



Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>



**Iranian
Concrete
Institute**



**Pavement
Engineering
Association of
Iran**

Investigation of the Effect of Polyolefin Fibers and Cement Replacement with Slag on the Strength of Alkali-Activated Concrete Containing Rubber Particles in Normal and Acidic Environments

Research Article

Bahram Bolouri Kashli¹, Iman Mohammadpour Nikbin², Mohammad Javad Mahdizadeh³

DOI: [10.22067/jfcej.2025.92782.1353](https://doi.org/10.22067/jfcej.2025.92782.1353)

1-Interduction

Alkali-activated concrete (AAC) has emerged as a sustainable alternative to Portland cement due to its significantly lower carbon footprint, reduced energy demand during production, and superior chemical resistance. Among various aluminosilicate sources, slag-based alkali-activated binders have demonstrated excellent mechanical performance and exceptional durability when exposed to aggressive environments, particularly sulfuric acid, due to their dense reaction products and low permeability [1–3]. At the same time, the global accumulation of end-of-life tires have intensified interest in incorporating crumb rubber as a partial fine aggregate replacement. Although the inclusion of rubber particles often reduces compressive and tensile strength because of their low stiffness and weak interfacial bonding, such environmental benefits make their use increasingly attractive. This drawback, however, can be mitigated through the addition of reinforcing fibers. Polyolefin fibers are particularly effective in enhancing crack-bridging capacity, improving tensile behavior, and limiting the formation of interconnected pathways for chemical ingress, thereby increasing overall durability.

In this study, slag-based AAC mixtures were developed using 0%, 10%, and 20% slag replacement levels, combined with 10% volumetric crumb rubber and polyolefin fibers at dosages of 0%, 0.5%, and 1%. The fresh and hardened properties were evaluated after dry curing at 60°C, while long-term acid resistance was investigated through immersion in 1% sulfuric acid for 7, 28, 60, and 120 days. Microstructural evolution was assessed using SEM, complemented by ultrasonic pulse velocity measurements to characterize damage and durability performance.

2-Materials and Experimental Methods

This study utilized Type II Portland cement and ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) as the principal

binders. Slag was incorporated at replacement levels of 0%, 10%, and 20% to assess its influence on alkali-activated concrete performance. Cement and slag complied with EN 197-1 and ASTM C989/C989M standards. Natural washed sand with a fineness modulus of 2.85 and crushed coarse aggregates (maximum size 19 mm) meeting ASTM C33 requirements were used.

Recycled crumb rubber from waste automobile tires replaced 10% of the fine aggregate volume. The rubber was introduced in three particle-size ranges (0–1 mm, 1–3 mm, and 3–4.75 mm), all approximately spherical. The replacement reduced the unit weight of the mixtures. Polyolefin fibers conforming to ASTM D7508/D7508M were incorporated at 0%, 0.5%, and 1% by volume, each with a length of 30 mm and a diameter of 0.8 mm.

The alkaline activator consisted of 12 M sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na₂SiO₂). The mass ratio of sodium silicate to sodium hydroxide was fixed at 2.5, while the alkaline-to-binder ratio was maintained at 0.4 according to [4]. Based on these parameters, nine mix designs were developed combining different levels of slag, rubber, and fiber content. A control mix with 100% slag and no rubber or fibers was also prepared.

Dry materials were first blended uniformly, followed by gradual addition of the alkaline activator solution. The fresh mixtures were cast into molds and dry-cured at 60°C for 48 hours, then stored under ambient conditions. Mechanical properties were assessed through compressive and tensile strength tests. Durability performance was evaluated by immersing samples in 1% sulfuric acid for 7, 28, 60, and 120 days. Microstructural examination using scanning electron microscopy (SEM) and ultrasonic pulse velocity (UPV) testing was conducted to characterize internal damage and degradation mechanisms.

* Manuscript received March 25, 2025, Revised April 15, 2025, Accepted November 03, 2025.

¹Corresponding author, M.Sc. Graduate, Civil Eng.–Structural Eng., Deilaman Inst. of Higher Education.

Email: bahrambolouri@gmail.com.

² Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Islamic Azad Univ., Rasht Branch, Rasht.

³ M.Sc. Graduate, Civil Eng.–Construction Mgmt., Ayandeghan Univ., Tonekabon, Iran.

3-Results and Discussion

The results indicate that replacing Portland cement with slag significantly improves both tensile and compressive strengths of alkali-activated concrete, although the increase in tensile strength is less pronounced at higher replacement levels (20%) compared to 10%. Additionally, adding up to 1% polyolefin fibers markedly enhances tensile and compressive strengths, with the highest strengths observed in mixes containing 20% slag replacement and 1% fibers. This improvement is attributed to the combined hydration reactions and enhanced bonding within the concrete matrix, which strengthen the mechanical performance.

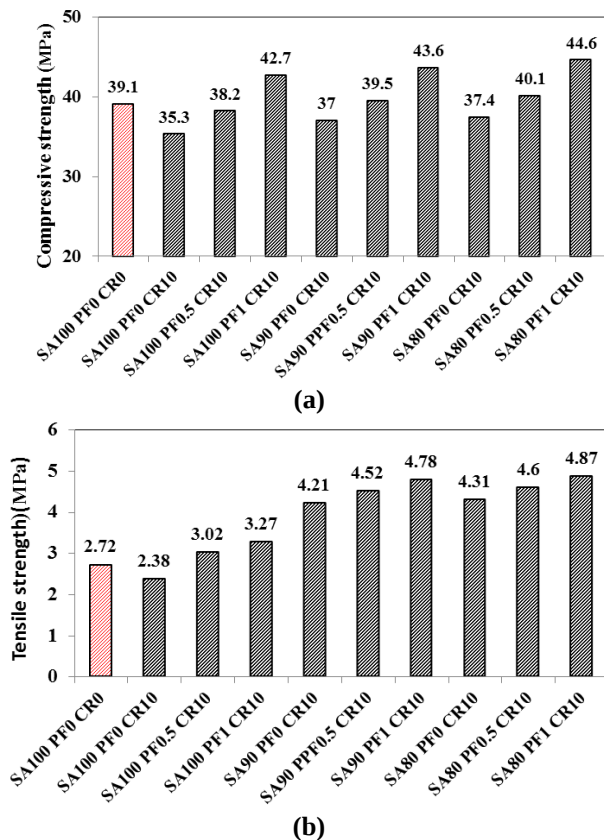


Fig1. Compressive and tensile strength of samples under normal conditions

Exposure to sulfuric acid reduces the compressive strength of alkali-activated concrete, especially in mixes with higher cement content due to acid attack on calcium-based phases like C-S-H. Samples with slag replacing cement showed better acid resistance. Adding polyolefin fibers significantly improved compressive strength and helped mitigate acid damage across all mixes. Overall, lower cement content combined with fiber reinforcement enhances durability and long-term performance in acidic environments.

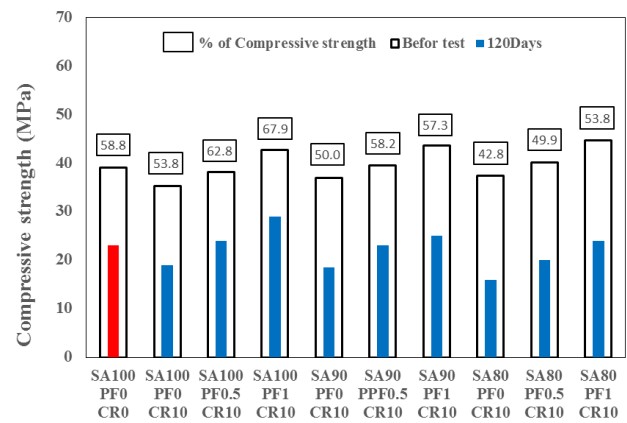


Fig2. Residual compressive strength percentage of different samples after 120 days in acid

4-Conclusion

This study investigated the effects of partial slag replacement with Portland cement and the incorporation of polyolefin fibers on the mechanical and durability performance of slag-based alkali-activated concrete (AAC) containing crumb rubber, under both ambient conditions and sulfuric acid exposure.

Under ambient conditions, replacing slag with Portland cement up to 20% generally enhanced mechanical performance. In AAC containing crumb rubber and polyolefin fibers (0–1% by volume), increasing the cement content from 0% to 20% led to a consistent increase in tensile strength. The highest tensile strength of 4.87 MPa was obtained for the mixture with 20% cement replacement and 1% polyolefin fibers. Similarly, in fiber-free AAC, compressive strength increased from 35.3 MPa in the cement-free mix to 42.7 MPa at 20% cement replacement. The optimum mixture under ambient conditions was the AAC containing 10% crumb rubber and 1% polyolefin fibers with 20% cement replacement, which achieved compressive and tensile strengths of 44.6 MPa and 4.87 MPa, respectively. SEM observations confirmed the reinforcing effect of polyolefin fibers through improved bonding at the fiber–matrix interface.

Under sulfuric acid exposure, the role of cement contrasted sharply with ambient behavior. Increasing the polyolefin fiber content from 0% to 1% significantly enhanced both compressive and tensile strengths and improved acid resistance, whereas higher Portland cement content intensified chemical degradation. After 120 days in sulfuric acid, weight loss increased from 5.9% in the cement-free mix to 9.6% at 20% cement replacement due to the formation of expansive gypsum and other calcium-based hydrates. The highest compressive strength in acid (29 MPa) was recorded for the cement-free AAC containing 1% polyolefin fibers, while the mix with 20% cement replacement and no fibers showed the lowest strength (16 MPa). Overall, the results indicate that minimizing Portland cement and incorporating polyolefin fibers are key strategies for enhancing the chemical resistance of slag-based AAC with crumb rubber



بررسی تأثیر الیاف پلی‌الفین و جایگزینی سیمان با سرباره بر مقاومت بتن قلیا فعال شده حاوی خرده لاستیک در محیط‌های

عادی و اسیدی*

مقاله پژوهشی

بهرام بلوری کشلی^(۱) ایمان محمد پور نیک بین^(۲) محمد جواد مهدی زاده^(۳)

DOI: 10.22067/jfeci.2025.92782.1353

چکیده بتن قلیا فعال 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 قلیا فعال 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 مگاپاسکال) و کششی (۴/۸۷ مگاپاسکال) 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 مگاپاسکال) را نشان داد. تحلیل‌های ریزساختاری و سرعت امواج ماورای صوت، تأیید کننده بهبود خواص مکانیکی و دوام نمونه‌ها بود.

واژه‌های کلیدی بتن قلیا فعال شده مبتنی بر سرباره، الیاف پلی‌الفین، جایگزینی سیمان با سرباره، تأثیر اسید بر بتن قلیا فعال شده.

Investigation of the Effect of Polyolefin Fibers and Cement Replacement with Slag on the Strength of Alkali-Activated Concrete Containing Rubber Particles in Normal and Acidic Environments

Bahram Bolouri Kashli Iman Mohammadpour Nikbin Mohammad Javad Mahdizadeh

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.

Key words Slag-Based Alkali-Activated Concrete, Polyolefin Fibers, Cement Replacement with Slag, Acid Resistance of Alkali-Activated Concrete.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۱/۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۸/۱۲ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - گرایش سازه، مؤسسه آموزش عالی غیرانتفاعی دیلمان، لاهیجان.

Email: bahrambolouri@gmail.com

(۲) دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رشت، رشت.

(۳) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - گرایش مدیریت ساخت، دانشگاه آیندگان، تنکابن.

مقدمه

بتن به عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح در جهان شناخته می‌شود که سیمان پرتلند به عنوان اصلی‌ترین جزء تشکیل دهنده آن، تأثیرات نامطلوبی بر محیط زیست دارد [1]. تولید سیمان پرتلند نه تنها به میزان قابل توجهی انرژی مصرف می‌کند (حدود ۴ گیگا ژول انرژی به ازای تولید هر تن سیمان)، بلکه منجر به انتشار حجم بالایی از گازهای گلخانه‌ای، به ویژه دی‌اکسید کربن (حدود ۱۰۳۵ میلیون تن در سال) و تشدید پدیده گرمایش جهانی می‌شود [2]. در این راستا، تحقیقات گسترده‌ای به منظور جایگزینی سیمان معمولی با پزولان‌های فعال شونده قلیایی انجام شده است. این نوع مواد که خواص مکانیکی مشابه یا حتی برتری نسبت به بتن معمولی ارائه می‌دهند [3]. همچنین، مقاومت فشاری بتن‌های قلیافعال شده در بازه ۲۸ تا ۸۸ مگاپاسکال گزارش شده است که نشان دهنده عملکرد مطلوب این نوع بتن در بلندمدت است [4,5].

بتن قلیافعال شده بر پایه سرباره به عنوان یکی از نوین‌ترین مواد ساخت‌وساز، با توجه به خصوصیات محیط‌زیستی و مکانیکی مناسب، توجه زیادی را به خود کشیده است [6,7]. سرباره که یک محصول جانبی صنایع فولادسازی است، دارای ترکیب آلومینوسیلیکاتی غنی است و در حضور فعال‌کنندگان قلیایی مانند هیدروکسید و سیلیکات سدیم، واکنش‌های قلیایی را آغاز می‌کند [8]. این خصوصیت به آن اجازه می‌دهد تا به عنوان یک جایگزین مؤثر برای سیمان پرتلند عمل کند، که علاوه بر کاهش ضایعات صنعتی، به بهبود ویژگی‌های مکانیکی و مقاومت بتن کمک می‌کند. استفاده از سرباره در تولید بتن قلیافعال شده، به دلیل وجود مقادیر بالای آلومینوم و سیلیکا در ترکیب آن، منجر به افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن می‌شود، که این موضوع بهبود عملکرد ساختاری بتن را تضمین می‌کند [9].

بتن قلیافعال شده به عنوان یک جایگزین بتن‌های پرتلند معمولی، نه تنها به دلیل ویژگی‌های مکانیکی مطلوب، بلکه به خاطر مقاومت استثنایی که در برابر حملات شیمیایی مختلف از خود نشان می‌دهد، توجه محققان و مهندسان عمران را به خود جلب کرده است [10]. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که این ماده پیشرفته به ویژه در مواجهه با اسیدسولفوریک که یکی از مخرب‌ترین عوامل برای سازه‌های بتنی در محیط‌های صنعتی و فضایی محسوب می‌شود، عملکرد برجسته‌ای از خود بروز می‌دهد [11]. ساختار شیمیایی منحصر به فرد بتن قلیافعال شده که بر پایه واکنش پلیمریزاسیون آلومینوسیلیکات‌ها در محیط

قلیایی شکل می‌گیرد، منجر به ایجاد شبکه‌ای متراکم با تخلخل بسیار کم در مقیاس نانومتری شده است [12]. این ویژگی باعث شده که این نوع بتن در مقایسه با بتن‌های معمولی بر پایه سیمان پرتلند، از نفوذپذیری بسیار کمتری برخوردار باشد. تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که ضریب نفوذپذیری بتن قلیافعال شده تا ۷۰ درصد کمتر از بتن‌های سیمانی است که این امر به طور مستقیم بر کاهش نرخ حملات شیمیایی تأثیرگذار است [13].

صنعت تولید لاستیک خودرو سالانه بیش از ۱۷ میلیون تن ضایعات لاستیک مستعمل تولید می‌کند که تنها درصد کمی از آن قابلیت بازیافت دارد [14]. در دو دهه گذشته، استفاده از لاستیک‌های خرد شده حاصل از تایرهای فرسوده در مخلوط‌های بتن به عنوان راهکاری برای کاهش تأثیرات منفی ناشی از سوزاندن یا دفن این ضایعات مطرح شده است [15]. سالانه حدود ۱۸۰ میلیون تایر لاستیکی در اروپا و ۲۷۵ میلیون تایر در آمریکا دور ریخته می‌شود [16]. استفاده از خرده لاستیک بازیافتی به عنوان جایگزینی در ترکیبات بتنی، به ویژه در راستای کاهش آثار زیست‌محیطی ناشی از انباشت تایرهای فرسوده، در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران حوزه مهندسی عمران و محیط زیست قرار گرفته است. در این میان، بررسی‌های محدودی به تأثیر خرده لاستیک بر خواص مهندسی مخلوط‌های قلیایی مبتنی بر سرباره پرداخته‌اند. یافته‌های این مطالعات نشان می‌دهد که جایگزینی بخشی از مصالح ریزدانه (نظیر ماسه) با خرده لاستیک، به ویژه در اندازه‌های مشابه، می‌تواند رفتار مکانیکی بتن قلیافعال شده را تحت تأثیر قرار دهد [17,18]. به طور کلی، شواهد تجربی حاکی از آن است که استفاده از مقادیر بالای خرده لاستیک، منجر به افت قابل توجهی 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 نیست و مقاومت فشاری و خمشی تقریباً حفظ می‌شود، هر چند کاهش نسبی در مقاومت کششی قابل مشاهده است. این یافته‌ها، اگر چه نیازمند بررسی‌های جامع‌تر در مقیاس‌های مختلف هستند، می‌توانند مبنایی برای توسعه مصالح پایدارتر در صنعت ساخت‌وساز فراهم کنند. [19,20].

افزودن الیاف پلی‌الفین به بتن قلیافعال شده تأثیر زیادی بر ویژگی‌های مکانیکی این نوع بتن دارد و می‌تواند اثرات نامطلوب افزودن خرده لاستیک را تا حد زیادی بهبود بخشد. از آنجا که

الیاف پلی‌الفین دارای ساختاری پایدار و مقاوم علیه شرایط زیست‌محیطی مختلف هستند، استفاده از آن‌ها می‌تواند منجر به بهبود معنادار مقاومت کششی بتن قلیافعال شده شود [21,22]. این الیاف، زمانی که به صورت 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 به عنوان 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 کند و در نتیجه، رسانایی ترک‌ها را کاهش دهد. بدین ترتیب، الیاف نه تنها مقاومت مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشند، بلکه دوام و پایداری آن را در برابر عوامل محیطی نیز افزایش می‌دهند [23,24]. با این حال، تأثیر الیاف پلی‌الفین بر مقاومت فشاری بتن قلیافعال شده ممکن است به صورت کمتری مشاهده شود، زیرا افزودن این الیاف به طور مستقیم بهبود چگالی و ساختار بتن را تقویت نمی‌کند و بیشتر به عنوان یک عنصر تقویت کننده تحت تنش کششی عمل می‌کند. بنابراین، انتخاب میزان مناسب افزودنی الیاف پلی‌الفین بر اساس نوع بارگذاری و کاربرد نهایی بتن قلیافعال شده بسیار حائز اهمیت است [25,26].

محیط‌های خورنده اسیدی همواره یکی از چالش‌های اساسی در زمینه دوام و پایداری بلندمدت سازه‌های بتنی به شمار می‌روند. تماس طولانی‌مدت بتن با محیط‌های اسیدی می‌تواند منجر به تجزیه فازهای هیدراته شده سیمان پرتلند، کاهش چسبندگی در ساختار ماتریس سیمانی و در نهایت کاهش قابل توجه مقاومت مکانیکی و از دست رفتن یکپارچگی ساختاری شود. در این راستا، استفاده از مواد جایگزین سیمان، نظیر سرباره، به عنوان رویکردی نوین در افزایش مقاومت شیمیایی بتن در برابر محیط‌های مهاجم مطرح شده است. ساختار این نوع بتن، که حاصل واکنش‌های پوزولانی بین آلومینوسیلیکات‌ها و محلول‌های فعال‌کننده قلیایی است، نسبت به سیستم‌های پایه سیمانی از پایداری شیمیایی بالاتری برخوردار است و در مواجهه با محیط‌های اسیدی، به ویژه اسیدهای معدنی قوی، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد [27-30]. در میان منابع مختلف

در این تحقیق، نمونه‌های مبتنی بر سرباره با درصدهای جزئی جایگزینی سیمان (۰، ۱۰ و ۲۰ درصد) و ۱۰ درصد حجمی خرده لاستیک به عنوان 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 مورد بررسی 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. به منظور تحلیل ریزساختاری و بررسی علل کاهش مقاومت فشاری، از میکروسکوپ الکترونی روشی (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 ماوری صوت نیز مقایسه و ارزیابی گردید.



شکل ۱ نمونه الیاف پلی‌الفین

مواد و روش‌ها

مواد

در این پژوهش آزمایشگاهی از سیمان پرتلند تیپ II با وزن مخصوص ۳/۱۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب تحت استاندارد En 197-1 و سرباره کوره آهن‌گدازی به صورت 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

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

جدول ۲ خصوصیات فیزیکی الیاف پلی‌الفین

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

طرح‌های مخلوط

در این پژوهش، از مخلوطی شامل هیدروکسید سدیم (NaOH) با مولاریته ۱۲ مولار و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_2) به عنوان 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 [34] 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 به عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه (ماسه) استفاده شد. این خرده لاستیک‌ها در سه اندازه مختلف (۰ - ۱ میلی‌متر، ۱ - ۳ میلی‌متر و ۳ - ۴/۷۵ میلی‌متر) و به صورت 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 نه‌گانه بتن ارائه شده است که شامل ترکیبات مختلف مواد قلیایی، سرباره، خرده لاستیک و الیاف پلی‌الفین می‌باشد. نمونه فاقد خرده لاستیک، فاقد الیاف و تشکیل شده از ۱۰۰ درصد سرباره نیز به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شده است.

جدول ۳ طرح اختلاط بتن های قلیا فعال شده

طرح	مخلوط ها	الیاف پلی الفین (kg/m ³)	محلول قلیایی (kg/m ³)	فوق روان کننده (kg/m ³)	ریزدانه (kg/m ³)	درشت دانه (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

مخلوط کردن و عمل آوری

در روند آماده سازی نمونه های قلیا فعال شده، 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 واکنش پذیری آلومینوسیلیکات ها انتخاب شده است. مطالعات پیشین نشان می دهد که غلظت های بالاتر از ۱۰ مولار می تواند اثربخشی فرایند فعال سازی قلیایی را افزایش دهد و منجر به ایجاد ساختار ژل پایدارتر در شبکه بتن شوند [35].

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 گزارش های موجود در ادبیات علمی صورت گرفته است، به گونه ای که این ترکیب می تواند ضمن حفظ ویسکوزیته مناسب محلول فعال کننده، باعث تشکیل فازهای قلیایی یکنواخت و دارای مقاومت مکانیکی مطلوب گردد. افزایش سهم سیلیکات سدیم در محلول فعال کننده، باعث تأمین سیلیس محلول کافی در سیستم می شود و نقش مهمی در تکامل ساختار سه بعدی ایفا می کند. محلول نهایی تهیه شده (ترکیب NaOH و سیلیکات

سدیم) به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شد تا به تعادل شیمیایی برسد و واکنش های اولیه بین اجزای محلول تکمیل گردد. این مرحله، که با هدف تثبیت خصوصیات فیزیکی و شیمیایی محلول انجام می شود، در بهبود عملکرد واکنش پلیمریزاسیون در زمان اختلاط با ماده جامد نقش مؤثری دارد [36].

پس از آماده سازی محلول قلیایی، شن و ماسه در حالت اشباع با سطح خشک ((Saturated Surface Dry (SSD)) به همراه خرده لاستیک و الیاف (در صورت وجود در طرح اختلاط) به صورت خشک مخلوط شدند. سپس، سرباره به مخلوط اضافه گردید و پس از اختلاط کامل، محلول قلیایی تهیه شده به تدریج به مخلوط اضافه شد. پس از ۲ تا ۵ دقیقه اختلاط، مخلوط در قالب ها ریخته شد. قالب ها به مدت ۱ تا ۳ دقیقه بر روی صفحه ارتعاشی قرار داده شدند تا حباب های هوا خارج شوند. پس از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای محیط (۲۰ - ۲۵ درجه سانتی گراد)، نمونه ها از قالب خارج شده و درون گرم کن با دمای حدود ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند. پس از این مرحله، نمونه ها از گرم کن خارج شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط خنک شدند. سپس، نمونه ها به مدت ۲۴ روز در شرایط محیطی با دمای معمولی نگهداری شدند و پس از آن، آزمایش ها و تحقیقات لازم بر روی آن ها انجام گرفت.

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

نمونه شاهد فاقد خرده لاستیک و مابقی نمونه‌های بتن قلیافعال شده در این مطالعه، حاوی ۱۰ درصد خرده لاستیک هستند. نمونه‌های ۱، ۴ و ۷ که فاقد الیاف پلی‌الفین بودند، بیشترین مقدار اسلامپ را نشان دادند. این نتایج با تحقیقات پیشین بر روی بتن قلیافعال 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 [37,38]. 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 [39-41]. 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 فرایند هیدراتاسیون باشد. این فرایند منجر به افزایش چسبندگی و در نتیجه کاهش کارایی و اسلامپ بتن می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که اگر چه حضور خرده لاستیک به طور کلی کارایی بتن را بهبود می‌بخشد، اما افزایش درصد سیمان جایگزین سرباره و همچنین الیاف، تأثیر معکوس بر اسلامپ دارد.

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 قلیافعال شده حاوی خرده لاستیک را نشان می‌دهد.

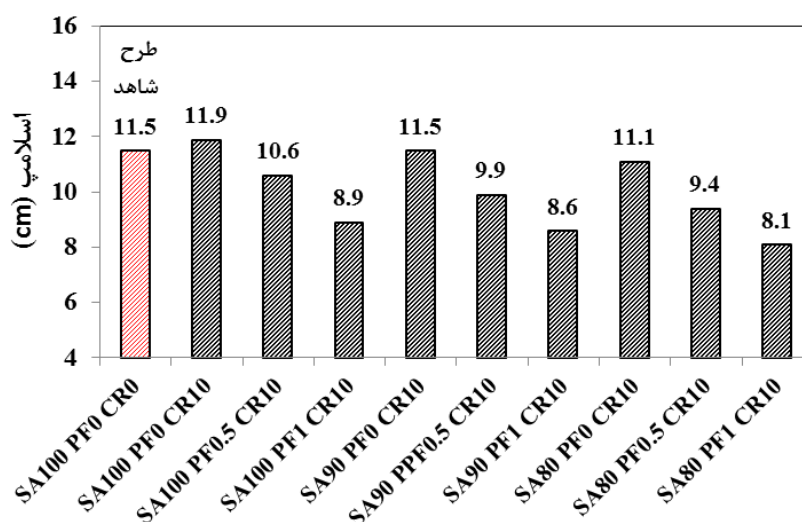
جدول (۴) آنالیز شیمیایی به دست آمده از روش XRF و مشخصات فیزیکی بتن قلیافعال شده مبتنی بر سرباره را بر اساس استاندارد C618 ASTM نشان می‌دهد. این نتایج مربوط به طرح‌های مختلف بتن قلیافعال شده فاقد الیاف پلی‌الفین می‌باشد. علت تغییر در درصد مواد بالا به دلیل جایگزین ۲۰ درصد سیمان به جای سرباره بوده که سبب کاهش SiO₂ و Al₂O₃ و افزایش CaO شده است.

تحلیل و بررسی نتایج

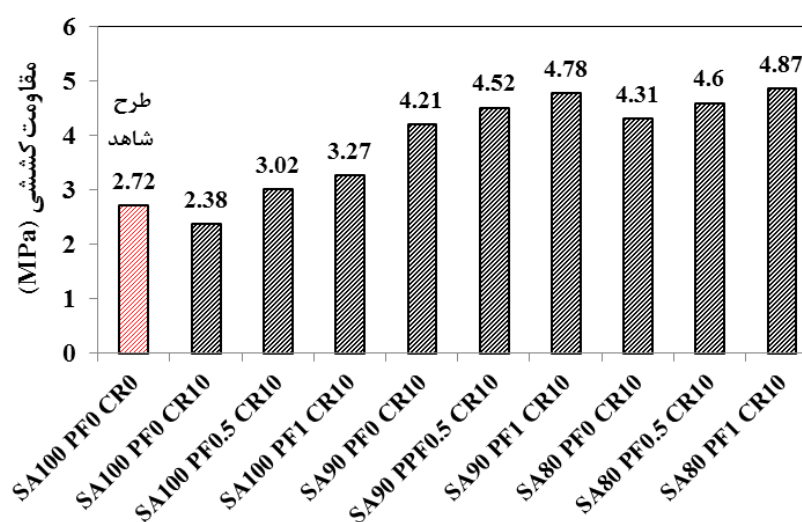
پس از ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش اسلامپ، نمونه‌ها در گرم‌کن با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند. پس از این مرحله، نمونه‌ها از گرم‌کن خارج شده و در محیط آزمایشگاهی با دمای معمولی نگهداری شدند. پس از سپری شدن ۲۸ روز از عمر نمونه‌ها، آزمایش‌های مختلف از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سرعت امواج ماورای 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 به صورت دقیق برای نمونه‌های قرار گرفته در شرایط محیطی عادی و نمونه‌های در معرض اسید، به طور مجزا بررسی و ارزیابی شدند.

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

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



شکل ۳ نمودار مقاومت کششی نمونه‌ها در شرایط محیط

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 مگاپاسکال (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 به ویژه 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.

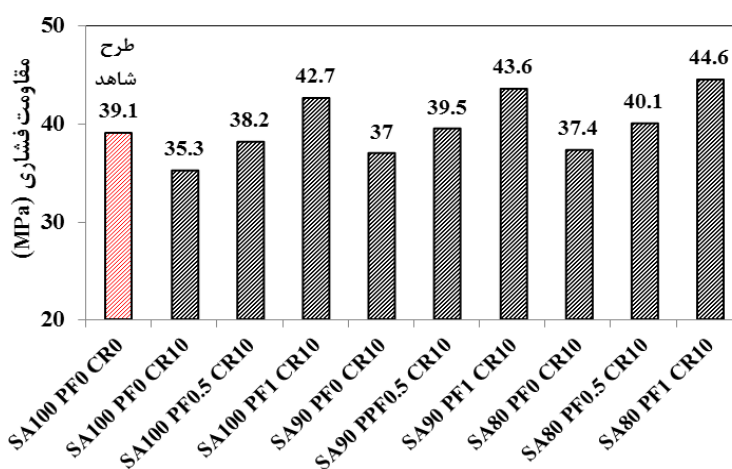
نتایج آزمایش مقاومت کششی نشان می‌دهد که افزایش درصد الیاف از صفر به یک درصد، منجر به بهبود مقاومت کششی بتن قلیا فعال شده حاوی خرده لاستیک می‌شود. این یافته با مطالعات پیشین نیز هم‌خوانی دارد [21,34]. همچنین، جایگزینی سیمان با سرباره باعث افزایش مقاومت کششی بتن شده است، هر چند این افزایش در مقایسه با 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 مگاپاسکال و در طرح ۹ معادل ۴.۸۷ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد). علاوه بر این، افزایش درصد الیاف

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 به عنوان جایگزینی برای این نواقص تشکیل شد. سیمان پرتلند با فراهم آوردن یون‌های کلسیم و قلیایی‌ها، فرایند پلیمریزاسیون سرباره را تسریع می‌کند و بهبود در تشکیل ساختار قلیایی (مانند N-A-S-H) را موجب می‌شود. این فرایند به طور 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 زیر 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 به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش سیمان پرتلند نه تنها باعث بهبود یکپارچگی ساختاری بتن قلیافعال‌شده می‌شود، بلکه از تشکیل ترک‌ها و حفره‌ها نیز جلوگیری می‌کند. رفتار بتن قلیافعال‌شده با جایگزینی تا حدود ۲۰ درصد سیمان پرتلند به جای سرباره، نشان دهنده عملکرد متناسب این ترکیب است. در این حالت، مقاومت فشاری بالاتر و نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه‌های بدون سیمان مشاهده می‌شود. به طور خاص، در طرح ۷، کاهش خلل و فرج و حفره‌ها همراه با افزایش یکپارچگی ساختاری در مقایسه با طرح ۱ به وضوح قابل تشخیص است.

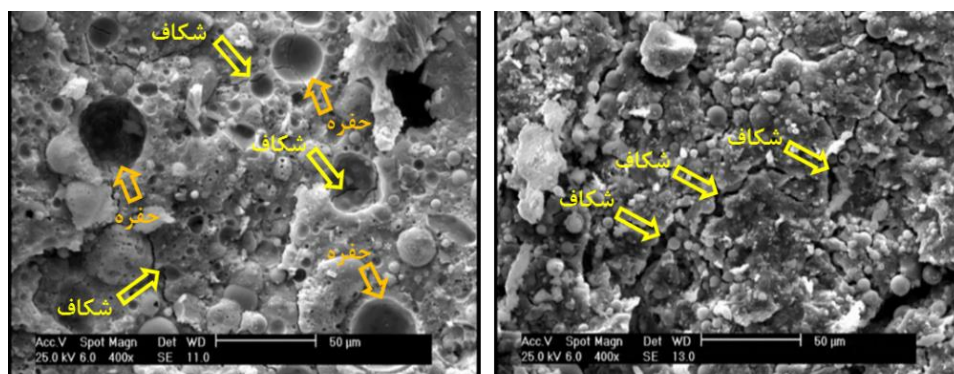
نتایج آزمایش مقاومت فشاری در شرایط محیط. نتایج به دست آمده از مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها در شکل (۴) مشاهده می‌شود. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که افزایش درصد الیاف از صفر تا ۱ درصد منجر به بهبود مقاومت فشاری بتن قلیافعال‌شده ۱۰۰ تا ۸۰ درصد سرباره می‌شود و ۱ درصد الیاف به ترتیب مقدار مقاومت فشاری را ۲۱، ۱۸ و ۱۹ درصد افزایش داده است. همچنین، افزایش جایگزینی سیمان پرتلند با سرباره نیز مقاومت فشاری را به طور 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.

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 به طور نسبی کاهش یافت. با افزایش بیشتر سیمان به ۲۰ درصد، ذرات واکنش‌ناپذیر سرباره به طور چشمگیری کاهش یافتند و حفره‌ها نیز کمتر شدند. این تغییرات به وضوح در تصاویر SEM شکل (۵) قابل مشاهده است.

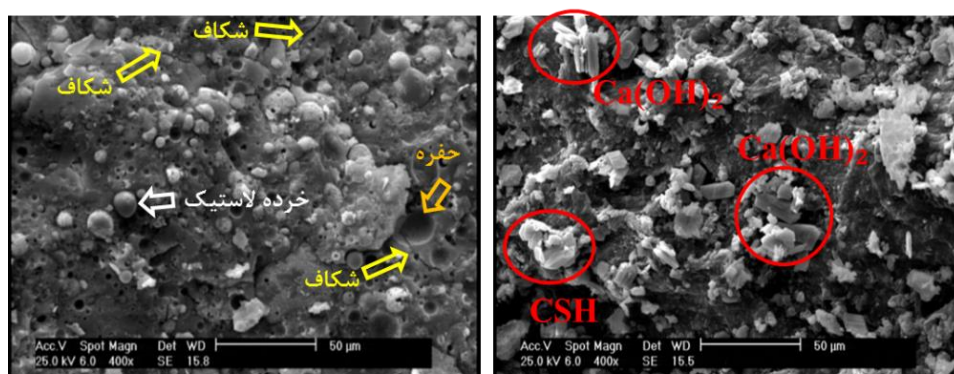
در بتن قلیافعال‌شده خالص (بدون سیمان)، ترک‌ها و حفره‌های بیشتری مشاهده شد که احتمالاً به دلیل تبخیر رطوبت در مرحله عمل‌آوری در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و انقباض ناشی از آن است. با افزایش درصد سیمان، رطوبت موجود در



شکل ۴ مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط محیط

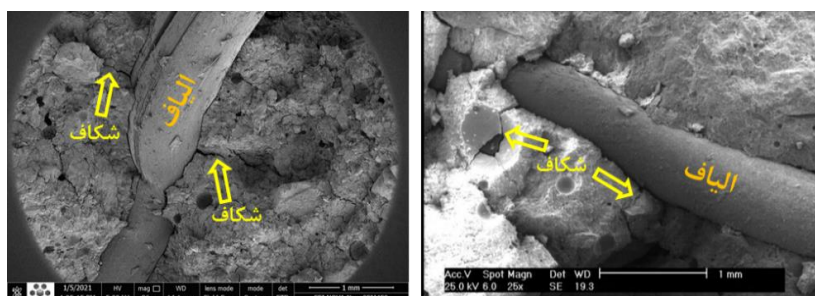


(الف)

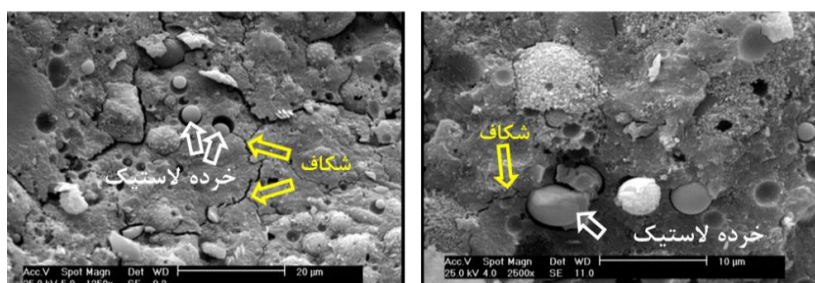


(ب)

شکل ۵ تصاویر SEM بتن قلیا فعال شده در شرایط محیط: (الف) طرح ۱ (بدون سیمان) و (ب) طرح ۷ (۲۰ درصد سیمان جایگزین شده با سرباره)



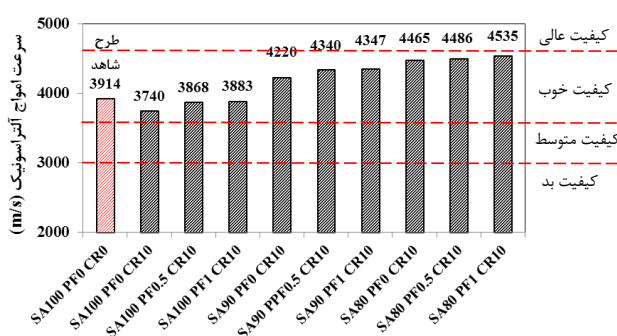
(الف)



(ب)

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

نمونه‌ها (مطابق شکل ۴) دارد.



شکل ۷ سرعت ماورای صوت نمونه‌ها در شرایط محیط

اثر مجاورت اسید بر نمونه‌ها

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

کاهش وزن به واسطه قرار گرفتن در محیط اسیدی. بررسی نمونه‌های بتن قلیافعال‌شده 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، به طور قابل توجهی افزایش یافت. این تغییرات نشان دهنده تأثیر تدریجی محیط اسیدی بر ساختار بتن و تخریب تدریجی آن است.

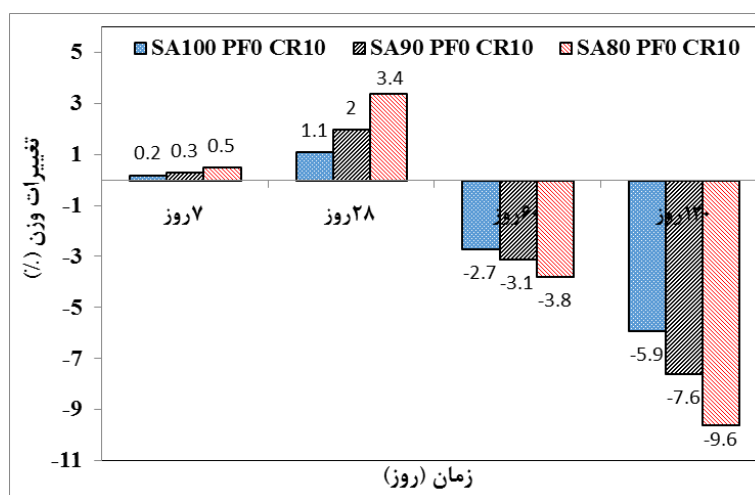
همان طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، در روزهای اولیه تا ۲۸ روز، به دلیل وجود خلل و فرج ناشی از عمل‌آوری در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و تبخیر آب در ۴۸ ساعت اولیه، نمونه‌ها در معرض اسیدسولفوریک قرار گرفتند و به تدریج اسید را جذب کردند. این فرایند منجر به افزایش حجم در روزهای اولیه تا ۲۸ روز شد که این پدیده در تحقیقات پیشین نیز مورد اشاره قرار گرفته است [45-47].

افزودن الیاف به میزان صفر 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 زنجندی در ترک‌ها را ایفا کرده‌اند و با حفظ یکپارچگی بتن، تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت فشاری داشته‌اند. از سوی دیگر، خرده لاستیک اگر چه مسیر ترک‌ها را تغییر داده و از گسترش برخی ترک‌ها جلوگیری کرده است، اما به دلیل عدم ترکیب شیمیایی با مواد تشکیل دهنده بتن قلیافعال‌شده، 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 [42-44].

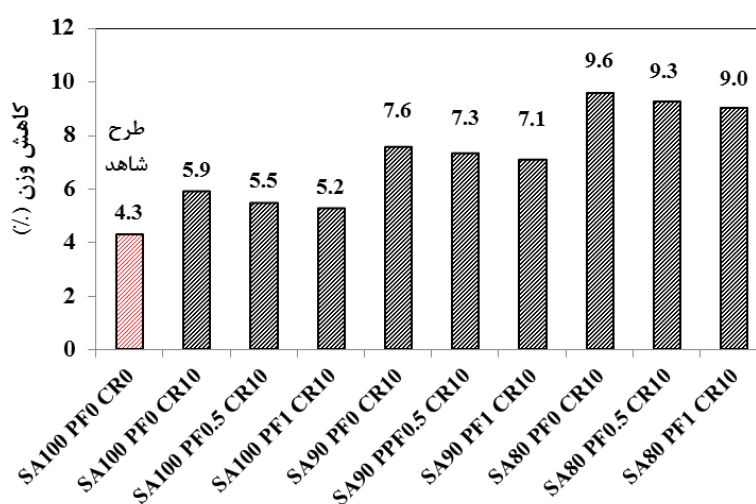
در شکل (۶-ب) تصاویر SEM تأثیر خرده لاستیک را بر بتن نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که برخی از ترک‌ها متوقف شده یا مسیر خود را تغییر داده‌اند که این امر ناشی از حضور خرده لاستیک در ساختار بتن است. با این حال، به دلیل عدم چسبندگی شیمیایی خرده لاستیک با ماتریس بتن، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی خرده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

آزمایش سرعت امواج ماورای صوت در شرایط محیط.

شکل (۷) میزان سرعت امواج ماورای صوت برای نمونه‌های مختلف ارائه شده است. اگر چه کلیه نمونه‌ها در شرایط محیطی دارای سرعت امواج ماورای صوت در محدوده ۳۵۰۰ تا ۴۵۰۰ متر بر ثانیه هستند و در بازه مطلوبی قرار دارند، اما همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش جایگزینی سیمان پرتلند به جای سرباره از صفر تا ۲۰ درصد، سرعت امواج ماورای صوت افزایش یافته است و به طور میانگین ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزینی سبب افزایش ۱۲ و ۱۶ درصد سرعت امواج شده است. این افزایش نشان دهنده 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 قلیافعال‌شده باشد. به طور کلی رفتار سرعت امواج ماورای صوت رفتاری مشابه با مقاومت فشاری



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



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

همان طور که مشاهده می‌شود افزایش درصد سیمان باعث افزایش افت جرم می‌شود. وقتی کلسیم افزایش می‌یابد محصولات کلسیم هیدراته به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند. Ca(OH)_2 آمادگی و استعداد بیشتری در واکنش با اسیدسولفوریک دارد که این امر موجب تشکیل ترکیبات گچی کلسیم‌دار و نرم‌شدگی و کاهش چگالی بتن قلیافعال 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 سولفاآلومینات کلسیم و سولفات‌های کلسیم شده که همگی به صورت رسوب سفید رنگ گچی به طور

شکل (۹) مقدار کاهش وزن نمونه‌ها بعد از قرارگرفتن ۱۲۰ روزه در اسید را نشان می‌دهد، نتایج بیانگر این امر است که 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، 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.

برای نمونه‌های ۱۰۰ درصد سرباره کمتر بوده است و این نمونه‌ها در مجاورت اسید عملکرد بهتری داشته‌اند.

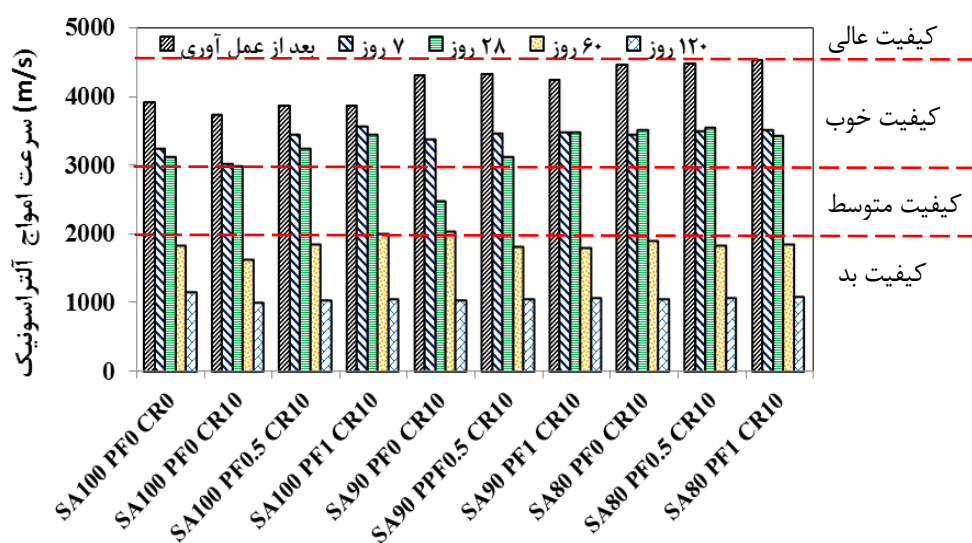
مقاومت فشاری نمونه‌های قرار گرفته در معرض اسید. در تحلیل نمونه شاهد، مشاهده شد که با افزایش میزان کلسیم شرایط محیطی و جایگزینی ۲۰ درصدی سیمان در بتن قلیافعال شده حاوی خرده لاستیک و الیاف پلی‌الفین، مقاومت فشاری بتن افزایش یافته است. این افزایش مقاومت ناشی از تشکیل ترکیبات سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) در اثر واکنش بین مواد تشکیل دهنده بتن و سیمان است که منجر به آزادسازی حرارت بیشتر و تولید سیلیکا آلومینات‌ها 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 نشان دهنده تأثیر نامطلوب محیط اسیدی بر دوام و عملکرد بتن در طول زمان است.

گسترده بر روی سطح نمونه مشاهده می‌شود که چگالی را کاهش می‌دهد.

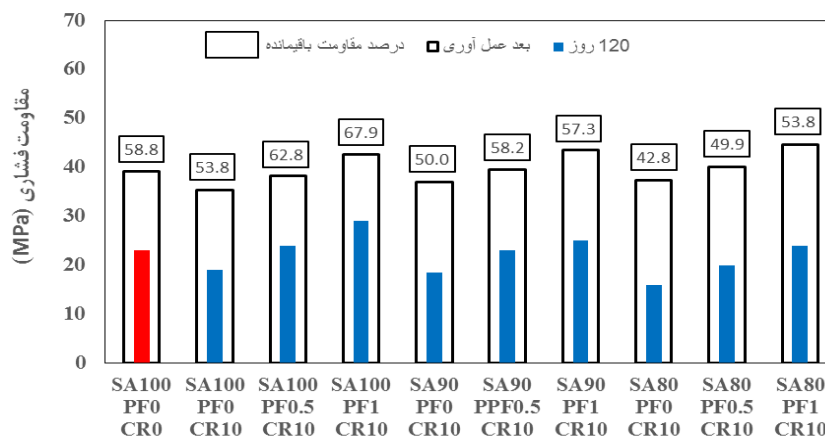
همچنین، بر اساس نتایج به دست آمده، مشخص شد که در نمونه‌های بتن قلیافعال شده با ۱۰۰ درصد سرباره، میزان کاهش وزن در کمترین مقدار خود قرار دارد. دیویدوویتس (Davidovits) [48] نیز پایداری مطلوب بتن در محیط اسیدسولفوریک را تأیید کرده و میزان افت جرم آن را در محدوده ۵ تا ۸ درصد گزارش کرده است. در مقابل، افت جرم بتن معمولی در محیط اسیدسولفوریک بین ۳۰ تا ۶۰ درصد است که نشان دهنده مقاومت بسیار بالاتر بتن در مقایسه با بتن معمولی در برابر حملات اسیدی است.

آزمایش سرعت امواج ماورای صوت نمونه‌های قرار گرفته در محیط اسیدی. در شکل (۱۰) سرعت امواج ماورای صوت در بتن قلیافعال شده حاوی خرده لاستیک و الیاف پلی‌الفین در محیط‌های اسیدی ۷، ۲۸، ۶۰ و ۱۲۰ روز مشاهده می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نگهداری نمونه‌ها در محیط اسیدسولفوریک به مدت ۱۲۰ روز، سرعت امواج ماورای صوت را به طور چشمگیری کاهش داده و به زیر ۲۰۰۰ متر بر ثانیه رسانیده است. این کاهش سرعت نشان دهنده افزایش تخلخل و پیشرفت فرایند خوردگی در ساختار بتن در اثر مجاورت طولانی مدت با اسید است. با وجود افت شدید سرعت امواج ماوراء صوت برای تمامی نمونه‌ها در زمان طولانی، مقدار کاهش



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



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

(نمونه‌های ۱، ۴ و ۷) به ترتیب ۴۶.۲، ۵۰ و ۵۷.۲ درصد بوده است. در مقابل، بیشترین مقاومت فشاری باقی مانده (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 هیدراته شده 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 (به ویژه در حالت ایندیریت) ضمن افزایش حجم داخلی، منجر به ایجاد تنش‌های داخلی و ریزترک‌هایی در سطح نمونه‌ها می‌شود و لایه‌های سطحی به تدریج از بتن جدا می‌شوند. این فرایند با افزایش درصد سیمان در مخلوط تشدید می‌شود و منجر به کاهش قابل توجه مقاومت فشاری و افزایش افت وزن می‌گردد. به طور 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 [50] گزارش شد که بتن‌های حاوی سیمان پرتلند در برابر اسید سولفوریک دچار کاهش مقاومت شدیدی نسبت به سیستم‌های قلیایی فاقد کلسیم می‌شوند. همچنین، تحقیقات آیکن (Aiken) و همکاران [32] نشان داده‌اند که در محیط‌های اسیدی، حمله اسید عمدتاً بر ترکیبات کلسیم‌دار تأثیرگذار است و حضور سرباره به عنوان

همان طور 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 مگاپاسکال 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، اگر چه 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٪ و سپس به ۱ درصد، افزایش مقاومت فشاری در هر سه دسته نمونه‌ها (بدون سیمان، ۱۰ درصد سیمان و ۲۰ درصد سیمان) مشاهده گردید. به طور مشخص، مقاومت فشاری نمونه‌های بدون سیمان از ۱۹ به ۲۴ (۲۶ درصد افزایش) و سپس به ۲۹ مگاپاسکال (۵۳ درصد افزایش)، نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد سیمان از ۱۸/۵ به ۲۳ (۲۴ درصد افزایش) و سپس به ۲۵ مگاپاسکال (۳۵ درصد افزایش) و نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد سیمان از ۱۶ به ۲۰ (۲۵ درصد افزایش) و سپس به ۲۴ مگاپاسکال (۵۰ درصد افزایش) بهبود یافت. این نتایج به وضوح نشان دهنده تأثیر مثبت افزودن الیاف پلی‌الفین بر بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها است.

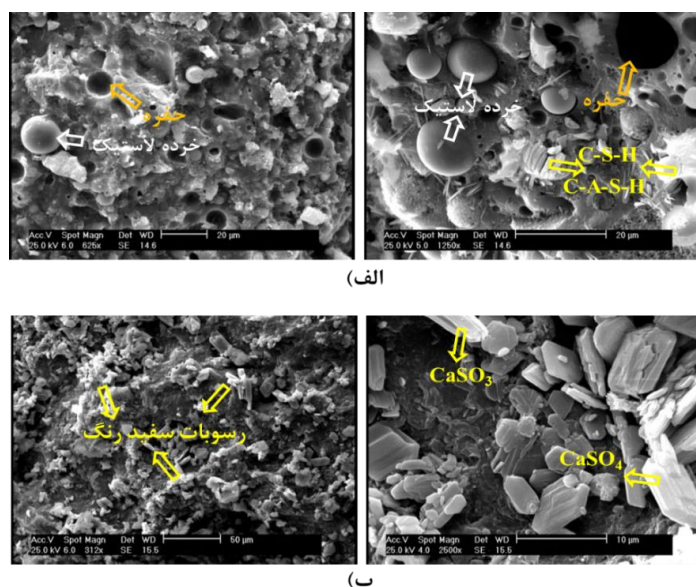
در پژوهش‌های پیشین گزارش شده است که مواد قلیایی به واسطه برخورداری از پیوندهای قوی Si-O-Al، در مقایسه با بتن‌های معمولی مبتنی بر سیمان پرتلند، عملکرد بهتری در برابر حملات اسیدی، به ویژه اسید سولفوریک، از خود نشان می‌دهند [31,49]. در این تحقیق، بررسی نمونه‌های بتن قلیا فعال شده حاوی خرده لاستیک و الیاف در محیط خورنده اسیدی حاکی از آن است که افت مقاومت فشاری نمونه‌های بدون الیاف

S-H و تشکیل ترکیبات ثانویه نظیر سولفات کلسیم (CaSO_4) و کربنات کلسیم (CaCO_3) شده‌اند که در نتیجه آن، مقاومت فشاری کاهش بیشتری یافته و آسیب‌پذیری ساختاری بتن افزایش یافته است.

شکل (۱۲) که تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای بتن طرح ۱ و ۷ که در به مدت ۱۲۰ ریز در معرض اسید قرار گرفته است نیز این روند را به خوبی تأیید می‌کند. در نمونه حاوی ۲۰ درصد سیمان (نمونه ۷)، تشکیل لایه‌های ضخیم گچ (CaSO_4) و رسوبات سفیدرنگی از ایندریت و کلسیت به وضوح قابل مشاهده است. این لایه‌های گچی، به دلیل حجیم شدن در حین تشکیل، موجب افزایش تنش‌های داخلی در ساختار ماتریس بتن می‌شوند 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 دادند و تنها مقدار بسیار اندکی از رسوبات گچی و کربنات‌ها در ریزساختار آن مشاهده شد. این مشاهدات تأکید می‌کنند که گرچه افزودن مقدار کمی سیمان می‌تواند تا حدودی موجب بهبود ساختار و انسداد میکروتورها شود، اما افزایش بیش از حد آن منجر به تشکیل فازهای آسیب‌پذیر در برابر محیط‌های اسیدی و در نتیجه تضعیف خواص مکانیکی بتن می‌گردد.

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 به شدت 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.

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 قلیافعال شده 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-



شکل ۱۲ تصاویر SEM بتن قلیافعال شده در معرض اسید به مدت ۱۲۰ روز: (الف) طرح ۱ (بدون سیمان) و (ب) طرح ۷ (۲۰٪ سیمان، ۸۰٪ سرباره)

سرباره به همراه ۱ درصد حجمی الیاف می باشد.

۴. تصاویر SEM تأیید کننده تأثیر تقویت کننده و مثبت الیاف در ماتریکس قلیافعال شده است و نشان دهنده افزایش نیروی چسبندگی بین فیبر و ماتریکس بتن می باشد.

در شرایط محیطی اسیدی

۱. با افزایش درصد الیاف پلی الفین از صفر به ۱ درصد حجمی در بتن قلیافعال شده حاوی خرده لاستیک هم در مقاومت کششی و فشاری در شرایط محیطی و هم در حالت اسیدی افزایش مقاومت قابل توجه است. طوری که افزایش الیاف پلی الفین 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 می دهد؛ و مقاومت فشاری در محیط را در حالت بدون سیمان ۲۱ درصد، در حالت ۱۰ درصد سیمان ۱۹ درصد و در حالت پس از ۱۲۰ روز قرار دادن در محیط اسیدی در وضعیت بدون سیمان ۵۲ درصد و ۱۰ درصد سیمان جایگزین ۳۵ درصد در وضعیت ۲۰ درصد جایگزین ۵۰ درصد افزایش می دهد.

۲. افزایش درصد سیمان پرتلند در بتن قلیافعال شده منجر به فرسایش بیشتر نمونه ها در معرض اسیدسولفوریک شده است که این موضوع از طریق کاهش وزن نمونه ها مشاهده می گردد. علت اصلی این فرسایش بیشتر، واکنش کلسیم اضافی موجود در سیمان پرتلند با اسیدسولفوریک و تشکیل ترکیبات هیدراته مثل سنگ گچ است. بررسی نتایج حاصل از آزمایش ها در زمان ۱۲۰ روز نشان می دهد 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.

۳. با افزایش درصد سیمان پرتلند، فرسایش بالا به صورت کاهش وزن برای نمونه های در مجاورت اسیدسولفوریک مشاهده شد که دلیل آن واکنش کلسیم اضافی با اسیدسولفوریک و تشکیل سنگ گچ است و در زمان ۱۲۰ روز در اسید، کاهش وزن از ۵/۹ درصد در حالت بدون سیمان به ۷/۶ درصد در حالت ۱۰

در راستای پیشرفت تحقیقات در زمینه بتن های قلیافعال شده، پیشنهاد می شود 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 نانوپوزولان ها بر ویژگی های مکانیکی و دوام بتن ها مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این، ارزیابی تأثیر ترکیب های مختلف الیاف و پوزولان ها بر مقاومت و دوام بتن در محیط های اسیدی و خورنده، به ویژه در شرایط با غلظت های مختلف اسید و مدت زمان تماس، می تواند به درک بهتری از رفتار بتن های قلیافعال شده در این محیط ها کمک کند.

نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر جایگزینی سیمان پرتلند به جای سرباره و همچنین افزودن الیاف پلی الفین بر بتن قلیافعال 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:

در شرایط محیطی عادی

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

۲. جایگزین کردن سیمان پرتلند با سرباره تا ۲۰ درصد در بتن قلیافعال شده فاقد الیاف در شرایط محیط، مقاومت فشاری را از ۳۵/۳ مگاپاسکال در حالت بدون سیمان به ۴۲/۷ مگاپاسکال در حالت جایگزینی ۲۰ درصد سیمان افزایش داده است که نشان دهنده حدود ۶ درصد افزایش مقاومت است.

۳. بیشترین مقاومت فشاری و کششی در شرایط محیطی عادی برای بتن قلیافعال شده حاوی ۱۰ خرده لاستیک و الیاف پلی-الفین ۴۴/۶ مگاپاسکال فشاری و ۴/۸۷ مگاپاسکال کششی بوده است که مربوط به حالت ۲۰ درصد سیمان جایگزین

درصد سیمان جایگزین سرباره می‌رسد و بیشترین فرسایش ۹/۶ درصد برای ۲۰ درصد سیمان جایگزین مشاهده شد.

۴. در محیط اسیدسولفوریک، افزایش محتوای سیمان پرتلند به عنوان جایگزین سرباره در بتن قلیافعال 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 مگاپاسکال به ۱۸/۵ مگاپاسکال). با این حال، افزایش محتوای سیمان به ۲۰ درصد منجر به کاهش قابل توجه مقاومت فشاری شد، به طوری که این مقدار به ۱۶ مگاپاسکال 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 به طور قابل توجهی از عملکرد بتن در برابر حملات شیمیایی بکاهد.

۵. در شرایط مجاورت اسیدسولفوریک بیشترین مقاومت فشاری مربوط به حالت بتن بدون سیمان با ۱ درصد الیاف پلی‌الفین است که مقدار آن ۲۹ مگاپاسکال می‌باشد و کمترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه فاقد الیاف و حاوی ۲۰ درصد سیمان

جایگزین است که مقدار آن ۱۶ مگاپاسکال می‌باشد.

۶. در شرایط محیطی، بیشترین مقاومت فشاری و کششی بتن قلیافعال شده حاوی خرده لاستیک و الیاف پلی‌الفین (۱٪) به ترتیب ۴۴/۶ مگاپاسکال و ۴/۸۷ مگاپاسکال 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 با مقدار ۲۹ مگاپاسکال است.

۷. در شرایط محیط اسیدی، هر چند بتن قلیافعال 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.

سپاسگزاری

- [1] A. Parande et al., "Environmental effects on concrete using ordinary and pozzolana Portland cement," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 1, pp. 288–297, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.027>
- [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. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.212>
- [3] R. Allahvirdizadeh, R. Rashetnia, A. Dousti, and M. Shekarchi, "Application of polymer concrete in repair of concrete structures: A literature review," in *Concrete Solutions*, 2011, pp. 435–444.
- [4] H. U. Ahmed, A. A. Mohammed, S. Rafiq, A. S. Mohammed, A. Mosavi, N. H. Sor, and S. M. Qaidi, "Compressive strength of sustainable geopolymer concrete composites: A state-of-the-art review," *Sustainability*, vol. 13, no. 24, p. 13502, 2021. <https://doi.org/10.3390/su132413502>
- [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. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00976>
- [6] Achak, H., 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*, 2023. 392: p. 131890. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131890>
- [7] K. Behfarnia and M. Rostami, "The effect of alkaline solution - to - slag ratio on permeability of alkali - activated slag concrete," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 16, no. 8, pp. 897–904, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0234-3>
- [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*, vol. 35, no. 3, 2022.
- [9] S. Pilehvar, V. D. Cao, A. M. Szczotok, M. Carmona, L. Valentini, M. Lanzón, R. Pamies, and A. L. Kjøniksen, "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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.016>
- [10] Z. Tang et al., "Investigation on dynamic mechanical properties of fly ash/slag-based geopolymeric recycled aggregate concrete," *Composites Part B: Engineering*, vol. 185, p. 107776, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107776>
- [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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127786>
- [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. <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.4.345>
- [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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130919>
- [14] M. Sienkiewicz et al., "Progress in used tyres management in the European Union: A review," *Waste Management*, vol. 32, no. 10, pp. 1742–1751, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.010>
- [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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123742>
- [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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.054>
- [17] A. Rezapour and S. E. Seyedihosseini Nia, "A Study on the Effect of Shredded Tire Size on the Mechanical Behavior of Sand and Shredded Tire Mixtures Using Direct Shear Test," *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 29, no. 1, pp. 17–36, 2017. <https://doi.org/10.22067/civil.v29i1.41679>
- [18] A. Zadeh et al., "Behavior of Clayey Soils Mixed with Tire Chips," *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 26, no. 2, pp. 117–130, 2015. <https://doi.org/10.22067/civil.v26i2.21991>

- [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.
- [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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139133>
- [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. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.12.004>
- [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. <https://doi.org/10.22067/jfcei.2025.88923.1312>
- [23] M. G. Azandariani et al., "Mechanical properties of polyolefin and polypropylene fibers-reinforced concrete – An experimental study," *Composites Part C: Open Access*, vol. 12, p. 100410, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100410>
- [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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120610>
- [25] M. G. Azandariani et al., "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. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100533>
- [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. <https://doi.org/10.22067/jfcei.2024.79313.1185>
- [27] I. Shafiq, M. Azreen, and M. W. Hussin, "Sulphuric acid resistant of self-compacted geopolymer concrete containing slag and ceramic waste," in *MATEC Web of Conferences*, vol. 97, p. 01102, 2017. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701102>
- [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. <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00425-2>
- [29] W. Yang et al., "Resistance to sulfuric acid corrosion of geopolymer concrete based on different binding materials and alkali concentrations," *Materials*, vol. 14, no. 23, p. 7109, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14237109>
- [30] S. H. Mohammadi, M. V. Pour, and F. Pargar, "Effect of Silica Fume, Metakaolin, Zeolite and Polypropylene Fiber on Chloride Diffusion in Concrete," *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 83–96, 2025. <https://doi.org/10.22067/civil.v22i1.9036>

- [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. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00515-5>
- [32] T. A. Aiken et al., "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. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.011>
- [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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.077>
- [34] 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120126>
- [35] D. Hardjito, S. Wallah, and B. Rangan, "Research into engineering properties of geopolymer concrete," in *Proceeding International Conference Geopolymer 2002 – Turn Potential into Profit*, Melbourne, Australia, Oct. 2002.
- [36] 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. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.07.005>
- [37] 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.043>
- [38] S. C. Moghaddam et al., "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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122571>
- [39] 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133233>
- [40] F. Z. Hossain et al., "Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing crumb rubber and polypropylene fiber," *Construction and Building Materials*, vol. 225, pp. 983–996, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.245>
- [41] R. Assaggaf et al., "Properties and sustainability of treated crumb rubber concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 51, p. 104250, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104250>
- [42] 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.
- [43] 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. <https://doi.org/10.1177/0361198105191400102>
- [44] N. M. Noor et al., "Effect of crumb rubber on concrete strength and chloride ion penetration resistance," *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, vol. 77, no. 32, 2015. <https://doi.org/10.11113/jt.v77.7004>

- [45] A. Allahverdi and F. Skvara, "Sulfuric acid attack on hardened paste of geopolymer cements – Part 1: Mechanism of corrosion at relatively high concentrations," *Ceramics Silikáty*, vol. 49, no. 4, p. 225, 2005.
- [46] 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 Silikáty*, vol. 50, no. 1, p. 1, 2006.
- [47] X. Song et al., "Response of geopolymer concrete to sulphuric acid attack," in *Proceeding World Congress Geopolymer*, 2005.
- [48] J. Davidovits, "High-alkali cements for 21st century concretes," *Special Publication*, vol. 144, pp. 383–398, 1994.
<https://doi.org/10.14359/4523>
- [49] J. Gourley and G. Johnson, "Developments in geopolymer precast concrete," in *Proceeding World Congress Geopolymer*, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France, 2005.
- [50] 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.