

Experimental evaluation and cubic regression modeling of mechanical properties of glass fiber-reinforced polymer concrete

Masoud MahmoudAbadi^{1*}, MohammadJavad Hosseiny²

1- Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

2- MSc Student, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

ABSTRACT

In this research, the effect of using chopped glass fibers on the mechanical properties of polymer concretes based on isophthalic and orthophthalic unsaturated polyester resins was investigated and compared. The main objective was to evaluate the improvement in compressive, tensile, and flexural strengths resulting from the addition of specific amounts of glass fibers. For this purpose, polymer concrete specimens with different percentages of glass fibers were prepared and subjected to standard mechanical tests. The results indicated that the addition of glass fibers led to a significant improvement in the tensile and flexural strengths of both types of polymer concrete, such that increasing the fiber percentage up to an optimal level enhances the mechanical properties. Furthermore, to analyze the behavior of polymer concretes more accurately and predict various strengths, cubic polynomial interpolation along with the backward elimination method was utilized. The coefficients obtained from these models were statistically examined and evaluated. The analysis revealed that the cubic model, by considering the interaction effects of the variables, exhibits higher accuracy in predicting the mechanical behavior of the concretes. In particular, the final model, with the statistical significance of its coefficients ($P\text{-value} < 0.05$), demonstrated the best agreement with the experimental data. The addition of chopped glass fibers increased the compressive, tensile, and flexural strengths of the polymer concrete by controlling crack propagation and improving stress distribution. However, an excessive increase in the amount or length of the fibers reduced the uniformity of the mixture and, in some cases, made specimen fabrication impossible. Additionally, the specimens containing isophthalic resin exhibited better overall mechanical performance compared to those with orthophthalic resin.

ARTICLE INFO

Receive Date:

Revise Date:

Accept Date:

Keywords:

Polyester polymer concrete
crushed glass fibers
Ortho phthalic polymer
concrete
isophthalic polymer concrete
Polynomial Mathematical
Model

*Corresponding author: Masoud MahmoudAbadi
Email address: m.mahmoudabadi@qom.ac.ir

ارزیابی آزمایشگاهی و مدل سازی رگرسیون درجه سه خواص مکانیکی بتن پلیمری

تقویت شده با الیاف شیشه

مسعود محمودآبادی^{۱*}، سیدمحمد جواد حسینی^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه قم، قم، ایران

چکیده

در این پژوهش، تأثیر استفاده از الیاف شیشه خرد شده بر خواص مکانیکی بتن های پلیمری بر پایه رزین های پلی استر غیراشباع با دو نوع ایزوفتالیک و ارتوفتالیک بررسی و مقایسه شد. هدف اصلی، ارزیابی بهبود مقاومت فشاری، کششی و خمشی در اثر افزودن مقادیر مشخصی از الیاف شیشه بود. برای این منظور، نمونه های بتن پلیمری با درصدهای مختلف الیاف شیشه تهیه و تحت آزمایش های مکانیکی استاندارد قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف شیشه منجر به بهبود قابل توجه مقاومت کششی و خمشی هر دو نوع بتن پلیمری شده است، به طوری که افزایش درصد الیاف تا حد بهینه، خواص مکانیکی را بهبود می بخشد. همچنین برای تحلیل دقیق تر رفتار بتن های پلیمری و پیش بینی مقاومت های مختلف، از درونیایی چندجمله ای درجه سه به همراه روش حذف پس رونده استفاده شد. ضرایب حاصل از این مدل ها از نظر آماری بررسی و ارزیابی گردید. تحلیل نشان داد که مدل درجه سه با در نظر گرفتن اثرات متقابل متغیرها، دقت بالاتری در پیش بینی رفتار مکانیکی بتن ها دارد. به ویژه مدل نهایی با معنی داری آماری ضرایب ($P\text{-value} < 0.05$) بهترین تطابق را با داده های تجربی نشان داد. افزودن الیاف شیشه خرد شده با کنترل رشد ترک ها و بهبود توزیع تنش، موجب افزایش مقاومت های فشاری، کششی و خمشی بتن پلیمری شد. با این حال، افزایش بیش از حد مقدار یا طول الیاف باعث کاهش یکنواختی مخلوط و در برخی موارد عدم امکان ساخت نمونه ها شد. همچنین، نمونه های حاوی رزین ایزوفتالیک در مجموع عملکرد مکانیکی بهتری نسبت به نمونه های دارای رزین ارتوفتالیک نشان دادند.

کلمات کلیدی: بتن پلیمری پلی استری، الیاف خرد شده شیشه، بتن پلیمری ارتوفتالیک، بتن پلیمری ایزوفتالیک، مدل ریاضی چندجمله ای درجه ۳

مسعود محمودآبادی

m.mahmoudabadi@qom.ac.ir

*نویسنده مسئول:

پست الکترونیکی:

در دنیای مدرن مهندسی و ساخت و ساز، استفاده از مصالح جدید و بهبود یافته به عنوان یک اولویت اصلی به منظور بهبود عملکرد و دوام سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. یکی از زمینه‌های تحقیقاتی مهم در این زمینه، بررسی، بهبود و بهینه‌سازی خواص مکانیکی بتن‌های پلیمری است که به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان که در ادامه به آنها اشاره می‌شود، مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. بتن‌های پلیمری عموماً از ترکیبی از رزین پلیمری با مواد معدنی تشکیل شده‌اند که منجر به بهبود قابل توجه خواص مکانیکی و شیمیایی بتن در مقایسه با بتن‌های معمولی می‌شود. بتن پلیمری (PC) یک ماده کامپوزیتی است که به جای سیمان پرتلند، از رزین به عنوان چسب برای سنگدانه‌ها استفاده می‌کند. این مواد در ابتدا به عنوان جایگزینی برای سنگ‌های تزئینی توسعه یافتند و در دهه‌های اخیر، استفاده از آنها برای تعمیر سازه‌های آسیب دیده به دلیل ویژگی‌هایی مانند مقاومت و شکل‌پذیری بالاتر و پخت سریع‌تر، افزایش یافته است. بتن‌های پلیمری به دلیل وزن سبک، مقاومت بالا و سازگاری با شرایط محیطی مختلف، مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند [۱]. بتن پلیمری به دلیل عمل‌آوری سریع‌تر و جدا شدن از قالب، خودتراکم بودن و عدم نیاز به ویبره، عدم محدودیت در ارتفاع بتن‌ریزی، عدم جدا شدن دوغاب بتن از سنگدانه، مقاومت مکانیکی بالاتر، چسبندگی بهتر، مقاومت بیشتر در برابر مواد شیمیایی و نفوذناپذیری بیشتر در برابر آب، مورد توجه است [۲]. انواع مختلفی از رزین‌ها، از جمله اپوکسی، پلی‌استر و اکریلیک، در تولید آن استفاده می‌شود و اخیراً از رزین‌های وینیل استر، فوران و پلی‌یورتان نیز استفاده شده است [۳]. رزین‌های پلی‌استر به دلیل هزینه کمتر و عملکرد خوبشان رایج‌تر هستند، اگرچه مقاومت کمتری نسبت به سایر رزین‌ها دارند [۴]. استفاده از الیاف تقویت‌کننده مانند الیاف شیشه خرد شده و کربن به عنوان روش‌های مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی بتن پلیمری استفاده می‌شود. بتن پلیمری مزایای خاصی مانند استحکام، عایق بودن، مقاومت در برابر خوردگی شیمیایی و مقاومت در برابر سایش دارد. این بتن به دلیل استحکام مکانیکی بالاتر، وزن کمتر، چسبندگی عالی به زیرلایه‌ها و مقاومت در برابر محیط‌های خورنده و انجماد-ذوب، می‌تواند در برخی از کاربردهای سازه‌ای جایگزین بتن معمولی شود [۵]. این نوع بتن به دلیل میرایی بالاتر، می‌تواند در سازه‌هایی که تجهیزات حساس در آنها قرار دارند نیز استفاده شود [۶]. بتن پلیمری به دلیل خواص مطلوب خود، در تولید اعضای پیش‌ساخته، سازه‌های هیدرولیکی، سطوح و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. این بتن به دلیل مقاومت کششی بالاتر نسبت به بتن معمولی، پخت سریع، نفوذپذیری کم و انعطاف‌پذیری در ریخته‌گری، جایگزین جذابی برای بتن سیمان پرتلند محسوب می‌شود [۷]. در سال ۲۰۱۳، جمشیدی و همکارانش تأثیر مواد اسیدی و قلیایی مختلف را بر مقاومت فشاری بتن پلیمری ساخته شده با استفاده از رزین پلی‌استر ایزوفتالیک غیراشباع بررسی کردند و دریافتند که تأثیر مواد شیمیایی قلیایی بر کاهش مقاومت فشاری این نوع بتن مؤثرتر از مواد اسیدی است [۸]. پژوهش دیگری نیز تأثیر کمتر این مواد را بر مقاومت مکانیکی بتن پلیمری در مقایسه با بتن معمولی گزارش کرد [۸]. در سال ۲۰۱۹، یانگ گو و همکارانش بتن پلیمری بر پایه رزین‌های پلی‌استر غیراشباع را بررسی کردند و دریافتند که مقاومت شیمیایی این نوع بتن پلیمری به طور قابل توجهی بالاتر از بتن معمولی است. همچنین استفاده از الیاف پلی‌اتیلن ترفتالات می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر چقرمگی و مقاومت به ضربه این نوع بتن داشته باشد [۷]. هاشمی و همکاران (۲۰۱۸) مکانیک شکست و خواص خمشی بتن پلیمری پلی‌استر غیراشباع را بررسی کردند و دریافتند که مواد اسیدی و بازی تأثیر یکسانی بر کاهش مقاومت خمشی این نوع بتن دارند [۲]. طباطباییان و همکاران (۲۰۱۹) بتن پلیمری بر پایه اپوکسی و پلی‌استر را مورد پژوهش قرار دادند و دریافتند که استفاده از سنگدانه‌های درشت‌تر و استفاده از رزین پلی‌استر به جای اپوکسی، مقاومت کششی و خمشی بتن پلیمری را کاهش می‌دهد [۴]. اوراک (۲۰۰۰) میرایی ارتعاش بتن پلیمری با رزین پلی‌استر را مورد پژوهش قرار داد و دریافت که بتن پلیمری با رزین پلی‌استر و کوارتز از نظر میرایی، ماده مناسبی برای ساخت بسترهای ماشین ابزار است [۶]. نادهی (۲۰۲۲) در پژوهش‌ای بر روی بتن‌های پلیمری مشاهده کرد که بتن‌های پلیمری حاوی رزین وینیل استر، دوام و خواص مکانیکی بهتری نسبت به بتن حاوی رزین پلی‌استر نشان می‌دهند [۳]. اسامه و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر دماهای بالاتر از ۲۵۰ درجه سانتیگراد را بر روی انواع مختلف بتن‌های پلیمری بررسی کردند [۹]. جی جین و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر دمای پخت بر خواص مکانیکی بتن‌های پلیمری حاوی رزین اپوکسی را بررسی کردند [۱۰]. یون (۲۰۲۰) تأثیر سخت‌کننده‌ها و پرکننده‌های مختلف را در بتن پلیمری بررسی کرد [۵]. فردوس و همکاران (۲۰۲۰) خواص بتن پلیمری اپوکسی را بررسی کردند و مشاهده کردند که هرچه پرکننده‌های بیشتری در ماتریس وجود داشته باشد، اثر منفی دما به دلیل ظرفیت جذب حرارت پرکننده‌ها کمتر و در نتیجه افت مقاومت کمتر می‌شود [۱۱]. در سال ۲۰۱۲، اپرا و همکارانش، با پژوهش بتن‌های پلیمری، بتن‌های پلیمری بر پایه رزین پلی‌یورتان را به عنوان گزینه‌ای مناسب برای ساختمان‌های صنعتی که در آن‌ها به حفاظت شیمیایی و حرارتی نیاز است، پیشنهاد کردند [۱۲]. در سال ۲۰۲۰، گو و همکارانش، با پژوهش ملات‌های تعمیر اپوکسی،

دریافتند که ملات حاوی پنج درصد رزین اپوکسی برای تعمیر سازه‌های بتنی مؤثر و بهینه است [۱۳]. در سال ۲۰۱۰، گلستانه و همکارانش با بررسی تأثیر پودر سیلیس بر بتن پلیمری پایه اپوکسی، دریافتند که بتن حاوی ۱۵٪ رزین و سنگدانه سیلیسی بالاترین مقاومت فشاری و بتن حاوی ۲۰٪ رزین بالاترین مقاومت کششی را دارد [۱۴]. کومار در سال ۲۰۱۶ با بررسی بتن پلیمری، تأثیر مثبت الکل پلی فورفوریل را بر مقاومت مکانیکی بتن پلیمری نشان داد [۱۵]. جی جین و همکارانش در سال ۲۰۱۷ با بررسی بتن پلیمری، نشان دادند که خواص مکانیکی این نوع بتن به طور قابل توجهی تحت تأثیر دمای عمل آوری در مقایسه با سن نمونه قرار می‌گیرد [۱۶]. اسامه و همکارانش در سال ۲۰۱۸ مشاهده کردند که افزودن ATH تأثیر قابل توجهی بر مقاومت حرارتی بتن پلیمری دارد [۱۷]. گورننسکی و همکارانش (۲۰۰۷) دریافتند که مقاومت مکانیکی بتن‌های مبتنی بر رزین ایزوفتالیک بالاتر از بتن‌های حاوی رزین ارتوفتالیک است، در حالی که عملکرد شیمیایی بتن‌های پلیمری حاوی پلی‌استر ارتوفتالیک کمی بهتر از رزین ایزوفتالیک است [۱۸]. وان جو و همکاران (۲۰۰۶) بتن‌های پلی‌استر را مورد پژوهش قرار دادند و نشان دادند که استفاده بیش از ۴۰٪ مونومر استایرن باعث جدایش بین سنگدانه و پلیمر می‌شود [۱۹].

بتن پلیمری به دلیل مقاومت استثنایی در برابر مواد شیمیایی، سایش و چرخه‌های یخ‌زدن، کاربرد گسترده‌ای در زیرساخت‌های صنعتی دارد و برای ساخت کف پوش‌های کارخانه‌ها، مدهول‌ها و کانال‌های فاضلاب بسیار مناسب است. در ساختمان‌سازی، از این ماده برای تولید قطعات پیش ساخته مانند پانل‌ها و بلوک‌ها و همچنین تعمیر و بهسازی سریع پل‌ها و روسازی‌های فرسوده استفاده می‌شود. زمان گیرش سریع و چسبندگی عالی آن، این ماده را به گزینه‌ای ایده‌آل برای پروژه‌های نو سازی و ترمیم شهری تبدیل کرده است. همچنین در حمل‌ونقل، به دلیل وزن کم تر و میرایی ارتعاش بالا، در ساخت پایه‌های ماشین‌آلات و روسازی پل‌ها کاربرد دارد. افزون بر این، قابلیت قالب‌گیری و کیفیت سطح بالا، آن را برای المان‌های معماری و دکوراسیون‌ها و روپوش‌های کانترمناسب می‌سازد. با وجود هزینه اولیه بالاتر، دوام طولانی مدت و نیاز اندک به تعمیرات، این ماده را به انتخابی مقرون به صرفه در چرخه عمر پروژه تبدیل کرده است.

نویسندگان این مقاله با جستجوی مقالات متعددی که در بالا به آن اشاره شد، دریافتند تا بحال تأثیر الیاف شیشه بر خواص مکانیکی بتن‌های پلیمری بررسی نشده است، لذا نوآوری این تحقیق، همین موضوع می‌باشد.

۲- مواد و روش ها

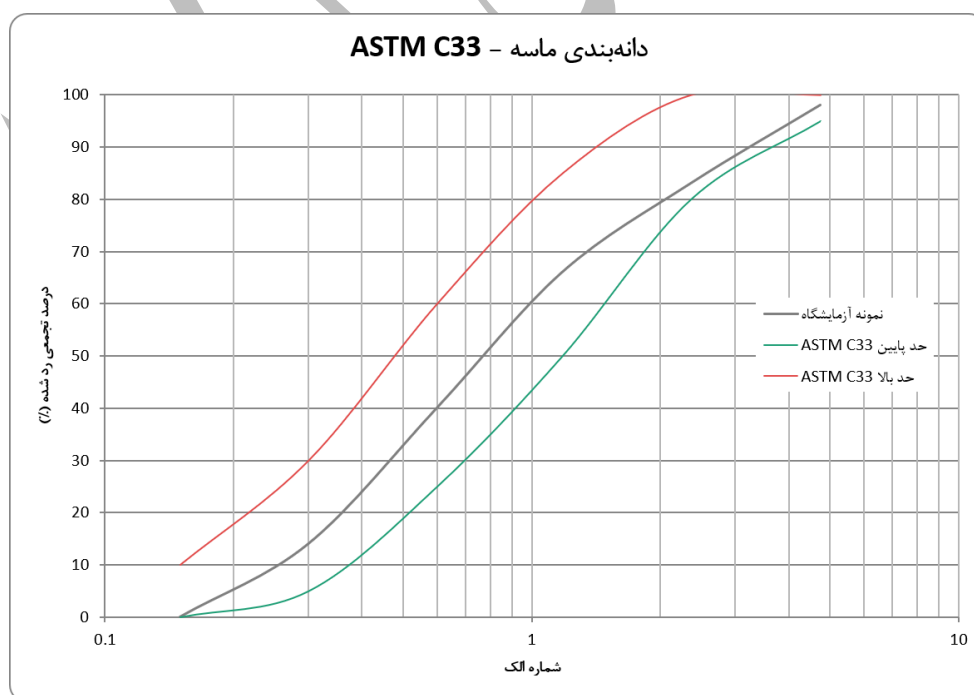
در این تحقیق، از مواد مختلف برای تهیه بتن پلیمری استفاده شده است که شامل رزین های پلی استر غیرا شباع ایزوفتالیک و ارتوفتالیک، سنگدانه ها، الیاف شیشه خرد شده و مواد افزودنی می باشد. این مصالح براساس استانداردهای فنی و خواص مکانیکی مورد نیاز برای بتن پلیمری با مشخصات زیر انتخاب شدند.

تمامی درصدهای الیاف در این پژوهش بر مبنای درصد وزنی کل مخلوط تعیین شده اند. انتخاب روش وزنی به دلیل سهولت کنترل در فرآیند ساخت، کاهش خطاهای ناشی از تغییر حجم ظاهری الیاف و رایج بودن این روش در مطالعات بتن های پلیمری انجام شده است. همچنین در بتن های پلیمری به دلیل تفاوت زیاد چگالی اجزاء، استفاده از درصدهای حجمی می تواند موجب افزایش خطای اختلاط شود.

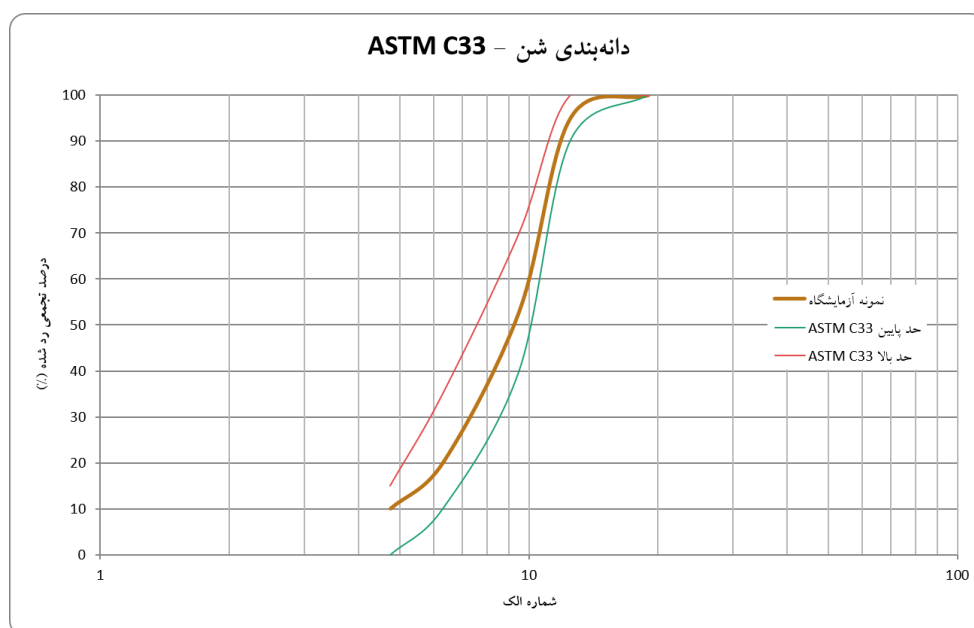
طول های ۳، ۶ و ۱۲ میلی متر بر اساس مطالعات پیشین و با هدف پوشش رفتار الیاف کوتاه، متوسط و بلند انتخاب شدند. مطالعات قبلی نشان داده اند که افزایش طول الیاف موجب بهبود مکانیزم پل زنی ترک ها می شود، اما در طول های زیاد احتمال کلوخه شدن الیاف و کاهش کارایی افزایش می یابد.

در شکل های ۱ و ۲ به ترتیب نمودارهای دان بندنی ماسه و شن مورد استفاده در آزمایش ر سم گردیده است. همچنین، در جدول ۱ مشخصات الیاف خرد شده شیشه و در جدول ۲ طرح اختلاط بتن پلیمری و نام گذاری نمونه ها آورده شده است.

همانطوریکه در جدول ۲ درج گردیده است طرح اختلاط مورد استفاده در این مقاله برای ساخت بتن پلیمری با الیاف شیشه به صورت وزنی می باشد. چون الیاف شیشه حالت رشته مانند دارند و با توجه به اینکه از ۱ تا حداکثر ۵ درصد وزنی آنها در ساخت نمونه ها استفاده شده است، اگر بخواهیم طرح اختلاط را به صورت حجمی ارائه دهیم، دقت کافی وجود ندارد. زیرا الیاف شیشه خرد شده حالت پنبه ای دارند.



شکل ۱: نتایج دان بندنی ماسه مورد استفاده در آزمایش



شکل ۲: نتایج دانه بندی شن مورد استفاده در آزمایش

جدول ۱: مشخصات الیاف خرد شده شیشه

ویژگی	نوع شیشه	طول اسمی الیاف	تولرانس طول	قطر فیلامنت	چگالی
مقدار	E-Glass (Electrical Grade)	3,6,12 mm	± 1 mm	$6-13 \mu m$ (معمولا $10-13 \mu m$)	$2.54-2.60$ g/cm^3
استاندارد	ASTM D578 ISO 2078	—	—	ASTM D578	ASTM C693

جدول ۲: طرح اختلاط و نامگذاری نمونه‌ها

کد نمونه	نوع رزین	طول الیاف (mm)	درصد الیاف (% وزنی)	رزین (% وزنی)	CaCO ₃ (% وزنی)	سنگدانه‌ها (% وزنی)	تعداد نمونه
ISO-0	ایزوفتالیک	0	0	15	5	80	3
ISO-3-(1-5)	ایزوفتالیک	3	1-5	15	5	79-75	3
ISO-6-(1-5)	ایزوفتالیک	6	1-5	15	5	79-75	3
ISO-12-(1-3)*	ایزوفتالیک	12	1-3	15	5	79-77	3
ORT-0	ارتوفتالیک	0	0	15	5	80	3
ORT-3-(1-5)	ارتوفتالیک	3	1-5	15	5	79-75	3
ORT-6-(1-5)	ارتوفتالیک	6	1-5	15	5	79-75	3

3	79-77	5	15	1-3	12	ارتوفتالیک	ORT-12-(1-3)*
---	-------	---	----	-----	----	------------	---------------

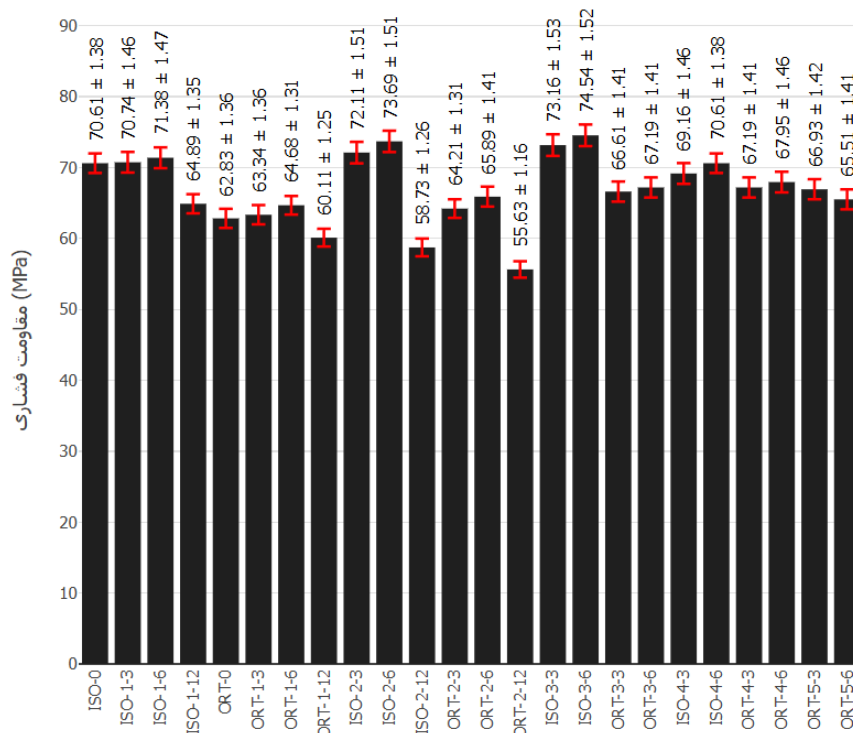
*نمونه‌های حاوی الیاف ۱۲ میلی‌متری با درصدهای ۴ و ۵ درصد وزنی به دلیل افزایش تراکم الیاف، جدایش سنگدانه‌ها از ماتریس رزینی و عدم امکان اختلاط و قالب‌گیری مناسب، قابل ساخت نبودند.

۳- یافته‌های آزمایشگاهی

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری با استفاده از نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متری انجام شد. این آزمایش برای تعیین توانایی بتن پلیمری در تحمل نیروهای فشاری مستقیم استفاده شد. علت این که از مکعبهای استاندارد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متری (که برای آزمایش مقاومت فشاری بتن معمولی استفاده می‌شود) استفاده نشد، محدودیت ظرفیت جک آزمایشگاه بود. لازم به ذکر است مقاومت فشاری بتن پلیمری چندین برابر مقاومت فشاری بتن‌های معمولی است. تعداد نمونه‌های ساخته شده برای هر طرح ۳ نمونه بود که نمودار ستونی میانگین مقاومت فشاری این سه نمونه‌ها در شکل ۳ رسم گردیده است.

آزمایش مقاومت فشاری یکی از شاخص‌های کلیدی برای ارزیابی کیفیت و عملکرد بتن پلیمری است. نتایج این آزمایش نشان داد که افزودن الیاف شیشه خرد شده به مخلوط بتن تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها دارد. برای نمونه‌های ساخته شده با رزین ایزوفتالیک، افزایش مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه بدون الیاف ($70/61$ مگاپاسکال) تقریباً در تمام درصدهای وزنی الیاف مشاهده شد. بالاترین مقاومت فشاری در ترکیب با الیاف ۶ میلی‌متری و درصد ۳٪ ($74/54$ مگاپاسکال) ثبت شد. نمونه‌هایی با طول ۳ میلی‌متر نیز افزایش خوبی در مقاومت داشتند، اما کاهش جزئی در مقاومت در درصد ۴٪ مشاهده شد که نشان دهنده تأثیر منفی احتمالی تراکم بیش از حد الیاف بر چسبندگی رزین و سنگدانه‌ها است. نمونه‌هایی با طول ۱۲ میلی‌متر در درصدهای بالاتر قابل ساخت نبودند. در درصدهای موجود، افزایش مقاومت نیز کمتر از نمونه بدون الیاف بود که به دلیل چسبندگی بیش از حد الیاف و کاهش پیوند بین رزین و سنگدانه‌ها است. نمونه‌های رزین ارتوفتالیک نیز در مقایسه با نمونه بدون الیاف ($62/83$ مگاپاسکال) بهبود مقاومت فشاری را نشان دادند، اما این افزایش به طور کلی کمتر از نمونه‌های ایزوفتالیک بود. بالاترین مقاومت در این گروه در ترکیب با الیاف ۶ میلی‌متری و درصد ۴٪ ($67/95$ مگاپاسکال) مشاهده شد. روند افزایش مقاومت با طول الیاف مشابه نمونه‌های ایزوفتالیک است؛ الیاف متوسط (۶ میلی‌متر) عملکرد بهتری نسبت به طول‌های کوتاه یا بلند دارند. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که نوع رزین و طول الیاف نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد نهایی بتن پلیمری دارند و الیاف شیشه خرد شده به طور مؤثر مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهند. همچنین، محدودیت درصد الیاف بالا و طول‌های بلند، اهمیت طراحی مخلوط مناسب مواد و کنترل درصد الیاف را برای دستیابی به بهترین عملکرد مکانیکی نشان می‌دهد.



شکل ۳: نمودار ستونی میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها برحسب مگاپاسکال

نتایج فوق‌الذکر نشان داد که افزودن الیاف شیشه خرد شده موجب افزایش مقاومت فشاری بتن پلیمری می‌شود که این امر را می‌توان به کنترل رشد ریزترک‌ها، بهبود توزیع تنش و ایجاد مکانیزم پل‌زنی الیاف در مسیر ترک‌ها نسبت داد. الیاف با طول ۶ میلی‌متر در هر دو نوع رزین عملکرد مطلوب‌تری نسبت به سایر طول‌ها نشان دادند که ناشی از توزیع مناسب‌تر آن‌ها در ماتریس و انتقال مؤثرتر تنش است. با افزایش بیش از حد مقدار الیاف، احتمال تجمع الیاف، کاهش یکنواختی مخلوط و افت پیوستگی بین اجزای بتن افزایش می‌یابد. در درصدهای بالای الیاف، جدایش سنگدانه‌ها از ماتریس رزینی و کاهش کارایی مخلوط باعث شد برخی طرح‌ها قابلیت ساخت نداشته باشند. همچنین نمونه‌های حاوی رزین ایزوفتالیک در مقایسه با رزین ارتوفتالیک مقاومت بیشتری از خود نشان دادند که می‌تواند ناشی از انسجام بیشتر ماتریس و انتقال بهتر تنش در این رزین باشد.

۳-۲- آزمایش مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی (آزمایش برزیلی) با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر انجام شد. تعداد نمونه‌های ساخته شده برای هر طرح ۳ نمونه بود که نمودار ستونی میانگین مقاومت کششی این سه نمونه‌ها در شکل ۴ رسم گردیده است.

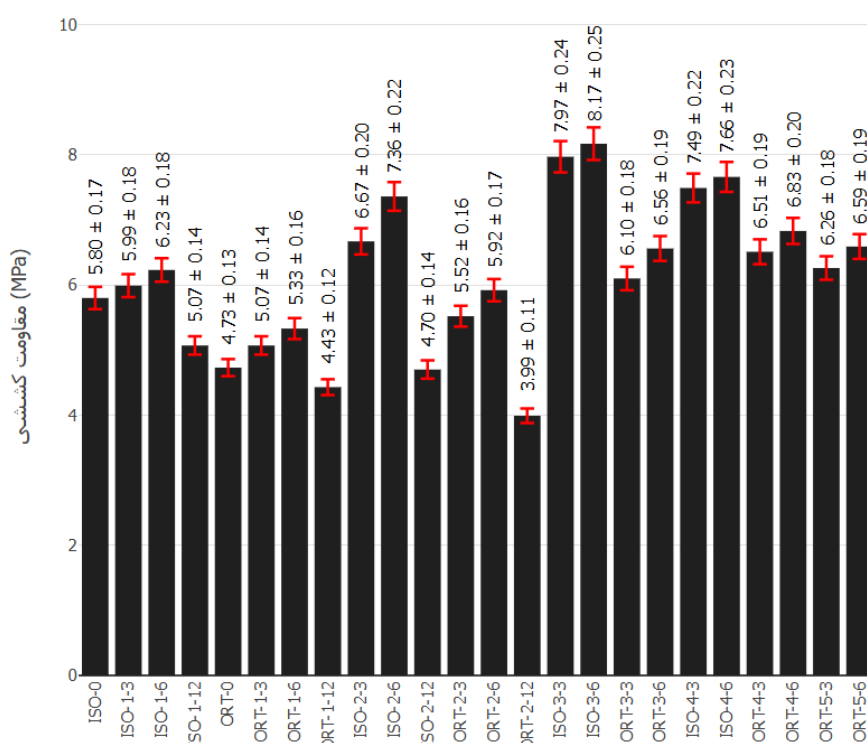
آزمایش مقاومت کششی یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی عملکرد بتن پلیمری است، به خصوص که نقش الیاف شیشه خرد شده در بهبود رفتار کششی نمونه‌ها بسیار قابل توجه است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی الیاف، مقاومت کششی نمونه‌ها به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

در نمونه‌های ساخته شده با رزین ایزوفتالیک، بیشترین مقاومت کششی در نمونه‌هایی با الیاف ۶ میلی‌متری و درصد وزنی ۳ درصد مشاهده شد که ۸/۱۷ مگاپاسکال است که بیش از ۴۰ درصد بیشتر از نمونه بدون الیاف (۵/۸ مگاپاسکال) است. به طور کلی، نمونه‌های حاوی

الیاف ۶ میلی متری عملکرد بهتری نسبت به سایر طول‌های الیاف داشتند. همچنین افزایش درصد الیاف بیش از ۴ درصد در طول‌های بلندتر (۱۲ میلی متر) امکان پذیر نبود، زیرا تجمع الیاف مانع از چسبندگی کافی رزین به سنگدانه‌ها می‌شد.

نمونه‌های دارای رزین ارتوفتالیک نیز افزایش مقاومت کششی داشتند، اما این افزایش کمتر از نمونه‌های ایزوفتالیک بود. بالاترین مقاومت کششی در این گروه برای نمونه با الیاف ۶ میلی متری و ۴ درصد وزنی، برابر با ۶/۸۳ مگاپاسکال به دست آمد، در حالی که نمونه بدون الیاف، مقاومتی برابر با ۴/۷۳ مگاپاسکال داشت.

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که طول الیاف تأثیر قابل توجهی بر رفتار کششی نمونه‌ها دارد؛ الیاف کوتاه‌تر (۳ و ۶ میلی متر) توزیع یکنواخت‌تری در ماتریس رزین ایجاد کرده و نقاط ضعف احتمالی ناشی از تجمع الیاف را کاهش داده و در نتیجه عملکرد کششی بهتر و یکنواخت‌تری را فراهم می‌کنند. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که هم نوع رزین و هم طول و درصد الیاف شیشه نقش مهمی در بهبود مقاومت کششی بتن‌های پلیمری دارند.



شکل ۴: نمودار ستونی میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها برحسب مگاپاسکال

نتایج فوق‌الذکر مقاومت کششی نشان داد که افزودن الیاف شیشه خرد شده موجب بهبود قابل توجه عملکرد کششی بتن پلیمری می‌شود. این بهبود را می‌توان به نقش الیاف در کنترل گسترش ترک‌ها، افزایش جذب انرژی شکست و ایجاد مکانیزم پل زنی در دو طرف ترک نسبت داد. نمونه‌های حاوی الیاف ۶ میلی متری در هر دو نوع رزین بیشترین مقاومت کششی را نشان دادند که بیانگر توزیع مناسب‌تر الیاف و انتقال مؤثرتر تنش در ماتریس است. با افزایش بیش از حد مقدار الیاف، احتمال تجمع الیاف و کاهش یکنواختی مخلوط افزایش یافته و در طول‌های بلندتر امکان ساخت برخی طرح‌ها به دلیل جدایش سنگدانه‌ها از رزین و کاهش کارایی مخلوط وجود نداشت. همچنین نمونه‌های

حاوی رزین ایزوفتالیک در مقایسه با رزین ارتوفتالیک مقاومت کششی بیشتری از خود نشان دادند که می‌تواند ناشی از پیوستگی بهتر ماتریس و مقاومت بیشتر در برابر رشد ترک باشد.

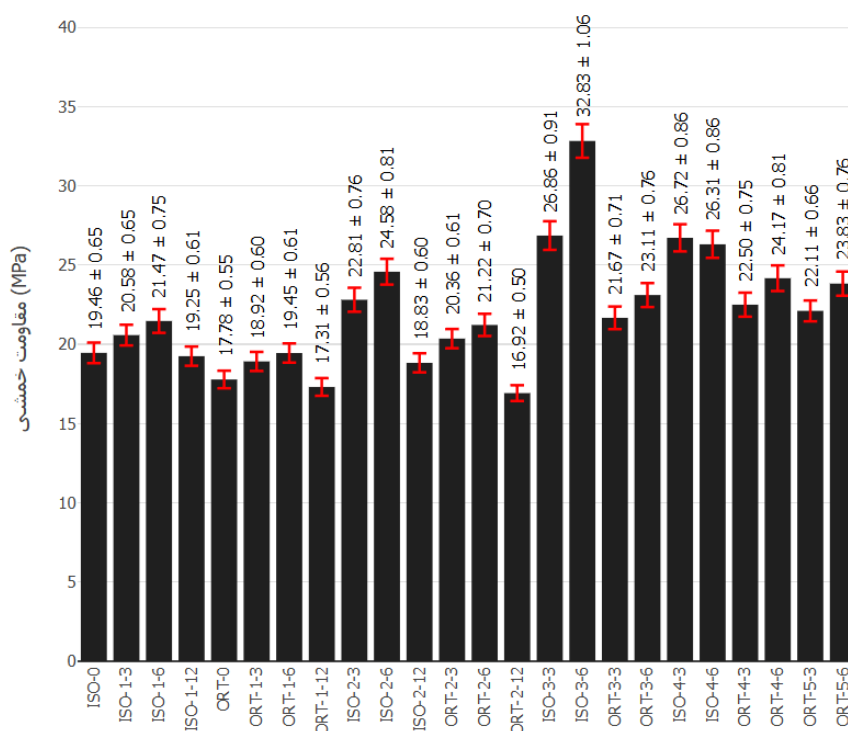
۳-۳- آزمایش مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی با استفاده از نمونه‌های مکعب مستطیلی 10×10 سانتی‌متری و با طول ۴۰ سانتی‌متر انجام شد. مانند دو آزمایش دیگر، تعداد نمونه‌های ساخته شده برای هر طرح ۳ نمونه بود که نمودار ستونی میانگین مقاومت خمشی این سه نمونه‌ها در شکل ۵ رسم گردیده است.

آزمایش مقاومت خمشی یکی از شاخص‌های کلیدی برای ارزیابی رفتار مکانیکی بتن‌های پلیمری است و نقش الیاف شیشه خرد شده و نوع رزین در بهبود عملکرد نمونه‌ها به وضوح مشهود است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف، مقاومت خمشی نمونه‌ها را به طور قابل توجهی افزایش داده است.

در نمونه‌های ساخته شده با رزین ایزوفتالیک، بیشترین مقاومت خمشی در نمونه‌هایی که از الیاف ۶ میلی‌متری با درصد وزنی ۳ درصد استفاده شده بود، مشاهده شد و مقدار آن $32/83$ مگاپاسکال ثبت شد؛ این مقدار تقریباً ۶۹ درصد بیشتر از نمونه بدون الیاف (۱۹/۴۶ مگاپاسکال) بود. نمونه‌های دارای الیاف ۳ میلی‌متری نیز در درصدهای بالاتر (۳ و ۴ درصد) مقاومت کافی نشان دادند، در حالی که نمونه‌های با طول الیاف ۱۲ میلی‌متر را نمی‌توان با درصدهای بالاتر تولید کرد، زیرا تجمع الیاف مانع از چسبندگی رزین به سنگدانه‌ها شده و عملکرد خمشی کاهش می‌یابد.

نمونه‌های ساخته شده با رزین ارتوفتالیک نیز افزایش خوبی در مقاومت خمشی نشان دادند؛ بیشترین مقاومت در نمونه‌های حاوی ۶ میلی‌متر و ۴ درصد وزنی الیاف مشاهده شد و به $24/17$ مگاپاسکال رسید که حدود ۳۶ درصد بیشتر از نمونه بدون الیاف (۱۷/۷۸ مگاپاسکال) است. به طور کلی، افزایش مقاومت خمشی در نمونه‌های ارتوفتالیک کمتر از نمونه‌های ایزوفتالیک بود که اهمیت نوع رزین را در عملکرد نهایی بتن‌های پلیمری نشان می‌دهد.



شکل ۵: نمودار ستونی میانگین مقاومت خمشی نمونه‌ها برحسب مگاپاسکال

نتایج فوق‌الذکر مقاومت خمشی نشان داد که افزودن الیاف شیشه خرد شده موجب بهبود قابل توجه ظرفیت خمشی بتن پلیمری می‌شود. این افزایش را می‌توان به نقش الیاف در کنترل و تأخیر رشد ترک‌های کششی، توزیع مجدد تنش‌ها و افزایش جذب انرژی تا زمان شکست نسبت داد. نمونه‌های حاوی الیاف ۶ میلی‌متری در هر دو نوع رزین عملکرد بهتری نسبت به سایر طول‌ها نشان دادند که بیانگر توزیع مناسب‌تر الیاف و کارایی بیشتر آن‌ها در انتقال تنش‌های خمشی است. با افزایش بیش از حد مقدار یا طول الیاف، احتمال تجمع الیاف و کاهش یکنواختی مخلوط افزایش یافته و در برخی طرح‌ها به دلیل جدایش سنگدانه‌ها از ماتریس رزینی امکان ساخت نمونه وجود نداشت. همچنین نمونه‌های ساخته شده با رزین ایزوفتالیک در مقایسه با رزین ارتوفتالیک مقاومت خمشی بالاتری از خود نشان دادند که می‌تواند ناشی از انسجام بیشتر ماتریس و مقاومت بالاتر آن در برابر گسترش ترک‌های ناشی از خمش باشد.

۴- درونیابی

یکی از اهداف اصلی این پژوهش، بررسی معنی‌داری آماری متغیرهای مستقل (درصد و طول الیاف) و اثرات متقابل آن‌ها بر مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن پلیمری است. برای این منظور، از روش درونیابی چندجمله‌ای درجه سه (Cubic) استفاده شد. به منظور کاهش اثرات هم‌خطی چندگانه (Multicollinearity)، داده‌های ورودی شامل درصد الیاف (x1) و طول الیاف (x2) ابتدا مرکزدهی (Centered) شدند. برای استخراج مدلی ساده‌تر و معنادارتر، روش حذف پس‌رونده (Backward Elimination) با سطح معنی‌داری $\alpha = 0.05$ روی مدل کامل اعمال گردید. در این فرآیند، جملاتی که بیشترین مقدار P-Value را داشتند و از آستانه 0.05 بالاتر بودند، به صورت گام‌به‌گام از معادله حذف شدند. هدف این بود که در مدل نهایی، تمامی ضرایب باقی‌مانده از نظر آماری معنی‌دار بوده ($P\text{-Value} < 0.05$) و تأثیر قطعی هر متغیر بر پاسخ مشخص گردد.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_1 x_2 + \beta_5 x_2^2 + \beta_6 x_1^3 + \beta_7 x_1^2 x_2 + \beta_8 x_1 x_2^2 + \beta_9 x_2^3 \quad (1)$$

در فرمول بالا x_1 درصد الیاف و x_2 طول الیاف می باشد.

جدول ۳: مقادیر ضرایب مدل سازی چندجمله ای درجه سه پس از اعمال روش حذف پس رونده برای پیش بینی مقاومت های بتن پلیمری

جمله (Term)	فشاری ایزوفتالیک	فشاری ارتوفتالیک	کششی ایزوفتالیک	کششی ارتوفتالیک	خمشی ایزوفتالیک	خمشی ارتوفتالیک
ثابت (β_0)	69.358242	60.446986	4.399686	4.504923	13.355741	17.765405
x_2	-1.485516	-1.883480	-1.195949	-0.518920	-4.513241	-1.212610
x_1^2	-0.892222	-	-	-0.082549	-	-0.239237
$x_1 x_2$	-0.791420	-1.017129	-0.673010	-0.229004	-2.794903	-0.480010
x_2^2	1.885701	2.613142	1.366896	0.777791	5.845871	1.953449
x_1^3	-0.670833	-0.347989	-0.348837	-0.056250	-1.739651	-0.108750
$x_1 x_2^2$	0.865753	0.980787	0.676266	0.282338	3.112991	0.716641

در جدول زیر، مقادیر دقیق P-Value برای ضرایب باقی مانده در مدل نهایی آورده شده است. مقادیر بر اساس نمادگذاری علمی نمایش داده شده اند تا دقت آماری به طور کامل حفظ شود. علامت (—) نشان دهنده حذف آن جمله به دلیل عدم معنی داری در فرآیند حذف پس رونده است.

جدول ۴: نتایج آنالیز آماری (P-Value) ضرایب معادلات رگرسیون درجه سه برای پیش‌بینی مقاومت‌های بتن پلیمری

نوع مقاومت	نوع رزین	R^2	مقدار دقیق P-Value برای جملات مدل						
			ثابت (β_0)	x_2	x_1^2	x_1x_2	x_2^2	x_1^3	$x_1x_2^2$
فشاری	ایزوفتالیک	0.71	$< 10^{-16}$	1.18×10^{-2}	1.10×10^{-2}	2.57×10^{-2}	1.91×10^{-3}	3.72×10^{-2}	7.50×10^{-3}
	ارتوفتالیک	0.69	$< 10^{-16}$	2.61×10^{-6}	—	2.32×10^{-7}	1.60×10^{-7}	1.55×10^{-4}	2.79×10^{-7}
کششی	ایزوفتالیک	0.96	$< 10^{-16}$	8.71×10^{-12}	—	1.72×10^{-13}	9.54×10^{-15}	2.41×10^{-11}	4.44×10^{-16}
	ارتوفتالیک	0.96	$< 10^{-16}$	2.55×10^{-14}	1.93×10^{-5}	5.48×10^{-13}	$< 10^{-16}$	1.03×10^{-4}	1.55×10^{-15}
خمشی	ایزوفتالیک	0.94	3.10×10^{-13}	5.41×10^{-8}	—	2.67×10^{-10}	9.89×10^{-12}	4.41×10^{-10}	8.03×10^{-14}
	ارتوفتالیک	0.94	$< 10^{-16}$	1.22×10^{-8}	7.35×10^{-4}	9.42×10^{-7}	8.34×10^{-12}	3.56×10^{-2}	1.98×10^{-10}

وجود داشت. همچنین، بتن پلیمری را نمی‌توان با دستگاه مخلوط کن بتن معمولی ساخت. چون رزین آن حالت چسبناک دارد. در نتیجه، دستگاه مخلوط کن بتن پلیمری طراحی و ساخته شد که ابتدا با دور کم و قدرت بالا کار مخلوط کردن را انجام می‌داد. سپس، بعد از مدت زمان مشخصی روی دور تند می‌افتاد و عمل مخلوط کردن را با دور بالایی انجام می‌داد.

۶- نتیجه گیری

۱. نتایج نشان داد که افزودن الیاف شیشه خرد شده موجب بهبود مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن پلیمری می‌شود. این بهبود عمدتاً ناشی از کنترل رشد ترک‌ها، توزیع مناسب‌تر تنش و افزایش ظرفیت جذب انرژی توسط الیاف در ماتریس پلیمری است.

۲. طول الیاف تأثیر قابل توجهی بر عملکرد مکانیکی بتن پلیمری داشت و در اکثر موارد الیاف ۶ میلی‌متری رفتار مطلوب‌تری نسبت به سایر طول‌ها از خود نشان دادند. این موضوع بیانگر نقش توزیع یکنواخت‌تر الیاف و انتقال مؤثرتر تنش در ساختار کامپوزیتی بتن پلیمری است.

۳. افزایش بیش از حد مقدار یا طول الیاف همواره منجر به بهبود خواص مکانیکی نشد و در برخی طرح‌ها به دلیل تجمع الیاف، کاهش کارایی مخلوط و جدایش سنگدانه‌ها از ماتریس رزینی، امکان ساخت نمونه‌ها وجود نداشت. بنابراین عملکرد بتن پلیمری علاوه بر مقدار الیاف، به قابلیت ساخت و یکنواختی مخلوط نیز وابسته است.

۴. مقایسه دو نوع رزین نشان داد که نمونه‌های حاوی رزین ایزوفتالیک در اغلب آزمایش‌ها عملکرد بهتری نسبت به رزین ارتوفتالیک داشتند. این موضوع می‌تواند ناشی از انسجام بیشتر ماتریس پلیمری و انتقال مؤثرتر تنش در رزین ایزوفتالیک باشد که در نهایت مقاومت بیشتری در برابر گسترش ترک‌ها ایجاد می‌کند.

۵. این پژوهش از درونیابی چندجمله‌ای درجه سه و روش حذف پس‌رونده برای مدل‌سازی رفتار مکانیکی بتن‌های پلیمری استفاده کرد. نتایج نشان داد مدل درجه سه با در نظر گرفتن اثرات متقابل متغیرها (مانند طول و درصد الیاف)، عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های خطی و ساده‌تر دارد.

۶. مدل نهایی با معنی‌داری آماری ضرایب و ضریب تعیین بالا، توانست نتایج آزمایشگاهی را به طور دقیق‌تری پیش‌بینی کند و نشان داد که رفتار مقاومتی بتن‌ها ماهیتی کاملاً غیرخطی دارند.

۷. مدل‌های درونیابی درجه سه می‌توانند ابزار مفیدی برای پیش‌بینی دقیق‌تر مقاومت بتن‌های پلیمری باشند و به ویژه در پیش‌بینی مقاومت کششی و خمشی بسیار مؤثرتر و دقیق‌تر عمل می‌کنند.

۷- پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آتی

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده اثر الیاف شیشه خرد شده بر دوام بلندمدت، رفتار حرارتی و مقاومت بتن پلیمری در شرایط محیطی مختلف بررسی شود. همچنین مطالعه ریزساختار ناحیه اتصال الیاف، رزین و سنگدانه‌ها و ارزیابی عملکرد سایر انواع الیاف و رزین‌ها می‌تواند به درک بهتر مکانیزم‌های مؤثر بر خواص مکانیکی این مصالح کمک کند.

واژه‌نامه انگلیسی – فارسی

ردیف	واژه / عبارت انگلیسی	معادل فارسی	توضیح مختصر
1	ATH	آلومینیوم تری‌هیدروکسید	ماده افزودنی مقاوم در برابر حرارت و شعله که در برخی مطالعات به بتن پلیمری افزوده می‌شود.
2	Multicollinearity	هم‌خطی چندگانه	همبستگی بالا بین متغیرهای مستقل در مدل رگرسیون که باعث کاهش دقت برآورد ضرایب می‌شود.
3	Backward Elimination	حذف پس‌رونده	روش گام‌به‌گام برای انتخاب مدل که با حذف متغیرهای غیرمعنی‌دار از مدل کامل آغاز می‌شود.
4	Cubic	درجه سه	نوعی مدل چندجمله‌ای که در آن توان متغیرها تا درجه سه است و برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی به کار می‌رود.
5	Centered	مرکزدهی	فرآیند کم کردن میانگین از داده‌ها برای کاهش هم‌خطی و بهبود پایداری مدل رگرسیون.
6	P-Value	مقدار احتمال	شاخص آماری برای سنجش معنی‌داری ضرایب مدل؛ مقدار کمتر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده معنی‌دار بودن است.

مراجع

- [1] M. Jamshidi, M. J. Ghasemi, and A. Hashemi, "Effect of cyclic exposure of chemicals on compressive strength of polyester resin based polymer concrete," *Adv. Mater. Res.*, vol. 687, pp. 185–190, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.687.185.
- [2] M. J. Hashemi, M. Jamshidi, and J. H. Aghdam, "Investigating fracture mechanics and flexural properties of unsaturated polyester polymer concrete (UP-PC)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 163, pp. 767–775, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.115.
- [3] M. Nodehi, "Epoxy, polyester and vinyl ester based polymer concrete: A review," *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 7, no. 1, p. 64, 2022, doi: 10.1007/s41062-021-00661-3.
- [4] M. Tabatabaeian, A. Khaloo, and H. Khaloo, "An innovative high performance pervious concrete with polyester and epoxy resins," *Constr. Build. Mater.*, vol. 228, p. 116820, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116820.
- [5] J. Yeon, "Deformability of bisphenol A-type epoxy resin-based polymer concrete with different hardeners and fillers," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 4, pp. 8–10, 2020, doi: 10.3390/app10041336.
- [6] S. Orak, "Investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 2, pp. 171–174, 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00225-2.
- [7] Y. Gao, P. Romero, H. Zhang, M. Huang, and F. Lai, "Unsaturated polyester resin concrete: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 228, p. 116709, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116709.
- [8] M. Jamshidi, M. J. Ghasemi, and A. Hashemi, "Effect of cyclic exposure of chemicals on compressive strength of polyester resin based polymer concrete," *Adv. Mater. Res.*, vol. 687, pp. 185–190, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.687.185.

- [9] O. Elalaoui, E. Ghorbel, V. Mignot, and M. Ben Ouezdou, "Mechanical and physical properties of epoxy polymer concrete after exposure to temperatures up to 250 °C," *Constr. Build. Mater.*, vol. 27, no. 1, pp. 415–424, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.027.
- [10] N. J. Jin, J. Yeon, I. Seung, and K. S. Yeon, "Effects of curing temperature and hardener type on the mechanical properties of bisphenol F-type epoxy resin concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 933–943, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.053.
- [11] W. Ferdous et al., "Optimal design for epoxy polymer concrete based on mechanical properties and durability aspects," *Constr. Build. Mater.*, vol. 232, p. 117229, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117229.
- [12] L. Agarviiioale, S. Oprea, M. Barbuta, and F. Luca, "Characterisation of polymer concrete with epoxy polyurethane acryl matrix," *Constr. Build. Mater.*, vol. 37, pp. 190–196, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.037.
- [13] S. Y. Guo, "Mechanical and interface bonding properties of epoxy resin reinforced Portland cement repairing mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 264, p. 120715, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120715.
- [14] M. Golestaneh, "Evaluation of mechanical strength of epoxy polymer concrete with silica powder as filler," *World Appl. Sci. J.*, vol. 9, no. 2, pp. 216–220, 2010.
- [15] R. Kumar, "A review on epoxy and polyester based polymer concrete and exploration of polyfurfuryl alcohol as polymer concrete," *J. Polym.*, vol. 2016, pp. 1–13, 2016, doi: 10.1155/2016/7249743.
- [16] N. J. Jin, I. Seung, Y. S. Choi, and J. Yeon, "Prediction of early-age compressive strength of epoxy resin concrete using the maturity method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 152, pp. 990–998, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.066.
- [17] O. Elalaoui, E. Ghorbel, and M. Ben Ouezdou, "Influence of flame retardant addition on the durability of epoxy based polymer concrete after exposition to elevated temperature," *Constr. Build. Mater.*, vol. 192, pp. 233–239, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.132.
- [18] J. P. Gorninski, D. C. Dal Molin, and C. S. Kazmierczak, "Comparative assessment of isophatic and orthophatic polyester polymer concrete: Different costs, similar mechanical properties and durability," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 3, pp. 546–555, 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.09.003.
- [19] B. W. Jo, S. K. Park, and C. H. Kim, "Mechanical properties of polyester polymer concrete using recycled polyethylene terephthalate," *ACI Struct. J.*, vol. 103, no. 2, pp. 219–225, 2006, doi: 10.14359/15179.