

Investigating the behavior of concrete containing waste glass and rubber as sand replacement before and after exposing to elevated temperatures

Fariborz Hamidi ¹ , Masoud Ziaei ^{2*} , Reza Esmailabadi ³ , Mohammad Hadi Alizadeh Elizei ⁴

1- PhD student in structural civil engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Roudehen Branch

2-Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Garmsar

3-Assistant Professor, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Roudehen Branch

4-Assistant Professor, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Roudehen Branch

ABSTRACT

Tires and waste glass are long-lasting pollutants in nature. One of the ways to recycle waste glass and rubber is to use it in concrete, which will result in minimal extraction of natural minerals. Many engineering structures are exposed to fire hazards, and therefore it is necessary to know the mechanical properties of concrete materials at high temperatures. In this research, waste glass and rubber were used as a substitute for a part of natural fine grain (sand). The size of glass particles is between 0.2-0.85 mm and with percentages of 5%, 10% and 15% and the size of rubber particles is between 3-5 mm by volume and with percentages of 5% and 10%, replacing fine aggregates. In total, 12 mixing plans were made, and from each mixing plan, 3 cubic and cylindrical specimens were made with different percentages of glass and rubber. The compressive and tensile strength, workability, weight loss, ratio of residual compressive and tensile strength of the specimens were measured at ambient temperature and at 600 °C and the average values were evaluated. In terms of appearance, after applying heat, the color of the specimens became darker and hairline cracks were widely visible on the concrete surfaces. As expected, with increasing the rubber, the compressive strength of the specimens decreased. After applying heat, the resistance drop of all specimens was higher than the ambient temperature state. With the increase in the rubber, the resistance decreased more, which can be attributed to the burning and destruction of rubber particles and the appearance of small holes and porosity in concrete. With increasing glass percentage, the trend of compressive strength was slightly improved. The results showed that the combined design of 5% glass and 5% rubber is the optimal design and has a more appropriate performance than other designs.

ARTICLE INFO

Receive Date: 12 August 2022

Revise Date: 21 November 2022

Accept Date: 06 December 2022

Keywords:

Waste glass

Tire rubber

Compressive strength

Tensile strength

Elevated temperature

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.354949.2895>

*Corresponding author: Masoud Ziaei
Email address: m.ziaei@fmgarmsar.ac.ir

بررسی رفتار بتن حاوی شیشه و لاستیک ضایعاتی جایگزین ماسه قبل و بعد از

قرارگیری در معرض حرارت بالا

فریبرز حمیدی^۱، مسعود ضیائی^{۲*}، رضا اسمعیل آبادی^۳، محمد هادی عزیزاده الیزئی^۴

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، رودهن، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه گرمسار، گرمسار، ایران

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، رودهن، ایران

۴- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، رودهن، ایران

چکیده

لاستیک خودروها و شیشه‌های ضایعاتی از جمله مواد آلاینده در طبیعت با ماندگاری بالا هستند. یکی از راه‌های بازیافت شیشه و لاستیک ضایعاتی، استفاده از آن در بتن می‌باشد که حداقل برداشت از معادن طبیعی را به همراه خواهد داشت. از طرفی دیگر بسیاری از سازه‌های مهندسی در طول عمر خود در معرض خطرات آتش سوزی قرار دارند و از این رو شناخت خواص مکانیکی مصالح بتن در دماهای بالا ضروری است. در این تحقیق از شیشه و لاستیک ضایعاتی به عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه طبیعی (ماسه) استفاده شد. اندازه ذرات شیشه بین $0.15 - 0.85$ mm بصورت وزنی و با درصدهای ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ و اندازه ذرات لاستیک بین $3 - 5$ mm بصورت حجمی و با درصدهای ۵٪ و ۱۰٪ جایگزین ریزدانه بتن شده است. در مجموع ۱۲ طرح اختلاط و از هر طرح اختلاط ۳ نمونه مکعبی و استوانه‌ای با درصدهای متفاوت شیشه و لاستیک ساخته شد. مقاومت فشاری و کششی، روانی، افت وزنی، نسبت مقاومت پسماند فشاری و کششی نمونه‌ها در دمای محیط و تحت دمای 600°C اندازه‌گیری و متوسط مقادیر مورد ارزیابی قرار گرفت. از نظر ظاهری بعد از اعمال حرارت، رنگ نمونه‌ها تیره‌تر گردید و ترک‌های مویی بصورت گسترده در سطوح بتن قابل مشاهده بود. همانطور که انتظار می‌رفت، با افزایش مقادیر لاستیک، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافت. بعد از اعمال حرارت، افت مقاومتی تمامی نمونه‌ها نسبت به حالت دمای محیط بیشتر بود. با افزایش مقدار درصد لاستیک، کاهش مقاومت بیشتر شد که دلیل آن را میتوان به سوختن و از بین رفتن ذرات لاستیک و پدیدار شدن حفرات ریز و ایجاد تخلخل در بتن نسبت داد. با افزایش مقدار درصد شیشه، روند مقاومت فشاری کمی بهبود داشت. نتایج نشان داد طرح ترکیبی ۵٪ شیشه و ۵٪ لاستیک طرح بهینه بوده و عملکرد مناسب تر و مطلوب تری را نسبت به سایر طرحها دارد.

کلمات کلیدی: شیشه ضایعاتی، لاستیک تایر، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، دمای بالا.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.354949.2895	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.354949.2895	۱۴۰۲/۰۷/۳۰	۱۴۰۱/۰۹/۱۵	۱۴۰۱/۰۹/۱۵	۱۴۰۱/۰۸/۳۰	۱۴۰۱/۰۵/۲۱
مسعود ضیائی m.ziyaei@fmgamsar.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

انباشت مواد دور ریختنی، باعث مخاطرات زیست محیطی می‌شود. لاستیک خودروها و شیشه‌های مستعمل از جمله مواد آلاینده در طبیعت با ماندگاری بالا هستند که محیط زیست را تهدید و نگرانی‌های گسترده‌ای را در جهان ایجاد نموده است. در سال‌های اخیر ضایعات پوزولانی به طور گسترده‌ای به عنوان جایگزینی جزئی برای سنگدانه‌ها یا سیمان در ملات‌های سیمانی مورد استفاده قرار گرفته اند.

بازیافت لاستیک‌ها به دلیل حجم بالای تولید و خواص غیرقابل تجزیه، به یکی از معضلات جامعه علمی و سازمان‌های محیط زیستی تبدیل شده است. تخمین زده می‌شود که در سراسر جهان، سالانه حدود یک میلیارد لاستیک تولید شود که از این تعداد کمتر از ۵۰ درصد بازیافت و بقیه بصورت زباله دفن می‌شوند [۱]. بتن پرکاربردترین ماده در صنعت ساختمان است که عمدتاً از سیمان، ماسه و سنگدانه‌ها تشکیل شده است و در بین این مصالح، سنگدانه‌ها حجم قابل توجهی از بتن را اشغال می‌کنند. برای غلبه بر این نگرانی‌ها، کشورهای مختلف از یافتن راه‌های جدید و ترویج تکنیک‌های بازیافت زباله حمایت می‌کنند. با توجه به حجم بالای سنگدانه در صنعت بتن، بازیافت مواد زائد برای جایگزینی سنگدانه‌ها در تولید بتن، یکی از بهترین روشها برای غلبه بر مشکلات مربوط به زباله است [۲].

در سال‌های اخیر تحقیقات و پژوهش‌های زیادی در خصوص استفاده از خرده لاستیک بازیافتی به عنوان جایگزین کردن بخشی از سنگدانه‌های طبیعی بتن به منظور کاهش منابع سنگدانه‌های طبیعی انجام شده و تاثیر آن بر رفتار و عملکرد مکانیکی بتن مورد بررسی قرار گرفته است. ژوان لی و همکاران در تحقیق انجام شده از ضایعات لاستیک برای جایگزینی سنگدانه شن و ماسه بتن استفاده کردند و نتایج نشان دهنده کاهش چگالی، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی و افزایش شکل پذیری بود. روند کاهش‌ها، با افزایش مقادیر و کاهش اندازه لاستیک آشکارتر بود [۳]. خرمی و همکاران در تحقیقی نشان دادند که مقاومت فشاری بتن با دانه‌های لاستیکی، به اندازه و مقدار درصد اضافه شده دانه لاستیک بستگی دارد. تا مقدار ۵٪ جایگزینی، تاثیر چندانی بر خواص بتن نداشت اما به طور کلی مقاومت فشاری، کششی و خمشی با افزایش میزان لاستیک در بتن کاهش یافت [۴]. تانگ و همکاران در تحقیقی بیان کردند که ذرات لاستیک در حرارت بالای 400°C کاملاً تجزیه شده و منافذی را باقی می‌گذارد. با افزایش حرارت، ریز ترک هایی در سطح نمونه‌های بتنی پدید آمده است. باتوجه به رفتار شکست و عملکرد خواص مکانیکی، مقادیر بیش از ۴٪ توصیه نمی‌شود [۵]. امیری و همکاران در مطالعه‌ای به ارزیابی تاثیر پودر و دانه‌های لاستیک ضایعاتی بر خواص مکانیکی و دوام بتن پرداختند. در این بررسی پودر و دانه لاستیک به ترتیب جایگزین سیمان و سنگدانه بتن شد. بتن با پودر لاستیک دارای منافذ مویرگی بزرگتر و تخلخل بیشتر بود. خواص مکانیکی نسبت بتن شاهد کاهش یافته و دانه لاستیک به دلیل عدم اتصال بین سنگدانه و خمیر سیمان باعث تخریب خواص مکانیکی بتن شد [۶]. اصلانی و همکاران در تحقیقی خرده لاستیک بازیافتی به ابعاد ۵-۲mm و ۵-۵mm را به ترتیب جایگزین ریزدانه و درشت دانه طبیعی با نسبت‌های ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ درصد و تحت حرارت 100°C ، 300°C و 600°C در بتن خودتراکم کردند. نتایج بیان کننده افزایش جذب انرژی و شکل پذیری و کاهش خواص مکانیکی و کارایی بود. همچنین اندازه لاستیک ۵-۲mm، پوسته پوسته شدن کمتری را نسبت به اندازه ۵-۵mm نشان داد. در هر دو ذرات با نسبت ۴۰٪ جایگزینی و در دمای 600°C پوسته پوسته شدن به صورت گسترده آشکار بود [۷]. کرینال دسی و جاکوپو در یک مطالعه آزمایشگاهی خرده لاستیک را جایگزین بخشی از ریزدانه بتن کردند و بررسیها نشان دادند با افزودن مقادیر ذرات لاستیک مقاومت مکانیکی بتن کاهش قابل توجهی داشته است. همچنین کارایی و زمان گیرش نیز افزایش یافت [۸]. طاها و همکاران در تحقیق آزمایشگاهی به بررسی ساختار میکروسکپی بتن لاستیکی پرداختند. آنها نشان دادند با افزایش ذرات لاستیک، مقاومت فشاری بتن کاهش داشت و همچنین عمده کاهش مقاومت، ناشی از رفتار ذرات دانه‌های لاستیک به عنوان یک سنگدانه نرم است [۹]. شن و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی ساختار میکروسکپی بتن متخلخل اصلاح شده با مصالح پلیمری لاستیکی پرداختند. تحقیقات نشان داد مدول الاستیسیته بتن متخلخل اصلاح شده زمانی کاهش می‌یابد که سنگدانه طبیعی جایگزین سنگدانه لاستیکی شود. تنش نهایی و کرنش نهایی بتن با جایگزینی سنگدانه معدنی با سنگدانه لاستیکی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت [۱۰]. صابریان و همکاران نشان دادند با افزایش محتوای لاستیک، شاخص شکل پذیری افزایش و همچنین با افزایش دما، شاخص شکل پذیری کاهش می‌یابد. در دمای بالای 450°C نمونه‌ها به دلیل افزایش فشار آب منفذی فرو ریختند. بر اساس تجزیه و تحلیل آزمایشات انجام شده مقدار ۱٪ سنگدانه لاستیک بازیافتی پیشنهاد شده است [۱۱].

از طرفی دیگر به طور معمول شیشه به محیط زیست آسیب نمی رساند زیرا آلاینده‌ای از خود خارج نمی کند. اما اگر با دقت برخورد نشود می‌تواند به انسان و همچنین حیوانات آسیب برساند و به دلیل غیرقابل تجزیه بودن سازگاری کمتری با محیط زیست دارد. بنابراین توسعه فناوری‌های جدید مورد نیاز است [۱۲]. هزاران بطری شیشه‌ای ضایعاتی هر روز در جهان تولید می‌شود و بازیافت شیشه‌های دور ریخته شده همیشه یک چالش بزرگ برای دستیابی به توسعه پایدار می‌باشد. جدا از ذوب ضایعات شیشه برای تولید مجدد محصولات شیشه‌ای، رویکرد دیگر بازیافت شیشه زباله با خرد کردن بصورت دانه و مخلوط در ترکیبات بتن است [۱۳].

تحقیقات زیادی برای استفاده از ذرات یا پودرهای شیشه برای تولید بتن یا ژئوپلیمر، با جایگزینی جزئی از مواد خام مانند سنگدانه، سیمان و یا به عنوان مواد سیمانی مکمل انجام شده است. با توجه به اینکه در ترکیب شیشه نسبت بالایی از سیلیس آمورف و غلظت بالایی از اکسیدهای فلز قلیایی وجود دارد بنابراین شیشه‌های بازیافتی می‌توانند در واکنش پوزولانی و عملکرد بتن نقش حیاتی داشته باشند [۱۴]. تمنا و همکاران در تحقیقات خود نشان دادند با جایگزین کردن ۶۰٪ ماسه رودخانه‌ای با شیشه ریزدانه بازیافتی، مقاومت خمشی و کششی رضایت بخش بوده است. اما با افزایش مقادیر بیشتر، کارایی بتن کاهش یافت. بتن حاوی شیشه ریزدانه بازیافتی مقاومت بهتری در مقابل نفوذپذیری یون کلر نشان داد [۱۵]. چگالی ظاهری بالا و جذب آب ناچیز شیشه، بتن حاوی ریزدانه طبیعی را در مواجهه با چرخه‌های ذوب و یخ زدگی محافظت می‌کند [۱۶]. در تحقیق انجام شده توسط بسکار و همکاران نشان دادند که با جایگزین کردن ۲۰٪ پودر شیشه با سیمان بالاترین مقاومت حاصل شد. با کاهش مقادیر پودر شیشه، وزن مخصوص بتن افزایش یافت [۱۲]. حامادا و همکاران بیان کردند که بهینه ترین مقدار شیشه به جای ریزدانه بین ۲۰٪-۳۰٪ و برای درشت دانه بین ۱۰٪-۲۰٪ می‌باشد [۱۷]. ژو و همکاران به بررسی رفتار تنش کرنش ملات سیمان خودتراکم حاوی شیشه بازیافتی در معرض حرارت بالا پرداختند و دریافتند مقاومت نهایی در دمای $600^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$ ، بین ۶۷٪ الی ۸۳٪ کاهش یافت [۱۸]. ترو نیز به عملکرد بتن ساخته شده با شیشه بطری خرد شده تحت حرارت پرداخت و بیان کرد بتن ساخته شده با ۱۰٪ جایگزینی دارای مقاومت بالاتری بوده و در دمای 700°C ، مقاومت فشاری بتن ۲۰٪ نسبت به مقاومت اولیه کاهش داشت [۱۹]. خان و همکاران به بررسی ملات حاوی شیشه ریزدانه بازیافتی و خاکستر بادی پرداختند و نشان دادند به دلیل جذب آب کمتر شیشه نسبت به سنگدانه طبیعی، کارایی ملات افزایش یافت. همچنین با جایگزینی ۱۰٪ ریزدانه شیشه‌ای با ماسه طبیعی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه از ۷۱ به ۶۶ مگاپاسکال کاهش داشت. در دمای 200°C الی 400°C ، با افزایش شیشه مقاومت پسماند اندکی کاهش داشت اما در دمای $600^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$ مقاومت پسماند فشاری اندکی افزایش یافت [۲۰].

بسیاری از سازه‌های مهندسی در طول عمر خود در معرض خطرات آتش سوزی قرار دارند. دمای بالا در مواقع آتش سوزی می‌تواند باعث تشدید دراز بین رفتن ظرفیت باربری قطعات، کاهش قابل توجه خواص مکانیکی آنها، به خطر انداختن ایمنی سازه‌های ساختمانی و حتی فروریختن آنها شود. از این رو شناخت خواص مکانیکی مصالح بتن در دماهای بالا ضروری است. بسیاری از مطالعات نشان دادند که حرارت بالا موجب کاهش مقاومت، مدول الاستیسیته و دیگر خواص مکانیکی مصالح بتن می‌شود [۲۱]. کن ژی و همکاران در مطالعات آزمایشگاهی به بررسی رابطه تنش کرنش فشاری تک محوری بتن تحت حرارت بالا پرداختند و بیان کردند مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته با افزایش سطح بار در دمای 460°C الی 580°C افزایش می‌یابد. همچنین اوج کرنش با افزایش تنش کاهش یافت بطوریکه کاهش نرخ در دمای بالای 680°C بطور قابل ملاحظه‌ای مشهود بود که می‌تواند به دلیل فشردگی ترک‌های حرارتی و افزایش خزش حرارتی گذرا نسبت داده شود [۲۲]. اومودینگ و همکاران در تحقیقی دریافتند با جایگزین کردن تا مقدار ۲۵٪ شیشه بازیافتی به جای سنگدانه‌های درشت طبیعی بتن، عملکرد سایشی آن را به میزان قابل توجهی کاهش نمی‌دهد [۲۳]. صلاح الدین و همکاران در تحقیقی آزمایشگاهی به تاثیر عملکرد بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی تحت حرارت بالا پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که مقاومت پسماند فشاری بتن سنگدانه بازیافتی در دماهای بالا رضایت بخش و قابل مقایسه با مخلوط مرجع بود و مقاومت فشاری بتن سنگدانه بازیافتی با افزایش درصد سنگدانه کاهش یافت. همچنین با جایگزینی ۲۰٪ پودر شیشه به جای سیمان در مخلوط ۱۰۰٪ سنگدانه بازیافتی، مقاومت فشاری و کششی افزایش یافت [۲۴].

قلهکی و پاچیده به بررسی اثر افزایش دما بر خواص مکانیکی بتن حاوی فیر فلزی بازیافتی پرداختند و نشان دادند که الیاف بازیافتی می‌توانند مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن در معرض دماهای بالا را افزایش داده و سبب کاهش ترک‌های گسترده ناشی از گرما و فشار می‌شود. در آستانه دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد مقاومت‌ها به شدت کاهش می‌یابد. [۳۶].

قلهکی و همکاران از ۴ نوع مصالح بازیافتی از پودرهای آهن، لاستیک، شیشه و پوسته تخم مرغ را با درصدهای ۷ و ۱۴ و ۲۱ و ۲۸ درصد و با اندازه ۵۰ الی ۶۰ میکرون جایگزین سیمانی کردند. آنها دریافتند که استفاده از ضایعات پوزولانی به میزان ۱۴ درصد در ملات‌های سیمانی به طور مطلوب بر مقاومت فشاری تأثیر می‌گذارد و پودر شیشه و آهن به طور موثرتری جذب آب را کاهش داده و خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد [۳۷]. پاچیده و همکاران در تحقیقی با افزودن مقادیر نانو گرافن با نسبت‌های ۰٫۲، ۰٫۴ و ۰٫۸ درصد جایگزین سیمان کردند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری به ترتیب ۹، ۳۷ و ۴۵ درصد و مقاومت کششی ۱۳، ۲۷ و ۸۱ درصد و مقاومت در برابر ضربه ۴۲، ۹۵ و ۱۳۷ درصد نسبت به بتن شاهد افزایش داشت. همچنین ترکیب نانوگرافن سبب کاهش عرض ترک‌ها شد [۳۸].

رودریگز و همکاران به بررسی ساختار میکروسکوپی بتن الیافی تحت حرارت پرداختند و نشان دادند که در دمای بالای ۵۷۳ درجه سانتیگراد تغییرات فیزیکی-شیمیایی در خمیر سیمان و سنگدانه‌ها رخ داده و پیوند بین ساختاری اجزاء به شدت ناپایدار و مقاومت اولیه خود را از دست می‌دهد و در دمای بالای ۸۰۰ درجه بتن کاملاً از بین رفته و متلاشی می‌شود [۳۹].

هدف از این تحقیق جایگزین کردن بخشی از ماسه طبیعی رودخانه‌ای با ریزدانه از جنس شیشه و لاستیک بازیافتی در بتن بوده است که می‌تواند حفظ و نگهداری از منابع طبیعی موجود را بهبود بخشیده و اقدامی نیز برای کاهش آلودگی زیست محیطی باشد. بررسی آزمایشگاهی استفاده از ریزدانه‌های شیشه و لاستیک بازیافتی با درصدهای مختلف (طرح اختلاط‌های متفاوت) و تاثیر آن بر مقاومت فشاری، کششی و کارایی بتن در دمای محیط و پس از قرارگیری در دمای ۶۰۰ °C انجام شد. از نظر ظاهری بعد از اعمال حرارت، ریزترکهایی بصورت گسترده در سطوح بتن قابل مشاهده بود. همچنین برای درک بهتر از رفتار ریزساختاری نمونه‌ها، آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

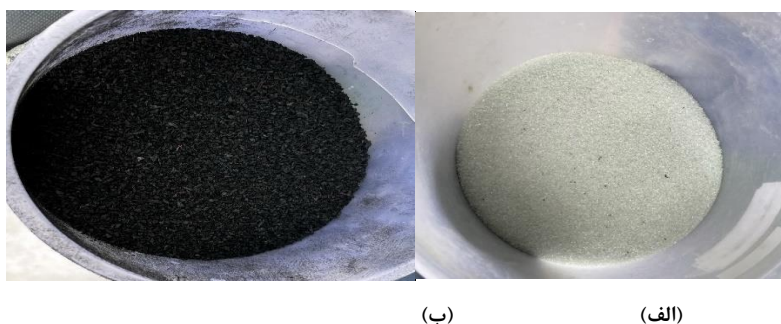
۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

سیمان مصرفی مورد استفاده در این تحقیق از سیمان پرتلند تپ ۲ تولید شده در کارخانه شاهرود با ضریب نرمی (بلین) $3150 \text{ cm}^2/\text{gr}$ ، وزن مخصوص $3/\text{cm}^3 \text{ gr}$ ، گیرش اولیه ۱۳۵ دقیقه و گیرش نهایی ۳/۳۵ ساعت مطابق با استاندارد ASTM C150 [۲۵] و استاندارد ۳۸۹ ملی ایران [۲۶] بوده است. شیشه مصرفی از خرد کردن و الک کردن شیشه‌های ضایعاتی ساختمانی از کارخانه‌ای واقع در اصفهان تهیه شد. وزن مخصوص اشباع با سطح خشک شیشه $2/\text{cm}^3 \text{ gr}$ و با اندازه بین ۰/۸۵mm الی ۲mm که با نسبت‌های وزنی ۰/۰، ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ جایگزین بخشی از ریزدانه طبیعی بتن (ماسه) شده است. مشخصات و ترکیبات شیمیایی سیمان و شیشه مصرفی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات ترکیبات شیمیایی سیمان و شیشه مصرفی

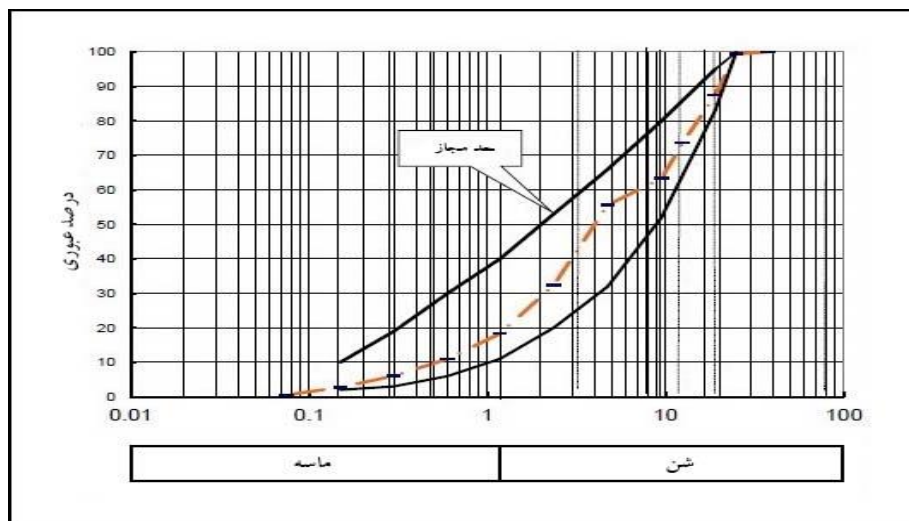
ترکیب	سیمان (%)	شیشه (%)
SiO ₂	۲۱/۱۱	۷۱/۴۹
Fe ₂ O ₃	۳/۹۱	۰/۵۱
CaO	۶۳/۳۶	۹/۲۹
Al ₂ O ₃	۴/۴۸	۱/۰۴
MgO	۱/۴۸	۳/۶۸
SO ₃	۲/۵۸	۰/۲۵
Na ₂ O	۰/۴۳	۱۳/۶۷
K ₂ O	۰/۴۸	۰/۲۴
F Ca O	۱/۵	۰

لاستیک مصرفی از خرد کردن لاستیک تایر کامیون که از کارخانه‌ای واقع در رباط کریم تهران تهیه شده است. وزن مخصوص اشباع با سطح خشک لاستیک $1/05 \text{ gr/cm}^3$ و با اندازه ۱ الی ۳ میلیمتر که با نسبت‌های حجمی ۰٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ جایگزین بخشی از ریزدانه طبیعی بتن (ماسه) شده است. تصاویری از شیشه و لاستیک مصرفی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: (الف) شیشه با اندازه ۰/۸۵-۲ میلیمتر (ب) لاستیک با اندازه ۱-۳ میلیمتر

سنگدانه‌های مصرفی از معدن الماس درخشان مشرق در نزدیکی محل آزمایشگاه و از حوالی شهر ایوانکی تهیه شده است. دانه بندی سنگدانه‌ها مطابق استاندارد [27] ASTM C33 انجام شد. حداکثر اندازه اسمی شن بادامی ۲۵mm، وزن مخصوص اشباع با سطح خشک $2/58 \text{ gr/cm}^3$ ، وزن مخصوص ظاهری $2/62 \text{ gr/cm}^3$ و جذب آب ۱/۵۶٪ تعیین شد. حداکثر اندازه اسمی شن نخودی ۱۹mm، وزن مخصوص اشباع با سطح خشک $2/57 \text{ gr/cm}^3$ ، وزن مخصوص ظاهری $2/61 \text{ gr/cm}^3$ و جذب آب ۱/۸۳٪ تعیین شد. حداکثر اندازه اسمی ماسه ۴/۷۵mm، وزن مخصوص اشباع با سطح خشک $2/56 \text{ gr/cm}^3$ ، وزن مخصوص ظاهری $2/64 \text{ gr/cm}^3$ و جذب آب ۲/۸۳٪ بدست آمد. برای تعیین وزن مخصوص و جذب آب درشت دانه‌ها و ریزدانه‌ها به ترتیب مطابق استاندارد [28] ASTM C127 و [29] ASTM C128 انجام شد. منحنی دانه بندی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: منحنی دانه بندی طرح اختلاط

آب مصرفی برای ساخت بتن، از آب آشامیدنی قابل شرب و عاری از هرگونه آلودگی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- طرح‌های اختلاط

در این تحقیق ۱۲ طرح اختلاط ساخته شد. ۱ طرح از بتن با سنگدانه‌های طبیعی که بتن مرجع نامیده می‌شود و ۱۱ طرح که با درصد‌های مختلف شیشه و لاستیک جایگزین بخشی از ریزدانه (ماسه) شده است. ذرات شیشه با اندازه $2-0.85\text{mm}$ با درصد‌های وزنی ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪ و ذرات لاستیک با اندازه $3-1\text{mm}$ با درصد‌های حجمی ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪ جایگزین ریزدانه شده اند. مشخصات طرح‌های اختلاط در جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۳- نام گذاری طرح‌های اختلاط

به منظور نام گذاری اختصاری طرح‌ها، از حرف لاتین G به عنوان شیشه و حرف لاتین R به عنوان لاستیک استفاده شده است. عدد بعد از حرف لاتین، بیانگر مقدار درصد جایگزینی می‌باشد. به عنوان مثال G10-R5 بیانگر طرح اختلاط حاوی ۱۰٪ شیشه و ۵٪ لاستیک بازیافتی جایگزین ریزدانه طبیعی می‌باشد.

۲-۴- ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

در این پژوهش از قالب‌های مکعبی به ابعاد $150 \times 150 \times 150\text{mm}$ و قالب‌های استوانه‌ای به ابعاد $300 \times 150\text{mm}$ برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. از هر طرح اختلاط میانگین ۲ نمونه برای آزمایش در دمای محیط و دمای $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ساخته شد و میانگین آنها مورد بررسی قرار گرفت. ساخت نمونه‌ها در محل آزمایشگاه و در شهر ایوانکی صورت پذیرفت. وزن کردن مصالح بر اساس نوع هر طرح اختلاط انجام و درون قالب‌های مکعبی و استوانه‌ای که از قبل آماده شده بود مطابق با استاندارد ASTM C192 [۳۰] انجام گرفت. سپس به منظور ارزیابی روانی بتن آزمایش اسلامپ نیز گرفته شد. نمونه‌ها پس از گذشت ۲۴ ساعت در محیط مرطوب نگهداری شدند و پس از باز کردن قالب‌ها، به درون حوضچه آب اشباع شده از آهک انتقال یافتند. عمل آوری نمونه‌ها در دمای $22 \text{ }^\circ\text{C}$ و به مدت ۲۸ روز مطابق با استاندارد ASTM C511 [۳۱] صورت پذیرفت. تصاویری از توزین، ساخت و عمل آوری بتن در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات طرح‌های اختلاط به ازای یک مترمکعب

کد طرح	نسبت آب به سیمان	سیمان (kg)	شن نخودی (kg)	شن بادامی (kg)	ماسه (kg)	آب (kg)	ذرات شیشه (kg)	ذرات لاستیک (kg)
reference	۰/۴۵	۴۲۵	۲۵۳	۵۰۹	۹۵۸	۱۹۱	۰	۰
G0-R5	۰/۴۵	۴۲۵	۲۵۳	۵۰۹	۹۱۰	۱۹۱	۰	۲۰
G5-R5	۰/۴۵	۴۲۵	۲۵۳	۵۰۹	۸۶۲	۱۹۱	۴۸	۲۰
G10-R5	۰/۴۵	۴۲۵	۲۵۳	۵۰۹	۸۱۴	۱۹۱	۹۶	۲۰
G15-R5	۰/۴۵	۴۲۵	۲۵۳	۵۰۹	۷۶۶	۱۹۱	۱۴۴	۲۰
G0-R10	۰/۴۵	۴۲۵	۲۵۳	۵۰۹	۸۶۲	۱۹۱	۰	۲۰
G5-R10	۰/۴۵	۴۲۵	۲۵۳	۵۰۹	۸۱۴	۱۹۱	۴۸	۲۰
G10-R10	۰/۴۵	۴۲۵	۲۵۳	۵۰۹	۷۶۶	۱۹۱	۹۶	۲۰
G15-R10	۰/۴۵	۴۲۵	۲۵۳	۵۰۹	۷۱۸	۱۹۱	۱۴۴	۲۰
G5-R0	۰/۴۵	۴۲۵	۲۵۳	۵۰۹	۹۱۰	۱۹۱	۴۸	۰
G10-R0	۰/۴۵	۴۲۵	۲۵۳	۵۰۹	۸۶۲	۱۹۱	۹۶	۰
G15-R0	۰/۴۵	۴۲۵	۲۵۳	۵۰۹	۸۱۴	۱۹۱	۱۴۴	۰



شکل ۳: توزین مصالح، ساخت و عمل آوری

۲-۵- اعمال حرارت

پس از اتمام دوره عمل آوری ۲۸ روزه، تمامی نمونه‌ها قبل از قرارگیری داخل کوره الکتریکی، به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه آون و در دمای 105°C قرار گرفتند. این اقدام به دلیل از بین بردن آب‌های آزاد داخل نمونه‌ها انجام گرفت زیرا بر اثر افزایش حرارت، آب‌های آزاد محبوس درون بتن شروع به تبخیر شدن نموده و با افزایش فشار آب منفذی و تنش‌های داخلی، منهدم شدن نمونه‌های داخل کوره را

به همراه خواهد داشت. برای انجام آزمایش ها، نیمی از نمونه های مکعبی و استوانه ای در دمای محیط و نیمی دیگر برای قرارگیری در معرض حرارت 600°C پیش بینی شدند. در این مرحله نمونه های مورد آزمایش در دمای محیط با ترازوی دیجیتال توزین شدند.

اعمال بارگذاری حرارتی با کوره الکتریکی مستقر در پژوهشگاه نیرو با نرخ حرارتی $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ تا رسیدن به دمای 600°C انجام پذیرفت. نمونه ها به مدت ۱ ساعت در این دما باقی ماندند. پس از اتمام زمان حرارت دهی، به منظور جلوگیری از شوک حرارتی نمونه ها، به مدت ۲۴ ساعت از داخل کوره خارج نشدند. در این مرحله پس از خارج کردن نمونه ها از داخل کوره با ترازو توزین شدند.

در طول مدت حرارت دهی دود سیاه ناشی از سوخته شدن لاستیک قابل مشاهده بود. از نظر ظاهری رنگ نمونه ها بعد از خارج کردن از کوره نسبت به حالت اولیه تیره تر بودند که می تواند ناشی از دود حاصل از سوخته شدن کربن لاستیک دانست. همچنین در سطوح بتن میکروترک هایی بصورت گسترده قابل مشاهده بود که می توان دلیل آن را تبخیر آب های آزاد و افزایش فشار منفذی درون و بتن و ایجاد فرایند دهیدراسیون ژل سیلیکات کلسیم بر اثر اعمال حرارت دانست. در شکل ۴ نمونه هایی از قبل و بعد از اعمال حرارت نشان داده شده است.



الف-قبل از حرارت ب-بعد از حرارت ج-قبل از حرارت د-بعد از حرارت

شکل ۴: تصاویر نمونه های مکعبی و استوانه ای در قبل و بعد از اعمال حرارت

۳-آزمایش ها

۳-۱-آزمایش مقاومت فشاری بتن

آزمایش مقاومت فشاری بتن بر روی نمونه های مکعبی ساخته شده به ابعاد $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ در دو حالت دمای محیط و دمای 600°C مطابق با استاندارد BS EN 12390-3 [۳۲] و استاندارد ۱۶۰۸-۳ ملی ایران [۳۳] انجام و خروجی حاصل از میانگین نتایج نمونه ها بدست آمده است.

۳-۲-آزمایش مقاومت کششی بتن

آزمایش مقاومت کششی بتن بر روی نمونه های استوانه ای ساخته شده به ابعاد $300 \times 150 \text{ mm}$ و به روش کشش غیرمستقیم برزلی (دو نیم شدن) مطابق با استاندارد ASTM C496 [۳۴] انجام و خروجی حاصل از میانگین نتایج نمونه ها بدست آمده است.



شکل ۵: آزمایش مقاومت فشاری و کششی بتن

۳-۳- آزمایش روانی بتن تازه

آزمایش اسلامپ برای هر طرح اختلاط مطابق با استاندارد ASTM C143 [۳۵] انجام شد. هدف از انجام این آزمایش، تاثیر شیشه و لاستیک بر روانی بتن مورد بررسی قرار گرفت.

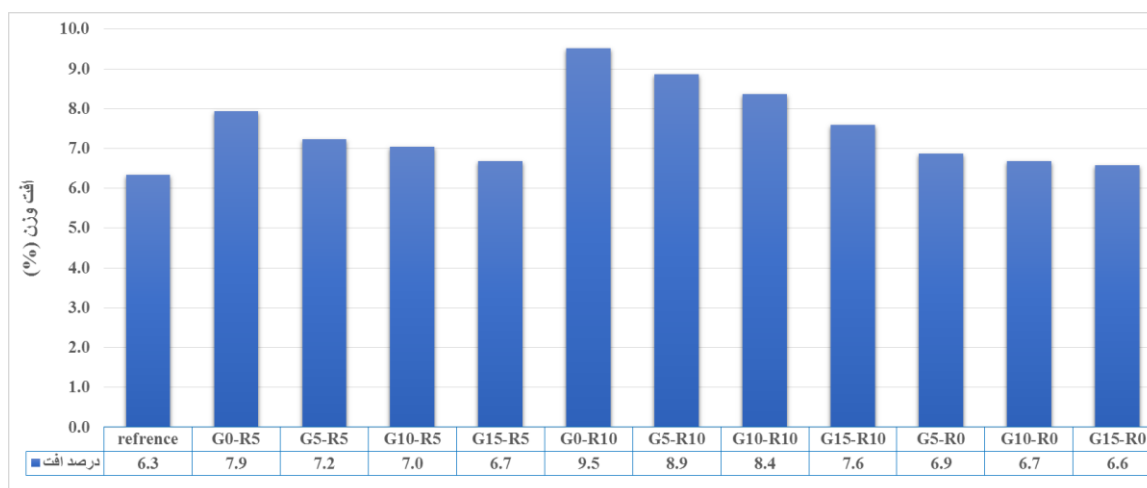


شکل ۶: (الف) دستگاه آون - (ب) کوره الکتریکی

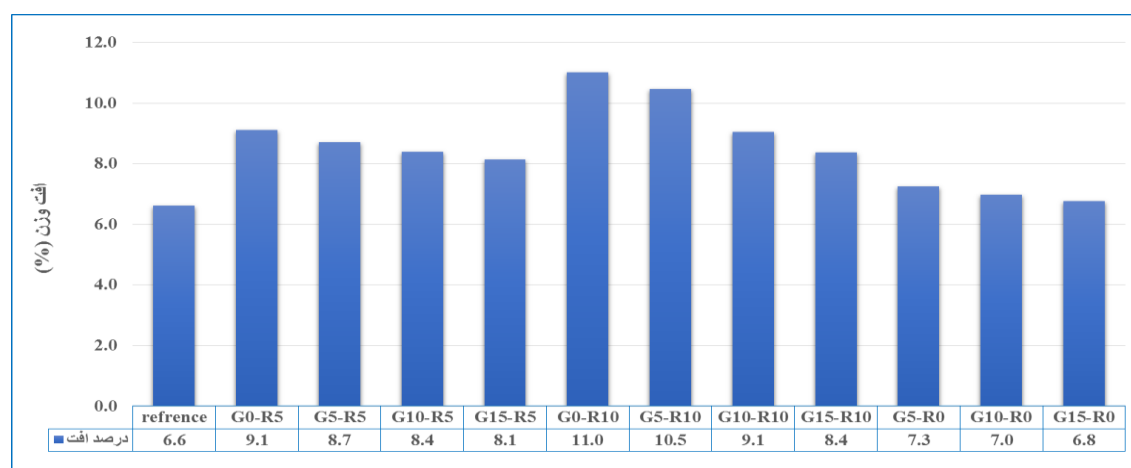
۴- نتایج آزمایشها و تحلیل ها

۴-۱- نتایج افت وزن ناشی از حرارت

وزن نمونه‌ها در دمای محیط و بعد از اعمال حرارت در دمای 600°C اندازه گیری شد. میانگین درصد افت وزنی نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای که به صورت درصدی از نسبت وزن ثانویه به اولیه می‌باشد در شکل ۷ و ۸ ارائه شده است.



شکل ۷: نمودار میانگین درصد افت وزنی ناشی از حرارت نمونه‌های مکعبی

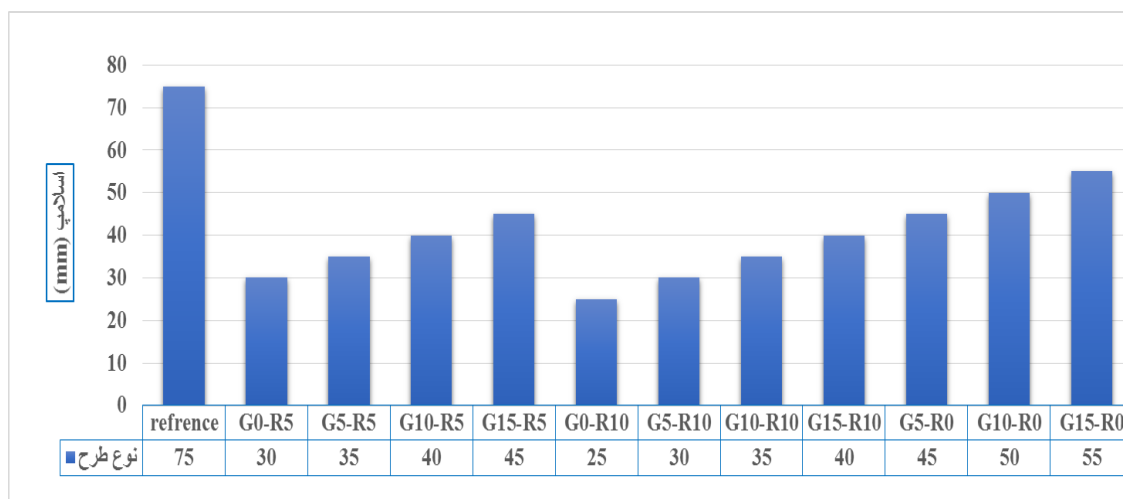


شکل ۸: نمودار میانگین درصد افت وزنی ناشی از حرارت نمونه‌های استوانه‌ای

همانگونه که ملاحظه می‌شود در تمامی نمونه‌ها بعد از اعمال حرارت افت وزن مشاهده شد. نمونه مکعبی و استوانه‌ای مرجع در بعد از حرارت به ترتیب به مقدار $6/3\%$ و $6/6\%$ افت وزنی داشتند. بیشترین درصد افت در نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای مربوط به طرح G0-R10 (طرح فاقد شیشه و 10% لاستیک) با مقدار $9/5\%$ و 11% تعیین شد. بیشترین افت نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای در طرح‌های ترکیبی مربوط به طرح G5-R10 با مقدار $8/9\%$ و $10/5\%$ ثبت شد. روند تغییرات نشان می‌دهد طرح‌های با ذرات لاستیک 10% دارای درصد افت بیستری نسبت به ذرات لاستیک 5% بودند. یعنی با افزایش مقدار ذرات لاستیک کاهش وزن نمونه‌ها در بعد از حرارت بیشتر شد و این تغییرات با افزایش درصد ذرات شیشه کاهش یافت. مهمترین عامل در میزان افت وزنی نمونه‌ها را می‌توان به سوخته شدن و از بین رفتن ذرات لاستیک تحت حرارت بالا و از دست رفتن آبهای آزاد و پیوندی بتن نسبت داد. ذرات شیشه تحت حرارت از بین نرفته و فقط از حالت جامد به حالت نیمه جامد (خمیری) و یا مرز جاری شدن تغییر می‌یابد. در طول مدت حرارت دهی دود سیاه ناشی از سوخته شدن لاستیک قابل مشاهده بود. از نظر ظاهری رنگ نمونه‌ها بعد از خارج کردن از کوره نسبت به حالت اولیه تیره تر بودند که می‌تواند ناشی از دود سوخته شدن کربن لاستیک دانست. همچنین میکروترک‌هایی بصورت گسترده در سطوح بتن قابل مشاهده بود که می‌تواند به دلیل افزایش فشار آب منفذی و دهیدراسیون سیلیکات کلسیم باشد.

۴-۲- نتایج آزمایش روانی بتن تازه

بر اساس آزمایش اسلامپ، مقدار متوسط روانی بتن مرجع برابر با ۷۵mm به دست آمده است. نتایج کلی نشانگر آن است که با اضافه کردن ذرات شیشه و لاستیک به طرح اختلاط، از میزان روانی بتن نسبت به حالت مرجع کاسته شده است. میزان این تغییرات بسته به میزان درصد شیشه و لاستیک متغیر بوده است. در طرح با ترکیب مقدار درصد شیشه ثابت، با افزایش مقدار درصد لاستیک میزان روانی بتن کاهش یافت. در دست دیگر در طرح با ترکیب مقدار درصد لاستیک ثابت، با افزایش مقدار درصد شیشه میزان روانی بتن افزایش یافت. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش و کاهش مقادیر لاستیک مقدار روانی کاهش و افزایش داشته و با افزایش و کاهش مقادیر شیشه مقدار روانی بتن افزایش و کاهش یافته است. به نظر می‌رسد ذرات لاستیک به دلیل زبری بیشتر نسبت به شیشه موجب افزایش اصطکاک داخلی ماتریس خمیر سیمان شده است. بالاترین مقدار روانی مربوط به طرح G15-R0 با ۵۵mm و افت ۲۶٪ نسبت به بتن مرجع و کمترین روانی مربوط به طرح G0-R10 با ۲۵mm و افت ۶۶٪ نسبت به بتن مرجع بوده است. در طرح‌های ترکیبی بالاترین مقدار روانی مربوط به طرح G15-R5 با ۴۵mm بدست آمد. میانگین مقادیر نتایج آزمایش اسلامپ در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۹: نمودار میانگین مقدار اسلامپ بر حسب میلی‌متر

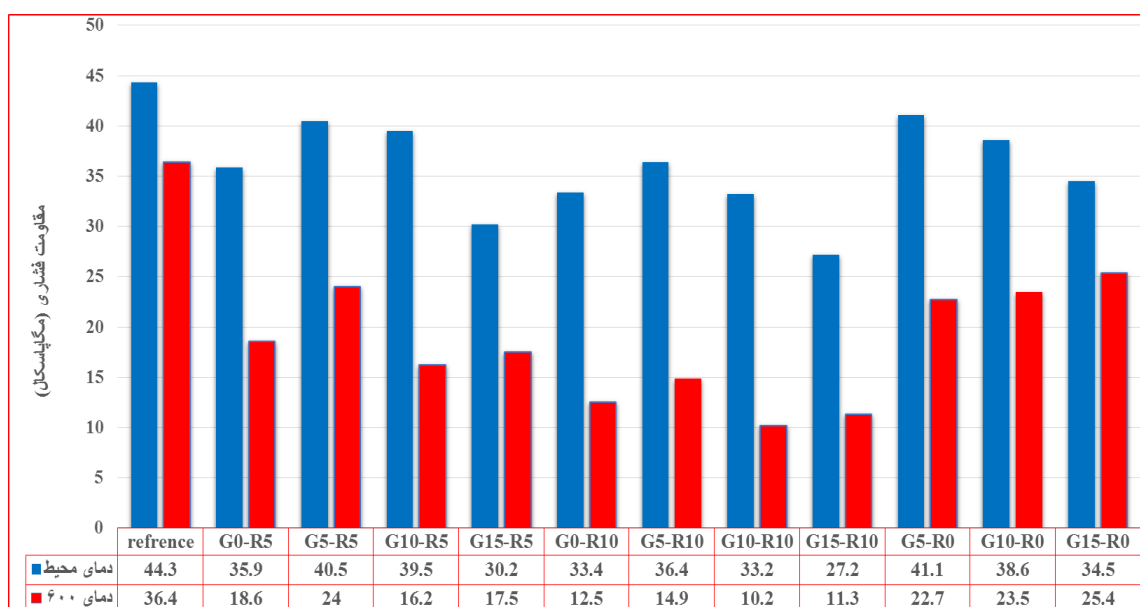
۴-۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن

نتایج مقاومت فشاری بتن با شکستن نمونه‌های مکعبی توسط جک هیدرولیکی انجام شد و با میانگین گیری نمونه‌ها، مقاومت فشاری تعیین شد. مقاومت فشاری مکعبی بتن مرجع ۴۴/۳ مگاپاسکال بدست آمد. بررسی‌ها نشان داد در شرایط دمای محیطی مقاومت فشاری تمامی نمونه‌های حاوی شیشه و لاستیک نسبت به بتن مرجع کاهش یافته است. هرچند طرح G5-R0 یعنی طرح اختلاط حاوی ۵٪ ریزدانه شیشه بدون لاستیک با مقاومت فشاری ۴۱/۱ مگاپاسکال نسبت به سایر طرح‌ها مقاومت فشاری بالاتری را نشان داد اما بالاترین مقاومت فشاری طرح ترکیبی مربوط به طرح G5-R5 یعنی ترکیب حاوی ۵٪ ریزدانه شیشه و ۵٪ ریزدانه لاستیک با مقدار ۴۰/۵ مگاپاسکال بود که نسبت به بتن مرجع ۸/۵٪ افت مقاومت را نشان داد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش مقدار درصد شیشه و لاستیک روند مقاومت فشاری نسبت به بتن مرجع کاهش یافت ضمن آنکه با افزایش مقدار درصد لاستیک، این کاهش بیشتر و مشهود تر شد. علت این امر می‌تواند به دلیل پایین بودن مدول الاستیسیته لاستیک نسبت به ریزدانه طبیعی و همچنین عدم چسبندگی مناسب بین ذرات لاستیک با ماتریس خمیر سیمان باشد.

کمترین مقدار مقاومت فشاری نیز مربوط به طرح G15-R10 با مقدار مقاومت فشاری ۲۷/۲ مگاپاسکال بود که نسبت به بتن مرجع حدود ۳۸/۶٪ افت مقاومت داشت.

در دمای ۶۰۰ °C، مقاومت فشاری تمام نمونه‌ها کاهش داشت و مقدار افت با توجه به نوع ترکیب متفاوت بود. در این حالت ریز ترک‌هایی در سطح نمونه‌ها مشخص بود. در این حالت مقاومت فشاری نمونه مکعبی مرجع برابر ۳۶/۴ مگاپاسکال بدست آمد که نسبت به حالت قبل از حرارت ۱۷/۸٪ افت داشت. هر چند طرح G15-R0 با مقاومت فشاری ۲۵/۴ مگاپاسکال نسبت سایر طرح‌ها مقاومت فشاری بالاتری را نشان داد اما همانند قبل، بالاترین مقاومت فشاری ترکیبی مربوط به طرح G5-R5 با مقدار ۲۴ مگاپاسکال بود که نسبت به بتن مرجع افت مقاومتی ۳۴٪ را نشان داد. روند نتایج نشان داد با افزایش مقدار درصد لاستیک، مقاومت فشاری رو به کاهش رفته است دلیل آن می‌تواند ناشی از تخلخل ایجاد شده بر اثر سوخته شدن ذرات لاستیک و تشکیل حفرات ریز باقیمانده در بتن باشد. تانگ و همکاران نیز اشاره داشتند که ذرات لاستیک در حرارت بالای ۴۰۰ °C کاملاً تجزیه شده و منافذی را باقی می‌گذارند که با افزایش حرارت، ریز ترک‌هایی در سطح نمونه‌های بتنی پدیدار می‌شود [۵]. اما با افزایش مقدار درصد شیشه مقاومت فشاری نمونه‌ها در بعد از اعمال حرارت کمی بهبود یافته است. علت آن می‌تواند عدم تجزیه کامل ذرات شیشه و جاری شدن ذرات در بین منافذ و کاهش تخلخل نسبی باشد.

با توجه نتایج بدست آمده مطلوب‌ترین طرح ترکیبی در دو حالت شرایط محیطی و دمای ۶۰۰ °C مربوط به طرح G5-R5 بوده است. نتایج مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط در دمای محیط و دمای ۶۰۰ °C در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



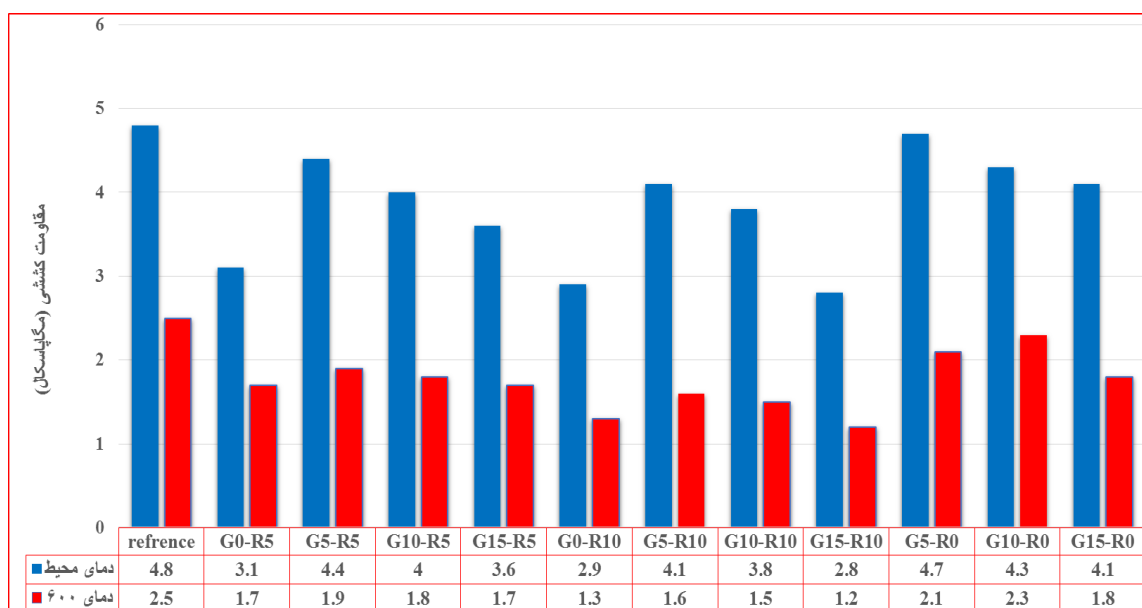
شکل ۱۰: نمودار میانگین مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط در دمای محیط و ۶۰۰ °C

۴-۴- نتایج آزمایش مقاومت کششی بتن

نتایج مقاومت کششی بتن با شکستن نمونه‌های استوانه‌ای توسط جک هیدرولیکی انجام شد و با میانگین گیری نمونه‌ها، مقاومت کششی تعیین شد. مقاومت کششی استوانه‌ای بتن مرجع ۴/۸ مگاپاسکال بدست آمد. بررسی‌ها نشان داد در شرایط دمای محیطی مقاومت کششی تمامی نمونه‌های حاوی شیشه و لاستیک نسبت به بتن مرجع کاهش یافته است. هر چند طرح G5-R0 یعنی طرح اختلاط حاوی ۵٪ ریزدانه شیشه و بدون لاستیک با مقاومت کششی ۴/۷ مگاپاسکال نسبت به سایر طرح‌ها مقاومت کششی بالاتری را نشان داد اما همانند مقاومت فشاری، بالاترین مقاومت کششی ترکیبی مربوط به طرح G5-R5 یعنی ترکیب حاوی ۵٪ ریزدانه شیشه و ۵٪

ریزانه لاستیک با مقدار ۴/۴ مگاپاسکال بود که نسبت به بتن مرجع ۸/۳٪ افت مقاومت را نشان داد. در سوی دیگر کمترین مقاومت کششی نیز مشابه مقاومت فشاری مربوط به طرح G15-R10 با مقدار مقاومت کششی ۲/۸ مگاپاسکال بود که نسبت به بتن مرجع ۴۱/۶٪ افت مقاومت را نشان داد. بررسی نتایج نشان داد در طرح‌های فاقد لاستیک یعنی طرح‌های G5-R0، G10-R0 و G15-R0 دارای مقاومت‌های نسبتاً خوبی نسبت به سایر طرح‌ها داشتند این روند با افزایش مقادیر ذرات شیشه کمتر شد. در طرح‌های فاقد شیشه یعنی طرح‌های G0-R5 و G0-R10 با افزایش مقادیر ذرات لاستیک و حذف ذرات شیشه، مقاومت کششی کمترین مقاومت‌های خود را تجربه کرد.

در دمای ۶۰۰ °C، مقاومت کششی تمام نمونه‌ها نسبت به بتن مرجع کاهش داشت و مقدار افت با توجه به نوع ترکیب متفاوت بود. مشابه قبل ریز ترک‌هایی در سطح نمونه‌ها مشخص بود در این حالت مقاومت کششی نمونه استوانه‌ای مرجع برابر ۲/۵ مگاپاسکال بدست آمد که نسبت به حالت قبل از حرارت ۴۷/۹٪ افت داشت. هرچند بالاترین مقاومت کششی مربوط به طرح G10-R0 با مقدار ۲/۳ مگاپاسکال بدست آمد که نسبت به بتن مرجع افت مقاومتی ۵۲٪ را نشان داد اما بالاترین مقاومت کششی ترکیبی همان قبل مربوط به طرح G5-R5 با مقدار ۱/۹ مگاپاسکال بود که نسبت به بتن مرجع ۲۴٪ افت را تجربه کرد. مشابه حالت نتایج حاصل از مقاومت‌ها در دمای محیط، با افزایش ذرات شیشه و لاستیک، از مقاومت کششی نمونه‌ها کاسته شد. مشابه نتایج مقاومت فشاری، افزایش مقادیر ذرات لاستیک اثرات مشهودتری بر افت مقاومت کششی بتن داشت که دلیل آن را می‌توان سوختن و از بین رفتن ذرات لاستیک و بوجود آمدن منافذ ریز و تخلخل در بتن باشد. نتایج میانگین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای در دمای محیط و ۶۰۰ °C در شکل ۱۱ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۱: نمودار میانگین مقاومت کششی طرح‌های اختلاط در دمای محیط و ۶۰۰ °C

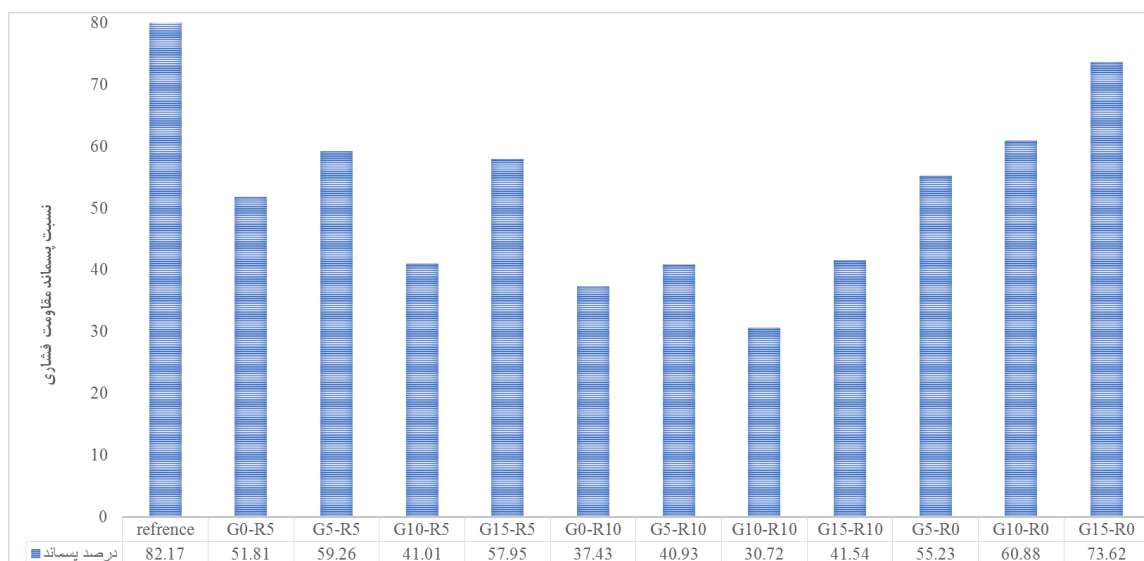
۴-۵- نسبت پسماند مقاومت

نسبت پسماند مقاومت شاخصی برای بیان درصد میزان افت مقاومت‌ها در بعد از اعمال حرارت نسبت به دمای اولیه که در این پژوهش همان دمای محیط بوده اعمال شده است. با استفاده از این شاخص می‌توان درصد افت مقاومت‌های کششی و فشاری را در

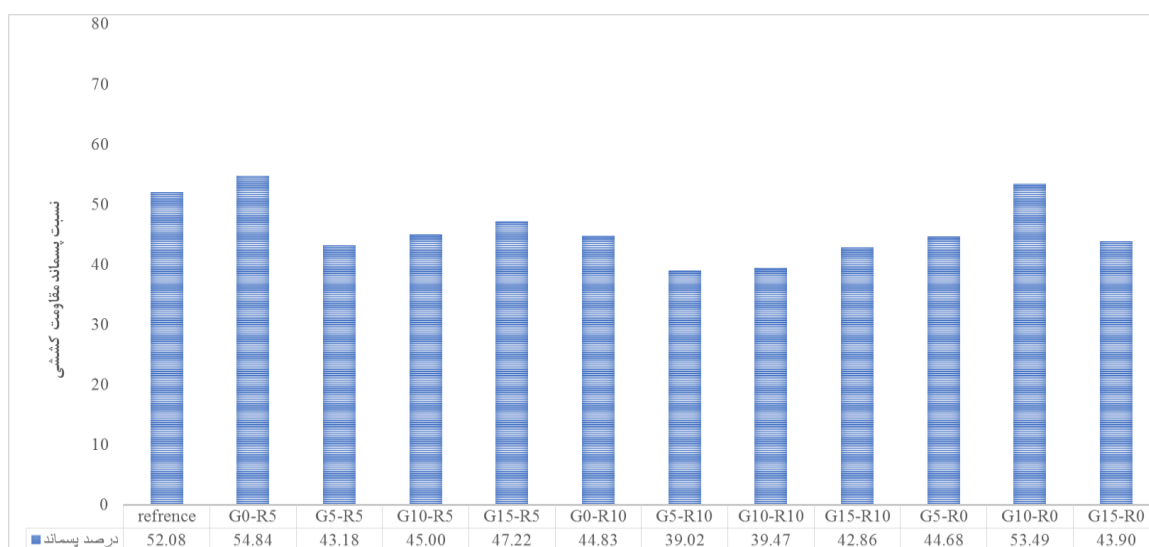
حالت‌های مختلف بررسی نمود. نتایج مقاومت‌های کششی و فشاری در قیل و بعد از اعمال حرارت و همچنین درصد نسبت پسماند مقاومت آنها در جدول ۳ و شکل ۱۲ الف و ۱۲-ب قابل مشاهده می‌باشند.

جدول ۳: میانگین مقاومت فشاری و کششی در دمای محیط و 600°C و نسبت پسماند طرح‌های اختلاط

کد طرح	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)		مقاومت کششی (مگاپاسکال)		نسبت پسماند فشاری (درصد)	نسبت پسماند کششی (درصد)
	محیط	600°C	محیط	600°C		
reference	۴۴/۳	۳۶/۴	۴/۸	۲/۵	۸۲/۱۷	۵۲/۰۸
G0-R5	۳۵/۹	۱۸/۶	۳/۱	۱/۷	۵۱/۸۱	۵۴/۸۴
G5-R5	۴۰/۵	۲۴	۴/۴	۱/۹	۵۹/۲۶	۴۳/۱۸
G10-R5	۳۹/۵	۱۶/۲	۴	۱/۸	۴۱/۰۱	۴۵/۰۰
G15-R5	۳۰/۲	۱۷/۵	۳/۶	۱/۷	۵۷/۹۵	۴۷/۲۲
G0-R10	۳۳/۴	۱۲/۵	۲/۹	۱/۳	۳۷/۴۳	۴۴/۸۳
G5-R10	۳۶/۴	۱۴/۹	۴/۱	۱/۶	۴۰/۹۳	۳۹/۰۲
G10-R10	۳۳/۲	۱۰/۲	۳/۸	۱/۵	۳۰/۷۳	۳۹/۴۷
G15-R10	۲۷/۲	۱۱/۳	۸/۲	۱/۲	۴۱/۵۴	۴۲/۸۶
G5-R0	۴۱/۱	۲۲/۷	۴/۷	۲/۱	۵۵/۲۳	۴۴/۶۸
G10-R0	۳۸/۶	۲۳/۵	۴/۳	۲/۳	۶۰/۸۸	۵۳/۴۹
G15-R0	۳۴/۵	۲۵/۴	۴/۱	۱/۸	۷۳/۶۲	۴۳/۹۰



شکل ۱۲-الف: نمودار میانگین درصد پسماند مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط



شکل ۱۲-ب: نمودار میانگین درصد پسماند مقاومت کششی طرح‌های اختلاط

همانگونه که ملاحظه می‌شود بیشترین مقدار پسماند مقاومت‌های فشاری و کششی مربوط به طرح مرجع به ترتیب با مقدار 82.17% و 52.08% بدست آمده است که بیان می‌کند مقاومت فشاری و کششی نسبت به حالت پس از اعمال حرارت به ترتیب به اندازه $117/83\%$ و $92/47\%$ افت داشته است و کمترین میزان افت در میان سایر طرح‌های اختلاط را دارا می‌باشد. در بین طرح‌های ترکیبی کمترین میزان افت (بالاترین میزان مقاومت) در فشار را طرح $G5-R5$ ($74/40\%$) و در کشش طرح $G15-R5$ ($78/52\%$) می‌باشد که نشان می‌دهد تقریباً نیمی از مقاومت خود را از دست داده است. اندازه نسبت افت مقاومت طرحها در فشار بین 26% الی 69% و در کشش بین 45% الی 61% درصد متفاوت بوده است. با بررسی نمودار فوق پس از اعمال حرارت، میزان آسیب پذیری نمونه‌ها در کشش بیشتر از فشار بوده است یعنی آنکه پس از اعمال حرارت $600^{\circ}C$ عملکرد فشاری مطلوب تر از عملکرد کششی بوده است. هر چند بسته به نوع طرح می‌تواند متفاوت باشد. با بررسی پسماند مقاومتها می‌توان روند تغییرات را بصورت زیر بیان داشت:

مقاومت کششی	مقاومت فشاری	۰/۵ > ۱/۰ > ۱/۱۵	۰/۵ > ۱/۰ > ۱/۱۵
		۱/۰ > ۱/۱۵ > ۱/۰	۱/۰ > ۱/۱۵ > ۱/۰
		۱/۱۵ > ۱/۰ > ۰/۵	۱/۱۵ > ۱/۰ > ۰/۵
		مقادیر شیشه	مقادیر شیشه

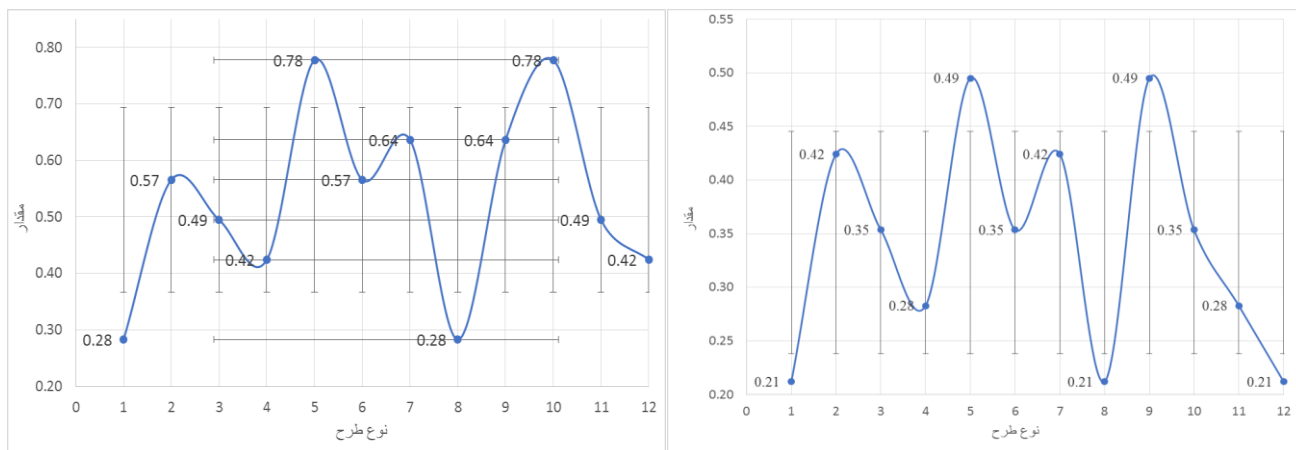
در پسماند مقاومت فشاری با طرح‌های ۰/۵٪ و ۱/۰٪ لاستیک ثابت، با افزایش مقدار شیشه از ۰/۵٪ به ۱/۰٪ افت مقاومت بیشتر و با افزایش مقدار شیشه از ۱/۰٪ به ۱/۱۵٪ افت مقاومت کمتر شده است. در طرح‌های فاقد لاستیک با افزایش مقادیر شیشه افت مقاومت همواره نزولی است. اما در پسماند مقاومت‌های کششی روند تغییرات الگوی مشخصی را دنبال نکرد. در پسماند مقاومت کششی با طرح‌های ۰/۵٪ و ۱/۰٪ لاستیک ثابت، با افزایش مقدار شیشه از ۰/۵٪ به ۱/۰٪ افت مقاومت بیشتر شده است در حالیکه با افزایش مقدار شیشه از ۱/۰٪ به ۱/۱۵٪ در طرح با لاستیک ۰/۵٪ افت مقاومت بیشتر و در طرح با لاستیک ۱/۰٪ افت مقاومت کمتر شده است. روند تغییرات در طرح‌های فاقد لاستیک نیز شبیه به طرح با لاستیک ۱/۰٪ ثابت می‌باشد.

۴-۶- انحراف از معیار

انحراف از معیار و دامنه تغییرات نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای به تفکیک هر طرح محاسبه و مقادیر به دست آمده در حد مطلوب و قابل قبول بوده است. شرح مقادیر در جدول ۴ و نتایج حاصل بصورت نمودار استاندارد در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

جدول ۴: مقادیر انحراف از معیار و دامنه تغییرات نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای

کد طرح	نمونه‌های مکعبی		نمونه‌های استوانه‌ای	
	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۱	نمونه ۲
reference	۴۴/۵	۴۴/۱	۴/۹۵	۴/۶۵
G0-R5	۳۶/۳	۳۵/۵	۳/۴۰	۲/۸۰
G5-R5	۴۰/۱۵	۴۰/۸۵	۴/۱۵	۴/۶۵
G10-R5	۳۹/۸	۳۹/۲	۴/۲۰	۳/۸۰
G15-R5	۳۰/۷۵	۲۹/۶۵	۳/۹۵	۳/۲۵
G0-R10	۳۳/۰۰	۳۳/۸	۲/۶۵	۳/۱۵
G5-R10	۳۶/۸۵	۳۵/۹۵	۴/۴۰	۳/۸۰
G10-R10	۳۳/۴	۳۳/۰۰	۳/۶۵	۳/۹۵
G15-R10	۲۷/۶۵	۲۶/۷۵	۳/۱۵	۲/۴۵
G5-R0	۴۰/۵۵	۴۱/۶۵	۴/۴۵	۴/۹۵
G10-R0	۳۸/۹۵	۳۸/۲۵	۴/۵۰	۴/۱۰
G15-R0	۳۴/۲	۳۴/۸۰	۴/۲۵	۳/۹۵



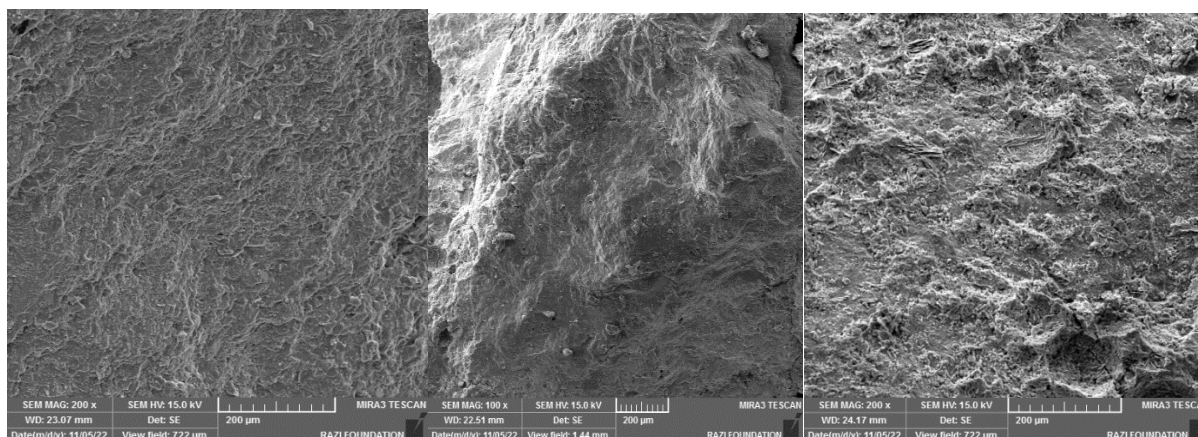
الف - نمونه‌های مکعبی

ب - نمونه‌های استوانه‌ای

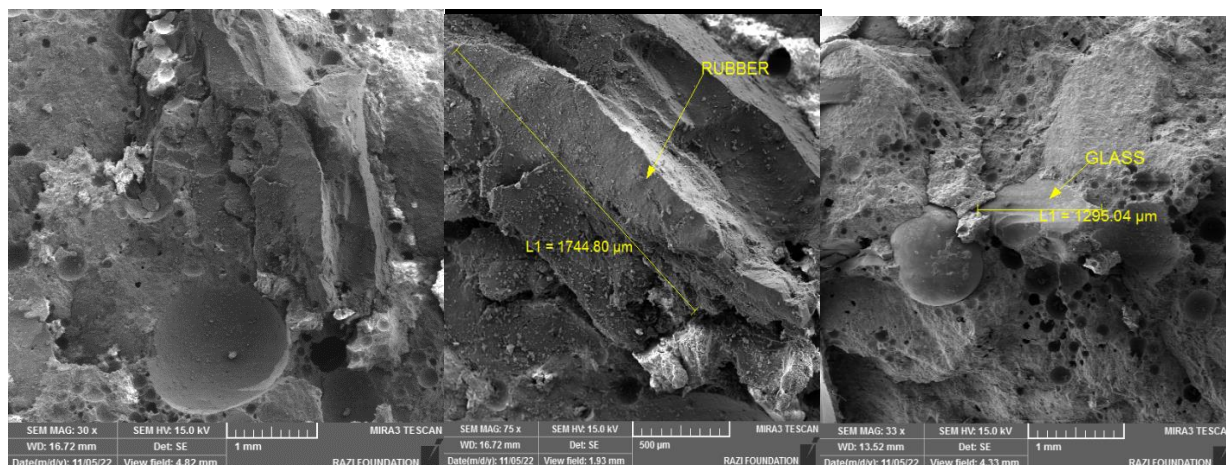
شکل ۱۳: نمودار انحراف از معیار نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای

۵- آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

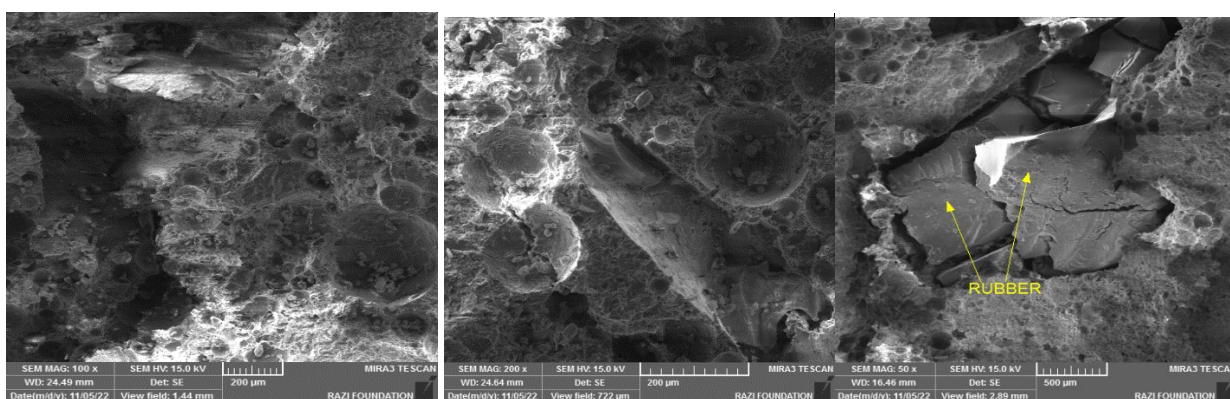
به منظور درک و بینش بیشتر از رفتار ریزساختار نمونه‌ها در قبل و بعد از اعمال حرارت، آزمایش میکروسکوپ الکترونی در آزمایشگاه بنیاد علوم کاربردی رازی انجام شد.



الف - بتن مرجع قبل از اعمال حرارت



ب: بتن حاوی شیشه و لاستیک بازیافتی قبل از اعمال حرارت



ج: بتن حاوی شیشه و لاستیک بازیافتی بعد از اعمال حرارت

شکل ۱۳: تصاویر آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تاثیر کاربردی استفاده از ذرات شیشه و لاستیک بازیافتی به عنوان جایگزینی بخشی از ریزدانه طبیعی (ماسه رودخانه ای) و اثر آن بر رفتار مقاومت فشاری و کششی و کارایی بتن در دمای محیط و پس از قرارگیری در معرض دمای 600°C پرداخته شد. اندازه ذرات شیشه $0/85-2$ و با درصدهای وزنی 5% ، 10% و 15% و اندازه ذرات لاستیک $1-3$ و با درصدهای حجمی 5% و 10% جایگزین ماسه در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح ذیل می باشد:

۱- پس از اعمال حرارت 600°C ، در تمامی نمونه ها افت وزنی مشاهده شد و مقدار آنها بسته به نوع طرح اختلاطها متفاوت بودند. میزان افت نمونه مکعبی و استوانه ای بتن مرجع به ترتیب $6/3\%$ و $6/6\%$ بود. بیشترین افت نمونه مکعبی و استوانه ای مربوط به طرح G0-R10 با مقدار $9/5\%$ و 11% و در نمونه ترکیبی مربوط به طرح G5-R10 با مقدار $8/9\%$ و $10/5\%$ مشاهده شد. با افزایش درصد لاستیک از 5% به 10% میزان افت وزنی نمونه ها بیشتر بود که دلیل آن را می توان به سوختن لاستیک در معرض حرارت بالا و تبخیر آب آزاد و شیمیایی بتن نسبت داد.

۲- میزان اسلامپ (روانی) بتن تمامی طرح ها از طرح بتن مرجع (75mm) کمتر بود. بررسی ها نشان داد با افزایش مقادیر ذرات لاستیک از میزان اسلامپ کاسته و با کاهش مقادیر میزان اسلامپ افزایش یافت. اما از طرف دیگر با اضافه کردن مقادیر ذرات شیشه نتایج معکوس شد و با کاهش مقادیر ذرات شیشه از میزان اسلامپ کاسته و با افزایش آن میزان اسلامپ افزایش یافت. دلیل آن را می توان به زبری بیشتر ذرات لاستیک نسبت به شیشه و افزایش اصطکاک داخلی در خمیر ماتریس سیمان دانست. بیشترین میزان اسلامپ

- مربوط به طرح G15-R0 با مقدار 55mm و کمترین آن مربوط به طرح G0-R10 با مقدار 25mm قابل مشاهده بود که نسبت به بتن مرجع به ترتیب 26٪ و 66٪ افت داشت. در طرح‌های ترکیبی طرح G15-R5 با 45mm بیشترین مقدار اسلامپ را نشان داد.
- ۳- قبل و بعد از اعمال حرارت، مقاومت فشاری تمامی طرح‌های دارای ذرات شیشه و لاستیک کمتر از طرح مرجع بود و با افزایش مقادیر شیشه و لاستیک مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافت. بعد از اعمال حرارت، افت مقاومتی تمامی نمونه‌ها نسبت به حالت دمای محیط بیشتر بود. با افزایش مقدار درصد لاستیک، کاهش مقاومت بیشتر و مشهود تر شد و دلیل آن سوختن و از بین رفتن ذرات لاستیک و پدیدار شدن حفرات ریز و ایجاد تخلخل در بتن بود. اما با افزایش مقدار درصد شیشه روند مقاومت فشاری کمی بهبود داشت و دلیل آن را می‌توان به عدم تجزیه شیشه و جاری شدن ذرات شیشه در بین منافذ و کاهش تخلخل نسبی بتن دانست. در دو حالت قبل و بعد از حرارت، بالاترین مقاومت فشاری طرح ترکیبی مربوط به طرح G5-R5 یعنی ترکیب حاوی 5٪ ریزدانه شیشه و 5٪ ریزدانه لاستیک جایگزین ماسه طبیعی بود که به عنوان طرح بهینه انتخاب شد.
- ۴- در قبل و بعد از اعمال حرارت، مقاومت کششی تمامی طرح‌های دارای ذرات شیشه و لاستیک کمتر از طرح مرجع بود و با افزایش مقادیر شیشه و لاستیک مقاومت کششی نمونه‌ها کاهش یافت. بعد از اعمال حرارت، افت مقاومتی تمامی نمونه‌ها نسبت به حالت دمای محیط بیشتر بود. در دو حالت قبل و بعد از حرارت مشابه نتایج مقاومت فشاری، بالاترین مقاومت کششی طرح ترکیبی مربوط به طرح G5-R5 یعنی ترکیب حاوی 5٪ ریزدانه شیشه و 5٪ ریزدانه لاستیک جایگزین ماسه طبیعی بود که به عنوان طرح بهینه انتخاب شد.
- ۵- از نظر ظاهری بعد از اعمال حرارت، رنگ نمونه‌ها تیره تر و ترک‌های مویی بصورت گسترده در سطوح بتن قابل مشاهده بود. دلیل عمده تغییرات رنگ را می‌توان به اثر سوخته شدن کربن لاستیک‌ها و علت میکروترک‌ها را از دست رفتن آب پیوندی و فرایند دهیدراسیون (آب زدایی) ژل سیلیکات کلسیم و افزایش فشار منفذی درون بتن نسبت داد. همچنین مشاهده شد که آسیب پذیری لاستیک نسبت به حرارت بیشتر از شیشه بوده است.
- ۶- در قبل و بعد از اعمال حرارت، نسبت پسماند مقاومت فشاری و کششی تمامی طرح‌ها نسبت به طرح مرجع کاهش داشت. در بین طرح‌های ترکیبی کمترین میزان افت (بالاترین میزان مقاومت) در فشار مربوط به طرح G5-R5 (40/74٪) و همچنین در کشش طرح G15-R5 (52/78٪) بود. افت مقاومت طرح‌ها در فشار بین 26٪ الی 69٪ و در کشش بین 45٪ الی 61٪ متفاوت بوده است. پس از اعمال حرارت 600 °C میزان آسیب پذیری در کشش بیشتر از فشار بوده و نمونه‌ها در فشار عملکرد مطلوب تری نسبت به کشش داشتند.
- ۷- بر اساس این تحقیق، استفاده از 5٪ شیشه و 5٪ لاستیک (G5-R5) به عنوان جایگزین در بخشی از ریزدانه طبیعی بتن (ماسه) بهینه بوده و عملکرد مناسب تر و مطلوب تری را در کشش و فشار نسبت به سایر طرح‌ها در دمای محیط و دمای 600 °C داشته است.
- ۸- مقادیر انحراف از معیار نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای بین 0/21 الی 0/78 به دست آمد که در حد مطلوب و قابل قبول می‌باشند.
- ۹- هرچند استفاده از طرح اختلاط بهینه به عنوان بخشی از مصالح ریزدانه بتن، مقاومت فشاری و کششی را نسبت نمونه مرجع کاهش داد اما نتایج نسبتاً قابل قبولی را در شرایط دمای محیط طبیعی (قبل از اعمال حرارت) به همراه داشت. بنابراین می‌توان در شرایط عادی مصرف آن را امکان پذیر دانست و استفاده از مصالح ریزدانه طبیعی را به حداقل رساند.
- در پژوهش‌های آینده می‌توان تاثیر استفاده از افزودنی‌هایی همانند میکروسیلیس و پوزولانها را بر خواص مکانیکی بتن حاوی ریزدانه از جنس شیشه و لاستیک بازیافتی در قبل و بعد از قرارگیری در معرض حرارت بالا را بررسی نمود.

منابع

1. Roychand, R., et al. (2020). A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 237: p. 117651.
2. Kazmi, S.M.S., M.J. Munir, and Y.-F. Wu. (2021). Application of waste tire rubber and recycled aggregates in concrete products: A new compression casting approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 167: p. 105353.
3. Li, L.-J., et al. (2016). Mechanical characterization of waste-rubber-modified recycled-aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 124: p. 325-338.
4. Khorami, Morteza. (2010). Experimental Investigation on Mechanical Characteristics and Environmental Effects on Rubber Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 4: p. 17-23.
5. Tang, Y., et al. (2021). Fracture behavior of a sustainable material: Recycled concrete with waste crumb rubber subjected to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 318: p. 128553.
6. Amiri, M., et al. (2021). Evaluating the synergic effect of waste rubber powder and recycled concrete aggregate on mechanical properties and durability of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15: p. e00639.
7. Aslani, Farhad. (2019). Properties of High-Performance Self-Compacting Rubberized Concrete Exposed to High Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(5).
8. Corinaldesi, V. and J. Donnini. (2019). 4- Waste rubber aggregates, in *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, J. de Brito and F. Agrela, Editors., Woodhead Publishing. p. 87-119.
9. Taha, M.M.R., Mechanical. (2008). Fracture, and Microstructural Investigations of Rubber Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, p. 20(10).
10. Shen, W., et al. (2013). Investigation on polymer-rubber aggregate modified porous concrete. *Construction and Building Materials*, 38: p. 667-674.
11. Saberian, M., et al. (2019). Recycled concrete aggregate mixed with crumb rubber under elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 222: p. 119-129.
12. Baskar, S. (2015). Experimental Investigations on Partial Replacement of Cement Using Glass Powder. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 8(4).
13. Chen, B., et al. (2020). Study on the fire resistance performance of cementitious composites containing recycled glass cullets (RGCs). *Construction and Building Materials*, 242: p. 117992.
14. Dong, W., W. Li, and Z. Tao. (2021). A comprehensive review on performance of cementitious and geopolymeric concretes with recycled waste glass as powder, sand or cullet. *Resources, Conservation and Recycling*, 172: p. 105664.
15. Tamanna, N., R. Tuladhar, and N. Sivakugan. (2020). Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete. *Construction and Building Materials*, 239: p. 117804.
16. Su, H., et al. (2015). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, 91: p. 288-296.
17. Hamada, H., et al. (2022). Effect of recycled waste glass on the properties of high-performance concrete: A critical review. *Case Studies in Construction Materials*, 17: p. e01149.
18. Guo, M.-Z., T.-C. Ling, and C.S. Poon. (2021). Stress-strain behaviour of cement mortars containing recycled glass during and after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 118: p. 103970.
19. Terro, M.J. (2006). Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures. *Building and Environment*, 41(5): p. 633-639.
20. Khan, M.N.N. and P.K. Sarker. (2020). Effect of waste glass fine aggregate on the strength, durability and high temperature resistance of alkali-activated fly ash and GGBFS blended mortar. *Construction and Building Materials*, 263: p. 120177.
21. Tang, Y., Feng W., Feng W., Chen J., Bao D., Li L. (2021). Compressive properties of rubber-modified recycled aggregate concrete subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 268: p. 121181.
22. Kunjie, F., L. Jiabin, and Y. Min. (2022). Compressive stress-strain relationship for stressed concrete at high temperatures. *Fire Safety Journal*, 130.
23. Omoding, N., L.S. Cunningham, and G.F. Lane-Serff. (2021). Effect of using recycled waste glass coarse aggregates on the hydrodynamic abrasion resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 268: p. 121177.
24. Salahuddin, H., et al. (2019). Effects of elevated temperature on performance of recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 202: p. 415-425.
25. ASTM C150/C150M-21. (2021). Standard Specification for Portland Cement, in, ASTM International, West Conshohocken.
26. INSO 389. (2020). Portland cement - Specifications, 4th Revision. Iranian National Standardization Organization,.

27. ASTM C33/C33M-18. (2018). Standard Specification for Concrete Aggregates, in, ASTM International, West Conshohocken.
28. ASTM C127-15. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, in, ASTM International, West Conshohocken.
29. ASTM C128-15. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, in, ASTM International, West Conshohocken.
30. ASTM C192/C192M-19. (2019). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, in, ASTM International, West Conshohocken.
31. ASTM C511-21. (2021). Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes, in, ASTM International, West Conshohocken.
32. BS EN, 12390-3. (2019). Testing Hardened Concrete-Part 3: Compressive Strength of Test Specimens, British Standards Institution.
33. INSO 1608-3. (2015). Hardened Concrete-Part 3: Compressive Strength of Test Specimens-Test Method, 1st.Edition, in, Iranian National Standardization Organization.
34. ASTM C496/C496M-17. (2017). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, in, ASTM International, West Conshohocken.
35. ASTM C143/C143M-20. (2020). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, in, ASTM International, West Conshohocken.
36. Seddighi F, Pachideh G., Salimbahrami S.B. (2021). A study of mechanical and microstructures properties of autoclaved aerated concrete containing nano-graphene, Journal of building engineering, Vol. 43.
37. Pachideh G., Gholhaki M. (2020). An experimental into effect of temperature rise on mechanical and visual characteristics of concrete containing recycled metal spring. Structural Concrete, 22.
38. Pachideh G., Gholhaki M., Ketabdari H. (2020). Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars, Journal of Building Engineering, Volume 29.
39. Mohseni pour asl J., Gholhaki M., Sharbatdar M., Pachideh G. (2022). An experimental investigation into the mechanical performance and microstructure of cementitious mortars containing recycled waste materials subjected to various environments, Journal of Building Engineering, Volume 61.