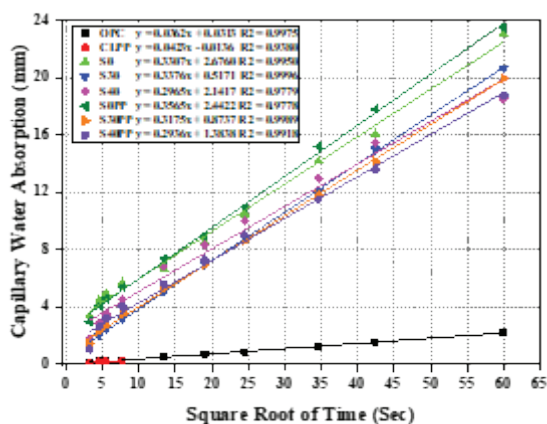
نتایج جذب آب موئینه نمونه‌ها در شکل ۱۳ نشان داده شده است. چنانچه نتایج نشان می‌دهد، جذب آب موئینه در آزمون OPC از ابتدا تا انتهای آزمایش به صورت خطی و شیب ثابت ادامه داشته است. آزمون گلی CLPP از همان آغاز آزمایش همزمان با جذب آب و تغییر اندک در وزن آزمون، ذرات تشکیل دهنده آن در آب شروع به حل شدن کردند که بعد از یک دقیقه وزن آزمون نسبت به وزن اولی آن کاهش یافت و به همین علت از ادامه آزمایش حذف گردید. در شکل ۱۱ نشان داده شده است که جذب آب موئینه در تمامی نمونه‌های ژئوپلیمری از زمان اولیه یعنی ۱۰ ثانیه الی ۶۰ دقیقه روند افزایشی داشته و دلیل آن ساختار منافذ غیر اشباع شده می‌باشند و همچنان سرعت جذب آب در زمان اولیه بیشتر بوده و با سپری شدن زمان یعنی بعد از یک ساعت، سرعت جذب

آب کاهش یافته و نشان دهنده آن است که ساختار منافذ کاملاً با آب اشباع شده و بعد از ۶۰ دقیقه جذب آب شکل خط مستقیم را اختیار کرده است. نتایج نشان می‌دهد که وجود الیاف پلی‌پروپیلن در آزمون‌های SOPP و S30PP نسبت به آزمون‌های S0 و S30 در بازه زمانی ۱ الی ۶ دقیقه اول باعث افزایش و بعد از آن باعث کاهش جذب آب گردیده است ولی در آزمون S40PP نسبت به S40 در کل جذب آب مؤئینه کاهش یافته و می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن بر روی جذب آب مؤئینه تاثیر مثبت داشته و باعث کاهش آن می‌گردد [۳۳][۳۱].



شکل ۱۳- نتایج جذب آب مؤئینه نمونه‌ها

نتایج آزمایش جذب آب مؤئینه از زمان ۱۰ ثانیه الی ۶۰ دقیقه در شکل ۱۴ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد هر چه خط جذب آب مؤئینه به طرف پائینتر و میل کمتری با خط افقی داشته باشد بیانگر آنست که نمونه‌ها از عملکرد خوبی در مقابل جذب آب برخوردار می‌باشند و طوریکه مشاهده می‌گردد صرفاً آزمون سیمانی OPC همچون حالت داشته ولی نمونه‌های ژئوپلیمری جذب آب بالا را شاهد هستند. نکته قابل ذکر این است، در طرح اختلاط نمونه‌های ژئوپلیمری که در آن‌ها مقدار از خاک با سرباره جایگزین شده (S30 و S40)، جذب آب مؤئینه در آن‌ها نسبت به طرح شاهد ژئوپلیمری (S۰)، تا اندازه کاهش را نشان داده است. باید یاد آور شد، آزمون‌ها ژئوپلیمری که با ۳۰ و ۴۰٪ سرباره تهیه شده‌اند در حالیکه از نگاه آزمایش جذب آب مؤئینه نتیجه مطلوب را ارائه نکرده اند ولی از نگاه مقاومت فشاری، کششی و دوام و مقاومت ضربه، نتایج مناسبی کسب کرده اند که حسن استفاده از ملات مذکور را هویدا می‌سازد.



شکل ۱۴- نتایج جذب آب مؤئینه نمونه‌ها

پارامترهای جذب آب موئینه در جدول ۱۰ نشان داده است. ضریب همبستگی R^2 که بیانگر همگرایی قابل قبول بین نقاط I و جذر دوم زمان می‌باشد و نشان می‌دهد که همبستگی مناسب وجود دارد. ضریب جذب موئینه در نمونه‌ها متفاوت بوده و به هر اندازه که رقم آن، عددی کمتر را نشان دهد بیانگر آنست که مقدار جذب آب در نمونه کمتر بوقوع پیوسته است و این ضریب در نمونه‌های ژئوپلیمری نسبت به نمونه سیمانی عدد بلندتری را نشان می‌دهد. ثابت موئینه C نیز در طرح‌های اختلاط نتایج متفاوت را نشان داده‌اند.

جدول ۱۰- نتایج جذب آب موئینه نمونه‌ها

شماره	نماد اختصاری	ضریب جذب موئینه (mm/Sec ^{1/2})	ثابت موئینه (mm)	ضریب همبستگی R^2
۱	OPC	۰/۰۳۶۲	۰/۰۳۱۳	۰/۹۹۷۶
۲	CLPP	۰/۰۴۳۲	۰/۰۱۳۶	۰/۹۳۸۱
۳	S0	۰/۳۳۰۷	۲/۶۷۶۰	۰/۹۹۵۰
۴	S30	۰/۳۳۷۶	۰/۵۱۷۱	۰/۹۹۹۶
۵	S40	۰/۲۹۶۵	۲/۱۴۱۷	۰/۹۷۷۹
۶	S0PP	۰/۳۵۶۵	۲/۴۴۲۲	۰/۹۹۷۸
۷	S30PP	۰/۳۱۷۵	۰/۸۷۳۷	۰/۹۹۸۹
۸	S40PP	۰/۲۹۳۶	۱/۳۸۳۸	۰/۹۹۱۸

بیشترین جذب آب موئینه نمونه‌های ژئوپلیمری در همان ۶۰ دقیقه اول بوقوع پیوسته است و بعد از آن روند ثابت را نشان می‌دهد. در آزمون‌های ژئوپلیمری S0 و S0PP (بدون سرباره) بعد از ۶۰ دقیقه کاهش وزن رخ داده و علت آن حل شدن مواد سطح آزمون‌ها که با آب در تماس بودند می‌باشد و این یکی فاکتورهای منفی ملات شاهد ژئوپلیمری بوده که دوام خود را در برابر آب از دست دادند. ضریب جذب آب در تمامی نمونه ژئوپلیمری نسبت به آزمون شاهد سیمانی رقم بیشتری را نشان می‌دهند و بیانگر آنست که نمونه‌های تهیه شده نرخ جذب آب بالایی را دارا هستند.

۴-۵- مقاومت ضربه

نتایج به دست آمده از آزمایش ضربه به صورت مقاومت اولین ترک و انهدام بررسی شده است. در تمامی نمونه‌ها تعداد ضربات که باعث ایجاد اولین ترک و انهدام گردیده است یادداشت شدند. اولین ترک که از اثر سقوط وزنه به وقوع پیوسته و توسط چشم قابل مشاهده بود، به عنوان مقاومت اولین ترک و به عین ترتیب تعداد ضربات که از اثر آن انهدام نمونه‌ها رخ داد، به عنوان مقاومت انهدام در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است که استفاده از الیاف‌ها می‌توانند به طور قابل اعتمادی از ترک خوردگی جلوگیری کنند که در نتیجه مقاومت را در برابر خستگی، ضربه، و انقباض یا تنش‌های حرارتی بهبود بخشند.

۴-۵-۱- مقاومت اولین ترک

نتایج مقاومت ضربه نمونه‌ها در جدول ۱۱ و شکل ۱۵ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین حد متوسط مقاومت مقابل ایجاد اولین ترک را آزمون OPC و پائینترین حد را آزمون ژئوپلیمری ردیف S0 به دست آورده اند. ملات پایه سیمانی که از مقاومت فشاری بیشتری نیز برخوردار بود در مقابل ضربه و ایجاد اولین ترک نیز مقاومت عالی داشته و به همین لحاظ حد متوسط تعداد ضربات که از اثر آن اولین ترک در آزمون‌ها بوقوع پیوسته است برابر ۱۲/۳ ضربه به دست آمده است. ایجاد اولین ترک در آزمون CLPP با حد متوسط ۱/۳ ضربه ثبت شده که نسبت به آزمون سیمانی ضعیف‌تر اما با آزمون‌های ژئوپلیمری ردیف‌های S0 و SOPP با حد متوسط ۱ و ۱/۳ ضربه در یک رده مقاومتی قرار گرفته است. چنانچه ملاحظه می‌گردد ملات‌های ژئوپلیمری در مقابل ضربه و ایجاد اولین ترک نتایج متفاوتی از خود نشان داده اند بطوریکه آزمون S0 از جمله ضعیف‌ترین که با حد متوسط ۱ ضربه اولین ترک در آن نمایان شده در حالیکه آزمون S30 با حد متوسط ۳/۷ ضربه و آزمون S40 با حد متوسط ۸/۷ ضربه اولین ترک را شاهد بوده اند. آزمون‌های S30PP و S40PP که حاوی الیاف پلی‌پروپیلن هستند، حد متوسط ضربات که باعث ایجاد اولین ترک در آنها گردیده به ترتیب ۵ و ۹ ضربه ثبت شده است. ملات‌های ژئوپلیمری که درصدی از خاک با سرباره جایگزین شده است، مقاومت ترک خوردگی اولیه بالاتر را نشان می‌دهند بطوریکه آزمون‌های S30 و S40 نسبت به آزمون مرجع ژئوپلیمری S0 به ترتیب ۳/۷ و ۸/۷ برابر افزایش مقاومت در مقابل ایجاد اولین ترک را کسب نموده اند. آزمون‌های S30PP و S40PP نظر به آزمون‌های S30 و S40 به ترتیب ۳۵ و ۳٪ مقاومت اولین ترک را داشتند. آزمون S40PP در مقایسه با آزمون S30PP حدود ۸۰٪ افزایش مقاومت مقابل ضربه در برابر اولین ایجاد ترک را از خود نشان داده اند. استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن باعث گردیده تا آزمون‌ها تعداد ضربات زیاتری تا ایجاد اولین ترک را تحمل کنند که در این راستا هاسی و همکاران نیز چنین نتایجی را ابراز داشته اند [۳۴]. آزمون‌های S30PP و S40PP در مقایسه با آزمون سیمانی OPC نیز توانسته اند نتایج خوبی را از خود نشان دهند که به این ترتیب ۴۰ و ۷۳٪ مقاومت آزمون OPC در برابر اولین ایجاد ترک را بدست آوردند و علت آن استفاده همزمان سرباره با الیاف می‌باشد.

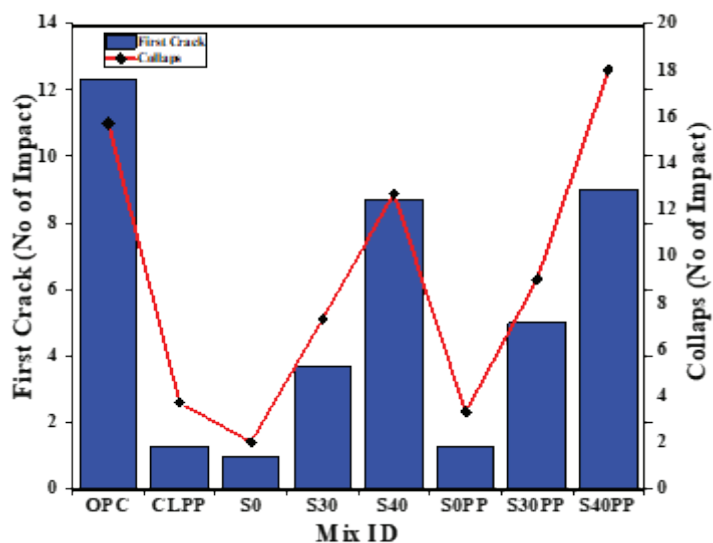
جدول ۱۱- نتایج تعداد ضربات نمونه‌ها

نماد اختصاری	شماره نمونه	اولین درز		انهدام	حد متوسط اولین ترک	حد متوسط انهدام	افزایش تعداد ضربات بعد از اولین ترک
		۱	۲				
OPC	۱	۱۸	۲۲				
	۲	۵	۸		۱۲/۳	۱۵/۷	۳/۴
	۳	۱۴	۱۷				
CLPP	۱	۲	۵				
	۲	۱	۳		۱/۳	۳/۷	۲/۴
	۳	۱	۳				
S0	۱	۱	۲				
	۲	۱	۲		۱	۲	۱
	۳	۱	۲				

				۸	۳	۱	
	۳/۶	۷/۳	۳/۷	۶	۴	۲	S30
				۸	۴	۳	
				۱۸	۱۲	۱	
	۴	۱۲/۷	۸/۷	۵	۴	۲	S40
				۱۵	۱۰	۳	
				۴	۲	۱	
	۲	۳/۳	۱/۳	۳	۱	۲	S0PP
				۳	۱	۳	
				۸	۵	۱	
	۴	۹	۵	۱۱	۵	۲	S30PP
				۸	۵	۳	
				۲۰	۹	۱	
	۹	۱۸	۹	۱۴	۸	۲	S40PP
				۲۰	۱۰	۳	

۴-۵-۲. مقاومت انهدام

نتایج مقاومت انهدام نمونه‌ها در شکل ۱۵ نشان داده شده است. نظر به نتایج جدول ۱۱ مقاومت متوسط انهدام آزمون S40PP بیشترین رقم برابر به ۱۸ ضربه نسبت به تمامی آزمون‌های طرح‌های اختلاط را نشان می‌دهد. حد متوسط مقاومت انهدام آزمون سیمانی OPC برابر ۱۵/۷ و از آزمون CLPP ۳/۷ ضربه بدست آمده است. آزمون ژئوپلیمری S۰ حد متوسط مقاومت انهدام برابر ۲ ضربه را بدست آورده اما وجود الیاف در آزمون S۰PP مقاومت انهدام را به ۳/۳ ضربه رسانیده که باعث گردیده تا حدود ۶۵٪ انهدام به تعویق بیفتد و با این نتیجه مقاومت انهدام آزمون مذکور با آزمون گلی CLPP نزدیکتر شد. مقاومت متوسط انهدام آزمون‌های ژئوپلیمری S30 و S40 به ترتیب ۷/۳ و ۱۲/۷ ضربه ثبت شدند که نظر به آزمون شاهد ژئوپلیمری S۰ به ترتیب ۳/۶۵ و ۶/۳۵ برابر افزایش را نشان می‌دهند. آزمون‌های S30PP و S40PP که مقاومت متوسط انهدام ۹ و ۱۸ ضربه را به دست آورده اند نظر به آزمون‌های غیر الیافی S30 و S40 به ترتیب ۲۳ و ۴۱/۷٪ افزایش را نشان داده و در عین زمان آزمون S30PP حدود ۴۶٪ مقاومت انهدام نمونه OPC را به دست آورده در حالیکه آزمون S40PP نسبت به آزمون OPC، حدود ۱۵٪ افزایش مقاومت انهدام را کسب کرده است. آزمون‌های ژئوپلیمری S30PP و S40PP نتایج قابل قبول را نشان داده و انرژی بیشتری را جذب کرده اند که علت آن اولاً وجود الیاف پلی پروپیلن بوده که نیرو وارده از اثر ضربه را در سه جهت تقسیم کرده و ثانیاً از آزمایشات مقاومت ضربه چنین برداشت گردید که آزمون‌های مذکور از قابلیت انعطاف پذیری خوبی برخوردار بوده دارند که دو اصل باعث گردید تا مقاومت متوسط انهدام به اندازه قابل توجه به بلندتر شود [۳۴]. نمونه‌های آزمایش شده در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۵- نتایج مقاومت اولین ترک نمونه‌ها



شکل ۱۶- نمونه‌ها بعد از آزمایش ضربه

افزایش تعداد ضربات بعد از ایجاد اولین ترک تا مرحله انهدام در تمامی نمونه‌ها در جدول ۱۱ آورده شده است. نتایج بیانگر آن است که آزمون‌های ژئوپلیمری S30 و S40 و همچنان S30PP و S40PP نسبت به آزمون‌ها OPC و CLPP تعداد ضربات بیشتری بعد از ایجاد اولین ترک الی مرحله انهدام را جذب نموده که ان خود حسن ملات مذکور را هویدا ساخته و نشان داد که قابلیت انعطاف پذیری و جذب انرژی بیشتری را دارا می‌باشند و ثابت گردیده است که افزایش تعداد ضربات در آزمون‌های الیافی S30PP و S40PP بعد از ایجاد اولین ترک الی مرحله انهدام نسبت به آزمون‌های S30 و S40 به ترتیب ۱۱٪ و ۲/۲۵ برابر افزایش یافته اند. لذا مشخص است که استفاده از الیاف‌های مختلف باعث جذب انرژی گردیده و مقاومت انهدام را بیشتر می‌سازد [۳۵].

نتیجه‌گیری

نمونه‌های مکعبی، استوانه‌ای و دیسک‌های استوانه‌ای ملات‌های ژئوپلیمری پایه خاک کلینوپتولولیت با ۰، ۳۰ و ۴۰ درصد سرباره با و بدون الیاف پلی‌پروپیلن، پایه سیمانی و گلی با ۱/۰٪ الیاف پلی‌پروپیلن ساخته شدند و آزمایشات مقاومت فشاری و کششی در روزهای ۷، ۲۸، ۵۴ و ۹۰ روز، آزمایش جذب آب مغروق (کلی)، جذب آب موئینه و مقاومت ضربه به روی آن‌ها انجام و نتایج بررسی شدند که خلاصه نتایج بصورت زیر حاصل گردید:

● نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های ژئوپلیمری نشان داده است که نمونه‌های حاوی ۳۰ و ۴۰٪ سرباره S30 و S40 نسبت به نمونه مرجع S0 بدون سرباره حدود ۱۵/۴ و ۲۴ برابر افزایش مقاومت داشته و همچنان استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در نمونه‌های ردیف S0PP، S30PP و S40PP نسبت به نمونه S0، S30 و S40 بدون الیاف به ترتیب ۲/۸، ۱۵ و ۷/۸٪ افزایش مقاومت فشاری را بعد از ۹۰ روز شاهد بوده اند و بدین ترتیب مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌های S30PP و S40PP حاکی از آن است که این نمونه‌ها به ترتیب ۵۰ و ۷۰٪ مقاومت فشاری نمونه سیمانی OPC را کسب کرده اند.

● مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری S30PP و S40PP به ترتیب ۵۳ و ۶۳٪ مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه سیمانی OPC را کسب کرده اند و نسبت به نمونه گلی CLPP حدود ۵ و ۵/۹ برابر افزایش را نشان داده است. تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن روی نتایج مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری متفاوت بررسی شده است بطوریکه در نمونه S0PP نسبت به S0 باعث کاهش ولی در نمونه‌های S30PP و S40PP نسبت به S30 و S40 بعد از ۲۸ روز به ترتیب ۱۳ و ۳/۸٪ افزایش را نشان داده است.

● نتایج جذب آب نشان داده است که نمونه‌های ژئوپلیمری از نگاه جذب آب در ردیف ملات‌های با جذب آب بالا قرار گرفته اند و نسبت به نمونه سیمانی OPC نمونه‌های ژئوپلیمری S30PP و S40PP به ترتیب ۹۵ و ۷۲٪ آب بیشتری را بعد از ۷۲ ساعت جذب نموده اند اما نسبت به نمونه گلی CLPP بهترین نتایج را ارائه داده اند و همچنان استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در نمونه شاهد ژئوپلیمری S0PP باعث افزایش اما در نمونه‌های S30PP و S40PP نسبت به نمونه غیر الیافی آن‌ها باعث کاهش جذب آب گردیده است.

● ضریب جذب آب موئینه در تمامی نمونه‌های ملات ژئوپلیمری به‌طور متوسط برابر به ۰/۳۲۲۱ بوده و بیان می‌دارد که ملات ژئوپلیمری از نگاه جذب آب موئینه در ردیف مواد ضعیفتر طبقه بندی گردیده است اما استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن این ضریب را کاهش داده طوریکه در نمونه S40PP نسبت به نمونه S۴۰ حدود ۱٪ کمتر را نشان داده است.

● تعداد ضربات که بعد از ایجاد اولین ترک الی انهدام ثبت شده است نشان داد که نمونه‌های ژئوپلیمری S30 و S40، S30PP و S40PP نسبت به نمونه‌های سیمانی OPC و گلی CLPP تعداد ضربات بیشتری را جذب نموده و قابلیت انعطاف پذیری این نمونه‌ها بیشتر.

● جایگزینی خاک با سرباره باعث شده تا ایجاد اولین ترک در نمونه‌های ژئوپلیمری به تعویق بی‌افتد و همچنان استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در نمونه‌ها مثبت ارزیابی شده است طوریکه نمونه‌های S30PP و S40PP نسبت به نمونه‌های S30 و S40 به ترتیب ۳۵ و ۳٪ افزایش در مقابل اولین ترک را داشته و همچنان این نمونه‌ها به ترتیب حدود ۴۰ و ۷۳٪ مقاومت نمونه سیمانی OPC را کسب کرده اند.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از ریاست محترم دانشکده مهندسی عمران و کارشناس آزمایشگاه مصالح و تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان در انجام کلیه آزمایشات، گروه صنعتی و معدنی کان تامین صدرا و شرکت سیمان سنگسر از بابت تهیه خاک و ماسه قابل استفاده در این تحقیق، صمیمانه قدردانی می‌شود.

- [1] Xu, Y., Chen, H., Wang, P. (2020). 'Effect of Polypropylene Fiber on Properties of Alkali-Activated Slag Mortar', *Advances in Civil Engineering*, vol 2020, p. 12.
- [2] Saidi, T., Hasan, M. (2022). 'The effect of partial replacement of cement with diatomaceous earth (DE) on the compressive strength and absorption of mortar', *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol 34, pp. 250–259.
- [2] Cebeci, Z., Al-Noury, S., Mirza, W. (1989). 'Strength and drying shrinkage of masonry mortars in various temperature-humidity environments', *Cement and Concrete Research*, vol 19(1), pp. 53–62.
- [3] Taha, M., Feng, C., Ahmed, S. (2020). 'Influence of Polypropylene Fibre (PF) Reinforcement on Mechanical Properties of Clay Soil', *Advances in Polymer Technology*, vol 2020, p.15.
- [4] Nikolov, A., Rostovsky, I., Nugteren, H. (2017). 'Geopolymer materials based on natural zeolite', *Case Studies in Construction Materials*, vol 6(March), pp. 198–205.
- [5] Marsh, A., Heath, P., Patureau, M., Evernden, Walker, P. (2018). 'Alkali activation behaviour of un-calcined montmorillonite and illite clay minerals', *Applied Clay Science*, vol 166(February), pp. 250–261.
- [6] Yaghoubi, M., Arulrajah, A., Disfani, M., Horpibulsuk, S., Darmawan, S., Wang, J. (2019). 'Impact of field conditions on the strength development of a geopolymer stabilized marine clay', *Applied Clay Science*, vol 167(October), pp. 33–42.
- [7] Zhang, B., Yuan, P., Guo, H., Deng, L., Li, Yun., Li, Li., Wang, Q. (2021). 'Effect of curing conditions on the microstructure and mechanical performance of geopolymers derived from nanosized tubular halloysite', *Construction and Building Materials*, vol 268. Pp, 121-134.
- [8] Yamchelou, M., Law, D., Brkljača, R., Gunasekara, C., Li, J., Patnaikuni, I. (2021). 'Geopolymer synthesis using low-grade clays', *Construction and Building Materials*, vol 268, pp. 182-194
- [9] Abdul, K., Muhammad, R., Ehsan, U., Muhammad, AH., Khurram, IK., Muhammad, N., Muhammad, A., Arsalan, H., Naveed, M., Muhammad MA. (2020). 'Experimental evaluation of sustainable geopolymer mortars developed from loam natural soil', *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, vol 19(6), pp. 637–646.
- [10] Nmiri, A., Hamdi, N., Yazoghli, Marzouk., Duc, M., Srasra, E. (2017). "Synthesis and characterization of kaolinite-based geopolymer: Alkaline activation effect on calcined kaolinitic clay at different temperatures," *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 8, pp. 276–290.
- [11] Heah, C., Kamarudin, H., Mustafa, A., Bnhussain, M., Luqman, M., Khairul, I., Ruzaidi, C., (2013). 'Kaolin-based geopolymers with various NaOH concentrations', *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol 20, pp. 313–322.
- [12] Merabtene, M., Kacimi, L., Clastres, P. (2019). 'Elaboration of geopolymer binders from poor kaolin and dam sludge waste', *Heliyon*, 5: 19-30
- [13] Ramasamy, S., Abdul, M., Haq, E., Hussaini, M., Khan, K., Nadeem, A., Haq, A., Navee, M., (2015). 'Recent dissertations on kaolin based geopolymer materials', *Reviews on Advanced Materials Science*, 42: 83–91.
- [14] Abdel Hadi, N., (2016). 'Geo Polymerization of Kaolin and Metakaolin Incorporating NaOH and High Calcium Ash', *Earth Science Research*, 5: 67-75
- [15] Istuque, D., Istuque, D., Soriano, L., Akasaki, J., Melges, J., Borrachero, M., Monzó, J., Payá,

- J., (2019). 'Effect of sewage sludge ash on mechanical and microstructural properties of geopolymers based on metakaolin', *Construction and Building Materials*, 203, pp. 95–103
- [16] Kaur, M., Singh, J., Kaur, M., (2018). 'Microstructure and strength development of fly ash-based geopolymer mortar: Role of nano-metakaolin', *Construction and Building Materials*, 190: 672–679
- [17] Ulloa, N., Baykara, M., Cornejo, A., Rigail, C., Paredes, V., Villalba, J., (2018) 'Application-oriented mix design optimization and characterization of zeolite-based geopolymer mortars', *Construction and Building Materials*, 174: 138–149
- [18] Erfanimanesh, A., Sharbatdar, M. K., (2020) 'Mechanical and microstructural characteristics of geopolymer paste, mortar, and concrete containing local zeolite and slag activated by sodium carbonate', *Journal of Building Engineering*, 32(May): 101781.
- [19] Dalvand, M. H., Sharbatdar, M. K., Dalvand, A., (2022). 'Experimental investigation and statistical analysis on structural design and impact strengths of fiber geopolymer mortar', 53(10): 947–950.
- [20] ASTM. C 33-99a. 'Standard Specification for Concrete Aggregates', *Annual Book of ASTM Standards*, i(C), pp. 1–11.
- [21] ASTM. C192. (2009). *Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, Engineered Concrete*. *Annual Book of ASTM Standards*
- [22] ASTM. C109. (2020). 'Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)', *Annual Book of ASTM Standards*,
- [23] ASTM. C496. (2008). 'Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens', *Annual Book of ASTM Standards*,
- [24] ASTM. C642. (1997). 'Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete', *Annual Book of ASTM Standards*,
- [25] ASTM. C1585-13. (2013). 'Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes', *Annual Book of ASTM Standards*,
- [26] Karatas, M., Benli, A., Arslan, F., (2020). 'The effects of kaolin and calcined kaolin on the durability and mechanical properties of self-compacting mortars subjected to high temperatures', *Construction and Building Materials*, 265: 120300
- [27] Muniswamappa, B., Mohammad, F., (2020), 'Water Absorption Capacity of Concrete Cubes With Sorptivity Water Absorption of Coefficient International Research Journal of Engineering and Technology', 7:88-96
- [28] ACI. 544R. (2017). 'Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete.', *ACI Structural Journal*, 85: 563–580.
- [29] Moradikhou, A. B., Esparham, A., (2021), 'Water Absorption, Density, Mechanical Strengths and High-temperature Resistance of Metakaolin-based Geopolymer Concrete Reinforced with Hybrid Polyolefin and Simple Polypropylene Fibers', *Advance Researches in Civil Engineering*, 3(2): pp; 1–15.
- [30] Bhutta, A., Farooq, M., Banthia, N., (2019), 'Performance characteristics of micro fiber-reinforced geopolymer mortars for repair', *Construction and Building Materials*, 215: 605–612.
- [31] Hossain, M., Karim, M., Elahi, A., Zain, M., (2019). "Water absorption and sorptivity of alkali-activated ternary blended composite binder," *J. Build. Eng.* 31: 101370

- [32] Mohseni, E., (2018). 'Assessment of Na_2SiO_3 to NaOH ratio impact on the performance of polypropylene fiber-reinforced geopolymer composites', *Construction and Building Materials*, 186: 904–911
- [33] Baykara, H., Cornejo, M., Espinoza, H., García, E., Ulloa, N., (2020). 'Preparation, characterization, and evaluation of compressive strength of polypropylene fiber reinforced geopolymer mortars', *Heliyon*, 6: 2020
- [34] Islam, A., Johnson, A., Zamin, M., Nurasyiqin, B., Sumiani, Y., Iftekhair, B., (2017). 'Influence of steel fibers on the mechanical properties and impact resistance of lightweight geopolymer concrete', *Construction and Building Materials*, 152: 964–977.