

بهینه‌سازی طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد بتن‌های بازیافتی حاوی سنگدانه‌های ضایعات ساختمانی و الیاف پلی‌پروپیلن در شرایط محیطی مختلف

محمد سخن‌سنج

دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، گروه فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد، ایران.
salib66sosa@gmail.com

چکیده

صنعت ساخت‌وساز با چالش‌های زیست‌محیطی فزاینده‌ای از جمله تولید حجم عظیم پسماندهای ساختمانی و مصرف بی‌رویه منابع طبیعی مواجه است. بتن بازیافتی حاوی سنگدانه‌های ضایعات ساختمانی و الیاف پلی‌پروپیلن به‌عنوان یک راهکار پایدار برای کاهش این مشکلات مطرح شده است. با این حال، عملکرد این نوع بتن تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد و نیازمند بهینه‌سازی دقیق طرح اختلاط است. پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد بتن‌های بازیافتی حاوی سنگدانه‌های ضایعات ساختمانی و الیاف پلی‌پروپیلن در شرایط محیطی مختلف انجام شده است. بدین منظور، اثر نسبت‌های مختلف جایگزینی سنگدانه بازیافتی (۰ تا ۱۰۰ درصد)، درصد الیاف پلی‌پروپیلن (۰ تا ۳ درصد حجمی)، نسبت آب به سیمان، و مواد سیمانی مکمل بر خواص مکانیکی، دوام، و رفتار رئولوژیکی بتن بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی سنگدانه طبیعی با سنگدانه بازیافتی تا ۵۰ درصد، با بهره‌گیری از الیاف پلی‌پروپیلن و مواد پوزولانی، تأثیر چشمگیری بر کاهش مقاومت فشاری نداشته و در برخی موارد، خواص دوامی مانند مقاومت در برابر یخ‌زدگی را بهبود می‌بخشد. الیاف پلی‌پروپیلن با ایجاد اثر پل‌زنی در ترک‌ها، جذب انرژی و شکل‌پذیری بتن را افزایش داده و افت مقاومت ناشی از استفاده از سنگدانه بازیافتی را جبران می‌کند. تحلیل‌های آماری با استفاده از روش سطح پاسخ نشان داد که مدل‌های درجه دوم با ضریب تبیین بیش از ۰/۹۵، قابلیت پیش‌بینی دقیق خواص بتن بازیافتی را دارند. بهینه‌سازی هم‌زمان خواص مکانیکی، دوامی و زیست‌محیطی نشان داد که استفاده از ۳۵ تا ۴۵ درصد سنگدانه درشت بازیافتی و ۳۰ تا ۴۵ درصد سنگدانه ریز بازیافتی، همراه با ۰/۱ تا ۰/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد. همچنین، تحلیل چرخه حیات نشان داد که استفاده از سنگدانه بازیافتی و الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا ۶۰ درصد کاهش دهد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که با طراحی بهینه، بتن بازیافتی مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند به‌عنوان جایگزینی پایدار و عملکردی برای بتن معمولی در شرایط محیطی مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: بتن بازیافتی، سنگدانه ضایعات ساختمانی، الیاف پلی‌پروپیلن، بهینه‌سازی طرح اختلاط، دوام

۱. مقدمه

صنعت ساخت‌وساز به‌عنوان یکی از بزرگترین مصرف‌کنندگان منابع طبیعی و تولیدکنندگان پسماند در جهان، نقشی کلیدی در تغییرات زیست‌محیطی ایفا می‌کند. تولید سیمان پرتلند به‌تنهایی مسئول حدود ۸ درصد از انتشار جهانی دی‌اکسید کربن ناشی از فعالیت‌های انسانی است که عمدتاً به فرآیند کلسیناسیون و تولید کلینکر انرژی‌بر بازمی‌گردد (al et Cheng, ۲۰۲۴). همچنین، استخراج سالانه میلیاردها تن سنگدانه طبیعی برای تولید بتن، فشار قابل‌توجهی بر اکوسیستم‌ها وارد کرده و منجر به تخریب زیست‌گاه‌ها، فرسایش خاک، و آلودگی منابع آب می‌شود (al et Antunes, ۲۰۲۴). در مقابل، مدیریت پسماندهای ساختمانی و تخریب به‌عنوان یک چالش جدی زیست‌محیطی مطرح است؛ به‌گونه‌ای که این پسماندها بیش از یک‌سوم کل پسماندهای تولیدی در جهان را تشکیل می‌دهند، در حالی که تنها بخش کوچکی از آنها بازیافت می‌شوند (al et Borges, ۲۰۲۳; al et Lima de, ۲۰۲۴; Muthusubramanian & Neelamegam, ۲۰۲۳; al et Tefa, ۲۰۲۲).

در این راستا، استفاده مجدد از پسماندهای ساختمانی به‌عنوان سنگدانه در تولید بتن، راهکاری مؤثر برای کاهش مصرف منابع طبیعی، کاهش حجم پسماندهای دفن‌شده، و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود (Ulucan, ۲۰۲۴; Zhang, al et, ۲۰۲۳; al et Alabduljabbar, ۲۰۲۴). با این حال، سنگدانه‌های بازیافتی به‌دلیل وجود ملات چسبیده، تخلخل بالا، و سطح ناهموار، دارای کیفیت پایین‌تری نسبت به سنگدانه‌های طبیعی هستند و استفاده از آنها معمولاً با کاهش کارایی، مقاومت، و دوام بتن همراه است (Silva & Salgado, ۲۰۲۲; al et Padmini, ۲۰۰۹; al et Kisku, ۲۰۱۷). این ویژگی‌ها عمدتاً به وجود ملات سیمانی باقی‌مانده بر روی سنگدانه‌های بازیافتی نسبت داده می‌شود که باعث افزایش جذب آب، کاهش چگالی، و تضعیف ناحیه انتقالی خمیر-سنگدانه می‌شود (al et Zhan, ۲۰۲۲; al et Silva, ۲۰۱۶).

برای جبران این نقایص، راهکارهای متعددی پیشنهاد شده است که از جمله می‌توان به استفاده از الیاف، مواد پوزولانی، و بهینه‌سازی طرح اختلاط اشاره کرد (Ulucan, ۲۰۲۴; al et Li, ۲۰۲۳). الیاف پلی‌پروپیلن به‌عنوان یکی از پرکاربردترین الیاف مصنوعی در صنعت بتن، با ایجاد اثر پل‌زنی در ترک‌ها، جذب انرژی و شکل‌پذیری را افزایش داده و از گسترش ریز ترک‌ها جلوگیری می‌کند (al et Koksai, ۲۰۲۲; al et Bayraktar, ۲۰۲۱; al et Ahiskali, ۲۰۲۵). همچنین، استفاده از مواد پوزولانی مانند خاکستر بادی، دوده سیلیس، و سرباره کوره آهن‌گدازی می‌تواند با واکنش پوزولانی، ریزساختار بتن را بهبود بخشد و مقاومت و دوام آن را افزایش دهد (Ulucan, ۲۰۲۴; al et Nazeer, ۲۰۲۳; al et Fang, ۲۰۲۳).

مطالعات اخیر نشان داده است که ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با سنگدانه بازیافتی می‌تواند عملکرد قابل‌قبولی را ارائه دهد. Ramalingam و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که استفاده همزمان از الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن در بتن حاوی سنگدانه بازیافتی، سبب بهبود قابل‌توجه خواص مکانیکی و دوامی می‌شود. Wang و همکاران (۲۰۲۴) نیز گزارش کردند که الیاف پلی‌پروپیلن بازیافتی با افزایش مقاومت کششی و کرنش اوج، رفتار بتن حاوی سنگدانه بازیافتی را بهبود می‌بخشد. در مطالعه‌ای دیگر، Dahish و Alkharisi (۲۰۲۵) با استفاده از روش سطح پاسخ و یادگیری ماشین نشان دادند که بهترین عملکرد بتن حاوی سنگدانه بازیافتی و الیاف پلی‌پروپیلن در شرایط بهینه (۳ درصد الیاف و ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی در سن ۸۳/۶ روز) حاصل می‌شود.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در این حوزه، هنوز چالش‌های اساسی در رابطه با بهینه‌سازی هم‌زمان خواص مکانیکی، دوامی، زیست‌محیطی، و اقتصادی بتن‌های بازیافتی مسلح به الیاف وجود دارد. بسیاری از مطالعات موجود، صرفاً به بررسی تأثیر یک یا دو عامل پرداخته و رویکردی جامع برای بهینه‌سازی چندمعیاره ارائه نداده‌اند (Santos et al, 2020; al et Revilla-Cuesta, 2019). همچنین، عملکرد این نوع بتن در شرایط محیطی مختلف مانند چرخه‌های یخ‌زدن-آب‌شدن، حملات سولفاتی، و کلریدی به‌طور کامل بررسی نشده است.

پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف‌های علمی، بهینه‌سازی طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد بتن‌های بازیافتی حاوی سنگدانه‌های ضایعات ساختمانی و الیاف پلی‌پروپیلن در شرایط محیطی مختلف را مورد بررسی قرار می‌دهد. اهداف اصلی این پژوهش عبارتند از:

۱. بررسی تأثیر نسبت جایگزینی سنگدانه بازیافتی (درشت و ریز)، درصد الیاف پلی‌پروپیلن، و نسبت آب به سیمان بر خواص مکانیکی و رئولوژیکی بتن بازیافتی.
۲. ارزیابی دوام بتن بازیافتی مسلح به الیاف در برابر چرخه‌های یخ‌زدن-آب‌شدن، حملات سولفاتی و کلریدی، و جذب آب.
۳. بهینه‌سازی چندمعیاره طرح اختلاط با استفاده از روش سطح پاسخ به‌منظور دستیابی به بهترین عملکرد هم‌زمان در خواص مکانیکی، دوامی، و زیست‌محیطی.
۴. تحلیل چرخه حیات برای ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی استفاده از سنگدانه بازیافتی و الیاف پلی‌پروپیلن در تولید بتن.
۵. ارائه مدل‌های پیش‌بینی برای خواص کلیدی بتن بازیافتی بر اساس پارامترهای طرح اختلاط.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲.۱. سنگدانه‌های بازیافتی از ضایعات ساختمانی

پسماندهای ساختمانی و تخریب که عمدتاً شامل بتن تخریب‌شده، آجر، کاشی، و ملات هستند، پس از خردایش و دانه‌بندی، به‌عنوان سنگدانه بازیافتی قابل استفاده در بتن جدید هستند (al et Akbarimehr, 2024). با این حال، سنگدانه‌های بازیافتی تفاوت‌های اساسی با سنگدانه‌های طبیعی دارند که عمدتاً به وجود ملات سیمانی چسبیده به سطح آنها برمی‌گردد (al et Etxeberria, 2007; Brito De & Evangelista, 2014). این ملات چسبیده باعث افزایش تخلخل، افزایش جذب آب، کاهش چگالی، و ایجاد ناحیه انتقالی خمیر-سنگدانه ضعیف‌تر می‌شود (Silva & Salgado, 2022; Padmini, al et Kisku, 2009; al et Kisku, 2017).

مطالعات نشان داده است که استفاده از سنگدانه بازیافتی معمولاً با کاهش کارایی، مقاومت فشاری، و مقاومت کششی بتن همراه است (al et González-Taboada, 2017; Ostrowski Adam & Malazdrewicz, 2023). با این حال، میزان این کاهش به عوامل متعددی از جمله کیفیت سنگدانه بازیافتی، درصد جایگزینی، نسبت آب به سیمان، و استفاده از مواد افزودنی بستگی دارد (al et Revilla-Cuesta, 2021b; Akbarimehr, 2024). در مطالعه‌ای بر روی بتن

حاوی پسماندهای ساختمانی غیرانتخابی از یک سایت دفن زباله در کرج، نشان دادند که استفاده از سنگدانه بازیافتی درشت و ریز غیرانتخابی، نتایج رضایت‌بخشی را ارائه می‌دهد و می‌تواند به صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف مواد اولیه منجر شود.

یکی از چالش‌های اساسی در استفاده از سنگدانه بازیافتی، نگرانی در مورد دوام بتن در شرایط محیطی مختلف است. Helsing و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای جامع بر روی دوام بتن حاوی سنگدانه بازیافتی، نشان دادند که نگرانی‌هایی در مورد مقاومت در برابر واکنش قلیایی-سیلیسی، مقاومت در برابر یخ‌زدگی، و کربناتاسیون وجود دارد. با این حال، آنها اشاره کردند که انتخاب چسبنده مناسب می‌تواند خطر واکنش قلیایی-سیلیسی را کاهش دهد و تأثیر منفی سنگدانه بازیافتی بر کربناتاسیون مشاهده نشده است.

۲.۲. الیاف پلی‌پروپیلن در بتن

الیاف پلی‌پروپیلن به‌عنوان یکی از پرکاربردترین الیاف مصنوعی در صنعت بتن، به دلیل هزینه نسبتاً کم، مقاومت شیمیایی بالا، و سهولت پراکندگی در ماتریس سیمانی، مورد توجه قرار گرفته است (al et Koksali, ۲۰۲۲; al et Bayraktar, ۲۰۲۱; al et Ahiskali, ۲۰۲۵). این الیاف با ایجاد اثر پل‌زنی در ترک‌ها، جذب انرژی و شکل‌پذیری بتن را افزایش داده و از گسترش ریزترک‌ها جلوگیری می‌کنند (al et Benyarar, ۲۰۲۳; al et Maafi, ۲۰۲۵).

مطالعات نشان داده است که الیاف پلی‌پروپیلن می‌توانند اثرات منفی استفاده از سنگدانه بازیافتی بر خواص مکانیکی بتن را جبران کنند. Li و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای بر روی بتن حاوی سنگدانه آجر بازیافتی و الیاف پلی‌پروپیلن، نشان دادند که الیاف پلی‌پروپیلن با ایجاد اثر پل‌زنی، مشکل کاهش مقاومت ناشی از جایگزینی سنگدانه بازیافتی را به‌طور مؤثر کاهش می‌دهند. همچنین، آنها گزارش کردند که خواص مکانیکی بتن بازیافتی تقویت‌شده با الیاف پلی‌پروپیلن در نرخ جایگزینی ۵۰ درصد بهینه است.

Wang و همکاران (۲۰۲۴) تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بازیافتی بر رفتار کششی بتن حاوی سنگدانه درشت بازیافتی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقاومت کششی محوری با افزایش حجم الیاف تا ۱/۵ درصد افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین، کرنش اوج با افزایش نسبت طول به قطر الیاف تا ۴۷/۸۵ افزایش یافت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که نه تنها درصد الیاف، بلکه هندسه الیاف نیز بر عملکرد بتن تأثیرگذار است.

۲.۳. بتن خودتراکم با سنگدانه بازیافتی

بتن خودتراکم به‌عنوان یکی از پیشرفت‌های مهم در علم بتن در اواخر قرن بیستم، قابلیت جریان‌یابی در قالب و بین آرماتورها را با استفاده از وزن خود، بدون نیاز به ویبره، دارد (Ozawa & Okamura, ۱۹۹۶; Okamura, ۱۹۹۷). این عملکرد بر اساس ویژگی‌های طراحی کلیدی از جمله اندازه کاهش‌یافته سنگدانه درشت، نسبت بالای سنگدانه ریز، و استفاده از فوق‌روان‌کننده‌ها حاصل می‌شود (al et Nepomuceno, ۲۰۱۶; al et Revilla-Cuesta, ۲۰۲۱a; al et Devi, ۲۰۲۰).

استفاده از سنگدانه بازیافتی در بتن خودتراکم با چالش‌های خاصی همراه است. شکل نامنظم سنگدانه درشت بازیافتی باعث کاهش قابلیت جریان‌یابی و عبور می‌شود، در حالی که سنگدانه ریز بازیافتی باعث افزایش ویسکوزیته و کاهش جدایش می‌شود (al et González-Taboada, ۲۰۱۷; al et Revilla-Cuesta, ۲۰۲۱a). از نظر عملکرد مکانیکی، هر دو بخش سنگدانه بازیافتی باعث کاهش مقاومت و سختی بتن خودتراکم می‌شوند (Ostrowski Adam & Malazdrewicz, ۲۰۲۳; al et Revilla-Cuesta, ۲۰۲۱b). همچنین، دوام بتن خودتراکم با استفاده از سنگدانه بازیافتی کاهش می‌یابد، زیرا هر دو بخش باعث افزایش تخلخل و در نتیجه نفوذپذیری بیشتر در برابر عوامل مخرب خارجی می‌شوند (et Santos, ۲۰۱۹; al, ۲۰۱۹).

۲.۴. بهینه‌سازی طرح اختلاط با روش‌های آماری

روش سطح پاسخ به‌عنوان یکی از روش‌های آماری کارآمد برای بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن، امکان بررسی هم‌زمان تأثیر چندین متغیر مستقل بر پاسخ‌های وابسته را فراهم می‌کند (Ulucan, ۲۰۲۴; al et Zhang, ۲۰۲۰). این روش با استفاده از طراحی آزمایش‌ها، مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی رفتار سیستم ارائه می‌دهد و امکان بهینه‌سازی چندمعیاره را فراهم می‌کند.

مطالعات اخیر نشان داده است که روش سطح پاسخ با دقت بالایی می‌تواند خواص بتن‌های بازیافتی را پیش‌بینی کند. Dahish و Alkharisi (۲۰۲۵) با استفاده از روش سطح پاسخ و الگوریتم جنگل تصادفی، خواص مهندسی بتن حاوی سنگدانه درشت بازیافتی و الیاف پلی‌پروپیلن را پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که مدل جنگل تصادفی با ضریب تبیین بالا، عملکرد بهتری نسبت به مدل روش سطح پاسخ دارد.

Ulucan (۲۰۲۴) رویکردی جامع برای بهینه‌سازی بتن پایدار با استفاده از سنگدانه بازیافتی و مواد سیمانی مکمل ارائه داد. در این مطالعه، با استفاده از روش سطح پاسخ، مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری توسعه داده شد و سپس بهینه‌سازی چندمعیاره با در نظر گرفتن خواص مکانیکی، زیست‌محیطی، و اقتصادی انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از سنگدانه بازیافتی و مواد سیمانی مکمل می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا ۲۱/۷ درصد و مصرف انرژی را تا ۱۹/۳ درصد کاهش دهد.

Prasanthi و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از رویکرد مشابه، عملکرد مکانیکی و ردپای کربن بتن ژئوپلیمری حاوی سنگدانه بازیافتی و الیاف پلی‌پروپیلن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بتن ژئوپلیمری مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن با ۶۰ درصد کاهش انتشار CO₂ نسبت به بتن معمولی، عملکرد مکانیکی قابل‌رقابتی ارائه می‌دهد.

۲.۵. دوام بتن بازیافتی در شرایط محیطی مختلف

یکی از چالش‌های اساسی در استفاده از بتن بازیافتی، اطمینان از دوام کافی در شرایط محیطی مختلف است. Guo و همکاران (۲۰۲۵) عملکرد برشی تیرهای بتن بازیافتی مسلح به الیاف را در شرایط یخ‌زدن-آب‌شدن در محلول نمک‌های سولفاتی و کلریدی بررسی کردند. نتایج نشان داد که پس از ۱۰۰ چرخه، بار ترک‌خوردگی و ظرفیت برشی تیرها به ترتیب ۳۹/۸ و ۲۲/۳ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده تأثیر مخرب شرایط محیطی بر عملکرد سازه‌ای است.

مطالعه‌ای دیگر بر روی بتن غلتکی متراکم حاوی سنگدانه بازیافتی و الیاف پلی‌پروپیلن نشان داد که استفاده از الیاف بهینه (۰/۲۵ تا ۰/۵۰ درصد) و پودر بتن ضایعاتی (تا ۲۰ درصد) می‌تواند مقاومت در برابر سولفات، کلرید، و چرخه‌های یخ‌زدن-آب‌شدن را بهبود بخشد (ScienceDirect, ۲۰۲۵). با این حال، افزایش محتوای پسماند ساختمانی و پودر بتن ضایعاتی باعث افزایش تخلخل و جذب آب مؤئینه شد.

Tuisk و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای بر روی بتن حاوی سنگدانه بازیافتی از آجر سیلیکات کلسیم، نشان دادند که جایگزینی سنگدانه طبیعی تا ۵۰ درصد تأثیر چشمگیری بر کاهش مقاومت فشاری ندارد و مقاومت در برابر یخ‌زدگی حتی بهبود می‌یابد. این بهبود احتمالاً به دلیل چگالی کمتر و تخلخل بسته بالاتر سنگدانه بازیافتی است که فضای بیشتری برای انبساط آب در هنگام یخ‌زدن فراهم می‌کند.

۳. روش‌شناسی تحقیق

۳.۱. مواد و مشخصات آنها

در این پژوهش، از مواد زیر برای ساخت نمونه‌های بتنی استفاده شده است:

سیمان: از سیمان پرتلند تیپ ۲ مطابق با استاندارد C10۰ ASTM استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان در جدول ۱ ارائه شده است.

سنگدانه طبیعی: سنگدانه طبیعی شامل شن (با اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر) و ماسه (با اندازه اسمی ۴/۷۵ میلی‌متر) از معادن اطراف تهران تهیه شده است.

سنگدانه بازیافتی: سنگدانه بازیافتی از خردایش بتن‌های تخریب‌شده با مقاومت اولیه حدود ۳۵ مگاپاسکال تهیه شده است. سنگدانه بازیافتی درشت (با اندازه ۴/۷۵ تا ۱۹ میلی‌متر) و سنگدانه بازیافتی ریز (با اندازه کوچک‌تر از ۴/۷۵ میلی‌متر) پس از شستشو و دانه‌بندی، مورد استفاده قرار گرفته است.

الیاف پلی‌پروپیلن: از الیاف پلی‌پروپیلن میکرو با طول ۱۲ میلی‌متر، قطر ۱۸ میکرومتر، و نسبت طول به قطر ۶۶۷ استفاده شده است. مقاومت کششی الیاف حدود ۴۰۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته حدود ۳/۵ گیگاپاسکال است.

مواد سیمانی مکمل: از خاکستر بادی کلاس F (مطابق با ASTM C71۸) و دوده سیلیس (با خلوص بیش از ۹۲ درصد SiO₂) به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده شده است.

فوق‌روان‌کننده: از فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات با کاهش آب تا ۳۰ درصد مطابق با ASTM C۴۹۴ استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲

ویژگی	مقدار	واحد	روش آزمون
SiO ₂	۲۱/۸	درصد	XRF
Al ₂ O ₃	۴/۹	درصد	XRF
Fe ₂ O ₃	۳/۷	درصد	XRF
CaO	۶۲/۴	درصد	XRF
MgO	۳/۱	درصد	XRF
SO ₃	۲/۳	درصد	XRF
LOI	۱/۸	درصد	XRF
چگالی	۳/۱۵	g/cm ³	C188 ASTM
سطح ویژه بلین	۳۳۰۰	cm ² /g	C2۰۴ ASTM
زمان گیرش اولیه	۱۸۰	دقیقه	C191 ASTM
زمان گیرش نهایی	۲۶۰	دقیقه	C191 ASTM

جدول ۲: مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

ویژگی	سنگدانه طبیعی درشت	سنگدانه طبیعی ریز	سنگدانه بازیافتی درشت	سنگدانه بازیافتی ریز
چگالی انبوهی (kg/m ³)	۱۵۶۰	۱۶۵۰	۱۳۸۰	۱۴۲۰
چگالی ویژه (g/cm ³)	۲/۶۵	۲/۶۲	۲/۴۲	۲/۳۵
جذب آب (درصد)	۱/۲	۱/۸	۴/۸	۶/۵
تخلخل (درصد)	۲/۵	۳/۲	۱۰/۴	۱۲/۸
ضریب شکل (درصد)	۷۵	-	۶۲	-
مدول نرمی	-	۲/۸	-	۳/۱

۳.۲. طرح‌های اختلاط

در این پژوهش، ۳۰ طرح اختلاط مختلف با استفاده از روش Design Box-Behnken (BBD) طراحی شده است. متغیرهای مستقل شامل:

- نسبت جایگزینی سنگدانه درشت بازیافتی (RCAc): ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد
- نسبت جایگزینی سنگدانه ریز بازیافتی (RCAf): ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد
- درصد الیاف پلی‌پروپیلن (PPF): ۰، ۰/۵ و ۱ درصد حجمی
- نسبت آب به مواد سیمانی (w/cm): ۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵

مقدار سیمان ثابت و برابر با ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. برای حفظ کارایی مناسب، از فوق‌روان‌کننده با دوز متغیر استفاده شده است.

جدول ۳: طرح‌های اختلاط نمونه‌های بتنی

شماره طرح	RCAc (%)	RCAf (%)	PPF (%)	w/cm	سیمان (kg/m ³)	فوق‌روان‌کننده (kg/m ³)
M1	۰	۰	۰	۰/۴۵	۳۵۰	۱/۷۵
M2	۰	۰	۰/۵	۰/۴۵	۳۵۰	۲/۱۰
M3	۰	۰	۱	۰/۴۵	۳۵۰	۲/۴۵
M4	۵۰	۰	۰	۰/۴۵	۳۵۰	۲/۱۰
M5	۵۰	۰	۰/۵	۰/۴۵	۳۵۰	۲/۴۵
M6	۵۰	۰	۱	۰/۴۵	۳۵۰	۲/۸۰
M7	۱۰۰	۰	۰	۰/۴۵	۳۵۰	۲/۴۵
M8	۱۰۰	۰	۰/۵	۰/۴۵	۳۵۰	۲/۸۰
M9	۱۰۰	۰	۱	۰/۴۵	۳۵۰	۳/۱۵
M10	۰	۵۰	۰	۰/۴۵	۳۵۰	۲/۱۰
M11	۰	۵۰	۰/۵	۰/۴۵	۳۵۰	۲/۴۵
M12	۰	۵۰	۱	۰/۴۵	۳۵۰	۲/۸۰

۲/۴۵	۳۵۰	۰/۴۵	۰	۵۰	۵۰	M13
۲/۸۰	۳۵۰	۰/۴۵	۰/۵	۵۰	۵۰	M14
۳/۱۵	۳۵۰	۰/۴۵	۱	۵۰	۵۰	M15
۲/۸۰	۳۵۰	۰/۴۵	۰	۵۰	۱۰۰	M16
۳/۱۵	۳۵۰	۰/۴۵	۰/۵	۵۰	۱۰۰	M17
۳/۵۰	۳۵۰	۰/۴۵	۱	۵۰	۱۰۰	M18
...	...	...	...	...	...	...

۳.۳. روش‌های آزمایشگاهی

آزمایش‌های حالت تازه: کارایی بتن با استفاده از آزمایش اسلامپ مطابق با ASTM C143 و آزمایش جریان (برای بتن خودتراکم) مطابق با ASTM C1711 اندازه‌گیری شد. همچنین، چگالی حالت تازه بتن مطابق با ASTM C138 تعیین گردید.

آزمایش‌های مقاومت مکانیکی: مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، و ۹۰ روز بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر مطابق با ASTM C39 اندازه‌گیری شد. مقاومت کششی برزلی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر مطابق با ASTM C496 انجام شد. مقاومت خمشی با استفاده از آزمایش خمش روی تیرهای ۱۰۰×۱۰۰×۵۰ میلی‌متر مطابق با ASTM C78 اندازه‌گیری گردید. مدول الاستیسیته با استفاده از آزمایش فشار محوری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای مطابق با ASTM C469 تعیین شد.

آزمایش‌های دوام: جذب آب مطابق با ASTM C143 اندازه‌گیری شد. مقاومت در برابر چرخه‌های یخ‌زدن-آب‌شدن مطابق با ASTM C672 (روش A) انجام شد. مقاومت در برابر حمله سولفاتی با غوطه‌وری نمونه‌ها در محلول سولفات سدیم ۵ درصد مطابق با ASTM C1012 ارزیابی گردید. نفوذپذیری کلرید با استفاده از آزمایش مهاجرت سریع کلرید (RCM) مطابق با NT BUILD 492 اندازه‌گیری شد.

ریزساختارشناسی: برای بررسی ریزساختار و ناحیه انتقالی خمیر-سنگدانه، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد. همچنین، تخلخل سنجی جیوه (MIP) برای تعیین توزیع اندازه حفرات انجام شد.

۳.۴. روش‌های تحلیل آماری و بهینه‌سازی

برای تحلیل داده‌ها و توسعه مدل‌های پیش‌بینی، از روش سطح پاسخ با استفاده از نرم‌افزار Design-Expert استفاده شد. مدل‌های درجه دوم برای هر پاسخ توسعه داده شد و با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA)، معنی‌داری ضرایب مدل بررسی گردید. برای بهینه‌سازی چندمعیاره، از روش مطلوبیت (Desirability) با تعیین اهداف برای هر پاسخ استفاده شد.

۳.۵. تحلیل چرخه حیات

برای ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی، تحلیل چرخه حیات با استفاده از رویکرد از گهواره تا دروازه (cradle-to-gate) و با در نظر گرفتن شاخص‌های گرمایش جهانی (GWP)، مصرف انرژی (EC)، و تولید پسماند (WG) انجام شد. داده‌های موجودی برای مواد اولیه از پایگاه داده‌های Ecoinvent نسخه ۳/۸ استخراج گردید.

۴. نتایج و بحث

۴.۱. خواص حالت تازه

نتایج آزمایش‌های حالت تازه نشان داد که جایگزینی سنگدانه طبیعی با سنگدانه بازیافتی، کارایی بتن را کاهش می‌دهد. کاهش کارایی عمدتاً به دلیل تخلخل بالاتر و جذب آب بیشتر سنگدانه بازیافتی است که باعث جذب بخشی از آب اختلاط و کاهش روانی مخلوط می‌شود. برای حفظ کارایی ثابت، نیاز به افزایش دوز فوق‌روان‌کننده با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه بازیافتی مشاهده شد (جدول ۳). این یافته با نتایج مطالعات قبلی (al et González-Taboada, ۲۰۱۷; Revilla-Cuesta, al et ۲۰۲۱a) هماهنگ است.

افزایش درصد الیاف پلی‌پروپیلن نیز باعث کاهش کارایی شد، زیرا الیاف با ایجاد اصطکاک و افزایش سطح تماس، مقاومت جریان را افزایش می‌دهند. با این حال، استفاده از فوق‌روان‌کننده توانست تا حدی این کاهش کارایی را جبران کند. بیشترین کاهش کارایی در طرح‌های با ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی و ۱ درصد الیاف مشاهده شد که نیاز به افزایش حدود ۸۰ درصدی دوز فوق‌روان‌کننده نسبت به طرح شاهد داشت.

چگالی حالت تازه بتن با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه بازیافتی کاهش یافت، که به دلیل چگالی کمتر سنگدانه بازیافتی نسبت به سنگدانه طبیعی است (جدول ۲). کاهش چگالی در طرح‌های با ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی حدود ۸ تا ۱۰ درصد بود.

۴.۲. مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز در شکل ۱ نشان داده شده است. به‌طور کلی، با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه بازیافتی (چه درشت و چه ریز)، مقاومت فشاری کاهش یافت. کاهش مقاومت در طرح‌های با سنگدانه بازیافتی ریز بیشتر از سنگدانه

بازیافتی درشت بود، که با نتایج مطالعات قبلی (Adam & Malazdrewicz, 2021b; al et Revilla-Cuesta, 2023; Ostrowski, 2023) همخوانی دارد. این تفاوت عمدتاً به دلیل وجود ذرات ملات و تخلخل بیشتر در سنگدانه ریز بازیافتی است که باعث تضعیف ناحیه انتقالی خمیر-سنگدانه می‌شود.

استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن تأثیر دوگانه بر مقاومت فشاری داشت. در درصد‌های پایین الیاف (تا ۰/۵ درصد)، مقاومت فشاری کاهش جزئی داشت، اما در درصد‌های بالاتر (۱ درصد)، کاهش مقاومت بیشتری مشاهده شد. این کاهش به دلیل ایجاد تخلخل و نقاط ضعف در ماتریس سیمانی ناشی از تجمع الیاف و افزایش حباب‌های هوا است. با این حال، برای طرح‌های با ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی، استفاده از ۰/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن توانست کاهش مقاومت را تا حد زیادی جبران کند. به‌عنوان مثال، در طرح M13 (۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی بدون الیاف)، مقاومت فشاری ۳۲/۴ مگاپاسکال بود، در حالی که در طرح M14 (۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی با ۰/۵ درصد الیاف)، مقاومت به ۳۴/۶ مگاپاسکال افزایش یافت. این بهبود به دلیل اثر پل‌زنی الیاف در ریزترک‌ها و جلوگیری از گسترش آنها تحت بار فشاری است (al et Ramalingam, 2024; al et Li, 2024).

تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری مطابق انتظار بود و با کاهش w/cm ، مقاومت فشاری افزایش یافت. این تأثیر در طرح‌های با سنگدانه بازیافتی بیشتر مشهودتر بود، زیرا سنگدانه بازیافتی به نسبت آب به سیمان پایین‌تر برای جبران تخلخل بیشتر نیاز دارد.

جدول ۴: نتایج مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتنی

شماره طرح	مقاومت فشاری ۲۸ روز (MPa)	مقاومت فشاری ۹۰ روز (MPa)	مقاومت کششی برزیلی (MPa)	مقاومت خمشی (MPa)
M1 (شاهد)	۴۲/۶	۴۸/۹	۳/۸	۴/۷
M2	۴۲/۱	۴۸/۲	۴/۱	۵/۲
M3	۴۰/۸	۴۶/۷	۴/۳	۵/۶
M4	۳۶/۲	۴۱/۸	۳/۲	۴/۰
M5	۳۶/۸	۴۲/۴	۳/۶	۴/۵
M6	۳۵/۴	۴۰/۶	۳/۹	۴/۹
M7	۳۰/۵	۳۵/۲	۲/۷	۳/۴
M8	۳۱/۲	۳۶/۱	۳/۱	۳/۹
M9	۲۹/۸	۳۴/۴	۳/۳	۴/۲
M13	۳۲/۴	۳۷/۶	۲/۹	۳/۶

۴/۲	۳/۴	۴۰/۲	۳۴/۶	M1۴
۴/۶	۳/۶	۳۸/۵	۳۳/۲	M1۵
۳/۰	۲/۴	۳۲/۱	۲۷/۸	M1۶
۳/۵	۲/۸	۳۳/۲	۲۸/۶	M1۷
۳/۸	۳/۰	۳۱/۵	۲۷/۲	M1۸

۴.۳. مقاومت کششی و خمشی

برخلاف مقاومت فشاری، مقاومت کششی برزیلی و خمشی تحت تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بهبود قابل توجهی نشان دادند (جدول ۴). این بهبود به دلیل نقش مؤثر الیاف در مهار ترک‌های کششی و ایجاد اثر پل‌زنی است. در طرح‌های با ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی، افزودن ۰/۵ درصد الیاف باعث افزایش ۱۷ درصدی مقاومت کششی برزیلی و ۱۷ درصدی مقاومت خمشی شد. با افزایش درصد الیاف به ۱ درصد، مقاومت کششی و خمشی بیشتری افزایش یافت، هرچند این افزایش با کاهش مقاومت فشاری همراه بود.

مقاومت کششی و خمشی با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه بازیافتی کاهش یافت، اما این کاهش کمتر از کاهش مقاومت فشاری بود. این مشاهده نشان می‌دهد که ضعف ناحیه انتقالی خمیر-سنگدانه در سنگدانه بازیافتی، تأثیر بیشتری بر مقاومت فشاری (که به یکپارچگی ماتریس وابسته است) نسبت به مقاومت کششی (که به چسبندگی خمیر-سنگدانه وابسته است) دارد. Ramalingam و همکاران (۲۰۲۴) نیز گزارش کردند که الیاف پلی‌پروپیلن با افزایش چقرمگی و شکل‌پذیری، عملکرد کششی بتن بازیافتی را بهبود می‌بخشند.

نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری در طرح‌های دارای الیاف بیشتر از طرح‌های بدون الیاف بود، که نشان‌دهنده بهبود شکل‌پذیری و کاهش تردی بتن است. این ویژگی برای کاربردهای سازه‌ای که نیاز به جذب انرژی و مقاومت در برابر بارهای دینامیکی دارند، بسیار حائز اهمیت است.

۴.۴. مدول الاستیسیته

نتایج مدول الاستیسیته نشان داد که با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه بازیافتی، مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. این کاهش عمدتاً به دلیل سختی کمتر سنگدانه بازیافتی (به دلیل وجود ملات چسبیده با مدول پایین‌تر) و تداخل بیشتر آن است. در طرح‌های با ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی، مدول الاستیسیته حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد نسبت به طرح شاهد کاهش یافت.

افزودن الیاف پلی‌پروپیلن تأثیر قابل توجهی بر مدول الاستیسیته نداشت، زیرا مدول الاستیسیته الیاف (حدود ۳/۵ گیگاپاسکال) بسیار کمتر از مدول الاستیسیته خمیر سیمانی و سنگدانه است و سهم الیاف در مقاومت کل بتن در محدوده الاستیک ناچیز

است. با این حال، الیاف با کنترل گسترش ریزترک‌ها در محدوده پس‌از ترک‌خوردگی، می‌توانند به حفظ یکپارچگی سازه کمک کنند.

۴.۵. دوام

۴.۵/۱. جذب آب و تخلخل

نتایج آزمایش جذب آب و تخلخل نشان داد که با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه بازیافتی، جذب آب و تخلخل بتن افزایش می‌یابد (شکل ۲). در طرح‌های با ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی، جذب آب حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد و تخلخل حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد نسبت به طرح شاهد افزایش یافت. این افزایش به دلیل تخلخل بالاتر سنگدانه بازیافتی و ناحیه انتقالی ضعیف‌تر است که مسیرهای بیشتری برای نفوذ آب فراهم می‌کند (Silva & Salgado, ۲۰۲۲; al et Padmini, ۲۰۰۹).

افزودن الیاف پلی‌پروپیلن تأثیر متفاوتی بر جذب آب داشت. در درصد‌های پایین الیاف (۰/۵ درصد)، جذب آب کاهش جزئی نشان داد، در حالی که در درصد‌های بالاتر (۱ درصد)، جذب آب افزایش یافت. این رفتار را می‌توان به دو مکانیسم توضیح داد: اول، الیاف با پر کردن حفرات و کاهش تخلخل، جذب آب را کاهش می‌دهند؛ دوم، الیاف با ایجاد سطح تماس اضافی و نقاط ضعف در ماتریس، می‌توانند مسیرهای نفوذ آب را افزایش دهند. بنابراین، درصد بهینه الیاف برای کاهش جذب آب حدود ۰/۵ درصد است.

۴.۵/۲. مقاومت در برابر یخ‌زدن-آب‌شدن

نتایج آزمایش چرخه‌های یخ‌زدن-آب‌شدن در شکل ۳ نشان داده شده است. به‌طور کلی، مقاومت در برابر یخ‌زدن-آب‌شدن با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه بازیافتی کاهش یافت، اما این کاهش در طرح‌های دارای الیاف پلی‌پروپیلن کمتر بود. پس از ۳۰۰ چرخه یخ‌زدن-آب‌شدن، کاهش وزن در طرح شاهد حدود ۲/۵ درصد، در طرح با ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی بدون الیاف حدود ۸/۲ درصد، و در طرح با ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی و ۰/۵ درصد الیاف حدود ۵/۶ درصد بود.

این نتایج نشان می‌دهد که الیاف پلی‌پروپیلن با مهار ترک‌های ناشی از انبساط آب در هنگام یخ‌زدن، از تخریب بتن جلوگیری می‌کنند. همچنین، مشاهده شد که طرح‌های با سنگدانه ریز بازیافتی کمتر، مقاومت بهتری در برابر یخ‌زدن داشتند، که احتمالاً به دلیل تخلخل بیشتر و ذرات ریزتر سنگدانه ریز بازیافتی است که آسیب‌پذیری بیشتری در برابر یخ‌زدن دارند. Guo و همکاران (۲۰۲۵) نیز گزارش کردند که در شرایط یخ‌زدن-آب‌شدن در محلول نمک‌های سولفاتی و کلریدی، عملکرد برشی تیرهای بتن بازیافتی مسلح به الیاف به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد که اهمیت استفاده از الیاف را در شرایط محیطی خشن نشان می‌دهد.

جالب توجه است که Tuisk و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای بر روی بتن حاوی سنگدانه بازیافتی از آجر سیلیکات کلسیم، نشان دادند که مقاومت در برابر یخ‌زدگی حتی بهبود می‌یابد. این بهبود به دلیل چگالی کمتر و تخلخل بسته بالاتر سنگدانه بازیافتی است که فضای بیشتری برای انبساط آب فراهم می‌کند. این یافته نشان می‌دهد که نوع سنگدانه بازیافتی تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار یخ‌زدگی دارد.

۴.۵/۳. مقاومت در برابر حمله سولفاتی

نتایج آزمایش مقاومت در برابر حمله سولفاتی نشان داد که قرارگیری در معرض محلول سولفات سدیم ۵ درصد به مدت ۹۰ روز، باعث کاهش مقاومت فشاری در همه طرح‌ها شد. با این حال، میزان کاهش مقاومت در طرح‌های دارای سنگدانه بازیافتی بیشتر از طرح شاهد بود. کاهش مقاومت در طرح با ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی بدون الیاف حدود ۱۸ درصد، در حالی که در طرح شاهد حدود ۹ درصد بود.

افزودن الیاف پلی‌پروپیلن تأثیر مثبتی بر مقاومت در برابر حمله سولفاتی داشت و کاهش مقاومت را در طرح‌های با سنگدانه بازیافتی تا حدودی جبران کرد. در طرح با ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی و ۰/۵ درصد الیاف، کاهش مقاومت حدود ۱۳ درصد بود. این بهبود به دلیل نقش الیاف در مهار ترک‌های ناشی از حمله سولفاتی و جلوگیری از نفوذ بیشتر یون‌های سولفات است. ScienceDirect (۲۰۲۵) نیز گزارش کرد که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن بهینه (۰/۲۵ تا ۰/۵۰ درصد) می‌تواند مقاومت بتن غلتکی متراکم حاوی سنگدانه بازیافتی را در برابر سولفات بهبود بخشد.

۴.۵/۴. نفوذپذیری کلرید

نتایج آزمایش نفوذپذیری کلرید (RCM) نشان داد که ضریب نفوذ کلرید با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه بازیافتی افزایش می‌یابد. در طرح با ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی، ضریب نفوذ کلرید حدود ۸۰ درصد بیشتر از طرح شاهد بود. این افزایش به دلیل تخلخل بالاتر و مسیرهای نفوذ بیشتر در بتن حاوی سنگدانه بازیافتی است.

افزودن الیاف پلی‌پروپیلن تأثیر متفاوتی بر نفوذپذیری کلرید داشت و در درصد ۰/۵ درصد، کاهش جزئی و در درصد ۱ درصد، افزایش جزئی در ضریب نفوذ کلرید مشاهده شد. این رفتار مشابه با جذب آب است و نشان می‌دهد که درصد بهینه الیاف برای کاهش نفوذپذیری، حدود ۰/۵ درصد است.

۴.۶. تحلیل ریزساختار

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونه‌های مختلف در شکل ۴ ارائه شده است. در نمونه شاهد، ساختار متراکم با حفرات ریز و یکنواخت مشاهده شد. در نمونه با سنگدانه بازیافتی، ناحیه انتقالی خمیر-سنگدانه با تخلخل بیشتر و ترک‌های ریز مشاهده شد که نشان‌دهنده چسبندگی ضعیف‌تر بین خمیر سیمانی و سنگدانه بازیافتی است.

در نمونه‌های دارای الیاف پلی‌پروپیلن، حضور الیاف در ماتریس سیمانی به‌خوبی قابل تشخیص بود. الیاف به‌صورت تصادفی در ماتریس پراکنده شده بودند و در بسیاری از موارد، ترک‌ها در اطراف الیاف متوقف شده بودند که نشان‌دهنده اثر پل‌زنی الیاف است. همچنین، در نمونه‌های با الیاف ۰/۵ درصد، توزیع نسبتاً یکنواخت الیاف مشاهده شد، در حالی که در نمونه‌های با ۱ درصد الیاف، تجمع الیاف در برخی نقاط مشاهده شد که می‌تواند باعث ایجاد نقاط ضعف در ماتریس شود. این مشاهدات با نتایج مقاومت مکانیکی و دوام همخوانی دارد و نشان می‌دهد که درصد بهینه الیاف برای بهبود عملکرد بتن بازیافتی حدود ۰/۵ درصد است.

۴.۷. مدل‌سازی آماری و بهینه‌سازی

۴/۷/۱. توسعه مدل‌های پیش‌بینی

با استفاده از روش سطح پاسخ، مدل‌های درجه دوم برای پیش‌بینی خواص کلیدی بتن توسعه داده شد. ضرایب تبیین (R^2) برای مدل‌های مختلف بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۸ بود که نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌ها در پیش‌بینی رفتار بتن است. تحلیل واریانس (ANOVA) نشان داد که مدل‌های درجه دوم برای تمام پاسخ‌ها معنی‌دار هستند ($p\text{-value} < 0.05$).

برای مقاومت فشاری، مدل نهایی به‌صورت زیر است:

$$CS = 42.6 - 7.8 \times RCAc - 4.2 \times RCAf + 1.5 \times PPF - 18.3 \times w/cm - 0.45 (- 2.1 \times RCAc^2 - 1.8 \times RCAf^2 - 3.0 \times PPF^2 + 2.5 \times RCAc \times RCAf - 0.8 \times RCAc \times PPF + 1.2 \times RCAf \times PPF)$$

که در آن CS مقاومت فشاری (MPa)، RCAc نسبت جایگزینی سنگدانه درشت بازیافتی، RCAf نسبت جایگزینی سنگدانه ریز بازیافتی، PPF درصد الیاف پلی‌پروپیلن، و w/cm نسبت آب به مواد سیمانی است.

Dahish و Alkharisi (۲۰۲۵) نیز با استفاده از روش سطح پاسخ، مدل‌های مشابهی برای پیش‌بینی خواص بتن حاوی سنگدانه بازیافتی و الیاف پلی‌پروپیلن توسعه دادند. آنها نشان دادند که مدل‌های توسعه‌یافته با روش سطح پاسخ، دقت قابل‌قبولی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری و کششی دارند، هرچند مدل‌های یادگیری ماشین (مانند جنگل تصادفی) دقت بالاتری ارائه می‌دهند.

۴/۷/۲. بهینه‌سازی چندمعیاره

با استفاده از روش مطلوبیت، بهینه‌سازی چندمعیاره برای تعیین بهترین ترکیب متغیرهای مستقل انجام شد. اهداف بهینه‌سازی شامل حداکثرسازی مقاومت فشاری، مقاومت کششی، و مقاومت در برابر یخ‌زدن، و حداقل‌سازی جذب آب و نفوذپذیری کلرید بود. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که بهترین عملکرد در شرایط زیر حاصل می‌شود:

- نسبت جایگزینی سنگدانه درشت بازیافتی: ۳۵ تا ۴۵ درصد
- نسبت جایگزینی سنگدانه ریز بازیافتی: ۳۰ تا ۴۵ درصد
- درصد الیاف پلی‌پروپیلن: ۰/۱ تا ۰/۵ درصد (حجمی)
- نسبت آب به مواد سیمانی: ۰/۳۸ تا ۰/۴۲

در این محدوده بهینه، مقاومت فشاری حدود ۳۵ تا ۴۰ مگاپاسکال، مقاومت کششی برزیلی حدود ۳/۰ تا ۳/۵ مگاپاسکال، و جذب آب کمتر از ۵ درصد پیش‌بینی شد.

این محدوده بهینه با نتایج سایر محققان نیز همخوانی دارد. Revilla-Cuesta و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای بر روی بتن خودتراکم با سنگدانه بازیافتی، محدوده ۳۵ تا ۴۵ درصد سنگدانه درشت بازیافتی و ۳۰ تا ۴۵ درصد سنگدانه ریز بازیافتی را

برای عملکرد بهینه پیشنهاد کردند. همچنین، ScienceDirect (۲۰۲۵) نشان داد که استفاده از ۰/۲۵ تا ۰/۵۰ درصد الیاف پلی‌پروپیلن بهترین عملکرد را در بتن غلتکی متراکم حاوی سنگدانه بازیافتی ارائه می‌دهد.

۴.۸. تحلیل چرخه حیات

نتایج تحلیل چرخه حیات نشان داد که استفاده از سنگدانه بازیافتی و الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند تأثیرات زیست‌محیطی تولید بتن را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد (جدول ۵). در طرح بهینه (۴۰ درصد سنگدانه بازیافتی درشت، ۴۰ درصد سنگدانه بازیافتی ریز، ۰/۳ درصد الیاف، و $40 \text{ w/cm} = 0$)، انتشار گازهای گلخانه‌ای حدود ۳۰ درصد، مصرف انرژی حدود ۲۵ درصد، و تولید پسماند حدود ۱۵ درصد نسبت به طرح شاهد کاهش یافت.

جدول ۵: نتایج تحلیل چرخه حیات برای طرح‌های مختلف

شاخص زیست‌محیطی	طرح شاهد	طرح با ۵۰٪ RCA	طرح بهینه	کاهش نسبت به شاهد
گرمایش جهانی ($\text{CO}_2\text{-eq/m}^3 \text{ kg}$)	۴۲۲	۳۵۴	۲۹۶	۳۰٪
مصرف انرژی (MJ/m^3)	۱۲۹۴	۱۰۸۲	۹۷۰	۲۵٪
تولید پسماند (kg/m^3)	۱۲۹۴	۱۲۵۰	۱۱۰۰	۱۵٪
هزینه (€/m^3)	۸۲	۷۸	۷۶	۷٪

این نتایج با یافته‌های Ulucan (۲۰۲۴) که گزارش داد استفاده از سنگدانه بازیافتی و مواد سیمانی مکمل می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا ۲۱/۷ درصد و مصرف انرژی را تا ۱۹/۳ درصد کاهش دهد، همخوانی دارد. همچنین، Prasanthi و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که بتن ژئوپلیمری حاوی سنگدانه بازیافتی و الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند انتشار CO_2 را تا ۶۰ درصد نسبت به بتن معمولی کاهش دهد.

تأثیر زیست‌محیطی استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن نیز بررسی شد. اگرچه تولید الیاف پلی‌پروپیلن خود دارای ردپای کربن است، اما بهبود عملکرد بتن و افزایش طول عمر سازه‌های ساخته‌شده با این بتن، می‌تواند این تأثیر را جبران کند. در تحلیل چرخه حیات کامل (با در نظر گرفتن طول عمر سازه)، استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به‌طور کلی تأثیر مثبتی بر پایداری زیست‌محیطی دارد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات**۵.۱. نتیجه‌گیری**

پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد بتن‌های بازیافتی حاوی سنگدانه‌های ضایعات ساختمانی و الیاف پلی‌پروپیلن در شرایط محیطی مختلف انجام شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، نتیجه‌گیری‌های زیر حاصل می‌شود:

۱. جایگزینی سنگدانه طبیعی با سنگدانه بازیافتی باعث کاهش کارایی، چگالی، مقاومت فشاری، و مدول الاستیسیته بتن می‌شود. با این حال، استفاده از فوق‌روان‌کننده و الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند تا حد زیادی این کاهش را جبران کند.

۲. الیاف پلی‌پروپیلن با ایجاد اثر پل‌زنی در ترک‌ها، جذب انرژی و شکل‌پذیری بتن را افزایش داده و مقاومت کششی و خمشی را بهبود می‌بخشد. درصد بهینه الیاف برای بهبود عملکرد بتن بازیافتی حدود ۰/۵ درصد حجمی است.

۳. دوام بتن بازیافتی در برابر چرخه‌های یخ‌زدن-آب‌شدن، حملات سولفاتی، و نفوذ کلرید با استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن بهبود می‌یابد. درصد بهینه الیاف برای بهبود دوام نیز حدود ۰/۵ درصد است.

۴. مدل‌های درجه دوم توسعه‌یافته با روش سطح پاسخ، دقت بالایی در پیش‌بینی خواص بتن بازیافتی دارند ($R^2 > 0.92$) و می‌توانند برای طراحی بهینه طرح‌های اختلاط مورد استفاده قرار گیرند.

۵. بهینه‌سازی چندمعیاره نشان داد که محدوده ۳۵ تا ۴۵ درصد سنگدانه درشت بازیافتی، ۳۰ تا ۴۵ درصد سنگدانه ریز بازیافتی، ۰/۱ تا ۰/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، و نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ تا ۰/۴۲، بهترین عملکرد را از نظر خواص مکانیکی، دوامی، و زیست‌محیطی ارائه می‌دهد.

۶. تحلیل چرخه حیات نشان داد که استفاده از سنگدانه بازیافتی و الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا ۳۰ درصد، مصرف انرژی را تا ۲۵ درصد، و تولید پسماند را تا ۱۵ درصد کاهش دهد.

۷. تحلیل ریزساختار نشان داد که حضور الیاف پلی‌پروپیلن در ماتریس سیمانی، با ایجاد اثر پل‌زنی و مهار ترک‌ها، یکپارچگی بتن را بهبود می‌بخشد و از گسترش ریزترک‌ها جلوگیری می‌کند.

۵.۲. پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهادات زیر برای پژوهش‌های آینده ارائه می‌شود:

۱. بررسی تأثیر ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با سایر انواع الیاف (مانند الیاف فولادی، شیشه‌ای، و طبیعی) بر عملکرد بتن بازیافتی.

۲. مطالعه عملکرد بلندمدت بتن بازیافتی مسلح به الیاف در شرایط محیطی واقعی و ارزیابی دوام آن در بازه‌های زمانی طولانی‌تر.

۳. بررسی امکان استفاده از ضایعات پلی‌پروپیلن بازیافتی به‌عنوان الیاف در بتن و مقایسه عملکرد آن با الیاف تجاری.

۴. توسعه مدل‌های پیش‌بینی با استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین (مانند جنگل تصادفی، شبکه‌های عصبی، و ماشین بردار پشتیبان) برای افزایش دقت پیش‌بینی خواص بتن بازیافتی.
۵. بررسی عملکرد سازه‌های ساخته‌شده با بتن بازیافتی مسلح به الیاف در مقیاس واقعی و ارزیابی رفتار آنها تحت بارهای مختلف.
۶. مطالعه امکان استفاده از سنگدانه بازیافتی از منابع مختلف (مانند آجر، کاشی، و شیشه) و تأثیر آن بر عملکرد بتن.
۷. ارزیابی جامع‌تر اقتصادی-زیست‌محیطی با در نظر گرفتن تمام مراحل چرخه حیات، از تولید مواد اولیه تا بازیافت در پایان عمر مفید سازه.
۸. بررسی تأثیر فرآیندهای بهبود کیفیت سنگدانه بازیافتی (مانند کربناته‌سازی، حرارت‌دهی، و اسیدشویی) بر عملکرد بتن بازیافتی مسلح به الیاف.

منابع

۱. Ahiskali, A., et al. (۲۰۲۰). Polypropylene fiber reinforced concrete: A review on mechanical properties and durability. *Journal of Building Engineering*, ۸۹, ۱۰۹۲۳۴.
۲. Akbarimehr, D., Eslami, A., Nasiri, A., Rahai, M., & Karakouzian, M. (۲۰۲۴). Performance study of sustainable concrete containing recycled aggregates from non-selected construction and demolition waste. *Sustainability*, ۱۶(۷), ۲۶۰۱.
۳. Alabduljabbar, H., et al. (۲۰۲۴). Recycled aggregates in sustainable concrete: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, ۴۰۰, ۱۳۲۸۴۵.
۴. Antunes, P., et al. (۲۰۲۴). Environmental impact assessment of natural aggregate extraction. *Journal of Cleaner Production*, ۴۳۴, ۱۴۰۲۷۶.
۵. Antunes, P., et al. (۲۰۲۵). Sustainable alternatives for aggregate production in concrete manufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, ۱۹۸, ۱۰۷۲۱۱.
۶. Baggio, A., et al. (۲۰۲۴). Ecological footprint of construction materials: A comprehensive review. *Sustainable Materials and Technologies*, ۳۹, e۰۰۸۵۷.
۷. Bayraktar, O. Y., et al. (۲۰۲۱). Polypropylene fiber reinforced concrete: A review on mechanical and durability properties. *Construction and Building Materials*, ۲۸۸, ۱۲۳۰۷۱.
۸. Benyarar, F., et al. (۲۰۲۳). Effect of polypropylene fibers on the mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, ۲۴(۲), ۱۸۷۴-۱۸۸۹.
۹. Borges, P. H. R., et al. (۲۰۲۳). Construction and demolition waste management in developing countries. *Waste Management*, ۱۶۸, ۷۲-۸۵.
۱۰. Cheng, S., et al. (۲۰۲۴). Carbon emissions from cement production: Global trends and mitigation strategies. *Cement and Concrete Research*, ۱۷۸, ۱۰۷۴۶۱.
۱۱. Dahish, H. A., & Alkharisi, M. K. (۲۰۲۵). Predicting the properties of polypropylene fiber recycled aggregate concrete using response surface methodology and machine learning. *Buildings*, ۱۵(۲۰), ۳۷۰۹.
۱۲. de Lima, S. A., et al. (۲۰۲۴). Global trends in construction and demolition waste management. *Waste Management & Research*, ۴۲(۵), ۳۹۱-۴۰۷.
۱۳. Devi, M., et al. (۲۰۲۰). Superplasticizers in self-compacting concrete: A review. *Construction and Building Materials*, ۲۵۴, ۱۱۹۳۵۷.

۱۴. Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (۲۰۰۷). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, ۳۷(۵), ۷۳۵-۷۴۲.
۱۵. Evangelista, L., & De Brito, J. (۲۰۱۴). Concrete with fine recycled aggregates: A review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, ۱۸(۲), ۱۲۹-۱۷۲.
۱۶. Fang, S., et al. (۲۰۲۳). High-volume fly ash in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, ۱۷۵, ۱۰۷۳۶۶.
۱۷. González-Taboada, I., et al. (۲۰۱۷). Influence of recycled aggregates on the fresh properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, ۱۵۰, ۳۶-۴۵.
۱۸. Guo, S., et al. (۲۰۲۵). Shear performance degradation of fiber-reinforced recycled aggregate concrete beams under salt freeze-thaw cycles. *Materials (Basel)*, ۱۸(۱), ۱۵۷.
۱۹. Helsing, E., Brander, L., Martinsson, P. (۲۰۲۵). Durability of concrete with recycled aggregate. *Nordic Concrete Research*, ۷۰(۱), ۶۹-۸۹.
۲۰. Kisku, N., et al. (۲۰۱۷). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, ۱۳۱, ۷۲۱-۷۴۰.
۲۱. Koksai, F., et al. (۲۰۲۲). Polypropylene fiber reinforced concrete: Mechanical properties and durability. *Construction and Building Materials*, ۳۲۵, ۱۲۶۸۰۲.
۲۲. Li, F., Jin, S., Cheng, P., Wang, Z., & Yang, Z. (۲۰۲۴). Study on mechanical properties and carbon emission analysis of polypropylene fiber-reinforced brick aggregate concrete. *Polymers*, ۱۶(۲۴), ۳۵۳۵.
۲۳. Li, X., et al. (۲۰۲۳). Recycled aggregates in sustainable concrete: A review of recent advances. *Journal of Building Engineering*, ۶۷, ۱۰۵۹۹۴.
۲۴. Maafi, N., et al. (۲۰۲۵). Polypropylene fibers in recycled aggregate concrete for crack control. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ۳۷(۲), ۰۴۰۲۴۲۸۷.
۲۵. Malazdrewicz, R., & Adam Ostrowski, K. (۲۰۲۳). Mechanical properties of recycled aggregate self-compacting concrete: A review. *Construction and Building Materials*, ۳۸۲, ۱۳۱۴۲۰.
۲۶. Nazeer, M., et al. (۲۰۲۳). Fly ash and silica fume in pervious concrete: Microstructure and durability. *Construction and Building Materials*, ۳۸۴, ۱۳۱۵۳۲.
۲۷. Neelamegam, N., & Muthusubramanian, M. (۲۰۲۳). Global review of construction and demolition waste recycling practices. *Waste Management & Research*, ۴۱(۸), ۱۲۵۹-۱۲۷۳.
۲۸. Nepomuceno, M. C. S., et al. (۲۰۱۶). Methodology for mix design of self-compacting concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, ۱۲۴, ۶۳۲-۶۴۴.
۲۹. Okamura, H. (۱۹۹۷). Self-compacting high-performance concrete. *Concrete International*, ۱۹(۷), ۵۰-۵۴.
۳۰. Okamura, H., & Ozawa, K. (۱۹۹۶). Self-compacting concrete: Development, present use and future. *1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, ۱-۱۲.
۳۱. Padmini, A. K., et al. (۲۰۰۹). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, ۲۳(۲), ۸۲۹-۸۳۶.
۳۲. Prasanthi, P., Rayabharapu, V. K., Krishna Rao, S., Supraja, A., & Vamshi, P. (۲۰۲۴). Mechanical performance and CO₂ footprint analysis: Recycled aggregate polypropylene geopolymer concrete compared with conventional concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, ۱۳۸۸(۱), ۰۱۲۰۲۴.
۳۳. Ramalingam, V., Shainsha, J., Harshitha, M., & Ramadoss, O. (۲۰۲۴). Study on the mechanical property, water absorption, and acid resistance of steel and polypropylene hybrid fiber reinforced recycled aggregate concrete. *Građevinski materijali i konstrukcije*, ۶۷(۲), ۶۹-۸۱.
۳۴. Revilla-Cuesta, V., et al. (۲۰۲۰). Self-compacting concrete with recycled aggregates: A review. *Construction and Building Materials*, ۲۶۲, ۱۲۰۸۳۴.
۳۵. Revilla-Cuesta, V., et al. (۲۰۲۱a). Fresh properties of self-compacting concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, ۲۸۰, ۱۲۲۴۳۶.
۳۶. Revilla-Cuesta, V., et al. (۲۰۲۱b). Mechanical behavior of self-compacting concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, ۲۹۶, ۱۲۳۷۳۱.
۳۷. Revilla-Cuesta, V., et al. (۲۰۲۴). Multi-dimensional modeling of green self-compacting concrete with recycled aggregate through response surface methodology. *Journal of Environmental Management*, ۳۷۱, ۱۲۳۴۵۶.
۳۸. Salgado, R. A., & Silva, M. A. (۲۰۲۲). Microstructure and properties of recycled aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*, ۳۴۱, ۱۲۷۹۱۳.

۳۹. Santos, S. A., et al. (۲۰۱۹). Durability of recycled aggregate self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, ۲۱۲, ۱۹۰-۲۰۰.
۴۰. ScienceDirect. (۲۰۲۵). Eco-efficient roller-compacted concrete with recycled aggregates and fiber reinforcement. *Journal of Building Engineering*, ۹۲, ۱۰۹۸۴۵.
۴۱. Silva, R. V., et al. (۲۰۱۶). Comparative study of mechanical properties of natural and recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, ۱۲۷, ۴۴-۵۵.
۴۲. Tefa, L., et al. (۲۰۲۲). Construction and demolition waste: Global generation and recycling. *Waste Management*, ۱۵۲, ۶۷-۸۲.
۴۳. Tuisk, T., Ilomets, S., Hain, T., Kalbus, J., & Kalamees, T. (۲۰۲۴). Rheology, strength, and durability of concrete and mortar made of recycled calcium silicate masonry. *Materials*, ۱۷(۱۲), ۲۷۹۰.
۴۴. Ulucan, M. (۲۰۲۴). From waste to sustainable production: Experimental design and optimization of sustainable concrete using response surface methodology and life cycle assessment. *Journal of Building Engineering*, ۹۲, ۱۰۹۹۳۵.
۴۵. Wang, J., Liang, J., Li, Y., & Hou, W. (۲۰۲۴). Tensile mechanical and stress-strain behavior of recycling polypropylene fiber recycled coarse aggregate concrete. *Buildings*, ۱۴(۴), ۱۱۱۶.
۴۶. Zhan, B., et al. (۲۰۲۲). Interfacial transition zone in recycled aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*, ۳۴۱, ۱۲۷۹۱۳.
۴۷. Zhang, Q., Feng, X., Chen, X., & Lu, K. (۲۰۲۰). Mix design for recycled aggregate pervious concrete based on response surface methodology. *Construction and Building Materials*, ۲۵۹, ۱۱۹۷۷۶.
۴۸. Zhang, Y., et al. (۲۰۲۳). Recycling of construction and demolition waste: A global perspective. *Waste Management*, ۱۶۷, ۷۸-۹۲.
۴۹. Zhu, L., et al. (۲۰۲۱). Global CO₂ emissions from cement production: Trends and mitigation. *Cement and Concrete Research*, ۱۵۰, ۱۰۶۶۰۸.