

# بررسی آزمایشگاهی عملکرد مکانیکی بتن حاوی شیشه و لاستیک ضایعاتی در دمای بالا

رامین جعفری<sup>۱</sup>، محمدهادی علیزاده الیزئی<sup>۲\*</sup>، مسعود ضیائی<sup>۳</sup>، رضا اسمعیل آبادی<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکترای عمران-سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن
- ۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن
- ۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گرمسار
- ۴- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن

\*alizadeh.mh@riau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰

## چکیده

شیشه و لاستیک از جمله مواد بسیار پر مصرف در دنیا هستند که با توجه به ماهیت و نوع مصرفشان دارای ضایعات بسیاری می‌باشند. تغییر شکل و استفاده مجدد از این ضایعات یکی از راهکارهای بهبود وضعیت پایدار محیط زیست است. کاربرد مصالح بازیافتی در صنایع مختلفی از جمله صنعت ساختمان رواج بسیاری یافته است. از طرف دیگر، بتن یکی از مصالح بسیار کاربردی در صنعت ساختمان است و اضافه کردن خرده‌های لاستیک و شیشه در بتن می‌تواند باعث بهبود برخی از ویژگی‌های مکانیکی و دینامیکی آن شود. همچنین، مقاومت بتن در برابر حرارت نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد که با اضافه کردن لاستیک و شیشه ضایعاتی می‌توان آن را ارتقا داد. در این تحقیق اثر جایگزینی لاستیک با درصدی از سنگدانه‌های ریز و درشت بتن و پودر شیشه با درصدی از سیمان بتن تحت دمای بالا مورد مطالعه قرار گرفته است. به این ترتیب که نمونه‌های بتنی حاوی لاستیک و شیشه با درصدهای مختلف جایگزینی، ساخته شده است. سپس تعدادی از نمونه‌ها بدون قرار گرفتن تحت حرارت و تعدادی دیگر پس از قرار گرفتن تحت دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، مورد آزمایش مقاومت فشاری و کششی پسماند قرار گرفتند. بررسی ریزساختار بتن حاوی شیشه و لاستیک، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان داد اضافه کردن لاستیک و شیشه به بتن باعث کاهش مقاومت فشاری و افزایش مقاومت کششی می‌شود. با مقایسه مجموع نمونه‌های حرارت ندیده و حرارت دیده می‌توان نتیجه گرفت که حرارت ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، به‌طور متوسط حدود ۳۳ درصد از مقاومت فشاری کاسته است. به‌طور کلی بتن‌های ساخته شده با ۵ درصد جایگزینی لاستیک و ۱۰ درصد پودر شیشه در دمای محیط و ۱۵ درصد پودر شیشه در دمای بالا، عملکرد بهتری نشان دادند. همچنین در بررسی ریزساختار بتن، چسبندگی بین لاستیک و بتن مناسب بود.

**واژگان کلیدی:** بتن - پودر شیشه - لاستیک ضایعاتی - دمای بالا - مقاومت پسماند

## ۱- مقدمه

استفاده از مصالح بازیافتی به دلیل وجود حجم زیاد آن‌ها، در عصر حاضر بسیار حائز اهمیت بوده و در صنایع مختلفی از جمله صنعت ساختمان رواج بسیاری یافته است. این کار از دو جهت به بهبود پایداری کمک می‌کند. اول، استفاده مجدد از موادی که محیط زیست را تحت فشار قرار داده و منابع کمیاب زمین را اشغال خواهند کرد. دوم، تخریب زمین و محیط زیست را در نتیجه خاک‌برداری نسبتاً کمتر به حداقل می‌رساند. بازیافت، در حال حاضر یک عمل رایج است زیرا منابع کره زمین را حفظ می‌کند [1]. استفاده مجدد از ضایعات به نوعی دیگر، یکی از راهکارهای مهم در موضوع بازیافت است. از جمله موادی که قابلیت استفاده مجدد را دارند شیشه و لاستیک است که با توجه به جنس و نوع مصرف‌شان ضایعات بسیاری دارند. کاربرد شیشه و لاستیک ضایعاتی در صنعت ساختمان می‌تواند یک راهکار مناسب در استفاده مجدد از مصالح ضایعاتی باشد. مثلاً اضافه کردن خرده‌های لاستیک و شیشه ضایعاتی در بتن باعث بهبود برخی از ویژگی‌های مکانیکی و دینامیکی آن می‌شود و در تغییر عملکرد آن موثر است.

بتن یکی از مصالح بسیار پرکاربرد در صنایع است. خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب بتن از یکسو و سهولت تولید آن از سوی دیگر بتن را به پرمصرف‌ترین مصالح در صنعت ساختمان تبدیل نموده است [2]. استفاده از مواد جایگزین و یا افزودنی مختلف در بتن، باعث تغییر در برخی خواص بتن مانند مقاومت فشاری و کششی می‌شود. جدا از مقاومت فشاری، مقاومت در برابر آتش مصالح مختلف ساختمان، سناریوهای کاربرد آن را تعیین می‌کند. بتن معمولاً در برابر آتش مقاوم است، زیرا دارای هدایت حرارتی کم و غیرقابل احتراق است. با این حال، از سوختگی ناشی از آتش رنج می‌برد، که یکی از پیچیده‌ترین پدیده‌ها و دارای درک ضعیفی در مهندسی آتش است [3, 4]. وقتی بتن در معرض آتش قرار می‌گیرد، باعث تبخیر آب آزاد،

کم آب شدن محصولات هیدراته سیمان و همچنین انبساط سنگدانه‌ها می‌شود و پیرو آن، کاهش قابل توجه مقاومت، از دست دادن یکپارچگی و عایق حرارتی رخ می‌دهد [5]. افزودن شیشه و لاستیک به بتن البته با توجه به مقدار و اندازه آن‌ها می‌تواند مقاومت در برابر حرارت بتن را تا حدودی افزایش دهد. شیشه ماده‌ای است که می‌تواند بدون اینکه خواص خود را از دست بدهد بازیافت شده و مورد استفاده مجدد قرار گیرد. یکی از راه‌های بازیافت شیشه، استفاده از آن در بتن به عنوان ریزدانه، درشت‌دانه و جایگزین سیمان است. با این حال، استفاده از سنگدانه‌های شیشه‌ای (حاوی مقدار زیادی سیلیس بی‌نظم) در بتن باعث مشکل واکنش قلیایی-سیلیسی (ASR) می‌شود [6]. به‌طورکلی، این مشکل زمانی در بتن رخ می‌دهد که سیلیس سنگدانه واکنش‌پذیر یا تا حدی واکنش‌پذیر، با محلول منفذ قلیایی واکنش نشان دهد [7]. مطالعات نشان می‌دهد اگر شیشه به اندازه کافی ریز شود می‌تواند در مخلوط‌های بتنی به دور از هرگونه نگرانی در مورد وقوع واکنش قلیایی-سیلیسی مورد استفاده قرار گیرد [8]. از پودر شیشه با اندازه کمتر از ۷۵ میکرون می‌توان به عنوان جایگزین سیمان در بتن استفاده کرد تا از واکنش قلیایی-سیلیسی جلوگیری شود [9]. در یک تحقیق، مقاومت فشاری بتن حاوی پودر شیشه بازیافتی با درصد‌های ۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ در سنین مختلف ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۵ روز مورد آزمایش قرار گرفت. با افزایش درصد شیشه، میانگین مقاومت فشاری کمتری نسبت به بتن شاهد (۰٪ شیشه) در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روزه بدست آمد. ولی با پیشرفت بیشتر واکنش در سن ۹۰ روز، بتن‌های حاوی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد شیشه، میانگین مقاومت فشاری بیشتر از بتن شاهد را ایجاد کردند و جایگزینی شیشه ۱۰ درصد، بالاترین مقدار را در میان آن‌ها داشت [10]. در مطالعه‌ای دیگر پودر شیشه با اندازه ۱ تا ۱۰۰ میکرون با درصد‌های جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ به صورت وزنی جایگزین سیمان شد. طبق آزمایش‌های انجام شده، مشاهده شد

که در نمونه‌های جایگزینی ۱۵ درصد پودر شیشه، مقاومت فشاری به حداکثر خود رسیده است [11]. در تحقیقی دیگر شیشه بازیافتی با هفت نسبت وزنی مختلف ۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪، ۲۵٪ و ۳۰٪، جایگزین سیمان شده است. مقاومت فشاری بتن حاوی شیشه بازیافتی، با افزایش مقدار شیشه بازیافتی در ۲۵٪ و ۳۰٪ جایگزینی شیشه، کاهش می‌یابد. در بخش دیگر آن، نمونه‌های بتن جایگزینی شیشه با سیمان، به مدت یک ساعت در معرض درجه حرارت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها مقاومت خوبی در برابر درجه حرارت‌های بالا از خود نشان داده‌اند [12].

لاستیک‌های ضایعاتی نیز از جمله موادی هستند که ذخیره‌سازی حجم زیاد آن‌ها دارای اثرات فاجعه‌آمیزی است که در صورت عدم بازیابی یا تجزیه مناسب، باعث ایجاد نگرانی‌های بهداشتی و زیست محیطی می‌شود [13]. چندین روش برای استفاده مجدد یا بازیافت لاستیک تایر پیشنهاد شده است، از جمله استفاده در روکش آسفالت، سوخت برای کوره‌های سیمان، مواد اولیه برای تولید کربن سیاه و ساخت صخره‌های مصنوعی در محیط‌های دریایی. با این حال، برخی از این پیشنهادات از نظر اقتصادی یا زیست محیطی مقرون به صرفه نیستند [14].

لاستیک‌های مورد استفاده در صنعت خودرو از ۷۰ تا ۸۰ درصد لاستیک ولکانیزه بسیار بادوام ساخته شده‌اند که نمی‌توان آن‌ها را به راحتی بازیافت کرد [15]. یکی از راه‌های غلبه بر مشکل ضایعات لاستیک، استفاده از آن‌ها در زیرساخت‌های مهندسی عمران است [16, 17]. طبق مطالعات انجام شده وقتی لاستیک به مخلوط بتن اضافه می‌شود، بدست آوردن یک مخلوط یکنواخت دشوار است. این مشکل ناشی از تفاوت عمده بین خواص حجمی لاستیک و سنگدانه‌های بتنی است [18]. اکثر محققان تأیید کرده‌اند که با افزایش فاز لاستیکی در مخلوط بتنی، کاهش مقاومت فشاری و افزایش شکل‌پذیری وجود دارد [16].

مقاومت فشاری بتن حاوی لاستیک در سطوح بالای جایگزینی

لاستیک (به عنوان مثال ۱۰۰٪ جایگزینی ماسه) تا ۹۰٪ کاهش می‌یابد [19]. مقاومت فشاری پایین بتن حاوی لاستیک را می‌توان به نسبت پواسون تقریباً بالای ذرات لاستیک (حدود ۰/۵)، تخلخل زیاد مخلوط و ضعف چسبندگی لاستیک و سیمان در ناحیه انتقال سطحی (ITZ) نسبت داد [20, 21]. عوامل دیگری که مقاومت بتن حاوی لاستیک را کاهش می‌دهند شامل جداشدگی، سختی کلی کمتر مخلوط و روش‌های ساخت و عمل‌آوری می‌باشند [22]. تجزیه و تحلیل ریزساختار بتن حاوی لاستیک، تخلخل بالاتری را در ماتریس بخش انتقال سطحی خمیر سیمان و لاستیک در مقایسه با بتن معمولی نشان می‌دهد [23, 24]. در یک پژوهش، از خرده لاستیک ضایعاتی با حداکثر اندازه ۶ میلی‌متر با میزان جایگزینی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی شن نخودی استفاده شده است. بر اساس نتایج، در همه درصدها شاهد کاهش مقاومت فشاری، چگالی و مدول الاستیسیته بودیم و مقاومت خمشی بتن با ۵ درصد لاستیک نسبت به نمونه شاهد، بهبود پیدا کرده است [25].

موضوع دیگر، مقاومت در برابر حرارت مصالح می‌باشد، که یکی از ویژگی‌هایی است که در نوع کاربرد آن موثر است. حرارت بالا می‌تواند باعث تغییر ریزساختار مواد و در نتیجه تغییر ماهیت کلی آن شود. آتش‌سوزی و قرار گرفتن سازه در معرض حرارت می‌تواند باعث کاهش عملکرد اجزای آن شود. عمده تلفات زلزله، مربوط به فروریزش ساختمان‌هاست اما این تلفات شامل تلفات ناشی از اتفاقات پس از زلزله مانند آتش‌سوزی نیز است [26]. بدین ترتیب مقاوم کردن اجزای سازه ساختمان و یا مصالح تشکیل دهنده آن در برابر حرارت، بسیار می‌تواند در جلوگیری از فروریزش ساختمان هنگام قرارگیری سازه در معرض حرارت بالا موثر باشد. در یک تحقیق، عملکرد و تغییرات خواص مکانیکی بتن‌های حاوی خرده لاستیک با نرخ جایگزینی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد با ریزدانه طبیعی تحت تاثیر درجه حرارت‌های ۲۷، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ سانتی‌گراد مورد

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۲ شاهرود

Component	Result(%)	Factory standard	ISIRI 389	Test Method
SiO2	21.11	Min20.5	Min 20	1692
Al2O3	4.48	Max 5	Max 6	
Fe2O3	3.91	Max 5	Max 6	
CaO	63.36	-	-	
MgO	1.48	Max 2.5	Max 5	
SO3	2.58	Max 2.9	Max 3	
Na2O	0.43	-	-	1695
K2O	0.48	-	-	
L.O.I	2.25	Max 2.9	Max 3	
IR	0.45	Max 0.7	Max 0.75	1692
F.CaO	1.50	-	-	
C3S	52.8	-	-	
C2S	21.0	-	-	
C3A≤8	5.3	-	-	

Table 1. Chemical characteristics of Shahroud Type 2 cement

لاستیک‌ها، از نظر مواد تشکیل دهنده به ویژه به دلیل مقدار لاستیک طبیعی و مصنوعی موجود در آن‌ها، متفاوت هستند [33]. خرده لاستیک‌های مورد استفاده در این تحقیق، از آسیاب مکانیکی لاستیک ضایعاتی تایرهای کامیون بدست آمده‌اند که بدون هیچ‌گونه آلاینده‌گی یا اصلاح، از یک کارخانه بازیافت واقع در شهر رباط کریم تهیه شده است. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده، این خرده لاستیک‌ها دارای دو رده اندازه مختلف بودند. رده ۱-۳ میلی‌متر و ۵-۱۰ میلی‌متر با وزن مخصوص ۱/۰۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب که به‌عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه و درشت‌دانه مورد استفاده قرار گرفت. جذب آب هر دو رده اندازه خرده لاستیک، ناچیز در نظر گرفته شده است.

شکل ۱. خرده لاستیک‌های مورد استفاده در بتن



Fig. 1. Rubber crumbs used in concrete

بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، تحت تاثیر افزایش حرارت و افزایش درصد خرده لاستیک در بتن، به میزان زیادی کاهش می‌یابد [27]. در این تحقیق اثر جایگزینی هم‌زمان پودر شیشه و لاستیک در بتن در دمای معمولی و دمای بالا مورد مطالعه قرار گرفته است. متغیرهای این تحقیق عبارتند از: اندازه لاستیک جایگزین، درصد لاستیک جایگزین، درصد جایگزینی پودر شیشه و درجه حرارتی که نمونه‌های بتنی در معرض آن قرار می‌گیرند. با توجه به مطالعات قبلی، اندازه لاستیک مورد استفاده در بتن در این تحقیق در دو رده ۱ تا ۳ میلی‌متر و ۵ تا ۱۰ میلی‌متر است که در طرح اختلاط‌های جداگانه به ترتیب جایگزین ریزدانه و درشت‌دانه با مقدار جایگزینی ۰، ۵ و ۱۰ درصد شده است. اندازه شیشه استفاده شده در بتن، حداکثر ۷۵ میکرون با مقدار جایگزینی ۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد است که جایگزین سیمان شده است. همچنین تعدادی از نمونه‌های بتنی بدون قرار گرفتن تحت حرارت و تعداد دیگر با قرار گرفتن تحت حرارت ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد توسط کوره الکتریکی مورد آزمایش فشاری و کششی پسماند قرار گرفتند.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱ مشخصات مصالح

سیمان مورد استفاده در این آزمایش، سیمان پرتلند نوع ۲ یا همان سیمان پرتلند اصلاح شده است که از کارخانه سیمان شاهرود تهیه شده و طبق استاندارد ملی ایران شماره ۳۸۹ [28] تولید می‌شود. این سیمان دارای وزن مخصوص  $3/15 \text{ g/cm}^3$  و سطح ویژه (بلین)  $3150 \text{ cm}^2/\text{g}$  و انبساط اتوکلاو  $0/046$  است و تمام پیش نیازهای آیین‌نامه ASTM C150 [29] را تامین می‌نماید [30]. مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۲ شاهرود در جدول (۱) آمده است.

آمده است. وزن مخصوص اشباع با سطح خشک شن بادامی و نخودی به ترتیب ۲/۵۸ و ۲/۵۷ گرم بر سانتی متر مکعب و همچنین جذب آب آن‌ها نیز به ترتیب ۱/۵۶٪ و ۱/۸۳٪ بدست آمده است. منحنی دانه‌بندی ماسه و شن مصرفی در بتن در شکل (۲) ارائه شده است.

آزمایش وزن مخصوص و جذب آب مصالح ریزدانه (ماسه) و درشت‌دانه (شن) مورد استفاده در این تحقیق به ترتیب طبق آیین‌نامه‌های ASTM C128 [31] و ASTM C127 [32] انجام شده است. وزن مخصوص اشباع با سطح خشک ماسه ۲/۵۶ گرم بر سانتی متر مکعب و جذب آب آن ۲/۸۳٪ بدست

شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه و شن مصرفی در بتن

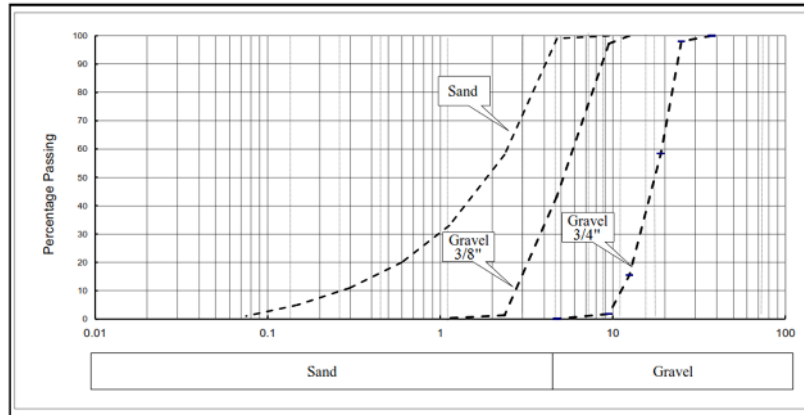


Fig. 2. Granulation curve of sand and gravel used in concrete

آب مورد استفاده در ساخت بتن و عمل‌آوری نمونه‌ها، آب لوله‌کشی آشامیدنی شهر تهران می‌باشد.

## ۲-۲ طرح‌های اختلاط

ابتدا یک طرح اختلاط بتن معمولی با مقدار نسبت آب به سیمان ۰/۴۱ و مقدار سیمان ۴۲۵ کیلوگرم در مترمکعب، به عنوان بتن مرجع طبق استاندارد ACI-211.1-91 [34] طراحی شد. سپس شیشه و لاستیک ضایعاتی طبق ۱۲ طرح و با درصد‌های مختلف به صورت وزنی با هم در بتن مرجع جایگزین شدند.

به این صورت که در ۳ طرح اختلاط، لاستیک با اندازه ۱ تا ۳ میلی‌متر با نسبت ثابت ۵٪ جایگزین ریزدانه و پودر شیشه با نسبت‌های ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ جایگزین سیمان شد. در ۳ طرح اختلاط، لاستیک با اندازه ۱ تا ۳ میلی‌متر با نسبت ثابت ۱۰٪ جایگزین ریزدانه و پودر شیشه با نسبت‌های ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ جایگزین سیمان شد.

در ۳ طرح اختلاط دیگر، لاستیک با اندازه ۵ تا ۱۰ میلی‌متر با نسبت ثابت ۵٪ جایگزین درشت‌دانه و پودر شیشه ضایعاتی با

در این پژوهش از پودر شیشه بازیافتی از شیشه‌های ساختمانی استفاده شده است که دارای ناخالصی و انواع دیگر شیشه‌ها مانند شیشه بطری، لامپ و غیره نیست. این پودر شیشه از کارخانه بازیافت شیشه ملل آرمه گلاسیبید واقع در اصفهان تهیه شده است و دارای حداکثر اندازه ۷۵ میکرون (عبوری از الک نمره ۲۰۰)، وزن مخصوص ۲/۹۴ گرم بر سانتی متر مکعب و سطح ویژه ۲۶۱۸ سانتی مترمربع بر گرم می‌باشد. پودر شیشه به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مورد استفاده قرار گرفته است.

شکل ۳. پودر شیشه مورد استفاده جایگزین سیمان



Fig. 3. Glass powder used to replace cement

نامگذاری طرح‌های اختلاط به این صورت است که R، D و C به ترتیب معرف لاستیک ریزدانه (۱-۳ میلی‌متر)، لاستیک درشت‌دانه (۵-۱۰ میلی‌متر) و پودر شیشه است و عدد بعد از آن بیانگر درصد استفاده از این مصالح به عنوان جایگزین است. برای نمونه، طرح R5C10 نمایانگر مقدار ۵٪ لاستیک ۱ تا ۳ میلی‌متر جایگزین ریزدانه بتن و ۱۰٪ پودر شیشه جایگزین سیمان در طرح مرجع می‌باشد و یا طرح D5C10 نمایانگر مقدار ۵٪ لاستیک ۵ تا ۱۰ میلی‌متر جایگزین درشت‌دانه بتن و ۱۰٪ پودر شیشه جایگزین سیمان در طرح مرجع می‌باشد. در جدول (۲) جزئیات طرح‌های اختلاط بیان شده است.

نسبت‌های ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ جایگزین سیمان شد. در ۳ طرح اختلاط دیگر، لاستیک با اندازه ۵ تا ۱۰ میلی‌متر با نسبت ثابت ۱۰٪ جایگزین درشت‌دانه و پودر شیشه ضایعاتی با نسبت‌های ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ جایگزین سیمان شد. روش جایگزینی این طور است که ابتدا از سنگدانه طرح مرجع (ریزدانه یا درشت‌دانه) به مقدار وزنی مورد نظر (۵٪ یا ۱۰٪) کسر شده و به مقدار حجمی آن، لاستیک (با اندازه ۱-۳ میلی‌متر یا ۵-۱۰ میلی‌متر) اضافه شده است. در هر کدام از طرح‌های بالا، پودر شیشه نیز جایگزین سیمان شده است. به این صورت که از سیمان طرح مرجع مقدار ۱۰٪ یا ۱۵٪ یا ۲۰٪ وزنی آن کسر شده و به همان مقدار پودر شیشه اضافه شده است.

جدول ۲. جزئیات طرح‌های اختلاط مورد استفاده در تحقیق

W/C	Water	rubber	Glass Powder	Cement	Gravel 3/4"	Gravel 3/8"	Sand	Size of Glass replaced (Microns)	Percent of Glass replaced	Type of replaced	Size of Rubber replaced (mm)	Percent of Rubber replaced	Design Symbol
0.41	175	0	0	425	509	253	958	0	0	-	0	0	R0C0 (Reference concrete)
0.41	175	19.5	42.5	382.5	509	253	910	75	10	Fine	1-3	5	R5C10
0.41	175	19.5	64	361.5	509	253	910	75	15	Fine	1-3	5	R5C15
0.41	175	19.5	85	340	509	253	910	75	20	Fine	1-3	5	R5C20
0.41	175	39	42.5	382.5	509	253	862	75	10	Fine	1-3	10	R10C10
0.41	175	39	64	361.5	509	253	862	75	15	Fine	1-3	10	R10C15
0.41	175	39	85	340	509	253	862	75	20	Fine	1-3	10	R10C20
0.41	175	15.5	42.5	382.5	484	240	958	75	10	Coarse	5-10	5	D5C10
0.41	175	15.5	64	361.5	484	240	958	75	15	Coarse	5-10	5	D5C15
0.41	175	15.5	85	340	484	240	958	75	20	Coarse	5-10	5	D5C20
0.41	175	31	42.5	382.5	458	228	958	75	10	Coarse	5-10	10	D10C10
0.41	175	31	64	361.5	458	228	958	75	15	Coarse	5-10	10	D10C15
0.41	175	31	85	340	458	228	958	75	20	Coarse	5-10	10	D10C20

Table 2. Details of the mixing designs used in the research

شده است. از قالب‌های مکعبی با اندازه ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر برای آزمایش مقاومت فشاری و از قالب‌های استوانه‌ای با اندازه قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر برای آزمایش مقاومت کششی

**۲-۳ ساختن بتن، قالب‌گیری و عمل‌آوری نمونه‌ها**  
ساختن و قالب‌گیری نمونه‌های بتنی مورد مطالعه طبق استانداردهای ASTM C192 [35] و ASTM C172 [36] انجام

به صورت اشباع با سطح خشک در کوره قرار داده می‌شوند، حتما باید تمهیداتی برای جلوگیری از ترکیدن نمونه‌ها در دماهای بالا انجام شود.

### ۳- آزمایش‌ها

آزمایش‌ها شامل اسلامپ، مقاومت فشاری و مقاومت کششی بر روی نمونه‌های حرارت ندیده و حرارت دیده با دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد هستند که در مرکز تحقیقات بتن انجام شده است.

#### ۳-۱ آزمایش اسلامپ

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C143 [38] انجام شده است. نتایج آزمایش اسلامپ بتن مرجع و بتن حاوی شیشه و لاستیک با انحراف  $\pm 2$  میلی‌متر در جدول (۳) آمده است. طبق نمودار شکل (۵) افزودن شیشه و لاستیک به بتن در همه طرح‌ها باعث کاهش اسلامپ نسبت به بتن مرجع شده است.

همان‌گونه که از نتایج پیداست، طرح R5C10 که دارای کوچکترین اندازه لاستیک و کمترین درصد جایگزینی لاستیک و شیشه است نسبت به طرح مرجع در حدود ۴۰ درصد کاهش اسلامپ دارد. اسلامپ طرح D10C20 که دارای بزرگترین اندازه لاستیک و بیشترین درصد جایگزینی لاستیک و شیشه است نیز نسبت به طرح مرجع در حدود ۶۵ درصد کاهش اسلامپ دارد. به این ترتیب هر چه مقدار درصد پودر شیشه جایگزین سیمان در طرح بیشتر شده، اسلامپ بتن کاهش یافته است و این می‌تواند به علت ریز بودن ابعاد پودر شیشه و جذب آب زیاد آن‌ها در مخلوط بتن باشد. همچنین هر چقدر ابعاد لاستیک جایگزین بزرگتر شده، اسلامپ بتن کاهش داشته است. به‌طور کلی جایگزینی لاستیک به‌جای سنگدانه در مخلوط بتن باعث کاهش اسلامپ شده است.

استفاده شده است. عمل‌آوری نمونه‌ها نیز طبق استاندارد ASTM C511 [37] به مدت ۲۸ روز انجام شده است. نمونه‌هایی که باید تحت حرارت بالا قرار بگیرند، به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای حدود ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند.

شکل ۴. مراحل ساختن بتن، قالب‌گیری و عمل‌آوری نمونه‌ها



Fig. 4. Manufacturing, sampling, and curing processes of specimens

#### ۲-۴ حرارت دادن نمونه‌ها در کوره

پس از خشک کردن نمونه‌ها در آون، تعدادی از آن‌ها برای حرارت‌دهی، در کوره الکتریکی قرار داده شدند. حرارت‌دهی نمونه‌ها در کوره پژوهشگاه نیرو تهران انجام شده است. میزان نرخ گرمایش کوره الکتریکی با سرعت حدود ۳ درجه سانتی‌گراد در دقیقه با دمای هدف ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. دمای هدف به مدت یک ساعت حفظ شد تا از انتقال گرما به طور یکنواخت اطمینان حاصل شود. پس از خاموش کردن کوره برای جلوگیری از ایجاد شوک حرارتی، نمونه‌ها در کوره به مدت ۲۴ ساعت باقی ماندند تا دمای آن‌ها بتدریج کاهش یابد. سپس نمونه‌ها را از کوره خارج کرده و به‌طور طبیعی به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار داده شدند. سپس آزمایش‌های مورد نظر روی آن‌ها انجام شد. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از ترکیدن نمونه‌ها در کوره حتما باید آن‌ها را حداقل به مدت ۲۴ ساعت در آون قرار داده و یا با روش دیگری خشک شوند تا رطوبت داخلی آن‌ها از بین برود. توصیه می‌شود نرخ رشد حرارتی کوره بسیار پایین باشد. توجه شود برای نمونه‌هایی که

جدول ۳. نتایج آزمایش اسلامپ بتن تازه طرح‌های اختلاط

Design NO.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Design symbol	R0C0	R5C10	R5C15	R5C20	R10C10	R10C15	R10C20	D5C10	D5C15	D5C20	D10C10	D10C15	D10C20
Slump (cm)	7.5	4.5	3.5	3	4	3	3	3.5	3	2.5	3	2.5	2

Table 3. Results of slump fresh concrete mixing designs

که حاوی ۵ درصد لاستیک درشت‌دانه و ۱۰ درصد پودر شیشه است. به طور متوسط، اضافه کردن لاستیک با ابعاد ۱ تا ۳ میلی‌متر باعث کاهش ۳۸ درصدی مقاومت فشاری و اضافه کردن لاستیک با ابعاد ۵ تا ۱۰ میلی‌متر باعث کاهش ۱۹/۵ درصدی مقاومت فشاری شده است. با افزایش اندازه لاستیک، کاهش مقاومت فشاری کمتری نسبت به بتن مرجع مشاهده شده است. در طرح‌های با شیشه ۱۰ و ۲۰ درصد، دو برابر کردن درصد جایگزینی لاستیک ریزدانه در مخلوط بتن به ترتیب باعث کاهش ۹/۵ و ۱۸ درصدی و جایگزینی لاستیک درشت‌دانه باعث کاهش ۶/۵ درصدی و کاهش ۹ درصدی مقاومت فشاری شده است. وزن بتن‌های دارای لاستیک و شیشه نسبت به بتن مرجع حدود ۲ درصد کمتر شده است.

### ۳-۲-۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های حرارت دیده

در نمودار شکل (۶) تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی حرارت دیده و حرارت ندیده نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد طرح D10C15 که دارای بیشترین مقاومت فشاری می‌باشد نسبت به بتن مرجع حرارت دیده حدود ۲۱ درصد و نسبت به بتن مرجع حرارت ندیده حدود ۴۱ درصد و نسبت به نمونه حرارت ندیده مشابه خود حدود ۲۶ درصد کاهش مقاومت دارد. طرح R10C20 نیز دارای کمترین مقاومت فشاری است که نسبت به طرح مرجع حرارت دیده حدود ۳۸ درصد و نسبت به بتن مرجع حرارت ندیده حدود ۵۳ درصد و نسبت به نمونه حرارت ندیده مشابه خود حدود ۳۵ درصد کاهش مقاومت دارد. طرح مرجع حرارت دیده نسبت به طرح مرجع حرارت ندیده حدود ۲۵ درصد کاهش مقاومت دارد. با افزایش درصد لاستیک در نمونه طرح‌های حرارت دیده، در ریزدانه، مقاومت فشاری بتن کمتر شده ولی در درشت‌دانه، در طرح D10C15 به مقدار ۵/۵ درصد افزایش داشته است. وزن تمامی نمونه حرارت دیده نسبت به بتن مرجع کمتر شده است.

شکل ۵. تغییرات آزمایش اسلامپ طرح‌های اختلاط نسبت به بتن مرجع

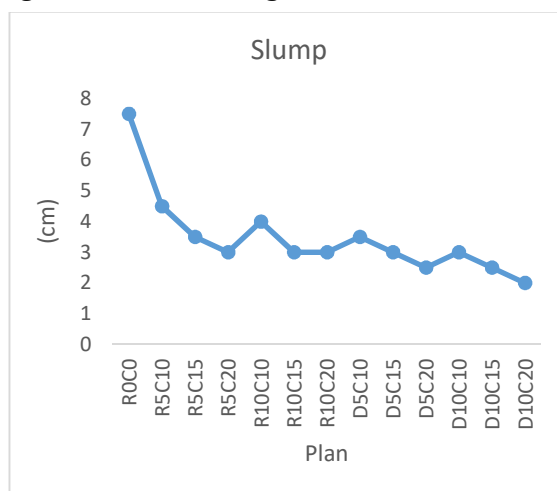


Fig. 5. slump test variations of mixing designs relative to reference concrete

### ۳-۲-۱ آزمایش مقاومت فشاری

این آزمایش مشابه استاندارد BS-1881 [39] انجام شده است. در این تحقیق ۱۳ طرح اختلاط وجود دارد که مقاومت فشاری هر طرح از میانگین سه نمونه ساخته شده و با در نظر گرفتن انحراف معیار استاندارد، بدست آمده است. به‌طور کلی دو سری نمونه مکعبی ساخته شده است که یک سری از آن‌ها بدون قرار گرفتن تحت حرارت و سری دیگر بعد از قرار گرفتن تحت حرارت مورد آزمایش مقاومت فشاری اولیه و پسماند قرار گرفتند.

### ۳-۲-۱ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های حرارت ندیده

نتایج نشان می‌دهد طرح D5C10 دارای بیشترین مقاومت فشاری می‌باشد که نسبت به طرح مرجع حدود ۱۲ درصد کاهش مقاومت دارد. طرح R10C20 نیز دارای کمترین مقاومت فشاری است که نسبت به طرح مرجع حدود ۴۸ درصد کاهش مقاومت دارد. از ۶ طرح لاستیک جایگزین ریزدانه، طرح R5C10 دارای بیشترین مقاومت فشاری است که نسبت به طرح مرجع حدود ۳۰ درصد کاهش مقاومت دارد و از ۶ طرح لاستیک جایگزین درشت‌دانه، طرح D5C10 دارای بیشترین مقاومت فشاری است



مقاومت دارد. با مقایسه متوسط مقاومت کششی نمونه‌های حاوی شیشه و لاستیک با بتن مرجع می‌توان نتیجه گرفت اضافه کردن لاستیک و شیشه، باعث افزایش حدود ۲۰ درصدی مقاومت کششی شده است. همچنین در طرح‌های با مقدار درصد لاستیک جایگزین ثابت، هر چقدر درصد شیشه جایگزین سیمان بیشتر شده مقاومت کششی کاهش یافته است. اضافه کردن لاستیک با ابعاد ۵ تا ۱۰ میلی‌متر به‌جای درشت‌دانه باعث افزایش مقاومت کششی بیشتری نسبت به لاستیک با ابعاد ۱ تا ۳ میلی‌متر به‌جای ریزدانه شده است. بیشترین تغییر وزن بتن دارای لاستیک و شیشه نسبت به بتن مرجع حدود ۵/۵ درصد کاهش است.

### ۳-۳-۲ نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای حرارت دیده

در نمودار شکل (۸) تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای حرارت دیده و حرارت ندیده نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود بیشترین مقاومت کششی مربوط به طرح D5C15 می‌باشد. مقاومت کششی این طرح نسبت به طرح مرجع حرارت دیده حدود ۲۰ درصد کمتر شده ولی نسبت به طرح مرجع حرارت ندیده حدود ۵۰ درصد و نسبت به نمونه مشابه حرارت ندیده خود حدود ۶۰ درصد کاهش دارد. طرح R10C20 نیز دارای کمترین مقاومت کششی است، که نسبت به طرح مرجع حرارت دیده ۵۴ درصد کاهش دارد و نسبت به نمونه مشابه حرارت ندیده خود حدود ۷۳ درصد کاهش دارد. طرح مرجع حرارت دیده نسبت به طرح مرجع حرارت ندیده حدود ۳۷ درصد کاهش مقاومت را نشان می‌دهد. با دو برابر شدن مقدار لاستیک ریزدانه در طرح‌های حاوی ۱۰٪ لاستیک ریزدانه، مقاومت کششی نمونه‌های حرارت دیده کم شده ولی با دو برابر شدن مقدار لاستیک درشت‌دانه در طرح‌های حاوی ۱۰٪ لاستیک درشت‌دانه، مقاومت کششی نمونه‌های حرارت دیده زیادتر شده است. وزن تمامی نمونه‌های طرح‌های حرارت دیده از طرح مرجع کمتر است.

شکل ۶. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی حرارت دیده و حرارت ندیده

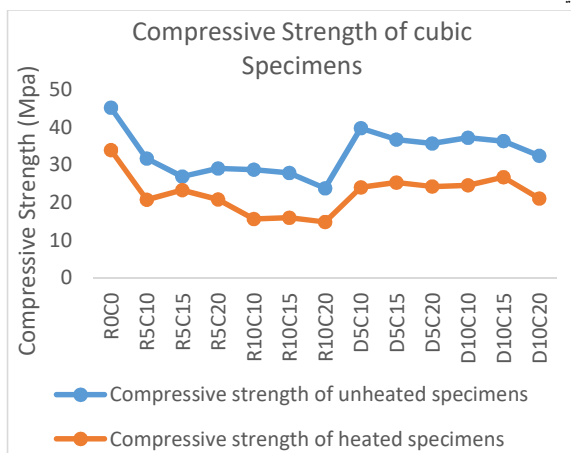


Fig 6. Compressive strength changes of heated and unheated cubic specimens

### ۳-۳-۱ آزمایش مقاومت کششی

این آزمایش با نام مقاومت کششی بتن به روش دو نیم کردن یا آزمایش برزیلی، طبق استاندارد ASTM C496 [40] انجام شده است. این آزمایش نیز روی دو سری نمونه استوانه‌ای که یک سری از آن‌ها بدون قرار گرفتن تحت حرارت و سری دیگر با قرار گرفتن تحت حرارت ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره الکتریکی مورد آزمایش مقاومت کششی اولیه و پسماند قرار گرفتند.

شکل ۷. فرآیند و ابزار انجام آزمایش کششی



Fig. 7. Process and tools for tensile testing

### ۳-۳-۱-۱ نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای حرارت ندیده

نتایج نشان می‌دهد که طرح D10C10 دارای بیشترین مقاومت کششی است که نسبت به طرح مرجع حدود ۳۳ درصد افزایش مقاومت داشته است. طرح R10C20 نیز دارای کمترین مقاومت کششی می‌باشد که نسبت به طرح مرجع حدود ۸ درصد افزایش

شکل ۹. دانه شیشه موجود در بتن

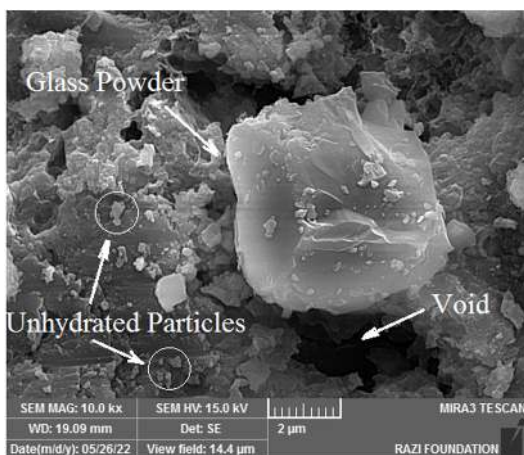


Fig. 9. Glass grain in concrete

شکل (۱۰) به ترتیب تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های بتن معمولی، بتن حاوی لاستیک ریزدانه و لاستیک درشت‌دانه را نشان می‌دهد. در شکل (۱۰-الف) دیده می‌شود که بتن در این قسمت بافتی همگن دارد و ساختار هیدراتاسیون ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) و هیدروکسید کلسیم (C-H) که از واکنش‌های اصلی هیدراتاسیون بتن است مشاهده می‌شود. شکل (۱۰-ب) نشان می‌دهد که چسبندگی بین لاستیک ریزدانه و بتن خوب است و بتن حاوی شیشه اطراف آن نیز بافت مناسبی دارد. ولی در لاستیک با این اندازه به علت سطح انتقال نیروی کم نسبت به اندازه آن، جداسازی بیشتر در سطح تماس رخ داده است. بلورهای سوزنی شکل اترینگایت و ژل متراکم (C-S-H) نیز دیده می‌شود و کریستال‌های مونوسولفات هیدراته در قسمت‌هایی، نمایان است. تخلخل در این نمونه کم است و شاهد منافذ بزرگ نیستیم. شکل (۱۰-ج) نیز بیانگر چسبندگی مناسب بین لاستیک درشت‌دانه و بتن است. این چسبندگی و اندازه بزرگتر لاستیک و سطح تماس بیشتر، باعث شده تا شکستگی بتن تحت اثر نیرو، گاهی در خود لاستیک اتفاق بیفتد. به همین علت است که نیروی کششی طرح‌های حاوی لاستیک (بخصوص لاستیک درشت‌دانه) افزایش یافته است. بافت بتن دارای یکپارچگی مناسبی است و منافذ بزرگ در آن وجود ندارد. هنگام قرار گرفتن بتن تحت نیرو، دو حالت رخ داده است، که

شکل ۸. نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای حرارت دیده و حرارت ندیده

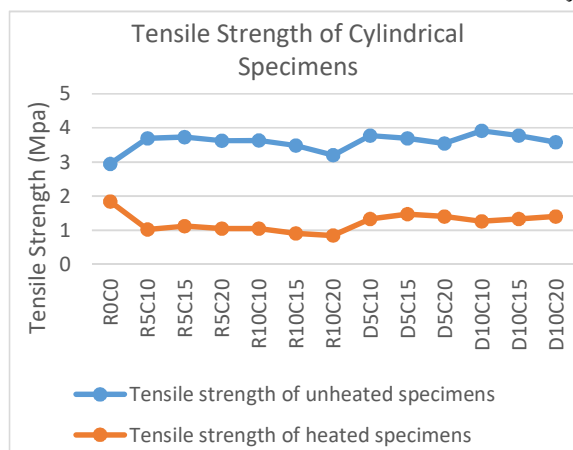


Fig. 8. Tensile strength test results of heated and unheated cylindrical specimens

### ۳-۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

برای ارزیابی ویژگی‌های ریزساختار و فازی بتن از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. تصویربرداری در آزمایشگاه بنیاد علوم کاربردی رازی تهران انجام شد. به‌طور کلی بررسی ریزساختاری بتن در سه فاز اصلی تقسیم‌بندی شد. فاز اول شامل محصولات هیدراتاسیون و ژل هیدراته است. فاز دوم شامل چسبندگی و پیوند بین لاستیک و بتن است. فاز سوم شامل مواد اولیه‌ای که وارد واکنش نشده‌اند. وجود منافذ ریز و درشت در نمونه‌ها، افزایش تخلخل در ساختار بتن، آهک زدایی و آب شستگی یون‌های کلسیم و... که باعث کاهش مقاومت بتن می‌شوند، می‌توانند به‌عنوان فازهای دیگر مورد بررسی قرار گیرند.

شکل (۹) تصویر دانه شیشه و ژل سیلیکات تشکیل شده در مجاورت آن را نشان می‌دهد. این امر بیانگر اینست که همه پودر شیشه موجود در بتن هنوز به‌طور کامل وارد واکنش نشده است و این موضوع که سیلیس موجود در شیشه در دراز مدت وارد واکنش شده و مقاومت بتن را بالا می‌برد را تایید می‌کند. البته مواد دیگری که وارد واکنش نشده‌اند نیز در تصویر دیده می‌شود. ژل سیلیکات ضمن چسبندگی بالا باعث افزایش فضاهای خالی و چگالی ناحیه بین لاستیک و بتن می‌شود.

شامل جدا شدن لاستیک از بتن و پاره شدن لاستیک است. بعد از اعمال نیرو و ترک خوردن بتن، در مجاورت بعضی لاستیک‌ها

شکل ۱۰. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از ریزساختار الف) بتن معمولی ب) بتن حاوی لاستیک ریزدانه و پودر شیشه ج) بتن حاوی لاستیک درشت‌دانه و پودر شیشه

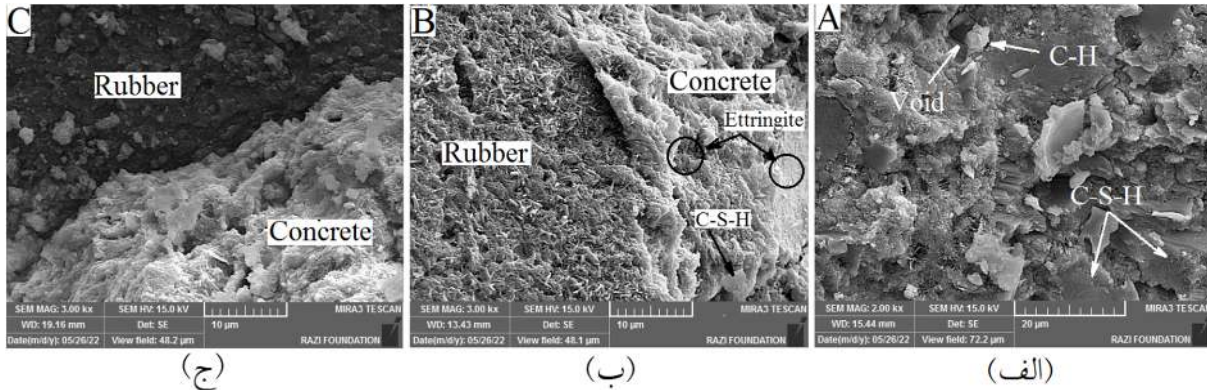


Fig. 10. SEM images of microstructure A) Ordinary concrete B) Concrete containing fine rubber and glass powder C) Concrete containing coarse rubber and glass powder

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

رده ۵ تا ۱۰ میلی‌متر، نتیجه بهتری در مقاومت فشاری بتن‌های حرارت دیده از خود نشان داده است. بتن‌های دارای لاستیک و شیشه نسبت به بتن مرجع وزن کمتری دارند و حرارت نیز باعث کاهش وزن در تمامی نمونه‌ها شده است.

■ مقاومت کششی، با اضافه کردن لاستیک و شیشه به بتن، افزایش یافته است. همچنین با افزایش اندازه و درصد لاستیک جایگزین، مقاومت کششی افزایش یافته ولی با افزایش درصد پودر شیشه جایگزین سیمان، مقاومت کششی کاهش شده است. در طرح‌های دارای لاستیک ریزدانه هر چه درصد لاستیک و شیشه توامان بیشتر شده، مقدار مقاومت کششی کاهش یافته ولی در طرح‌های دارای لاستیک درشت‌دانه، شاهد افزایش مقاومت کششی هستیم. طرح‌های با مقدار ۱۰ درصد شیشه و با اندازه و درصد‌های مختلف لاستیک، بیشترین مقاومت کششی را نشان داده‌ند. دو برابر کردن درصد جایگزینی لاستیک از هر دو اندازه آن تاثیر زیادی در مقاومت کششی ایجاد نکرد.

■ مقاومت کششی تمامی طرح‌های حاوی لاستیک و شیشه حرارت دیده، از طرح مرجع حرارت دیده کمتر است. بتن‌های دارای لاستیک درشت‌دانه نسبت به بتن‌های دارای لاستیک ریزدانه، تحت حرارت مقاومت کششی بیشتری داشتند. دو برابر

■ با توجه به اسلامپ کم‌ویش پایین طرح‌های دارای شیشه و لاستیک توصیه می‌شود برای ساختن این نوع بتن و بکار بردن آن در سازه، از روان کننده استفاده شود. هر چه اندازه لاستیک جایگزین بزرگتر باشد تاثیر آن در کاهش روانی بتن بیشتر خواهد بود. به‌طور کلی جایگزینی لاستیک و شیشه در مخلوط بتن باعث کاهش اسلامپ و کارایی بتن شده است.

■ به‌طور کلی اضافه کردن لاستیک و شیشه به بتن باعث کاهش مقاومت فشاری بتن شده است. اضافه کردن لاستیک با اندازه بزرگتر باعث کاهش مقاومت فشاری کمتری در بتن حاوی شیشه و لاستیک می‌شود. همچنین با افزایش درصد پودر شیشه جایگزین سیمان، مقاومت فشاری بتن کمتر شده است. می‌توان گفت طرح‌های شامل ۱۰ درصد شیشه جایگزین سیمان به‌همراه لاستیک با اندازه و درصد‌های مختلف، دارای مقاومت فشاری بیشتری هستند. دو برابر کردن درصد جایگزینی لاستیک ریزدانه و درشت‌دانه تاثیری زیادی در مقاومت فشاری نداشت.

■ با مقایسه مجموع نمونه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که حرارت ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، به‌طور متوسط حدود ۳۳ درصد از مقاومت فشاری کاسته است. می‌توان گفت که جایگزینی لاستیک

- waste glass fine aggregate in alkali activated concrete by concrete prism tests. *Construction and Building Materials*, Volume 266, Part B, 10 January, 121121.
- [8] Shayan A. & Xu A. 1999 Utilization of Glass as a Pozzolanic Material in Concrete”, *ARRB TR Internal Report* RC 91132.
- [9] Vijayakumar G., Vishaliny H. & Govindarajulu D. 2013 Studies on Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete Production. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3 (2) 153-157.
- [10] Sadiqul Islam G. M., Rahman M. H. & Kazi M. 2017 Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*. Volume 6, Issue 1, June 2017, Pages 37-44.
- [11] Peyghambarzadeh S. A. & Baranjian J. 2016 Survey and comparison of the effect of glass powder, crumb and rubber crumb recycled on the mechanical properties of high strength concrete. Non- Governmental Higher Education Institutions. Non-Profit Tabari Higher Education Institute. Faculty of Civil Engineering. [Master Thesis]. "(In Persian)".
- [12] Firouzjaei Z., 1393 The effect of adding recycled glass on the properties of self-compacting concrete at different temperatures, *Master's thesis for Civil Engineering*, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Faculty of Civil Engineering.
- [13] Aslani F. & Khan M. 2019 Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* 31(5): 04019040 *Journal of Materials in Civil Engineering*, © ASCE, ISSN 0899-1561. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002672. © 2019 American Society of Civil Engineers.
- [14] Prasad, D.S.V., Raju, G.V.R.P. & Kumar, M.A., 2009. Utilization of industrial waste in flexible pavement construction. *Electron.J.Geotech.Eng.* 13, e12.
- [15] Raffoul S., Garcia R., Pilakoutas K., M., Guadagnini, N. & Medina F. 2016 Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation,” *Construction and Building Materials* 124 391–404. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.054> 0950-0618/ 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.
- کردن درصد جایگزینی لاستیک درشت‌دانه عملکرد بهتری نسبت به لاستیک ریزدانه داشت. به‌طور کلی اضافه کردن لاستیک به حفظ مقاومت کششی تحت حرارت کمک کرده است.
- تصاویر میکروسکوپ الکترونی گرفته شده از سطح شکست بتن نشان می‌دهند که شیشه در بتن در سنین پایین در هیدراتاسیون بطور کامل شرکت نمی‌کند و یکی از علل مقاومت کمتر طرح‌های حاوی شیشه با درصد‌های بیشتر است. چسبندگی سطح لاستیک و بتن به نحو مناسبی است و موید افزایش مقاومت کششی نمونه‌های حاوی لاستیک است.

## ۵- اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

## ۶- مراجع

- [1] Terro M. 2006 Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures. *Building and Environment* 41 633–639.
- [2] Emam Ali E. & Al-Tersawy S. “Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self-compacting concrete,” *Construction and Building Materials*, 35,(2012) 785-791.
- [3] Fletcher I., Welch S., Torero J., Carvel R. & Usmani A. 2007. Behaviour of Concrete Structures in Fire. *Thermal Science*, 11 (2), p.37-52.
- [4] Bisby L., Mostafaei H. & Pimienta P. 2014. State-of-the-Art on Fire Resistance of Concrete Structure. *Structure-Fire Model Validation*. Retrieved from Word-NIST-White-Paper-on-concrete DRAFT\_25-03-14- pdf.
- [5] Tung-Chai Ling. & Chi-Sun Poon, 2012 Stress-strain behaviour of fire exposed selfcompacting glass concrete, *Fire Mater.* 37 (4) 297–310.
- [6] Yang T.C.S., Ling H. & Cui, C.S. 2019 Poon, Influence of particle size of glass aggregates on the high temperature properties of dry-mix concrete blocks, *Construction and Building Materials* 209, 522-531. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.131>.
- [7] Nabi M., Newaz Khan A., Kumer Saha P. & Kumar Sarker. 2021 Evaluation of the ASR of

- city. *Modeling in Engineering*, 16 (55), 247-266. "(In Persian)". doi: 10.22075/jme.2018.10978.1057.
- [27] Akbarzadeh B. H., Zangebari A. N. & Zangebari A. N. 2016 The effect of fire on the mechanical properties of concrete containing crumb rubber replaced with natural fine-grained. *the First National Conference on Applied Research in Civil Engineering (Structural Engineering and Construction Management)*, Tehran. "(In Persian)". <https://civilica.com/doc/580427>.
- [28] Iranian National Standard No. 389, "Properties of Portland Cement".
- [29] ASTM C150-7 Standard Specification for Portland Cement. American Society for Testing and Materials (2012).
- [30] Shahroud Cement Factory Website. <https://shahroudcement.com>.
- [31] ASTM C128-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate (2015).
- [32] ASTM C127-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate (2015).
- [33] Sgobba S., Borsa M., Molfetta M., Carlo Marano G., 2015 Mechanical performance and medium-term degradation of rubberized concrete. *Construction and Building Materials* 98 820–831. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat>.
- [34] ACI-211.1-91. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.
- [35] ASTM C192/C192M-19 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (2020).
- [36] ASTM C172/C172M-17 Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete (2017).
- [37] 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 (2021).
- [38] ASTM C143/C143M-20 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (2020).
- [39] BS 1881-124 Testing Concrete Methods for analysis of hardened concrete (2015).
- [40] ASTM C496/C496M-17 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens (2017).
- [16] Bignozzi, M., & F. Sandrolini. 2006. "Tyre rubber waste recycling in selfcompacting concrete." *Cem. Concr. Res.* 36 (4): 735–739. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.011>.
- [17] Aslani F. 2016. "Mechanical properties of waste tire rubber concrete." *J. Mater. Civ. Eng.* 28 (3): 04015152. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001429](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001429).
- [18] Aslani F., Ma G., Law Yim Wan D. & Le V.X.T. 2018a Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *J. Cleaner Prod.* 172(20):1835-1847. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.003>.
- [19] Batayneh M.K., Marie I. & Asi I. 2008 Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries, *Waste Manage.* 28 (11) 2171–2176.
- [20] Najim K.B. & Hall M.R. 2013 Crumb rubber aggregate coatings/pre-treatments and their effects on interfacial bonding, air entrapment and fracture toughness in self-compacting rubberised concrete (SCRC), *Mater. Struct.* 46 (12) 2029–2043.
- [21] Najim K.B. & Hall M.R. 2012 Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete. *Constr. Build. Mater.* 27 (1) 521–530.
- [22] Ganjian E., Khorami M. & Maghsoudi A.A. 2009 Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Constr. Build. Mater.* 23(5) 1828–1836.
- [23] Gupta T., Chaudhary S. & Sharma R.K. 2014 Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate, *Constr. Build. Mater.* 73 562–574.
- [24] Turki M., Bretagne E., Rouis M. & Quéneudec M. 2009 Microstructure, physical and mechanical properties of mortar-rubber aggregates mixtures. *Constr. Build. Mater.* 23 (7) 2715–2722.
- [25] Jokar F., Khorram M., Karimi Gh. & Hatef N. 2017 Laboratory survey of mechanical properties of concrete containing waste rubber. the second international conference and exhibition of new technologies in the rubber and polymer industry, Shiraz. *The international conference and exhibition of new technologies* "(In Persian)". <https://civilica.com/doc/659509>.
- [26] Razavian Amraei S A., Ali Dost A. F. & Jafari R. 1397 Seismic risk assessment of Hamedan

# Laboratory study of mechanical performance of concrete containing waste glass and rubber at high temperature

Ramin Jafari <sup>1</sup>, Mohammad Hadi Alizadeh Elizei\*<sup>2</sup>, Masoud Ziaei <sup>3</sup>, Reza Esmaeil Abadi <sup>4</sup>

1- PhD student in Civil Engineering, Islamic Azad University, Roodehen Branch, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Roodehen Branch, Iran.

3- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Garmsar University, Iran.

4- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Roodehen Branch, Iran.

alizadeh.mh@riau.ac.ir

## Abstract

With the advancement of technology in the world, industrial waste has become one of the most important environmental challenges. Deformation and reuse of these wastes is one of the ways to improve the sustainable state of the environment. Glass and rubber are among the most widely used materials in the world, which due to their nature have a lot of wastes. Waste tires cause a lot of environmental pollution due to their non-degradable materials. The use of waste glass and rubber in the construction industry can be a good solution in reusing waste materials. Concrete, on the other hand, is one of the most widely used materials in the construction industry, and the addition of rubber and glass crumb to concrete can improve some of its mechanical and dynamic properties. Of course, heat resistance of materials is one of the features that is effective in the type of application. Adding waste rubber and glass to concrete, of course, depending on their amount and size can increase the heat resistance of concrete to some extent.

In this research, the effect of replacing small and large aggregates with rubber and also glass powder with cement in concrete at ambient temperature and high temperature has been studied. The size of rubber used in concrete in two categories is 1 to 3 mm and 5 to 10 mm, which are replaced by fine-grained and coarse-grained, respectively, with replacement values of 0, 5 and 10%. The size of the glass used is smaller than 75 microns and it can be replaced with cement with 0, 10, 15 and 20% replacement values. Shredded truck tires and powdered construction glass were used. In this study, cubic specimens were made into 15 x 15 x 15 cm specimens and cylindrical specimens with a diameter of 15 cm and a height of 30 cm were made according to the standards and processed for 28 days in optimal conditions. After processing, the number of cubic and cylindrical specimens was subjected to compressive and tensile tests. A number of other samples were placed in an electric furnace and heated to 600 ° C as standard. After removing the samples from the furnace, they were naturally placed at room temperature for 24 hours and then they were tested for the Residual compressive and tensile strength. The microstructure of concrete containing glass and rubber was examined by scanning electron microscope (SEM). The results of this study showed that adding rubber and glass to concrete causes a decreases compressive strength and increases tensile strength. The D10C10 design, which has the highest compressive strength, has a resistance reduction of about 12% compared to the reference design. The highest tensile strength of heated samples is related to D5C15 design, which is about 43% higher than the heated reference design. By comparing the sum of heated and unheated samples, it can be seen that heat at 600 ° C has reduced the compressive strength by an average of about 33%. In general, concretes made with 5% replacement of rubber and 10% glass powder at ambient temperature and 15% glass powder at high temperature showed better performance. Also, in the study of concrete microstructure, adhesion between rubber and concrete was appropriate.

**Keywords:** Concrete - Glass powder - Waste Rubber - High Temperature - Residual Strength