

تأثیر خاکستر باگاس و الیاف پلی پروپیلن بر عملکرد مکانیکی بتن و پیش بینی آن با یادگیری ماشین

دانیال نصر* (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران
رضوان باباگلی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران
نادر دهاقین، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران

چکیده

در این پژوهش از الیاف پلی پروپیلن با مقادیر (۰، ۱، ۳ و ۵ درصد) و خاکستر باگاس با مقادیر (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) جایگزین سیمان و از فوق روان کننده به میزان ۲/۵ درصد مواد سیمانی استفاده شد. همچنین مقاومت و دوام بتن حاوی افزودنی های فوق در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، این پژوهش به بررسی کاربرد مدل های یادگیری ماشین، شامل Cat Boost، Li ght GBM، و یک مدل ترکیبی Ensemble، برای پیش بینی مقاومت فشاری و خمشی بتن مسلح به الیاف و باگاس اختصاص دارد. نتایج به دست آمده نشان داد که در صورت استفاده از الیاف پلی پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن به صورت هم زمان، طرح (CP-B₂₀) یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می تواند بهترین عملکرد را از لحاظ مقاومت فشاری به میزان ۴۱/۷ مگاپاسکال در برابر مقاومت فشاری طرح شاهد به میزان ۳۲ مگاپاسکال، مقاومت خمشی به میزان ۱۴/۹ مگاپاسکال در برابر مقاومت خمشی طرح شاهد به میزان ۵ مگاپاسکال، جذب آب به میزان ۰/۹ درصد در برابر جذب آب طرح شاهد به میزان ۵ درصد و نفوذپذیری به میزان ۳۲۰ کلوپ در برابر نفوذپذیری طرح شاهد به میزان ۳۱۴۹ کلوپ، در میان طرح های مورد آزمایش داشته باشد. نتایج نشان داد که مدل Ensemble با R² معادل ۰/۸۵-۰/۹۰ برای مقاومت فشاری و ۰/۹۲ برای مقاومت خمشی، و RMSE به ترتیب ۱/۵۰-۲/۰۰ MPa و ۰/۶۵-۱/۱۰ MPa، دقت قابل توجهی ارائه می دهد.

واژگان کلیدی: ملات، ژل میکروسیلیس، پودر سرامیک ضایعاتی، مقاومت مکانیکی، دوام بتن.

۱. مقدمه

بحران انرژی و کمبود مواد اولیه، پژوهش گران این عرصه را به اندیشیدن راه کارهایی در جهت مصرف بهینه انرژی و مواد اولیه، واداشته است. در صنعت ساختمان، یکی از پرکاربردترین مصالح، سیمان است که انرژی زیادی صرف تولید آن می گردد. یکی از راه هایی که به صرفه جویی در مصرف انرژی در صنعت ساختمان منتهی می گردد، جایگزین نمودن سیمان با مصالحی نظیر پوزولان ها با خواص هیدرولیکی و خاصیت سیمانی ثانویه می باشد. به علاوه، استفاده از پوزولان ها بسیاری از خواص مهندسی و پایایی بتن های سخت شده را نیز بهبود می بخشد و سبب صرفه جویی در مصرف مواد اولیه ای نظیر آهک که در تولید سیمان به مقدار زیادی مصرف می شود نیز می گردد. نیاز روز افزون به سیمان و کاربرد آن در مناطق مختلف که باید دارای خصوصیات منحصر به فردی باشد و صرفه جویی در مصرف انرژی، باعث لزوم بررسی و تحقیق در مواد افزودنی و جایگزینی آن با سیمان می شود [۱].

* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

d.nasr13@gmail.com

در گذشته، پوزولان طبیعی در محصولات سیمانی و بتنی مورد استفاده قرار می‌گرفت. امروزه نیز مواد افزودنی معدنی، جایگاه ویژه‌ای در صنعت بتن پیدا کرده است و بخشی از بتن و یا مواد سیمانی که به مصرف می‌رسد، حاوی پوزولان طبیعی و مصنوعی است. کشور ما نیز با وجود منابع پوزولان طبیعی و همچنین تولید پوزولان‌های مصنوعی، پتانسیل بالایی برای تولید بتن‌های پوزولانی دارد. برای توسعه‌ی این صنعت مهم، نیاز به همکاری همه‌جانبه‌ی صنایع و پژوهش‌گران می‌باشد. صنعت بتن به سیمان پرتلند به‌عنوان ماده‌ی چسباننده وابسته است. تولید سیمان پرتلند با مشکلاتی همراه می‌باشد؛ مانند مصرف سنگ آهک، مصرف سوخت‌های فسیلی، هزینه‌ی نسبتاً بالای تولید، افزایش تولید دی‌اکسید کربن، آلودگی محیط زیست. با توجه به این موارد، دانشمندان در جستجوی یافتن جایگزینی برای سیمان می‌باشند تا ضمن کاهش مصرف سیمان، خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشند. از جمله‌ی این مواد جایگزین، پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی می‌باشند. بسیاری از خواص بتن، بر اثر استفاده از مواد پوزولانی بهبود می‌یابد. بعضی از این آثار ناشی از خواص فیزیکی، شامل ریز بودن و شکل ذرات و بقیه ناشی از فعل و انفعالات شیمیایی پوزولان با سیمان است. رفتار بتن تازه و درجه‌ی هیدراتاسیون سیمان پرتلند را می‌توان از خواص فیزیکی دانست که به اندازه‌ی ذرات پوزولان وابسته است. مقاومت و نفوذپذیری بتن سخت‌شده، مقاومت در مقابل بروز ترک خوردگی حرارتی، واکنش قلیایی دانه‌ها و خرابی سولفاتی از خواص مهمی است که از فعل و انفعالات شیمیایی پوزولان با سیمان ناشی می‌شود [۲].

استفاده‌ی وسیع از پوزولان طبیعی به عنوان جایگزین سیمان در کاربردهای مختلف، به دلیل صرفه‌ی اقتصادی، کاهش حرارت‌زایی بتن، کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت شیمیایی است. هر چند ممکن است کاهش مقاومت در سنین اولیه را در پی داشته باشد. موضوع دیگری که در سال‌های اخیر ذهن محققان این عرصه را به خود مشغول کرده است، بحث پایایی بتن‌ها در شرایط سخت محیطی می‌باشد. سازه‌های ساخته‌شده با بتن معمولی، عموماً دارای عملکرد مناسبی در شرایط سخت محیطی و عوامل مهاجم نمی‌باشند. راهکار پیشنهادی، استفاده از سیمان‌های آمیخته است. امروزه، تولید سیمان‌های آمیخته با استفاده از پوزولان‌های مختلف بسیار گسترش پیدا کرده است. تحقیقات نشان می‌دهند که کارخانه‌های تولیدکننده‌ی سیمان، مسئول انتشار حدود ۷ درصد از کل دی‌اکسید کربن وارد شده به اتمسفر کره‌ی زمین می‌باشند. سیمان‌های آمیخته چندین دهه است که مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در جریان تولید سیمان، از مرحله‌ی استخراج سنگ آهک از معدن تا مرحله‌ی بسته‌بندی، میزان انرژی زیادی مصرف می‌گردد، که با استفاده از سیمان آمیخته می‌توان در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد و تولید گاز دی‌اکسید کربن را کاهش داد [۳].

پوزولان‌ها، مواد سیلیسی یا سیلیسی-آلومیناتی هستند که به خودی خود خاصیت سیمانی (چسبندگی) ندارند ولی پس از آسیاب شدن و وارد شدن به سیمان، در مجاورت رطوبت، با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی داده و ترکیباتی با موادسیمانی (ژل سیلیکاتی و...) به وجود می‌آورند. پوزولان‌ها انواع مختلفی داشته و به طور کلی به دو دسته‌ی طبیعی و مصنوعی طبقه‌بندی می‌گردند. تمام پوزولان‌های طبیعی غیر از خاک‌های دیاتومه، از سنگ‌ها و کانی‌های آتش‌فشانی سرچشمه گرفته‌اند [۴]. بر اساس تحقیقات انجام گرفته‌شده، پوزولان‌ها در آزمایش‌های فشاری دارای رفتار یکسانی می‌باشند؛ به طوری که با اضافه‌کردن مقداری مشخص از هر پوزولان در مخلوط، حداکثر مقاومت فشاری به دست می‌آید و بعد از آن با افزایش درصد پوزولان در مخلوط، مقدار مقاومت افت می‌کند. همچنین پوزولان‌ها می‌توانند آب‌انداختگی، جدایش و تورق در بتن تازه را کاهش داده و با همگن کردن مخلوط بتن باعث سهولت در پمپ کردن بتن گردند. به علاوه این‌که، پوزولان‌ها می‌توانند با هیدروکسید کلسیم موجود در سیمان ترکیب شوند و احتمال واکنش‌های قلیایی در بتن و یا تشکیل اترینگایت را بسیار کاهش دهند و باعث کاهش نفوذپذیری، بهبود مقاومت و افزایش دوام بتن سخت‌شده مخصوصاً در مقابل واکنش قلیایی-سنگدانه شود. رشد روزافزون صنعت ساخت‌وساز در ایران از یک طرف و نیاز به ساخت بتن‌هایی که بتوانند در مقابل محیط‌های مهاجم و شرایط نسبتاً عادی مقاومت و دوام کافی را دارا باشند از طرف دیگر، باعث می‌شود که جایگزینی پوزولانی هم‌چون خاکستر باگاس به جای بخشی از سیمان، نسبت به پوزولان‌هایی مانند میکروسیلیس و خاکستر بادی که یا کمیاب بوده و یا دارای هزینه‌ی بیش‌تری می‌باشند، اهمیت پیدا کند. هم‌چنین حضور الیاف در بتن، سبب کاهش انقباض و کنترل ترک‌های عمیق و سطحی در حجم نهایی بتن می‌گردد. لذا استفاده از الیافی هم‌چون پلی‌پروپیلن در بتن می‌تواند سبب بهبود مقاومت، دوام و کارایی آن گردد.

الیاف پلی پروپیلن نوعی الیاف تقویتی بتن است. یک ترکیب پلیمری از الیاف‌های پلاستیکی است که به عنوان یک تقویت کننده‌ی ثانویه در حجم نهایی بتن استفاده می‌شود. حضور الیاف پلی پروپیلن در بتن به کاهش انقباض و هم‌چنین کنترل ترک‌های عمیق و سطحی در حجم نهایی بتن پس از سخت‌شدن کمک می‌کند. به کارگیری الیاف پلی پروپیلن در بتن هیچ تأثیری در نحوه‌ی ساختن آن ندارد و باعث تغییر در روش اختلاط مصالح مقدماتی بتن نمی‌شود. کاربرد عمده‌ی الیاف پلی پروپیلن در بتن، تقویت و مسلح کردن بتن از طریق افزایش مقاومت خمشی، کششی، برشی و سایش در بتن است؛ هم‌چنین این الیاف، جمع‌شدگی ناشی از تنش‌های حرارتی را نیز کاهش می‌دهد و وظیفه‌ی کنترل توسعه‌ی ترک‌های عرضی را نیز بر عهده دارد. الیاف پلی پروپیلن به عنوان ترک‌گیر بتن شناخته می‌شود. الیاف پلی پروپیلن به شکل مؤثر و کاملاً یکپارچه در حجم کلی بتن توزیع می‌شود و این حضور همگن در سراسر ساختار بتن مانع از گسترش ترک‌ها به واسطه‌ی از هم گسیختگی سنگدانه‌ها و ملات سیمان خواهد شد [۵].

از طرفی، در کنار مزیت‌های استفاده از الیاف پلی پروپیلن در بتن، معایب استفاده از آن در مخلوط بتنی شامل: ۱- شکننده بودن؛ ۲- هادی الکتریکی؛ ۳- کرنش کم در شکست و ۴- قیمت بالا می‌باشد [۵].، از خاکستر باگاس به منظور رفع این مشکلات و کاهش مصرف سیمان در بتن به دلیل اثرات زیست محیطی بسیار مخربی که دارد، استفاده خواهد شد.

باگاس محصول فرعی فرآیند تولید شکر از نیشکر است. وقتی ساقه‌های نیشکر خرد می‌شوند، ماده‌ی خشک و کاغذی به نام باگاس باقی می‌ماند. البته ماده‌ی مشابهی به نام باگاس آگاو وجود دارد که از گیاه آگاو به دست می‌آید. باگاس نیشکر در تولید کاغذ و خمیر کاغذ، مصالح ساختمانی و سوخت استفاده می‌شود. سوختی که سازگار با محیط زیست است و در تولید انرژی، گرما و برق قابل استفاده است. استفاده از ضایعات کشاورزی و صنعتی هم‌چون خاکستر باگاس در بتن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، علاوه بر کاهش هزینه‌های بتن و بهبود خواص آن، با هدف کاهش آلودگی محیط زیست در دنیا انجام می‌گیرد [۶]. باگاس علی‌رغم استفاده‌های زیاد در صنعت، مقدار زیادی از آن به صورت ضایعات کشاورزی باقی می‌ماند که علاوه بر آلودگی محیط زیست، هزینه‌های زیادی را جهت سامان‌دهی به این حجم انبوه باگاس، متحمل می‌کند [۷].

بتن به عنوان مصالح ساختمانی مرکب و با کاربرد بسیار زیاد در سازه‌ها محسوب می‌شود، لذا خواص مکانیکی و دوام آن همواره مورد توجه مهندسین عمران می‌باشد. در تحقیقات مختلف برای بهبود خواص بتن و هم‌چنین کاهش مصرف سیمان به منظور کاهش هزینه‌ها، کاهش انرژی و کاهش آلاینده‌های زیست محیطی ناشی از تولید سیمان، از مواد پوزولانی مختلف مانند میکروسیلیس، خاکستر بادی و دیگر سرباره‌های صنعتی استفاده شده است. در این تحقیق به طور خاص از خاکستر باگاس با هدف کاهش آلودگی محیط زیست ناشی از تولید سیمان به واسطه‌ی انتشار گاز دی‌اکسید کربن و از الیاف پلی پروپیلن با هدف کاهش انقباض و هم‌چنین کنترل ترک‌های عمیق و سطحی در حجم نهایی بتن پس از سخت‌شدن در جهت بهبود خواص مکانیکی و دوام مخلوط بتنی، استفاده شده است.

همتی و همکاران در سال ۱۴۰۲، در پژوهشی تأثیر طول و ترکیب الیاف بر مقاومت فشاری و خمشی بتن را بررسی کردند. در این مقاله، ۱۵ طرح اختلاط بتن در قالب ۹۰ نمونه‌ی مکعبی به ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و ۴۲ نمونه به ابعاد $15 \times 15 \times 60$ سانتی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت خمشی ساخته شده است. ۳ طرح اختلاط به عنوان مرجع با ۳ نسبت آب به سیمان (۰/۲۹، ۰/۳۴ و ۰/۳۹) بدون الیاف و با الیاف با ۳ طول مختلف الیاف پلی پروپیلن به ترتیب با طول‌های (۶، ۱۲ و ۱۸) میلی‌متر ساخته شد. یک طرح اختلاط با الیاف فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی‌متر و نیز طرح اختلاطی دیگر با ترکیب الیاف فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی‌متر و الیاف پلی پروپیلن به طول ۱۲ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفتند. بالاترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه مربوط به نمونه‌های دارای الیاف ترکیبی با مقاومت ۷۶/۱۶ مگاپاسکال بود که ۱۶/۳ درصد نسبت به نمونه‌ی مرجع افزایش داشت. نمونه‌ی بتن دارای الیاف فلزی با مقاومت خمشی ۱۶/۱ مگاپاسکال، بالاترین مقاومت را در بین تمامی طرح‌های اختلاط بتن این تحقیق داشته و نسبت به نمونه‌ی بدون الیاف، ۶۰ درصد افزایش مقاومت خمشی را نشان می‌دهد [۱].

مختاری و فاطمیان در سال ۱۴۰۲، در پژوهشی مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر الیاف پلی پروپیلن و میکروسیلیس بر خصوصیات مکانیکی بتن را انجام دادند. در این مقاله با هدف بررسی تأثیر به کارگیری میکروسیلیس با درصدهای ۳، ۵ و ۷، الیاف پلی پروپیلن با درصدهای ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۸ و نیز مخلوط هم‌زمان این دو افزودنی بر روی مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن، ۴۰ نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته شد.

نتایج نشان داد که در آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه، نمونه‌های دارای میکروسیلیس افزایش ۳۷ درصدی، نمونه‌های دارای الیاف پلی‌پروپیلن افزایش ۱۷ درصدی و نمونه‌های دارای مخلوط هم‌زمان میکروسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن، افزایش ۲۶ درصدی نسبت به نمونه‌ی مرجع داشتند. هم‌چنین در آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه، نمونه‌های دارای مخلوط میکروسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن به ترتیب افزایش ۸ درصدی و ۶ درصدی نسبت به نمونه‌ی مرجع داشتند. در آزمایش مقاومت کششی، تمامی نمونه‌های ۷ روزه دارای مقاومت پایین‌تری در حدود ۹ درصد نسبت به نمونه‌ی مرجع بودند؛ در حالی‌که در نمونه‌های ۲۸ روزه شامل ۳ درصد میکروسیلیس و ۰/۴ درصد پلی‌پروپیلن، مقاومت کششی به میزان ۵ درصد نسبت به نمونه‌ی مرجع افزایش داشت. در نمونه‌های ۹۰ روزه نیز به طور میانگین افزایش ۸ درصدی مقاومت کششی حاصل گردید [۲].

موسوی و جواهری در سال ۱۴۰۲، در پژوهشی بررسی مقاومت فشاری و خمشی بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی‌وینیل الکل و پلی‌پروپیلن بر پایه‌ی رزین اپوکسی را انجام دادند. در این پژوهش به بررسی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن و پلی‌وینیل الکل در ساختار بتن پلیمری پرداخته‌شده و میزان مقاومت فشاری، خمشی و تنش-کرنش مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین نمونه‌های ساخته‌شده توسط دستگاه SEM، مورد ارزیابی واقع شدند. مطالعه بر روی ۴ گروه بتن پلیمری حاوی رزین اپوکسی ۱۲ درصد، با افزودن الیاف با درصدهای ۰/۵، ۱، ۲ و ۲/۵ نسبت به وزن رزین برای هر دو نوع الیاف پلی‌پروپیلن و پلی‌وینیل الکل، انجام گرفت. نمونه‌های ساخته‌شده در این پژوهش شامل نمونه‌ی ۵۰×۵۰ میلی‌متر مربوط به آزمایش مقاومت فشاری و تنش-کرنش و نمونه‌ی منشوری ۳۰۰×۵۰ میلی‌متر مربوط به آزمایش مقاومت خمشی می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل‌شده، هرچه میزان درصد الیاف پلی‌پروپیلن در بتن‌های پلیمری افزایش یابد، میزان مقاومت نیز افزایش پیدا می‌کند و روند صعودی را در مقایسه با بتن شاهد از خود نشان می‌دهد. اما در مقابل هرچه میزان درصد الیاف پلی‌وینیل الکل افزایش یابد، مقاومت با روندی نزولی همراه می‌شود. بنابراین از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که درصد بهینه برای پلی‌وینیل الکل در بتن پلیمری، ۰/۵ درصد وزنی رزین و برای الیاف پلی‌پروپیلن ۲/۵ درصد می‌باشد. هم‌چنین نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که به طور کلی هر دو الیاف مورد استفاده پس از تحمل بارگذاری کششی، از ماتریس پلیمری جدا نشده و پیوندی قوی با فاز پلیمری برقرار کرده است، اما به دلیل پراکندگی مناسب الیاف پلی‌پروپیلن در بتن پلیمری و بالطبع ایجاد پیوند مطلوب با رزین، خصوصیات مکانیکی بتن به طور چشم‌گیری بهبود می‌یابد [۳].

ماگلاد و همکاران در سال ۲۰۲۳، در پژوهشی خواص مهندسی بتن با مقاومت بالا حاوی باگاس نیشکر و خاکستر ساقه‌ی ذرت را مورد بررسی قرار دادند. کشورها از مشکلات رشد خاکستر پسماند کشاورزی رنج می‌برند. این مقاله‌ی تحقیقاتی استفاده از خاکستر پسماند کشاورزی را به عنوان یک جایگزین جزئی برای سیمان برای تولید بتن با مقاومت بالا مورد مطالعه قرار می‌دهد. این مقاله هم‌چنین تأثیر استفاده از خاکستر باگاس نیشکر و خاکستر ساقه‌ی ذرت را بر روی خواص بتن با مقاومت بالا بررسی می‌کند. بقایای فرآیند احتراق ضایعات کشاورزی به عنوان یک ماده‌ی پوزولانی که به عنوان یک جایگزین جزئی برای سیمان برای تولید بتن با مقاومت فوق‌العاده بالا وارد می‌شود، استفاده می‌شود. نرخ جایگزینی جرمی سیمان توسط خاکستر باگاس نیشکر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد بود، در حالی که نرخ جرمی سیمان توسط خاکستر ساقه‌ی ذرت، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد بود. اثرات خاکستر تفاله نیشکر و خاکستر ساقه‌ی ذرت بر کارایی، استحکام فشاری، استحکام کششی شکافی، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته بر خواص بتن با مقاومت فوق‌العاده بالا مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، اثرات خاکستر تفاله نیشکر و خاکستر ساقه‌ی ذرت بر مقاومت به نفوذ یون کلرید و جذب آب و نفوذپذیری در بتن با مقاومت فوق‌العاده بالا مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نتایج چشم‌گیری را نشان داد. یعنی تولید بتن با مقاومت فوق‌العاده بالا با مقاومت فشاری و خمشی مربوطه بیش از ۲۰۵ و ۲۷ مگاپاسکال زمانی امکان‌پذیر است که جایگزینی ۲۴ درصد جرم سیمان توسط خاکستر پسماند کشاورزی (۴ درصد ذرت و ۲۰ درصد باگاس) در سن تست ۲۸ روزه انجام شود. کم‌ترین نفوذپذیری با جایگزینی ۳۸ درصد جرم سیمان توسط خاکستر پسماند کشاورزی (۸ درصد ذرت و ۳۰ درصد باگاس) به ترتیب ۱۴۰ کلومب و ۰/۹۵ سانتی‌متر بر ثانیه برای نفوذپذیری کلرید و آب به دست می‌آید [۸].

اکبر و همکاران در سال ۲۰۲۱، در پژوهشی ملات ژئوپلیمری مهندسی‌شده مبتنی بر خاکستر باگاس نیشکر حاوی الیاف پروپیلن را مورد بررسی قرار دادند. اخیراً تولید ژئوپلیمر سبک وزن از ضایعات، مورد توجه جدی برای ساخت‌وساز ساختمان‌های پایدار و سبز قرار گرفته

است. اما خمش کم‌تر و استحکام کششی کاربرد گسترده‌تر آن را در صنعت ساختمان محدود می‌کند. این مطالعه به منظور تهیه‌ی خاکستر باگاس نیشکر مبتنی بر ژئوپلیمر تقویت‌شده با الیاف پلی‌پروپیلن انجام شد. خواص فیزیکی و مکانیکی ژئوپلیمرها با درصد‌های مختلف الیاف پلی‌پروپیلن از طریق آزمایش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و به تفصیل مورد بحث قرار گرفت. افزودن الیاف پلی‌پروپیلن منجر به افزایش استحکام خمشی و کششی شد. نتایج نشان می‌دهد که با محدود کردن محتوای الیاف پلی‌پروپیلن به ۱ درصد، نه تنها خواص خمشی را بهبود می‌بخشد، بلکه با ارائه‌ی ریزساختار متراکم‌تر، مقاومت فشاری را نیز افزایش می‌دهد. این مطالعه نتیجه‌گیری می‌کند که استفاده از کامپوزیت خاکستر باگاس تقویت‌شده با الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند راه‌های جایگزینی برای دستیابی به پایداری با استفاده از زباله‌هایی که عمدتاً باعث تخریب محیط‌زیست در طول دفن زباله می‌شوند، فراهم کند [۹].

کومار و گوپتا در سال ۲۰۲۱، در پژوهشی بررسی اثر خاکستر باگاس، الیاف فولادی قلاب‌دار و الیاف شیشه بر خواص مکانیکی بتن را انجام دادند. در کار حاضر، بررسی‌هایی برای بررسی اثر بر خواص مکانیکی بتن با جایگزینی جزیی سیمان با خاکستر باگاس و گنجانیدن الیاف فولادی قلاب‌دار و الیاف شیشه در جایگزینی بهینه‌ی خاکستر باگاس در بتن انجام شده است. نمونه‌های بتن خاکستر باگاس برای عیار M30 با درصد جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ریخته‌گری شدند. نتایج آزمایش نشان داده است که خواص مکانیکی تا ۱۰ درصد جایگزینی BA بهبود یافته و در نتیجه شروع به کاهش کرده است. افزایش بهینه‌ی مقاومت کششی، خمشی، فشاری و شکافی به ترتیب ۶/۵، ۱۳/۰۹ و ۸/۱۳ درصد برای نمونه‌ی BA10 پس از ۲۸ روز تعیین شد. با افزودن الیاف فولادی قلاب‌دار، استحکام بهینه برای نمونه‌ی BASF-C با افزایش مقاومت کششی، خمشی، فشاری و شکافی به ترتیب ۸/۸۹، ۱۸/۴۴ و ۱۸/۸ درصد به دست می‌آید. با این حال، حداکثر استحکام با الیاف شیشه برای BAGF-C با افزایش مقاومت کششی، خمشی، فشاری و شکافی به ترتیب ۸/۱۲، ۱۴/۲۹ و ۱۰/۰۳ درصد به دست آمد. کارایی با افزایش نسبت خاکستر باگاس در مخلوط کاهش یافت. بتن خاکستر باگاس را می‌توان با نسبت بهینه‌ی ۱ درصد الیاف فولادی یا ۱/۵ درصد الیاف شیشه در جایگزینی ۱۰ درصد خاکستر باگاس توسعه داد [۱۰].

دیهان و همکاران در سال ۲۰۲۱، در پژوهشی ارزیابی خواص مکانیکی بتن تولید شده با خاکستر بادی، خاکستر باگاس و الیاف موز را بررسی کردند. بتن به دلیل خواص مقاومتی و هم‌چنین دوامش، پویاترین ماده‌ی مهندسی در صنعت ساختمان است. مصرف مواد خام نه تنها منابع طبیعی را تحلیل می‌برد، بلکه باعث افزایش مواد سمی در محیط زیست توسط صنایع ساختمانی می‌شود. محصولات جایگزین تا حدودی محیط زیست و منابع طبیعی را نجات می‌دهند. در همین زمینه، برخی از ترکیبات معمول مخلوط بتن با ضایعات صنعتی/طبیعی مانند خاکستر بادی، خاکستر باگاس نیشکر و الیاف موز جایگزین می‌شود. نمونه‌ها با ترکیبات مختلف با استفاده از درصد جایگزینی متفاوت سیمان و ماسه تهیه شدند. بنابراین، مخلوط بتن با استفاده از خاکستر بادی (جایگزینی ۲۰ درصد سیمان) و جایگزینی جزیی ماسه با ضایعات صنعتی یعنی خاکستر باگاس نیشکر (جایگزینی ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد ماسه) با افزودن الیاف موز (۰، ۲/۵ و ۵ درصد) ایجاد می‌شود. نمونه‌ها با مخلوط بتن استاندارد تحت مقاومت فشاری مشخصه و مقاومت خمشی ارزیابی و مقایسه شدند. جایگزینی جزیی با ۱۰ درصد خاکستر باگاس بهترین ترکیب است که خواص مکانیکی بهتری را به همراه دارد [۱۱].

با توجه به بیان مسأله و پیشینه‌ی تحقیق حاضر، تحقیقات گسترده‌ای در جهت تولید بتن دوست‌دار محیط زیست (بتن سبز) صورت گرفته است. در این تحقیقات از موادی هم‌چون سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی، دوده‌ی سیلیس، میکروسیلیس، خاکستر باگاس، الیاف فولاد، الیاف کربن، الیاف شیشه، الیاف پلی‌پروپیلن و... استفاده شده است، اما به طور خاص بررسی اثر استفاده‌ی هم‌زمان از الیاف پلی‌پروپیلن به منظور کنترل ترک‌های سطحی و عمقی بتن و هم‌چنین خاکستر باگاس به منظور کاهش آلودگی محیط زیست ناشی از تولید سیمان صورت نپذیرفته است. لذا در پژوهش حاضر به این مهم پرداخته شده است. بنابراین، با وجود پتانسیل بالای پوزولان‌ها مانند خاکستر باگاس و الیاف پلی‌پروپیلن در کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید سیمان و بهبود خواص مکانیکی بتن [۱۲، ۱]، بهینه‌سازی ترکیب‌ها و پیش‌بینی دقیق خواص همچنان چالش برانگیز است. این پژوهش با بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین (LightGBM، CatBoost، Ensemble) به تحلیل داده‌های مقاومت فشاری و خمشی می‌پردازد تا رویکردی داده‌محور برای طراحی بتن سبز ارائه دهد. هدف، توسعه مدل‌هایی با دقت بالا برای پیش‌بینی رفتار بتن مسلح به فیبر و بگاس در شرایط مختلف پخت (۲۸ و ۹۰ روز) است.

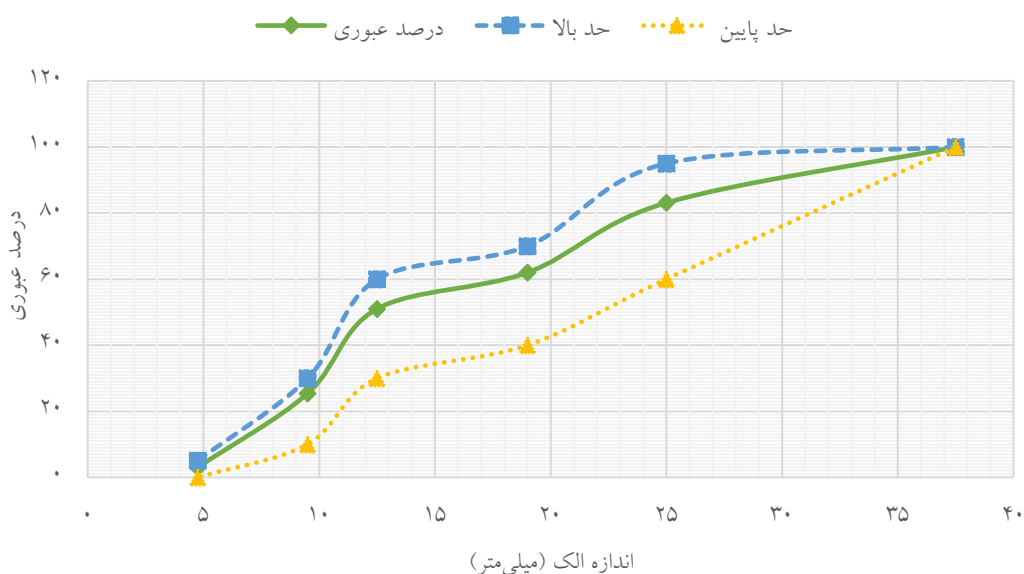
۲. مصالح و روش تحقیق

۱,۲. شن

شن مورد استفاده در این تحقیق از نوع شکسته است و در ساخت مخلوط از ۲ تیپ سنگدانه ی ۵-۱۲ و ۱۲-۱۹ استفاده شده است. در جدول ۱ و شکل ۱، مشخصات سنگدانه ها و منحنی دانه بندی شن آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات سنگدانه ها

قطر الک	درصد عبوری	حد بالا	حد پایین	وزن مخصوص ظاهری	وزن مخصوص واقعی
۳۷/۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱/۵۵	۲/۸۰
۲۵	۸۳/۱۰	۹۵	۶۰		
۱۹	۶۲	۷۰	۴۰		
۱۲/۵۰	۵۱	۶۰	۳۰		
۹/۵۰	۲۵/۴۰	۳۰	۱۰		
۴/۷۵	۳	۵	۰		



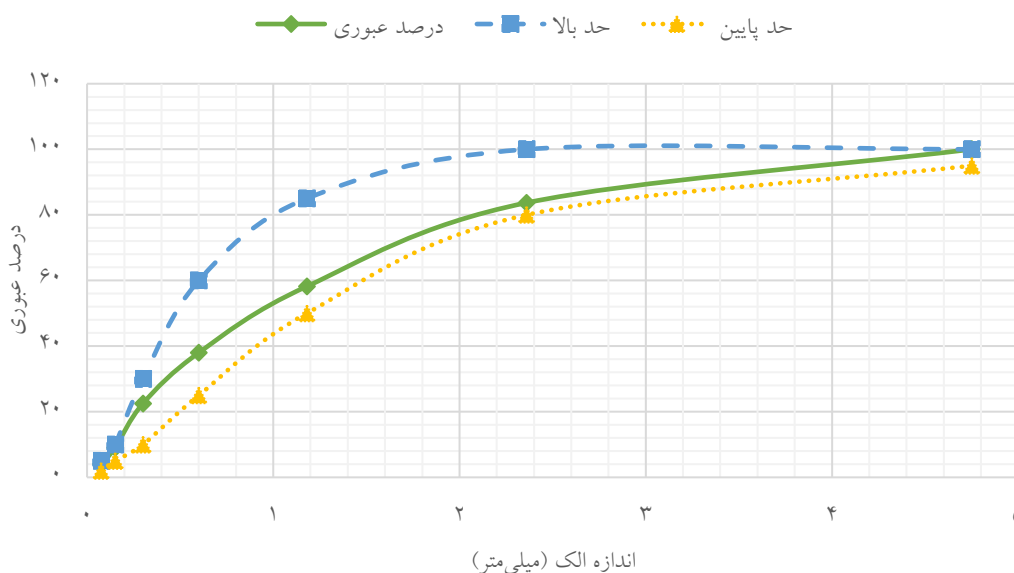
شکل ۱. منحنی دانه بندی شن

۲,۲. ماسه

ماسه ی مورد استفاده در این تحقیق از نوع شکسته، دارای حداکثر اندازه ی ۵ میلی متر و میزان جذب آب ۱/۱۵ درصد می باشد که در جدول ۲ و شکل ۲، دانه بندی ماسه و منحنی دانه بندی ماسه آورده شده است.

جدول ۲. دانه‌بندی ماسه

قطر الک	درصد عبوری	حد بالا	حد پایین	وزن مخصوص ظاهری	وزن مخصوص واقعی
۴/۷۵	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۲/۷۱	۲/۶۳
۲/۳۶	۸۳/۷۰	۱۰۰	۸۰		
۱/۱۸	۵۸/۲۰	۸۵	۵۰		
۰/۶۰	۳۸	۶۰	۲۵		
۰/۳۰	۲۲/۵۰	۳۰	۱۰		
۰/۱۵	۹	۱۰	۵		
۰/۰۷۵	۴	۵	۲		



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه

۳.۲. سیمان

سیمان مورد استفاده در این تحقیق، سیمان تیپ ۲ از کارخانه‌ی سیمان اردستان می‌باشد. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مصرفی در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده است.

جدول ۳. مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۲ اردستان (۳۸۹ ISI RI)

پارامتر شیمیایی	مقدار
Si O ₂	۲۲/۰۰ ± ۰/۴۰
Al ₂ O ₃	۵/۰۰ ± ۰/۳۰

$3/82 \pm 0/20$	Fe ₂ O ₃
$64/00 \pm 0/50$	CaO
$1/90 \pm 0/20$	MgO
$1/50 \pm 0/20$	SO ₃
$0/49 \pm 0/20$	K ₂ O
$0/25 \pm 0/15$	Na ₂ O
$0/019 \pm 0/001$	Cl
$1/00 \pm 0/20$	L.O.I
$91/00 \pm 1/00$	L.S.F
$6/50 \pm 1/00$	C ₃ A
$1/20 \pm 0/20$	CaO Free

جدول ۴. مشخصات فیزیکی سیمان تیپ ۲ اردستان (ISIRI ۳۸۹)

پارامتر فیزیکی	بلین (Cm/gr)	گیرش اولیه (دقیقه)	گیرش نهایی (دقیقه)	مقاومت فشاری (Kg/Cm ²)			انقباض اتوکلاو (%)
				۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	
مقدار	۳۰۰۰±۵۰	۹۵±۵	۱۵۰±۱۰	≥۱۷۰	≥۲۷۵	≥۳۷۰	۰/۱۴±

۳.۲. الیاف پلی پروپیلن

مشخصات فیزیکی، مکانیکی و نمونه‌ی الیاف مصرفی در تحقیق حاضر در جدول ۵ و شکل ۳ آورده شده است. مشخصات فیزیکی ژل میکروسلیس الیاف‌دار در جدول ۵ آمده است. شکل ۲ ژل میکروسلیس مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۵. مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف پلی پروپیلن

پارامتر فیزیکی	جنس	طول	ضخامت	رنگ	وزن مخصوص
مقدار	PP (پلی پروپیلن)	۶ تا ۱۸ (mm)	۳ تا ۶ (Denier)	سفید	۰/۹۱ (gr/Cm ³)
مقاومت کششی	میزان ازدیاد طول	دمای ذوب			



شکل ۳. نمونه‌ی الیاف پلی پروپیلن مصرفی

۴.۲. خاکستر باگاس

باگاس: ۴۹ درصد رطوبت، ۴۸ درصد فیبر و ۲/۳۰ درصد قند دارد که این مقدار قند بسیار مهم است؛ چراکه باعث می‌شود پروسه‌ی تخمیر به راحتی آغاز شود. قدرت جذب آب باگاس بسیار بالاست. نیتروژن باگاس کم و تقریباً برابر ۰/۱۷ درصد است. از نظر ظاهری شبیه تراشه‌های ریز چوب است که رنگ باگاس تازه زرد مایل به سفید است ولی پس از خشک‌شدن به زرد متمایل به قهوه‌ای می‌گراید. باگاس بوی مخصوص به خود را دارد که بویی شبیه به بوی ملاس تخمیر شده دارد. میزان عناصر موجود در آن متفاوت بوده و بستگی به گونه‌های مختلف نیشکر، رشد سنی نیشکر، نحوه‌ی برداشت آن و بالاخره میزان بازیابی و راندمان عصاره‌گیری در آسیاب‌ها دارد [۱۳]. در تحقیق حاضر، افزودنی باگاس مصرفی در ۲ حالت خشک سوخته‌نشده و خشک خاکسترشده در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. نمونه‌ی افزودنی باگاس مصرفی (خشک سوخته‌نشده و خشک خاکسترشده)

۵.۲. آب

آب مصرفی در مخلوط باید عاری از هرگونه املاح، اسیدها، روغن‌ها و مواد آلی صدمه‌زننده به ساختار مخلوط باشد. در این راستا باید از تمیز و صاف بودن آب مصرفی در ساخت مخلوط اطمینان یافت در غیر این صورت آب‌های آلوده به مواد ذکر شده موجب صدمه‌زدن به مخلوط و یا آرماتورها خواهد شد. محدوده‌ی pH آب مصرفی در این تحقیق بین ۵ الی ۸/۵ بود.

۶.۲. فوق روان کننده

یکی از افزودنی‌های قدرتمند بتن، فوق روان کننده می‌باشد که بر پایه‌ی نفتالین سولفات است و در ساخت انواع بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش گیرش و ساخت بتن با کاهش نسبت سیمان و آب و افزایش سایر مقاومت‌های اولیه، فرموله می‌شود. طبق استانداردهای جهانی، افزودن فوق روان کننده‌ی بتن یا کاهش شدید آب اطلاق می‌شود یا این عمل بدون تغییر در اسلامپ و روانی، مقدار مخلوط آب را به اندازه‌ی چشم‌گیری کاهش می‌دهد یا میزان اسلامپ یا جریان روانی را افزایش می‌دهند. از خواص دیگر فوق روان کننده‌ی بتن در ایجاد خاصیت دیرگیری یا گیرش بتن و تغییر حالت بتن از حالت خمیری به سخت می‌توان تعریف کرد.

۷.۲. طرح اختلاط

در این پژوهش از الیاف پلی‌پروپیلن با مقادیر (۰، ۱، ۳ و ۵ درصد) و خاکستر باگاس با مقادیر (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) جایگزین درصد وزنی سیمان و از فوق روان کننده به میزان ۲/۵ درصد بایندر (مواد سیمانی) استفاده شده است. هم‌چنین مقاومت و دوام بتن سبب حاوی افزودنی‌های فوق در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه مورد بررسی قرار گرفت. باتوجه به مفروضات، در کل تعداد ۱۰۰ عدد نمونه ساخته شد و مورد آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، جذب آب و نفوذپذیری قرار گرفت. در جدول ۶، طرح اختلاط بتن سبب حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و خاکستر باگاس به همراه طرح شاهد آورده شده است.

جدول ۶. طرح اختلاط

طرح	آب kg/m ³	سیمان kg/m ³	ماسه kg/m ³	شن kg/m ³	الیاف پلی‌پروپیلن (%)	الیاف پلی‌پروپیلن kg/m ³	نسبت آب به مواد سیمانی	خاکستر باگاس kg/m ³ (%)	فوق روان کننده (%)
شاهد	۲۲۰/۵	۴۹۰	۸۷۷	۹۵۲	۰	۰	۰/۴۵	۰ (۰٪)	۲
CP _۱ B _۱	۲۲۰/۵	۴۳۶/۱	۸۷۷	۹۵۲	۱	۴/۹	۰/۴۵	۴۹ (۱۰٪)	۲
CP _۲ B _۱	۲۲۰/۵	۴۲۶/۳	۸۷۷	۹۵۲	۳	۱۴/۷	۰/۴۶	۴۹ (۱۰٪)	۲
CP _۳ B _۱	۲۲۰/۵	۴۱۶/۵	۸۷۷	۹۵۲	۵	۲۴/۵	۰/۴۷	۴۹ (۱۰٪)	۲
CP _۱ B _۲	۲۲۰/۵	۳۸۷/۱	۸۷۷	۹۵۲	۱	۴/۹	۰/۴۵	۹۸ (۲۰٪)	۲
CP _۲ B _۲	۲۲۰/۵	۳۷۷/۳	۸۷۷	۹۵۲	۳	۱۴/۷	۰/۴۶	۹۸ (۲۰٪)	۲
CP _۳ B _۲	۲۲۰/۵	۳۶۷/۵	۸۷۷	۹۵۲	۵	۲۴/۵	۰/۴۷	۹۸ (۲۰٪)	۲
CP _۱ B _۳	۲۲۰/۵	۳۳۸/۱	۸۷۷	۹۵۲	۱	۴/۹	۰/۴۵	۱۴۷ (۳۰٪)	۲
CP _۲ B _۳	۲۲۰/۵	۳۲۸/۳	۸۷۷	۹۵۲	۳	۱۴/۷	۰/۴۶	۱۴۷ (۳۰٪)	۲
CP _۳ B _۳	۲۲۰/۵	۳۱۸/۵	۸۷۷	۹۵۲	۵	۲۴/۵	۰/۴۷	۱۴۷ (۳۰٪)	۲

۲	۱۹۶ (۴۰٪)	۰/۴۵	۴/۹	۱	۹۵۲	۸۷۷	۲۸۹/۱	۲۲۰/۵	CP _۵ B _۴
۲	۱۹۶ (۴۰٪)	۰/۴۶	۱۴/۷	۳	۹۵۲	۸۷۷	۲۷۹/۳	۲۲۰/۵	CP _۳ B _۴
۲	۱۹۶ (۴۰٪)	۰/۴۷	۲۴/۵	۵	۹۵۲	۸۷۷	۲۶۹/۵	۲۲۰/۵	CP _۵ B _۴
۲	۲۴۵ (۵۰٪)	۰/۴۵	۴/۹	۱	۹۵۲	۸۷۷	۲۴۰/۱	۲۲۰/۵	CP _۵ B _۵
۲	۲۴۵ (۵۰٪)	۰/۴۶	۱۴/۷	۳	۹۵۲	۸۷۷	۲۳۰/۳	۲۲۰/۵	CP _۳ B _۵
۲	۲۴۵ (۵۰٪)	۰/۴۷	۲۴/۵	۵	۹۵۲	۸۷۷	۲۲۰/۵	۲۲۰/۵	CP _۵ B _۵

۸.۲. آماده سازی نمونه ها

ابتدا مقدار ماده‌ی مورد استفاده در هر طرح محاسبه و اندازه‌گیری می‌شود و سپس توسعه‌ی طرح آغاز می‌گردد. مواد خشک؛ ماسه و سیمان به مخلوط‌کن اضافه می‌گردد و به مدت ۱ دقیقه با هم مخلوط شد. سپس آب به آرامی به مخلوط‌کن اضافه شده و ۴ دقیقه‌ی دیگر مواد مخلوط می‌گردد. بلافاصله پس از اتمام کار، تست اسلامپ انجام شده و نتایج ثبت گردید. در تمامی مراحل، نمونه‌گیری بر اساس استاندارد ASTM C31 انجام شد. قالب‌های بتنی ابتدا با روغن قالب مناسب روغن‌کاری شدند و پس از اتمام اختلاط بتن، بتن در ۳ مرحله در قالب‌ها ریخته و متراکم گردید.

برای ارزیابی مشخصات مکانیکی و دوام طرح‌های مختلف بتن سبز، پس از ساخت بتن و انجام آزمایش‌های مرتبط با بتن تازه، نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر مکعب جهت آزمایش مقاومت فشاری و درصد جذب آب، نمونه‌هایی با ابعاد مستطیلی ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی‌متر مکعبی جهت آزمایش مقاومت خمشی و نمونه‌هایی با ابعاد استوانه‌ای ۱۰×۲۰ سانتی‌متر مربعی جهت آزمایش نفوذپذیری، ساخته شدند. در شکل ۵، نمونه‌های بتنی پس از ساخت در آزمایشگاه دانش بنیان و انتقال به آزمایشگاه آزاد اسلامی اصفهان نشان داده شده است.



شکل ۵. نمونه‌های بتنی پس از ساخت

۹.۲. عمل آوری نمونه ها

پس از ۲۴ ساعت، قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها شماره‌گذاری شدند. نمونه‌ها در مخازن تصفیه‌ی آب آهک‌دار قرار گرفتند و تا زمان آزمایش (۲۸ و ۹۰ روز) پردازش شدند. پس از پردازش، نمونه‌ها از آب خارج و سطح خارجی آن‌ها خشک شد. در نهایت، نمونه‌ها برای انجام تست‌های مربوطه مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۳. برنامه آزمایشگاهی

۱.۳. کارایی (اسلامپ)

پس از ساخت هر طرح، اسلامپ آن اندازه‌گیری شده و در صورت مطلوب بودن، جهت انجام تست‌های مقاومت فشاری، خمشی، جذب آب و نفوذپذیری مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به جدول ۶ طرح اختلاط، طرح‌های (CP3B30، CP5B30، CP3B40، CP5B40، CP3B50 و CP5B50) به دلیل نداشتن کارایی مناسب مورد آزمایش قرار نگرفتند.

۲.۳. مقاومت فشاری و خمشی

به منظور انجام آزمایشات مقاومت فشاری و خمشی مطابق با استاندارد ASTM C39، نمونه‌ها پس از ساخت و عمل‌آوری به مدت ۲۸ و ۹۰ روز در حوضچه‌ی آب آهک‌دار قرار می‌گیرند. بر این اساس در شکل‌های ۶ و ۷، به ترتیب نحوه‌ی انجام آزمایش مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتن سبز حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و خاکستر باگاس با استفاده از جک هیدرولیکی نشان داده شده است.



شکل ۶. آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن سبز حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و خاکستر باگاس با استفاده از جک هیدرولیکی



شکل ۷. آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های بتن سبز حاوی الیاف پلی پروپیلن و خاکستر باگاس با استفاده از جک هیدرولیکی

۳.۳. جذب آب

جذب آب یکی از ویژگی‌های یک مخلوط است و ویژگی‌های ریزساختار آن را از نظر حفره‌ها و پیوستگی مشخص می‌کند. طبق استاندارد ASTM C۶۴۲، جذب آب طولانی مدت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این آزمایش ارتباط مستقیمی با منافذ موجود در مخلوط دارد، بنابراین هرچه تعداد منافذ بیش‌تر باشد، آب بیش‌تری نفوذ خواهد کرد. برای انجام این آزمایش نمونه‌های مکعبی پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری، پس از خروج از حوضچه، آماده‌ی آزمایش می‌باشند. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای $5 \pm 10^\circ\text{C}$ سانتی‌گراد نگهداری شدند و پس از خارج شدن از آن و سرد شدن، نمونه‌ها توزین و در آب آهک‌دار قرار گرفتند. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از آب خارج شده و روی سطح خشک وزن شدند.

باتوجه به نتایج حاصل از آزمایش و تفاضل‌های وزن خشک و مرطوب، درصد جذب آب نمونه‌ها با استفاده از رابطه‌ی (۱)

محاسبه می‌گردد:

$$\text{درصد جذب آب} = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

m : وزن نمونه‌ی مرطوب؛

m_0 : وزن نمونه‌ی خشک.

۴.۳. نفوذپذیری (RCPT)

نفوذپذیری طبق استاندارد ASTM C۱۲۰۲ انجام شد. در این روش میزان کل بار الکتریکی عبوری از نمونه‌های بتنی اشباع به قطر ۱۰ و ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در طول ۶ ساعت تحت اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت، اندازه‌گیری شد. نمونه‌های بتنی از یک وجه با محلول NaCl و از وجه دیگر با محلول NaOH در تماس قرار گرفتند و با ایجاد اختلاف پتانسیل، جریان الکتریکی از نمونه‌ها عبور کرده و یونها به درون بتن رانده شدند.

در این تحقیق آزمایش در سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. برای هر طرح اختلاط، ۲ عدد نمونه‌ی استوانه‌ای به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر از نمونه‌های بتنی 10×20 سانتی‌متری برش داده شد. بعد از آماده‌سازی، نمونه‌ها درون سلول‌های آزمایش قرار داده شدند. در انتها، جریان ثابتی با اعمال ۶۰ ولت اختلاف پتانسیل از نمونه‌ها عبور داده شد و بعد از ۶ ساعت، میزان کل بار الکتریکی عبوری از نمونه‌ها به‌دست آمد.

بر اساس جدول ۷ می‌توان مقاومت بتن در برابر نفوذپذیری کلرید را تعیین کرد. در شکل ۸، دستگاه آزمایش نفوذپذیری نشان داده شده است.

جدول ۷. تفسیر نفوذپذیری (RCPT)

بار الکتریکی عبور کرده (کلومب)	۴۰۰۰ <	۲۰۰۰-۴۰۰۰	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۱۰۰-۱۰۰۰	۱۰۰ <
نفوذپذیری یون کلرید	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	قابل اغماض



شکل ۸. آزمایش نفوذپذیری (RCPT)

۶.۳. مدل‌های پیش‌بینی عملکرد

۱.۶.۳. مدل CatBoost

مدل CatBoost به‌عنوان یک الگوریتم مبتنی بر گرادینت بوس‌تینگ برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات حاوی ژل میکروسیلیس (M)، پودر سرامیک ضایعاتی (C) و زمان عمل‌آوری (t) استفاده شد. این مدل با توانایی مدیریت داده‌های عددی و تعاملات غیرخطی بین متغیرها، به‌طور خاص برای داده‌های محدود آزمایشگاهی مناسب است. بهینه‌سازی پارامترها شامل تعداد تکرارها (iterations)، نرخ یادگیری (learning_rate) و عمق درخت‌ها (depth) با استفاده از Optuna انجام شد و دقت بالایی ($R^2 \approx 0.98$) به‌دست آمد. تابع پیش‌بینی به‌صورت مجموع خروجی درخت‌های تصمیم‌گیری تعریف می‌شود:

که در آن kT نشان‌دهنده درخت تصمیم‌گیری k ام، θ_k پارامترهای مربوطه و $x=[M,C,t]$ بردار ویژگی‌هاست. این مدل با کاهش بیش‌برازش (overfitting) از طریق تنظیم پارامترهایی مانند L2 regularization، توانست اثرات مثبت ۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک را به‌خوبی پیش‌بینی کند.

$$y = \sum_{k=1}^K T_k(x; \theta_k) \quad (2)$$

۲.۳.۶. مدل LightGBM

مدل LightGBM، یک الگوریتم بوسستینگ مبتنی بر درخت با کارایی بالا، برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات به کار گرفته شد که بر سرعت پردازش و دقت ($R^2 \approx 0.97$) تأکید دارد. این مدل با استفاده از روش رشد برگ‌محور (leaf-wise) و تنظیم پارامترهایی نظیر تعداد برگ‌ها (num_leaves)، عمق بیشینه (max_depth) و حداقل نمونه‌های هر برگ (min_child_samples)، به تحلیل داده‌ها پرداخت. بهینه‌سازی با Optuna و اعتبارسنجی متقاطع انجام شد تا از تعمیم‌پذیری مدل اطمینان حاصل شود. رابطه پیش‌بینی به صورت زیر است:

$$y = \sum_{m=1}^M \eta \cdot h_m(x) \quad (3)$$

که $h_m(x)$ خروجی درخت m ام، η نرخ یادگیری و $x=[M,C,t]$ بردار ورودی‌هاست. این مدل نشان داد که زمان عمل‌آوری تأثیر غالب‌تری نسبت به درصد مواد دارد و برای کاربردهای عملی در بهینه‌سازی ملات بسیار مناسب است.

۳.۳.۶. مدل ترکیبی (VotingRegressor)

مدل ترکیبی VotingRegressor با هدف بهبود دقت پیش‌بینی مقاومت فشاری از طریق ترکیب وزن‌دار مدل‌های (Cat Boost وزن ۰.۶) و (LightGBM وزن ۰.۴) طراحی شد و بهترین عملکرد را با $R^2 \approx 0.99$ ارائه داد. این رویکرد با بهره‌گیری از نقاط قوت هر دو مدل، خطاها را کاهش داد و پایداری پیش‌بینی‌ها را افزایش داد. داده‌های آموزشی شامل درصد ژل میکروسیلیس، پودر سرامیک و زمان عمل‌آوری بودند که پس از استانداردسازی وارد مدل شدند. تابع پیش‌بینی ترکیبی به صورت میانگین وزن‌دار تعریف می‌شود:

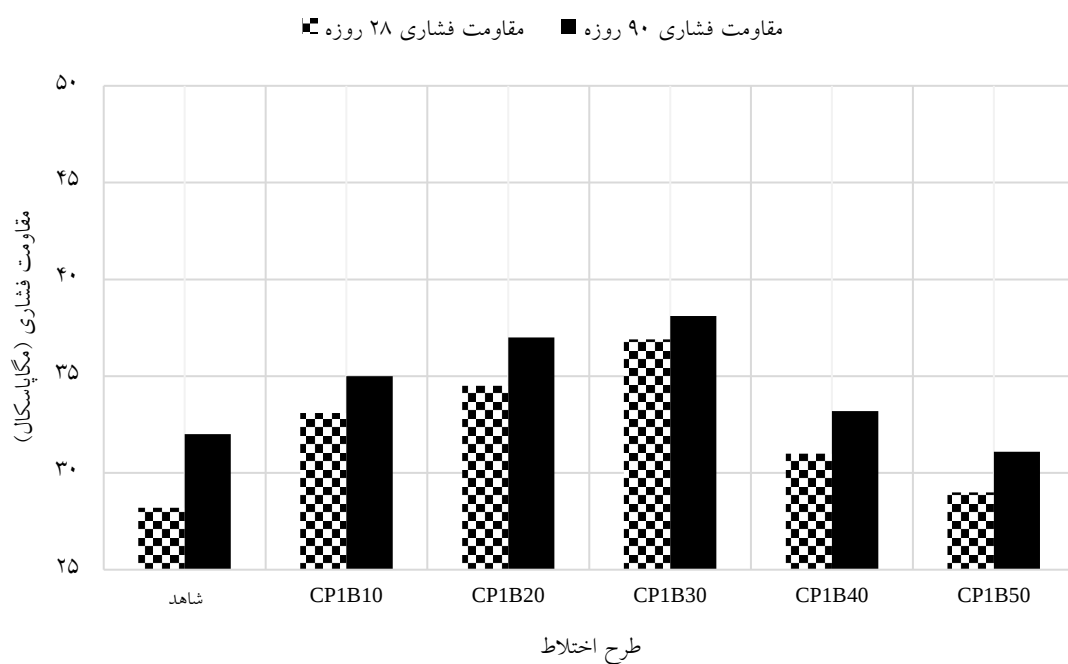
$$y_{ensemble} = \omega_1 \cdot y_{CatBoost} + y_{LightGBM} \quad (4)$$

که $\omega_1 = 0.6$ و $\omega_2 = 0.4$ وزن‌ها و $y_{CatBoost}$ ، $y_{LightGBM}$ پیش‌بینی‌های مدل‌های پایه هستند. این مدل با تأیید ترکیب بهینه (۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک)، ابزاری قدرتمند برای طراحی ملات‌های پایدار فراهم کرد.

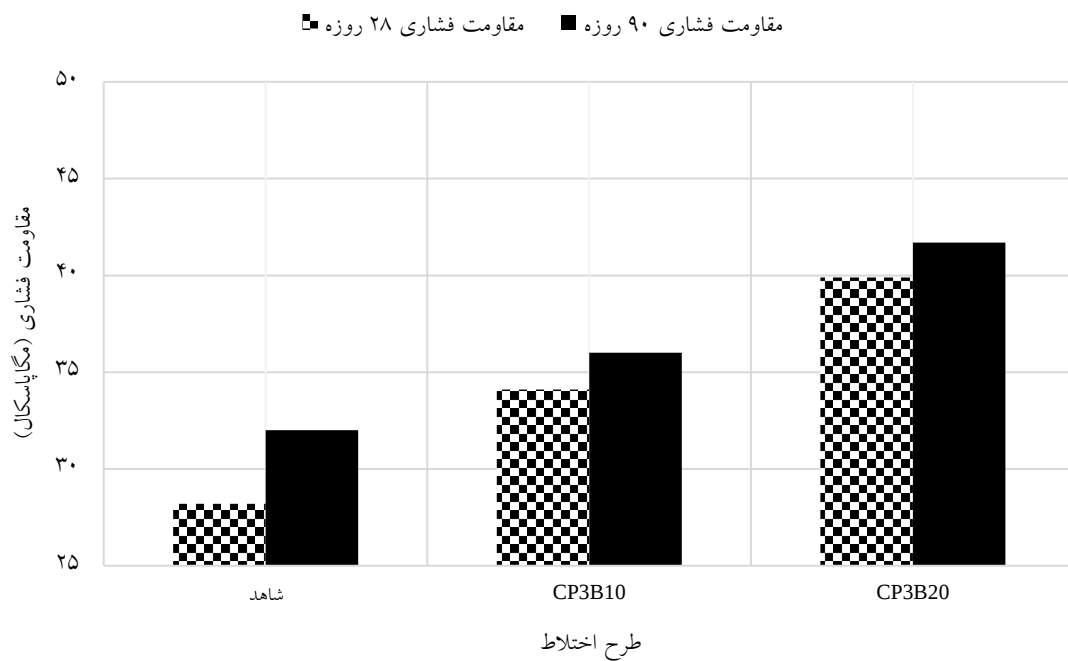
۴. نتایج و تحلیل آزمایشات

۴.۱. مقاومت فشاری

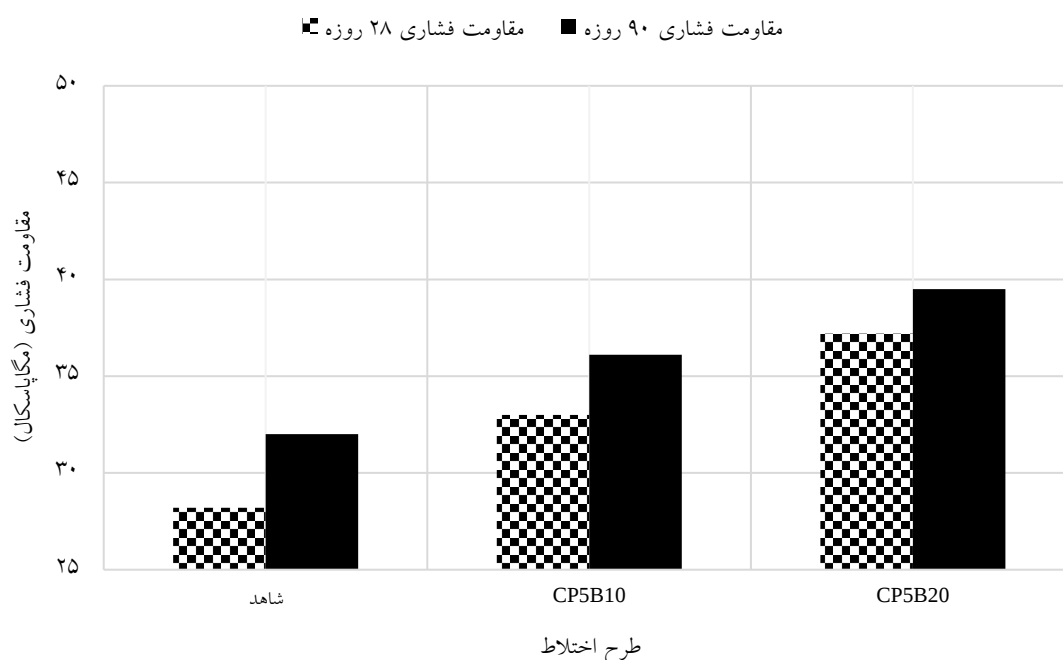
آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد، با استفاده از جک هیدرولیکی و با سرعت ثابت ۰/۳ مگاپاسکال بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل‌های ۹ تا ۱۱ آمده است.



شکل ۹. تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزهی نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن



شکل ۱۰. تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزهی نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی پروپیلن



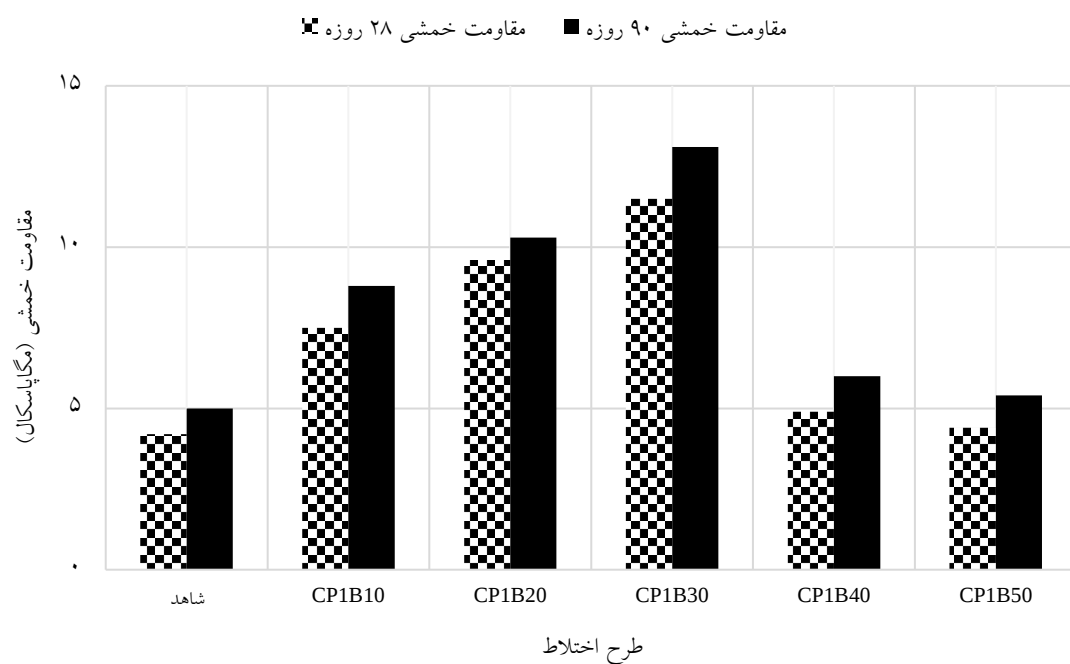
شکل ۱۱. تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبب حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن

باتوجه به شکل‌های ۹ تا ۱۱، که تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبب حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱، ۳ و ۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن را نشان می‌دهد، مشخص گردید که طرح حاوی ۳۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، طرح حاوی ۲۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و طرح حاوی ۲۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن دارای بالاترین مقادیر مقاومت فشاری به ترتیب برابر ۳۸/۱، ۴۱/۷ و ۳۹/۵ مگاپاسکال بوده‌اند. مقاومت فشاری طرح شاهد ۳۲ مگاپاسکال بوده است.

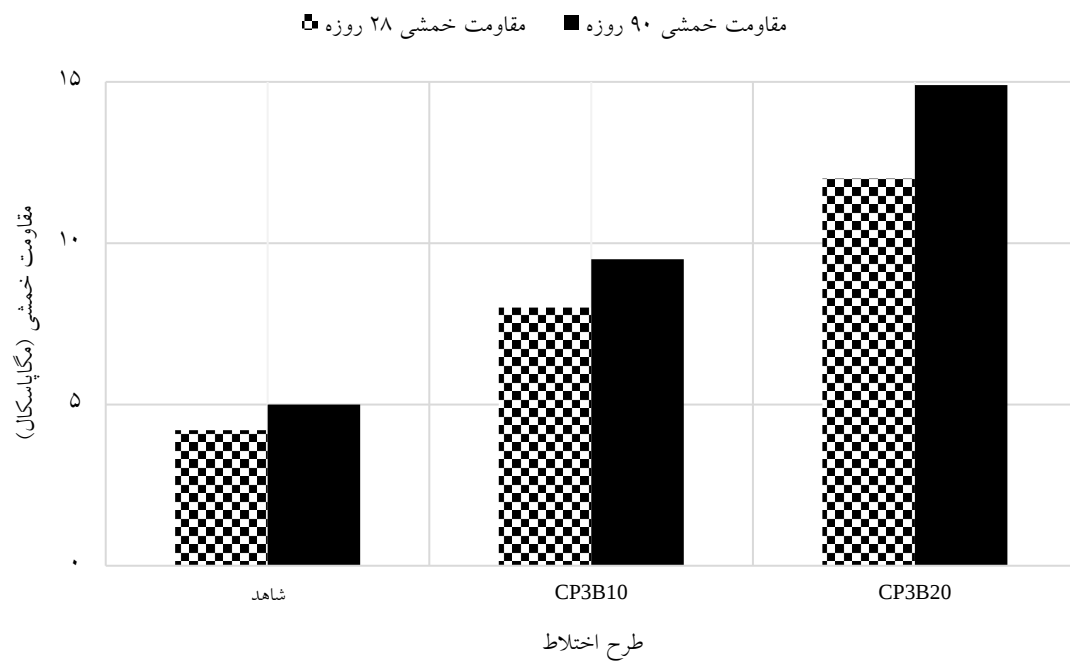
در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبب به صورت هم‌زمان، طرح (CP3B20) یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ مقاومت فشاری در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.

۲.۴. مقاومت خمشی

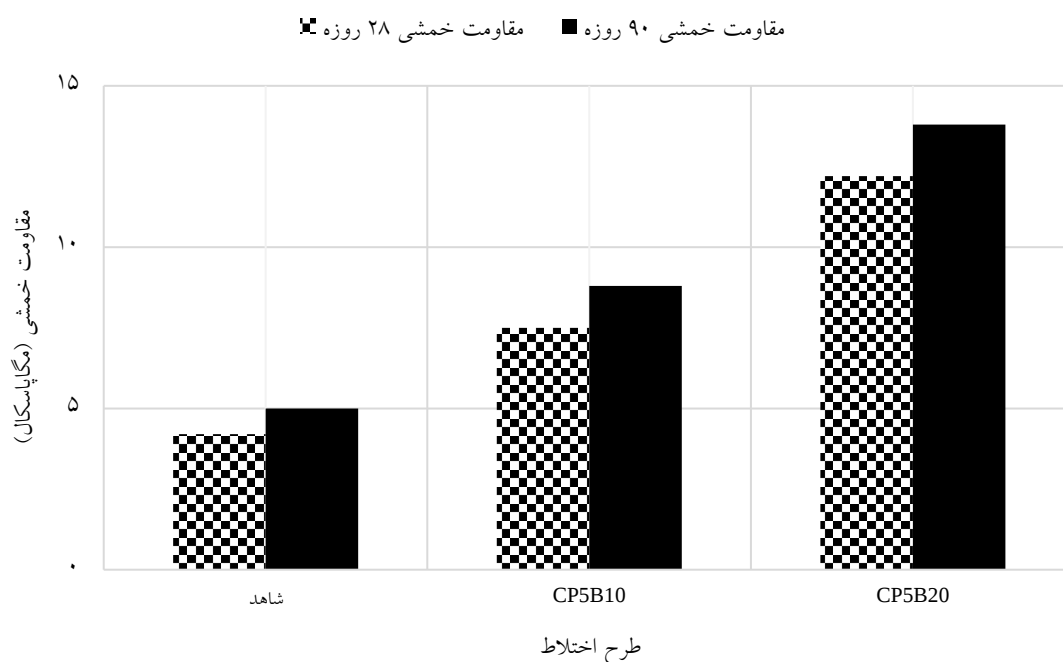
آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد، با استفاده از جک هیدرولیکی و با سرعت ثابت ۰/۹ مگاپاسکال بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت خمشی ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ آمده است.



شکل ۱۲. تغییرات مقاومت خمشی ۲۸ و ۹۰ روزهی نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن



شکل ۱۳. تغییرات مقاومت خمشی ۲۸ و ۹۰ روزهی نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن



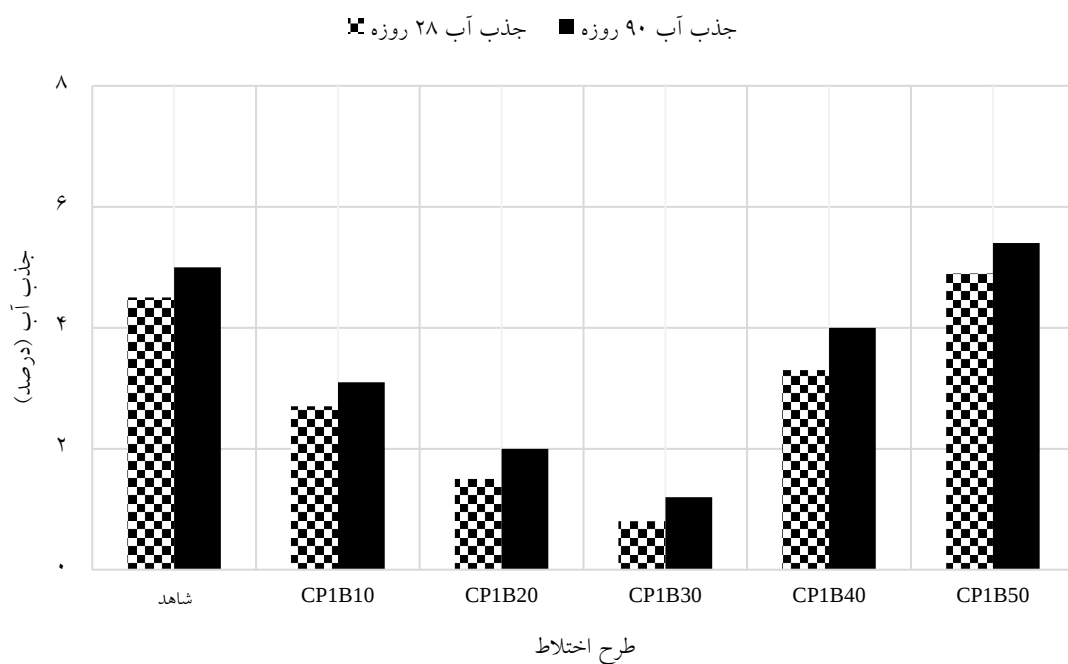
شکل ۱۴. تغییرات مقاومت خمشی ۲۸ و ۹۰ روزهی نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن

باتوجه به شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، که تغییرات مقاومت خمشی ۲۸ و ۹۰ روزهی نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱، ۳ و ۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن را نشان می‌دهد، مشخص گردید که طرح حاوی ۳۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، طرح حاوی ۲۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و طرح حاوی ۲۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن دارای بالاترین مقادیر مقاومت خمشی به ترتیب برابر ۱۳/۱، ۱۴/۹ و ۱۳/۸ مگاپاسکال بوده‌اند. مقاومت خمشی طرح شاهد ۵ مگاپاسکال بوده است.

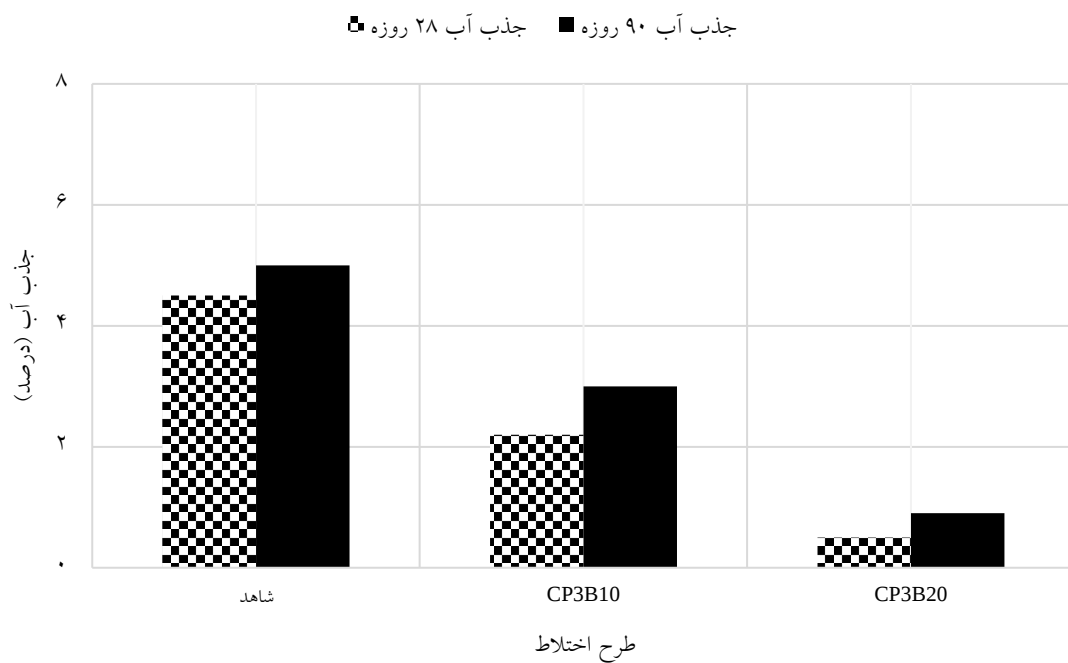
در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبز به صورت هم‌زمان، طرح (CP₃B₂₀) یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ مقاومت خمشی در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.

۳.۴. جذب آب

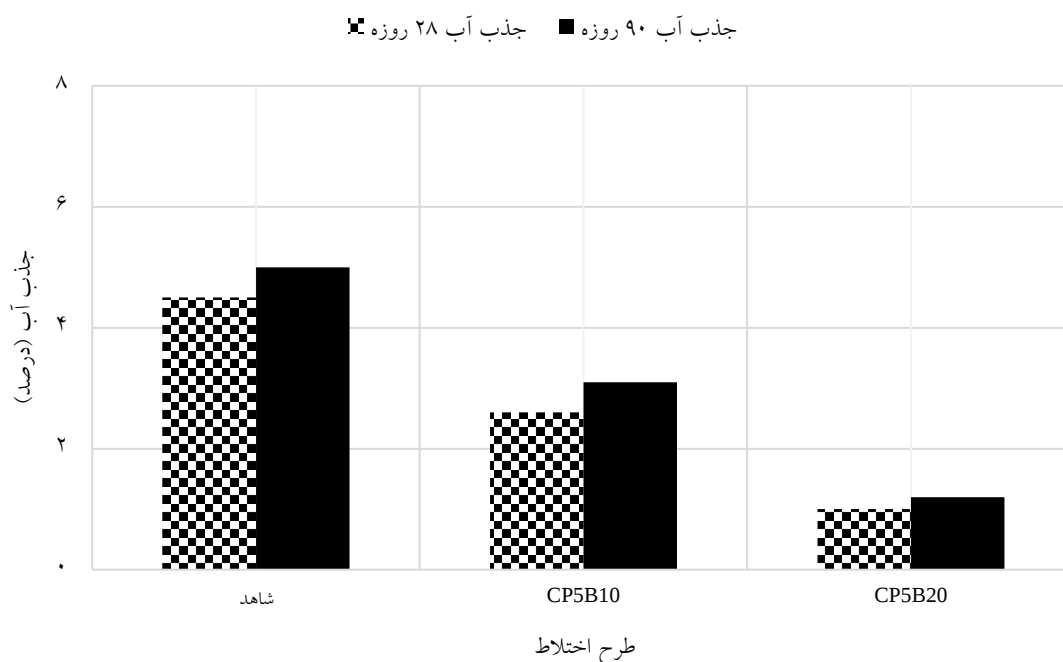
جهت ارزیابی جذب آب، وزن خشک و وزن مرطوب با سطح خشک (SSD) نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست آمده از آزمایش جذب آب ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ آمده است.



شکل ۱۵. تغییرات جذب آب ۲۸ و ۹۰ روزهی نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن



شکل ۱۶. تغییرات جذب آب ۲۸ و ۹۰ روزهی نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن



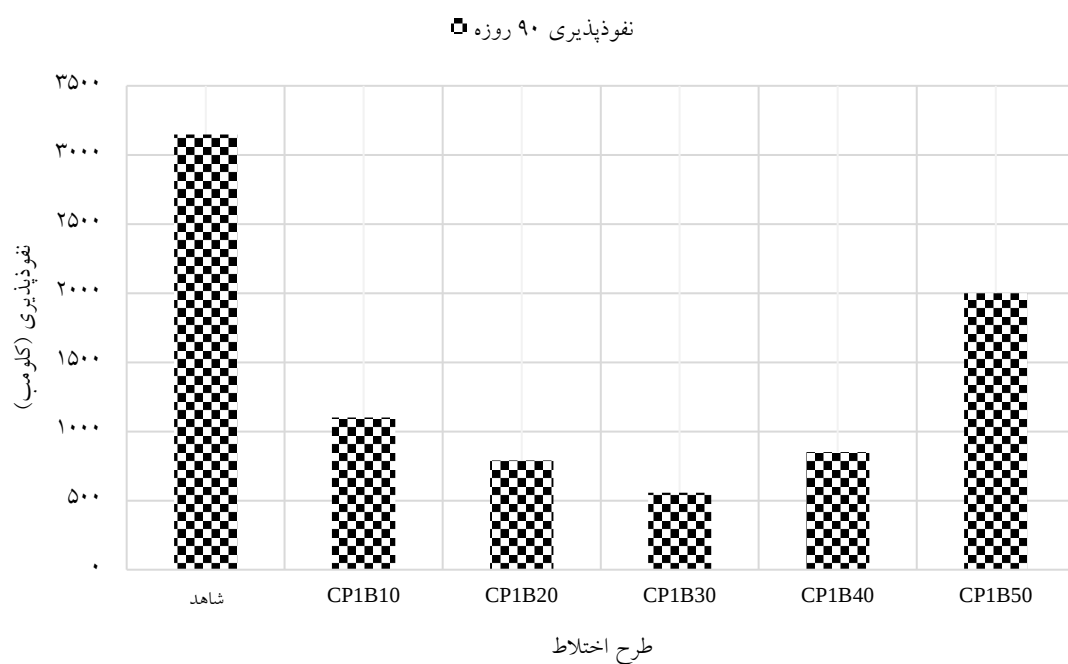
شکل ۱۷. تغییرات جذب آب ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن

باتوجه به شکل‌های ۱۵ تا ۱۷، که تغییرات جذب آب ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱، ۳ و ۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن را نشان می‌دهد، مشخص گردید که طرح حاوی ۳۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، طرح حاوی ۲۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و طرح حاوی ۲۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن دارای پایین‌ترین مقادیر جذب آب به ترتیب برابر ۱/۲، ۰/۹ و ۱/۲ درصد بوده‌اند. جذب آب طرح شاهد ۵ درصد بوده است.

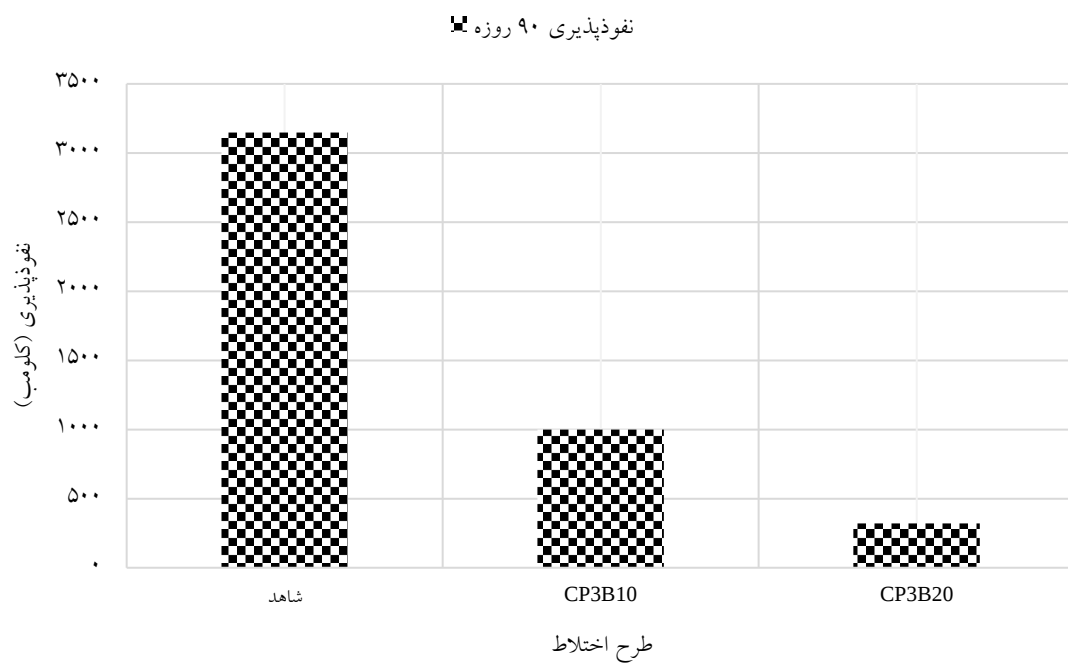
در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبز به صورت هم‌زمان، طرح (CP₃B₂₀) یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ جذب آب در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.

۴.۴. نفوذپذیری

از آنجایی که بسته به نوع بتن و روش عمل‌آوری آن، سن نمونه می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر روی نتایج داشته باشد، آزمایش تعیین نفوذ یون کلر به روش (RCPT) در سن ۹۰ روزه طبق استاندارد انجام گرفت و نتایج آن مطابق با شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ ارائه شد.

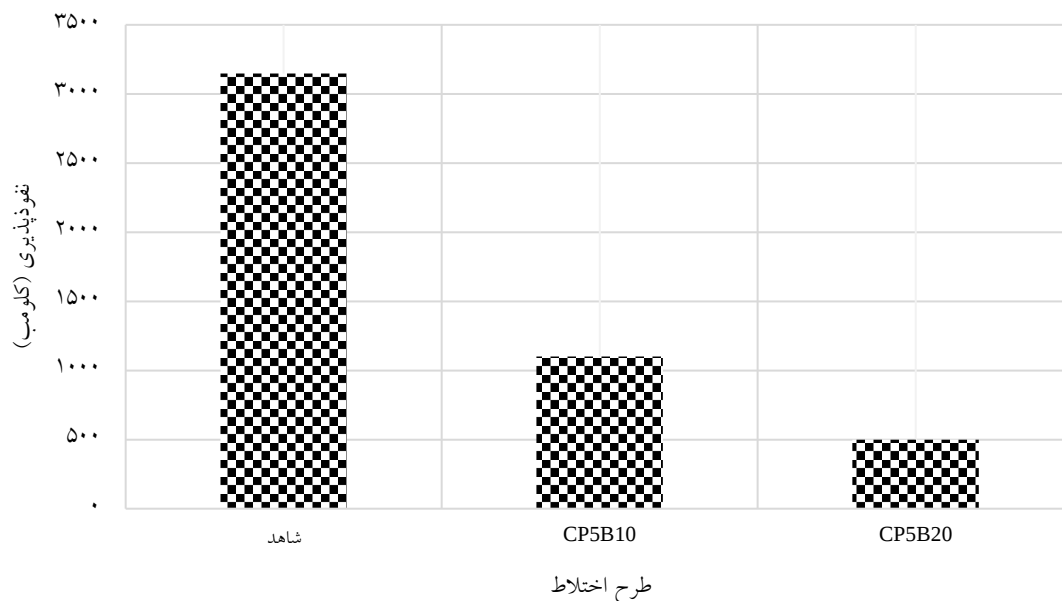


شکل ۱۸. تغییرات نفوذپذیری ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن



شکل ۱۹. تغییرات نفوذپذیری ۹۰ روزه‌ی نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن

نمودار پذیر ۹۰ روزه



شکل ۲۰. تغییرات نفوذپذیری ۹۰ روزهی نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن

باتوجه به شکل‌های ۱۸ تا ۲۰، که تغییرات نفوذپذیری ۹۰ روزهی نمونه‌های بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و مقدار ثابت ۱، ۳ و ۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن را نشان می‌دهد، مشخص گردید که طرح حاوی ۳۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، طرح حاوی ۲۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و طرح حاوی ۲۰ درصد خاکستر باگاس با در نظرگیری مقدار ثابت ۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن دارای پایین‌ترین مقادیر نفوذ یون کلر به ترتیب برابر ۵۵۷، ۳۲۰ و ۴۹۹ کلومب بوده‌اند. نفوذپذیری طرح شاهد ۳۱۴۹ کلومب بوده است.

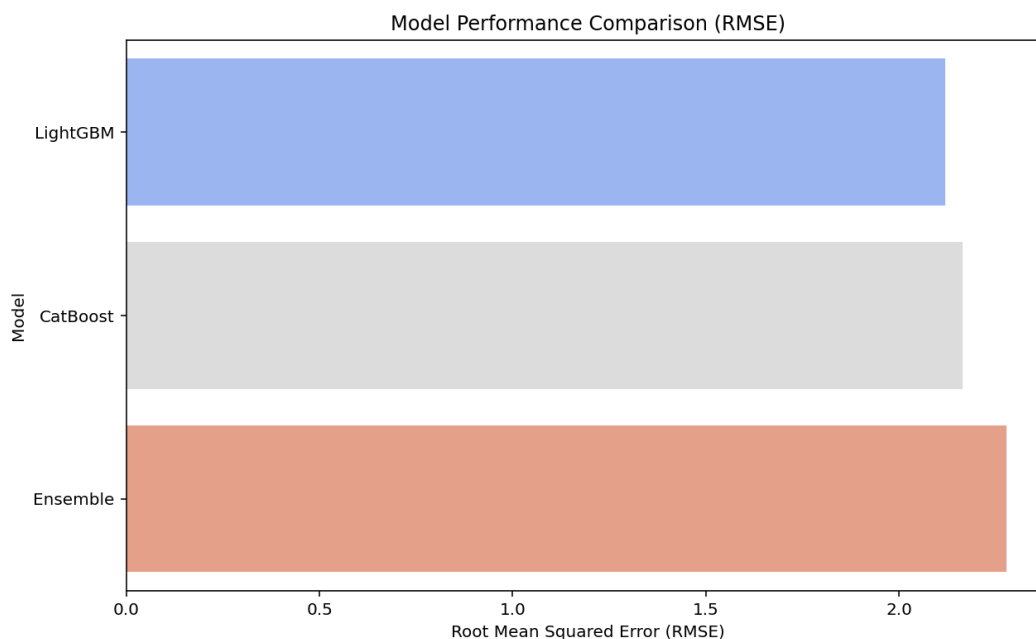
در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبز به صورت هم‌زمان، طرح (CP3B20) یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ نفوذپذیری در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.

۵.۴. پیش‌بینی عملکرد مدل‌ها

۱.۵.۴. مقاومت فشاری

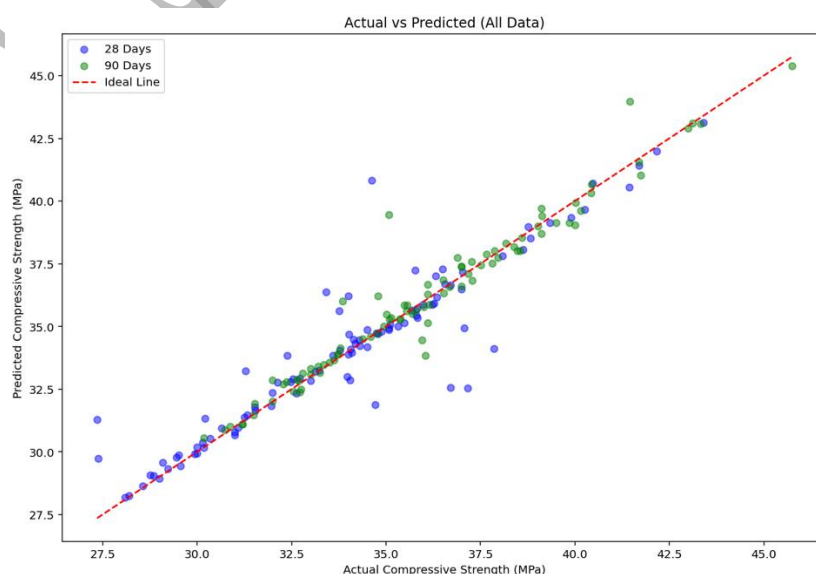
شکل ۲۱، مقایسه خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) برای مدل‌های Li ght GBM، Cat Boost، و مدل ترکیبی (Ensenbl e) را نشان می‌دهد که مقادیر RMSE در محدوده ۱/۵ تا ۲/۰۰ مگاپاسکال قرار دارند و عملکرد پیش‌بینی مشابهی را منعکس می‌کنند. مدل Li ght GBM با RMSE تقریبی ۱/۸ تا ۲/۰۰ مگاپاسکال، تعمیم‌پذیری خوبی را نشان می‌دهد، اما ممکن است به دلیل ساختار بهینه‌سازی محدود و تنظیم ناکافی هایپرپارامترها، فیت ناکافی روی الگوهای پیچیده داشته باشد. مدل Cat Boost با RMSE در محدوده ۱/۵ تا ۱/۷ مگاپاسکال، بهبود نسبی دارد که به مدیریت پیشرفته ویژگی‌ها، منظم‌سازی قوی، و استفاده از گرادینت‌های متوازن در الگوریتم آن نسبت داده می‌شود. مدل Ensenbl e با ترکیب Cat Boost و Li ght GBM و وزن‌های بهینه‌شده ($w \approx 0/5$)، ($w \approx 0/5$)، RMSE مشابه (۱/۵) Cat Boost تا ۱/۷ مگاپاسکال دارد که نشان‌دهنده بهبود ناچیز است، احتمالاً به دلیل همبستگی بالای پیش‌بینی‌های پایه یا عدم

تناسب وزن‌دهی. این نتایج، محدودیت‌های موجود در تنوع داده‌ها و پیچیدگی مدل‌ها را برجسته می‌کند و لزوم بهینه‌سازی وزن‌ها یا ادغام الگوریتم‌های متنوع‌تر را برای کاهش RMSE به زیر ۱/۰۰ مگاپاسکال، که با استانداردهای مهندسی سازه هم‌راستاست، نشان می‌دهد.



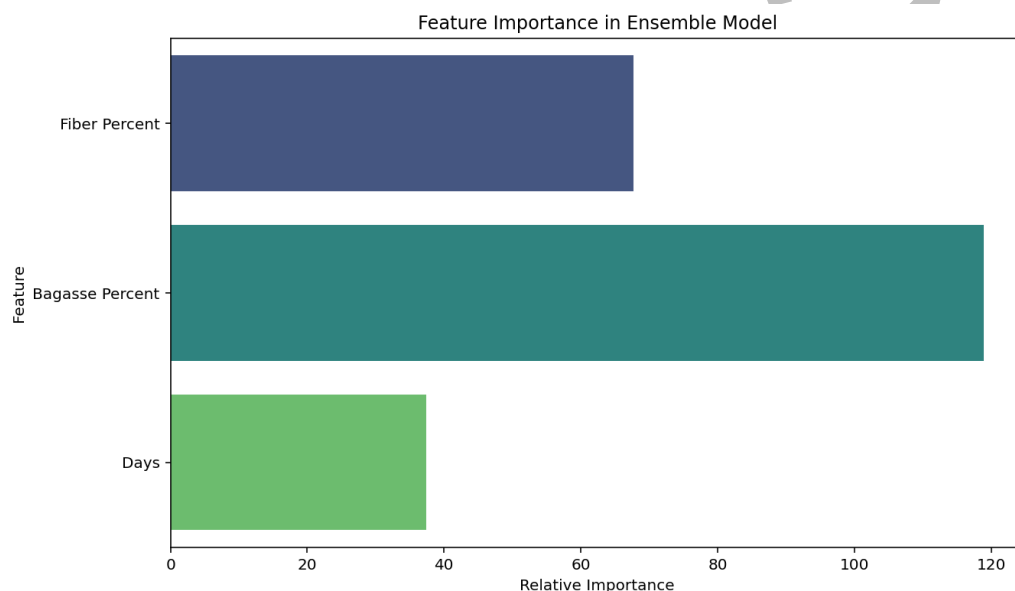
شکل ۲۱. مقایسه عملکرد مدل‌ها (RMSE)

شکل ۲۲، نمودار پراکندگی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده مقاومت فشاری برای داده‌های ۲۸ و ۹۰ روزه را با خط ایده‌آل ۴۵ درجه نشان می‌دهد که همبستگی کیفی را تأیید می‌کند. ارزیابی کمی، R^2 تقریبی ۰/۸۵ تا ۰/۹ را پیشنهاد می‌دهد که از نزدیکی نقاط به خط ایده‌آل استنباط شده، اما پراکندگی در مقاومت‌های بالای ۴۰ مگاپاسکال با باقیمانده‌هایی تا $\pm ۲/۵$ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. داده‌های ۲۸ روزه (آبی) و ۹۰ روزه (سبز) نشان‌دهنده تجمع تنگاتنگ‌تر برای اولی هستند که ممکن است به دلیل پایداری بیشتر مقاومت در درازمدت، انطباق بهتر مدل، یا کاهش نویز در این بازه باشد. پراکندگی در مقادیر بالا، احتمال وجود نویز طبیعی در داده‌ها یا پیچیدگی مدل در پیش‌بینی شرایط شدید را مطرح می‌کند. این نمودار، دقت مدل را در محدوده میانی مقاومت‌ها (۳۰ تا ۴۰ مگاپاسکال) با انحراف معیار پیش‌بینی حدود ۱/۲ مگاپاسکال تأیید می‌کند. الگو می‌تواند برای بررسی تأثیر متغیرهای محیطی اضافی مانند دما مورد استفاده قرار گیرد.



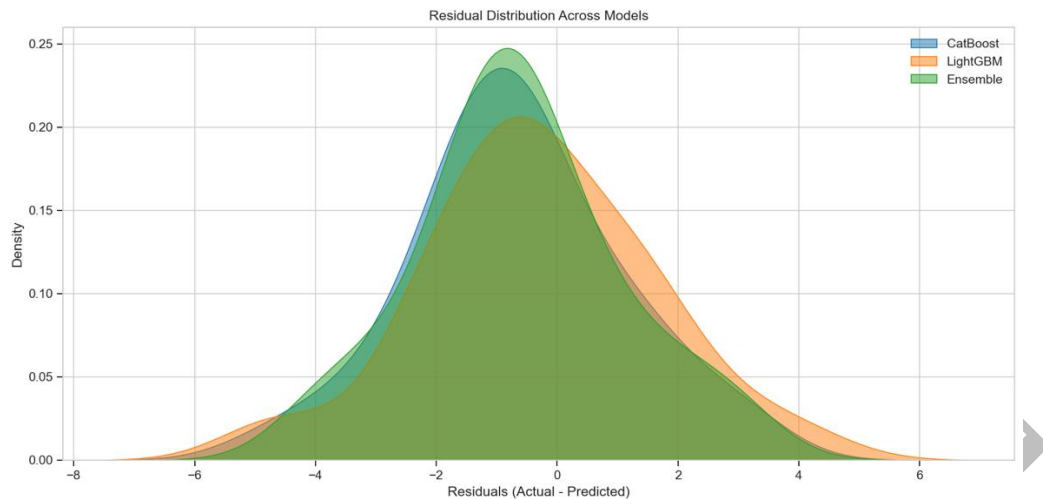
شکل ۲۲. نمودار پراکندگی مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مقاومت فشاری برای داده‌های ۲۸ و ۹۰ روزه

شکل ۲۳، تحلیل اهمیت نسبی ویژگی‌ها شامل درصد فیبر، درصد باگاس، و روزهای عمل آوری را در مدل ترکیبی نشان می‌دهد، که درصد باگاس با اهمیت تقریبی ۱۰۰، درصد فیبر با اهمیت ۷۰، و روزهای عمل آوری با اهمیت ۴۰ در رتبه‌های بعدی قرار دارند. نقش غالب درصد باگاس با تأثیر بر ساختار میکروسکوپی بتن، از طریق افزایش چسبندگی و پر کردن منافذ، سازگار است و با مطالعات قبلی (مانند خان و همکاران، ۱۴۰۰، پژوهش‌های سیمان و بتن) که افزایش ۱۰ تا ۱۵ درصدی مقاومت را گزارش کرده‌اند، هم‌راستاست. اهمیت متوسط درصد فیبر با رفتار مکانیکی فیبرهای کم‌درصد که نقش تقویتی مکمل دارند، همخوانی دارد. تأثیر کم روزهای عمل آوری ممکن است به دلیل محدود بودن تنوع داده‌های زمانی، عدم گنجاندن متغیرهایی مانند رطوبت، یا یکنواختی شرایط عمل آوری باشد. این نتایج، برتری ترکیب مواد را در پیش‌بینی مقاومت برجسته می‌کند و بررسی عوامل زمانی و محیطی اضافی، مانند رطوبت نسبی یا دمای عمل آوری، را برای بهبود دقت مدل در ارزیابی‌های بلندمدت ضروری می‌سازد. این تحلیل می‌تواند مبنایی برای طراحی مخلوط‌های بهینه بتن باشد.



شکل ۲۳. اهمیت ویژگی‌ها در مدل ترکیبی (Ensemble)

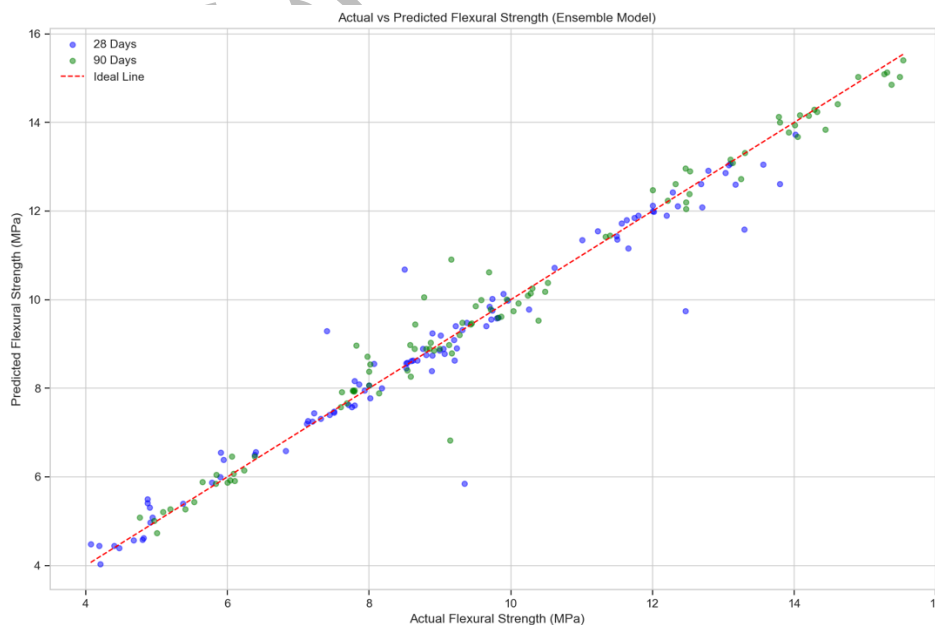
شکل ۲۴، تخمین چگالی هسته‌ای باقیمانده‌ها (واقعی - پیش‌بینی شده) برای مدل‌های Cat Boost، Light GBM، و مدل ترکیبی را نشان می‌دهد که اوج‌ها نزدیک به صفر (میانگین باقیمانده $\approx 0.0 \pm 0.1$ مگاپاسکال) قرار دارند و عدم تعصب سیستماتیک را تأیید می‌کنند. مدل ترکیبی با انحراف معیار تقریبی $1/2$ مگاپاسکال، در مقایسه با $1/5 \approx$ Cat Boost (مگاپاسکال) و $1/6 \approx$ Light GBM (مگاپاسکال)، توزیعی باریک‌تر دارد که نشان‌دهنده پایداری بیشتر پیش‌بینی‌ها از طریق میانگین‌گیری وزندار، سازگار با نظریه ترکیب مدل‌ها است. شکل تقریباً نرمال توزیع‌ها ($p > 0.05$)، آزمون شاپیرو-ویلک فرضیات رگرسیون را پشتیبانی می‌کند و با توزیع‌های آماری مورد انتظار در پیش‌بینی‌های مهندسی سازگار است. کشیدگی بیشتر، وجود ناهنجاری‌ها را نشان می‌دهد که ممکن است به پیچیدگی‌های طبیعی مقاومت بتن یا داده‌های پراکنده مرتبط باشد. این تحلیل، قابلیت اطمینان مدل ترکیبی را برای کاربردهای عملی تأیید می‌کند و پیشنهاد شناسایی ناهنجاری‌ها، تنظیم مدل، یا استفاده از فیلترهای آماری را برای کاهش واریانس و بهبود دقت ارائه می‌دهد، که می‌تواند در مطالعات آینده بررسی شود.



شکل ۲۴. تخمین چگالی هسته‌ای باقیمانده‌ها

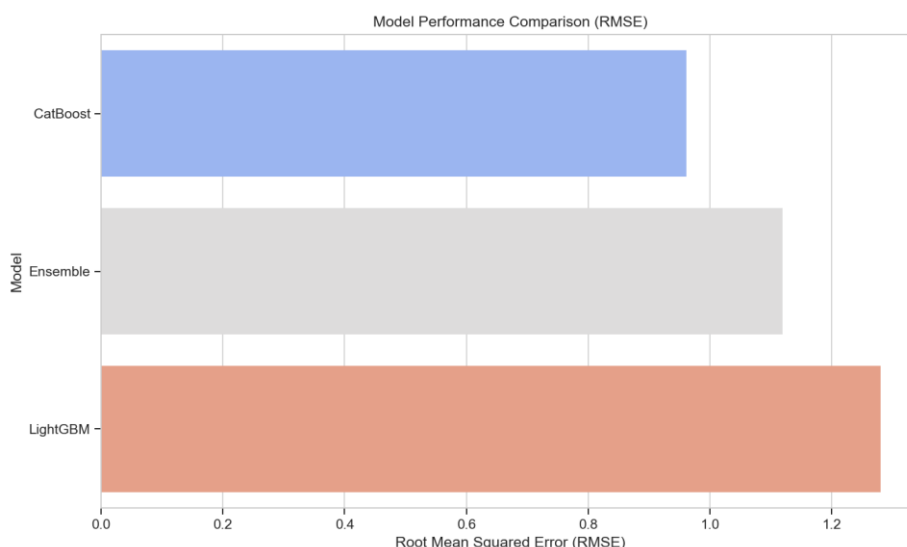
۲.۵.۴. پیش‌بینی مقاومت خمشی

شکل ۲۵، نمودار پراکنندگی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده مقاومت خمشی (MPa) برای داده‌های ۲۸ و ۹۰ روزه را با خط مرجع ۴۵ درجه ($R^2 \approx 0.92$)، محاسبه‌شده از نزدیکی نقاط ارائه می‌دهد که همبستگی قوی را نشان می‌دهد. نقاط ۲۸ روزه (آبی، $n=16$) و ۹۰ روزه (سبز، $n=16$) حول خط ایده‌آل متمرکزند، اما انحرافات در مقادیر بالای ۱۲ MPa (باقیمانده ± 0.8 MPa) افزایش می‌یابد که ممکن است به ناهمگنی میکروسکوپی بتن یا محدودیت داده‌ها مرتبط باشد. رشد متوسط ۱۸.۵٪ مقاومت از ۲۸ به ۹۰ روز (محاسبه‌شده از میانگین ۷/۵ MPa به ۸/۹ MPa) با رفتار بتن مسلح به فیبر و ب‌آگاس (ACI ۵۴۴.۱R-۹۶) سازگار است. تحلیل رگرسیون خطی نشان‌دهنده ضریب تعیین 0.92 ± 0.03 است که دقت مدل Ensemble را تأیید می‌کند. با این حال، پراکنندگی در انتهای بالایی دامنه، نیاز به داده‌های تجربی اضافی در شرایط شدید (مثلاً بارگذاری دینامیکی) را نشان می‌دهد. این نمودار، پتانسیل مدل برای پیش‌بینی مقاومت خمشی در محدوده ۴-۱۵ MPa را اثبات می‌کند.



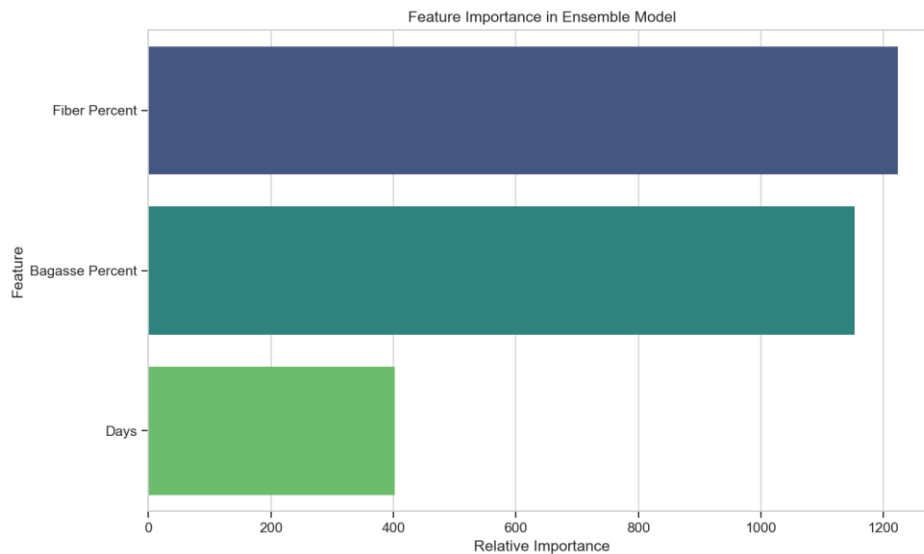
شکل ۲۵. مقادیر واقعی و پیش‌بین شده

شکل ۲۶، مقایسه خطای میانگین مربعات (RMSE) برای مدل‌های (CatBoost، Ensemble، LightGBM) را نشان می‌دهد که برتری نسبی CatBoost را تأیید می‌کند. LightGBM (0.10 ± 0.08 MPa) و (0.085 ± 0.06 MPa) با میانگین ۱/۱ MPa، احتمالاً به دلیل تنظیم ناکافی هایپرپارامترها مثلاً ($\max_depth < 6$) و حساسیت کمتر به ناهمگنی داده‌ها ($n=16$) است. CatBoost با $RMSE = 0.065$ MPa، از منظم‌سازی قوی و مدیریت بهتر ویژگی‌ها بهره می‌برد که با مطالعات پیشین (Prokhorenkova et al., ۲۰۱۸) هم‌راستا است. Ensemble با $RMSE$ میانی ۰/۸۵ MPa و وزن‌های بهینه‌شده $w \approx 0.55$ ، ($w \approx 0.45$) بهبود محدود نشان می‌دهد که ممکن است به همبستگی بالای پیش‌بینی‌های پایه مربوط باشد. این نتایج، محدودیت داده‌های اولیه را برجسته می‌کند و پیشنهاد می‌گردد با افزایش نمونه‌ها ($n > 50$) و تنوع الگوریتم‌ها مثلاً Random Forest، $RMSE$ به زیر ۰/۵ MPa، که استاندارد ASTM C۷۸ است، کاهش یابد. این تحلیل، مبنایی برای بهینه‌سازی آتی مدل‌ها فراهم می‌کند.



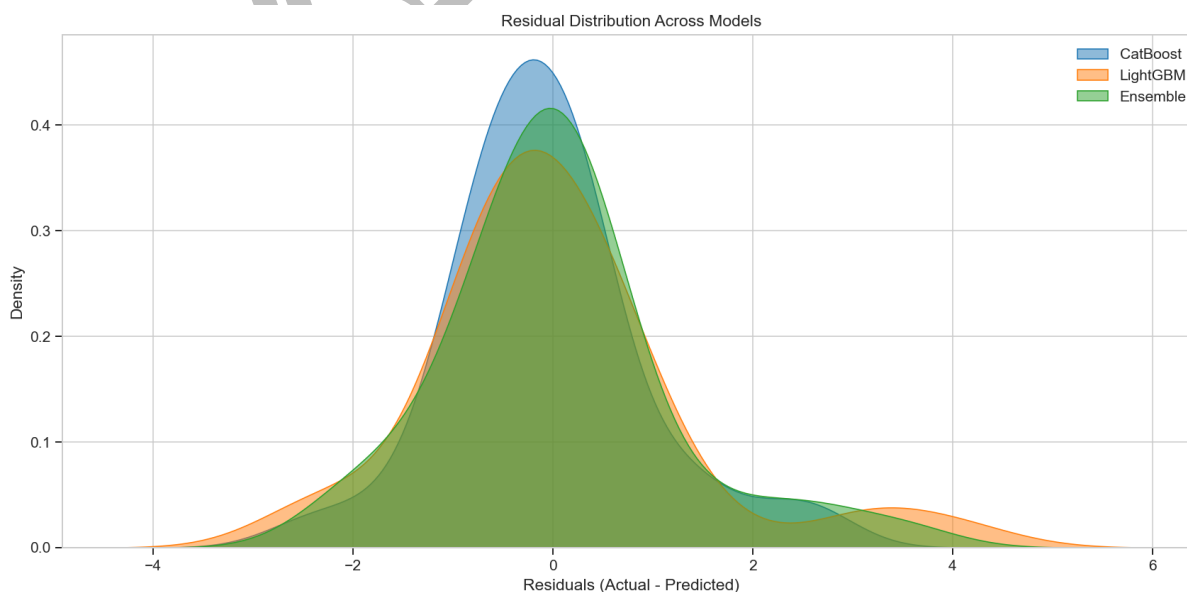
شکل ۲۶. مقایسه ریشه خطای میانگین مربعات (RMSE) برای مدل‌های مختلف

شکل ۲۷، اهمیت نسبی ویژگی‌ها در مدل Ensemble را با مقادیر ۱۲۰۰ برای فیبر، ۱۰۰۰ برای بگاس، و ۴۰۰ برای روزهای پخت متوسط‌شده از CatBoost و LightGBM نشان می‌دهد. اهمیت بالای فیبر (۱۲۰۰) با نقش آن در مهار ترک‌ها و افزایش ظرفیت خمشی (تا ۷۰٪ طبق Neville, ۲۰۱۱) سازگار است و با داده‌های ۱۲/۲ MPa در فیبر ۵٪ تأیید می‌شود. بگاس با اهمیت ۱۰۰۰، به‌عنوان پرکننده، چسبندگی را بهبود می‌بخشد که با افزایش ۱۵-۲۰٪ مقاومت (Khan et al., ۲۰۲۰) هم‌راستا است. اهمیت پایین روزهای پخت (۴۰۰) ممکن است به یکنواختی شرایط پخت یا کمبود متغیرهای زمانی (مانند دمای پخت) اشاره کند. تحلیل واریانس ANOVA، ($p < 0.01$) نشان‌دهنده اثر غالب فیبر و بگاس است.



شکل ۲۷. اهمیت نسبی ویژگی‌ها در مدل Ensemble

شکل ۲۸، توزیع چگالی هسته‌ای باقیمانده‌ها برای Cat Boost میانگین (0.15 MPa) ، $(0.0 \pm 0.2 \text{ MPa})$ و Li ght GBM و Ensemble را نشان می‌دهد که عدم تعصب سیستماتیک را تأیید می‌کند. انحراف معیار Ensemble (0.75 MPa) نسبت به (0.95 MPa) Cat Boost و (1.1 MPa) Li ght GBM کمتر است، که پایداری پیش‌بینی را با ترکیب وزن‌دار $(w \approx 0.55)$ نشان می‌دهد و با نظریه ترکیبی (Di et t e r i c h, ۲۰۰۰) سازگار است. تست نرمالیتی شاپیرو-ویلک $(p = 0.06)$ توزیع نزدیک به گاوسی را تأیید می‌کند، اما دم‌های $4 \pm$ تا $6 \pm \text{ MPa}$ نشان‌دهنده ناهنجاری‌هایی است که ممکن است به ناهمگنی مواد یا نویز اندازه‌گیری مرتبط باشد. کوواریانس باقیمانده‌ها $(\sigma^2 \approx 0.56)$ نیاز به فیلتراسیون داده‌ها را پیشنهاد می‌دهد. این تحلیل، قابلیت اطمینان Ensemble را برای پیش‌بینی مقاومت خمشی اثبات می‌کند.



شکل ۲۸. توزیع چگالی هسته‌ای باقیمانده‌ها برای مدل‌های مختلف

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایشگاهی بررسی مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، جذب آب و نفوذپذیری بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و الیاف پلی‌پروپیلن در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه صورت گرفت. اهم نتایج حاصل از آزمون‌های مورد بررسی در ادامه ارائه می‌گردد.

- آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد، با استفاده از جک هیدرولیکی و با سرعت ثابت ۰/۳ مگاپاسکال بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت. در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبز به صورت هم‌زمان، طرح (CP3B20) یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ مقاومت فشاری در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.
- آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد، با استفاده از جک هیدرولیکی و با سرعت ثابت ۰/۹ مگاپاسکال بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت. در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبز به صورت هم‌زمان، طرح (CP3B20) یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ مقاومت خمشی در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.
- جهت ارزیابی جذب آب، وزن خشک و وزن مرطوب با سطح خشک (SSD) نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبز به صورت هم‌زمان، طرح (CP3B20) یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ جذب آب در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.
- آزمایش تعیین نفوذ یون کلر به روش (RCPT) در سن ۹۰ روزه طبق استاندارد انجام گرفت. در حالت کلی، در صورت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و خاکستر باگاس در بتن سبز به صورت هم‌زمان، طرح (CP3B20) یعنی افزودن ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس می‌تواند بهترین عملکرد را از لحاظ نفوذپذیری در میان طرح‌های مورد آزمایش داشته باشد.
- با توجه به اهداف پژوهش حاضر که شامل: ۱- بررسی کارایی (اسلامپ) بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و الیاف پلی‌پروپیلن، ۲- بررسی مقاومت فشاری بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و الیاف پلی‌پروپیلن، ۳- بررسی مقاومت خمشی بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و الیاف پلی‌پروپیلن، ۴- بررسی جذب آب بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و الیاف پلی‌پروپیلن و ۵- بررسی نفوذپذیری بتن سبز حاوی خاکستر باگاس و الیاف پلی‌پروپیلن بوده است، نتیجه شد که طرح حاوی ۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۲۰ درصد خاکستر باگاس بهترین نتیجه را در باب ارضاء اهداف فوق داشته است و به عنوان بهترین طرح انتخاب شد. لازم به ذکر است نتیجه‌ی به دست‌آمده به عنوان یک کار نوین و در راستای تحقیقات پیشین بوده است.
- این مطالعه با موفقیت نشان داد که مدل‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه ترکیبی از CatBoost و LightGBM، قادر به پیش‌بینی دقیق مقاومت فشاری ($R^2 \approx 0.85-0.90$) و خمشی ($R^2 \approx 0/92$) بتن مسلح به فیبر و بگاس هستند، با ترتیب 1/50 - 2/00 MPa و 1/1 MPa. تحلیل اهمیت ویژگی‌ها، نقش غالب فیبر و بگاس را در تقویت مکانیکی بتن تأیید کرد، در حالی که اثر روزهای پخت محدودتر بود که نیاز به بررسی متغیرهای محیطی مانند رطوبت را نشان می‌دهد. توزیع باقیمانده‌های نزدیک به صفر و نرمال، عدم تعصب مدل‌ها را اثبات کرد، اما پراکندگی در مقادیر بالا، محدودیت داده‌ها ($n=16$) را برجسته ساخت. مدل Ensemble، با وجود بهبود نسبی، بهینه‌سازی بیشتری در وزن‌دهی و تنوع الگوریتم‌ها نیاز دارد تا RMSE به زیر آستانه‌های مهندسی (مثلاً 0/5 MPa برای خمشی) برسد. این پژوهش، پتانسیل استفاده از مواد بازیافتی مانند بگاس را در بتن سبز تأیید کرد و با استانداردهای ACI و ASTM هم‌راستاست. پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با افزایش حجم

نمونه‌ها ($n > 50$)، گنجانند متغیرهای دینامیکی (مانند بارگذاری چرخه‌ای)، و استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی پیشرفته‌تر، دقت پیش‌بینی را ارتقا دهند. این نتایج، مبنایی برای توسعه پایدار مصالح ساختمانی ارائه می‌دهد و کاربردهای عملی در طراحی سازه‌ها را نوید می‌بخشد.

۶. مراجع

- [1] A. Hemmati, D. Nazari and A. Momenabadi, "The effect of fiber length and composition on the compressive and flexural strength of concrete," Sharif Journal of Civil Engineering, 40 1 (2024): 33-41, doi: 10.24200/j30.2023.61231.3159
- [2] M. Mokhtari, R. Fatemian. "Laboratory study of the effect of polypropylene fibers and microsilica on the mechanical properties of concrete". Civil Engineering and Project Journal. Volume 5. Issue 1. Pages 22-37. (2013). (In Persian)
<https://doi.org/10.22034/cpj.2023.392896.1188>
- [3] S. R. mousavi and M. R. Javaheri, "Investigation of Compressive and Flexural Strength of Polymer Concretes Based on Epoxy Resin Containing Polyvinyl alcohol and Polypropylene Fibers," Concrete Research, 16 2 (2023): 57-70, doi: 10.22124/jcr.2023.20833.1524
- [4] M. Piriai, M. Kamasi. "Evaluation of compressive strength and durability of fiber concrete containing polypropylene fiber material, polycarboxylate ether and E207". Tarbiat Modares Civil Engineering Journal. Volume 22. Number 6. Pages 135-149.
DOI: [10.22034/22.6.135](https://doi.org/10.22034/22.6.135)
- [5] A. Choubdar, A. Farajollahi, A. Ameli. "The effect of polypropylene fibers on the mechanical strength and durability of concrete containing converter slag". Journal of Transportation Research. Volume 18, Issue 3. Pages 133-152. (2022). (In Persian)
DOI: 10.22034/TRI.2021.137310
- [6] S. A. mousavi davoudi and M. H. khalilpasha, "A Study on the Structural Effects of Bagasse Sugar Cane Stem In Structural Concrete Mixture in Sulfate and Chloride Environments," Concrete Research, 13 3 (2020): 137-149, doi: 10.22124/jcr.2020.14357.1387
- [7] H. Shokrani, N. Bakhshi, A. Roghani Zad. "Laboratory investigation of the properties of bagasse ash as a cement substitute in comparison with other pozzolanic materials". Esas Journal. Volume 11. Issue 24. Pages 72-88. (2019). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/550440/>
- [8] Maglad A, Amin M, Zeyad A, Tayeh B, Agwa I. 2023. Engineering properties of ultra-high strength concrete containing sugarcane bagasse and corn stalk ashes. Journal of Materials Research and Technology. Volume 23. Pages 3196-3218.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.197>.

- [9] Akbar A, Farooq F, Shafique M, Aslam F, Rayed A, Hisham A. 2021. Sugarcane bagasse ash-based engineered geopolymer mortar incorporating propylene fibers. Journal of Building Engineering. Volume 33. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101492>.
- [10] Kumar A, Gupta A. 2021. Investigation of the effect of bagasse ash, hooked steel fibers and glass fibers on the mechanical properties of concrete. Materialstoday:Proceedings. Volume 44. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.711>.
- [11] Dhawan A, Gupta N, Goyal R, Saxena K. 2021. Evaluation of mechanical properties of concrete manufactured with fly ash, bagasse ash and banana fibre. Materialstoday:Proceedings. Volume 44. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.006>.
- [12] Mangi S, Jamaluddin N, Ibrahim M. 2017. Utilization of sugarcane bagasse ash in concrete as partial replacement of cement. Cement and Concrete Research. Volume 97, Pages 41-49. DOI= 10.1088/1757-899X/271/1/012001
- [13] A. Baghaei, M. Dashti. "Investigation of the characteristics of fluids on the strength and fluidity of concrete", 8th Annual International Congress of Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Tehran. (2012). (In Persian) <https://civilica.com/doc/1655508/>

Investigating the Strength and Durability of Green Concrete Containing Bagasse Ash and Polypropylene Fibers

*Danial Nasr^{*1}, Rezvan Babagoli², Nader Dahaghin³*

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran

3- Master's degree graduate, Department of Civil Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

Abstract

Concrete is considered as a composite building material and is widely used in structures, so its mechanical properties and durability are always of interest to civil engineers. Various pozzolanic materials such as microsilica, fly ash and other industrial slags have been used in various researches to improve concrete properties and also reduce cement consumption in order to reduce costs, reduce energy and reduce environmental pollutants caused by cement production. In this research, specifically, from bagasse ash with the aim of reducing the environmental pollution caused by the production of cement through the emission of carbon dioxide gas and from polypropylene fibers with the aim of reducing shrinkage and also controlling deep and surface cracks in The final volume of concrete after hardening was used to improve the mechanical properties and durability of the concrete mixture. For this purpose of the research, polypropylene fibers with amounts (0, 1, 3 and 5%) and bagasse ash with amounts (0, 10, 20, 30, 40 and 50%) replaced the weight percentage of cement and super lubricant to 2.5% binder (cement material) was used. Also, the strength and durability of green concrete containing the above additives at the ages of 28 and 90 days were investigated. According to the assumptions, a total of 100 samples were made and tested for compressive strength, bending strength, water absorption and permeability. The obtained results showed that if polypropylene fibers and bagasse ash are used in green concrete at the same time, the design (CP3B20) i.e. adding 3% polypropylene fibers and 20% bagasse ash can be the best performance. in terms of compressive strength of 41.7 MPa against the compressive strength of the Shahid design of 32 MPa, bending strength of 14.9 MPa against the bending strength of the Shahid design of 5 MPa, water absorption at the rate of 0.9% in It has 5 percent water absorption of the control design and 320 coulomb permeability compared to the control design permeability of 3149 coulombs among the tested designs.

Keywords: Green Concrete, Polypropylene Fibers, Bagasse Ash, Resistance, Durability

نسخه
پیش
انتشار