

The difference in the effect of replacing cement with rice husk ash and biochar on the physical and mechanical properties of fiber-reinforced cement mortar

Hossein gorji¹, Mehdi Dehestani^{2*}

1- MSc student of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

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

ABSTRACT

The rising greenhouse gas emissions and increasing cement consumption, as one of the most extensively used construction materials, are major contributors to global warming. The utilization of agricultural by-products such as rice husk can not only alleviate the environmental concerns related to waste disposal but also significantly reduce cement demand. This study investigates the effects of partially replacing cement with 5% rice husk biochar and 5% rice husk ash, combined with the incorporation of 3% hooked-end sinusoidal steel fibers, on the physical and mechanical properties of cement mortar. The results revealed that the replacement of biochar and ash decreased mortar workability. Due to its porous structure, biochar exhibited the most pronounced effect on accelerating the setting process, reducing the initial and final setting times by approximately 46% and 29%, respectively, compared to the control specimen. The inclusion of 5% biochar enhanced the long-term compressive strength by about 14% over the control mix. Moreover, incorporating 3% fibers into rice husk ash-based mortar improved the long-term flexural and tensile strengths by nearly 57% and 48%, respectively. These findings suggest that the combined use of rice husk biochar, rice husk ash, and steel fibers can improve mortar performance while providing a sustainable approach to reducing cement consumption and its environmental impacts.

ARTICLE INFO

Receive Date: 12 July 2025

Revise Date: 22 September 2025

Accept Date: 04 November 2025

Keywords:

Rice husk ash
Rice husk biochar
Metal fibers
Mechanical properties
Agricultural Waste
Sustainable Mortar
Cement Replacement

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.533836.3770

*Corresponding author: Mehdi Dehestani
Email address: dehestani@nit.ac.ir

تفاوت اثر جایگزینی سیمان با خاکستر و بایوچار پوسته برنج بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملات سیمانی تقویت شده با الیاف

حسین گرجی^۱، مهدی دهستانی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- استاد، گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و رشد مصرف سیمان، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی، از عوامل اصلی گرمایش جهانی محسوب می‌شوند. استفاده از پسماندهای کشاورزی مانند پوسته برنج می‌تواند ضمن کاهش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از دفع این ضایعات، به کاهش مصرف سیمان نیز کمک قابل توجهی کند. در این پژوهش اثر جایگزینی ۵٪ بایوچار پوسته برنج و ۵٪ خاکستر پوسته برنج به جای سیمان، همراه با تأثیر افزودن ۳٪ الیاف فولادی سینوسی دوسر قلاب، بر خواص فیزیکی و مکانیکی ملات سیمانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد جایگزینی بایوچار و خاکستر موجب کاهش کارایی ملات شد. بایوچار با ساختار متخلخل خود بیشترین اثر را در تسریع فرآیند گیرش داشت، به طوری که موجب کاهش حدود ۴۶٪ در زمان گیرش اولیه و ۲۹٪ در زمان گیرش نهایی نسبت به نمونه شاهد گردید. جایگزینی ۵٪ بایوچار موجب افزایش مقاومت فشاری بلندمدت تا حدود ۱۴٪ در مقایسه با نمونه‌های شاهد گردید. افزودن ۳٪ الیاف به ملات حاوی خاکستر پوسته برنج، مقاومت خمشی و کششی بلندمدت را به ترتیب حدود ۵۷٪ و ۴۸٪ افزایش داد. این نتایج نشان می‌دهد استفاده از بایوچار و خاکستر پوسته برنج، همراه با الیاف فولادی، می‌تواند ضمن بهبود خواص ملات، رویکردی پایدار برای کاهش مصرف سیمان و اثرات زیست‌محیطی آن باشد.

کلمات کلیدی: خاکستر پوسته برنج، بایوچار پوسته برنج، الیاف فولادی، مشخصات مکانیکی، پسماند کشاورزی، ملات پایدار، جایگزینی سیمان.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.533836.3770	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.533836.3770	۱۴۰۵/۰۳/۳۱	۱۴۰۴/۰۸/۱۳	۱۴۰۴/۰۸/۱۳	۱۴۰۴/۰۶/۳۱	۱۴۰۴/۰۴/۲۱
			مهدی دهستانی		نویسنده مسئول [®]	
			dehestani@nit.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

تولید سیمان یکی از منابع مهم انتشار دی‌اکسید کربن است و حدود ۸٪ از انتشار جهانی این گاز را به خود اختصاص می‌دهد [۱]. بتن به عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی، به دلیل دسترسی آسان، دوام بالا و خواص مکانیکی مناسب، مصرف جهانی سالانه‌ای در حدود ۳۰ میلیارد تن دارد [۲]. حجم بالای مصرف این ماده، پیامدهای زیست‌محیطی قابل توجهی به دنبال دارد.

برنج به طور گسترده در آسیا کشت می‌شود و پوسته برنج به عنوان محصول زائد کشاورزی، دور ریخته می‌شود و آلودگی زیست‌محیطی ایجاد می‌کند [۳، ۴]. استفاده از پوسته برنج به صورت بایوچار یا خاکستر به عنوان جایگزینی جزئی سیمان، می‌تواند ضمن کاهش اثرات زیست‌محیطی، مصرف سیمان را کاهش دهد [۵].

خاکستر پوسته برنج سیلیس آمورف^۱ با واکنش‌پذیری بالا تولید می‌کند که مشخصات مکانیکی و دوام ملات را بهبود می‌بخشد. سیلیس آمورف دارای واکنش‌پذیری بسیار بالایی است و در نتیجه، هنگام استفاده در بتن، تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری آن دارد [۴، ۶-۱۰]. بایوچار^۲ حاصل از فرآیند حرارت‌دهی در محیط بدون اکسیژن، تولید دی‌اکسید کربن را به حداقل رسانده و خواص مکانیکی ملات را با کاهش تخلخل و افزایش جذب دی‌اکسید کربن بهبود می‌بخشد [۱۱-۱۵].

برای جبران ضعف بتن در کشش، افزودن الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن مؤثر است. الیاف فولادی عملکرد بهتری نسبت به پلی‌پروپیلن در مقاومت خمشی و کششی از خود نشان می‌دهد و تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد [۱۶-۱۸]. الیاف فولادی دوسر قلاب و سینوسی موجب افزایش مقاومت نهایی، سختی و جذب انرژی می‌شوند، اگرچه ممکن است شکل‌پذیری قاب‌های خمشی را کاهش دهند [۱۹، ۲۰].

اغلب پژوهش‌های پیشین به طور جداگانه اثر بایوچار، خاکستر یا الیاف را بررسی کرده‌اند و مقایسه مستقیم اثر بایوچار و خاکستر بر ملات محدود بوده است؛ بنابراین شرایط بررسی تفاوت اثر دو ماده بر ملات فراهم نبوده است. همچنین، اغلب پژوهش‌های گذشته بهینه‌ترین درصد جایگزینی سیمان با بایوچار برای بهبود خواص ملات یا بتن را کمتر از ۱۰٪ و در بازه ۲ تا ۵٪ گزارش کرده‌اند [۱۲، ۱۳، ۲۱، ۲۲]. اثر الیاف بر ملات یا بتن در اغلب مطالعات کمتر از حدود ۲٪ حجمی بررسی شده و اثر درصد بالای الیاف مورد توجه قرار نگرفته است [۱۶-۲۰].

هدف اصلی این پژوهش، بررسی و مقایسه اثر جایگزینی ۵٪ سیمان با بایوچار و خاکستر پوسته برنج بر خواص ملات است. همچنین، تأثیر افزودن ۳٪ از نوع جدیدی از الیاف (الیاف فولادی سینوسی دوسر قلاب) به این دو طرح اختلاط ارزیابی می‌شود. نوع الیاف فولادی مورد استفاده در پژوهش‌های گذشته یا دوسر قلاب ساده بوده یا سینوسی ساده، و در درصد‌های پایین به کار رفته‌اند؛ بنابراین تأثیر این نوع الیاف و درصد بالای آن (۳٪) بر ملات مورد بررسی قرار نگرفته است. انجام این مطالعه، نقش الیاف فولادی با هندسه الهام‌گرفته از دو مدل دوسر قلاب و سینوسی و اثر استفاده از درصد بالای الیاف بر خواص ملات حاوی بایوچار و خاکستر پوسته برنج و تفاوت اثر این دو ماده را به طور کامل مشخص می‌کند.

¹ Amorphous silica

² Biochar

۲- مواد و روش انجام آزمایش‌ها

۲-۱- مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سیمان

در این پژوهش از سیمان پرتلند تپ دو تولید کارخانه شاهرود برای تهیه ملات‌ها استفاده شد. این نوع سیمان مطابق با استاندارد ملی ایران ISIRI 389 [۲۳] تولید می‌شود. مشخصات فیزیکی و شیمیایی اعلام شده توسط کارخانه در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی سیمان شاهرود

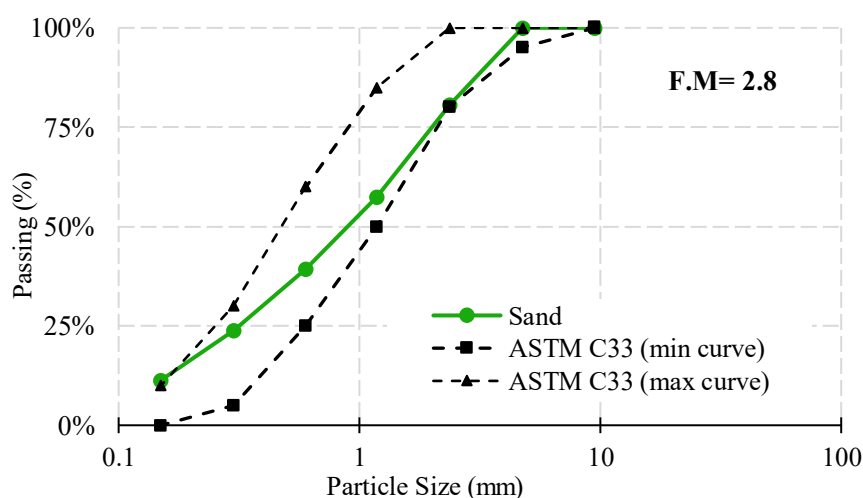
نسبسط اتوکلاو	نرمی توسط بلین (سانتی‌متر مربع بر گرم)
۰/۰۴۶	۲۷۰۰

جدول ۲: مشخصات شیمیایی سیمان شاهرود

ترکیبات شیمیایی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
درصد (%)	۲۱/۱۱	۴/۴۸	۳/۹۱	۶۳/۳۶	۱/۳۷	۲/۵۸	۰/۴۳	۰/۴۸	۲/۸۵

۲-۱-۲- سنگدانه

ماسه مورد استفاده در طرح‌های اختلاط از معدن شهرستان آمل واقع در استان مازندران تأمین شد. دانه‌بندی ماسه در محدوده مجاز بر اساس استاندارد ASTM C33 [۲۴] (شکل ۱) قرار داشت. میزان رطوبت ماسه مطابق با استاندارد ASTM C566 [۲۵] اندازه‌گیری شد که برابر با ۲/۶۷٪ به‌دست آمد. پیش از استفاده، ماسه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون خشک شدند تا رطوبت آن‌ها به حداقل مقدار ممکن برسد و اثر رطوبت در تمامی طرح‌های اختلاط حذف شود. همچنین، چگالی و جذب آب ماسه مطابق با ASTM C128 [۲۶] تعیین شد که به ترتیب برابر با ۲/۲۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۱/۰۲٪ بود.



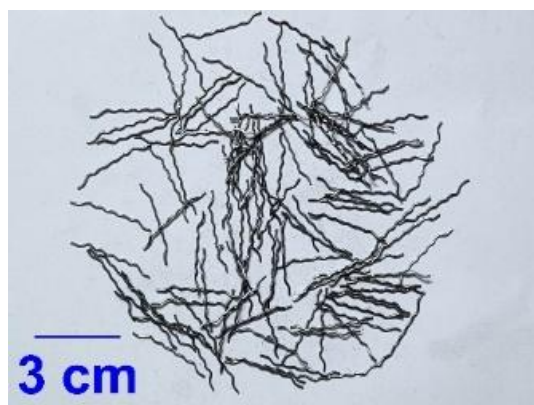
شکل ۱: توزیع اندازه ذرات سنگدانه‌های مصرفی

۲-۱-۳- پوسته برنج

پوسته برنج از یک کارخانه شالی کوبی واقع در شهرستان بابل (استان مازندران) تأمین شد، سپس این پوسته‌ها به‌طور کامل آسیاب گردید تا در فرآیندهای تولید بایوچار و خاکستر، حرارت به‌صورت یکنواخت به آن‌ها برسد.

۲-۱-۴- الیاف فولادی

الیاف فولادی مورد استفاده در این پژوهش از شرکت کیمیکس تأمین شده و مطابق با استاندارد ASTM 510M [۲۷] تولید گردیده‌اند. این الیاف ترکیبی ویژه از دو نوع الیاف فولادی دوسر قلاب و الیاف فولادی سینوسی هستند (شکل ۲). الیاف مذکور به میزان ۳٪ حجمی در طرح‌های اختلاط به‌کار رفته‌اند. مشخصات فنی مربوط به الیاف در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۲: الیاف فولادی سینوسی دوسر قلاب

جدول ۳: مشخصات فنی الیاف فولادی

شکل الیاف	سطح مقطع	طول (میلی‌متر)	قطر (میلی‌متر)	نسبت طول به قطر	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مقاومت خمشی (مگاپاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
سینوسی دوسر قلاب	گرد	۳۰	۰/۷	۴۲/۸۵	۱۰۰۰	۱۹۰	۷۸۵۰

۲-۲-۱- فرآیند بایوچار

ابتدا ماده موردنظر در راکتور پیرولیز قرار داده شد. سپس مخازن آب راکتور پر گردید تا بخارات تولیدشده در اثر فرآیند پیرولیز از طریق لوله به داخل این مخازن هدایت شده و در نهایت تخلیه شوند. وجود مخزن آب ضروری است، زیرا در صورت تماس مستقیم لوله خروجی بخارات با هوا، اکسیژن وارد راکتور شده و محصول نهایی به‌جای بایوچار، به خاکستر تبدیل خواهد شد. در مرحله بعد، گاز نیتروژن به داخل راکتور تزریق شد تا اکسیژن به‌طور کامل تخلیه گردد. استفاده از گاز نیتروژن به دلیل خاصیت بی‌اثر بودن آن ضروری است، چرا که در صورت باقی‌ماندن اکسیژن در راکتور، ماده به خاکستر پوسته برنج تبدیل خواهد شد. پس از این مرحله، فرآیند حرارت‌دهی آغاز شد تا دمای موردنظر حاصل گردد و فرآیند پیرولیز به‌طور کامل انجام گیرد. فرآیند زمانی پایان یافته تلقی گردید که نرخ تولید بخار در پایان دو ساعت به حدود ۵٪ مقدار اوج خود رسید.

۲-۲-۲- ساخت بایوچار پوسته برنج

برای بررسی تأثیر دما بر عملکرد بایوچار پوسته برنج، تولید در دو دمای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد (حداقل و حداکثر دمای قابل دستیابی در راکتور پیرولیز موجود) انجام شد. در آغاز فرآیند، گاز نیتروژن به راکتور تزریق گردید تا اکسیژن به‌طور کامل خارج شود. سپس یک چهارم از پوسته‌های آسیاب‌شده در راکتور قرار داده شدند. دما به تدریج با نرخ ۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه افزایش یافت تا به مقدار هدف برسد. پس از رسیدن به دمای موردنظر، مواد به مدت دو ساعت در آن دما نگهداری شدند. در مرحله نخست، بایوچار در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید گردید (شکل ۳). پس از جمع‌آوری محصول، راکتور تمیز شد و فرآیند مجدداً با یک چهارم دیگر از پوسته‌ها آغاز گردید تا این‌بار بایوچار در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید شود. پس از خنک شدن، بایوچار حاصل الک و به‌صورت خلأ بسته‌بندی شد تا از ورود هوا و رطوبت جلوگیری گردد. مشخصات شیمیایی بایوچار پوسته برنج در جدول ۴ ارائه شده است [۱۵].



شکل ۳: فرآیند تولید بایوچار از پوسته برنج

جدول ۴: مشخصات شیمیایی بایوچار پوسته برنج ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد [۱۵]

LOI	Mn ₂ O ₃	Ti ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ترکیبات شیمیایی
۰/۰۲	۰/۱۳	۰/۲۳	۵/۱۱	۰/۳۹	۰/۰۸	۰/۵۷	۱/۸۵	۱/۲۶	۰/۹۲	۸۹/۴۵	درصد (%)

۲-۳- ساخت خاکستر پوسته برنج

برای تولید خاکستر پوسته برنج، نیمی از پوسته‌های آسیاب‌شده در کوره قرار داده شد. کوره بر اساس دمای هدف و مدت زمان موردنیاز تنظیم گردید و فرآیند آغاز شد. دما به تدریج طی پنج ساعت افزایش یافت تا به ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد برسد. سپس نمونه‌ها به مدت پنج ساعت در این دما نگهداری شدند تا فرآیند خاکستر شدن به‌طور کامل انجام گیرد. پس از پایان فرآیند و خنک شدن کوره، خاکستر حاصل الک گردید و برای جلوگیری از ورود رطوبت و هوا به‌صورت خلأ بسته‌بندی شد (شکل ۴). مشخصات شیمیایی خاکستر پوسته برنج در جدول ۵ ارائه شده است. طبق نتیجه حاصل از آزمون مشخصات شیمیایی مقادیر SiO₂، Al₂O₃ و Fe₂O₃ به ترتیب برابر با ۷۸٪، ۱۵۱٪ و ۴۹٪ وزنی به دست آمد. براساس استاندارد ASTM C618 [۲۸]، از آنجا که مجموع SiO₂، Al₂O₃ و Fe₂O₃ بیش از ۷۰٪ وزنی است، خاکستر پوسته برنج در رده نوع F طبقه‌بندی می‌شود و قابلیت استفاده به عنوان جایگزین سیمان را دارد.



شکل ۴: فرآیند تولید خاکستر از پوسته برنج

جدول ۵: مشخصات شیمیایی خاکستر پوسته برنج

MnO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ترکیبات شیمیایی
۰/۱	۲/۷۳	۲/۵۵	۲/۷۲	۱/۰۳	۱۰/۵۴	۰/۴۹	۱/۵۱	۷۸	درصد (%)

۲-۴- طرح اختلاط و آماده سازی ملات

مخلوط‌های ملات با نسبت سیمان به ماسه ۱:۲/۷۵ و نسبت آب به سیمان ۰/۴۸۵، در محدوده توصیه شده استاندارد ASTM C270 [۲۹] تهیه شدند. در طرح‌های حاوی بایوچار، ۵٪ از وزن سیمان با بایوچار پوسته برنج و در طرح‌های حاوی خاکستر، ۵٪ از سیمان با خاکستر پوسته برنج جایگزین گردید تا امکان مقایسه مستقیم اثر درصد یکسانی از این دو ماده فراهم شود.

برای آماده‌سازی مخلوط‌ها، ابتدا سیمان به‌طور کامل با بایوچار یا خاکستر پوسته برنج مخلوط شد. سپس آب به ترکیب افزوده گردید و مواد با استفاده از یک میکسر مکانیکی (شکل ۵) مخلوط شدند. در مرحله بعد، ماسه اضافه شد و فرآیند اختلاط تا یکنواخت شدن کامل ادامه یافت. در مخلوط‌های حاوی الیاف فولادی، الیاف به تدریج و پس از افزودن ماسه وارد ترکیب شدند تا به‌طور یکنواخت در ملات پراکنده گردند. همچنین برای مخلوط‌های حاوی بایوچار، خاکستر و الیاف، از فوق‌روان‌کننده به‌منظور بهبود کارایی و نزدیک کردن آن به سطح مخلوط شاهد استفاده شد.

در مجموع شش طرح اختلاط مختلف تهیه گردید. جزئیات ترکیب تمامی مخلوط‌ها در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. نمونه‌ها ۲۴ ساعت پس از ریختن در قالب، از قالب خارج شدند و تا سنین آزمایش ۷، ۲۸ و ۵۶ روز در آب اشباع از آهک عمل‌آوری شدند. برای هر طرح اختلاط و در هر سن سه نمونه ساخته و آزمایش شد. در مجموع برای آزمون‌های مقاومت فشاری، خمشی و کششی، ۱۶۲ نمونه (۵۴ نمونه برای هر آزمون) آماده گردید.



شکل ۵: میکسر مکانیکی

جدول ۶: جزئیات طرح اختلاط ملات‌ها

نماد گذاری	توضیحات
C	طرح شاهد
B5-300	جایگزینی ۵٪ از سیمان با ۵٪ بایوچار پوسته برنج بدست آمده در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد
B5-500	جایگزینی ۵٪ از سیمان با ۵٪ بایوچار پوسته برنج بدست آمده در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد
B5-F3	جایگزینی ۵٪ از سیمان با ۵٪ بایوچار پوسته برنج بدست آمده در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد و افزودن ۳٪ حجمی الیاف
A5	جایگزینی ۵٪ از سیمان با ۵٪ خاکستر پوسته برنج
A5-F3	جایگزینی ۵٪ از سیمان با ۵٪ خاکستر پوسته برنج و افزودن ۳٪ حجمی الیاف

جدول ۷: جزئیات نسبت‌های اختلاط ملات‌ها

نماد اختلاط ملات	سیمان (گرم)	ماسه (گرم)	آب (گرم)	بایوچار پوسته دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد (گرم)	بایوچار پوسته دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد (گرم)	خاکستر پوسته برنج (گرم)	الیاف (گرم)
C	۵۴۶/۶	۱۵۰۳/۱	۲۶۵/۱	۰	۰	۰	۰
B5-300	۵۱۹/۲	۱۵۰۳/۱	۲۶۵/۱	۲۷/۳	۰	۰	۰
B5-500	۵۱۹/۲	۱۵۰۳/۱	۲۶۵/۱	۰	۲۷/۳	۰	۰
B5-F3	۵۱۹/۲	۱۵۰۳/۱	۲۶۵/۱	۰	۲۷/۳	۰	۲۳۵/۵
A5	۵۱۹/۲	۱۵۰۳/۱	۲۶۵/۱	۰	۰	۲۷/۳	۰
A5-F3	۵۱۹/۲	۱۵۰۳/۱	۲۶۵/۱	۰	۰	۲۷/۳	۲۳۵/۵

۲-۵- روش انجام آزمایشات

۲-۵-۱- تجزیه و تحلیل با میکروسکوپ الکترونی روبشی

برای بررسی تفاوت ساختار بایوچار و خاکستر، از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل SNE-4500M ساخت کره استفاده شد. تصاویر پودرها به منظور بررسی ساختار، در بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر ثبت گردید. مشخصات دستگاه در جدول ۸ ارائه شده است. علاوه بر این، تصاویر نمونه‌ها برای بررسی ریز ساختار در بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر تهیه شدند.

جدول ۸: مشخصات دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی

مدل و سازنده	وضوح (Resolution)	بزرگ‌نمایی (Magnification)	آشکارساز (Detector)	ولتاژ شتاب دهنده (Acceleration Voltage)	منبع پرتو الکترونی (Electron Beam Source)	خلا (Vacuum)	بیشینه اندازه نمونه (Max Sample Size)	حرکت استیج (Stage Traverse)	پوشش نمونه (Sample Coating)
SNE-4500M (Korea)	۵ نانومتر	تا ۱۰۰،۰۰۰ برابر	SE	(1kV-30kV)-6 Step	Tungsten Filament	High	قطر ۸۰ میلی‌متر، ارتفاع ۳۵ میلی‌متر	X, Y: 40 mm, Z: 0-35 mm, R: 360°, T: 0-45°	طلا

۲-۵-۲- کارایی

کارایی هر طرح اختلاط با استفاده از آزمایش میز جریان و مطابق با استاندارد ASTM C230 [۳۰] ارزیابی گردید. برای این منظور، قالب استاندارد بر روی میز جریان قرار داده شد و ملات در سه لایه داخل آن ریخته شد؛ هر لایه با کوبه متراکم گردید. پس از برداشتن قالب، ۲۵ ضربه در مدت ۱۵ ثانیه به میز وارد شد. بلافاصله پس از آن، دو قطر عمود بر هم از سطح ملات اندازه‌گیری گردید و میانگین این دو مقدار به‌عنوان کارایی ملات ثبت شد (شکل ۶).



شکل ۶: یک نمونه اندازه گیری کارایی

۲-۵-۳- زمان گیرش

زمان گیرش اولیه و نهایی با استفاده از دستگاه ویکات و مطابق با استاندارد ASTM C191 [۳۱] اندازه گیری گردید (شکل ۷). برای شروع، از میان سه طرح اختلاط C، B5-500 و A5 مخلوط با کمترین کارایی انتخاب شد. یک نمونه ۳۰۰ گرمی از چسباننده^۱ این مخلوط تهیه شد و آب به تدریج به آن افزوده گردید تا چسباننده به حالت خمیری برسد. برای دو طرح دیگر نیز به همین ترتیب، ۳۰۰ گرم از چسباننده هر کدام آماده و مقدار مشابهی آب به آن‌ها افزوده شد.

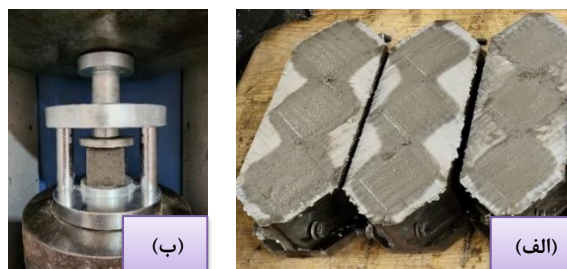
برای اندازه گیری زمان گیرش اولیه، از سوزن گیرش اولیه استفاده شد. زمان لازم برای کاهش نفوذ سوزن از ۴۰ میلی متر به ۲۵ میلی متر به عنوان زمان گیرش اولیه ثبت گردید. زمان گیرش نهایی با استفاده از سوزن گیرش نهایی تعیین شد و به لحظه ای اطلاق گردید که تنها اثر نوک سوزن بر سطح نمونه باقی بماند و اثری از دایره دور نوک سوزن مشاهده نشود.



شکل ۷: دستگاه ویکات

۲-۵-۴- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C109 [۳۲] انجام گردید. ملات‌ها در قالب‌های مکعبی با ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ میلی متر ریخته شدند (شکل ۸ الف)). پس از عمل آوری، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه جک فشار هیدرولیکی تحت بارگذاری با نرخ ثابت ۰/۹ کیلونیوتن بر ثانیه قرار گرفتند (شکل ۸ ب)). دستگاه به صورت خودکار بیشینه تنش اعمال شده در لحظه شکست را ثبت کرد. برای هر سن، سه نمونه آزمایش شدند و میانگین مقادیر تنش آن‌ها به عنوان مقاومت فشاری گزارش گردید.

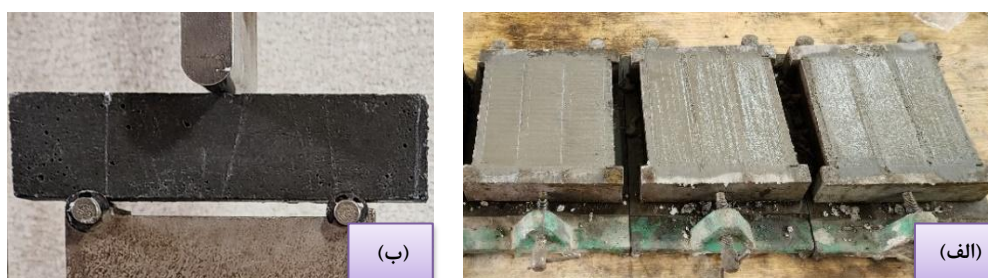


شکل ۸: (الف) ملات در قالب فشاری، (ب) نحوه قرار گیری نمونه آزمون مقاومت فشاری

¹ Binder

۲-۵-۴- مقاومت خمشی

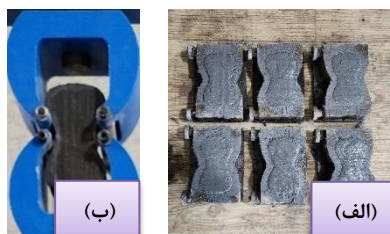
آزمایش مقاومت خمشی مطابق با استاندارد ASTM C348 [۳۳] انجام گردید. ملات‌ها در قالب‌های منشوری با ابعاد $160 \times 40 \times 40$ میلی‌متر ریخته شدند (شکل ۹ الف)). نمونه‌ها در هر سن با استفاده از دستگاه یونیورسال تحت بارگذاری با نرخ $1/27$ میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شدند (شکل ۹ ب)). بارگذاری تا زمان شکست ادامه یافت و بیشینه بار اعمالی توسط دستگاه ثبت شد. تنش خمشی متناظر با این بار محاسبه گردید. برای هر سن، سه نمونه آزمایش شدند و میانگین مقادیر آن‌ها به عنوان مقاومت خمشی گزارش گردید.



شکل ۹: (الف) ملات در قالب خمشی، (ب) نحوه قرار گیری نمونه آزمون خمشی

۲-۵-۴- مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی مطابق با استاندارد ASTM C307 [۳۴] انجام گردید. ملات‌ها در قالب‌های بریکت^۱ (شکل ۱۰ الف)) ریخته شدند و در هر سن با استفاده از دستگاه یونیورسال تحت بارگذاری با نرخ بارگذاری $1/27$ میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شدند (شکل ۱۰ ب)). بارگذاری به صورت خودکار تا زمان شکست ادامه یافت. بیشینه بار اعمالی ثبت شد و تنش کششی متناظر براساس آن محاسبه گردید. برای هر سن نمونه، سه نمونه آزمایش شدند و میانگین تنش آن‌ها به عنوان مقاومت کششی گزارش گردید.



شکل ۱۰: (الف) ملات در قالب بریکت، (ب) نحوه قرار گیری نمونه آزمون کشش

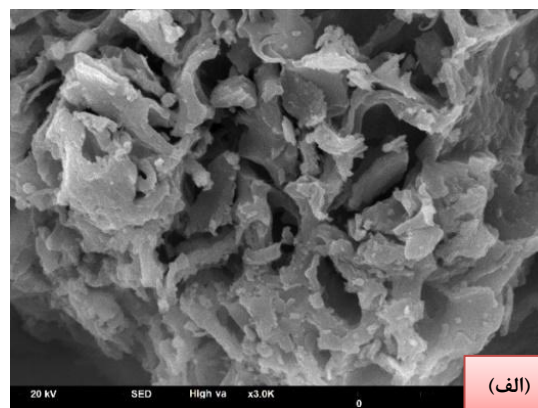
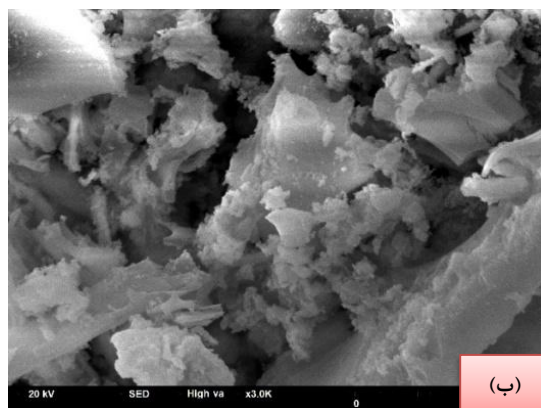
۳- نتایج

۳-۱- تجزیه و تحلیل با میکروسکوپ الکترونی روبشی

تصاویر گرفته شده از پودرها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۱۱ ارائه شده‌اند. مقایسه تصاویر بایوچار و خاکستر پوسته برنج نشان می‌دهد که ساختار این دو ماده کاملاً متفاوت است، که ناشی از تفاوت فرآیند حرارتی در هنگام تولید آن‌ها می‌باشد. در بایوچار پوسته برنج (شکل ۱۱ الف)) ساختاری اسفنجی با حفرات درشت‌تر و مجراهای باز مشاهده شد. این منافذ نتیجه تجزیه حرارتی پوسته برنج در فرآیند پیرولیز هستند و منجر به تشکیل ساختاری متخلخل و پایدار می‌شوند. همچنین در سطح بایوچار، دیواره‌های نازک و ورقه‌ای دیده می‌شود که ظرفیت بالای جذب آب را فراهم می‌آورد.

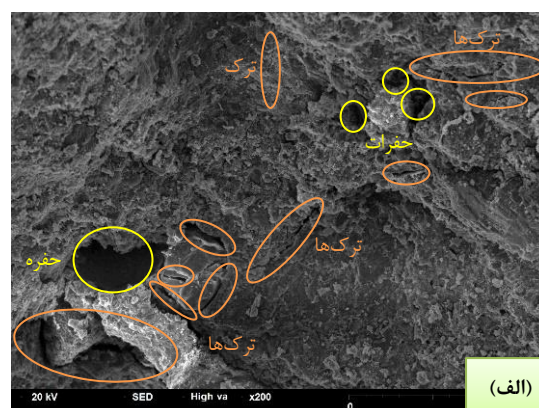
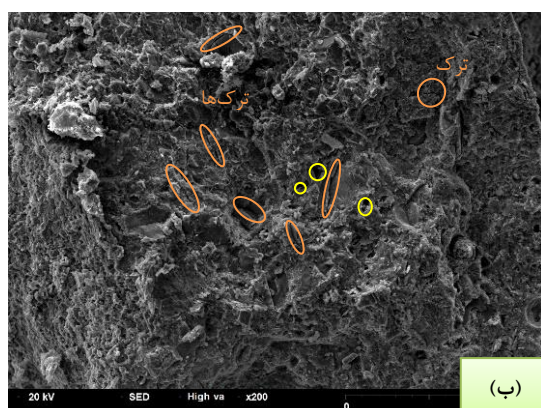
^۱ Briquette

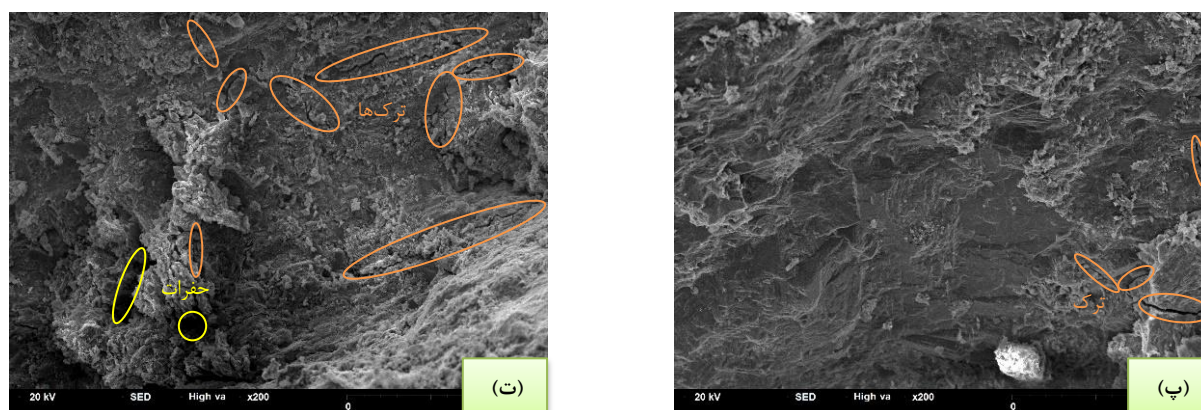
در مقابل، خاکستر پوسته برنج (شکل ۱۱ ب)) شامل تجمع ذرات کوچک و نامنظم است. وجود این ذرات و توزیع نامنظم آن‌ها نشان‌دهنده حضور سیلیس آمورف حاصل از احتراق کامل مواد آلی می‌باشد. چنین ساختاری اگرچه سطح ویژه تقریباً بالایی دارد، اما تخلخل آن بیشتر ناشی از فضاهای بین ذرات بوده و به صورت منافذ منظم و پیوسته مشاهده نمی‌شود. به طور کلی، ساختار بایوچار پوسته برنج به دلیل بیشتر و سطح ویژه بالا، قابلیت بیشتری در فرآیندهای جذب و کاربردهای زیست‌محیطی دارد، در حالی که خاکستر پوسته برنج به دلیل ساختار ذره‌ای و نامنظم، مناسب کاربردهایی نظیر بهبود مقاومت در مصالح سیمانی است.



شکل ۱۱: تصاویر میکروسکوپی پودرها؛ (الف) بایوچار پوسته برنج، (ب) خاکستر پوسته برنج

تصاویر نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۱۲ ارائه شده‌اند. نمونه شاهد نسبت به سایر نمونه‌ها دارای ترک‌ها و حفرات بیشتری بود (شکل ۱۲ الف)). نمونه‌های حاوی بایوچار پوسته برنج کاهش قابل توجهی در ترک‌ها و حفرات نشان دادند، که نشان‌دهنده نقش بایوچار در ایجاد ساختاری متراکم‌تر و منسجم‌تر است (شکل ۱۲ ب و پ)). این یافته با نتایج پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد [۱۲، ۳۵]. در مقایسه بین دو نمونه حاوی بایوچار، نمونه‌ای که بایوچار آن در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تهیه شده، ترک‌ها و حفرات کمتری دارد (شکل ۱۲ پ))، که نشان‌دهنده عملکرد بهتر بایوچار حاصل از دمای بالاتر در بهبود ساختار ملات است. نمونه حاوی خاکستر پوسته برنج نیز نسبت به نمونه شاهد ترک‌ها و حفرات کمتری داشت (شکل ۱۲ ت))، که این اثر در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است [۷، ۹]. با این حال، در مقایسه با نمونه حاوی بایوچار پوسته برنج، ترک‌ها و حفرات بیشتری مشاهده شد. پژوهش‌های پیشین تشکیل ژل هیدرات سیلیکات کلسیم و هیدرات آلومینوسیلیکات کلسیم را به‌عنوان عوامل مؤثر در بهبود ساختار نمونه‌ها معرفی کرده‌اند [۸، ۹].





شکل ۱۲: تصاویر میکروسکوپی نمونه‌ها؛ (الف) C، (ب) B5-300، (پ) B5-500، (ت) A5

۳-۲- کارایی

به دلیل نسبت پایین آب به سیمان، به ملات شاهد فوق‌روان کننده افزوده شد تا کارایی آن افزایش یابد. افزودن بایوچار و خاکستر پوسته برنج موجب کاهش کارایی گردید که این امر به خاصیت جذب آب این مواد و به ویژه ساختار متخلخل و سطح ویژه بالاتر بایوچار نسبت داده می‌شود. این موضوع در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است [۷، ۳۷-۳۵]. کاهش کارایی در نمونه‌های حاوی الیاف تشدید شد، زیرا شکل سینوسی الیاف موجب افزایش انسجام و پیوستگی ملات می‌گردد، که این اثر نیز در پژوهش‌های گذشته تأیید شده است [۳۶، ۳۸]. بر این اساس، برای حفظ کارایی و امکان تراکم مناسب ملات در قالب، فوق‌روان کننده به صورت درصدی از وزن ماده چسباننده به هر طرح اختلاط افزوده شد (جدول ۹).

میان طرح‌های اختلاط، ملات B5-F3 بیشترین میزان فوق‌روان کننده را برای دستیابی به کارایی مشابه ملات شاهد نیاز داشت. اگرچه ملات A5-F3 نیز به ۱٪ فوق‌روان کننده نیاز داشت، اما میزان مصرف در B5-F3 بیشتر بود. نتایج مقایسه‌ها نشان داد که ملات‌های حاوی بایوچار پوسته برنج کارایی کمتری نسبت به نمونه‌های حاوی خاکستر داشتند، که بیانگر جذب آب بالاتر بایوچار است. همچنین، کاهش کارایی در اثر افزودن الیاف نیز مشاهده شد که نشان‌دهنده تأثیر الیاف بر افزایش انسجام و چسبندگی ملات است.

جدول ۹: نتایج آزمون کارایی ملات‌ها

کارایی (میلی‌متر)	درصد فوق‌روان کننده	طرح اختلاط
۱۷	۰/۵	C
۱۷	۰/۷۵	B5-300
۱۷	۰/۷۵	B5-500
۱۷	۱/۵	B5-F3
۱۷	۰/۶۵	A5
۱۷	۱	A5-F3

۳-۳- زمان گیرش

زمان‌های گیرش اولیه و نهایی برای ملات شاهد، ملات حاوی بایوچار پسته برنج و ملات حاوی خاکستر پسته برنج در جدول ۱۰ ارائه شده‌اند.

نتایج نشان می‌دهند که ملات حاوی بایوچار پسته برنج کوتاه‌ترین زمان گیرش اولیه و نهایی را در مقایسه با دو نمونه دیگر دارد. به‌ویژه، بایوچار موجب کاهش حدود ۴۶٪ در زمان گیرش اولیه و ۲۹٪ در زمان گیرش نهایی نسبت به ملات شاهد گردید. این تسریع در گیرش به دلیل خاصیت جذب آب بالای بایوچار ناشی از ساختار متخلخل آن است که موجب کاهش رطوبت آزاد در مخلوط و تسریع فرآیند گیرش می‌شود. این یافته با نتایج پژوهش‌های گذشته مطابقت دارد [۷، ۲۲]. ملات حاوی خاکستر پسته برنج نیز زمان گیرش اولیه و نهایی کوتاه‌تری نسبت به ملات شاهد داشت، اما در مقایسه با ملات حاوی بایوچار، زمان گیرش طولانی‌تری از خود نشان داد. این نتایج نشان می‌دهند که بایوچار در مقایسه با خاکستر تأثیر بیشتری در تسریع فرآیند گیرش دارد.

جدول ۱۰: نتایج آزمون زمان گیرش ملات‌ها

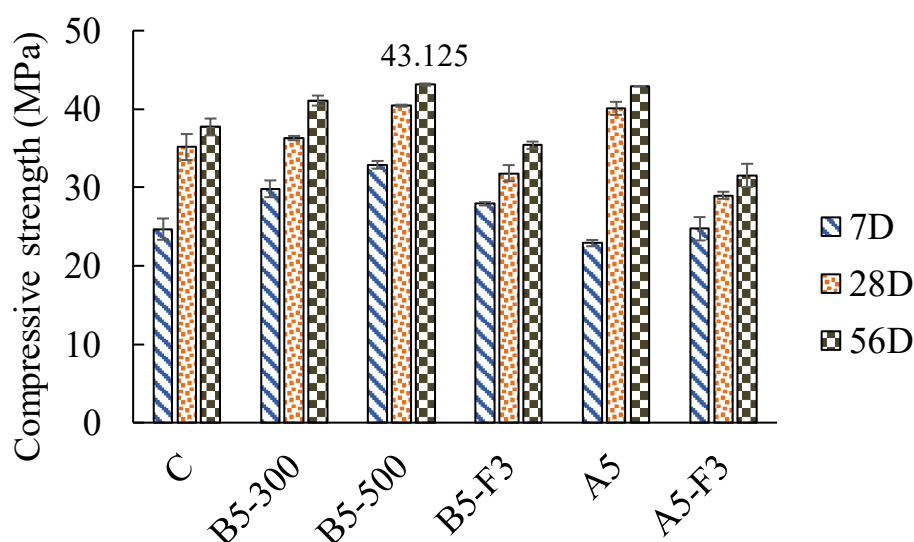
ملات	زمان گیرش اولیه (دقیقه)	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
C	۱۷۷	۲۷۸
B5-500	۹۵	۱۹۵
A5	۱۴۰	۲۲۵

۳-۴- مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای تمامی طرح‌های اختلاط در شکل ۱۳ ارائه شده‌اند. به‌منظور تعیین دمای بهینه تولید بایوچار پسته برنج، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی بایوچار تولیدشده در دماهای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تا سن ۲۸ روز با یکدیگر مقایسه شد. نمونه‌های B5-500 در سنین ۷ و ۲۸ روزه، حدود ۱۰٪ مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه‌های B5-300 داشتند. براین اساس، بایوچار تولیدشده در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد برای استفاده در طرح اختلاط B5-F3 در این آزمایش و سایر آزمایش‌ها انتخاب شد. در سن ۷ روزگی، نمونه B5-500 بالاترین مقاومت فشاری را در میان تمامی طرح‌ها نشان داد که تقریباً ۳۳٪ بیشتر از نمونه‌های شاهد بود. این امر نشان‌دهنده اثربخشی بایوچار پسته برنج در تسریع فرآیند کسب مقاومت است. در سن ۲۸ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های C، B5-500 و A5 نسبتاً مشابه بود، با این حال B5-500 حدود ۱۵٪ بیشتر از شاهد و ۱٪ بیشتر از A5 مقاومت نشان داد. در سن ۵۶ روزگی نیز، نمونه‌های B5-500 بیشترین مقاومت فشاری را داشتند؛ به‌طوری‌که حدود ۱۴٪ بیشتر از نمونه‌های شاهد و ۱٪ بیشتر از A5 بودند. این نتایج نشان می‌دهد که بایوچار پسته برنج عملکرد مطلوب‌تری در افزایش مقاومت فشاری دارد.

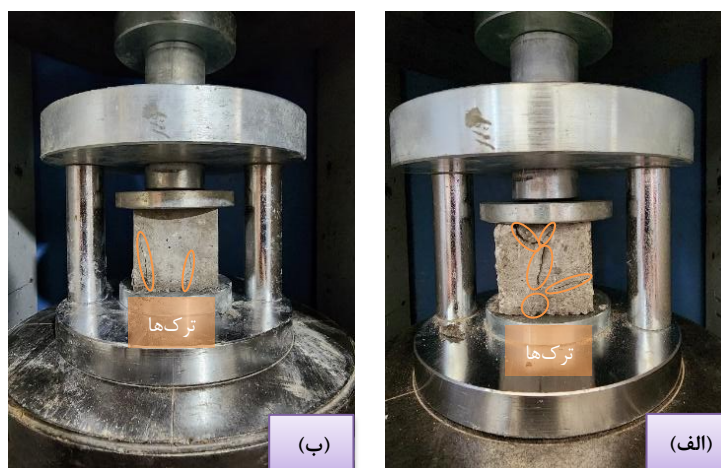
مقایسه نمونه‌های B5-F3، B5-500 و شاهد نشان داد که افزودن الیاف موجب افزایش مقاومت فشاری نمی‌شود. اگرچه نمونه‌های B5-F3 در سن ۷ روزه مقاومت بیشتری نسبت به شاهد داشتند، اما مقاومت آن‌ها در سنین ۲۸ و ۵۶ روزه کاهش یافته و کمتر از نمونه‌های شاهد شد. وضعیت مشابهی در نمونه‌های A5-F3 نیز مشاهده شد؛ به‌طوری‌که مقاومت آن‌ها در سن ۷ روزه بالاتر از A5 و شاهد بود، اما در سنین بالاتر کاهش یافت. علت اصلی کسب مقاومت بالای نمونه‌های B5-500، اثر ذرات ریز بایوچار پسته برنج در پر کردن حفره‌ها و بهبود ریزساختار ملات است. این فرآیند منجر به شکل‌گیری ساختاری متراکم و منسجم‌تر شد. همچنین ساختار متخلخل و خاصیت جذب آب بایوچار موجب ذخیره آب در طرح و آزادسازی تدریجی آن طی زمان می‌شود که هیدراسیون طولانی‌تر و کامل‌تر را امکان‌پذیر می‌کند.

علاوه بر این، پژوهش‌های گذشته محتوای بالای سیلیکا، ماهیت آمورف بایوچار و تأثیر آن بر فرآیند عمل‌آوری نمونه‌ها را به‌عنوان عوامل مؤثر بر افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی بایوچار معرفی کرده‌اند [۷، ۲۲، ۳۵]. افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی خاکستر نیز به واکنش پوزولانی و اثر پرکنندگی خاکستر نسبت داده شده است؛ همچنین تشکیل ژل هیدرات سیلیکات کلسیم از دیگر دلایل بهبود مقاومت آن‌ها گزارش شده است [۹، ۳۶، ۳۷]. در خصوص تأثیر الیاف، نتایج مشابهی در پژوهش‌های گذشته مشاهده شده است؛ به گونه‌ای که درصد‌های بالای الیاف موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شوند، که علت آن تمایل الیاف به تجمع و افزایش تخلخل است [۳۹، ۴۰].



شکل ۱۳: نتایج مقاومت فشاری تمامی طرح‌ها

با وجود عدم افزایش مقاومت فشاری در اثر استفاده از الیاف، بررسی نحوه شکست نمونه‌ها (شکل ۱۴) نشان داد که نمونه‌های حاوی الیاف انسجام ساختاری بیشتری داشتند و پس از شکست، ترک خوردگی و گسیختگی کمتری از خود نشان دادند.



شکل ۱۴: (الف) شکست نمونه فاقد الیاف تحت فشار، (ب) شکست نمونه تقویت شده با الیاف تحت فشار

نتایج نرمال شده مقاومت فشاری پژوهش حاضر و طرح‌های نسبتاً مشابه مطالعات گذشته، در جدول ۱۱ ارائه شده‌اند. بهترین عملکرد مربوط به پژوهش بلی و همکاران (طرح حاوی ۱/۲٪ الیاف) بود. همچنین در اغلب مطالعات گذشته، درصد کم الیاف موجب افزایش مقاومت فشاری شده است. درصد بالای خاکستر و بایوچار پوسته برنج معمولاً کاهش مقاومت را در پی داشته است. نمونه‌های B5-500 و A5 در پژوهش حاضر، در مقایسه با اغلب نتایج بررسی شده پژوهش‌های گذشته، مقاومت فشاری بالاتری نشان دادند.

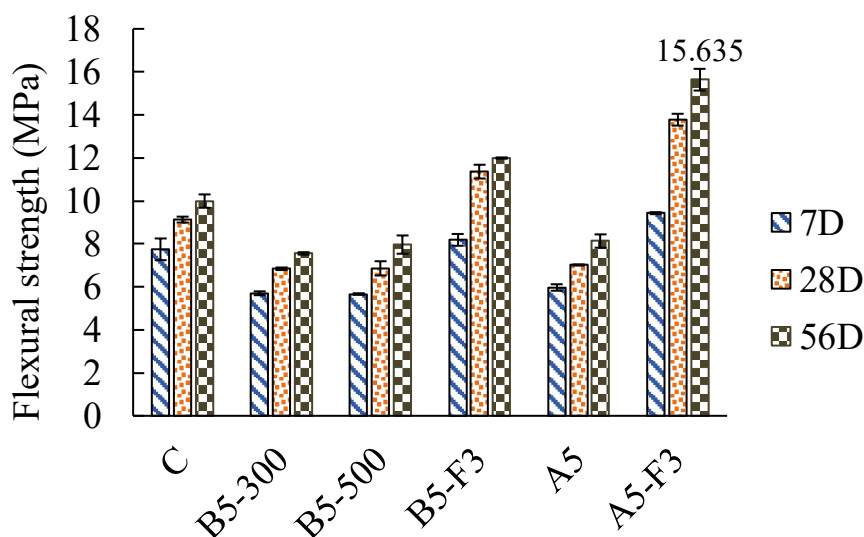
جدول ۱۱: مقایسه نتایج نرمال شده مقاومت فشاری ۲۸ روزه پژوهش حاضر با مطالعات گذشته

نرمال شده مقاومت فشاری	پژوهش	نرمال شده مقاومت فشاری	پژوهش
۰/۷۵	G. Huang et al- [14] 2025[10%RHB]	۱/۱۵	Current Research[B5-500]
۱/۰۹	S. Gupta et al- [21] 2020[2%RHB]	۰/۹۱	Current Research[B5-F3]
۰/۹۸	T. S. Bhagat et al- [22] 2025[4%RHB]	۱/۱۴	Current Research[A5]
۰/۹	P. F. E. Gunn et al- [35] 2024[20%RHB]	۰/۸۳	Current Research[A5-F3]
۰/۷۱	P. F. E. Gunn et al- [35] 2024[40%RHB]	۱/۰۳	M. Pellegrini et al- [7] 2013[10%RHA]
۱/۱۶	S. Guler et al- [36] 2023[0.5%Steel Fiber]	۰/۹۷	M. Pellegrini et al- [7] 2013[30%RHA]
۱/۱۲	S. Guler et al- [36] 2023[1%Steel Fiber]	۱/۰۴	J. Zhang et al- [8] 2025[10%RHA+5%CSP]
۱/۳۶	A. Belli et al- [39] 2020[1.2%BSF]	۱/۰۴	Y. Guo et al- [9] 2025[10%RHA +5%OCSP]
۱/۳۵	A. Belli et al- [39] 2020[1.6%BSF]	۰/۹۸	S. Nasiru et al- [10] 2021[10%RHA+50%RG]
۱/۱۲	A. Zaragoza-Benzal et al- [40] 2025[(60kg/m ³) Steel Fiber]	۰/۹۶	M. H. Javed et al- [12] 2022[5%RHB]
		۰/۹۳	G. Huang et al- [14] 2025[5%RHB]

۳-۵- مقاومت خمشی

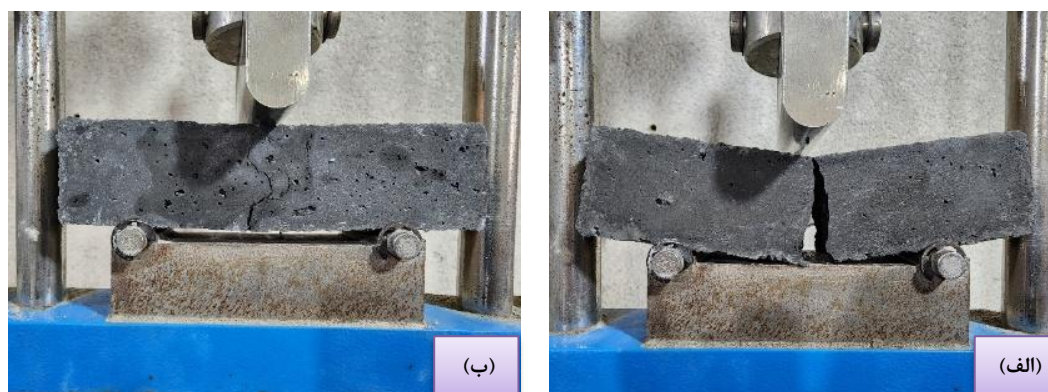
نتایج آزمایش مقاومت خمشی برای تمامی طرح‌های اختلاط در شکل ۱۵ ارائه شده‌اند. به منظور بررسی تأثیر دمای پیرولیز بر عملکرد بایوپچار پوسته برنج در مقاومت خمشی، نتایج حاصل از بایوپچار تولید شده در دماهای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد با یکدیگر مقایسه شدند. در تمامی سنین، مقاومت خمشی نمونه‌های B5-300 و B5-500 بسیار نزدیک به هم بود، با این حال، نمونه‌های B5-500 مقاومت کمی بالاتری نشان دادند. در سن ۵۶ روزه، میزان اختلاف اندکی افزایش یافته و به حدود ۶٪ رسید. در سن ۷ روزه، بیشترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه‌های A5-F3 و سپس B5-F3 بود. مقاومت خمشی A5-F3 حدود ۲۲٪ بیشتر از نمونه شاهد و ۱۵٪ بیشتر از B5-F3 بود. در سن ۲۸ روزه نیز مشابه سن ۷ روزه، نمونه‌های A5-F3 و B5-F3 بیشترین مقاومت خمشی را داشتند؛ به طوری که مقاومت A5-F3 حدود ۵۱٪ بیشتر از نمونه شاهد و ۲۱٪ بیشتر از B5-F3 بود. در سن ۵۶ روزه نیز، همانند سنین ۷ و ۲۸ روزه، نمونه‌های A5-F3 و B5-F3 بیشترین مقاومت خمشی را نشان دادند، به گونه‌ای که مقاومت A5-F3 حدود ۵۷٪ بیشتر از نمونه شاهد و ۳۰٪ بیشتر از B5-F3 بود. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ۳٪ الیاف فولادی موجب بهبود قابل توجه مقاومت خمشی در تمامی سنین می‌شود.

نتایج نشان می‌دهند که بایوچار و خاکستر به تنهایی افزایش قابل توجه مقاومت خمشی را ایجاد نمی‌کنند، که این موضوع در برخی پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است [۹، ۲۱]. با این حال، خاکستر عملکرد مطلوب‌تری نسبت به بایوچار دارد که می‌توان آن را به خاصیت پرکنندگی بهتر خاکستر نسبت داد. به طور کلی، مقاومت کمتر نمونه‌های حاوی بایوچار و خاکستر به کاهش انعطاف‌پذیری و تحمل تغییر شکل ناشی از افزودن این مواد مرتبط است.



شکل ۱۵: نتایج مقاومت خمشی تمامی طرح‌ها

افزودن الیاف فولادی سینوسی دوسر قلاب به ملات باعث افزایش مقاومت خمشی می‌شود. بررسی نحوه شکست نمونه‌ها نشان داد که حضور الیاف انسجام و پیوستگی بیشتری در حین شکست ایجاد کرده و رفتار انعطاف‌پذیر نمونه‌ها را بهبود می‌بخشد، در حالی که نمونه‌های فاقد الیاف به صورت شکننده و ناگهانی گسیخته شده و به دو نیم تقسیم شدند (شکل ۱۶). این رفتار ناشی از اثر پل زنی الیاف است، به گونه‌ای که الیاف هنگام ایجاد ترک مانند پلی میان دو طرف عمل کرده و از گسترش سریع ترک جلوگیری می‌کنند. پژوهش‌های گذشته نیز نتایج مشابه گزارش کرده‌اند و این بهبود را به تقویت اتصال و پیوستگی در اثر حضور الیاف نسبت داده‌اند [۳۹، ۴۱].



شکل ۱۶: (الف) شکست نمونه فاقد الیاف تحت خمش، (ب) شکست نمونه تقویت شده با الیاف تحت خمش

نتایج نرمال شده مقاومت خمشی پژوهش حاضر و مطالعات گذشته با طرح‌های نسبتاً مشابه در جدول ۱۲ ارائه شده‌اند. بهترین عملکرد، با اختلاف بسیار جزئی نسبت به نمونه A5-F3 از پژوهش حاضر، مربوط به پژوهش بلی و همکاران (طرح حاوی ۱/۱۶٪ الیاف) بود. در اغلب پژوهش‌های گذشته، افزایش درصد الیاف منجر به بهبود مقاومت خمشی شده است. در مطالعات فاقد الیاف، افزایش قابل توجه مقاومت مشاهده نشد و تنها در پژوهش گوپتا و همکاران افزایش جزئی مقاومت گزارش گردید.

جدول ۱۲: مقایسه نتایج نرمال شده مقاومت خمشی ۲۸ روزه پژوهش حاضر با مطالعات گذشته

نرمال شده مقاومت خمشی	پژوهش	نرمال شده مقاومت خمشی	پژوهش
۱/۰۱	S. Gupta et al- [21] 2020[2%RHB]	۰/۷۵	Current Research[B5-500]
۱/۲۷	S. Guler et al- [36] 2023[0.5%Steel Fiber]	۱/۲۴	Current Research[B5-F3]
۱/۴۳	S. Guler et al- [36] 2023[1%Steel Fiber]	۰/۷۷	Current Research[A5]
۱/۳۱	A. Belli et al- [39] 2020[1.2%BSF]	۱/۵۱	Current Research[A5-F3]
۱/۵۴	A. Belli et al- [39] 2020[1.6%BSF]	۰/۹۷	Y. Guo et al- [9] 2025[10%RHA +5%OCSP]
۱/۳۲	A. Zaragoza-Benzal et al- [40] 2025[(60kg/m ³) Steel Fiber]	۰/۹۳	S. Nasiru et al- [10] 2021[10%RHA+50%RG]

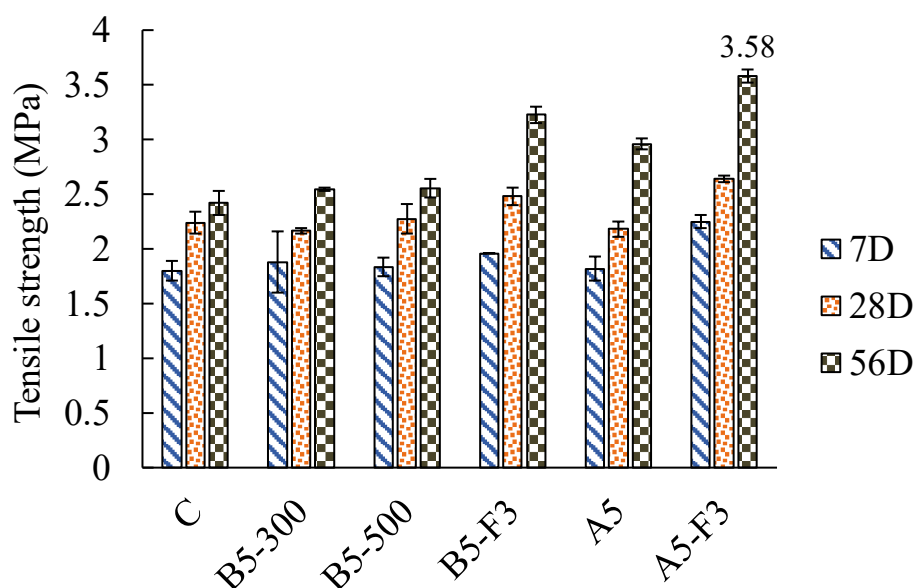
۳-۶- مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی تمامی طرح‌های اختلاط در شکل ۱۷ ارائه شده‌اند. برای بررسی تأثیر دمای تولید بایوپچار پوسته برنج، نمونه‌های حاوی بایوپچار تولید شده در دماهای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد با یکدیگر مقایسه شدند. در تمامی سنین، مقاومت کششی نمونه‌های B5-300 و B5-500 بسیار نزدیک بود. در سن ۷ روزگی، نمونه‌های B5-300 حدود ۲٪ مقاومت بالاتری نسبت به B5-500 داشتند، در حالی که در سنین ۲۸ و ۵۶ روزه، نمونه‌های B5-500 به ترتیب حدود ۵٪ و ۴٪ مقاومت بیشتری نسبت به B5-300 نشان دادند.

در سن ۷ روزه، نمونه A5-F3 بیشترین مقاومت کششی را داشت که حدود ۲۵٪ بیشتر از نمونه شاهد بود. در سن ۲۸ روزه نیز این نمونه بالاترین مقاومت کششی را نشان داد و تقریباً ۱۸٪ بیشتر از نمونه شاهد بود. در سن ۵۶ روزه نیز همانند سنین قبلی، A5-F3 دارای بیشترین مقاومت کششی بود و حدود ۴۸٪ بیشتر از نمونه شاهد مقاومت داشت.

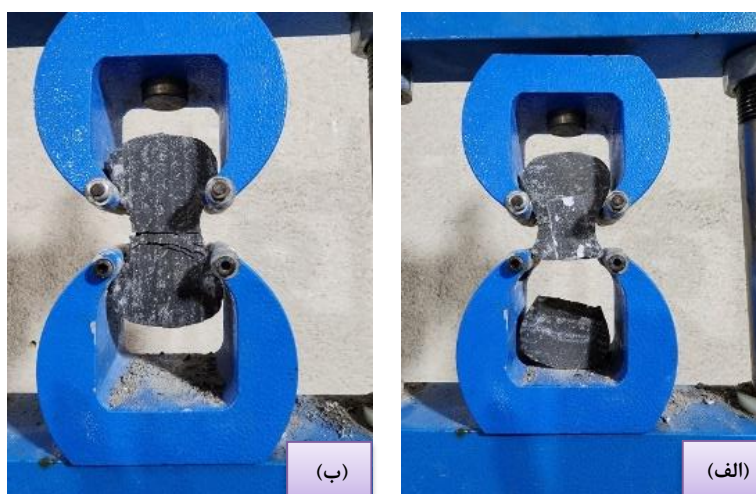
مقایسه نتایج نمونه‌های B5-300، B5-500، A5 و نمونه شاهد نشان داد که افزودن بایوپچار در سنین ۷ و ۲۸ روزه موجب افزایش مقاومت کششی می‌شود، که بیانگر تأثیر مثبت بایوپچار پوسته برنج بر بهبود ریزساختار و چسبندگی ملات است. نمونه A5 در سنین ۷ و ۲۸ روزه مقاومت کششی کمتری نسبت به نمونه شاهد داشت، اما در سن ۵۶ روزه عملکرد بهتری نشان داد و مقاومت کششی آن از تمامی نمونه‌های حاوی بایوپچار و شاهد بیشتر بود.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهند که در مقاومت کششی، برخلاف مقاومت خمشی که عوامل تغییر شکل، انعطاف‌پذیری و کشش همزمان تأثیرگذار هستند، بهبود ریزساختار و چسبندگی بهتر خمیر سیمان عامل اصلی افزایش مقاومت است. بنابراین افزایش مقاومت کششی مشاهده شده در نمونه‌های حاوی بایوپچار و خاکستر را می‌توان به نقش این مواد در بهبود ریزساختار و پیوند بهتر با ملات نسبت داد.



شکل ۱۷: نتایج مقاومت کششی تمامی طرح‌ها

نتایج آزمایش مقاومت کششی نشان داد که افزودن ۳٪ الیاف به نمونه‌های حاوی بایوپچار یا خاکستر پوسته برنج، مشابه نتایج مقاومت خمشی، منجر به افزایش قابل توجه مقاومت کششی در تمامی سنین نسبت به سایر نمونه‌ها شد. افزایش مقاومت کششی در اثر افزودن الیاف، در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است [۳۹، ۴۲]. علاوه بر این، الیاف نقش مؤثری در بهبود پیوستگی و انسجام ساختاری نمونه‌ها داشتند؛ به طوری که هنگام شکست، نمونه‌ها به صورت ترد شکسته نشدند و به دو نیم تقسیم نشدند (شکل ۱۸).



شکل ۱۸: (الف) شکست نمونه فاقد الیاف تحت کشش، (ب) شکست نمونه تقویت شده با الیاف تحت کشش

نتایج نرمال شده مقاومت کششی پژوهش حاضر و طرح‌های نسبتاً مشابه مطالعات گذشته در جدول ۱۳ ارائه شده است. همانند نتایج مقاومت خمشی، بهترین عملکرد مربوط به پژوهش بلی و همکاران (طرح حاوی ۱/۶٪ الیاف) بود. همچنین، همانند مقاومت خمشی، در اغلب پژوهش‌های گذشته با افزایش درصد الیاف، افزایش مقاومت کششی مشاهده شد. در پژوهش گو و همکاران، افزودن خاکستر منجر به افزایش جزئی مقاومت کششی گردید، ولی افزودن بایوپچار در پژوهش گوپتا و همکاران کاهش مقاومت را به همراه داشت. در پژوهش حاضر، افزودن بایوپچار موجب افزایش جزئی مقاومت شد و افزودن خاکستر نیز کاهش بسیار جزئی در مقاومت کششی ایجاد کرد.

جدول ۱۳: مقایسه نتایج نرمال شده مقاومت کششی ۲۸ روزه پژوهش حاضر با مطالعات گذشته

پژوهش	نرمال شده مقاومت کششی	پژوهش	نرمال شده مقاومت کششی
Current Research[B5-500]	۱/۰۲	S. Gupta et al- [21] 2020[2%RHB]	۰/۸۱
Current Research[B5-F3]	۱/۱۱	A. Belli et al- [39] 2020[1.2%BSF]	۱/۹۷
Current Research[A5]	۰/۹۷	A. Belli et al- [39] 2020[1.6%BSF]	۲/۱۵
Current Research[A5-F3]	۱/۱۸	A. Zaragoza-Benzal et al- [40] 2025[(60kg/m ³) Steel Fiber]	۱/۳۲
Y. Guo et al- [9] 2025[10%RHA +5%OCSP]	۱/۰۳		

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر جایگزینی بایوپچار و خاکستر پوسته برنج به عنوان جایگزین جزئی سیمان و همچنین نقش الیاف فولادی سینوسی دوسر قلاب بر خواص ملات سیمانی بررسی شد. نتایج اصلی به شرح زیر هستند:

۱- بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی نشان داد بایوپچار دارای ساختار متخلخل و ورقه‌ای است، درحالی‌که خاکستر پوسته برنج ساختاری ذره‌ای و نامنظم دارد. همچنین جایگزینی ۵٪ بایوپچار نسبت به ۵٪ خاکستر، موجب کاهش قابل توجه حفرات و ترک‌ها در نمونه‌ها گردید.

۲- جایگزینی ۵٪ بایوپچار یا خاکستر موجب کاهش کارایی ملات گردید که این کاهش در حضور الیاف تشدید شد. شدت افت کارایی در نمونه‌های حاوی بایوپچار چشمگیرتر بود.

۳- افزودن ۵٪ بایوپچار سبب تسریع بیشتر زمان‌های گیرش اولیه و نهایی نسبت به خاکستر شد.

۴- بایوپچار تولیدشده در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد عملکرد مکانیکی بهتری نسبت به بایوپچار حاصل از دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد.

۵- در مقاومت فشاری، افزودن ۵٪ بایوپچار پوسته برنج موجب تسریع در کسب مقاومت در سنین اولیه و همچنین حدود ۱۴٪ مقاومت بیشتر از نمونه‌های شاهد در سن ۵۶ روز شد. الیاف فولادی تأثیر معناداری بر مقاومت فشاری نداشتند ولی در کنترل گسترش ترک و جلوگیری از شکست ناگهانی موثر بودند.

۶- در مقاومت خمشی، افزودن ۳٪ الیاف به ملات حاوی خاکستر موجب افزایش حدود ۵۱٪ مقاومت در سن ۲۸ روز شد. نقش الیاف علاوه بر بهبود مقاومت، کنترل گسترش ترک و ایجاد رفتار شکل‌پذیر در شکست بود.

۷- در مقاومت کششی، ترکیب ۵٪ خاکستر با ۳٪ الیاف بهترین عملکرد را داشت؛ به طوری که در سن ۵۶ روز مقاومت کششی حدود ۴۸٪ بیشتر از نمونه‌های شاهد بود. همچنین الیاف همانند مقاومت خمشی، علاوه بر بهبود مقاومت در کنترل گسترش ترک و ایجاد رفتار شکل پذیر نقش داشتند.

به طور کلی، بایوچار در بهبود مقاومت فشاری و تسریع در کسب مقاومت مؤثرتر بود، در حالی که خاکستر عملکرد برتری در مقاومت خمشی و کششی نشان داد. با این حال، تولید بایوچار از نظر زیست محیطی پایدارتر است و در کنار عملکرد مکانیکی قابل قبول، می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای جایگزینی جزئی سیمان باشد. همچنین افزودن الیاف فولادی، ضمن ارتقای شکل پذیری، ضعف‌های موجود در مقاومت خمشی و کششی ملات‌های حاوی بایوچار و خاکستر را تا حد زیادی جبران کرد.

۴-۱ محدودیت‌های پژوهش

آزمایش‌های این پژوهش صرفاً بر روی نمونه‌های کوچک مقیاس انجام گرفت و بررسی عملکرد در ابعاد واقعی (مانند تیر، ستون و دال) صورت نگرفت. این موضوع می‌تواند تعمیم‌پذیری نتایج به مقیاس‌های سازه‌ای را محدود کند. علاوه بر این، دقت ابعادی قالب‌ها به طور کامل تضمین نشده و این مسئله احتمالاً بر برخی نتایج مکانیکی تأثیر گذار بوده است.

۴-۲ پیشنهادات برای تحقیقات آینده

با توجه به محدودیت‌های موجود، انجام مطالعات آینده در زمینه‌های زیر می‌تواند مفید باشد:

- بررسی اثر استفاده از الیاف ترکیبی (شامل چند نوع الیاف) بر خواص مکانیکی ملات‌های حاوی بایوچار و خاکستر پوسته برنج.
- ارزیابی عملکرد ملات در صورت ترکیب بایوچار پوسته برنج با بایوچار حاصل از سایر مواد، و مقایسه آن با ملات‌های ترکیبی حاوی خاکستر پوسته برنج و خاکستر سایر مواد.
- انجام آزمایش‌های جذب دی‌اکسید کربن برای ارزیابی دقیق‌تر پتانسیل زیست محیطی ملات‌های مورد بررسی.
- اجرای تحلیل چرخه عمر (LCA) برای هر دو نوع ملات و مقایسه نتایج به منظور تعیین اثرات زیست محیطی در مقیاس کلان.

سپاسگزاری

نویسنده از آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل به خاطر حمایت و راهنمایی کمال سپاسگزاری را دارد.

مراجع

- [1] S. S. Volaity *et al.*, (2025), "Towards decarbonization of cement industry: a critical review of electrification technologies for sustainable cement production," *npj Materials Sustainability*, vol. 3, no. 1, p. 23.
- [2] Y. Ali, M. S. Hassan, and A. Petrillo, (2025), "From waste to resource: Life cycle assessment of eco-friendly concrete in developing nations through energy transition," *Journal of Cleaner Production*, vol. 501, p. 145226.
- [3] S.-H. Kang, S.-G. Hong, and J. Moon, (2019), "The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 115, pp. 389–400.
- [4] E. Khankhaje, H. Jang, J. Kim, and M. Rafieizonooz, (2025), "Utilizing Rice Husk Ash as Cement Replacement in Pervious Concrete: A Review," *Developments in the Built Environment*, p. 100675.
- [5] E. Aprianti, P. Shafiqh, S. Bahri, and J. N. Farahani, (2015), "Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes—A review," *Construction and Building Materials*, vol. 74, pp. 176–187.
- [6] M. M. Meraz *et al.*, (2023), "On the utilization of rice husk ash in high-performance fiber reinforced concrete (HPFRC) to reduce silica fume content," *Construction and Building Materials*, vol. 369, p. 130576.

- [7] M. Pellegrini-Cervantes *et al.*, (2013), "Corrosion resistance, porosity and strength of blended portland cement mortar containing rice husk ash and nano-SiO₂," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 8, no. 8, pp. 10697–10710.
- [8] J. Zhang, Y. Guo, S. Zhuang, and Y. Li, (2025), "The Effect of Adding Rice Husk Ash (Rha) and Calcined Shell Powder (Csp) on the Properties of Cement Mortar," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 22, e04426.
- [9] Y. Guo, J. Zhang, M. T. Lakhari, and J. Wang, (2025), "Eco-friendly cement mortar production using rice husk ash and oyster seashell powder: A comprehensive study of mechanical, durability and life cycle properties," *Construction and Building Materials*, vol. 481, p. 141590.
- [10] S. Nasiru *et al.*, (2021), "Properties of cement mortar containing recycled glass and rice husk ash," *Construction and Building Materials*, vol. 299, p. 123900.
- [11] M. Ahmad *et al.*, (2014), "Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review," *Chemosphere*, vol. 99, pp. 19–33.
- [12] M. H. Javed, M. A. Sikandar, W. Ahmad, M. T. Bashir, R. Alrowais, and M. B. Wadud, (2022), "Effect of various biochars on physical, mechanical, and microstructural characteristics of cement pastes and mortars," *Journal of Building Engineering*, vol. 57, p. 104850.
- [13] Z. Li, X. Wang, S. Wang, and X. Feng, (2025), "Comparative study on the effect of agricultural waste biochar on the properties of cement mortar," *Industrial Crops and Products*, vol. 227, p. 120854.
- [14] G. Huang *et al.*, (2025), "Upcycling rice husk biochar into carbon-negative composites," *Construction and Building Materials*, vol. 470, p. 140459.
- [15] L. F. Morales, K. Herrera, J. E. López, and J. F. Saldarriaga, (2021), "Use of biochar from rice husk pyrolysis: assessment of reactivity in lime pastes," *Heliyon*, vol. 7, no. 11.
- [16] G. Pachideh, M. Gholhaki, and A. Moshtagh, (2019), "The effect of quantity and type of fibers and recycled metal springs on concrete properties," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 231–247.
- [17] R. A. Izadifard and M. Abdi Moghadam, (2021), "Evaluation of various content of steel fibers on improving the mechanical and durability properties of concrete at high temperatures," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 159–176.
- [18] K. Arab Shahrab, A. Mirzakhani, E. Kashi, and N. Bakhshi, (2024), "Investigation of the mechanical properties of structural lightweight concrete and fiber reinforced concrete exposed to elevated temperatures," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 11, no. 6, pp. 107–126.
- [19] J. Esfandiari and O. Heidari, (2021), "Investigation on the behavior of concrete with optimum percentage of steel fiber, microsilica, fly ash and hybrid fiber under different loading pattern," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 8, no. 6, pp. 130–150.
- [20] M. Bakhshipour, J. Esfandiari, and M. TahamouliRoudsari, (2023), "Experimental study of the effect of fiber additives to concrete materials in rc moment-resisting frames with manufacturing errors," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 10, no. 5, pp. 91–107.
- [21] S. Gupta, H. W. Kua, and S. Dai Pang, (2020), "Effect of biochar on mechanical and permeability properties of concrete exposed to elevated temperature," *Construction and Building Materials*, vol. 234, p. 117338.
- [22] T. S. Bhagat and R. K. Pancharathi, (2025), "Performance, microstructure and carbon sequestration potential of agro biochar based cement mortars," *Cement and Concrete Composites*, vol. 156, p. 105867.
- [23] ISIRI 389, "Portland Cement – Specifications (ISIRI 389)," Institute of Standards and Industrial Research of Iran, Tehran, Iran, 1378.
- [24] ASTM C33/C33M-24a, "Standard Specification for Concrete Aggregates," ASTM International, West Conshohocken, 2024.
- [25] ASTM C566-19, "Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying," ASTM International, West Conshohocken, 2019.
- [26] ASTM C128-22, "Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate," ASTM International, West Conshohocken, 2023.
- [27] ASTM A510/A510M-25, "Standard Specification for General Requirements for Wire Rods and Coarse Round Wire, Carbon Steel, and Alloy Steel," ASTM International, West Conshohocken, 2025.
- [28] ASTM C618-22, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," ASTM International, West Conshohocken, 2023.
- [29] ASTM C270-25a, "Standard Specification for Mortar for Unit Masonry," ASTM International, West Conshohocken, 2025.
- [30] ASTM C230/C230M-23, "Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement," ASTM International, West Conshohocken, 2023.

- [31] ASTM C191-21, "Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle," ASTM International, West Conshohocken, 2021.
- [32] ASTM C109/C109M-24, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 50 mm [2 in.] Cube Specimens)," ASTM International, West Conshohocken, 2024.
- [33] ASTM C348-21, "Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars," ASTM International, West Conshohocken, 2021.
- [34] ASTM C307-23, "Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacing," ASTM International, West Conshohocken, 2023.
- [35] P. F. E. Gunn, C. C. Onn, K. H. Mo, and H. V. Lee, (2024), "Enhancing carbon sequestration in cement mortar using high volume local rice husk biochar coupled with carbonation curing," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 21, p. e03591.
- [36] S. Guler and Z. F. Akbulut, (2023), "Workability, physical & mechanical properties of the cement mortars strengthened with metakaolin and steel/basalt fibers exposed to freezing-thawing periods," *Construction and Building Materials*, vol. 394, p. 132100.
- [37] M. Elsayed, M. H. Saad, and M. A. Hassanean, (2025), "Flexural behavior of reinforced high strength concrete slabs containing glass powder, fly ash, and rice husk ash as cement substitute," *Construction and Building Materials*, vol. 477, p. 141393.
- [38] M. Cao, Z. Liu, and C. Xie, (2020), "Effect of steel-PVA hybrid fibers on compressive behavior of CaCO₃ whiskers reinforced cement mortar," *Journal of Building Engineering*, vol. 31, p. 101314.
- [39] A. Belli, A. Mobili, T. Bellezze, and F. Tittarelli, (2020), "Commercial and recycled carbon/steel fibers for fiber-reinforced cement mortars with high electrical conductivity," *Cement and Concrete Composites*, vol. 109, p. 103569.
- [40] A. Zaragoza-Benzal, D. Ferrández, I. Prieto-Barrio, and A. L. Matilla, (2025), "Impact assessment of different steel fibres on mechanical, environmental and economic performance in cement mortars," *Results in Engineering*, p. 105021.
- [41] S. Li, C. Guan, H. Li, H. Wang, and L. Liang, (2024), "Size-dependent fracture behavior of steel fiber reinforced cement mortar modified by polymer," *Journal of Building Engineering*, vol. 89, p. 109297.
- [42] X. Shi, L. Brescia-Norambuena, C. Tavares, and Z. Grasley, (2020), "Semicircular bending fracture test to evaluate fracture properties and ductility of cement mortar reinforced by scrap tire recycled steel fiber," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 236, p. 107228.