

Experimental Evaluation of Polypropylene Fiber Content and Lightweight Aggregate Replacement on Concrete Compressive and Tensile Strengths

Atefeh Soleymani¹, Hashem Jahangir^{2*}

1-PhD. in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

2-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Research Group of Novel Technologies in Civil Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

h.jahangir@birjand.ac.ir

Received: 23 October 2025 **Revised:** 30 November 2025 **Accepted:** 01 December 2025

Research paper

Abstract

This study investigates the mechanical behavior of concrete modified with polypropylene fibers and lightweight aggregates through a series of experimental tests. To this end, cubic and cylindrical specimens were prepared with varying fiber contents (0, 0.05, 0.1 and 0.2% by volume) and different replacement levels of lightweight aggregates (0, 2.5, 7.5, 12, and 15%). The specimens were tested for compressive and tensile strengths at curing ages of 7, 28, and 56 days. The results indicated that incorporating polypropylene fibers at an optimal dosage of 0.05% improved both compressive and tensile strengths in most mix designs, while a 7.5% replacement of lightweight aggregates yielded the highest strength in the majority of cases. Although increasing the fiber content to 0.1% generally led to a reduction in strength, when combined with 15% lightweight aggregate, both compressive and tensile strengths showed improvement. Furthermore, prolonged curing durations had a significant positive effect on the mechanical performance of the specimens. The findings of this research provide valuable insights for designing lightweight, fiber-reinforced concretes with enhanced mechanical performance and reduced self-weight for structural applications.

Keywords: fiber-reinforced concrete, lightweight aggregate, polypropylene fiber, compressive strength, tensile strength.

* Corresponding Author: Hashem Jahangir

Soleymani A., Jahangir H. Experimental Evaluation of Polypropylene Fiber Content and Lightweight Aggregate Replacement on Concrete Compressive and Tensile Strengths. *J. Concr. Struct. Mater.*, 2024; 9(2): 188-214.

<http://doi.org/10.30478/jcsm.2025.543537.1404>

2538-5828/ © 2025 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

تحلیل تجربی اثر الیاف پلی پروپیلن و درصد جایگزینی سنگدانه‌های سبک بر مقاومت فشاری و کششی بتن

عاطفه سلیمانی^۱، هاشم جهانگیر^{۲*}

۱. دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۲. استادیار گروه مهندسی عمران، گروه پژوهشی فناوری‌های نوین در مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: h.jahangir@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در این پژوهش، رفتار مکانیکی بتن اصلاح شده با الیاف پلی پروپیلن و سنگدانه‌های سبک از طریق مجموعه‌ای از آزمایش‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای با مقادیر مختلفی از الیاف (۰، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد حجمی) و درصدهای متفاوت جایگزینی سنگدانه‌ی سبک (۰، ۲/۵، ۷/۵، ۱۲ و ۱۵ درصد) مطابق استانداردهای ASTM ساخته شده و در سه سن عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روز تحت آزمون‌های مقاومت فشاری و کششی برزیلی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف پلی پروپیلن با درصد بهینه‌ی ۰/۰۵ درصد موجب بهبود مقاومت فشاری و کششی در بیشتر طرح‌های اختلاط شده و استفاده از ۷/۵ درصد سنگدانه سبک نیز بیشترین مقاومت را در بیشتر حالت‌ها به همراه داشته است. در حالی که افزایش میزان الیاف به ۰/۱ درصد در بیشتر موردها باعث کاهش مقاومت شده است، تنها در ترکیب با ۱۵ درصد سنگدانه سبک افزایش مقاومت فشاری و کششی مشاهده شد. همچنین افزایش مدت زمان عمل‌آوری، اثر مثبت چشم‌گیری بر مقاومت مکانیکی نمونه‌ها داشت. یافته‌های این پژوهش می‌تواند راهنمایی برای طراحی بتن‌های سبک مسلح با عملکرد مکانیکی مطلوب و وزن کمتر در کاربردهای سازه‌ای فراهم آورد.

واژگان کلیدی: بتن الیافی، سنگدانه سبک، الیاف پلی پروپیلن، مقاومت فشاری، مقاومت کششی.

۱-۱- پیشینه پژوهش

بتن به عنوان پرکاربردترین ماده ساختمانی در جهان، نقش کلیدی در توسعه زیرساخت‌ها و سازه‌های عمرانی دارد. با این حال، بتن معمولی از نظر مقاومت کششی و رفتار در برابر ترک‌خوردگی محدودیت‌هایی دارد و تحت بارهای چرخه‌ای یا اثرات محیطی مستعد آسیب و کاهش دوام است. استفاده از مواد افزودنی و اصلاح‌کننده‌ها، به‌ویژه الیاف و سنگدانه‌های جایگزین، یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود عملکرد مکانیکی و دوام بتن محسوب می‌شود [۱ و ۲]. تحولات سریع در زمینه فناوری بتن نه تنها منجر به بهبود ویژگی‌های ماده‌ای و مکانیکی بتن معمولی شده است، بلکه توسعه انواع بتن جایگزین با خصوصیات ویژه، مانند بتن خودتراکم، بتن با مقاومت بالا و بتن مسلح با الیاف را نیز امکان‌پذیر ساخته است [۳ و ۴].

بتن سبکدانه^۱ (LWC) طی سال‌های زیادی در مهندسی عمران با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است [۵-۷]. به‌ویژه در سالیان اخیر در ساخت ساختمان‌های بلندمرتبه، پل‌های با دهانه طولانی و سکوه‌های دریایی این نوع سنگدانه کارایی بالایی داشته است [۸]. سنگدانه‌های سبک به‌طور کلی به دو دسته طبیعی (مانند پوکه معدنی^۲، دیاتومیت^۳، خاکسترهای آتشفشانی^۴ و غیره) و مصنوعی (مانند پرلیت^۵، شیل منبسط^۶، رس^۷، اسلیت^۸ و غیره) تقسیم می‌شوند. بتن سبک به‌راحتی می‌تواند با استفاده از سنگدانه‌های سبک طبیعی، مانند پامیس یا پرلیت، تولید شود [۲]. در مقایسه با بتن معمولی، بتن سبکدانه مزایای قابل توجهی دارد، از جمله چگالی کمتر [۹]، عایق حرارتی عالی‌تر [۱۰] و دوام بهتر [۱۱ و ۱۲]. با این حال، علی‌رغم این مزایا، معایبی همچون مقاومت مکانیکی پایین‌تر و تردی بیشتر [۱۳] منجر به گسیختگی زودهنگام سازه‌های LWC پس از رسیدن به بارهای حداکثر می‌شود [۱۴]. تحقیقات پیشین نشان داده است که رفتار تردی با افزایش مقاومت بتن تشدید می‌شود، که این موضوع کاربرد گسترده‌تر آن را محدود می‌سازد [۱۵ و ۱۶]. تولید بتن سبکدانه در سال‌های اخیر گسترش یافته و در حال حاضر تمامی انواع آن را شامل می‌شود؛ از بتن بدون ریزدانه با چگالی پایین (عمدتاً برای تولید بلوک) با چگالی ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، تا بتن سازه‌ای با چگالی ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مقاومت فشاری بین ۱ تا ۱۰۰ مگاپاسکال [۱۷].

از سوی دیگر، الیاف کوتاه از دیرباز برای مسلح کردن مواد ترد مانند سیمان یا آجرهای بنایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. امروزه انواع متعددی از الیاف برای کاربردهای تجاری در دسترس هستند که مهم‌ترین آن‌ها شامل الیاف فولادی، شیشه‌ای، الیاف مصنوعی (مانند پلی‌پروپیلن، کربن و نایلون) و برخی الیاف طبیعی می‌باشند [۲۰-۱۷]. در همین راستا، ترکیب استفاده از سنگدانه‌های سبک همراه با الیاف تقویتی به منظور بهبود ویژگی‌های ماده‌ای و مکانیکی بتن سبک در حالت تازه و سخت‌شده معرفی شده است و منجر به توسعه بتن سبک مسلح با الیاف^۹ شده است که کاربرد آن در چندین مطالعه تجربی و موارد واقعی گزارش شده است [۲۴-۲۱]. انواع مختلفی از بتن سبک مسلح با الیاف، توسعه یافته و مورد بررسی قرار گرفته‌اند و تفاوت‌های رفتاری آن‌ها عمدتاً به نوع سنگدانه‌ها و جنس الیاف (فولاد، کربن، پلی‌پروپیلن^{۱۰} و غیره) نسبت داده می‌شود [۳].

مطالعات آزمایشگاهی متعددی در زمینه استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در بتن منتشر شده است [۳۱-۲۵]. در بیشتر این مطالعات، نسبت حجمی الیاف پلی‌پروپیلن مورد استفاده در محدوده ۰/۱ تا ۰/۵ درصد بوده است [۱۷ و ۳۰]. پژوهش‌های موجود تأثیر تقویتی

¹ Lightweight concrete

² Pumice

³ Diatomite

⁴ volcanic cinders

⁵ perlite

⁶ Expanded shale

⁷ Clay

⁸ Slate

⁹ fiber reinforced lightweight concrete (FRLWC)

¹⁰ polypropylene

الیاف پلی پروپیلن بر عملکرد بتن را نشان داده‌اند. نتایج تحلیل‌های میکروسکوپی [۳۱ و ۳۲] حاکی از آن است که استفاده از مقدار بهینه‌ای از الیاف پلی پروپیلن می‌تواند حفره‌های داخلی بتن را پر کند. این الیاف که به صورت تصادفی در حجم بتن توزیع می‌شوند، اثری مشابه یک ساختار مش‌بافت بر ماتریس بتن اعمال کرده و مقاومت آن در برابر ترک خوردگی را بهبود می‌بخشند. از سوی دیگر، نتایج آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی بر روی بتن مسلح با الیاف پلی پروپیلن نشان می‌دهد که افزودن درصد حجمی مناسب از این الیاف می‌تواند به طور مؤثری خواص مقاومت کششی، خمشی و ضربه‌ای بتن را ارتقا دهد [۳۷-۳۵].

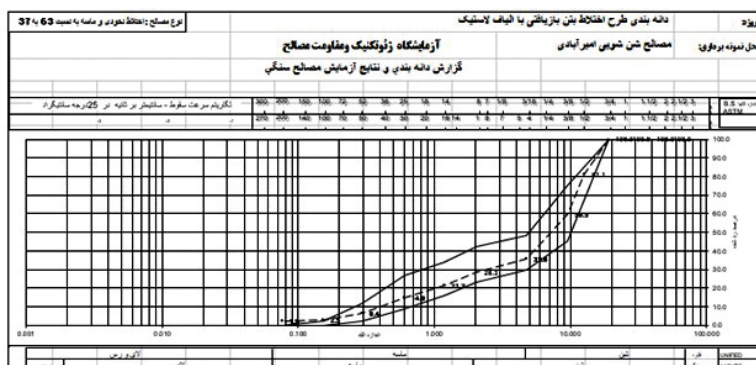
بنابراین در گام بعدی، افزودن الیاف به مخلوط LWC نیز به عنوان روشی مؤثر برای بهبود مقاومت آن شناخته شده است [۳۸-۴۰]. بیشتر مطالعات نشان داده‌اند که اثر تقویتی الیاف فولادی بر خواص بتن سبک به دلیل مقاومت کششی بالا و طول بیشتر این نوع الیاف، برتر از الیاف پلی پروپیلن است. با این حال، وزن مخصوص زیاد و مقاومت پایین در برابر خوردگی در الیاف فولادی، کاربرد گسترده آن را با محدودیت مواجه می‌کند [۱].

۲-۱- نوآوری و اهمیت پژوهش

در این مطالعه، با هدف غلبه بر این محدودیت‌ها، استفاده از الیاف پلی پروپیلن به عنوان جایگزینی سبک، ارزان، مقاوم در برابر خوردگی و با قابلیت توزیع یکنواخت در ماتریس بتن مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، تأثیر مقادیر مختلف الیاف پلی پروپیلن در کنار درصدهای گوناگون جایگزینی سنگ‌دانه‌های سبک بر خواص مکانیکی بتن شامل مقاومت فشاری و کششی در سنین عمل‌آوری مختلف مطالعه شده است. این رویکرد ضمن کاهش وزن مخصوص بتن و بهبود عملکرد مکانیکی آن، می‌تواند به توسعه مصالح سبک و مقاوم برای کاربردهای سازه‌ای نوین منجر شود و مبنایی برای طراحی بهینه مخلوط‌های بتن سبک الیافی فراهم آورد. این امر نوآوری اصلی پژوهش حاضر را در ترکیب هم‌زمان اثرات الیاف پلی پروپیلن و سنگ‌دانه‌های سبک در چارچوبی آزمایشگاهی و نظام‌مند نشان می‌دهد.

در سال‌های اخیر، استفاده از بتن اصلاح‌شده با الیاف و سنگ‌دانه‌های سبک به عنوان رویکردی نوین برای ارتقای خواص مکانیکی و دوام سازه‌های بتنی مورد توجه گسترده قرار گرفته است. بررسی دقیق رفتار مکانیکی این نوع بتن، شامل مقاومت فشاری، کششی و خمشی، امکان درک عمیق‌تری از عملکرد آن تحت شرایط بارگذاری مختلف را فراهم می‌سازد و می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای طراحی سازه‌های سبک و مقاوم ارائه دهد.

با توجه به روند فزاینده استفاده از مصالح سبک با مقاومت مطلوب، بهره‌گیری هم‌زمان از الیاف پلی پروپیلن و سنگ‌دانه‌های سبک نه تنها موجب کاهش وزن مرده سازه می‌شود، بلکه می‌تواند از ایجاد ترک‌های ناشی از انقباض پلاستیک و همچنین آسیب‌های ناشی از بارهای چرخه‌ای جلوگیری کند و در نتیجه عملکرد لرزه‌ای سازه را بهبود بخشد. افزون بر این، داده‌های آزمایشگاهی حاصل از این پژوهش می‌تواند مبنایی برای توسعه مدل‌های تحلیلی و عددی پیشرفته‌تر به منظور پیش‌بینی دقیق رفتار بتن اصلاح‌شده فراهم آورد. بر این اساس، نتایج این مطالعه نه تنها به گسترش دانش مهندسی مصالح و بهبود درک از رفتار بتن‌های نوین کمک می‌کند، بلکه قابلیت‌های کاربردی چشمگیری در طراحی سازه‌های سبک، مقاوم در برابر ترک خوردگی و دارای دوام بالا دارد. این امر می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای استانداردهای ساخت، افزایش بهره‌وری سازه‌ها و بهینه‌سازی عملکرد کلی سیستم‌های بتنی ایفا نماید.



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی

۲-۱-۲- الیاف و سنگدانه‌های سبک

در این پژوهش، همان‌گونه که در شکل (۳-الف) و جدول (۲) نشان داده شده است، از الیاف پلی‌پروپیلن به‌منظور جبران کاهش مقاومت‌های کششی و فشاری در نمونه‌های بتنی استفاده شده است. الیاف مورد استفاده از شرکت مقاوم‌سازی افزیر تهیه شده و مشخصات فنی آن مطابق با اطلاعات ارائه‌شده توسط این شرکت در جدول (۲) گزارش شده است. افزون بر این، به‌منظور کاهش وزن مخصوص بتن و بهبود عملکرد مکانیکی آن، بخشی از سنگدانه‌های معمولی با سنگدانه‌های سبک جایگزین شده است. این جایگزینی علاوه بر کاهش وزن مرده سازه، می‌تواند در کنترل ترک‌های ناشی از بارهای مختلف و افزایش دوام نمونه‌ها مؤثر باشد. نمونه‌ای از سنگدانه‌های سبک مصرفی در این پژوهش در شکل (۳-ب) نمایش داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳. الف) الیاف درونی پلی‌پروپیلن مصرفی؛ ب) سنگدانه‌های سبک

جدول ۲. ویژگی‌های مکانیکی الیاف پلی‌پروپیلن مصرفی

ویژگی	مقدار
طول (mm)	۱۲
کشیدگی (%)	۸/۰
چگالی (gr/cm ³)	۹۱۰/۰
مقاومت کششی (MPa)	۴۰۰

۲-۲- طرح اختلاط

به منظور تعیین درصد بهینه الیاف پلی پروپیلن، پس از انجام چندین مرحله سعی و خطا، چهار درصد مختلف شامل ۰، ۰/۵، ۱/۱ و ۰/۲ درصد حجمی الیاف نسبت به حجم بتن انتخاب شد. این مقادیر برای سطوح مختلف جایگزینی سنگ‌دانه‌های سبک در طرح اختلاط مورد استفاده قرار گرفتند تا اثر هم‌زمان الیاف و سنگ‌دانه‌های سبک بر خواص بتن ارزیابی شود. مقادیر دقیق اجزای طرح اختلاط شامل الیاف، سیمان، آب، افزودنی (فوق روان‌کننده)، درشت‌دانه‌ها و ریزدانه‌ها، در جدول (۳) بر حسب حجم واحد آورده شده است. برای اختلاط مصالح مصرفی، از بتونیر با ظرفیت ۳۵۰ لیتر استفاده شد تا اختلاط یکنواخت و کیفیت مناسب بتن حاصل شود.

جدول ۳. طرح اختلاط نمونه‌های بتنی

مقدار افزودنی (فوق روان‌کننده) (L/100kg cement)	ریزدانه (kg/m ³)	درشت‌دانه (kg/m ³)	آب مصرفی (kg/m ³)	عیار سیمان (kg/m ³)	الیاف پلی پروپیلن (kg/m ³)	نمونه‌ها
۰/۹	۹۰۰	۹۰۰	۲۲۰	۴۰۰	۰	بدون الیاف
۰/۹	۹۰۰	۹۰۰	۲۲۰	۴۰۰	۰/۵۰۰۵	۰/۰۵٪ الیاف
۰/۹	۹۰۰	۹۰۰	۲۲۰	۴۰۰	۰/۹۱	۰/۱٪ الیاف
۰/۹	۹۰۰	۹۰۰	۲۲۰	۴۰۰	۱/۸۲	۰/۲٪ الیاف

۲-۳- ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

در این پژوهش، در مجموع تعداد ۳۰۰ نمونه بتنی ساخته شده است. از این تعداد، ۱۵۰ نمونه مکعبی با ابعاد (۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر) به منظور انجام آزمون مقاومت فشاری (با نماد C) و ۱۵۰ نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر جهت آزمون مقاومت کششی (با نماد T) در نظر گرفته شدند. این نمونه‌ها در سه سطح مختلف الیاف پلی پروپیلن شامل بدون الیاف درونی (P00)، حاوی ۰/۰۵ درصد الیاف (P0.05)، حاوی ۰/۱ درصد الیاف (P0.1) و حاوی ۰/۲ درصد الیاف (P0.2) ساخته و بررسی شدند. همچنین، برای میزان جایگزینی سنگ‌دانه‌های سبک پنج سطح مختلف لحاظ گردید: بدون سنگ‌دانه سبک (Agg00)، حاوی ۲/۵ درصد (Agg2.5)، حاوی ۷/۵ درصد (Agg7.5)، حاوی ۱۲ درصد (Agg12) و حاوی ۱۵ درصد (Agg15). این مقادیر به منظور بررسی تأثیر هم‌زمان میزان الیاف و درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌های سبک بر رفتار مکانیکی بتن انتخاب شده‌اند. به منظور نام‌گذاری نمونه‌های مکعبی مربوط به آزمون مقاومت فشاری از الگوی C_AggAgg_Pp_n و برای نمونه‌های استوانه‌ای مربوط به آزمون مقاومت کششی از الگوی T_AggAgg_Pp_n استفاده شد. در این الگو:

- حرف C نشان‌دهنده‌ی آزمون مقاومت فشاری و حرف T بیانگر آزمون کششی است.
- عبارت Agg بیانگر میزان سنگ‌دانه سبک مورد استفاده است (Agg00، Agg2.5، Agg7.5، Agg12 و Agg15).
- عبارت Pp درصد الیاف پلی پروپیلن مصرفی را نشان می‌دهد (P00، P0.05، P0.1 و P0.2).
- حرف n نیز شماره‌ی نمونه‌ی تکراری را مشخص می‌کند.

برای هر گروه سه نمونه‌ی تکراری ساخته شده است تا دقت و اطمینان نتایج افزایش یابد. تمامی نمونه‌ها پیش از انجام آزمون‌های مقاومت فشاری و کششی در سه بازه زمانی ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه در شرایط استاندارد در آب عمل‌آوری شدند. تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول (۴) ارائه شده است.

برای تهیه طرح‌های اختلاط، یک پروتکل اختلاط ثابت به‌منظور تضمین یکنواختی مخلوط‌ها به‌کار گرفته شد. ابتدا سنگ‌دانه‌های ریز و درشت به‌مدت یک دقیقه در میکسر با سرعت ۳۰ دور بر دقیقه (rpm)^{۱۱} مخلوط شدند. سپس حدود ۵۰ درصد آب اختلاط به همراه فوق‌روان‌کننده افزوده شد و عملیات مخلوط‌کردن به‌مدت یک دقیقه ادامه یافت. پس از آن، سیمان به مخلوط افزوده شده و هم‌زدن با سرعت rpm60 به‌مدت دو دقیقه انجام شد تا ملات اولیه تشکیل شود. در مرحله بعد، الیاف پلی‌پروپیلن به‌صورت تدریجی و یکنواخت طی ۳۰ ثانیه به مخلوط اضافه شد تا از گلوله‌ای‌شدن احتمالی جلوگیری شود؛ سپس مخلوط به‌مدت دو دقیقه دیگر با سرعت rpm60 هم‌زده شد. برای جلوگیری از تجمع توده‌ای الیاف، طی فرآیند اختلاط، مخلوط از نظر وجود گره‌های الیاف به‌صورت چشمی بررسی شد و در صورت مشاهده، زمان مخلوط‌کردن افزایش یافت تا توزیع یکنواخت الیاف حاصل شود.

جدول ۴. تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی

تعداد نمونه‌ها استوانه‌ای	تعداد نمونه مکعبی	زمان عمل‌آوری	الیاف پلی‌پروپیلن	سنگ‌دانه‌ها
۹	۹	۵۶ و ۲۸،۷	بدون الیاف	بدون سنگ‌دانه‌سبک
	۹	۹	۵۶ و ۲۸،۷	۰۵/۰٪ الیاف
	۹	۹	۵۶ و ۲۸،۷	۱/۰٪ الیاف
	۳	۳	۷	۲/۰٪ الیاف
۹	۹	۵۶ و ۲۸،۷	بدون الیاف	۵/۲٪ سنگ‌دانه‌سبک
	۹	۹	۵۶ و ۲۸،۷	۰۵/۰٪ الیاف
	۹	۹	۵۶ و ۲۸،۷	۱/۰٪ الیاف
	۳	۳	۷	۲/۰٪ الیاف
۹	۹	۵۶ و ۲۸،۷	بدون الیاف	۵/۷٪ سنگ‌دانه‌سبک
	۹	۹	۵۶ و ۲۸،۷	۰۵/۰٪ الیاف
	۹	۹	۵۶ و ۲۸،۷	۱/۰٪ الیاف
	۳	۳	۷	۲/۰٪ الیاف
۹	۹	۵۶ و ۲۸،۷	بدون الیاف	۱۲٪ سنگ‌دانه‌سبک
	۹	۹	۵۶ و ۲۸،۷	۰۵/۰٪ الیاف
	۹	۹	۵۶ و ۲۸،۷	۱/۰٪ الیاف
	۳	۳	۷	۲/۰٪ الیاف
۹	۹	۵۶ و ۲۸،۷	بدون الیاف	۱۵٪ سنگ‌دانه‌سبک
	۹	۹	۵۶ و ۲۸،۷	۰۵/۰٪ الیاف
	۹	۹	۵۶ و ۲۸،۷	۱/۰٪ الیاف
	۳	۳	۷	۲/۰٪ الیاف
۰۵۱	۰۵۱	مجموع		

^{۱۱} round per minute

۲-۴- معرفی آزمایش‌ها

۲-۴-۱- آزمایش اسلامپ

همان‌گونه که در شکل (۴) نمایش داده شده است، برای هر طرح اختلاط، به‌منظور ارزیابی میزان کارایی بتن تازه، آزمایش اسلامپ انجام شد و نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۵) گزارش شده است. بر اساس داده‌های جدول (۵)، مشاهده می‌شود که به‌طور کلی، با افزایش درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌های سبک، میزان اسلامپ نیز افزایش یافته است؛ این موضوع نشان‌دهنده‌ی بهبود روانی و افزایش کارایی مخلوط در اثر استفاده از سنگ‌دانه‌های سبک است. در مقابل، افزودن الیاف پلی‌پروپیلن موجب کاهش میزان اسلامپ و در نتیجه کاهش روانی مخلوط شده است. این پدیده به دلیل ایجاد شبکه‌ای از الیاف درون مخلوط و افزایش مقاومت آن در برابر تغییر شکل پلاستیک رخ می‌دهد که باعث کاهش روانی بتن تازه می‌شود.



شکل ۴. نمونه‌ای از انجام آزمون اسلامپ

جدول ۵. مقدار اسلامپ طرح اختلاط نمونه ستون‌های بتنی

میزان اسلامپ (cm)	نمونه‌ها
۶/۸	بدون الیاف
۶/۴	۰/۰۵٪ الیاف
۵/۹	۰/۱٪ الیاف
۵/۳	۰/۲٪ الیاف
۷/۴	بدون الیاف
۶/۸	۰/۰۵٪ الیاف
۶/۲	۰/۱٪ الیاف
۵/۷	۰/۲٪ الیاف
۷/۹	بدون الیاف
۷/۴	۰/۰۵٪ الیاف
۷/۱	۰/۱٪ الیاف
۶/۸	۰/۲٪ الیاف
۸/۳	بدون الیاف
۷/۸	۰/۰۵٪ الیاف
۶/۹	۰/۱٪ الیاف
۶/۲	۰/۲٪ الیاف
۸/۹	بدون الیاف
۸/۴	۰/۰۵٪ الیاف
۷/۶	۰/۱٪ الیاف
۷/۱	۰/۲٪ الیاف

۲-۴-۲- آزمون تعیین مقاومت فشاری

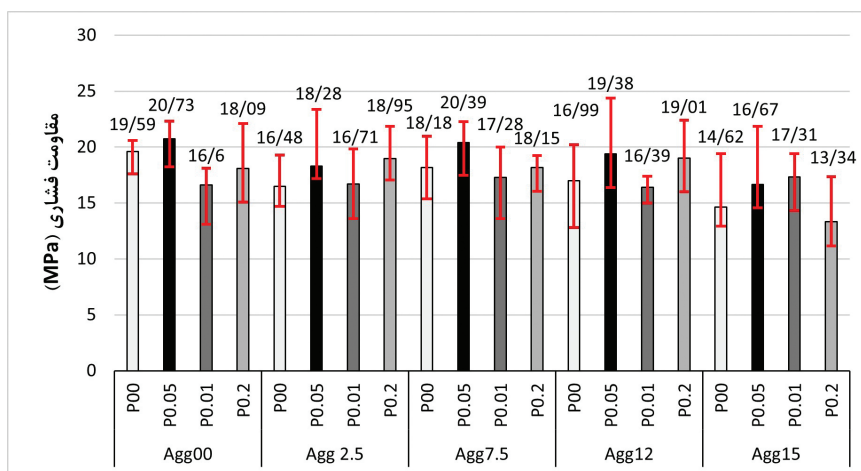
برای انجام آزمون مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی استاندارد با ابعاد (۱۵×۱۵×۱۵) سانتی‌متر طبق استاندارد ASTM C39 [۴۷] استفاده شده است. پس از دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه در استخر آب، مقاومت فشاری این نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. این بازه‌های زمانی به‌منظور بررسی روند افزایش مقاومت فشاری در طول زمان و ارزیابی اثر ترکیب مصالح بر عملکرد مکانیکی بتن انتخاب شده‌اند. آزمون‌ها با استفاده از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰۰ kN انجام شد. این دستگاه مجهز به لودسل با دقت ۰/۵ درصد ظرفیت اسمی است و نرخ بارگذاری مطابق استاندارد ASTM C39 و به‌صورت ثابت برابر با ۰/۲۵ MPa تنظیم شد [۴۷]. نحوه محاسبه مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بر اساس رابطه (۱) انجام شده است. در این رابطه، نسبت نیروی اعمال‌شده در لحظه شکست به سطح مقطع نمونه، معیار تعیین مقاومت فشاری بتن محسوب می‌شود. این روش یکی از متداول‌ترین و دقیق‌ترین روش‌ها برای ارزیابی رفتار فشاری بتن در استانداردهای بین‌المللی است.

$$f_c = \frac{P}{a^2} \quad (1)$$

و الیاف درونی پلی‌پروپیلن است، پیشنهاد خواهد شد. این طرح به منظور دستیابی به بالاترین عملکرد مکانیکی و دوام سازه‌ای، بهینه‌سازی شده و می‌تواند مبنای کاربرد عملی در طراحی و اجرای سازه‌های بتنی سبک و مقاوم قرار گیرد.

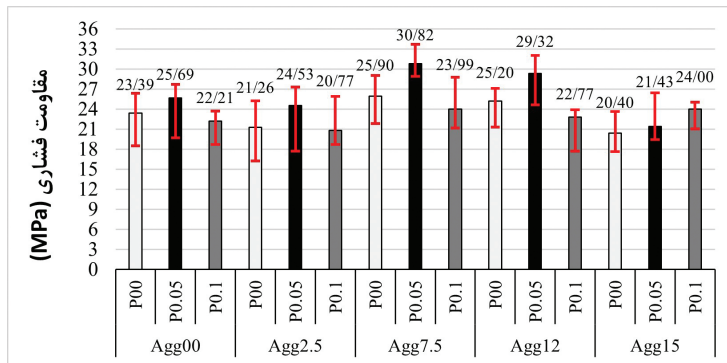
۱-۳- آزمون‌های تعیین مقاومت فشاری

در این پژوهش، به منظور تعیین کران‌های بالا و پایین میزان بهینه استفاده از الیاف درونی پلی‌پروپیلن، آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی استاندارد با ابعاد (۱۵×۱۵×۱۵) سانتی‌متر انجام شد. در این آزمایش، نمونه‌ها دارای مقادیر مختلف جایگزینی سنگ‌دانه‌های سبک به جای سنگ‌دانه‌های معمولی بودند که شامل پنج سطح ۰ درصد (Agg00)، ۲/۵ درصد (Agg2.5)، ۷/۵ درصد (Agg7.5)، ۱۲ درصد (Agg12) و ۱۵ درصد (Agg15) می‌باشند. همچنین، به منظور بررسی تأثیر مقدار الیاف بر رفتار مکانیکی بتن، از چهار سطح متفاوت الیاف پلی‌پروپیلن شامل بدون الیاف (P00)، ۰/۵٪ (P0.05)، ۰/۱٪ (P0.1)، ۰/۲٪ (P0.2) استفاده شد. پس از گذشت هفت روز عمل‌آوری در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی، نمونه‌ها جهت تعیین مقاومت فشاری زیر دستگاه جک فشاری قرار داده شدند. نتایج به دست آمده از آزمون مقاومت فشاری به همراه مقادیر انحراف استاندارد نمونه‌های عمل‌آوری شده پس از ۷ روز، در شکل (۶) ارائه شده است. این نتایج به عنوان مبنایی برای تحلیل اثر هم‌زمان میزان الیاف پلی‌پروپیلن و درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌های سبک بر مقاومت فشاری بتن مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

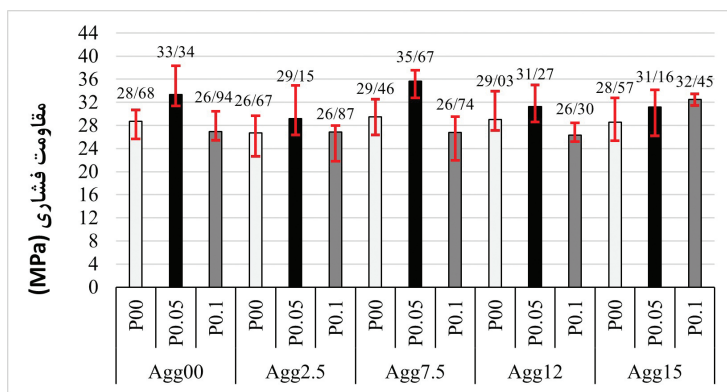


شکل ۶. نتیجه‌های آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی استاندارد ۷ روزه

از بررسی نتایج ارائه شده در شکل (۶) می‌توان دریافت که در میان نمونه‌های استاندارد مکعبی شکل بدون الیاف درونی (P00) و نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ (P0.05)، ۰/۱٪ (P0.1) و ۰/۲٪ (P0.2) الیاف پلی‌پروپیلن، نمونه‌های دارای ۰/۲٪ الیاف پلی‌پروپیلن بیشترین نوسان در نتایج مقاومت فشاری را نشان داده‌اند. به طوری که با کاهش حدود ۳۰ درصدی مقاومت فشاری، مقدار این مقاومت از ۱۹/۰۱ مگاپاسکال در حالت ۱۲٪ جایگزینی سنگ‌دانه سبک به ۱۳/۳۴ مگاپاسکال در حالت ۱۵٪ جایگزینی کاهش یافته است؛ که این مقدار کمترین میزان مقاومت فشاری در میان نمونه‌های ۷ روزه محسوب می‌شود. بنابراین، در ادامه تنها مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی فاقد الیاف درونی و نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ و ۰/۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی به همراه مقادیر انحراف استاندارد پس از گذشت ۲۸ و ۵۶ روز از زمان عمل‌آوری در شرایط آزمایشگاه، در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است.



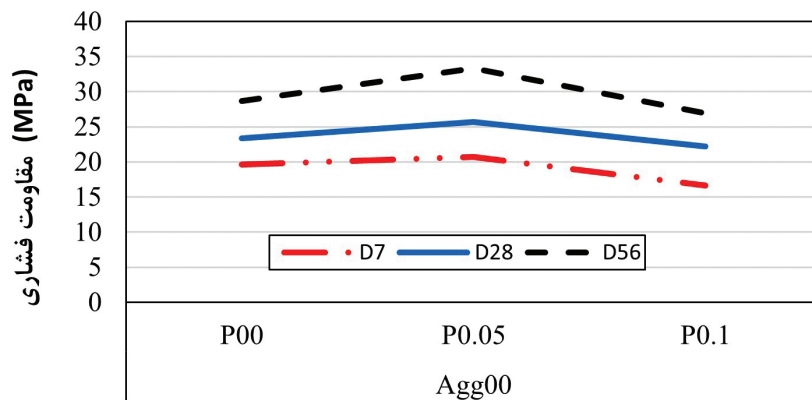
شکل ۷. نتیجه‌های آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی استاندارد ۲۸ روزه



شکل ۸. نتیجه‌های آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی استاندارد ۵۶ روزه

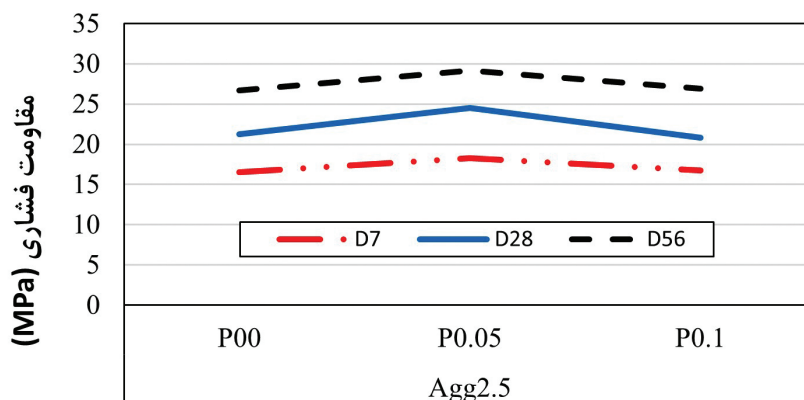
۳-۱-۱- اثر الیاف پلی پروپیلن بر رفتار فشاری نمونه‌های مکعبی

شکل (۹) نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بدون استفاده از سنگ‌دانه‌های سبک (Agg00) را نمایش می‌دهد.



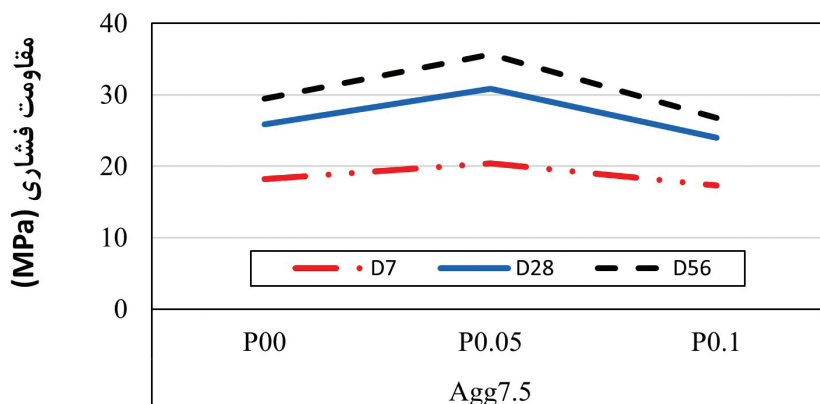
شکل ۹. نتیجه‌های آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های بدون سنگ‌دانه سبک

شکل (۹) نشان می‌دهد که همان‌طور که انتظار می‌رفت، افزایش مدت زمان عمل‌آوری موجب افزایش مقاومت فشاری تمامی نمونه‌های مکعبی شده است. همچنین، بیشترین میزان مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های بدون سنگ‌دانه سبک و دارای ۰/۰۵٪ (P0,05) الیاف درونی پلی‌پروپیلن است. علاوه بر این، در تمامی حالت‌ها افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۰/۱٪ باعث کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف شده است. نتیجه‌های آزمون تعیین مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی دارای ۲/۵٪ سنگ‌دانه سبک (Agg2.5) در شکل (۱۰) ارائه شده است. این شکل روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها را در بازه‌های زمانی مختلف عمل‌آوری نشان می‌دهد و امکان مقایسه تأثیر میزان الیاف درونی پلی‌پروپیلن بر رفتار فشاری بتن سبک را فراهم می‌سازد.



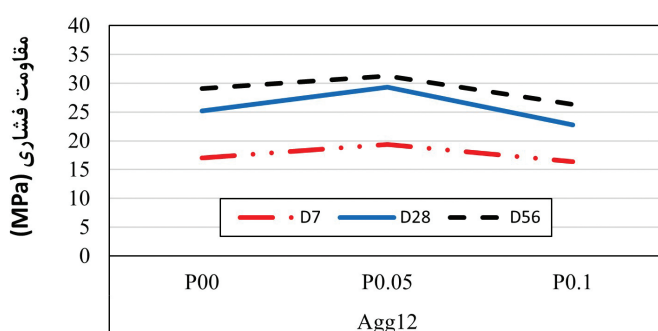
شکل ۱۰. نتیجه‌های آزمون مقاومت فشاری نمونه‌ها با ۲/۵٪ سنگ‌دانه سبک

تحلیل شکل (۱۰) نشان می‌دهد که مشابه با نمونه‌های بدون سنگ‌دانه سبک، افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۵۶ روز موجب افزایش مقاومت فشاری در تمامی نمونه‌های مکعبی می‌شود. همچنین مقایسه نمونه‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی ۰/۰۵٪ الیاف درونی پلی‌پروپیلن (P0.05) مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف (P00) و نمونه‌های دارای ۰/۱٪ الیاف (P0.1) دارند. در تمامی حالت‌ها، افزودن ۰/۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن درونی سبب کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های بدون الیاف شده است. در شکل (۱۱)، نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی استاندارد حاوی ۷/۵٪ سنگ‌دانه سبک (Agg7.5) ارائه شده است. این شکل روند تغییرات مقاومت فشاری را در بازه‌های زمانی مختلف عمل‌آوری نمایش می‌دهد.



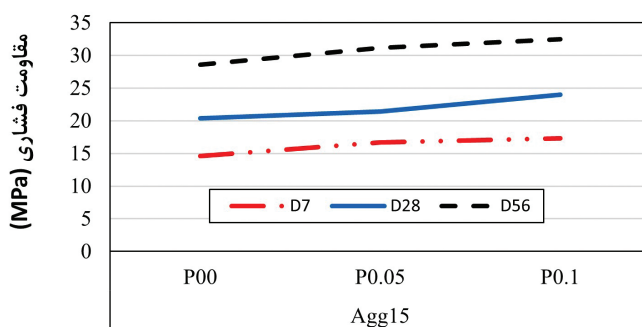
شکل ۱۱. نتیجه‌های آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های دارای ۷/۵٪ سنگ‌دانه سبک

بررسی شکل (۱۱) نشان می‌دهد که مطابق انتظار، افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها منجر به بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری تمامی نمونه‌های مکعبی شده است؛ به‌گونه‌ای که مقاومت فشاری نمونه‌های ۵۶ روزه نسبت به نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه افزایش چشم‌گیری دارد. همچنین، مشابه با نتایج بخش‌های پیشین، بیشترین مقدار مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های حاوی ۰/۰۵٪ (P0.05) الیاف پلی‌پروپیلن است. به‌طور دقیق، میزان افزایش مقاومت فشاری این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون الیاف درونی (P0.0) به‌ترتیب برابر با ۱۲/۱۱٪، ۲۱/۱۰٪ و ۱۸/۹۹٪ در سنین عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روز است. با وجود این روند مثبت، همانند مشاهدات قبلی، افزودن ۰/۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن درونی منجر به کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف شده است. نتیجه‌های به‌دست‌آمده از آزمون تعیین مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی دارای ۱۲٪ سنگ‌دانه سبک (Agg12) در شکل (۱۲) ارائه شده است. این نتایج بیانگر تغییرات مقاومت فشاری در بازه‌های زمانی مختلف عمل‌آوری (۷، ۲۸ و ۵۶ روز) برای نمونه‌ها هستند.



شکل ۱۲. نتیجه‌های آزمون مقاومت فشاری نمونه‌ها با ۱۲٪ سنگ‌دانه سبک

تحلیل نتایج ارائه‌شده در شکل (۱۲) نشان می‌دهد که، همانند الگوهای مشاهده‌شده در حالت‌های پیشین، افزایش مدت زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۵۶ روز موجب افزایش قابل‌توجه مقاومت فشاری تمامی نمونه‌های مکعبی شده است. در میان نمونه‌های مورد بررسی، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۰/۰۵٪ الیاف درونی پلی‌پروپیلن (P0.05) بیشتر از مقاومت نمونه‌های فاقد الیاف (P0.0) و همچنین نمونه‌های دارای ۰/۱٪ الیاف (P0.1) است. میزان افزایش مقاومت فشاری این گروه از نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون الیاف به‌ترتیب برابر با ۱۴/۰۷٪، ۱۶/۳۵٪ و ۷/۷۳٪ در سنین عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روز است. مشابه نتایج سایر طرح‌های اختلاط، افزودن ۰/۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن منجر به کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف شده است. در شکل (۱۳)، نتایج آزمون تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های استاندارد مکعبی دارای ۱۵٪ سنگ‌دانه سبک (Agg15) ارائه شده است. این شکل روند تغییرات مقاومت فشاری را در بازه‌های زمانی مختلف عمل‌آوری برای نمونه‌های فاقد الیاف و نمونه‌های حاوی مقادیر متفاوت الیاف پلی‌پروپیلن نشان می‌دهد.

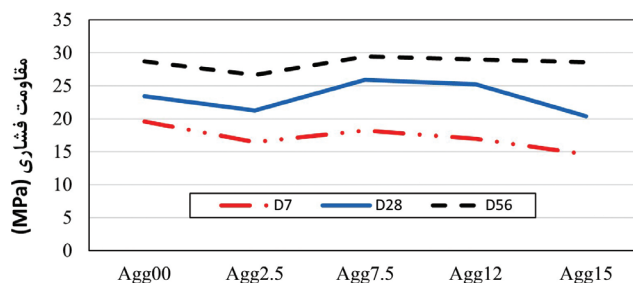


شکل ۱۳. نتیجه‌های آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های دارای ۱۵٪ سنگ‌دانه سبک

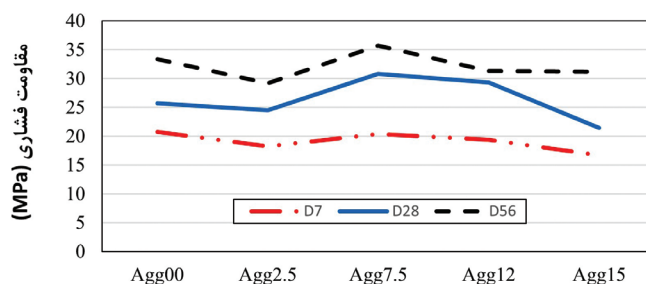
تحلیل شکل (۱۳) و نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد که، مطابق انتظار و مشابه با نتایج بخش‌های پیشین، افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها منجر به افزایش مقاومت فشاری تمامی نمونه‌های مکعبی استاندارد می‌شود. با این حال، برخلاف نتایج بخش‌های قبلی، نمونه‌های حاوی ۰/۱٪ الیاف درونی پلی‌پروپیلن (P0,1) مقاومت فشاری بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها از خود نشان داده‌اند. میزان افزایش مقاومت فشاری این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف (P00) به ترتیب برابر با ۱۸/۴۰٪، ۱۷/۶۴٪ و ۱۳/۶۱٪ در سنین عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روز است. همچنین، در نمونه‌های دارای ۰/۰۵٪ الیاف درونی پلی‌پروپیلن (P0.05)، نسبت افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های بدون الیاف به ترتیب برابر با ۱۴/۰۳٪، ۵/۰۰٪ و ۹/۰۸٪ در ۷، ۲۸ و ۵۶ روز پس از عمل‌آوری می‌باشد. نتایج حاصل از این بخش و تحلیل آن نشان می‌دهد که در بین درصدهای مختلف الیاف درونی پلی‌پروپیلن، استفاده از ۰/۱٪ الیاف درونی در نمونه‌های مکعبی فاقد جایگزینی سنگ‌دانه سبک و نمونه‌های دارای ۲/۵٪، ۷/۵٪ و ۱۲٪ سنگ‌دانه سبک، موجب کاهش مقاومت فشاری شده است و تنها در نمونه‌های مکعبی استاندارد حاوی ۱۵٪ سنگ‌دانه سبک توانسته است باعث افزایش مقاومت فشاری گردد. از سوی دیگر، به‌کارگیری ۰/۰۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن درونی منجر به افزایش مقاومت فشاری تمامی نمونه‌های مکعبی استاندارد شده و بنابراین می‌تواند به‌عنوان درصد بهینه استفاده از این الیاف در این پژوهش پیشنهاد شود.

۲-۱-۳- اثر سنگ‌دانه‌های سبک بر رفتار فشاری نمونه‌های مکعبی

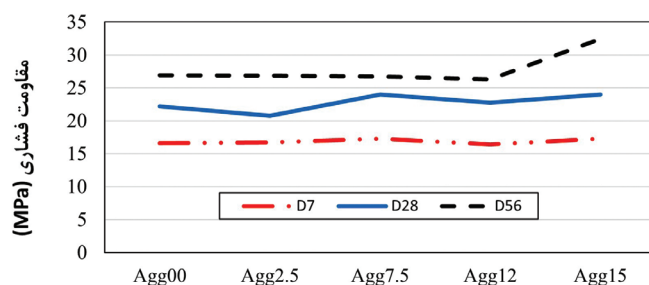
در شکل‌های (۱۴) تا (۱۶)، تأثیر جایگزینی سنگ‌دانه‌های معمولی با مقادیر مختلفی از سنگ‌دانه‌های سبک (۰، ۲/۵، ۷/۵، ۱۲ و ۱۵ درصد) بر مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی استاندارد نشان داده شده است. این بررسی برای سه حالت مختلف شامل نمونه‌های فاقد الیاف درونی پلی‌پروپیلن (۰٪)، حاوی ۰/۰۵٪ و حاوی ۰/۱٪ الیاف انجام شده است. مقایسه روند تغییرات نشان می‌دهد که تغییر درصد سنگ‌دانه‌های سبک تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها دارد و این اثر به میزان الیاف درونی موجود در طرح اختلاط نیز وابسته است.



شکل ۱۴. نتیجه‌های آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های بدون الیاف درونی



شکل ۱۵. نتیجه‌های آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های دارای ۰/۰۵٪ الیاف درونی



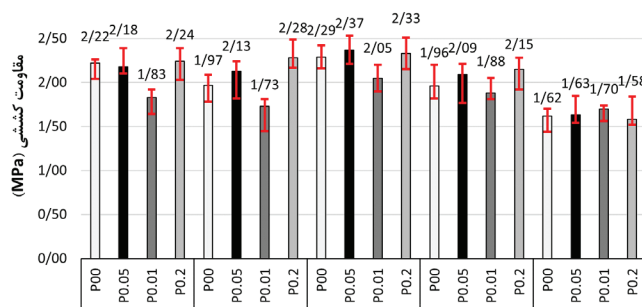
شکل ۱۶. نتیجه‌های آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های دارای ۱٪ الیاف درونی

بررسی و تحلیل شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) نشان می‌دهد که با افزایش مدت زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۵۶ روز، مقاومت فشاری تمامی نمونه‌های مکعبی استاندارد به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که استفاده از ۷/۵٪ سنگ‌دانه سبک در نمونه‌های بدون الیاف درونی و نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن منجر به دستیابی به بیشترین مقدار مقاومت فشاری در مقایسه با سایر درصد‌های جایگزینی شده است. در مقابل، در نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن، بیشترین مقاومت فشاری تنها در حالتی به دست آمده است که ۱۵٪ از سنگ‌دانه‌های معمولی با سنگ‌دانه‌های سبک جایگزین شده‌اند و این روند در هر سه بازه‌ی زمانی ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه مشاهده شده است.

به‌طور کلی، نتایج این بخش بیانگر آن است که بهینه‌ترین درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌های سبک برای دستیابی به حداکثر مقاومت فشاری در نمونه‌های مکعبی استاندارد، معادل ۷/۵٪ است. این مقدار توانسته است تعادل مناسبی میان کاهش وزن بتن و حفظ یا افزایش مقاومت فشاری ایجاد کند.

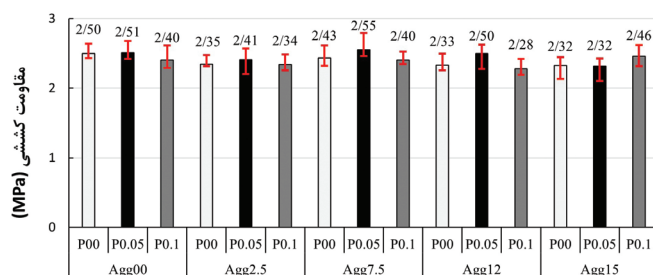
۳-۲- آزمون‌های تعیین مقاومت کششی

در این بخش، مشابه با آزمون‌های تعیین مقاومت فشاری، به‌منظور شناسایی حدود بالا و پایین میزان مناسب استفاده از الیاف درونی پلی‌پروپیلن، آزمایش‌های تعیین مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد با قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. این نمونه‌ها شامل حالت‌های بدون الیاف درونی (P00) و دارای ۰/۵٪ (P0.05)، ۱٪ (P0.1) و ۲٪ (P0.2) الیاف پلی‌پروپیلن بودند. همچنین، جایگزینی سنگ‌دانه‌های سبک در پنج سطح مختلف ۰٪ (Agg00)، ۲/۵٪ (Agg2.5)، ۷/۵٪ (Agg7.5)، ۱۲٪ (Agg12) و ۱۵٪ (Agg15) در طرح اختلاط در نظر گرفته شد. پس از گذشت ۷ روز از زمان عمل‌آوری، آزمون‌های تعیین مقاومت کششی بر روی تمامی نمونه‌ها انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها به‌همراه مقدارهای انحراف استاندارد در شکل (۱۷) ارائه شده‌اند. این نتایج مبنای تحلیل رفتار کششی بتن اصلاح‌شده با الیاف و سنگ‌دانه سبک در مراحل بعدی پژوهش قرار گرفته‌اند.

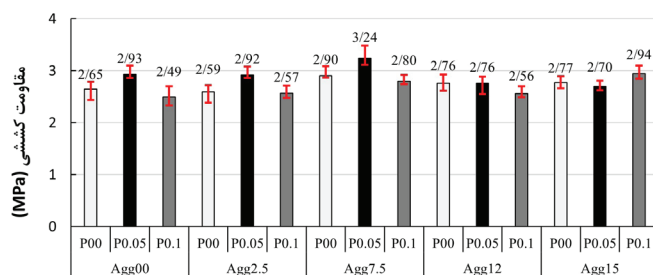


شکل ۱۷. نتیجه‌های آزمون مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد ۷ روزه

تحلیل نتایج ارائه شده در شکل (۱۷) نشان می‌دهد که در میان نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای بدون الیاف درونی (P00) و نمونه‌های حاوی ۰/۰۵٪ (P0.05)، ۰/۱٪ (P0.1) و ۰/۲٪ (P0.2) الیاف درونی پلی‌پروپیلن، روند تغییر مقاومت کششی بر اساس میزان سنگ‌دانه‌های سبک جایگزین شده با سنگ‌دانه‌های معمولی در سه گروه نخست (P00، P0.05 و P0.1) مشابه است. در مقابل، در نمونه‌های حاوی ۰/۲٪ الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت کششی در مقدار جایگزینی ۲/۵٪ سنگ‌دانه سبک افزایش یافته، اما با افزایش درصد سنگ‌دانه‌های سبک، این مقاومت روندی کاهشی پیدا کرده است. کمترین مقدار مقاومت کششی ثبت شده برابر با ۱/۵۸ MPa بوده است که مربوط به نمونه‌های دارای ۰/۲٪ الیاف درونی و ۱۵٪ سنگ‌دانه سبک می‌باشد. بر همین اساس، در ادامه‌ی پژوهش تنها مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای بدون الیاف درونی و نمونه‌های حاوی ۰/۰۵٪ و ۰/۱٪ الیاف درونی پلی‌پروپیلن مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نتایج آزمون مقاومت کششی به همراه مقدارهای انحراف استاندارد نمونه‌های استوانه‌ای شکل را پس از ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری نشان می‌دهند.



شکل ۱۸. نتیجه‌های آزمون مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد ۲۸ روزه

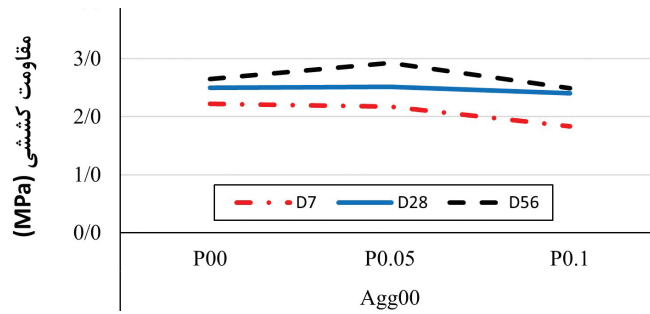


شکل ۱۹. نتیجه‌های آزمون مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد ۵۶ روزه

مقایسه‌ی مقادیر الیاف درونی مورد استفاده و همچنین میزان سنگ‌دانه‌های سبک جایگزین شده با سنگ‌دانه‌های معمولی در نمونه‌ها، منجر به نتایج ارائه شده در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) شده است. این نتایج در بخش‌های بعدی به تفصیل مورد تحلیل و مقایسه قرار خواهند گرفت.

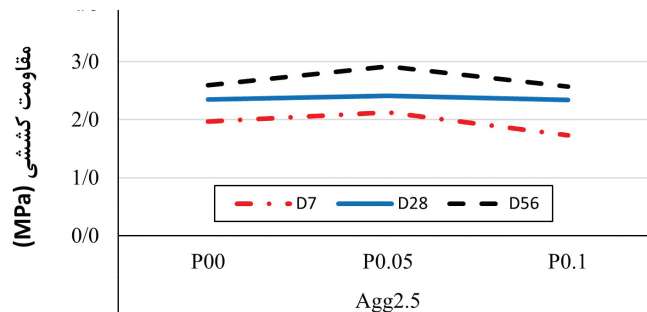
۱-۲-۳- اثر الیاف پلی‌پروپیلن بر رفتار کششی نمونه‌های استوانه‌ای

در شکل (۲۰)، نتایج آزمون تعیین مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای بدون استفاده از سنگ‌دانه‌های سبک (Agg00) ارائه شده است.



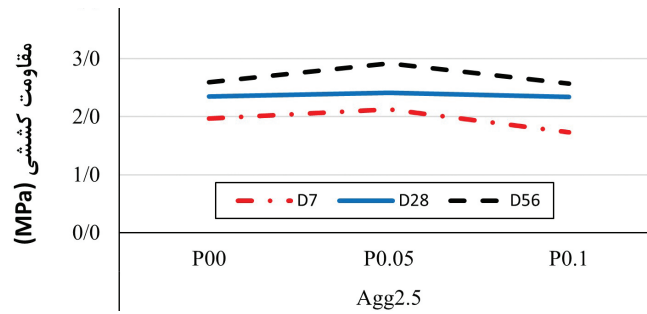
شکل ۲۰. نتیجه‌های آزمون مقاومت کششی نمونه‌های بدون سنگ‌دانه سبک

نتایج ارائه‌شده در شکل (۲۰) نشان می‌دهد که به‌طور کلی و مطابق با انتظار، افزایش زمان عمل‌آوری منجر به افزایش مقاومت کششی در تمامی نمونه‌های استوانه‌ای می‌شود. همچنین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای حاوی ۰/۰۵٪ (P0.05) الیاف درونی پلی‌پروپیلن نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است. میزان افزایش مقاومت کششی این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های فاقد هرگونه الیاف درونی به‌ترتیب برابر با ۰/۹۸٪، ۰/۴۴٪ و ۱۰/۵۹٪ در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز پس از عمل‌آوری است. در تمامی حالت‌ها، افزودن ۰/۱٪ الیاف درونی نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف منجر به کاهش مقاومت کششی شده است. نتایج آزمون مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای حاوی ۲/۵٪ سنگ‌دانه سبک (Agg2,5) در شکل (۲۱) ارائه شده است.



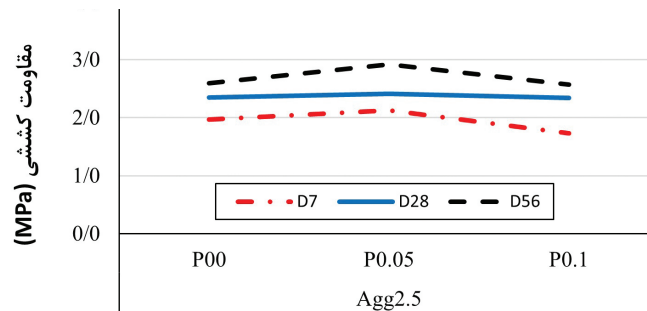
شکل ۲۱. نتیجه‌های آزمون مقاومت کششی نمونه‌ها با ۲/۵٪ سنگ‌دانه سبک

تحلیل شکل (۲۱) نشان می‌دهد که همانند نمونه‌های فاقد سنگ‌دانه سبک، افزایش مدت زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۵۶ روز موجب افزایش مقاومت کششی تمامی نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای شده است. نمونه‌های حاوی ۰/۰۵٪ (P0.05) الیاف پلی‌پروپیلن در مقایسه با نمونه‌های بدون الیاف درونی (P00) و نمونه‌های دارای ۰/۱٪ (P0,1) الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت کششی بالاتری از خود نشان داده‌اند. به‌ترتیب، میزان افزایش مقاومت کششی در نمونه‌های دارای ۰/۰۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به نمونه‌های بدون الیاف درونی برابر با ۸/۰۸٪، ۲/۷۶٪ و ۲/۷۶٪ در ۷، ۲۸ و ۵۶ روز پس از عمل‌آوری بوده است. در تمامی حالت‌ها، افزودن ۰/۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن منجر به کاهش مقاومت کششی در مقایسه با نمونه‌های فاقد الیاف شده است. شکل (۲۲) نتیجه‌های حاصل از آزمون مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای حاوی ۷/۵٪ سنگ‌دانه سبک (Agg7.5) را نشان می‌دهد.



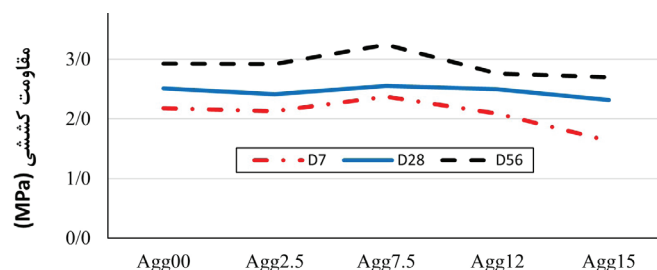
شکل ۲۲. نتیجه‌های آزمون مقاومت کششی نمونه‌های دارای ۷/۵٪ سنگ‌دانه سبک

نتایج ارائه‌شده در شکل (۲۲) نشان می‌دهد که مشابه حالت‌های پیشین، افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها منجر به افزایش مقاومت کششی در تمامی نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای می‌شود. همچنین، نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ (P0,05) الیاف درونی پلی‌پروپیلن نسبت به سایر نمونه‌ها مقاومت کششی بیشتری از خود نشان داده‌اند. در این نمونه‌ها، میزان افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف به ترتیب برابر با ۳/۵۵٪، ۴/۹۱٪ و ۱۱/۱۶٪ در ۷، ۲۸ و ۵۶ روز پس از عمل‌آوری بوده است. علاوه بر این، مشابه نتایج به‌دست‌آمده در بخش‌های پیشین، افزودن ۰/۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن موجب کاهش مقاومت کششی نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف شده است. نتیجه‌های آزمون مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ۱۲٪ سنگ‌دانه سبک (Agg12) در شکل (۲۳) نشان داده شده است.

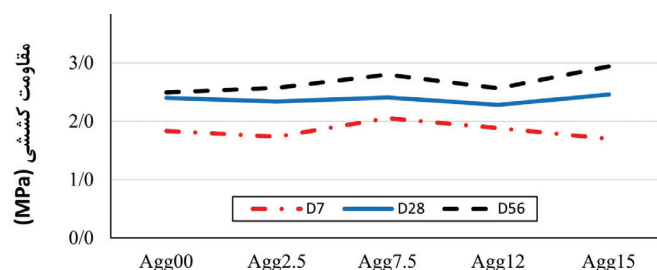


شکل ۲۳. نتیجه‌های آزمون مقاومت کششی نمونه‌ها با ۱۲٪ سنگ‌دانه سبک

شکل (۲۳) نشان می‌دهد که همانند نتایج به‌دست‌آمده در بخش‌های پیشین، افزایش مدت زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۵۶ روز موجب افزایش مقاومت کششی در تمامی نمونه‌های استوانه‌ای می‌شود. مقایسه‌ی نمونه‌های بدون الیاف درونی (P00) و نمونه‌های دارای ۰/۱٪ الیاف درونی (P0,1) نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ (P0,05) الیاف پلی‌پروپیلن مقاومت کششی بالاتری از خود نشان داده‌اند. میزان افزایش مقاومت کششی در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف به ترتیب برابر با ۶/۷۷٪، ۷/۲۸٪ و ۰/۰۶٪ در ۷، ۲۸ و ۵۶ روز پس از عمل‌آوری بوده است. همچنین، افزودن ۰/۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن موجب کاهش مقاومت کششی نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف شده است. در شکل (۲۴)، نتیجه‌های آزمون مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای دارای ۱۵٪ سنگ‌دانه سبک (Agg15) نشان داده شده است.



شکل ۲۶. نتیجه‌های آزمون مقاومت کششی نمونه‌های دارای ۰/۰۵٪ الیاف درونی



شکل ۲۷. نتیجه‌های آزمون مقاومت کششی نمونه‌های دارای ۰/۱٪ الیاف درونی

بررسی شکل‌های (۲۵) تا (۲۷) نشان می‌دهد که در تمامی نمونه‌ها، افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۵۶ روز، موجب افزایش مقاومت کششی می‌شود. در نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد فاقد الیاف و همچنین نمونه‌های دارای ۰/۰۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن، جایگزینی ۷/۵٪ سنگ‌دانه سبک بیشترین مقاومت کششی را به همراه داشته است. تنها در نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای حاوی ۰/۱٪ الیاف درونی پلی‌پروپیلن و در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۵۶ روز، افزایش درصد سنگ‌دانه سبک تا ۱۵٪ منجر به افزایش مقاومت کششی و دستیابی به مقادیر بالاتر شده است. بر این اساس، درصد بهینه جایگزینی سنگ‌دانه‌های سبک برای افزایش مقاومت کششی در نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد برابر با ۷/۵٪ پیشنهاد می‌شود.

۳-۳- ساز و کار و تحلیل برهم‌کنش الیاف - سنگ‌دانه سبک

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده هم‌زمان از ۰/۰۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۷/۵ درصد سنگ‌دانه سبک باعث دستیابی به بیشترین میزان مقاومت فشاری و کششی در اکثر طرح‌های اختلاط می‌شود. در مقابل، افزایش مقدار الیاف به ۰/۱ درصد به‌طور معمول منجر به کاهش مقاومت می‌شود، مگر آن‌که این مقدار الیاف با ۱۵ درصد سنگ‌دانه سبک همراه باشد که در آن حالت بهبود نسبی مقاومت مشاهده شد. این رفتار نشان می‌دهد که میان میزان الیاف و درصد سنگ‌دانه نوعی برهم‌کنش مکانیکی - ریزساختاری وجود دارد که بر عملکرد بتن اثرگذار است و نیاز به تبیین دارد.

از منظر ریزساختاری، افزایش ۷/۵ درصدی سنگ‌دانه سبک موجب ایجاد تخلخل کنترل‌شده در ماتریس سیمانی می‌شود. این میزان تخلخل، بدون آنکه پیوستگی خمیر را به‌طور چشمگیر کاهش دهد، فضای کافی برای نفوذ و جای‌گیری بهتر الیاف ایجاد کرده و در نتیجه پیوند الیاف - ماتریس را بهبود می‌بخشد. این شرایط امکان مشارکت مؤثر الیاف در مکانیزم مهار ترک را فراهم کرده و

منجر به افزایش مقاومت می‌شود. با این حال، در درصدهای بالاتر سبک‌دانه مانند ۱۵ درصد، میزان تخلخل به حدی افزایش می‌یابد که پیوستگی ماتریس کاهش یافته و مقاومت پایه‌ای بتن افت می‌کند؛ در چنین شرایطی تنها افزایش مقدار الیاف (تا ۰/۱ درصد) می‌تواند با ایجاد شبکه مقاوم ثانویه، بخشی از کاهش مقاومت را جبران کند.

از سوی دیگر، استفاده از سبک‌دانه‌ها باعث کاهش نسبت خمیر مؤثر می‌شود. در مقدار ۷/۵ درصد، این کاهش در سطحی است که سبب افزایش چسبندگی نسبی بین الیاف و ماتریس شده و امکان کنترل مناسب ترک‌خوردگی را فراهم می‌کند. اما وقتی درصد سبک‌دانه به ۱۵ درصد افزایش می‌یابد، کاهش حجم خمیر موجب محدودیت در احاطه مؤثر الیاف توسط ماتریس می‌شود. در چنین شرایطی تنها با افزایش الیاف، شبکه داخلی بتن قادر به حفظ انسجام و انتقال نیرو در هنگام گسترش ترک خواهد بود.

مکانیزم دیگری که می‌تواند رفتار مشاهده‌شده را توضیح دهد، قفل‌شدگی الیاف در ماتریس سبک‌تر است. وجود سنگ‌دانه‌های سبک با چگالی کمتر، نقاط اتکای مناسبی برای گیرکردن الیاف ایجاد می‌کند و در درصدهای بالاتر سبک‌دانه، این اثر قفل‌شدگی تقویت می‌شود. زمانی که مقدار الیاف ۰/۱ درصد است، این قفل‌شدگی نقش مهم‌تری در افزایش مقاومت ایفا می‌کند؛ اما در درصدهای پایین‌تر سبک‌دانه چنین سازوکاری به‌خوبی شکل نمی‌گیرد و الیاف اضافی در بیشتر موارد سبب کاهش کارایی و عملکرد مکانیکی می‌شوند.

در مجموع، ترکیب میزان مناسب سبک‌دانه و الیاف منجر به تعادل مطلوبی میان تراوایی، ساختار تخلخل، پیوند الیاف - ماتریس و نحوه گسترش ترک می‌شود. همین تعادل است که رفتار بهینه و برهم‌کنش قابل توجه میان الیاف و سنگ‌دانه سبک را در طرح‌های اختلاط مشاهده‌شده توضیح می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، در دو بخش به بررسی اثر الیاف پلی‌پروپیلن و سنگ‌دانه‌های سبک بر مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتنی پرداخته شده است. در بخش مقاومت فشاری، تعداد ۱۵۰ نمونه مکعبی استاندارد با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر و در بخش کششی تعداد ۱۵۰ نمونه استاندارد استوانه‌ای با ارتفاع ۳۰ cm و قطر ۱۵ cm جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی در نظر گرفته شد. چهار درصد مختلف الیاف پلی‌پروپیلن شامل بدون الیاف درونی، ۰/۰۵٪، ۰/۱٪ و ۰/۲٪ الیاف درونی در ساخت این نمونه‌ها به کار گرفته شد. علاوه بر این، پنج سطح جایگزینی سنگ‌دانه سبک با سنگ‌دانه عادی در نظر گرفته شد: بدون سنگ‌دانه سبک، ۲/۵٪، ۷/۵٪، ۱۲٪ و ۱۵٪ سنگ‌دانه سبک. مقاومت فشاری نمونه‌ها در سه زمان عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه اندازه‌گیری شد. خلاصه نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های مذکور به شرح زیر ارائه می‌شود:

● به منظور تعیین کران‌های بالا و پایین مقدار بهینه استفاده از الیاف درونی پلی‌پروپیلن، آزمون مقاومت فشاری ۷ روزه بر روی نمونه‌های مکعبی استاندارد انجام شد که شامل گروه‌هایی بدون الیاف درونی و همچنین دارای ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲٪ الیاف پلی‌پروپیلن بود و در هر گروه، درصدهای مختلفی از جایگزینی سنگ‌دانه‌های سبک با سنگ‌دانه معمولی شامل ۰، ۲/۵، ۷/۵، ۱۲ و ۱۵٪ در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که نمونه‌های دارای ۰/۲٪ الیاف درونی پلی‌پروپیلن نسبت به سایر نمونه‌ها نوسان بیشتری در مقاومت فشاری دارند؛ به طوری که در حالت ۱۲٪ جایگزینی سنگ‌دانه‌های معمولی مقاومت فشاری این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون الیاف در حالت بدون جایگزینی سنگ‌دانه‌ها با کاهش ۳۱/۹۰٪ مواجه شد، که کمترین مقدار مقاومت فشاری در میان نمونه‌های ۷ روزه محسوب می‌شود. در تعیین مقاومت‌های کششی ۷ روزه نیز کم‌ترین مقاومت کششی ثبت‌شده برابر ۱/۵۸ MPa بوده که مربوط به نمونه‌های دارای ۰/۲٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۱۵٪ سنگ‌دانه سبک می‌باشد. بنابراین، مقاومت‌های فشاری و کششی ۲۸ و ۵۶ روزه

تنها محدود به نمونه‌های مکعبی بدون الیاف درونی و نمونه‌های دارای ۰/۰۵ و ۰/۱٪ الیاف درونی پلی‌پروپیلن انجام شد.

● مطابق انتظار، با بررسی نتایج به‌دست‌آمده، مشاهده شد که افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها از ۷ به ۲۸ روز به ترتیب با میانگین مقدار ۳۶/۱۶٪، ۲۳/۲۴٪ و از ۲۸ تا ۵۶ روز به ترتیب با میانگین ۲۳/۰۸٪ و ۱۵/۰۶٪، موجب افزایش مقاومت فشاری و کششی در نمونه‌ها می‌شود.

● در میان درصد‌های مختلف الیاف درونی پلی‌پروپیلن، استفاده از ۰/۱٪ الیاف در نمونه‌ها بدون جایگزینی سنگ‌دانه سبک و در نمونه‌های دارای ۲/۵، ۷/۵ و ۱۲٪ سنگ‌دانه سبک باعث کاهش مقاومت فشاری و کششی شده و تنها در نمونه‌های مکعبی دارای ۱۵٪ سنگ‌دانه سبک، مقاومت فشاری و کششی را به ترتیب به‌طور میانگین ۱۶/۵۴٪ و ۵/۵۶٪ افزایش داده است. از سوی دیگر، به‌کارگیری ۰/۰۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن در نمونه‌ها منجر به افزایش مقاومت فشاری و کششی شده و این مقدار به‌عنوان درصد بهینه برای استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در این پژوهش پیشنهاد می‌شود.

● در نمونه‌های آزمایش‌شده فاقد الیاف پلی‌پروپیلن و نیز در نمونه‌های دارای ۰/۰۵٪ الیاف، استفاده از ۷/۵٪ سنگ‌دانه سبک بیشترین افزایش مقاومت فشاری نسبت به حالت بدون الیاف و سنگ‌دانه سبک به ترتیب برابر با ۴/۰۸٪، ۳۱/۷۶٪ و ۲۴/۳۷٪ در ۲۸، ۷ و ۵۶ روز و بیشترین افزایش مقاومت کششی نسبت به حالت بدون الیاف و سنگ‌دانه سبک به ترتیب برابر با ۶/۷۵٪، ۸/۵۴٪ و ۲۲/۲۶٪ در ۲۸، ۷ و ۵۶ روز را به همراه داشته است. بنابراین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان مناسب‌ترین میزان استفاده از سنگ‌دانه سبک به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه‌های عادی را ۷/۵٪ در نظر گرفت.

تشکر و قدردانی

نگارندگان این پژوهش کمال سپاس‌گزاری از دست‌اندرکاران انجام آزمون‌ها در دانشگاه بیرجند را دارند.

منابع

- [1] J. jun Li, J. gang Niu, C. jun Wan, B. Jin, Y. liu Yin, Investigation on mechanical properties and microstructure of high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 118 (2016) 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.116>.
- [2] H. Li, Y. Wei, L. Zhao, S. Hu, B. Zhu, P. Ye, Experimental and theoretical studies on fracture performance of bamboo fiber-reinforced lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 465 (2025) 140250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140250>.
- [3] E.G. Badogiannis, I. Christidis, G.E. Tzanetatos, Evaluation of the mechanical behavior of pumice lightweight concrete reinforced with steel and polypropylene fibers, *Construction and Building Materials* 196 (2019) 443–456. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.109>.
- [4] A. Soleymani, D. Rezazadeh Eidgahee, A. Tamimi, H. Jahangir, H. Hasani, M.L. Nehdi, Machine learning assessment of mechanical properties of oil palm shell concrete, *Materials Today Communications* 49 (2025) 114239. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.114239>.
- [5] T.M. Grabois, G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers, *Construction and Building Materials* 104 (2016) 284–292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.060>.
- [6] A.A. Zamani, M. Ahmadi, A. Dalvand, F. Aslani, Effect of Single and Hybrid Fibers on Mechanical Properties of High-Strength Self-Compacting Concrete Incorporating 100% Waste Aggregate, *Journal of Materials in Civil Engineering* 35 (2023). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE))

MT.1943-5533.0004528.

[7] M. Ahmadi, E. Abdollahzadeh, M. Kashfi, B. Khataei, M. Razavi, *Life Cycle Assessment and Performance Evaluation of Self-Compacting Concrete Incorporating Waste Marble Powder and Aggregates*, *Materials* 18 (2025) 2982. <https://doi.org/10.3390/ma18132982>.

[8] Y. Gao, C. Zou, *Experimental study on segregation resistance of nanoSiO₂ fly ash lightweight aggregate concrete*, *Construction and Building Materials* 93 (2015) 64–69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.102>.

[9] A. Bilodeau, V.K.R. Kodur, G.C. Hoff, *Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire*, *Cement and Concrete Composites* 26 (2004) 163–174. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00085-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00085-4).

[10] J.A. Bogas, A. Gomes, *Non-steady-state accelerated chloride penetration resistance of structural lightweight aggregate concrete*, *Cement and Concrete Composites* 60 (2015) 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.001>.

[11] H.L. Ma, C. Cui, X. Li, S.L. Hu, *Study on mechanical properties of steel fiber reinforced autoclaved lightweight shell-aggregate concrete*, *Materials and Design* 52 (2013) 565–571. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.086>.

[12] K.C. Onyelowe, D.-P.N. Kontoni, S. Oyewole, T. Apugo-Nwosu, S. Nasrollahpour, A. Soleymani, S.R.M. Pilla, H. Jahangir, F. Dabbaghi, *Compressive strength optimization and life cycle assessment of geopolymer concrete using machine learning techniques*, *E3S Web of Conferences* 436 (2023) 08009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343608009>.

[13] N.A. Libre, M. Shekarchi, M. Mahoutian, P. Soroushian, *Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice*, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 2458–2464. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.058>.

[14] P. Rashiddadash, A.A. Ramezaniapour, M. Mahdikhani, *Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice*, *Construction and Building Materials* 51 (2014) 313–320. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.087>.

[15] M. Hassanpour, P. Shafiqh, H. Bin Mahmud, *Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement - A review*, *Construction and Building Materials* 37 (2012) 452–461. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.071>.

[16] K.C. Onyelowe, D.-P.N. Kontoni, M.E. Onyia, A. Soleymani, A.M. Ebid, H. Jahangir, *Overview of meshfree modeling of the flowability of fresh self-compacting concrete for sustainable structures*, *E3S Web of Conferences* 436 (2023) 08008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343608008>.

[17] H. Tanyildizi, *Statistical analysis for mechanical properties of polypropylene fiber reinforced lightweight concrete containing silica fume exposed to high temperature*, *Materials and Design* 30 (2009) 3252–3258. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.11.032>.

[18] K.C. Onyelowe, A.M. Ebid, H.A. Mahdi, A. Soleymani, H. Jahangir, F. Dabbaghi, *Optimization of Green Concrete Containing Fly Ash and Rice Husk Ash Based on Hydro-Mechanical Properties and Life Cycle Assessment Considerations*, *Civil Engineering Journal* 8 (2022) 3912–3938. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-12-018>.

[19] A.S. Kamjou, A. Khaloo, S. Hassanpour, *Experimental and numerical investigation of minimum required fiber content in bending characteristics of 100 MPa UHPC-formulated concrete*, *Case Studies in Construction Materials* 16 (2022) e01066. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01066>.

- [20] S.N. Shinde, S. Christa, R.K. Grover, N. Pasha, D. Harinder, G. Nakkeeran, G.U. Alaneme, Optimization of waste plastic fiber concrete with recycled coarse aggregate using RSM and ANN, *Scientific Reports* 15 (2025) 7798. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92505-8>.
- [21] A. Seydmoradi, M.H. Tavana, M.R. Habibi, Investigation on the response of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete slab under sequential impact loading, *Engineering Failure Analysis* 161 (2024) 108221. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108221>.
- [22] P. Bancercz, J. Kutzer, P. Miarka, Case study of fiber reinforced, lightweight concrete, intended for production of precast elements, *Case Studies in Construction Materials* 21 (2024) e03755. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03755>.
- [23] A. Abbadi, A. El Refai, H.A. El Mal, Shear behavior of fiber-reinforced lightweight concrete beams reinforced with BFRP bars, *Construction and Building Materials* 484 (2025) 141762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141762>.
- [24] Q. Liao, X.-D. Zhao, W.-W. Wu, J.-X. Lu, K.-Q. Yu, C.S. Poon, A review on the mechanical performance and durability of fiber reinforced lightweight concrete, *Journal of Building Engineering* 88 (2024) 109121. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109121>.
- [25] K. Zhang, W. Lin, Q. Lan, Q. Zhang, Compressive properties of polypropylene fiber reinforced seawater sea-sand recycled aggregate concrete under different strain rate loading, *Construction and Building Materials* 452 (2024) 138968. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138968>.
- [26] G. Huang, L. Su, C. Xue, Y. Zhang, H. Qiao, C. Wang, Study on the deterioration mechanism of hybrid basalt-polypropylene fiber-reinforced concrete under sulfate freeze-thaw cycles, *Construction and Building Materials* 449 (2024) 138560. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138560>.
- [27] A.A. Alawi Al-Naghi, K. Aamir, M.N. Amin, B. Iftikhar, K. Mehmood, M.T. Qadir, Predicting strength in polypropylene fiber reinforced rubberized concrete using symbolic regression AI techniques, *Case Studies in Construction Materials* 23 (2025) e05024. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05024>.
- [28] L. Yan, L. Liu, C. Liu, Bonding performances of polypropylene fiber reinforced concrete beam-type specimen at corrosion conditions: Experimental and simulation study, *Journal of Building Engineering* 105 (2025) 112479. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112479>.
- [29] N. Liang, S. Geng, J. Mao, X. Liu, X. Zhou, Investigation on cracking resistance mechanism of basalt-polypropylene fiber reinforced concrete based on SEM test, *Construction and Building Materials* 411 (2024) 134102. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134102>.
- [30] H. Wang, X. He, M. Zhou, B. Wei, W. Wu, G. Zhou, J. He, A study on the tensile fracture behavior of polypropylene fiber reinforced concrete based on a microscale model, *Construction and Building Materials* 417 (2024) 135291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135291>.
- [31] A. Khaloo, A. Daneshyar, B. Rezaei, A. Fartash, Fiber bridging in polypropylene-reinforced high-strength concrete: An experimental and numerical survey, *Structural Concrete* 23 (2022) 457–472. <https://doi.org/10.1002/suco.202000779>.
- [32] H. Toutanji, S. McNeil, Z. Bayasi, Chloride permeability and impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete, *Cement and Concrete Research* 28 (1998) 961–968. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00073-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00073-8).
- [33] C. Wu, X. He, X. Zhao, L. He, Y. Song, X. Zhang, Effect of Fiber Content on Mechani-

cal Properties and Microstructural Characteristics of Alkali Resistant Glass Fiber Reinforced Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering* 2022 (2022) 1–19. <https://doi.org/10.1155/2022/1531570>.

[34] W. Yang, Z. Tang, W. Wu, K. Zhang, J. Yuan, H. Li, Z. Feng, Effect of different fibers on impermeability of steam cured recycled concrete, *Construction and Building Materials* 328 (2022) 127063. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127063>.

[35] D. Wang, Y. Ju, H. Shen, L. Xu, Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber, *Construction and Building Materials* 197 (2019) 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.181>.

[36] L. Chen, X. Zhang, G. Liu, Analysis of dynamic mechanical properties of sprayed fiber-reinforced concrete based on the energy conversion principle, *Construction and Building Materials* 254 (2020) 119167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119167>.

[37] P. Fakharian, R. Bazrgary, A. Ghorbani, D. Tavakoli, Y. Nouri, Compressive Strength Prediction of Green Concrete with Recycled Glass-Fiber-Reinforced Polymers Using a Machine Learning Approach, *Polymers* 17 (2025) 2731. <https://doi.org/10.3390/polym17202731>.

[38] S. Hamoush, T. Abu-Lebdeh, T. Cummins, Deflection behavior of concrete beams reinforced with PVA micro-fibers, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 2285–2293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.027>.

[39] S.P. Yap, C.H. Bu, U.J. Alengaram, K.H. Mo, M.Z. Jumaat, Flexural toughness characteristics of steel-polypropylene hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete, *Materials and Design* 57 (2014) 652–659. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.004>.

[40] L. Chen, Y. Nouri, N. Allahyarsharahi, H. Naderpour, D. Rezazadeh Eidgahee, P. Fakharian, Optimizing compressive strength prediction in eco-friendly recycled concrete via artificial intelligence models, *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design* 8 (2025) 24. <https://doi.org/10.1007/s41939-024-00641-x>.

[41] ASTM D2419/D2419, Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate, (2002).

[42] ASTM C136/C136, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, (2001).

[43] ASTM C128/C128, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, (2001).

[44] ASTM C127/C127, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, (2001).

[45] A. C33/C33M, Standard specification for concrete aggregates, (2013).

[46] ASTM C29/C29, Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate., (2003).

[47] ASTM C39/C39M, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, (2020).

[48] ASTM C496/C496M-17, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, (2017).

[49] BS-1881:117, Testing concrete Part 117. Method for determination of tensile splitting strength., (1983).