

Investigating the effect of Fibers on the Mechanical properties of Lightweight Polyester Polymer Concrete

Mohammad Mahdi Shiravi ¹, Mohammad Reza Eftekhari ^{2*}

1- M.S Student of structure, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

ABSTRACT

Due to its desirable properties, polymer concrete is used to repair or build structures that require both mechanical resistance and high durability in a short period of time. On the other hand, reducing the weight of polymer concrete by using light aggregates can double the benefits of using this type of concrete in practical cases in order to make it easier to repair damaged concrete or use it in special conditions. Since the increase in concrete strength usually results in a decrease in ductility, therefore, the use of fibers in the concrete matrix can largely compensate for the problem of the decrease in ductility. The aim of this research is to investigate the mechanical properties of lightweight optimized polyester polymer concrete (with and without fibers) and compare it with the mechanical properties of lightweight concrete. To check the mechanical properties of polymer concrete, compressive strength, tensile strength, flexural strength, impact resistance and abrasion resistance tests were used. The results showed that in line with the remarkable improvement of the mechanical resistance of polymer concrete compared to light concrete, the addition of fibers can improve the mechanical properties of polymer concrete. In this study, the use of 0.25 percent by volume of composite fibers (polypropylene and Corta) in the mixing design of polymer concrete increases the compressive, tensile, flexural, and abrasion resistance by 9.1, 8.8, 6.2, and 6.3 percent, respectively, compared to polymer concrete without fiber. Also, the presence of fibers in the structure of polymer concrete, like ordinary concrete, improves the impact resistance of concrete and its better formability.

ARTICLE INFO

Receive Date: 09 September 2022

Revise Date: 24 October 2022

Accept Date: 24 December 2022

Keywords:

Polymer concrete,
Polyester resin,
Mechanical strengths,
Impact resistance,
Abrasion resistance

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.356333.2904>

*Corresponding author: Mohammad Reza Eftekhari

Email address: eft@ iut.ac.ir

بررسی تاثیر الیاف بر خواص مکانیکی بتن پلیمری پلی استری سبک وزن

محمد مهدی شیروی^۱، محمدرضا افتخار^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

از بتن پلیمری به دلیل خواص مطلوب، برای تعمیر و یا ساخت سازه‌هایی که نیاز هم‌زمان به مقاومت مکانیکی و دوام بالا در مدت زمان کوتاه دارند استفاده می‌شود. از طرفی کاهش وزن بتن پلیمری با استفاده از سنگ دانه‌های سبک، می‌تواند مزایای کاربرد این نوع بتن را در موارد عملی به منظور سهولت بیش‌تر در ترمیم بتن‌های آسیب دیده یا استفاده در شرایط خاص دو چندان نماید. از آن جا که افزایش مقاومت بتن، معمولاً کاهش شکل پذیری را به دنبال دارد، لذا استفاده از الیاف در ماتریس بتن، می‌تواند تا حد زیادی مشکل کاهش شکل پذیری را جبران نماید. هدف از این پژوهش، بررسی خواص مکانیکی بتن پلیمری پلی استری بهینه شده‌ی سبک وزن (با و بدون الیاف) و مقایسه‌ی آن با خواص مکانیکی بتن سبک می‌باشد. برای بررسی خواص مکانیکی بتن پلیمری از آزمایشات مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، مقاومت در برابر ضربه و مقاومت در برابر سایش استفاده گردید. هم‌چنین، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) به منظور بررسی تاثیر الیاف بر ریز ساختار نمونه‌های بتن پلیمری استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که هم راستا با بهبود چشم‌گیر مقاومت‌های مکانیکی بتن پلیمری نسبت به بتن سبک، افزودن الیاف می‌تواند خواص مکانیکی بتن پلیمری را ارتقا دهد. در این تحقیق، استفاده از ۰.۲۵ درصد حجمی الیاف ترکیبی (پلی پروپیلن و کورتا) در طرح اختلاط بتن پلیمری، سبب افزایش مقاومت فشاری، کششی، مقاومت خمشی و مقاومت در برابر سایش به ترتیب به میزان ۹/۱، ۸/۸، ۶/۲ و ۶/۳ درصد نسبت به بتن پلیمری فاقد الیاف شده است. هم‌چنین وجود الیاف در ساختار بتن پلیمری، همانند بتن معمولی، بهبود مقاومت بتن در برابر ضربه و شکل پذیری بهتر را به دنبال دارد. آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی حاکی از پیوستگی و انسجام الیاف پلی پروپیلن و ماتریس بتن پلیمری است که می‌تواند توجیه مناسبی برای ارتقای خواص مکانیکی بتن پلیمری حاوی الیاف محسوب شود.

کلمات کلیدی: بتن پلیمری، رزین پلی استر، مقاومت مکانیکی، مقاومت در برابر سایش، مقاومت در برابر ضربه.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.356333.2904	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.356333.2904	۱۴۰۲/۰۷/۳۰	۱۴۰۱/۱۰/۰۳	۱۴۰۱/۱۰/۰۳	۱۴۰۱/۰۸/۰۲	۱۴۰۱/۰۶/۱۸
محمدرضا افتخار eft@cc.iut.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

بتن معمولی، به دلیل مزایایی هم چون هزینه‌ی کم، سهولت اجرا و مقاومت فشاری مناسب از متداول‌ترین ماده‌ی ساختمانی مورد استفاده در سراسر جهان می‌باشد [۱]. در مقابل، مقاومت خمشی و کششی کم، وزن مخصوص زیاد، دوام پایین در محیط‌های مخرب، زمان گیرش طولانی و نفوذپذیری بالا نیز از معایب این نوع بتن است [۲-۳]. بسیاری از سازه‌ها در طول عمر مفید خود، به علت کاهش مقاومت ناشی از قرارگیری در معرض محیط‌های مخرب، به سمت زوال پیش می‌روند. به همین دلیل، در دهه‌های اخیر نیاز به مواد جدید با مقاومت مکانیکی بالا همراه با دوام زیاد در برابر محیط‌های مخرب، در ساخت و ساز افزایش یافته است. بتن پلیمری، در زمره‌ی این مواد جدید است.

بتن پلیمری^۱، از ترکیب سنگ دانه و فیلر با رزین ساخته می‌شود. معمولاً از رزین‌های پلی استر، اپوکسی، فوران، پلی اورتان، اوره فرمالدهید و آکرلیک برای ساخت این نوع بتن استفاده می‌شود [۴-۵]. با توجه به تنوع رزین، سنگ دانه و فیلر مورد استفاده در بتن پلیمری و تاثیر متفاوت هر یک از این مصالح بر خواص مکانیکی بتن پلیمری، تعدادی از پژوهشگران به انجام آزمایشات مختلف جهت تعیین مقاومت مکانیکی بتن پلیمری حاوی مواد مختلف پرداخته‌اند. صرامی^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۶، مزایای استفاده از نانو فیلرهای تیتانیوم دی اکسید و اکسید روی و هم‌چنین فیلرهای میکروسیلیس و لجن کارخانه‌های سنگ‌بری را بر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن پلیمری پلی استری بررسی کردند [۶]. توفیق^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۶، رفتار فشاری و کششی بتن پلیمری حاوی مقادیر مختلف رزین اپوکسی را تعیین کردند [۲]. حسنی نیکی^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۷، تاثیر استفاده از سنگ دانه‌ی بازالت را بر خواص مکانیکی بتن پلیمری اپوکسی بررسی کرده و درصد بهینه‌ی استفاده از آن را تعیین نمودند [۷]. جیانگ^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۸، اثرات اشعه‌ی ماوراء بنفش را بر خواص مکانیکی، حرارتی و دوام بتن پلیمری پلی استری مورد بررسی قرار دادند [۸]. جعفری^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۸، خواص مکانیکی بتن پلیمری اپوکسی را از طریق آزمایشات مخرب و غیرمخرب بررسی کردند [۹]. شن^۷ و همکاران در سال ۲۰۲۰، اقدام به بررسی تاثیر سرامسیت^۸ و پودر لاستیک^۹ بر خواص مکانیکی و ریزساختار بتن پلیمری پلی استری کردند [۱۰]. ثنایی^{۱۰} و همکاران در سال ۲۰۲۰، خواص مکانیکی و دوام بتن پلیمری پلی استری سبک‌وزن را در دماهای مختلف مورد آزمایش قرار دادند و نتایج را با بتن معمولی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که افزایش مقدار رزین، باعث بهبود مقاومت خمشی، فشاری و کششی می‌شود، ولی مقدار رزین بیش‌تر از ۲۷ درصد، تاثیر کمی بر خواص بتن سبک پلیمری دارد. این محققین نتیجه گرفتند که بتن سبک پلیمری، مقاومت عالی در مقابل محلول‌های شیمیایی دارد، اما با افزایش دما خواص بتن کاهش می‌یابد. در این تحقیق به ازای مقدار رزین ۲۴ درصد، بالاترین عملکرد در بتن پلیمری گزارش شده است [۱۱]. فردوس^{۱۱} و همکاران در سال ۲۰۲۰، تاثیر چهار نسبت مختلف ماتریس به سنگ دانه را بر خواص مکانیکی بتن پلیمری اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد مقدار بهینه‌ی رزین به فیلر برای دستیابی به یک مخلوط همگن، ۶۰:۴۰ بوده و نسبت بهینه‌ی ماتریس به سنگ‌دانه، برای رسیدن به یک تعادل مناسب بین هزینه و عملکرد بتن پلیمری، ۱:۱،۳۵ می‌باشد و با کاهش نسبت ماتریس به سنگ دانه، مقاومت کششی، خمشی و دوام بتن پلیمری کاهش می‌یابد. هم‌چنین بیان کردند مقاومت خمشی بتن پلیمری تقریباً ۳۵ درصد از مقاومت کششی آن بیش‌تر است [۱۲]. حیدر نژاد^{۱۲} و همکاران در سال ۲۰۲۰، به بررسی خواص مکانیکی بتن پلیمری اپوکسی سبک‌وزن در دماهای مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش نسبت رزین، باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی، افزایش مقاومت در برابر ضربه و افزایش جذب انرژی در بتن پلیمری سبک‌وزن می‌شود. هم‌چنین با کاهش دما از ۲۵ به ۱۵- درجه‌ی سانتی‌گراد،

1. Polymer concrete

2. Sarami

3. Toufigh

4. Hassani Niaki

5. Jiang

6. Jafari

7. Shen

8. Ceramsite

9. Waste rubber powder

10. Sanaei

11. Ferdous

12. Heidarnazhad

مقاومت فشاری، کششی، خمشی و مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد در حالی که جذب انرژی، مقاومت در برابر ضربه و شکل‌پذیری کاهش می‌یابد [۱۳]. ثنایی و همکاران در سال ۲۰۲۱، تاثیر افزایش دما بر خواص مکانیکی و ریزساختار بتن پلیمری پلی استری سبک‌وزن را بررسی کردند. نتایج نشان داد دماهای بالاتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، تاثیر مخربی بر خواص بتن پلیمری دارد به گونه‌ای که مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲۴ درصد رزین، در دمای ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۱۲، ۲۹، ۵۹ و ۸۵ درصد از نمونه‌های قرار داده شده در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد کم‌تر است [۱۴]. سارد و همکاران در سال ۲۰۲۲، خواص مکانیکی بتن پلیمری ساخته شده با استفاده از رزین پلی استر بازیافتی اصلاح شده با مونومر استایرن^{۱۳} و متیل متاکریلات^{۱۴} را بررسی کردند. نتایج نشان داد مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن پلیمری اصلاح شده با استایرن، به ترتیب ۱۹٫۵، ۲۵٫۰ و ۲۸٫۲ درصد بیش‌تر از بتن پلیمری حاوی استایرن است [۱۵].

در خصوص تاثیر الیاف بر خواص مکانیکی بتن پلیمری نیز تحقیقات اندکی در ادبیات موضوع دیده می‌شود. وی پولانا^{۱۵} و همکاران در سال ۱۹۹۸، خواص مکانیکی بتن پلیمری اپوکسی و پلی استری حاوی مقادیر مختلف رزین و الیاف شیشه را در دماهای متفاوت بررسی کردند [۱۶]. ریز^{۱۶} در سال ۲۰۰۶، تاثیر الیاف‌های طبیعی نارگیل، تفاله‌ی نیشکر و موز را بر خواص مکانیکی بتن پلیمری اپوکسی بررسی نمود [۱۷]. مارتینز باربوتا^{۱۷} و همکاران در سال ۲۰۱۳، تأثیر الیاف طبیعی لوف^{۱۸} و اشعه‌ی گاما را بر خواص مکانیکی بتن پلیمری پلی استری مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. حسنی نیای^{۱۹} و همکاران در سال ۲۰۱۸، تاثیر الیاف بازالت^{۲۰} و نانوس^{۲۱} را بر خواص مکانیکی بتن پلیمری اپوکسی تا دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بررسی کردند [۱۹]. هو^{۲۲} و همکاران در سال ۲۰۱۸، تاثیر مقادیر مختلف الیاف طبیعی کوتاه (رامی^{۲۳} و سیسال^{۲۴}) را در بتن پلیمری اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که درصد کمی از این الیاف طبیعی (۰٫۳۶ درصد حجمی)، مقاومت خمشی بتن پلیمری اپوکسی را بدون کاهش مقاومت فشاری، به طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. در این تحقیق، میزان افزایش مقاومت خمشی بتن پلیمری برای الیاف رامی و سیسال به ترتیب ۲۵٫۳ و ۱۰٫۴ درصد گزارش شده است [۲۰]. شن^{۲۵} و همکاران در سال ۲۰۱۹، تاثیر الیاف شیشه و سرامسیت را بر خواص مکانیکی و دوام بتن پلیمری پلی استری بررسی کردند. نتایج نشان داد الیاف شیشه، مقاومت فشاری و خمشی بتن پلیمری را به ترتیب ۲ و ۱۱ درصد افزایش داده است. همچنین مقاومت فشاری و خمشی بتن پلیمری حاوی سرامسیت، حدود ۵۰ درصد کاهش یافته است [۲۱].

چنانچه در تاریخچه‌ی موضوع ملاحظه می‌شود، تحقیقات بسیار زیادی در دهه‌های گذشته توسط پژوهشگران، پیرامون خواص مکانیکی بتن پلیمری حاوی سنگ دانه‌ی معمولی و الیاف انجام شده است، ولی علی‌رغم مطالعات بسیار انجام شده، در خصوص خواص مکانیکی بتن پلیمری پلی استری سبک‌وزن مستندات قابل توجهی وجود ندارد. رزین پلی استر در مقایسه با سایر رزین‌های پلیمری، به دلیل فراوانی و قیمت کم‌تر، گزینه‌ی مناسبی برای ساخت بتن‌های پلیمری محسوب می‌شود. استفاده از این رزین در ساخت بتن، می‌تواند ضمن توسعه‌ی خواص مکانیکی مطلوب در آن، دوام و طول عمر سازه‌های بتنی ساخته شده و تقویت شده با این بتن را نیز در مدت زمان بسیار کوتاهی بهبود ببخشد. لذا در این تحقیق، به بررسی خصوصیات مکانیکی بتن پلیمری پلی استری بهینه شده‌ی سبک‌وزن (با و بدون الیاف) و مقایسه‌ی آن با خصوصیات بتن سبک پرداخته شده است.

¹³. Styrene

¹⁴. Methyl methacrylate

¹⁵. Vipulanandan

¹⁶. Reis

¹⁷. Martínez-barrera

¹⁸. Luffa fiber

¹⁹. Hassani Niaki

²⁰. Basalt fiber

²¹. Clay Nano particles

²². Hu

²³. Rami fiber

²⁴. Sisal fiber

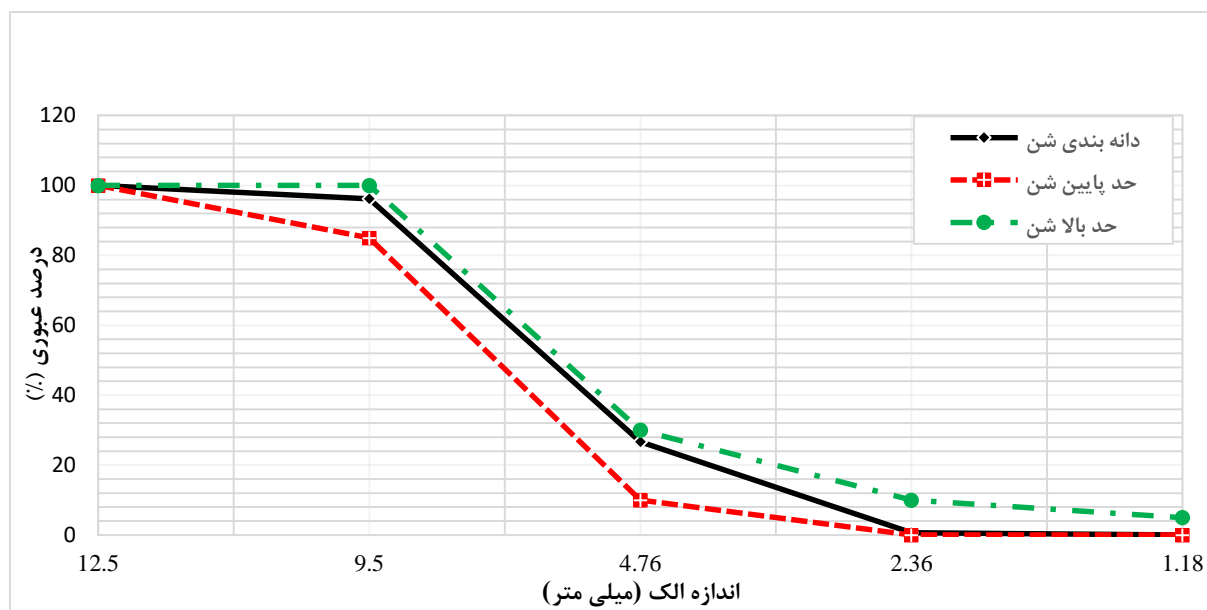
²⁵. Shen

۲ - مصالح، ساخت و آزمایش نمونه‌ها

۲ - ۱ مواد و مصالح

در این تحقیق برای ساخت بتن پلیمری، از رزین پلی استر غیراشباع ارتوفتالیک FARAPOL O115 ساخت شرکت فرایپل استفاده شد. برای آماده‌سازی رزین نیز از کبالت به عنوان تسریع کننده‌ی واکنش و از پراکسید به عنوان شروع کننده‌ی واکنش استفاده گردید. هم‌چنین در ساخت بتن پلیمری سبک، ماسه‌ی سیلیسی با بزرگ‌ترین بعد ۳۰۰ میکرون ساخت شرکت چیروک به عنوان فیلر و درشت دانه‌ی لیکا با حداکثر بعد ۹/۵ میلی‌متر ساخت شرکت لیکا مطابق با دانه‌بندی شکل ۱ مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات رزین، درشت‌دانه‌ی مصرفی، کبالت و پراکسید به ترتیب در جداول ۱ تا ۳ آمده است. برای ساخت بتن پلیمری، نسبت حجمی اختلاط رزین، کبالت و پراکسید به ترتیب با نسبت ۱۰۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد حجمی و اختلاط درشت دانه و فیلر به ترتیب با نسبت ۴۰ به ۶۰ می‌باشد. در نمونه‌های پلیمری حاوی الیاف، از ۰/۲۵ درصد حجمی الیاف ترکیبی (پلی پروپیلن و کورتا) ساخت شرکت نخ و گرانول سیرجان، با نسبت برابر استفاده گردید. مشخصات الیاف مصرفی، در جدول ۳ نمایش داده شده است. هم‌چنین جهت ساخت بتن سبک، از سیمان پرتلند تیپ ۲ با مشخصات فیزیکی و شیمیایی موجود در جداول ۴ و ۵، فوق روان‌کننده‌ی پایه پلی کربوکسیلات با مشخصات بیان شده در جدول ۶، درشت دانه‌ی لیکا و فیلر ماسه‌ی سیلیسی، مشابه با مشخصات مورد استفاده در بتن پلیمری استفاده گردید. به منظور امکان مقایسه بین خواص بتن سبک و بتن پلیمری، با اختلاط نسبت‌های مختلف مصالح، طرح اختلاطی که مقاومت فشاری بتن سبک با حداکثر مقاومت فشاری بتن پلیمری (بتن پلیمری حاوی الیاف) برابر می‌باشد، انتخاب شد.

در تحقیقات موجود پیرامون خواص مکانیکی بتن پلیمری پلی استری سبک‌وزن، مقدار رزین در بازه‌ی ۲۰ تا ۳۰ درصد استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر نیز با توجه به تحقیقات گذشته و بازه‌ی مقدار رزین مورد استفاده در آن‌ها و هم‌چنین محدوده‌ی مقاومت فشاری حداکثر ۴۰/۰ مگاپاسکال، سه مقدار رزین ۲۵، ۲۷/۵ و ۳۰ درصد انتخاب گردید [۱۱ و ۱۴]. سپس برای یافتن طرح اختلاط بهینه‌ی بتن پلیمری، با سه مقدار رزین ۲۵، ۲۷/۵ و ۳۰ درصد، نمونه‌های مکعبی بتن پلیمری ساخته شد و آزمایش مقاومت فشاری روی آن‌ها انجام گردید. مشاهده شد که در نمونه‌های با مقدار رزین ۲۵ درصد، سنگ دانه‌ها به طور کامل با رزین پوشانده نمی‌شوند ولی نمونه‌های با مقدار رزین ۲۷/۵ و ۳۰ درصد، به طور کامل با رزین اشباع و مقاومت فشاری آن‌ها نیز نزدیک به هم می‌باشد. بنابراین مقدار رزین ۲۷/۵ درصد، به عنوان مقدار رزین مناسب انتخاب گردید و در تمامی نمونه‌ها (با و بدون الیاف)، از این مقدار رزین استفاده شد. در جدول ۷، مقادیر مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط بتن پلیمری با درصد‌های مختلف رزین، نشان داده شده است. در این جدول، نماد PC برای بتن پلیمری، PC.F برای بتن پلیمری حاوی الیاف و عدد بعد از آن درصد رزین پلی استر را در آن نمایش می‌دهد.



شکل ۱: منحنی دانه بندی لیکا

جدول ۱: مشخصات رزین پلی استر

وزن مخصوص (g/cm ³)	ویسکوزیته (mPa.s)	حداکثر دمای قابل تحمل (°C)	زمان ژل شدن (min)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت خمشی (MPa)	جمع شدگی (%)	دمای اعوجاج (°C)
۱/۱۱-۱۱/۱۱۳	۳۳۵±۱۵	۱۴۰-۱۸۰	۱±۱۷	> ۶۰	> ۱۲۰	۱/۸	> ۶۰

جدول ۲: مشخصات درشت دانه‌ی لیکا

مشخصات فیزیکی	
۱/۲۲	وزن مخصوص (g/cm ³)
۱۳/۶۵	درصد جذب آب (%)
۱۷	وزن مخصوص خشک و میله خورده (g/cm ³)

جدول ۳: مشخصات فیزیکی کبالت و پراکسید*

کبالت	رنگ	وزن مخصوص (g/cm ³)	حالت فیزیکی	ویسکوزیته (mPa.s)
کبالت	بنفش	۰/۹۷	مایع غلیظ	۲۰۰-۵۰۰
پراکسید	بدون رنگ	۱/۱۷	مایع	۲۵/۰

* بر اساس کاتالوگ شرکت سازنده‌ی محصول.

جدول ۴: مشخصات الیاف مصرفی

مشخصات	مقدار	
	پلی پروپیلن	کورتا
طول (mm)	۱۲	۳۸
قطر (mm)	۰/۰-۱۷/۱۹	۰/۰-۱/۵
وزن مخصوص (g/cm ³)	۰/۹۱	۰/۹۱
مقاومت کششی (MPa)	۴۰۰	۸۰۰-۴۵۰

جدول ۵: مشخصات فیزیکی سیمان*

مشخصات فیزیکی	سطح مخصوص (m ² /kg)	زمان گیرش (min)			مقاومت فشاری (MPa)
		اولیه	ثانویه	۳ روزه	
ISIR389	۲۸۰	۴۵	۳۶۰	۱۰	۲۸ روزه
سیمان اردستان	۳۰۰	۱۳۰	۱۸۰	۲۰	۷ روزه

* بر اساس کاتالوگ شرکت سازندهی محصول.

جدول ۶: ترکیبات شیمیایی سیمان*

ترکیبات شیمیایی	درصد
SiO ₂	۲۲
AL ₂ O ₃	۵
Fe ₂ O ₃	۴
CaO	۶۴
MgO	۱/۷
SO ₃	۲/۱
K ₂ O	۰/۶۵
Na ₂ O	۰/۳۵

* بر اساس کاتالوگ شرکت سازندهی محصول.

جدول ۶: مشخصات فوق روان کننده*

پایه‌ی شیمیایی	نوع و رنگ	نقطه انجماد (°C)	وزن مخصوص (g/cm ³)
پلی کربوکسیلات	مایع عسلی کدر	۰/۰	۱/۰۵-۱/۱۰

* بر اساس کاتالوگ شرکت سازندهی محصول.

جدول ۷: مقایسه‌ی مقادیر مقاومت فشاری و چگالی بتن پلیمری در طرح‌های مختلف اختلاط

نام نمونه	رزین (%)	فیلر (%)	لیکا (%)	الیاف (%)	مقاومت فشاری (MPa)	چگالی (kg/m^3)
	۱ روزه					
۲۵PC	۲۵	۳۰	۴۵	-	۲۸/۹	۱۶۱۱/۵
۵/۲۷PC	۲۷/۵	۲۹	۴۳/۵	-	۴۴/۰	۱۶۰۳/۵
۳۰PC	۳۰	۲۸	۴۲	-	۴۶/۱	۱۵۹۷/۱
PC.F 27/5	۲۷/۵	۲۸/۹	۴۳/۴	۰/۲۵	۴۸/۰	۱۶۰۳/۴

۲-۲ ساخت نمونه‌ها

با توجه به استاندارد JSA 1181: 2005 [۲۲] که مربوط به نحوه‌ی اختلاط بتن پلیمری می‌باشد، ابتدا درشت دانه و فیلر به صورت خشک با هم مخلوط می‌شود. در ظرف جداگانه نیز، رزین و کبالت با هم مخلوط شده و سپس پراکسید به آن اضافه می‌شود. رزین به دست آمده، به مخلوط درشت دانه و فیلر اضافه شده و عمل مخلوط کردن به دقت انجام می‌شود. در نمونه‌های حاوی الیاف، پس از اضافه کردن رزین، الیاف به مخلوط اضافه شده و اجازه داده می‌شود تا عمل اختلاط به خوبی انجام شود. سپس بتن حاصل، در سه لایه داخل قالب ریخته می‌شود و هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم می‌گردد. پس از یک ساعت قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها به مدت یک روز، در محیط آزمایشگاه با دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد نگهداری می‌شوند. به منظور جلوگیری از چسبیدن رزین به قالب، قبل از ساخت بتن پلیمری، جداره‌های داخلی قالب با لایه‌ای از واکس رهاساز رزین از جنس پلی‌آلفین پوشانده می‌شود.

برای ساخت بتن سبک، سنگ دانه‌های لیکا به مدت ۲۴ ساعت در آب اشباع می‌گردد. سپس قبل از ساخت، سنگ دانه‌ها به مدت نیم ساعت بیرون از آب قرار داده می‌شود. سیمان پرتلند و ماسه‌ی سیلیسی داخل مخلوط‌کن ریخته شده و مخلوط می‌شوند. سپس سنگ دانه‌های لیکا به ترکیب مصالح داخل مخلوط‌کن اضافه شده و مجدد عمل اختلاط ادامه می‌یابد. آب و فوق روان‌کننده به مخلوط اضافه شده و مصالح با دقت مخلوط می‌شود. سپس بتن حاصل، در سه لایه داخل قالب ریخته شده و هر لایه با ۲۵ ضربه‌ی میله متراکم می‌شود. پس از ۲۴ ساعت قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در حوضچه‌ی آب عمل‌آوری می‌گردد. طرح اختلاط و مقاومت فشاری بتن سبک در جدول ۸ نشان داده شده است. در این مطالعه، از نماد LWC برای بتن سبک استفاده شده است.

جدول ۸: طرح اختلاط بتن سبک

نام طرح	$\frac{W}{C}$	لیکا (kg/m^3)	ماسه‌ی سیلیسی (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	فوق روان‌کننده (kg/m^3)	مقاومت فشاری (MPa)	چگالی (kg/m^3)
	۲۸ روزه							
LWC	۰/۳	۴۱۱/۱۲۵	۸۲۲/۳۰۸	۷۳۱/۹۷۵	۱۵۷/۳۵	۱۰/۹۸۳	۴۸/۰	۲۱۳۰/۵

با توجه به جداول ۷ و ۸، چگالی بتن پلیمری بهینه تقریباً ۲۵ درصد کم‌تر از چگالی بتن سبک می‌باشد. از طرفی کاهش چگالی بتن پلیمری با استفاده از سنگ دانه‌های سبک، می‌تواند مزایای کاربرد این نوع بتن را در موارد عملی به منظور سهولت بیشتر در ترمیم بتن‌های آسیب دیده یا استفاده در شرایط خاص دو چندان نماید.

۳ - آزمایشات

آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM 109C/M109 [۲۳] بر روی نمونه‌های مکعبی ۷۰ میلی‌متری، آزمایش‌های مقاومت کشش مستقیم و برزیلی مطابق با استانداردهای ASTM 190C [۲۴] و ASTM C496 [۲۵] بر روی نمونه‌های بریکت (با طول ۷۵، عرض حداکثر ۴۰ و حداقل ۲۵ میلی‌متر) و نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر، آزمایش مقاومت خمشی بر اساس استاندارد ASTM 78C [۲۶] به وسیله‌ی دستگاه خمش چهار نقطه‌ای بر روی نمونه‌های منشوری با ابعاد ۳۵۰ × ۱۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر انجام شد.

مطابق با آیین‌نامه‌ی ASTM 1138C [۲۷] دو روش (جت آب و زیر آب) برای اندازه‌گیری مقاومت سایشی بتن ارائه شده که بر روی نمونه‌های دیسکی شکل با قطر ۳۰۰ و ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر انجام می‌شود. با توجه به هزینه‌های بالای ساخت نمونه‌های بتن پلیمری مطابق با توصیه‌ی این آیین‌نامه‌ها، بر اساس طرح پژوهشی مودی و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۲۸]، از آزمایش لس‌آنجلس برای تعیین مقاومت سایشی بتن پلیمری استفاده گردید. برای این منظور، نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر در دستگاه لس‌آنجلس قرار گرفت و میزان کاهش جرم نمونه‌ها اندازه‌گیری شد [۲۹].

در این تحقیق، جهت بررسی مقاومت در برابر ضربه‌ی بتن، بر اساس توصیه‌ی ACI Committee. 544 [۳۰] از نمونه‌های دیسکی با قطر ۱۵۰ و ضخامت ۶۰ میلی‌متر استفاده گردید. برای انجام این آزمایش، یک وزنه‌ی ۴/۵ کیلوگرمی از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متری از سطح نمونه، به طور متناوب بر روی گوی فولادی سخت با قطر ۶۳/۵ میلی‌متری که در مرکز سطح نمونه قرار دارد، رها می‌گردد. تعداد دفعاتی که وزنه بر روی نمونه رها می‌شود تا ترک یا گسیختگی در نمونه ایجاد شود، نشان‌دهنده میزان جذب انرژی و مقاومت نمونه در برابر ضربه می‌باشد. در این پژوهش، ابتدا وزنه‌ی ۴/۵ کیلوگرمی برای آزمایش ضربه انتخاب شد، اما با توجه به تعداد ضربات بسیار زیادی که برای ایجاد ترک و شکست در نمونه‌های پلیمری نیاز بود، از وزنه‌ی ۹/۴ کیلوگرمی استفاده گردید. هم‌چنین به منظور ارزیابی میکرو ساختار نمونه‌های حاوی الیاف پلیمری، با استفاده از دستگاه LEO 1430VP، تصاویر SEM از قطعه‌ی کوچکی از سطح نمونه‌ها گرفته شد.

۴ - تحلیل نتایج

در این قسمت، نتایج آزمایشات مختلف انجام شده بر روی نمونه‌های بتن پلیمری و بتن سبک به تفصیل بیان می‌شود.

۴-۱ مقاومت فشاری

در جدول ۹، نتایج آزمایشات مکانیکی بتن در مورد آزمایش مقاومت فشاری، کششی، خمشی و سایش آمده است. با توجه به اطلاعات مندرج در جدول ۹ مقاومت فشاری نمونه‌های پلیمری حاوی الیاف، ۹/۱ درصد نسبت به مقاومت فشاری نمونه‌های پلیمری فاقد الیاف بیش‌تر است زیرا الیاف از طریق مسلح کردن ماتریس بتن، باعث بهبود مقاومت فشاری بتن می‌شود. با این وجود در برخی از مطالعات، برای افزودن الیاف پلی پروپیلن، افزایش مقاومت فشاری و در برخی دیگر کاهش مقاومت فشاری گزارش شده است [۳۱-۳۸]. بنابراین به نظر می‌رسد، تحقیقات بیش‌تری جهت بررسی تاثیر الیاف بر مقاومت فشاری بتن پلیمری لازم است.

جدول ۹: نتایج آزمایشات تعیین مقاومت مکانیکی نمونه‌ها

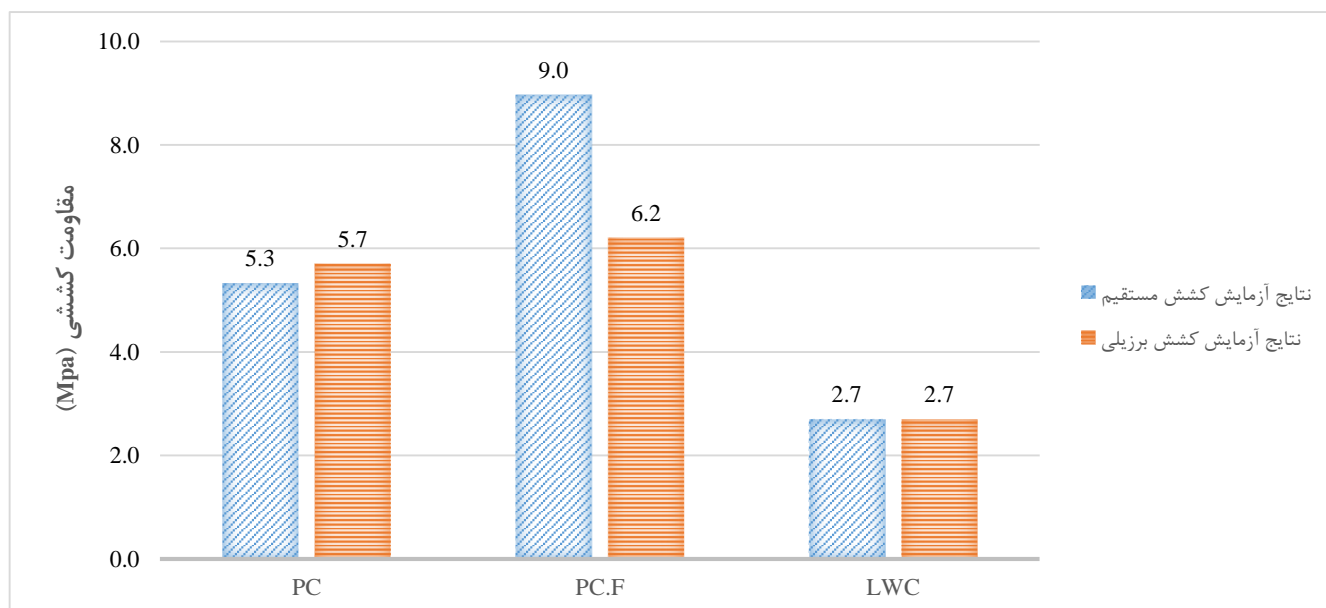
الف) آزمایش مقاومت فشاری			
PC.F (۱ روزه)	PC (۱ روزه)	LWC (۲۸ روزه)	N
۴۸/۰ (۱۱/۰)	۴۴/۰ (۹/۳)	۴۸/۰ (۸/۱)	۴
مقاومت فشاری (MPa)			
ب) آزمایش مقاومت خمشی			
PC.F (۱ روزه)	PC (۱ روزه)	LWC (۲۸ روزه)	N
۱۲/۰ (۹/۰)	۱۱/۳ (۱۱/۲)	۴/۶ (۱۲/۰)	۴
مقاومت خمشی (MPa)			
پ) آزمایش مقاومت سایشی			
PC.F (۱ روزه)	PC (۱ روزه)	LWC (۲۸ روزه)	N
۵/۹ (۱۰/۰)	۶/۳ (۹/۵)	۱۸/۵ (۱۱/۰)	۴
کاهش جرم (%)			

یادداشت: N = تعداد نمونه، LWC = بتن سبک، PC = بتن پلیمری، PC.F = بتن پلیمری حاوی الیاف و عدد داخل پرانتز، مقدار ضریب تغییرات (COV%) می‌باشد.

۴-۲ مقاومت کششی

معمولا برای تعیین مقاومت کششی ملات، از آزمایش کشش مستقیم و برای بررسی مقاومت کششی بتن، از آزمایش کشش برزیلی استفاده می‌شود. بتن پلیمری ساخته شده در این پژوهش، به علت استفاده از سنگ‌دانه‌ی درشت، جزو دسته‌ی بتن قرار می‌گیرد. با این حال، به منظور مقایسه‌ی بین دو روش مختلف تعیین مقاومت کششی، نتایج هر دو آزمایش در شکل ۲ نمایش داده شده است. مقایسه‌ی کمی و کیفی نتایج آزمایش کشش برزیلی نشان می‌دهد مقاومت کششی بتن پلیمری با و بدون الیاف علی‌رغم دوره‌ی عمل‌آوری ۱ روزه، به ترتیب ۲/۳ و ۲/۱ برابر مقاومت کششی بتن سبک می‌باشد. همچنین مقاومت کششی نمونه‌های پلیمری حاوی الیاف نسبت به نمونه‌های پلیمری فاقد الیاف ۸/۸ درصد افزایش یافته است، زیرا حضور الیاف باعث دوخته شدن ترک‌ها، پرشدن ریز ترک‌ها و درهم گره خوردن تمامی اجزای بتن پلیمری شده و در نتیجه گسیختگی کششی به سختی رخ می‌دهد. همچنین حضور الیاف، باعث ایجاد شکست نرم و جذب انرژی بالا در نمونه‌های حاوی الیاف می‌شود. در مقابل، شکست نهایی نمونه‌های بتن سبک و بتن پلیمری فاقد الیاف، به صورت ترد همراه با جذب انرژی پایین می‌باشد.

با توجه به شکل ۲، مقادیر مقاومت کششی بتن‌های فاقد الیاف، چه از نوع بتن سبک معمولی و چه از نوع بتن سبک پلیمری، حاصل از هر دو روش تعیین مقاومت کششی، تقریبا یکسان می‌باشد. با این وجود، مقاومت کششی حاصل از آزمایش کشش مستقیم و کشش برزیلی در بتن پلیمری حاوی الیاف، اختلاف زیادی دارند. به نظر می‌رسد با توجه به نقش الیاف در افزایش مقاومت کششی بتن، دقت در ساخت نمونه‌های بریکت به دلیل کوچکی نمونه می‌تواند دلیلی بر افزایش مقاومت کششی مستقیم نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی آزمایش کشش برزیلی باشد.



شکل ۲: نتایج آزمایش کشش مستقیم و کششی برزیلی در نمونه‌ها

۴ - ۳ مقاومت خمشی

با توجه به نتایج آزمایش مقاومت خمشی موجود در جدول ۹، مقاومت خمشی بتن پلیمری با و بدون الیاف، به ترتیب $2/6$ و $2/5$ برابر بتن سبک می‌باشد. همچنین افزودن الیاف باعث بهبود $6/2$ درصدی مقاومت خمشی بتن پلیمری شده است. زیرا الیاف مانند پل در ماتریس بتن عمل کرده و اجازه‌ی گسترش ترک‌ها را نمی‌دهد، بنابراین مقاومت خمشی افزایش می‌یابد. با این وجود، به دلیل مقدار کم الیاف مصرفی در نمونه‌های این تحقیق، مقدار افزایش مقاومت خمشی در آن‌ها اندک بوده و بلافاصله پس از ایجاد ترک خمشی در وجه کششی نمونه، شکست حادث می‌شود.

۴ - ۴ مقاومت در برابر سایش

درصد کاهش جرم نمونه‌ها در جدول ۹ ارائه شده است. نمونه‌های بتن سبک، کم‌ترین مقاومت در برابر سایش را در بین سایر نمونه‌ها دارد به گونه‌ای که میزان کاهش جرم آن به ترتیب $3/1$ و $2/9$ برابر بتن پلیمری با و بدون الیاف می‌باشد. همچنین الیاف، مقاومت سایشی بتن پلیمری را $6/3$ درصد بهبود بخشیده است، زیرا الیاف انرژی ناشی از اصابت گلوله‌ها به نمونه را به خود جذب کرده و پس از نمایان شدن الیاف نیز از پیشروی بیش‌تر تخریب جلوگیری می‌کند.

پس از انجام آزمایش سایش، مشاهده می‌شود که در بتن پلیمری تنها گوشه‌های نمونه دچار آسیب شده‌اند، اما نمونه‌های بتن سبک، علاوه بر کاهش زیاد جرم، در طول خود نیز دچار شکست شده‌اند که نشان دهنده‌ی آسیب پذیری زیاد بتن سبک در برابر سایش می‌باشد (شکل ۳).

مودی و همکاران در سال ۲۰۱۸، با انجام آزمایش لس‌آنجلس به منظور تعیین مقاومت سایشی نمونه‌ها نتیجه گرفتند که نمونه‌های بتن پلیمری حاوی ۲۰ درصد رزین پلی استر، $6/9$ درصد کاهش وزن داشته‌اند. همچنین از لحاظ شکل ظاهری، بتن پلیمری عملکرد بهتری از خود نشان داده است ولی بتن معمولی پس از آزمایش به شدت آسیب دیده است [۲۸].



شکل ۳: نمونه‌ها پس از قرارگیری در دستگاه لس آنجلس
شکل (الف) نمونه‌های بتن سبک، شکل (ب) نمونه‌های بتن پلیمری بدون الیاف و شکل (پ) نمونه‌های پلیمری حاوی الیاف

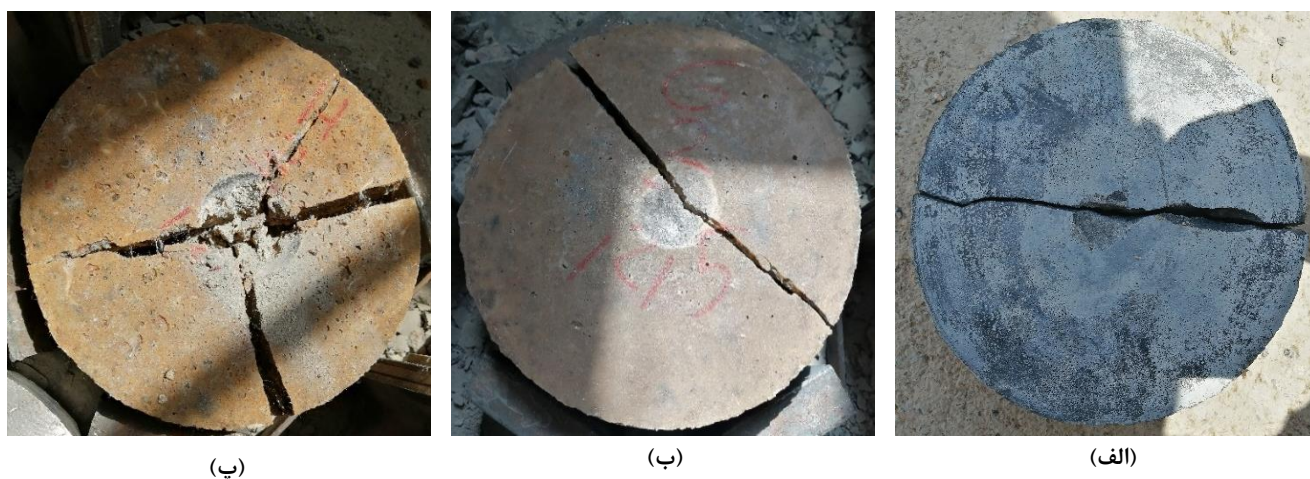
۴-۵ آزمایش مقاومت در برابر ضربه

با توجه به نتایج مندرج در جدول ۱۰ که مربوط به تعداد ضربات لازم برای ایجاد ترک اولیه و گسیختگی نهایی نمونه‌ها می‌باشد، مشخص می‌شود تعداد ضربات لازم برای ایجاد ترک خوردگی در نمونه‌های پلیمری با و بدون الیاف، به ترتیب ۴۲/۸ و ۴۴ برابر بتن سبک می‌باشد. در نمونه‌های فاقد الیاف، با ایجاد اولین ترک نمونه گسیخته می‌شود اما نمونه‌های حاوی الیاف، بعد از ایجاد ترک اولیه، همچنان قابلیت جذب انرژی داشته و تا گسیختگی نهایی، تعداد ضربات بیشتری را تحمل می‌کنند. از آن جا که الیاف به صورت ترکیبی استفاده شده است، الیاف پلی پروپیلن بیش تر در مهار ریز ترک‌ها موثر هستند و تاثیرگذاری آن‌ها بعد از ترک خوردگی، نسبت به الیاف کورتا، بسیار کم تر است. الیاف کورتا با ایجاد پل بین ترک‌های بزرگ، نقش اصلی را در جذب انرژی بعد از ترک خوردگی دارند. افزودن الیاف به بتن پلیمری، تعداد ضربات لازم برای ایجاد ترک خوردگی و تعداد ضربات لازم برای گسیختگی نهایی را به ترتیب ۳ و ۱۷ درصد افزایش داده است. همان طور که در شکل ۴ مشخص می‌شود، میزان تخریب ناشی از اصابت وزنه برای نمونه‌های فاقد الیاف بسیار کم می‌باشد، به گونه‌ای که اثر گوی فولادی در مرکز نمونه کم تر نمایان می‌باشد. با این وجود، در نمونه‌های مسلح به الیاف، به دلیل افزایش مقاومت در برابر ضربه، تخریب و فرورفتگی گوی فولادی در مرکز نمونه بیش تر مشهود است. همچنین در نمونه‌های دارای الیاف، حالت ترک خوردگی از قطری به شعاعی تغییر پیدا کرده است. تغییر وضعیت ترک خوردگی در نمونه‌های الیافی به این علت است که الیاف، مانند یک پل ارتباطی تنش‌های وارده به ماتریس بتن را به قسمت‌های مختلف نمونه انتقال می‌دهد و باعث ایجاد ترک در چندین جهت می‌شود.

جدول ۱۰: تعداد ضربات لازم برای ایجاد ترک اولیه و شکست نهایی نمونه‌ها

تعداد ضربات				تعداد نمونه	نام طرح
COV (%)	N ₂	COV (%)	N ₁		
۸/۵	۲/۰	۱۰/۲	۲/۰	۴	LWC
۹/۰	۸۶/۰	۹/۵	۸۶/۰	۴	PC
۱۱/۵	۱۰۰/۰	۱۱/۰	۸۸/۰	۴	PC.F

یادداشت: LWC = بتن سبک، PC = بتن پلیمری، PC.F = بتن پلیمری حاوی الیاف، N₁ = تعداد ضربه‌ی لازم جهت ایجاد ترک اولیه، N₂ = تعداد ضربه‌ی لازم جهت گسیختگی نهایی و COV = مقدار ضریب تغییرات می‌باشد.



(پ)

(ب)

(الف)

شکل ۴: نحوه‌ی ترک خوردگی نمونه‌ها

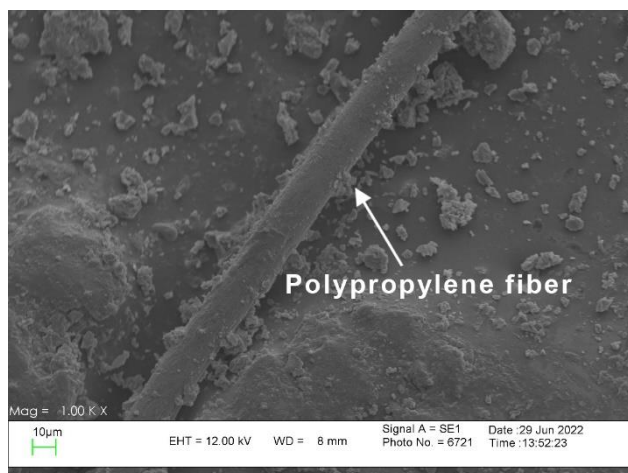
شکل (الف) نمونه‌های بتن سبک، شکل (ب) نمونه‌های بتن پلیمری بدون الیاف و شکل (پ) نمونه‌های پلیمری حاوی الیاف

۴-۶ تصویربرداری میکروسکوپی الکترونی (SEM)

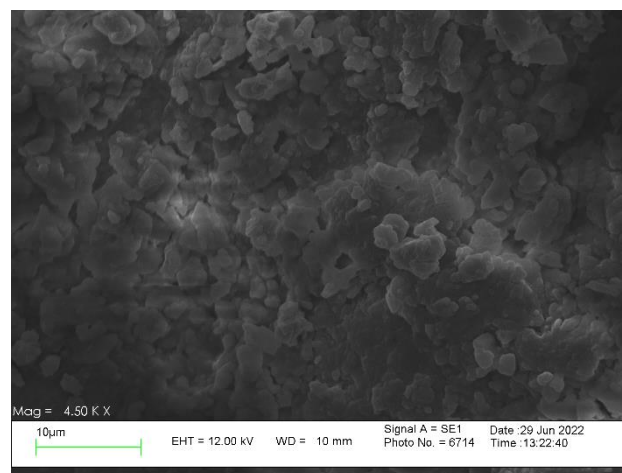
به منظور ارزیابی میکرو ساختار نمونه‌های بتن پلیمری حاوی الیاف، با استفاده از دستگاه LEO 1430VP، تصاویر SEM از قطعه‌ی کوچکی از سطح نمونه‌ها گرفته شد. شکل ۵ (الف) و (ب) به ترتیب تصاویر SEM بتن پلیمری با و بدون الیاف را در این تحقیق نشان می‌دهد. شکل ۵ (پ) و (ت) نیز تصاویر SEM از نمونه‌های بتن معمولی، با و بدون الیاف پلی پروپیلن را از تحقیق یان و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۳۷] نشان می‌دهد. این محققین گزارش کرده‌اند که افزودن الیاف مطابق شکل ۵ (ت)، باعث افزایش تخلخل و ایجاد ضعف در محل اتصال الیاف و ماتریس بتن می‌شود. به نظر می‌رسد که در بتن پلیمری به دلیل ساختار قوی‌تر ماتریس بتن، چسبندگی و اتصال قوی-تری مطابق شکل ۵ (ب) بین الیاف و ماتریس بتن ایجاد می‌شود که نتیجه‌ی آن افزایش مقاومت‌های مکانیکی بتن پلیمری حاوی الیاف است. هم‌چنین مقایسه‌ی تصاویر SEM بتن پلیمری و معمولی نشان می‌دهد که بتن پلیمری از میزان تخلخل کم‌تری نسبت به بتن معمولی برخوردار می‌باشد.

با توجه به نتایج آنالیز SEM موجود در بعضی از مطالعات، برای افزودن الیاف پلی پروپیلن (عموماً بیش از ۰.۵ درصد حجمی)، به علت پدیده‌ی گلوله شدگی، افزایش تخلخل، ایجاد و گسترش ریز ترک در ساختار بتن و کاهش خواص مکانیکی بتن گزارش شده است. با

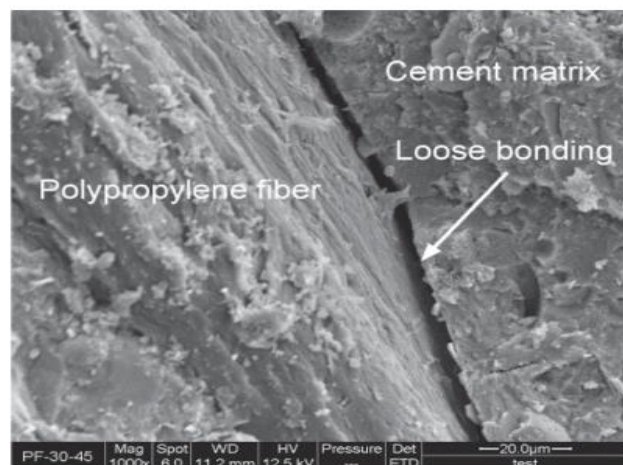
این وجود، این نتیجه‌گیری عمومیت نداشته و در تعدادی دیگر از مطالعات، برای افزودن الیاف (عموماً کم‌تر از ۰٫۵ درصد حجمی)، کاهش تخلخل، کاهش ریزترک‌ها و افزایش مقاومت مکانیکی عنوان شده است [۳۱-۳۸].



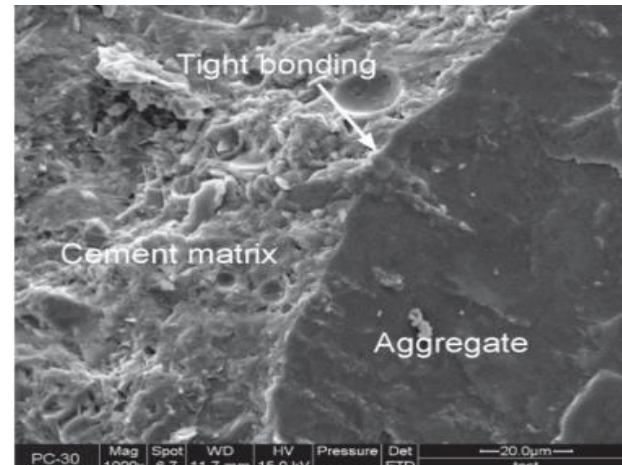
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۵: تصاویر SEM از: (الف) و (ب) به ترتیب بتن پلیمری با و بدون الیاف در مطالعه‌ی حاضر، (پ) و (ت) به ترتیب بتن معمولی با و بدون الیاف (تصاویر (پ) و (ت) از مرجع [۳۸] گرفته شده است).

۴ - ۷ بررسی مقاومت مکانیکی بتن پلیمری حاوی الیاف در مقالات مختلف

به منظور بررسی بیش‌تر تاثیر الیاف بر خواص مکانیکی بتن پلیمری، مقالاتی که در آن خواص بتن پلیمری حاوی الیاف بررسی شده است، جمع‌آوری گردید. با توجه به اطلاعات مندرج در جدول ۱۱، بتن پلیمری اپوکسی خواص مکانیکی مطلوب‌تری نسبت به بتن پلیمری پلی استری دارد. افزودن الیاف، خواص مکانیکی بتن پلیمری پلی استری را بیش‌تر از بتن پلیمری اپوکسی افزایش داده است که نشان دهنده‌ی عملکرد بهتر الیاف در بتن پلیمری پلی استری می‌باشد. در نمونه‌های بتن پلیمری اپوکسی، مقدار مشخصی از الیاف، باعث بهبود مقاومت شده و بیش‌تر از آن مقدار، تاثیر مخربی بر خواص مکانیکی داشته است. هم‌چنین با توجه به پراکندگی زیاد در نتایج تحقیقات موجود در جدول ۱۱، مطالعات بیش‌تری در خصوص تاثیر الیاف بر خواص مکانیکی بتن پلیمری مورد نیاز است.

جدول ۱۱: مشخصات مکانیکی بتن پلیمری اپوکسی و پلی استری حاوی الیاف در مقالات مختلف

نام محقق	رزین	نوع الیاف	مقدار الیاف (%)	f'_{c_i} (MPa)	f'_{r_i} (MPa)	f'_{t_i} (MPa)	$\Delta f'_c$ (%)	Δf_r (%)	Δf_t (%)	
ویپولانا و همکاران [۱۶]	UP	شیشه	۱/۰	۴۳/۲	۱۱/۷	۶/۶	۶/۹	۸/۵	۲۵/۸	
			۲/۰				۲۰/۶	N.A	N.A	
			۳/۰				۲۷/۰	۳۲/۵	۸۹/۴	
ریز [۱۷]	EP	نارگیل	۲/۰	N.A	۳۴/۳	N.A	N.A	۳/۴	۲۵/۱	
		باگاس							N.A	
		موز							-۲۱/۰	
حسینی نیای و همکاران [۱۹]	EP	بازالت	۰/۵	۹۴/۱	۳۹/۰	۱۱/۸	۹/۷	۱۰/۳	۱/۹	
			۱/۰						۴/۱	۲۸/۲
			۱/۵						۱۰/۶	۳۱/۵
			۰/۲						۴/۸	۳۵/۲
			۲/۵						-۱۲/۳	۱۳/۱
			۳/۰						-۲۰/۹	-۱/۸
شن و همکاران [۲۱]	UP	شیشه	۰/۳	۲۵	۱۱/۵	N.A	۱۲/۰	۹/۶	N.A	
مطالعه‌ی حاضر	UP	پلی پروپیلن و کورتا	۰/۲۵	۴۸/۰	۱۲/۰	۶/۲	۹/۱	۶/۲	۸/۸	

یادداشت: UP = رزین پلی استر، EP = رزین اپوکسی، f'_{c_i} ، f'_{r_i} و f'_{t_i} = به ترتیب مقاومت فشاری، خمشی و کششی بتن پلیمری قبل از افزودن الیاف، $\Delta f'_c$ ، Δf_r و Δf_t = به ترتیب تغییر مقاومت فشاری، خمشی و کششی بتن پلیمری پس از افزودن الیاف و N.A = اطلاعات در دسترس نمی‌باشد.

۶ - نتیجه گیری

با توجه به خواص مکانیکی و دوام بسیار مطلوب بتن پلیمری، می‌توان از این بتن به عنوان جایگزینی مناسب برای بتن معمولی، در سازه‌هایی که نیاز هم‌زمان به مقاومت مکانیکی و دوام بالا باشد، استفاده کرد. به دلیل مطالعات اندک بر روی خواص مکانیکی بتن پلیمری پلی استری سبک‌وزن، بررسی خصوصیات مکانیکی بتن پلیمری پلی استری بهینه شده‌ی سبک‌وزن (با و بدون الیاف) و مقایسه‌ی آن با خصوصیات بتن سبک، در این تحقیق هدف قرار گرفته شد. با بررسی نتایج آزمایشات مکانیکی صورت گرفته بر بتن پلیمری پلی استری سبک‌وزن، مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق، به شرح زیر است:

۱. چگالی بتن پلیمری، تقریباً ۲۵ درصد کم‌تر از بتن سبک می‌باشد که این موضوع باعث کاهش وزن سازه‌ها، حمل و نقل راحت‌تر قطعات پیش‌ساخته، کاهش خسارات ناشی از زلزله و غیره می‌شود.
۲. مقدار بهینه‌ی استفاده از رزین در این پژوهش، ۲۷/۵ درصد می‌باشد. هم‌چنین افزودن ۰/۲۵ درصد الیاف، باعث افزایش ۹/۱ درصدی مقاومت فشاری بتن پلیمری می‌شود.
۳. مقاومت کششی بتن پلیمری با و بدون الیاف، به ترتیب ۲/۳ و ۲/۱ برابر مقاومت کششی بتن سبک می‌باشد. هم‌چنین افزودن الیاف به بتن پلیمری، علاوه بر افزایش مقاومت کششی به مقدار ۸/۸ درصد، باعث شکست نرم بتن پلیمری می‌شود.
۴. مقاومت خمشی بتن پلیمری با و بدون الیاف، به ترتیب ۲/۶ و ۲/۵ برابر بتن سبک می‌باشد. هم‌چنین افزودن الیاف، باعث بهبود مقاومت خمشی بتن پلیمری می‌شود.
۵. با توجه به نتایج، مقاومت مکانیکی بتن پلیمری، تنها یک روز پس از ساخت بتن پلیمری به دست آمده است. بنابراین استفاده از بتن پلیمری در سازه‌هایی که نیاز به ساخت و یا مقاوم‌سازی سریع دارند، توصیه می‌شود.

۶. بتن سبک، کمترین مقاومت در برابر سایش را در بین سایر نمونه‌ها دارد، به گونه‌ای که کاهش جرم آن به ترتیب $\frac{3}{2}$ و $\frac{3}{10}$ برابر کاهش جرم بتن پلیمری با و بدون الیاف می‌باشد. در نمونه‌های بتن سبک، علاوه بر کاهش جرم، در طول خود نیز دچار شکست شدند که نشان دهنده آسیب پذیری بسیار زیاد بتن سبک در مقابل سایش می‌باشد.
۷. بتن پلیمری، مقاومت عالی در برابر ضربه نسبت به بتن سبک دارد. افزودن الیاف به بتن سبک، باعث بهبود مقاومت در برابر ضربه‌ی بتن پلیمری می‌شود، به گونه‌ای که در نمونه‌های حاوی الیاف، تعداد ضربات لازم برای ایجاد ترک خوردگی و تعداد ضربات لازم برای گسیختگی، به ترتیب ۳ و ۱۷ افزایش یافته است. هم‌چنین الیاف باعث تغییر حالت ترک خوردگی، از حالت قطری به حالت شعاعی شده است.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از همکاری بی‌دریغ جناب آقای مهندس بهنام ابراهیمی و جناب آقای حسین رجبی، کارکنان آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه صنعتی اصفهان، کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] Muthukumar, M. and Mohan, D., (2004). Studies on polymer concretes based on optimized aggregate mix proportion. *European polymer journal*, 40(9), pp.2167-2177.
- [2] Toufigh, V., Hosseinali, M. and Shirshorshidi, S.M., (2016). Experimental study and constitutive modeling of polymer concrete's behavior in compression. *Construction and Building Materials*, 112, pp.183-190.
- [3] Jafari, K. and Toufigh, V., (2017). Experimental and analytical evaluation of rubberized polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 155, pp.495-510.
- [4] Liu, W., Wu, J. and Ge, H., (2016). Influence of Aggregate on the Mechanical Properties of UP Polymer Concrete. In *2016 5th International Conference on Advanced Materials and Computer Science (ICAMCS 2016)* (pp. 284-287). Atlantis Press.
- [5] Reis, J.M.L.D. and Jurumenh, M.A.G., (2011). Experimental investigation on the effects of recycled aggregate on fracture behavior of polymer concrete. *Materials Research*, 14, pp.326-330.
- [6] Sarami, N. and Mahdavian, L., (2017). Mechanical properties of artificial stones produced from sludge of stone-cutting factories (SSCF): the effects of nano-fillers (aTiO₂ and ZnO nanoparticles). *Silicon*, 9(2), pp.165-172.
- [7] Hassani Niaki, M., Fereidoon, A. and Ghorbanzadeh Ahangari, M., (2018). Mechanical properties of epoxy/basalt polymer concrete: Experimental and analytical study. *Structural Concrete*, 19(2), pp.366-373.
- [8] Jiang, C., Jin, C., Wei, M., Yan, S. and Chen, D., (2018). Mechanical and thermal properties improvement of unsaturated polyester resin by incorporation of TiO₂ nanoparticle surface modified with titanate. *Materials Research Express*, 5(11), p.115008.
- [9] Jafari, K., Tabatabaeian, M., Joshaghani, A. and Ozbakkaloglu, T., (2018). Optimizing the mixture design of polymer concrete: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 167, pp.185-196.
- [10] Shen, Y., Huang, J., Ma, X., Hao, F. and Lv, J., (2020). Experimental study on the free shrinkage of lightweight polymer concrete incorporating waste rubber powder and ceramsite. *Composite Structures*, 242, p.112152.
- [11] Ataabadi, H.S., Zare, A., Rahmani, H., Sedaghatdoost, A. and Mirzaei, E., (2020). Lightweight dense polymer concrete exposed to chemical condition and various temperatures: An experimental investigation. *Journal of Building Engineering*, 34, p.101878.
- [12] Ferdous, W., Manalo, A., Wong, H.S., Abousnina, R., AlAjarmeh, O.S., Zhuge, Y. and Schubel, P., (2020). Optimal design for epoxy polymer concrete based on mechanical properties and durability aspects. *Construction and Building Materials*, 232, p.117229.
- [13] Heidarnazhad, F., Jafari, K. and Ozbakkaloglu, T., (2020). Effect of polymer content and temperature on mechanical properties of lightweight polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 260, p.119853.
- [14] Ataabadi, H.S., Sedaghatdoost, A., Rahmani, H. and Zare, A., (2021). Microstructural characterization and mechanical properties of lightweight polymer concrete exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 311, p.125293.
- [15] Sarde, B., Patil, Y., Dholakiya, B. and Pawar, V., (2022). Effect of calcined kaolin clay on mechanical and durability properties of pet waste-based polymer mortar composites. *Construction and Building Materials*, 318,

- p.126027.
- [16] Vipulanandan, C., Dharmarajan, N. and Ching, E., (1988). Mechanical behaviour of polymer concrete systems. *Materials and Structures*, 21(4), pp.268-277.
- [17] Reis, J.M.L., (2006). Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete. *Construction and building materials*, 20(9), pp.673-678.
- [18] Martínez-Barrera, G., Viguera-Santiago, E., Martínez-López, M., Ribeiro, M.C., Ferreira, A.J. and Brostow, W., (2013). Luffa fibers and gamma radiation as improvement tools of polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 47, pp.86-91.
- [19] Niaki, M.H., Fereidoon, A. and Ahangari, M.G., (2018). Experimental study on the mechanical and thermal properties of basalt fiber and nanoclay reinforced polymer concrete. *Composite Structures*, 191, pp.231-238.
- [20] Hu, B., Zhang, N., Liao, Y., Pan, Z., Liu, Y., Zhou, L., Liu, Z. and Jiang, Z., (2018). Enhanced flexural performance of epoxy polymer concrete with short natural fibers. *Science China Technological Sciences*, 61(8), pp.1107-1113.
- [21] Shen, Y., Liu, B., Lv, J. and Shen, M., (2019). Mechanical properties and resistance to acid corrosion of polymer concrete incorporating ceramsite, fly ash and glass fibers. *Materials*, 12(15), p.2441.
- [22] JIS A 1181. (2005). Test methods for polymer concrete.
- [23] ASTM-C39, (2017). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, *ASTM International*.
- [24] ASTM C190. (2001), West Conshohocken, PA: American Society for Testing Matels.
- [25] ASTM-C496, (2017). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, *ASTM International*,
- [26] ASTM-C293, (2016). Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading), *ASTM International, USA*.
- [27] ASTM C1138-97 (1997), Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method), *ASTM International, West Conshohocken, USA*.
- [28] Moodi, F., Kashi, A., Ramezani-pour, A.A. and Pourebrahimi, M., (2018). Investigation on mechanical and durability properties of polymer and latex-modified concretes. *Construction and Building Materials*, 191, pp.145-154.
- [29] American Society for Testing and Materials, (1989). Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. American Society for Testing and Materials.
- [30] ACI 544.2R-17 (2017), Report on the Measurement of Fresh State Properties and Fiber Dispersion of Fiber-Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [31] Pachideh, G. and Gholhaki, M., (2021). An experimental investigation into effect of temperature rise on mechanical and visual characteristics of concrete containing recycled metal spring. *Structural Concrete*, 22(1), pp.550-565.
- [32] Gholhaki, M., Pachideh, G. and Rezayfar, O., (2017). An experimental study on mechanical properties of concrete containing steel and polypropylene fibers at high temperatures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(3), pp.167-179.
- [33] Pachideh, G. and Gholhaki, M., (2019). An experimental study on the effects of adding steel and polypropylene fibers to concrete on its resistance after different temperatures. *ASTM International*.
- [34] Gao, Y., Zhang, H., Huang, M. and Lai, F., (2019). Unsaturated polyester resin concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 228, p.116709.
- [35] Al Qadi, A.N. and Al-Zaidyeen, S.M., (2014). Effect of fibre content and specimen shape on residual strength of polypropylene fibre self-compacting concrete exposed to elevated temperatures. *Journal of king Saud university-engineering sciences*, 26(1), pp.33-39.
- [36] Karimipour, A., Ghalehnovi, M., De Brito, J. and Attari, M., (2020). The effect of polypropylene fibres on the compressive strength, impact and heat resistance of self-compacting concrete. In *Structures* (Vol. 25, pp. 72-87).
- [37] Yuan, Z. and Jia, Y., 2021. Mechanical properties and microstructure of glass fiber and polypropylene fiber reinforced concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 266, p.121048.
- [38] Behfarnia, K. and Rostami, M., (2017). Mechanical properties and durability of fiber reinforced alkali activated slag concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 29(12), p.04017231.