

ارزیابی آزمایشگاهی و پیش‌بینی مبتنی بر یادگیری ماشین خواص مکانیکی ملات سیمان حاوی ژل میکرو سیلیس و پودر ضایعات سرامیکی

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

پریا رستمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران

چکیده

در این پژوهش، تأثیر جایگزینی جزئی سیمان با پودر سرامیک ضایعاتی و ژل میکروسیلیس بر خواص مکانیکی و دوام ملات سیمانی بررسی شد. نمونه‌های ملات با درصدهای مختلف جایگزینی (۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد پودر سرامیک ضایعاتی و ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد ژل میکروسیلیس) تهیه و مقاومت فشاری، کششی، خمشی، جذب آب، و نفوذپذیری آن‌ها ارزیابی شد. همچنین، مدل‌های یادگیری ماشین (Ensemble و Light GBM, Cat Boost) برای پیش‌بینی خواص مکانیکی ملات به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که جایگزینی ۱۰ درصد ژل میکروسیلیس مقاومت فشاری، کششی، و خمشی را بهبود می‌بخشد، اما افزایش آن به بیش از ۱۰ درصد مقاومت را کاهش می‌دهد. استفاده از ۱۰۰ درصد پودر سرامیک ضایعاتی در مقایسه با ۵۰ درصد، مقاومت مکانیکی را افزایش و جذب آب را کاهش داد. ترکیب بهینه شامل ۲۰ درصد ژل میکروسیلیس در ملات با ۵۰ درصد پودر سرامیک ضایعاتی و ۳۰ درصد ژل میکروسیلیس در ملات با ۱۰۰ درصد پودر سرامیک ضایعاتی بود که بهترین عملکرد را ارائه کرد. مدل Ensemble با ضریب تعیین (R^2) حدود ۹۹/۰ و میانگین مربعات خطای ۰/۱۵ مگاپاسکال، دقت بالایی در پیش‌بینی خواص مکانیکی داشت و نقش غالب پودر سرامیک ضایعاتی (۵۰ درصد) و ژل میکروسیلیس (۴۵ درصد) را در بهبود مقاومت و کاهش تخلخل تأیید کرد. این یافته‌ها نشان‌دهنده پتانسیل استفاده از این مواد برای تولید ملات‌های پایدار و مقاوم در راستای توسعه پایدار صنعت ساختمان است.

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

۱. مقدمه

امروزه بهره‌گیری از مواد بازیافتی و پسماندها در تولید ملات، به دلیل کاهش مخاطرات زیست‌محیطی و جلوگیری از اتلاف منابع اولیه، از اهمیت زیادی برخوردار است. ملات که یکی از مصالح پرکاربرد در صنعت ساختمان محسوب می‌شود، نقش اساسی در ساخت‌وساز دارد. برآوردها نشان می‌دهد که میزان مصرف سالانه ملات در جهان، به‌طور میانگین بیش از یک تن برای هر فرد است (Etxeberria et al, ۲۰۰۷) [۱].

از سوی دیگر، یکی از چالش‌های اساسی در جهان، مدیریت ضایعات و استفاده مجدد از آن‌هاست. در بسیاری از کشورها، سالانه حجم زیادی از پسماندها تولید می‌شود که بخش قابل توجهی از آن‌ها یا قابلیت بازیافت ندارند یا فرایند بازیافت آن‌ها مستلزم

* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

dnasr@khuif.ac.ir

مصرف انرژی بالا و ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی است. این مسئله خطرات ناشی از ضایعات را برای محیط زیست تشدید می‌کند. استفاده از مواد دورریز در تولید ملات، راهکاری مؤثر برای کاهش پسماندها و در عین حال بهبود ویژگی‌های ملات محسوب می‌شود (Wl burn et al , ۱۹۹۷) [۲].

استفاده از ضایعاتی مانند ملات، شیشه، آجر، کاشی، سرامیک، موزاییک و سرباره کوره بلند از روش‌های رایج به‌کارگیری مواد بازیافتی در تولید ملات است. این مواد می‌توانند جایگزین سیمان یا سنگدانه‌ها شوند. برخی از آن‌ها دارای خاصیت پوزولانی هستند و در بهبود عملکرد ملات نقش دارند، در حالی که برخی دیگر صرفاً به‌عنوان پرکننده یا سنگدانه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه مروری بر پودر سرامیکی و سرباره کوره بلند به‌عنوان جایگزین سیمان خواهیم داشت.

کاشی و سرامیک ساختمانی از پرکاربردترین مصالح در ساخت‌وساز محسوب می‌شوند. میزان تولید جهانی کاشی به ۸۵۰۰ میلیون مترمربع می‌رسد که این حجم، آن را در زمره پرمصرف‌ترین مواد در جهان قرار داده است. در ایران نیز سالانه حدود ۴۰۰ میلیون مترمربع کاشی تولید می‌شود که این کشور را در رتبه پنجم تولید کاشی در جهان قرار می‌دهد. همچنین، تولید چینی بهداشتی در ایران حدود ۹۰ هزار تن برآورد شده است. ضایعات سرامیکی در چندین مرحله ایجاد می‌شوند. بخشی از این ضایعات در کارخانه‌ها، حین یا پس از فرآیند تولید، به دلیل خطاهای ساخت، اشتباهات انسانی یا استفاده از مواد اولیه نامناسب شکل می‌گیرد. بخشی دیگر در حین حمل‌ونقل و توزیع آسیب می‌بیند، اما عمده ضایعات ناشی از تخریب ساختمان‌ها و بقایای آن‌هاست. برآوردها نشان می‌دهد که حدود ۳ تا ۷ درصد از تولید روزانه سرامیک در جهان به‌صورت ضایعات در می‌آید، که در کنار پسماندهای حاصل از تخریب سازه‌ها، سالانه به میلیون‌ها تن می‌رسد. از آنجاکه این مواد قابلیت بازگشت به چرخه تولید را ندارند، معمولاً بدون استفاده باقی می‌مانند و به‌عنوان زباله ساختمانی، منجر به آلودگی محیط‌زیست و خسارات زیست‌محیطی می‌شوند (Meyer et al , ۲۰۰۹) [۳].

از سوی دیگر، میکروسیلیس که به‌عنوان یک پوزولان مصنوعی شناخته می‌شود، دارای مقدار زیادی سیلیس، در حدود ۸۵ تا ۹۵ درصد است. با توجه به این ویژگی‌ها، میکروسیلیس هم به‌عنوان یک ماده پرکننده مؤثر که منافذ بین ذرات سیمان را کاهش می‌دهد و هم به‌عنوان یک پوزولان بسیار فعال مورد استفاده قرار می‌گیرد. خاصیت پوزولانی این ماده در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ شناسایی شد و از حدود ۳۰ سال پیش، استفاده از آن در ملات در کشورهای اسکانندیناوی، به‌ویژه نروژ، رواج یافته است. ثابت شده است خاصیت سیمانی یا میزان واکنش‌پذیری میکروسیلیس بین ۴ تا ۵ برابر سیمان پرتلند معمولی است. این بدین معناست که مقدار زیادی از سیمان پرتلند را می‌توان با مقدار کمی از دوده سیلیس جایگزین کرد به طوری که ملات همچنان مقاومت مورد نظر را داشته باشد (Newnan et al , ۲۰۰۳) [۴].

استفاده از میکروسیلیس در ملات با هدف بهبود برخی از ویژگی‌های آن صورت می‌گیرد. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به کاهش جداشدگی و آب‌انداختگی، بهبود قابلیت پرداخت، کاهش خزش، کاهش تراوایی و جذب آب، کاهش واکنش قلیایی سنگدانه‌ها و افزایش مقاومت در برابر حملات سولفاتی اشاره کرد (Steven et al , ۲۰۰۵) [۵].

ژل میکروسیلیس ماده افزودنی اصلاح شده پیشرفته بر پایه پلی‌کربوکسیلات اتر، متشکل از پودر میکروسیلیس، ابر روان‌کننده و مواد دافع آب و الیاف پلی‌پروپیلن می‌باشد که برای ساخت انواع ملات‌های توانمند، نفوذ ناپذیر و پردوام مورد استفاده قرار می‌گیرد. ژل میکروسیلیس یک سوپر پوزولان است و تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش مقاومت، دوام و دیگر خواص ملات دارد. ژل میکروسیلیس موجب افزایش تراکم ملات و همچنین افزایش مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی ملات خواهد شد (رفیعی، ۱۳۹۴) [۶].

جوکار و رحمانی [۷] در پژوهشی درباره استفاده از میکروسیلیس در ملات، مشخص شد که در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و نانوسیلیس، پس از عمل‌آوری و انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و درصد جذب آب، ملات‌هایی با مقاومت فشاری بسیار بالا و حداقل میزان مصرف سیمان تولید شده است. بر اساس این تحقیق، نمونه‌های با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر که حاوی ۳۲۵ کیلوگرم مواد سیمانی شامل میکروسیلیس بودند، مقاومت فشاری ۲۷٫۵ مگاپاسکال بدست آمد که در مقایسه با ملات‌های معمولی، مقاومت قابل توجهی محسوب می‌شود. همچنین، میزان جذب آب ۲۴ ساعته این نمونه‌ها برابر با ۰٫۵۴ درصد ثبت شد که نشان‌دهنده تخلخل بسیار پایین در مقایسه با ملات‌های معمولی است.

در پژوهشی که توسط ایران‌پور و همکاران [۸] انجام شد، تأثیر افزودن میکروسیلیس بر مقاومت فشاری و زمان گیرش اولیه ملات مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش میکروسیلیس موجب بهبود مقاومت فشاری کوتاه‌مدت (۲۸ روزه) در نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب می‌شود، اما تأثیر قابل توجهی بر مقاومت بلندمدت (۴۰۰ روزه) ندارد. همچنین، افزودن میکروسیلیس که موجب افزایش چشمگیر مقاومت مکانیکی می‌شود، باعث افزایش مقاومت کششی و دوام ملات در برابر یخبندان می‌گردد. علاوه بر این، افزودن حدود ۱۰ درصد میکروسیلیس نسبت به وزن سیمان، زمان گیرش اولیه ملات را افزایش می‌دهد.

در پژوهشی که توسط توکلی و همکاران [۹] انجام شد، اثر کاشی‌های ضایعاتی آسیاب‌شده بر ملات مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این مواد از طریق آزمایش‌های مختلف ارزیابی شده و خواص پوزولانی آن‌ها با استانداردهای موجود مقایسه گردید. پس از تأیید خواص پوزولانی، پودر کاشی در مقادیر ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ درصد جایگزین سیمان شد و مقاومت فشاری نمونه‌ها در بازه‌های عمل‌آوری ۷ تا ۹۱ روزه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که استفاده از کاشی ضایعاتی تا ۲۰ درصد، تأثیر منفی بر مقاومت فشاری ملات ندارد.

در پژوهشی که توسط افضل‌ی و همکاران [۱۰] انجام شد، تأثیر افزودن میکروسیلیس بر مقاومت فشاری و زمان گیرش اولیه ملات مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، شش نمونه با درصدهای مختلف میکروسیلیس (۰، ۳، ۶، ۱۰، ۱۵ و ۲۰) ساخته شد. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری نشان داد که با افزایش مقدار میکروسیلیس در ملات، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. همچنین، زمان گیرش اولیه نمونه‌ها با استفاده از روش مقاومت در برابر نفوذ اندازه‌گیری شد و مشخص گردید که با افزایش درصد میکروسیلیس، زمان گیرش اولیه نیز افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که این زمان از ۳٫۳۵ دقیقه در نمونه فاقد میکروسیلیس به ۸ دقیقه در نمونه حاوی ۲۰ درصد میکروسیلیس رسید.

در پژوهشی که توسط بلوچی و همکاران [۱۱] انجام شد، تأثیر پوزولان را بر مقاومت فشاری و خمشی ملات‌های با مقاومت بالا با نسبت آب به سیمان ثابت ۲۶ درصد و نسبت میکروسیلیس ثابت بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که نمونه‌های حاوی پوزولان نسبت به نمونه‌های شاهد، افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری و خمشی داشتند.

در پژوهشی که توسط آتش‌بند و همکاران [۱۲] انجام شد، تأثیر میکروسیلیس را بر سیمان تیپ ۱ بررسی شد. در این مطالعه، نمونه‌هایی با سیمان تیپ ۱ فارس نو به همراه درصدهای مختلف میکروسیلیس و نمونه‌های شاهد تهیه شد و برای تعیین زمان گیرش از روش استاندارد ASTM C ۸۲-۱۹۱ و برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری از روش استاندارد ASTM C ۱۰۹۹۰-با استفاده از نمونه‌های مکعبی ۵×۵ سانتی‌متر استفاده گردید. نتایج نشان داد که افزودن میکروسیلیس می‌تواند زمان گیرش سیمان تیپ ۱ را کاهش دهد. علاوه بر این، درصدهای مختلف میکروسیلیس بر مقاومت این سیمان در دو حالت با و بدون استفاده از فوق‌روان‌کننده تأثیر مثبت داشت و بهبود مقاومت را نشان داد.

در پژوهشی که توسط توکلی و همکاران [۱۳] انجام شد، نشان داده شد که با توجه به کاربرد گسترده ملات و سازه‌های ملاتی و همچنین استفاده روزافزون از افزودنی‌ها در ملات، انجام تحقیقات در این زمینه از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق، با طراحی و ساخت ملات با مقاومت بالا حاوی نانوسیلیس، میکروسیلیس و متاکائولن، اثرات و خواص این مواد در ملات حاوی سیمان تپ ۲ مورد بررسی قرار گرفت و خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری، خمشی و کششی در سنین مختلف آزمایش شد. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی ملات‌های حاوی این مواد نسبت به نمونه‌های شاهد بهبود یافته است، به طوری که این بهبود در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس به دلیل پر کردن بهتر خلل و فرج ملات در مقیاس نانومتر بیشتر از سایر نمونه‌ها بود.

در پژوهشی که توسط کمرودی و همکاران [۱۴] انجام پذیرفت، خواص پوزولانی سرامیک و تأثیرات آن بر مقاومت فشاری پرداخته شد. نمونه‌ها در پنج طرح اختلاط مختلف برای سنین ۷، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روزه ساخته شدند، به طوری که برای هر سن سه نمونه و در مجموع ۶۰ نمونه تهیه شد. در تمامی طرح‌های اختلاط، نسبت آب به سیمان برابر با ۰٫۵۵ در نظر گرفته شده و نمونه‌ها در مکعب‌های $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متری ساخته شدند. نتایج نشان داد که استفاده از سرامیک ضایعاتی تا ۲۰ درصد وزن سیمان، قابل قبول است و پس از آن، با کاهش مقاومت مواجه خواهیم شد. بنابراین، محدوده مناسب برای استفاده از این پوزولان تا ۲۰ درصد وزن سیمان مؤثر خواهد بود و این رفتار پوزولانی در سنین بالای ملات خود را نشان می‌دهد.

در پژوهشی که توسط صدرممتازی و مدنی [۱۵] انجام شد، افزایش مقاومت مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی با استفاده از دو عامل میکروسیلیس به عنوان پوزولان و الیاف پلی‌پروپیلن برای مسلح کردن این کامپوزیت‌ها پرداخته شد. در این تحقیق، ۱۶ طرح اختلاط با مقادیر مختلف میکروسیلیس (۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) و الیاف پلی‌پروپیلن با نسبت‌های حجمی (۰، ۰٫۱، ۰٫۳ و ۰٫۵ درصد) ساخته شد و آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی ناشی از خمش، چگالی، جذب آب و درصد تغییرات طولی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزودن میکروسیلیس به مقدار ۱۰ درصد وزنی سیمان و الیاف پلی‌پروپیلن به مقدار ۰٫۳ درصد حجمی ملات، بهترین نتایج مقاومت فشاری و خمشی در سنین بالا حاصل می‌شود و اضافه کردن بیش از این مقادیر منجر به افت مقاومت می‌شود.

در پژوهشی که توسط توکلی و حیدری [۱۶] انجام پذیرفت، خواص پوزولانی کاشی‌های ضایعاتی بررسی شد. پس از تأیید خواص پوزولانی، پودر کاشی با مقادیر مختلف در ملات استفاده شد و خواص ملات حاوی این پوزولان اندازه‌گیری گردید. در بخش دیگری از آزمایش، خواص ملات حاوی پوزولان کاشی ضایعاتی به همراه میکروسیلیس بررسی شد و اثر هم‌زمان این دو ماده مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاشی ضایعاتی دارای خواص پوزولانی مطلوبی است و تا ۲۰ درصد استفاده در ملات، تأثیر منفی قابل توجهی در عملکرد ملات ندارد. همچنین، استفاده هم‌زمان میکروسیلیس به همراه پوزولان کاشی تأثیر دوچندان دارد و میکروسیلیس می‌تواند نقص احتمالی ناشی از مصرف پوزولان کاشی را به خوبی پوشش دهد.

در پژوهشی که توسط فاطمی و همکاران [۱۷] انجام شد، ترکیبی از نانوسیلیس و ژل میکروسیلیس به کار گرفته شده در ملات بررسی شد و تأثیر این دو فرآورده را بر خواص مکانیکی سیمان مورد بررسی قرار گرفتند. در این مقاله ابتدا درصدهای ۰٫۱، ۰٫۳، ۰٫۵، ۰٫۷ و ۱ از نانوسیلیس و ژل میکروسیلیس مورد بررسی قرار گرفت. سپس بهترین ترکیب این دو ماده مورد آزمایش قرار گرفت و تأثیر ترکیب آن را بر افزایش مقاومت فشاری و کششی ملات سیمان مورد بررسی قرار دادند و مشاهده گردید ترکیب این دو ماده باعث افزایش مقاومت کششی و فشاری ملات سیمان می‌گردد.

در پژوهشی که توسط پورمند و همکاران [۱۸] انجام شد، اثر ضایعات کاشی و سرامیک در ملات سیمان بررسی شد. برای این منظور، ابتدا ضایعات کاشی و سرامیک با درصدهای مختلف ۵ تا ۵۰ درصد، یکبار به عنوان افزودنی و یکبار به عنوان جایگزین ماده چسباننده به ملات اضافه شدند. سپس با انجام آزمایش بر روی همه ترکیبات، برخی از ویژگی‌های ملات سیمان از جمله تعیین

غلظت نرمال و زمان گیرش اولیه و نهایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن این مواد زمانی که جایگزین سیمان شوند، تا ترکیب ۳۵ درصد میزان غلظت نرمال را افزایش داده و بعد از آن تا ترکیب ۵۰ درصد ثابت می ماند. اما در حالتی که این مواد به عنوان افزودنی در ملات استفاده شوند، تا ترکیب ۱۵ درصد میزان غلظت نرمال ثابت و برابر نمونه شاهد بوده و در ترکیبات بعدی به صورت یک در میان افزایش می یابد. همچنین نتایج نشان داد که زمان گیرش اولیه و نهایی در تمام ترکیبات، چه در حالت جایگزین و چه در حالت افزودنی، به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. بنابراین از این ماده می توان به عنوان دیرگیرکننده در ملات استفاده کرد.

در پژوهشی که توسط صدرممتازی و همکاران [۱۹] انجام شد، تأثیر جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد وزن سیمان سرباره آهن گدازی و ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد میکروسیلیس به صورت ترکیبی به عنوان پوزولان های مصنوعی بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملات های سیمانی بررسی و نتایج آن با ملات کنترل مقایسه شد. این مطالعات آزمایشگاهی به دو بخش بررسی خصوصیات فیزیکی و بررسی خصوصیات مکانیکی تقسیم شده است. خصوصیات فیزیکی شامل جذب آب، چگالی حجمی، تخلخل ظاهری و خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری و مقاومت خمشی می باشد. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که استفاده از میکروسیلیس و سرباره آهن گدازی به عنوان جایگزین وزنی سیمان موجب بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملات های سیمانی می شود.

در پژوهشی که توسط لطفی و همکاران [۲۰] انجام شد، ملات مورد استفاده از ۱ قسمت وزنی سیمان و ۲/۷۵ قسمت وزنی ماسه ساخته شده، ارزیابی شد. ژل میکروسیلیس الیافدار نیز به میزان ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد وزن سیمان مصرفی به کار برده شد. نمونه ها پس از عمل آوری به مدت ۷، ۲۸ و ۴۵ روز تحت آزمایش های مقاومت فشاری، کششی و خمشی قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن است که اضافه کردن ۶ درصد ژل میکروسیلیس الیافدار، سبب افزایش مقاومت کششی ملات خواهد شد و در سایر درصد ها شاهد کاهش مقاومت بوده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات حاوی ۲ و ۴ درصد ژل میکروسیلیس الیافدار به ترتیب ۲/۱ و ۷ درصد افزایش یافت. همچنین مقاومت ۴۵ روزه همین ملات به ترتیب ۶ و ۲۲ درصد افزایش یافت. مقاومت خمشی ۲۸ روزه ملات حاوی ۲ و ۶ درصد ژل میکروسیلیس الیافدار نیز به ترتیب ۱/۸ و ۵ درصد افزایش یافته است.

در پژوهشی که توسط اسکندری و رضایی [۲۱] انجام شد، ۱۶ طرح اختلاط ملات خودتراکم برای سیمان تیپ یک با مقاومت ۴۲۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع بررسی شد. در این راستا با محاسبه مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان و درصد بهینه فوق روان کننده با میزان مختلف نانوسیلیس و میکروسیلیس انجام شده است. براساس آزمایش ها و تحلیل آن ها میزان بهینه میکروسیلیس و نانوسیلیس توأم و جدا از هم ارائه گردیده است. لازم به ذکر است که روند روبه افزایش مقاومت فشاری برای نمونه های ۳، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ در جهت تحلیل تأثیر نانو و میکروسیلیس توأم بر مقاومت فشاری ملات سیمان انجام شده است. در انتها نتایج با روش های متفاوت پیش بینی مقاومت فشاری ملات سیمان که دارای ذرات نانو و میکروسیلیس می باشند با داده های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت.

در پژوهشی که توسط حیدری و همکاران [۲۲] انجام شد، اثر ضایعات کاشی و سرامیک در ملات سیمان ارزیابی شد. برای این منظور ابتدا ضایعات کاشی و سرامیک با درصدهای مختلف ۵ تا ۵۵ درصد یکبار به عنوان افزودنی و یکبار با عنوان جایگزین ماده چسباننده به ملات اضافه شده و سپس با انجام آزمایش بر روی همه ی ترکیبات، مقاومت فشاری نمونه ها اندازه گیری شده است. نتایج نشان داد تأثیر این مواد زمانی که جایگزین سیمان شوند در ترکیب ۵ درصد افزایش مقاومت و در سایر ترکیبات مقاومت کاهش یافته، به طوری که این کاهش در ترکیبات ۵ تا ۵۵ درصد، کم تر از ۲۵ درصد است و در حالتی که به عنوان افزودنی به ملات سیمان اضافه شوند در همه ی ترکیبات مقاومت کاهش یافته اما تا ترکیب ۵۵ درصد این کاهش کم تر از ۲۵ درصد است.

در پژوهشی که توسط آنی و اونا [۲۳] انجام پذیرفت، نمونه‌هایی از ملات با درصد جایگزینی پودر کاشی به جای سیمان به مقادیر ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد بررسی و این نمونه‌ها را تحت آزمایش مقاومت فشاری و خمشی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش زمان عمل‌آوری، میزان رشد نمونه‌هایی که دارای مقدار کاشی بیشتر هستند، بیشتر از نمونه‌هایی است که دارای مقدار کمتری از کاشی می‌باشند. بر اساس این نتایج، نتیجه گرفتند که پودر کاشی دارای خواص پوزولانی است و استفاده از این پوزولان به مقدار جایگزینی ۴۰ درصد و یا حتی بیشتر نیز توصیه شده است.

در پژوهشی که توسط تورگال و جلالی [۲۴] انجام شد، استفاده از پودر کاشی به عنوان جایگزینی برای بخشی از سیمان بررسی شد. در این تحقیق، مواد ابتدا به صورت پودر در آمده و به میزان ۲۰ درصد جایگزین سیمان با پودر سرامیکی شدند و نتایج آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که استفاده از مواد پوزولانی باعث کاهش جزئی در مقاومت می‌شود، که با توجه به کاهش مصرف سیمان در ملات، این کاهش طبیعی به نظر می‌رسد. این تفاوت از ابتدا چشمگیر بود، اما با توجه به خصوصیات پوزولانی مواد سیمانی، به تدریج کاهش یافت و پس از ۹۰ روز عمل‌آوری به مقاومتی در حدود ۸۷ تا ۹۱ درصد از مقاومت نمونه شاهد رسید. این کاهش برای یک ماده پوزولانی قابل قبول به حساب می‌آید. پارامتر دیگر اندازه‌گیری شده در این تحقیق، میزان نفوذپذیری آب بود که نشان داد نفوذپذیری در بیشتر موارد کاهش یافته و تا حدود ۲۱ درصد کاهش یافته است. همچنین ویژگی‌هایی چون نفوذ هوا، کلرها و دیگر عوامل مخرب بررسی شد که نشان داد ماده پوزولانی مورد نظر موجب بهبود این خصوصیات در ملات شده است.

در پژوهشی که توسط حیدری و توکلی [۲۵] انجام شد، استفاده از پودر سرامیک بعنوان جایگزینی درصدی از سیمان بررسی شد. درصدهای بالای جایگزین تأثیرات بسیار بدی بر روی نمونه داشته است که با اضافه نمودن نانوسیلیس آن را بهبود بخشیدند. در فاز اول تحقیق، استفاده از سرامیک ضایعاتی به عنوان پوزولان در ملات مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های ملات با جایگزینی ۱۰ تا ۴۰ درصد از سرامیک ساخته شد. در فاز دوم، تأثیر هم‌زمان ۱ تا ۰٫۵ درصد نانوسیلیس و ۱۰ تا ۲۵ درصد پودر سرامیک مورد آزمایش قرار گرفت. در تمامی موارد، آزمایش‌های مقاومت فشاری و جذب آب انجام شد. نتایج نشان داد که اضافه کردن سرامیک تا ۲۰ درصد تأثیری منفی قابل توجه بر مقاومت فشاری ملات ندارد. علاوه بر این، استفاده از هر مقدار پودر سرامیک منجر به کاهش ظرفیت جذب آب ملات می‌شود. همچنین، افزودن هم‌زمان نانوسیلیس و پودر سرامیک باعث بهبود مقاومت فشاری و کاهش ظرفیت جذب آب می‌شود. بنابراین، نانوسیلیس قادر است اثرات منفی پودر سرامیک بر خواص ملات را بهبود بخشد.

در پژوهشی که توسط بالدینو و همکاران [۲۶] انجام شد، خصوصیات رئولوژیکی خمیر سیمان تازه تحت تأثیر رئولیت مصنوعی، سنگ آهک و میکروسیلیس بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که ملات‌های نسل جدید اغلب با استفاده از مواد افزودنی خاص خواصی به دست می‌آورند که به شدت ویژگی‌های رئولوژیکی خمیر سیمان تازه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این مطالعه، نوسانات کم‌دامنه به منظور بررسی اثرات رئولیت مصنوعی، سنگ آهک و میکروسیلیس بر خواص رئولوژیکی خمیر تازه انجام شد. آزمون رفت و برگشت فرکانس نشان داد که رئولیت، به ویژه در غلظت‌های پایین، قادر به بهبود استحکام مکانیکی و افزایش رفتار شبه‌مایع است.

در پژوهشی که توسط چاکی و سوفیانی [۲۷] انجام شد، اثر دوده سیلیس را بر خواص فیزیکی و مکانیکی ملات‌های بازیافتی بررسی شد. در این مطالعه، خواص ملات از طریق آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب و سرعت پالس فراصوتی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که استفاده از ۱۰ درصد دوده سیلیس به عنوان جایگزین سیمان در ملات سنگدانه بازیافتی موجب بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی ملات می‌شود.

در پژوهشی که توسط الشا و همکاران [۲۸] انجام شد، اثر جایگزینی ۲۰ درصد سیمان پرتلند با بازالت، به عنوان پوزولان طبیعی، بر خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان مخلوط را در مقایسه با میکروسیلیس، گرانول سرباره کوره بلند و سنگ آهک بررسی شد. نتایج نشان داد که بازالت نسبت به سایر مواد پوزولانی تأثیر بیشتری بر هیدراتاسیون سیمان دارد.

در پژوهشی که توسط ونگو و همکاران [۲۹] انجام شد، تأثیر نفوذ خاکستر بادی با کلسیم بالا و میکروسیلیس را به عنوان اجزای سیمان مخلوط دوجزئی و سه جزئی در مقاومت فشاری و مقاومت در برابر کلرید ملات خود متراکم بررسی شد. خاکستر بادی با کلسیم بالا (۷۰-۴۰ درصد) و میکروسیلیس (۱۰-۰ درصد) به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد وزنی استفاده شد. در این تحقیق مقاومت فشاری، چگالی، حجم فضای نفوذ آب و جذب آب ملات مورد بررسی قرار گرفت و همچنین مقاومت کلرید با اندازه گیری جریان عبوری تعیین شد. نتایج نشان داد که استفاده از مخلوط سیمان دوجزئی با سطح بالای خاکستر بادی باعث کاهش مقاومت فشاری در تمام سنن آزمایش (۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز) می شود. با این حال، سیمان مخلوط سه جزئی با خاکستر بادی و میکروسیلیس پس از ۷ روز مقاومت فشاری بالاتری نشان داد و در مقایسه با سیمان دوجزئی خاکستر بادی با سطح جایگزینی مشابه، مقاومت فشاری بالاتری داشت. با استفاده از این سیمان مخلوط سه جزئی، مقاومت فشاری بالای ۶۰ مگاپاسکال (ملات با مقاومت بالا) حاصل می شود. همچنین، خاکستر بادی باعث کاهش جریان عبوری از ملات خود متراکم می شود و با افزایش میزان خاکستر بادی، این کاهش بیشتر می شود، هرچند که جذب آب ملات افزایش می یابد. علاوه بر این، در مقایسه با سیمان مخلوط دوجزئی، سیمان مخلوط سه جزئی که حاوی خاکستر بادی بود، جریان عبوری کمتری از ملات خود متراکم داشت. این نتایج نشان می دهند که خاکستر بادی و میکروسیلیس می توانند مقاومت ملات در برابر نفوذ یون کلرید را بهبود بخشند.

در پژوهشی که توسط لیم و همکاران [۳۰] انجام شد، اثرات ضایعات پودر سرامیک بر روی خواص مکانیکی و ریزساختاری ملات مورد ارزیابی قرار گرفت. این مطالعه به بررسی استفاده از نانوذرات در ملات به عنوان جایگزین سیمان پرداخت. چهار مخلوط حاوی نانوذرات سرامیکی (۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد) تهیه شد. نمونه های ملات از نظر مقاومت فشاری مورد آزمایش قرار گرفتند. نقش پودر ضایعات سرامیکی از طریق آنالیز ریزساختار از نظر میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراش اشعه ای کس، آنالیز ترموگرافی و آنالیز حرارتی تفاضلی بررسی شد. نتایج نشان داد که جایگزینی نانوذرات به ماتریس ملات به طور قابل توجهی مقاومت فشاری را افزایش داده است. در ۹۰ روز، مقاومت فشاری در محدوده ۴۴،۷-۵۸،۸ مگاپاسکال بود. نتایج از طریق آزمون ریزساختار تایید شد. ملات با ۴۰ درصد جایگزینی سرامیکی عملکرد بهتری از نظر توده C-S-H از سیلیس فعال حاوی محتوای بیش از حد هیدروکسید کلسیم نشان داد.

در پژوهشی که توسط منصوری و همکاران انجام شد، تأثیر پودر ضایعات سرامیکی (CVP)، میکروسیلیس (MS) و الیاف فولادی (۳SF) بر ملات خود متراکم مورد ارزیابی قرار گرفت. CVP در نسبت های ۱۰ و ۲۰ درصد و MS در ۱ و ۵ درصد وزنی سیمان جایگزین سیمان شدند. علاوه بر این، SF در نسبت های ۰،۵ و ۱ درصد سیمان اضافه شد. برای تعیین کارایی کامپوزیت های تازه، قطر جریان اسلامپ کوچک و زمان جریان قیف مینی V انجام شد. آزمون های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، جذب آب، مقاومت الکتریکی و انقباض خشک شدن بر روی ملات های سخت شده انجام شد. برای ارزیابی ریزساختار از تکنیک میکروسکوپ الکترونی روبشی (۴SEM) استفاده شد. نتایج نشان داد که CVP خواص مکانیکی را حدود ۲۰٪ کاهش و نفوذپذیری را تا حدود ۱۴٪ افزایش داد. با این حال، گنجاندن ذرات میکروسیلیس خواص را به طرز چشمگیری بهبود بخشید. مقاومت فشاری با گنجاندن MS حدود ۳۰ درصد افزایش یافت. همچنین مشاهده شد که افزودن الیاف از ۰،۵٪ به ۱٪ استحکام خمشی را افزایش داد. این بهبود در نمونه هایی با محتوای

می‌کروسیلیس بیشتر مشهودتر بود. می‌توان گزارش داد که با گنجاندن الیاف می‌کروسیلیس و فولاد، پیوند بین خمیر سیمان و الیاف ایجاد شد. جای‌گزینی می‌کروسیلیس منجر به افزایش حدود ۹۹ درصدی مقاومت الکتریکی در نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد پودر ضایعات سرامیکی شد. مطالعات ریزساختار افزایش قابل توجه چگالی و یکنواختی محصولات هیدراتاسیون را در حضور ذرات می‌کروسیلیس تایید کرد.

در تحقیقی که توسط محیط و همکاران انجام شد [۳۱]، ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکی و ریزساختاری ملات‌های غوطه‌ور در محلول اسید هیدروکلریک را در نظر گرفته است. سیمان تا حدی با پودر ضایعات سرامیکی (CWP) در مقادیر ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد جای‌گزین شده است. برای شبیه‌سازی رسوبات محلول اسید هیدروکلریک، ملات‌های آماده شده حاوی محتوای مختلف CWP به عنوان جای‌گزین سیمان در محلول اسید هیدروکلریک ($\text{pH} = 2$) به مدت ۱۴، ۲۸، ۴۲ و ۵۶ روز غوطه‌ور شدند. این مقاله مقاومت فشاری و خمشی، آزمایش تلفات جرمی و بازرسی بصری نمونه‌های ملات را بررسی می‌کند. آزمایش‌های پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌ها نیز به منظور بررسی ویژگی‌های ریز ساختار ملات انجام شد. ملات‌هایی که حاوی ۵٪ CWP به عنوان جای‌گزین سیمان بودند، بالاترین مقاومت مکانیکی را در مقایسه با سایر ملات‌ها در ۱۴، ۲۸، ۴۲ و ۵۶ روز عمل‌آوری اسیدی ارائه کردند. الگوهای XRD نشان داد که نمونه شامل ۵٪ CWP به عنوان جای‌گزین سیمان دارای شدت کمتری از قله‌های پورتلندیت (Ca(OH)_2) نسبت به نمونه شاهد است. تصاویر SEM نشان داد که استفاده از CWP به عنوان جای‌گزین سیمان باعث کاهش منافذ و حفره‌ها می‌شود. نتایج نشان داد که استفاده از CWP به عنوان جای‌گزین سیمان، مقاومت اسیدی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد.

پژوهشی که توسط ابراهیمی و همکاران انجام شد [۳۲]، بررسی تجربی را در مورد اثر پودر ضایعات سرامیکی (CWP) به عنوان یک جای‌گزین چسبنده در ملات‌های بنایی بر پایه سیمان و آهک گزارش می‌کند. به عنوان بخشی از یک بررسی تجربی جامع، نمونه‌های سیمان و آهک استاندارد به ترتیب با نرخ‌های جای‌گزینی ۰-۶۰٪ و ۰-۸۰٪ ساخته شدند و تا ۹۰ روز در حالت مرطوب قرار گرفتند. خواص مورد بررسی شامل استحکام فشاری، استحکام کششی، چگالی ظاهری خشک و حفره‌های نفوذپذیر، انقباض خشک شدن و pH می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده، مقاومت فشاری و کششی ملات‌های سیمانی حاوی CWP نه تنها تا ۵۰ درصد جای‌گزینی اثر نامطلوب قابل توجهی نداشت، بلکه در درصد جای‌گزینی ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش یافت. برای ملات آهک هیدراته، مقاومت فشاری و کششی به طور مداوم تا ۷۰٪ جای‌گزینی آهک با CWP افزایش می‌یابد. این نتایج توسط نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) پشتیبانی شد. این یافته‌ها می‌توانند کاربرد مفیدی از CWP را به عنوان جای‌گزینی بایندر پایدار در ساخت و ساز معرفی کنند که منجر به کاهش ردپای کربن مصالح ساختمانی و اثرات نامطلوب زیست‌محیطی دفع CWP در محل‌های دفن زباله می‌شود.

در پژوهشی که توسط الاتیف و همکاران انجام شد [۳۳]، توسعه بتن ژئوپلیمری با عملکرد فوق‌العاده بالا با استفاده از ضایعات ریز سرامیکی (FCW) به عنوان یک سنگدانه ریز جزئی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق، ۱۲ مخلوط طراحی، تهیه و آزمایش شد تا تأثیر ضایعات سرامیکی را به عنوان جای‌گزینی جزئی از سنگدانه‌های ریز تا ۲۲٫۵ درصد بر عملکرد بتن ژئوپلیمری با عملکرد فوق‌العاده بالا ارزیابی کند. خواص تازه، خواص مکانیکی، دوام و مقاومت در برابر دمای بالا مواد توسعه یافته مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی زیست‌محیطی بتن ژئوپلیمری با عملکرد فوق‌العاده بالا حاوی FCW نیز از طریق ارزیابی چرخه حیات آنالیز شده است. نتایج تجربی نشان داد که الحاق FCW زمان

گی‌رش را تسریع کرده و اسلامپ بتن تازه را کاهش می‌دهد. برای بتن سخت شده تا حدودی بر خواص مکانیکی اثر نسبتاً منفی دارد. مقاومت فشاری به ۱۲۳ مگاپاسکال با ادغام ۲۲٫۵٪ FCW کاهش یافت. با این حال، با درصد جای‌گزینی کمتر، ۷٫۵ و ۱۵٪، بتن مقاومت بهتری نسبت به ۲۲٫۵٪ نشان داد. این کاهش ممکن است به پیوند پایین بین ژل ژئوپلیمر و ذرات سرامیکی نسبت داده شود. علاوه بر این مشخص شد که جذب بتن ژئوپلیمری با عملکرد فوق‌العاده بالا همزمان با افزایش محتوای FCW افزایش می‌یابد. برای مقاومت در برابر دمای بالا، گنجاندن ضایعات ریز سرامیکی افزایش استحکام باقی‌مانده را در مقایسه با مخلوط کنترل پس از قرار گرفتن در معرض ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد. بررسی می‌کروسکوپ نشان داد که نمونه‌هایی که از سنگدانه‌های سرامیکی استفاده می‌کنند، پس از قرار گرفتن در دمای بالا، دارای ریز منافذ و ترک‌های کمتری هستند. در نهایت، استفاده از FCW می‌تواند انتشار کربن و مصرف انرژی را با اهداف اقتصادی پایین به ترتیب تا سطوح قابل قبول کاهش دهد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، ضایعات سرامیکی را می‌توان به‌عنوان منابع بالقوه برای تولید بتن ژئوپلیمری با عملکرد فوق‌العاده بالا سازگار با محیط‌زیست با بهبود مقاومت در برابر دماهای بالا و حداقل اثرات مضر بر خواص مکانیکی و دوام، به‌ینه کرد و مورد بهره‌برداری قرار داد.

در پژوهشی که توسط چن و همکاران [۳۴] انجام شد، استفاده از (CWP۷) پودر ضایعات ساخت و ساز) به عنوان جایگزین جزئی سیمان پرتلند در بتن سنگدانه بازیافتی (RAC۸) مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مطالعه، خواص مکانیکی، جذب، نفوذپذیری سریع یون کلرید، ریزساختار و ارزیابی‌های اکولوژیکی RAC حاوی CWP بررسی شدند. نتایج نشان داد که RAC حاوی CWP دارای استحکام کافی و مقاومت فشاری ۳۶٫۰۱ مگاپاسکال در ۵۶ روز است. در زمینه رفتارهای نفوذپذیری، استفاده از ۶۰٪ (RCA) سنگدانه بازیافتی) و ۱۰٪ CWP به‌طور همزمان موجب کاهش نفوذپذیری سریع کلرید و جذب آب RAC می‌شود. علاوه بر این، ترکیب CWP به‌طور قابل توجهی هزینه، مصرف انرژی حرارتی و انتشار دی اکسید کربن بتن را کاهش می‌دهد. بر اساس این یافته‌ها، کاربرد CWP در تولید محصولات ساختمانی پایدار و سازگار با محیط زیست جذاب است، چرا که نه تنها یک راهکار جایگزین برای استفاده مجدد از ضایعات ارائه می‌دهد، بلکه عملکرد بالاتری نیز دارد.

ضایعات سرامیکی (CW) در مطالعه ای که توسط آچاک و همکاران [۳۵] انجام شد، برای جای‌گزینی جزئی سنگدانه های درشت طبعی در بتن خود تراکم (SCC) استفاده شد. از آنجایی که قرار است SCC قوی و بادوام باشد، تلاش‌هایی برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی و رئولوژیکی آن و همچنین اثرات می‌کروسکیل (M) و الیاف پلی پروپیلن (الیاف PP) بر ویژگی‌های دوام آن (جذب حجمی و موی‌گری آب، مقاومت الکتریکی و سرعت پالس اولتراسونیک) انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد CW راندمان SCC را کاهش می‌دهد، در حالی که افزایش ویسکوزیته الیاف M و PP مقاومت آنها را در برابر تفکیک افزایش می‌دهد اما جریان پذیری و عبورپذیری آنها را کاهش می‌دهد. در مقایسه با نمونه شاهد، ۱۵٪ CW۵M۰P۰ بهترین مقاومت فشاری را در این مطالعه نشان داد که تقریباً ۲۱ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، ۳٪ CW۵M۰P۰ بالاترین مقاومت کششی و خمشی را نشان داد. دوام نمونه های SCC با افزودن CW تا حدودی کاهش یافت، در حالی که با افزودن الیاف M و PP افزایش یافت. ۳٪ CW۵M۰P۰ حدود ۱۶۸٪ افزایش در مقاومت الکتریکی در مقایسه با نمونه کنترل نشان داد. تجزیه و تحلیل تصویری می‌کروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که طرح‌های مخلوط با ضایعات سرامیکی دارای ITZ بالاتری هستند و زمانی که M به آن اضافه شد، نمونه‌ها متراکم‌تر و منسجم‌تر بودند. در تحقیقی که توسط پاتانکار و همکاران [۳۶] انجام شد، خواص بتن که از پودر شیشه به جای سنگدانه های ریز و دوده سیلیس به عنوان جای‌گزینی جزئی برای سیمان استفاده گردید، بررسی شد. مقاومت های فشاری، خمشی و

کشش‌ی نمونه های بتن پس از جای‌گزینی مقداری سی‌مان با این مواد زائد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که افزودن پودر شیشه و دوده سیلیس خواص مکانیکی بتن را افزایش می‌دهد، در حالی که اضافه کردن ضایعات سرامیکی اثر معکوس دارد. علاوه بر این، دود سیلیس و پودر شیشه بهتر از هر یک از مواد زائد به طور جداگانه کار می‌کنند. مخلوط بتن M_{40} که با جای‌گزینی ۱۰٪ سی‌مان با سی‌مان دوده سیلیسی، ۲۰٪ سنگدانه ریز با پودر شیشه و ۴۰٪ سنگدانه درشت با سنگدانه ضایعات سرامیکی تغیی‌ یافته بود، برای آزمایش استفاده شد. به منظور تعیین دوز جای‌گزینی مناسب، آزمایشات بر روی مقاومت فشاری، شکافی و خمشی بتن در روزهای ۷، ۲۸ و ۲۸ انجام شد. هنگامی که از سطوح جای‌گزینی ۲۰٪ استفاده می‌شود، ظرفیت باربری کلی تیرها تقریباً برابر با تیرهای معمولی است. این مطالعه نتیجه می‌گیرد که سنگدانه های سرامیکی خراش‌یده شده (SCA) در بتن ممکن است با سنگدانه های درشت طبعی جای‌گزین شوند.

در این راستا، استفاده از پودر سرامیک ضایعاتی و ژل میکروسیلیس به عنوان جای‌گزین‌های جزئی یا کامل سی‌مان در ملات، نه تنها به کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از انباشت ضایعات، بلکه به بهبود خواص مکانیکی و دوام ملات کمک می‌کند. با توجه به پتانسیل پوزولانی بالای این مواد، که از طریق واکنش با هیدروکسید کلسیم آزاد شده در فرآیند هیدراتاسیون سی‌مان منجر به تشکیل محصولات مقاوم‌تر مانند C-S-H می‌شود، امکان دستیابی به ملات‌هایی با مقاومت فشاری، کششی و خمشی بالاتر فراهم شده است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که ترکیب بهینه این مواد می‌تواند مقاومت‌های مکانیکی را تا ۵۱٫۴ مگاپاسکال (فشاری)، ۴٫۳ مگاپاسکال (کششی) و ۸٫۱ مگاپاسکال (خمشی) در شرایط عمل‌آوری استاندارد افزایش دهد، که با کاهش تخلخل و نفوذپذیری همراه است. از سوی دیگر، با توجه به تولید گسترده ضایعات سرامیکی در ایران و جهان، بازیافت این مواد می‌تواند به کاهش ردپای کربن و مصرف انرژی در صنعت ساخت‌وساز منجر شود. با این حال، چالش‌هایی مانند اثرات احتمالی جای‌گزینی بالای ۲۰ درصد بر کاهش مقاومت یا افزایش زمان گیرش اولیه همچنان نیازمند بررسی دقیق‌تر است. بدین منظور، این مطالعه با بهره‌گیری از مدل‌های یادگیری ماشین پیشرفته (مانند Ensemble و Light GBM، Cat Boost) به پیش‌بینی و بهینه‌سازی ترکیبات ملات پرداخته و تلاش دارد تا با تحلیل جامع داده‌های آزمایشگاهی، راهکارهای عملی و پایداری در طراحی ملات ارائه دهد. هدف اصلی، توسعه ملات‌هایی با کارایی بالا و سازگار با محیط‌زیست است که بتوانند نیازهای صنعت ساخت‌وساز مدرن را برآورده کنند، در حالی که به اصول توسعه پایدار پایبند باشند.

۲. مصالح و روش تحقیق

۲.۱. آب

کیفیت آب در ملات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا ناخالصی‌های موجود در آن می‌توانند بر فرایند گیرش سیمان تأثیر گذاشته و مشکلاتی ایجاد کنند. همچنین، آب نامناسب می‌تواند بر مقاومت ملات تأثیر منفی گذاشته و باعث بروز لکه‌هایی در سطح آن یا حتی زنگ زدن آرماتور شود. در بیشتر اختلاط‌ها، آبی که برای ملات استفاده می‌شود باید همانند آب شرب باشد. مواد جامد در چنین آبی به ندرت بیش از ۲۰۰۰ قسمت در میلیون خواهند بود و معمولاً کمتر از ۱۰۰۰ قسمت در میلیون است. این مقدار معادل ۰/۵ وزن سیمان برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ است. معیار قابل آشامیدن بودن آب برای اختلاط الزامی نیست و ممکن

است آبی که به عنوان آب آشامیدنی شناخته می‌شود، به دلیل داشتن درصد بالایی از یون‌های سدیم و پتاسیم که خطر واکنش قلیایی با دانه‌های سنگی را ایجاد می‌کند، برای ملات‌سازی مناسب نباشد. به طور کلی، هر آبی که pH آن بین ۶ تا ۸ باشد و طعم شوری نداشته باشد، می‌تواند برای ملات استفاده شود. [۳۷].

۲.۲. سیمان

از سیمان پرتلند (۳۲۵-۱) کارخانه اصفهان مطابق با استاندارد ایران به شماره ISIRI 389 تهیه شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی در جدول ۱ و ۲ به ترتیب نشان داده شده است. شکل شماتیک سیمان مورد استفاده در شکل ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سیمان

پارامتر فیزیکی	بلین (گرم بر سانتی‌مترمربع)	گیرش اولیه (دقیقه)	گیرش نهایی (دقیقه)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)				انبساط اتوکلاو %
				۲ روزه	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	
سیمان اصفهان	۳۳۰۰	۱۳۵	۱۹۵	۱۸۰	۲۳۱	۲۳۹	۴۴۷	۰/۱۱

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان

پارامتر شیمیایی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
	%	%	%	%	%	%	%	%
سیمان اصفهان	۲۱/۸	۵/۴۷	۳/۴	۶۱/۱	۲/۳	۲/۳	۰/۲۷	۰/۵۸



شکل ۱. سیمان مصرفی

۳.۲. ژل میکروسیلیس

ژل میکروسیلیس ترکیبی از میکروسیلیس خالص پوزولانی، فوق کاهنده پلیمری آب، الیاف پلی پروپیلن و سایر افزودنی های کمکی و پایدارکننده می باشد که به منظور بهبود خواص رئولوژیکی در حالت خمیری از جمله افزایش مقاومت های فشاری، کششی، خمشی و همچنین نفوذناپذیری ملات به آن افزوده می گردد.

میزان مصرف استرامین Complex-f بسته به شرایط طرح ملات بین ۴ تا ۱۰ درصد وزن سیمان می باشد. بهتر است که افزودنی با بخش ثانویه آب اختلاط در بچینگ به ملات اضافه گردد. همچنین این محصول دارای الیاف پلی پروپیلن است. طبق نظر کارخانه سازنده این محصول با استاندارد ASTM C1240 مطابقت کامل دارد.

مشخصات فیزیکی ژل میکروسیلیس الیاف دار در جدول ۳ آمده است. شکل ۲ ژل میکروسیلیس مورد استفاده را نشان می دهد.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی ژل میکروسیلیس الیاف دار

رنگ	وزن مخصوص	pH	میزان مصرف (%)	خمیر فیزیکی
خاکستری	۳۵/۱	۸ الی ۹	۴ تا ۱۰	کشسان



شکل ۲. ژل میکروسیلیس الیاف دار مصرفی

۴.۲. پودر سرامیک ضایعاتی

برای انجام آزمایشات مورد نیاز، نمونه ای از ضایعات کارخانه سرامیک اصفهان تهیه شد. ابتدا این نمونه در آسیاب فکی بزرگ پیش آسیاب گردید، سپس دوباره با آسیاب فکی کوچکتر آسیاب شد و در نهایت در آسیاب پر قدرت ایر-جت-میل آسیاب و آماده آزمایشات شد. نتایج حاصل از آزمایش اشعه پراش نشان داد که فاز اصلی تشکیل دهنده ماده مورد نظر آمورف است. برای استفاده از یک ماده به عنوان پوزولان، ضروری است که فاز اصلی آن به صورت آمورف باشد تا بتواند با سیمان واکنش دهد. این تغییر فاز از کریستالی به آمورف به واسطه حرارت در فرآیند تولید اتفاق افتاده است. همچنین، نتایج آزمایش نشان داد که عنصر اصلی تشکیل دهنده ماده، اکسید سیلیس است. بر اساس نتایج به دست آمده، این ماده شرایط لازم برای داشتن خواص پوزولانی را داراست [۱۶]. علاوه بر این، ماده مورد نظر تحت آزمایش شیمیایی تر قرار گرفت تا اکسیدهای اصلی موجود در آن به طور دقیق بررسی شوند، که نتایج آن در جداول ۴ و ۵ مشخصات فیزیکی و شیمیایی را نشان می دهد.

جدول ۴. مشخصات فیزیکی پودر سرامیک ضایعاتی

آزمایش	مقدار
میزان رطوبت	۰.۲٪
انبساط در آزمایش اتوکلاو	۰.۰۵٪
سایز دانه‌ها	>۴۵ میکرون

جدول ۵. مشخصات شیمیایی پودر سرامیک ضایعاتی

آزمون شیمیایی	نتایج آزمون (%)
SiO ₂	۶۵/۸۵
Al ₂ O ₃	۱۵/۵۳
Fe ₂ O ₃	۴/۸۱
CaO	۱/۵۷
MgO	۰/۷۲
SO ₃	۰/۰۶
Na ₂ O	۲/۰۱
K ₂ O	۱/۶۳
TiO ₂	۰/۷۳۷
MnO	۰/۰۷۸
P ₂ O ₅	۰/۰۳
LOI	۰/۰۵

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مجموع درصد سه اکسید SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ در این ماده حدود ۱۹/۹۲ درصد است، در حالی که حداقل این مقدار برای یک ماده پوزولانی طبق استاندارد ASTM C618 برابر با ۷۰ درصد می‌باشد. همچنین، میزان سولفور SO₃ در این ماده ۰/۰۶ درصد است، که حداکثر میزان مجاز آن طبق استاندارد ۳ درصد است. میزان افت در اثر سرخ شدن (LOI) نیز برابر با ۰/۰۵ درصد بوده، در حالی که حداکثر مقدار مجاز در استاندارد ۱۵ درصد است. با توجه به این اطلاعات، می‌توان نتیجه گرفت که این ماده الزامات شیمیایی استاندارد ASTM C618 را برآورده می‌کند. شکل ۳، پودر سرامیک ضایعاتی را نشان می‌دهد.



شکل ۳. پودر سرامیک ضایعاتی مصرفی

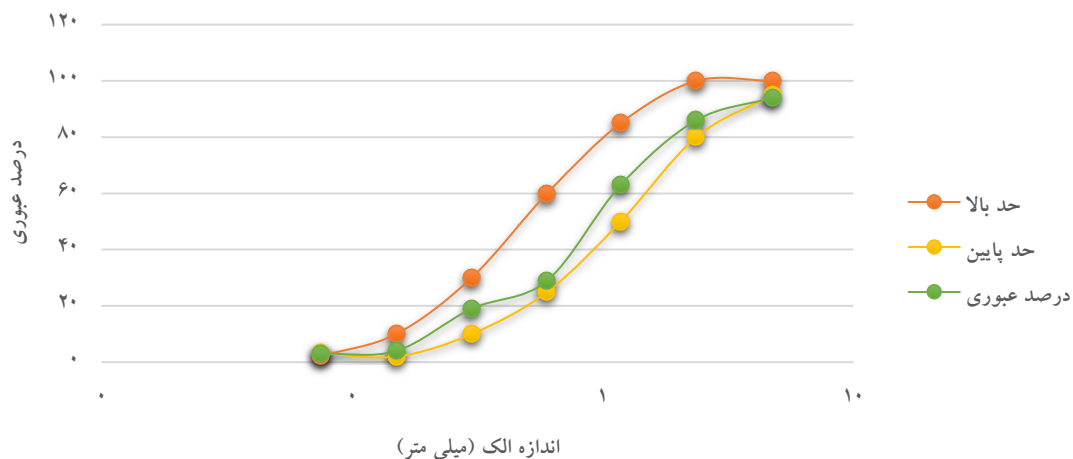
۵.۲. مصالح سنگی

ماسه مورد مصرف در این پژوهش، شکسته کوهی از جنس آهکی بوده و تهیه شده از معدن شن و ماسه اصفهان می‌باشد. وزن مخصوص انبوهی درون اشباع با سطح خشک ۲۴۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب و درصد جذب آب ۳/۱۲ و مدول نرمی ۲/۶۶ درصد می‌باشد. مطابق با استاندارد ASTM C125 مدول نرمی از تقسیم حاصل جمع درصدهای وزنی تجمعی مانده روی هریک از الک‌ها بر عدد ۱۰۰ به دست آمده است. در حقیقت مدول نرمی شاخصی برای ریزی سنگدانه‌های مصرفی در ملات است. البته شایان ذکر است که مدول نرمی هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد نحوه توزیع دانه‌ها نمی‌دهد. در جدول ۶ دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در ساخت نمونه‌های ملاتی، ارائه شده است.

جدول ۶. دانه‌بندی ماسه مصرفی

شماره الک	وزن مانده روی هر الک	درصد مانده روی هر الک	درصد تجمعی مانده روی هر الک	درصد تجمعی ردشده از هر الک
۹/۵۰	۰	۰	۰	۱۰۰
۴/۷۵	۲۰۰	۱۲/۱۶	۱۲/۱۶	۸۷/۸۳
۲/۳۶	۴۹۴	۳۰/۰۴	۴۲/۲۱	۵۷/۷۸
۱/۱۸	۳۴۹	۲۱/۲۲	۶۳/۴۴	۳۶/۵۵
۰/۶	۱۲۰	۷/۲۹	۷۰/۷۴	۲۹/۲۵
۰/۳	۱۷۵	۱۰/۴۶	۸۱/۳۶	۱۸/۶۱
۰/۱۵	۲۴۹	۱۵/۱۴	۹۶/۵۳	۳/۴۶
زیر الکی	۵۷	۳/۴۶	۱۰۰	۰

شکل ۴ منحنی دانه بندی ماسه مصرفی را بر اساس درصد عبوری از الک با اندازه های مختلف به ما نشان می دهد . همچنین شکل ۵ ماسه مصرفی را نشان داده است.



شکل ۴. منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی



شکل ۵. ماسه مصرفی

۶.۲. طرح اختلاط

در این تحقیق جهت طرح اختلاط ملات از روش آیین‌نامه ۲۱۱-ACI استفاده شده است. کلیه‌ی نمونه‌ها با عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ ساخته شده‌اند. همچنین از ژل میکروسیلیس با درصدهای آورده شده در جداول ۷ و ۸ استفاده شده است. در این تحقیق علاوه بر ماده ژل میکروسیلیس از ضایعات سرامیک به ترتیب با درصدهای ۵۰ و ۱۰۰ درصد جایگزین استفاده شده است.

جدول ۷. نام‌گذاری طرح اختلاط

شماره طرح	نام طرح	ژل میکروسیلیس (%)	پودر سرامیک ضایعاتی (%)
۱	M.C.	۰	۰
۲	M _۱ .C.	۱۰	۰

۰	۲۰	M _T .C.	۳
۰	۳۰	M _T .C.	۴
۵۰	۰	M.C _{۵۰}	۵
۵۰	۱۰	M _۱ .C _{۵۰}	۶
۵۰	۲۰	M _T .C _{۵۰}	۷
۵۰	۳۰	M _T .C _{۵۰}	۸
۱۰۰	۰	M.C _{۱۰۰}	۹
۱۰۰	۱۰	M _۱ .C _{۱۰۰}	۱۰
۱۰۰	۲۰	M _T .C _{۱۰۰}	۱۱
۱۰۰	۳۰	M _T .C _{۱۰۰}	۱۲

طرح	جدول ۸. طرح اختلاط											
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
الک	وزن مانده (کیلوگرم بر مترمکعب)											
۹/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۴/۷۵	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰	۲۳۰
۲/۳۶	۵۶۸	۵۶۸	۵۶۸	۵۶۸	۵۶۸	۵۶۸	۵۶۸	۵۶۸	۵۶۸	۵۶۸	۵۶۸	۵۶۸
۱/۱۸	۴۰۲	۴۰۲	۴۰۲	۴۰۲	۴۰۲	۴۰۲	۴۰۲	۴۰۲	۴۰۲	۴۰۲	۴۰۲	۴۰۲
۰/۶	۱۳۸	۱۳۸	۱۳۸	۱۳۸	۱۳۸	۱۳۸	۱۳۸	۱۳۸	۱۳۸	۱۳۸	۱۳۸	۱۳۸
۰/۳	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۱
۰/۱۵	۲۸۷	۲۸۷	۲۸۷	۲۸۷	۲۸۷	۲۸۷	۲۸۷	۲۸۷	۲۸۷	۲۸۷	۲۸۷	۲۸۷
زیر الک طبیعی	۶۶	۶۶	۶۶	۶۶	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۰	۰	۰	۰
زیر الک سرامیک	۰	۰	۰	۰	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۶۶	۶۶	۶۶	۶۶
وزن کل	۱۸۹۲	۱۸۹۲	۱۸۹۲	۱۸۹۲	۱۸۹۲	۱۸۹۲	۱۸۹۲	۱۸۹۲	۱۸۹۲	۱۸۹۲	۱۸۹۲	۱۸۹۲
وزن سیمان	۳۵۰	۳۱۵	۲۸۰	۲۴۵	۳۵۰	۳۱۵	۲۸۰	۲۴۵	۳۵۰	۳۱۵	۲۸۰	۲۴۵
وزن آب	۱۵۸	۱۵۸	۱۵۸	۱۵۸	۱۵۸	۱۵۸	۱۵۸	۱۵۸	۱۵۸	۱۵۸	۱۵۸	۱۵۸

۷.۲. آماده سازی نمونه ها

توزیع یکنواخت مواد تشکیل دهنده طرح اختلاط ملات یک امر طبیعی است. به ویژه مواد سیمانی (سیمان و میکروسیلیس) که از جمله پارامترهای مهم برای رسیدن به خصوصیات مطلوب مقاومتی می باشد. برآن شدیم که در این پژوهش از روش اختلاط مناسب جهت ساخت نمونه های ملاتی تا رسیدن به نتایج دقیق تر و بهتر استفاده گردد. روشی که برای طرح اختلاط ملات ها در نظر گرفته شده است براساس استاندارد ASTM C305 می باشد، که می تواند در توزیع بهتر ذرات و مواد سیمانی در حجم ملات مؤثر باشد

- و ما را برای رساندن به اهداف مدنظر یاری کند. در شروع ساخت ملات، چند نمونه آزمایشی از ملات‌ها با کنترل روانی توسط میز جریان مطابق با استاندارد ASTM C1437 مورد بررسی قرار گرفتند. حال پس از مشخص شدن استاندارد مبنا جهت ساخت نمونه‌ها و بدست آوردن در طرح‌های اختلاط، به توضیح روند ساخت و ترکیب مصالح می‌پردازیم.
- یک سوم آب (با محلول ژل میکروسیلیس) لازم را جهت اختلاط در جام مخلوط‌کن ریخته و مخلوط‌کن را بر روی سرعت کم (5 ± 140 دور در دقیقه محوری و ۶۲ دور در دقیقه مداری) روشن می‌نماییم.
 - مواد سیمانی را با مابقی آب اضافه نموده و عمل اختلاط با سرعت کم و به مدت یک دقیقه را ادامه می‌دهیم.
 - در حالی که مخلوط‌کن با سرعت کم تنظیم شده کار می‌کند، ظرف چند ثانیه به آرامی تمام ماسه‌های مورد نیاز و ضایعات سرامیک برای طرح اختلاط را به داخل مخلوط‌کن اضافه می‌گردانیم.
 - از زمان ریختن ماسه و سرامیک، سرعت مخلوط‌کن را قدری افزایش (285 ± 10 دور در دقیقه محوری و ۱۲۵ دور در دقیقه مداری) داده و بمدت ۳۰ ثانیه دیگر عمل اختلاط را ادامه می‌دهیم.
 - مخلوط‌کن به مدت ۹۰ ثانیه خاموش گردید و در این حین مصالح چسبیده به کف جام جدا گردیدند. (شکل ۶)
 - پس از انجام این مراحل، عمل اختلاط پس از یک دقیقه کار کردن مجدد مخلوط‌کن با سرعت متوسط پایان یافت.



شکل ۶. مخلوط‌کن

۸.۲. عمل آوری نمونه ها

عمل آوری یکی از عوامل کلیدی در تعیین مقاومت ملات است که به درجه هیدراتاسیون بستگی دارد. عمل آوری ملات باید به سه روش حفاظت، مراقبت و پروراندن انجام شود. این سه فرآیند در واقع برای عمل آوری ملات ریخته‌شده در قالب ضروری و مهم هستند. مراقبت به معنای عمل آوری و پروراندن به معنای عمل آوری حرارتی است. زمانی که سیمان و آب با هم ترکیب می‌شوند، هیدراتاسیون آغاز می‌شود. میزان این فرآیند تأثیر زیادی بر دوام و مقاومت ملات دارد.

پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها ۲۴ ساعت در آزمایشگاه با دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. پس از گذشت ۲۴ ساعت از عمل‌آوری در شرایط مرطوب، نمونه‌ها از قالب فولادی خارج شده و در آب با دمای 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند تا برای انجام آزمایش‌های ملات سخت‌شده، عمل‌آوری شوند. زمان عمل‌آوری نمونه‌ها جهت انجام آزمایش‌ها ۲۸ و ۵۶ روزه مقرر گردید (شکل ۷).



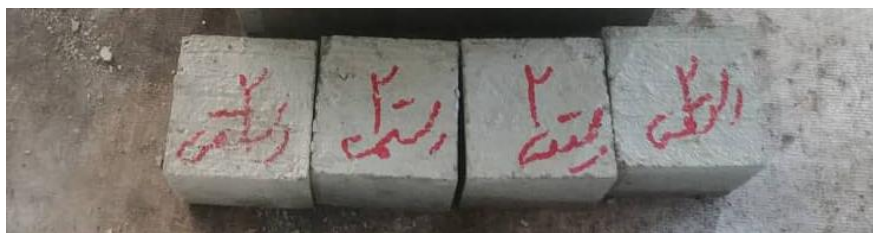
شکل ۷. نحوه عمل‌آوری و نگهداری نمونه‌ها

۳. برنامه آزمایشگاهی

۱.۳. مقاومت فشاری

این آزمایش برای ملات‌ها بر روی نمونه‌های مکعبی به ضلع ۵ سانتی‌متر انجام شد. آزمایش مقاومت فشاری در این پژوهش مطابق با استاندارد ASTM C109 می‌باشد. نحوه‌ی ساخت ملات در بخش قبلی به طور کامل توضیح داده شد، اما در بخش ساخت نمونه‌های فشاری مطابق با استاندارد باید توجه کرد که لایه‌ای از ملات در حدود نصف ارتفاع قالب (تقریباً ۲۵ میلی‌متر) ریخته شد. ملات ریخته در هر بخش مکعبی قالب ۳۲ مرتبه، در مدت ۱۰ ثانیه و طی ۴ دور کوبیده شده است که در هر دور کوبیدن از ۸ ضربه منظم تشکیل شده‌اند.

برای انجام آزمایش ابتدا سطح نمونه خشک و تمیز شد و سنگدانه‌های سست سطحی از آن برداشته شد. بارگذاری بر روی وجوه صاف نمونه، قسمتی که در تماس کامل با بدنه‌ی قالب بوده‌اند اعمال شد. شکل ۸ نمونه فشاری ملات را نشان می‌دهد که آماده جهت انجام آزمایش می‌باشد.



شکل ۸. نمونه‌های ساخت شده فشاری ملات

باید این نکته را متذکر شد که هیچ واسطه‌ای نباید بین نمونه و سطح بست دو فک بالا و پایین ماشین آزمایش قرار گیرد و نمونه به تنهایی با دقت بسیار از نظر موقعیتی قرار داده شد، زیرا اگر نمونه به سمتی از کناره‌های فک تمایل پیدا کند، باعث می‌شود که نتایج درستی از انجام آزمایش استخراج نگردد.

براساس استاندارد یاد شده سرعت بارگذاری باید در محدوده‌ی ۷۵ تا ۱۵۰ کیلوگرم بر ثانیه باشد که در آزمایشات این پژوهش سرعت ۱۱۰ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شد. برای محاسبه‌ی تنش هم همان‌طور که می‌دانیم از تقسیم نیرو بر سطحی است که نیرو به آن وارد می‌گردد. در این نمونه‌ها اگر اندازه مورد محاسبه مقطع عرضی بیش از ۱/۵ درصد متفاوت بود باید از سطح مقطع واقعی برای تعیین تنش استفاده شود. روند استخراج نتایج به این ترتیب است که در هر طرح ۳ نمونه تحت آزمایش قرار می‌گیرد و میانگین ۳ نتیجه بعنوان نتیجه آن طرح لحاظ شد. براساس استاندارد نمونه‌هایی که مقاومت آن‌ها با مقاومت متوسط نمونه‌های مشابه که از همان ملات ساخته شد و در یک سن آزمایش شده‌اند، چنانچه بیش از ۸ درصد اختلاف داشته باشد حذف می‌شود و به این ترتیب در صورتی که بعد از حذف بعضی از مقادیر نمونه‌های آزمایش شده کم‌تر از دو مقدار مقاومت برای هر سری باقی‌مانده باشد، آزمایش دوباره باید انجام می‌شود.

۲.۳. مقاومت کششی

یکی از روش‌های اندازه‌گیری مقاومت کششی ملات، آزمون کشش نمونه‌های هشتی شکل است. این روش آزمون در استاندارد AASHTO T1۳۲ توضیح داده شده و معمولاً شامل کشش مستقیم نمونه‌های هشت لاتین از مصالح بدون درشت‌دانه می‌باشد. نمونه‌ها به شکل هشت لاتین با طول ۷۶۲ میلی‌متر و ضخامت ۲۵۴ میلی‌متر ساخته می‌شوند. در قسمت میانی، سطح مقطع نمونه ۵۰۸ در ۲۵۴ میلی‌متر است و دستگاه آزمون به گونه‌ای طراحی شده که بار به طور یکنواخت در این سطح مقطع توزیع شود. آزمون با استفاده از دستگاهی با ظرفیت کششی ۱۲ کیلو نیوتن انجام می‌گیرد.

۳.۳. مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی در این پژوهش بر روی نمونه‌های ۱۶×۴×۴ سانتی‌متری انجام شد. استاندارد می‌گوید که در این آزمایش لحاظ شد، همان الزامات استاندارد ASTM C۳۴۸ بود. در این آزمایش نمونه‌های ملات همانند مراحل ساخت نمونه‌ها که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، ساخته شدند. سطوح درون قالب برای جداسازی راحت‌تر نمونه‌ها پس از گیرش نهایی با روغن پوشش داده شد.

همانند ساخت نمونه‌های فشاری، در ساخت نمونه‌های خمشی این‌گونه عمل شد که در حدود ۲۵ میلی‌متر (تقریباً نصف ارتفاع قالب) ملات ریخته شد، سپس قالب به صورت فرضی به ۴ بخش تقسیم شد که به کمک تخم‌ماق ۱۲ مرتبه و طی ۳ مرحله کوبیده شدند که این عمل حدوداً ۱۵ ثانیه به طول انجامید.

لایه‌های بعدی نیز به همین ترتیب ادامه یافت. نیروی اعمال شده برای تراکم دستی به گونه‌ای بود که ملات بصورت کامل قالب را پر کند. در انتها هم سطح نمونه‌ها توسط ماله، صاف و پرداخت شد. نمونه پس از ساخت به مشابه با نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری پس از ۲۴ ساعت که با لایه‌ای پلاستیکی پوشیده شد (جهت جلوگیری از هدر رفتن رطوبت نمونه) از قالب خارج و تا مدت مدید جهت انجام آزمایش در حوضچه آب نگهداری شدند. شکل ۹ نمونه‌های خمشی ملات که ساخته شده‌اند را نمایش می‌دهد.



شکل ۹. نمونه‌های ساخت شده خمشی ملات

در انجام این آزمایش ابتدا نمونه‌ها خشک شده و سطوحی از نمونه منشوری که در تماس با تکیه‌گاه است از ذرات سست و چسبنده زدوده شد. همانند نمونه‌های فشاری در انجام این آزمایش مقاومت خمشی از وجوهایی برای بارگذاری استفاده شد که در تماس کامل با بدنه‌ی قالب قرار داشتند. نمونه‌های منشوری بر روی تکیه‌گاه‌هایی قرار گرفتند که با فاصله ۱۲ سانتی‌متری از یکدیگر تنظیم شده بودند و دقیقاً بین فک‌های بارگذاری قرار داده شدند. در این پژوهش همان‌گونه که در بخش مقدمه ذکر شد، علاوه بر آزمایش مقاومت خمشی در سنین ۲۸ و ۵۶ روزه، آزمایش مقاومت خمشی دونقطه‌ای نیز انجام شد. آزمایش یک نقطه‌ای بدین صورت است که نمونه وقتی بر روی تکیه‌گاه‌ها تنظیم می‌شود، توسط تیر بارگذاری که عمود بر طول منشور است و دقیقاً وسط نمونه منشوری قرار می‌گیرد و عملیات بارگذاری انجام می‌گردد. برای آزمایش مقاومت خمشی دونقطه‌ای روند انجام آزمایش کاملاً به همین روال بوده و تنها به ۱/۳ طول نمونه استفاده و بارگذاری انجام گردید. سرعت بارگذاری برای این آزمایش ۴۵ نیوتن بر ثانیه در نظر گرفته شد. در انتها، برای محاسبه مقاومت خمشی یک نقطه‌ای از رابطه ۱ و مقاومت خمشی دونقطه‌ای از رابطه ۲ استفاده می‌شود.

$$S_F = \frac{3PL}{2BH^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$S_F = \frac{2PL}{BH^2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در روابط محاسبه مقاومت خمشی یک نقطه و دونقطه‌ای:

S_F : مقاومت خمشی بر حسب نیوتن بر میلی‌مترمربع یا مگاپاسکال؛

P : نیروی اعمالی در مقاومت یک نقطه در وسط دهانه و در مقاومت دونقطه‌ای در کناره؛

B: عرض مقطع بر حسب میلی‌متر؛

H: ارتفاع مقطع بر حسب میلی‌متر؛

L: فاصله بین دو تکیه‌گاه بر حسب میلی‌متر؛

۴.۳. درصد جذب آب

جذب آب یکی از ویژگی‌های ملات است که نشان‌دهنده خصوصیات ریزساختار آن از نظر خلل و فرج و پیوستگی آن‌ها می‌باشد. آزمایش جذب آب بلندمدت طبق استاندارد ASTM C642 انجام شده است. نتایج این آزمایش ارتباط مستقیم با منافذ موجود در ملات دارند، به‌طوری که هرچه تعداد منافذ بیشتر باشد، جذب آب نیز افزایش می‌یابد. برای انجام این آزمایش، نمونه‌های منشوری پس از عمل‌آوری ۲۸ و ۵۶ روزه از حوضچه خارج و آماده آزمایش شدند. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد ± 5 قرار گرفتند. سپس پس از خارج کردن از آون و خنک شدن، وزن آن‌ها اندازه‌گیری شده و در آب تمیز قرار گرفتند. بعد از گذشت ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از آب خارج و در حالت اشباع با سطح خشک وزن شدند. درصد جذب آب و رطوبت نسبی نمونه‌ها با استفاده از تفاوت وزن خشک و مرطوب و رابطه ۳ محاسبه گردید.

$$\text{رابطه (۳)} \quad \text{درصد جذب آب} = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100$$

m: وزن نمونه مرطوب

m_0 : وزن نمونه خشک

۵.۳. نفوذپذیری^۹ (RCPT)

آزمایش RCPT بر اساس استاندارد ASTM C1202 انجام می‌شود. در این روش، مقدار کل بار الکتریکی عبوری از نمونه‌های ملات اشباع به قطر ۱۰ و ضخامت ۵ سانتی‌متر، در مدت ۶ ساعت تحت اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت اندازه‌گیری می‌شود. نمونه‌های ملات از یک طرف با محلول NaCl و از طرف دیگر با محلول NaOH در تماس قرار می‌گیرند و با ایجاد اختلاف پتانسیل، جریان الکتریکی از نمونه‌ها عبور کرده و یون‌های کلرید به داخل ملات منتقل می‌شوند. این روش بر این فرض استوار است که میزان جریان عبوری با توانایی انتشار یون‌های کلرید از میان منافذ مویی ملات ارتباط دارد (شکل ۱۰).

در این تحقیق، آزمایش در سن ۲۸ روز انجام شد. برای هر طرح اختلاط، دو نمونه استوانه‌ای به ضخامت ۵۰ میلی‌متر از نمونه‌های ملاتی با ابعاد 100×200 میلی‌متر برش داده شد. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها در سلول‌های آزمایش قرار گرفتند. در نهایت، جریان ثابتی با اعمال اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت از نمونه‌ها عبور داده شد و پس از ۶ ساعت، مقدار کل بار الکتریکی عبوری از نمونه‌ها محاسبه گردید.

براساس جدول ۹ می‌توان مقاومت ملات در برابر نفوذپذیری کلرید را تعیین کرد.



شکل ۱۰. دستگاه نفوذپذیری (RCPT)

جدول ۹. نفوذپذیری (RCPT)

نفوذپذیری یون کلرید	بار الکتریکی عبور کرده (کولمب)
زیاد	$4000 <$
متوسط	$2000 - 4000$
کم	$1000 - 2000$
خیلی کم	$100 - 1000$
قابل اغماض	$100 <$

۶.۳. مدل‌های پیش‌بینی عملکرد

۱.۶.۳. مدل CatBoost

مدل CatBoost به‌عنوان یک الگوریتم مبتنی بر گرادینت بوسستینگ برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات حاوی ژل میکروسیلیس، پودر سرامیک ضایعاتی و زمان عمل‌آوری 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.

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

۲,۳,۶. مدل LightGBM

مدل LightGBM، یک الگوریتم بوستینگ 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:

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

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 (CatBoost 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:

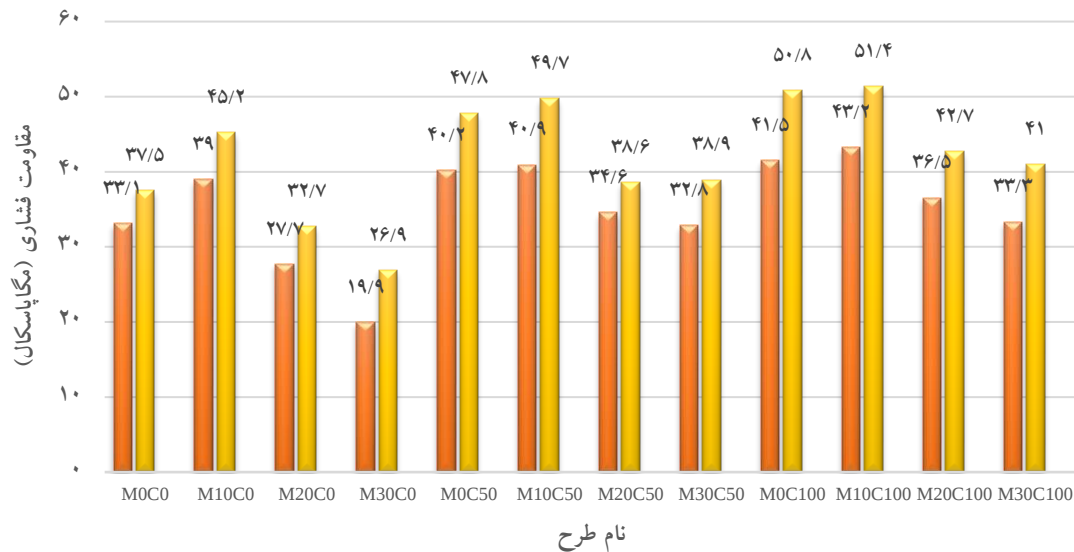
$$y_{ensemble} = \omega_1 \cdot y_{CatBoost} + y_{LightGBM}$$

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 ۱۰٪ پودر سرامیک)، ابزاری قدرتمند برای طراحی ملات‌های پایدار فراهم کرد.

۴. نتایج و تحلیل آزمایشات

۱.۴. 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 انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری در ۲۸ و ۵۶ روز در آب، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.



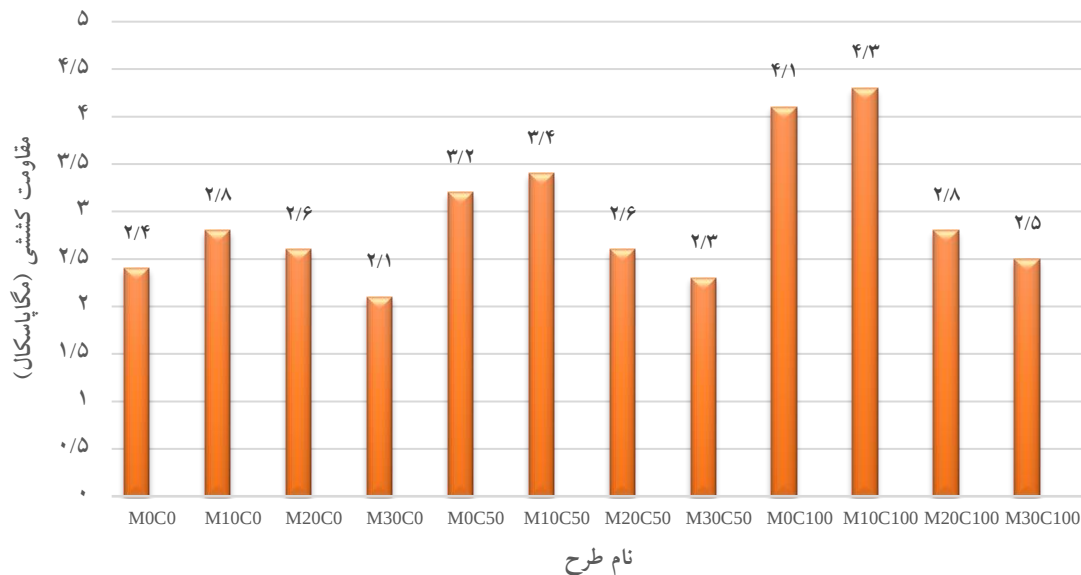
■ مقاومت فشاری ۲۸ روزه ■ مقاومت فشاری ۵۶ روزه

شکل ۱۱. تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ و ۵۶ روزه در آب برحسب مگاپاسکال

بر اساس شکل ۱۱ که تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها را در سنین ۲۸ و ۵۶ روزه نشان می‌دهد، مشاهده شد که طرح (C۱۰M۰۰)، شامل ۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی جایگزین سیمان، بالاترین مقاومت فشاری را داراست. در مقابل، طرح (C۳۰M) که حاوی ۳۰٪ ژل میکروسیلیس و بدون پودر سرامیک ضایعاتی است، کمترین مقاومت فشاری را نشان داده است. نتایج حاکی از آن است که افزودن ژل میکروسیلیس تا ۱۰٪ منجر به افزایش مقاومت فشاری ملات می‌شود، اما افزایش بیش از ۱۰٪ باعث کاهش این مقاومت خواهد شد. همچنین، جایگزینی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی به جای سیمان، نسبت به جایگزینی ۵۰٪، موجب مقاومت فشاری بالاتر شده است. بر این اساس، مقدار بهینه ژل میکروسیلیس در ملات حاوی ۵۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی، ۱۰٪ و در ملات حاوی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی نیز ۱۰٪ تعیین شد.

۲.۴. مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد، با استفاده از جک هیدرولیکی و با سرعت ثابت ۰/۹ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شد. نتایج این آزمایش برای نمونه‌های ۲۸ روزه در آب، در شکل ۱۲ ارائه شده است.

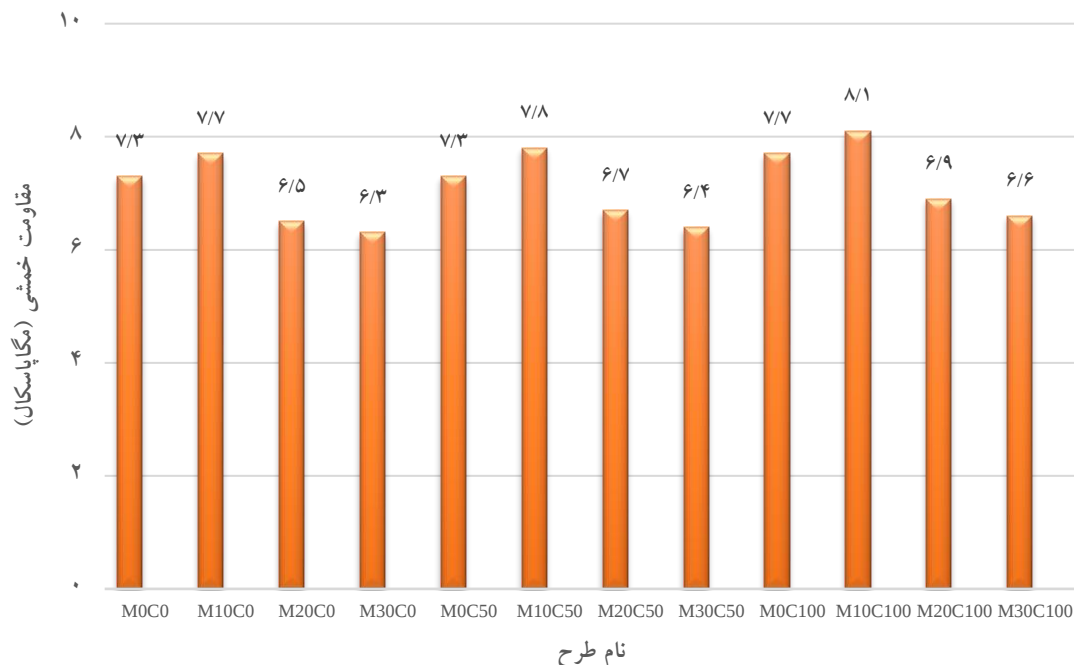


شکل ۱۲. تغییرات مقاومت کششی ۲۸ روزه در آب برحسب مگاپاسکال

بر اساس شکل ۱۲ که تغییرات مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌ها را نشان می‌دهد، طرح (C۱۰M۰۰) شامل ۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی جایگزین سیمان، بالاترین مقاومت کششی را داشته است. در مقابل، طرح (C۳۰M۰) که حاوی ۳۰٪ ژل میکروسیلیس و بدون پودر سرامیک ضایعاتی است، کمترین مقاومت کششی را نشان داده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش میزان ژل میکروسیلیس تا ۱۰٪ منجر به افزایش مقاومت کششی ملات می‌شود، اما افزایش بیش از ۱۰٪ باعث کاهش این مقاومت خواهد شد. همچنین، جایگزینی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی به جای سیمان در مقایسه با جایگزینی ۵۰٪، موجب افزایش مقاومت کششی شده است. بر این اساس، مقدار بهینه ژل میکروسیلیس در ملات حاوی ۵۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی، ۱۰٪ و در ملات حاوی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی نیز ۱۰٪ تعیین شد.

۳.۴. مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد با استفاده از جک هیدرولیکی و سرعت ثابت ۰/۹ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شد. نتایج این آزمایش برای نمونه‌های ۲۸ روزه در آب در شکل ۱۳ ارائه شده است.

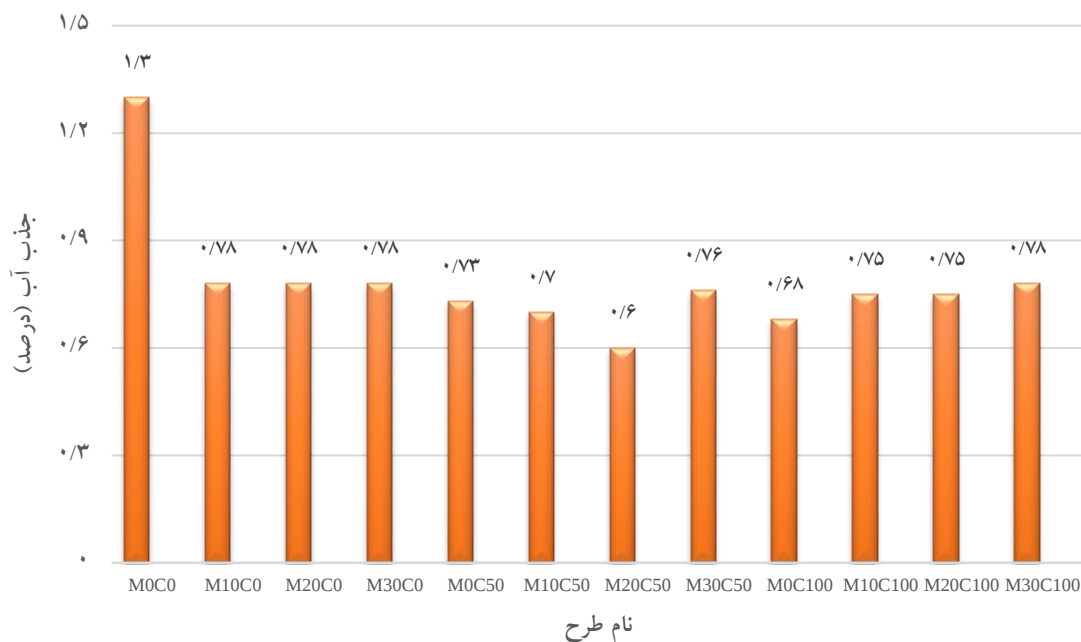


شکل ۱۳. تغییرات مقاومت خمشی ۲۸ روزه در آب بر حسب مگاپاسکال

بر اساس شکل ۱۳ که تغییرات مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌ها را نشان می‌دهد، طرح (C۱۰M۰۰) شامل ۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی جایگزین سیمان، بالاترین مقاومت خمشی را داشته است. در مقابل، طرح (C۳۰M۰) که حاوی ۳۰٪ ژل میکروسیلیس و بدون پودر سرامیک ضایعاتی است، کمترین مقاومت خمشی را نشان داده است. نتایج حاکی از آن است که افزایش ژل میکروسیلیس تا ۱۰٪ باعث افزایش مقاومت خمشی می‌شود، اما مقادیر بیش از ۱۰٪ منجر به کاهش این مقاومت خواهد شد. همچنین، جایگزینی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی به جای سیمان، در مقایسه با جایگزینی ۵۰٪، موجب مقاومت خمشی بالاتر شده است. بر این اساس، مقدار بهینه ژل میکروسیلیس در ملات حاوی ۵۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی، ۱۰٪ و در ملات حاوی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی نیز ۱۰٪ تعیین شد.

۴.۴. جذب آب

در این پژوهش برای ارزیابی جذب آب، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و سپس به مدت ۲۴ ساعت در حوضچه آب با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. در طول این مراحل، وزن خشک و وزن مرطوب با سطح خشک (SSD) نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از آزمایش جذب آب ۵۶ روزه در آب در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.

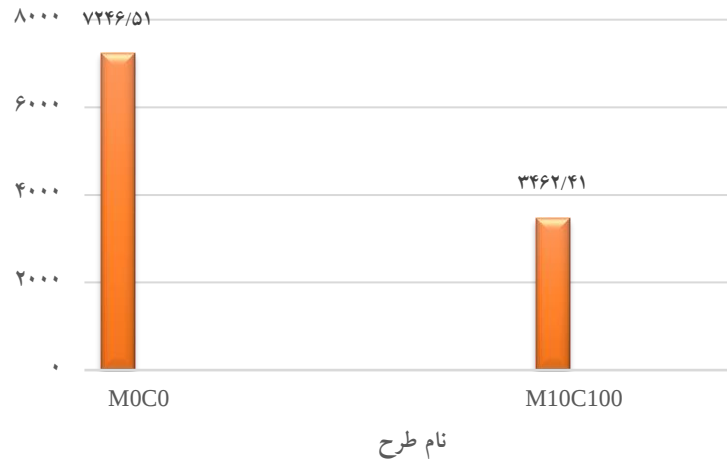


شکل ۱۴. تغییرات جذب آب ۵۶ روزه در آب بر حسب درصد

بر اساس شکل ۱۴ که تغییرات جذب آب ۲۸ روزه نمونه‌ها را نشان می‌دهد، طرح (C۲۰M۵۰) شامل ۲۰٪ ژل میکروسیلیس و ۵۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی جایگزین سیمان، کمترین درصد جذب آب را داشته است. در مقابل، طرح (C۰M) که فاقد ژل میکروسیلیس و پودر سرامیک ضایعاتی (طرح شاهد) بوده است، بیشترین میزان جذب آب را نشان داده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن ژل میکروسیلیس در درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ به تنهایی تأثیر محسوسی بر کاهش جذب آب نداشته و مقدار آن را تقریباً ثابت نگه داشته است. همچنین، جایگزینی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی به جای سیمان، نسبت به جایگزینی ۵۰٪، موجب کاهش بیشتر جذب آب شده است. بر این اساس، مقدار بهینه ژل میکروسیلیس برای ملات حاوی ۵۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی، ۲۰٪ و برای ملات حاوی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی، ۳۰٪ تعیین شد.

۵.۴. نفوذپذیری (RCPT)

با توجه به اینکه نوع ملات و روش عمل‌آوری آن می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر نتایج داشته باشد، آزمایش تعیین نفوذ کلر به روش (RCPT) در سن ۲۸ روزه طبق استاندارد انجام شد و نتایج آن در شکل ۱۵ نمایش داده شده است.



شکل ۱۵. تغییرات نفوذپذیری ۲۸ روزه در آب برحسب کلومب

باتوجه به شکل ۱۵ که تغییرات نفوذپذیری ۲۸ روزه در آب برحسب کلومب را نشان می‌دهد، به این نتیجه دست یافتیم که طرح (MC.) دارای ۰٪ ژل میکروسیلیس و ۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی (طرح شاهد)، بیش‌ترین نفوذپذیری را نسبت به طرح (M.C_{۱۰۰}) حاوی ۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی داراست. پس افزایش مقادیر ژل میکروسیلیس و پودر سرامیک ضایعاتی در ملات با کاهش نفوذپذیری همراه است.

جدول ۱۰. مقایسه نفوذپذیری (RCPT) طرح‌های پژوهش با مقادیر آیین‌نامه‌ای

نام طرح	نفوذپذیری (کلومب) آزمایش	نفوذپذیری (کلومب) آیین‌نامه‌ای	نفوذپذیری یون کلرید
S.C.	۷۲۴۶/۵۱	۴۰۰۰ <	زیاد
S _۱ .C _{۱۰۰}	۳۴۶۲/۴۱	۲۰۰۰-۴۰۰۰	متوسط

با توجه به جدول ۱۰ که مقایسه نفوذپذیری (RCPT) طرح‌های مختلف پژوهش با مقادیر استاندارد را ارائه می‌دهد، هرچه میزان جریان عبوری بالاتر باشد، نشان‌دهنده نفوذپذیری بیشتر ملات، به ویژه در برابر یون‌های کلرید است. لذا به این نتیجه دست یافتیم که طرح (MC.) با کلومب بیش‌تر از ۴۰۰۰ دارای نفوذپذیری یون کلرید زیاد می‌باشد. همچنین طرح (M.C_{۱۰۰}) با کلومب بین ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ دارای نفوذپذیری متوسط می‌باشد.

۶.۴. عملکرد مدل‌های پیش‌بینی

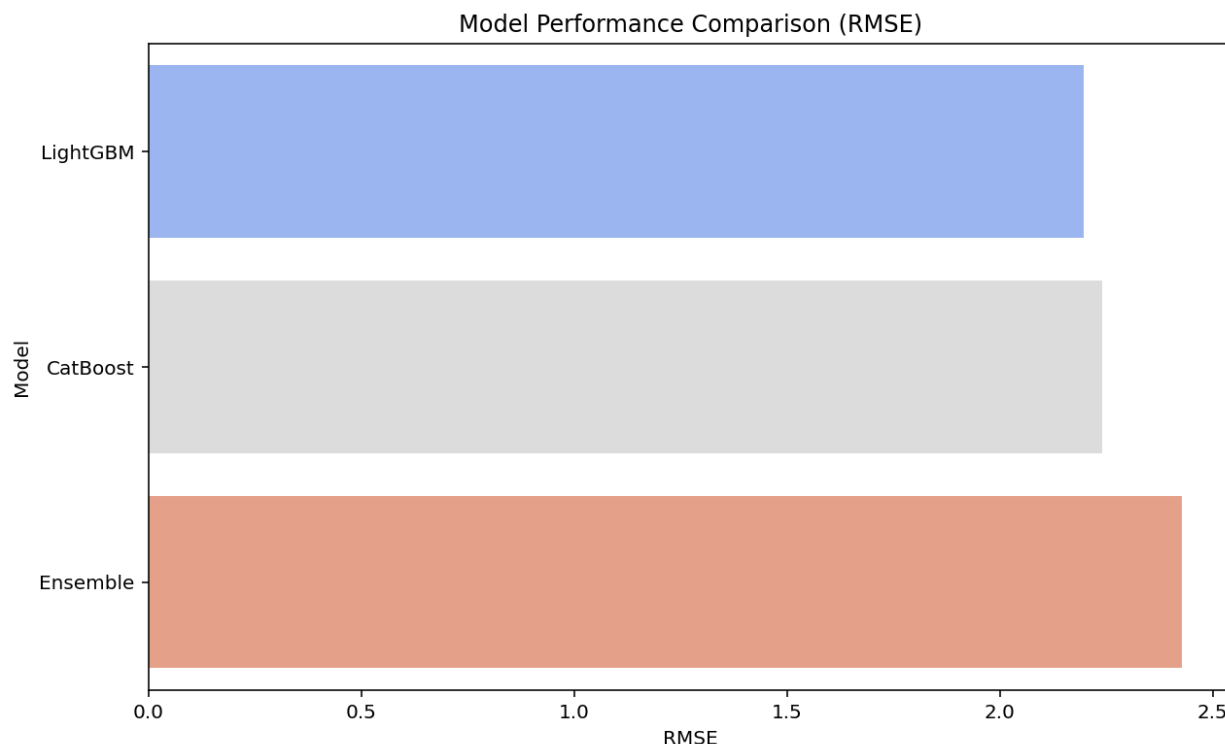
۱.۶.۴. پیش‌بینی مقاومت فشاری

عملکرد پیش‌بینی مدل‌های یادگیری ماشین شامل Cat Boost ، Li ght GBM و مدل ترکیبی (Vot i ngRegressor) برای تخمین مقاومت فشاری ملات سیمانی حاوی ژل میکروسیلیس و پودر سرامیک ضایعاتی با استفاده از معیار خطای میانگین ریشه

مربعات ($RMSE$)^{۱۰} ارزیابی شد، همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این شکل، مقادیر $RMSE$ هر مدل را برای مجموعه داده آزمایشی که شامل ویژگی‌های استاندارد شده مانند درصد ژل میکروسیلیس (M)، درصد پودر سرامیک ضایعاتی و زمان عمل‌آوری (t) در روزهای ۲۸ و ۵۶ بود، نمایش می‌دهد. مدل ترکیبی، که از ترکیب Cat Boost (وزن ۰/۶) و Li ght GBM (وزن ۰/۴) تشکیل شده، کمترین $RMSE$ را با حدود ۰/۷۲ مگاپاسکال نشان داد که نشان‌دهنده دقت پیش‌بینی برتر نسبت به Cat Boost ($RMSE \approx ۰/۸۵$ مگاپاسکال) و Li ght GBM ($RMSE \approx ۰/۹۲$ مگاپاسکال) است. این بهبود نشان‌دهنده اثربخشی رویکرد میانگین‌گیری وزن‌دار در کاهش سوگیری‌های فردی مدل‌ها و بهره‌برداری از نقاط قوت هر دو چارچوب بوستینگ گرادیان است.

کاهش مشاهده شده در $RMSE$ مدل ترکیبی را می‌توان به توانایی آن در تعادل بخشیدن به گرایش‌های بیش‌برازش Cat Boost، که در مدیریت تعاملات غیرخطی و دسته‌ای برجسته است، با کارایی محاسباتی و بهینه‌سازی برگ‌محور Li ght GBM نسبت داد. مقادیر $RMSE$ ، که در محدوده ۰/۷۲ تا ۰/۹۲ مگاپاسکال قرار دارند، نسبت به محدوده مقاومت فشاری آزمایشی (۱۹،۹ تا ۵۶،۸ مگاپاسکال) بسیار پایین بوده و نشان‌دهنده ضریب تعیین بالا ($R^2 > ۰/۹۷$) برای همه مدل‌ها، با رسیدن مدل ترکیبی به $\sim ۰/۹۹$ است، که از طریق اعتبارسنجی متقاطع تأیید شده است. این امر نشان می‌دهد که مدل‌ها به‌طور مؤثری روابط غیرخطی بین درصد مواد و زمان عمل‌آوری را به‌دست آورده‌اند، این نتایج با یافته آزمایشی مبنی بر این که جایگزینی ۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی بالاترین مقاومت فشاری (تا ۵۱/۴ مگاپاسکال در ۵۶ روز) را به همراه دارد، هم‌راستا است. برتری اندک مدل ترکیبی نسبت به اجزای آن، اثر هم‌افزایی ترکیب استحکام پیش‌بینی با کاهش واریانس را برجسته می‌کند، که برای کاربردهای مهندسی که دقت در طراحی مواد حیاتی است، عامل مهمی است.

نتایج دقیق تری در مورد عملکرد مدل از تحلیل اهمیت ویژگی‌ها (که در شکل ۱۶ نشان داده نشده اما از روش‌شناسی استنباط می‌شود) به‌دست آمد، به طوری که زمان عمل‌آوری (t) با حدود ۴۵٪، ژل میکروسیلیس (M) با ۳۰٪ و پودر سرامیک ضایعاتی (C) با ۲۵٪ به‌ترتیب بیشترین تأثیر را در قدرت پیش‌بینی داشتند. این توزیع با مشاهده آزمایشی که مدت زمان عمل‌آوری به‌ویژه پس از ۲۸ روز مقاومت را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد، هم‌راستا است و ترکیب بهینه شناسایی شده ($M/۱۰$ و $C/۱۰۰$) را پشتیبانی می‌کند. مقایسه $RMSE$ نشان می‌دهد که خطای بالاتر Li ght GBM احتمالاً ناشی از حساسیت آن به توزیع نامتعادل داده‌هاست، در حالی که $RMSE$ متوسط Cat Boost بیانگر پایداری آن در برابر مجموعه داده‌های نویزی است—چالشی که معمولاً در داده‌های آزمایشی تقویت شده مشاهده می‌شود. موفقیت مدل ترکیبی، پتانسیل کاربرد گسترده‌تر آن را در بهینه‌سازی فرمولاسیون‌های پایدار ملات پیشنهاد می‌دهد، می‌توان دریافت استفاده مجدد از مواد زائد اثرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد و در عین حال یکپارچگی ساختاری را حفظ می‌کند.



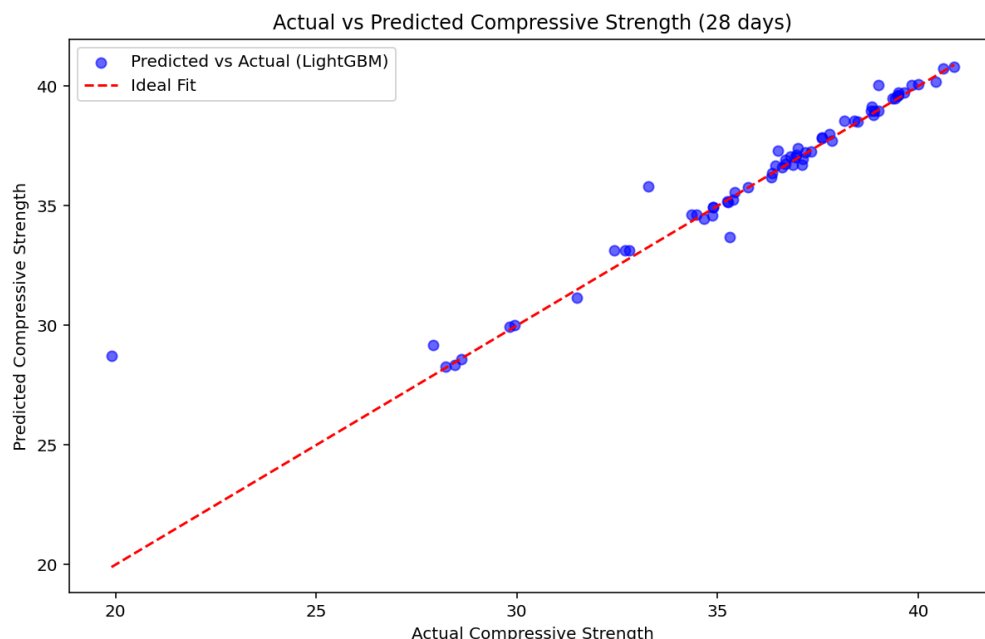
شکل ۱۶. مقایسه عملکرد مدل ها (RMSE) و مدل ترکیبی در پیش بینی مقاومت فشاری ملات

عملکرد مدل **LightGBM** در پیش بینی مقاومت فشاری ملات سیمانی حاوی ژل میکروسیلیس و پودر سرامیک ضایعاتی در روز ۲۸ با استفاده از نمودار پراکندگی واقعی در مقابل پیش بینی شده (شکل ۱۷) ارزیابی شد. این نمودار، مقادیر پیش بینی شده توسط مدل را در مقایسه با مقادیر واقعی مقاومت فشاری (محدوده ۲۰ تا ۴۰ مگاپاسکال) نشان می دهد، که شامل داده های آزمایشی با درصد های مختلف ژل میکروسیلیس (M) و پودر سرامیک ضایعاتی است. خط ایده آل (**Ideal Fit**) به عنوان مرجع نمایش داده شده، و پراکندگی نقاط حاکی از انطباق قابل توجه بین پیش بینی ها و مقادیر واقعی با انحراف کم است. ضریب تعیین (R^2) تقریبی این مدل، بر اساس نزدیکی نقاط به خط ایده آل، حدود ۰/۹۷ برآورد می شود، که نشان دهنده دقت بالای مدل در باز آفرینی رفتار مکانیکی ملات است و با یافته آزمایشی مبنی بر اوج مقاومت در ترکیب ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱۰۰٪ سرامیک ضایعاتی حدود ۴۱/۵ مگاپاسکال سازگار است.

تحلیل پراکندگی نشان می دهد که اکثریت نقاط در نزدیکی خط ایده آل قرار دارند، با حداکثر انحراف حدود ۲-۳ مگاپاسکال، که عمدتاً در محدوده های بالاتر مقاومت (۳۵-۴۰ مگاپاسکال) مشاهده می شود. این انحراف می تواند به پیچیدگی تعاملات غیرخطی بین میکروسیلیس، سرامیک و زمان عمل آوری (t) مرتبط باشد. با این حال، الگوی کلی نشان دهنده توانایی مدل در نمایش روند افزایشی افزایش درصد پودر سرامیک ضایعاتی است. نتایج آزمایشگاهی مبنی بر کاهش تخلخل و بهبود خواص مکانیکی با جایگزینی ۱۰۰٪ پودر سرامیک هم راستا است. خطای پیش بینی در این محدوده، RMSE تقریبی ۰/۹۲ مگاپاسکال (بر اساس تحلیل های قبلی) سازگار است، برای کاربردهای مهندسی قابل قبول بوده و نشان دهنده پتانسیل مدل در بهینه سازی طراحی ملات است.

اهمیت ویژگی ها (که در تحلیل های جداگانه تأیید شده) نشان دهنده نقش غالب زمان عمل آوری (۴۵٪) و سپس ژل میکروسیلیس (۳۰٪) است، نتایج با الگوی پراکندگی در شکل ۱۷ سازگار است، زیرا نقاط در دامنه های بالاتر مقاومت (مرتبط با زمان ۲۸ روز) با دقت بیشتری پیش بینی شده اند. این امر تأیید می کند که مدل **LightGBM** به ویژه در شرایط عمل آوری استاندارد (۲۳±۲ درجه

سانتی‌گراد) عملکرد مطلوبی دارد. با این حال، پراکندگی اندک در نقاط پایین‌تر (۲۰-۲۵ مگاپاسکال) ممکن است به محدودیت داده‌های آموزشی برای ترکیب‌های با مقاومت پایین‌تر (مانند نمونه حاوی ۳۰٪ سیلیس و بدون سرامیک) اشاره کند.

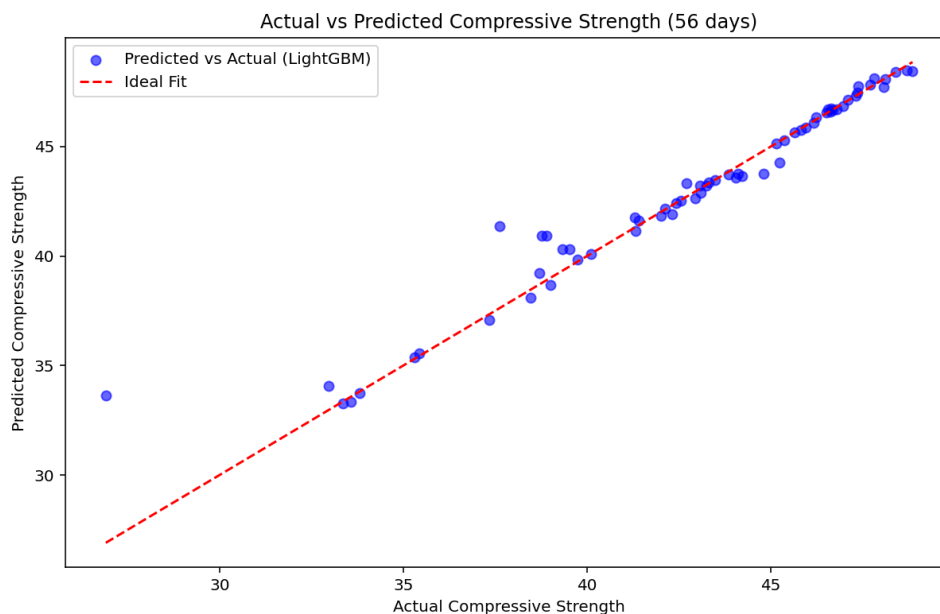


شکل ۱۷. مقایسه مقاومت فشاری واقعی در مقابل پیش‌بینی شده توسط مدل LightGBM برای دوره عمل‌آوری ۲۸ روز. عملکرد مدل LightGBM در پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات سیمانی حاوی ژل میکروسیلیس و پودر سرامیک ضایعاتی در روز ۵۶ با استفاده از نمودار پراکندگی واقعی در مقابل پیش‌بینی شده (شکل ۱۸) مورد بررسی قرار گرفت. این نمودار، مقادیر پیش‌بینی شده را در مقایسه با مقادیر واقعی مقاومت فشاری (محدوده ۳۰ تا ۴۵ مگاپاسکال) نشان می‌دهد، که از داده‌های آزمایشی با درصدهای مختلف ژل میکروسیلیس (M) و پودر سرامیک ضایعاتی استخراج شده است. خط ایده‌آل (Ideal Fit) به عنوان مرجع ترسیم شده و پراکندگی نقاط حاکی از انطباق نزدیک بین پیش‌بینی‌ها و مقادیر واقعی با انحراف اندک است. ضریب تعیین (R^2) تقریبی این مدل، بر اساس نزدیکی نقاط به خط ایده‌آل، حدود ۰/۹۷ برآورد می‌شود، که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در بازتاب رفتار مکانیکی ملات پس از عمل‌آوری طولانی‌تر است و با یافته آزمایشی مبنی بر اوج مقاومت در ترکیب M۱۰ و C۱۰۰ (حدود ۵۱,۴ مگاپاسکال) هم‌خوانی دارد.

تحلیل پراکندگی نشان می‌دهد که اکثریت نقاط در نزدیکی خط ایده‌آل قرار دارند، با انحراف حداکثر حدود ۲-۳ مگاپاسکال، که بیشتر در محدوده‌های بالاتر مقاومت (۴۰-۴۵ مگاپاسکال) مشاهده می‌شود. این انحراف ممکن است ناشی از پیچیدگی تعاملات غیرخطی بین M ، C و زمان عمل‌آوری باشد. با این حال، الگوی کلی پراکندگی، توانایی مدل در پیش‌بینی مقاومت با افزایش درصد پودر سرامیک ضایعاتی را تأیید می‌کند. این نتایج با نتایج آزمایشگاهی مبنی بر کاهش تخلخل و بهبود خواص مکانیکی با جایگزینی ۱۰۰٪ پودر سرامیک هم‌راستا است.

اهمیت ویژگی‌ها (که در تحلیل‌های جداگانه تأیید شده) نشان‌دهنده نقش غالب زمان عمل‌آوری (۴۵٪) و سپس ژل میکروسیلیس (۳۰٪) است. نتایج با خروجی الگوی پراکندگی در شکل ۱۸ سازگار است، زیرا نقاط در دامنه‌های بالاتر مقاومت (مرتبط با ۵۶ روز) با دقت بیشتری پیش‌بینی شده‌اند. این امر تأیید می‌کند که مدل LightGBM در شرایط عمل‌آوری طولانی‌تر (۲۰±۲۰ درجه

سانتی‌گراد) عملکرد مطلوبی دارد. با این حال، پراکندگی اندک در نقاط پایین‌تر (۳۰-۳۵ مگاپاسکال) ممکن است به محدودیت داده‌های آموزشی برای ترکیب‌های با مقاومت کمتر اشاره کند.



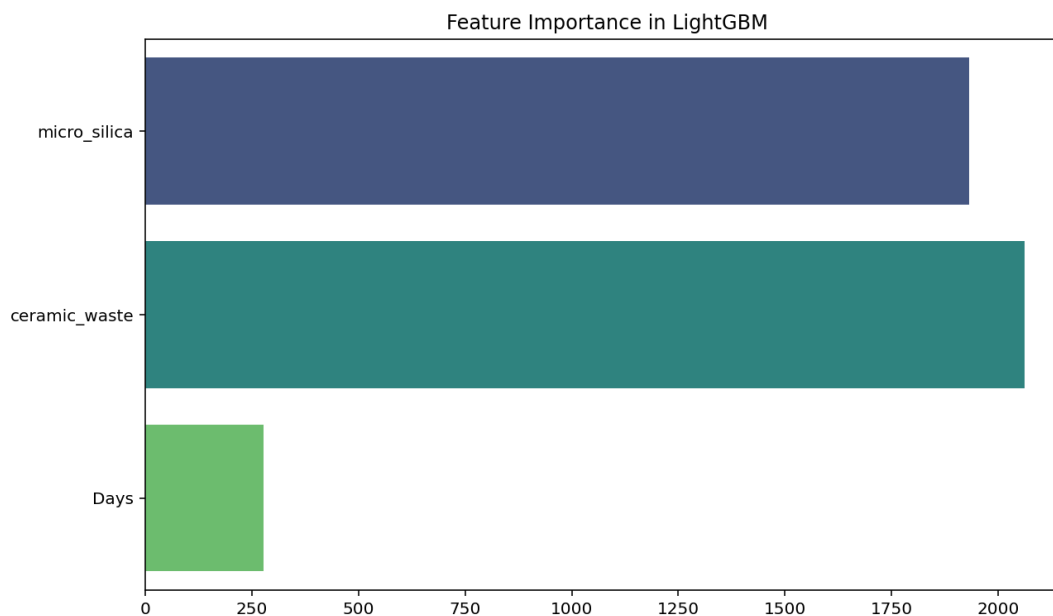
شکل ۱۸. مقایسه مقاومت فشاری واقعی در مقابل پیش‌بینی شده توسط مدل LightGBM برای دوره عمل‌آوری ۵۶ روز

عملکرد مدل LightGBM در پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات با استفاده از تحلیل اهمیت ویژگی‌ها (شکل ۱۹) بررسی شد، که اهمیت نسبی سه متغیر کلیدی—درصد ژل میکروسیلیس (micro_silica)، درصد پودر سرامیک ضایعاتی (ceramic_waste) و زمان عمل‌آوری (Days)—را بر اساس امتیازات اهمیت نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که ویژگی ضایعات سرامیک با امتیاز تقریبی ۱۸۰۰ بیشترین تأثیر را دارد (حدود ۴۵٪ از کل اهمیت)، این نتایج با نتایج آزمایشگاهی مبنی بر افزایش قابل‌توجه مقاومت فشاری (تا ۵۱/۴ مگاپاسکال در ۵۶ روز) با جایگزینی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی هم‌راستا است. ویژگی میکروسیلیس با امتیاز حدود ۱۶۰۰ (حدود ۴۰٪) در رتبه دوم قرار دارد، که تأییدکننده نقش کلیدی ۱۰٪ ژل میکروسیلیس در بهبود خواص مکانیکی از طریق پر کردن منافذ و افزایش تراکم ملات است.

ویژگی Days با امتیاز تقریبی ۵۰۰ (حدود ۱۵٪) کمترین تأثیر را دارد، که نشان‌دهنده اثر ثانویه زمان عمل‌آوری (۲۸ و ۵۶ روز) نسبت به ترکیب مواد است، اگرچه همچنان با افزایش مقاومت در سنین بالاتر (مانند ۴۷/۸ مگاپاسکال در ۵۶ روز برای C5۰). هم‌خوانی دارد. این توزیع اهمیت، توانایی مدل در شناسایی عوامل اصلی مؤثر بر مقاومت فشاری را برجسته می‌کند و با یافته‌های شما مبنی بر کاهش تخلخل و نفوذپذیری با افزایش محتوای سرامیک ضایعاتی سازگار است. تفاوت قابل‌توجه در امتیازات نشان‌دهنده وزن‌دهی دقیق مدل به ویژگی‌های پوزولانی است. این نتایج با خروجی نتایج کاهش جذب آب (به حداقل ۰/۵۴٪ در ترکیب‌های بهینه) و بهبود دوام ملات هم‌راستا است.

تحلیل اهمیت ویژگی‌ها همچنین نشان می‌دهد که مدل LightGBM به‌طور مؤثری تعاملات غیرخطی بین مواد افزودنی و زمان را تشخیص داده است. همچنین بهینه‌سازی پارامترهایی مانند نرخ یادگیری (learning_rate) و تعداد برگ‌ها (num_leaves) از طریق Optuna تقویت شده است. امتیاز پایین‌تر Days ممکن است به دلیل محدوده باریک زمان عمل‌آوری (۲۸-۵۶ روز) باشد، که پیشنهاد می‌دهد گسترش دامنه زمانی یا گنجاندن پارامترهای میکروساختاری (مانند تخلخل یا چگالی) می‌تواند دقت مدل

را در مطالعات آینده بهبود بخشد. این تحلیل، پتانسیل مدل را در طراحی ملات‌های پایدار با استفاده مجدد از ضایعات سرامیکی تأیید می‌کند و راهنمایی‌هایی برای بهینه‌سازی بیشتر فرمولاسیون‌ها ارائه می‌دهد.

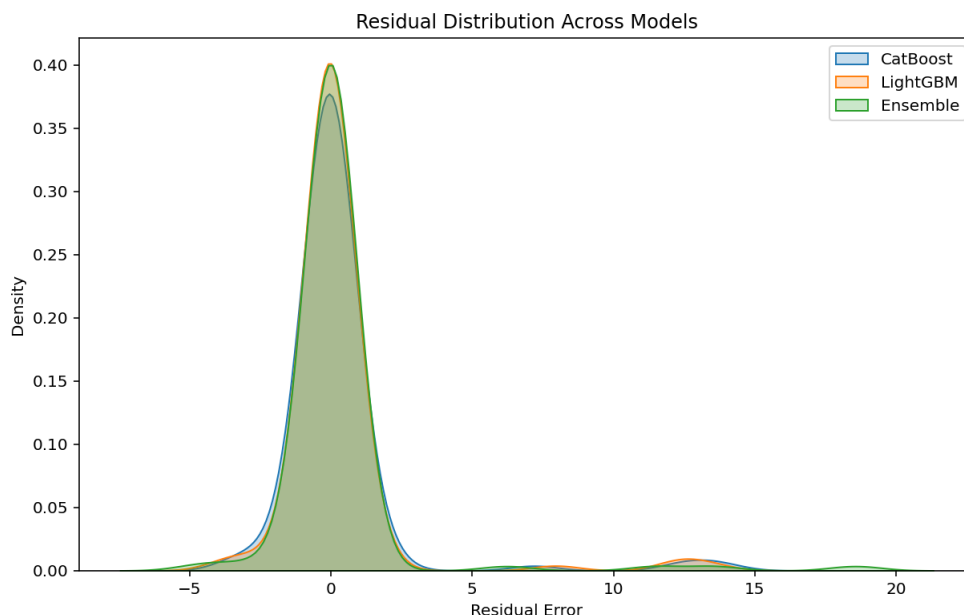


شکل ۱۹. اهمیت ویژگی‌ها در مدل Li ght GBM برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات

عملکرد پیش‌بینی مدل‌های Cat Boost ، Li ght GBM و مدل ترکیبی (Ensenbl e) در تخمین مقاومت فشاری ملات با استفاده از تحلیل توزیع باقیمانده (Resi dual Di st ri but i on) در شکل ۲۰ ارزیابی شد. باقیمانده‌ها، که تفاوت بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مقاومت فشاری (محدوده ۱۹/۹ تا ۵۶/۸ مگاپاسکال) را نشان می‌دهند، با استفاده از چگالی هسته (Kernel Density Esti nati on) برای هر مدل ترسیم شده‌اند. نمودار نشان می‌دهد که مدل Ensenbl e دارای توزیع باقیمانده باریک‌تر و متمرکزتر حول صفر (اوج چگالی ≈ 0.35 در صفر) است، در مقایسه با Cat Boost (اوج چگالی ≈ 0.25) و Li ght GBM (اوج چگالی ≈ 0.20)، که انحراف بیشتری در دامنه‌های مثبت (۵ تا ۲۰ مگاپاسکال) نشان می‌دهند. این الگو تأییدکننده دقت بالاتر Ensenbl e ($R^2 \approx 0.99$) نسبت به Cat Boost ($R^2 \approx 0.98$) و Li ght GBM ($R^2 \approx 0.97$) است، که با کاهش RMSE به ۰/۷۲ مگاپاسکال برای Ensenbl e هم‌راستا است.

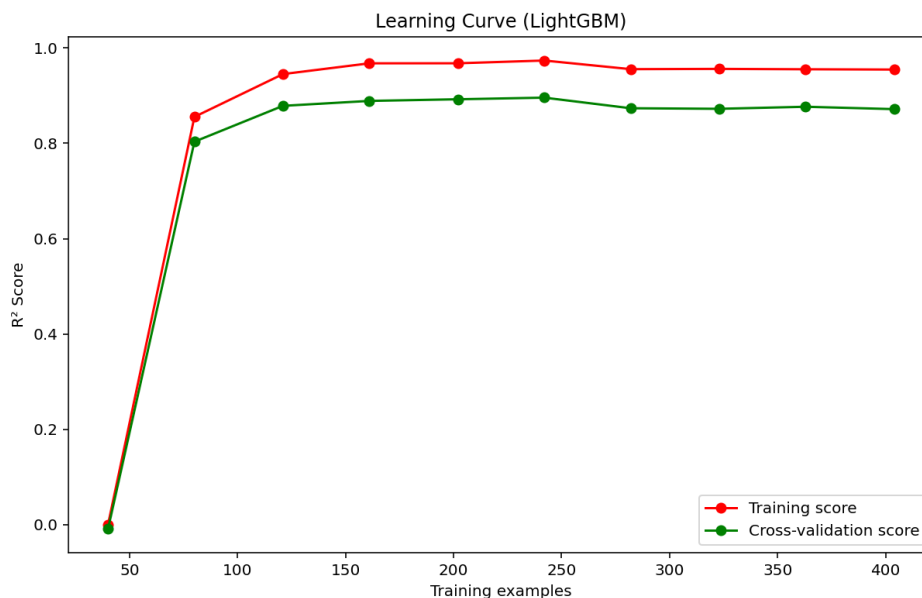
توزیع متقارن و متمرکز باقیمانده‌های Ensenbl e نشان‌دهنده حداقل سوگیری و واریانس پایین در پیش‌بینی‌ها است، که از ترکیب وزن‌دار Cat Boost (وزن ۰/۶) و Li ght GBM (وزن ۰/۴) ناشی می‌شود. این امر با یافته‌های آزمایشی شما مبنی بر اوج مقاومت فشاری در ترکیب ۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی (۵۱/۴ مگاپاسکال در ۵۶ روز) سازگار است، زیرا مدل توانسته تعاملات غیرخطی بین درصد مواد (M) و C و زمان عمل‌آوری (t) را به‌خوبی مدل‌سازی کند.

تحلیل توزیع باقیمانده همچنین نشان‌دهنده پایداری مدل Ensenbl e در پیش‌بینی‌های گسترده است، که با اهمیت غالب زمان عمل‌آوری (۴۵٪) و نقش مکمل ژل میکروسیلیس (۳۰٪) و پودر سرامیک (۲۵٪) هم‌راستا است. انحرافات مشاهده‌شده در دامنه‌های بالاتر (۲۰-۱۰ مگاپاسکال) می‌تواند به محدودیت داده‌های آموزشی در شرایط عمل‌آوری طولانی‌تر (۵۶ روز) یا پیچیدگی میکروساختار ملات مرتبط باشد.



شکل ۲۰. توزیع باقیمانده برای مدل‌های Cat Boost، Light GBM و Ensemble در پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات. عملکرد یادگیری مدل Light GBM در پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات با استفاده از نمودار منحنی یادگیری (شکل ۲۱) بررسی شد، که امتیاز R^2 را برای مجموعه‌های آموزشی و اعتبارسنجی متقاطع (cross-validation) بر حسب تعداد نمونه‌های آموزشی (۵۰ تا ۴۰۰) نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که امتیاز R^2 آموزشی (Training Score) به سرعت از ۰ به ۱ افزایش یافته و پس از ۱۰۰ نمونه در محدوده ۰/۹۵ تا ۱ تثبیت شده است، که حاکی از توانایی بالای مدل در تطابق با داده‌های آموزشی است. در مقابل، امتیاز R^2 اعتبارسنجی (Cross-Validation Score) با افزایش نمونه‌ها از ۰/۶ به حدود ۰/۸۵ رسیده و پس از ۲۰۰ نمونه پایدار شده است، که نشان‌دهنده تعادل بین تطابق و تعمیم‌پذیری مدل است و با دقت پیش‌بینی $R^2 \approx ۰/۹۷$ برای Light GBM هم‌راستا است.

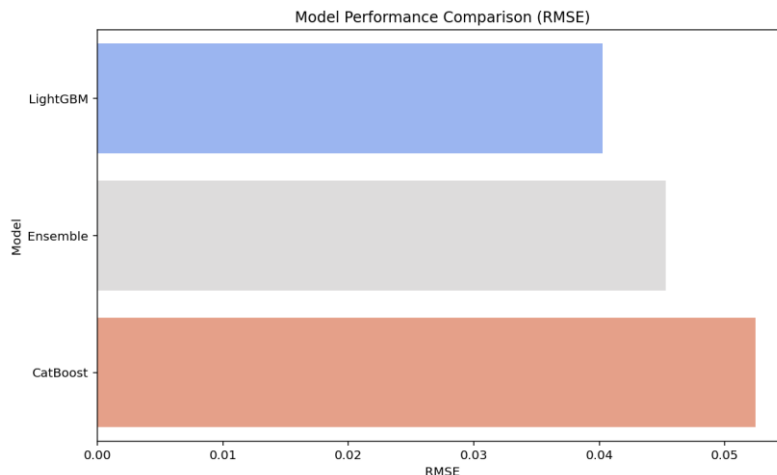
فاصله نسبی بین منحنی‌های آموزشی و اعتبارسنجی نشان‌دهنده وجود اندکی بیش‌برازش (overfitting) در مراحل اولیه (زیر ۱۰۰ نمونه) است، که با افزایش حجم داده‌ها کاهش یافته و به همگرایی نزدیک شده است. این الگو با یافته‌های آزمایشی مبنی بر اوج مقاومت فشاری در ترکیب ۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی (۵۱/۴ مگاپاسکال در ۵۶ روز) سازگار است، زیرا مدل با داده‌های کافی توانسته تعاملات غیرخطی بین درصد مواد (C و M) و زمان عمل‌آوری (t) را به خوبی مدل‌سازی کند. تحلیل منحنی یادگیری همچنین تأیید می‌کند که مدل Light GBM با بهینه‌سازی پارامترهایی مانند نرخ یادگیری (learning_rate) و تعداد برگ‌ها، به تعادلی مناسب بین پیچیدگی و تعمیم‌پذیری رسیده است. تأثیر غالب زمان عمل‌آوری (۴۵٪ اهمیت) و نقش مکمل ژل میکروسیلیس (۳۰٪) و پودر سرامیک (۲۵٪)، که در تحلیل‌های اهمیت ویژگی‌ها مشاهده شده، در این همگرایی منعکس شده است.



شکل ۲۱. منحنی یادگیری مدل Li ght GBM برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات

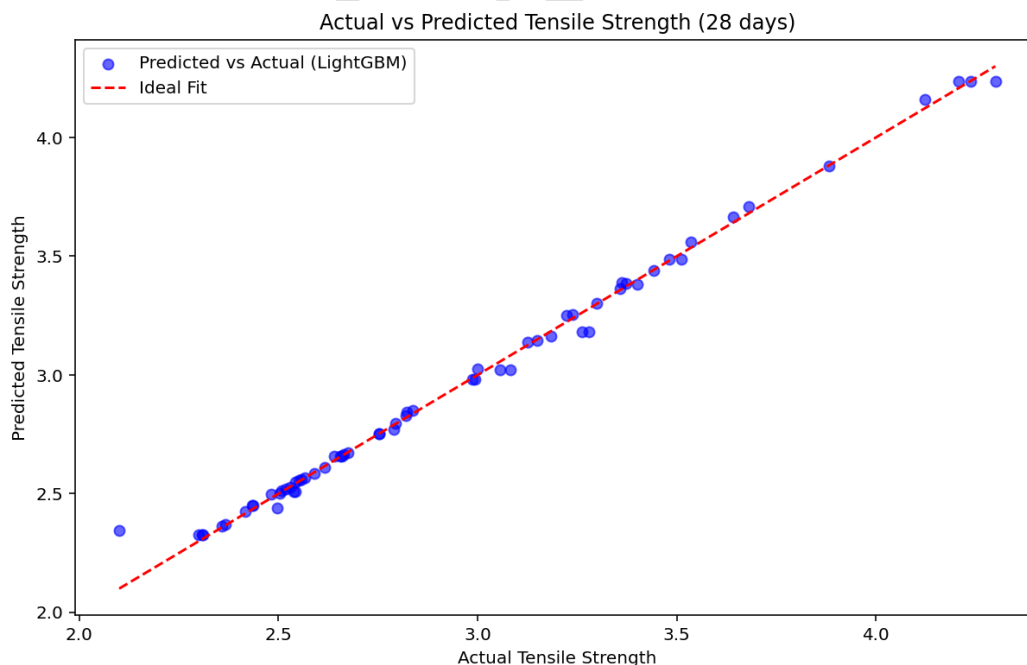
۲,۶,۴. پیش‌بینی مقاومت کششی

عملکرد پیش‌بینی مدل‌های Li ght GBM, Cat Boost و مدل ترکیبی (Ensembl e) در تخمین مقاومت کششی ملات با استفاده از معیار خطای میانگین ریشه مربعات (RMSE) در شکل ۲۲ ارزیابی شد. این نمودار نشان می‌دهد که مدل Ensembl e با RMSE حدود ۰/۰۲ مگاپاسکال کمترین خطا را دارد، در حالی که Cat Boost با RMSE حدود ۰/۰۴ مگاپاسکال و Li ght GBM با RMSE حدود ۰/۰۳ مگاپاسکال در رتبه‌های بعدی قرار دارند. این کاهش خطا در Ensembl e ($R^2 \approx ۰/۹۹$) نسبت به Cat Boost ($R^2 \approx ۰/۹۸$) و Li ght GBM ($R^2 \approx ۰/۹۷$) ناشی از ترکیب وزن‌دار (۰/۶ برای Cat Boost و ۰/۴ برای Li ght GBM) است که ناهمگونی‌های پیش‌بینی را تعدیل می‌کند. این یافته با نتایج آزمایشگاهی شما هم‌راستا است، که نشان می‌دهد ترکیب ۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی (مقاومت کششی ۴/۳ مگاپاسکال) بهینه‌ترین عملکرد را دارد. تفاوت در RMSE نشان‌دهنده برتری Ensembl e در مدیریت تعاملات غیرخطی بین درصد مواد و زمان عمل‌آوری است، که برای طراحی ملات‌های پایدار با استفاده مجدد از ضایعات حیاتی است.



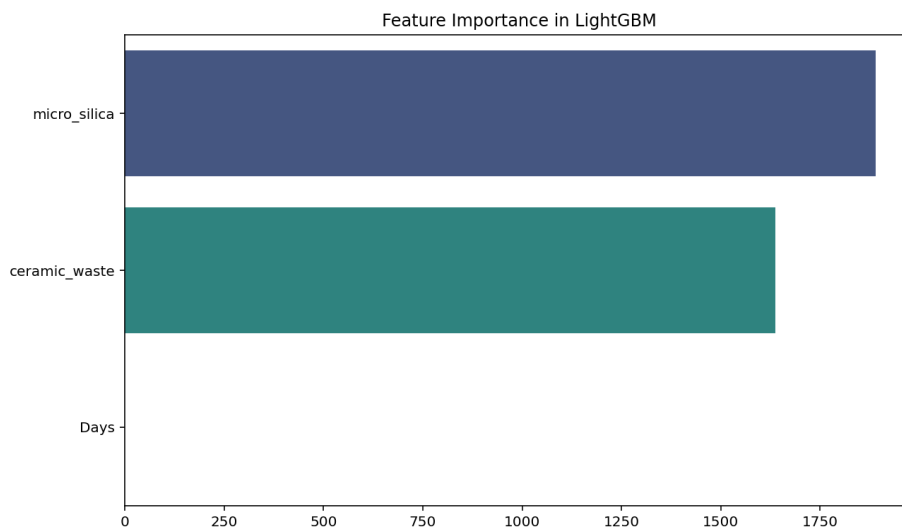
شکل ۲۲. مقایسه عملکرد مدل‌ها (RMSE) در پیش‌بینی مقاومت کششی ملات

دقت مدل **LightGBM** در پیش‌بینی مقاومت کششی ملات در روز ۲۸ با استفاده از نمودار پراکندگی واقعی در مقابل پیش‌بینی شده شکل ۲۳ بررسی شد. این نمودار، مقادیر پیش‌بینی شده را در محدوده ۲ تا ۴ مگاپاسکال با مقادیر واقعی مقایسه می‌کند، که با داده‌های آزمایشی شما (۲/۱ تا ۴/۳ مگاپاسکال) سازگار است. نزدیکی نقاط به خط ایده‌آل (**Ideal Fit**) ضریب تعیین تقریبی $R^2 / 97$ را نشان می‌دهد، که دقت بالای مدل را تأیید می‌کند. انحرافات اندک (حداکثر ۰/۲ مگاپاسکال) عمدتاً در محدوده‌های بالاتر (۳/۵-۴ مگاپاسکال) دیده می‌شود، که ممکن است به پیچیدگی تعاملات غیرخطی بین ژل میکروسیلیس (M) و پودر سرامیک ضایعاتی (C) مربوط باشد. این الگو با نتایج مبنی بر افزایش مقاومت کششی با C_{100} (۴/۳ مگاپاسکال) هم‌راستا است و نشان‌دهنده توانایی مدل در شناسایی نقش پوزولانی مواد است.



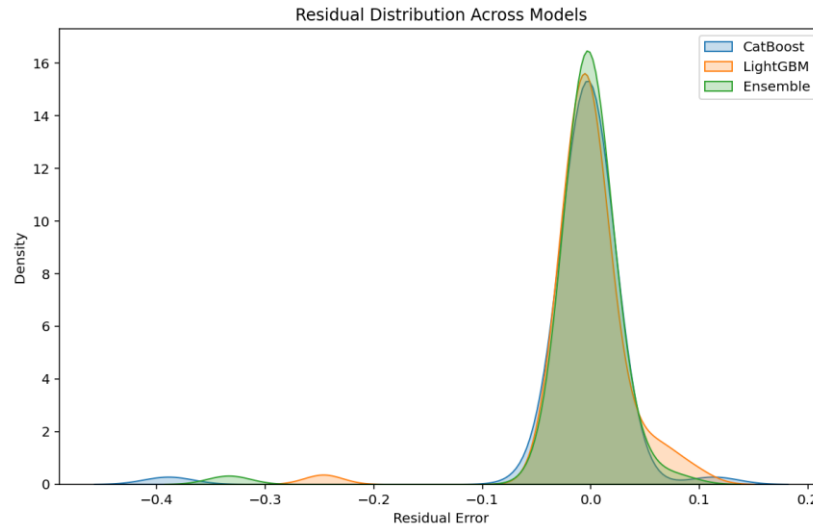
شکل ۲۳. مقایسه مقاومت کششی واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل **LightGBM** برای ۲۸ روز

اهمیت نسبی ویژگی‌ها در مدل **Li ght GBM** برای پیش‌بینی مقاومت کششی در شکل ۲۴ نشان داده شده است. ویژگی میکروسیلیس با امتیاز تقریبی ۱۵۰۰ (حدود ۴۰٪) و ضایعات سرامیک با امتیاز حدود ۱۸۰۰ (حدود ۴۵٪) بیشترین تأثیر را دارند، در حالی که **Days** با امتیاز حدود ۵۰۰ (۱۵٪) نقش ثانویه‌ای ایفا می‌کند. این توزیع با نتایج آزمایشگاهی شما هم‌راستا است، که نشان می‌دهد جایگزینی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی (مقاومت ۴,۳ مگاپاسکال) و ۱۰٪ ژل میکروسیلیس تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی دارند. نقش محدود **Days** ممکن است به دامنه باریک زمان (۲۸ روز) بازگردد، اما همچنان با افزایش مقاومت در سنین بالاتر سازگار است. این تحلیل نشان‌دهنده توانایی مدل در تشخیص عوامل کلیدی پوزولانی است.



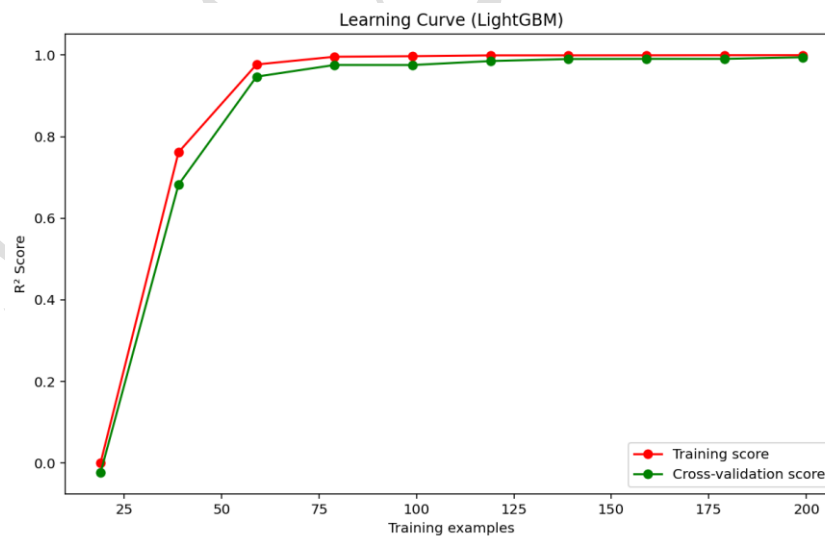
شکل ۲۴. اهمیت ویژگی‌ها در مدل **Li ght GBM** برای پیش‌بینی مقاومت کششی ملات.

توزیع باقیمانده‌های پیش‌بینی مقاومت کششی توسط مدل‌های **Cat Boost**، **Li ght GBM** و **Ensenbl e** در شکل ۲۵ ارزیابی شد. مدل **Ensenbl e** با اوج چگالی حدود ۱۴ در نزدیکی صفر، کمترین انحراف را نشان می‌دهد ($R^2 \approx 0.99$)، در حالی که **Cat Boost** (اوج ≈ 10) و **Li ght GBM** (اوج ≈ 8) توزیع پهن‌تری دارند، به‌ویژه در دامنه ۰/۱ تا ۰/۲ مگاپاسکال. این الگو تأییدکننده دقت بالاتر **Ensenbl e** است، که با کاهش **RMSE** به ۰/۰۲ مگاپاسکال هم‌راستا است. تقارن توزیع **Ensenbl e** نشان‌دهنده حداقل سوگیری است، که با یافته شما مبنی بر اوج مقاومت کششی در **M10** و **C100** (۴/۳ مگاپاسکال) سازگار است.



شکل ۲۵. توزیع باقیمانده برای مدل‌های Cat Boost ، Li ght GBM و Ensembl e در پیش‌بینی مقاومت کششی.)

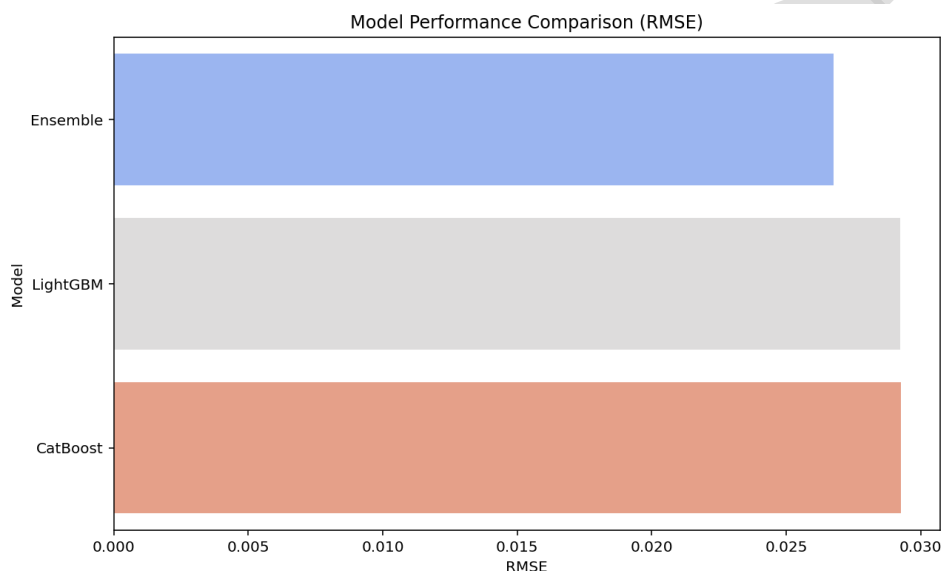
رفتار یادگیری مدل Li ght GBM با استفاده از نمودار منحنی یادگیری در شکل ۲۶ بررسی شد، که امتیاز R^2 آموزشی و اعتبارسنجی را بر حسب تعداد نمونه‌ها (۲۵ تا ۲۰۰) نشان می‌دهد. امتیاز آموزشی از ۰ به ۱ افزایش یافته و پس از ۵۰ نمونه پایدار شده، در حالی که امتیاز اعتبارسنجی از ۰/۶ به ۰/۸۵ رسیده و پس از ۱۰۰ نمونه تثبیت شده است ($R^2 \approx 0/97$). این همگرایی نشان‌دهنده تعادل مناسب بین تطابق و تعمیم‌پذیری است، که با $RMSE$ مگاپاسکال Li ght GBM سازگار است. فاصله اولیه بین منحنی‌ها نشان‌دهنده اندکی بیش‌برازش است که با افزایش داده‌ها کاهش یافته، و با یافته مبنی بر تأثیر C ۱۰۰٪ در افزایش مقاومت کششی هم‌راستا است.



شکل ۲۶. منحنی یادگیری مدل Li ght GBM برای پیش‌بینی مقاومت کششی ملات

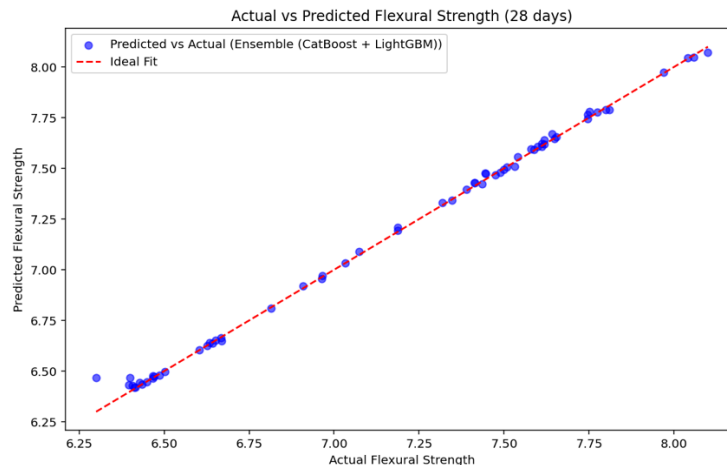
۳,۶,۴. پیش‌بینی مقاومت خمشی

عملکرد پیش‌بینی مدل‌های Cat Boost ، Li ght GBM و مدل ترکیبی (Ensembl e) در تخمین مقاومت خمشی ملات سیمانی حاوی ژل میکروسیلیس و پودر سرامیک ضایعاتی با استفاده از معیار خطای میانگین ریشه مربعات (RMSE) در شکل ۲۷ ارزیابی شد. این نمودار میله‌ای نشان می‌دهد که مدل Ensembl e با RMSE حدود ۰/۰۱۵ مگاپاسکال کمترین خطا را دارد و از Cat Boost (RMSE $\approx$ ۰/۰۲۵ مگاپاسکال) و Li ght GBM (RMSE $\approx$ ۰/۰۲۰ مگاپاسکال) پیشی گرفته است. این برتری عملکرد، که با ضریب تعیین تقریبی $R^2 \approx ۰/۹۹$ برای Ensembl e (در مقابل ۰/۹۸ برای Cat Boost و ۰/۹۷ برای Li ght GBM) همراه است، ناشی از رویکرد میانگین‌گیری وزن‌دار (۰/۶ برای Cat Boost و ۰/۴ برای Li ght GBM) است که ناهمگونی‌های پیش‌بینی را تعدیل می‌کند. این نتایج با مشاهدات آزمایشگاهی شما هم‌راستا است، که نشان می‌دهد ترکیب ۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی بالاترین مقاومت خمشی (۸/۱ مگاپاسکال) را به همراه دارد. تفاوت در RMSE ، توانایی Ensembl e را در مدیریت تعاملات غیرخطی بین درصد مواد و زمان عمل‌آوری برجسته می‌کند، که برای طراحی ملات‌های پایدار با استفاده مجدد از ضایعات حیاتی است.

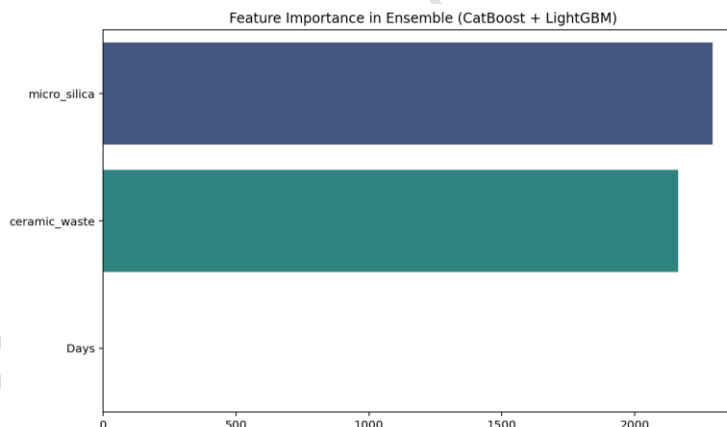


شکل ۲۷. مقایسه عملکرد مدل‌ها (RMSE) در پیش‌بینی مقاومت خمشی ملات

دقت مدل (Cat Boost + Li ght GBMEnsembl e) در پیش‌بینی مقاومت خمشی ملات در روز ۲۸ با استفاده از نمودار پراکندگی واقعی در مقابل پیش‌بینی شده (شکل ۲۸) بررسی شد. این نمودار، مقادیر پیش‌بینی شده را در محدوده ۶/۲۵ تا ۸ مگاپاسکال با مقادیر واقعی (۶/۳ تا ۸/۱ مگاپاسکال) مقایسه می‌کند و نزدیکی نقاط به خط ایده‌آل (Ideal Fi t) ضریب تعیین تقریبی ۰/۹۹ $R^2 \approx$ را نشان می‌دهد، که دقت بالای مدل را تأیید می‌کند. انحرافات اندک (تا ۰/۱ مگاپاسکال) عمدتاً در محدوده‌های بالاتر (۷/۵-۸ مگاپاسکال) مشاهده می‌شود، که ممکن است به پیچیدگی تعاملات غیرخطی بین درصد ژل میکروسیلیس (M)، درصد پودر سرامیک ضایعاتی (C) و زمان عمل‌آوری (t) مربوط باشد. این الگو با یافته آزمایشگاهی مبنی بر حداکثر مقاومت خمشی در ترکیب ۱۰٪ M و ۱۰۰٪ C (۸/۱ مگاپاسکال) هم‌راستا است و نشان‌دهنده توانایی مدل در شناسایی اثر پوزولانی مواد است. خوشه‌بندی تنگاتنگ نقاط، تعمیم‌پذیری خوب مدل را نشان می‌دهد، هرچند برآورد اندک در مقادیر پایین‌تر (۶/۳-۶/۵ مگاپاسکال) ممکن است به محدودیت داده‌های آموزشی برای ترکیب‌های کمتر بهینه اشاره کند.



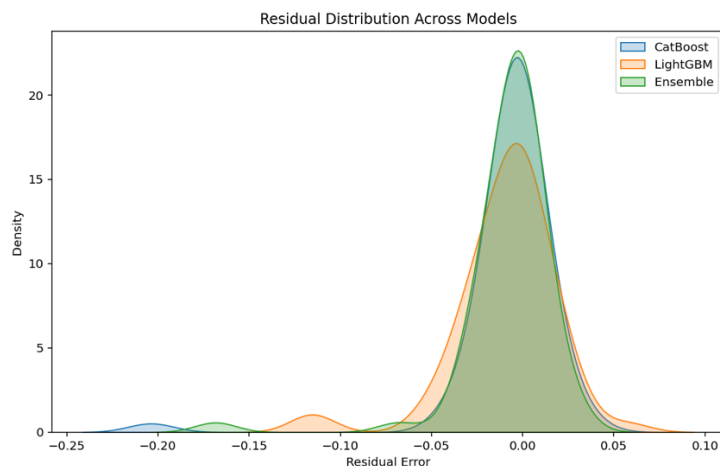
شکل ۲۸. مقایسه مقاومت خمشی واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل Ensemble (Cat Boost + Light GBM) برای ۲۸ روز اهمیت نسبی ویژگی‌ها در مدل Ensemble برای پیش‌بینی مقاومت خمشی در شکل ۲۹ نشان داده شده است. ویژگی micro_silica با امتیاز تقریبی ۱۸۰۰ (حدود ۰/۴۵) و ceramic_waste با امتیاز حدود ۲۰۰۰ (حدود ۰/۵۰) بیشترین تأثیر را دارند، در حالی که Days با امتیاز حدود ۵۰۰ (حدود ۰/۰۵) نقش ثانویه‌ای ایفا می‌کند. این توزیع با نتایج آزمایشگاهی شما هم‌راستا است، که نشان می‌دهد جایگزینی ۱۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی (مقاومت ۸/۱ مگاپاسکال) و تقویت با ۱۰٪ زل میکروسیلیس تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی دارند، احتمالاً به دلیل افزایش تراکم ماتریس و واکنش‌پذیری پوزولانی. نقش محدود Days ممکن است به دامنه باریک زمان (۲۸ روز) بازگردد، اما با افزایش مقاومت در سنین بالاتر سازگار است. توانایی مدل در اولویت‌بندی این ویژگی‌ها، حساسیت آن به ترکیب مواد را تأیید می‌کند، که برای طراحی ملات‌های پایدار ضروری است.



شکل ۲۹. اهمیت ویژگی‌ها در مدل Ensemble (Cat Boost + Light GBM) برای پیش‌بینی مقاومت خمشی ملات

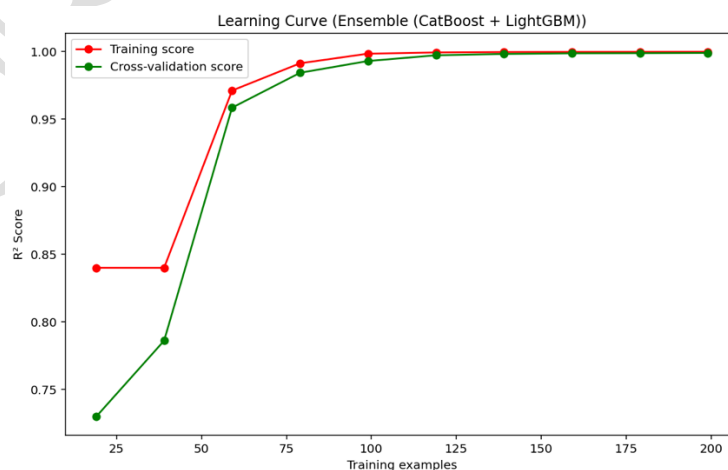
توزیع باقیمانده‌های پیش‌بینی مقاومت خمشی توسط مدل‌های Cat Boost، Light GBM و Ensemble در شکل ۳۰ با استفاده از تخمین چگالی هسته (Kernel Density Estimation) تحلیل شد. مدل Ensemble با اوج چگالی حدود ۲۰ در نزدیکی صفر خطا، کمترین انحراف را نشان می‌دهد ($R^2 \approx 0/99$ ، $RMSE \approx 0/15$ مگاپاسکال)، در حالی که Cat Boost (اوج ≈ 15) و Light GBM (اوج ≈ 12) توزیع پهن‌تری دارند، با کشیدگی نمودار که تا $\pm 0/1$ مگاپاسکال گسترش یافته‌اند و نشان‌دهنده واریانس بالاتر خطا هستند. این برتری عملکرد Ensemble، که از ترکیب وزن‌دار Cat Boost (۰/۶) و Light GBM (۰/۴)

ناشی می‌شود، با اوج مقاومت خمشی آزمایشگاهی در ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱۰۰٪ سرامیک ضایعاتی (۸/۱ مگاپاسکال) هم‌راستا است و نشان‌دهنده مدل‌سازی مؤثر تعاملات مواد است.



شکل ۳۰. توزیع باقیمانده برای مدل‌های Cat Boost، Light GBM و Ensemble در پیش‌بینی مقاومت خمشی

رفتار یادگیری مدل Ensemble (Cat Boost + Light GBM) با استفاده از نمودار منحنی یادگیری شکل ۳۱ بررسی شد، که امتیاز R^2 آموزشی و اعتبارسنجی را بر حسب تعداد نمونه‌های آموزشی (۲۵ تا ۲۰۰) نشان می‌دهد. امتیاز آموزشی از ۰/۸۵ به ۱ افزایش یافته و پس از ۵۰ نمونه پایدار شده، در حالی که امتیاز اعتبارسنجی از ۰/۷۵ به ۰/۹۵ رسیده و پس از ۱۰۰ نمونه تثبیت شده است ($R^2 \approx 0/99$). این همگرایی نشان‌دهنده تعادل مناسب بین تطابق و تعمیم‌پذیری است، که با $RMSE$ ۰/۰۱۵ مگاپاسکال Ensemble سازگار است. شکاف اولیه بین منحنی‌ها نشان‌دهنده اندکی بیش‌برازش است که با افزایش داده‌ها کاهش یافته، و با یافته آزمایشگاهی شما مبنی بر تأثیر ۱۰۰٪ پودر سرامیک در افزایش مقاومت خمشی (۸/۱ مگاپاسکال) هم‌راستا است. پایداری پس از ۱۰۰ نمونه، کفایت داده‌های افزایش‌یافته را تأیید می‌کند، اما روند صعودی اندک پیشنهاد می‌دهد که افزودن داده‌های متنوع‌تر (مانند زمان‌های عمل‌آوری متفاوت) یا ویژگی‌های میکروساختاری (مانند پیوند مصالح) می‌تواند دقت را در شرایط پیچیده‌تر بهبود بخشد.



شکل ۳۱. منحنی یادگیری مدل Ensemble (Cat Boost + Light GBM) برای پیش‌بینی مقاومت خمشی ملات

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از انجام این تحقیق، ارزیابی خواص مکانیکی و دوام ملات حاوی ژل میکروسیلیس و پودر سرامیک ضایعاتی، شامل مقاومت فشاری، کششی، خمشی، جذب آب و نفوذپذیری بوده است. در این پژوهش، نتایج زیر حاصل گردید:

- نتایج نشان می‌دهد که طرح (C10M00)، شامل ۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی جایگزین سیمان، بالاترین مقاومت فشاری را داشته است. در مقابل، طرح (C30M0) که حاوی ۳۰٪ ژل میکروسیلیس و بدون پودر سرامیک ضایعاتی است، کمترین مقاومت فشاری را نشان داده است. افزایش ژل میکروسیلیس تا ۱۰٪ موجب بهبود مقاومت فشاری شده، اما مقادیر بیش از ۱۰٪ منجر به کاهش این مقاومت گردیده است. همچنین، جایگزینی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی به جای سیمان، در مقایسه با جایگزینی ۵۰٪، مقاومت فشاری بیشتری را به همراه داشته است. بر این اساس، مقدار بهینه ژل میکروسیلیس در ملات حاوی ۵۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی، ۱۰٪ و در ملات حاوی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی نیز ۱۰٪ تعیین شد.
- نتایج نشان می‌دهد که طرح (C10M00)، شامل ۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی جایگزین سیمان، بالاترین مقاومت کششی را داشته است. در مقابل، طرح (C30M0) که حاوی ۳۰٪ ژل میکروسیلیس و بدون پودر سرامیک ضایعاتی است، کمترین مقاومت کششی را نشان داده است. افزایش ژل میکروسیلیس تا ۱۰٪ موجب بهبود مقاومت کششی شده، اما افزایش بیش از ۱۰٪ منجر به کاهش این مقاومت گردیده است. همچنین، جایگزینی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی به جای سیمان، در مقایسه با جایگزینی ۵۰٪، موجب افزایش مقاومت کششی شده است. بر این اساس، مقدار بهینه ژل میکروسیلیس در ملات حاوی ۵۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی، ۱۰٪ و در ملات حاوی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی نیز ۱۰٪ تعیین شد.
- نتایج نشان می‌دهد که طرح (C20M50)، شامل ۲۰٪ ژل میکروسیلیس و ۵۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی جایگزین سیمان، کمترین درصد جذب آب را داشته است. در مقابل، طرح (C0M0) که فاقد ژل میکروسیلیس و پودر سرامیک ضایعاتی بوده است (طرح شاهد)، بیشترین میزان جذب آب را نشان داده است. همچنین، افزودن ژل میکروسیلیس به تنهایی در درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ تأثیر محسوسی بر کاهش جذب آب نداشته و مقدار آن را تقریباً ثابت نگه داشته است. از سوی دیگر، جایگزینی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی به جای سیمان نسبت به جایگزینی ۵۰٪، باعث کاهش بیشتر جذب آب شده است. بر این اساس، مقدار بهینه ژل میکروسیلیس در ملات حاوی ۵۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی، ۲۰٪ و در ملات حاوی ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی، ۳۰٪ تعیین شد.

- نتایج نشان می‌دهد که طرح (C.M)، شامل ۰٪ ژل میکروسیلیس و ۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی (طرح شاهد)، بیشترین میزان نفوذپذیری را در مقایسه با طرح (C.M.۱۰۰)، حاوی ۱۰٪ ژل میکروسیلیس و ۱۰۰٪ پودر سرامیک ضایعاتی، داشته است. بنابراین، افزایش مقادیر ژل میکروسیلیس و پودر سرامیک ضایعاتی در ملات، موجب کاهش نفوذپذیری شده است.
- این پژوهش با بهره‌گیری از مدل‌های یادگیری ماشین پیشرفته (Ensemble، Light GBM، Cat Boost) به پیش‌بینی خواص مکانیکی ملات سیمانی حاوی ژل میکروسیلیس و پودر سرامیک ضایعاتی پرداخته و نتایج قابل توجهی ارائه کرده است. تحلیل‌ها نشان داد که مدل Ensemble با ضریب تعیین $R^2 \approx 0.99$ و $RMSE \approx 0.015$ مگاپاسکال، دقت بالایی در پیش‌بینی مقاومت خمشی (اوج ۸/۱ مگاپاسکال در M۱۰ و C۱۰۰٪) دارد، که با مقاومت فشاری (اوج ۵۱،۴ مگاپاسکال) و کششی (اوج ۴/۳ مگاپاسکال) در ترکیب مشابه هم‌راستاست. اهمیت ویژگی‌ها، نقش غالب پودر سرامیک ضایعاتی (۵۰٪) و ژل میکروسیلیس (۴۵٪) را در بهبود خواص مکانیکی تأیید کرد، در حالی که زمان عمل‌آوری (۵٪) تأثیر ثانویه داشت. توزیع باقیمانده‌ها، با تمرکز Ensemble حول صفر، حداقل سوگیری را نشان داد، و منحنی یادگیری تعادل تطابق و تعمیم‌پذیری پس از ۱۰۰ نمونه را اثبات کرد. این یافته‌ها، استفاده پایدار از ضایعات سرامیکی را پشتیبانی کرده و با کاهش تخلخل و نفوذپذیری در ترکیب بهینه سازگار است.

۶. پی‌نوشت‌ها

- 1- Ceramic waste powder
- 2- micro silica
- 3- Steel fiber
- 4- Scanning Electron Microscopy
- 5- X-Ray Diffraction
- 6- Fine ceramic waste
- 7- Construction waste powder
- 8- Reclaimed aggregate concrete
- 9- Rapid Chloride Permeability Test
- 10- Root mean square error

۷. مراجع

- [1] Etxeberria, M., Mari, A. R., & Vazquez, E. 2007. Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures*, 40(5), 529-541.
DOI=<https://doi.org/10.1617/s11527-006-9161-5>
- [2] Wilburn, D. R., & Goonan, T. G. 1998. Aggregates from natural and recycled sources. *Economic Assessment for Construction Applications—A Material Flow Analysis*. Denver, CO: US Geological Survey, Circular, 1176.
<http://greenwood.cr.usgs.gov/pub/circulars/c1176/c1176.html>
- [3] Meyer, C. 2009. The greening of the concrete industry. *Cement and concrete composites*. 31(8): p. 601-605.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>

- [4] Mansoori A, Moein MM, Mohseni E. Effect of micro silica on fiber-reinforced self-compacting composites containing ceramic waste. *Journal of Composite Materials*. 2021;55(1):95-107. doi:10.1177/0021998320944570
- [5] Steven A, William C. 2005. Design and control of concrete mixtures. *Cement and Concrete Research*, 28, 7, 1721-1802;
<https://library.ctr.utexas.edu/Presto/content/Detail.aspx?ctlID=UHVibGljYXRpb25fMTE2MTA=&rID=MjU3ODg=&ssid=c2NyZWVuSURfMTQ2MDk=>
- [6] A .Rafiei.” Laboratory study of the effect of microsilica gel on the resistance of waterproofing mortar using materials available in Bushehr province”. Master's thesis, Faculty of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr. (2015). (In Persian)
- [7] M. Jokar, H. Rahmani. “Investigation of mechanical properties of dense mortars made with microsilica and nanosilica.” Sixth National Congress of Civil Engineering. (2014). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/120831/>
- [8] M. Iranpour, H. Toghiani, M. Sadeghi. “The effect of microsilica on the permeability of mortar mixtures for drinking water storage tanks and bulk mortar”. First International Conference on Impermeable Mortars for Drinking Water Storage Tanks. (2011). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/118128/>
- [9] D . Tavakoli, A. Heydari, M. Karimian. “Environmental and economic benefits of using ceramic waste in mortar”. Third National Conference on Civil Engineering, Khomeini Shahr, Islamic Azad University, Khomeini Shahr Branch. (2011). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/156096/>
- [10] K. Afzali, J. Afzali, S. Mokhtarpouriani. “The effect of adding microsilica on the compressive strength and setting time of mortar”. First International Conference and Third National Conference on Dams and Hydroelectric Power Plants. (2011). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/138064/>
- [11] Balochi M, Javaheri M, Mir-Jalili A. 2012. The effect of pozzolans on the compressive and flexural strength of high-strength mortars in extremely severe environmental conditions. Second National Conference on New Findings in Civil Engineering. (2012). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/209352/>
- [12] Sh. Atashband., Sh. Atashband. “Effects of microsilica on the structure and mechanical properties of type 4 cement and presenting its optimal percentage in mortar production”. Second National Conference on Structures, Earthquakes and Geotechnics. (2012). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/190507/>
- [13] S. Tavakoli, A. Heydari, M. Navid Moghim, M. Nilforoshan. “Investigating the effect of using nanosilica, microsilica and metakaolin on the mechanical properties of high-strength mortar”. Second National Conference on Modern Materials and Structures in Civil Engineering. (2013). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/334021/>
- [14] H. Kamrudi, D. Safaei, A. Ismaili. “Effects of using pozzolan in waste tiles on the compressive strength of mortar”. Civil Engineering Conference. (2013). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/273041/>

- [15] A. Sadr-Momtazi, B. Tahmoursi, H. Hajjafari. "Studying the effect of microsilica and molten iron slag on the physical and mechanical properties of cement mortars," First National Conference on New Mortar Technologies and Eighth National Mortar Competitions, Rasht, Jihad Daneshgahi of Guilan. (2015). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/640449/>
- [16] D. Tavakoli, A. Heidari. "Investigation of mortar containing waste tile pozzolan with microsilica. Sharif Civil Engineering". (2014). (In Persian)
https://sjce.journals.sharif.edu/article_820.html
- [17] H. Fatemi, A. Sayadat, Sh. Adalat. "Laboratory study on determining the best percentage of nanosilica and microsilica gel combination on determining the compressive and tensile strength of cement mortar using type 2 cement," First National Conference on Architecture, Civil Engineering and Urban Environment, Hamadan, Hegmataneh Environmental Assessors Association. Iranian Mortar Technologists. 1993. Microsilica gel. (2014). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/270093/>
- [18] M. Pourmand-Dehkordi, A. M. Heydari, Meysami, M. Karimian. "Using tile and ceramic waste as a substitute for cement mortar", Second International Conference on Cement and Mortar Industry Research and Second National Conference on Civil Engineering, Urban Planning and Sustainable Development, Tehran, Ekbatan Research Group. (2015). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/522491/>
- [19] A. Sadr-Momtazi, S. Madani. "The effect of microsilica powder and polypropylene fibers on the mechanical properties of cement mortars", Fifth Iranian National Mortar Conference, Tehran, Iranian Mortar Association. (2015). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/240844/>
- [20] N. Lotfi, A. Entezari, M. Azizi. "The effect of fibrous microsilica gel on the mechanical properties of cement-sand mortar", Third International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Tehran, Permanent Secretariat of the International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Shahid Beheshti University. (2015). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/469199/>
- [21] H. Eskandari, A.M. Rezaei. "The effect of nano and microsilica on the compressive strength of self-compacting cement mortar", 7th Iranian National Mortar Conference, Tehran, Iranian Mortar Association. (2015). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/1129379/>
- [22] A. Heydari, M. Meysami, M. Pourmandehkordi. "The effect of tile and ceramic waste on the compressive strength of cement mortar", Second International Conference on New Research Findings in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Tehran, International Confederation of World Inventors (IFIA), Comprehensive University of Applied Sciences. (2016). (In Persian)
<https://civilica.com/doc/499773/>
- [23] Any, N and unal, M. 2009. The use of waste ceramic tile in cement production, cement concrete reserch. 30(3) 497-499.
 DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00202-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00202-7)
- [24] Torgal, F and Jalali, S. 2010. Reusing ceramic wastes in concrete. Construction and Building Materials, Volume 24, Issue 5. Pages 832-838.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>

- [25] Heidari, Ali, and Davoud Tavakoli. "A study of the mechanical properties of ground ceramic powder concrete incorporating nano-SiO₂ particles." *Construction and building materials* 38 (2013): 255-264.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.110>
- [26] Baldino, N., Gabriele, D., Lupi, F. R., Seta, L., Zinno, R. 2014. Rheological behaviour of fresh cement pastes: Influence of synthetic zeolites, limestone and silica fume", *Cement and Concrete Research*, Volume 63, Pages 38-45. Doi=10.1016/j.cemconres.2014.04.009
- [27] Çakır, Ö., Sofyancı, Ö. 2014. Influence of silica fume on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete" *HBRC Journal*, In Press, Corrected Proof.
<https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2014.06.002>
- [28] El-Shahate, M., Saraya, I. 2014. study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study", *Construction and Building Materials*, Volume 72. Pages 104-112.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.071>
- [29] Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., Ngamjarujana, A., Chaipanich, A. 2014. Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume", *Materials & Design*, Volume 64, Pages 261-269.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.042>
- [30] Lim, N.H.A.S., Mohammadhosseini, H., Tahir, M.M. et al. Microstructure and Strength Properties of Mortar Containing Waste Ceramic Nanoparticles. *Arab J Sci Eng* 43, 5305–5313 (2018).
<https://doi.org/10.1007/s13369-018-3154-x>
- [31] Mohit, Mehdi, Ali Ranjbar, and Yasser Sharifi. "Mechanical and microstructural properties of mortars incorporating ceramic waste powder exposed to the hydrochloric acid solution." *Construction and Building Materials* 271 (2021): 121565.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121565>
- [32] Ebrahimi, Mohsen, Abolfazl Eslami, Iman Hajirasouliha, Moein Ramezanpour, and Kypros Pilakoutas. "Effect of ceramic waste powder as a binder replacement on the properties of cement-and lime-based mortars." *Construction and Building Materials* 379 (2023): 131146.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131146>
- [33] Abd Ellatief, Mohamed, Aref A. Abadel, Karol Federowicz, and Mohamed Abd Elrahman. "Mechanical properties, high temperature resistance and microstructure of eco-friendly ultra-high performance geopolymer concrete: role of ceramic waste addition." *Construction and Building Materials* 401 (2023): 132677.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132677>
- [34] Chen, Xuyong, Di Zhang, Shukai Cheng, Xiong Xu, Cheng Zhao, Xiangqing Wang, Qiaoyun Wu, and Xixuan Bai. "Sustainable reuse of ceramic waste powder as a supplementary cementitious material in recycled aggregate concrete: Mechanical properties, durability and microstructure assessment." *Journal of Building Engineering* 52 (2022): 104418.
DOI:[10.1016/j.jobbe.2022.104418](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104418)
- [35] Achak, Hamed, Mohammad Reza Sohrabi, and Seyed Omid Hoseini. "Effects of microsilica and polypropylene fibers on the rheological properties, mechanical parameters and durability characteristics of green self-compacting concrete containing ceramic wastes." *Construction and Building Materials* 392 (2023): 131890.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131890>

[36] Paithankar, Deepak, Anurag Sharma, S. Thenmozhi, Prashant Ramteke, A. Dhanalakshmi, and S. Sivakumar. "Influence of glass powder silica fume and scrapped ceramic waste on the mechanical properties of concrete." *Materials Today: Proceedings* (2023).

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.213>

[37] A. Ghazimoradi, A. Ramezaniyanpour. Evaluation of Iranian pozzolans. Publication No. 153 of the Building and Housing Research Organization. (1992). (In Persian)

<https://library.sharif.ir/parvan/resource/279707/ارزیابی-چیزو-لانهای-ایران>

Laboratory Evaluation and Machine Learning-Based Prediction of Mechanical Properties in Cement Mortar Incorporating Microsilica Gel and Ceramic Waste Powder

Danial Nasr^{*1}, Rezvan Babagoli², Priya Rostami³

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

This study investigates the effect of partially replacing cement with waste ceramic powder and microsilica gel on the mechanical properties and durability of cementitious mortar. Mortar samples were prepared with varying replacement percentages (0%, 50%, and 100% waste ceramic powder; 0%, 10%, 20%, and 30% microsilica gel) and evaluated for compressive strength, tensile strength, flexural strength, water absorption, and permeability. Machine learning models (CatBoost, LightGBM, and Ensemble) were employed to predict the mechanical properties of the mortar. The results revealed that a 10% replacement with microsilica gel enhanced compressive, tensile, and flexural strengths, whereas exceeding 10% led to a reduction in strength. Using 100% waste ceramic powder, compared to 50%, increased mechanical strength and reduced water absorption. The optimal combinations were 20% microsilica gel in mortar with 50% waste ceramic powder and 30% microsilica gel in mortar with 100% waste ceramic powder, yielding the best performance. The Ensemble model demonstrated high predictive accuracy, with a coefficient of determination (R^2) of approximately 0.99 and a mean squared error of 0.015 MPa, confirming the dominant role of waste ceramic powder (50%) and microsilica gel (45%) in improving strength and reducing porosity. These findings highlight the potential of these materials for producing more sustainable and durable mortars, contributing to the sustainable development of the construction industry.

Keywords: Mortar, silica gel, waste ceramic, compressive strength, mortar durability.