

بررسی تأثیر الیاف پلی‌الفین و جایگزینی سیمان با سرباره بر مقاومت بتن قلیافعال شده حاوی خرده لاستیک در محیط‌های عادی و اسیدی

بهرام بلوری کشلی^{۱*}، ایمان محمد پور نیک بین^۲، محمد جواد مهدی زاده^۳

۱-دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران-گرایش سازه، مؤسسه آموزش عالی غیرانتفاعی دیلمان، لاهیجان، ایران. bahrambolori@gmail.com

۲-استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رشت، رشت، ایران. Nikbin@iaurasht.ac.ir

۳-دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران-گرایش مدیریت ساخت، دانشگاه آیندگان، تنکابن، ایران. Planbartar@gmail.com

چکیده

بتن قلیافعال شده مبتنی بر سرباره، به عنوان جایگزینی پایدار برای بتن سیمانی، با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف ضایعات صنعتی مانند سرباره و خرده لاستیک، توسعه یافته است. در این پژوهش، تأثیر جایگزینی سیمان با سرباره (۰، ۱۰ و ۲۰ درصد) و افزودن خرده لاستیک (۱۰ درصد حجمی ریزدانه) بر خواص مکانیکی بتن قلیافعال شده مسلح به الیاف پلی‌الفین (۰، ۰/۵ و ۱ درصد حجمی) بررسی شد. نمونه‌ها در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری خشک شدند و تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی در محیط‌های عادی و اسیدسولفوریک قرار گرفتند. نتایج نشان داد که جایگزینی ۲۰ درصد سیمان با سرباره و افزودن ۱ درصد الیاف، بالاترین مقاومت فشاری (۴۴/۶ مگا پاسکال) و کششی (۴/۸۷ مگا پاسکال) در محیط عادی را ایجاد کرد. در محیط اسیدی، نمونه فاقد سیمان (۱۰۰ درصد سرباره) با ۱ درصد الیاف، کمترین افت مقاومت فشاری (۳۲/۱ درصد کاهش از ۴۲/۷ به ۲۹ مگا پاسکال) را نشان داد. تحلیل‌های ریزساختاری و سرعت امواج ماوراء صوت، تأییدکننده بهبود خواص مکانیکی و دوام نمونه‌ها بود.

کلمات کلیدی: بتن قلیافعال شده مبتنی بر سرباره، الیاف پلی‌الفین، جایگزینی سیمان با سرباره، تأثیر اسید بر بتن قلیافعال شده

Abstract

Slag-Based Alkali-Activated Concrete, as a Sustainable Alternative to Cementitious Concrete, Has Been Developed by Reducing Greenhouse Gas Emissions and Utilizing Industrial Waste Materials Such as Slag and Rubber Particles. In this study, the effects of replacing cement with slag (0%, 10%, and 20%) and adding rubber particles (10% by volume of fine aggregate) on the mechanical properties of polyolefin fiber-reinforced alkali-activated concrete (0%, 0.5%, and 1% by volume) were investigated. The specimens were cured under dry conditions at 60°C and subjected to compressive and tensile strength tests in both normal and sulfuric acid environments. The results showed that replacing 20% of cement with slag and adding 1% fiber led to the highest compressive (44.6 MPa) and tensile (4.87 MPa) strengths under normal conditions. In the acidic environment, the specimen without cement (100% slag) and reinforced with 1% fiber exhibited the lowest compressive strength loss (a 32.1% decrease from 42.7 MPa to 29 MPa). Microstructural analyses and ultrasonic pulse velocity measurements confirmed the improvement in mechanical properties and durability of the specimens.

Keywords: Slag-Based Alkali-Activated Concrete, Polyolefin Fibers, Cement Replacement with Slag, Acid Resistance of Alkali-Activated Concrete

بتن به عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح در جهان شناخته می شود که سیمان پرتلند به عنوان اصلی ترین جزء تشکیل دهنده آن، تأثیرات نامطلوبی بر محیط زیست دارد [۱]. تولید سیمان پرتلند نه تنها به میزان قابل توجهی انرژی مصرف می کند (حدود ۴ گیگا ژول انرژی به ازای تولید هر تن سیمان)، بلکه منجر به انتشار حجم بالایی از گازهای گلخانه ای، به ویژه دی اکسید کربن (حدود ۱۰۳۵ میلیارد تن در سال) و تشدید پدیده گرمایش جهانی می شود [۲]. در این راستا، تحقیقات گسترده ای به منظور جایگزینی سیمان معمولی با پزولان های فعال شونده قلیایی انجام شده است. این نوع مواد که خواص مکانیکی مشابه یا حتی برتری نسبت به بتن معمولی ارائه می دهند [۳]. همچنین، مقاومت فشاری بتن های قلیا فعال شده در بازه ۲۸ تا ۸۸ مگا پاسکال گزارش شده است که نشان دهنده عملکرد مطلوب این نوع بتن در بلندمدت است [۴، ۵].

بتن قلیا فعال شده بر پایه سرباره به عنوان یکی از نوین ترین مواد ساخت و ساز، با توجه به خصوصیات محیط زیستی و مکانیکی مناسب، توجه زیادی را به خود کشیده است [۶، ۷]. سرباره که یک محصول جانبی صنایع فولادسازی است، دارای ترکیب آلومینوسیلیکاتی غنی بوده و در حضور فعال کنندگان قلیایی مانند هیدروکسید و سیلیکات سدیم، واکنش های قلیایی را آغاز می کند [۸]. این خصوصیت به آن اجازه می دهد تا به عنوان یک جایگزین مؤثر برای سیمان پرتلند عمل کند، که علاوه بر کاهش ضایعات صنعتی، به بهبود ویژگی های مکانیکی و مقاومت بتن کمک می کند. استفاده از سرباره در تولید بتن قلیا فعال شده، به دلیل وجود مقادیر بالای آلومینیوم و سیلیکا در ترکیب آن، منجر به افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن می شود، که این موضوع بهبود عملکرد ساختاری بتن را تضمین می کند [۹].

بتن قلیا فعال شده به عنوان یک جایگزین بتن های پرتلند معمولی، نه تنها به دلیل ویژگی های مکانیکی مطلوب، بلکه به خاطر مقاومت استثنایی که در برابر حملات شیمیایی مختلف از خود نشان می دهد، توجه محققان و مهندسان عمران را به خود جلب کرده است [۱۰]. مطالعات متعدد نشان داده اند که این ماده پیشرفته به ویژه در مواجهه با اسید سولفوریک که یکی از مخرب ترین عوامل برای سازه های بتنی در محیط های صنعتی و فاضلابی محسوب می شود، عملکرد برجسته ای از خود بروز می دهد [۱۱]. ساختار شیمیایی منحصربه فرد بتن قلیا فعال شده که بر پایه واکنش پلیمریزاسیون آلومینوسیلیکات ها در محیط قلیایی شکل می گیرد، منجر به ایجاد شبکه ای متراکم با تخلخل بسیار کم در مقیاس نانومتری شده است [۱۲]. این ویژگی باعث شده که این نوع بتن در مقایسه با بتن های معمولی بر پایه سیمان پرتلند، از نفوذپذیری بسیار کمتری برخوردار باشد. تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده اند که ضریب نفوذپذیری بتن قلیا فعال شده تا ۷۰ درصد کمتر از بتن های سیمانی است که این امر به طور مستقیم بر کاهش نرخ حملات شیمیایی تأثیرگذار است [۱۳].

صنعت تولید لاستیک خودرو سالانه بیش از ۱۷ میلیون تن ضایعات لاستیک مستعمل تولید می کند که تنها درصد کمی از آن قابلیت بازیافت دارد [۱۴]. در دو دهه گذشته، استفاده از لاستیک های خرد شده حاصل از تایرهای فرسوده در مخلوط های بتن به عنوان راهکاری برای کاهش تأثیرات منفی ناشی از سوزاندن یا دفن این ضایعات مطرح شده است [۱۵]. سالانه حدود ۱۸۰ میلیون تایر لاستیکی در اروپا و ۲۷۵ میلیون تایر در آمریکا دور ریخته می شود [۱۶]. استفاده از خرده لاستیک بازیافتی به عنوان جایگزینی در ترکیبات بتنی، به ویژه در راستای کاهش آثار زیست محیطی ناشی از انباشت تایرهای فرسوده، در سال های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران حوزه مهندسی عمران و محیط زیست قرار گرفته است. در این میان، بررسی های محدودی به تأثیر خرده لاستیک بر خواص مهندسی مخلوط های قلیایی مبتنی بر سرباره پرداخته اند. یافته های این مطالعات نشان می دهد که

جایگزینی بخشی از مصالح ریزدانه (نظیر ماسه) با خرده لاستیک، به‌ویژه در اندازه‌های مشابه، می‌تواند رفتار مکانیکی بتن قلیافعال‌شده را تحت تأثیر قرار دهد [۱۷، ۱۸]. به‌طور کلی، شواهد تجربی حاکی از آن است که استفاده از مقادیر بالای خرده لاستیک، منجر به افت قابل‌توجهی در مقاومت فشاری، خمشی و در مواردی مقاومت کششی نمونه‌ها می‌شود. با این حال، در اغلب پژوهش‌ها گزارش شده که در صورت محدودسازی میزان خرده لاستیک به حدود ۱۰ درصد حجمی از مصالح ریزدانه، افت عملکرد مکانیکی بتن چندان چشمگیر نبوده و مقاومت فشاری و خمشی تقریباً حفظ می‌شود، هرچند کاهش نسبی در مقاومت کششی قابل‌مشاهده است. این یافته‌ها، اگرچه نیازمند بررسی‌های جامع‌تر در مقیاس‌های مختلف هستند، می‌توانند مبنایی برای توسعه مصالح پایدارتر در صنعت ساخت‌وساز فراهم کنند. [۱۹، ۲۰].

افزودن الیاف پلی‌الفین به بتن قلیافعال‌شده تأثیر زیادی بر ویژگی‌های مکانیکی این نوع بتن دارد و می‌تواند اثرات نامطلوب افزودن خرده لاستیک را تا حد زیادی بهبود بخشد. از آنجاکه الیاف پلی‌الفین دارای ساختاری پایدار و مقاوم علیه شرایط زیست‌محیطی مختلف هستند، استفاده از آن‌ها می‌تواند منجر به بهبود معنادار مقاومت کششی بتن قلیافعال‌شده شود [۲۱، ۲۲]. این الیاف، زمانی که به‌صورت یکنواخت و مناسب درون ماتریس بتنی توزیع شوند، می‌توانند نقش مؤثری در کنترل ریزترک‌ها و جلوگیری از گسترش آن‌ها به ترک‌های بزرگ‌تر ایفا کنند. درواقع، الیاف به‌عنوان عناصری مقاوم در برابر کشش، در مسیر رشد ترک‌ها قرار گرفته و با ایجاد پل میان دیواره‌های ترک، از بازشدگی و پیشروی آن‌ها جلوگیری می‌کنند. این پدیده باعث بهبود رفتار پس از ترک‌خوردگی بتن و افزایش شکل‌پذیری آن می‌شود. علاوه بر این، حضور الیاف می‌تواند از ایجاد مسیرهای پیوسته برای نفوذ عوامل مخرب مانند یون‌های کلرید، سولفات و اسیدها جلوگیری کرده و درنتیجه، رسانایی ترک‌ها را کاهش دهد. بدین ترتیب، الیاف نه‌تنها مقاومت مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشند، بلکه دوام و پایداری آن را در برابر عوامل محیطی نیز افزایش می‌دهند. [۲۳، ۲۴]. با این حال، تأثیر الیاف پلی‌الفین بر مقاومت فشاری بتن قلیافعال‌شده ممکن است به‌صورت کمتری مشاهده شود، زیرا افزودن این الیاف به‌طور مستقیم بهبود چگالی و ساختار بتن را تقویت نمی‌کند و بیشتر به‌عنوان یک عنصر تقویت‌کننده تحت تنش کششی عمل می‌کند. بنابراین، انتخاب میزان مناسب افزودنی الیاف پلی‌الفین بر اساس نوع بارگذاری و کاربرد نهایی بتن قلیافعال‌شده بسیار حائز اهمیت است [۲۵، ۲۶].

محیط‌های اسیدی از مهم‌ترین عوامل تخریب و کاهش دوام سازه‌های بتنی هستند. تماس طولانی بتن با این محیط‌ها موجب تجزیه فازهای سیمان، افت چسبندگی و کاهش مقاومت مکانیکی می‌شود. برای افزایش مقاومت شیمیایی بتن، استفاده از مواد جایگزین مانند سرباره پیشنهاد شده است. بتن‌های حاوی سرباره با واکنش‌های پوزولانی آلومینوسیلیکات‌ها و فعال‌کننده‌های قلیایی ساخته می‌شوند و در برابر محیط‌های اسیدی، به‌ویژه اسیدهای معدنی قوی، پایداری و عملکرد بهتری دارند [۳۰-۲۷]. در میان منابع مختلف آلومینوسیلیکاتی، سرباره کوره بلند یکی از مواد رایج و مؤثر محسوب می‌شود. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که بتن‌های قلیافعال‌شده مبتنی بر سرباره، به دلیل ماهیت شیمیایی و ساختار متراکم‌تری که ایجاد می‌کنند، مقاومت بالاتری در برابر نفوذ اسید و فرسایش شیمیایی از خود نشان می‌دهند [۳۱، ۳۲]. این ویژگی‌ها باعث شده تا سرباره به‌عنوان یکی از گزینه‌های کلیدی در طراحی بتن‌های مقاوم در برابر خوردگی اسیدی مطرح شود.

از میان انواع مختلف اسیدهای مورد استفاده در آزمایش‌های دوام، اسیدسولفوریک به دلیل کاربرد گسترده در شرایط واقعی و صنعتی، به‌ویژه در سیستم‌های فاضلاب شهری، صنایع شیمیایی، معادن و کارخانه‌های فرآوری مواد غذایی، بیشترین توجه را به خود جلب کرده است. سازه‌های بتنی در این حوزه‌ها اغلب به‌طور مداوم در معرض حمله اسیدسولفوریک قرار دارند که منجر به

تخریب سطحی، پوسته‌پوسته شدن و کاهش عمر مفید سازه می‌شود. بر همین اساس، انتخاب اسیدسولفوریک به‌عنوان عامل خورنده در این تحقیق، شرایط بهره‌برداری و ارزیابی واقعی‌تر عملکرد نمونه‌ها صورت گرفته است [۳۳، ۳۴].

در این تحقیق، نمونه‌های مبتنی بر سرباره با درصدهای جزئی جایگزینی سیمان (۰، ۱۰ و ۲۰ درصد) و ۱۰ درصد حجمی خرده لاستیک به‌عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه‌ها (با دانه‌بندی مشابه ماسه در محدوده‌های ۰-۱ میلی‌متر، ۱-۳ میلی‌متر و ۳-۴/۷۵ میلی‌متر) به همراه الیاف پلی‌الفین با درصدهای ۰، ۵ و ۱ درصد حجمی کل بتن موردبررسی قرار گرفتند. پس از اختلاط و عمل‌آوری نمونه‌ها در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و شرایط خشک، پارامترهایی همچون اسلامپ، مقاومت کششی و مقاومت فشاری در محیط معمولی و همچنین درصد کاهش مقاومت فشاری در محیط اسیدی ارزیابی شد. به‌منظور تحلیل ریزساختاری و بررسی علل کاهش مقاومت فشاری، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. سپس نمونه‌ها در محیط اسیدی (اسیدسولفوریک ۱ درصد با pH مشخص) غوطه‌ور شده و پس از دوره‌های زمانی ۷، ۲۸، ۶۰ و ۱۲۰ روز، تأثیر درصدهای مختلف جایگزینی سیمان با سرباره به همراه خرده لاستیک و الیاف پلی‌الفین بر مقاومت فشاری مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه، نتایج با آزمایش سرعت امواج ماوراء صوت نیز مقایسه و ارزیابی گردید.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش آزمایشگاهی از سیمان پرتلند تپ II با وزن مخصوص ۳/۱۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب تحت استاندارد En 197-1 و سرباره کوره آهن‌گدازی به‌صورت پودری با چگالی ۲/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب تحت استاندارد ASTM C989/C989M استفاده گردید. خصوصیات شیمیایی این مواد در جدول (۱) آورده شده است. ریزدانه مصرفی، ماسه طبیعی شسته با مدول نرمی ۲/۸۵ میلی‌متر و وزن مخصوص ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و درشت‌دانه شکسته با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر با وزن مخصوص ۲/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب مطابق الزامات استاندارد ASTM-C33 مورد بهره‌برداری قرار گرفت. همچنین از الیاف پلی‌الفین تحت استاندارد ASTM D7508/D7508M با خصوصیات مطابق با جدول (۲) و ظاهری مشابه شکل (۱) استفاده شده است.

جدول ۱ مشخصات سیمان و سرباره

سرباره	سیمان	اجزای ترکیب‌شده
۲۹/۲	۲۱/۲۶	سیلیکون دی‌اکسید (SiO_2)
۳۸/۶	۶۲/۷	کلسیم اکسید (CaO)
۱۹/۴	۴/۷	آلومینیوم اکسید (Al_2O_3)
۵/۸	۴/۳	اکسید آهن (Fe_2O_3)
۲/۸	۲/۱	منیزیم اکسید (MgO)
۲/۶	۲/۱	گوگرد تری اکسید (SO_3)
۰/۲	۱/۶	سدیم اکسید (Na_2O)
۰/۱	۱/۶	پتاسیم اکسید (K_2O)

جدول ۲ خصوصیات فیزیکی الیاف پلی الفین

مقاومت کششی (N/mm^2)	< ۵۰۰
طول (mm)	۳۰
قطر (mm)	۰/۸
نسبت (l/d)	۳۷/۵
چگالی (g/cm^3)	۲۴۰۰



شکل ۱ نمونه الیاف پلی الفین

۲-۱ طرح‌های مخلوط

در این پژوهش، از مخلوطی شامل هیدروکسید سدیم^۱ با مولاریته ۱۲ مولار و سیلیکات سدیم^۲ به‌عنوان محلول فعال‌ساز استفاده شد. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم (نسبت قلیا) برابر با ۲/۵ در نظر گرفته شد. همچنین، نسبت ماده قلیایی به مواد سیلیسی-آلومینیومی معادل ۰/۴ تعیین گردید [۳۵] که مشابه نسبت آب به سیمان در بتن معمولی است. این طرح در قالب سه ترکیب مختلف شامل: (۱) بتن قلیا فعال شده با ۱۰۰ درصد سرباره، (۲) بتن قلیا فعال شده با جایگزینی ۱۰ درصد سیمان با سرباره و (۳) بتن قلیا فعال شده با جایگزینی ۲۰ درصد سیمان با سرباره، جهت بررسی تأثیر جایگزینی سیمان (از صفر تا ۲۰ درصد) بر خواص مکانیکی بتن، مورد ارزیابی قرار گرفت.

علاوه بر این، از خرده لاستیک‌های بازیافتی حاصل از تایرهای فرسوده خودرو به‌عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه (ماسه) استفاده شد. این خرده لاستیک‌ها در سه اندازه‌ی مختلف (۱-۰ میلی‌متر، ۱-۳ میلی‌متر و ۳-۴/۷۵ میلی‌متر) و به‌صورت کروی تهیه شدند و معادل ۱۰ درصد حجمی ماسه جایگزین گردیدند. این جایگزینی منجر به کاهش وزن واحد حجمی مخلوط بتن شد. همچنین، الیاف پلی‌الفین با درصدهای حجمی ۰، ۰/۵ و ۱ درصد به بتن اضافه شد. مشخصات این الیاف شامل طول ۳ سانتی‌متر و قطر ۰/۸ میلی‌متر بود. در جدول (۳)، طرح‌های اختلاط ۹ گانه بتن ارائه شده است که شامل ترکیبات مختلف مواد قلیایی، سرباره، خرده

^۱ NaOH

^۲ Na₂SiO₂

لاستیک و الیاف پلی‌الفین می‌باشد. نمونه فاقد خرده لاستیک، فاقد الیاف و تشکیل‌شده از ۱۰۰ درصد سرباره نیز به‌عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته‌شده است.

جدول ۳ طرح اختلاط بتن‌های قلیا فعال‌شده

طرح	مخلوط‌ها	الیاف پلی‌الفین (kg/m ³)	محلول قلیایی (kg/m ³)	فوق روان کننده (kg/m ³)	ریزدانه (kg/m ³)	درشت‌دانه (kg/m ³)	خرده لاستیک (kg/m ³)	سرباره (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)
شاهد	SA100 PF0 CR0	۰	۱۶۳/۲	۶/۲	۵۷۶/۶	۱۳۴۷	۰	۴۰۸	۰
۱	SA100 PF0 CR10	۰	۱۶۳/۲	۶/۲	۴۹۱/۸	۱۳۴۷	۱۹/۷	۴۰۸	۰
۲	SA100 PF0.5 CR10	۳۹	۱۶۳/۲	۶/۲	۴۷۸/۶	۱۳۴۷	۱۹/۷	۴۰۸	۰
۳	SA100 PF1 CR10	۷۸	۱۶۳/۲	۶/۲	۴۶۵/۴	۱۳۴۷	۱۹/۷	۴۰۸	۰
۴	SA90 PF0 CR10	۰	۱۶۳/۲	۶/۲	۵۰۷/۴	۱۳۴۷	۱۹/۷	۳۶۷/۲	۴۰/۸
۵	SA90 PPF0.5 CR10	۳۹	۱۶۳/۲	۶/۲	۴۹۴/۲	۱۳۴۷	۱۹/۷	۳۶۷/۲	۴۰/۸
۶	SA90 PF1 CR10	۷۸	۱۶۳/۲	۶/۲	۴۸۱/۰	۱۳۴۷	۱۹/۷	۳۶۷/۲	۴۰/۸
۷	SA80 PF0 CR10	۰	۱۶۳/۲	۶/۲	۵۲۳/۰	۱۳۴۷	۱۹/۷	۳۲۶/۴	۸۱/۶
۸	SA80 PF0.5 CR10	۳۹	۱۶۳/۲	۶/۲	۵۰۹/۷	۱۳۴۷	۱۹/۷	۳۲۶/۴	۸۱/۶
۹	SA80 PF1 CR10	۷۸	۱۶۳/۲	۶/۲	۴۹۶/۵	۱۳۴۷	۱۹/۷	۳۲۶/۴	۸۱/۶

۲-۲ مخلوط کردن و عمل‌آوری

در روند آماده‌سازی نمونه‌های قلیا فعال‌شده، ابتدا محلول قلیایی مورد نیاز از طریق تهیه محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۲ مولار آماده شد. برای این منظور، مقدار معادل ۴۸۰ گرم هیدروکسید سدیم (NaOH) با درجه خلوص ۹۷ درصد، در یک لیتر آب آشامیدنی (شهری) حل گردید. این غلظت بر مبنای وزن مولکولی NaOH (معادل ۴۰ گرم بر مول) و با هدف تأمین شرایط بهینه واکنش‌پذیری آلومینوسیلیکات‌ها انتخاب شده است. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که غلظت‌های بالاتر از ۱۰ مولار می‌توانند اثربخشی فرآیند فعال‌سازی قلیایی را افزایش داده و منجر به ایجاد ساختار ژل پایدارتر در شبکه بتن شوند [۳۶].

پس از تهیه محلول NaOH، این محلول با سیلیکات سدیم تجاری با درجه خلوص ۴۸ درصد مخلوط گردید. نسبت جرمی محلول سیلیکات سدیم به محلول هیدروکسید سدیم برابر با ۲/۵ انتخاب شد. انتخاب این نسبت بر مبنای مطالعات تجربی و گزارش‌های موجود در ادبیات علمی صورت گرفته است، به‌گونه‌ای که این ترکیب می‌تواند ضمن حفظ ویسکوزیته مناسب محلول فعال‌کننده، باعث تشکیل فازهای قلیایی یکنواخت و دارای مقاومت مکانیکی مطلوب گردد. افزایش سهم سیلیکات سدیم در محلول فعال‌کننده، باعث تأمین سیلیس محلول کافی در سیستم شده و نقش مهمی در تکامل ساختار سه‌بعدی ایفا می‌کند. محلول نهایی تهیه‌شده (ترکیب NaOH و سیلیکات سدیم) به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شد تا به تعادل شیمیایی برسد و واکنش‌های اولیه بین اجزای محلول تکمیل گردد. این مرحله، که با هدف تثبیت خصوصیات فیزیکی و شیمیایی محلول انجام می‌شود، در بهبود عملکرد واکنش پلیمریزاسیون در زمان اختلاط با ماده جامد نقش مؤثری دارد [۳۷].

پس از آماده‌سازی محلول قلیایی، شن و ماسه در حالت اشباع با سطح خشک^۳ به همراه خرده لاستیک و الیاف (در صورت وجود در طرح اختلاط) به‌صورت خشک مخلوط شدند. سپس، سرباره به مخلوط اضافه گردید و پس از اختلاط کامل، محلول قلیایی تهیه‌شده به تدریج به مخلوط اضافه شد. پس از ۲ تا ۵ دقیقه اختلاط، مخلوط در قالب‌ها ریخته شد. قالب‌ها به مدت ۱ تا ۳ دقیقه

^۳ Saturated Surface Dry (SSD)

بر روی صفحه ارتعاشی قرار داده شدند تا حباب‌های هوا خارج شوند. پس از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای محیط (۲۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد)، نمونه‌ها از قالب خارج شده و درون گرم‌کن با دمای حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند. پس‌ازاین مرحله، نمونه‌ها از گرم‌کن خارج شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط خنک شدند. سپس، نمونه‌ها به مدت ۲۴ روز در شرایط محیطی با دمای معمولی نگهداری شدند و پس‌ازآن، آزمایش‌ها و تحقیقات لازم بر روی آن‌ها انجام گرفت. جدول (۴) آنالیز شیمیایی به‌دست‌آمده از روش XRF و مشخصات فیزیکی بتن قلیافعال شده مبتنی بر سرباره را بر اساس استاندارد C618 ASTM نشان می‌دهد. این نتایج مربوط به طرح‌های مختلف بتن قلیافعال شده فاقد الیاف پلی‌الفین می‌باشد.

جدول ۴ مشخصات شیمیایی و ترکیب عناصر تشکیل‌دهنده نمونه‌های مختلف بتن قلیافعال شده

شماره نمونه	محتویات بتن قلیافعال شده	ترکیب شیمیایی (عناصر اصلی)
		LOI SO ₃ Fe ₂ O ₃ Na ₂ O K ₂ O MgO CaO Al ₂ O ₃ SiO ₂
شاهد	۱۰۰٪ سرباره، بدون خرده لاستیک	۱۶/۸ ۱/۲ ۵/۹ ۱/۱ ۰/۵ ۱/۸ ۱۷/۰ ۹/۵ ۳۷/۵
۱	۱۰۰٪ سرباره، با خرده لاستیک و بدون سیمان	۱۶/۵ ۱/۱ ۵/۸ ۰/۹ ۰/۵ ۱/۷ ۱۶/۷ ۹/۳ ۳۶/۸
۷	۸۰٪ سرباره، با خرده لاستیک و با ۲۰ درصد سیمان	۱۳/۶ ۱/۴ ۵/۵ ۱/۲ ۰/۷ ۱/۸ ۲۵/۹ ۸/۲ ۳۳/۴

علت تغییر در درصد مواد بالا به دلیل جایگزین ۲۰ درصد سیمان به‌جای سرباره بوده که سبب کاهش SiO₂ و Al₂O₃ و افزایش CaO شده است.

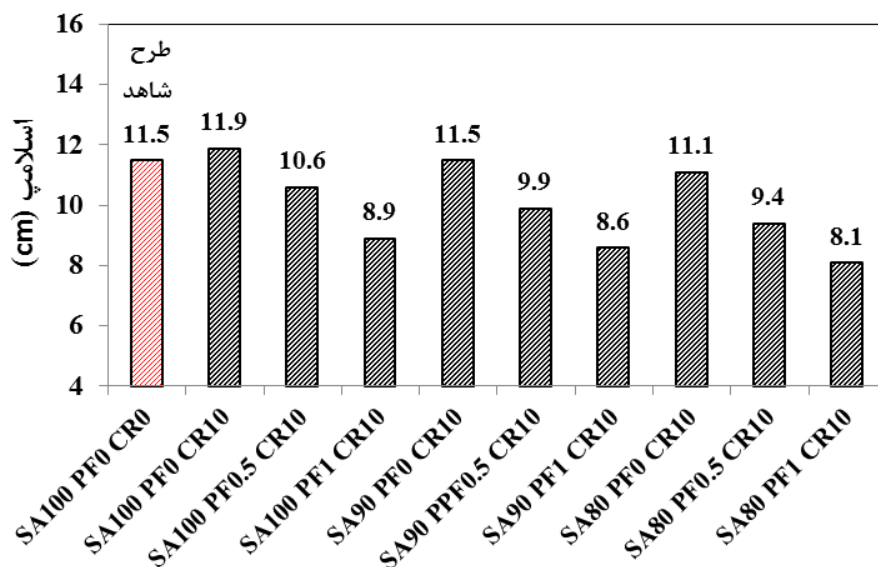
۳. تحلیل و بررسی نتایج

پس از ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش اسلامپ، نمونه‌ها در گرم‌کن با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند. پس‌ازاین مرحله، نمونه‌ها از گرم‌کن خارج شده و در محیط آزمایشگاهی با دمای معمولی نگهداری شدند. پس از سپری شدن ۲۸ روز از عمر نمونه‌ها، آزمایش‌های مختلف از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سرعت امواج ماوراء صوت و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بر روی نمونه‌ها انجام گردید. این آزمایش‌ها در دو شرایط محیطی متفاوت، یعنی شرایط محیطی معمولی و شرایط مجاورت با اسیدسولفوریک، اجرا شدند. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها به‌صورت دقیق برای نمونه‌های قرارگرفته در شرایط محیطی عادی و نمونه‌های در معرض اسید، به‌طور مجزا بررسی و ارزیابی شدند.

۳-۱ اثر درصدهای مختلف سرباره و سیمان به همراه درصد مختلف الیاف در شرایط محیط

۳-۱-۱ کارایی بتن قلیافعال شده در شرایط محیط

نتایج حاصل از آزمایش اسلامپ در شکل (۲) نمایانگر عملکرد بتن قلیافعال شده مبتنی بر سرباره است که در آن خرده لاستیک و الیاف پلی‌الفین به ترکیب بتن اضافه شده و درصد مشخصی از سیمان نیز با سرباره جایگزین شده است.

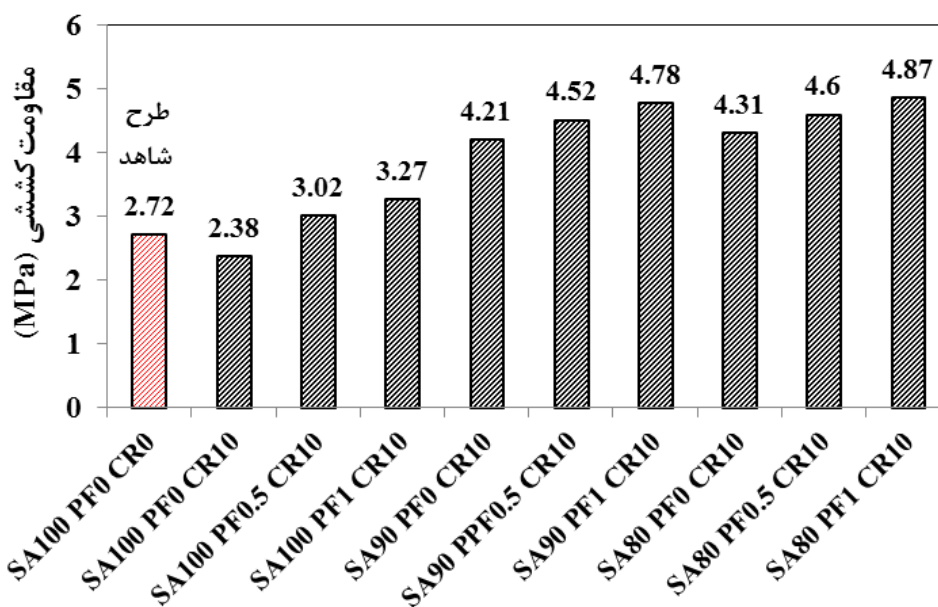


شکل ۲ نمودار اسلامپ نمونه‌های در شرایط محیط

نمونه شاهد فاقد خرده لاستیک و مابقی نمونه‌های بتن قلیا فعال شده در این مطالعه، حاوی ۱۰ درصد خرده لاستیک می‌باشند. نمونه‌های ۱، ۴ و ۷ که فاقد الیاف پلی‌الفین بودند، بیشترین مقدار اسلامپ را نشان دادند. این نتایج با تحقیقات پیشین بر روی بتن قلیا فعال شده حاوی سیمان و بدون خرده لاستیک مطابقت دارد که در آن افزایش درصد سیمان جایگزین سرباره، از صفر درصد به بالا منجر به کاهش اسلامپ شده است [۳۸، ۳۹]. در این تحقیق، با وجود ۱۰ درصد خرده لاستیک، افزایش قابل توجهی (بیش از ۵۰ درصد) در اسلامپ کلیه طرح‌های بدون الیاف و حاوی خرده لاستیک نسبت به تحقیقات گذشته مشاهده شد [۴۰-۴۲]. این افزایش اسلامپ عمدتاً ناشی از بهبود کارایی بتن به دلیل حضور خرده لاستیک است. با این حال، با افزایش درصد سیمان از صفر به ۲۰ درصد، کاهش تدریجی اسلامپ مشاهده گردید. این کاهش اسلامپ می‌تواند به دلیل افزایش چسبندگی ناشی از ترکیب آب اختلاط آزاد با سیمان در فرآیند هیدراتاسیون باشد. این فرآیند منجر به افزایش چسبندگی و در نتیجه کاهش کارایی و اسلامپ بتن می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه حضور خرده لاستیک به‌طور کلی کارایی بتن را بهبود می‌بخشد، اما افزایش درصد سیمان جایگزین سرباره و همچنین الیاف تأثیر معکوس بر اسلامپ دارد.

۳-۱-۲ نتایج آزمایش مقاومت کششی در شرایط محیط

شکل (۳) نتایج مقاومت کششی و اثر دو پارامتر افزایش الیاف از صفر تا یک درصد و افزایش سیمان پرتلند از صفر تا ۲۰ درصد جایگزین سرباره در بتن قلیا فعال شده حاوی خرده لاستیک را نشان می‌دهد.

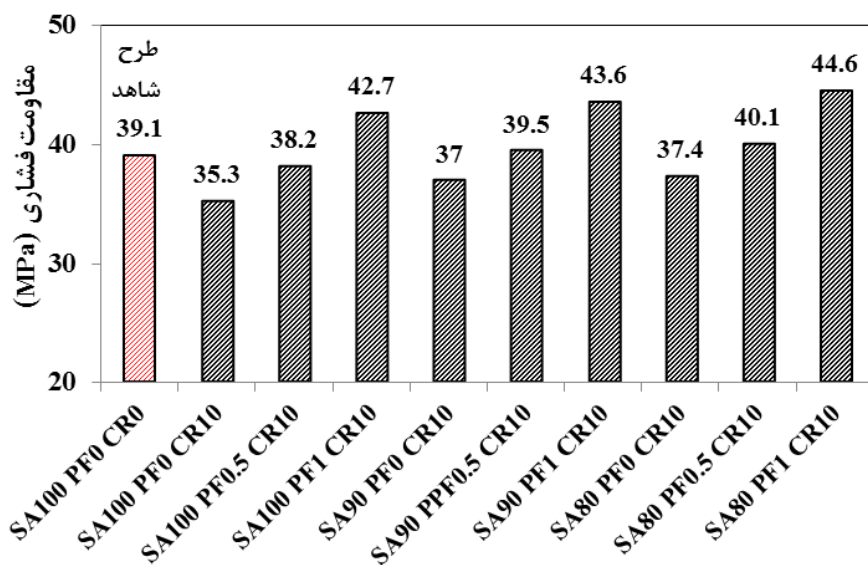


شکل ۳ نمودار مقاومت کششی نمونه‌ها در شرایط محیط

نتایج آزمایش مقاومت کششی نشان می‌دهد که افزایش درصد الیاف از صفر به یک درصد، منجر به بهبود مقاومت کششی بتن قلیا فعال شده حاوی خرده لاستیک می‌شود. این یافته با مطالعات پیشین نیز هم‌خوانی دارد [۲۱، ۳۵]. همچنین، جایگزینی سیمان با سرباره باعث افزایش مقاومت کششی بتن شده است، هرچند این افزایش در مقایسه با جایگزینی ۱۰ درصد سیمان به ۲۰ درصد، بسیار ناچیز بوده است، به عبارت دیگر مقاومت کششی طرح ۶ و ۹ نسبت به طرح ۳ که فاقد سیمان است به ترتیب ۴۶ و ۴۹ درصد افزایش یافته است (مقاومت کششی در طرح ۶ معادل ۴،۷۸ مگا پاسکال و در طرح ۹ معادل ۴،۸۷ مگا پاسکال اندازه‌گیری شد). علاوه بر این، افزایش درصد الیاف نیز تأثیر مثبتی بر مقاومت کششی داشته است، به طوری که بیشترین مقاومت کششی در طرح ۹ با ۲۰ درصد جایگزینی سیمان و یک درصد الیاف، معادل ۴،۸۷ مگا پاسکال (۱۳ درصد بیشتر از نمونه ۷ که طرح مشابه و فاقد الیاف است می‌باشد) مشاهده شد. دلیل این افزایش مقاومت کششی را می‌توان به واکنش ترکیبی آب اختلاط با سیمان و بهبود خاصیت چسبندگی بتن نسبت داد. این اثر به‌ویژه در درصد‌های پایین جایگزینی سیمان (۱۰ درصد) مشهود است، به طوری که افزایش قابل توجهی در مقاومت کششی مشاهده می‌شود. با این حال، با افزایش بیشتر درصد سیمان، میزان افزایش مقاومت کششی کاهش می‌یابد.

۳-۱-۳ نتایج آزمایش مقاومت فشاری در شرایط محیط

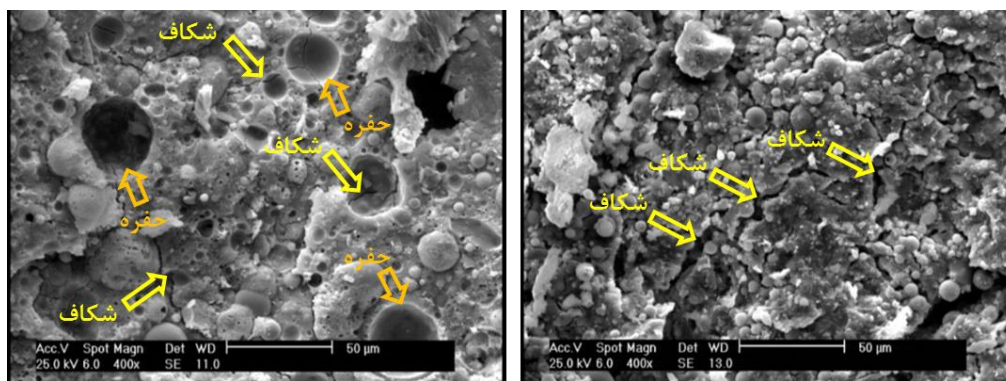
نتایج به‌دست‌آمده از مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها در شکل (۴) مشاهده می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که افزایش درصد الیاف از ۰ تا ۱ درصد منجر به بهبود مقاومت فشاری بتن قلیا فعال شده ۱۰۰ تا ۸۰ درصد سرباره می‌شود و ۱ درصد الیاف به ترتیب مقدار مقاومت فشاری را ۲۱، ۱۸ و ۱۹ درصد افزایش داده است. همچنین، افزایش جایگزینی سیمان پرتلند با سرباره نیز مقاومت فشاری را به‌طور قابل توجهی افزایش داده است به نحوی که در نمونه‌های فاقد الیاف، جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد سیمان مقاومت فشاری را به ترتیب ۵ و ۶ درصد بهبود بخشیده است.



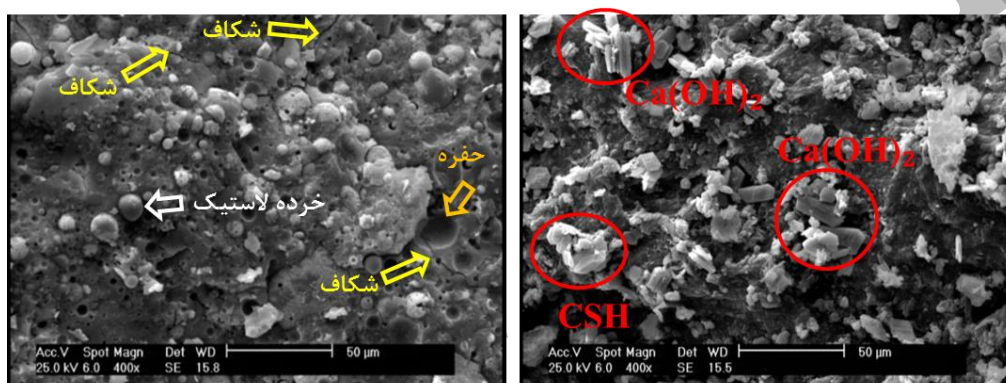
شکل ۴ مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط محیط

در نمونه‌های بدون سیمان، حفره‌های متعدد همراه با ذرات سرباره غیر واکنشی مشاهده شد. علاوه بر این، ترک‌های ریز در محل اتصال دانه‌ها به ملات نیز دیده شد که این عوامل در کنار هم باعث کاهش خواص مکانیکی بتن گردید. با افزایش جایگزینی سیمان به ۱۰ درصد، تعداد حفره‌ها و ذرات سرباره غیر ترکیبی به‌طور نسبی کاهش یافت. با افزایش بیشتر سیمان به ۲۰ درصد، ذرات واکنش ناپذیر سرباره به‌طور چشمگیری کاهش یافته و حفره‌ها نیز کمتر شدند. این تغییرات به‌وضوح در تصاویر SEM شکل (۵) قابل مشاهده است.

در بتن قلیا فعال شده خالص (بدون سیمان)، ترک‌ها و حفره‌های بیشتری مشاهده شد که احتمالاً به دلیل تبخیر رطوبت در مرحله عمل‌آوری در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و انقباض ناشی از آن است. با افزایش درصد سیمان، رطوبت موجود در شن و ماسه همراه با سیمان بهبود چسبندگی میان اجزای بتن را به دنبال داشت. این بهبود چسبندگی علاوه بر جلوگیری از تشکیل رسوبات و تبخیر آب اضافی، از ایجاد ترک‌ها و حفره‌های ناشی از حرارت نیز ممانعت به عمل آورد. به این ترتیب، یک ملات چسبنده به‌عنوان جایگزینی برای این نواقص تشکیل شد. سیمان پرتلند با فراهم آوردن یون‌های کلسیم و قلیایی‌ها، فرآیند پلیمریزاسیون سرباره را تسریع کرده و بهبود در تشکیل ساختار قلیایی (مانند N-A-S-H) را موجب می‌شود. این فرآیند به‌طور کلی موجب افزایش تراکم ماتریس، کاهش تخلخل و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری می‌گردد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) در شکل (۵) با بزرگ‌نمایی بیشتر، ذرات بلوری را نشان می‌دهد که با لایه‌ای زبر پوشش داده شده‌اند. این لایه‌ها به احتمال زیاد از مواد C-S-H (سیلیکات کلسیم هیدراته) اضافی یا هیدروکسید کلسیم $(Ca(OH)_2)$ حاصل از واکنش سیمان پرتلند اضافی تشکیل شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که افزایش سیمان پرتلند نه تنها باعث بهبود یکپارچگی ساختاری بتن قلیا فعال شده می‌شود، بلکه از تشکیل ترک‌ها و حفره‌ها نیز جلوگیری می‌کند. رفتار بتن قلیا فعال شده با جایگزینی تا حدود ۲۰ درصد سیمان پرتلند به‌جای سرباره، نشان‌دهنده عملکرد متناسب این ترکیب است. در این حالت، مقاومت فشاری بالاتر و نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه‌های بدون سیمان مشاهده می‌شود. به‌طور خاص، در طرح ۷، کاهش خلل و فرج و حفره‌ها همراه با افزایش یکپارچگی ساختاری در مقایسه با طرح ۱ به‌وضوح قابل تشخیص است.



(الف)

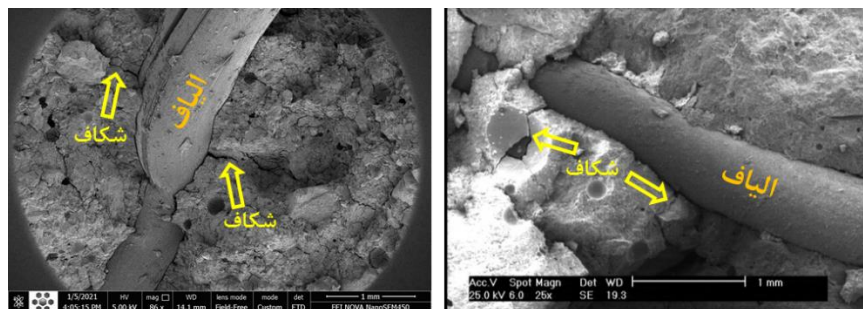


(ب)

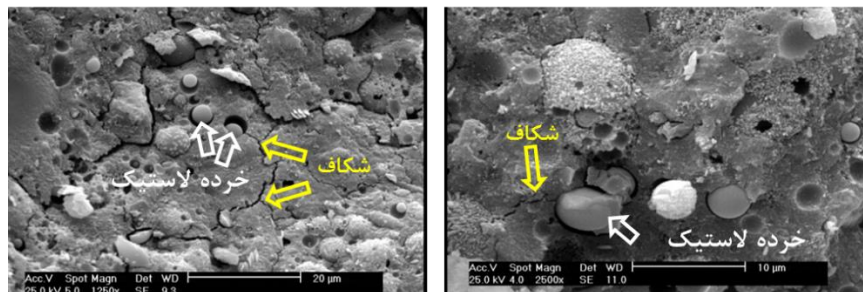
شکل ۵ تصاویر SEM بتن قلیا فعال شده در شرایط محیط (الف) طرح ۱ (بدون سیمان)، (ب) طرح ۲ (۲۰ درصد سیمان جایگزین شده با سرباره)

افزودن الیاف به میزان ۰ تا ۱ درصد نیز علاوه بر بهبود مقاومت کششی، مقاومت فشاری را افزایش داده است. شکل (۶ الف) SEM نمونه حاوی الیاف پلی‌الفین را نشان می‌دهد، در این شکل مشاهده می‌شود که الیاف نقش پل زنجری در ترک‌ها را ایفا کرده و با حفظ یکپارچگی بتن، تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت فشاری داشته‌اند. از سوی دیگر، خرده لاستیک اگرچه مسیر ترک‌ها را تغییر داده و از گسترش برخی ترک‌ها جلوگیری کرده است، اما به دلیل عدم ترکیب شیمیایی با مواد تشکیل‌دهنده بتن قلیا فعال شده، باعث کاهش مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه‌های شاهد بدون خرده لاستیک شده است. این یافته با تحقیقات پیشین در زمینه بتن‌های حاوی خرده لاستیک که کاهش مقاومت فشاری را گزارش کرده‌اند، هم‌خوانی دارد [۴۳-۴۵].

شکل (۶ ب) تصاویر SEM به منظور تأثیر خرده لاستیک بر بتن را نشان می‌دهد، در این شکل مشاهده می‌شود که برخی از ترک‌ها متوقف شده یا مسیر خود را تغییر داده‌اند که این امر ناشی از حضور خرده لاستیک در ساختار بتن است. با این حال، به دلیل عدم چسبندگی شیمیایی خرده لاستیک با ماتریس بتن، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی خرده لاستیک در مقایسه با نمونه‌های شاهد کاهش یافته است.



(الف)

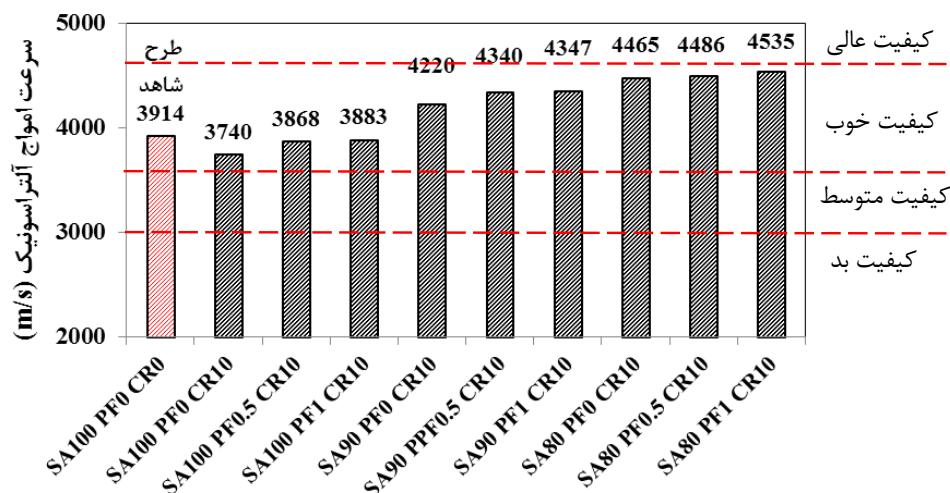


(ب)

شکل ۶ تصاویر SEM بتن قلیا فعال شده در شرایط محیط (الف) طرح ۳ (تأثیر الیاف پلی الفین)، (ب) طرح ۱ (تأثیر خرده لاستیک)

۳-۴ آزمایش سرعت امواج ماوراء صوت در شرایط محیط

در شکل (۷) میزان سرعت امواج ماوراء صوت برای نمونه‌های مختلف ارائه شده است. اگرچه کلیه نمونه‌ها در شرایط محیطی دارای سرعت امواج ماوراء صوت در محدوده ۳۵۰۰ تا ۴۵۰۰ متر بر ثانیه بوده و در بازه مطلوبی قرار دارند، اما همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش جایگزینی سیمان پرتلند به جای سرباره از صفر تا ۲۰ درصد، سرعت امواج ماوراء صوت افزایش یافته است و به‌طور میانگین ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزینی سبب افزایش ۱۲ و ۱۶ درصد سرعت امواج شده است. این افزایش نشان‌دهنده کاهش تخلخل و ترک‌های داخلی در ساختار بتن است. علاوه بر این، افزایش درصد الیاف تا حدی ناچیز نیز باعث افزایش سرعت امواج شده است که دلیل آن می‌تواند بهبود یکپارچگی ساختاری و کاهش گسترش ترک‌ها به دلیل اتصال مناسب الیاف به ماتریس قلیا فعال شده باشد. به‌طور کلی رفتار سرعت امواج ماوراء صوت رفتاری مشابه با مقاومت فشاری نمونه‌ها (مطابق شکل (۴)) دارد.



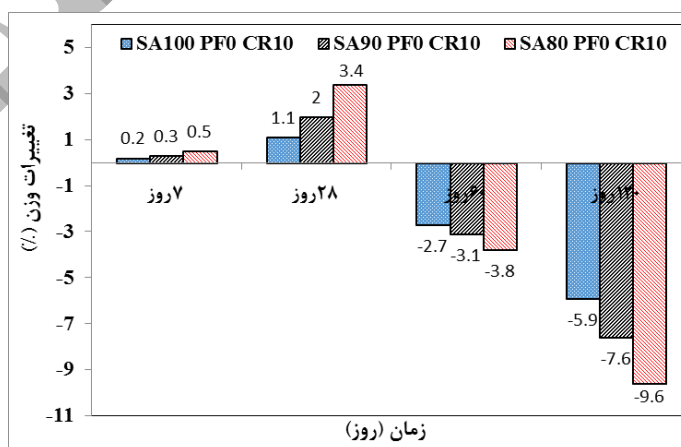
شکل ۷ سرعت ماوراء صوت نمونه‌ها در شرایط محیط

۳-۲ اثر مجاورت اسید بر نمونه‌ها

پس از قرار دادن نمونه‌ها در محیط اسیدی با PH یک درصد، در بازه ۷، ۲۸، ۶۰ و ۱۲۰ روز مشاهده گردید که سطوح فرسوده شده با مرور زمان افزایش یافته و در گذشت زمان تغییر جرم، حجم و تغییر مقاومت اتفاق می‌افتد.

۳-۲-۱ کاهش وزن به واسطه قرار گرفتن در محیط اسیدی

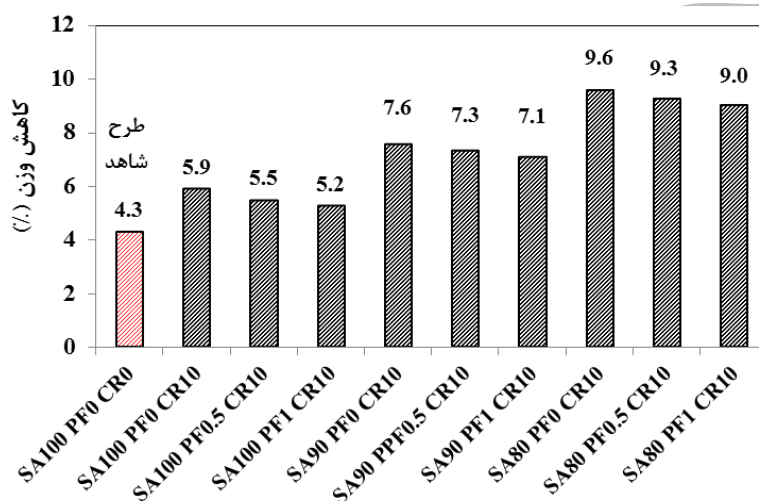
بررسی نمونه‌های بتن قلیا فعال شده حاوی سرباره و خرده لاستیک با درصد‌های جایگزینی سیمان ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد (بدون الیاف، طرح‌های ۱، ۴ و ۷) نشان می‌دهد که قرارگیری این نمونه‌ها در محیط اسیدسولفوریک منجر به تغییرات قابل توجهی در رفتار آن‌ها شده است. شکل (۸) درصد تغییرات وزن نمونه‌ها بعد از قرار گرفتن در معرض اسید را نشان می‌دهد. در بازه ۷ روز، نمونه‌ها افزایش حجم اندکی را تجربه کردند و این روند افزایش حجم تا ۲۸ روز ادامه یافت. با این حال، پس از گذشت ۶۰ روز، کاهش وزن اندکی در نمونه‌ها مشاهده شد. این کاهش وزن با گذشت زمان و رسیدن به بازه ۱۲۰ روز، به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. این تغییرات نشان‌دهنده تأثیر تدریجی محیط اسیدی بر ساختار بتن و تخریب تدریجی آن است.



شکل ۸ تغییر وزن نمونه‌ها با گذشت زمان بعد از قرارگیری در معرض اسید

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، در روزهای اولیه تا ۲۸ روز، به دلیل وجود خلل و فرج ناشی از عمل‌آوری در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و تبخیر آب در ۴۸ ساعت اولیه، نمونه‌ها در معرض اسیدسولفوریک قرار گرفته و به تدریج اسید را جذب کردند. این فرآیند منجر به افزایش حجم در روزهای اولیه تا ۲۸ روز شد که این پدیده در تحقیقات پیشین نیز مورد اشاره قرار گرفته است [۴۶-۴۸].

با این حال، با افزایش مدت زمان قرارگیری نمونه‌ها در معرض اسید، پس از ۱۲۰ روز، کاهش وزن در نمونه‌های بتن حاوی خرده لاستیک بدون الیاف و با درصدهای جایگزینی سیمان ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد به ترتیب ۵/۸۸، ۷/۵۶ و ۹/۵۷ درصد اندازه‌گیری شد. با توجه به اهمیت ارزیابی رفتار و مقاومت نمونه‌ها در طولانی‌ترین زمان ممکن در معرض اسید، کلیه نمونه‌ها با درصدهای الیاف ۰، ۰/۵ و ۱ درصد در شرایط ۱۲۰ روزه مورد تحلیل قرار گرفتند. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر تدریجی محیط اسیدی بر ساختار بتن و تخریب آن در بلندمدت است.



شکل ۹ کاهش وزن نمونه‌ها بعد از قرار گرفتن در اسید به مدت ۱۲۰ روز

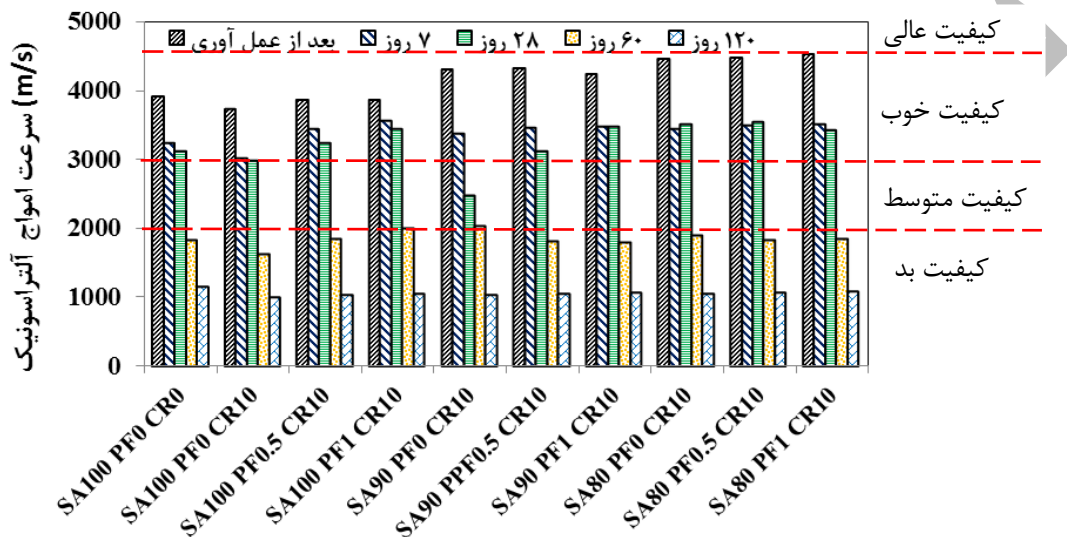
همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش درصد سیمان باعث افزایش افت جرم می‌شود وقتی کلسیم افزایش می‌یابد محصولات کلسیم هیدراته به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته Ca(OH)_2 که این محصول آمادگی و استعداد بیشتری در واکنش با اسیدسولفوریک دارد که این امر موجب تشکیل ترکیبات گچی کلسیم‌دار و نرم شدگی و کاهش چگالی بتن قلیا فعال شده حاوی سیمان می‌شود. فراوانی رسوب سفید رنگی که در تحلیل SEM در بخش‌های بعد ارائه می‌گردد نشانگر این واقعیت است که افزایش کلسیم سیمان سبب واکنش با اسیدسولفوریک و تولید کربنات کلسیم و سولفات‌الومینات کلسیم و سولفات‌های کلسیم شده که همگی به‌صورت رسوب سفید رنگ گچی به‌صورت گسترده بر روی سطح نمونه مشاهده می‌شود که چگالی را کاهش می‌دهد. همچنین، بر اساس نتایج به‌دست آمده، مشخص شد که در نمونه‌های بتن قلیا فعال شده با ۱۰۰ درصد سرباره، میزان کاهش وزن در کمترین مقدار خود قرار دارد. دیویدوویتس^۴ [۴۹] نیز پایداری مطلوب بتن در محیط اسیدسولفوریک را تأیید کرده و میزان افت

^۴ Davidovits

جرم آن را در محدوده ۵ تا ۸ درصد گزارش نموده است. در مقابل، افت جرم بتن معمولی در محیط اسیدسولفوریک بین ۳۰ تا ۶۰ درصد بوده که نشان‌دهنده مقاومت بسیار بالاتر بتن در مقایسه با بتن معمولی در برابر حملات اسیدی است.

۳-۲-۲ آزمایش سرعت امواج ماوراء صوت نمونه‌های قرار گرفته در محیط اسیدی

نمودار سرعت امواج ماوراء صوت در بتن قلیافعال شده حاوی خرده لاستیک و الیاف پلی‌الفین در محیط‌های اسیدی ۷، ۲۸، ۶۰ و ۱۲۰ روز مشاهده می‌شود.



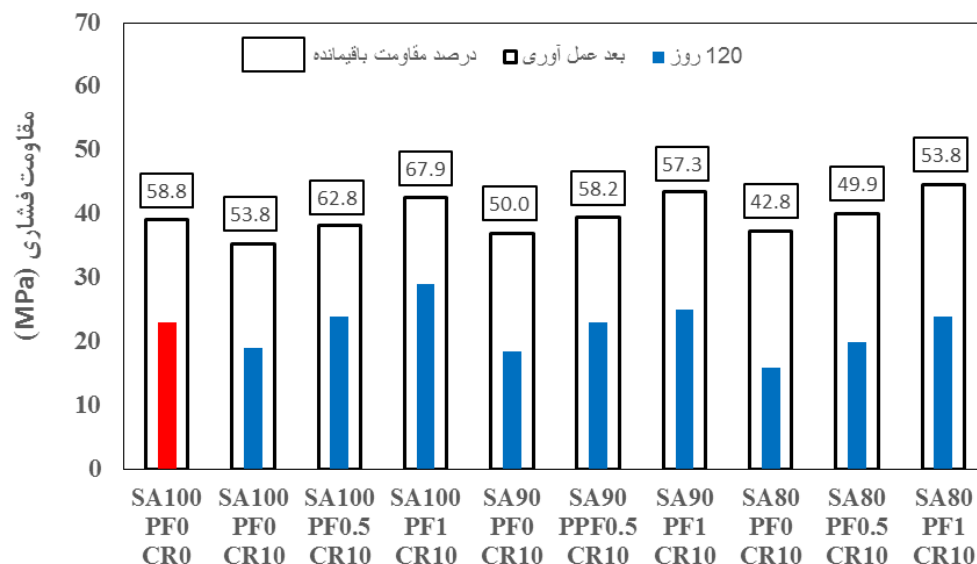
شکل ۱۰ سرعت امواج ماوراء صوت نمونه‌ها بعد از قرار گرفتن در شرایط اسیدی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نگهداری نمونه‌ها در محیط اسیدسولفوریک به مدت ۱۲۰ روز، سرعت امواج ماوراء صوت را به‌طور چشمگیری کاهش داده و به زیر ۲۰۰۰ متر بر ثانیه رسانیده است. این کاهش سرعت نشان‌دهنده‌ی افزایش تخلخل و پیشرفت فرآیند خوردگی در ساختار بتن در اثر مجاورت طولانی‌مدت با اسید است. باوجود افت شدید سرعت امواج ماوراء صوت برای تمامی نمونه‌ها در زمان طولانی، مقدار کاهش برای نمونه‌های ۱۰۰ درصد سرباره کمتر بوده است و این نمونه‌ها در مجاورت اسید عملکرد بهتری داشته‌اند.

۳-۲-۳ مقاومت فشاری نمونه‌های قرار گرفته در معرض اسید

در تحلیل نمونه شاهد، مشاهده شد که با افزایش میزان کلسیم در شرایط محیطی و جایگزینی ۲۰ درصدی سیمان در بتن قلیافعال شده حاوی خرده لاستیک و الیاف پلی‌الفین، مقاومت فشاری بتن افزایش یافته است. این افزایش مقاومت ناشی از تشکیل ترکیبات سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) در اثر واکنش بین مواد تشکیل‌دهنده بتن و سیمان است که منجر به آزادسازی حرارت بیشتر و تولید سیلیکاآلومینات‌ها شده و در نهایت مقاومت فشاری بتن حاوی سیمان و خرده لاستیک را بهبود بخشیده است. پس از قرارگیری نمونه‌ها در محیط اسیدی، مقاومت فشاری آن‌ها در بازه‌های زمانی ۷، ۲۸، ۶۰ و ۱۲۰ روز مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که در بخش کاهش وزن اشاره شد، در بحرانی‌ترین حالت (۱۲۰ روز)، بیشترین کاهش وزن و بیشترین کاهش مقاومت فشاری مشاهده گردید. در شکل (۱۱) مقاومت فشاری نمونه‌های قرار گرفته در معرض اسید به مدت ۱۲۰ روز و همچنین

درصد مقاومت باقیمانده آن‌ها نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری ارائه شده است. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر نامطلوب محیط اسیدی بر دوام و عملکرد بتن در طول زمان است.



شکل ۱۱ نمودار مقاومت فشاری و درصد مقاومت فشاری باقیمانده نمونه‌های مختلف در اسید به مدت ۱۲۰ روز

همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۱۲۰ روز برای طرح‌های حاوی ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد سیمان (بدون در نظر گرفتن الیاف پلی‌الفین) به ترتیب به ۱۹، ۱۸/۵ و ۱۶ مگا پاسکال رسیده است و به ترتیب ۵۳/۸، ۵۰ و ۴۲/۸ از مقاومت فشاری خود را توانسته‌اند حفظ کنند. در طرح‌های ۱، ۴ و ۷، اگرچه با افزایش سیمان از ۰ به ۱۰ درصد، افت مقاومت فشاری ناچیز بوده است، اما این روند با افزایش سیمان به ۲۰ درصد، تشدید شده است. از سوی دیگر، با افزودن الیاف پلی‌الفین از ۰ به ۵/۵ و سپس به ۱ درصد، افزایش مقاومت فشاری در هر سه دسته نمونه‌ها (بدون سیمان، ۱۰ درصد سیمان و ۲۰ درصد سیمان) مشاهده گردید. به‌طور مشخص، مقاومت فشاری نمونه‌های بدون سیمان از ۱۹ به ۲۴ (۲۶ درصد افزایش) و سپس به ۲۹ مگا پاسکال (۵۳ درصد افزایش)، نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد سیمان از ۱۸/۵ به ۲۳ (۲۴ درصد افزایش) و سپس به ۲۵ مگا پاسکال (۳۵ درصد افزایش) و نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد سیمان از ۱۶ به ۲۰ (۲۵ درصد افزایش) و سپس به ۲۴ مگا پاسکال (۵۰ درصد افزایش) بهبود یافت. این نتایج به‌وضوح نشان‌دهنده تأثیر مثبت افزودن الیاف پلی‌الفین بر بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها است.

در پژوهش‌های پیشین گزارش شده است که مواد قلیایی به‌واسطه برخورداری از پیوندهای قوی Si-O-Al، در مقایسه با بتن‌های معمولی مبتنی بر سیمان پرتلند، عملکرد بهتری در برابر حملات اسیدی، به‌ویژه اسید سولفوریک، از خود نشان می‌دهند [۳۱، ۵۰]. در این تحقیق، بررسی نمونه‌های بتن قلیا فعال‌شده حاوی خرده‌لاستیک و الیاف در محیط خورنده اسیدی حاکی از آن است که افت مقاومت فشاری نمونه‌های بدون الیاف (نمونه‌های ۱، ۴ و ۷) به ترتیب ۴۶، ۵۰ و ۵۷،۲ درصد بوده است. در مقابل، بیشترین مقاومت فشاری باقیمانده (معادل ۶۷/۹ درصد) مربوط به نمونه فاقد سیمان و حاوی یک درصد الیاف است. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از الیاف نقش مؤثری در کاهش اثرات مخرب محیط اسیدی ایفا می‌کند.

کاهش مقاومت در نمونه‌های حاوی سیمان را می‌توان به حضور فازهای هیدراته‌شده مبتنی بر کلسیم نظیر C-S-H نسبت داد. در محیط‌های اسیدی، این ترکیبات مستعد واکنش با یون‌های سولفات و هیدروژن هستند که منجر به تخریب ساختار C-S-H،

آزادسازی یون‌های کلسیم، و در نهایت تشکیل فازهای ثانویه‌ای مانند سولفات کلسیم (گچ)، سولفوآلومینات کلسیم و کربنات کلسیم می‌شود. تشکیل فاز گچ (به‌ویژه در حالت ایندريت) ضمن افزایش حجم داخلی، منجر به ایجاد تنش‌های داخلی و ریزترکهایی در سطح نمونه‌ها شده و لایه‌های سطحی به‌تدریج از بتن جدا می‌شوند. این فرآیند با افزایش درصد سیمان در مخلوط تشدید می‌شود و منجر به کاهش قابل‌توجه مقاومت فشاری و افزایش افت وزن می‌گردد. به‌طور مشخص، در نمونه ۷ (حاوی ۲۰ درصد سیمان)، کاهش وزن تا ۹,۵۷ درصد و افت مقاومت فشاری تا ۵۷,۲ درصد مشاهده گردید.

این نتایج با یافته‌های سایر پژوهش‌ها همخوانی دارد؛ برای مثال، در مطالعه‌ای توسط عزت [۵۱]، گزارش شد که بتن‌های حاوی سیمان پرتلند در برابر اسید سولفوریک دچار کاهش مقاومت شدیدتری نسبت به سیستم‌های قلیایی فاقد کلسیم می‌شوند. همچنین، تحقیقات آیکن^۵ و همکاران [۳۲] نشان داده‌اند که در محیط‌های اسیدی، حمله اسید عمدتاً بر ترکیبات کلسیم‌دار تأثیرگذار است و حضور سرباره به‌عنوان ماده‌ای با کلسیم کمتر، می‌تواند مقاومت اسیدی بتن را افزایش دهد. بنابراین، نتایج این پژوهش نیز مؤید آن است که کاهش مقاومت در محیط اسیدی به‌شدت تحت تأثیر حضور فازهای حاوی کلسیم است و استفاده از سامانه‌های کم‌کلسیم (همچون بتن‌های صرفاً مبتنی بر سرباره بدون سیمان پرتلند) می‌تواند دوام بلندمدت بتن را در شرایط اسیدی بهبود بخشد.

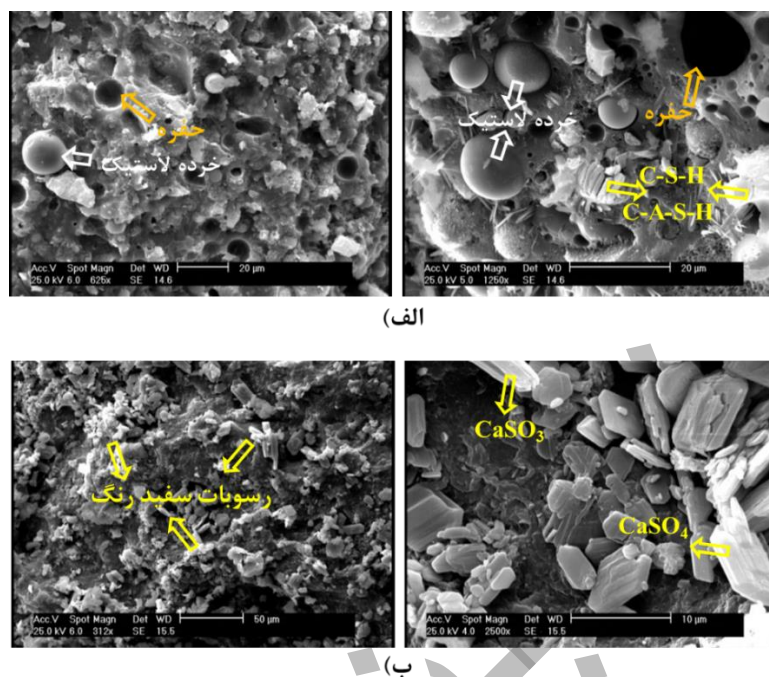
۳-۲-۴ آنالیز SEM نمونه‌های قرار گرفته در معرض اسید

با توجه به نتایج مربوط به مقاومت فشاری، کاهش وزن و سرعت انتشار امواج، مشاهده شد که بیشترین میزان فرسایش و افت ویژگی‌های مکانیکی در طولانی‌ترین زمان (۱۲۰ روز) در تمامی نمونه‌ها رخ داده است. افزایش درصد سیمان از صفر به ۱۰ درصد در بتن قلیافعال‌شده در معرض محیط اسیدسولفوریک، منجر به کاهش جزئی در مقاومت فشاری (حدود ۲ درصد، از ۲۴ به ۲۳/۵ مگاپاسکال) و کاهش وزن (از ۴/۷ درصد در نمونه بدون سیمان به ۴/۵ درصد در نمونه دارای ۱۰ درصد سیمان) گردید. این کاهش محدود را می‌توان به پر شدن حفرات و ترک‌های ریز توسط ژل‌های ثانویه نظیر C-S-H و C-A-S-H نسبت داد، که موجب انسداد مسیرهای نفوذ اسید به درون ساختار بتن شده و در نتیجه، افت مقاومت فشاری در این نمونه‌ها بسیار ناچیز بوده است. با این حال، افزایش درصد سیمان از ۱۰ به ۲۰ درصد موجب تشدید واکنش‌های اسیدسولفوریک با فازهای حاوی کلسیم گردیده است. این واکنش‌ها منجر به تخریب پیوندهای C-S-H و تشکیل ترکیبات ثانویه نظیر سولفات کلسیم (CaSO_4) و کربنات کلسیم (CaCO_3) شده‌اند که در نتیجه‌ی آن، مقاومت فشاری کاهش بیشتری یافته و آسیب‌پذیری ساختاری بتن افزایش یافته است.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نیز این روند را به‌خوبی تأیید می‌کنند. در نمونه حاوی ۲۰ درصد سیمان (نمونه ۷)، تشکیل لایه‌های ضخیم گچ (CaSO_4) و رسوبات سفیدرنگی از ایندريت و کلسیت به‌وضوح قابل مشاهده است. این لایه‌های گچی، به دلیل حجیم‌شدن در حین تشکیل، موجب افزایش تنش‌های داخلی در ساختار ماتریس بتن شده و ترک‌های ثانویه‌ای را به وجود می‌آورند که در نهایت منجر به کاهش پیوستگی و افت مقاومت مکانیکی می‌شود. در مقابل، نمونه حاوی ۱۰۰ درصد سرباره (نمونه ۱)، به دلیل تشکیل ساختار پایدار آلومینوسیلیکاتی (N-A-S-H) و عدم وجود فازهای کلسیم‌دار قابل واکنش، در برابر حملات اسیدی عملکرد مقاوم‌تری از خود نشان داده و تنها مقدار بسیار اندکی از رسوبات گچی و کربنات در ریزساختار آن مشاهده شد. این مشاهدات تأکید می‌کنند که گرچه افزودن مقدار کمی سیمان می‌تواند تا حدودی موجب بهبود ساختار و انسداد میکروترک‌ها

^۵ Aiken

شود، اما افزایش بیش از حد آن منجر به تشکیل فازهای آسیب‌پذیر در برابر محیط‌های اسیدی و در نتیجه تضعیف خواص مکانیکی بتن می‌گردد.



شکل ۱۲ تصاویر SEM بتن قلیا فعال شده در معرض اسید به مدت ۱۲۰ روز (الف) طرح ۱ (بدون سیمان) (ب) طرح ۷ (۲۰٪ سیمان، ۸۰٪ سرباره) در راستای پیشرفت تحقیقات در زمینه بتن‌های قلیا فعال شده، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده، تأثیر انواع مختلف الیاف مانند شیشه، کربن و فولاد و همچنین استفاده از مواد پوزولانی جایگزین نظیر متاکائولین، خاکستر بادی و نانوپوزولان‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این، ارزیابی تأثیر ترکیب‌های مختلف الیاف و پوزولان‌ها بر مقاومت و دوام بتن در محیط‌های اسیدی و خورنده، به ویژه در شرایط با غلظت‌های مختلف اسید و مدت زمان تماس، می‌تواند به درک بهتری از رفتار بتن‌های قلیا فعال شده در این محیط‌ها کمک کند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر جایگزینی سیمان پرتلند به جای سرباره و همچنین افزودن الیاف پلی‌الفین بر بتن قلیا فعال شده مبتنی بر سرباره در شرایط محیط و در شرایط قرارگیری در معرض اسید بررسی شده است. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

۱- در شرایط محیطی عادی:

- جایگزین کردن سیمان پرتلند با سرباره از صفر تا ۲۰ درصد در بتن قلیا فعال شده حاوی خرده لاستیک و الیاف پلی‌الفین در شرایط محیط در همه طرح‌ها (۰ تا ۱ درصد الیاف پلی‌الفین) باعث افزایش مقاومت کششی شده است. همچنین اضافه کردن الیاف پلی‌الفین نیز در هر حالت افزایش مقاومت کششی را به همراه دارد به طوری که در بیشترین حالت مقاومت کششی ۴/۸۷ مگا پاسکال مربوط به نمونه ۲۰ درصد سیمان جایگزین سرباره و درصد حجمی الیاف پلی‌الفین یک درصد به دست آمد.

- جایگزین کردن سیمان پرتلند با سرباره تا ۲۰ درصد در بتن قلیا فعال شده فاقد الیاف در شرایط محیط، مقاومت فشاری را از ۳۵/۳ مگا پاسکال در حالت بدون سیمان به ۴۲/۷ مگا پاسکال در حالت جایگزینی ۲۰ درصد سیمان افزایش یافته است که حدود ۶ درصد افزایش مقاومت می‌باشد.
- بیشترین مقاومت فشاری و کششی در شرایط محیطی عادی برای بتن قلیا فعال شده حاوی ۱۰ خرده لاستیک و الیاف پلی‌الفین ۴۴/۶ مگا پاسکال فشاری و ۴/۸۷ مگا پاسکال کششی بوده مربوط به حالت ۲۰ درصد سیمان جایگزین سرباره به همراه ۱ درصد حجمی الیاف می‌باشد.
- تصاویر SEM تأیید کننده تأثیر تقویت کننده و مثبت الیاف در ماتریکس قلیا فعال شده است نشان دهنده افزایش نیروی چسبندگی بین فیبر و ماتریکس بتن می‌باشد.

۲- در شرایط محیطی اسیدی

- با افزایش درصد الیاف پلی‌الفین از صفر به ۱ درصد حجمی در بتن قلیا فعال شده حاوی خرده لاستیک هم در مقاومت کششی و فشاری در شرایط محیطی و هم در حالت اسیدی افزایش مقاومت قابل توجه می‌باشد. طوری که افزایش الیاف پلی‌الفین از صفر تا ۱ درصد، مقاومت کششی در حالت بدون سیمان ۳۷ درصد و در حالت ۱۰ درصد سیمان جایگزین سرباره ۱۴ درصد و در حالت ۲۰ درصد سیمان جایگزین سرباره را ۱۳ درصد افزایش می‌دهد؛ و مقاومت فشاری در محیط را در حالت بدون سیمان ۲۱ درصد و در حالت ۱۰ درصد سیمان جایگزین سرباره ۱۸ درصد و در حالت ۲۰ درصد سیمان ۱۹ درصد افزایش می‌دهد و در حالت پس از ۱۲۰ روز قرار دادن در محیط اسیدی در حالت بدون سیمان ۵۲ درصد و ۱۰ درصد سیمان جایگزین ۳۵ درصد در حالت ۲۰ درصد جایگزین ۵۰ درصد افزایش می‌دهد.
- افزایش درصد سیمان پرتلند در بتن قلیا فعال شده منجر به فرسایش بیشتر نمونه‌ها در معرض اسید سولفوریک شده است که این موضوع از طریق کاهش وزن نمونه‌ها مشاهده می‌گردد. علت اصلی این فرسایش بیشتر، واکنش کلسیم اضافی موجود در سیمان پرتلند با اسید سولفوریک و تشکیل ترکیبات هیدراته مثل سنگ گچ است. بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌ها در زمان ۱۲۰ روز نشان می‌دهد که کاهش وزن از ۵/۹ درصد در حالت بدون سیمان به ۷/۶ درصد در حالت جایگزینی ۱۰ درصد سیمان با سرباره افزایش یافت، به طوری که بیشترین میزان فرسایش مربوط به حالت ۲۰ درصد جایگزینی سیمان با ۹/۶ درصد کاهش وزن بوده است.
- افزایش درصد سیمان پرتلند، فرسایش بالا به صورت کاهش وزن برای نمونه‌های در مجاورت اسید سولفوریک مشاهده شد که دلیل آن واکنش کلسیم اضافی با اسید سولفوریک و تشکیل سنگ گچ بوده و در زمان ۱۲۰ روز در اسید، کاهش وزن از ۵/۹ درصد در حالت بدون سیمان به ۷/۶ درصد در حالت ۱۰ درصد سیمان جایگزین سرباره و بیشترین فرسایش ۹/۶ درصد برای ۲۰ درصد سیمان جایگزین مشاهده شد.
- در محیط اسید سولفوریک، افزایش محتوای سیمان پرتلند به عنوان جایگزین سرباره در بتن قلیا فعال شده حاوی خرده لاستیک و الیاف، تأثیر قابل توجهی بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها داشته است. با افزایش سیمان از صفر تا ۱۰ درصد، کاهش ناچیزی در مقاومت فشاری نمونه‌های بدون الیاف مشاهده شد (از ۱۹ مگا پاسکال به ۱۸/۵ مگا پاسکال). با این حال، افزایش محتوای سیمان به ۲۰ درصد منجر به کاهش قابل توجه مقاومت فشاری شد، به طوری که این مقدار به ۱۶ مگا پاسکال رسید که معادل حدود ۱۶ درصد کاهش نسبت به حالت بدون سیمان است. علت اصلی این کاهش، واکنش

کلسیم اضافی موجود در سیمان پرتلند با اسیدسولفوریک و تشکیل ترکیبات هیدراته، افزایش حجم، کاهش چگالی بتن و همچنین تولید CaCO_3 است. این پدیده نشان می‌دهد که افزایش محتوای سیمان پرتلند می‌تواند به‌طور قابل توجهی از عملکرد بتن در برابر حملات شیمیایی کاسته شود.

- در شرایط مجاورت اسیدسولفوریک بیشترین مقاومت فشاری مربوط به حالت بتن بدون سیمان با ۱ درصد الیاف پلی-الفین بوده که مقدار آن ۲۹ مگا پاسکال می‌باشد و کمترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه فاقد الیاف و حاوی ۲۰ درصد سیمان جایگزین شده بوده است که مقدار آن ۱۶ مگا پاسکال می‌باشد.
- در شرایط محیطی، بیشترین مقاومت فشاری و کششی بتن قلیا فعال شده حاوی خرده لاستیک و الیاف پلی‌الفین (۱٪) به ترتیب ۴۴/۶ مگا پاسکال و ۴/۸۷ مگا پاسکال مشاهده شد که مربوط به حالت ۲۰ درصد جایگزینی سیمان با سرباره است. در مقابل، در شرایط مجاورت اسیدسولفوریک، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به بتن بدون سیمان و حاوی ۱٪ الیاف پلی‌الفین بوده، با مقدار ۲۹ مگا پاسکال است.
- در شرایط محیط اسیدی، هرچند بتن قلیا فعال شده حاوی خرده لاستیک و الیاف پلی‌الفین مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی نشان می‌دهد، افزایش سیمان از ۰ تا ۲۰ درصد (طرح ۷) منجر به کاهش مقاومت می‌شود. علت این کاهش، واکنش کلسیم موجود در سیمان با اسیدسولفوریک و تشکیل ترکیبات گچی مانند سنگ گچ است که سبب کاهش چگالی و یکپارچگی ساختار می‌شود. این پدیده نیز توسط نتایج محاسباتی مقاومت فشاری و کششی و تصاویر SEM تأیید شده است.

واژه‌نامه

Saturated Surface Dry	حالت اشباع با سطح خشک
SEM (Scanning Electron Microscope)	میکروسکوپ الکترونی روبشی
C-S-H (Calcium Silicate Hydrate)	هیدرات کلسیم سیلیکات
C-A-S-H (Calcium Alumino-Silicate Hydrate)	هیدرات سدیم آلومینو-سیلیکات
NaOH	هیدروکسید سدیم
ASTM (American Society for Testing and Materials)	انجمن آمریکایی آزمون و مصالح

منابع

- [1] A. Parande, B. R. Babu, K. Pandi, M. Karthikeyan, and N. Palaniswamy, "Environmental effects on concrete using Ordinary and Pozzolana Portland cement," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 1, pp. 288-297, 2011.
- [2] N. Mohamad, K. Muthusamy, R. Embong, A. Kusbiantoro, and M. H. Hashim, "Environmental impact of cement production and Solutions: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 48, pp. 741-746, 2022.
- [3] R. Allahvirdizadeh, R. Rashetnia, A. Dousti, and M. Shekarchi, "Application of polymer concrete in repair of concrete structures: A literature review," *Concrete Solutions*, pp. 435-444, 2011.
- [4] H. U. Ahmed *et al.*, "Compressive strength of sustainable geopolymer concrete composites: a state-of-the-art review," *Sustainability*, vol. 13, no. 24, p. 13502, 2021.
- [5] M. Amin, Y. Elsakhawy, K. Abu el-hassan, and B. A. Abdelsalam, "Behavior evaluation of sustainable high strength geopolymer concrete based on fly ash, metakaolin, and slag," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, p. e00976, 2022.
- [6] H. Achak, M. R. Sohrabi, and S. O. 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*, vol. 392, p. 131890, 2023.

- [7] K. Behfarnia and M. Rostami, "The effect of alkaline solution-to-slag ratio on permeability of alkali-activated slag concrete," *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 31, no. 1, pp. 99–112, 2018. (in Persian)
- [8] A. Jahani, A. R. Estabragh, H. Khajepour, and M. Amini, "Comparison of the effect of cement, ground granulated blast furnace slag (GGBS), and activated GGBS on stabilization of a clay soil," *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 35, no. 3, pp. 89–106, 2022. (in Persian)
- [9] S. Pilehvar *et al.*, "Physical and mechanical properties of fly ash and slag geopolymer concrete containing different types of micro-encapsulated phase change materials," *Construction and Building Materials*, vol. 173, pp. 28-39, 2018.
- [10] Z. Tang, W. Li, V. W. Tam, and Z. Luo, "Investigation on dynamic mechanical properties of fly ash/slag-based geopolymeric recycled aggregate concrete," *Composites Part B: Engineering*, vol. 185, p. 107776, 2020.
- [11] O. A. Mohamed, "Effect of immersing geopolymer slag-fly ash mortar in sulfuric acid on strength development and stability of mass," *Construction and Building Materials*, vol. 341, p. 127786, 2022.
- [12] A. E. Kurtoglu *et al.*, "Mechanical and durability properties of fly ash and slag based geopolymer concrete," *Advances in concrete construction*, vol. 6, no. 4, p. 345, 2018.
- [13] W. Yang, H. Liu, P. Zhu, X. Zhu, X. Liu, and X. Yan, "Effect of recycled coarse aggregate quality on the interfacial property and sulfuric acid resistance of geopolymer concrete at different acidity levels," *Construction and Building Materials*, vol. 375, p. 130919, 2023.
- [14] M. Sienkiewicz, J. Kucinska-Lipka, H. Janik, and A. Balas, "Progress in used tyres management in the European Union: A review," *Waste management*, vol. 32, no. 10, pp. 1742-1751, 2012.
- [15] J. Shao, H. Zhu, G. Xue, Y. Yu, S. M. Borito, and W. Jiang, "Mechanical and restrained shrinkage behaviors of cement mortar incorporating waste tire rubber particles and expansive agent," *Construction and Building Materials*, vol. 296, p. 123742, 2021.
- [16] C. A. Issa and G. Salem, "Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design," *Construction and Building Materials*, vol. 42, pp. 48-52, 2013.
- [17] A. Rezapour and S. E. S. Nia, "Effect of rubber particle size on mechanical behavior of sand-rubber mixtures using direct shear apparatus," *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 29, no. 1, pp. 17–36, 2017. (in Persian)
- [18] A. Zadeh *et al.*, "Mechanical behavior of clay soils mixed with rubber particles," *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 26, no. 2, pp. 117–130, 2015. (in Persian)
- [19] M. Asadzadeh and H. Soltani Jigheh, "Swelling and consolidation properties of clayey soils reinforced with tire-chips," *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 23, no. 2, p. 11, 2012. (in Persian)
- [20] I. W. Adebayo *et al.*, "Effect of crumb rubber and polyethylene fiber on the strength and toughness of fly ash/slag-based geopolymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 455, p. 139133, 2024.
- [21] O. Smirnova, A. Kharitonov, and Y. Belentsov, "Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 6, no. 4, pp. 407-417, 2019.
- [22] Q. Z. M. Nejad and M. Varesteh, "Study of the effect of alkaline activator on static and dynamic properties of geopolymer mortars containing frac and fibers," *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 37, no. 2, p. 11, 2025. (in Persian)
- [23] M. G. Azandariani, M. Vajdian, K. Asghari, and S. Mehrabi, "Mechanical properties of polyolefin and polypropylene fibers-reinforced concrete—An experimental study," *Composites Part C: Open Access*, vol. 12, p. 100410, 2023.
- [24] H. Xu *et al.*, "Experimental study on mechanical properties of fiber reinforced concrete: Effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber," *Construction and Building Materials*, vol. 261, p. 120610, 2020.
- [25] M. G. Azandariani, M. Vajdian, M. Javadi, and A. Parvari, "Durability and compressive strength of composite polyolefin fiber-reinforced recycled aggregate concrete: An experimental study," *Composites Part C: Open Access*, vol. 15, p. 100533, 2024.
- [26] Q. Z. M. Nejad, D. Nejad, and A. Arin, "Experimental study of mechanical properties of geopolymer mortars containing slag, kaolin powder, and polymer," *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 37, no. 2, pp. 25–50, 2024. (in Persian)
- [27] I. Shafiq, M. Azreen, and M. Hussin, "Sulphuric acid resistant of self compacted geopolymer concrete containing slag and ceramic waste," in *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 97: EDP Sciences, p. 01102.

- [28] A. Özcan and M. B. Karakoç, "The resistance of blast furnace slag-and ferrochrome slag-based geopolymer concrete against acid attack," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 17, no. 10, pp. 1571-1583, 2019.
- [29] W. Yang, P. Zhu, H. Liu, X. Wang, W. Ge, and M. Hua, "Resistance to sulfuric acid corrosion of geopolymer concrete based on different binding materials and alkali concentrations," *Materials*, vol. 14, no. 23, p. 7109, 2021.
- [30] S. H. Mohammadi, M. V. Pour, and F. Pargar, "Investigation of the effect of micro silica, metakaolin, and zeolite pozzolans and polypropylene fibers on chloride ion penetration resistance in concrete under the environmental conditions of Qeshm Island" *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 83–96, 2025. (in Persian)
- [31] H. E. Elyamany, A. E. M. A. Elmoaty, and A. R. A. Diab, "Sulphuric acid resistance of slag geopolymer concrete modified with fly ash and silica fume," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, vol. 45, pp. 2297-2315, 2021.
- [32] T. A. Aiken, J. Kwasny, W. Sha, and M. N. Soutsos, "Effect of slag content and activator dosage on the resistance of fly ash geopolymer binders to sulfuric acid attack," *Cement and Concrete Research*, vol. 111, pp. 23-40, 2018.
- [33] A. Mehta and R. Siddique, "Sulfuric acid resistance of fly ash based geopolymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 146, pp. 136-143, 2017.
- [34] M. Mehrabian and J. Mahmoudimehr, "Numerical Simulation of a Biogas-fueled Solid Oxide Fuel Cell and the Investigation of the Influence of Operating Conditions," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 55, no. 7, pp. 895–916, 2023.
- [35] S. Mehdipour *et al.*, "Mechanical properties, durability and environmental evaluation of rubberized concrete incorporating steel fiber and metakaolin at elevated temperatures," *Journal of Cleaner Production*, vol. 254, p. 120126, 2020.
- [36] D. Hardjito, S. Wallah, and B. Rangan, "Research into engineering properties of geopolymer concrete," in *International Conference'Geopolymer2002-turn potential into profit'*, Melbourne (Australia), October, 2002.
- [37] M. S. Reddy, P. Dinakar, and B. H. Rao, "A review of the influence of source material's oxide composition on the compressive strength of geopolymer concrete," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 234, pp. 12-23, 2016.
- [38] A. A. Aliabdo, M. Abd Elmoaty, and H. A. Salem, "Effect of cement addition, solution resting time and curing characteristics on fly ash based geopolymer concrete performance," *Construction and building materials*, vol. 123, pp. 581-593, 2016.
- [39] S. C. Moghaddam, R. Madandoust, M. Jamshidi, and I. M. Nikbin, "Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions," *Construction and Building Materials*, vol. 281, p. 122571, 2021.
- [40] M. Shahjalal *et al.*, "Fiber-reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber: A state-of-the-art review," *Construction and Building Materials*, vol. 404, p. 133233, 2023.
- [41] F. Z. Hossain, M. Shahjalal, K. Islam, M. Tiznobaik, and M. S. Alam, "Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing crumb rubber and polypropylene fiber," *Construction and Building Materials*, vol. 225, pp. 983-996, 2019.
- [42] R. Assaggaf, M. Maslehuddin, M. A. Al-Osta, S. U. Al-Dulaijan, and S. Ahmad, "Properties and sustainability of treated crumb rubber concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 51, p. 104250, 2022.
- [43] F. Wang and W. Song, "Effects of crumb rubber on compressive strength of cement-treated soil," *Archives of Civil Engineering*, vol. 61, no. 4, pp. 59-78, 2015.
- [44] K. E. Kaloush, G. B. Way, and H. Zhu, "Properties of crumb rubber concrete," *Transportation Research Record*, vol. 1914, no. 1, pp. 8-14, 2005.
- [45] N. M. Noor, H. Hamada, Y. Sagawa, and D. Yamamoto, "Effect of crumb rubber on concrete strength and chloride ion penetration resistance," *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, vol. 77, no. 32, 2015.
- [46] A. Allahverdi and F. Skvara, "Sulfuric acid attack on hardened paste of geopolymer cements-Part 1. Mechanism of corrosion at relatively high concentrations," *Ceramics Silikaty*, vol. 49, no. 4, p. 225, 2005.
- [47] A. Allahverdi and F. Skvara, "Sulfuric acid attack on hardened paste of geopolymer cements-part 2. Corrosion mechanism at mild and relatively low concentrations," *Ceramics Silikaty*, vol. 50, no. 1, p. 1, 2006.
- [48] X. Song, M. Marosszeky, M. Brungs, and Z.-T. Chang, "Response of geopolymer concrete to sulphuric acid attack," in *Proceedings of World Congress Geopolymer*, 2005, pp. 157-160.

- [49] J. Davidovits, "High-alkali cements for 21st century concretes," *Special Publication*, vol. 144, pp. 383-398, 1994.
- [50] J. Gourley and G. Johnson, "Developments in geopolymer precast concrete," in *World congress geopolymer*, 2005: Geopolymer Institute Saint-Quentin, France, pp. 139-143.
- [51] A. M. Izzat *et al.*, "Sulfuric acid attack on ordinary Portland cement and geopolymer material," *Revista de Chimie*, vol. 64, no. 9, pp. 1011-1014, 2013.