



The effect of slag addition on the fracture characteristics of geopolymer concrete

Mohammad Reza Abbasi Zargaleh ¹

¹ Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 2025.06.05

Revised: 2025.10.05

Accepted: 2026.04.21

Keyword:

Geopolymer concrete
Lightweight
fracture parameters
high-temperature curing
fly ash
slag

*Corresponding Author:

Mohammad Reza Abbasi
Zargaleh

Email: m_rezaabbasi@tvu.ac.ir

ABSTRACT

This study investigates the effect of replacing fly ash with ground granulated blast furnace slag (GGBFS) in lightweight geopolymer concrete. Given that geopolymer concrete eliminates the use of Portland cement, thereby contributing to reduced cement consumption and mitigating its negative environmental impacts, this topic holds particular significance. In this research, lightweight expanded clay aggregate was employed as coarse aggregate, and the activator-to-binder ratio (Al/Bi) was set at 0.5. The specimens included cubes for compressive strength, cylinders for tensile strength and elastic modulus, and notched beams for fracture testing. Curing was performed at 80 °C for 24 hours. The results revealed that a 20% slag replacement led to a 16% increase in compressive strength compared to the control specimen. Furthermore, fracture energy and fracture toughness reached their maximum at 30% slag replacement, with an improvement of approximately 63% relative to the slag-free specimen. However, further replacement levels of 40% and 50% resulted in a decline in these properties. The findings indicate that a slag replacement range of 20–30% provides the optimum balance for enhancing both the mechanical performance and fracture behavior of geopolymer concrete. These results underscore the substantial importance of such mixtures in advancing sustainable construction materials and reducing Portland cement consumption.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The production of ordinary Portland cement (OPC) is associated with high energy consumption and considerable carbon dioxide emissions, making the development of environmentally sustainable construction materials an important research priority. Fly ash-based geopolymer concrete (GPC) has emerged as a promising alternative because it utilizes industrial by-products and exhibits excellent durability and mechanical performance. Nevertheless, the fracture behavior of lightweight geopolymer concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) has not yet been sufficiently investigated, particularly regarding the relationship between slag replacement, fracture parameters, and microstructural evolution. Since fracture properties govern crack initiation and propagation in structural concrete, understanding these mechanisms is essential for the safe design of geopolymer concrete structures. Therefore, this study aims to evaluate the influence of different GGBFS replacement levels on the mechanical properties, fracture behavior, and microstructure of lightweight Class C fly ash-based geopolymer concrete.

Methodology

Lightweight geopolymer concrete mixtures were prepared using Class C fly ash as the primary aluminosilicate precursor while partially replacing it with different percentages of GGBFS. Expanded lightweight aggregate (LECA) was used as the coarse aggregate, and alkaline activation was achieved using sodium hydroxide and sodium silicate solutions under controlled curing conditions. Compressive strength and splitting tensile strength tests were performed to evaluate the mechanical behavior of the mixtures. Fracture parameters, including fracture energy (G_f), fracture toughness (K_{IC}), and characteristic length (C_f), were determined using the Size Effect Method (SEM). Furthermore, scanning electron microscopy (SEM) was employed to investigate the microstructural characteristics of the geopolymer matrix and to explain the fracture mechanisms associated with different slag replacement levels.

Results and discussion

The experimental results demonstrated that partial replacement of fly ash with GGBFS significantly enhanced both the mechanical and fracture performance of lightweight geopolymer concrete. Increasing the slag content up to an optimum level produced a denser geopolymer matrix, improved interfacial bonding, reduced internal porosity, and increased compressive strength, tensile strength, fracture energy, and fracture toughness. Microstructural observations confirmed the formation of a more compact reaction product due to the higher calcium content contributed by GGBFS, resulting in improved resistance to crack initiation and propagation. However, excessive slag replacement reduced fracture performance because of microcracking associated with rapid reaction kinetics and excessive calcium-rich phases. The combined mechanical and microscopic analyses demonstrated a strong correlation between microstructural refinement and fracture resistance.

Conclusion

The findings confirm that controlled partial replacement of Class C fly ash with GGBFS is an effective strategy for improving the fracture behavior of lightweight geopolymer concrete while preserving the environmental advantages of geopolymer technology. The integration of fracture mechanics with microstructural characterization provides a comprehensive understanding of the mechanisms governing crack resistance and structural performance. The proposed approach offers practical guidance for designing

durable and sustainable lightweight geopolymer concretes for structural applications and contributes to the broader development of low-carbon construction materials.



اثر افزودن سرباره بر مشخصات شکست بتن ژئوپلیمری

محمد رضا عباسی زرگله^۱

۱- گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵	
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱	
کلید واژگان: بتن ژئوپلیمری سبکوزن پارامترهای شکست عمل آوری در دمای بالا خاکستر بادی سرباره	این پژوهش به بررسی اثر جایگزینی خاکستر بادی با سرباره کوره بلند دانه‌بندی‌شده در بتن ژئوپلیمری سبکوزن پرداخته است. از آنجاکه بتن ژئوپلیمری با حذف سیمان به کاهش مصرف سیمان پرتلند و همچنین کاهش پیمادهای منفی زیست‌محیطی آن کمک می‌کند، این موضوع بسیار مهم است. در این پژوهش، از سنگ‌دانه رس منبسط شده سبکوزن به عنوان سنگ‌دانه درشت استفاده شده و نسبت فعال‌کننده به چسب (Al/Bi) ۰٫۵ تعیین شده است. نمونه‌ها شامل مکعب‌های مقاومت فشاری، استوانه‌های مقاومت کششی و مدول الاستیسیته و تیرهای ناچ دار برای آزمایش شکست بودند. عمل آوری در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت انجام شد. نتایج نشان دادند که جایگزینی ۲۰٪ سرباره موجب افزایش ۱۶٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد گردید. همچنین، انرژی شکست و چقرمگی شکست در ۳۰٪ سرباره به بیشینه مقدار خود رسیدند (بهبود حدود ۶۳٪ نسبت به نمونه بدون سرباره). با افزایش جایگزینی به ۴۰ و ۵۰٪، کاهش در این خواص مشاهده شد. یافته‌ها نشان می‌دهند که محدوده ۲۰ تا ۳۰٪ سرباره بهینه‌ترین ترکیب برای بهبود عملکرد مکانیکی و شکست بتن ژئوپلیمری است. این نتایج اهمیت قابل توجهی در توسعه مصالح پایدار و کاهش مصرف سیمان پرتلند دارند.
نویسنده مسئول: محمد رضا عباسی زرگله پست الکترونیکی: m_rezaabbasi@tvu.ac.ir	



مقدمه

بتن ژئوپلیمری ۱ (GPC) به عنوان یک جایگزین پایدار و امیدوارکننده برای بتن سیمان پرتلند سنتی (PCC) ظهور کرده است. این نوع بتن با استفاده از محصولات جانبی صنعتی و مواد طبیعی تولید می‌شود و مزایای زیست‌محیطی و مهندسی قابل توجهی را ارائه می‌دهد [۱]. تولید سیمان پرتلند انرژی بر است و به انتشار قابل توجه گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند. در مقابل، تولید بتن ژئوپلیمری به طور چشمگیری مصرف انرژی و انتشار دی اکسید کربن را کاهش می‌دهد و در نتیجه اثرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد. بتن ژئوپلیمری با استفاده از مواد زائد صنعتی مانند خاکستر بادی (FA) و سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده (GGBFS)، به کاهش ضایعات و صرفه‌جویی در هزینه کمک می‌کند [۲؛ ۳]. علاوه بر این، دوام بالاتری از خود نشان می‌دهد و مقاومت بالایی در برابر دماهای بالا، رطوبت، حمله شیمیایی و سایش دارد که عمر مفید سازه‌ها را افزایش می‌دهد. بتن ژئوپلیمری همچنین در مقایسه با PCC زمان گیرش سریعتری دارد و فرایندهای ساخت و ساز را تسریع می‌کند. در بسیاری از موارد، بتن ژئوپلیمری مقاومت فشاری و کششی بالاتری نشان می‌دهد. اجزای اصلی بتن ژئوپلیمری شامل منابع آلومینو سیلیکاتی مانند خاکستر بادی، سرباره و خاکستر پوسته برنج است که با فعال‌کننده‌های قلیایی مانند هیدروکسید سدیم یا هیدروکسید پتاسیم ترکیب می‌شوند. فعال‌کننده قلیایی با منبع آلومینو سیلیکاتی واکنش داده و یک ژل آلومینو سیلیکاتی سه بعدی تشکیل می‌دهد که ذرات سنگ‌دانه را به هم متصل می‌کند.

بتن ژئوپلیمری به دلیل خواص منحصر به فرد خود، در زمینه‌های مهندسی مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آن در ساخت دیوارها، کف‌ها، ستون‌ها، پل‌ها، مخازن ذخیره سازی، لوله‌ها و سازه‌های دریایی استفاده می‌شود. بتن ژئوپلیمری با مزایای متعدد خود، آماده تبدیل شدن به یک مصالح ساختمانی رایج است. تلاش‌های مداوم تحقیق و توسعه بر بهینه‌سازی بیشتر خواص آن و گسترش دامنه کاربردهای آن متمرکز است. پیش‌بینی می‌شود که پیشرفت‌های آتی در فناوری ژئوپلیمر، موادی با عملکرد و تطبیق‌پذیری بهبود یافته تولید کند.

این مطالعه بررسی می‌کند که چگونه می‌توان از سرباره به عنوان جایگزین جزئی خاکستر بادی در بتن ژئوپلیمری استفاده کرد و چه تأثیری بر رفتار شکست این ماده دارد. خاکستر بادی یک منبع رایج آلومینو سیلیکات در تولید ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر بادی است و نقش مهمی در تعیین خواص مکانیکی و دوام ژئوپلیمرها ایفا می‌کند. با این حال، در برخی مناطق، ممکن است دسترسی به خاکستر بادی با کیفیت بالا به میزان کافی محدود باشد؛ بنابراین، بررسی استفاده از سرباره به عنوان یک جایگزین مناسب برای خاکستر بادی می‌تواند کاربرد بتن ژئوپلیمری را گسترش دهد.

درک رفتار شکست بتن ژئوپلیمری (GPC) برای استفاده ایمن و مؤثر آن در کاربردهای ساختاری مختلف ضروری است. مکانیک شکست، جنبه‌ای کلیدی در علم مواد، نحوه انتشار ترک‌ها در داخل مواد، از جمله بتن را بررسی می‌کند. با توجه به استفاده گسترده از بتن در ساخت و ساز، درک پارامترهای مکانیک شکست این ماده برای پیش‌بینی دقیق نحوه پاسخ آن به تنش‌های اعمال شده و بهینه‌سازی عملکرد آن بسیار مهم است. پارامترهای شکست، معیارهای کمی مقاومت یک ماده در برابر انتشار ترک را ارائه می‌دهند. برای بتن ژئوپلیمری، درک جامع مکانیک شکست برای پیش‌بینی و بهبود عملکرد ساختاری آن حیاتی است. این اصول به‌ویژه در پروژه‌های زیربنایی، سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، ساخت و سازه‌های دریایی و صنعتی و در بازسازی سازه‌های موجود اهمیت دارند؛ بنابراین، توجه دقیق به مکانیک

^۱ Geopolymer concrete^۲ Fly ash^۳ Ground Granulated Blast Furnace Slag

شکست و تعیین پارامترهای شکست برای بتن ژئوپلیمری برای ادغام موفقیت آمیز آن در صنعت ساخت و ساز ضروری است.

این تحقیق امکان سنجی استفاده از سرباره را به عنوان جایگزین جزئی برای خاکستر بادی در تولید بتن ژئوپلیمری بررسی می کند و تأثیر آن را بر رفتار شکست این ماده ارزیابی می نماید. خاکستر بادی، به عنوان منبع اصلی آلومینوسیلیکات ها در سنتز ژئوپلیمر، نقش اساسی در تعیین خواص مکانیکی و دوام این مواد ایفا می کند. با این حال، در برخی مناطق، دسترسی به خاکستر بادی با کیفیت مطلوب و به مقدار کافی ممکن است محدود باشد؛ بنابراین، بررسی پتانسیل سرباره به عنوان یک جایگزین مناسب می تواند نه تنها به گسترش کاربردهای بتن ژئوپلیمری کمک کرده و راه حلی برای چالش های مرتبط با تأمین خاکستر بادی ارائه دهد، بلکه با توجه به قیمت رقابتی سرباره در مقایسه با خاکستر بادی، می تواند توجه اقتصادی دیگری برای جایگزینی آن باشد. این مطالعه، با هدف درک عمیق تر از خواص این کامپوزیت ها، می تواند افق های جدیدی را در صنعت ساخت و ساز بگشاید.

پیشینه پژوهش

مطالعات اخیر نشان داده اند که جایگزینی بخشی از خاکستر بادی با سرباره کوره آهن گدازی (GGBFS) می تواند نقش قابل توجهی در بهبود خواص مکانیکی و رفتار شکست بتن ژئوپلیمری داشته باشد. بررسی های انجام شده توسط Mohyeddin و همکاران [۴] بر روی نمونه های عمل آوری شده در دمای محیط نشان داد که افزایش سهم سرباره تا حدود مشخصی منجر به افزایش انرژی شکست و بهبود تافنس می شود. در پژوهشی دیگر، Zhao و همکاران [۵] با استفاده از مدل سازی و بهینه سازی پارامترها به این نتیجه رسیدند که انتخاب درصد مناسب سرباره می تواند پیش بینی پذیری بهتری برای مقاومت و رفتار شکست فراهم آورد. همچنین Bazarkhankyzy و همکاران [۶] با بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی، اثر ترکیب چندماده ای بر رفتار بتن ژئوپلیمری را تحلیل کردند و ارتباط مستقیمی میان ریزساختار و مقاومت ضربه ای گزارش نمودند. مطالعات دیگر نیز به بررسی ترکیبات متفاوت سرباره و خاکستر بادی پرداخته اند و همگی بر اهمیت کنترل شرایط عمل آوری و نسبت فعال سازها در کنار درصد جایگزینی سرباره تأکید دارند [۷؛ ۸]. نتایج این تحقیقات نشان می دهد که طراحی بهینه ترکیبات می تواند مسیر مناسبی برای توسعه بتن های ژئوپلیمری با خواص شکست بهبود یافته فراهم کند. کیو و ژائو [۹] گزارش کردند که افزایش نسبت سرباره به خاکستر بادی، مقاومت را افزایش داده و به دلیل افزایش محتوای کلسیم، یک ماتریس همگن تر ایجاد می کند. داس و همکاران [۱۰] نشان دادند که افزودن سرباره مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی را بهبود می بخشد. پوئرتا و همکاران [۱۱] واکنش تقریباً کامل سرباره را در این سیستم ها مشاهده کردند که با افزایش مقاومت فشاری همبستگی داشت. با این حال، لینگ و وانگ [۱۲] دریافتند که تجاوز از ۵۰ درصد محتوای سرباره می تواند منجر به کاهش مقاومت شود. این کاهش به توسعه ریز ترک ها ناشی از کلسیم اضافی و انبساط و ترک خوردگی ناشی از تشکیل Ca(OH)_2 نسبت داده شد [۱۳]. علاوه بر این، ساسوی و همکاران [۱۴] نشان دادند که افزودن خاکستر بادی کلاس C به بتن ژئوپلیمری مبتنی بر سرباره، مقاومت فشاری را کاهش داده و زمان گیرش را افزایش می دهد. نات و همکاران [۱۵] نشان دادند که افزایش درصد جایگزینی سرباره در بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی از ۰٪ به ۱۵٪، مقاومت فشاری، انرژی شکست (Gf) و چقرمگی شکست را افزایش می دهد. گتو و همکاران دریافتند که با افزایش مقاومت، انرژی شکست و چقرمگی شکست بتن نیز افزایش می یابد. بهاراتکومار و همکاران [۱۶] نشان دادند که به دلیل افزودن خاکستر بادی یا سرباره، کاهش در انرژی شکست وجود دارد. میدون و همکاران [۱۷] و سارکر و همکاران [۱۸] نشان دادند که Gf با افزایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی افزایش می یابد. راوی و همکاران [۱۹] نشان دادند که انرژی شکست با افزایش نسبت جایگزینی خاکستر بادی با سرباره در بتن SCGC افزایش می یابد. محر [۲۰] به بررسی امکان جایگزینی پودر ماسه سیلیسی پسماند کارخانه سنبلاست با سیمان در بتن پرداخت. نتایج حاصل از این مطالعه

نشان داد که با جایگزینی ۵ درصد سیمان با پودر ماسه سیلیسی (در طرح اختلاط با عیار سیمان ۴۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب)، می‌توان به افزایش ۱۰ درصدی مقاومت فشاری دست یافت. سلیم بهرامی و همکاران [۲۱] پارامترهای مکانیکی و اقتصادی استفاده از بتن بازیافتی به عنوان بتن جداول بتنی شهری بررسی کردند. نتایج نشان داد که بتن بازیافتی و بتن الیافی بازیافتی با طرح اختلاط پیشنهادی، مقاومت فشاری بالتری دارد. حسنی و همکاران [۲۲] رفتار فشاری و دوام بتن سبز حاوی سنگ دانه های ضایعاتی (ضایعات سنگ ساب) جایگزین درشت دانه و پودر سنگ مرمر جایگزین سیمان را ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که سنگ دانه های ضایعاتی جایگزین شن، تأثیر منفی و پودر سنگ مرمر جایگزین سیمان، تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری بتن دارد.

هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی تأثیر سطوح مختلف جایگزینی سرباره بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، انرژی شکست، طول ناحیه فرایند و چقرمگی شکست بتن ژئوپلیمری سبک وزن مبتنی بر خاکستر بادی کلاس C است. علاوه بر این، تغییرات ریز ساختمانی ناشی از مقادیر مختلف سرباره از طریق تجزیه و تحلیل میکروسکوپی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. تمرکز این مقاله بر رفتار شکست بتن ژئوپلیمری است. خواص شکست بتن به شدت به نوع مواد و طرح اختلاط آن بستگی دارد [۲۳-۲۵]. ایجاد و گسترش ترک‌ها مسائل مهمی در ساخت سازه‌های بتنی هستند. با توجه به توسعه روزافزون استفاده از سازه‌های بتنی، بررسی نحوه ایجاد و گسترش ترک‌ها در این سازه‌ها بسیار مهم است. مکانیک شکست، که رفتار بتن در حضور ریزترک‌ها را مشخص می‌کند، تأیید شده است که یک روش ایمن و قابل اعتماد برای طراحی سازه‌ای ارائه می‌دهد [۲۶؛ ۲۷]. مطالعات نشان می‌دهند که خاکستر پسته برنج و پودر مرمر می‌توانند تا حدود ۲۰٪ جایگزین سیمان شوند و خواص مکانیکی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند [28]. همچنین، ترکیب مختلفی از پودر مرمر، شیشه، و RHA در ژئوپلیمرها به‌عنوان جایگزین ماسه مورد بررسی قرار گرفته که منجر به بهبود مقاومت فشاری و دوام شده‌اند [29]. در ملات‌های ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی، حضور ۵٪ پودر مرمر موجب افزایش تراکم و مقاومت فشاری تا حدود ۴۰٪ گردید [30]. به‌این ترتیب، سرباره در مقام مقایسه می‌تواند از نظر دسترس‌پذیری، هزینه و عملکرد، یک جایگزین مؤثر و عملی به‌عنوان مکمل در بتن ژئوپلیمری باشد.

تمایز این پژوهش در سه نکته کلیدی است: (۱) بررسی رفتار شکست بتن ژئوپلیمری سبک‌وزن مبتنی بر خاکستر بادی کلاس C که مطالعات ناکافی‌ای پیرامون پارامترهای شکست آن وجود دارد؛ (۲) کاربرد سیستماتیک روش اثر - اندازه برای تعیین G_f ، C_f و KIC در یک بازهٔ گستردهٔ جایگزینی سرباره (۰-۵۰٪)؛ و (۳) اتصال‌دهی نتایج مکانیکی به شواهد میکرو ساختاری (SEM) برای تبیین مکانیسم‌های شکست مرتبط با درصد سرباره. این ترکیب روشی و کاربردی برای طراحی مخلوط‌های ژئوپلیمری سبک‌وزن و بهینه‌سازی خواص شکست آن‌ها نوآورانه است.

روش‌شناسی

روش اثر اندازه^۱ (SEM)

روش اثر اندازه (SEM) توسط بازانت و کاظمی [۳۱] توسعه داده شده است. همچنین در توصیه‌های RILEM [32] به عنوان یک روش دقیق و مطلوب پیشنهاد شده است. روش اثر اندازه، پارامترهای شکست را مستقل از اندازه و شکل نمونه‌ها ارائه می‌دهد و ویژگی‌های ذاتی بتن را نشان می‌دهد. بر اساس قانون اثر اندازه، معادله (۱) یک رابطه غیرخطی بین تنش اسمی شکست (σ_N) و ابعاد نمونه‌های تیر مشابه هندسی را نشان می‌دهد:

^۱ Size Effect Method

$$\sigma_N = \frac{B f_t}{\sqrt{1 + \beta}} \quad (۱)$$

در این معادله، B یک پارامتر آزمایشی و β عدد تردی، f_t مقاومت کششی است که توسط معادله (۲) تعیین می‌شود:

$$\beta = \frac{d}{d_0} \quad (۲)$$

در این معادله، d ارتفاع تیر و d_0 ثابت تجربی است که نشان‌دهنده اندازه مشخصه ناحیه فرآیند شکست است. عدد تردی (β) در سه محدوده مختلف تعریف می‌شود. برای $\beta < 0.1$ ، مقاومت اسمی مقدار ثابتی دارد و معیار مقاومت باید اعمال شود. در این محدوده، بتن رفتار شکل‌پذیرتری نشان می‌دهد. برای $0.1 \leq \beta \leq 10$ ، مکانیک شکست غیرخطی رفتار بتن را تعیین می‌کند. در نهایت، برای $\beta > 10$ ، بتن از مکانیک شکست الاستیک خطی پیروی می‌کند. در این محدوده β ، بتن تردتر است.

در روش اثر اندازه، ویژگی‌های شکست به سادگی با حداکثر بارهای تعیین شده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای که بر روی تیرهای ناچ دار مشابه هندسی با اندازه‌های مختلف و نسبت‌های مساوی طول ناچ اولیه به عمق نمونه انجام می‌شود، محاسبه می‌شوند. این پارامترها با محاسبه شیب (A) و عرض از مبدأ (C) معادله رگرسیون خطی (۳) تعیین می‌شوند:

$$Y = AX + C \quad (۳)$$

که در آن:

$$X_i = d_i, Y_i = \left(\frac{b d_i}{P_i^0}\right)^2 \quad (۴)$$

در این معادلات، P_i^0 حداکثر بار تصحیح شده، d_i عمق و b عرض هر نمونه هستند. ضرایب B و d_0 را می‌توان از معادلات (۵) و (۶) تعیین کرد:

$$B = \frac{1}{\sqrt{C}} \quad (۵)$$

$$d_0 = \frac{C}{A} \quad (۶)$$

در روش اثر اندازه، پارامترهای اصلی شکست، از جمله انرژی شکست اولیه (G_f)، اندازه مؤثر ناحیه فرآیند (C_f) و چقرمگی شکست (KIC) را می‌توان به ترتیب با معادلات (۷)، (۸) و (۹) تعیین کرد:

$$G_f = \frac{g(\alpha_0)}{\frac{AE}{g'(\alpha_0)}} \times \frac{C}{A} \quad (7)$$

$$C_f = \frac{g(\alpha_0)}{g'(\alpha_0)} \times \frac{C}{A} \quad (8)$$

$$K_{IC} = \sqrt{E G_f} \quad (9)$$

در این روابط، نرخ آزادسازی انرژی بی بعد با $g(\alpha_0)$ و مشتق $g'(\alpha_0)$ با $g'(\alpha_0)$ نشان داده می شود و α_0 طول نسبی ترک اولیه ($\alpha_0 = a_0/d$) است. مقدار $g(\alpha_0)$ از معادله (۱۰) تعیین می شود:

$$g(\alpha) = \left(\frac{1}{d}\right)^2 \pi \alpha [1.5 F(\alpha)]^2 \quad (10)$$

$F(\alpha)$ تابع برون یابی کمکی است که برای $l/d=2.5$ از معادله (۱۱) به دست می آید:

$$F_{2.5}(\alpha) = \frac{1 - 2.5\alpha + 4.49\alpha^2 - 3.98\alpha^3 + 1.33\alpha^4}{(1 - \alpha)^{1.5}} \quad (11)$$

روش انجام آزمایش

مواد

خاکستر بادی یک ماده سیمانی است که به طور گسترده به عنوان مکمل در بتن استفاده می شود. این ماده به دو دسته کلاس F و کلاس C طبقه بندی می شود. خاکسترهای بادی کلاس F دارای حداقل محتوای ترکیبی دی اکسید سیلیکون، اکسید آلومینیوم و اکسید آهن ۷۰٪ هستند، در حالی که خاکسترهای بادی کلاس C حداقل محتوای ترکیبی این اکسیدها ۵۰٪ دارند [۳۳]. ترکیب شیمیایی خاص خاکستر بادی کلاس C مورد استفاده در این مطالعه از طریق آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) تعیین شد. نتایج این آنالیز در جدول ۱ ارائه شده است:

جدول ۱- مشخصات شیمیایی خاکستر بادی کلاس C

محتوای شیمیایی	میزان درصد	رواداری
SiO ₂	35	±1.50
Al ₂ O ₃	16	±1.20
Fe ₂ O ₃	1	±0.40
CaO	38	±1.50
MgO	8.5	±1.00
SO ₃	2.3	±0.30
K ₂ O	0.5	±0.10
Na ₂ O	0.4	±0.10

در این پژوهش، از محلول ۱۰ مولار هیدروکسید سدیم (NaOH) برای ساخت بتن ژئوپلیمری استفاده شد. نسبت SiO₂ به Na₂O برابر با ۲٫۳۳ بود. ترکیبی از محلول سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم با نسبت ۱٫۳۳ (Na₂SiO₃/NaOH) به عنوان محلول فعال کننده قلیایی مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق، از سنگدانه

رس منبسط شده سبکوزن ۱ با حداکثر اندازه ۱۲٫۵ میلی‌متر و وزن مخصوص ۶۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب برای تولید بتن ژئوپلیمری سبک وزن بر پایه خاکستر بادی کلاس C۱ استفاده شد. همچنین از سنگدانه‌های ریز با مدول نرمی ۲٫۸، تعیین شده طبق استاندارد [34] ASTM C136 استفاده شد.

در این مطالعه، عمل‌آوری در دمای °C ۸۰ به مدت ۲۴ ساعت انجام شد تا شرایط همگن و قابل‌مقایسه با مطالعات مرجعی برقرار شود. باید تأکید شود که پارامترهای عمل‌آوری (دما و زمان) نقش مهمی در توسعه ساختار ژل و خواص شکست دارند؛ مطالعات اخیر نشان داده‌اند که افزایش دما یا افزایش زمان عمل‌آوری می‌تواند منجر به افزایش مقاومت فشاری و پارامترهای شکست تا حدی گردد؛ بنابراین بررسی جامع‌تر اثرات دما و زمان عمل‌آوری برای آینده پژوهش پیشنهاد می‌شود.

نسبت‌های اختلاط

انتخاب بازه جایگزینی سرباره (۰ تا ۵۰٪) بر اساس مطالعات پیشین روی بتن ژئوپلیمری و با هدف شناسایی ترکیب بهینه صورت گرفت. طرح بدون سرباره (C1) به‌عنوان نمونه شاهد و سایر درصدها به‌عنوان ترکیبات مقایسه‌ای بررسی شدند. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است. تمام مخلوط‌ها نسبت ثابت فعال‌کننده به چسب 0.5 (Al/Bi) را حفظ کردند و از حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۱۲٫۵ میلی‌متر استفاده کردند.

جدول ۲- طرح اختلاط‌های مورد استفاده

نام طرح	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Al/Bi	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
درصد جایگزینی	0	10	20	30	40	50
خاکستر بادی (kg/m ³)	450	445	360	315	270	225
سرباره (kg/m ³)	0	45	90	135	180	225
Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³)	98	98	98	98	98	98
NaOH (kg/m ³)	127	127	127	127	127	127
ماسه (kg/m ³)	454	454	454	454	454	454
سنگدانه رس منبسط‌شده سبکوزن (kg/m ³)	472	472	472	472	472	472

تحلیل آماری داده‌ها

برای هر طرح اختلاط و در هر ابعاد نمونه، سه تیر تکراری آزمایش گردید. (n=3) مقادیر گزارش شده به‌صورت میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات (CV%) محاسبه شدند. به منظور ارزیابی معناداری تفاوت میان طرح‌ها در هر عمق، آزمون آماری ANOVA یک‌طرفه با سطح اطمینان ۹۵٪ انجام شد و در صورت معنادار بودن، از آزمون پست‌هوک Tukey HSD برای مقایسه‌های زوجی استفاده گردید.

تعیین پارامترهای شکست با استفاده از روش اثر اندازه SEM:

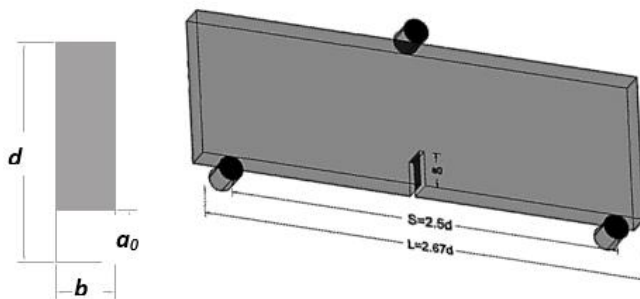
رفتار شکست هر طرح اختلاط با تهیه و آزمایش دوازده نمونه تیر ناچدار با اندازه‌های مختلف برای هر طرح اختلاط برای ارزیابی اثر اندازه انجام شد. نمونه‌های بزرگ تحت کنترل جابجایی با استفاده از دستگاه تست الکترو-سرو STM-150 آزمایش شدند، نمونه‌های کوچکتر با دستگاه STM-2 آزمایش شدند. طبق توصیه‌های [32] RILEM،

^۱ lightweight expanded clay aggregate

نرخ بارگذاری ثابتی اعمال شد تا شکست در حدود پنج دقیقه رخ دهد. ابعاد نمونه‌ها مطابق با دستورالعمل‌های [32] RILEM انتخاب شدند، همانطور که در جداول ۳ و شکل ۱ به تفصیل آمده است. پس از ۲۴ ساعت عمل‌آوری در قالب‌ها، تمام نمونه‌ها از قالب خارج شده و متعاقباً به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شدند. برای هر طرح اختلاط، سه نمونه مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری و شش نمونه استوانه‌ای ۱۵۰ × ۳۰۰ میلی‌متری برای تعیین خواص مکانیکی ریخته شدند. مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و مقاومت فشاری به ترتیب مطابق با [35] ASTM C469، [36] ASTM C496 و [37] BS EN 12390 اندازه‌گیری شدند.

جدول ۳: ابعاد نمونه برای آزمایش خمش سه نقطه‌ای در SEM

حداکثر اندازه سنگدانه	12.5	12.5	12.5	12.5
ارتفاع (mm) (<i>d</i>)	38.1	76.2	152.4	304.8
عرض (mm) (<i>b</i>)	38.1	38.1	38.1	38.1
<i>L/d</i>	2.67	2.67	2.67	2.67
<i>s/d</i>	2.5	2.5	2.5	2.5
<i>a0/d</i>	0.2	0.2	0.2	0.2



شکل ۱. نمونه آزمایش خمش سه نقطه‌ای.

نتایج و بحث

نتایج روش اثر اندازه (SEM)

جدول ۴ بارهای حداکثر اصلاح شده برای تمام نمونه‌های تیر شکافدار مورد استفاده در روش اثر اندازه را نشان می‌دهد. افزایش درصد جایگزینی خاکستر بادی با سرباره منجر به افزایش بار حداکثر می‌شود.

جدول ۴. حداکثر بارهای اصلاح شده

نام طرح	مقاومت فشاری (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	ارتفاع <i>d</i> (mm)	حداکثر بار اصلاح شده (P^0) (N)		
				تیر یک	تیر دو	تیر سه
C1	23.6	14.48	38.1	675	615	636
			76.2	1029	1018	1079
			152.4	1963	1851	1879
			304.8	3246	3285	3255
C2	24.3	14.78	38.1	687	654	678
			76.2	1277	1259	1249

			152.4	2180	2053	2085
			304.8	3726	3767	3784
C3	27.4	15.16	38.1	681	658	673
			76.2	1281	1311	1228
			152.4	2404	2360	2435
			304.8	3954	4008	3975
C4	25	14.95	38.1	773	747	763
			76.2	1453	1486	1393
			152.4	2726	2676	2761
			304.8	4640	4664	4622
C5	24.5	15.85	38.1	744	716	774
			76.2	1395	1380	1392
			152.4	2663	2555	2714
			304.8	4274	4328	4293
C6	23.3	14.35	38.1	745	710	787
			76.2	1363	1374	1379
			152.4	2656	2602	2627
			304.8	3971	4051	4017

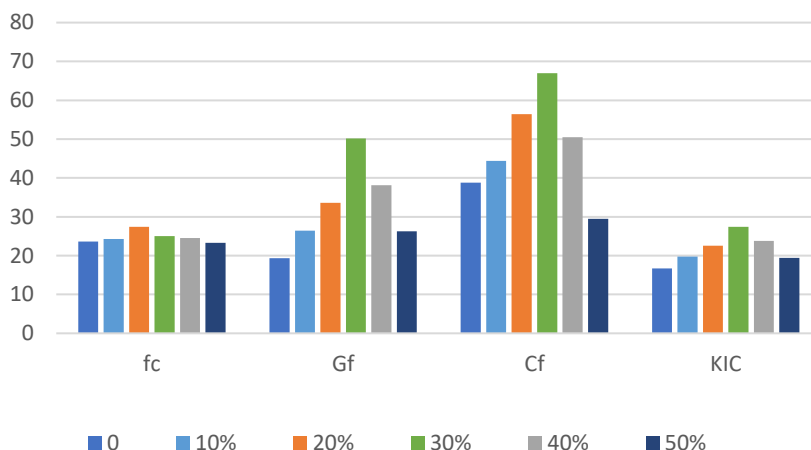
جدول ۵ پارامترهای شکست، شامل انرژی شکست اولیه (G_f)، اندازه مؤثر ناحیه فرآیند (C_f) و چقرمگی شکست (KIC) ارائه می‌دهد. دقت نتایج روش اثر اندازه در صورتی قابل قبول است که شاخص‌هایی شامل ضریب تغییرات شیب خط رگرسیون (ωA)، ضریب تغییرات عرض از مبدأ (ωC) و عرض نسبی نوار پراکندگی (m) به ترتیب از ۰،۱، ۰،۲ و ۰،۲ تجاوز نکنند [۳۲]. همانطور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده از روش اثر اندازه (SEM) نشان می‌دهد که افزایش سطح جایگزینی خاکستر بادی با سرباره تا ۳۰٪ (نمونه C_4) منجر به افزایش قابل توجهی در انرژی شکست (G_f) می‌شود که به مقدار ۵۰،۱۶ نیوتن بر متر می‌رسد. متعاقباً، با افزایش بیشتر در صد جایگزینی سرباره به ۵۰٪ (نمونه C_6)، کاهش در انرژی شکست به ۲۶،۲۶ نیوتن بر متر مشاهده می‌شود. به طور مشابه، طول منطقه فرآیند شکست (C_f) نیز با ۳۰٪ جایگزینی سرباره (نمونه C_4) به حداکثر مقدار خود یعنی ۶۶،۹۸ میلی‌متر می‌رسد که گسترش منطقه ریزترک در نوک ترک و در نتیجه، اتلاف انرژی بیشتر و بهبود مقاومت شکست را تأیید می‌کند. باین‌حال، افزایش بیشتر در محتوای سرباره باعث کاهش طول این منطقه به ۲۹،۴۷ میلی‌متر در نمونه C_6 می‌شود. از سوی دیگر، چقرمگی شکست (KIC) نیز با ۳۰٪ جایگزینی سرباره (نمونه C_4) به اوج خود یعنی ۲۷،۳۹ $MPa \cdot m^{0.5}$ می‌رسد که نشان‌دهنده بهبود در مقاومت ذاتی ماده در برابر انتشار ترک است. با این وجود، تجاوز از این حد منجر به کاهش چقرمگی شکست می‌شود که در نمونه C_6 به ۱۹،۴۱ $MPa \cdot m^{0.5}$ می‌رسد. به طور خلاصه، یافته‌های به دست آمده از روش اثر اندازه (SEM)، تأثیر مثبت جایگزینی جزئی خاکستر بادی با سرباره بر پارامترهای شکست بتن ژئوپلیمری را تأیید می‌کند. به طور خاص، بهترین عملکرد در رابطه با انرژی شکست، طول منطقه فرآیند شکست و چقرمگی شکست در محدوده ۳۰٪ جایگزینی سرباره (نمونه C_4) به دست می‌آید. اگرچه افزایش بیشتر در درصد جایگزینی سرباره منجر به کاهش این پارامترها می‌شود، اما مقادیر همچنان در سطحی بالاتر یا نزدیک به نمونه بدون سرباره (نمونه شاهد) حفظ می‌شوند. چقرمگی شکست بتن نیز با افزایش درصد جایگزینی سرباره افزایش یافت، که با یافته‌های نات و همکاران [۱۵] همخوانی دارد.

جدول ۵ - پارامترهای شکست SEM

نام طرح	C1	C2	C3	C4	C5	C6
$G_f (N/m)$	19.33	26.47	33.56	50.16	38.09	26.26
$C_f (mm)$	38.76	44.43	56.42	66.98	50.53	29.47

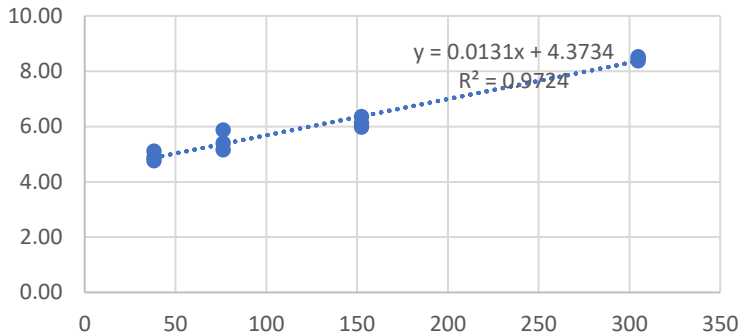
$K_{IC} (MPa \cdot mm^{0.5})$	16.73	19.78	22.56	27.39	23.78	19.41
ω_A	0.087	0.074	0.058	0.053	0.067	0.076
ω_C	0.08	0.059	0.035	0.028	0.048	0.093
m	0.122	0.096	0.067	0.053	0.081	0.125

مقادیر مقاومت فشاری (f_c)، انرژی شکست اولیه (G_f)، اندازه مؤثر ناحیه فرآیند (C_f) و چقرمگی شکست (K_{IC}) برای در صدهای جایگزینی مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. تمام پارامترهای شکست با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی مطابق با توصیه [32] RILEM محاسبه شده‌اند. نمونه‌ای از آنالیز رگرسیون خطی برای مخلوط C5 در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲ و جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری با افزایش جایگزینی سرباره تا ۲۰٪ افزایش یافت. با این حال، افزایش بیشتر محتوای سرباره از ۲۰٪ به ۳۰٪ منجر به کاهش مقاومت فشاری شد. این با یافته‌های لینگ و وانگ [۱۲] با تفاوت در در صد جایگزینی سرباره مطابقت دارد. در حالی که کیو و ژائو [۹]، داس و همکاران [۱۰] و پوئرتا و همکاران [۱۱] افزایش نامحدودی در درصد جایگزینی سرباره گزارش کردند.



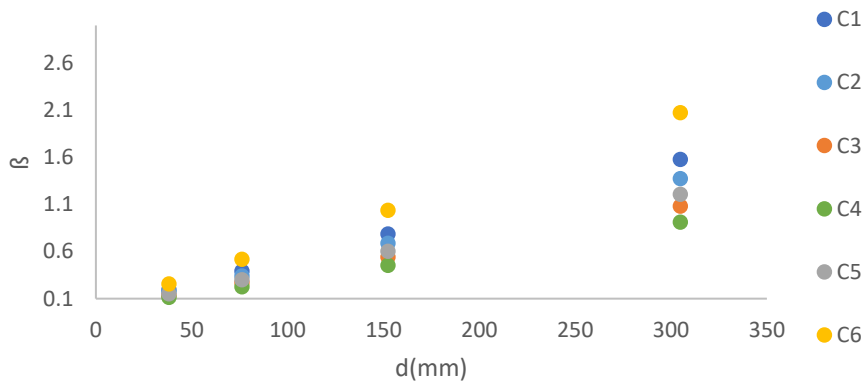
شکل ۲. پارامترهای شکست بتن ژئوپلیمری با مقادیر درصد جایگزینی مختلف

نتایج جداول به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شده‌اند. تحلیل آماری نشان داد که در تمامی ابعاد تیرها، تفاوت میان طرح‌ها از نظر حداکثر بار ا صلاح شده معنادار است ($p < 0.001$, ANOVA). آزمون Tukey نیز بیانگر آن است که طرح‌های حاوی ۲۰ تا ۳۰٪ سرباره به طور معناداری مقادیر بالاتری نسبت به نمونه شاهد نشان می‌دهند.



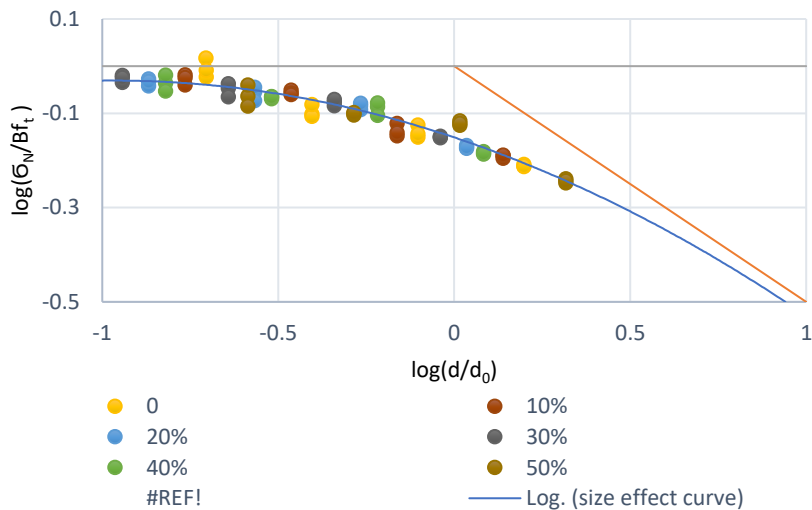
شکل ۳: نتایج تحلیل رگرسیون خطی برای C5

در شکل ۴، مقادیر عدد تردی (β) در برابر عمق نمونه‌های تیر (d) برای درصدهای جایگزینی مختلف نمایش داده شده است. تمام مقادیر β در محدوده معیار مکانیک شکست غیرخطی (NLFM) قرار دارند. علاوه بر این، مشخص شده است که β با افزایش عمق نمونه‌ها و درصد جایگزینی افزایش می‌یابد.



شکل ۴. تغییرات β با عمق

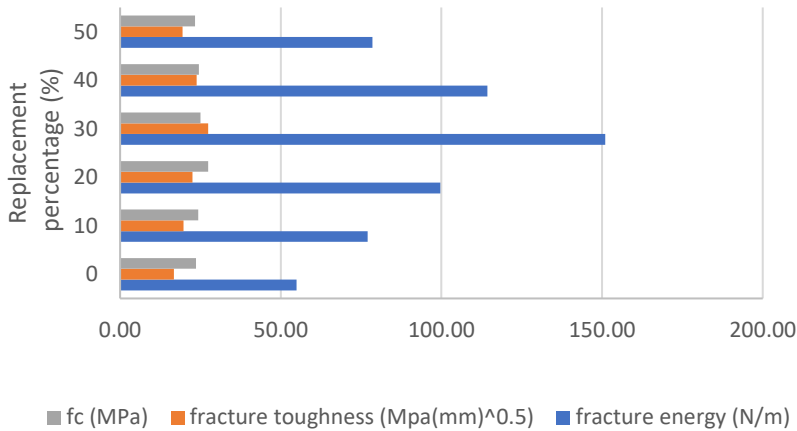
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نتایج تجربی به دست آمده بر اساس معادلات اثر اندازه به منحنی نزدیک هستند. بنابراین، نتایج تجربی توافق خوبی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط قانون اثر اندازه دارند. بر اساس این قانون و معادله (۳)، تنش اسمی به اندازه سازه بستگی دارد و با افزایش عمق تیر کاهش می‌یابد. شکل ۵ دارای یک خط افقی است که نشان دهنده معیار شکست مستقل از اندازه است و یک خط با شیب ۰.۵- که شرایط مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های به دست آمده، می‌توان بیان کرد که برای تیرهای بزرگتر با سرباره کمتر، طرح‌های اختلاط به معیار LEFM نزدیک می‌شوند. در مقابل، برای تیرهای کوچکتر با سرباره بیشتر، مخلوط‌ها به معیار مقاومت نزدیک می‌شوند.



شکل ۵. منحنی‌های اثر اندازه برای بتن با طرح‌های اختلاط مختلف

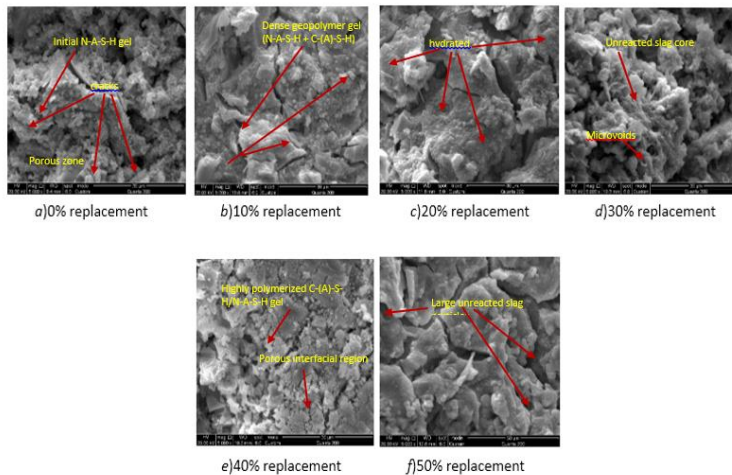
ارتباط بین نتایج

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، هم انرژی شکست (G_f) و هم چقرمگی شکست (KIC) با درصد‌های بالاتر جایگزینی خاکستر بادی با سرباره افزایش نشان می‌دهند. این روند نشان می‌دهد که ترکیب سرباره در بتن ژئوپلیمری سبک وزن مبتنی بر خاکستر بادی، خواص مکانیکی آن، به ویژه مقاومت آن در برابر شکست را بهبود می‌بخشد. افزایش مشاهده شده در G_f با افزایش محتوای سرباره نشان می‌دهد که مقدار بیشتری انرژی برای انتشار ترک در بتن اصلاح شده با سرباره مورد نیاز است. این امر احتمالاً به دلیل بهبود انسجام داخلی و متراکم شدن ماتریس است که مانع از شروع و رشد ترک‌ها می‌شود. به طور مشابه، افزایش KIC با درصد‌های بالاتر سرباره، نشان دهنده افزایش مقاومت در برابر انتشار ترک است. این را می‌توان با افزایش پیوند بین سطحی بین ماتریس و سنگدانه‌ها توضیح داد که منجر به ساختاری منسجم‌تر و یکپارچه‌تر می‌شود. بر اساس داده‌های ارائه شده، به نظر می‌رسد که درصد‌های جایگزینی سرباره در محدوده ۳۰٪ مطلوب‌ترین خواص مکانیکی را برای این فرمولاسیون خاص بتن ژئوپلیمری ارائه می‌دهند.



شکل ۶: تغییرات K_{IC} و G_f بتن با مقادیر درصد جایگزینی مختلف

ریزساختار نمونه‌ها



شکل ۷: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، در نمونه کنترلی بدون سرباره (a)، یک ریزساختار نسبتاً متراکم با برخی ریزترک‌های سطحی قابل تشخیص است. ذرات خاکستر بادی به طور نامنظم در ماتریس ژئوپلیمر توزیع شده‌اند. با افزایش سطح جایگزینی سرباره تا ۳۰٪ (تصاویر b، c و d)، به نظر می‌رسد ریزساختار فشرده‌تر و یکپارچه‌تر می‌شود. به ویژه، در تصویر مربوط به ۳۰٪ جایگزینی (d)، به نظر می‌رسد پیوند بین‌فازی بین ذرات و فاز ژئوپلیمری بهبود یافته و ترک‌های سطحی کمتری مشاهده می‌شود. این مشاهده ممکن است افزایش در انرژی شکست و چقرمگی شکست را

تا این درصد جایگزینی روشن کند، زیرا یک ریزساختار متراکم تر معمولاً مقاومت بیشتری در برابر شروع و انتشار ترک نشان می‌دهد. باین حال، با افزایش بیشتر درصد جایگزینی سرباره به ۴۰٪ و ۵۰٪ (e و f)، به نظر می‌رسد ریزساختار دچار تغییراتی می‌شود. در برخی مناطق، تجمع ذرات سرباره یا عدم همگنی در پراکندگی آنها ممکن است مشهود باشد. علاوه بر این، تمایل به ظهور ترک‌های سطحی افزایش می‌یابد. این می‌تواند کاهش در انرژی شکست و چقرمگی شکست را در این سطوح جایگزینی بالاتر توضیح دهد، زیرا ریزساختار ممکن است شکننده تر شده و مقاومت کمتری در برابر رشد ترک ارائه دهد.

مکانیسم شکست

بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که در درصدهای پایین سرباره (۱۰ تا ۳۰٪)، ریزساختار بتن ژئوپلیمری متراکم تر شده و پیوند بین فاز ژئوپلیمری و سنگ‌دانه‌ها بهبود یافته است. این موضوع موجب افزایش انرژی شکست و چقرمگی گردید. در مقادیر بالاتر (۴۰ و ۵۰٪)، تجمع سرباره و تشکیل فازهای ثانویه مانند Ca(OH)_2 باعث ناهمگنی در ماتریس و ایجاد ریزترک‌های بیشتر شد که به افت خواص مکانیکی منجر گردید.

سایر خواص بتن

اگرچه در این پژوهش تمرکز بر خواص مکانیکی و شکست بود، اما مطالعات دیگر نشان داده‌اند که سرباره می‌تواند نفوذپذیری را کاهش داده و مقاومت در برابر خوردگی را افزایش دهد؛ بنابراین انتظار می‌رود بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، دوام بالاتری نیز داشته باشد.

نتیجه گیری

این مطالعه به بررسی تأثیر سرباره به عنوان جایگزین خاکستر بادی بر رفتار شکست بتن ژئوپلیمری سبک‌وزن مبتنی بر خاکستر بادی پرداخت. یافته‌های کلیدی در زیر خلاصه شده است:

- انرژی شکست (G_f) روند همسویی را با تغییرات درصد جایگزینی سرباره نشان دادند و بدین ترتیب تأثیر این تغییرات را بر مکانیسم شکست ماده تأیید کردند. به نظر می‌رسد ترکیب تقریباً ۳۰٪ سرباره، مقاومت ماده را در برابر شروع و گسترش ترک افزایش می‌دهد.
- مقادیر طول منطقه فرآیند شکست (cf) تا سطح جایگزینی ۳۰٪ سرباره افزایش یافته و پس از آن کاهش مشاهده می‌شود. این روند نشان می‌دهد که ترکیب بهینه سرباره نه تنها مقاومت در برابر شروع و گسترش ترک را افزایش می‌دهد، بلکه باعث گسترش منطقه آسیب قبل از شکست می‌شود و در نتیجه، شکل‌پذیری ماده را تقویت می‌کند.
- سختی شکست (KIC) نیز با افزایش سطح جایگزینی سرباره افزایش یافت و به حداکثر مقدار $27,39 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ در نمونه C4 که شامل ۳۰٪ جایگزینی سرباره بود، رسید. این میزان، ۶۳٫۷٪ بهبود قابل توجهی در مقاومت ذاتی ماده در برابر گسترش ترک در مقایسه با نمونه کنترل را نشان می‌دهد. پس از این درصد جایگزینی بهینه، کاهش در سختی شکست مشاهده شد. به طور خاص، در نمونه C5 (۴۰٪ جایگزینی سرباره)، مقدار KIC به $23,78 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ کاهش یافت و در نمونه C6 (۵۰٪ جایگزینی سرباره) به حداقل $19,41$ مگاپاسکال رسید که تنها ۱۶٪ بالاتر از نمونه کنترل است.
- نمونه C3، شامل ۲۰٪ جایگزینی سرباره، بالاترین مقاومت فشاری ($27,4$ مگاپاسکال) را نشان داد که تقریباً ۱۶٫۱٪ افزایش در مقایسه با نمونه کنترل ($23,6$ مگاپاسکال) بود. نمونه C4، با ۳۰٪ جایگزینی

^۱ scanning electron microscopy

سرباره، نیز مقاومت فشاری نسبتاً بالایی (۲۵،۰ مگاپاسکال) را نشان داد که همچنان از نمونه کنترل بهتر بود. با این حال، افزایش‌های بعدی در درصد جایگزینی سرباره به ۴۰٪ و ۵۰٪ منجر به کاهش مقاومت فشاری شد.

- یافته‌ها نشان دادند که جایگزینی ۲۰ تا ۳۰٪ سرباره بهترین عملکرد مکانیکی و شکست را ایجاد می‌کند؛ بنابراین استفاده از این محدوده برای تولید بتن ژئوپلیمری سبک‌وزن در کاربردهای سازه‌ای توصیه می‌شود. مقادیر بالاتر سرباره (۴۰-۵۰٪) به دلیل افت مقاومت و افزایش شکنندگی مناسب نیستند. در پژوهش‌های آینده بررسی اثر سرباره بر دوام درازمدت و مقاومت در برابر خوردگی توصیه می‌گردد.

تقدیر و تشکر

نویسنده از مدیریت و کارکنان هنرستان فنی ابوریحان کرج برای فراهم کردن امکانات کارگاهی جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی تشکر می‌کند.

فهرست منابع

- [۱] Assi, L. N., Deaver, E. E., & Ziehl, P. (2018). *Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete*. Construction and Building Materials, 167, 372-380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.193>.
- [۲] Singh, N., & Singh, S. (2018). *Evaluating the performance of self compacting concretes made with recycled coarse and fine aggregates using non destructive testing techniques*. Construction and Building Materials, 181, ۷۳-۸۴. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.039>.
- [۳] Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). *Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview*. Construction and Building Materials, 237, 117455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.117455>.
- [۴] Mohyeddin, A., Karmokar, T., & Fardipour, M. (2025). *Fracture energy of ambient-cured fly ash-based geopolymer concrete*. Australian Journal of Structural Engineering, 1-17. <https://doi.org/10.1080/13287982.2025.2535086>.
- [۵] Zhao, C., Yuan, Y., Wen, S., Wang, Y., & Tan, B. (2025). *Research on Ambient-Temperature Synthesis of High-Strength Geopolymer Concrete: Parameter Optimization and Strength Prediction Model*. Case Studies in Construction Materials, e05123. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.05123>.
- [۶] Bazarkhankyzy, A., Murali, G., Aibulidinov, Y., Iskakova, Z., Kurpińska, M., Abdelgader, H. S., Avudaiappan, S., & Dixit, S. (2025). *Comprehensive evaluation of impact strength and microstructural characteristics of geopolymer concrete reinforced with four types of natural fibers of varying lengths*. Scientific Reports, 15(1), 29624. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14857-5>.
- [۷] Sheydaei, P., Mohsennia, E., & Toufigh, V. (2025). *Fracture and mechanical properties of GGBFS-based geopolymer concrete incorporating rice husk ash and natural zeolite*. Journal of Materials in Civil Engineering, 37(5), 04025079. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-18861>.

- [^۸]Pan, Z., Sanjayan, J. G., & Rangan, B. V. (2011). *Fracture properties of geopolymers paste and concrete*. Magazine of Concrete Research, 63(10), 763-771. <https://doi.org/10.1680/macr.2011.63.10.763>.
- [^۹]Qiu, J., Zhao, Y., Xing, J., & Sun, X. (2019). *Fly Ash/Blast Furnace Slag-Based Geopolymer as a Potential Binder for Mine Backfilling: Effect of Binder Type and Activator Concentration*. Advances in Materials Science and Engineering, 2019(1), 2028109. <https://doi.org/10.1155/2019/2028109>.
- [^{۱۰}]Das, D., Das, A. P., & Rout, P. K. (2021). Effect of slag addition on compressive strength and microstructural features of fly ash based geopolymer. In *Circular economy in the construction industry* (61-68). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003217619-9>.
- [^{۱۱}]Puertas, F., Martínez-Ramírez, S., Alonso, S., & Vázquez, T. (2000). *Alkali-activated fly ash/slag cements: Strength behaviour and hydration products*. Cement and concrete research, 30(10), 1625-1632. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00298-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00298-2).
- [^{۱۲}]Ling, Y., Wang, K., Li, W., Shi, G., & Lu, P. (2019). *Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymer composites*. Composites Part B: Engineering, 164, 747-757. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.092>.
- [^{۱۳}]Collins, F., & Sanjayan, J. (2001). *Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete*. Cement and Concrete Composites, 23(4-5), 345-352. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00003-8).
- [^{۱۴}]Sasui, S., Kim, G., Nam, J., Koyama, T., & Chansomsak, S. (2020). *Strength and microstructure of class-C fly ash and GGBS blend geopolymer activated in NaOH & NaOH+ Na₂SiO₃*. Materials, 13(1), 59. <https://doi.org/10.3390/ma13010059>.
- [^{۱۵}]Nath, P., & Sarker, P. K. (2017). *Fracture properties of GGBFS-blended fly ash geopolymer concrete cured in ambient temperature*. Materials and Structures, 50(1), 1-12. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0893-6>.
- [^{۱۶}]Bharatkumar, B., Raghuprasad, B., Ramachandramurthy, D., Narayanan, R., & Gopalakrishnan, S. (2005). *Effect of fly ash and slag on the fracture characteristics of high performance concrete*. Materials and Structures, 38(1), 63-72. <https://doi.org/10.1007/BF02480576>.
- [^{۱۷}]Midhun, M., Rao, T. G., & Srikrishna, T. C. (2018). *Mechanical and fracture properties of glass fiber reinforced geopolymer concrete*. Advances in concrete construction, 6(1), 29. <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.1.029>.
- [^{۱۸}]Sarker, P. K., Haque, R., & Ramgolam, K. V. (2013). *Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete*. Materials & Design, 44, 580-586. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.005>.
- [^{۱۹}]Al-Rawi, S., & Taysi, N. (2018). *Performance of self-compacting geopolymer concrete with and without GGBFS and steel fiber*. Advances in Concrete Construction, 6 (4), 323-344. <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.4.323>.
- [^{۲۰}]Moharrer, M. (۲۰۲۴). *Barrasi-ye asar-e jaygozini-ye pasmand-e maseh hasel az karkhaneh-ye sandblast ba siman dar moshakhasat-e rheology va mekaniki-ye beton [Investigation of the effect of replacing sandblasting waste with cement on the rheological and mechanical properties of concrete]*. Karafan Scientific Quarterly, 21(3), 325-346. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.409074.2640>.

- [۲۱] Bahrami, S., Shakeri, A., & Hajikalaei, H. (2021). *Era'eh-ye tarh-e ekhtelat-e pishnehadi-ye beton-e bazyafati mored-e estefade dar jadavel-e betoni-ye shahri ba estefade az shabake-ye asabi [Proposed mix design of recycled concrete used in urban concrete pavements using an artificial neural network]*. Karafan Scientific Quarterly, 17(4), 215-238. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128404>. (In Persian)
- [۲۲] Hasani, A., & Nematzadeh, M. (2022). *Raftar-e feshari va davam-e beton havi-ye sangdanehay-e zayeati jaygozin-e doroshtdaneh va powder-e sang-e marmar jaygozin-e siman [Compressive behavior and durability of concrete containing recycled coarse aggregates and marble powder as a cement replacement]*. Karafan Scientific Quarterly, 19(1), 83-105. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.314386.1831>. (In Persian)
- [۲۳] Ding, Y., Dai, J.-G., & Shi, C.-J. (2018). *Fracture properties of alkali-activated slag and ordinary Portland cement concrete and mortar*. Construction and Building Materials, 165, 310-320. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.202>.
- [۲۴] Khan, M. Z. N., Hao, Y., Hao, H., & Shaikh, F. U. A. (2018). *Mechanical properties of ambient cured high strength hybrid steel and synthetic fibers reinforced geopolymer composites*. Cement and Concrete Composites, 85, 133-152. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.011>.
- [۲۵] Khalilpour, S., BaniAsad, E., & Dehestani, M. (2019). *A review on concrete fracture energy and effective parameters*. Cement and concrete research, 120, 294-321. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.013>.
- [۲۶] Hilsdorf, H., & Brameshuber, W. (1991). *Code-type formulation of fracture mechanics concepts for concrete*. International journal of fracture, 51(1), 61-72. <https://doi.org/10.1007/BF00017920>.
- [۲۷] Ganesan, N., Abraham, R., DEEPA, R. S., & Sasi, D. (2015). *Fracture properties of geopolymer concrete*. ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING), 127-134. <https://www.sid.ir/paper/299102/en>.
- [۲۸] Yeshiwas, M. D., Yehualaw, M. D., Habtegebreal, B. T., Nebiyu, W. M., & Taffese, W. Z. (2025). *Rice Husk Ash and Waste Marble Powder as Alternative Materials for Cement*. Infrastructures, 10(4), 78. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10040078>.
- [۲۹] Uysal, M., Aygörmmez, Y., Canpolat, O., Cosgun, T., & Kuranlı, Ö. F. (2022). *Investigation of using waste marble powder, brick powder, ceramic powder, glass powder, and rice husk ash as eco-friendly aggregate in sustainable red mud-metakaolin based geopolymer composites*. Construction and Building Materials, 361, 129718. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129718>.
- [۳۰] Mukhtiar, F., Kumar, R., Kumar, A., Hussain, W., & Ali, S. (2022). *Effect of marble powder on fly ash based one part geopolymer mortar*. Int Res J Mod Eng Technol Sci, 4(6), 567-572. <https://www.researchgate.net/publication/377454830>.
- [۳۱] Bazant, Z. P., Kazemi, M. T. (1990). *Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete*. International journal of fracture, 44(2), 111-131. <https://doi.org/10.1007/BF00047063>.

- [۳۲] RILEM FMT-89. (1990). *Fracture mechanics of concrete—test methods, Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete*. Materials and Structures, 23, 461-465. <https://doi.org/10.1007/BF02472030>.
- [۳۳] ASTM C618. (2013). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. In: ASTM international. <https://doi.org/10.1520/C0618-13>.
- [۳۴] ASTM C136. (2005). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. In *American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA*. <https://doi.org/10.1520/C0136-05>.
- [۳۵] ASTM C469. (2002). Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. In *Annual Book of ASTM standards* (Vol. 4). <https://doi.org/10.1520/C0469-02>.
- [۳۶] ASTM C496. (2011). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. In *Annual Book of ASTM Standard, American Society for Testing and Materials*. https://doi.org/10.1520/C0496_C0496M-11.
- [۳۷] BSI. (2009). BS EN 12390-3:2009. *Testing hardened concrete—Part 3: Compressive strength of test specimens*. British Standards Institution, London, UK. <https://knowledge.bsigroup.com/products/testing-hardened-concrete-compressive-strength-of-test-specimens-1>.