

Experimental and Comparative Study on the Effects of PET and Basalt Fibers on the Mechanical Performance and Workability of Concrete

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: 15 February 2026 Revised: 25 February 2026 Accepted: 06 May 2026

Research paper

Abstract:

In this study, the effect of incorporating polymeric PET fibers and mineral basalt fibers on the mechanical behavior and workability of concrete was experimentally investigated. Concrete mixtures containing PET fibers at volumetric fractions of 0.8%, 1.0%, 1.2%, and 1.4%, and basalt fibers at 0.3%, 0.5%, 0.7%, 0.9%, and 1.1% were prepared and cast into cubic, cylindrical, and prismatic specimens. Compressive strength, indirect tensile strength (Brazilian splitting test), and three-point flexural strength were measured at curing ages of 7, 28, and 42 days. Simultaneously, concrete workability was evaluated using the slump test. The results indicated that the optimal PET fiber content increased the 28-day compressive strength by 8%, the tensile strength by 22%, and the flexural strength by 19% compared to the control specimen. Similarly, basalt fibers at their optimal dosage enhanced the 28-day compressive, tensile, and flexural strengths by 20%, 28%, and 30%, respectively, relative to plain concrete. The mechanical response of fiber-reinforced concrete exhibited a nonlinear trend with increasing fiber content; beyond the optimal dosage, a reduction in strength was observed due to decreased compaction efficiency and increased matrix discontinuities. The optimal fiber contents for achieving maximum mechanical performance were determined as 1.2% for PET fibers and 0.7% for basalt fibers. Owing to their higher elastic modulus and tensile strength, basalt fibers showed a more pronounced improvement in compressive and flexural strengths, whereas PET fibers were particularly effective in enhancing tensile strength and post-cracking behavior. At the highest investigated fiber contents, PET and basalt fibers reduced slump by 29% and 41%, respectively, indicating a significant decrease in workability. Finally, empirical behavioral models based on nonlinear regression were developed, including a quadratic model describing the relationship between compressive strength and fiber volume fraction, an exponential growth model incorporating the curing time effect, and power-law relationships for predicting tensile and flexural strengths as functions of compressive strength.

Keywords: Fiber-reinforced concrete, PET fibers, Basalt fibers, Compressive strength, Tensile strength, Flexural strength.

*Corresponding Author: Hashem Jahangir

Soleymani A., Jahangir H. Experimental and Comparative Study on the Effects of PET and Basalt Fibers on the Mechanical Performance and Workability of Concrete. J. Concr. Struct. Mater., 2026; 10(1): 118-148.

<http://doi.org/10.30478/jcsm.2026.574046.1414>

2538-5828/ © 2026The Authors. Published by Iranian Concrete Society

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

بررسی تجربی و مقایسه‌ای اثر الیاف PET و بازالت بر رفتار مکانیکی و کارایی 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: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در این پژوهش، اثر افزودن الیاف پلیمری PET و الیاف معدنی بازالت بر رفتار مکانیکی و کارایی بتن به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف PET با درصدهای حجمی ۰/۸، ۱/۰، ۱/۲ و ۱/۴ درصد و الیاف بازالت با درصدهای ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹ و ۱/۱ درصد تهیه و در قالب‌های مکعبی، استوان‌های و منشوری ساخته شدند. مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم به روش برزلی و مقاومت خمشی سه نقطه‌ای در سنین عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۴۲ روزه اندازه‌گیری گردید و همزمان، تغییرات روانی بتن از طریق آزمون اسلامپ ارزیابی شد. نتایج نشان داد افزودن الیاف PET در درصد بهینه خود موجب افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه به میزان ۸٪، افزایش مقاومت کششی به مقدار ۲۲٪ و افزایش مقاومت خمشی به مقدار ۱۹٪ نسبت به نمونه شاهد شد. همچنین، الیاف بازالت در درصد بهینه خود افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی ۲۸ روزه را به ترتیب به مقدارهای ۲۰٪، ۲۸٪ و ۳۰٪ نسبت به بتن بدون الیاف نشان داد. رفتار مکانیکی بتن در برابر افزایش درصد الیاف غیرخطی بوده و پس از یک مقدار بهینه، به دلیل کاهش تراکم و افزایش ناپیوستگی ماتریس، روند کاهش در مقاومت مشاهده گردید. درصد بهینه برای دستیابی به بیشینه عملکرد مکانیکی به ترتیب ۱/۲ درصد برای الیاف PET و ۰/۷ درصد برای الیاف بازالت تعیین شد. الیاف بازالت به دلیل مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بالاتر، اثر بارزتری در افزایش مقاومت فشاری و خمشی نشان داد، در حالی که الیاف PET به‌ویژه در بهبود مقاومت کششی و رفتار پس از ترک نقش مؤثرتری ایفا کردند. همچنین افزایش درصد الیاف PET و بازالت در بیشترین مقدارهای خود به ترتیب موجب کاهش ۲۹٪ و ۴۱٪ اسلامپ و افت کارایی بتن شد. در پایان پژوهش، مدل‌های رفتاری تجربی مبتنی بر رگرسیون غیرخطی شامل مدل درجه دوم برای وابستگی مقاومت فشاری به درصد حجمی الیاف، مدل رشد نمایی برای لحاظ اثر زمان عمل‌آوری و رابطه‌های توانی برای پیش‌بینی مقاومت کششی و خمشی بر اساس مقاومت فشاری ارائه شدند.

واژگان کلیدی: بتن الیافی، الیاف PET، الیاف بازالت، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی.

بتن به عنوان پرمصرف‌ترین ماده ساختمانی جهان، نقش اصلی را در توسعه زیرساخت‌های عمرانی ایفا می‌کند. با وجود مزایای فراوانی نظیر مقاومت فشاری مناسب، دوام قابل قبول، دسترسی آسان به مصالح و هزینه نسبتاً پایین، این ماده دارای کاستی‌های ذاتی مهمی است که عملکرد آن را در بسیاری از کاربردهای سازه‌های محدود می‌کند. مهم‌ترین ضعف بتن، رفتار ترد و مقاومت کششی و خمشی پایین آن است که سبب می‌شود در برابر تنش‌های کششی، ضربه، خستگی و تغییرشکل‌های ناگهانی عملکرد مطلوبی نداشته باشد [۱]. تشکیل ریزترک‌ها در مراحل اولیه بارگذاری و گسترش سریع آن‌ها در ماتریس سیمانی، منجر به کاهش سختی، افت ظرفیت باربری و در نهایت شکست ناگهانی می‌شود. علاوه بر این، نفوذپذیری بتن ترک‌خورده افزایش یافته و دوام آن در محیط‌های مهاجم به شدت کاهش می‌یابد [۲]. این محدودیت‌ها پژوهشگران را به سمت روش‌های مختلف بهبود رفتار کششی و شکل‌پذیری بتن سوق داده است [۳].

یکی از مؤثرترین راهکارها برای غلبه بر این ضعف‌ها، استفاده از الیاف درونی به منظور تولید بتن الیافی است. افزودن الیاف به ماتریس سیمانی موجب ایجاد مکانیزم پل‌زنی در محل ترک‌ها، توزیع یکنواخت تنش، جذب انرژی بیشتر و کنترل عرض ترک می‌شود [۴]. الیاف می‌توانند با ایجاد شبکه‌های سه‌بعدی در داخل بتن، از رشد و پیوستن ریزترک‌ها جلوگیری کرده و رفتار بتن را از حالت ترد به نیمه‌شکل‌پذیر تغییر دهند. به همین دلیل، بتن الیافی در سال‌های اخیر به عنوان نسل جدیدی از مصالح سیمانی با عملکرد بهبود یافته مورد توجه قرار گرفته و در روسازی‌ها، کف‌های صنعتی، قطعات پیش‌ساخته، سازه‌های مقاوم در برابر ضربه و زلزله کاربرد گسترده‌ای یافته است. نوع، جنس، طول و درصد الیاف از مهم‌ترین پارامترهایی هستند که عملکرد نهایی بتن الیافی را تعیین می‌کنند [۵].

در دهه‌های گذشته، انواع مختلفی از الیاف نظیر فولادی، شیشه‌ای، پلیمری و معدنی برای تقویت بتن مورد مطالعه قرار گرفت‌ه‌اند. الیاف فولادی نخستین گزینه مورد استفاده بودند که توانستند مقاومت کششی و خمشی بتن را به طور محسوسی افزایش دهند، اما مشکلاتی مانند خوردگی، وزن زیاد و هزینه بالا، محدودیت‌هایی در کاربرد آن‌ها ایجاد کرد. پس از آن، الیاف پلیمری از جمله پلی‌پروپیلن و PET به دلیل وزن کم، مقاومت در برابر خوردگی و دسترسی آسان مورد توجه قرار گرفتند. به ویژه الیاف PET که از بازیافت بطری‌های پلاستیکی به دست می‌آیند، علاوه بر بهبود خواص بتن، از منظر زیست‌محیطی نیز اهمیت زیادی دارند و می‌توانند به کاهش آلودگی‌های ناشی از ضایعات پلیمری کمک کنند [۶-۱۰].

در سال‌های اخیر، الیاف بازالت به عنوان نسل جدید الیاف معدنی با مقاومت کششی بالا، مدول الاستیسیته مناسب و پایداری حرارتی و شیمیایی مطلوب معرفی شده‌اند. مطالعات مختلف [۱۴-۱۱] نشان داده است که الیاف بازالت می‌توانند نسبت به الیاف پلیمری اثر بیشتری بر افزایش مقاومت خمشی و کنترل ترک داشته باشند. با این حال، اغلب پژوهش‌ها به بررسی جداگانه هر یک از این الیاف پرداخت‌ه‌اند و مقایسه عملکرد آن‌ها در شرایط یکسان آزمایشگاهی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در بسیاری از تحقیقات، تن‌ها مقاومت فشاری یا صرفاً مقاومت ۲۸ روزه بررسی شده و رفتار زمانی بتن الیافی در سنین مختلف به طور جامع تحلیل نشده است. مرور ادبیات نشان می‌دهد که اگرچه اثر مثبت الیاف بر بهبود رفتار بتن به اثبات رسیده است، اما هنوز پرسش‌های مهمی درباره درصد بهینه الیاف، تفاوت عملکرد الیاف سنتزی و معدنی، و تأثیر آن‌ها بر کارایی بتن وجود دارد. برخی محققان گزارش کرده‌اند که افزایش بیش از حد الیاف می‌تواند موجب کاهش تراکم، ایجاد حفرات و افت مقاومت فشاری شود. از سوی دیگر، کاهش روانی و اسلامپ بتن الیافی یکی از چالش‌های اصلی در کاربرد اجرایی آن است. بنابراین طراحی بهینه بتن الیافی نیازمند مطالعات جامع

است که به صورت همزمان مقاومت‌های مکانیکی و ویژگی‌های اجرایی را مورد توجه قرار دهد [۱۵-۱۸].

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارائه یک ارزیابی مقایسه‌ای نظام‌مند از عملکرد دو نوع الیاف با ماهیت متفاوت طراحی شده است. در این مطالعه، الیاف پلیمری PET و الیاف معدنی بازالت در یک چارچوب آزمایشگاهی یکسان و تحت شرایط ترکیب، عمل‌آوری و آزمون مشابه مورد بررسی مستقیم قرار گرفت‌ه‌اند تا امکان مقایسه واقعی عملکرد آن‌ها فراهم شود. برخلاف بسیاری از مطالعات که تن‌ها یک نوع الیاف یا تن‌ها سن ۲۸ روزه را بررسی کرده‌اند، در این پژوهش روند تکاملی مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی در سه سن ۷، ۲۸ و ۴۲ روزه تحلیل شده است تا اثر زمان بر کارایی هر نوع الیاف به‌صورت دقیق ارزیابی گردد. علاوه بر این، درصد بهینه هر الیاف بر مبنای ارزیابی همزمان سه شاخص مقاومتی و کارایی بتن تعیین شده است که رویکردی چندمعیاره در طراحی مخلوط ارائه می‌دهد. همچنین، مدل رفتاری مقاومت‌ها بر اساس درصد الیاف استخراج شده است که می‌تواند در پیش‌بینی عملکرد و طراحی عملی مخلوط‌های بتنی مورد استفاده قرار گیرد. توجه همزمان به ملاحظات مکانیکی و زیست‌محیطی استفاده از PET بازیافتی در مقایسه با الیاف بازالت، بُعد کاربردی و توسعه پایدار این پژوهش را تقویت می‌کند.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

در این بخش، ویژگی‌های مصالح مصرفی، چگونگی طراحی مخلوط‌های بتنی، روش ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها و همچنین آزمایش‌های انجام‌شده برای ارزیابی رفتار مکانیکی و کارایی بتن تشریح می‌شود.

۲-۱- مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سیمان و سنگدانه‌ها

برای ساخت نمونه‌های بتنی از سیمان پرتلند نوع II تولیدشده در کارخانه سیمان قاین مطابق با الزامات استانداردهای ملی و بین‌المللی استفاده شد. انتخاب ریزدانه و درشت‌دانه‌های مصرفی بر اساس استانداردهای ASTM C33 [۱۹]، ASTM C127 [۲۰]، ASTM C128 [۲۱] و ASTM C136 [۲۲] انجام گرفت تا توزیع دانه‌بندی مناسب و ویژگی‌های فیزیکی مطلوب برای تولید بتن با مقاومت هدف فراهم شود. حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها ۱۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد تا با الزامات ساخت نمونه‌ها و دستیابی به تراکم مناسب هم‌خوانی داشته باشد. ویژگی‌های فیزیکی و ترکیبات شیمیایی سیمان استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ گزارش شده است. علاوه بر آن، ویژگی‌هایی سنگ‌دانه‌ها نظیر مدول نرمی ریزدانه، وزن مخصوص ظاهری، درصد رطوبت و جذب آب در جدول ۲ ارائه شده است. شکل ۱ نمایی از سنگ‌دانه‌های استفاده‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها نیز بر اساس نتایج آزمون الک مطابق ASTM C33 [۱۹] در شکل ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های سیمان پرتلند تیپ ۲ استفاده شده [۲۳]

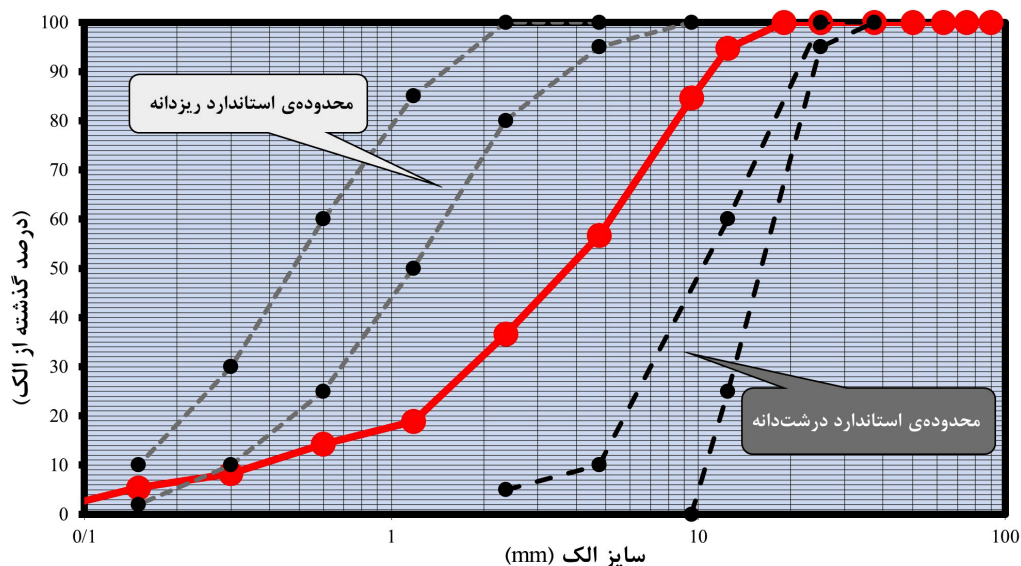
ویژگی	مقدار
وزن مخصوص ظاهری (kg/m^3)	۳۱۰۰
سطح مخصوص بلین (kg/m^2)	۳۲۰
زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۴۵
زمان گیرش نهایی (دقیقه)	۳۷۵
CaO (%)	۶۱
SiO ₂ (%)	۲۲
Al ₂ O ₃ (%)	۷
Fe ₂ O ₃ (%)	۵
MgO (%)	۳
SO ₃ (%)	۲

جدول ۲. ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌دانه‌ها

سنگ‌دانه	ریزدانه	درشت‌دانه
وزن مخصوص ظاهری (kg/m^3)	۲۵۳۸	۲۵۸۷
رطوبت اشباع با سطح خشک (%)	۳/۹	۱/۰
رطوبت نسبی (%)	۳/۵	۰/۰۰۸
مدول نرمی	۲/۹	-



شکل ۱. سنگ‌دانه‌های زیردانه و درشت‌دانه مصرفی در این پژوهش



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها

۲-۱-۲- الیاف PET و بازالت

در این پژوهش از الیاف پلیمری پلی استر^۱ یا پلی اتیلن ترفتالات^۲ که به اختصار در این پژوهش PET نامیده می‌شود و الیاف معدنی بازالت با ماهیت متفاوت برای بررسی اثر آن‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط بتن استفاده شد. شکل ۳ تصویر و ویژگی‌های الیاف استفاده شده در این پژوهش را ارائه کرده است. در این پژوهش، الیاف PET به دلیل وزن کم، مقاومت در برابر خوردگی و جنبه‌های زیست‌محیطی، و الیاف بازالت^۳ به علت مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بالا انتخاب شدند. الیاف PET با درصدهای حجمی ۰/۸، ۱/۰، ۱/۲ و ۱/۴ درصد و الیاف بازالت با درصدهای ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹ و ۱/۱ درصد نسبت به حجم بتن به مخلوط‌ها افزوده شدند. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی الیاف مطابق اطلاعات فنی تولیدکننده در جدول ۳ گزارش شده است.



شکل ۳. (الف) الیاف PET؛ (ب) الیاف بازالت

^۱ polyester

^۲ Polyethylene Terephthalate

^۳ Basalt

جدول ۳. ویژگی‌های مکانیکی الیاف استفاده‌شده در این پژوهش

ویژگی	الیاف PET	الیاف بازالت
طول (mm)	۱۲	۲۴
ضریب کشسانی (GPa)	۱۲	۷۹
چگالی (gr/cm^3)	۱/۳۸۰	۲/۶۳۰
مقاومت کششی (MPa)	۱۱۰۰	۳۱۰۰

۲-۲- نسبت‌های مخلوط نمونه‌های بتنی

نسبت‌های مخلوط پایه در این پژوهش با هدف دستیابی به مقاومت فشاری حدود ۳۰ تا ۳۵ مگاپاسکال در سن ۲۸ روزه مطابق با جدول ۴ طراحی شد. نسبت آب به سیمان برای تمامی مخلوط‌ها ثابت در نظر گرفته شد تا اثر الیاف به‌صورت مستقل ارزیابی گردد. برای هر نوع الیاف، یک طرح شاهد بدون الیاف PET و بازالت (با نمادهای PET00 و B00) تهیه و سپس درصدهای مختلف الیاف PET با درصدهای حجمی ۰/۸، ۱/۰، ۱/۲ و ۱/۴ درصد (به‌ترتیب با نمادهای PET0.8، PET1.0، PET1.2، PET1.4) و الیاف بازالت با درصدهای ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹ و ۱/۱ درصد (به‌ترتیب با نمادهای B0.3، B0.5، B0.7، B0.9، B1.1) نسبت به حجم بتن به آن افزوده شد. مقادیر سیمان، آب، ریزدانه، درشت‌دانه و فوق‌روان‌کننده برای تمامی مخلوط‌ها یکسان بوده و تنها متغیر پژوهش، نوع و درصد الیاف بوده است. ترکیب مصالح با استفاده از بتونیر آزمایشگاهی انجام شد و ترتیب افزودن اجزا به‌گون‌های انتخاب گردید که از گلوله‌شدن الیاف جلوگیری شود.

در این پژوهش، درصدهای حجمی الیاف بر اساس یک رویکرد پارامتریک و با در نظر گرفتن ملاحظات مکانیکی و اجرایی انتخاب شدند. بازه‌های مورد استفاده مبتنی بر مقادیر رایج گزارش‌شده در مطالعات پیشین و همچنین نتایج آزمایش‌های مقدماتی تعیین شدند تا هم‌زمان با حفظ کارایی بتن تازه، امکان بررسی رفتار مقاومتی در محدوده مؤثر فراهم شود. با توجه به چگالی کمتر و مدول الاستیسیته پایین‌تر الیاف PET، امکان استفاده از درصدهای حجمی بالاتر بدون افت شدید اسلامپ و کلوخه‌شدگی وجود داشت و از این‌رو بازه ۰/۸ تا ۱/۴ درصد برای این الیاف انتخاب شد. در مقابل، به دلیل مدول الاستیسیته بالاتر، سطح ویژه بیشتر و تمایل الیاف بازالت به کاهش کارایی مخلوط، بازه‌های محدودتر شامل ۰/۳ تا ۱/۱ درصد در نظر گرفته شد تا از کاهش شدید روانی و ایجاد ناپیوستگی در ماتریس جلوگیری شود.

در این پژوهش از یک فوق‌روان‌کننده مایع بر پایه پلی‌کربوکسیلات اتر^۱ استفاده شد. این افزودنی دارای رنگ قهوه‌ای روشن، وزن مخصوص ۱/۱۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و درصد مواد جامد ۳۳ درصد می‌باشد و مطابق با الزامات استاندارد ASTM C494 نوع F تولید شده است [۲۴]. محدوده کاهش آب این افزودنی بر اساس اطلاعات فنی تولیدکننده بین ۱۵ تا ۲۵ درصد گزارش شده است. با وجود آنکه نسبت آب به سیمان در این پژوهش برای تمامی مخلوط‌ها برابر ۰/۵۳ بوده است و در محدوده بتن‌های با کارایی متوسط قرار دارد، به‌منظور کنترل کارایی و جبران افت روانی ناشی از حضور الیاف، مقدار ثابتی فوق‌روان‌کننده معادل ۰/۷ لیتر به ازای هر ۱۰۰ کیلوگرم سیمان به تمامی طرح‌ها افزوده شد. افزودن الیاف، به‌ویژه در درصدهای حجمی بالاتر، باعث افزایش سطح ویژه، اصطکاک داخلی و کاهش اسلامپ می‌شود. از این‌رو استفاده از افزودنی کاهنده آب برای حفظ یکنواختی مخلوط و امکان مقایسه منصفانه نتایج مقاومتی ضروری بود.

^۱ Polycarboxylate Ether

در این پژوهش بیشینه درصد الیاف استفاده شده PET و بازالت به ترتیب برابر ۱/۴ و ۱/۱ درصد حجم کل بتن است که به مخلوط پایه افزوده شده است. با توجه به کوچک بودن حجم اشغال شده توسط الیاف، تغییر ایجاد شده در حجم کل مخلوط ناچیز بوده است و در محدوده خطای اجرایی و آزمایشگاهی قرار می گیرد. بنابراین برای حفظ امکان مقایسه مستقیم اثر نوع و درصد الیاف، مقادیر سیمان، ماسه، شن و نسبت آب به سیمان ثابت نگه داشته شده و فقط مقدار الیاف تغییر داده شده است.

جدول ۴. نسبت های مخلوط نمونه های بتنی در این پژوهش

نمونه ها	الیاف PET (kg/m ³)	الیاف بازالت (kg/m ³)	مقدار سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	درشت دانه (kg/m ³)	ریزدانه (kg/m ³)	مقدار افزودنی (فوق روان کننده) (L/100kg cement)
PET00 & B00	.	.	۴۰۰	۲۱۲	۹۰۰	۹۰۰	۰/۷
PET0.8	۱۱/۰۴	.	۴۰۰	۲۱۲	۹۰۰	۹۰۰	۰/۷
PET1.0	۱۳/۰۸	.	۴۰۰	۲۱۲	۹۰۰	۹۰۰	۰/۷
PET1.2	۱۶/۵۶	.	۴۰۰	۲۱۲	۹۰۰	۹۰۰	۰/۷
PET1.4	۱۹/۳۲	.	۴۰۰	۲۱۲	۹۰۰	۹۰۰	۰/۷
B0.3	.	۷/۸۹	۴۰۰	۲۱۲	۹۰۰	۹۰۰	۰/۷
B0.5	.	۱۳/۱۵	۴۰۰	۲۱۲	۹۰۰	۹۰۰	۰/۷
B0.7	.	۱۸/۴۱	۴۰۰	۲۱۲	۹۰۰	۹۰۰	۰/۷
B0.9	.	۲۳/۶۷	۴۰۰	۲۱۲	۹۰۰	۹۰۰	۰/۷
B1.1	.	۲۸/۹۳	۴۰۰	۲۱۲	۹۰۰	۹۰۰	۰/۷

۳-۲- فرآیند ترکیب، ساخت و عمل آوری نمونه ها

در این پژوهش، به منظور تضمین یکنواختی مخلوط ها و قابلیت مقایسه نتایج، برای تمامی نسبت های مخلوط یک روند ثابت و کنترل شده به کار گرفته شد. در مرحله نخست، ریزدانه ها و درشت دانه های خشک به مدت یک دقیقه در بتن میکسر آزمایشگاهی با ظرفیت ۳۵۰ لیتر با سرعت ۳۰ دور بر دقیقه مخلوط شدند تا توزیع یکنواخت اولیه حاصل شود. سپس حدود ۵۰ درصد آب ترکیب به همراه مقدار تعیین شده فوق روان کننده به مخلوط افزوده شد و عمل ترکیب به مدت یک دقیقه دیگر ادامه یافت. در گام بعد، سیمان به مخلوط اضافه و عملیات هم زدن با سرعت ۶۰ دور بر دقیقه به مدت دو دقیقه انجام شد تا ملات یکنواخت و همگنی تشکیل شود. افزودن الیاف PET و بازالت به مخلوط از حساس ترین مراحل فرآیند ساخت به شمار می رفت. از این رو، الیاف به صورت تدریجی و یکنواخت طی حدود ۳۰ ثانیه به مخلوط اضافه شدند تا از پدیده گلوله های شدن و تجمع موضعی الیاف جلوگیری شود. پس از اتمام افزودن الیاف، ترکیب به مدت دو دقیقه دیگر با سرعت ۶۰ دور بر دقیقه ادامه یافت. در طول این مرحله، مخلوط به صورت چشمی از نظر وجود گره ها و توده های الیافی کنترل شد و در صورت مشاهده هرگونه غیر یکنواختی، زمان ترکیب افزایش یافت تا توزیع سه بعدی و همگن الیاف در ماتریس سیمانی تضمین گردد. پس از اتمام ترکیب، بتن تازه در قالب های استاندارد ریخته و در چند لایه متوالی متراکم شد. سطح نمونه ها پس از تراکم پرداخت شده و قالب ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط آزمایشگاه نگهداری

شدند. سپس نمونه‌ها از قالب خارج و تا زمان انجام آزمون‌ها در حوضچه آب با شرایط استاندارد عمل‌آوری قرار گرفتند. تمامی نمونه‌ها در حوضچه آب معمولی و در شرایط دمایی استاندارد نگهداری شدند تا فرآیند هیدراتاسیون سیمان به‌طور کامل انجام گیرد. لازم به ذکر است که نگهداری در آب خالص می‌تواند منجر به لیچینگ کلسیم هیدروکسید از ماتریس سیمانی به داخل آب شود که در درازمدت می‌تواند مقاومت سطحی و دوام نمونه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. با توجه به دسترسی محدود به حوضچه‌های آب آهک و کوتاه‌مدت بودن بازه‌های عمل‌آوری (۷، ۲۸ و ۴۲ روز)، این اثر در نتایج مکانیکی این پژوهش مشاهده نشده است. آب حوضچه به‌صورت منظم تعویض می‌شد تا هرگونه کاهش مواد محلول در سطح نمونه‌ها به حداقل برسد. این توضیح در متن مقاله برای شفافیت فرآیند عمل‌آوری درج شد. در این پژوهش، برای هر نسبت مخلوط سه نمونه تکراری در نظر گرفته شد تا قابلیت اعتماد آماری نتایج افزایش یابد و اثر خطاهای تصادفی کاهش پیدا کند. از این رو، در مجموع ۲۷۰ نمونه بتنی ساخته شد که شامل ۹۰ نمونه مکعبی با ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر برای آزمون مقاومت فشاری و ۹۰ نمونه استوان‌های با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر برای آزمون مقاومت کششی برزیلی بود. افزون بر این، برای ارزیابی مقاومت خمشی، تعداد ۹۰ نمونه منشوری $15 \times 15 \times 50$ سانتی‌متر نیز برای هر نسبت مخلوط تهیه گردیدند. نمونه‌ها در سه سن عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۴۲ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند تا روند تکاملی مقاومت‌ها در طول زمان بررسی شود. برای سازمان‌دهی و شناسایی دقیق نمونه‌ها، یک سیستم کدگذاری منسجم در نظر گرفته شد. در این سیستم، برای نمونه‌های فشاری از الگوی C_X_n و برای نمونه‌های کششی از الگوی T_X_n استفاده گردید که در آن حرف C بیانگر آزمون مقاومت فشاری و حرف T نشان‌دهنده آزمون کششی است. عبارت X نوع و درصد الیاف را مشخص می‌کند. برای نمونه‌های بدون الیاف PET و بازالت از نمادهای PET00 و B00 و برای نمونه‌ها با درصدهای مختلف الیاف PET از نمادهای PET0.8، PET1.0، PET1.2 و PET1.4 و الیاف بازالت با نمادهای B0.3، B0.5، B0.7، B0.9 و B1.1 استفاده شده است. در این نام‌گذاری، عدد پایانی n شماره نمونه تکراری را نشان می‌دهد.

۴-۲- معرفی آزمایش‌ها

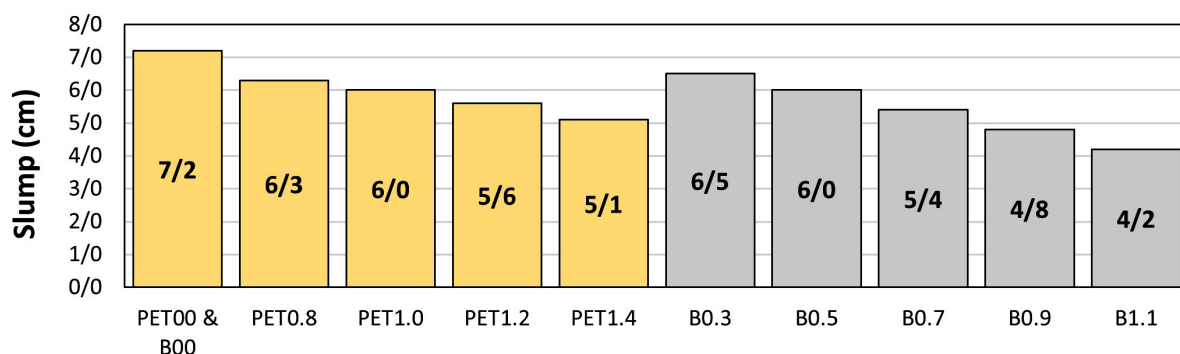
۴-۲-۱- آزمایش اسلامپ

به‌منظور ارزیابی کارایی بتن تازه و اثر افزودن الیاف PET و بازالت برای تمامی طرح‌ها آزمون، مطابق با شکل ۴، اسلامپ مطابق استاندارد ASTM C143 [۲۵] انجام شد تا تغییرات کارایی و روانی بتن با درصدهای مختلف الیاف مشخص شود. نتیجه‌های آزمون اسلامپ در شکل ۵ ارائه شده است. آن‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در مخلوط‌های بتن دارای الیاف PET، افزودن الیاف باعث کاهش روانی بتن می‌شود. نمونه بدون الیاف (PET00) دارای بیشترین اسلامپ $7/2$ سانتی‌متر بود. با افزایش درصد الیاف PET، اسلامپ کاهش یافته است، به طوری که در نمونه‌های دارای $0/8$ درصد الیاف (PET0.8) مقدار اسلامپ برابر $6/3$ سانتی‌متر، در نمونه‌های PET1.0 برابر $6/0$ سانتی‌متر، در نمونه‌های PET1.2 برابر $5/6$ سانتی‌متر و در نمونه‌های PET1.4 برابر $5/1$ سانتی‌متر ثبت شده است. این کاهش پیوسته در اسلامپ ناشی از افزایش اصطکاک داخلی و کاهش جریان‌پذیری بتن به دلیل حضور الیاف است. افزایش درصد PET باعث می‌شود که الیاف با ایجاد شبکه‌های در ماتریس سیمانی، مقاومت داخلی بتن نسبت به تغییر شکل را افزایش دهند و از روانی آن بکاهند. در نمونه‌های دارای الیاف بازالت نیز روند مشابهی داشتند. نمونه بدون الیاف بازالت (B00)، همانند نمونه‌های PET00، دارای اسلامپ $7/2$ سانتی‌متر بود. افزودن $0/3$ درصد بازالت باعث کاهش اندک اسلامپ به $6/5$ سانتی‌متر شد. با افزایش درصد الیاف به $0/5$ و $0/7$ درصد، اسلامپ به ترتیب به $6/0$ و $5/4$ سانتی‌متر کاهش یافت و در درصدهای بالاتر مانند $0/9$ و $1/1$ به $4/8$ و $4/2$ سانتی‌متر رسید. این کاهش شدیدتر در اسلامپ نمونه‌های بازالت نسبت به PET نشان می‌دهد

که الیاف بازالت اثر بیشتری بر کاهش روانی بتن دارند، که به دلیل سختی و طول الیاف و ایجاد شبکه مقاوم در ماتریس سیمانی است. نتیجه کلی این بررسی نشان می‌دهد که افزودن هر دو گونه الیاف PET و بازالت، به ویژه در درصدهای بالاتر، باعث کاهش روانی بتن می‌شود و برای حفظ کارایی و قابلیت اجرا، باید ترکیب بتن و درصد الیاف به دقت کنترل شود.



شکل ۴. چگونگی انجام آزمون اسلامپ



۲-۴-۲- آزمون تعیین مقاومت فشاری

به منظور ارزیابی رفتار فشاری بتن، آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی استاندارد با ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر مطابق با الزامات استاندارد ASTM C39 [۲۶] انجام شد. نمونه‌ها پس از طی دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۴۲ روزه در شرایط غوطه‌وری در آب، مورد آزمایش قرار گرفتند. مطابق با شکل ۶، برای اعمال بار فشاری از دستگاه جک هیدرولیکی با ظرفیت اسمی ۲۰۰۰ کیلونیوتن استفاده شد. این دستگاه مجهز به نیروسنج با دقت ۰/۵ درصد ظرفیت اسمی بوده است و قابلیت ثبت پیوسته بار اعمالی را داراست. نرخ بارگذاری بر اساس توصیه‌های استاندارد ASTM C39 [۲۶] به صورت ثابت و معادل ۰/۲۵ مگاپاسکال بر ثانیه تنظیم شد تا از اعمال بار یکنواخت و قابل مقایسه برای تمامی نمونه‌ها اطمینان حاصل شود.

۴-۴-۲- آزمون تعیین مقاومت خمشی

برای تعیین مقاومت خمشی بتن، مطابق شکل ۸ از آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های منشوری (مکعب مستطیلی) استفاده شد. این آزمون مطابق با استاندارد ASTM C293 [۲۹] انجام گردید. دستگاه مورد استفاده شامل دو تکیه‌گاه در دو انتهای نمونه و یک نقطه اعمال بار در وسط طول آن است.



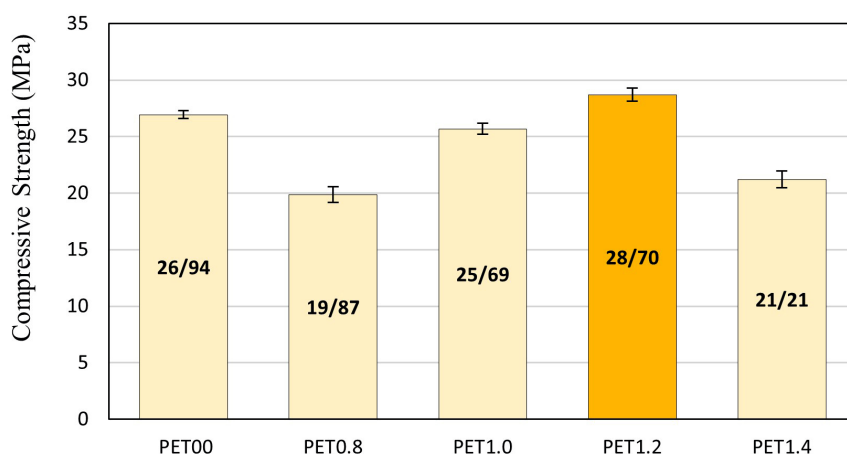
شکل ۸. دستگاه آزمون تعیین مقاومت خمشی

۳- تحلیل نتایج آزمایشگاهی

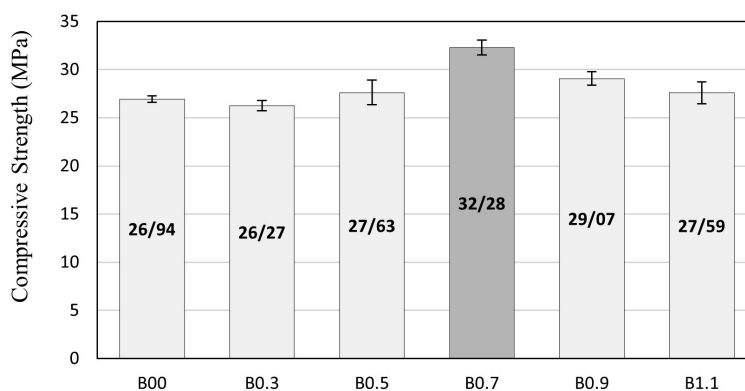
در این بخش، نتایج حاصل از آزمون‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمایش برزیلی) و مقاومت خمشی سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های مکعبی، استوانه‌ای و منشوری بررسی و تحلیل می‌شود. تحلیل‌ها بر اساس تأثیر نوع و درصد الیاف PET و بازالت در مخلوط بتن انجام شده است.

۳-۱- آزمون‌های تعیین مقاومت فشاری

در این پژوهش، به منظور تعیین حدود بهینه درصد الیاف درونی و بررسی تأثیر آن بر رفتار مکانیکی بتن، آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی استاندارد با ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر در سه زمان عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۴۲ روزه انجام شد. نمونه‌ها شامل ترکیبات مختلف بتن با درصدهای متفاوت الیاف PET در پنج سطح مختلف بدون الیاف (PET00)، ۰/۸ درصد (PET0.8)، ۱/۰ درصد (PET1.0)، ۱/۲ درصد (PET1.2) و ۱/۴ درصد (PET1.4) و درصدهای مختلف بازالت در شش سطح بدون الیاف (B00)، ۰/۳ درصد (B0.3)، ۰/۵ درصد (B0.5)، ۰/۷ درصد (B0.7)، ۰/۹ درصد (B0.9) و ۱/۱ درصد (B1.1) نسبت به حجم بتن را شامل می‌شد. نتیجه‌های آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های دارای درصدهای مختلف الیاف PET و بازالت، پس از گذشت ۷ روز از عمل‌آوری نمونه‌ها به ترتیب در شکل ۹ و ۱۰ آمده است.



شکل ۹. مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های مکعبی دارای الیاف PET



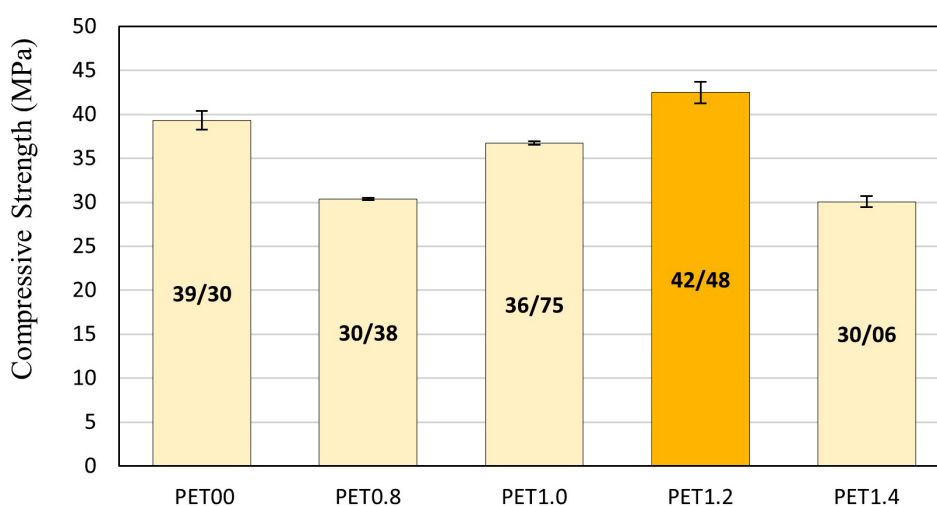
شکل ۱۰. مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های مکعبی دارای الیاف بازالت

همان‌گونه که در شکل ۹ نشان داده شده است، در نمونه‌های مکعبی دارای الیاف PET مشاهده شد که افزودن ۰/۸ درصد الیاف باعث کاهش چشمگیر مقاومت به ۱۹/۸۷ مگاپاسکال شد. این کاهش اولیه ناشی از پراکندگی نامتعادل الیاف و ترکیب ناکافی در درصد پایین است، به طوری که الیاف قادر به ایجاد شبکه انتقال بار مؤثر نیستند. با افزایش درصد PET به ۱/۰ درصد، علی‌رغم پیچیدگی بیشتر ترکیب، تعداد الیاف کافی برای تشکیل شبکه مستمر در ماتریس سیمانی فراهم شد که موجب بهبود پیوستگی و افزایش مقاومت فشاری به ۲۵/۶۹ مگاپاسکال شد که به‌طور تقریبی مشابه نمونه بدون الیاف (PET00) با مقاومت فشاری ۲۶/۹۴ مگاپاسکال بود و این روند نشان‌دهنده غالب شدن اثر مثبت الیاف بر اثرات منفی ناشی از ترکیب جزئی است. بیشترین مقاومت فشاری در بین نمونه‌های PET مربوط به ۱/۲ درصد الیاف بود که به ۲۸/۷۰ مگاپاسکال رسید و این افزایش ناشی از توانایی الیاف در انتقال بار و کنترل ترک‌های اولیه است. با این حال، در نمونه PET1,4 مقاومت کاهش یافت و به ۲۱/۲۱ مگاپاسکال رسید که این امر ناشی از تجمع الیاف و ایجاد نقاط ضعف در ماتریس سیمانی می‌باشد. در نتیجه، درصد بهینه PET برای مقاومت فشاری ۷ روزه برابر با ۱/۲ درصد است و مقادیر کمتر یا بیشتر باعث کاهش مقاومت می‌شوند.

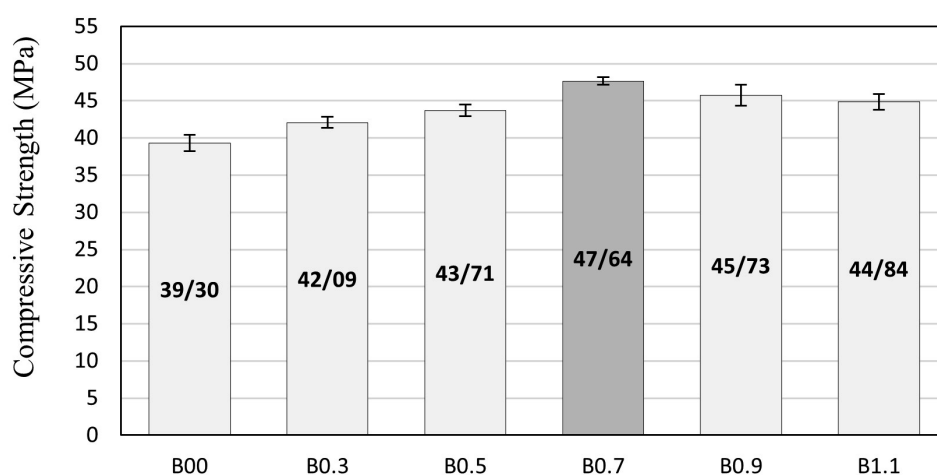
نتیجه‌های ارایه‌شده در شکل ۱۰ برای نمونه‌های حاوی الیاف بازالت نیز روند مشابهی را نشان دادند، اما اثر تقویتی آن‌ها در مقایسه

با نمونه‌های دارای الیاف PET قابل توجه‌تر بود. مقاومت فشاری نمونه B0.3 اندکی کاهش یافت و به ۲۶/۲۷ مگاپاسکال رسید، در حالی که B0.5 با مقاومت ۲۷/۶۳ مگاپاسکال افزایش جزئی نشان داد. بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه B0.7 با ۳۲/۲۸ مگاپاسکال بود و نشان‌دهنده درصد بهینه بازالت برای مقاومت فشاری زودرس است. درصدهای بالاتر از ۰/۷ بازالت باعث کاهش مقاومت فشاری شدند، به طوری که B0.9 به ۲۹/۰۷ و B1.1 به ۲۷/۵۹ مگاپاسکال کاهش یافتند. این کاهش مقاومت در درصدهای بالاتر ناشی از تمرکز تنش‌ها و کاهش یکنواختی توزیع الیاف است.

نتیجه‌های آزمون تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های دارای درصدهای مختلف الیاف PET و بازالت پس از ۲۸ و ۴۲ روز از زمان عمل‌آوری به‌تریب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ و شکل‌های ۱۳ و ۱۴ گزارش شده است.



شکل ۱۱. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی دارای الیاف PET

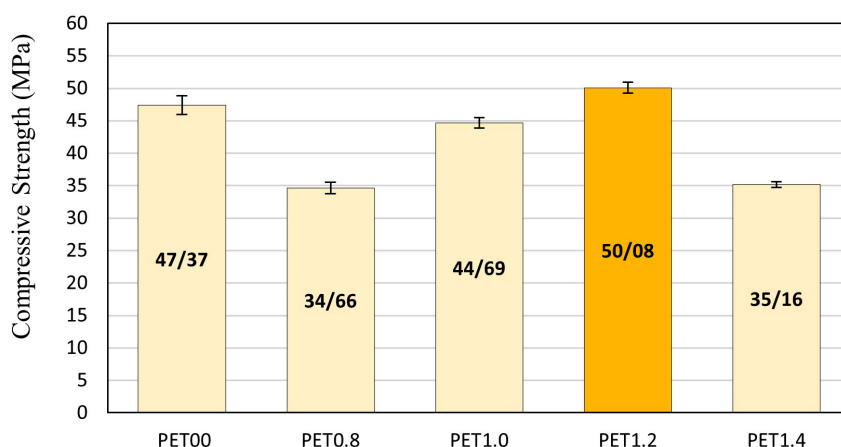


شکل ۱۲. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی دارای الیاف بازالت

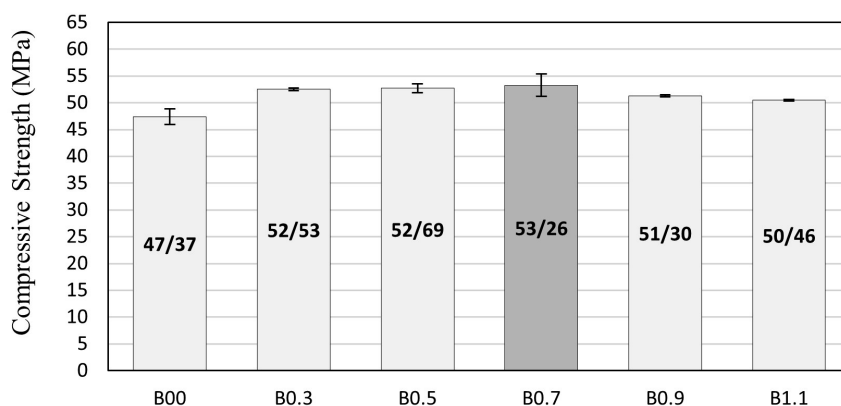
آن‌گونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، در مورد مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های دارای الیاف PET، مشاهده شد که نمونه‌های بدون الیاف (PET00) مقاومت فشاری ۳۹/۳۰ مگاپاسکال را ثبت کرده‌اند. با افزودن ۰/۸ درصد الیاف PET، کاهش

قابل توجهی در مقاومت فشاری مشاهده شد و مقدار آن به $30/38$ مگاپاسکال رسید که نشان‌دهنده اثر منفی درصد پایین الیاف بر یکپارچگی ماتریس سیمانی در درازمدت است. با افزایش درصد PET به $1/0$ درصد، مقاومت فشاری به $36/75$ مگاپاسکال افزایش یافت، و نمونه‌های PET1.2 بیشترین مقاومت فشاری را نشان دادند ($42/48$ مگاپاسکال)، که بیانگر اثر مثبت الیاف در تقویت ماتریس و کنترل ترک‌های ناشی از جمع شدگی و بارهای داخلی است. در PET1.4 دوباره کاهش مقاومت به $30/06$ مگاپاسکال رخ داد، که ناشی از تراکم بالای الیاف، ترکیب ناکافی و ایجاد نقاط تمرکز تنش در ماتریس بتن است. این روند نشان می‌دهد که درصد بهینه الیاف PET برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه همانند مقاومت فشاری ۷ روزه، حدود $1/2$ درصد است.

مطابق با شکل ۱۲، مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های بازالت نیز روند مشابهی داشتند، اما اثر تقویتی آن‌ها در مقاومت فشاری بیشتر از PET بود. نمونه بدون الیاف (B00) مقاومت $39/30$ مگاپاسکال را نشان داد، و با افزودن $0/3$ درصد بازالت، مقاومت به $42/09$ مگاپاسکال افزایش یافت. با افزایش درصد الیاف به $0/5$ و $0/7$ درصد، مقاومت فشاری به ترتیب به $43/71$ و $47/64$ مگاپاسکال رسید، که بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه ثبت شده برای بازالت در این پژوهش است. درصدهای بالاتر الیاف بازالت مانند $0/9$ و $1/1$ باعث کاهش مقاومت فشاری شدند ($45/73$ و $44/84$ مگاپاسکال)، که دلیل آن افزایش تمرکز تنش‌ها و کاهش یکنواختی توزیع الیاف در ماتریس سیمانی است. درصد بهینه الیاف بازالت برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه، مشابه مقاومت فشاری ۷ روزه، $0/7$ درصد می‌باشد.



شکل ۱۳. مقاومت فشاری ۴۲ روزه نمونه‌های مکعبی دارای الیاف PET

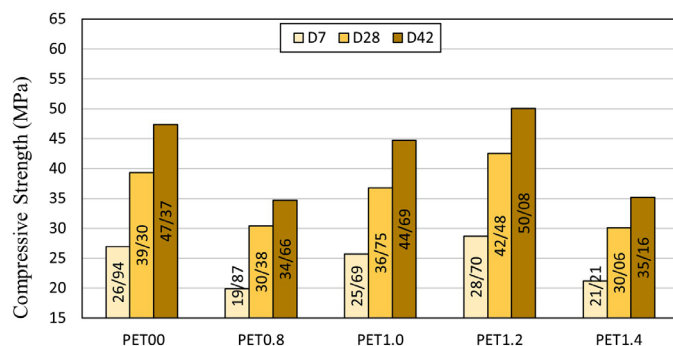


شکل ۱۴. مقاومت فشاری ۴۲ روزه نمونه‌های مکعبی دارای الیاف بازالت

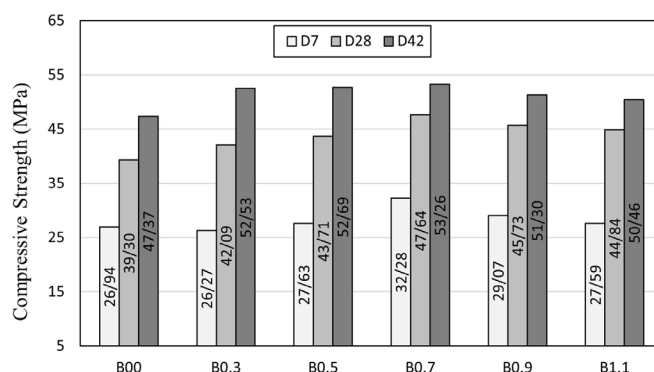
بررسی نتیجه‌های ارایه‌شده در شکل ۱۳ برای مقاومت فشاری ۴۲ روزه نمونه‌های دارای الیاف PET نشان می‌دهد که نمونه بدون الیاف (PET00) مقاومت ۴۷/۳۷ مگاپاسکال را دارا بوده‌اند. افزودن ۰/۸ درصد PET باعث کاهش مقاومت به ۳۴/۶۶ مگاپاسکال شد که مشابه روند مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه، کاهش ناشی از عدم یکنواختی و ترکیب ناکافی الیاف است. با افزایش درصد PET به ۱/۰ درصد، مقاومت فشاری به ۴۴/۶۹ مگاپاسکال رسید و نمونه PET1.2 بیشترین مقاومت فشاری ۴۲ روزه برابر با ۵۰/۰۸ مگاپاسکال را ثبت کرد، که نشان‌دهنده اثر مثبت الیاف در تقویت ماتریس سیمانی و کنترل ترک‌های ناشی از بارگذاری و جمع شدگی بتن در بلندمدت است. در نمونه PET1.4 مقاومت کاهش یافت و به ۳۵/۱۶ مگاپاسکال رسید، که این امر ناشی از تراکم بیش از حد الیاف و ایجاد نقاط تمرکز تنش در ماتریس سیمانی است. این روند نشان می‌دهد که درصد بهینه PET برای مقاومت فشاری ۴۲ روزه، مشابه مقادیر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه، حدود ۱/۲ درصد است.

با ارزیابی نتیجه‌های شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری ۴۲ روزه نمونه‌های حاوی الیاف بازالت نیز روند افزایشی مشابهی داشتند، اما اثر تقویتی آن‌ها در مقایسه با PET بیشتر بود. مقاومت فشاری ۴۲ روزه نمونه B0.3 برابر با ۵۲/۵۳ مگاپاسکال بود و با افزایش درصد الیاف به ۰/۵ درصد، مقاومت به ۵۲/۶۹ مگاپاسکال رسید. بیشترین مقاومت فشاری ۴۲ روزه در نمونه B0.7 ثبت شد و مقدار آن ۵۳/۲۶ مگاپاسکال بود. درصدهای بالاتر مانند ۰/۹ و ۱/۱ کاهش مقاومت را نشان دادند (۵۱/۳۰ و ۵۰/۴۶ مگاپاسکال)، که دلیل آن افزایش تمرکز تنش‌ها و کاهش یکنواختی توزیع الیاف در ماتریس سیمانی است. این نتایج نشان می‌دهد که درصد بهینه بازالت برای مقاومت فشاری ۴۲ روزه نیز ۰/۷ درصد است.

در ادامه، اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است، تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف عمل‌آوری، به ترتیب برای نمونه‌های حاوی الیاف PET و الیاف بازالت ارائه شده است.



شکل ۱۵. اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی دارای الیاف PET



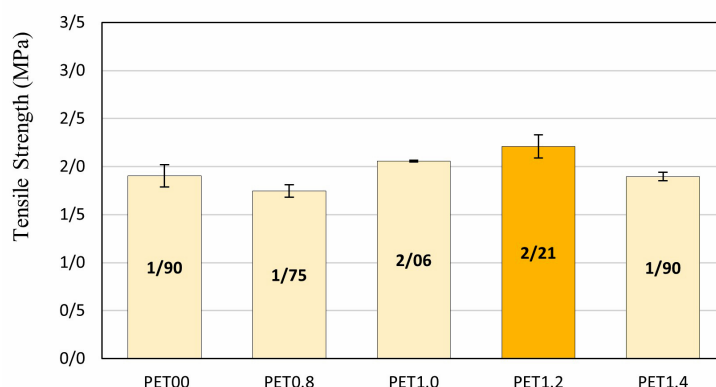
شکل ۱۶. اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی دارای الیاف بازالت

آن گونه که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، در نمونه‌های دارای الیاف PET، روند تکاملی مقاومت فشاری نشان داد که نمونه‌های بدون الیاف (PET00) از ۲۶/۹۴ مگاپاسکال در ۷ روز به ۳۹/۳۰ مگاپاسکال در ۲۸ روز و در نهایت به ۴۷/۳۷ مگاپاسکال در ۴۲ روز رسید. افزودن ۰/۸ درصد PET باعث کاهش مقاومت در تمام مراحل عمل‌آوری شد و مقادیر آن به ترتیب ۱۹/۸۷، ۳۰/۳۸ و ۳۴/۶۶ مگاپاسکال بود که کاهش به ترتیب ۲۶/۳٪، ۲۲/۸٪ و ۳۰/۷٪ نسبت به نمونه بدون الیاف را نشان می‌دهد. این کاهش ناشی از ترکیب ناکافی و عدم یکنواختی توزیع الیاف در درصدهای پایین است. با افزایش درصد PET به ۱/۰ و ۱/۲ درصد، مقاومت فشاری در همه مراحل عمل‌آوری به‌طور مستمر افزایش یافت و بیشترین مقاومت مربوط به PET1.2 بود که به ترتیب ۲۸/۷۰، ۴۲/۴۸ و ۵۰/۰۸ مگاپاسکال در ۷، ۲۸ و ۴۲ روز رسید. این افزایش به ترتیب ۶/۵٪، ۸/۱٪ و ۶/۰٪ نسبت به نمونه بدون الیاف را نشان می‌دهد و اثر مثبت الیاف PET در تقویت ماتریس سیمانی، کنترل ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی و بهبود انتقال بار در طول زمان را تایید می‌کند. با این حال، در PET1.4 کاهش مقاومت مشاهده شد که در تمام مراحل عمل‌آوری ادامه داشت و ناشی از تراکم بیش از حد الیاف و ایجاد نقاط تمرکز تنش است.

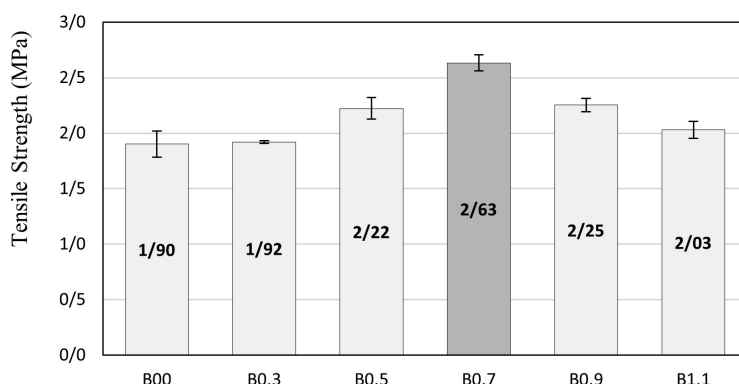
بررسی شکل ۱۶ نشان می‌دهد که نمونه‌های بازالت نیز روند مشابهی داشتند، اما اثر تقویتی آن‌ها قوی‌تر بود. مقاومت فشاری نمونه‌های B0.3 به ترتیب ۲۶/۲۷، ۴۲/۰۹ و ۵۲/۵۳ مگاپاسکال در ۷، ۲۸ و ۴۲ روز ثبت شد که به ترتیب افزایش ۰/۹۵٪، ۷/۰٪ و ۱۱/۱٪ نسبت به نمونه بدون الیاف بود. با افزایش درصد بازالت به ۰/۵ و ۰/۷ درصد، مقاومت فشاری به ترتیب ۲۷/۶۳، ۴۳/۷۱ و ۵۲/۶۹ مگاپاسکال رسید، که بیشترین مقاومت در B0.7 مشاهده شد و نسبت به نمونه بدون الیاف افزایش ۱۰/۰٪، ۲۰/۳٪ و ۱۵/۷٪ را نشان می‌دهد. درصدهای بالاتر ۰/۹ و ۱/۱ کاهش مقاومت فشاری در طول زمان را نشان دادند. بنابراین، درصد بهینه بازالت برای مقاومت فشاری هم در کوتاه‌مدت و هم بلندمدت ۰/۷ درصد است.

۳-۲- آزمون‌های تعیین مقاومت کششی

در این بخش، مشابه با آزمون‌های مقاومت فشاری، به‌منظور شناسایی حدود بهینه درصد الیاف درونی و بررسی اثر آن بر رفتار کششی بتن، آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمایش برزیلی) بر روی نمونه‌های استوان‌های استاندارد با قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. نمونه‌ها شامل بتن‌های بدون الیاف و بتن‌های حاوی الیاف PET با درصدهای ۰/۸، ۱/۰، ۱/۲ و ۱/۴ و همچنین الیاف بازالت با درصدهای ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹ و ۱/۱ نسبت به حجم بتن بودند. شکل ۱۷ و ۱۸ نتیجه‌های آزمون مقاومت کششی نمونه‌های دارای درصدهای مختلف الیاف PET و بازالت، پس از گذشت ۷ روز از عمل‌آوری نمونه‌ها را گزارش کرده‌اند.



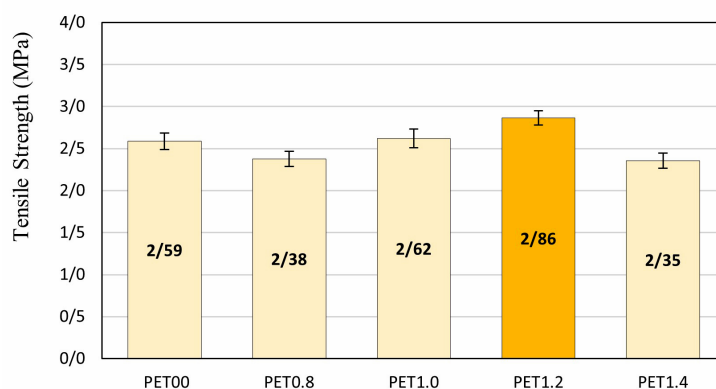
شکل ۱۷. مقاومت کششی ۷ روزه نمونه‌های استوان‌های استاندارد دارای الیاف PET



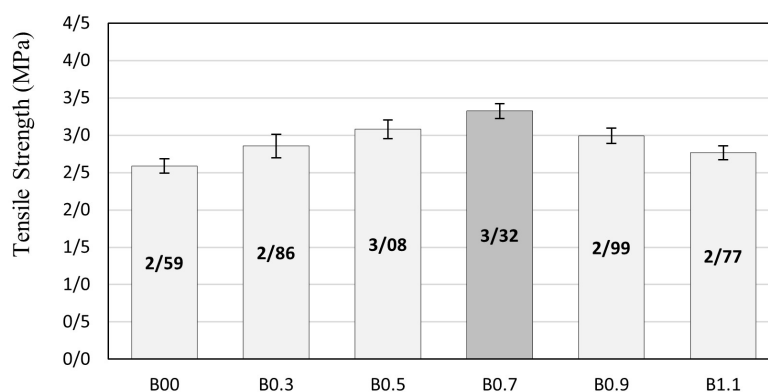
شکل ۱۸. مقاومت کششی ۷ روزه نمونه‌های استوانه‌های استاندارد دارای الیاف PET

همان‌گونه که در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ آمده است، در مورد مقاومت کششی، نتایج نشان داد که الیاف PET و بازالت هر دو باعث افزایش مقاومت کششی زودرس می‌شوند، اما اثر بازالت قوی‌تر است. مطابق با شکل ۱۷، برای نمونه‌های دارای الیاف PET، مقاومت کششی نمونه‌های PET0.8 با اندکی کاهش نسبت به نمونه‌های بدون الیاف از ۱/۹۰ مگاپاسکال به ۱/۷۵ مگاپاسکال رسید که به احتمال زیاد ناشی از توزیع ناکافی الیاف است. با افزایش درصد PET به ۱/۰ درصد، مقاومت کششی به ۲/۰۶ مگاپاسکال رسید و در PET1.2 به بیشترین مقدار مقاومت کششی ۷ روزه برابر با ۲/۲۱ مگاپاسکال افزایش یافت. نمونه PET1.4 دوباره کاهش مقاومت کششی را نشان داد که با افزایش جمع‌شدگی و تمرکز تنش‌ها مرتبط است. نتیجه‌های شکل ۱۸ نشان می‌دهد که برای نمونه‌های دارای الیاف بازالت، مقاومت کششی ۷ روزه روند افزایشی مشخصی دارد. مقاومت کششی نمونه‌های B0.3 به ۱/۹۲ مگاپاسکال رسید، B0.5 به ۲/۲۲ مگاپاسکال افزایش یافت و بیشترین مقاومت کششی ۷ روزه در B0.7 برابر با ۲/۶۳ مگاپاسکال ثبت شد. درصد‌های بالاتر از ۰/۷ باعث کاهش مقاومت کششی شدند، به طوری که B0.9 به ۲/۲۵ و B1.1 به ۲/۰۳ مگاپاسکال رسیدند. این نتایج نشان می‌دهد که الیاف بازالت در انتقال تنش و کنترل ترک‌های اولیه مؤثرتر از PET عمل می‌کنند و درصد بهینه آن برای مقاومت کششی نیز ۰/۷ درصد است.

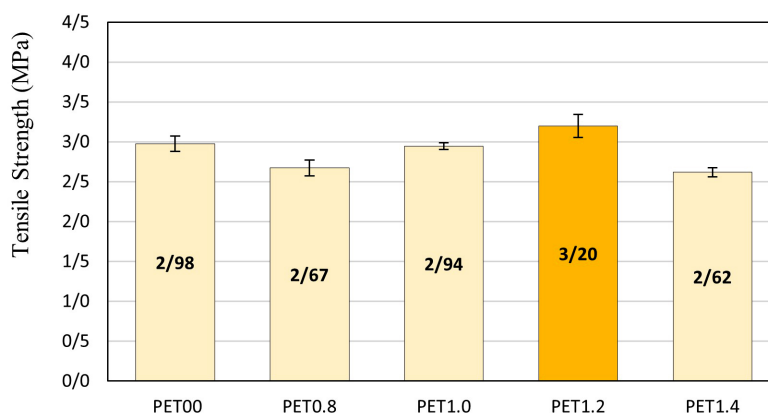
در ادامه، شکل‌های ۱۹ و ۲۰ و شکل‌های ۲۱ و ۲۲ به ترتیب نتیجه‌های آزمون تعیین مقاومت کششی نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف الیاف PET و بازالت پس از ۲۸ و ۴۲ روز از زمان عمل‌آوری را گزارش کرده‌اند.



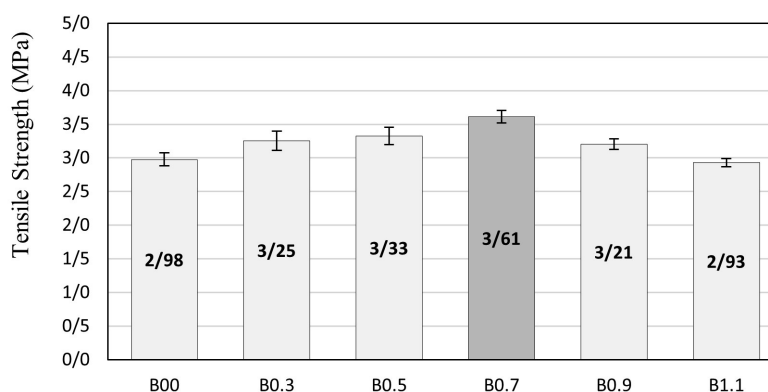
شکل ۱۹. مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌های استاندارد دارای الیاف PET



شکل ۲۰. مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌های استاندارد دارای الیاف بازالت



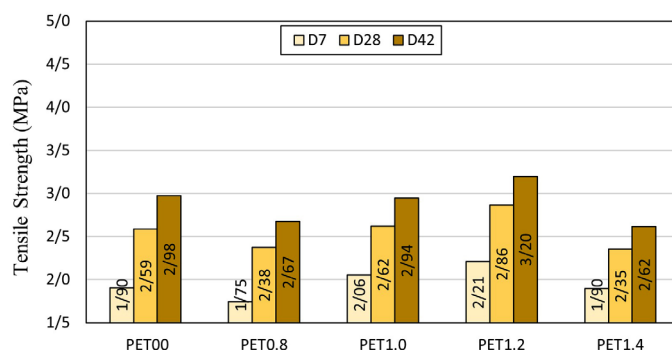
شکل ۲۱. مقاومت کششی ۴۲ روزه نمونه‌های استوانه‌های استاندارد دارای الیاف PET



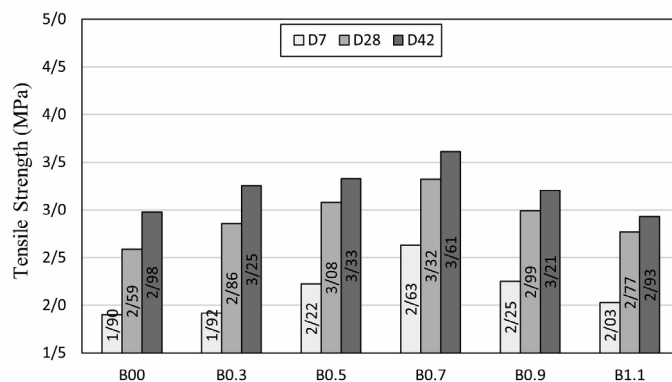
شکل ۲۲. مقاومت کششی ۴۲ روزه نمونه‌های استوانه‌های استاندارد دارای الیاف بازالت

بررسی شکل ۱۹ نشان می‌دهد که مقاومت کششی ۲۸ روزه در نمونه‌های PET روند افزایشی داشته است. نمونه‌های PET0.8 مقاومت کششی ۲۸ روزه برابر با ۲/۳۸ مگاپاسکال را ثبت کرد که کاهش جزئی نسبت به نمونه بدون الیاف (۲/۵۹ مگاپاسکال) نشان می‌دهد. با افزایش درصد PET به ۱/۰ درصد، مقاومت کششی ۲۸ روزه به ۲/۶۲ مگاپاسکال رسید و نمونه PET1.2 بیشترین مقاومت

کششی ۲۸ روزه برابر با ۲/۸۶ مگاپاسکال را نشان داد. در PET1.4 کاهش مقاومت کششی ۲۸ روزه به ۲/۳۵ مگاپاسکال مشاهده شد که مشابه مقاومت فشاری، ناشی از اختلال در یکنواختی توزیع الیاف و تمرکز تنش هاست. مطابق با شکل ۲۰، برای نمونه‌های دارای الیاف بازالت، اثر تقویتی الیاف مشهودتر بود. مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌های B0.3 برابر ۲/۸۶ مگاپاسکال بود و با افزایش درصد الیاف به ۰/۵ و ۰/۷ درصد، مقاومت کششی ۲۸ روزه به ۳/۰۸ و ۳/۳۲ مگاپاسکال رسید. درصد‌های بالاتر ۰/۹ و ۱/۱ کاهش مقاومت کششی ۲۸ روزه به ۲/۹۹ و ۲/۷۷ مگاپاسکال را نشان دادند، که نشان می‌دهد درصد بهینه بازالت برای مقاومت کششی ۲۸ روزه نیز ۰/۷ درصد است. در مقاومت کششی ۴۲ روزه، مطابق آنچه در شکل ۲۱ ارایه شده است، نمونه‌های PET روند افزایشی مشابهی داشتند. نمونه‌های PET0.8 مقاومت کششی ۴۲ روزه برابر با ۲/۶۷ مگاپاسکال را ثبت کرد که کاهش جزئی نسبت به نمونه بدون الیاف (۲/۹۸ مگاپاسکال) نشان می‌دهد. با افزایش درصد PET به ۱/۰ درصد، مقاومت کششی ۴۲ روزه به ۲/۹۴ مگاپاسکال رسید و نمونه‌های PET1.2 بیشترین مقاومت کششی ۴۲ روزه برابر با ۳/۲۰ مگاپاسکال را ثبت کرد. نمونه‌های PET1.4 کاهش مقاومت کششی ۴۲ روزه به ۲/۶۲ مگاپاسکال را نشان داد که مشابه روند فشاری، ناشی از عدم یکنواختی و تراکم بیش از حد الیاف است. مطابق با شکل ۲۲ برای نمونه‌های دارای الیاف بازالت، اثر تقویتی قوی‌تر برای مقاومت کششی ۴۲ روزه نسبت به نمونه‌های دارای الیاف PET مشاهده شد. در نمونه‌های B0.3 مقاومت کششی ۴۲ روزه برابر ۳/۲۵ مگاپاسکال ثبت شد، این مقاومت در نمونه‌های B0.5 به ۳/۳۳ مگاپاسکال رسید و بیشترین مقاومت کششی ۴۲ روزه در نمونه‌های B0.7 برابر با ۳/۶۱ مگاپاسکال بود. درصد‌های بالاتر الیاف بازالت ۰/۹ و ۱/۱ باعث کاهش مقاومت کششی ۴۲ روزه به ۳/۲۱ و ۲/۹۳ مگاپاسکال شدند، که نشان‌دهنده اهمیت انتخاب درصد بهینه برای دستیابی به مقاومت کششی ۴۲ روزه بیشینه است. اثر زمان عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۴۲ روزه بر مقاومت کششی نمونه‌های استوان‌های دارای الیاف PET و بازالت به ترتیب در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۲۳. اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت کششی نمونه‌های استوان‌های دارای الیاف PET

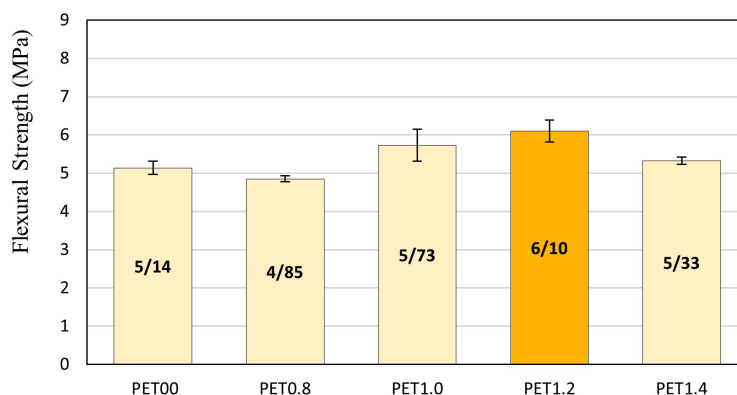


شکل ۲۴. اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت کششی نمونه‌های استوان‌های دارای الیاف بازالت

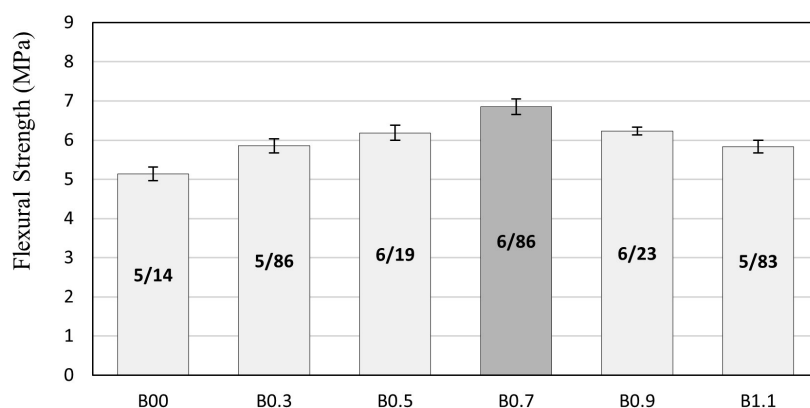
آن گونه که در شکل ۲۳ نشان داده شده است، در نمونه‌های دارای الیاف PET، مقاومت کششی نمونه‌های PET00 از ۱/۹۰ مگاپاسکال در ۷ روز به ۲/۵۹ مگاپاسکال در ۲۸ روز و ۲/۹۸ مگاپاسکال در ۴۲ روز افزایش یافت. نمونه‌های PET0,8 کاهش مقاومت کششی جزئی نشان داد و مقاومت‌های کششی ۷، ۲۸ و ۴۲ روزه به ترتیب به ۱/۷۵، ۲/۳۸ و ۲/۶۷ مگاپاسکال رسید که کاهش ۷/۹٪، ۸/۱٪ و ۱۶/۶٪ نسبت به نمونه بدون الیاف را نشان می‌دهد. افزایش درصد PET به ۱/۰ و ۱/۲ درصد باعث افزایش مقاومت کششی در تمام روزهای عمل‌آوری شد و بیشترین مقاومت کششی در PET1,2 ثبت شد (۲/۲۱، ۲/۸۶ و ۳/۲۰ مگاپاسکال) که این مقادیر نسبت به نمونه بدون الیاف افزایش ۱۶/۳٪، ۱۰/۴٪ و ۲۵/۰٪ را نشان می‌دهد. نمونه‌های PET1,4 نیز کاهش مقاومت کششی را در همه مرحله‌های عمل‌آوری نشان داد که علت آن تمرکز تنش‌ها و اختلال در یکنواختی ماتریس است. نتیجه‌های ارایه‌شده در شکل ۲۴ نشان می‌دهد که نمونه‌های B0,3 مقاومت کششی ۱/۹۲، ۲/۸۶ و ۳/۲۵ مگاپاسکال را در سه زمان عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۴۲ ثبت کرده‌اند که افزایش ۱/۱٪، ۱۰/۴٪ و ۱/۶٪ نسبت به نمونه بدون الیاف را نشان می‌دهد. افزایش درصد بازالت به ۰/۵ و ۰/۷ درصد، مقاومت‌های کششی را به ترتیب ۲/۲۲، ۳/۰۸، ۳/۳۳ و ۲/۶۳، ۳/۳۲، ۳/۶۱ مگاپاسکال افزایش داد که نسبت به نمونه بدون الیاف افزایش ۱۶/۸٪، ۱۹/۰٪ و ۲۱/۹٪ برای B0,7 را نشان می‌دهد. درصدهای بالاتر ۰/۹ و ۱/۱ به ترتیب کاهش مقاومت کششی را به ۲/۲۵، ۲/۹۹ و ۳/۲۱ مگاپاسکال و ۲/۰۳، ۲/۷۷ و ۲/۹۳ مگاپاسکال نشان دادند. این نتایج حاکی از اهمیت درصد بهینه ۰/۷ درصد برای بازالت در دستیابی به مقاومت کششی بیشینه است.

۳-۳- آزمون‌های تعیین مقاومت خمشی

در این بخش، مشابه آزمون‌های تعیین مقاومت فشاری و کششی، برای بررسی حدود بهینه درصد الیاف PET و بازالت بر مقاومت خمشی، آزمون خمشی سه‌تقطه‌ای ۷، ۲۸ و ۴۲ روزه بر روی نمونه‌های منشوری ۱۵×۱۵×۵۰ سانتی‌متر با درصدهای متفاوت الیاف PET در پنج سطح مختلف بدون الیاف (PET00)، ۰/۸ درصد (PET0,8)، ۱/۰ درصد (PET1,0)، ۱/۲ درصد (PET1,2) و ۱/۴ درصد (PET1,4) و درصدهای مختلف بازالت در شش سطح بدون الیاف (B00)، ۰/۳ درصد (B0,3)، ۰/۵ درصد (B0,5)، ۰/۷ درصد (B0,7)، ۰/۹ درصد (B0,9) و ۱/۱ درصد (B1,1) نسبت به حجم بتن انجام شد. نتیجه‌های آزمون مقاومت خمشی نمونه‌های دارای درصدهای مختلف الیاف PET و بازالت، پس از گذشت ۷ روز از عمل‌آوری نمونه‌ها به ترتیب در شکل ۲۵ و ۲۶ آمده است.



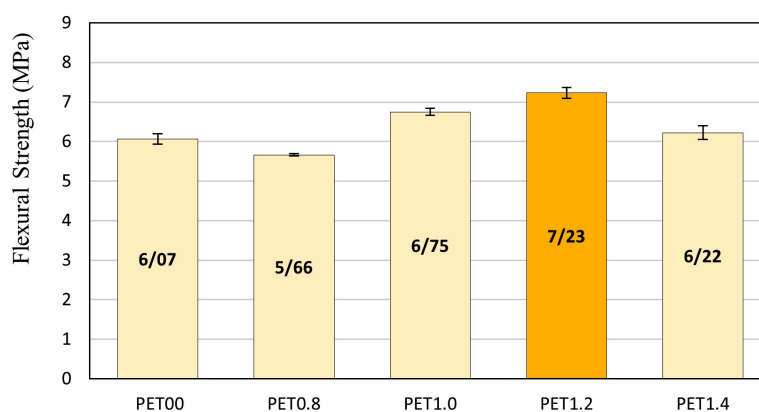
شکل ۲۵. مقاومت خمشی ۷ روزه نمونه‌های منشوری دارای الیاف PET



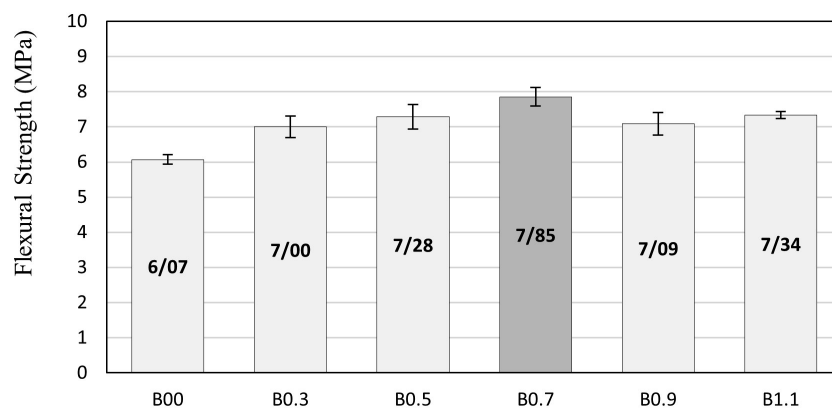
شکل ۲۶. مقاومت خمشی ۷ روزه نمونه‌های منشوری دارای الیاف بازالت

مطابق با آنچه در شکل ۲۵ آمده است، نتیجه‌ها نشان می‌دهد که در نمونه‌های دارای الیاف PET، مقاومت خمشی ۷ روزه در نمونه‌های PET0.8 نسبت به نمونه‌های بدون الیاف (۵/۱۴ مگاپاسکال) کمی کاهش یافت و به ۴/۸۵ مگاپاسکال رسید، در حالی که نمونه‌های PET1.0 با ۵/۷۳ مگاپاسکال و نمونه‌های PET1.2 با ۶/۱۰ مگاپاسکال افزایش محسوسی در مقدار مقاومت خمشی ۷ روزه نشان دادند. از طرف دیگر، نمونه‌های PET1.4 کاهش مقاومت خمشی ۷ روزه را به ۵/۳۳ مگاپاسکال نشان داد. مطابق با شکل ۲۶، در نمونه‌های دارای الیاف بازالت، مقاومت خمشی ۷ روزه در نمونه‌های B0.3 برابر با ۵/۸۶ مگاپاسکال بود که در نمونه‌های B0.5 به ۶/۱۹ مگاپاسکال افزایش یافت و بیشترین مقاومت خمشی ۷ روزه در نمونه‌های B0.7 با ۶/۸۶ مگاپاسکال ثبت شد. درصدی بالاتر الیاف بازالت مانند B0.9 و B1.1 کاهش مقاومت خمشی ۷ روزه به ترتیب به ۶/۲۳ و ۵/۸۳ مگاپاسکال را نشان دادند. این نتایج نشان‌دهنده اثر مثبت الیاف بر مقاومت خمشی زودرس و کنترل ترک‌های اولیه در بتن است و بازالت نسبت به PET اثر بیشتری در بهبود مقاومت خمشی ۷ روزه دارد.

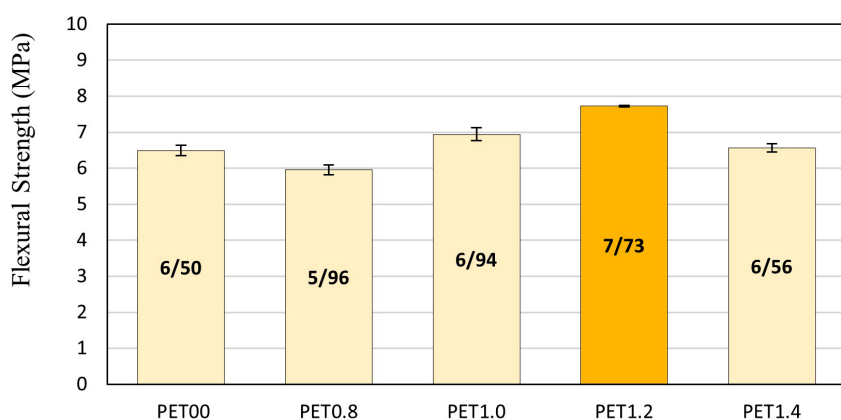
نتیجه‌های آزمون تعیین مقاومت خمشی نمونه‌های دارای درصدی مختلف الیاف PET و بازالت پس از ۲۸ و ۴۲ روز از زمان عمل‌آوری به‌تریب در شکل‌های ۲۷ و ۲۸ و شکل‌های ۲۹ و ۳۰ گزارش شده است.



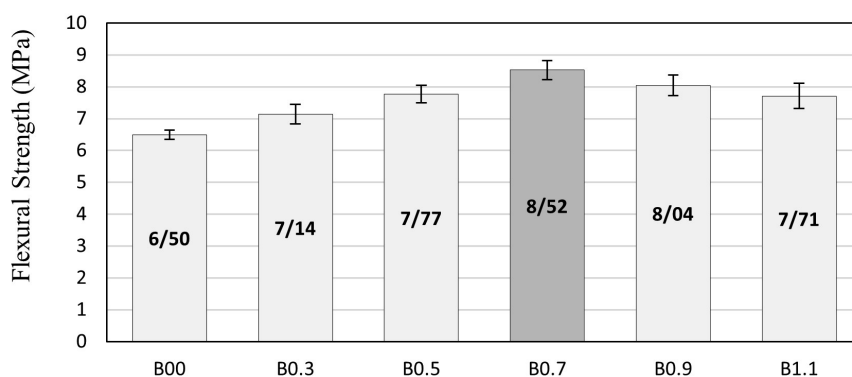
شکل ۲۷. مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های منشوری دارای الیاف PET



شکل ۲۸. مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های منشوری دارای الیاف بازالت



شکل ۲۹. مقاومت خمشی ۴۲ روزه نمونه‌های منشوری دارای الیاف TEP



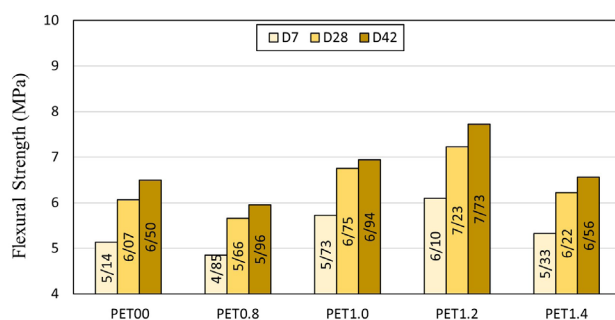
شکل ۳۰. مقاومت خمشی ۴۲ روزه نمونه‌های منشوری دارای الیاف بازالت

آن‌گه که در شکل ۲۷ نشان داده شده است، مقاومت خمشی نمونه‌های دارای الیاف PET پس از ۲۸ روز نیز روند افزایشی مشابه داشت. نمونه‌های بدون الیاف PET00 مقاومت خمشی ۲۸ روزه برابر با ۶/۰۷ مگاپاسکال را ثبت کرد و با افزودن ۰/۸ درصد الیاف PET کاهش جزئی مقاومت خمشی ۲۸ روزه به ۵/۶۶ مگاپاسکال مشاهده شد. نمونه‌های PET1.0 و PET1.2 با مقاومت‌های

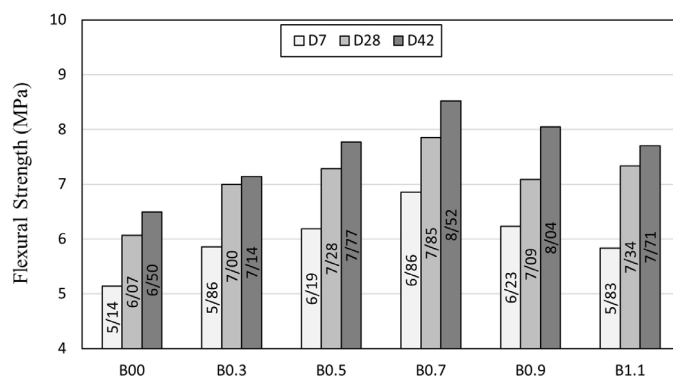
خمشي ۲۸ روزه ۶/۷۵ و ۷/۲۳ مگاپاسکال افزایش چشمگیر نشان دادند، در حالی که PET1,4 کاهش مقاومت خمشي ۲۸ روزه به ۶/۲۲ مگاپاسکال داشت. مطابق با شکل ۲۸، در نمونه‌های دارای الیاف بازالت، نمونه‌های B0.3 مقاومت خمشي ۲۸ روزه برابر ۷/۰۰ مگاپاسکال را نشان داد و با افزایش درصد الیاف بازالت به ۰/۵ و ۰/۷ درصد، مقاومت خمشي به ترتیب به ۷/۲۸ و ۷/۸۵ مگاپاسکال رسید. درصدهای بالاتر از ۰/۷ در نمونه‌های B0,9 و B1.1، کاهش مقاومت خمشي ۲۸ روزه به ۷/۰۹ و ۷/۳۴ مگاپاسکال را نشان دادند. این نتایج نشان می‌دهند که بازالت اثر تقویتی بیشتری نسبت به PET در مقاومت خمشي ۷ روزه و ۲۸ روزه دارد و درصد بهینه آن برای دستیابی به بیشترین مقاومت خمشي ۷ و ۲۸ روزه حدود ۰/۷ درصد است.

بررسی نتیجه‌های شکل ۲۹ نشان می‌دهد که مقاومت خمشي نمونه‌های دارای الیاف PET پس از ۴۲ روز در نمونه‌های PET0.8 به ۵/۹۶ مگاپاسکال رسیده است و این مقدار در نمونه‌های PET1,0 برابر با ۶/۹۴ مگاپاسکال و در نمونه‌های PET1,2 برابر با ۳/۷۳ مگاپاسکال شده است که افزایش قابل توجهی نسبت به نمونه‌های بدون الیاف (با مقاومت خمشي ۴۲ روزه برابر ۶/۵۰) داشتند، در حالی که در نمونه‌های PET1.4 کاهش مقاومت خمشي ۴۲ روزه به ۶/۵۶ مگاپاسکال مشاهده شد. مطابق با شکل ۳۰، در نمونه‌های دارای الیاف بازالت، مقدار مقاومت خمشي ۴۲ روزه در نمونه‌های B0.3 به ۷/۱۴ مگاپاسکال رسیده است. با افزایش درصد الیاف بازالت به ۰/۵ و ۰/۷ درصد، مقاومت خمشي ۴۲ روزه به ترتیب به ۷/۷۷ و ۸/۵۲ مگاپاسکال رسید. نمونه‌های با درصدهای بالاتر بازالت، نمونه‌های B0.9 و B1.1، کاهش مقاومت خمشي به ترتیب به ۸/۰۴ و ۷/۷۱ مگاپاسکال را نشان دادند. این نتایج حاکی از اثر تقویتی واضح الیاف بازالت نسبت به PET در مقاومت خمشي بلندمدت هستند و درصد بهینه بازالت برای دستیابی به بیشترین مقاومت خمشي حدود ۰/۷ درصد است.

در ادامه، اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت خمشي نمونه‌های منشوری مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل‌های ۳۱ و ۳۲ نشان داده شده است، تغییرات مقاومت خمشي نمونه‌ها در سنین مختلف عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۴۲ روزه، به ترتیب برای نمونه‌های حاوی الیاف PET و الیاف بازالت ارائه شده است.



شکل ۳۱. اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت خمشي نمونه‌های منشوری دارای الیاف PET



شکل ۳۲. اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت خمشي نمونه‌های منشوری دارای الیاف بازالت

بررسی نتیجه‌های اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت خمشی نمونه‌های دارای الیاف PET در شکل ۳۱ نشان می‌دهد که مقاومت خمشی نمونه‌های بدون الیاف PET00 از ۵/۱۴ مگاپاسکال در ۷ روز به ۶/۰۷ در ۲۸ روز و ۶/۵۰ در ۴۲ روز افزایش یافته است. نمونه‌های PET0.8 کاهش مقاومت خمشی را در تمام مراحل عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۴۲ روزه نشان داد و مقادیر آن به ترتیب به ۴/۸۵، ۵/۶۶ و ۵/۹۶ مگاپاسکال رسید که کاهش ۵/۷٪، ۶/۸٪ و ۲۰/۵٪ نسبت به نمونه بدون الیاف را نشان می‌دهد. افزایش درصد PET به ۱/۰ و ۱/۲ باعث افزایش مقاومت خمشی شد و نمونه‌های PET1.2 بیشترین مقاومت خمشی را در همه زمان‌های عمل‌آوری داشتند (۶/۱۰، ۷/۲۳ و ۷/۷۳ مگاپاسکال) که نسبت به نمونه بدون الیاف افزایش ۱۸/۶٪، ۱۹/۱٪ و ۱۵/۹٪ را نشان می‌دهد. از طرف دیگر، نمونه‌های PET1.4 کاهش مقاومت خمشی را نشان داد و روند مشابهی با کاهش مقاومت فشاری و کششی داشتند. نتیجه‌های ارایه‌شده در شکل ۳۲ نشان می‌دهد که نمونه‌های دارای الیاف بازالت مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونه‌های دارای الیاف PET داشتند. نمونه‌های B0.3 مقاومت خمشی ۵/۸۶، ۷/۰۰ و ۷/۱۴ مگاپاسکال را به ترتیب در سه زمان عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۴۲ روزه ثبت کردند که افزایش ۱۴/۰٪، ۱۵/۴٪ و ۴/۸٪ نسبت به نمونه بدون الیاف را نشان می‌دهد. افزایش درصد بازالت به ۰/۵ و ۰/۷ درصد مقاومت‌های خمشی را به ۶/۱۹، ۷/۲۸، ۷/۷۷ و ۸/۵۲ مگاپاسکال رساند و نسبت به نمونه بدون الیاف افزایش ۳۳/۳٪، ۲۹/۳٪ و ۳۴/۶٪ را نشان داد. درصدهای بالاتر ۰/۹ و ۱/۱ الیاف بازالت کاهش مقاومت خمشی را نشان دادند. این نتایج نشان می‌دهد که بازالت اثر تقویتی بیشتری نسبت به PET در مقاومت خمشی بلندمدت دارد و درصد بهینه آن برای بیشترین مقاومت خمشی حدود ۰/۷ درصد است.

بررسی روند تکاملی مقاومت‌ها در طول زمان نشان داد که هر دو نوع الیاف PET و بازالت، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن را در کوتاه‌مدت و بلندمدت افزایش می‌دهند، اما اثر الیاف بازالت قوی‌تر و پایدارتر است. درصد بهینه الیاف PET برای دستیابی به بیشترین مقاومت‌ها ۱/۲ درصد و درصد بهینه الیاف بازالت ۰/۷ درصد تعیین شد. درصدهای بالاتر از بهینه باعث کاهش مقاومت‌ها در همه مراحل عمل‌آوری می‌شوند، که ناشی از تراکم بیش از حد الیاف، اختلال در یکنواختی ماتریس و ایجاد نقاط تمرکز تنش است. مقایسه بین الیاف PET و بازالت نشان داد که الیاف بازالت در تمام مقاومت‌ها عملکرد بهتری دارد، در حالی که الیاف PET بهبود بیشتری در مقاومت خمشی و کششی نسبت به مقاومت فشاری ایجاد می‌کند.

۴-۳- مقایسه نتیجه‌ها با پژوهش‌های پیشین

در این بخش از پژوهش، برای ارزیابی انطباق و اعتبار نتایج حاضر، یافته‌های کمی به‌دست‌آمده در این پژوهش در زمینه افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن‌های دارای الیاف PET و بازالت با نتایج تجربی گزارش‌شده در مطالعات پیشین مقایسه می‌شوند. در پژوهش حاضر، در درصد بهینه ۰/۷٪ الیاف بازالت، افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌های شاهد به ترتیب ۲۰٪، ۲۸٪ و ۳۰٪ به‌دست آمد و برای الیاف PET در درصد ۱/۲٪، این افزایش‌ها به ترتیب ۸٪، ۲۲٪ و ۱۹٪ ثبت شد. در مطالعه چن^۲ [۳۰] بتن دارای الیاف بازالت به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که با افزودن مقدار مناسب الیاف، مقاومت فشاری نبت به نمونه‌های بدون الیاف تا حدود ۹٪ و مقاومت کششی تا حدود ۱۹٪ افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود عملکرد مکانیکی با الیاف بازالت است. در پژوهش وو^۳ و همکاران [۱۶]، افزایش مقاومت فشاری بتن تا حدود ۴/۵٪ در محتوای ۰/۲۵٪ الیاف بازالت گزارش شد که هرچند کمتر از نمونه‌های با درصد بالاتر است، اما نشان‌دهنده اثر مثبت الیاف بر پاسخ مکانیکی می‌باشد.

² Chen

³ Wu

در مورد الیاف PET، مطالعه ارائه شده توسط شمس‌الدین^۴ و همکاران [۳۱] نشان داد که در بتن‌های تقویت شده با الیاف PET، بهینه درصد ۰/۵٪ موجب بیشینه مقاومت فشاری شده است. اگرچه، اثر بر مقاومت خمشی در درصدهای بالاتر الیاف PET نیز قابل توجه بوده است. این نتایج با روند مشاهده شده در نمونه‌های PET1.2 پژوهش حاضر که افزایش مقاومت فشاری حدود ۸٪، کششی حدود ۲۲٪ و خمشی حدود ۱۹٪ را نشان می‌دهد سازگار است. علاوه بر این، مطالعات روی بتن‌های حاوی PET در بسیاری از موارد نشان داده‌اند که با افزایش مقدار الیاف تا حد بهینه مقاومت خمشی و کششی بهبود می‌یابد، اما درصدهای بسیار بالا موجب کاهش کارایی و افت مقاومت می‌شوند [۳۲-۳۴].

رفتار غیرخطی نتیجه شده در مقدارهای مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی پژوهش حاضر نیز با یافته‌های زو و همکاران [۳۵] همخوانی دارد. آن‌ها در پژوهش خود بهبود مقاومت کششی و خمشی را با افزایش درصد الیاف بازالت مشاهده کردند. اگرچه اثر افزایش در مقاومت فشاری کمتر بود و بیشینه اثر افزایش مقاومت در پژوهش آن‌ها در مقادیر ۰/۳ تا ۰/۴٪ الیاف بازالت گزارش شده است. مقادیر افزایش گزارش شده در این پژوهش با دامنه افزایشی موجود در نمونه‌های پژوهش یافته‌های زو و همکاران [۳۵] مطابقت نسبی دارد. در مجموع، اگرچه دامنه‌های دقیق درصد الیاف و مقادیر افزایش مقاومت در هر مطالعه ممکن است متفاوت باشد، روند کلی و جهت اثرات مشاهده شده در پژوهش حاضر با نتایج معتبر پیشین همسو است، به‌گونه‌ای که افزایش مقاومت‌های کششی و خمشی با مقدار بهینه الیاف بازالت و PET مطابق گزارش‌های تجربی قبلی دیده شده است و رفتار غیرخطی ناشی از افزایش درصد الیاف و افت پس از مقدار بهینه نیز در مطالعات پیشین به‌صورت عددی مشاهده شده است. این تطبیق کمی با نتایج معتبر پیشین نشان می‌دهد که یافته‌های این پژوهش در چارچوب علمی مشابه با مطالعات گذشته قرار دارد و درصدهای بهینه تعیین شده نیز از نظر مکانیکی معنادار هستند.

۵-۳- مدل رفتاری بتن دارای الیاف PET و بازالت

در این بخش از پژوهش، به‌منظور تبدیل نتیجه‌های آزمایشگاهی به یک چارچوب تحلیلی، یک مدل رفتاری برای پیش‌بینی مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن دارای الیاف PET و بازالت به‌عنوان تابعی از درصد حجمی الیاف و سن عمل‌آوری بتن بر اساس داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده ارائه می‌شود. با توجه به این که مقاومت ۲۸ روزه مبنای طراحی سازه‌های است، ابتدا مدل رفتاری مقاومت فشاری وابسته به درصد حجمی الیاف (V_f) در این سن توسعه می‌یابد. بررسی داده‌های آزمایشگاهی در این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات مقاومت فشاری نسبت به درصد الیاف (که با نماد $f_c(V_f)$ نشان داده می‌شود) رفتار سهمی‌وار دارد. از این رو، مدل درجه دوم مطابق با رابطه‌ی زیر انتخاب شد:

$$f_c(V_f) = f_{c0}(\beta V_f^2 - \alpha V_f - 1) \quad (4)$$

در رابطه‌ی (۴)، f_{c0} بیان‌گر مقاومت فشاری بتن شاهد و V_f درصد حجمی الیاف است و ضرایب α و β بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی و به کمک روش رگرسیون محاسبه می‌شوند. بر این اساس، رابطه‌های (۵) و (۶) به‌ترتیب تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به درصد الیاف PET و بازالت (به‌ترتیب با نمادهای $f_c^{PET}(V_f)$ و $f_c^B(V_f)$) را در این پژوهش گزارش می‌کنند:

$$f_c^{PET}(V_f) = 39.30(0.647V_f^2 - 0.568V_f - 1) \quad (5)$$

$$f_c^B(V_f) = 39.30(0.982V_f^2 - 0.643V_f - 1) \quad (6)$$

ضریب تعیین (R^2) برای مدل‌های رفتاری ارائه شده در رابطه‌های (۵) و (۶) به‌ترتیب برابر ۰/۹۳۸ و ۰/۹۶۴ محاسبه شده است. در

⁶ coefficient of determination

این پژوهش برای لحاظ کردن اثر زمان عمل‌آوری بتن، مدل رشد نمایی زیر استفاده شد:

$$f_c(t, V_f) = f_{c28}(V_f)(1 - e^{-kt}) \quad (7)$$

در مدل رفتاری ارائه شده در رابطه‌ی (۷)، t بیان‌گر زمان عمل‌آوری بر حسب روز و ضریب k نرخ رشد مقاومت فشاری است. بر اساس داده‌های آزمایشگاهی در این پژوهش، ضریب‌های k برای نمونه‌های شاهد، نمونه‌های دارای الیاف PET و بازالت به ترتیب برابر ۰/۰۶۵، ۰/۰۶۱ و ۰/۰۷۲ محاسبه شدند. از این رو، مدل رفتاری یکپارچه نهایی مقاومت فشاری در این پژوهش به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$f_c(t, V_f) = f_{c0}(\beta V_f^2 - \alpha V_f + 1)(1 - e^{-kt}) \quad (8)$$

به منظور ارائه مدل رفتاری وابستگی مقاومت کششی (f_t) و مقاومت خمشی (f_r) به مقاومت فشاری (f_c)، رابطه‌های زیر به صورت تابع توانی پیشنهاد می‌شود:

$$f_t = A(f_c)^n \quad (9)$$

$$f_r = C(f_c)^m \quad (10)$$

در رابطه‌های (۹) و (۱۰)، ضریب‌های A و C و همچنین توان‌های n و m بر اساس داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش و به کمک روش رگرسیون محاسبه شدند. نتیجه‌های به دست آمده برای نمونه‌های دارای الیاف PET و بازالت در رابطه‌های زیر گزارش شده است:

$$f_t^{PET} = 0.29(f_c)^{0.56} \quad (11)$$

$$f_t^B = 0.34(f_c)^{0.61} \quad (12)$$

$$f_r^{PET} = 0.82(f_c)^{0.63} \quad (13)$$

$$f_r^B = 0.95(f_c)^{0.67} \quad (14)$$

مقدار ضریب تعیین (R^2) برای مدل‌های رفتاری ارائه شده در رابطه‌های (۱۱) تا (۱۴) به ترتیب برابر ۰/۹۵۷، ۰/۹۷۲، ۰/۹۴۱ و ۰/۹۶۳ محاسبه شده است.

باید اشاره کرد که مدل‌های ارائه شده محدود به محدوده درصد‌های حجمی الیاف مورد مطالعه (۰/۸ تا ۱/۴ درصد برای الیاف PET و ۰/۳ تا ۱/۱ درصد برای الیاف بازالت) هستند. استفاده از مدل برای مقادیر کمتر یا بیشتر از این محدوده ممکن است نتایج غیر دقیق دهد و نیازمند اعتبارسنجی مجدد است. همچنین، مدل‌ها برای بتن‌های با مشخصات سیمان، سنگدانه، نسبت آب به سیمان و افزودنی مشابه نسبت‌های مخلوط حاضر هستند و تغییر هر یک از این پارامترها ممکن است دقت پیش‌بینی را کاهش دهد. مدل‌های رشد مقاومت نیز برای عمل‌آوری در آب معمولی و سنین ۷ تا ۴۲ روزه توسعه یافته‌اند و دقت آن‌ها در شرایط محیطی متفاوت (مانند عمل‌آوری با بخار، دماهای بالا یا آب آهک) ممکن است کاهش یابد. در پایان، رابطه‌های رگرسیونی مقاومت‌های کششی و خمشی نسبت به مقاومت فشاری فقط در محدوده درصد‌های الیاف و سنین عمل‌آوری بررسی شده قابل استفاده هستند و پیش‌بینی خارج از این بازه توصیه نمی‌شود. این محدودیت‌ها باید هنگام استفاده از مدل برای طراحی یا تحلیل سازه‌ها لحاظ شوند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر افزودن الیاف PET و الیاف بازالت بر رفتار مکانیکی و کارایی بتن مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه‌ها شامل

مکعب‌های استاندارد با ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر برای آزمون مقاومت فشاری، استوانه‌های 30×15 سانتی‌متر برای آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم و نمونه‌های منشوری $50 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر برای آزمون مقاومت خمشی بودند. الیاف PET در پنج سطح مختلف بدون الیاف (PET00)، ۰/۸ درصد (PET0.8)، ۱/۰ درصد (PET1.0)، ۱/۲ درصد (PET1.2) و ۱/۴ درصد (PET1.4) و درصد‌های مختلف بازالت در شش سطح بدون الیاف (B00)، ۰/۳ درصد (B0.3)، ۰/۵ درصد (B0.5)، ۰/۷ درصد (B0.7)، ۰/۹ درصد (B0.9) و ۱/۱ درصد (B1.1) نسبت به حجم بتن به کار گرفته شدند و اثر زمان عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۴۲ روزه بر مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها نیز ارزیابی شد. خلاص‌های از نتیجه‌های به‌دست آمده در این پژوهش در ادامه ارائه شده است:

نتایج نشان داد که افزودن الیاف، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی را تا درصد بهینه افزایش می‌دهد و پس از آن، افزایش بیشتر الیاف با کاهش جزئی مقاومت‌ها همراه است. این رفتار غیرخطی ناشی از کاهش تراکم و ایجاد ناپیوستگی در ماتریس بتن است. برای الیاف PET، بیشینه مقاومت‌ها با انتخاب ۱/۲ درصد الیاف PET نسبت به حجم بتن حاصل شد. در سن ۷ روزه، نمونه‌های دارای ۱/۲ درصد (PET1.2) PET مقاومت فشاری ۲۸/۷۰، مقاومت کششی ۲/۲۱ و مقاومت خمشی ۶/۱۰ مگاپاسکال داشتند که نسبت به نمونه بدون الیاف (به‌ترتیب برابر ۲۶/۹۴، ۱/۹۰ و ۵/۱۴ مگاپاسکال) به ترتیب افزایش ۶/۵٪، ۱۶/۳٪ و ۱۸/۷٪ را نشان می‌دهد. پس از ۲۸ روزه، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی این نمونه‌ها به ترتیب به ۴۲/۴۸، ۲/۸۶ و ۷/۲۳ مگاپاسکال رسید که نسبت به نمونه بدون الیاف (به‌ترتیب برابر ۳۹/۳۰، ۲/۵۹ و ۶/۰۷ مگاپاسکال) افزایش ۸/۱٪، ۱۰/۴٪ و ۱۹/۱٪ را نشان می‌دهد. در سن ۴۲ روزه، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های PET1.2 به ۵۰/۰۸، ۳/۲۰ و ۷/۷۳ مگاپاسکال رسیدند که افزایش ۶/۰٪، ۱۱/۹٪ و ۷/۱٪ نسبت به مقاومت‌های ۲۸ روزه و افزایش ۸۵/۷٪، ۶۸/۴٪ و ۵۰/۴٪ نسبت به مقاومت‌های ۷ روزه نمونه‌های بدون الیاف را نشان می‌دهد.

برای الیاف بازالت، بیشینه مقاومت‌ها در درصد ۰/۷ نسبت به حجم بتن حاصل شد. در سن ۷ روزه، مقاومت فشاری، کششی و خمشی این نمونه (B0.7) به ترتیب ۳۲/۲۸، ۲/۶۳ و ۶/۸۶ مگاپاسکال بود که نسبت به نمونه‌های بدون الیاف به‌ترتیب افزایش ۱۹/۷٪، ۳۸/۴٪ و ۳۳/۴٪ را نشان می‌دهد. پس از ۲۸ روزه، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی در نمونه‌های B0.7 به‌ترتیب به ۴۷/۶۴، ۳/۳۲ و ۷/۸۵ مگاپاسکال رسید که به‌ترتیب افزایش ۲۱/۰٪، ۱۶/۱٪ و ۹/۷٪ نسبت به نمونه‌های بدون الیاف را نشان می‌دهد. نمونه‌های B0.7 در سن ۴۲ روزه، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی به‌ترتیب برابر با ۵۳/۲۶، ۳/۶۱ و ۸/۵۲ مگاپاسکال را ثبت کردند که به‌ترتیب افزایش ۱۱/۹٪، ۸/۷٪ و ۸/۵٪ نسبت به مقاومت‌های ۲۸ روزه و ۹۷/۸٪، ۹۰/۳٪ و ۶۶/۱٪ نسبت به مقاومت‌های ۷ روزه در نمونه‌های بدون الیاف را نشان می‌دهد.

بررسی نتیجه‌ها نشان می‌دهد که در حالت کلی، الیاف بازالت اثر بیشتری بر مقاومت فشاری و خمشی دارد، در حالی که الیاف PET به‌صورت ویژه در مقاومت کششی مؤثر است.

روند افزایش مقاومت‌ها با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۴۲ روز در هر دو نوع الیاف پیوسته بود و بیشترین رشد مقاومت در بازه ۲۸ تا ۴۲ روز مشاهده شد. علاوه بر این، افزایش درصد الیاف موجب کاهش اسلامپ و کاهش روانی بتن شد که این اثر در نمونه‌های دارای الیاف بازالت محسوس‌تر بود و ناشی از ایجاد شبکه‌های از الیاف در ماتریس و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک است.

تشکر و قدردانی

نگارندگان از همکاری دانشکده فنی فردوس – دانشگاه بیرجند در فراهم کردن تجهیزات و امکانات لازم برای آزمون‌ها قدردانی می‌کنند.

- [1] S.-H. Hong, J.-S. Choi, H.-J. Lee, H.-J. Park, Y.-S. Yoon, Optimizing hybrid ratio of steel and polyethylene fibers on the compressive and tensile properties of ultra-high-strength lightweight concrete, *Construction and Building Materials* 494 (2025) 143515. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143515>.
- [2] T. El-Maaddawy, A. El Refai, Innovative Repair of Severely Corroded T-Beams Using Fabric-Reinforced Cementitious Matrix, *Journal of Composites for Construction* 20 (2016). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000641](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000641).
- [3] A. Soleymani, H. Jahangir, Experimental Evaluation of Polypropylene Fiber Content and Lightweight Aggregate Replacement on Concrete Compressive and Tensile Strengths, *Journal of Concrete Structures and Materials* 9 (2024) 188–214. <https://doi.org/10.30478/jcsm.2025.543537.1404>.
- [4] 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>.
- [5] K.R. Akça, Ö. Çakır, M. İpek, Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates, *Construction and Building Materials* 98 (2015) 620–630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.133>.
- [6] C. Zhao, Z. Wang, Z. Zhu, Q. Guo, X. Wu, R. Zhao, Research on different types of fiber reinforced concrete in recent years: An overview, *Construction and Building Materials* 365 (2023) 130075. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130075>.
- [7] L. Chen, Z. Chen, Z. Xie, L. Wei, J. Hua, L. Huang, P.-S. Yap, Recent developments on natural fiber concrete: A review of properties, sustainability, applications, barriers, and opportunities, *Developments in the Built Environment* 16 (2023) 100255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100255>.
- [8] M. Anas, M. Khan, H. Bilal, S. Jadoon, M.N. Khan, Fiber Reinforced Concrete: A Review, *Engineering Proceedings* 22 (2022) 3. <https://doi.org/10.3390/engproc2022022003>.
- [9] G. Wang, Y. Zhuang, L. Song, Z. He, J. Zhang, H. Zhou, Mechanical properties and failure mechanism of fiber-reinforced concrete materials: Effects of fiber type and content, *Construction and Building Materials* 465 (2025) 140190. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140190>.
- [10] Z.F. Akbulut, T.A. Tawfik, P. Smarzewski, S. Guler, Advancing Hybrid Fiber-Reinforced Concrete: Performance, Crack Resistance Mechanism, and Future Innovations, *Buildings* 15 (2025) 1247. <https://doi.org/10.3390/buildings15081247>.
- [11] M. Khan, M. Cao, S.H. Chu, M. Ali, Properties of hybrid steel-basalt fiber reinforced concrete exposed to different surrounding conditions, *Construction and Building Materials* 322 (2022) 126340. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126340>.
- [12] M. Khan, M. Cao, C. Xie, M. Ali, Effectiveness of hybrid steel-basalt fiber reinforced concrete under compression, *Case Studies in Construction Materials* 16 (2022) e00941. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00941>.
- [13] B.N. AL-Kharabsheh, M.M. Arbili, A. Majdi, S.M. Alogla, A. Hakamy, J. Ahmad, A.F. Deifalla, Basalt Fibers Reinforced Concrete: Strength and Failure Modes, *Materials* 15 (2022) 7350.

<https://doi.org/10.3390/ma15207350>.

[14] B.N. Al-Kharabsheh, M.M. Arbili, A. Majdi, S.M. Alogla, A. Hakamy, J. Ahmad, A.F. Deifalla, *Basalt Fiber Reinforced Concrete: A Compressive Review on Durability Aspects*, *Materials* 16 (2023) 429. <https://doi.org/10.3390/ma16010429>.

[15] E.T. Al-Rousan, H.R. Khalid, M.K. Rahman, *Fresh, mechanical, and durability properties of basalt fiber-reinforced concrete (BFRC): A review*, *Developments in the Built Environment* 14 (2023) 100155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100155>.

[16] H. Wu, X. Qin, X. Huang, S. Kaewunruen, *Engineering, Mechanical and Dynamic Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete*, *Materials* 16 (2023) 623. <https://doi.org/10.3390/ma16020623>.

[17] Z. Peng, X. Wang, X. Liu, L. Ding, B. Tang, Z. Wu, *Carbon emission assessment of basalt fiber and basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) reinforced/strengthened concrete structures*, *Structures* 85 (2026) 111128. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iistruc.2026.111128>.

[18] X. Zhang, X. Wang, L. Ding, Y.G. Haile, X. Chang, Y. Zhang, Z. Wu, *Flexural performance of small-scale concrete thin plate with hybrid basalt fiber reinforcement: Macro fibers and textiles*, *Structures* 84 (2026) 111068. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iistruc.2026.111068>.

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

[20] *astmc127/c127, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*, (2001).

[21] *ASTMC128/C128, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*, (2001).

[22] *ASTMC136/C136, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, (2001).

[23] *ASTM C150/C150M, Standard specification for Portland cement*, (2012).

[24] *ASTM C494/C494M-17, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, (2017).

[25] *ASTMC143/C143M, Standard test method for slump of hydraulic cement concrete*, (2015).

[26] *ASTMC39/C39M, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, (2020).

[27] *ASTMC496/C496M-17, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*, (2017).

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

[29] *ASTMC293-07, Standard test method for flexural strength of concrete using a simple beam with centre-point loading*, (2007).

[30] F. Chen, *An Experimental Study on Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete*, *Applied Mechanics and Materials* 405–408 (2013) 2767–2770. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.405-408.2767>.

[31] M.M.H. Shamsudin, N.H. Hamid, M.A.M. Fauzi, *Compressive and Flexural Strength of Concrete Containing Recycled Polyethylene Terephthalate (PET)*, *Key Engineering Materials* 879 (2021) 13–21. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.879.13>.

- [32] L.A. Pereira de Oliveira, J.P. Castro-Gomes, *Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar*, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 1712–1717. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.044>.
- [33] D. Foti, *Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers*, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 1906–1915. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.066>.
- [34] A. Pimanmas, S. Saleem, *Evaluation of Existing Stress–Strain Models and Modeling of PET FRP–Confined Concrete*, *Journal of Materials in Civil Engineering* 31 (2019) 04019303. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002941](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002941).
- [35] H. Zhou, B. Jia, H. Huang, Y. Mou, *Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete*, *Materials* 13 (2020) 1362. <https://doi.org/10.3390/ma13061362>.