



## رفتار حرارتی بتن با لاستیک بازیافتی و پودر شیشه به عنوان بخشی از ریزدانه و سیمان

رضا ثقفی لاسمی<sup>۱</sup>، مسعود ضیائی<sup>۲\*</sup>، محمد هادی عزیزاده الیزئی<sup>۱</sup>، رضا اسمعیل آبادی<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گرمسار، گرمسار، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۹/۱۰

### کلمات کلیدی:

بتن

لاستیک ضایعاتی

پودر شیشه

مشخصات مکانیکی

حرارت بالا

**خلاصه:** یکی از راهکارهای بازیافت مواد ضایعاتی مانند لاستیک تایر و شیشه، استفاده از آن‌ها در بتن می‌باشد که علاوه بر کمک به پاک‌سازی محیط زیست، باعث برداشت کمتر از معادن طبیعی و کاهش آلودگی حاصل از تولید سیمان می‌شود. در این مقاله تاثیر جایگزینی همزمان ذرات لاستیک ضایعاتی به جای بخشی از سنگدانه ریز و پودر شیشه به جای بخشی از سیمان، بر کارایی و مشخصات مکانیکی بتن، در دمای محیط و پس از اعمال حرارت  $600^{\circ}\text{C}$ ، مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین میزان تاثیر اندازه ذرات لاستیک بر کارایی و مشخصات مکانیکی، پیش و پس از اعمال حرارت، از دو اندازه متفاوت ذرات لاستیک ۱-۱۵ mm و ۳-۵ mm استفاده شد. در کل ۱۳ طرح اختلاط ساخته شد، که جز طرح مرجع، باقی دارای ترکیب ذرات لاستیک جایگزین ماسه در مقادیر حجمی ۵٪ و ۱۰٪، در دو اندازه ذرات لاستیک و پودر شیشه جایگزین سیمان در مقادیر وزنی ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ بوده‌اند. برای بررسی کارایی بتن‌های دارای لاستیک و پودر شیشه از آزمایش اسلامپ استفاده شد، همچنین مقاومت‌های فشاری، کششی، نسبت مقاومت کششی به فشاری، پیش و پس از اعمال حرارت و افت وزن ناشی از اعمال حرارت، مورد بررسی قرار گرفت. برای درک رفتار مواد ضایعاتی از تصاویر میکروسکوپ الکترونی و طیف‌سنجی استفاده گردید. نتایج در هر دو حالت حرارتی نشان داد ۵٪ لاستیک و ۱۰٪ پودر شیشه، همچنین اندازه ۳-۵ mm ذرات لاستیک، بهترین نتایج را از نظر مقاومت‌های فشاری و کششی، در بین طرح‌های اختلاط دارای لاستیک و پودر شیشه، ارائه داده‌اند.

می‌نماید. می‌توان از لاستیک ضایعاتی به عنوان جایگزین سنگدانه‌های طبیعی و یا سیمان استفاده نمود [۳]. استفاده از خرده لاستیک‌های ضایعاتی به عنوان جایگزین سنگدانه طبیعی می‌تواند علاوه بر کمک به پاک‌سازی محیط زیست، باعث کاهش بهره برداری از منابع طبیعی (معادن شن و ماسه) و خطرات زیست محیطی ناشی از برداشت آن می‌شود.

در سال‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه تاثیر استفاده از ذرات لاستیک ضایعاتی به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه طبیعی بر رفتار و خواص مکانیکی بتن انجام پذیرفته است. به عنوان مثال حسنی و همکاران [۴] تاثیر استفاده از ذرات لاستیک جایگزین سنگدانه ریز را بررسی کرده و مشخص کردند که افزایش لاستیک، باعث کاهش چگالی، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته شد، اما با افزایش لاستیک، میانگین نسبت میرایی بتن افزایش یافته و در همه مقادیر بیشتر از بتن بدون لاستیک بوده است. در تحقیق توماس و گوپتا [۵]، در مورد تاثیر میزان لاستیک جایگزین شده سنگدانه ریز طبیعی در بتن مشخص شد مقاومت فشاری و حمله سولفاته در

### ۱- مقدمه

انباشت حجم وسیعی از مواد ضایعاتی زیست تجزیه ناپذیر مانند لاستیک تایرهای فرسوده و شیشه، نگرانی‌های جدی‌ای از نظر محیطی زیست در سطح جهان ایجاد نموده است.

با توجه به رشد سریع جمعیت و توسعه حمل و نقل، تولید تایرهای وسایل نقلیه به طور تصاعدی افزایش یافته و متعاقب آن تعداد تایرهای فرسوده ضایعاتی نیز افزایش می‌یابد [۱]. دفن تایرهای ضایعاتی به علت دارا بودن ترکیبات سمی، می‌تواند عامل تهدیدهای اکولوژیکی باشد. اگر چه سوختن لاستیک تایر دشوار است، اما همواره این خطر وجود دارد و در صورت سوختن، باعث تصاعد گازهای سمی می‌گردد [۲]. بر این اساس بازیافت این مواد از هر لحاظ مفید است. یکی از راهکارهای بازیافت لاستیک تایرهای ضایعاتی استفاده از آن در تولید بتن است، که پر مصرف‌ترین ماده در صنعت ساختمان‌سازی بوده و حجم زیادی از منابع طبیعی را مصرف

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.ziyaei@fmgarmsar.ac.ir



بتن‌های دارای لاستیک، کمتر از بتن بدون لاستیک بوده اما برای بتن دارای لاستیک تا میزان ۱۲/۵٪ مقاومت در برابر جذب آب و کرنش‌ها شدن بهتری مشاهده شد. در تحقیق انجام شده توسط گزاوگلو و همکاران [۶] از دو اندازه لاستیک جایگزین شده سنگدانه‌های ریز و درشت استفاده گردید و مشخص شد که استفاده از لاستیک باعث کاهش مقاومت‌های فشاری و کششی و مدول الاستیسیته در بتن شد، همچنین کاهش این مقاومت‌ها در مقادیر بیشتر لاستیک جایگزین شده و اندازه درشت‌تر لاستیک بیشتر مشخص شد. اندازه ذرات لاستیک نیز بر خواص بتن تاثیرگذار است. در تحقیق انجام شده اصلانی و همکاران [۷] از سه اندازه ذرات لاستیک ۱-۳ mm و ۲-۵ mm و ۵-۱۰ mm، در مقادیر مختلف جایگزینی در بتن خودتراکم<sup>۱</sup> استفاده شد. مشخص شد که بتن‌های دارای لاستیک با اینکه مقادیر مجاز جریان اسلامپ را تامین نمودند اما توانایی عبور کمتری داشته و بتن‌های خودتراکم دارای لاستیک ۲-۵ mm به بالاترین مقاومت‌های فشاری و کششی دست یافتند و بتن‌های دارای لاستیک ۵-۱۰ mm ضعیف‌ترین نتایج را به دست آوردند. بیشترین مقاومت فشاری در لاستیک ۱۰٪ مشاهده شد. در تحقیق انجام شده توسط لی و همکاران [۸] با استفاده از سه اندازه ذرات لاستیک، در مقادیر مختلف جایگزینی سنگدانه ریز خواص مکانیکی بتن با سنگدانه بازیافتی<sup>۲</sup> بررسی شد و نتایج نشان داد که استفاده از لاستیک باعث کاهش چگالی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی شده و با افزایش میزان لاستیک و کاهش اندازه ذرات آن، کاهش در چگالی و مقاومت‌های فشاری و کششی آشکارتر گردید اما افزودن لاستیک، شکل‌پذیری بتن سنگدانه بازیافتی را افزایش داد. وجود ذرات لاستیک در بتن علاوه بر تاثیر بر خواص مکانیکی، بر کارایی آن نیز تاثیرگذار است. تحقیق کاروناراتنا و همکاران [۹] نشان داد، وجود و افزایش ذرات لاستیک در بتن باعث کاهش کارایی بتن می‌شود.

در زمینه رفتار بتن دارای لاستیک، پس از قرارگیری در معرض حرارت‌های بالا نیز تحقیقاتی صورت گرفته. مارکز و همکاران [۱۰] خواص مکانیکی بتن‌های دارای لاستیک جایگزین شده سنگدانه‌های ریز و درشت طبیعی، پس از قرارگیری در معرض حرارت‌های ۴۰۰°C تا ۸۰۰°C را بررسی کرده و مشخص شد که در دمای ۸۰۰°C، بتن‌های دارای لاستیک بیشترین کاهش مقاومت پسماند فشاری را نسبت بتن مرجع به علت سوختن ذرات لاستیک داشت. گولماین و همکاران [۱۱] نشان دادند که ذرات لاستیک در دمای ۲۰۰°C شروع به سوختن کرده که در دمای بالاتر باعث کاهش خواص مکانیکی بتن دارای لاستیک می‌شود.

- 1 Self-Compacting Concrete (SCC)
- 2 Recycled Aggregate Concrete (RAC)

تحقیقات گوپتا و همکاران [۱۲] نیز نشان دهنده کاهش سریع خواص پسماند بتن دارای لاستیک جایگزین سنگدانه ریز در دمای بالای ۱۵۰°C است. تحقیقات موسوی مهر و نعمت زاده [۱۳] در دماهای ۲۰۰°C تا ۸۰۰°C نشان داد که جایگزینی کمتر لاستیک سبب کاهش کمتر مقاومت‌های فشاری و کششی و مدول الاستیسیته شده و با افزایش حرارت، کاهش وزن در بتن‌های دارای لاستیک نسبت به مرجع بیشتر بوده است. تانگ و همکاران [۱۴]، میزان ۴٪ جایگزینی لاستیک با سنگدانه ریز را، به علت عملکرد بهتر فشاری در حرارت‌های بالا پیشنهاد نمودند.

شیشه ضایعاتی نیز به علت زیست تجزیه ناپذیر بودن، مشکلات محیط زیستی متعددی ایجاد می‌نماید. با اینکه شیشه از لحاظ تتوریک کاملاً قابل بازیافت است، اما به علت محدودیت‌های موجود از لحاظ کیفی برای بازتولید شیشه، بخش قابل توجهی از آن از چرخه بازیافت دور مانده و در محل‌های دفن زباله دفع می‌شوند [۱۵]. در سال‌های اخیر در زمینه استفاده از شیشه ضایعاتی در ساخت بتن به عنوان جایگزین سنگدانه‌ها و سیمان، تحقیقاتی صورت گرفته است. این کار می‌تواند باعث کاهش بهره برداری از معادن طبیعی و کاهش آلودگی‌های ایجاد شده از تولید سیمان شود.

در محیط قلیایی بالا، با رطوبت کافی، یون‌های هیدروکسید در خمیر سیمان با اشکال واکنش‌پذیر سیلیس، واکنش قلیایی-سیلیسی می‌دهد که باعث تولید ژلی می‌گردد که در طول زمان متورم شده و باعث ایجاد ترک در بتن می‌شود [۱۶]. بنابراین اصلی‌ترین نگرانی برای استفاده از پودر شیشه در بتن ایجاد واکنش قلیایی-سیلیسی به علت وجود سیلیس زیاد در شیشه است. ژنگ [۱۷] در تحقیقات خود با استفاده از پودر شیشه زیر ۲۰۰ μm نشان داد شیشه ریز در محیط قلیایی تحت واکنش قلیایی-سیلیسی قرار نگرفته و پودر شیشه خاصیت پوزولانی داشته و در واکنش پوزولانی با مصرف پرتلندایت، سیلیکات کلسیم هیدراته ثانویه تولید می‌نماید. با توجه به اینکه در واکنش پوزولانی پرتلندایت مصرف می‌شود، کلسیم مورد نیاز برای واکنش قلیایی-سیلیسی کاهش می‌یابد [۱۸]. در زمینه تاثیر پودر شیشه بر خواص بتن، تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته بنابراین در این بخش از تحقیقات انجام شده بر روی خواص ملات و خمیر سیمان نیز استفاده شده است. کالاکادا و همکاران [۱۹] در تحقیقات خود نشان دادند که پودر شیشه زیر ۱۵۰ μm خاصیت پوزولانی داشته و باعث افزایش مقاومت فشاری، مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید شده و حرارت هیدراتاسیون را نیز کاهش می‌دهد. الافینید و همکاران [۲۰] بر اساس شاخص فعالیت پوزولانی، مقدار جایگزینی ۲۱٪ پودر زیر با اندازه کوچک‌تر از ۷۵ μm را بهینه در نظر گرفته و نشان دادند

گرفته در معرض حرارت بالا بوده است. بر این اساس تاثیر لاستیک و پودر شیشه ضایعاتی بر کارایی و مشخصات مکانیکی بتن، در دمای محیط و پس از قرارگیری در معرض حرارت  $600^{\circ}\text{C}$  مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

سیمان مورد استفاده در این تحقیق از نوع پرتلند تیپ ۲ تولید شده در کارخانه سیمان شاهرود با وزن مخصوص  $3\text{ gr/cm}^3$  و  $3/14$  و سطح ویژه (بلین)  $2676\text{ cm}^2/\text{gr}$  بوده و در شرایط مطلوب نگهداری شد و الزامات استاندارد ۳۸۹ ملی ایران [۲۶] و ASTM C150 [۲۷] را دارا بوده است. پودر شیشه ضایعاتی مورد استفاده در این تحقیق حاصل از آسیاب شیشه‌های ضایعات ساختمانی بوده و از کارخانه‌ای واقع در استان اصفهان تامین شد و با الک شماره ۲۰۰ ( $75\text{ }\mu\text{m}$ ) تصفیه گردید تا اندازه ذرات پودر شیشه مورد استفاده کوچکتر از  $75\text{ }\mu\text{m}$  باشد. دلیل این امر جلوگیری هر چه بیشتر از واکنش قلیایی-سیلیسی پودر شیشه و افزایش واکنش‌پذیری پوزولانی پودر شیشه بوده است. وزن مخصوص پودر شیشه  $2/93\text{ gr/cm}^3$  و سطح ویژه (بلین) آن برابر  $2676\text{ cm}^2/\text{gr}$  بوده است. در این پژوهش از پودر شیشه به عنوان جایگزین بخشی از سیمان با نسبت‌های وزنی  $10\%$ ،  $15\%$  و  $20\%$  استفاده شده است. ترکیبات شیمیایی سیمان و پودر شیشه مورد استفاده در جدول ۱ قابل مشاهده است.

تمامی سنگدانه‌های مورد استفاده از معدن شرکت الماس درخشان مشرق تامین گردید. تعیین وزن مخصوص و جذب آب سنگدانه‌های درشت مطابق ASTM C127 [۲۸] انجام شد و شن بادامی با حداکثر اندازه اسمی  $25\text{ mm}$ ، دارای وزن مخصوص اشباع با سطح خشک  $3\text{ gr/cm}^3$  و  $2/58$ ، وزن مخصوص ظاهری  $2/62\text{ gr/cm}^3$  و جذب آب  $1/56\%$  بوده و این مقادیر برای شن نخودی دارای حداکثر اندازه اسمی  $12/5\text{ mm}$ ، به ترتیب برابر  $3/57\text{ gr/cm}^3$  و  $2/61\text{ gr/cm}^3$  و  $1/83\%$  بود. وزن مخصوص و جذب آب سنگدانه ریز مطابق ASTM C128 [۲۹] انجام شد و مقادیر وزن مخصوص اشباع با سطح خشک و جذب آب برای ماسه به ترتیب برابر  $2/56\text{ gr/cm}^3$  و  $2/83\%$  بوده است. دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده بر اساس حدود تعیین شده استاندارد ۳۰۲ ملی ایران [۳۰] و ASTM C33 [۳۱] بوده که در شکل ۱ قابل مشاهده است.

ذرات لاستیک مورد استفاده در این تحقیق از خرد کردن لاستیک تایرهای کامیون به دست آمده که از کارخانه‌ای در استان تهران در دو اندازه ذرات لاستیک  $1-1/5$  و  $3-5\text{ mm}$  با وزن مخصوص  $\text{gr/}$

که با افزایش پودر شیشه، مقاومت کششی کاهش یافت. سن نیز بر خواص مکانیکی بتن دارای پودر شیشه تاثیرگذار است، به عنوان مثال الکارا و همکاران [۲۱] نشان دادند که بتن دارای پودر شیشه با اندازه کوچکتر از  $75\text{ }\mu\text{m}$  مقاومت فشاری کمتری، تا سن ۲۸ روز، نسبت به مرجع داشته، اما پس از ۹۰ روز، مقاومت فشاری بتن دارای  $10\%$  و  $20\%$  پودر شیشه، نسبت به بتن ساده بیشتر شد. اندازه ذرات پودر شیشه جایگزین شده سیمان نیز بر خواص مکانیکی موثر است، به عنوان نمونه در تحقیق انجام شده توسط پاتل و همکاران [۲۲] علاوه بر مشخص کردن ماهیت پوزولانی پودر شیشه، با استفاده از دو اندازه پودر شیشه کوچکتر از  $63\text{ }\mu\text{m}$  و  $75\text{ }\mu\text{m}$  نشان دادند که هر چه پودر شیشه ریزتر باشد، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. همچنین تاثیر میزان جایگزینی پودر شیشه بر کارایی بتن نیز موضوع برخی از تحقیقات بوده است. به عنوان مثال علی عبدو و همکاران [۲۳] مشخص کردند که با افزایش پودر شیشه جایگزین سیمان با اندازه ذره کوچکتر از  $75\text{ }\mu\text{m}$  اسلامپ بتن افزایش یافته و با استفاده از  $10\%$  پودر شیشه، مقاومت فشاری و کششی بهبود یافت.

در مورد خواص مکانیکی بتن، ملات و یا خمیر سیمان دارای پودر شیشه ضایعاتی جایگزین سیمان، پس از قرارگیری در معرض حرارت بالا، تحقیقات محدودی صورت گرفته و نیاز به تحقیقات گسترده‌تری در این زمینه حس می‌شود. پان و همکاران [۲۴] با استفاده از پودر شیشه با اندازه کوچکتر از  $100\text{ }\mu\text{m}$ ، رفتار ملات سیمان حاوی پودر شیشه را در دماهای بالا تا  $800^{\circ}\text{C}$  بررسی نموده و نشان دادند که در دمای بالای  $500^{\circ}\text{C}$ ، به دلیل خمیری شدن شیشه، انقباض حرارتی ملات دارای پودر شیشه و متعاقب آن افت مقاومتی بیشتری نسبت به ملات ساده داشته است. لی و همکاران [۲۵] در تحقیقات خود با استفاده از سه اندازه مختلف ذرات پودر شیشه پس از قرار گرفتن در معرض حرارت‌های  $300^{\circ}\text{C}$  تا  $900^{\circ}\text{C}$  نشان دادند که خمیر سیمان دارای پودر شیشه افت وزن کمتری نسبت به خمیر کنترل داشته، مشارکت کمتر پودر شیشه در واکنش پوزولانی بوده و خمیرهای دارای پودر شیشه ریزتر دارای مقاومت پسماند بهتری بودند.

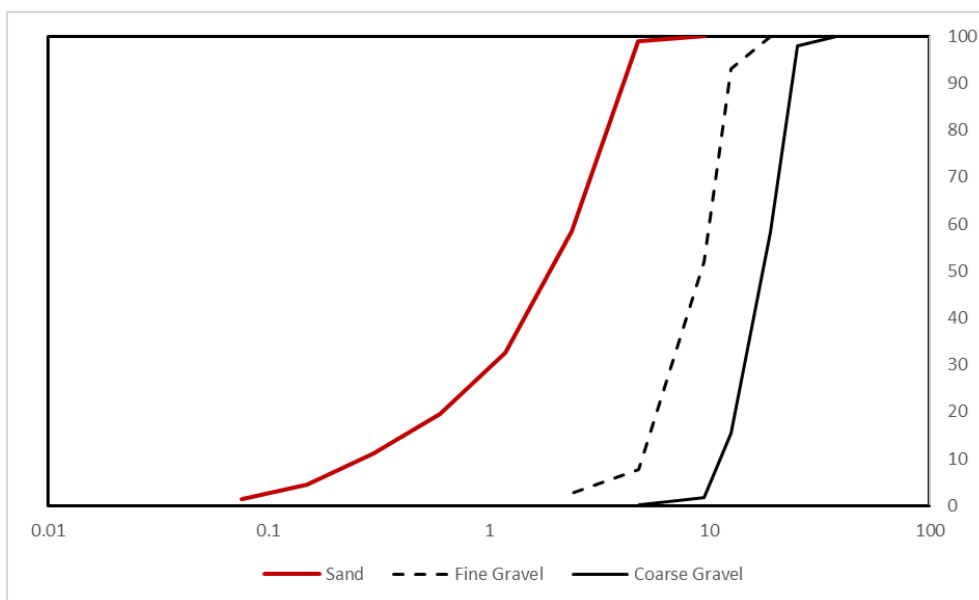
نوآوری این پژوهش نسبت به پژوهش‌های پیشین در استفاده همزمان لاستیک و پودر شیشه در بتن و بررسی مشخصات مکانیکی این نوع بتن در دمای محیط و پس از اعمال حرارت بالا می‌باشد. هدف از این تحقیق استفاده همزمان از لاستیک و پودر شیشه ضایعاتی به جای سنگدانه ریز طبیعی و سیمان، در بتن به جهت کاهش بهره برداری از منابع طبیعی و پاک‌سازی محیط زیست و تاثیر استفاده از این مواد بر عملکرد بتن قرار

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی سیمان و پودر شیشه مورد استفاده

Table 1. Chemical composition of cement and glass powder

ترکیب	سیمان (%)	پودر شیشه (%)
SiO <sub>2</sub>	۲۱/۱۱	۷۱/۳۹
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۴۸	۰/۷۴
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۹۱	۰/۴۰
CaO	۶۳/۳۶	۷/۵۶
MgO	۱/۴۸	۵/۴۲
Na <sub>2</sub> O	۰/۴۳	۱۳/۲۵
K <sub>2</sub> O	۰/۴۸	۰/۲۷
SO <sub>3</sub>	۲/۵۸	-
TiO <sub>2</sub>	-	۰/۰۱
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	۰
L.O.I*	۲/۲۵	۰/۸۵

L.O.I\* = Loss On Ignition



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی شن‌های بادامی و نخودی و ماسه

Fig. 1. Grading curves of coarse and fine gravel and sand



شکل ۲. تصویر (الف) پودر شیشه، (ب) لاستیک اندازه ۰/۱۵-۱ mm، (ج) لاستیک اندازه ۳-۵ mm مورد استفاده در این پژوهش

Fig. 2. Images of (a) Glass Powder, (b) Rubber with the size of 0.15-1 mm, and (c) rubber with the size of 3-5 mm

C192 [۳۲] انجام شد و بلافاصله پس از ساخت بتن هر طرح اختلاط، جهت سنجش کارایی بتن، آزمایش اسلامپ انجام گرفت. سپس نمونه‌گیری از بتن با استفاده از قالب‌های استوانه‌ای و مکعبی از پیش آماده شده، صورت گرفت. پس از اتمام فرآیند نمونه‌گیری، نمونه‌ها در قالب به مدت ۲۴ ساعت در محیطی مرطوب نگهداری شده و پس از این مدت، از قالب جدا شده و در حوضچه‌های عمل‌آوری دارای محلول آب و آهک اشباع به مدت ۲۸ روز، در دمای  $22^{\circ}\text{C}$ ، مطابق استاندارد ASTM C511 [۳۳]، به جهت عمل‌آوری قرار گرفتند.

نمونه‌های استوانه‌ای و نمونه‌های مکعبی، برای هر طرح اختلاط به دو دسته تقسیم شدند، نیمی از آن‌ها جهت انجام آزمایشات در دمای محیط ( $20^{\circ}\text{C}$ ) و باقی برای انجام آزمایشات پس از قرارگیری در معرض حرارت  $600^{\circ}\text{C}$  در نظر گرفته شدند.

### ۳-۲- قرارگیری در معرض حرارت

پس از عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز، نمونه‌های در نظر گرفته شده برای اعمال حرارت، پیش از قرارگیری در کوره الکتریکی جهت از دست دادن آب مازاد، در آون با حرارت  $105^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. این امر به دو علت بوده، اول جلوگیری از خرابی احتمالی نمونه‌ها در کوره، به علت فشار زیادی که بخار آب محبوس در داخل نمونه‌ها در اثر حرارت اعمال می‌نماید که با افزایش حرارت، این فشار به علت انبساط بیشتر بخار آب، افزایش می‌یابد. دوم از دست دادن تا حد امکان آب آزاد نمونه‌ها بوده تا کاهش وزن

$3\text{ cm}^3$ ، ۱/۰۵، تامین شده و به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه ریز طبیعی (ماسه) با نسبت‌های حجمی ۰/۵٪ و ۱۰٪ استفاده گردید. در شکل ۲ تصویر پودر شیشه و لاستیک مصرفی قابل مشاهده‌اند.

با توجه به لزوم استفاده از آب عاری از ناخالصی در ساخت و عمل‌آوری بتن، در این تحقیق از آب آشامیدنی شهر ایوانکی استفاده شد.

### ۲-۲- نام‌گذاری طرح‌های اختلاط، ساخت و عمل‌آوری

در این پژوهش در مجموع از ۱۳ طرح اختلاط استفاده شد که به جز طرح اختلاط مرجع، در ۱۲ طرح باقی‌مانده از ترکیب هم‌زمان ذرات لاستیک جایگزین شده به جای ماسه طبیعی در نسبت‌های حجمی ۰/۵٪ و ۱۰٪، در دو اندازه مختلف ذره و پودر شیشه جایگزین شده به جای سیمان در نسبت‌های وزنی ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ استفاده شد.

در این مقاله اندازه‌های ذرات لاستیک ۰/۱۵-۱ mm و ۳-۵ mm و همچنین پودر شیشه، به ترتیب با نام‌های اختصاری 1R، 5R و GP شناخته شده و عدد پس از حروف لاتین بیانگر درصد جایگزینی این مصالح می‌باشد. به عنوان مثال طرح 1R5-GP10 نشان دهنده طرح اختلاطی است که در آن ذرات لاستیک ۰/۱۵-۱ mm (1R) به میزان ۰/۵٪ و پودر شیشه به میزان ۱۰٪ استفاده شده است. جدول ۲ مشخصات طرح‌های ساخته شده در این پژوهش را نشان داده با ذکر اینکه مقادیر ارائه شده برای سنگدانه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک می‌باشد.

ساخت و عمل‌آوری بتن در آزمایشگاه بر اساس استاندارد ASTM

جدول ۲. مشخصات طرح‌های اختلاط مورد استفاده

Table 2. Mix design proportions

کد طرح	نسبت آب به مواد سیمانی	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	شن بادامی (kg/m <sup>3</sup> )	شن نخودی (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	پودر شیشه (kg/m <sup>3</sup> )	ذرات لاستیک (kg/m <sup>3</sup> )
Reference	۰/۴۵	۴۲۵	۱۹۱/۳	۵۱۳/۸	۲۵۵/۹	۹۳۴/۶	۰	۰
1R5-GP10	۰/۴۵	۳۸۲/۵	۱۹۱/۳	۵۱۳/۸	۲۵۵/۹	۸۸۷/۹	۴۲/۵	۱۹/۱
1R5-GP15	۰/۴۵	۳۶۱/۲۵	۱۹۱/۳	۵۱۳/۸	۲۵۵/۹	۸۸۷/۹	۶۳/۷۵	۱۹/۱
1R5-GP20	۰/۴۵	۳۴۰	۱۹۱/۳	۵۱۳/۸	۲۵۵/۹	۸۸۷/۹	۸۵	۱۹/۱
1R10-GP10	۰/۴۵	۳۸۲/۵	۱۹۱/۳	۵۱۳/۸	۲۵۵/۹	۸۴۱/۱	۴۲/۵	۳۸/۲
1R10-GP15	۰/۴۵	۳۶۱/۲۵	۱۹۱/۳	۵۱۳/۸	۲۵۵/۹	۸۴۱/۱	۶۳/۷۵	۳۸/۲
1R10-GP20	۰/۴۵	۳۴۰	۱۹۱/۳	۵۱۳/۸	۲۵۵/۹	۸۴۱/۱	۸۵	۳۸/۲
5R5-GP10	۰/۴۵	۳۸۲/۵	۱۹۱/۳	۵۱۳/۸	۲۵۵/۹	۸۸۷/۹	۴۲/۵	۱۹/۱
5R5-GP15	۰/۴۵	۳۶۱/۲۵	۱۹۱/۳	۵۱۳/۸	۲۵۵/۹	۸۸۷/۹	۶۳/۷۵	۱۹/۱
5R5-GP20	۰/۴۵	۳۴۰	۱۹۱/۳	۵۱۳/۸	۲۵۵/۹	۸۸۷/۹	۸۵	۱۹/۱
5R10-GP10	۰/۴۵	۳۸۲/۵	۱۹۱/۳	۵۱۳/۸	۲۵۵/۹	۸۴۱/۱	۴۲/۵	۳۸/۲
5R10-GP15	۰/۴۵	۳۶۱/۲۵	۱۹۱/۳	۵۱۳/۸	۲۵۵/۹	۸۴۱/۱	۶۳/۷۵	۳۸/۲
5R10-GP20	۰/۴۵	۳۴۰	۱۹۱/۳	۵۱۳/۸	۲۵۵/۹	۸۴۱/۱	۸۵	۳۸/۲

با دقت یک گرم انجام شده است.

### ۳- آزمایش‌های انجام گرفته

#### ۳-۱- آزمایش اسلامپ بتن تازه

برای هر طرح اختلاط، آزمایش اسلامپ مطابق استاندارد ASTM C143 [۳۴] انجام شد تا تاثیر لاستیک و پودر شیشه بر روانی بتن مورد بررسی قرارگیرد.

#### ۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری بتن

آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ۱۶۰۸-۳ ملی ایران [۳۵]

بیشتر به علت سوختن لاستیک و محصولات هیدراتاسیون باشد. نمونه‌ها پس از خروج از آون وزن‌کشی شدند.

حرارت دهی به وسیله کوره الکتریکی با سرعت ۳ °C/min، تا رسیدن به دمای ۶۰۰ °C و باقی ماندن در آن دما به مدت یک ساعت انجام شد. پس از اتمام فرآیند حرارت دهی و خاموش کردن کوره، برای جلوگیری از اعمال شوک حرارتی، نمونه‌ها داخل کوره درب بسته تا رسیدن به دمای محیط باقی ماندند (حداقل ۲۴ ساعت). سپس وزن‌کشی شده و مورد آزمایشات مقاومت فشاری و کششی قرار گرفتند. در شکل ۳ کوره الکتریکی مورد استفاده و تصویری از دو نمونه استوانه‌ای حرارت دیده و ندیده قابل مشاهده است.

وزن‌کشی نمونه‌ها، پیش و پس از اعمال حرارت، توسط ترازو آزمایشگاهی



شکل ۳. تصویر (الف) نمونه‌ای در دمای محیط، (ب) نمونه‌ای پس از اعمال حرارت، (ج) کوره الکتریکی و (د) جک هیدرولیکی مورد استفاده

Fig. 3. Images of (a) a specimen at ambient temperature, (b) a specimen after heating exposure, (c) Electrical furnace, and (d) Hydraulic jack

نظر اندازه ذرات لاستیک، مشخص شد که هر چه اندازه ذره بزرگ‌تر باشد، مقدار اسلامپ کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در مقادیر ثابت لاستیک و پودر شیشه، طرح 1R5-GP20، مقدار اسلامپ ۵۰ mm (کاهش ۲۱/۹٪ نسبت به مرجع) بوده در حالی که در طرح 5R5-GP20 این مقدار mm ۴۲ (کاهش ۳۴/۴٪) بوده است.

به نظر می‌رسد هر چه ذرات لاستیک درشت‌تر باشند، اصطکاک داخلی افزایش یافته که باعث کاهش روانی بتن می‌شود [۷]. در مقادیر و اندازه ثابت ذرات لاستیک با افزایش میزان جایگزینی پودر شیشه، اسلامپ افزایش می‌یابد.

میزان جایگزینی ۵٪ لاستیک و ۱۰٪ پودر شیشه و همچنین اندازه لاستیک 1R بیشترین مقادیر اسلامپ در طرح‌های ترکیبی را ارائه دادند. نتایج آزمایش اسلامپ طرح‌های اختلاط مورد بررسی در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد.

#### ۴-۲- افت وزن ناشی از اعمال حرارت

یکی از اثرات قرارگیری در معرض حرارت‌های بالا، از دست دادن وزن است. بر این اساس برای هر طرح اختلاط پیش و پس از اعمال حرارت ۶۰۰ °C وزن کشی انجام شد تا میزان افت وزن ناشی از اعمال حرارت مشخص شود. در این تحقیق افت وزن به صورت درصدی از وزن اولیه (پیش از اعمال حرارت) می‌باشد. در شکل ۵ افت وزن طرح‌های اختلاط پس از اعمال

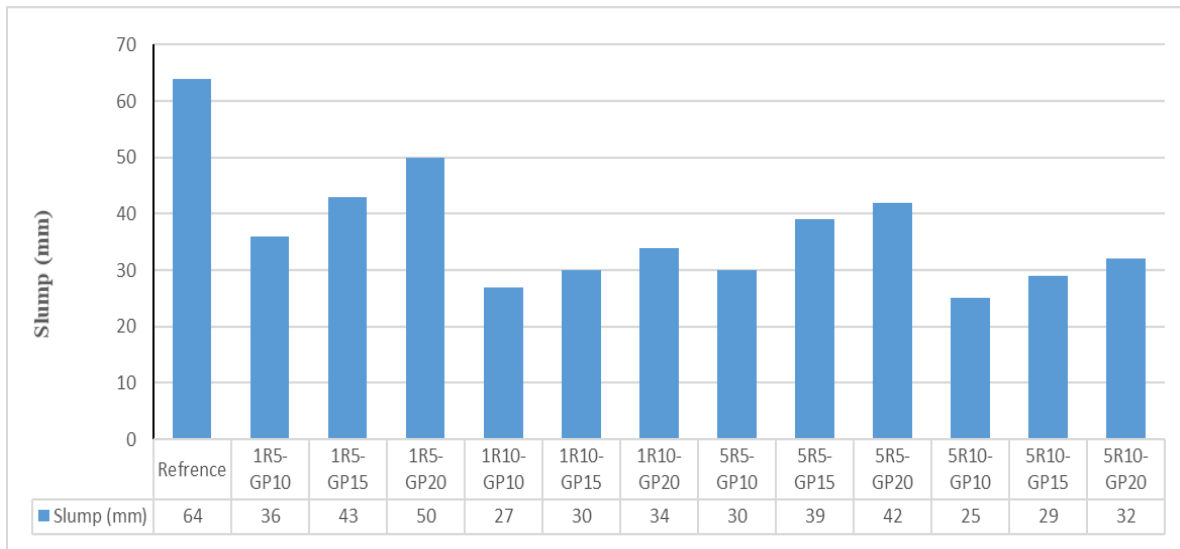
و BS EN 12390-3 [۳۶] با استفاده از نمونه‌های مکعبی  $mm^3$  ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ انجام و نتایج برای هر طرح در هر دو حالت حرارتی به صورت میانگین نتایج آزمایش نمونه‌ها به دست آمد.

#### ۳-۳- آزمایش مقاومت کششی به روش دو نیم شدن (غیرمستقیم)

آزمایش مقاومت کششی مطابق استاندارد ASTM C496 [۳۷] با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای  $mm^2$  ۱۵۰×۳۰۰ انجام شد و نتایج برای هر طرح، در هر دو حالت حرارتی به صورت میانگین نتایج آزمایش نمونه‌ها به دست آمد. در شکل ۳ تصویر جک هیدرولیکی مورد استفاده قابل مشاهده است.

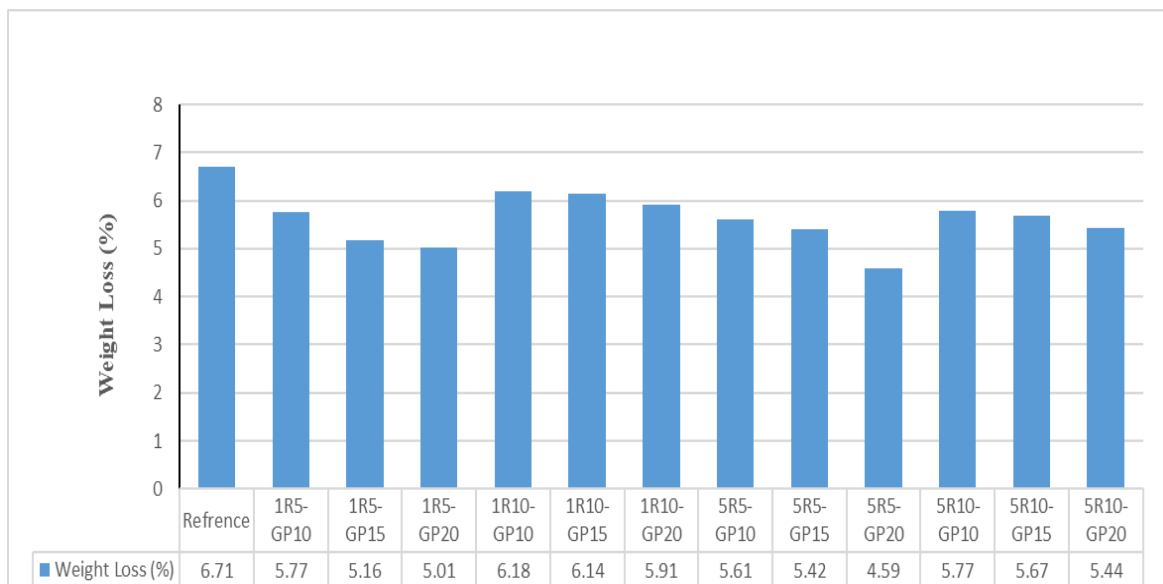
#### ۴-۱- نتایج اسلامپ بتن تازه

نتایج نشان می‌دهد اسلامپ تمامی طرح‌های دارای ذرات لاستیک و پودر شیشه نسبت به طرح مرجع دارای کاهش بودند. با افزایش میزان جایگزینی لاستیک، در هر دو اندازه ذرات لاستیک، اسلامپ کاهش یافت. به عنوان مثال در میزان ثابت ۱۰٪ پودر شیشه طرح 1R5-GP10 دارای اسلامپ mm ۳۶ (کاهش ۴۳/۸٪ نسبت به مرجع) بوده در حالی که 1R10-GP10 دارای اسلامپ mm ۲۷ (کاهش ۵۷/۸٪ نسبت به مرجع) بوده است. دلیل این امر را می‌توان ناشی از زبری سطح ذرات لاستیک تأیر دانست که باعث مقاومت اصطکاکی بیشتر در برابر جریان‌پذیری بتن می‌شود. از



شکل ۴. نتایج آزمایش اسلامپ طرح‌های اختلاط مورد بررسی

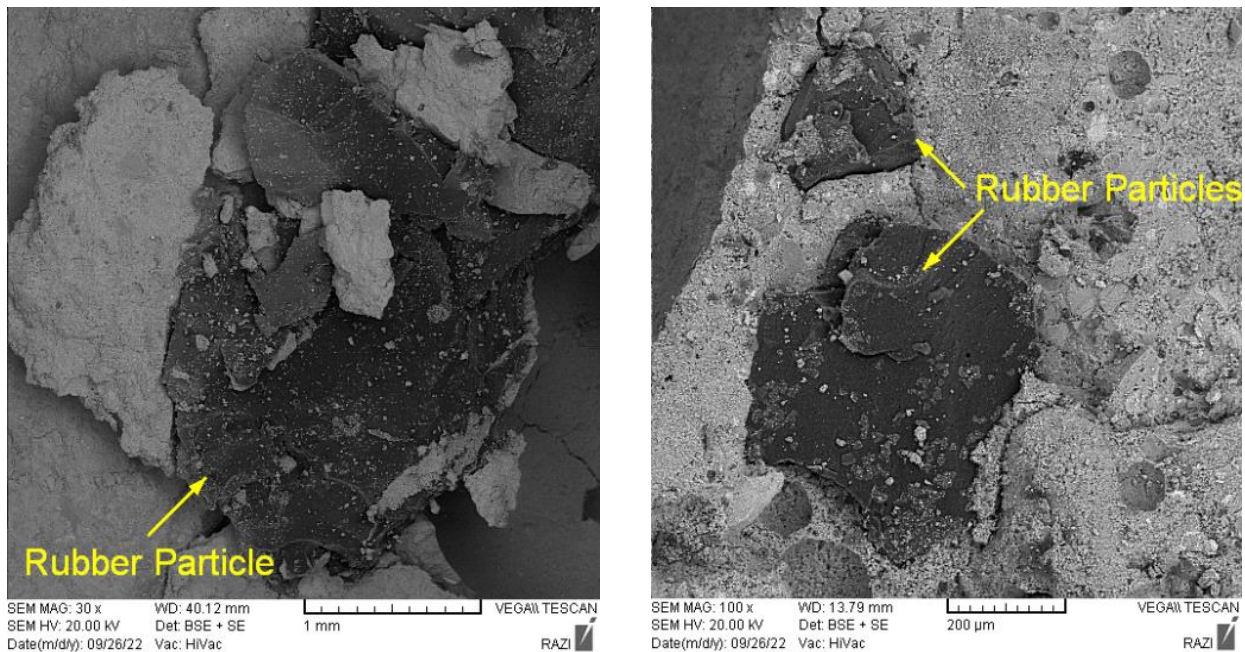
Fig. 4. results of slump tests of mixtures



شکل ۵. افت وزن طرح‌های اختلاط پس از قرارگیری در معرض حرارت ۶۰۰ °C

Fig. 5. Weight loss of mixtures after exposure to 600 °C





شکل ۶. تصاویر وجود ذرات لاستیک (راست) ۱R و (چپ) ۵R در نمونه‌ها

Fig. 6. Images of rubber particles (right) 1R, and (left) 5R, in specimens

وزن شده که به سبب سوختن مقدار بیشتری لاستیک می‌باشد. اندازه ذرات لاستیک نیز در کاهش وزن مؤثر بوده. با افزایش اندازه ذرات لاستیک از 1R به 5R، افت وزن کاهش یافت. به نظر می‌رسد که هر چه اندازه ذرات لاستیک درشت‌تر باشد، آسیب کمتری در حرارت‌های بالا اتفاق افتاده است.

#### ۴-۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM<sup>۱</sup>) و نتایج آزمایش طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX<sup>۲</sup>)

پس از شکست نمونه‌ها حاصل از آزمایشات مقاومت فشاری و کششی، نمونه‌گیری از طرح‌های 1R10-GP10 و 5R10-GP10 (به عنوان نمونه) در حالت شکست در دمای محیط، انجام شد، تا درک بهتری از رفتار هر دو اندازه ذرات لاستیک و پودر شیشه در بتن با استفاده از تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) حاصل شود و همچنین با استفاده از آزمایش طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) برخی عناصر تشکیل دهنده هر دو اندازه لاستیک نیز مشخص گردید.

در شکل‌های ۶ تا ۹ تصاویر میکروسکوپی ذرات لاستیک و پودر شیشه نمونه‌های یاد شده قابل مشاهده است.

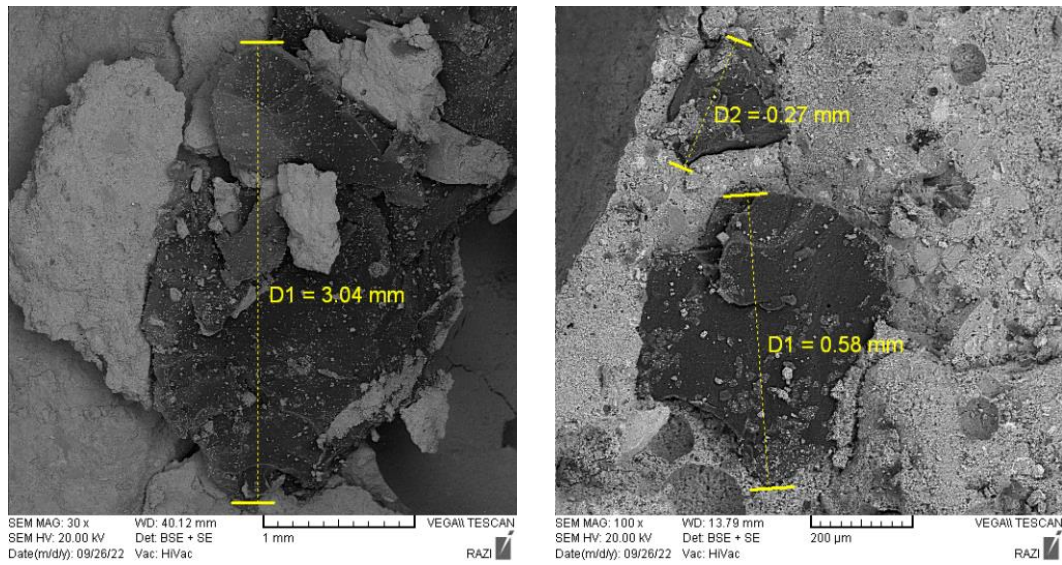
- 1 Scanning Electron Microscope
- 2 Energy-dispersive X-ray spectroscopy

حرارت قابل مشاهده است.

در تمامی طرح‌های اختلاط افت وزن مشاهده می‌شود، که به جز تاثیر وجود لاستیک و پودر شیشه، دلیل این کاهش، آسیب‌های وارده بر خمیر سیمان هیدراته می‌باشد. بر اساس تحقیقات موسوی مهر و نعمت زاده [۱۳] در دمای °C ۴۰۰، بتن کاهش وزن قابل توجهی داشته که به علت دی هیدراته شدن ژل کلسیم سیلیکات هیدرات و تبخیر آب شیمیایی موجود در آن و تجزیه کریستال‌های هیدروکسید کلسیم می‌باشد.

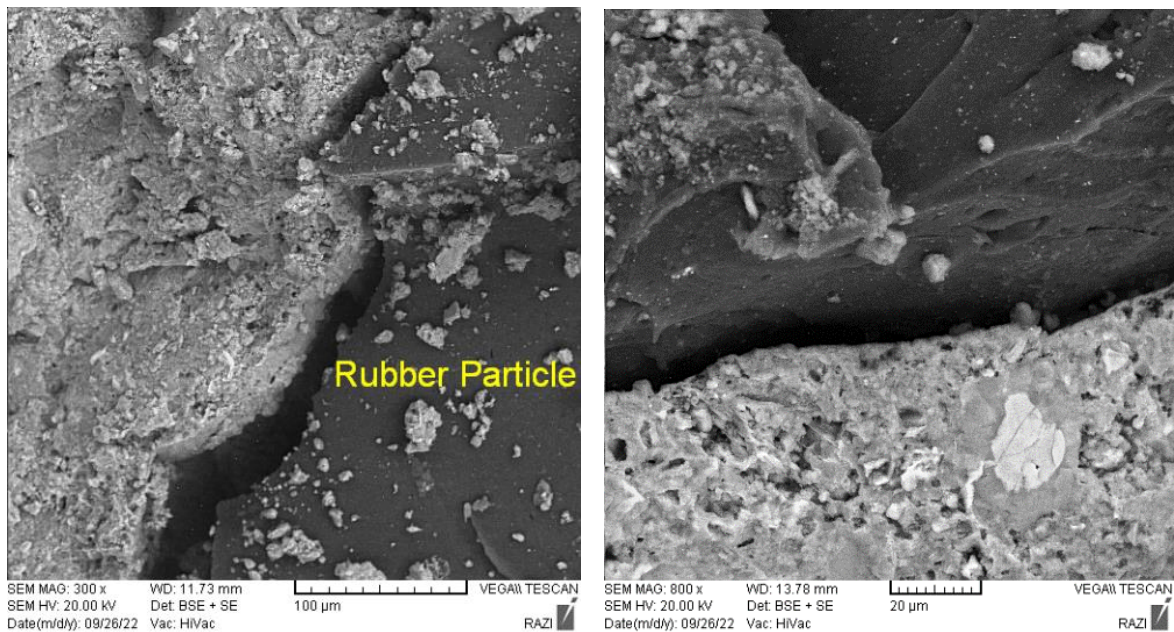
طرح‌های اختلاط ترکیبی، افت وزن کمتری نسبت به طرح مرجع داشته‌اند. البته بر اساس تحقیقات برخی محققین با جایگزینی ذرات لاستیک به جای سنگدانه، به تنهایی، افت وزن نسبت به طرح مرجع (بدون لاستیک) افزایش می‌یابد، که علت آن سوختن ذرات لاستیک می‌باشد [۱۴ و ۱۳ و ۱۱]. بر این اساس کاهش میزان افت وزن در طرح‌های ترکیبی این پژوهش به علت استفاده از پودر شیشه به جای سیمان است که بر اثر حرارت تجزیه نشده و فقط احتمالاً از حالت جامد به حالت خمیری یا نهایتاً به مذاب تبدیل می‌شود. بر این اساس هر چه میزان جایگزینی پودر شیشه به جای سیمان افزایش یافت، میزان افت وزن کمتر شد.

افزایش میزان ذرات لاستیک، در هر دو اندازه ذره، باعث افزایش افت



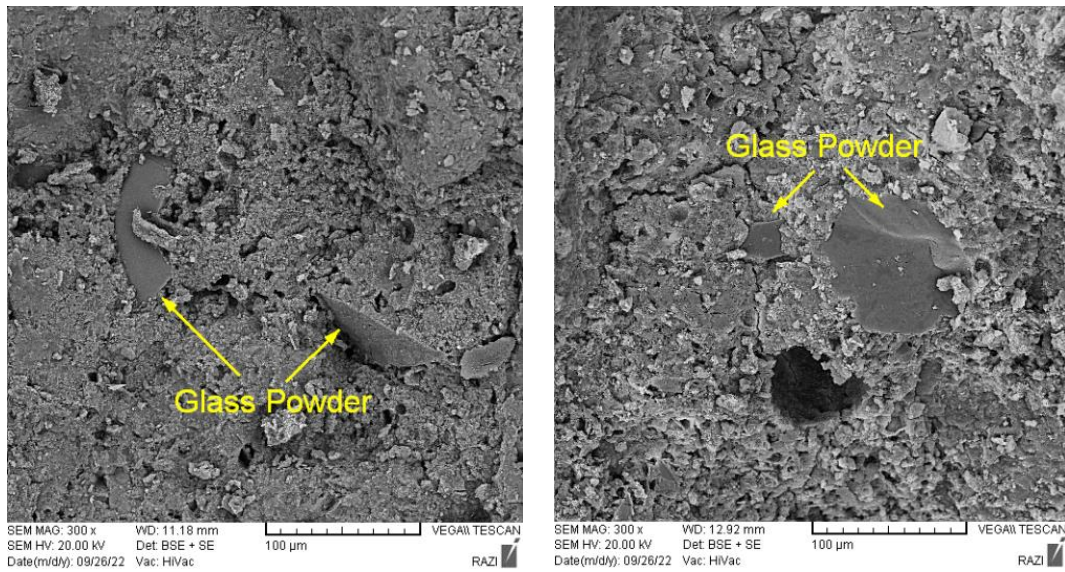
شکل ۷. ابعاد ذرات لاستیک (راست) ۱R و (چپ) ۵R در نمونه‌ها

Fig. 7. Dimensions of rubber particles (right) 1R, and (left) 5R, in specimens



شکل ۸. تصاویر ناحیه انتقالی بین ذرات لاستیک (راست) ۱R و (چپ) ۵R با ماتریس سیمان

Fig. 8. Images of interface between rubber particles of (right) 1R, and (left) 5R with cement matrix



شکل ۹. تصاویر نشان دهنده پودر شیشه در نمونه‌های (راست) GPI0-1R10 و (چپ) GPI0-5R10

Fig. 9. Images of Glass powder in specimens (right) 1R10-GP10, and (left) 5R10-GP10

#### ۴-۴- نتایج آزمایشات مقاومت فشاری

ابتدا به تفسیر نتایج مقاومت فشاری در دمای محیط و سپس نتایج پس از اعمال حرارت  $600^{\circ}\text{C}$  و پسماند حاصل از آن پرداخته می‌شود. در شکل ۱۱ و جدول ۴ نتایج مقاومت فشاری در دماهای محیط و  $600^{\circ}\text{C}$  قابل مشاهده می‌باشد.

در دمای محیط، مقاومت فشاری تمامی طرح‌های ترکیبی کمتر از مقدار به دست آمده برای طرح مرجع بوده است.

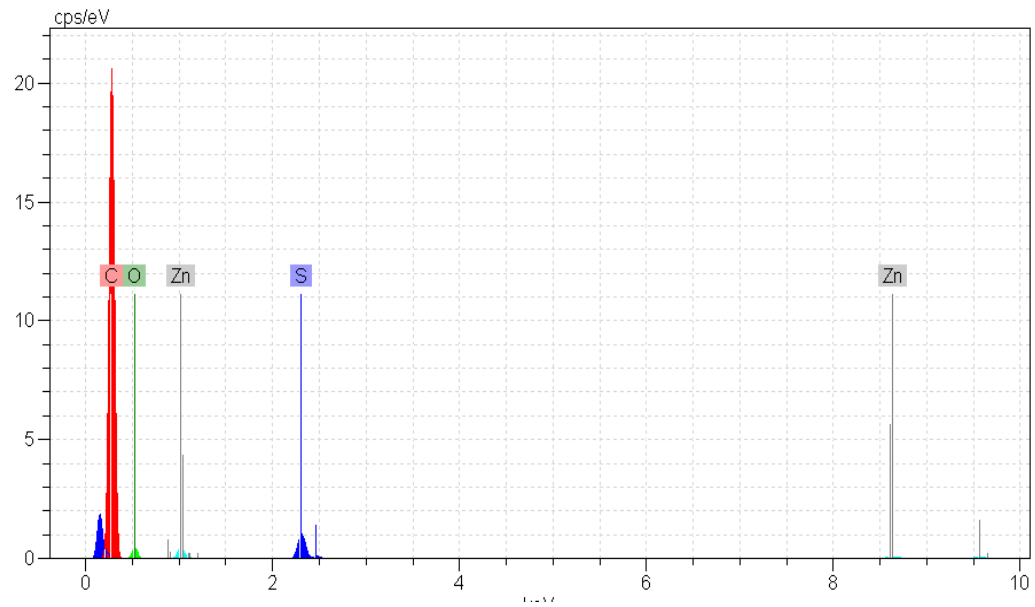
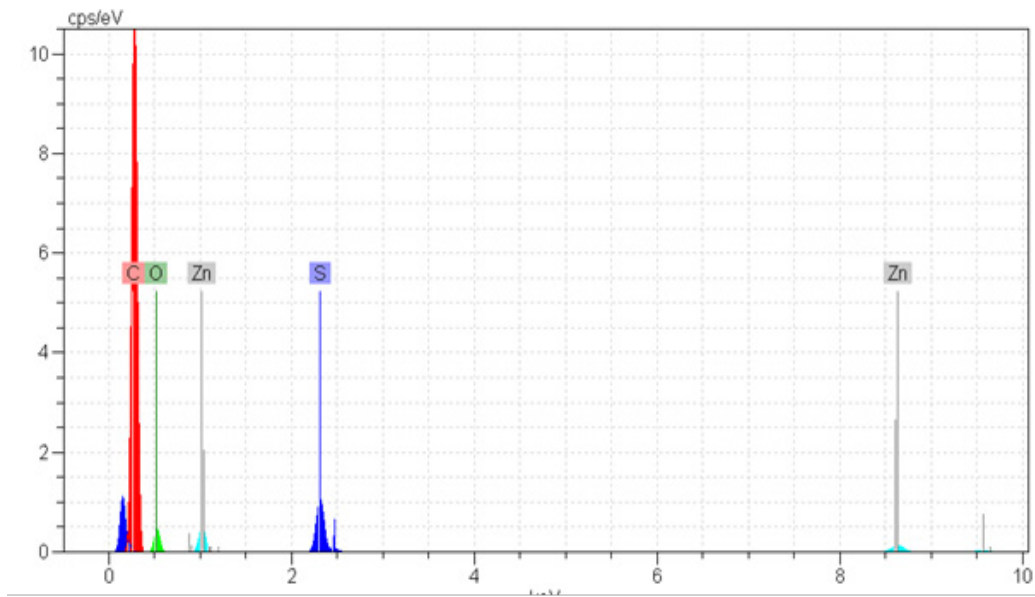
در هر دو اندازه ذرات لاستیک و میزان پودر شیشه ثابت، با افزایش میزان لاستیک، مقاومت فشاری کاهش یافت. همچنین در مقادیر ثابت پودر شیشه و لاستیک، با افزایش اندازه ذره از IR به 5R، مقاومت فشاری به طور کلی افزایش یافته البته موارد نقض نیز مشاهده شد. بر اساس تصاویر میکروسکوپی، مشخص است شکاف واضحی در طول مرز بین ذرات لاستیک و ماتریس خمیر سیمان وجود دارد، این فاصله می‌تواند به تسریع شکست بتن کمک کند. مشخص است که با افزایش جایگزینی لاستیک، این مشکل بیشتر می‌شود. همچنین به علت بیشتر بودن سطح مخصوص ذرات لاستیک ریزتر، سطح تماس افزایش یافته و در نتیجه احتمالاً مقدار

همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، پیوند مناسبی بین ذرات لاستیک و خمیر سیمان برقرار نشده و شکاف واضحی در طول مرز بین ذرات لاستیک (در هر دو اندازه ذرات لاستیک) و ماتریس خمیر سیمان وجود دارد، این فاصله می‌تواند به عنوان یک ترک میکروسکوپی عمل کرده و در تسریع شکست بتن نقش آفرینی کند. طبیعی است که با افزایش جایگزینی لاستیک به جای سنگدانه، این مشکل بیشتر می‌شود. همچنین به علت بیشتر بودن سطح مخصوص ذرات لاستیک ریزتر، سطح تماس افزایش یافته و در نتیجه احتمالاً مقدار و تعداد این شکاف‌های میکروسکوپی نیز افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده از تفسیر تصاویر، با نتایج پژوهش کاروناراتنا و همکاران [۹]، در همین زمینه نیز مطابقت دارد.

شکل ۹ نیز نشان دهنده وجود ذرات پودر شیشه در ماتریس خمیر سیمان هر دو طرح یاد شده می‌باشد.

در شکل ۱۰ و جدول ۳ نتایج آزمون EDX برای هر دو اندازه ذرات لاستیک قابل مشاهده می‌باشد.

البته باید قید گردد که تفاوت در میزان عناصر موجود در نتایج آزمون EDX برای دو اندازه ذره لاستیک به معنی تفاوت نوع جنس آن‌ها نمی‌باشد.



شکل ۱۰. نتیجه آزمون EDX (راست) ذرات لاستیک ۱R و (چپ) ذرات لاستیک ۵R

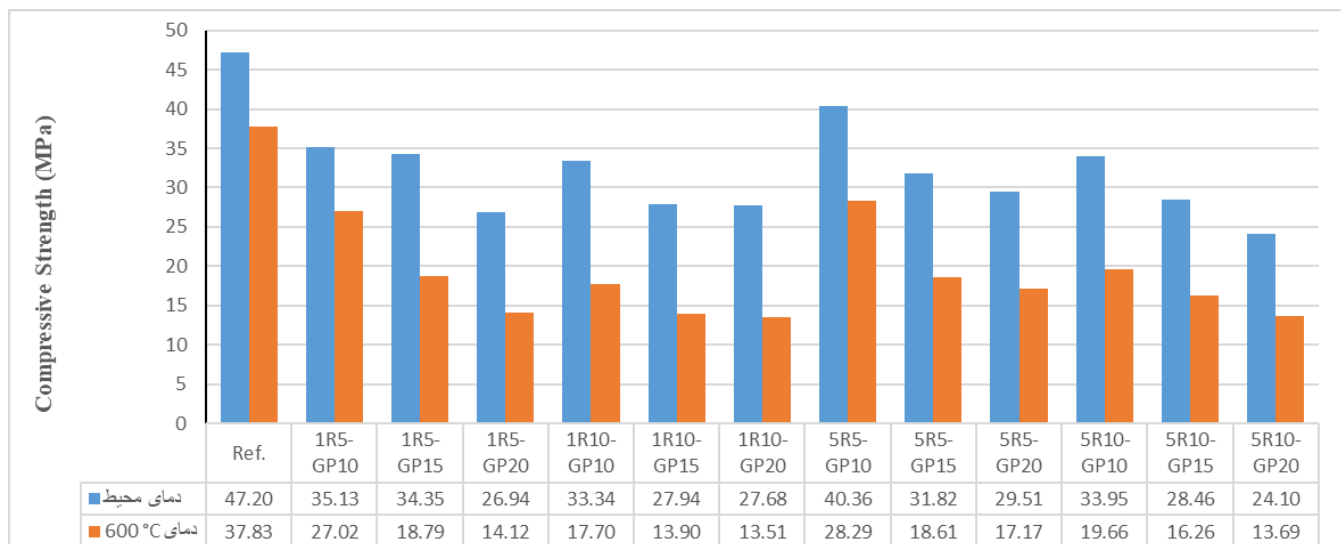
Fig. 10. EDX test results of (right) 1R rubber particles, and (left) 5R rubber particles

جدول ۳. نتایج آزمون EDX برای هر دو اندازه ذره لاستیک

Table 3. Chemical composition of cement and glass powder

Atom. C [at.-%] ***	Norm. C [wt.-%] **	Unn. C [wt.-%] *	سری‌ها	عنصر	نوع لاستیک
۸۲/۷۴	۷۶/۹۹	۷۶/۹۸	K series	Carbon	1R
۱۶/۶۱	۲۰/۵۹	۲۰/۵۹	K series	Oxygen	
۰/۳۵	۰/۸۶	۰/۸۶	K series	Sulfur	
۰/۳۱	۱/۵۷	۱/۵۷	K series	Zinc	
۸۸/۱۰	۸۲/۸۷	۸۲/۸۷	K series	Carbon	5R
۱۰/۸۸	۱۳/۶۴	۱۳/۶۴	K series	Oxygen	
۰/۶۶	۱/۶۶	۱/۶۶	K series	Sulfur	
۰/۳۶	۱/۸۳	۱/۸۳	K series	Zinc	

Unn. C [wt.-%] \*=Un-normalized concentration in weight percent of element, Norm. C [wt.-%] \*\*=Normalized concentration in of element weight percent, Atom. C [at.-%] \*\*\*=Atomic weight percent



شکل ۱۱. مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط در دماهای محیط و ۶۰۰ °C

Fig. 11. Compressive strength of mixtures at ambient temperature and 600 °C

جدول ۴. نتایج مقاومت‌های فشاری و کششی در دماهای محیط و ۶۰۰ °C و نسبت پسماند آن‌ها

Table 4. results of compressive and tensile strength at ambient temperature and 600 °C and their residual ratio

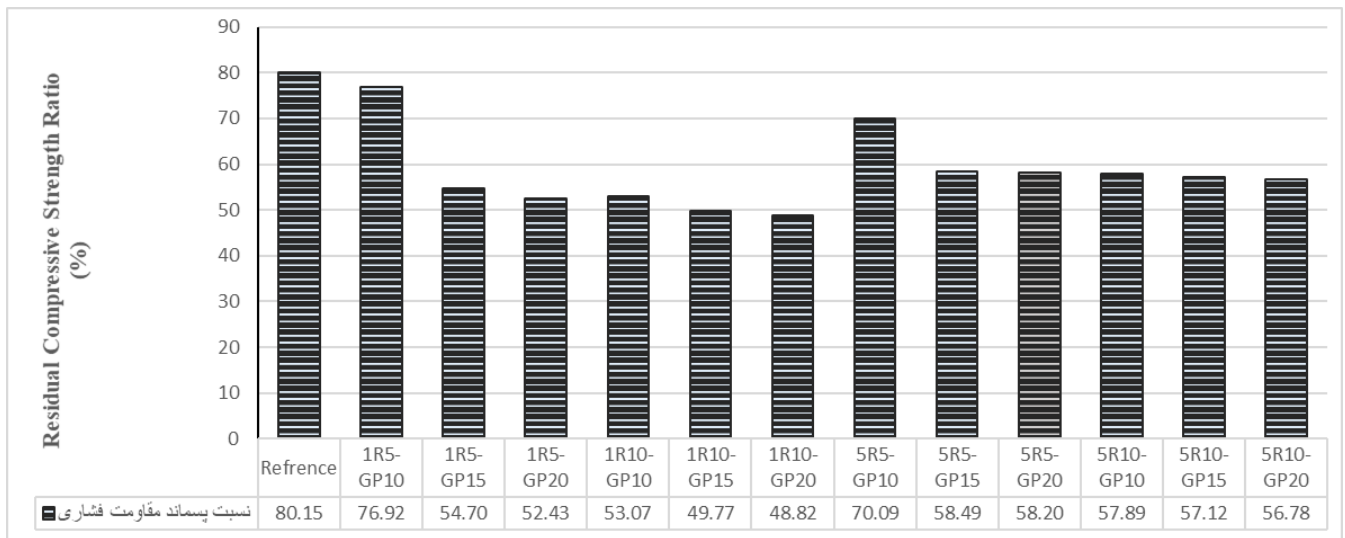
نسبت پسماند مقاومت کششی (%)	مقاومت کششی (MPa)		نسبت پسماند مقاومت فشاری (%)	مقاومت فشاری (MPa)		کد طرح
	محیط	۶۰۰ °C		محیط	۶۰۰ °C	
۶۵/۹۳	۲/۰۷	۳/۱۴	۸۰/۱۵	۳۷/۸۳	۴۷/۲۰	Reference
۴۷/۲۷	۱/۴۴	۳/۰۵	۷۶/۹۲	۲۷/۰۲	۳۵/۱۳	1R5-GP10
۴۵/۵۸	۱/۳۶	۲/۹۸	۵۴/۷۰	۱۸/۷۹	۳۴/۳۵	1R5-GP15
۴۷/۷۲	۱/۳۰	۲/۷۳	۵۲/۴۳	۱۴/۱۲	۲۶/۹۴	1R5-GP20
۴۰/۸۳	۱/۲۳	۳/۰۲	۵۳/۰۷	۱۷/۷۰	۳۳/۳۴	1R10-GP10
۴۸/۱۵	۱/۲۶	۲/۶۲	۴۹/۷۷	۱۳/۹۰	۲۷/۹۴	1R10-GP15
۴۶/۹۶	۱/۱۸	۲/۵۱	۴۸/۸۲	۱۳/۵۱	۲۷/۶۸	1R10-GP20
۴۹/۸۳	۲/۰۳	۴/۰۶	۷۰/۰۹	۲۸/۲۹	۴۰/۳۶	5R5-GP10
۳۷/۷۲	۱/۵۱	۴/۰۱	۵۸/۴۹	۱۸/۶۱	۳۱/۸۲	5R5-GP15
۵۰/۲۴	۱/۴۴	۲/۸۷	۵۸/۲۰	۱۷/۱۷	۲۹/۵۱	5R5-GP20
۳۹/۶۱	۱/۴۰	۳/۵۴	۵۷/۸۹	۱۹/۶۶	۳۳/۹۵	5R10-GP10
۴۱/۱۰	۱/۳۵	۳/۲۷	۵۷/۱۲	۱۶/۲۶	۲۸/۴۶	5R10-GP15
۴۱/۴۱	۱/۳۰	۳/۱۵	۵۶/۷۸	۱۳/۶۹	۲۴/۱۰	5R10-GP20

تعداد این شکاف‌های میکروسکوپی نیز افزایش می‌یابد که منجر به کاهش هر چه بیشتر مقاومت فشاری می‌گردد. در مقادیر و اندازه ثابت ذرات لاستیک، با افزایش میزان پودر شیشه مقاومت فشاری کاهش یافت. این امر را می‌توان به دو عامل نسبت داد. اول، کم بودن فعالیت پودر شیشه در واکنش پوزولانی نسبت به سیمان است که می‌تواند ناشی جنس و یا اندازه ذرات پودر شیشه باشد. عامل دوم می‌تواند واکنش قلیایی-سیلیسی ذرات بزرگ‌تر پودر شیشه باشد، که با توجه به کاهش اندازه ذرات پودر شیشه تا حد امکان و سن نمونه‌ها به نظر نمی‌رسد مؤثر باشد. البته برخی از محققین نشان دادند که با افزایش سن عمل‌آوری بتن، تاثیر پودر شیشه بیشتر می‌شود [۲۱].

در دمای محیط در بین طرح‌های دارای اندازه ذرات لاستیک 1R، طرح 1R5-GP10 با ۳۵/۱۳ MPa و در بین طرح‌های دارای 5R، طرح 5R5-GP10 با ۴۰/۳۶ MPa بیشترین مقاومت فشاری را در بین

طرح‌های دارای لاستیک و پودر شیشه دارا بوده‌اند. در این بخش ابتدا به تاثیر آسیب حرارتی وارده بر طرح‌های اختلاط در قالب نسبت پسماند مقاومت فشاری پرداخته شده و سپس نتایج به دست آمده پس از اعمال حرارت مقایسه می‌شود. در این پژوهش نسبت مقاومت فشاری حاصله پس از اعمال حرارت به مقاومت فشاری در دمای محیط را به عنوان نسبت پسماند مقاومت فشاری شناخته و به صورت درصد بیان شد و نتایج آن برای طرح‌های اختلاط در شکل ۱۲ و جدول ۴ قابل مشاهده است.

پس از اعمال حرارت، مقاومت فشاری تمامی طرح‌ها کاهش یافت، البته میزان نسبت پسماند مقاومت فشاری برای هر طرح متفاوت بوده، در این بین بیشترین میزان نسبت پسماند مقاومت (کمترین میزان افت مقاومت ناشی از اعمال حرارت) برای طرح مرجع با ۸۰/۱۵٪ (افت مقاومت ۱۹/۸۵٪) است که همانگونه که پیشتر بیان گردید بیش از هر چیز حاصل تجزیه محصولات



شکل ۱۲. نسبت پسماند مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط

Fig. 12. residual compressive strength ratio of the mixtures

بخش قابل توجهی از لاستیک مصرفی است. نتایج به دست آمده برای تاثیر اندازه ذره لاستیک پس از حرارت  $600^{\circ}\text{C}$  نیز مانند دمای محیط بوده و باعث افزایش مقاومت فشاری شده که می‌تواند ناشی از آسیب حرارتی کمتر ذرات درشت‌تر لاستیک باشد.

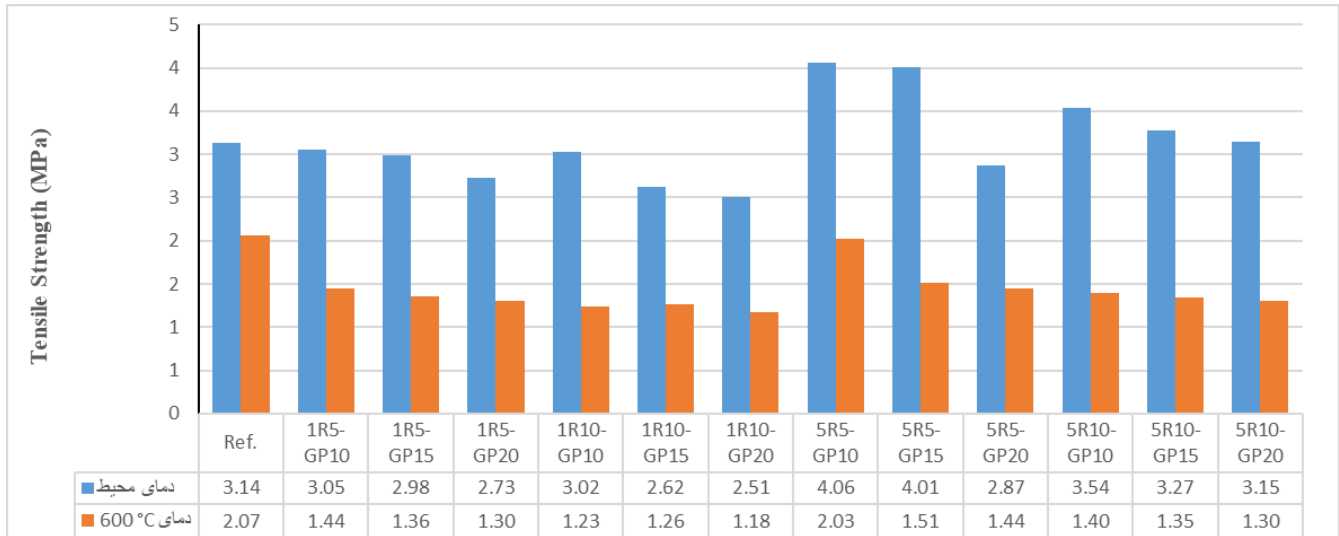
تاثیر پودر شیشه پس از اعمال حرارت  $600^{\circ}\text{C}$  مانند دمای محیط بوده و در مقدار و اندازه ثابت لاستیک باعث کاهش مقاومت فشاری شد. با توجه به مشاهده همین روند در دمای محیط و تجزیه نشدن و سوختن پودر شیشه و نهایتاً تغییر حالت از جامد به خمیری در حرارت بالا، می‌توان این کاهش را به دو عامل ربط داد. اول آسیب جایگزینی پودر شیشه به جای سیمان به علت کمتر بودن فعالیت پوزولانی از ابتدا، دوم اینکه مطابق تحقیقات پان و همکاران [۲۴] (برای ملات) خمیر سیمان دارای پودر شیشه در حرارت بالا، به علت تبدیل شیشه به حالت خمیری جمع شدگی بیشتری نسبت به خمیر سیمان بدون شیشه داشته و این امر در کنار میل به انبساط سنگدانه باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود.

پس از اعمال حرارت نیز طرح 1R5-GP10 با  $27/02\text{ MPa}$  در اندازه لاستیک 1R و طرح 5R5-GP10 با  $28/29\text{ MPa}$  در اندازه لاستیک 5R بیشترین مقاومت فشاری را در طرح‌های ترکیبی داشته‌اند. در نتیجه در هر دو دمای محیط و  $600^{\circ}\text{C}$  میزان جایگزینی  $5\%$

هیدراتاسیون و تبخیر آب شیمیایی محصور در ساختار خمیر سیمان بوده است، اما در طرح‌های اختلاط دیگر به علت وجود ذرات لاستیک و پودر شیشه میزان این نسبت کمتر بود. در میزان ثابت پودر شیشه، در هر دو اندازه ذره لاستیک، با افزایش میزان لاستیک نسبت پسماند مقاومت فشاری، به دلیل سوختن لاستیک بیشتر و در نتیجه ایجاد حفرات بیشتر، کاهش یافت (افت مقاومت ناشی از حرارت افزایش یافت). همچنین در میزان ثابت لاستیک و پودر شیشه با افزایش اندازه ذره، از 1R به 5R، نسبت پسماند افزایش یافت. افزایش میزان پودر شیشه در مقادیر و اندازه ثابت لاستیک باعث کاهش نسبت پسماند مقاومت فشاری (افزایش افت مقاومت ناشی از حرارت) شد.

در بین طرح‌های ترکیبی بیشترین نسبت پسماند مقاومت فشاری (کمترین افت مقاومت) در طرح‌های دارای اندازه لاستیک 1R برای 1R5-GP10 با  $76/92\%$  و در طرح‌های دارای اندازه لاستیک 5R برای 5R5-GP10 با  $70/09\%$  بوده‌اند.

پس از حرارت  $600^{\circ}\text{C}$  نیز مانند نتایج در دمای محیط، در میزان پودر شیشه ثابت و برای هر دو اندازه لاستیک با افزایش میزان جایگزینی لاستیک کاهش مقاومت فشاری نسبت به مرجع مشاهده شد، اما شدت این کاهش در حرارت بالا، نسبت به دمای محیط بیشتر بوده که علت آن سوختن



شکل ۱۳. مقاومت کششی طرح‌های اختلاط در دماهای محیط و 600 °C

Fig. 13. Splitting tensile strength of mixtures at ambient temperature and 600 °C

طرح 1R5-GP10 با 3/05 MPa در اندازه 1R و 5R5-GP10 با 4/06 MPa در اندازه 5R بیشترین مقاومت کششی را داشت. نسبت مقاومت کششی پس از اعمال حرارت به مقاومت کششی در دمای محیط را به عنوان نسبت پسماند مقاومت کششی شناخته و به صورت درصد بیان شده و نتایج آن برای طرح‌های اختلاط در شکل ۱۴ و جدول ۴ قابل مشاهده است.

پس از اعمال حرارت، نسبت پسماند مقاومت کششی برای هر طرح اختلاط متفاوت بود و بیشترین میزان آن (کمترین میزان افت مقاومت ناشی از حرارت) برای طرح مرجع با ۶۵/۹۳٪ (افت مقاومت به میزان ۳۴/۰۷٪) است که پیشتر بیان شد که بیش از هر چیز حاصل تجزیه محصولات هیدراتاسیون و تبخیر آب شیمیایی محصور در ساختار خمیر سیمان بوده، اما در باقی طرح‌ها به علت وجود لاستیک و پودر شیشه میزان این نسبت کمتر شد (افت مقاومت بیشتر بوده). اما با توجه به نتایج به دست آمده برای نسبت پسماند مقاومت‌های فشاری و کششی، مشخص است که نسبت پسماند مقاومت کششی در مقایسه با این نسبت برای مقاومت فشاری کمتر بود (افت کششی نسبت به افت فشاری ناشی از حرارت بیشتر بوده) که نشان دهنده آسیب بیشتر بتن در حوزه عملکرد کششی نسبت به عملکرد فشاری است. به عنوان مثال در طرح مرجع، نسبت پسماند مقاومت فشاری ۸۰/۱۵٪ بوده در حالی که این نسبت برای مقاومت کششی ۶۵/۹۳٪ شده است، که نشان

لاستیک به جای ماسه و ۱۰٪ پودر شیشه به جای سیمان، مقادیر بهینه بوده و همچنین اندازه درشت‌تر ذره 5R مقاومت فشاری بیشتری ارائه داد.

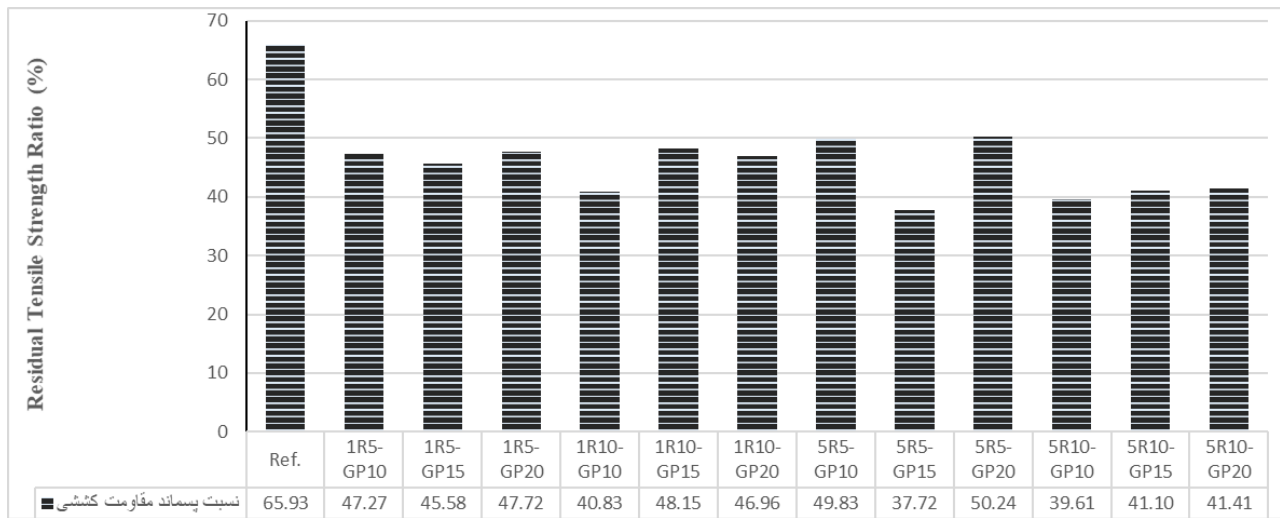
#### ۴-۵ نتایج آزمایشات مقاومت کششی

در شکل ۱۳ و جدول ۴ نتایج مقاومت کششی به روش دو نیم شدن در دماهای محیط و 600 °C قابل مشاهده می‌باشد.

در دمای محیط، مانند مقاومت فشاری، میزان لاستیک و پودر شیشه و اندازه ذرات لاستیک بر مقاومت کششی نیز مؤثر بوده. برای هر دو اندازه ذره لاستیک در میزان ثابت پودر شیشه، با افزایش میزان لاستیک از ۵٪ به ۱۰٪، به جز طرح‌های 5R5-GP20 و 5R10-GP20 در باقی طرح‌های ترکیبی مقاومت کششی کاهش یافت. در میزان جایگزینی ثابت لاستیک و پودر شیشه با افزایش اندازه ذرات لاستیک از 1R به 5R، مقاومت کششی افزایش داشت. تاثیر افزایش اندازه ذرات لاستیک به حدی بود که با افزایش اندازه، مقاومت کششی که برای تمامی طرح‌های ترکیبی دارای اندازه لاستیک 1R همواره کمتر از طرح مرجع بود، در طرح‌های دارای اندازه لاستیک 5R در طرح‌های 5R5-GP15، 5R5-GP10، 5R10-GP10، 5R10-GP15 و 5R10-GP20 حتی با وجود پودر شیشه، مقاومت کششی بیشتر از مقدار حاصله برای طرح مرجع بوده است.

همچنین در دمای محیط با ثابت بودن میزان و اندازه ذرات لاستیک، با افزایش میزان پودر شیشه مقاومت کششی کاهش یافت.





شکل ۱۴. نسبت پسماند مقاومت کششی طرح‌های اختلاط

Fig. 14. residual ratio of tensile strength of the mixtures

طرح مرجع داشته‌اند، پس از اعمال حرارت همگی مقاومت کششی کمتری نسبت به مرجع به دست آوردند. به عنوان مثال در دمای محیط، مقاومت کششی طرح‌های 5R5-GP10 و 5R10-GP10، نسبت به طرح مرجع به ترتیب ۲۹/۶۵٪ و ۱۲/۸۳٪ افزایش داشته‌اند، در حالی که پس از اعمال حرارت، مقاومت کششی طرح‌های مذکور نسبت به طرح مرجع به ترتیب، ۲/۰۱٪ و ۳۲/۲۱٪ کاهش از خود نشان داد.

با افزایش اندازه لاستیک در مقادیر ثابت پودر شیشه و لاستیک مقاومت کششی افزایش داشت.

با افزایش میزان پودر شیشه در طرح‌های ترکیبی، در میزان و اندازه ثابت ذرات لاستیک، پس از اعمال حرارت  $600^{\circ}\text{C}$  نیز همانند دمای محیط، کاهش در مقاومت کششی مشاهده شد. البته طرح 1R10-GP15 از این روند پیروی نکرد.

همانند دمای محیط، پس از اعمال حرارت نیز طرح 1R5-GP10 با  $1/44\text{ MPa}$  در بین طرح‌های دارای اندازه لاستیک 1R و طرح 5R5-GP10 با  $2/03\text{ MPa}$  در بین طرح‌های دارای 5R، بیشترین مقاومت کششی را داشته‌اند.

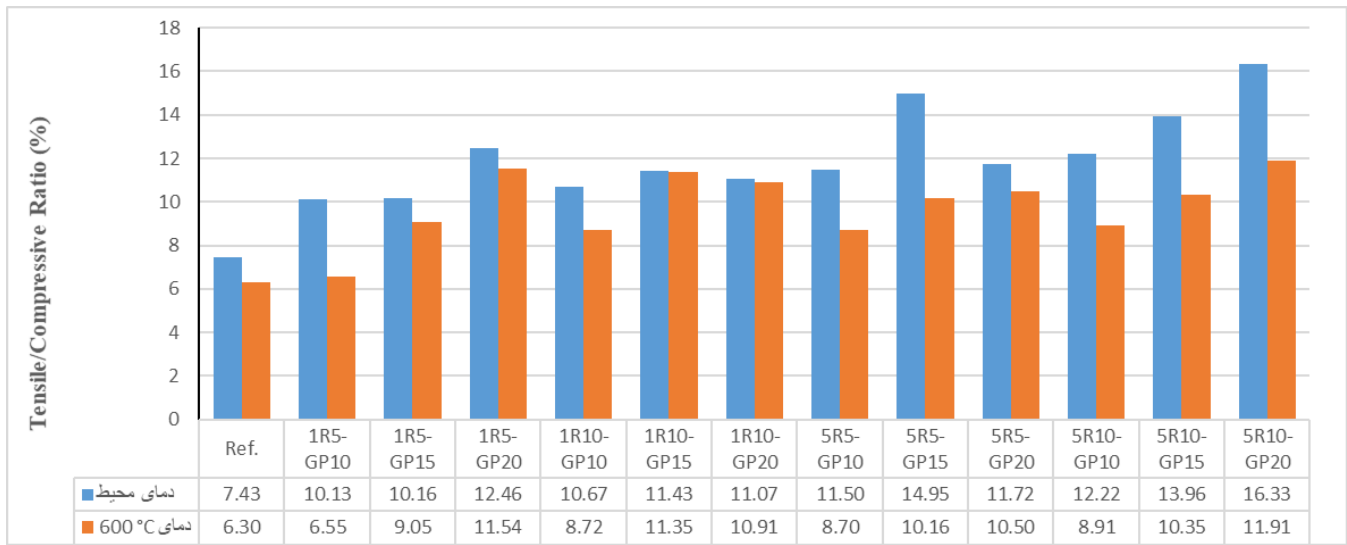
در نتیجه در هر دو حالت حرارتی میزان ۵٪ جایگزینی ذرات لاستیک و ۱۰٪ جایگزینی پودر شیشه مقادیر بهینه بوده و همانند نتایج مقاومت فشاری، در مقاومت کششی نیز طرح‌های دارای اندازه ذره لاستیک 5R

دهنده آسیب بیشتر طرح‌های اختلاط در مقاومت کششی نسبت به مقاومت فشاری است.

همانند روند نسبت پسماند مقاومت فشاری، با افزایش میزان لاستیک از ۵٪ به ۱۰٪، نسبت پسماند کششی نیز کاهش یافت، اما در مواردی این روند نقض شد. در مقادیر ثابت لاستیک و پودر شیشه، بر خلاف روند مشاهده شده در نسبت پسماند مقاومت فشاری، با افزایش اندازه لاستیک، نسبت پسماند مقاومت کششی در بیشتر موارد کاهش داشت. این امر می‌تواند بیانگر تاثیر بیشتر وجود حفرات بزرگ‌تر ایجاد شده حاصل از سوختن ذرات درشت‌تر لاستیک 5R نسبت به 1R در نسبت پسماند کششی باشد ولی تاثیر این حفرات بزرگ‌تر در حدی نبود که مقاومت کششی حاصله را نیز به صورت معکوس مقاومت فشاری حرارت دیده درآورد.

با افزایش پودر شیشه، در میزان و اندازه ثابت لاستیک، در بیشتر موارد نسبت پسماند کششی کمی افزایش داشته که روندی معکوس نسبت پسماند فشاری را نشان می‌دهد، البته موارد نقضی نیز وجود دارد.

پس از اعمال حرارت  $600^{\circ}\text{C}$ ، مقاومت کششی طرح‌های ترکیبی کمتر از طرح مرجع بود. با افزایش میزان لاستیک، در هر دو اندازه ذره و با میزان ثابت پودر شیشه، به علت سوختن مقدار لاستیک بیشتر، مقاومت کششی کاهش داشت. شدت آسیب حاصل از سوختن لاستیک در حدی بود که طرح‌های ترکیبی که در دمای محیط مقاومت کششی بیشتری نسبت به



شکل ۱۵. نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری معادل استوانه‌های طرح‌های اختلاط در دماهای محیط و 600 °C

Fig. 15. ratio of tensile strength to the equivalent compressive strength of the cylinder for mixtures at ambient temperature and 600 °C

معادل استوانه‌ای به دست آید [۳۸]. در شکل ۱۵ و جدول ۵ نسبت‌های مقاومت کششی به مقاومت فشاری معادل استوانه استاندارد، در دمای محیط و پس از اعمال حرارت 600 °C، قابل مشاهده است.

هم در دمای محیط و هم پس از اعمال حرارت 600 °C، اندازه و میزان ذرات لاستیک و پودر شیشه تاثیر مثبتی بر نسبت مقاومت کششی به فشاری داشته و باعث افزایش آن برای تمامی طرح‌های ترکیبی نسبت به طرح مرجع شده‌اند.

در هر دو حالت حرارتی با افزایش میزان جایگزینی لاستیک، در هر دو اندازه ذرات لاستیک، نسبت مقاومت کششی به فشاری عموماً افزایش داشت. همچنین در مقادیر ثابت ذرات لاستیک و پودر شیشه، در هر دو حالت حرارتی نیز با افزایش اندازه ذرات لاستیک، نسبت مقاومت کششی به فشاری عموماً افزایش یافت. در نتیجه وجود ذرات لاستیک، در هر دو حالت حرارتی، باعث عملکرد بهتر بتن در کشش نسبت به فشار می‌شود اما پس از اعمال حرارت، به علت سوختن بخش قابل توجهی از لاستیک این تاثیرگذاری چه از نظر میزان جایگزینی و چه از لحاظ اندازه ذره، کمتر شد.

در میزان و اندازه ثابت ذرات لاستیک، در هر دو حالت حرارتی، با افزایش میزان جایگزینی پودر شیشه نسبت مقاومت کششی به فشاری نیز افزایش

عموماً مقاومت بیشتری ارائه داده‌اند.

#### ۴-۶- نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری

در برخی تحقیقات جهت سنجش مقاومت کششی، آن را به صورت نسبتی از مقاومت فشاری بتن ارائه می‌دهند. با توجه به این که مقاومت‌های فشاری به دست آمده در این پژوهش از نمونه‌های مکعبی حاصل شد و مقادیر آن با مقاومت فشاری به دست آمده با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای متفاوت است، صرفاً برای حصول نتیجه دقیق‌تر نسبت مقاومت کششی به فشاری، مقاومت فشاری حاصله از نمونه‌های مکعبی با استفاده از روش ارائه داده شده توسط آیین‌نامه بتن ایران (آبا) [۳۸]، ابتدا به مقاومت معادل استوانه استاندارد تبدیل شد و سپس نسبت مقاومت کششی به فشاری با استفاده از آن، به دست آمد و به صورت درصد ارائه شد.

بر اساس آیین‌نامه بتن ایران (آبا) برای تبدیل مقاومت فشاری مکعبی به مقاومت فشاری معادل استوانه استاندارد، در مقادیر بالای 25 MPa مقاومت مکعبی، کافی است از مقدار مقاومت مکعبی به میزان 5 MPa کسر شده تا مقاومت استوانه‌ای استاندارد حاصل شود، برای مقادیر کمتر از 25 MPa مقاومت مکعبی نیز کافی است این مقادیر بر 1/25 تقسیم شده تا مقاومت

جدول ۵. نتایج مقاومت‌های فشاری و کششی در دماهای محیط و ۶۰۰ °C و نسبت آن‌ها

Table 5. results of compressive and tensile strengths at ambient temperatures and 600 °C and their ratio

نسبت مقاومت کششی به فشاری معادل استوانه (%)	مقاومت کششی (MPa)		مقاومت فشاری معادل استوانه (MPa)		مقاومت فشاری مکعبی (MPa)		کد طرح	
	محیط	۶۰۰ °C	محیط	۶۰۰ °C	محیط	۶۰۰ °C		
۶/۳۰	۷/۴۳	۲/۰۷	۳/۱۴	۳۲/۸۳	۴۲/۲۰	۳۷/۸۳	۴۷/۲۰	Reference
۶/۵۵	۱۰/۱۳	۱/۴۴	۳/۰۵	۲۲/۰۲	۳۰/۱۳	۲۷/۰۲	۳۵/۱۳	1R5-GP10
۹/۰۵	۱۰/۱۶	۱/۳۶	۲/۹۸	۱۵/۰۳	۲۹/۳۵	۱۸/۷۹	۳۴/۳۵	1R5-GP15
۱۱/۵۴	۱۲/۴۶	۱/۳۰	۲/۷۳	۱۱/۳۰	۲۱/۹۴	۱۴/۱۲	۲۶/۹۴	1R5-GP20
۸/۷۲	۱۰/۶۷	۱/۲۳	۳/۰۲	۱۴/۱۶	۲۸/۳۴	۱۷/۷۰	۳۳/۳۴	1R10-GP10
۱۱/۳۵	۱۱/۴۳	۱/۲۶	۲/۶۲	۱۱/۱۲	۲۲/۹۴	۱۳/۹۰	۲۷/۹۴	1R10-GP15
۱۰/۹۱	۱۱/۰۷	۱/۱۸	۲/۵۱	۱۰/۸۱	۲۲/۶۸	۱۳/۵۱	۲۷/۶۸	1R10-GP20
۸/۷۰	۱۱/۵۰	۲/۰۳	۴/۰۶	۲۳/۲۹	۳۵/۳۶	۲۸/۲۹	۴۰/۳۶	5R5-GP10
۱۰/۱۶	۱۴/۹۵	۱/۵۱	۴/۰۱	۱۴/۸۹	۲۶/۸۲	۱۸/۶۱	۳۱/۸۲	5R5-GP15
۱۰/۵۰	۱۱/۷۲	۱/۴۴	۲/۸۷	۱۳/۷۴	۲۴/۵۱	۱۷/۱۷	۲۹/۵۱	5R5-GP20
۸/۹۱	۱۲/۲۲	۱/۴۰	۳/۵۴	۱۵/۷۳	۲۸/۹۵	۱۹/۶۶	۳۳/۹۵	5R10-GP10
۱۰/۳۵	۱۳/۹۶	۱/۳۵	۳/۲۷	۱۳/۰۱	۲۳/۴۶	۱۶/۲۶	۲۸/۴۶	5R10-GP15
۱۱/۹۱	۱۶/۳۳	۱/۳۰	۳/۱۵	۱۰/۹۵	۱۹/۲۸	۱۳/۶۹	۲۴/۱۰	5R10-GP20

داشت. در دمای محیط و پس از قرارگیری در حرارت ۶۰۰ °C مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای تعیین تاثیر اندازه ذرات لاستیک جایگزین شده، از دو اندازه متفاوت ذرات لاستیک با اندازه بین ۱-۱/۱۵ mm (رده 1R) و اندازه بین ۳-۵ mm (رده 5R) استفاده شد. به علاوه به جهت بررسی رفتار این مواد در بتن، در دمای محیط، از تصاویر SEM نیز استفاده گردید.

نتایج حاصل از این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

۱- میزان اسلامپ در تمامی طرح‌های دارای لاستیک و پودر شیشه از طرح مرجع کمتر بوده است. در میزان ثابت پودر شیشه و در هر دو اندازه ذره لاستیک، با افزایش میزان ذرات لاستیک از ۰.۵٪ به ۱.۰٪، مقدار اسلامپ کاهش یافت. در میزان ثابت لاستیک و پودر شیشه، با افزایش اندازه ذره لاستیک از ۱-۱/۱۵ mm به اندازه ۳-۵ mm کاهش مقادیر اسلامپ

داشت. در دمای محیط و پس از قرارگیری در حرارت ۶۰۰ °C مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای تعیین تاثیر اندازه ذرات لاستیک جایگزین شده، از دو اندازه متفاوت ذرات لاستیک با اندازه بین ۱-۱/۱۵ mm (رده 1R) و اندازه بین ۳-۵ mm (رده 5R) استفاده شد. به علاوه به جهت بررسی رفتار این مواد در بتن، در دمای محیط، از تصاویر SEM نیز استفاده گردید.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر همزمان جایگزینی لاستیک تیره‌های ضایعاتی به جای بخشی از سنگدانه ریز طبیعی (ماسه طبیعی) و همین‌طور جایگزینی پودر شیشه به جای بخشی از سیمان، بر کارایی و خواص مکانیکی بتن،

از  $1\text{ mm}$ – $0/15$  به  $5\text{ mm}$ – $3$ ، مقاومت کششی افزایش نشان داد. پس از اعمال حرارت، شدت آسیب حاصل از سوختن لاستیک در حدی بود که طرح‌های دارای لاستیک و پودر شیشه که در دمای محیط مقاومت بیشتری نسبت به طرح مرجع داشتند، پس از اعمال حرارت  $600^\circ\text{C}$  همگی مقاومت کششی کمتری نسبت به طرح مرجع به دست آوردند. در هر دو حالت حرارتی، میزان جایگزینی  $5\%$  ذرات لاستیک به جای ماسه و  $10\%$  پودر شیشه به جای سیمان، مقادیر بهینه بوده و اندازه  $5\text{ mm}$ – $3$  عموماً مقاومت کششی بیشتری نسبت به اندازه  $1\text{ mm}$ – $0/15$  داشت.

۷- نسبت پسماند مقاومت کششی کلیه طرح‌های دارای لاستیک و پودر شیشه از مرجع کمتر بود. با افزایش میزان لاستیک، عموماً کاهش در این تناسب دیده شد و افزایش اندازه ذرات لاستیک از  $1\text{ mm}$ – $0/15$  به  $5\text{ mm}$ – $3$ ، در بیشتر موارد باعث کاهش نسبت پسماند مقاومت کششی شد. همچنین افزایش میزان جایگزینی پودر شیشه، عموماً باعث افزایش اندکی در نسبت پسماند شد.

۸- در هر دو دمای محیط و  $600^\circ\text{C}$ ، افزایش میزان جایگزینی و اندازه ذره برای لاستیک و همچنین افزایش میزان جایگزینی پودر شیشه، عموماً باعث افزایش نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری شد و این نشان دهنده این است که وجود لاستیک و پودر شیشه باعث عملکرد بهتر بتن در کشش نسبت به فشار شد. اما پس از اعمال حرارت به علت سوختن بخشی از لاستیک، این تاثیرگذاری چه از لحاظ میزان و چه اندازه ذره لاستیک کمتر شد.

علیرغم تفاوت‌های جزئی در روندهای به دست آمده برای نتایج مقاومت‌های فشاری و کششی طرح‌های اختلاط در دمای محیط و نتایج حاصله پس از اعمال حرارت  $600^\circ\text{C}$ ، با این حال مقدار جایگزینی ذرات لاستیک با سنگدانه ریز طبیعی به میزان  $5\%$  حجمی، در هر دو اندازه ذرات لاستیک و همچنین جایگزینی پودر شیشه به جای سیمان به میزان  $10\%$  وزنی، مقادیر بهینه بوده و بالاترین نتایج مقاومت فشاری و کششی را در طرح‌های اختلاط دارای لاستیک و پودر شیشه نشان دادند. همچنین از نظر اندازه ذرات لاستیک، اندازه  $5\text{ mm}$ – $3$ ، بهینه بوده و نتایج بهتری در مقاومت‌های فشاری و کششی، چه در دمای محیط و چه پس از اعمال حرارت  $600^\circ\text{C}$  در مقایسه با اندازه ذره  $1\text{ mm}$ – $0/15$  از خود نشان داد. بر این اساس به نظر می‌رسد استفاده از بتن دارای لاستیک به عنوان بخشی از سنگدانه ریز و پودر شیشه به عنوان بخشی از سیمان در ساخت اجزای سازه‌ای حداقل برای مقادیر جایگزینی بهینه اشاره شده در این تحقیق

مشاهده شد اما با افزایش میزان جایگزینی پودر شیشه به جای سیمان (در میزان و اندازه ثابت ذرات لاستیک)، مقادیر اسلامپ افزایش یافت. بر این اساس، از لحاظ کارایی میزان جایگزینی  $5\%$  لاستیک و  $20\%$  پودر شیشه مقادیر بهینه برای بتن‌های دارای لاستیک و پودر شیشه بوده و همچنین نشان داده شد که اندازه ذره لاستیک ریزتر  $1\text{ mm}$ – $0/15$  جایگزین شده به جای ماسه، کارایی بهتری ارائه داد.

۲- پس از اعمال حرارت  $600^\circ\text{C}$  برای تمامی طرح‌های اختلاط افت وزن مشاهده شد ولی طرح‌های دارای لاستیک و پودر شیشه افت کمتری نشان دادند که علت آن جایگزینی پودر شیشه به جای سیمان می‌باشد و هر چه این جایگزینی بیشتر شد، افت کمتر بوده. با افزایش میزان جایگزینی لاستیک (برای هر دو اندازه) افت وزن افزایش یافت و اندازه لاستیک  $5\text{ mm}$ – $3$  افت کمتری داشت.

۳- از تصاویر SEM در دمای محیط، مشخص است که در ناحیه مرزی بین هر دو اندازه لاستیک و ماتریس خمیر سیمان درزهای میکروسکوپی وجود دارد که می‌توانند در تسریع شکست نمونه‌ها کمک کرده و متعاقب آن منجر به کاهش مقاومت فشاری شوند.

۴- در هر دو حالت حرارتی، میزان مقاومت فشاری طرح‌های دارای لاستیک و پودر شیشه، کمتر از طرح مرجع بوده و با افزایش میزان جایگزینی ذرات لاستیک و پودر شیشه (در هر دو اندازه ذره لاستیک) مقاومت فشاری کاهش داشت. همچنین از نظر اندازه ذره لاستیک جایگزین شده به جای سنگدانه ریز طبیعی، اندازه  $5\text{ mm}$ – $3$  مقاومت فشاری بیشتری نسبت به اندازه  $1\text{ mm}$ – $0/15$  نشان داد. کاهش مقاومت فشاری پس از اعمال حرارت، با افزایش میزان جایگزینی ذرات لاستیک، نسبت به دمای محیط بیشتر بوده که علت آن سوختن لاستیک مصرفی می‌باشد. و در هر دو حالت حرارتی، میزان جایگزینی  $5\%$  ذرات لاستیک به جای ماسه و  $10\%$  پودر شیشه به جای سیمان، مقادیر بهینه بوده و اندازه  $5\text{ mm}$ – $3$  مقاومت فشاری بیشتری نسبت به اندازه  $1\text{ mm}$ – $0/15$  داشت.

۵- پس از اعمال حرارت، نسبت پسماند مقاومت فشاری طرح‌های دارای لاستیک و پودر شیشه نسبت به طرح مرجع کمتر بوده و با افزایش میزان جایگزینی لاستیک و پودر شیشه، کاهش در این نسبت مشاهده شد. همچنین با افزایش اندازه ذره لاستیک جایگزین شده از  $1\text{ mm}$ – $0/15$  به  $5\text{ mm}$ – $3$ ، نسبت پسماند مقاومت فشاری، افزایش یافت.

۶- در هر دو حالت حرارتی، با افزایش میزان جایگزینی ذرات لاستیک و پودر شیشه، مقاومت کششی کاهش یافت. با افزایش اندازه ذرات لاستیک

and other mechanical properties of structural concrete, *Journal of Cleaner Production*, 314 (2021) 128230.

- [10] A.M. Marques, J.R. Correia, J. de Brito, Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled rubber aggregate, *Fire Safety Journal*, 58 (2013) 49-57.
- [11] L. Guelmine, H. Hadjab, A. Benazzouk, Effect of elevated temperatures on physical and mechanical properties of recycled rubber mortar, *Construction and Building Materials*, 126 (2016) 77-85.
- [12] T. Gupta, S. Siddique, R.K. Sharma, S. Chaudhary, Effect of elevated temperature and cooling regimes on mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber fiber, *Construction and Building Materials*, 137 (2017) 35-45.
- [13] M. Mousavimehr, M. Nematzadeh, Predicting post-fire behavior of crumb rubber aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 229 (2019) 116834.
- [14] Y. Tang, W. Feng, W. Feng, J. Chen, D. Bao, L. Li, Compressive properties of rubber-modified recycled aggregate concrete subjected to elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 268 (2021) 121181.
- [15] Y. Jiang, T.-C. Ling, K.H. Mo, C. Shi, A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products, *Journal of Environmental Management*, 242 (2019) 440-449.
- [16] F. Rajabipour, E. Giannini, C. Dunant, J.H. Ideker, M.D.A. Thomas, Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps, *Cement and Concrete Research*, 76 (2015) 130-146.
- [17] K. Zheng, Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Composites*, 67 (2016) 30-38.
- [18] R.F. Bleszynski, M.D.A. Thomas, Microstructural Studies of Alkali-Silica Reaction in Fly Ash Concrete Immersed in Alkaline Solutions, *Advanced Cement Based Materials*, 7(2) (1998) 66-78.

بلامانع باشد. با این حال بررسی‌های بیشتر در زمینه نداشتن تاثیر منفی استفاده از لاستیک ضایعاتی و پودر شیشه بر دوام بتن حس می‌شود.

## منابع

- [1] A. Siddika, M.A.A. Mamun, R. Alyousef, Y.H.M. Amran, F. Aslani, H. Alabduljabbar, Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review, *Construction and Building Materials*, 224 (2019) 711-731.
- [2] F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, S. Jalali, Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview, *Construction and Building Materials*, 30 (2012) 714-724.
- [3] K. Strukar, T. Kalman Šipoš, I. Miličević, R. Bušić, Potential use of rubber as aggregate in structural reinforced concrete element – A review, *Engineering Structures*, 188 (2019) 452-468.
- [4] R. Hassanli, J.E. Mills, D. Li, T. Benn, Experimental and Numerical Study on the Behavior of Rubberized Concrete, *Advances in Civil Engineering Materials*, 6(1) (2017) 134-156.
- [5] B.S. Thomas, R.C. Gupta, Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber, *Journal of Cleaner Production*, 102 (2015) 78-87.
- [6] M. Gesoglu, E. Güneyisi, O. Hansu, S. İpek, D.S. Asaad, Influence of waste rubber utilization on the fracture and steel-concrete bond strength properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 101 (2015) 1113-1121.
- [7] F. Aslani, G. Ma, D.L. Yim Wan, V.X. Tran Le, Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Journal of Cleaner Production*, 172 (2018) 1835-1847.
- [8] L.-J. Li, G.-R. Tu, C. Lan, F. Liu, Mechanical characterization of waste-rubber-modified recycled-aggregate concrete, *Journal of Cleaner Production*, 124 (2016) 325-338.
- [9] S. Karunarathna, S. Linforth, A. Kashani, X. Liu, T. Ngo, Effect of recycled rubber aggregate size on fracture

- Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [29] ASTM C128-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [30] INSO 302, Concrete Aggregate — Specifications, 4th Revision, in, Iranian National Standardization Organization, 2020. (in Persian)
- [31] ASTM C33/C33M-18, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [32] ASTM C192/C192M-19, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [33] ASTM C511-21, Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- [34] ASTM C143/C143M-20, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- [35] INSO 1608-3, Hardened Concrete-Part 3: Compressive Strength of Test Specimens- Test Method, 1st.Edition, in, Iranian National Standardization Organization, 2015. (in Persian).
- [36] BS EN, 12390-3: 2019 Testing Hardened Concrete— Part 3: Compressive Strength of Test Specimens, British Standards Institution, 2019.
- [37] ASTM C496/C496M-17, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [38] Iranian Concrete Code, Materials and Construction, No.120-2, in, Plan and Budget Organization, Tehran, Iran, 2021. (in Persian).
- [19] Z. Kalakada, J.H. Doh, G. Zi, Utilisation of coarse glass powder as pozzolanic cement—A mix design investigation, *Construction and Building Materials*, 240 (2020) 117916.
- [20] O.M. Olofinnade, J.M. Ndambuki, A.N. Ede, C. Booth, Application of waste glass powder as a partial cement substitute towards more sustainable concrete production, in: *International Journal of Engineering Research in Africa*, Trans Tech Publ, 2017, pp. 77-93.
- [21] H.A. Elaqla, M.A.A. Haloub, R.N. Rustom, Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete, *Construction and Building Materials*, 203 (2019) 75-82.
- [22] D. Patel, R.P. Tiwari, R. Shrivastava, R.K. Yadav, Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar, *Construction and Building Materials*, 199 (2019) 406-415.
- [23] A.A. Aliabdo, A.E.M. Abd Elmoaty, A.Y. Aboshama, Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete, *Construction and Building Materials*, 124 (2016) 866-877.
- [24] Z. Pan, Z. Tao, T. Murphy, R. Wuhler, High temperature performance of mortars containing fine glass powders, *Journal of Cleaner Production*, 162 (2017) 16-26.
- [25] B. Li, T.-C. Ling, J.-G. Yu, J. Wu, W. Chen, Cement pastes modified with recycled glass and supplementary cementitious materials: Properties at the ambient and high temperatures, *Journal of Cleaner Production*, 241 (2019) 118155.
- [26] INSO 389, Portland cement — Specifications, 4th Revision, in, Iranian National Standardization Organization, 2020. (in Persian)
- [27] ASTM C150/C150M-21, Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- [28] ASTM C127-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Jafarpour, M. Mokhtari, N. Soltani, Evaluation of the parameters affecting the seismic response of underground cavities considering earthquakes in near and far fault fields, Amirkabir J. Civil Eng., 55(1) (2023) 85-108.*

**DOI:** 10.22060/ceej.2022.21263.7670



