

بررسی تأثیر استفاده از مواد بازیافتی شیشه، لاستیک و سرامیک بر روی خواص مکانیکی بتن پودری واکنش پذیر

سجاد بایگی *

استادیار، گروه مهندسی عمران، مجتمع آموزش عالی اسفراین.

ایمان عبدالله آبادی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نیشابور.

چکیده

در این تحقیق تأثیر جایگزینی مواد پودری با مواد بازیافتی شیشه، لاستیک و سرامیک بر روی خواص مکانیکی بتن پودری واکنش پذیر پرداخته شده است. تأثیر جایگزینی ۱۰٪، ۲۰٪ و ۴۰٪ مواد پودری با مواد بازیافتی با تست‌های آزمایشگاهی بررسی شد. نمونه مورد استفاده جهت آزمایش فشاری، مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر، آزمایش کششی استوانه‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و آزمایش خمشی نمونه به ابعاد ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که جایگزینی مواد بازیافتی باعث کاهش مقاومت فشاری بتن پودری واکنش پذیر خواهد شد. به طوری که با جایگزینی ۴۰٪ مواد پودری با لاستیک مقاومت فشاری به اندازه ۴۹٪ کاهش خواهد یافت. جایگزینی مواد بازیافتی لاستیک تا ۲۰٪ با مواد پودری باعث افزایش اندکی در مقاومت کششی خواهد شد. که می‌توان به رفتار شبه الاستیک ذرات لاستیک و توانایی آنها در ایجاد پل روی ریز ترک‌ها نسبت داد. جایگزینی شیشه بازیافتی با مواد پودری بهترین تأثیر را بر روی مقاومت خمشی دارد به گونه‌ای که با جایگزینی ۱۰٪ مواد پودری با شیشه بازیافتی مقاومت خمشی ۸٪ افزایش یافت. این افزایش را می‌توان به زاویه‌دار بودن و فعالیت پوزولانی ذرات شیشه ریز آسیاب شده مرتبط دانست که می‌تواند به متراکم شدن ماتریس بتن پودری واکنش پذیر کمک کند.

واژه‌های کلیدی: بتن پودری واکنش پذیر، مواد بازیافتی، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی.

* نویسنده مسئول: s.baygi@esfarayen.ac.ir

۱- مقدمه

را به حداقل برساند به ترتیب ۱۵، ۷/۵ و ۱۵ درصد می‌باشد [۷]. تیکریت و همکاران تأثیر مقدار و هندسه الیاف فولادی صنعتی و ضایعاتی را بر خواص مکانیکی بتن پودری واکنش‌پذیر از نظر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و رفتار تنش-کرنش تحت فشار بررسی کردند. در این تحقیق سه نوع الیاف فولادی شامل الیاف میکرو فولادی صنعتی، الیاف فولادی تغییر شکل یافته صنعتی و الیاف فولادی ضایعاتی بازیافت شده از لاستیک‌های دور ریخته شده به میزان ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۴٪ از کل حجم به بتن پودری واکنش‌پذیر اضافه شدند [۸]. پاپاکونستانینو و توبولسکی [۹] نتیجه گرفتند که الیاف فولادی ضایعاتی به میزان زیادی چقرمگی بتن را افزایش می‌دهد. همچنین نتیجه گرفته شد که الیاف فولادی ضایعاتی تأثیر قابل توجهی بر کارایی بتن نداشته است. علی‌عبدو و همکاران امکان استفاده از ضایعات گرد و غبار مرمر در تولید سیمان و بتن را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نسبت‌های جایگزینی ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی گرد و غبار مرمر جایگزین سیمان شد. به طور کلی، استفاده از گرد و غبار مرمر در تولید بتن به عنوان جایگزین سیمان یا به عنوان جایگزین ماسه (افزودن سیمان) به تدریج هر دو خواص مکانیکی و فیزیکی بتن را به ویژه با نسبت آب به سیمان کمتر بهبود می‌بخشد [۱۰]. شوارتز و همکاران تأثیر پودر شیشه ریز با اندازه متوسط دانه حدود ۲۰ میکرومتر، بر نفوذپذیری بتن را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق کاهش نفوذپذیری در مراحل اولیه مورد تأیید قرار گرفت. در حالی که نفوذپذیری در دراز مدت به سطح معادل بتن معمولی گزارش شد [۱۱]. یک ترکیب دوتایی جدید شامل پودر آجر ضایعاتی و پودر مرمر ضایعاتی برای بهبود عملکرد مخلوط‌های سیمانی پایه سرباره توسط اسد و همکاران معرفی شد [۱۲]. گارسیا و همکاران نشان دادند استفاده از کربنات کلسیم و پودر شیشه ضایعاتی به عنوان مواد پودری در بتن پودری واکنش‌پذیر می‌تواند عملکرد بتن پودری واکنش‌پذیر را بهبود بخشد. مخلوط بهینه‌ای که در این تحقیق معرفی شد حاوی ۳۶۸ کیلوگرم بر مترمکعب شیشه ضایعاتی و ۱۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب کربنات کلسیم بود [۱۳]. تأثیر استفاده از سنگ‌دانه بازیافتی و خاکستر بادی ضایعاتی بر روی عملکرد بتن خود تراکم توسط عابد و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق تأثیر این مواد بر روی جریان اسلامپ، زمان جریان، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، ضریب

بتن پودری واکنش‌پذیر را می‌توان یکی از مهم‌ترین بتن‌های فوق توانمند در نظر گرفت. این نوع بتن به دلیل استحکام و دوام بالای خود شناخته می‌شود. در این بتن با توجه به پودری بودن آن هیچ گونه سنگ‌دانه درشت دانه استفاده نمی‌شود. همچنین اصطلاح واکنش‌پذیر که در این نوع بتن استفاده شده است، مربوط به استفاده از پودرهایی مانند سیمان پرتلند و سیلیس در مخلوط آن است که می‌توان با بهینه‌سازی ذرات، ساختاری منسجم و متراکم بدست آورد [۱]. در این نوع بتن با استفاده از مواد ریز سیمانی مانند دوده سیلیس یا پوردهای ریز مانند کوارتز در بتن می‌توان باعث بهبود فشردگی ذرات و انجام واکنش پوزولانی شد. همچنین با استفاده از فوق روان‌کننده نسبت آب به مواد سیمانی کاهش می‌یابد [۲]. بهبود خواص بتن پودری واکنش‌پذیر بدون استفاده از الیاف در کاهش هزینه‌ها بسیار مهم است. برای دستیابی به این هدف می‌توان با استفاده از افزودن نانو ذرات به بتن و پر کردن حفره‌های بتن در مقیاس نانو، ماتریس بتن را اصلاح و باعث بهبود عملکرد مکانیکی بتن شد [۳]. تراکم ذرات روشی برای ساخت یک ماتریس فشرده است و می‌توان با انتخاب مواد مناسب با اندازه‌های مختلف، که در آن حفره‌های بزرگتر توسط حفره‌های کوچکتر بعدی پر می‌شوند، به آن دست یافت. از این رو، پارامترهای استحکام و دوام بتن پودری واکنش‌پذیر تا حد زیادی به اندازه ذرات و حفره‌هایی که به دلیل تراکم این ذرات ایجاد می‌شوند، بستگی دارد [۴]. استفاده روزافزون از مواد معدنی و استخراج بیش از حد آنها، صنعت ساخت و ساز را بر آن داشته است تا از مواد سازگار با محیط زیست استفاده کند. بر این اساس، استفاده از ضایعات صنعتی برای تولید بتن در مبارزه با تخریب محیط زیست بسیار مفید است [۵]. استفاده از مواد بازیافتی و ضایعات صنعتی برای تولید بتن توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. سواد کوهی و رضایی تأثیر استفاده از ضایعات برش سنگ در تولید بتن پودری واکنش‌پذیر را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق ضایعات گرانیت با نسبت‌های درصد مختلف جایگزین ماسه سیلیس شد [۶]. آزدو و همکاران مطالعاتی جهت تعیین نسبت بهینه جایگزینی سنگ‌دانه با ضایعات گرانیت در بتن و ملات معمولی انجام دادند. بهینه‌ترین حالت جهت به دست آوردن مقاومت فشاری، خمشی و کششی در حالی که جذب آب

که افزودن پودر شیشه به عنوان جایگزین ماسه سیلیسی باعث کاهش ۵/۲٪ مقاومت فشاری و افزایش ۵٪ مقاومت خمشی گردید [۱۹].

با توجه به مصرف بالای سیمان و مواد معدنی ریزدانه در تولید بتن پودری واکنش پذیر، استفاده از مواد بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از این مواد می تواند علاوه بر کاهش هزینه های تولید، به کاهش اثرات زیست محیطی صنعت ساخت و ساز و مدیریت پسماندهای جامد کمک کند. با وجود انجام مطالعات متعدد درباره کاربرد جداگانه شیشه، لاستیک و سرامیک بازیافتی در انواع مختلف بتن، تحقیقات محدودی به بررسی و مقایسه عملکرد این مواد به عنوان جایگزین مواد پودری در بتن پودری واکنش پذیر پرداخته اند. از این رو، پژوهش حاضر با ارزیابی اثر سطوح مختلف جایگزینی شیشه، لاستیک و سرامیک بازیافتی بر مقاومت فشاری، کششی و خمشی RPC، درصدد شناسایی مناسب ترین ماده بازیافتی و میزان بهینه جایگزینی آن است. نتایج این تحقیق می تواند زمینه استفاده پایدارتر از منابع، کاهش مصرف مواد اولیه و توسعه بتن های با عملکرد بالا و سازگار با محیط زیست را فراهم آورد.

۲- انجام آزمایش

۲-۱- مصالح مصرفی سیمان و طرح اختلاط

در این پژوهش، از سیمان پرتلند تیپ II تولیدی کارخانه زاوه تربت حیدریه به عنوان ماده چسباننده اصلی استفاده شده است. انتخاب این نوع سیمان با توجه به عملکرد مناسب آن در بتن های با مقاومت متوسط تا زیاد و نیز سازگاری مطلوب با مواد افزودنی به ویژه در ساخت بتن های مهندسی شده صورت گرفت. به منظور اطمینان از یکنواختی و کیفیت سیمان مصرفی، خواص فیزیکی و شیمیایی آن مطابق استانداردهای مرتبط مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد استفاده

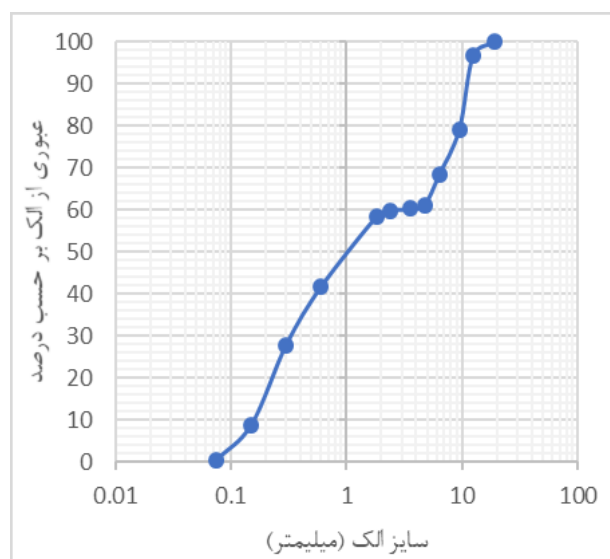
	مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)					
	۲۸ روز	۷ روز	۳ روز	نهایی	اولیه	بلین
خواص فیزیکی	۵۲۰	۳۸۶	۳۱۵	۲۰۵	۱۵۵	۳۴۲۵
خواص شیمیایی	SiO ₂	SO ₃	MgO	FE ₂ O ₃	AL ₂ O ₃	CaO
	۲۰/۶۸	۲/۲	۲/۴۷	۳/۷۳	۴/۷۹	۶۳/۸

نفوذ یون کلرید و مقاومت در برابر چرخه های انجماد-ذوب برای سن عمل آوری مورد بررسی قرار گرفت [۱۴]. بابایی و طاهرخانی به بررسی تأثیر جایگزینی بخشی از سنگ دانه با ضایعات شیشه، لاستیک و پلاستیک بر روی خواص بتن با هدف بدست آوردن طرح اختلاط بهینه بتن حاوی مواد بازیافتی با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از ترکیب شیشه و پلاستیک در طرح اختلاط بتن می تواند موجب افزایش مقاومت فشاری بتن و کاهش میزان جذب آب شود [۱۵]. موسوی و همکاران به بررسی تأثیر افزودن خاک کاشی به بتن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان روی خواص مکانیکی و دوام بتن پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که برای نسبت آب به سیمان ۰/۵، کاهش در مقاومت فشاری و خمشی بتن تا ۴۰ درصد جایگزینی خاک کاشی ایجاد نمی شود و در تمام درصدهای جایگزینی، افت تخلخل، کاهش نفوذ یون کلر، کاهش جمع شدگی و افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به نمونه شاهد ایجاد می شود [۱۶]. حسن ونهری و قلهکی تأثیر خرده های لاستیک که به عنوان جایگزین سیمان در نظر گرفته شد، مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق یک رابطه ای جهت محاسبه مقاومت فشاری بتن بر حسب مقاومت ۲۸ روزه بتن پیشنهاد شد [۱۷]. صالحی زاده و دیزنگیان به بررسی مقاومت بتن متخلخل ساخته شده از خرده لاستیک ضایعاتی پرداختند. در این تحقیق ضایعات لاستیک جایگزین بخشی از سنگ دانه ها شدند. نتایج نشان دهنده آن بود که افزودن خرده لاستیک تأثیر زیادی بر روی تغییر مقاومت کششی بتن متخلخل ندارد. همچنین نتایج نشان داده که افزودن خرده لاستیک نفوذ پذیری و تخلخل بتن را افزایش خواهد داد [۱۸]. حجازی و عبد الهی تأثیر پودر شیشه، نانو سیلیس، الیاف شیشه ای و پلی پروپیلن بر خصوصیات مکانیکی بتن پودری واکنش پذیر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد

برخوردار است؛ به طوری که حتی ترتیب افزودن اجزای تشکیل دهنده می تواند تأثیر قابل توجهی بر رفتار رئولوژیکی و مقاومت نهایی مخلوط داشته باشد.

جدول ۵- طرح اختلاط استفاده شده برای نمونه شاهد.

مصالح	طرح اختلاط (برحسب وزن سیمان)			
	شاهد	٪۱۰	٪۲۰	٪۴۰
سیمان	۱	۱	۱	۱
میکروسلیس	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳
ماسه سیلیسی	۱/۱	۰/۹۹	۰/۸۸	۰/۶۶
پودر سلیس	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵
ماده بازیافتی	۰	۰/۱۱	۰/۲۲	۰/۴۴
فوق روان کننده	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
نسبت آب به سیمان	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵



شکل ۱- نمودار دانه بندی مصالح سنگی.

به منظور حصول یکنواختی در ترکیب و بهبود کارایی بتن، در این پژوهش تمامی مصالح ابتدا با دقت توزین شدند. سپس کل مقدار فوق روان کننده با تمام آب مصرفی به طور کامل مخلوط گردید. در ادامه، مصالح خشک به مدت پنج دقیقه در مخلوط کن با دور ثابت همگن شدند. پس از آن، حدود ۶۵ درصد از مخلوط آب و فوق روان کننده به مواد خشک افزوده شده و فرآیند اختلاط با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت سه دقیقه ادامه یافت. در مرحله نهایی، باقیمانده آب و فوق روان کننده به مخلوط افزوده شده و عملیات اختلاط با همان سرعت برای مدت هشت دقیقه دیگر ادامه

مشخصات فیزیکی و شیمیایی میکروسلیس استفاده شده در این تحقیق در جدول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات شیمیایی میکروسلیس

ترکیبات موجود	درصد (حداقل)
SiO ₂	۹۰
MgO	۰/۶
Fe ₂ O ₃	۱/۲
Al ₂ O ₃	۰/۶
CaO	۰/۵
C	۰/۸
K ₂ O	۰/۴
Na ₂ O	۰/۳
S	۰/۰۴
Cl	۰/۴

جدول ۳- مشخصات فیزیکی میکروسلیس

چگالی انبوهی (Kg/m ³)	۳۱۰-۳۵۰
چگالی ویژه	۲/۲
اندازه ذرات	کوچکتر از ۱ میکرومتر
سطح ویژه (m ² /g)	۱۵-۳۰
رنگ	خاکستری روشن

ماسه سیلیس مورد استفاده در این تحقیق از ماسه های سیلیسی استخراج و فرآوری شده شهرستان نیشابور انتخاب شده است. مشخصات ماسه معدن نیشابور در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- مشخصات ماسه معدنی

وزن مخصوص اشباع با	درصد جذب آب (%)
سطح خشک	
۲/۱۶	۱/۵

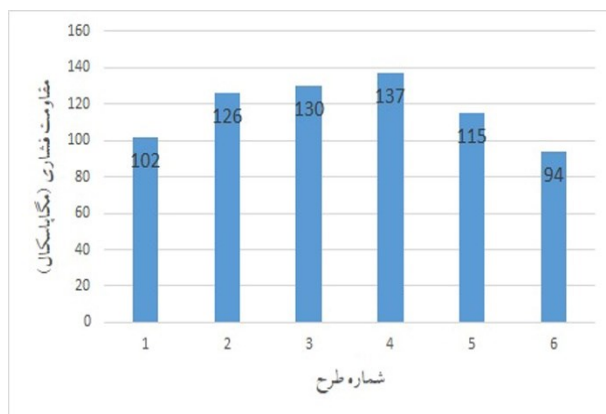
همچنین فوق روان کننده ممتاز ژیکاپلاست ZP در این تحقیق استفاده شد. طرح اختلاط نمونه شاهد و نمونه های جایگزین شده بوسیله ماده بازیافتی در جدول ۵ نشان داده شده است. در شکل ۱ نمودار دانه بندی مصالح سنگی استفاده شده نشان داده شده است.

۲-۲- نمونه های مورد آزمایش

با توجه به حساسیت بالای بتن پودری واکنش پذیر نسبت به روش اختلاط، اجرای دقیق مراحل آماده سازی از اهمیت ویژه ای

جدول ۶- نتایج مقاومت فشاری براساس نسبت آب به سیمان و آب به مواد پودری.

طرح	W/C	W/B	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
۱	۰/۲۷	۰/۲۳	۱۰۲
۲	۰/۲۵	۰/۲۱	۱۲۶
۳	۰/۲۲	۰/۱۹	۱۳۰
۴	۰/۲	۰/۱۷	۱۳۷
۵	۰/۱۷	۰/۱۵	۱۱۵
۶	۰/۱۵	۰/۱۳	۹۴



شکل ۳- تأثیر نسبت آب به سیمان و آب به مواد پودری بر روی مقاومت فشاری

با افزایش W/B مقاومت فشاری ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. نسبت W/B بهینه که متناظر با حداکثر مقاومت فشاری است برابر با ۰/۱۷ است. با استفاده از نسبت W/B بهینه مخلوطی همگن متراکم و با حداقل تفاضل حاصل می‌گردد.

۳-۲- تأثیر نسبت فوق روان کننده به سیمان بر روی مقاومت فشاری

تأثیر مقدار نسبت فوق روان کننده مصرفی به سیمان، بر مقاومت فشاری بتن پودری واکنش پذیر با ساخت نمونه هایی با نسبت فوق روان کننده به سیمان (SP/C) برابر با ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ درصد انجام گرفت. در تمام نمونه ها نسبت W/B ثابت و برابر ۰/۱۷ انتخاب گردید. از هر نسبت شش نمونه فشاری مکعبی تهیه شده و پس از عمل آوری در آب ۲۰ درجه سانتی گراد در سن ۲۸ روزه آزمایش گردید. متوسط نتایج حاصل در جدول ۷ و نمودار شکل ۴ آمده است.

پیدا کرد تا یکنواختی کامل و توزیع مناسب ذرات در کل حجم بتن حاصل شود.

با توجه به محدودیت حجم بتن پودری واکنش پذیر تولیدی در هر مرحله اختلاط و محدودیت توان دستگاه پرس جهت انجام آزمایش فشاری نمونه ها، ابعاد نمونه مکعبی ۱۰ سانتی متر مطابق استاندارد ASTM C39، جهت انجام آزمایش خمشی از نمونه های منشوری ۵۰×۱۰×۱۰ سانتی متر مکعب مطابق استاندارد ASTM C78 و جهت انجام آزمایش کششی به روش شکافت برزلی از استوانه هایی با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی متر مطابق استاندارد ASTM C496 استفاده شد. تمام نمونه ها برای مدت ۲۴ ساعت در قالب نگهداری شده و پس از خارج شدن از قالب در حوضچه شکل ۲ در آب ۲۰ درجه سانتیگراد عمل آوری شدند.



شکل ۲- حوضچه نگهداری نمونه ها

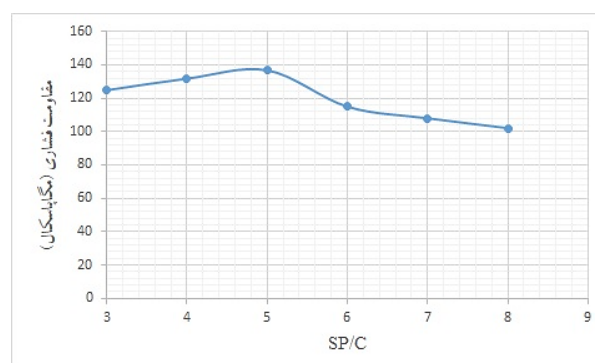
۳- نتایج آزمایشگاهی

۳-۱- تأثیر نسبت آب به مواد پودری بر روی مقاومت فشاری

مقاومت بتن پودری واکنش پذیر RPC به طور چشمگیری به واکنش های هیدراسیون وابسته است و در این واکنش ها آب نقش اساسی دارد. دست یابی به مقاومت های فوق العاده نیازمند بهینه سازی نسبت آب به سیمان و مواد پودری است. جهت بررسی تأثیر نسب آب به مواد پودری (W/B) شش نسبت ۰/۲۳، ۰/۲۱، ۰/۱۹، ۰/۱۷، ۰/۱۵ و ۰/۱۳ در نظر گرفته شد. در تمام آزمایش ها وزن سیمان ۰/۸۵ و وزن مواد پودری در نظر گرفته شد که در نتیجه نسبت آب به سیمان به ترتیب ۰/۲۷، ۰/۲۵، ۰/۲۲، ۰/۲۰، ۰/۱۷ و ۰/۱۵ در نظر گرفته شد. همچنین در تمام طرح ها نسبت فوق روان کننده به سیمان (SP/C) برابر ۵ درصد انتخاب شد. متوسط نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح ها در جدول ۶ و شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۷- تأثیر استفاده از مواد فوق روان کننده بر روی مقاومت

فشاری	
SP/C	مقاومت فشاری مگاپاسکال
۳	۱۲۵
۴	۱۳۲
۵	۱۳۷
۶	۱۱۵
۷	۱۰۸
۸	۱۰۲



شکل ۴- مقاومت فشاری بتن پودری واکنش پذیر بر اساس مقدار ماده فوق روان کننده

بیشترین مقاومت مربوط به طرح اختلاط با ۵ درصد فوق روان کننده است. در درصد های کمتر فوق روان کننده، کاهش مقاومت ملاحظه می گردد که به دلیل عدم کفایت فوق روان کننده در تأمین روانی لازم برای حصول به تراکم بهینه است.

۳-۳- مقاومت فشاری بتن پودری واکنش پذیر باز یافتی

در این بخش تأثیر استفاده از مواد باز یافتی شیشه، لاستیک و سرامیک به جای مواد پودری در بتن پودری واکنش پذیر پرداخته شده است. مواد باز یافتی مورد استفاده در این تحقیق مواد عبوری از الک نمره ۱۰۰ و قرار گرفته بر روی الک نمره ۲۰۰ در نظر گرفته شده است. در جدول ۸ مقدار مقاومت فشاری نمونه شاهد و در جدول ۹ و شکل ۵ تأثیر استفاده از مواد باز یافتی بر روی مقاومت فشاری نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱۰ نسبت مقاومت فشاری نمونه باز یافتی به مقاومت فشاری نمونه شاهد نشان داده شده است.

جدول ۸- میانگین مقاومت فشاری نمونه شاهد

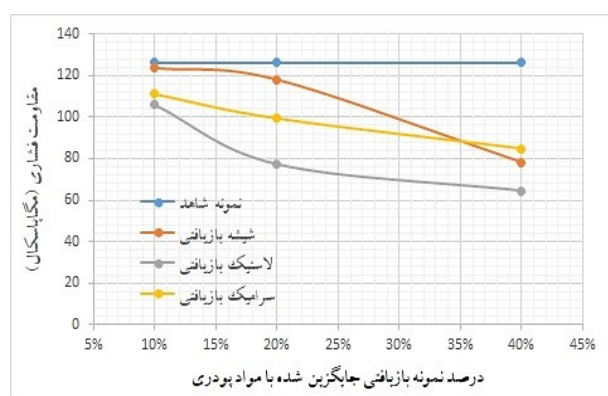
نمونه	میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)
شاهد	۱۲۶/۲۱

جدول ۹- میانگین مقاومت فشاری نمونه های باز یافتی

نمونه ها	درصد های مختلف		
	٪۱۰	٪۲۰	٪۴۰
شیشه باز یافتی	۱۲۳/۶۸	۱۱۸/۰۶	۷۸/۲۵
لاستیک باز یافتی	۱۰۶/۰۲	۷۷/۲۵	۶۴/۳۷
سرامیک باز یافتی	۱۱۱/۷۰	۹۹/۳۳	۸۴/۶۰

جدول ۱۰- نسبت مقاومت فشاری نمونه های باز یافتی به شاهد.

نمونه ها	٪۱۰		
	٪۲۰	٪۴۰	٪۱۰
نمونه شاهد	۱	۱	۱
شیشه باز یافتی	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۹
لاستیک باز یافتی	۰/۸۴	۰/۶۲	۰/۵۱
سرامیک باز یافتی	۰/۸۸۵	۰/۷۹	۰/۶۷



شکل ۵- میانگین مقاومت فشاری بتن پودری واکنش پذیر با

جایگزینی مواد پودری با مواد باز یافتی.

با افزایش مواد باز یافتی مقاومت فشاری بتن پودری واکنش پذیر کاهش می یابد. بیشترین تأثیر در کاهش مقاومت فشاری مربوط به لاستیک باز یافتی است به طوری که با جایگزینی ۴۰ درصد مواد پودری با لاستیک باز یافتی مقاومت فشاری به اندازه ۴۹٪ کاهش می یابد. بهترین نتیجه جهت جایگزینی مواد پودری استفاده از مواد باز یافتی شیشه تا ۲۰٪ می باشد. با توجه به اینکه سطح لاستیک آب گریز و تقریباً صاف است، پیوند مناسبی با ماتریس سیمان ایجاد نمی کند و همچنین هنگام استفاده از لاستیک، تخریب بیشتر افزایش پیدا می کند، در اطراف ذرات لاستیک معمولاً حفرات ریز و ناحیه انتقالی ضعیف تشکیل می شود که باعث کاهش بیشتر مقاومت فشاری خواهد شد.

جایگزین مواد پودری با لاستیک بازیافتی تا ۲۰٪ تأثیری در مقاومت کششی بتن پودری ندارد ولی با افزودن بیشتر از این مقدار، مقاومت کشش کاهش می‌یابد. با جایگزین مواد پودری با شیشه بازیافتی و سرامیک بازیافتی مقاومت کششی کاهش خواهد یافت و این کاهش مقاومت کششی در سرامیک بازیافتی شدت بیشتری دارد به طوری که با جایگزینی ۴۰٪ از مواد پودری با سرامیک بازیافتی مقدار مقاومت کششی به اندازه ۵۱٪ کاهش خواهد یافت. عدم کاهش محسوس مقاومت کششی بتن پودری حاوی لاستیک بازیافتی تا سطح جایگزینی ۲۰٪ به دلیل توزیع مناسب ذرات لاستیک در ماتریس سیمانی، رفتار شبه الاستیک ذرات لاستیک و محدود بودن تأثیر آن‌ها بر ریزساختار بتن می‌باشد. در این محدوده، تراکم مناسب ماتریس و وجود الیاف می‌تواند اثرات منفی ناشی از ضعف چسبندگی لاستیک با خمیر سیمان را تا حدی جبران کند. با این حال، افزایش میزان لاستیک بیش از ۲۰ درصد موجب افزایش حجم نواحی ضعیف در بتن، کاهش پیوستگی ماتریس سیمانی و افزایش تخلخل می‌شود.

۳-۵- مقاومت خمشی بتن پودری واکنش پذیر بازیافتی

در جدول ۱۴ مقدار مقاومت خمشی نمونه شاهد و در جدول ۱۵ و شکل ۷ تأثیر استفاده از مواد بازیافتی بر روی مقاومت فشاری نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱۶ نسبت مقاومت خمشی نمونه بازیافتی به مقاومت خمشی نمونه شاهد نشان داده شده است.

جدول ۱۴- میانگین مقاومت خمشی نمونه شاهد		
نمونه	میانگین مقاومت خمشی ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	شاهد
		۱۹/۶۲

جدول ۱۵- میانگین مقاومت خمشی نمونه‌های بازیافتی			
میانگین مقاومت خمشی			
درصدهای مختلف (مگاپاسکال)			نمونه‌ها
٪۴۰	٪۲۰	٪۱۰	
۱۹/۴۱	۲۰/۳۹	۲۱/۲۲	شیشه بازیافتی
۱۳/۳۴	۱۶/۸۸	۱۶/۴۷	لاستیک بازیافتی
۱۳/۹۲	۱۶/۴۷	۱۷/۴۵	سرامیک بازیافتی

۳-۴- مقاومت کششی بتن پودری واکنش پذیر بازیافتی

در جدول ۱۱ مقاومت کششی نمونه شاهد نشان داده شده است.

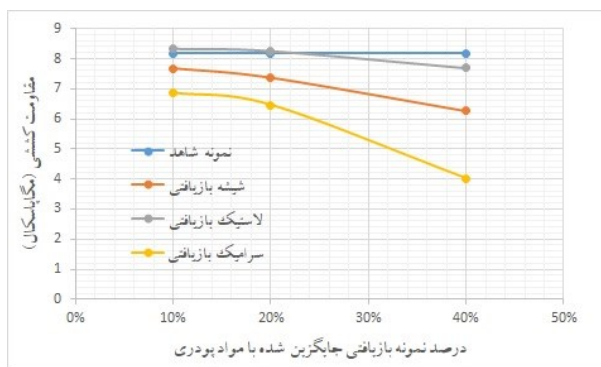
جدول ۱۱- میانگین مقاومت کششی نمونه شاهد	
نمونه	میانگین مقاومت کششی ۲۸ روزه (مگاپاسکال)
شاهد	۸/۱۸

در جدول ۱۲ و شکل ۶ تأثیر استفاده از مواد بازیافتی بر روی مقاومت کششی نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱۳ نسبت مقاومت کششی نمونه بازیافتی به مقاومت کششی نمونه شاهد نشان داده شده است.

جدول ۱۲- میانگین مقاومت کششی نمونه‌های بازیافتی			
میانگین مقاومت کششی			
نمونه‌ها	درصدهای مختلف (مگاپاسکال)		
	٪۱۰	٪۲۰	٪۴۰
شیشه بازیافتی	۷/۶۹	۷/۳۶	۶/۶۳
لاستیک بازیافتی	۸/۳۴	۸/۲۶	۷/۷
سرامیک بازیافتی	۶/۸۷	۶/۴۶	۴/۰۱

جدول ۱۳- نسبت مقاومت کششی نمونه‌های بازیافتی به شاهد

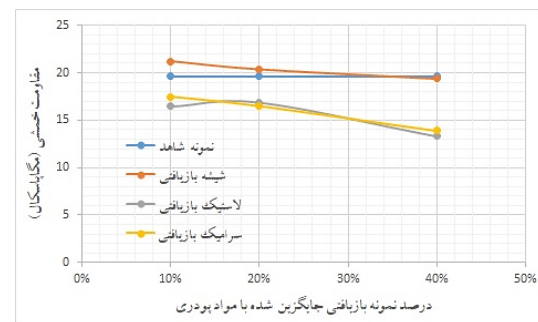
نوع نمونه	۱۰٪	۲۰٪	۴۰٪
نمونه شاهد	۱	۱	۱
شیشه بازیافتی	۰/۹۴	۰/۹	۰/۸۱
لاستیک بازیافتی	۱/۰۲	۱/۰۱	۰/۹۴
سرامیک بازیافتی	۰/۸۴	۰/۷۹	۰/۴۹



شکل ۶- میانگین مقاومت کششی بتن پودری واکنش پذیر با جایگزینی مواد پودری با مواد بازیافتی

جدول ۱۶- نسبت مقاومت خمشی نمونه‌های بازیافتی به شاهد

نوع نمونه	۱۰٪	۲۰٪	۴۰٪
نمونه شاهد	۱	۱	۱
شیشه بازیافتی	۱/۰۸	۱/۰۴	۰/۹۹
لاستیک بازیافتی	۰/۸۴	۰/۸۶	۰/۶۸
سرامیک بازیافتی	۰/۸۹	۰/۸۴	۰/۷۱



شکل ۷- میانگین مقاومت خمشی بتن پودری واکنش‌پذیر با جایگزینی مواد پودری با مواد بازیافتی

کشتی و خمشی بتن پودری پرداخته شد. برای این منظور مواد پودری با ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد مواد بازیافتی جایگزین و تست‌های آزمایشگاهی مد نظر انجام شد. جهت بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتی‌متر، مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و مقاومت خمشی نمونه‌های ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد. نکته قابل توجه در استفاده از پودر شیشه بازیافتی در بتن پودری واکنش‌پذیر، احتمال وقوع واکنش قلیایی-سیلیسی (ASR) است. این واکنش در اثر برهم‌کنش سیلیس فعال موجود در شیشه با قلیاهای موجود در خمیر سیمان رخ داده و می‌تواند منجر به تشکیل ژل منبسط‌شونده شود. در صورت حضور رطوبت کافی، این ژل با جذب آب متورم شده و تنش‌های داخلی ایجاد می‌کند که در نهایت به ترک‌خوردگی، کاهش دوام و افت خواص مکانیکی بتن منجر می‌شود. با این حال، در بتن پودری واکنش‌پذیر شرایط تا حدودی با بتن معمولی متفاوت است. ریزدانه بودن ذرات شیشه و تراکم بالای ریزساختار RPC می‌تواند احتمال بروز مخرب این واکنش را کاهش دهد. از یک سو، ذرات بسیار ریز شیشه ممکن است به‌عنوان ماده پوزولانی عمل کرده و با مصرف هیدروکسید کلسیم، بخشی از قلیاهای آزاد موجود در محیط را کاهش دهند. از سوی دیگر، نفوذپذیری بسیار کم RPC دسترسی رطوبت به داخل ماتریس را محدود کرده و شرایط لازم برای انبساط ژل ASR را تا حدی کنترل می‌کند.

نتایج نشان‌دهنده آن است که با افزودن فوق روان‌کننده تا ۵ درصد وزنی سیمان مقدار مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و با افزودن بیشتر از این مقدار مقاومت فشاری کاهش خواهد یافت. افزودن مواد بازیافتی باعث کاهش مقاومت فشاری خواهد شد. بیشترین تأثیر بر روی کاهش مقاومت فشاری را لاستیک بازیافتی دارد به گونه‌ای که با جایگزینی ۴۰ درصد مواد پودری با لاستیک بازیافتی مقاومت فشاری به اندازه ۴۹٪ کاهش می‌یابد. کمترین تأثیر بر روی کاهش مقاومت فشاری را افزودن شیشه بازیافتی نشان داد. جایگزینی مواد بازیافتی لاستیک تا ۲۰ درصد باعث افزایش اندکی در مقاومت کششی خواهد شد و افزودن بیشتر و همچنین جایگزین کردن مواد بازیافتی شیشه و سرامیک باعث کاهش

جایگزینی شیشه بازیافتی تا ۲۰ درصد باعث افزایش مقاومت خمشی خواهد شد. جایگزینی لاستیک بازیافتی و سرامیک بازیافتی باعث کاهش مقاومت خمشی خواهد شد. بهترین ماده جهت جایگزینی مواد پودری جهت مقاومت خمشی شیشه بازیافتی می‌باشد. بیشترین تأثیر بر روی کاهش مقاومت خمشی جایگزین کردن لاستیک بازیافتی با مواد پودری را دارد. افزایش مقاومت خمشی در نمونه‌های حاوی شیشه بازیافتی تا سطح جایگزینی ۲۰ درصد را می‌توان به اثر پرکنندگی ذرات ریز شیشه و بهبود آرایش دانه‌بندی در ماتریس بتن پودری، زاویه دار بودن ذرات ریز شیشه نسبت داد. ذرات ریز شیشه با پر کردن فضاهای خالی میان ذرات سیمانی، موجب افزایش تراکم ریزساختار و کاهش تخلخل شده و در نتیجه مقاومت خمشی را بهبود می‌بخشند. در درصدهای بالاتر، کاهش مواد سیمانی فعال و تضعیف پیوستگی ماتریس می‌تواند مانع از ادامه روند افزایشی مقاومت خمشی شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر جایگزینی مواد پودری با مواد بازیافتی شیشه، لاستیک و سرامیک بر روی مقاومت فشاری،

¹ Alkali-Silica Reaction

Materials, vol. 154, pp. 1024–1034, 2017.

[9] Papakonstantinou. C. G and Tobolski. M. J, "Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete," Cement and Concrete Research, vol. 36, no. 9, pp. 1686–1691, 2006.

[10] Aliabdo. A. A, Abd Elmoaty. A. M, and Auda. E. M, "Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete," Construction and Building Materials, vol. 50, pp. 28–41, 2014.

[11] Schwarz. N, Cam. H, and Neithalath. N, "Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash," Cement and Concrete Composites, vol. 30, no. 6, pp. 486–496, 2008.

[12] Asad. A, Iftikhar. S, and Khitab. A, "Waste brick and marble powders as sustainable additives for improving slag-based concrete," Journal of Building Engineering, vol. 111, 113625, 2025.

[13] Abellan-Garcia. J, Molinares. M, Daza. N, Abbas. Y. M, and Khan M. I, "Formulation of inexpensive and green reactive powder concrete using milled-waste-glass and micro calcium-carbonate – A multi-criteria optimization approach," Construction and Building Materials, vol. 409, 134167, 2023.

[14] Abed. M, Rashid. K, Rehman. M. U, and Ju. M, "Performance keys on self-compacting concrete using recycled aggregate with fly ash by multi-criteria analysis," Journal of Cleaner Production, vol. 378, 134398, 2022.

[۱۵] بابایی. م، طاهرخانی. س، "بررسی آزمایشگاهی تأثیر ضایعات شیشه، لاستیک و پلاستیک و ترکیب آنها بر روی خواص بتن های بازیافتی و بهینه یابی با روش تحلیل سلسله مراتبی"، تحقیقات بتن، ۴ (۱۳)، ۲۸–۱۷، ۱۳۹۹.

[۱۶] موسوی. ا، مرشد. ر، اسلامی. ا، "بررسی تأثیر ضایعات خاک کاشی به عنوان جایگزین سیمان بر خصوصیات بتن سازه ای"، تحقیقات بتن، ۱ (۱۵)، ۸۳–۷۱، ۱۴۰۱.

[۱۷] حسن ونهری. م، قلهکی. م، "مطالعه آزمایشگاهی تعیین رابطه تجربی مقاومت فشاری بر حسب سن بتن های حاوی سیمان نوع ۲ و خرده لاستیک"، تحقیقات بتن، ۲ (۱۵)، ۳۱–۲۱، ۱۴۰۱.

[۱۸] صالحی زاده. م، دیزنگیان. ب، "ارزیابی مقاومت بتن متخلخل ساخته شده با استفاده از خرده الستیک ضایعات"، تحقیقات بتن، ۱ (۱۳)، ۱۲۸–۱۱۳، ۱۳۹۹.

[۱۸] حجازی. م، عبدالمهی. ح، "تأثیر پودر شیشه، نانو سیلیس، الیاف شیشه ای و پلی پروپیلن بر خصوصیات مکانیکی بتن پودری واکنش پذیر"، تحقیقات بتن، ۴ (۱۱)، ۴۸–۳۳، ۱۳۹۷.

مقاومت کششی خواهد شد. با جایگزینی مواد پودری با شیشه بازیافتی تا ۱۰ درصد، مقاومت خمشی تا ۸ درصد افزایش خواهد یافت و جایگزینی بیشتر باعث کاهش مقاومت خمشی خواهد شد. بیشترین تأثیر بر روی کاهش مقاومت خمشی جایگزینی مواد پودری با لاستیک را دارد. به طوری که با جایگزینی ۴۰ درصد باعث کاهش مقاومت خمشی به اندازه ۲۹٪ خواهد شد. با مقایسه نتایج بدست آمده با مرجع شماره [۱۹] که تأثیر پودر شیشه را بر روی مقاومت خمشی و فشاری بتن پودری مورد بررسی قرار داده، نشان دهنده آن است که نتایج مرجع [۱۹] و تحقیق حاضر نشان دهنده افزایش مقاومت خمشی و کاهش مقاومت فشاری با افزودن پودر شیشه و ضایعات شیشه است.

۵- مراجع

[1] Mostofinejad. D, Rostami Nikoo. M, and Hosseini. S.A, "Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC)," Construction and Building Materials, vol. 123, pp. 754–767, 2016.

[2] Cwirzen. A, Penttala. V, and Vornanen. C, "Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC," Cement and Concrete Research, vol. 38, no. 10, pp. 1217–1226, 2008.

[3] Zhang. J, Yang. H, Zhang. H, and Liang. X, "Application status and prospect of carbon-based nanomaterials in biomedical field," Progress in Chemistry, vol. 25, pp. 397–408, 2013.

[4] Yu. L, "Effect of graphene oxide on microstructure and micromechanical property of ultra-high performance concrete," Cement and Concrete Composites, vol. 138, 104964, 2023.

[5] Al-Zboon. K and Al-Zou. J, "Recycling of stone cutting slurry in concrete mixes," Journal of Material Cycles and Waste Management, vol. 17, no. 2, pp. 324–335, 2015.

[6] Savadkoobi. M. S and Reisi. M, "Environmental protection based sustainable development by utilization of granite waste in reactive powder concrete," Journal of Cleaner Production, vol. 266, 121973, 2020.

[7] de Azevedo, A. R. G, "Effect of granite residue incorporation on the behavior of mortars," Materials, vol. 12, no. 9, 1449, 2019.

[8] Al-Tikrite. A and Hadi. M. N, "Mechanical properties of reactive powder concrete containing industrial and waste steel fibres at different ratios under compression," Construction and Building

Investigating the effect of using recycled glass, rubber and ceramic materials on the mechanical properties of reactive powder concrete

Sajjad Baygi *

Department of Civil Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran.

Iman Abdullah Abadi

Department of Civil Engineering, Neyshabur, Islamic Azad University, Ramsar, Iran.

Abstract

Reactive Powder Concrete (RPC) is recognized as one of the most advanced and highly efficient types of ultra-high-performance concretes. Its superior mechanical strength and durability arise from the elimination of coarse aggregates, the enhancement of particle packing density, and the refinement of microstructure compared with conventional concrete. In this regard, the incorporation of highly reactive powder materials, such as silica powder, plays a key role in achieving a dense and cohesive microstructure. Considering the growing emphasis on environmental sustainability and the need for alternative materials, this study aims to investigate the influence of replacing powder materials with recycled glass, rubber, and ceramic waste on the compressive, tensile, and flexural performance of RPC. For this purpose, replacement levels of 10%, 20%, and 40% were experimentally evaluated. Cubic specimens (10×10×10 cm) were prepared for compressive strength tests, cylindrical specimens (10 cm in diameter and 20 cm in height) were used for tensile testing, and prismatic specimens (50×10×10 cm) were employed for flexural strength assessment. The results indicate that the incorporation of recycled materials, particularly rubber, leads to a significant reduction in compressive strength. Specifically, a 40% replacement of rubber resulted in a 49% decrease in compressive strength. However, using rubber at replacement levels up to 20% produced a slight improvement in tensile strength, which may be attributed to the pseudo-elastic behavior of rubber particles and their ability to bridge microcracks. Moreover, recycled glass exhibited a favorable effect on flexural performance; a 10% replacement led to an approximate 8% increase in flexural strength. This enhancement can be linked to the angularity and pozzolanic activity of finely ground glass particles, which can contribute to the densification of the RPC matrix. Overall, the findings of this research demonstrate that by selecting appropriate types of recycled materials and limiting their replacement ratios, it is possible to maintain acceptable mechanical performance while simultaneously improving environmental sustainability and reducing dependency on natural raw materials. That replacing 10% of powdered materials with recycled glass increased the flexural strength by 8%.

Keywords: Reactive powder concrete, recycled materials, Compressive strength, bending strength, tensile strength.

* Corresponding Author: s.baygi@esfarayen.ac.ir