Quarterly Journal of the Civil Engineering Department, Faculty of Engineering (2025), I 2, No.2, pp 1-11

NEW APPROACHES in CONSTRUCTION and PROJECT MANAGEMENT

Quarterly Journal of the Civil Engineering Department, Faculty of Engineering

https://cpm.aletaha.ac.ir

Ministry of Science, Research & Technology Ale-Taha Institute of Higher Education

Investigating the mechanical characteristics of unreinforced and reinforced polymer concrete with basalt and glass fibers

Javad Karimi Malekabadi[a], Alireza Saljoughian[b], Mohammad Reza Eftekhar[c], Davod Mostofinejad[d*]

[a] Senior student of civil engineering majoring in structures, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran; Javadkarimi12349@gmail.com

[b] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran; a.saljoughian@iut.ac.ir

[c] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran; eft@iut.ac.ir

[d] Professor of Civil Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran; dmostofi@iut.ac.ir

Abstract

Researchers have produced a new concrete called polymer concrete (PC) by using fine grains along with the use of resin. Due to the rapid development of concrete technology knowledge, polymer concrete has been used for optimization in structures. Basalt, carbon and glass fibers are used to make fibrous polymer concrete. In this research, microsilica, silica sand and orthophthalic polyester resin were used to make polymer concrete, and basalt and glass fibers were used to reinforce it. The production of polymer concrete with the percentage of different resins has been done in order to achieve the optimal resin. To determine the compressive strength of polymer concrete, cubic samples of 70 x 70 x 70 mm and prismatic samples of 350 x 100 x 100 mm dimensions were used for bending strength. The results obtained from this research were to reach the plan of mixing polymer concrete and adding 0.25 percent by volume of basalt and glass fibers to concrete, the obtained compressive strength of the sample containing basalt fibers, glass, and the control sample were 86, 82, and 78, respectively. It is a mega pascal. The bending strength of the sample containing basalt fibers, glass and the control sample was obtained as 26.5, 25.9 and 21.3 megapascals. Therefore, adding basalt and glass fibers to polymer concrete increased the compressive strength by 11% and 6%, respectively, compared to the sample without fibers. Also, the bending strength of samples containing basalt and glass fibers has increased by 25 and 22%, respectively, compared to the sample without fibers.

Article history:
Received: 21/12/2024
Revised: 30/01/2025
Accepted: 04/05/2025

Keywords
polyester resin, polymer concrete, fiber concrete, basalt fibers, glass fibers, micro silica.

* corresponding author: Professor of Civil Engineering Department, Faculty of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran; dmostofi@iut.ac.ir; ORCID: 0000-0003-1326-012x

فصلنامه گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، سال دوم، شماره ۲، بهار ۱۴۰۴، صص ۱-۱۱

رویکـــردهای نوین در
مدیریت ساخت و پروژه
فصلنامه گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی
https://cpm.aletaha.ac.ir

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
مؤسسه آموزش عالی آل طه

بررسی مشخصات مکانیکی بتن پلیمری غیرمسلح و مسلح با الیاف بازالت و شیشه

جواد کریمی ملک‌آبادی[۱]، علیرضا سلجوقیان[۲]، محمدرضا افتخار[۳]، داود مستوفی‌نژاد[۴*]

۱. دانشجوی ارشد مهندسی عمران، گرایش سازه، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران؛ Javadkarimi12349@gmail.com
۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران؛ a.saljoughian@iut.ac.ir
۳. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران؛ eft@iut.ac.ir
۴. استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران؛ dmostofi@iut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۴

چکیده فارسی

محققین با اســتفاده از ریزدانه‌ها به همراه اســتفاده از رزین، بتن جدیدی را به نام بتن پلیمری (PC)، تولید کرده‌اند. با توجه به پیشــرفت ســریع دانش تکنولوژی بتن، بتن پلیمری برای بهینه‌ســازی در سـازه‌ها مورد اسـتفاده قرار گرفته اسـت. برای سـاخت بتن‌های پلیمری الیافی از الیاف بازالت، کربن و شیشـه استفاده می‌شود. در این پژوهش برای ساخت بتن پلیمری از میکروسیلیس و ماسه سیلیس و رزین پلی‌استر اورتوفتالیک استفاده می‌شود؛ همچنین برای مسلح کردن آن از الیاف بازالت و شیشـه اسـتفاده شـده اسـت. سـاخت بتن پلیمری با درصـد رزین‌های مختلف جهت دسـت‌یابی به رزین بهینه انجام شــده اســت. برای تعیین مقاومت فشــاری بتن پلیمری ســاخته شــده از نمونه‌های مکعبی ۷۰×۷۰×۷۰ میلی‌متر و جهت مقاومت خمشــی از نمونه‌های منشــوری با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۳۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش رسیدن به طرح اختلاط بتن پلیمری و اضافه کردن ۰/۲۵ درصد حجمی الیاف بازالت و شیشه به بتن بوده است. مقاومت فشاری به‌دست آمده نمونه حاوی الیاف بازالت، شـیشـه و نمونه شـاهد، به ترتیب ۸۶، ۸۲ و ۷۸ مگاپاسـکال اسـت. مقاومت خمشــی حاصــل از آزمایش نمونه، حاوی الیاف بازالت، شــیشــه و نمونه شــاهد، ۲۶/۵، ۲۵/۹ و ۲۱/۳ مگاپاسـکال به‌دسـت آمده اسـت؛ بنابراین اضـافه کردن الیاف بازالت و شـیشـه به بتن پلیمری به ترتیب باعث افزایش ۱۱ و ۶ درصد مقاومت فشاری نسبت به نمونه بدون الیاف شد. همچنین مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف بازالت و شــیشــه به ترتیب برابر ۲۵ و ۲۲ درصــد نســبت به نمونه بدون الیاف افزایش یافته است.

واژگان کلیدی

رزین پلی‌استر، بتن پلیمری، بتن الیافی، الیاف بازالت، الیاف شیشه، میکروسیلیس.

* نویسنده مسئول: استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران؛ dmostofi@iut.ac.ir
ORCID: 0000-0003-1326-012x

۱. مقدمه

با توجه به تولید بتن پلیمری در سال‌های گذشته و طرح اختلاط‌های مختلف آن، در این تحقیق نیز طرح اختلاط جدیدی از آن ساخته و مورد بررسی قرار می‌گیرد. در واقع با جایگزینی مواد دیگر برای سیمان و تغییر در طرح اختلاط، بتن جدید با خواص و ویژگی‌های مطلوب‌تر ساخته می‌شود. با ساخت بتن‌های جدید و با توجه به ویژگی‌های آن می‌توان جهت تقویت در اعضای سازه‌ای، مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از این بتن و تقویت اعضای سازه‌ای می‌توان باعث افزایش ظرفیت باربری شد و از شکست‌هایی مثل شکست برشی و خمشی جلوگیری کرده و به تعویق انداخت. بتن پلیمری با رزین‌های متفاوت ساخته می‌شود. بدین‌صورت که در ابتدا با سعی و خطا و با توجه به روانی و کارایی بتن ساخته شده مقدار رزین مورد نظر مشخص می‌شود. همچنین اضافه کردن ۰/۲۵ درصد حجمی الیاف بازالت و شیشه به نمونه‌ها و بررسی مشخصات مکانیکی آن‌ها در این تحقیق انجام می‌شود. در سال‌های گذشته مطالعات بسیاری توسط افرادی چون برونیفسکی، گریفیتس، ایکدویگو، مودی، همزا و ثنایی انجام شده که با توجه به موارد مورد آزمایش، تغییرات در نوع و مقدار رزین، انواع الیاف و مقدار آن را مورد بررسی قرار گرفتند.

۲. مطالعات پیشین

امروزه بتن یکی از مهم‌ترین مصالح موجود روی کرۀزمین در زمینۀ ساخت‌وساز است. از بتن برای مقاوم‌سازی سازه‌ها در مهندسی عمران به‌وفور استفاده می‌شود[۱]. ساخت این مادۀ مرکب با استفاده از ارزان‌ترین و در دسترس‌ترین مواد از یک‌سو و همچنین امکان استفاده از مواد جایگزین در ساخت بتن که به کاهش آلودگی محیط‌زیست کمک می‌کند، موجب شده است که بتن به‌عنوان مصالحی ممتاز در قرن حاضر مطرح شود. از بتن در اجزای سازه‌ای نظیر فنداسیون، تیر، ستون، دیوار و دیافراگم‌ها به مقدار زیاد استفاده می‌شود[۲]. بتن پلیمری دارای ویژگی‌های منحصر به‌فردی است که برخی از این ویژگی‌ها شامل مقاومت فشاری بالا، مقاومت خمشی بالا، شکل‌پذیری زیاد و مقاومت در برابر محیط‌های اسیدی است[۳]. به‌طورکلی پلیمر و محصولات پلیمری از سال ۱۹۹۰ مورد توجه قرار گرفتند. یکی از اهداف محققین در چند دهۀ اخیر رسیدن به مقاومت فشاری بالا بوده است. محققین در چند دهۀ اخیر با حذف سیمان و درشت‌دانه و استفاده از رزین و ریزدانه، بتن جدیدی، تحت عنوان بتن پلیمری تولید کردند. در این بتن با استفاده از الیاف، مقاومت خمشی و شکل‌پذیری بتن افزایش یافته و از ترک‌خوردگی آن جلوگیری می‌شود. از ویژگی‌های بتن پلیمری مقاومت فشاری نسبتاً بالا و مقاومت بالا در برابر محیط‌های اسیدی است. بتن معمولی به‌دلیل مقاومت پایین در برابر عوامل خورندۀ شیمیایی، اغلب دچار خوردگی توسط گازهای اکسیدکننده و مایعات می‌شود، اما می‌توان با جایگزینی کامل مواد پلیمری در بتن، ترکیبی ایجاد کرد که مقاومت بالایی در برابر عوامل خورندۀ شیمیایی داشته باشد. با توجه به قیمت بالاتر رزین نسبت به سیمان، قیمت بتن پلیمری از بتن معمولی بالاتر است؛ اما زمانی که به خواص ایجاد شده در بتن پلیمری توجه شود، مشاهده می‌شود که این بتن در شرایط محیطی خورنده و در درازمدت مقرون به‌صرفه است. در برخی شرایط نیز چاره‌ای جز استفاده از بتن پلیمری وجود ندارد. به‌عنوان مثال، زمانی که بتن در برابر مواد شیمیایی خاصی قرار دارد، بهترین روش استفاده از بتن پلیمری است[۴]. از مهم‌ترین موارد کاربرد انواع بتن پلیمری، استفاده از آن در ساخت قطعات پیش‌ساخته و نماهای ساختمانی است. در سنگ‌های طبیعی به‌دلیل حفرات زیاد، جذب آب و نفوذ بالا، آسیب‌پذیری در برابر عوامل جوی و مواد شیمیایی بسیار بالاست. علاوه بر این، وزن قطعات سنگی بالا بوده و عایق حرارت یا صوت نیز نمی‌باشند. در مقابل بتن پلیمری با چگالی پایینی که دارد جایگزین بسیار مناسبی در تولیدات پیش‌ساخته و سنگ‌های تزئینی به‌عنوان نما است[۵].

برونیفسکی و همکاران در سال ۱۹۹۶، بیان کردند که اضافه کردن ۳/۵ درصد (وزنی) الیاف کوتاه فلزی، حدود ۴۰ درصد مقاومت خمشی بتن پلیمری اپوکسی را افزایش می‌دهد[۶].

گریفیتس و همکاران در سال ۲۰۰۰، مدول‌گسیختگی و چقرمگی شکست بتن پلیمری پلی‌استری حاوی ۱/۵ درصد وزنی الیاف شیشه‌ای کوتاه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که الیاف، به‌طور چشم‌گیری خواص مکانیکی بتن پلیمری پلی‌استری را بهبود می‌بخشد، به‌گونه‌ای که مدول گسیختگی و چقرمگی شکست بتن پلیمری پلی‌استری را به ترتیب حدود ۲۰ و ۵۵ درصد افزایش می‌دهد[۷].

ایکدویگو و همکاران در سال ۲۰۱۲، تأثیر اضافه کردن الیاف شیشه را بر مقاومت خمشی و سختی بتن پلیمری پلی‌استر بررسی کردند. این محققین نتیجه گرفتند که مقاومت خمشی، سختی خمشی و کرنش شکست به ترتیب ۱۳۸، ۹۴/۶، ۶۲/۸ درصد، افزایش می‌یابد[۸].

مودی و همکاران در سال ۲۰۱۸، مقاومت و دوام بتن پلیمری اپوکسی (۱۰ درصد وزن سنگ‌دانه‌ها)، بتن پلیمری پلی‌استری (۱۰ و ۲۰ درصد وزن سنگ‌دانه‌ها) و بتن اصلاح شده با لاتکس استایرن بوتادین رابر (۱۵ و ۲۵ درصد وزن سیمان) و لاتکس اپوکسی (۲۵ درصد وزن سیمان) را بررسی‌کردند. نتایج نشان داد که در بین انواع مختلف بتن، بتن پلیمری پلی‌استری، بهترین عملکرد را از نظر مقاومت فشاری، کششی و خمشی دارد. همچنین مشابه بتن اصلاح‌شده با لاتکس، افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن‌های پلیمری، بیشتر از افزایش مقاومت فشاری آن‌ها بود. در این تحقیق در مقایسه با بتن معمولی، برای نفوذپذیری در برابر آب در بتن پلیمری با۲۰ درصد رزین پلی‌استر، بتن اصلاح شده با ۲۵ درصد لاتکس استایرن بوتادین رابر و بتن پلیمری با ۲۵ درصد رزین، کاهش قابل توجهی گزارش شده است[۹].

همزا و همکاران در سال ۲۰۱۸، خواص مکانیکی و فیزیکی بتن پلیمری حاوی دو نوع زبالهٔ ساختمانی (ضایعات سیمانی و ضایعات بلوک‌های ساختمانی) به‌عنوان سنگ‌دانهٔ درشت و دو نوع رزین مختلف (اپوکسی و پلی‌استر غیراشباع) با درصدهای وزنی ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد، را بررسی‌کردند. آن‌ها بیان کردند که بتن پلیمری پلی‌استری حاوی ۲۵ درصد رزین و درشت‌دانهٔ ضایعات بلوک، مقاومت فشاری ۱۳۳ مگاپاسکال و بتن پلیمری پلی‌استری حاوی ۳۰ درصد رزین و درشت‌دانهٔ ضایعات بتن، مقاومت فشاری ۸۰ مگاپاسکال دارد؛ درحالی‌که برای بتن پلیمری اپوکسی، حاوی ۲۰ درصد رزین و ضایعات بلوک، مقاومت فشاری ۱۲۱ مگاپاسکال و برای بتن پلیمری اپوکسی حاوی ۱۵ درصد رزین و ضایعات بتن، مقاومت فشاری ۵۷ مگاپاسکال گزارش شده است. با توجه به موارد فوق این محققین نتیجه گرفتند که استفاده از ضایعات بلوک در بتن پلیمری، باعث افزایش مقاومت مکانیکی آن می‌شود[۱۰].

ثنایی و همکاران در سال ۲۰۲۱، خواص مکانیکی و دوام بتن پلیمری پلی‌استری سبک وزن در دماهای مختلف (۲۳، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد) با مقادیر مختلف رزین (۱۵، ۱۸، ۲۱، ۲۶ و ۲۷ درصد) و دو نوع سنگ‌دانه (لیکا و ماسهٔ رودخانه‌ای) را مورد آزمایش قرار دادند و نتایج را با بتن و سیمان پرتلند معمولی، مقایسه کردند. نتایج نشان داد که افزایش مقدار رزین، باعث بهبود مقاومت خمشی، فشاری و کششی می‌شود؛ درحالی‌که مقدار رزین بیشتر از ۲۷ درصد، تأثیر کمی بر خواص بتن سبک پلیمری داشت. همچنین نتیجه گرفتند که بتن سبک پلیمری، مقاومت عالی در مقابل محلول‌های شیمیایی دارد، اما با افزایش دما، خواص آن کاهش می‌یابد. سرانجام ایشان بیان کردند، مقدار رزینی که به ازای آن بالاترین عملکرد ایجاد می‌شود، ۲۴ درصد است[۱۱].

۳. مواد و روش‌ها

در این بخش، مصالح مصرفی، طرح اختلاط بتن و نحوهٔ ساخت نمونه‌ها ارائه شده است.

۳-۱. مصالح مصرفی

در این پژوهش بتن پلیمری از رزین پلی‌استر اورتوفتالیک ۱۱۵، ساخت شرکت فراپل با چگالی ۱۱۱ کیلوگرم بر مترمکعب، میکروسیلیس و ماسه سیلیسی تشکیل شده است. میکروسیلیس مورد استفاده از شرکت فروآلیاژ ایران تهیه شده است. ماسهٔ سیلیسی مورد استفاده در این تحقیق با اندازهٔ ۹۰ میکرون، از شرکت چیروک تهیه شده است. الیاف بازالت و شیشهٔ مورد استفاده در این تحقیق به ترتیب از شرکت‌های ریونیز ویرا پارس تهران و شرکت نخ و گرانول سیرجان تهیه شده است. مشخصات این دو نوع الیاف در جدول ۱ قابل مشاهده است. قابل ذکر است که برای ساخت بتن پلیمری، جهت تسریع در انجام واکنش در گیرش رزین از افزودنی‌های کبالت و پراکسید استفاده می‌شود که نسبت حجمی اختلاط رزین، کبالت و پراکسید به ترتیب با نسبت ۱۰۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ بوده و درصد حجمی اختلاط درشت‌دانه و پرکننده به ترتیب با نسبت ۴۰ به ۶۰ می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات الیاف مورد استفاده در این تحقیق[۱۲]

مشخصات	نوع الیاف	
	بازالت	شیشه
قطر (mm)	۰/۰۲۴	۰/۰۴
طول (mm)	۱۸	۱۸
مقاومت کششی (MPa)	۳۰۰۰	۲۹۰۰
چگالی (kg/m^3)	۲۸۰۰	۲۵۰۰

(الف)

(ب)

شکل ۱. (الف) الیاف بازالت؛ (ب) الیاف شیشه

۳-۲. طرح اختلاط نمونه‌ها

به منظور رسیدن به اهداف این پژوهش، مطابق جدول ۲ از طرح اختلاط‌های متفاوت برای ساخت بتن استفاده شد. طرح مبنای بتن این پژوهش با استفاده از آزمایشات اولیه و فرایند سعی و خطا به‌دست آمد. طرح اختلاط با درصد رزین‌های مختلف ساخته شد. لازم به ذکر است که کلیهٔ مراحل ساخت و ریختن بتن در قالب براساس استاندارد ASTM C192-02[۱۳] بوده است.

جدول ۲. طرح اختلاط بتن پلیمری مورد استفاده در این پژوهش

طرح اختلاط	درصد حجمی (٪)
رزین	۴۵
ماسه سیلیسی	۳۶/۶۶
میکروسیلیس	۱۸/۳۴

۳-۳. نحوهٔ ساخت نمونه‌ها

برای ساخت تمامی طرح اختلاط‌های بتن در این پژوهش، پس از آماده‌سازی کلیهٔ مصالح، از دستگاه مخلوط‌کن برای ترکیب آن‌ها با یکدیگر استفاده شده است. سپس مصالح ترکیب شده، در قالب‌های فلزی مکعبی در ابعاد ۷۰ × ۷۰ × ۷۰ میلی‌متر نیز نمونه‌های منشوری به ابعاد ۱۰۰ ×۱۰۰ × ۳۵۰ میلی‌متر ریخته شد. در نهایت پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج شده و به مدت ۷ روز در محیط آزمایشگاه و در دمای استاندارد ۲۵ درجه سانتی‌گراد جهت گیرش نهایی رزین نگهداری شد.

۴. روش‌های آزمایش

در این پژوهش آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های بتن پلیمری به‌صورت زیر انجام می‌شود.

۴-۱. آزمایش مقاومت فشاری

براساس استاندارد ACI 318-14[۱۴]، مقاومت فشاری بتن با استفاده از میانگین‌گیری مقاومت سه نمونهٔ مکعبی به ابعاد ۷۰×۷۰×۷۰ میلی‌متر به‌دست می‌آید. برای مشخص شدن مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی از دستگاه نشان داده شده در شکل ۲ استفاده می‌شود. دستگاه مذکور دارای ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن و دقت ۱ کیلو نیوتن است. سرعت اعمال نیرو قابل تنظیم بوده و بعد از قرارگیری نمونهٔ مکعبی درون دستگاه، فک پایینی دستگاه به‌سمت بالا حرکت می‌کند.

(الف)

(ب)

شکل ۲. آزمایش مقاومت فشاری؛ (الف) دستگاه آزمایش مقاومت فشاری؛ (ب) نحوه شکست نمونه فشاری بتن پلیمری

۴-۲. آزمایش مقاومت خمشی

جهت اندازه‌گیری مقاومت خمشی، براساس استاندارد ASTM C78[۱۵]، نمونه‌های منشوری به ابعاد ۱۰۰ × ۱۰۰ × ۳۵۰ میلی‌متر ساخته شد. نمونه‌های بتن پلیمری ساخته‌شده ۷ روز در محیط آزمایشگاه نگهداری می‌شوند. سپس روی دو تکیه‌گاه مفصلی قرار گرفته و به‌صورت چهار نقطه‌ای، مطابق شکل ۳، تحت بارگذاری قرار گرفتند. در این آزمایش خمش چهار نقطه فاصله دو تکیه‌گاه پایین از هم ۳۰۰ میلی‌متر، همچنین سرعت بارگذاری در این آزمایش ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه است. در این آزمایش از دو عدد جابه‌جایی سنج الکترونیکی در تکیه‌گاه و یک عدد در وسط نمونه استفاده شد.

بدین‌ترتیب حاصل تفریق میانگین اعداد در تکیه‌گاه و عدد ثبت‌شده توسط جابه‌جایی سنج در وسط نمونه، مقدار تغییر شکل را نشان می‌دهد.

(الف)

(ب)

شکل ۳. (الف) دستگاه آزمایش خمش چهار نقطه؛ (ب) نمونه منشوری بتن پلیمری مسلح به الیاف

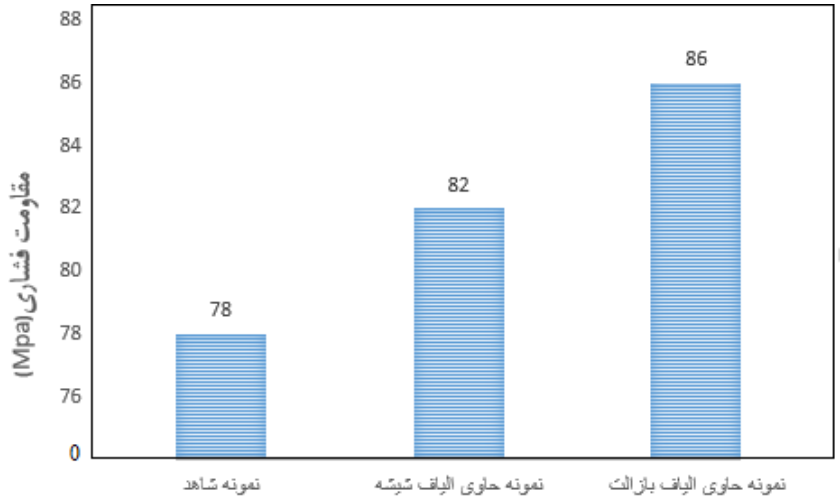
۵. بررسی و تفسیر نتایج آزمایشگاهی

۵-۱. آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های این پژوهش در جدول ۳ و شکل ۴ ارائه شده است. براساس جدول ۳ نمونهٔ حاوی الیاف بازالت نسبت به نمونه شاهد ۱۱ درصد و نمونهٔ حاوی الیاف شیشه ۶ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. دلیل این افزایش مقاومت فشاری استفاده الیاف در بتن پلیمری است؛ همچنین دلیل افزایش مقاومت فشاری نمونهٔ حاوی الیاف بازالت نسبت به نمونهٔ حاوی الیاف شیشه، خواص مکانیکی بهتر الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه می‌باشد. در شکل ۵ نمونه بدون الیاف و حاوی الیاف پس از بارگذاری ارائه شده است. در نمونه حاوی الیاف پس از بارگذاری جداشدگی کمتر و ترک‌های ریزتر همراه با قطر کمتر نسبت به نمونه شاهد به‌وجود آمد.

جدول ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نام نمونه	مقاومت فشاری (MPa)
نمونه شاهد	۷۸
نمونه حاوی الیاف شیشه	۸۲
نمونه حاوی الیاف بازالت	۸۶



شکل۴. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته‌شده

(ب) **(الف)**

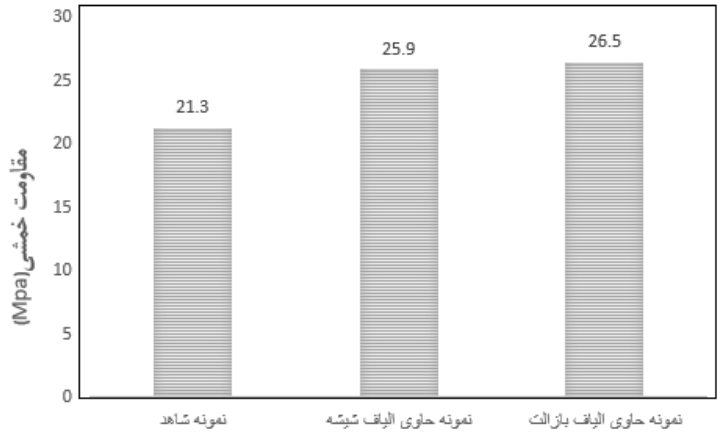
شکل ۵. (الف) نمونه شاهد؛ (ب) نمونه حاوی الیاف

۵-۲. آزمایش مقاومت خمشی

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌های بتن پلیمری ساخته شده در جدول ۴ و شکل ۶، نمونهٔ مسلح‌شده با الیاف بازالت ۲۵ درصد و نمونهٔ مسلح‌شده با الیاف شیشه ۲۲ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت خمشی داشته است. نمونه بدون الیاف شکست نسبتاً تردتری نسبت به نمونه حاوی الیاف از خود نشان داد. دلیل این افزایش مقاومت خمشی استفاده از الیاف بوده؛ همچنین افزایش ظرفیت خمشی نمونهٔ حاوی الیاف بازالت نسبت به شیشه، خواص مکانیکی مطلوب‌تر بازالت نسبت به شیشه است. در شکل ۷ نمونه حاوی الیاف پس از بارگذاری ارائه شده است.

جدول ۴. نتایج آزمایش مقاومت خمشی

نام نمونه	مقاومت خمشی (MPa)
نمونه شاهد	۲۱/۳
نمونه حاوی الیاف بازالت	۲۶/۵
نمونه حاوی الیاف شیشه	۲۵/۹



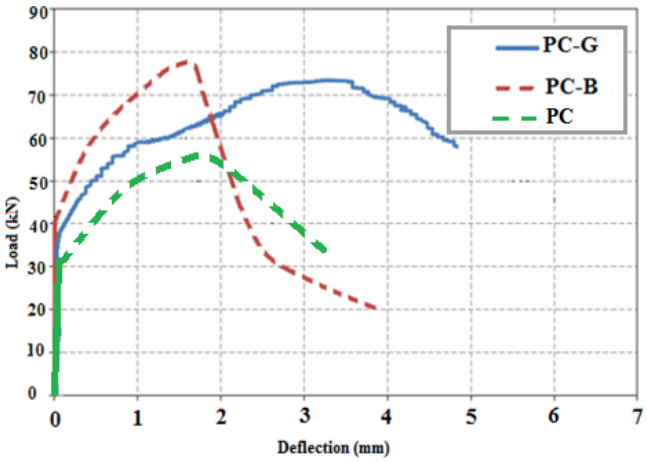
شکل۶. تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته‌شده

(الف)

(ب)

شکل ۷. (الف) نمونه بدون الیاف پس از بارگذاری؛ (ب) نمونه حاوی الیاف پس از بارگذاری

نتایج مربوط به آزمایش خمش نشان می‌دهد که با افزودن الیاف، مقاومت خمشی افزایش پیدا می‌کند. این افزایش مقاومت منجر به انتقال تنش کششی از بتن به الیاف می‌شود. در واقع این الیاف مانند پلی بین دو ترک در سطح بتن شده و اجازهٔ جدا شدن بیشتر را نمی‌دهد. در شکل ۸ تصویر نمودار بار ـ تغییر مکان نمونه‌های بتن پلیمری حاوی الیاف بازالت و شیشه قابل مشاهده است. با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای، می‌توان مدول گسیختگی (تنش کششی دورترین تار نمونهٔ بتن پلیمری در بار حداکثر)، نیرو و تغییر شکل در لحظهٔ ترک‌خوردگی، تنش در لحظهٔ ترک‌خوردگی، حداکثر نیروی قابل تحمل توسط بتن پلیمری، تغییر شکل متناظر با بار حداکثر، مقدار انرژی جذب شده در لحظهٔ ترک‌خوردگی (E0) که برابر با سطح زیر نمودار بار ـ تغییر مکان در لحظه ترک‌خوردگی است، انرژی جذب‌شده توسط نمونه تا بار حداکثر (Emax) و انرژی جذب‌شده تا بار نهایی (Eu) که برابر با سطح زیر منحنی بار ـ تغییر مکان تا ۸۵ درصد بار حداکثر در شاخهٔ نزولی است را محاسبه کرد.



شکل ۸. نمودار بار- تغییر مکان بتن پلیمری حاوی الیاف بازالت و شیشه تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

حداکثر نیروی قابل تحمل در نمونه‌های PC-B، PC-G و PC به ترتیب برابر با ۷۵/۷، ۷۴/۱ و ۵۹/۴ کیلو نیوتن به‌دست آمد. همچنین تنش در لحظهٔ اولین ترک‌خوردگی در نمونه‌های PC-B و PC-G به ترتیب برابر با ۱۰/۸۳ و ۹/۷۱ مگاپاسکال ثبت شد.

۵-۳. بررسی مقدار انرژی مستهلک‌شده

انرژی جذب‌شده در نمونهٔ حاوی الیاف بازالت در نقطهٔ حداکثر و نهایی بیشتر از نمونه حاوی الیاف شیشه ثبت شده است. این افزایش به‌دلیل مقاومت کششی بیشتر الیاف بازالت نسبت به شیشه است. در جدول ۵ انرژی جذب‌شده در لحظهٔ اولین ترک‌خوردگی، انرژی جذب‌شده تا نیروی حداکثر و انرژی جذب شده تا نقطهٔ نهایی ارائه شده است.

جدول ۵. انرژی جذب‌شده توسط نمونه‌ها در لحظهٔ ترک‌خوردگی، بار حداکثر و نهایی

نام طرح	E0 (N.m)	Emax (N.m)	Eu (N.m)
PC-G	۸۰۷	۳۵۸۰	۳۹۷۸
PC-B	۱۱۰۹	۴۲۵۶	۴۶۲۰

۵-۴. شاخص‌های طاقت

شاخص طاقت، ظرفیت استهلاک انرژی در نمونه را نشان می‌دهد. به منظور تخمین رفتار خمشی، درجهٔ انعطاف‌پذیری و مقدار انرژی جذب‌شده براساس اندیس‌های طاقت معرفی می‌شود. مطابق با استاندارد ASTM C1018[۱۶]، شاخص طاقت به‌صورت نسبت انرژی تا تغییر مکان مشخص به انرژی ترک‌خوردگی اولیه تعریف می‌شود. به‌طورکلی، شاخص طاقت Im برابر با انرژی مستهلک شده تا تغییر

مکان معادل $(m+1)/2$؛ برابر تغییر مکان اولین ترک‌خوردگی به انرژی مستهلک تا نقطه ترک‌خوردگی می‌باشد. لازم به ذکر است که انرژی مستهلک شده برابر با سطح زیر نمودار بار ـ تغییر مکان تا نقطهٔ مورد نظر است. در جدول ۴-۲ اندیس‌های طاقت برای نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش ارائه شده است. در جدول ۶ گسترهٔ شاخص طاقت برای بتن‌های الیافی براساس ASTM C1018[۱۶]، قابل مشاهده است. با مقایسهٔ اعداد به‌دست آمده در دو جدول ۶ و ۷ مشاهده می‌شود شاخص طاقت محاسبه شده برای نمونه‌ها در محدودهٔ مجاز استاندارد ASTM C1018[۱۶]، قرار دارد.

جدول ۶. مقادیر شاخص طاقت براساس استاندارد ASTM C1018[۱۶]

نام طرح	I5	I10	I20
PC-G	۴/۲	۶/۳	۱۸/۷۵
PC-B	۴/۹	۸/۴۶	۱۹/۸۸

جدول ۷. محدودهٔ مجاز شاخص طاقت برای بتن‌های الیافی مطابق با ASTM C1018[۱۶]

Im	محدود G مشاهده شده برای بتن الیافی
I_5	۱-۶
I_{10}	۱-۱۲
I_{20}	۱-۲۵

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های انجام شده، خلاصهٔ نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

همان‌طور که در تحقیق‌های پیشین مشهود است در این پژوهش نیز با افزایش مقدار الیاف، کارایی و روانی بتن کاهش یافته و با افزایش مقدار رزین کارایی و روانی بتن افزایش می‌یابد.

مسلح کردن بتن پلیمری با استفاده از الیاف بازالت و شیشه به ترتیب باعث افزایش ۱۱ و ۶ درصد مقاومت فشاری نسبت به نمونه بدون الیاف شد.

مسلح کردن بتن پلیمری با الیاف بازالت و شیشه به ترتیب باعث افزایش ۲۵ و ۲۲ درصد مقاومت خمشی نسبت به نمونه بدون الیاف شد.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن پلیمری همچنین مشخصات الیف‌ها، الیاف بازالت نتایج مطلوب‌تری نسبت به الیاف شیشه دارد؛ دلیل آن خواص مکانیکی مطلوب‌تر آن نسبت به الیاف شیشه است.

۷. منابع

[1] El-Kholy,A.M., and Dahish,H.A. (2016). "Improved confinement of reinforced concrete columns," *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 7, pp. 717–728.

[2] Frangou, M., Pilakoutas, K., and Dritsos, S. (1995). "Structural repair/strengthening of RC columns, "*Construction and Building Materials,* Vol. 9, No. 5, pp. 259-266.

[3] Walters, D. Gerry; Krauss PD. (1996). " Polymer Concrete - Structural Applications State-of-the-Art Report Reported by ACI Committee 548". *Man Concr Pract*..

[4] Moodi F, Kashi A, Ramezanianpour AA, Pourebrahimi M." Investigation on mechanical and durability properties of polymer and latex-modified concretes"

[5] Zhong, P., Hu, Z., Griffa, M., Wyrzykowski, M., Liu, J., Lura, P., b. (2021). "Mechanisms of internal curing water release from retentive and non-retentive superabsorbent polymers in cement paste". *Cement Concrete Research*.Vol. 147,pp, 106494.

[6] Hu, B., Zhang, N.L., Liao, Y.T., Pan, Z.W., Liu, Y.P., Zhou, L.C., et, a.l. (2018). "Enhanced flexural performance of epoxy polymer concrete with short natural fibers." *Sci China Technol Sci*.Vol.61, No.8, PP.13–1107.
[7] Griffiths, R., Ball, A. (2000). "An assessment of the properties and degradation behaviour of glass-fibre-reinforced polyester polymer concrete." *Composites science and technology*., Vol.60, No.14, pp.2747-2753.
[8] Gao, Y., romero, P., Zhang, H., Huang, M., Lai, F. (2019). "Unsaturated polyester resin concrete: A review." Construction and Building Materials., Vol.228.
[9] Moodi, F., Kashi, A., Ramezanianpour, A.A., Pourebrahimi, M. (2018). "Investigation on mechanical and durability properties of polymer and latex-modified concretes." Construction and Building Materials.Vol.191, pp.145-154.
[10] Hameed, A.M., Hamza, M.T. (2018). "Recycling the construction and demolition waste to produce polymer concrete." Journal of Physics: Conference Series. Vol.1003, No.1.
[11] Sanaei, Ataabadi, H., Zare, A., Rahmani, H., Sedaghatdoost, A., Mirzaei, E. (2021). "Lightweight dense polymer concrete exposed to chemical condition and various temperatures." An experimental investigation. *Journal of Building Engineering*.
[12] 2022.10.08. http://sirjannano.com/category/58
[13] ASTM C192/C192M-16, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Speciments in the Laboratory, ASTM International West Conshohocken, PA, USA, 2016.
[14] ACI 318-14 (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete, An ACI Standard, American Concrete Institute, USA.
[15] ASTM C78/C78M (2010). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with third-point Loading), ASTM Internatinal West Conshohocken, PA, USA.
[16] ASTM C 1018-97 (1998). "Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete," *ASTM International*, U.S.A.