

## Recycling Spent Coffee Grounds in Geopolymer Mortars: A Sustainable Approach for Environmental Impact Reduction and Mechanical Performance Enhancement

Shayan Mohammadalizadeh<sup>1</sup>, Hadi Nazarpour<sup>2\*</sup>, Seyed Sina Mousavi<sup>3</sup>, Mehdi Dehestani<sup>4</sup>

1- Ph.D. Candidate in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3- Postdoctoral researcher, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

4-Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

### ABSTRACT

Spent coffee grounds are a high-volume and biodegradable bio-waste that, if improperly disposed of or accumulated, can lead to greenhouse gas emissions and contamination of resources. Recycling this waste in geopolymer mortars, as a novel construction material, represents a sustainable approach to mitigate its environmental impacts. In this study, spent coffee grounds were used to partially replace ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) in geopolymer mortars at different levels (1%, 5%, 10%, 15%, 20%, and 30%), and both the workability and mechanical performance of the specimens, including compressive, tensile, and flexural strengths, were evaluated at curing ages of 7, 28, and 56 days. The results showed that increasing the amount of spent coffee grounds led to a reduction in compressive strength; however, at later ages, some mixtures exhibited satisfactory tensile and flexural performance. The highest tensile and flexural strengths were observed for the specimens containing 15% and 20% spent coffee grounds, respectively, showing approximately 19% and 7% increases compared to the reference specimen at 56 days. Compressive strength tests after heat exposure also revealed a more pronounced reduction in specimens containing spent coffee grounds compared to the reference. These results indicate that the targeted use of spent coffee grounds not only provides an effective solution for reducing bio-waste but can also enhance certain mechanical properties of geopolymer mortars.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 24 July 2025

Revise Date: 02 October 2025

Accept Date: 04 November 2025

### Keywords:

Coffee waste  
geopolymer mortar  
mechanical performance  
high temperature  
environment

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.534089.3774

\*Corresponding author: Hadi Nazarpour  
Email address: H.nazarpour@nit.ac.ir.

## بازیافت پسماند قهوه مصرف شده در ملات‌های ژئوپلیمری: رویکردی پایدار برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهبود خواص مکانیکی

شایان محمد علی زاده<sup>۱</sup>، هادی نظرپور<sup>۲\*</sup>، سید سینا موسوی<sup>۳</sup>، مهدی دهستانی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۳- محقق پسا دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۴- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

### چکیده

پسماند قهوه مصرف شده یکی از زباله‌های زیستی پر حجم و تجزیه پذیر است که در صورت دفن یا انباشت نامناسب می‌تواند منجر به تولید گازهای گلخانه‌ای و آلودگی منابع شود. بازیافت این پسماند در ملات‌های ژئوپلیمری، به عنوان مصالح ساختمانی نوین، رویکردی پایدار برای کاهش اثرات زیست‌محیطی آن محسوب می‌شود. در این پژوهش، پسماند قهوه در سطوح مختلف ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰٪ وزنی جایگزین سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS) در ملات ژئوپلیمری شد و کارایی به همراه عملکرد مکانیکی نمونه‌ها شامل مقاومت فشاری، کششی و خمشی در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار پسماند قهوه، مقاومت فشاری کاهش خواهد یافت، اما در سنین بالاتر برخی ترکیبات عملکرد مناسبی در مقاومت‌های کششی و خمشی از خود نشان دادند. بیشترین مقاومت کششی و خمشی مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۵٪ و ۲۰٪ پسماند قهوه بود که به ترتیب در سن ۵۶ روز حدود ۱۹٪ و ۷٪ افزایش نسبت به نمونه مرجع نشان دادند. آزمون مقاومت فشاری پس از حرارت‌دهی نیز کاهش محسوس تری در نمونه‌های حاوی تفاله قهوه نسبت به نمونه مرجع نشان داد. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده هدفمند از پسماند قهوه نه تنها راهکاری مؤثر برای کاهش زباله‌های زیستی است، بلکه می‌تواند برخی خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمری را نیز بهبود بخشد.

کلمات کلیدی: پسماند قهوه، ملات ژئوپلیمر، عملکرد مکانیکی، دمای بالا، محیط زیست

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.534089.3774	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.534089.3774	۱۴۰۵/۰۳/۳۱	۱۴۰۴/۰۸/۱۳	۱۴۰۴/۰۸/۱۳	۱۴۰۴/۰۷/۱۰	۱۴۰۴/۰۵/۰۲
هادی نظرپور					*نویسنده مسئول:	
H.nazarpour@nit.ac.ir					پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

با توجه به روند رو به رشد مصرف قهوه در جهان و ایران، حجم پسماند قهوه (SCG) نیز به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این پسماند آلی، در صورت مدیریت نادرست، می تواند موجب آلودگی خاک و آب، انتشار گازهای گلخانه‌ای و فشار بر سیستم‌های دفع زباله شود. یکی از راهکارهای پایدار برای کاهش این اثرات زیست‌محیطی، استفاده از آن در تولید بتن‌های نوین است که علاوه بر بازیافت مؤثر، به بهبود برخی ویژگی‌های بتن نیز کمک می‌کند. از جمله بازیافت SCG و ترکیب آن با انواع مختلف چسباننده‌های سنتی سیمانی، از جمله سیمان پرتلند معمولی و آهک هیدرولیکی طبیعی، عملکرد انرژی را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. این بهبودها شامل کاهش ۲۶٪ در چگالی ظاهری، کاهش ۷۲٪ در رسانایی حرارتی، و افزایش سه‌برابری در ظرفیت گرمای ویژه است. چنین تغییراتی باعث بهبود خواص حرارتی شده، که می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری منابع شود. افزون بر این، هم‌افزایی صنعتی منجر به کاهش نسبی در هزینه مواد گردیده که برای صنعت ساخت‌وساز و تولیدکنندگان سودمند است [۱]. در مطالعه توپیل و همکاران<sup>۱</sup> [۲]، تأثیر درصد‌های مختلفی از پسماند قهوه بر خواص حرارتی و مکانیکی گچ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش درصد پسماند قهوه، چگالی کاهش یافته و عملکرد حرارتی بهبود می‌یابد، هرچند مقاومت مکانیکی در درصد‌های بالا کاهش پیدا می‌کند. در نهایت، ترکیب بهینه شامل ۶٪ پسماند قهوه و نسبت اختلاطی معادل ۰/۷ (آب به گچ) تعیین شد که با حفظ مقاومت خمشی، موجب کاهش قابل توجهی در هدایت و نفوذ حرارتی گچ گردید. همچنین SCG می‌تواند به‌عنوان جایگزینی پایدار در چارچوب اقتصاد چرخشی در کاربردهای سنتی ساخت‌وساز مانند اندودهای حرارتی یا به‌عنوان پرکننده‌ای غیرمرسوم در بلوک‌های بتنی نفوذپذیر به کار رود [۳، ۴]. استفاده از SCG به‌عنوان افزودنی در تولید بتن، علاوه بر کاهش پسماند آلی و تولید مصالح ساختمانی پایدارتر، می‌تواند خواص مکانیکی بتن را نیز بهبود بخشد. نتایج نشان داد که افزودن ۱۱٪ SCG به مخلوط سیمان، پس از ۶۸ روز عمل‌آوری، موجب افزایش ۱۲/۶۲٪ مقاومت فشاری گردید. با این حال، برای تعیین مقدار بهینه SCG به‌منظور دستیابی به بالاترین عملکرد در بتن، تحقیقات بیشتری مورد نیاز است [۵].

بایوچار، ماده‌ای غنی از کربن است که راهکارهای پایداری برای تولید سوخت، بهبود کیفیت خاک، و تثبیت کربن ارائه می‌دهد. اگرچه تعاریف مختلفی برای بایوچار وجود دارد، اما معمولاً به فرایند تولید و کاربرد آن اشاره دارد. ابتکار بایوچار بین‌المللی<sup>۲</sup>، بایوچار را ماده‌ای پایدار توصیف می‌کند که از تجزیه حرارتی مواد آلی در محیطی با اکسیژن محدود تولید می‌شود [۶، ۷]. اگرچه SCG یک زیست‌توده غیرخوراکی است، اما تحقیقات همچنان در حال بررسی ترکیب آلی، مزایای زیست‌محیطی و راهبردهای کاهش نیاز بالای اکسیژن برای تجزیه طبیعی آن هستند. مؤثرترین راهبرد برای مدیریت SCG، ادغام آن در فرایند پالایش زیستی، به‌ویژه پیرولیز، است؛ فرایندی که انرژی و محصولات جانبی ارزشمندی تولید می‌کند [۸]. مطالعات اخیر [۹، ۱۰] نشان داده‌اند که استفاده از بایوچار پسماند قهوه<sup>۳</sup> در دمای پایین و استفاده از گرانول کربن فعال حاصل از تفاله قهوه<sup>۴</sup> در دمای بالا می‌تواند خواص مکانیکی و عملکرد بتن را به طور قابل توجهی بهبود دهد. نتایج نشان داد که افزودن ۱۵٪ بایوچار پسماند قهوه در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۱/۵٪ کربن فعال حاصل از پسماند قهوه در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، می‌تواند مقاومت فشاری بتن پس از ۲۸ روز را به ترتیب تا ۲۹/۳٪ و ۲۷٪ افزایش دهد. در مطالعه‌ای دیگر [۱۱] تأثیر فرآوری هیدروترمال SCG در دماهای پایین<sup>۵</sup> بر عملکرد آن در مخلوط‌های بتنی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش دما و زمان فرآوری، ساختار تخلخلی بایوچار به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد؛ به‌نحوی که این تغییرات منجر به افزایش بازده حرارتی بتن و کاهش هزینه‌های تولید تا حدود ۷٪ گردید.

پژوهش‌ها پیرامون استفاده از SCG در بتن با بهره‌گیری از خاکستر پسماند قهوه<sup>۶</sup> در مخلوط‌های پایه سیمانی، گسترش یافت. این رویکرد با هدف بررسی توانایی خاکستر حاصل از SCG در بهبود خواص مکانیکی بتن و کاهش وابستگی به سیمان معمولی انجام گرفته

<sup>1</sup> Touil et al

<sup>2</sup> International Biochar Initiative

<sup>3</sup> Spent Coffee Grounds Biochar

<sup>4</sup> Activated Carbon Granules Spent Coffee Grounds

<sup>5</sup> Spent Coffee Grounds Hydrothermal Biochar

<sup>6</sup> Spent Coffee Grounds Ash

است. برای ارزیابی این موضوع، سیمان به صورت وزنی تا میزان ۵٪ با خاکستر جایگزین شد و تأثیر آن بر مقاومت فشاری مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین، این مطالعه نحوه تأثیر دمای تولید خاکستر بر ترکیب شیمیایی آن و عملکرد مکانیکی بتن حاصل را مورد بررسی قرار داد. در میان نمونه‌های آزمایش شده، بتنی که حاوی خاکستر تولید شده در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد بود، بیشترین مقاومت فشاری را (بیش از ۴۰ مگاپاسکال) از خود نشان داد که حتی از نمونه شاهد نیز فراتر رفت [۱۲]. با این حال، مطالعه‌ای دیگر [۱۳] نشان داد که سوزاندن پسماند قهوه در دماهای ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و استفاده از خاکستر حاصل در سطوح جایگزینی ۲، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵٪ سیمان در ملات، منجر به کاهش مقاومت فشاری می‌شود، هرچند جایگزینی در سطح ۱۰٪ با خاکستر ۶۰۰ درجه عملکرد نسبتاً بهتری داشته و می‌تواند از نظر کاهش پسماند، صرفه‌جویی اقتصادی و کاهش انتشار CO<sub>2</sub> ارزشمند باشد. این نتایج بیانگر آن است که خواص مکانیکی خاکستر تفاله قهوه به شدت تحت تأثیر شرایط حرارت‌دهی و درصد جایگزینی قرار دارد.

کاربردهای SCG تنها محدود به بتن سیمانی نبوده و در فناوری‌های ژئوپلیمری نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعات نشان می‌دهند که SCG می‌تواند به‌عنوان افزودنی مؤثر در تولید سیمان ژئوپلیمری به کار رود و خواص مناسبی برای کاربردهای ساخت‌وساز فراهم آورد. استفاده از ترکیب محلول سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی در فرایند ژئوپلیمریزاسیون<sup>۷</sup>، الزامات ساختاری لازم برای استفاده از این مواد در زیرلایه‌های خاکریز جاده‌ها را به‌خوبی فراهم می‌سازد. به عبارتی، این ترکیب فعال‌کننده، استحکام پیوند و دوام مورد نیاز برای استفاده از سیمان ژئوپلیمری حاوی SCG را تأمین می‌کند [۱۴-۱۶].

با توجه به پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از دفن یا انباشت غیر اصولی پسماند قهوه و همچنین ظرفیت بالقوه آن در بهبود برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ملات‌های ژئوپلیمری، پژوهش حاضر به بررسی جایگزینی این پسماند با سرباره کوره آهن‌گدازی<sup>۸</sup> (GGBFS) در محدوده‌ای از ۱ تا ۳۰٪ وزنی می‌پردازد. فرض بر این بود که به دلیل ماهیت الیاف سلولزی موجود در پسماند قهوه، این ماده می‌تواند موجب بهبود مقاومت کششی و خمشی ملات گردد، هرچند اثر آن بر مقاومت فشاری و کارایی نیازمند بررسی دقیق است. در این راستا، عملکرد ملات‌های حاوی پسماند قهوه از جنبه‌های مختلف شامل مقاومت فشاری، کششی و خمشی در سنین مختلف، کارایی و همچنین مقاومت فشاری پس از اعمال حرارت ارزیابی شده است. هدف اصلی تحقیق، شناسایی اثرگذاری درصدهای مختلف جایگزینی بر خواص مکانیکی و دوام ملات ژئوپلیمری و در نهایت تعیین بازه بهینه مصرف این پسماند است. نتایج حاصل می‌تواند چشم‌اندازی نوین برای بهره‌برداری پایدار از ضایعات کشاورزی در صنعت ساخت‌وساز فراهم آورد و استفاده از پسماند قهوه را به‌عنوان یک راهکار نوآورانه و دوستدار محیط‌زیست در تولید مصالح ساختمانی تقویت نماید.

## ۲- روش تجربی

### ۲-۱ مواد

برای تهیه نمونه‌های ملات ژئوپلیمری، از موادی شامل سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده (GGBFS)، پسماند قهوه (SCG)، سیلیکات سدیم مایع<sup>۹</sup>، سدیم هیدروکسید جامد پرک شده<sup>۱۰</sup> و ماسه طبیعی استفاده شد. نمایی از این مواد در شکل ۱ نشان داده شده است.

<sup>7</sup> Geopolymerization

<sup>8</sup> Ground Granulated Blast Furnace Slag

<sup>9</sup> Liquid Sodium Silicate (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)

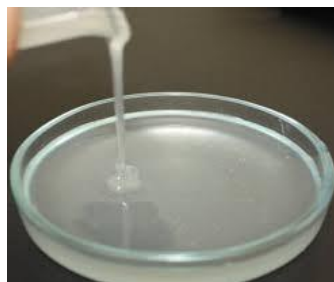
<sup>10</sup> Solid Flaked Sodium Hydroxide (NaOH)



(ب)



(الف)



(پ)



(ث)



(ت)

شکل ۱: مواد مورد استفاده، (الف) GGBFS، (ب) SCG، (پ) سدیم سیلیکات، (ت) سدیم هیدروکسید پرک شده، (ث) ماسه

## ۲-۱-۱-۲ قهوه (SCG)

در این مطالعه، SCG از کافی شاپ‌های محلی در شهر آمل (استان مازندران) جمع‌آوری شدند. این پسماند ترکیبی از دو نوع متداول قهوه، یعنی روبوستا و عربیکا بود در ادامه به منظور کاهش رطوبت، جلوگیری از تخریب زیستی و یکنواخت‌سازی ترکیب، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند. سپس، تمامی نمونه‌های SCG پیش از استفاده از الک شماره ۱۰۰ (با اندازه منافذ ۱۵۰ میکرومتر) عبور داده شدند و چگالی آن ۱/۳۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود.

## ۲-۱-۲-۲ سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده (GGBFS)

GGBFS محصول جانبی صنعت آهن است که از سیلیکات و آلومینوسیلیکات کلسیم ذوب شده تشکیل شده و پس از خنک‌سازی سریع و آسیاب شدن، به پودری با ذرات شیشه‌ای آمورف تبدیل می‌شود. این ماده هیدرولیکی قابلیت هیدراته شدن در حضور آب و تولید ترکیبات سخت‌شده را دارد و واکنش‌پذیری آن به ترکیبات شیمیایی و محتوای شیشه بستگی دارد. [۱۷، ۱۸]. در مطالعه حاضر GGBFS با چگالی ۲/۵۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب، از شرکت بنا گستر زیست فناوری واقع در شهر همدان تهیه شد.

## ۲-۱-۳ سدیم هیدروکسید

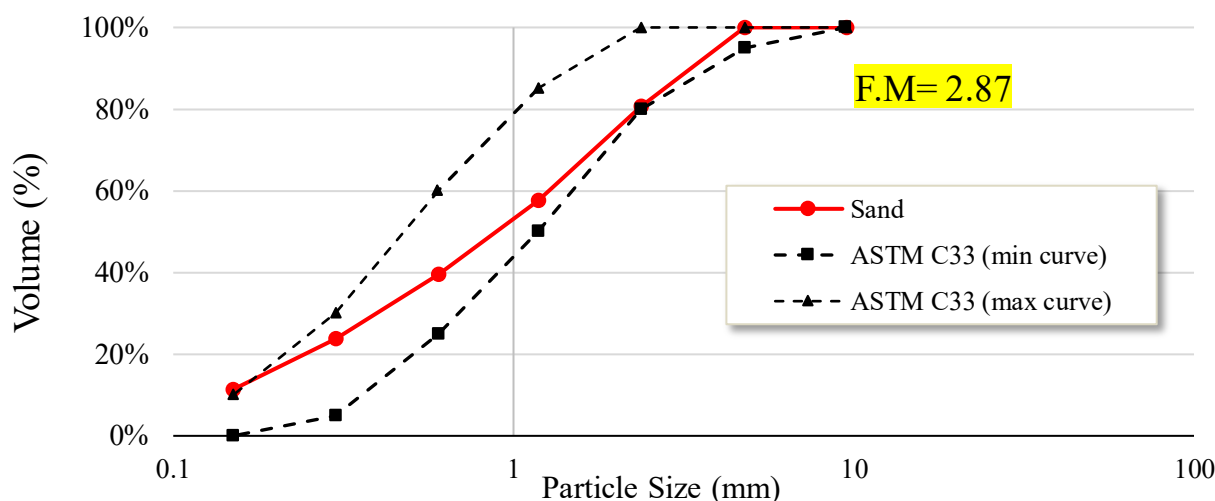
سدیم هیدروکسید (همچنین به آن لیمو، سود سوزآور و هیدرات سدیم نیز گفته می‌شود) محصول جانبی تولید کلر می‌باشد و به‌طور گسترده به‌عنوان یک فعال‌کننده قلیایی در تولید ژئوپلیمر استفاده می‌شود. مشاهدات نشان داده‌اند که ژئوپلیمرهایی که با هیدروکسید سدیم فعال شده‌اند، بلورینگی بالاتری ایجاد کرده و بنابراین پایداری بهتری در محیط‌های مهاجم حاوی سولفات و اسید از خود نشان می‌دهند [۱۹]. در مطالعه حاضر از پرک‌های جامد هیدروکسید سدیم با خلوص ۹۸٪ و چگالی ۲/۱۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، تولید شده توسط شرکت دیجی شیمی استفاده بعمل آمد.

## ۲-۱-۴ سدیم سیلیکات

سیلیکات‌های سدیم جامد از طریق ذوب شن ( $\text{SiO}_2$ ) با کربنات سدیم<sup>۱۱</sup> در دماهایی بیش از ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شوند و محصول حاصل با استفاده از بخار فشار بالا به یک مایع نیمه‌ویسکوز به نام واترگلس<sup>۱۲</sup> حل می‌شود [۲۰]. سدیم سیلیکات به‌ندرت به‌عنوان یک فعال‌کننده مستقل مورد استفاده قرار می‌گیرد، چرا که به تنهایی پتانسیل کافی برای آغاز واکنش پوزولانی را ندارد. در عوض، معمولاً با سدیم هیدروکسید یا پتاسیم هیدروکسید<sup>۱۳</sup> ترکیب می‌شود تا خاصیت قلیایی آن تقویت شده و مقاومت نهایی نمونه افزایش یابد. [۲۱]. در مطالعه حاضر از سیلیکات سدیم مایع با مدول سیلیس برابر ۲/۸ و چگالی ۲/۳۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ساخته شده توسط شرکت دیجی شیمی استفاده شد.

## ۲-۱-۵ ماسه

ماسه، به‌عنوان یک ماده دانه‌ای طبیعی و مهم در تهیه ملات و بتن، نقش اساسی در بهبود خواص مکانیکی و کارپذیری مخلوط دارد. در این مطالعه، ماسه مورد استفاده از معدن «آمل کار» واقع در شهر آمل استخراج شده است. این ماسه دارای مدول نرمی<sup>۱۴</sup> ۲/۸۷، چگالی ۲/۵۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب و جذب آب ۲/۵٪ بوده و دانه‌بندی آن در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: منحنی دانه‌بندی

<sup>11</sup>  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

<sup>12</sup> Waterglass

<sup>13</sup> KOH

<sup>14</sup> Fineness Modulus

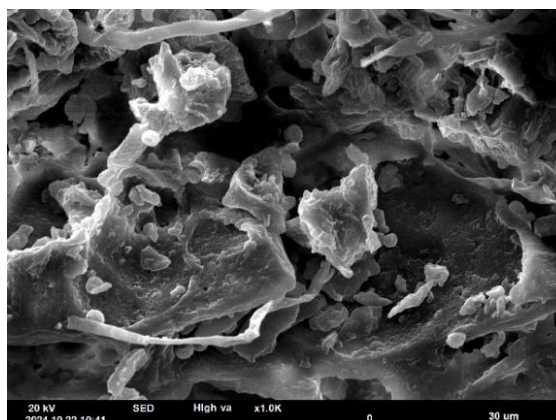
۲-۲ آنالیز فلورسانس پرتو ایکس<sup>۱۵</sup> (XRF) و تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱۶</sup> (SEM)

آنالیز XRF (جدول ۱) ترکیب‌های شیمیایی مواد خام را نشان می‌دهد. GGBFS عمدتاً از  $\text{CaO}$  (۳۷/۹٪)،  $\text{SiO}_2$  (۳۵/۹٪)، و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (۸/۴٪) تشکیل شده است و مقادیر کمتری از  $\text{MgO}$  (۸/۹٪) و  $\text{BaO}$  (۲/۱٪) را نیز داراست که با رفتار نهفته هیدرولیکی این ماده مطابقت دارد. SCG مقدار بالایی از افت حرارتی (LOI = 94%) را نشان می‌دهد [۲۲، ۱۳]، که بیانگر غلبه ترکیبات آلی در این ماده است، در حالی که ترکیبات معدنی باقیمانده شامل مقادیر قابل توجهی از  $\text{K}_2\text{O}$  (۳/۱۴٪) و  $\text{P}_2\text{O}_5$  (۱/۰۳٪) هستند. شکل ۳ (الف)، نتایج تحلیل SEM برای SCG را نشان می‌دهد. ریزساختار SCG دارای مورفولوژی متخلخل، الیافی و نامنظم است؛ ویژگی‌ای که خاص زیست‌توده‌های سلولزی است. وجود برجستگی‌های آلی مشخص منشأ گیاهی و فرآوری نشده این ماده را نشان می‌دهد. شکل ۳ (ب)، آنالیز XRD پودر SCG را نشان می‌دهد که جزء اصلی آن مشابه مطالعه [۲۲]، الیاف سلولزی بود (کد مرجع، ۰۱۹۲-۰۰۳-۰۰)، که مقدار بالای LOI (جدول ۱) را تایید می‌کند. مطابق شکل ۳ (پ)، در طیف FTIR مربوط به SCG، یک باند گسترده در عدد موجی ۳۱۵۵/۴۸ سانتی‌متر<sup>-۱</sup> ظاهر گردید که به ارتعاشات کششی گروه‌های O-H نسبت داده می‌شود [۲۲-۲۴] که معرف حضور ساختارهای آلی باقی‌مانده از ذرات SCG است [۲۲]. همچنین باند مشخصه‌ای در عدد موجی ۲۹۲۱/۰۶ سانتی‌متر<sup>-۱</sup> مشاهده شد که مربوط به ارتعاشات کششی گروه‌های C-H است [۲۲، ۲۵]. باند مشاهده‌شده در عدد موجی ۱۶۴۹/۲۳ سانتی‌متر<sup>-۱</sup> به ارتعاش خمشی H-O-H مربوط به مولکول‌های آب پیوندی نسبت داده می‌شود [۲۶، ۲۷]. ارتعاشات خمشی پیوند C-O در عدد موجی ۶۷۳/۷۸ و ۸۷۸/۵۸ [۲۴] و کششی C-O در عدد موجی ۱۳۸۵/۰۱ [۲۲] وجود کربنات را اثبات می‌کنند. علاوه بر این، باند مشاهده‌شده در ۲۳۶۵/۵۵ سانتی‌متر<sup>-۱</sup> به ارتعاش کششی گروه O-C-O مربوط بوده و نشان‌دهنده وجود کربنات‌های سطحی یا  $\text{CO}_2$  جذب‌شده در SCG می‌باشد [۲۶]. همچنین باند ۱۰۵۶/۲۲ سانتی‌متر<sup>-۱</sup> نیز دلالت بر وجود مواد آلی دارد [۲۵].

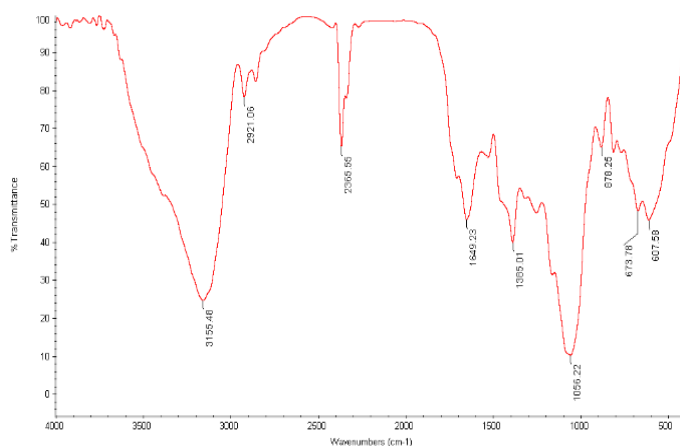
جدول ۱: ترکیبات شیمیایی

Chemical Formula	SCG	GGBFS
$\text{SiO}_2$	-	۳۵/۹
$\text{Al}_2\text{O}_3$	-	۸/۴
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	۰/۱۱۲	۰/۶
$\text{CaO}$	۱/۲۲۵	۳۷/۹
$\text{MgO}$	۰/۳۳۳	۸/۹
$\text{Na}_2\text{O}$	۰/۰۲۱	۰/۳
$\text{K}_2\text{O}$	۳/۱۴۲	۰/۷
$\text{TiO}_2$	۰/۰۲۸	۱/۹
$\text{MnO}$	۰/۰۲۱	-
$\text{P}_2\text{O}_5$	۱/۰۲۶	<۰/۰۱
$\text{BaO}$	-	۲/۱
LOI	۹۴	۰/۹

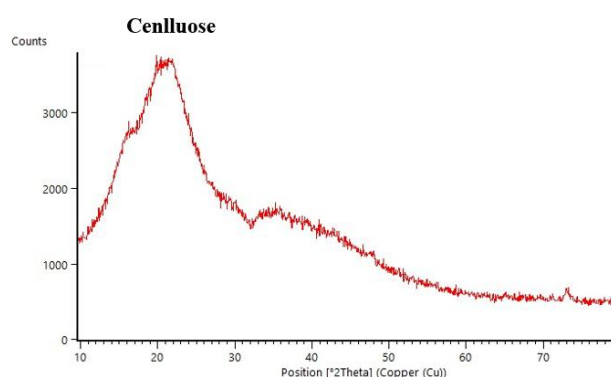
<sup>۱۵</sup> Scanning Electron Microscopy<sup>۱۶</sup> X-ray Fluorescence



الف



ب



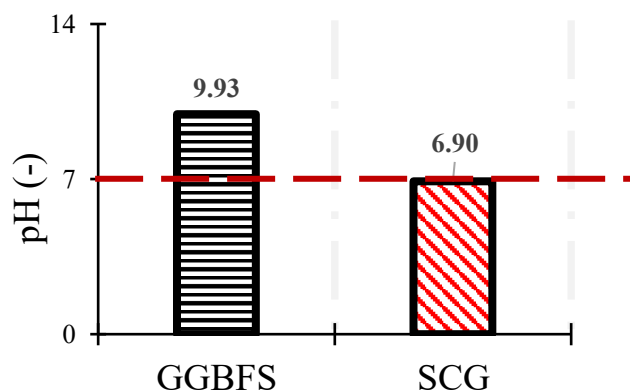
ب

شکل ۳: آنالیز شیمیایی، الف (SEM، ب (XRD و پ) FTIR

## ۲-۳ تست pH

pH یکی از عوامل کلیدی تأثیرگذار بر واکنش پذیری مواد مورد استفاده در بتن محسوب می‌شود، چرا که محیط‌های اسیدی یا قلیایی می‌توانند به طور قابل توجهی بر فرآیند هیدراتاسیون، دوام و عملکرد نهایی بتن تأثیر بگذارند. از این رو، ارزیابی pH برای بررسی اثر افزودنی‌ها بر خواص بتن ضروری است. در این راستا، اندازه‌گیری pH بر روی مواد خام مورد استفاده در این مطالعه انجام شد و پیش از آزمایش، پودرهای GGBFS و SCG، از الک شماره ۱۰۰ عبور داده شدند [۲۸]. در حالی که استاندارد ASTM D4972-13 و مطالعات پیشین نسبت‌های مختلف جامد به مایع را در شرایط گوناگون مورد استفاده قرار داده‌اند (مانند نسبت ۱:۱ [۲۹-۳۲]، نسبت ۱:۱۰ [۲۸، ۳۳]، و نسبت‌های دیگر [۳۱، ۳۴-۳۷])، در مطالعه حاضر نسبت ۱:۱۰ انتخاب شد. هر نمونه پودر به مقدار ۵ گرم با ۵۰ گرم آب مقطر مخلوط شد و به مدت ۵ دقیقه هم‌زده شد. سپس به مدت یک ساعت در حالت سکون قرار گرفت تا pH آن اندازه‌گیری شود [۲۸، ۳۳]. مطابق شکل ۴، SCG، pH اسیدی برابر با ۶/۹۰ (کمتر از ۷) را نشان داد که پایین‌تر از مقدار مربوط به GGBFS بود. این امر منطقی است، زیرا SCG دارای مواد آلی زیادی بوده (LOI=94)، در حالی که GGBFS حاوی اکسیدهای قلیایی مانند CaO، MgO بوده که در حضور آب، باز (هیدروکسید) تولید کرده و pH را افزایش می‌دهند.





شکل ۴: تست pH

## ۲-۴- نسبت‌های اختلاط

مطابق آنچه در جدول ۲ آمده است، مجموعاً هفت طرح اختلاط متفاوت تهیه شد. این طرح‌ها شامل مخلوط مرجع (Ref) بودند که تنها از GGBFS، آب، هیدروکسید سدیم، سیلیکات سدیم و ماسه تشکیل شده بود. همچنین مخلوط‌های اصلاح شده با جایگزینی SCG به جای GGBFS در محدوده ۱ تا ۳۰٪ انتخاب شدند و نمونه‌ها در نسبت‌های ۱٪ (GSCG-1%)، ۵٪ (GSCG-5%)، ۱۰٪ (GSCG-10%)، ۱۵٪ (GSCG-15%)، ۲۰٪ (GSCG-20%) و ۳۰٪ (GSCG-30%) تهیه شدند. درصدهای کمتر از ۱٪ تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی ملات ندارند و تغییرات مقاومت در این بازه ناچیز است. از سوی دیگر، جایگزینی‌های بیش از ۳۰٪ ممکن است باعث کاهش چسبندگی بین ذرات، افزایش خلأها و در نتیجه کاهش مقاومت نهایی ملات شوند. بنابراین، بازه ۱ تا ۳۰٪ امکان بررسی روند افزایش مقاومت، شناسایی درصد بهینه جایگزینی و جلوگیری از اثرات منفی جایگزینی بیش از حد را فراهم می‌کند.

جدول ۲: طرح اختلاط

بایندر/ فوق روان کننده	فعال کننده قلیایی		بایندر/ ماسه	بایندر		طرح اختلاط
	بایندر/ سدیم سیلیکات	بایندر/ محلول سدیم هیدروکسید (۸ مولار)		SCG	GGBFS	
-	۰/۱۶۶	۰/۳۳	۳/۵	-	۱	Ref
-	۰/۱۶۶	۰/۳۳	۳/۵	۰/۰۱	۰/۹۹	GSCG- 1%
-	۰/۱۶۶	۰/۳۳	۳/۵	۰/۰۵	۰/۹۵	GSCG- 5%
-	۰/۱۶۶	۰/۳۳	۳/۵	۰/۱۰	۰/۹۰	GSCG- 10%
-	۰/۱۶۶	۰/۳۳	۳/۵	۰/۱۵	۰/۸۵	GSCG- 15%
۱/۵	۰/۱۶۶	۰/۳۳	۳/۵	۰/۲۰	۰/۸۰	GSCG- 20%
۵	۰/۱۶۶	۰/۳۳	۳/۵	۰/۳۰	۰/۷۰	GSCG- 30%

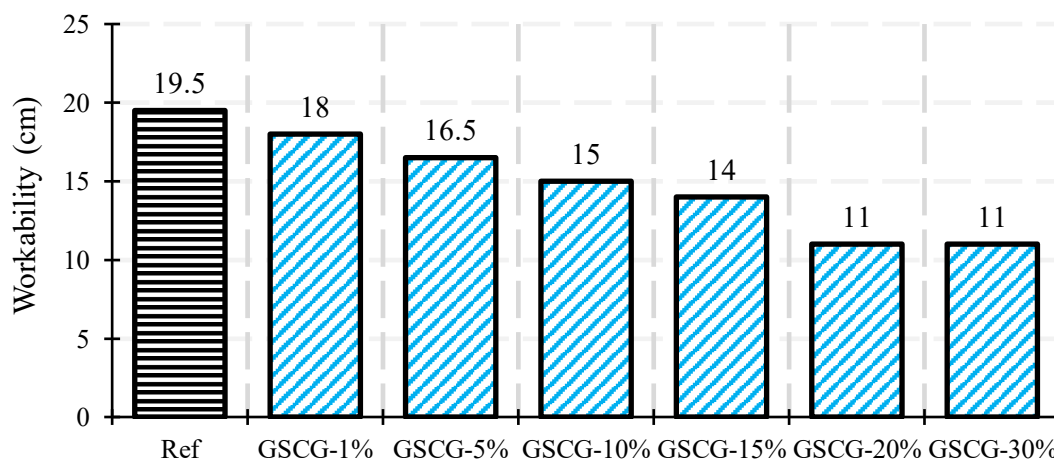
## ۲-۵- آماده سازی نمونه ها

برای اطمینان از پایداری شیمیایی، محلول هیدروکسید سدیم به مدت ۲۴ ساعت پیش از اختلاط تهیه شد؛ این محلول پیش از ساخت ملات با محلول سیلیکات سدیم ترکیب شده و به مدت ۱۵ تا ۳۰ دقیقه همگن سازی شد. محلول فعال کننده قلیایی به داخل مخلوط کن بتن منتقل گردید و سپس GGBFS که از پیش با SCG مخلوط شده بود، به آن اضافه شد تا یکنواختی ترکیب حفظ شود. اختلاط اولیه به مدت ۳۰ ثانیه انجام شد، سپس سنگدانه های ریز به تدریج طی مرحله دوم اختلاط اضافه گردیدند و در نهایت، یک چرخه ۳۰ ثانیه ای دیگر برای همگن سازی کامل انجام شد. قابلیت کارپذیری ملات تازه با استفاده از آزمون میز روانی (ASTM C1437) [۳۸]، ارزیابی شد. سپس ملات در سه نوع نمونه مختلف برای آزمون های مکانیکی قالب گیری شدند: مکعب هایی با ابعاد ۵۰ میلی متر برای آزمون مقاومت فشاری (ASTM C109) [۳۹]، نمونه های بریکت برای آزمون مقاومت کششی (ASTM C190) [۴۰]، و منشورهایی با ابعاد  $40 \times 40 \times 160$  میلی متر برای آزمون مقاومت خمشی (ASTM C348) [۴۱].

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- کارایی

مطابق شکل ۵ در ترکیبات حاوی SCG، با افزایش جایگزینی از ۱ تا ۱۵٪، روانی ملات به صورت پیوسته از مقدار ۱۹/۵ سانتی متر در نمونه Ref به ۱۴ سانتی متر در نمونه GSCG-15% کاهش یافت، که معادل ۲۸٪ کاهش بود. این کاهش کارایی به قدری محسوس بود که در سطوح بالاتر، استفاده از فوق روان کننده برای حفظ روانی الزامی شد. کاهش روانی در این ترکیبات عمدتاً ناشی از ویژگی های فیزیکی و شیمیایی SCG است. جذب بالای آب به دلیل حضور مواد آلی زیاد (LOI=94%) و همچنین سطح ویژه بالا، موجب افزایش ویسکوزیته مخلوط شده و در نتیجه قابلیت جریان آن را کاهش می دهد.

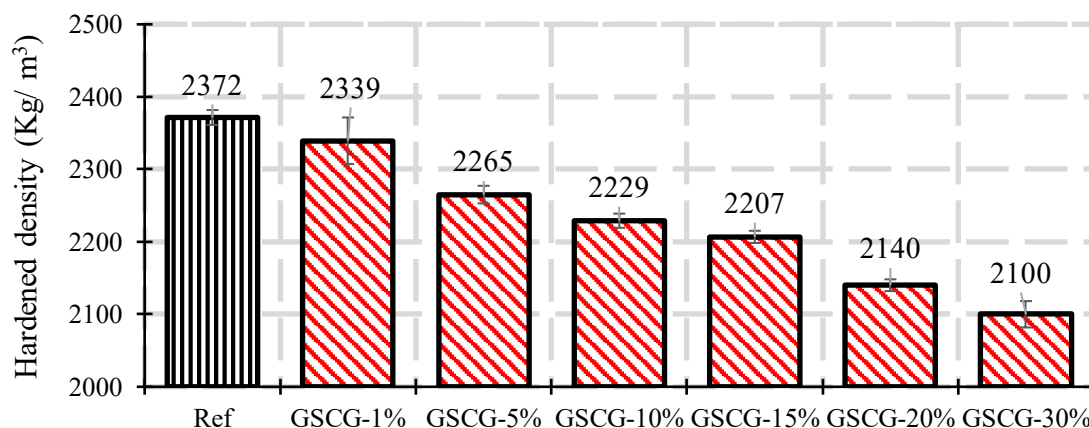


شکل ۵: نتایج کارایی

## ۳-۲- چگالی سخت شونده

چگالی ملات سخت شده نشان دهنده ی تراکم ساختاری و یکپارچگی آن پس از گیرش و سخت شدن است و به طور مستقیم بر مقاومت مکانیکی و دوام تأثیر می گذارد. به منظور ارزیابی تأثیر جایگزینی SCG بر چگالی سخت شده، نمونه ها به مدت ۲۸ روز عمل آوری شدند و سپس چگالی آن ها اندازه گیری و تحلیل گردید (شکل ۶). نمونه مرجع (Ref) بیشترین چگالی را با مقدار ۲۳۷۲ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آورد. با افزایش درصد جایگزینی SCG، کاهش قابل توجهی در چگالی نمونه های GSCG مشاهده شد که این کاهش در نمونه

GSCG-30% بیشترین مقدار را داشت (حدود ۱۱٪ کمتر از Ref). این کاهش چگالی به عواملی نظیر چگالی نسبی کمتر SCG، افزایش تخلخل خمیر ژئوپلیمری، و توزیع ناهمگن ذرات نسبت داده می‌شود.

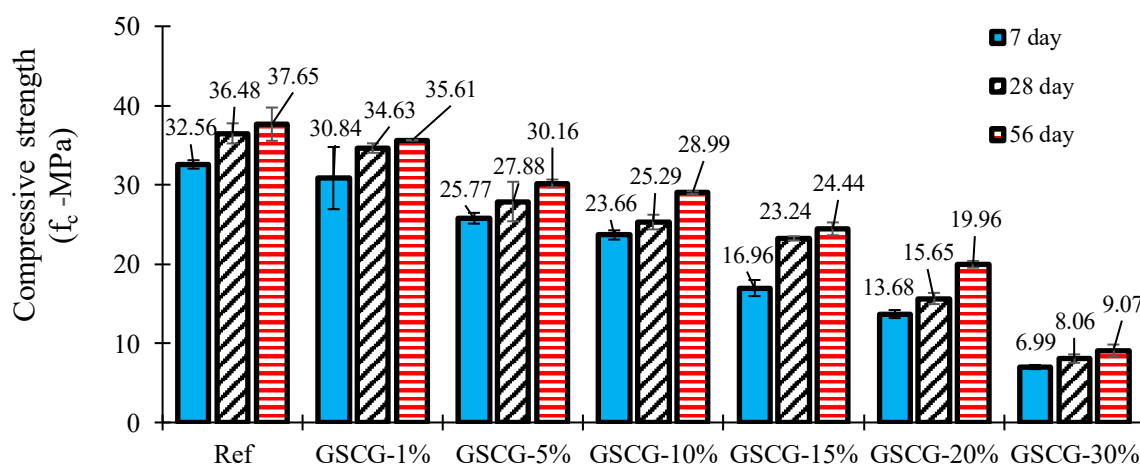


شکل ۶: تغییرات چگالی سخت شده ملات

### ۳-۳- مقاومت فشاری

شکل ۷ مقاومت فشاری ( $f_c$ ) تمامی نمونه‌ها را در سنین عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روز مطابق با استاندارد (ASTM C109) نشان می‌دهد که از رابطه (۱) محاسبه شد، و در آن  $f_c$  مقاومت فشاری نمونه برحسب مگاپاسکال (MPa)،  $P$  بار اعمال شده در لحظه شکست برحسب نیوتن (N) و  $A$  سطح مقطع نمونه تحت بارگذاری برحسب میلی‌متر مربع (۵۰\*۵۰) است. در تمامی سنین عمل‌آوری، طرح-های GSCG مقاومت کمتری نسبت به نمونه Ref نشان دادند و این کاهش با افزایش درصد جایگزینی SCG تشدید یافت. افت مقاومت در این ترکیبات به سه عامل اصلی نسبت داده می‌شود: اول، مطابق با آنالیز XRF (جدول ۱) جایگزینی GGBFS با SCG موجب کاهش محتوای آلومینوسیلیکاتی شده و در نتیجه تشکیل ژل‌های مقاوم‌کننده Si-O-Al محدود می‌شود؛ دوم، کاهش چگالی نمونه‌های سخت‌شده (شکل ۶) که ارتباط مستقیمی با افت مقاومت دارد؛ و سوم، ساختار متخلخل ذرات SCG (شکل ۳ الف)) که موجب کاهش تراکم و فشردگی ماتریس خمیر ژئوپلیمری می‌شود [۳]. این عوامل در مجموع باعث تضعیف عملکرد مکانیکی ملات‌های حاوی SCG می‌شوند.

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

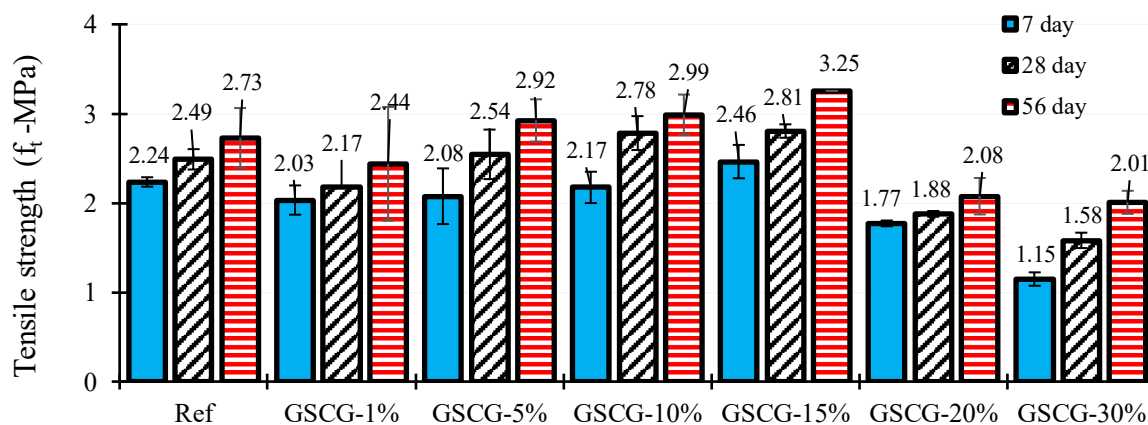


شکل ۷: مقاومت فشاری

## ۳-۴- مقاومت کششی

آزمون مقاومت کششی مستقیم ( $f_t$ ) یکی از روش‌های رایج برای ارزیابی توانایی ملات در برابر تنش کششی است. در این مطالعه، نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM C190 در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز در شکل ۸ ارایه شده است، که  $f_t$  مطابق با رابطه (۲) محاسبه شد. در آن  $f_t$  مقاومت کششی نمونه برحسب مگاپاسکال (MPa)،  $T$  بار اعمال شده در لحظه شکست برحسب نیوتن (N) و  $A$  سطح مقطع نمونه تحت بارگذاری برحسب میلی‌متر مربع ( $۲۵/۴ \times ۲۵/۴$ ) است. در سن ۷ روز، نمونه‌های GSCG بجز GSCG-15% مقاومت کششی کمتری نسبت به نمونه Ref نشان دادند که این موضوع عمدتاً ناشی از تأخیر در واکنش‌های هیدراسیون و پوزولانی است. در سنین بالاتر، بهبود عملکرد کششی به افزایش فعالیت پوزولانی و همچنین حضور الیاف سلولزی موجود در SCG که در نمودارهای XRD و FTIR (شکل ۳ (ب و پ)) نیز مشاهده شد، نسبت داده می‌شود، که به‌عنوان تقویت‌کننده میکروسکوپی برای کاهش ریزترک‌ها عمل کردند [۳]. در میان تمام ترکیبات GSCG، نمونه GSCG-15% در تمامی سنین عمل‌آوری بیشترین مقاومت کششی را از خود نشان داد و در سن ۲۸ و ۵۶، به ترتیب ۱۳٪ و ۱۹٪ افزایش مقاومت نسبت به نمونه Ref داشت. در مقابل، ترکیب GSCG-30% کمترین مقاومت کششی را ثبت کرد، به طوری که در سن ۲۸ و ۵۶ به ترتیب کاهش ۳۶٪ و ۲۶٪ نسبت به نمونه Ref داشت که این امر به کاهش شدید محتوای GGBFS و کاهش بیش از حد مقاومت فشاری آن نسبت داده می‌شود.

$$f_t = \frac{T}{A} \quad (۲)$$

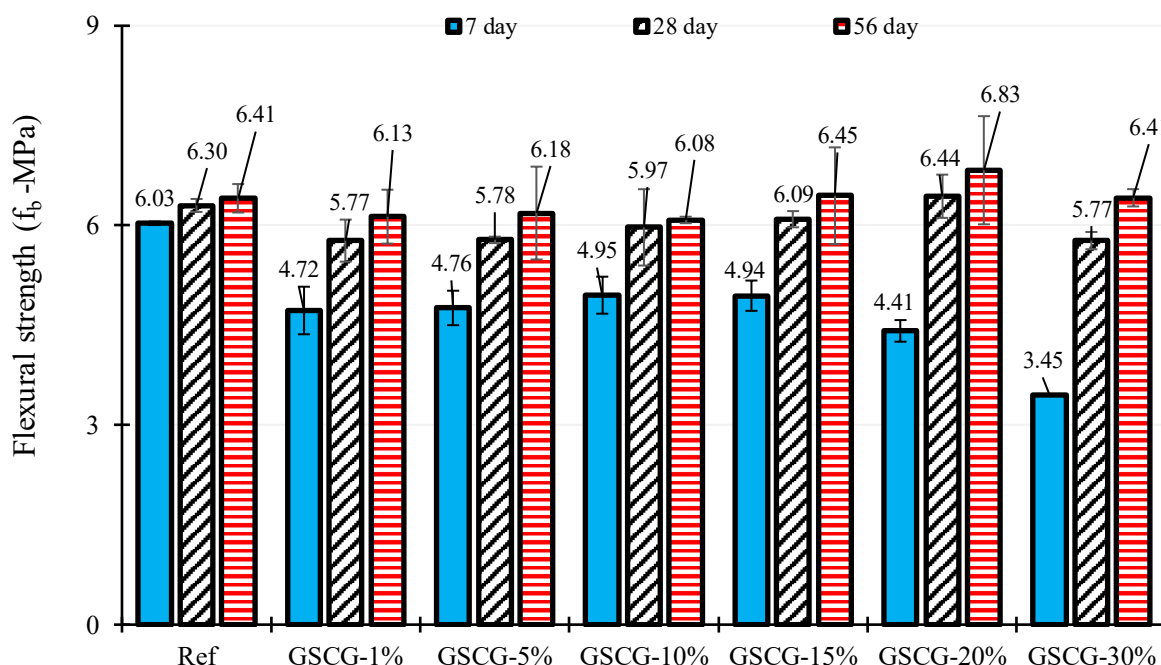


شکل ۸: مقاومت کششی

## ۳-۵- مقاومت خمشی

آزمون مقاومت خمشی ( $f_b$ ) یکی از ارزیابی‌های مکانیکی کلیدی برای سنجش توانایی ملات در تحمل تنش‌های کششی ناشی از بارهای خمشی است. این آزمون معمولاً مطابق با استانداردهای بین‌المللی مانند ASTM C348 انجام می‌شود و مقاومت نهایی ملات تحت بارگذاری خمشی را مطابق با رابطه (۳) مشخص می‌سازد، که در آن  $f_b$  مقاومت خمشی نمونه برحسب مگاپاسکال (MPa)،  $P$  بار اعمال شده در لحظه شکست برحسب نیوتن (N)،  $L$  طول نمونه برحسب میلی‌متر،  $b$  عرض مقطع برحسب میلی‌متر و  $d$  ارتفاع مقطع برحسب میلی‌متر است. مطابق شکل ۹ در مطالعه حاضر، تمامی نمونه‌های GSCG در سن ۷ روز مقاومت کمتری نسبت به نمونه Ref از خود نشان دادند که علت آن به واکنش‌های پوزولانی کند و کاهش محتوای GGBFS در طرح اختلاط بازمی‌گردد. با این حال، در سنین بالاتر و با فعال شدن واکنش‌های پوزولانی و همچنین اثر تقویت‌کنندگی الیاف سلولزی موجود در SCG [۳، ۴۲] که مطابق شکل ۳ (ب و پ) نیز به اثبات رسید، افزایش قابل توجهی در مقاومت خمشی مشاهده شد. به‌عنوان نمونه، مخلوط GSCG-20% در سنین ۲۸ و ۵۶ روز به ترتیب حدود ۲٪ و ۷٪ مقاومت بیشتری نسبت به نمونه Ref کسب کرد. به‌طور کلی، تأثیر افزودن SCG بر مقاومت خمشی در سنین ۲۸ و ۵۶ روز تقریباً با نمونه شاهد برابر بوده و تفاوت چشمگیری ندارد، که این یک امتیاز ویژه برای یک زباله آلی محسوب خواهد شد.

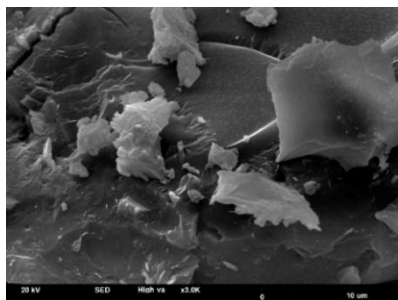
$$f_b = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3)$$



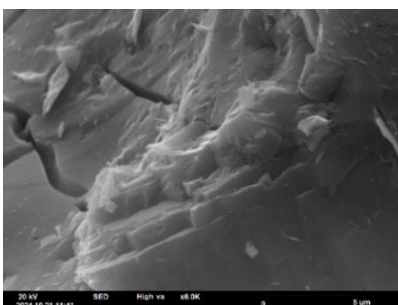
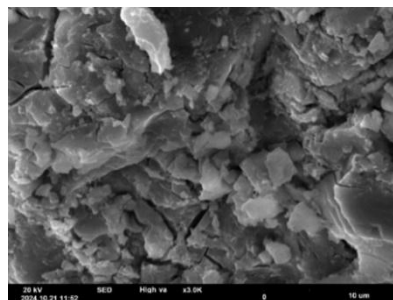
شکل ۹: مقاومت خمشی

### ۳-۶- آنالیز SEM

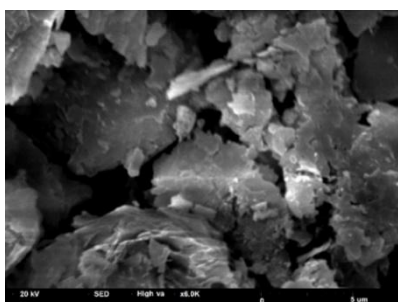
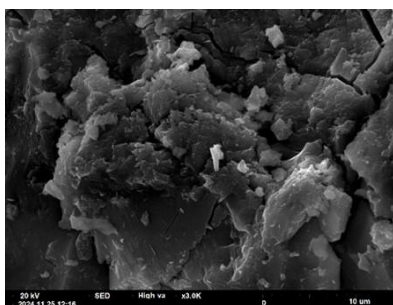
تصویر ارایه شده در شکل ۱۰، آنالیز SEM مربوط به سه نمونه ملات ژئوپلیمری شامل نمونه مرجع (Ref)، نمونه با ۱٪ جایگزینی تفاله قهوه (GSCG-1%) و نمونه با ۳۰٪ جایگزینی تفاله قهوه (GSCG-30%) در بزرگنمایی‌های مختلف نشان داده شده‌اند. در تصاویر مربوط به نمونه Ref، ساختار نسبتاً فشرده و همگنی دیده شده که همراه با ترک‌های ریز و خلل و فرج محدود همراه بود. اما به‌طور کلی سطح دارای پیوستگی بالاست و فاز آمورف به خوبی در زمینه دیده می‌شود. این امر نشان‌دهنده واکنش‌پذیری مناسب اجزای اولیه و تشکیل فاز ژئوپلیمری به‌صورت یکنواخت است. در نمونه GSCG-1%، ساختار هنوز نسبتاً فشرده باقی مانده اما در مقایسه با نمونه Ref، حضور برخی ذرات لایه‌لایه و همچنین ترک‌های کوچک‌تر و توده‌های تردتر مشاهده می‌شود. بنظر می‌رسد در این میزان جایگزینی، تفاله قهوه هنوز تأثیر منفی جدی بر پیوستگی شبکه ژئوپلیمری نگذاشته، اما برخی اختلالات موضعی در ساختار دیده می‌شود که می‌تواند به دلیل واکنش‌پذیری کمتر یا مداخله فیزیکی ذرات آلی باشد. اما نمونه GSCG-30% دارای ساختار کاملاً متخلخل و فاقد انسجام مناسب است. ذرات زیادی با شکل نامنظم و توده‌های شکسته دیده می‌شوند و سطح پر از ترک‌ها و خلل و فرج در اندازه‌های مختلف است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش مقدار تفاله قهوه به ۳۰٪، تشکیل ژل ژئوپلیمری به‌شدت کاهش یافته و محصول نهایی ساختاری ناپیوسته و ضعیف‌تر دارد. حضور زیاد مواد آلی و غیرواکنش‌پذیر باعث کاهش تراکم فاز پیوندی و افزایش فضاهای خالی شده است.



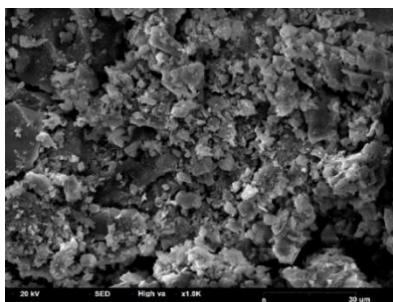
(الف)



(ب)



(پ)

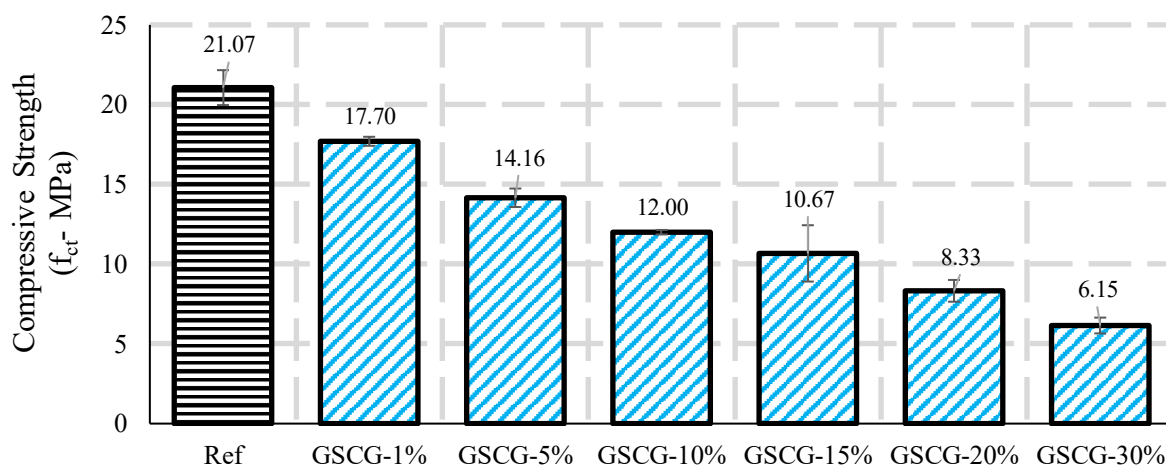


شکل ۱۰: آنالیز SEM نمونه ملات‌ها، (الف) Ref.، (ب) GSCG- 1%، (پ) GSCG- 30%

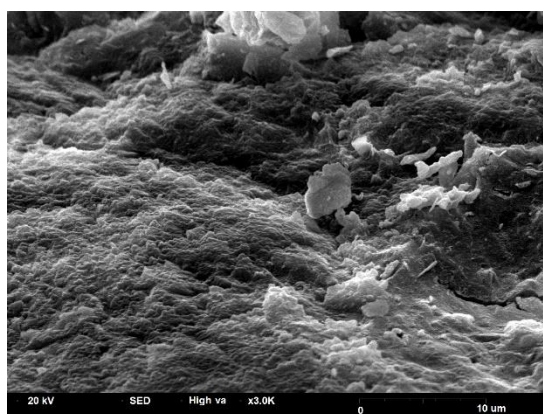
### ۳-۷- مقاومت فشاری پس از حرارت

برای ارزیابی مقاومت فشاری پس از حرارت، نمونه‌ها پس از ۵۶ روز عمل‌آوری، تحت یک فرآیند حرارتی کنترل‌شده قرار گرفتند که طی آن دما در ۵ ساعت به ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد رسید و به مدت ۲ ساعت در این دما باقی ماند. سپس نمونه‌ها به آرامی تا دمای محیط سرد شدند تا از بروز تنش‌های حرارتی جلوگیری شود. مطابق شکل ۱۱، که مقاومت فشاری پس از حرارت را نشان می‌دهد، با افزایش سطح جایگزینی SCG، مقاومت فشاری به‌طور پیوسته کاهش یافت، به‌طوری که مقاومت از ۲۱/۰۷ مگاپاسکال در نمونه شاهد به ۶/۱۵ مگاپاسکال در نمونه GSCG-30% رسید که معادل کاهشی حدود ۷۰/۸٪ است. همچنین درصد کاهش مقاومت فشاری نسبت به قبل از حرارت‌دهی، برای نمونه شاهد ۴۴٪ و برای نمونه GSCG-30% حدود ۷۸٪ بوده است که به ترتیب کمترین و بیشترین میزان افت در میان تمام طرح‌های اختلاط است. کاهش مقاومت بیشتر نمونه‌های GSCG را می‌توان مرتبط با مواد آلی موجود در SCG دانست. زیرا این ترکیبات آلی در دماهای بالا دچار تجزیه حرارتی شده و به‌همراه آب پیوندی (باند ۱۶۴۹/۲۳ سانتی‌متر<sup>-۱</sup>، شکل ۳ (پ)) و کربنات‌ها (باندهای ۲۳۶۵/۵۵، ۶۷۳/۷۸، ۸۷۸/۲۵ و ۱۳۸۵/۰۱ سانتی‌متر<sup>-۱</sup>، شکل ۳ (پ))، مقادیر زیادی گازهای فرار (شامل بخار آب، CO<sub>2</sub> و CO) تولید می‌کنند. خروج این گازها از ماتریس بتن، منجر به ایجاد فشار داخلی، تشکیل تخلخل‌های وسیع و ریزترک‌ها شده که به شدت پیوستگی، یکپارچگی و ظرفیت باربری ساختار ژئوپلیمر را تضعیف کرده و در نهایت کاهش چشمگیر مقاومت فشاری را به دنبال دارد. شکل ۱۲ نیز آنالیز SEM نمونه‌های

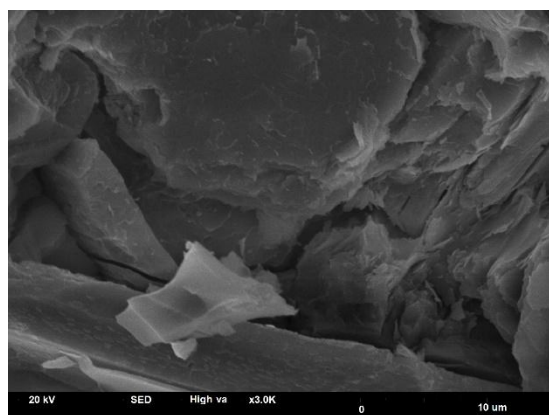
Ref، GSCG-10% و GSCG-15% را پس از حرارت دهی نشان می دهد، که به وضوح آسیب دیدگی بیشتر نمونه های GSCG نسبت به Ref را نمایان می کند.



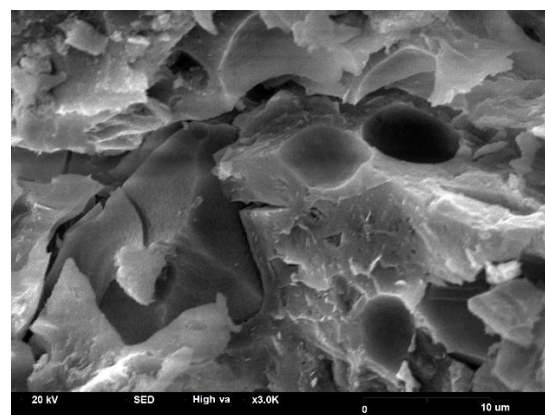
شکل ۱۱: مقاومت فشاری پس از حرارت



الف



پ



ب

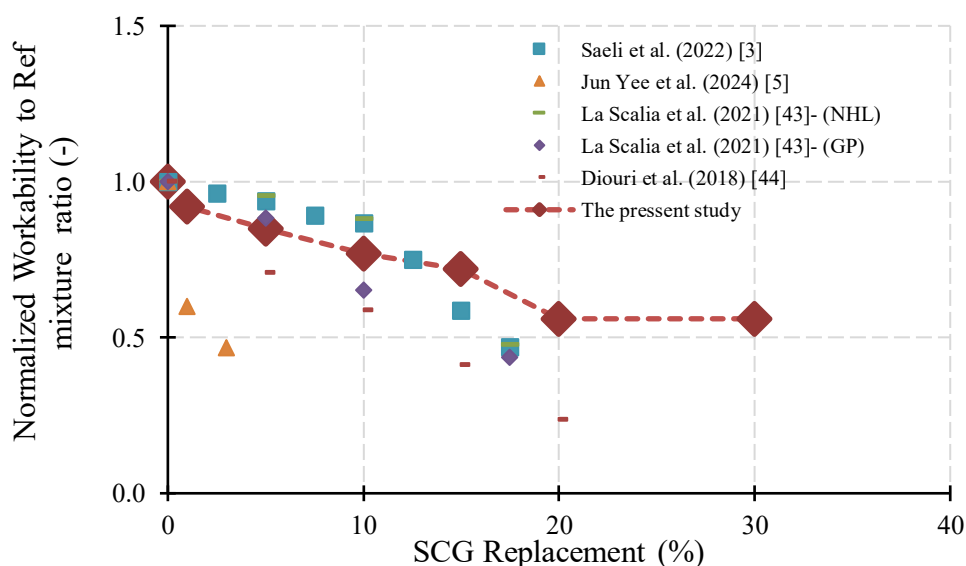
شکل ۱۲: آنالیز SEM نمونه ها پس از حرارت دهی، الف) Ref، ب) GSCG-10% و پ) GSCG-15%

## ۴- صحت‌سنجی

به منظور ارزیابی صحت نتایج مطالعه حاضر، نتایج کارایی، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی نمونه‌های تهیه‌شده، با نتایج گزارش‌شده در منابع معتبر علمی پس از نرمال‌سازی (نسبت کارایی، مقاومت فشاری و خمشی مخلوط‌های حاوی SCG در هر مرجع به کارایی، مقاومت فشاری و خمشی نمونه شاهد همان مرجع) مورد مقایسه قرار گرفت. در این راستا، تنها مطالعاتی مدنظر قرار گرفتند که در آن‌ها از SCG به‌عنوان بخشی از ترکیب مواد، استفاده شده بود.

## ۴-۱- کارایی

شکل ۱۳ نسبت‌های کارایی نرمال‌شده (نسبت کارایی مخلوط‌های حاوی SCG به کارایی نمونه شاهد) در مطالعه حاضر و سایر مراجع [۳، ۵، ۴۳، ۴۴] را نشان می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهد که افزودن SCG باعث کاهش روانی ملات می‌شود و این اثر در سطوح جایگزینی بالاتر شدیدتر می‌شود. مطالعه [۴۳] مقادیر نرمال‌شده روانی ۰/۴۷۶ برای ملات‌های آهکی<sup>۱۷</sup> (NHL) و ۰/۴۳۵ برای ملات‌های ژئوپلیمری<sup>۱۸</sup> (GP) را در جایگزینی ۱۷/۵٪ ماسه ارایه داد، در حالی که مطالعه [۳] عدد ۰/۴۶۹ را گزارش کرد. مطالعه [۴۴] کاهش شدیدتری تا ۰/۲۳۵ را در جایگزینی ۲۰٪ ارایه داد. این نتایج منعکس‌کننده سطح ویژه بالاتر و اندازه ذرات ریزتر SCG نسبت به ماسه است. اما در مطالعه حاضر برخلاف پژوهش‌های ذکر شده، SCG به‌عنوان جایگزین بایندر (GGBFS) استفاده شد که در ۱۵٪ جایگزینی به مقدار ۰/۷۸ و در ۲۰٪ جایگزینی و استفاده از ۱۵٪ فوق روان‌کننده، به مقدار ۰/۵۶ رسید.



شکل ۱۳: مقایسه نرمالایز نتایج کارایی مطالعه حاضر و پژوهش‌های پیشین

## ۴-۲- مقاومت فشاری

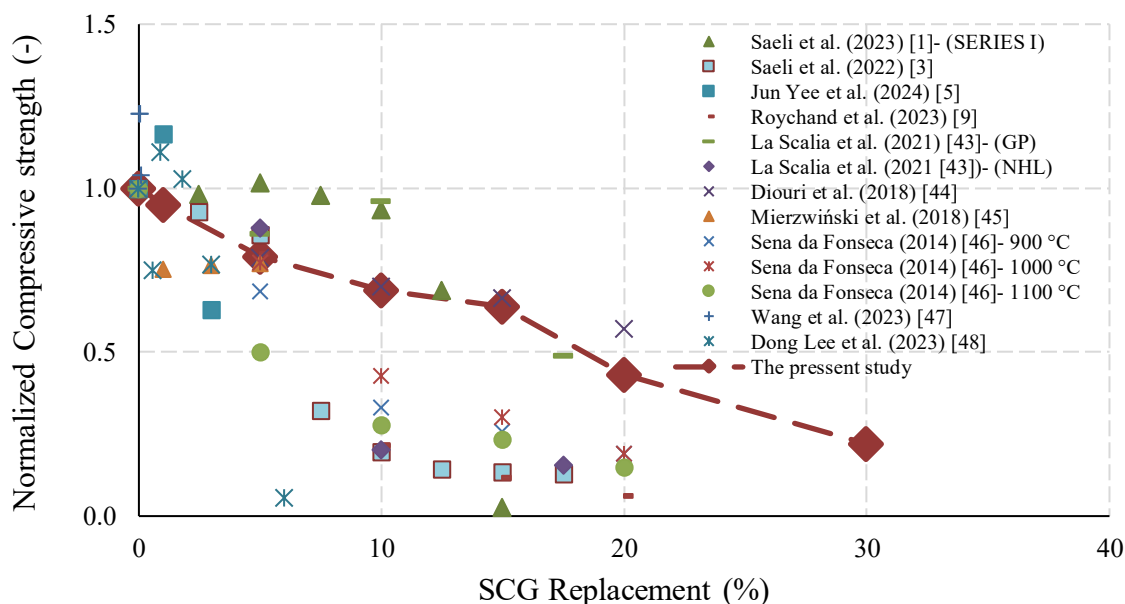
شکل ۱۴، نسبت‌های مقاومت فشاری نرمال‌شده (نسبت مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی SCG به مقاومت فشاری نمونه شاهد) پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، در مطالعه حاضر و سایر مراجع [۱، ۳-۵، ۹، ۴۳-۴۸] ارایه شده است. در اغلب موارد (بجز در معدود درصد‌های پایین جایگزینی)، افزایش درصد جایگزینی منجر به کاهش مقاومت فشاری شد. برای نمونه مطالعه [۱] گزارش کرد که جایگزینی ماسه با

<sup>17</sup> Natural Hydraulic Lime

<sup>18</sup> Geopolymer



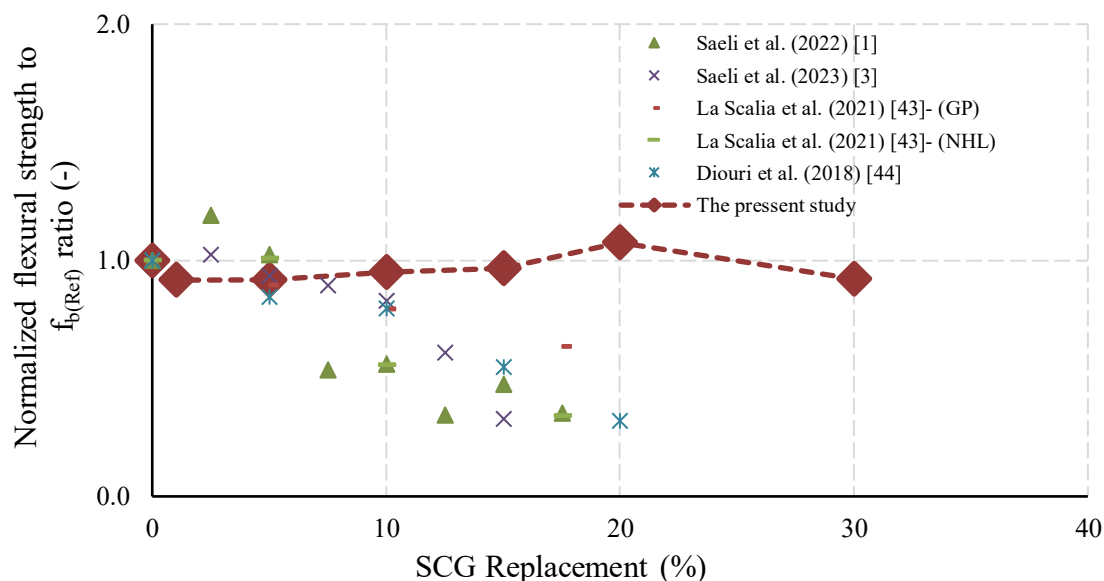
SCG تا ۱۰٪ تأثیر منفی قابل توجهی بر مقاومت فشاری نداشت و حتی نمونه‌های با ۵ تا ۱۰٪ جایگزینی، مقادیری بالاتر از ۱/۰ را نشان دادند. در مطالعه [۳]، مقدار بهینه جایگزینی SCG برای ماسه برابر با ۵٪ تعیین شد، در حالی که درصدهای بالاتر منجر به کاهش ۴۰٪ تا ۶۰٪ مقاومت، نسبت به نمونه مرجع شد. این افت عملکرد به وجود ذرات آلی متخلخل در SCG نسبت داده شد که از تراکم مؤثر ماتریس سیمانی جلوگیری کرده و پیوند ضعیفی میان فازهای باربر ایجاد می‌کنند. در مطالعه حاضر نیز، جایگزینی چسباننده با SCG موجب افت شدید مقاومت شد، به طوری که جایگزینی ۳۰٪ منجر به کاهش ۷۸٪ مقاومت فشاری گردید. مطالعه [۴۸] مقدار بهینه جایگزینی SCG را حدود ۰/۹٪ گزارش کرد که منجر به افزایش ۱۱٪ در مقاومت شد. به طور مشابه مطالعه [۴۶] نشان داد که دمای بالاتر (۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) منجر به حفظ بهتر مقاومت در سرامیک‌های حاوی SCG می‌شود و در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش مقاومت نسبت به سایر دماها کمتر است. مطالعه [۵] افزایش ۱۰٪ در مقاومت را با جایگزینی ۱/۱٪ گزارش کرد، که این بهبود را به خاصیت جذب رطوبت SCG نسبت داد که امکان جذب آب اضافی موجود در ماتریس سیمانی را فراهم می‌کند. مطالعه [۴۷] نشان داد غلظت کم عصاره SCG (کمتر از ۰/۰۵٪) اثر تسریع قابل ملاحظه‌ای بر هیدراسیون سیمان خواهد داشت، در حالی که با افزایش غلظت، اثر بازدارندگی هیدراسیون تدریجاً آشکار شد. در مجموع، مقاومت فشاری ملات‌های سیمانی حاوی ۰/۰۵٪ عصاره SCG در سن ۲۸ روز ۱۸/۶٪ افزایش نشان داد که این به دلیل تشکیل محصولات هیدراسیون بیشتر، کاهش ۲۵/۱٪ در تخلخل و کریستال‌های ضخیم  $Ca(OH)_2$  بود.



شکل ۱۴: مقایسه نرمالایز نتایج مقاومت فشاری مطالعه حاضر و پژوهش‌های پیشین

#### ۴-۳- مقاومت خمشی

در شکل ۱۵، نسبت مقاومت خمشی نرمال شده (نسبت مقاومت خمشی مخلوط‌های حاوی SCG به مقاومت خمشی نمونه شاهد) پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در مطالعه حاضر، با نتایج داده‌های موجود در منابع [۱، ۳، ۴۳، ۴۴] مقایسه شده است. در مطالعات مربوط به جایگزینی SCG با ماسه [۱، ۳، ۴۳، ۴۴] پراکندگی قابل توجهی در داده‌ها مشاهده می‌شود که می‌توان آن را به دلایل: (۱) کاهش پایداری ساختاری ناشی از کاهش محتوای ماسه، و (۲) ظرفیت باربری پایین‌تر SCG در قیاس با ماسه نسبت داد. مطالعه حاضر بهترین پایداری نتایج را در میان سایر مطالعات داشت که حتی مقاومت در درصدهای بالاتر جایگزینی (۲۰٪) بیشتر از نمونه شاهد بود که از دلایل آن می‌توان به حضور سلولز و همچنین عدم جایگزینی SCG با ماسه اشاره کرد.



شکل ۱۵: مقایسه نرمالیز نتایج مقاومت خمشی مطالعه حاضر و پژوهش‌های پیشین

## ۵- نتیجه گیری

در سال‌های اخیر، استفاده از پسماندهای زیستی به‌عنوان جایگزین بخشی از مواد سنتی در ملات‌های ساختمانی به‌دلیل مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است. پسماند قهوه به‌عنوان یکی از این مواد آلی، قابلیت جایگزینی بخشی از سرباره کوره بلند را دارد، اما تأثیر آن بر خواص مکانیکی و دوام ملات‌های ژئوپلیمری هنوز نیازمند بررسی دقیق است. این مطالعه به‌منظور ارزیابی تأثیر درصد‌های مختلف جایگزینی پسماند قهوه بر کارایی، مقاومت مکانیکی در سنین مختلف عمل‌آوری و رفتار حرارتی ملات‌ها انجام شده است تا بتوان با شناسایی نقاط قوت و ضعف، راهکارهای بهینه‌سازی استفاده از این ماده را پیشنهاد داد. در ادامه، نتایج اصلی به تفصیل ارائه می‌شود:

۱. کارایی ملات با افزایش درصد جایگزینی پسماند قهوه کاهش یافت، به‌طوری‌که در سطح ۱۵٪، کاهش چشمگیری در روانی نسبت به نمونه بدون پسماند مشاهده شد. این موضوع به ویژگی‌های فیزیکی پسماند از جمله جذب آب بالا و سطح ویژه زیاد مربوط می‌شود.
۲. مقاومت فشاری در کلیه سنین عمل‌آوری (۷، ۲۸ و ۵۶ روز) با افزایش درصد پسماند قهوه کاهش یافت.
۳. مقاومت کششی نمونه‌های حاوی پسماند قهوه در سنین اولیه در اکثریت طرح‌ها، پایین‌تر از نمونه مرجع بود، اما در سنین بالاتر عملکرد مطلوب‌تری از این نمونه‌ها دیده شد. بیشترین افزایش مقاومت کششی در نمونه حاوی ۱۵٪ پسماند قهوه ثبت شد که در سن ۵۶ روز، حدود ۱۹٪ بیشتر از نمونه مرجع مقاومت داشت.
۴. مقاومت خمشی در سنین اولیه کاهش یافت، اما با گذشت زمان و در سنین ۲۸ و ۵۶ روز، عملکرد تمامی نمونه‌ها به سطحی نزدیک به نمونه مرجع رسید. در این میان، نمونه حاوی ۲۰٪ پسماند عملکرد مطلوبی از خود نشان داد و در سن ۵۶ روز، حدود ۷٪ افزایش مقاومت نسبت به نمونه مرجع ثبت کرد.
۵. رفتار حرارتی ملات‌ها تحت تأثیر حضور پسماند قهوه قرار گرفت. با افزایش درصد جایگزینی، مقاومت فشاری پس از حرارت‌دهی کاهش یافت و نمونه‌های حاوی پسماند نسبت به نمونه مرجع افت بیشتری در مقاومت فشاری تجربه کردند.

## ۵- پیشنهادات

اگرچه استفاده از پسماند قهوه به عنوان جایگزین سرباره مزایای زیست محیطی قابل توجهی دارد، اما مشکلاتی نظیر کاهش مقاومت فشاری، افت کارایی و کاهش پایداری حرارتی، محدودیت‌هایی را ایجاد می‌کند. به منظور رفع این معایب، پیشنهاد می‌شود پسماند قهوه ابتدا تحت فرآیندهای تبدیلی مانند پیرولیز برای تولید بایوچار یا سوزاندن کامل جهت تولید خاکستر قهوه قرار گیرد. این روش‌ها با حذف ترکیبات آلی و اصلاح ساختار فیزیکی و شیمیایی، می‌توانند عملکرد مکانیکی و حرارتی ملات‌های ژئوپلیمری را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشند و در عین حال کاربرد پایدار و اقتصادی این مواد را ممکن سازند.

## مراجع

- [1] Saeli, M. et al. (2023). Development of energy-saving innovative hydraulic mortars reusing spent coffee ground. *Journal of Cleaner Production*, 399, 136664.
- [2] Touil, M., Lachheb, A., Saadani, R., Sanbi, M., Talidi, A. & Rahmoune, M. (2022). Experimental investigation on the combined effect of water mixing ratio and spent coffee grounds on plaster's properties. *Thermal Science and Engineering Progress*, 36, 101488.
- [3] Saeli, M., Capela, M., Campisi, T., Seabra, M., Tobaldi, D. & La Fata, C. (2022). Architectural technologies for life environment: Spent coffee ground reuse in lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 319, 126079.
- [4] Lee, J., Song, H., Park, J. & Lee, S. (2023). Recycling Spent Coffee Grounds on Permeable Interlocking Concrete Paving Blocks. *Advances in Environmental and Engineering Research*, 4(4), 1-11.
- [5] Yee, J., Khong, S., Tee, K., Jolius, G. & Chin, S. (2024). Spent coffee grounds enhanced compressive strength of cement mortar. *Discover Applied Sciences*, 6(7), 379.
- [6] Bhattacharya, T., Khan, A., Ghosh, T., Kim, J. & Rhim, J. (2024). Advances and prospects for biochar utilization in food processing. *Sustainable Materials and Technologies*, e00831.
- [7] Laird, D., Brown, R., Amonette, J. & Lehmann, J. (2009). *Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar*. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3(5), 547-562.
- [8] Atabani, A. et al. (2022). A state-of-the-art review on spent coffee ground (SCG) pyrolysis. *Chemosphere*, 286(Pt 2), 131730.
- [9] Roychand, R., Kilmartin-Lynch, S., Saberian, M., Li, J., Zhang, G. & Li, C. (2023). Transforming spent coffee grounds into a valuable resource for concrete enhancement. *Journal of Cleaner Production*, 419, 138205.
- [10] Na, S., Lee, S. & Youn, S. (2021). Experiment on Activated Carbon from Waste Coffee Grounds. *Symmetry*, 13(4), 619.
- [11] Shao, J. et al. (2024). Evaluation on modified treatment of spent coffee grounds on concrete performance. *Journal of Building Engineering*, 97, 110910.
- [12] Anisah, A. et al. (2021). Furnace temperature of coffee grounds as cementitious material. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol: IOP Publishing, 022087.
- [13] Lin, L.-K., Kuo, T.-M., & Hsu, Y.-S. (2016). The application and evaluation research of coffee residue ash into mortar. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 18(3), 541-551. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0351-5>

- [14] Kua, T., Imteaz, M., Arulrajah, A. & Horpibulsuk, S. (2018). Environmental viability of Alkali Activated Material. *International Journal of Sustainable Engineering*, 12(4), 223-232.
- [15] Kua, T., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Du, Y. & Shen, S. (2016). Strength assessment of spent coffee grounds-geopolymer cement. *Construction and Building Materials*, 115, 565-575.
- [16] Arulrajah, A., Kua, T., Suksiripattanapong, C. & Horpibulsuk, S. (2017). *Stiffness and strength properties of spent coffee grounds-recycled glass geopolymers*. Road Materials and Pavement Design, 20(3), 623-638.
- [17] Vivek, S. & Dhinakaran, G. (2022). Strength of self-compacting concrete. In: F. Colangelo, R. Cioffi & I. Farina (Eds.), *Handbook of Sustainable Concrete* (pp. 387-405). Cambridge: Woodhead Publishing.
- [18] El-Chabib, H. (2020). Properties of SCC with cementing materials. In: R. Siddique (Ed.), *Self-Compacting Concrete* (pp. 283-308). Cambridge: Woodhead Publishing.
- [19] García-Lodeiro, I., Palomo, A. & Fernández-Jiménez, A. (2007). Alkali-aggregate reaction in fly ash systems. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 175-183.
- [20] Fernández-Jiménez, A., Palomo, A. & Criado, M. (2005). Microstructure development of alkali-activated fly ash cement. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1204-1209.
- [21] McDonald, M. & Thompson, J. (2005). *Sodium silicate: A binder for the 21st century*. Pennsylvania: PQ Corporation.
- [22] Le, T., Park, S., Lee, J. & Lee, D. (2021). Strength of spent coffee grounds and oyster shells cemented with GGBS- based alkaline-activated materials. *Construction and Building Materials*, 267, 120986.
- [23] Wang, K., Mishulovich, A. & Shah, S. (2007). Activations of cement-kiln dust and fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(1), 112-119.
- [24] Lima, F., Gomes, T., & Moraes, J. (2023). Effect of coffee husk ash as alkaline activator in one-part alkali-activated binder. *Construction and Building Materials*, 362, 129799.
- [25] Ramos, F. J. H. T. V., Marques, M. d. F. V., de Oliveira Aguiar, V., Gondim, F. F., dos Santos Gomes, L., & de Oliveira Gomes, P. H. (2024). Geopolymer composites reinforced with silverskin fibers from the coffee industry waste. *Journal of Materials Research and Technology*, 31, 3287-3300.
- [26] Onisei, S., Lesage, K., Blanpain, B., & Pontikes, Y. (2015). Early age microstructural transformations of an inorganic polymer made of fayalite slag. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(7), 2269-2277.
- [27] Adediran, A., Yliniemi, J., Moukannaa, S., Ramteke, D., Perumal, P., & Illikainen, M. (2023). Enhancing the thermal stability of alkali-activated Fe-rich fayalite slag-based mortars by incorporating ladle and blast furnace slags: Physical, mechanical and structural changes. *Cement and Concrete Research*, 166, 107098.
- [28] Manso Blanco, S., & Aguado de Cea, A. (2017). A review of sample preparation and its influence on pH determination in concrete samples. *Materiales de Construcción*, 67(325), 1-10.
- [29] Song, H.-W., Saraswathy, V., Muralidharan, S., Lee, C.-H., & Thangavel, K. (2009). Role of alkaline nitrites in the corrosion performance of steel in composite cements. *Journal of Applied Electrochemistry*, 39, 15-22.
- [30] Wang, K., Mishulovich, A., & Shah, S. P. (2007). Activations and properties of cementitious materials made with cement-kiln dust and class F fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(1), 112-119.
- [31] Räsänen, V. & Penttala, V. (2004). pH measurement of concrete powder suspension. *Cement and Concrete Research*, 34(5), 813-820.

- [32] Mori, T., Nonaka, T., Tazaki, K., Koga, M., Hikosaka, Y. & Noda, S. (1992). Interactions on microbial corrosion of concrete. *Water Research*, 26(1), 29-37.
- [33] Loh, P., Shafiqh, P. & Ibrahim, Z. (2024). pH measurement of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 411, 134525.
- [34] Haga, K., Shibata, M., Hironaga, M., Tanaka, S. & Nagasaki, S. (2002). Silicate anion change in calcium silicate hydrate. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 39(5), 540-547.
- [35] Grubb, J., Limaye, H. & Kakade, A. (2007). Testing pH of concrete. *Concrete International*, 29(4), 78.
- [36] Payam, S., Sumra, Y. & Zainah, I. (2021). Variables affecting pH of cement mortars. *Journal of Wuhan University of Technology*, 36(5), 689-696.
- [37] Pavlík, V. (2000). Water extraction of ions from cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 30(6), 895-906.
- [38] ASTM International. (2015). *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar* (ASTM C1437-15).
- [39] ASTM International. (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)* (ASTM C109/C109M-21).
- [40] ASTM International. (1985). *Standard Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars (Withdrawn 1998)* (ASTM C190-85).
- [41] ASTM International. (2021). *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars* (ASTM C348-21).
- [42] Lee, J. J., Song, H., Park, J., & Lee, S. J. (2023). Recycling spent coffee grounds on permeable interlocking concrete paving blocks. *Advances in Environmental and Engineering Research*, 4(4), 1–11.
- [43] La Scalia, G., Saeli, M., Miglietta, P. & Micale, R. (2021). Coffee biowaste valorization for mortar production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(9), 1805-1815.
- [44] Diouri, A., et al. (2018). Properties of dune sand concrete containing coffee waste. *MATEC Web of Conferences*, 149, 01039. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814901039>
- [45] Mierzwiński, D., Korniejenko, K., Łach, M., Mikuła, J. & Krzywda, J. (2018). Effect of coffee grounds on efflorescence in geopolymer. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol: IOP Publishing, 012035.
- [46] Sena da Fonseca, B., Vilão, A., Galhano, C., & Simão, J. A. R. (2013). Reusing coffee waste in manufacture of ceramics for construction. *Advances in Applied Ceramics*, 113(3), 159–166. <https://doi.org/10.1179/1743676113y.0000000131>
- [47] Wang, Y., et al. (2023). Exploring coffee extract as a renewable admixture to prepare mortars with better performance. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01879. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01879>
- [48] Lee, J., Kim, J., & Lee, S. (2023). Study of recycled spent coffee grounds as aggregates in cementitious materials. *Recent Progress in Materials*, 5(1), 1–23.