

Effects of using Synthetic Polymer Fibers and Polyvinyl Alcohol on the Mechanical Characteristics of High Strength engineered Cement Composite Containing Supplementary Cementitious Materials

Mahdi Kouhiazar Tulun¹, Jafar Sobhani^{2*}, Seyyed Mohammad Mirhosseini³

1-PhD Student, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

2-Associate Professor, Department of Concrete Technology, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

3-Associate Professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

Received: 08 October 2024 Revised: 30 December 2024 Accepted: 30 December 2024

Research note

Abstract

This article presents the results of a laboratory study aimed at developing a new generation of engineered cementitious composites. Specifically, the effects of using synthetic polymer fibers and polyvinyl alcohol (PVA) fibers, both individually and in combination, on the mechanical properties of high-performance engineered cementitious composites were investigated. The study focused on compressive strength and flexural behavior. Synthetic and PVA fibers were used in varying amounts, along with natural zeolite at quantities of 65, 70, 80, and 90 kg per cubic meter and silica fume at 90, 100, and 110 kg per cubic meter as pozzolanic materials in the engineered cementitious composites. The results demonstrated that the use of fibers, both individually and in combination, improved the compressive performance and flexural behavior of the studied mixtures by 5–36% and 66–201%, respectively. Based on the findings, the maximum 28-day compressive strength achieved was 109.31 MPa, while the highest flexural strength was 15.93 MPa. Analysis of the flexural performance curves revealed a triphasic behavior: an ascending branch up to the maximum flexural strength, a descending branch indicating a reduction in flexural strength but with enhanced strain capacity and ductility, and a final ascending branch representing strain hardening. These curves highlight fibers' positive role in improving the examined mixtures' flexural properties.

Keywords: Engineered Cement Composites (ECC), Compressive Strength, Flexural Behavior, Fibers, Natural Zeolite

*Corresponding Author: Jafar Sobhani

Sobhani, J., kohiazartulun, M., Mirhosseini, S. M. Effects of using Synthetic Polymer Fibers and Polyvinyl Alcohol on the Mechanical Characteristics of High Strength engineered Cement Composite Containing Supplementary Cementitious Materials. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2024; 9(1): 1-34.

<http://doi.org/10.30478/jcsm.2024.482495.1378>

2538-5828/ © 2024 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

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

تاثیر استفاده از الیاف پلیمری سینتتیک و پلی وینیل الکل بر مشخصات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده پر مقاومت حاوی مواد پوزولانی

مهدی کوهی آذرتولون^۱، جعفر سبحانی^{۲*}، سیدمحمد میرحسینی

۱-دانشجوی دکتری گروه عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۲-دانشیار بخش فناوری بتن، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

۳-دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ja_sobhani@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

نوع مقاله: یادداشت فنی

چکیده

این مقاله نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی در راستای توسعه نسل جدیدی از کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده را گزارش می‌کند. بر این اساس، تاثیر استفاده از الیاف پلیمری سینتتیک و الیاف پلی وینیل الکل بصورت مجزا و ترکیبی بر مشخصات مکانیکی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت شامل مقاومت فشاری و رفتار خمشی مورد بررسی قرار گرفت. الیاف سینتتیک و پلی وینیل الکل با مقادیر متفاوت و همچنین زئولیت طبیعی با مقادیر ۶۵، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ کیلوگرم در هر مترمکعب و دوده سیلیس به میزان ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ کیلوگرم در هر متر مکعب به عنوان مصالح پوزولانی در کامپوزیت سیمانی مهندسی شده مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد استفاده از الیاف بصورت مجزا و ترکیبی، عملکرد فشاری و رفتار خمشی مخلوط‌های مورد مطالعه را به ترتیب در محدوده ۵ تا ۳۶ درصد و ۶۶ تا ۲۰۱ درصد بهبود بخشیده است. بر اساس نتایج، بیشترین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه، ۱۰۹،۳۱ مگاپاسکال و بیشترین مقاومت خمشی ۱۵،۹۳ مگاپاسکال بدست آمد. مطالعات مربوط به منحنی‌های عملکرد خمشی این مطالعه، نشان دهنده رفتار سه بخشی شامل شاخه صعودی تا حد مقاومت خمشی حداکثر، بخش نزولی بصورت افت مشخصات مقاومت خمشی ولی با توسعه رفتار کرنشی و انعطاف پذیری و در آخرین مرحله، رفتار شاخه صعودی بصورت سخت‌شوندگی کرنش می‌باشد. بدین ترتیب، این منحنی‌ها نشان از عملکرد مثبت الیاف در بهبود مشخصات خمشی مخلوط‌های مورد بررسی دارد.

کلمات کلیدی: کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت، رفتار فشاری، مقاومت خمشی، الیاف، زئولیت طبیعی.

بتن یکی از پر مصرف‌ترین و مهمترین مصالح ساختمانی در دنیا است که در قرن اخیر از آن بسیار استفاده شده است. مهمترین ضعف بتن غیر مسلح، مقاومت خمشی پایین، مشخصات پایین چقرمگی (طاقات)، عرض ترک خوردگی زیاد و همچنین شکننده بودن آن است که بصورت ترد و ناگهانی اتفاق می‌افتد. نیاز به توسعه روز افزون زیرساخت‌های عمرانی در کشورهای در حال توسعه، بیانگر آن است که در سالهای آتی، مقدار مصرف بتن افزایش خواهد داشت و برای تولید سیمان، صرف منابع طبیعی و وارد کردن حجم بسیار زیادی از دی‌اکسیدکربن به محیط زیست لازم اجتناب ناپذیر است. مطالعات نشان داده است که در حدود ۵ تا ۷ درصد از گازهای گلخانه‌ای آزاد شده در جو کره زمین، ناشی از فرآیند تولید سیمان است [۳-۱]. بتن‌های با عملکرد فوق توانمند (UHPRC) به‌طور قابل توجهی مقاومت فشاری را افزایش داده‌اند، اما توجه زیاد آن‌ها بر روی تراکم ذرات تشکیل دهنده، آن‌ها را شکننده‌تر از بتن‌های معمولی می‌کند [۴]. بتن‌های تقویت شده با الیاف (FRCs) این مورد را تا حدودی برطرف می‌کنند، اما همچنان رفتار کششی نرم‌شوندگی و شکل‌پذیری کششی محدودی را از خود بروز می‌دهند [۵]. برای برطرف کردن این مورد نیز کامپوزیت سیمانی کرنش - سخت شونده (SHCCs)، معرفی شدند، همچنین به عنوان کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC) شناخته می‌شوند که یک روش برای مدیریت خرابی‌ها را توسعه داده است که در آن الیاف توزیع شده به شکل موثری در برابر ترک‌ها مقاومت می‌کنند و باعث ایجاد چقرمگی بسیار عالی می‌شود [۶].

کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده، یک نوع ویژه از بتن‌های فوق توانمند (HPFRC) می‌باشد که توسط لی و همکارانش در دهه ۱۹۹۰ بر اساس تئوری میکرومکانیسم توسعه یافت [۷]. در مقایسه با بتن معمولی، کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC)، پس از ایجاد اولین ترک مشابه فلز انعطاف‌پذیر، دچار سخت‌شوندگی شده و بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ برابر بیشتر از بتن معمولی ظرفیت کرنشی از خود بروز می‌دهد. همچنین تحت افزایش بار، بیشتر از بتن‌های توانمند عرض ترک خوردگی را بصورت خود کنترلی نشان می‌دهد. پس از بارگذاری، تعدادی ترک در داخل مصالح ایجاد شده و درون نمونه گسترش می‌یابد. تا زمانی که عرض ترک تا حدود ۶۰ میکرومتر برسد، ترک خوردگی‌ها افزایش می‌یابند که این موضوع ناشی از عملکرد مکانیکی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده می‌باشد [۸]. با توجه به آنکه سنگدانه‌های درشت در مخلوط‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی شده حذف می‌شوند، این موضوع باعث استفاده حجم سیمان بیشتری در مقایسه با بتن‌های سازه‌ای معمولی می‌شود. برای کامپوزیت سیمانی مهندسی شده معمولی، مقدار سیمان می‌تواند بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب باشد [۹]. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، کامپوزیت سیمانی مهندسی شده می‌تواند در کاربردهای سازه‌ای مورد استفاده قرار بگیرد، با این حال مقاومت فشاری کامپوزیت سیمانی مهندسی شده در بین بتن‌های رده دوم از نظر مقاومت فشاری نیز قرار می‌گیرد [۱۰].

در مطالعات پیشین، محمد و پاکروان یافته‌اند که ترکیب کردن انواع متفاوت الیاف می‌تواند باعث افزایش در میزان مقاومت کششی و چقرمگی بتن شود [۱۱ و ۱۲]. استفاده از الیاف پلی اتیلن و فولادی بصورت ترکیبی باعث بهبود مقاومت خمشی، فشاری و کششی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده می‌گردد [۱۳]. استفاده همزمان از الیاف فولادی و پلی اتیلن در کامپوزیت سیمانی مهندسی شده باعث بهبود عملکرد در برابر بارگذاری تکراری گردید و همچنین عرض ترک ایجاد شده در بارگذاری‌های خمشی را کنترل کرده و کاهش داد [۱۴]. علاوه بر این، نتایج مطالعات نشان داده است که استفاده از الیاف پلی اتیلن و پلی وینیل الکل بصورت ترکیبی باعث بهبود قابل توجهی در رفتار کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده به خصوص در مشخصه‌های مکانیکی آن می‌شود [۱۵]. سویی و همکاران از الیاف فولادی و پلی وینیل الکل بصورت ترکیبی در کامپوزیت سیمانی مهندسی شده استفاده کردند که این مورد باعث بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی و عملکرد خمشی گردید [۱۶].

بر اساس اندازه، الیاف در دو مجموعه دسته‌بندی می‌شوند: الیاف میکرو و الیاف ماکرو. الیاف میکرو معمولاً بین ۶ تا ۲۰ میلی‌متر در طول و ده‌ها میکرون در ضخامت می‌باشند. الیاف میکرو از نظر اندازه طول کوتاه هستند و در صورتی که سازه‌های بتنی وارد محدوده تغییر شکل‌های بزرگ شوند، آن‌ها میزان کمی تاثیر در عملکرد سازه‌های بتن خواهند داشت. طول الیاف ماکرو بین ۳۰ تا ۶۰ میلی‌متر می‌باشد و دارای بیش از ۰,۳ میلی‌متر قطر بوده و دارای قابلیت تحمل بارها و مقابله با توزیع ترک‌های قابل رویت مشابه عملکرد میلگردهای مسلح کننده پس از شکست خمیره بتن می‌باشند [۱۶].

سالانه در سراسر جهان بیش از ۱۰ میلیارد تن بتن تولید می‌شود. تخمین زده می‌شود که یک تن دی اکسید کربن در تولید هر تن سیمان پرتلند تولید می‌شود که همین مقدار دی اکسید کربن در جو منتشر می‌شود [۱۷ و ۱۸]. همچنین برای تولید این مقدار بتن، حجم عظیمی شن و مایه وجود دارد. برای دهه‌ها ماسه بستر رودخانه به عنوان سنگدانه ریز برای ساخت بتن استفاده می‌شود اما منابع آن محدود بوده و کمبود این مصالح را خواهیم داشت. استفاده بیش از حد از شن و ماسه باعث تحت تاثیر قرار گرفتن آب و هوا شده و موجب سیل، سونامی و طوفان‌های ناشی از فرسایش بستر رودخانه و خطوط ساحلی می‌شود [۱۹]. استفاده از کامپوزیت سیمانی مهندسی شده به جهت آنکه در کامپوزیت سیمانی مهندسی شده از سنگدانه استفاده نمی‌شود، راه حل مناسبی برای حفظ محیط زیست در برابر تخریب خواهد بود. اما مقدار مصرف سیمان در کامپوزیت سیمانی مهندسی شده نسبت به بتن معمولی بالاتر است که باعث افزایش هزینه و انتشار بیشتر دی اکسید کربن در محیط زیست می‌شود [۲۰]. برای حل این مشکل می‌توان از مصالح پوزولانی جایگزین سیمان نظیر دوده سیلیس [۲۱] استفاده کرد. بررسی‌های کینگ و همکاران نشان داد که استفاده و جایگزین کردن دوده سیلیس با سیمان باعث بهبود مقاومت فشاری کامپوزیت سیمانی مهندسی شده نیز گردید [۲۲].

در این مطالعه آزمایشگاهی تاثیر پودر زئولیت، دوده سیلیس و الیاف سینتتیک و پلی وینیل الکل بصورت مجزا و ترکیبی با مقادیر متفاوت بر روی مقاومت فشاری و خمشی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده حاوی پودر سرپاره کوره قوس الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از پودر زئولیت و دوده سیلیس به منظور کاهش استفاده از سیمان که دارای سهم بسزایی در انتشار دی اکسید کربن در تولید کامپوزیت سیمانی مهندسی شده دارد، یکی از مهمترین ویژگی‌های این تحقیق می‌باشد. همچنین استفاده از الیاف سینتتیک و پلی وینیل الکل با هدف ارتقا عملکرد مکانیکی و جذب انرژی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت، از دیگر جنبه‌های نوآوری این تحقیق می‌باشد. کاهش انتشار دی اکسید کربن به عنوان یکی از راههای مقابله با گرمایش زمین و همچنین بهبود عملکرد کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت بعد از ترک خوردگی از موارد اهمیت انجام این تحقیق می‌باشد. در این پژوهش مشخصات مکانیکی یک نوع کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت و دوستدار محیط زیست مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت مقدار انرژی جذب شده و چقرمگی خمشی تیرهای حاوی الیاف و پودر زئولیت و دوده سیلیس مورد بررسی و مقایسه با نمونه کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت فاقد الیاف مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۱-۲- مصالح

مصالح اولیه مورد استفاده در این مطالعه شامل سیمان پرتلند نوع دو، پودر زئولیت، پودر سرپاره کوره قوس الکتریکی، دوده سیلیس، ماسه سیلیس، الیاف سینتتیک پلیمری و الیاف پلی وینیل الکل می‌باشد (شکل ۱ و ۲). سیمان مورد استفاده در این تحقیق محصول کارخانه سیمان تهران، پرتلند نوع دو می‌باشد که مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است.



جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان مصرفی

مقدار	ویژگی‌ها
۳۲۰۰	نرمی (cm ² /gr)
۱۴۰	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
۱۷۰	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
۱۰	مقاومت فشاری ۳ روزه (مگاپاسکال)
۱۶	مقاومت فشاری ۷ روزه (مگاپاسکال)
۳۲	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)

مشخصات شیمیایی سیمان، زئولیت، پودر سرباره کوره قوس الکتریکی و دوده سیلیس مصرفی در جدول ۲ آمده است. دوده سیلیس از محصولات کارخانجات تولید فروسیلیس می‌باشد که محصول مورد استفاده در این تحقیق از کارخانه فروسیلیس خمین تهیه شده است. با خرد کردن سنگ سیلیس، ماسه سیلیس با دانه بندی متفاوت بدست می‌آید که در این تحقیق آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. پودر سرباره کوره قوس الکتریکی از محصولات کارخانجات تولید فولاد است، پودر مصرف شده در این تحقیق از محصولات جانبی کارخانه فولاد سپاهان می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات شیمیایی مصالح سیمانی مصرفی (درصد)

ماده	دوده سیلیس	سیمان	زئولیت	پودر سرباره کوره قوس الکتریکی
SiO ₂	90.36	22.33	67.7	15.23
CaO	0.83	61.45	1.6	25.3
AL ₂ O ₃	0.43	4.8	10.4	2.7
Fe ₂ O ₃	0.58	3.5	1.5	25.13
MgO	0.89	2.7	-	5.69
K ₂ O	1.46	0.62	3.2	0.69
Na ₂ O	0.66	0.37	2.2	0.82
So ₃	-	2.4	-	0.13

به جهت استفاده از الیاف متفاوت با مقادیر متغیر در کامپوزیت سیمانی مهندسی شده و افزایش و حفظ کارایی مخلوط به ازای هر مترمکعب، ۴ کیلوگرم فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات بر اساس استانداردهای ASTM C1017 [۲۳] و ASTM C494 [۲۴] مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات فوق روان کننده مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده است. الیاف از مهمترین اجزای استفاده شده در این تحقیق آزمایشگاهی می‌باشد. در این مطالعه از دو نوع الیاف استفاده شده که شامل الیاف سینتتیک پلیمری و الیاف پلی

وینیل الکل می‌باشد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف مورد استفاده در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین شکل ۲ تصویر الیاف مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. الیاف‌ها بر اساس استاندارد ASTM C1116 [۲۵] مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۳ - مشخصات فوق روان کننده

ظاهر	مابع قهوه‌ای روشن
یون کلرید	کمتر از 0.1%
pH	۶/۵-۷/۵
نقطه انجماد	2°C
وزن مخصوص (kg/m ³)	۱۱۰۰



شکل ۱- مصالح مورد استفاده

جدول ۴- مشخصات الیاف مصرفی

نوع الیاف	الیاف سینتتیک پلیمری	الیاف پلی وینیل الکل
طول (mm)	۳۰	۶
قطر (mm)	۰/۵-۰/۴	۰/۴
مقاومت کششی (MPa)	۶۶۰-۵۷۰	۱۴۰۰
مدول الاستیسیته (GPa)	۶	۳۲
چگالی (g/cm ³)	۰,۹	۱,۳



شکل ۲ - تصویر الیاف مصرفی

۲-۲- نسبت‌های مخلوط و روش ساخت

طرح مخلوط بتن به ویژه نسبت آب به سمیان، با توجه به راهنمای ACI 211.4R-08 و مقادیر بهینه مواد پوزولانی با توجه به نتایج مطالعات پیشین انتخاب گردید. در جدول ۵، مقدار مصالح مصرفی در هر طرح مخلوط مورد بررسی در این تحقیق به‌طور خلاصه ارائه شده است. به منظور دستیابی به یک مخلوط یکنواخت، ابتدا مصالح خشک شامل سیمان، دوده سیلیس، ماسه سیلیسی، زئولیت و پودر سرباره کوره قوس الکتریکی درون مخلوط کن ریخته شد و به مدت ۲ دقیقه با دور آرام مخلوط گردید سپس آب و فوق روان کننده با هم ترکیب شد. در نهایت باقیمانده آب و فوق روان کننده به مخلوط درون همزن اضافه شد و همزن به مدت ۳ دقیقه با دور تند مصالح را مخلوط کرد.

نهایتاً هنگامی که مخلوط یکنواختی بدست آمد، الیاف به آرامی به مخلوط اضافه شد و پس از اتمام افزودن الیاف، همزن به مدت ۳ دقیقه با دور تند مصالح را مخلوط کرد تا الیاف‌ها کاملاً در مخلوط به‌طور یکنواخت توزیع شود و روند آماده سازی مخلوط کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تکمیل گردد و به ترکیبی یکنواخت و همگن دست یابیم. پس از آن مخلوط آماده شده درون قالب‌های فولادی ریخته شده و توسط میز لرزان عملیات تراکم به روش مکانیکی انجام شد. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شد. آزمون‌ها درون حوضچه آب تحت شرایط آزمایشگاهی با دمای ۲۴ درجه سانتیگراد با خطای ۳ درجه سانتیگراد نگهداری شد تا زمان انجام آزمون فرا برسد. طرح مخلوط‌های ارائه شده در تحقیق حاضر، بر اساس مطالعات انجام شده بر روی طرح اختلاط‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی شده حاوی الیاف پلی وینیل الکل و الیاف سینتتیک و همچنین نتایج تجربی حاصل از فعالیت‌های آزمایشگاهی بوده است. همانگونه که گفته شد، مقدار و نوع مصالح تشکیل دهنده کامپوزیت سیمانی مهندسی شده در جدول ۵ ارائه شده است. شایان ذکر است هیچگونه پدیده گلوله شدن در مخلوط‌های مورد بررسی مشاهده نگردید.

جدول ۵- نسبت طرح مخلوط (Kg/m³)

الیاف پلی وینیل الکل	الیاف سینتتیک	آب	ماسه سیلیس	پودر سرباره کوره قوس الکتریکی	زئولیت	دوده سیلیس	سیمان	ترکیبات
-	-	330	510	400	65	90	1000	RPE0
-	2	330	510	400	80	100	1000	RPE1
-	2	330	510	400	65	90	1000	RPE2
-	2	330	510	400	90	110	1000	RPE3
14.5	-	330	510	400	70	90	1000	RPE4
7.5	2	330	510	400	70	90	1000	RPE5

۳-۲- مشخصات نمونه‌ها و روش‌های آزمون

ساخت نمونه‌ها به دو دسته نمونه‌های فشاری بر اساس استاندارد EN 12390-3 [۲۶]، نمونه‌های خمشی بر اساس استاندارد CECS 13:2009 [۲۷] تقسیم گردید. جهت تعیین مقاومت فشاری برای هر طرح مخلوط، ۶ نمونه مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر ساخته و در سنین ۷ و ۲۸ روزه، بر اساس استاندارد EN 12390-3 [۲۶] مورد آزمون قرار گرفت. نمونه‌های خمشی با توجه به استاندارد CECS 13:2009 [۲۷] برای هر ترکیب بصورت آزمون منشوری با ابعاد ۴۰×۴۰×۱۶۰ میلی‌متر انتخاب شد که در مجموع ۶ آزمون ساخته و در سن ۷ و ۲۸ روز مورد آزمون قرار گرفت. روش بارگذاری خمشی، بصورت کنترل بار و ظرفیت دستگاه مورد استفاده برای این آزمایش ۵۰ کیلو نیوتن می‌باشد. میانگین نتایج حاصل از آزمون تعیین مقاومت فشاری و خمشی بر روی سه آزمون به عنوان نتیجه هر کدام از آزمون‌ها گزارش شده است.

۳- نتایج آزمون‌ها

۳-۱- مقاومت فشاری

جدول ۶ مقاومت فشاری مخلوط‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی شده بر مقاومت در سنین ۷ و ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. افزودن الیاف که به عنوان عامل بازدارنده ترک در خمیره عمل می‌کند می‌تواند حالت شکست را به حالت بسیار انعطاف پذیر تبدیل کند. با افزایش مقدار بارگذاری، ریز ترک‌ها ظاهر شده و در خمیره منتشر می‌شوند. حال اثر پل زدن الیاف فعال شده و از ایجاد ترک‌های با عرض زیاد که موجب شکافتگی و شکست نمونه می‌شود، جلوگیری می‌کند. این موضوع باعث کنترل ایجاد ترک شده و ترک‌های متعدد ریز در نزدیکی ترک‌های اصلی ایجاد شد.

جدول ۶ - نتایج آزمایش مقاومت فشاری

مخلوط		۷ روزه (MPa)		۲۸ روزه (MPa)	
میانگین	واریانس	میانگین	واریانس	میانگین	واریانس
68.45	3.2	93.75	3.9	92.85	7.1
92.85	7.1	109.31	9.2	80.32	2.9
80.32	2.9	72.84	4.2	68.04	5.8
72.84	4.2	68.65	2.7	68.04	5.8
68.04	5.8	94.29	2.7	68.65	5.3
68.65	5.3				

مقاومت فشاری نمونه‌ها با توجه به سن آن‌ها افزایش می‌یابد. به عنوان مثال برای طرح مخلوط RPE1، مقاومت فشاری ۷ روزه کامپوزیت سیمانی مهندسی شده بر مقاومت برابر ۹۲،۸۵ مگاپاسکال است که در سن ۲۸ روزه افزایش داشته و به ۹۷،۲۱ مگاپاسکال رسید. با در نظر گرفتن بررسی‌های انجام شده، مقاومت فشاری آزمون‌ها در سن ۲۸ روزه به نسبت مقاومت فشاری ۷ روزه کاهش را شاهد نبودیم. بیشترین تغییر مقاومت فشاری ۲۸ روزه به نسبت مقاومت فشاری ۷ روزه با ۲۹ مگاپاسکال افزایش مربوط به طرح مخلوط RPE2 نیز بود. همچنین کمترین افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه به نسبت ۷ روزه، با ۴،۴ مگاپاسکال افزایش مربوط به طرح مخلوط RPE1 بود.

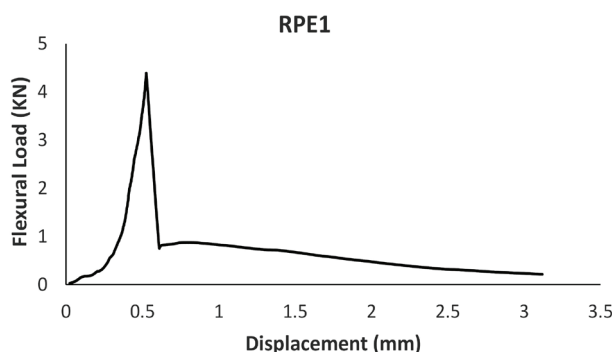
۲-۳- نتایج مقاومت خمشی

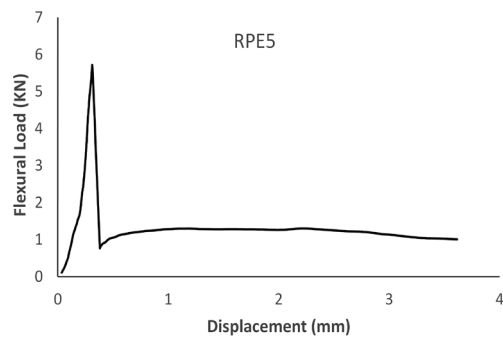
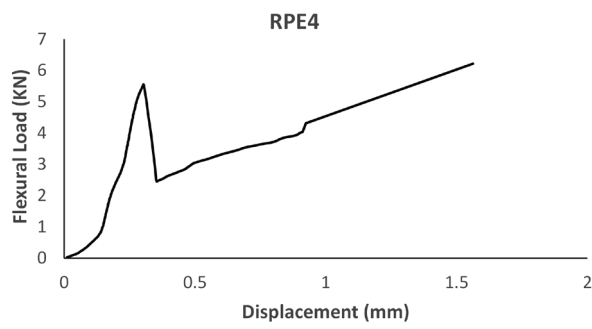
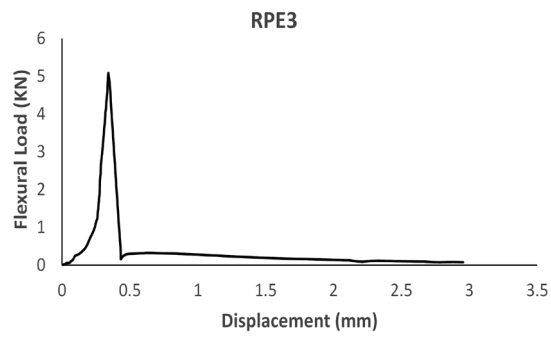
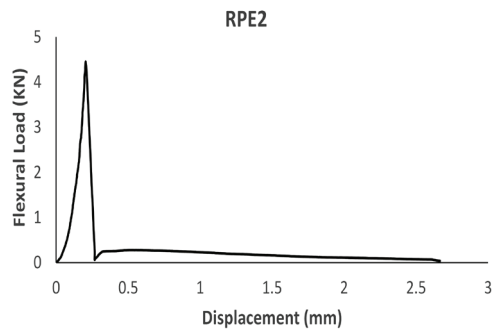
آزمونه‌های تیر خمشی با ابعاد $160 \times 40 \times 40$ میلی‌متر مورد آزمون تعیین عملکرد خمشی و جذب انرژی قرار گرفتند. در جدول ۷ نتایج آزمون‌های خمشی نشان داده شده است. تمامی نمونه‌ها در سن ۷ و ۲۸ روزه مورد آزمون قرار گرفتند. شکل ۳ نمودار بار-تغییر شکل آزمون‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۷ - نتایج آزمون مقاومت خمشی و جذب انرژی

میزان رشد جذب انرژی نسبت به مرجع (%)	مقاومت خمشی ۲۸ روزه (MPa)		مقاومت خمشی ۷ روزه (MPa)		مخلوط
	جذب انرژی (J)	میانگین	واریانس	میانگین	
--	1.85	10.35	0.2	3.85	RPE0
102	3.73	12.81	0.3	7.72	RPE1
21	2.23	13.02	0.1	4.33	RPE2
112	3.92	13.28	0.6	5.46	RPE3
209	5.72	15.93	3.2	9.07	RPE4
78	4.29	15.27	0.6	7.50	RPE5

طبق نتایج بدست آمده از آزمون تعیین عملکرد خمشی، پس از ایجاد اولین ترک در مخلوط RPE0 که فاقد الیاف است، ترک خوردگی در آزمون منتشر شده و باعث ایجاد جداشدگی در آزمون گردید که این مورد در نمونه‌های دارای الیاف مشاهده نگردید. افزودن الیاف به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده بر مقاومت باعث بهبود شکل‌پذیری، از بین رفتن رفتار شکننده و جذب و تحمل بار پس از ایجاد اولین ترک خوردگی می‌شود. افزایش میزان الیاف سینتتیک اضافه شده باعث افزایش مقاومت خمشی نمونه‌ها می‌شود. بیشترین مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه مربوط به طرح مخلوط RPE4 و کمترین میزان مقاومت خمشی ۷ روزه مربوط به طرح مخلوط RPE2 و پایین‌ترین مقاومت خمشی ۲۸ روزه در طرح مخلوط RPE1 بدست آمد.





شکل ۳ - نمودار عملکرد خمشی نمونه‌های مورد بررسی

۴- تحلیل نتایج آزمون‌ها

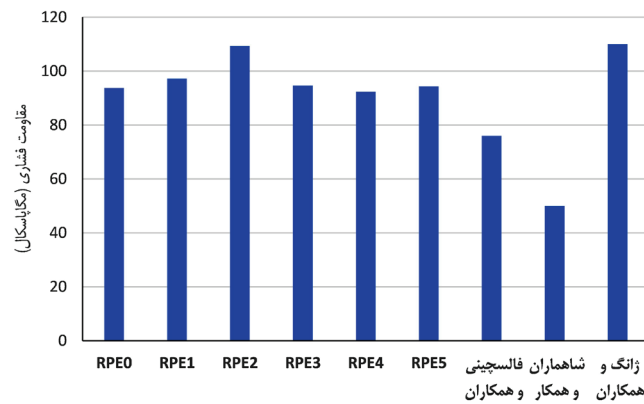
۴-۱- نمونه‌های فشاری

وجود الیاف در کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت، باعث تغییر رفتار شکننده کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت به رفتار شکل‌پذیر می‌شود. هنگامی که بارگذاری به حداکثر میزان خود رسید، آزمون‌های فشاری فاقد الیاف، شکست ناگهانی را تجربه کردند، در حالی که وجود الیاف باعث ایجاد انسجام بین اجزای سازنده کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت شد. افزودن الیاف به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت باعث ایجاد تغییر در عملکرد فشاری آن می‌شود.

همانگونه که در جدول ۶، مشاهده می‌شود، نتایج آزمایش مقاومت فشاری مقاومت نمونه مرجع RPE0، که فاقد الیاف می‌باشد در سن ۷ روز و ۲۸ روز به ترتیب معادل ۶۸/۴۵ مگاپاسکال و ۹۳/۷۵ مگاپاسکال می‌باشد. در شکل ۴، نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف با طرح مرجع مقایسه شده است. کمترین میزان مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه در طرح مخلوط RPE4 بدست آمد که علت آن را می‌توان به استفاده از حجم بالای الیاف سینتتیک مربوط دانست. بیشترین مقاومت فشاری ۷ روزه در طرح مخلوط RPE1 و بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه مربوط به طرح مخلوط RPE2 بود. در طرح مخلوط‌های RPE4 و RPE5 با کاهش میزان مصرف دوده سیلیس و زئولیت، کاهش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه به نسبت سایر طرح مخلوط‌ها مشاهده شد. همچنین استفاده از الیاف سینتتیک را می‌توان یکی دیگر از دلایل این کاهش مقاومت فشاری دانست. بین میزان مصرف زئولیت و مقاومت فشاری ۲۸ روزه ارتباط مستقیمی وجود دارد. چنانکه از نتایج مشاهده می‌شود با افزایش مقدار مصرف زئولیت، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز کاهش یافت و با ثابت ماندن میزان مصرف زئولیت در طرح مخلوط‌های RPE4 و RPE5 تغییر چندانی در مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن‌ها مشاهده نشد. در مقایسه طرح مخلوط‌های RPE4 و RPE5 با افزایش میزان الیاف سینتتیک کاهش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نیز مشاهده شد.

مقاومت فشاری نمونه فاقد الیاف در سن ۲۸ روزه به میزان ۳۷ درصد به نسبت مقاومت فشاری در سن ۷ روزه افزایش یافت. بالاترین میزان افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه بین طرح مخلوط‌های RPE1، RPE2 و RPE3 به نسبت طرح مخلوط فاقد الیاف به ترتیب ۳۶، ۱۷ و ۶ درصد و در سن ۲۸ روزه به ترتیب ۴، ۱۷ و ۱ درصد افزایش یافتند. طبق نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود با افزایش میزان زئولیت مصرفی، روند افزایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه کاهش می‌یابد و از ۱۷ درصد افزایش مقاومت فشاری در طرح مخلوط RPE2 که حاوی ۶۵ کیلوگرم زئولیت در هر مترمکعب است، به ۱ درصد افزایش در طرح مخلوط RPE3 با ۹۰ کیلوگرم در هر متر مکعب به نسبت طرح مخلوط فاقد الیاف می‌رسد که از نتایج کاربرد زئولیت طبیعی می‌باشد. در طرح مخلوط‌های RPE4 و RPE5 مقاومت فشاری ۲۸ روزه به نسبت مقاومت فشاری ۷ روزه به ترتیب ۳۶ و ۳۷ درصد نیز افزایش داشتند. همچنین مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه طرح مخلوط‌های حاوی الیاف سینتتیک و پلی وینیل الکل تغییر چندانی به نسبت طرح مخلوط فاقد الیاف نداشتند.

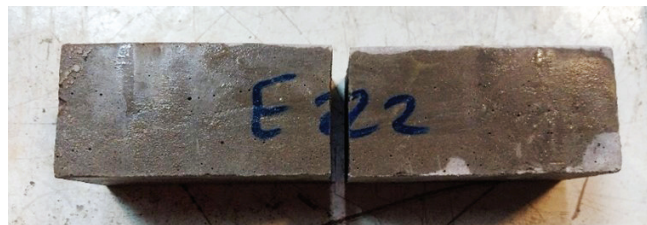
در شکل ۴، نتایج مقاومت فشاری طرح‌های مورد مطالعه با سه مرجع مختلف مقایسه شده است. فالسچینی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۶] مشخصات مکانیکی بتن حاوی سرباره کوره قوس الکتریکی را مورد بررسی قرار دادند که مقاومت فشاری مخلوط‌های مورد بررسی ایشان در محدوده ۴۰ تا ۷۶ مگاپاسکال می‌باشد. شاهماران و همکار در سال ۲۰۰۹ [۸] مشخصات کامپوزیت سیمانی مهندسی شده با مصالح جایگزین سیمان را مورد بررسی قرار دادند که مقاومت فشاری آزمون‌های مورد بررسی آن‌ها بین ۲۱ تا ۵۰ مگاپاسال بدست آمد. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۲۱] مشخصات مکانیکی بتن‌های پرمقاومت حاوی مواد جایگزین سیمان را مورد بررسی قرار دادند که مقاومت فشاری ۶۰ تا ۱۱۰ مگاپاسکال بدست آمد.



شکل ۴- مقایسه نتایج مقاومت فشاری طرح‌های مورد مطالعه با تحقیقات سایر محققین

۴-۲- نمونه‌های تیر خمشی

نمونه تیر خمشی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت فاقد الیاف پس از ایجاد اولین ترک، دچار خرابی شده و قابلیت تحمل بار نداشتند، در صورتی که سایر نمونه‌های دارای الیاف پس از ترک خوردگی، الیاف موجود در نمونه‌ها وارد مکانیسم تحمل بار شده و جذب انرژی کردند و باعث بروز رفتار شکل پذیر نمونه‌ها شدند. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که پس از بروز ترک، نمونه کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت فاقد الیاف قابلیت تحمل بار را نداشته و دچار شکستگی شده است. شکل ۶ تصاویر نمونه‌های حاوی یک نوع الیاف و شکل ۷ تصاویر نمونه‌های حاوی دو نوع الیاف پس از انجام آزمون خمشی را نشان می‌دهد. شکل ۸ وضعیت نمونه را در حین آزمون خمشی نشان می‌دهد.



شکل ۵ - نمونه تیر خمشی فاقد الیاف



شکل ۶ - تیرهای خمشی حاوی یک نوع الیاف



شکل ۷- تیرهای خمشی حاوی دو نوع الیاف



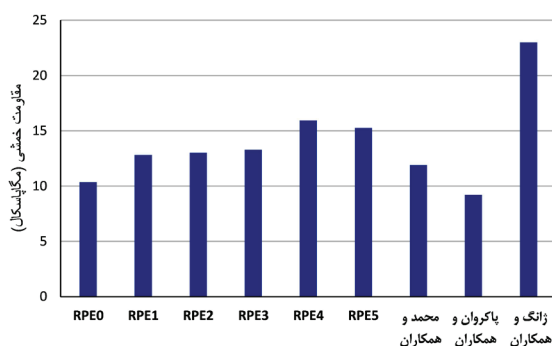
شکل ۸ - نمونه تیر خمشی در حین آزمون خمشی

همانگونه که در جدول ۷، مشاهده می‌شود، نتایج آزمایش مقاومت فشاری مقاومت نمونه مرجع RPE0، که فاقد الیاف می‌باشد در سن ۷ روز و ۲۸ روز به ترتیب معادل ۳/۸۵ مگاپاسکال و ۱۰/۳۵ مگاپاسکال می‌باشد. در شکل ۹، نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف با طرح مرجع مقایسه شده است. طبق نتایج آزمون مقاومت خمشی مشاهده می‌شود که طرح مخلوط‌های RPE4 و RPE5 دارای مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه بیشتری به نسبت سایر نمونه‌ها می‌باشند که از نتایج استفاده الیاف سینتتیک و پلی وینیل الکل بصورت ترکیبی و حجم زیاد الیاف پلی وینیل الکل بصورت تکی می‌باشد. مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه طرح مخلوط RPE4 به ترتیب ۹،۰۷ و ۱۵،۹۳ مگاپاسکال حاصل شد. که مهمترین علت این مورد را می‌توان به استفاده از الیاف با طول کوتاه پلی وینیل الکل نسبت داد، به جهت آنکه مهمترین نقش الیاف کوتاه در بهبود مقاومت خمشی قبل از ایجاد ترک خوردگی و افزایش مقاومت ایجاد اولین ترک خوردگی می‌باشد. با توجه به مقادیر یکسان الیاف موجود در طرح مخلوط‌های RPE1، RPE2 و RPE3 مقاومت خمشی ۲۸ روزه آن‌ها نزدیک به هم بوده و تفاوت چندانی با هم ندارند.

بیشترین میزان افزایش مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه به نسبت مقاومت خمشی در سن ۷ روزه با ۲۰۱ درصد مربوط به طرح مخلوط RPE2 مشاهده شد که علت این امر کمترین میزان مصرف پوزولان‌های دوده سیلیس و ژئولیت طبیعی به نسبت سایر طرح مخلوط‌های مورد مطالعه می‌باشد. مقاومت خمشی طرح مخلوط‌های RPE1، RPE2 و RPE3 در سن ۲۸ روزه به ترتیب ۲۴، ۲۶

و ۲۸ درصد افزایش داشتند که از مهمترین نتایج افزودن الیاف سینتتیک به طرح مخلوط‌های مورد بررسی می‌باشد. مقاومت خمشی طرح مخلوط RPE4 در سن ۲۸ روزه با افزایش ۵۴ درصدی به نسبت طرح مخلوط فاقد الیاف به ۱۵,۹۳ مگاپاسکال رسید که بیشترین مقاومت خمشی در بین طرح مخلوط‌های مورد بررسی می‌باشد که به دلیل افزودن ۱۴,۵ کیلوگرم الیاف پلی وینیل الکل به مخلوط کامپوزیت سیمانی مهندسی شده است. افزایش مقاومت خمشی آزمون‌های RPE4 و RPE5 در سن ۲۸ روزه به نسبت آزمون فاقد الیاف به ترتیب ۵۴ و ۴۸ درصد بود که در بین طرح مخلوط‌های مورد بررسی بیشترین مقدار را داشتند، این مورد یکی از ویژگی‌های استفاده از الیاف با طول کوتاه می‌باشد.

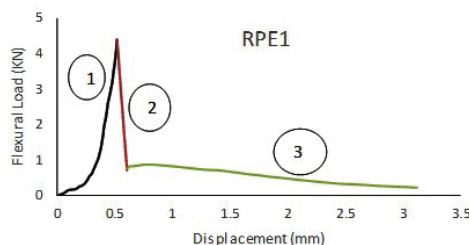
در نمودار شکل ۹، مقاومت خمشی طرح‌های مورد مطالعه با کارهای سایر محققین مقایسه گردیده است. محمد و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۱۱] عملکرد خمشی و فشاری کامپوزیت سیمانی مهندسی شده را مورد بررسی قرار دادند مقاومت خمشی بین ۲,۸ تا ۱۱,۹ مگاپاسکال بود. پاکروان و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱۲] مشخصات مکانیکی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده را مورد بررسی قرار دادند که مقاومت خمشی بین ۸,۵ تا ۹,۲ مگاپاسکال بدست آمد. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۲۱] مشخصات مکانیکی بتن‌های پرمقاومت حاوی مواد جایگزین سیمان را مورد بررسی قرار دادند مقاومت خمشی آن‌ها بین ۹ تا ۲۳ مگاپاسکال بدست آمد.



شکل ۹- مقایسه نتایج مقاومت خمشی طرح‌های مورد مطالعه با تحقیقات سایر محققین

۳-۴- منحنی رفتاری تحت بار خمشی

با مطالعه داده‌های مربوط به منحنی‌های خمشی نمونه‌های مسلح به الیاف رفتار سه خطی را در کل داده‌ها می‌توان تشخیص داد. در نمودار شکل ۱۰، نمودار رفتاری این نمونه‌های مسلح بصورت شماتیک نشان داده شده است. در این نمودار سه ناحیه ۱، ۲ و ۳ قابل تمیز است. ناحیه اولیه بصورت غیر خطی افزایشی، ناحیه دوم ارتباطی، به عنوان بخش نزولی خطی و ناحیه سوم نیز بصورت غیر خطی با رفتار توسعه ظرفیت کرنشی می‌باشد.



شکل ۱۰- منحنی مشخصه مدل رفتاری

مطابق رفتاری شناسایی شده و با بررسی نمودار عملکرد خمشی طرح RPE4 که در شکل ۳، مشاهده شد پس از ایجاد اولین ترک خوردگی در آزمون میزان جذب انرژی بصورت افزایشی ادامه یافت، این روند فقط در این طرح مخلوط ایجاد شد که یکی دیگر از ویژگی‌های کاربرد الیاف پلی وینیل الکل با طول کوتاه است. مدول و مقاومت کششی بسیار زیاد این نوع الیاف در کنار مقدار وزنی مورد استفاده از این نوع الیاف که بیشترین مقدار را در بین طرح‌ها به خود اختصاص داده است موجب بهبود فرآیند تقویت رفتار خمشی با عمل پل زنی بین ترک‌های ناشی از بار خمشی را می‌توان به این میزان بهبود نسبت داد.

استفاده از پودر زئولیت و دوده سیلیس به عنوان محصولات جانبی صنایع تولیدی باعث کاهش استفاده از سیمان و کاهش آسیب به محیط زیست می‌شود. نوآوری این تحقیق استفاده از الیاف جهت بهبود عملکرد مکانیکی و پودر سرباره کوره قوس الکتریکی، پودر زئولیت و دوده سیلیس جهت جلوگیری از آسیب به محیط زیست بصورت همزمان در کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت می‌باشد. چنانکه مشاهده می‌شود با این عمل، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی در مقایسه با نمونه فاقد الیاف بهبود یافته است. محمد [۱۱] در سال ۲۰۱۸ و پاکروان [۱۲] در سال ۲۰۱۶ مطالعاتی بر روی مشخصات مکانیکی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده با الیاف ترکیبی شامل مقاومت فشاری، خمشی و قابلیت جذب انرژی انجام دادند. مقایسه نتایج این محققین با نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که روند مشابهی از نتایج بدست آمده از آزمون‌های مقاومت فشاری، خمشی و رفتار جذب انرژی وجود دارد که این امر نتایج این تحقیق را پشتیبانی می‌نماید. هر چند تفاوت‌هایی از نظر مقیاس نتایج با مطالعه موجود وجود دارد که علت این امر متفاوت بودن نوع مصالح و مواد اولیه مورد استفاده به ویژه نوع و جنس الیاف در طرح مخلوط‌های قابل تفسیر است.

۴-۴- بررسی میزان جذب انرژی

بر اساس جدول ۷ مشاهده می‌گردد که استفاده از الیاف به‌طور کلی موجب بهبود ظرفیت جذب انرژی در محدوده ۲۰ تا ۲۰۰ درصد در مقایسه با مخلوط مرجع شده است.

که در میان نمونه‌های مورد بررسی RPE4 با داشتن بیشترین میزان الیاف از نوع پلی وینیل الکل به میزان ۱۴٫۵ کیلوگرم در هر متر مکعب بیشترین مقدار رشد جذب انرژی را تا حدود ۲۰۰ درصد در مقایسه با مخلوط مرجع بدون الیاف از خود نشان می‌دهد. این دستاورد هم راستا با سایر پارامترهای رفتار خمشی و فشاری می‌باشد که در این نوع مخلوط به علت بهبود پدیده پل زنی ما بین ترک‌های ناشی از بارهای خمشی بروز پیدا کرده است که منجر به افزایش ظرفیت طاقت یا به عبارتی جذب انرژی شده است. کمترین میزان افزایش جذب انرژی در بین مخلوط‌های مورد بررسی در مخلوط RPE2 به میزان ۲۱ درصد می‌باشد.

از بین نمونه‌های مورد بررسی RPE1 و RPE3 با رشد مقدار جذب انرژی به ترتیب در حدود ۱۰۰ درصد و بیش از ۱۰۰ درصد به علت قیمت تمام شده پایین‌تر نسبت به مخلوط RPE4 از دیدگاه فنی و اقتصادی قابل رقابت می‌باشد. در این نوع مخلوط نیز بهبود تا به میزان دو برابر در رفتار جذب انرژی می‌تواند ناشی از مدول الاستیسیته و ظرفیت کششی این الیاف در مقایسه با الیاف‌های پلی وینیل الکل و تفاوت در میزان مواد موثر چسباننده توجیه نمود.

مخلوط RPE2 به واسطه داشتن کمترین میزان دوده سیلیس و زئولیت به نسبت سایر مخلوط‌های مورد بررسی مقدار کمترین رشد در بحث جذب انرژی از خود بروز نموده است. این مخلوط حاوی مقدار الیاف مشابه با مخلوط‌های RPE1 و RPE3 لیکن مقدار مواد پوزولانی ترکیبی زئولیت و دوده سیلیس کمتری در حدود ۲۵ درصد نسبت به طرح‌های مورد اشاره را دارد.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی مقاومت فشاری و عملکرد خمشی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت مورد بررسی قرار گرفت که در آن از مصالح جایگزین سیمان و نیز پودر سرباره کوره قوس الکتریکی استفاده شد. مهمترین نتایج بدست آمده بر اساس مواد و مصالح‌های این مطالعه به شرح ذیل ارائه می‌شود:

- بیشترین مقاومت فشاری ۷ روزه در مخلوط RPE1 با ۹۲,۸۵ مگاپاسکال و بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه در مخلوط RPE2 با ۱۰۹,۳۱ مگاپاسکال بدست آمد.

- مقاومت فشاری سنین ۷ و ۲۸ روزه طرح مخلوط RPE4 به نسبت طرح مخلوط‌های RPE1، RPE2 و RPE3 کاهش یافت که از نتایج افزودن ۱۴,۵ کیلوگرم در هر مترمکعب الیاف پلی وینیل الکل به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده می‌باشد.

- استفاده از الیاف سینتتیک و پلی وینیل الکل بصورت ترکیبی در طرح مخلوط RPE5 باعث کاهش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه به نسبت مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های RPE1، RPE2 و RPE3 شد.

- بیشترین مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه در بین آزمون‌های مورد بررسی در طرح مخلوط RPE4 به ترتیب ۹,۰۷ و ۱۵,۹۳ مگاپاسکال مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که در میان نمونه‌های مورد بررسی این مخلوط با داشتن بیشترین میزان الیاف از نوع پلی وینیل الکل به میزان ۱۴,۵ کیلوگرم در هر متر مکعب بیشترین مقدار رشد جذب انرژی را تا حدود ۲۰۰ درصد در مقایسه با مخلوط مرجع بدون الیاف از خود نشان می‌دهد.

- مطالعات مربوط به منحنی‌های رفتاری نمونه‌های حاوی الیاف، نشان دهنده رفتار سه بخشی شامل شاخه صعودی تا حد مقاومت خمشی حداکثر، بخش نزولی بصورت افت مشخصات ظرفیت خمشی ولی با توسعه رفتار کرنشی و انعطاف پذیری و در آخرین مرحله، رفتار غیر خطی بصورت توسعه ظرفیت کرنشی می‌باشد.

تشکر و قدردانی

مراحل تحقیق در آزمایشگاه بخش فناوری بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انجام پذیرفته است. بدین وسیله مولفین، از آن مرکز تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌دارند.

۷- مراجع

- [1] Shoji, D., He, Z., Zhang, D. and et al., (2022). *The greening of engineered cementitious composites (ECC): A review. Construction and Building Materials*, 327: p.126701.
- [2] Zhu, H.; Yu, K.; Li, V.C. (2021). *Sprayable Engineered Cementitious Composites (ECC) Using Calcined Clay Limestone Cement (LC3) and PP Fiber. Cem. Concr. Compos.* 115: 103868.
- [3] M. Imani, M. Donn, Z. Balador; (2019). *Bio-inspired materials: contribution of biology to energy efficiency of buildings*, in: L.M.T. Martínez, O.V. Kharissova, B.I. Kharisov (Eds.), *Handbook of Ecomaterials*, Springer International Publishing, Cham, pp. 2213–2236.
- [4] H. Bahmani, D. Mostofinejad, (2022). *Microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC) – a review study, J. Build. Eng.* 50: 104118.
- [5] D. Ravichandran, P.R. Prem, S.K. Kaliyavaradhan, P.S. Ambily, (2022). *Influence of fibers on fresh and hardened properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC)—a review, J. Build. Eng.* 57: 104922.

- [6] K.T. Soe, Y.X. Zhang, L.C. Zhang, (2013). *Impact resistance of hybrid-fiber engineered cementitious composite panels*, *Compos. Struct.* 104: 320–330.
- [7] V.C. Li, C.K.Y. Leung, (1992). *Steady state and multiple cracking of short random fiber composites*, *ASCE J. Eng. Mech.* 118: 2246–2264.
- [8] Sahmaran M, Li VC. (2009). *Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash*. *Cem Concr Res* 39:1033–43.
- [9] M.D. Lepech, V.C. Li, R.E. Robertson, G.A. Keoleian, (2008). *Design of green engineered cementitious composites for improved sustainability*, *Aci Mater. J.* 105: 567.
- [10] Y. Ruan, B. Han, X. Yu, Z. Li, J. Wang, S. Dong, J. Ou, (2018). *Mechanical behaviors of nano-zirconia reinforced reactive powder concrete under compression and flexure*, *Constr. Build. Mater.* 162: 663–673.
- [11] B.S. Mohammed, V.C. Khed, M.S. Liew, (2018). *Optimization of hybrid fibres in engineered cementitious composites*, *Constr. Build. Mater.* 190: 24–37.
- [12] H.R. Pakravan, M. Jamshidi, M. Latifi, (2016). *Study on fiber hybridization effect of engineered cementitious composites with low- and high-modulus polymeric fibers*, *Constr. Build. Mater.* 112: 739–746.
- [13] S.F.U. Ahmed, M. Maalej, (2009). *Tensile strain hardening behaviour of hybrid steel-polyethylene fiber reinforced cementitious composites*, *Constr. Build. Mater.* 23: 96–106.
- [14] Shiyao Zhu, Y.X. Zhang, C.K. Lee, (2024). *an experimental study on hybrid fibre reinforced engineered cementitious composite link slabs under static and fatigue loadings*, *Engineering Structures* 300: 117254.
- [15] Feng Shi, Thong M. Pham, Hong Hao, Yifei Hao, (2020). *Post-cracking behavior of basalt and macro polypropylene hybrid fiber reinforced concrete with different compressive strengths*, *Construction and Building Materials* 262: 120108.
- [16] P.K. Mehta, (2002). “Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development”, *Concrete International*.
- [17] Malhotra VM. (2000). *Role of Supplementary Cementing Materials in Reducing Greenhouse Gas Emissions*. In: Gjørsv OE, Sakai K, editors. *Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century*. London: E&FN Spon.
- [18] Torres A, Brandt J, Lear K, Liu J. (2017). *A looming tragedy of the sand commons*. *Science* 357(6355):970–1.
- [19] L.F. Zhang, W.Q. Liu, L. Wang, Z.B. Ling, (2020). *On-axis and off-axis compressive behavior of pultruded GFRP composites at elevated temperatures*, *Compos. Struct.* 236: 111891.
- [20] J.K. Kim, J.S. Kim, G.J. Ha, Y.Y. Kim, (2007). *Tensile and fiber dispersion performance of ECC (engineered cementitious composites) produced with ground granulated blast furnace slag*, *Cem. Concr. Res.* 37: 1096–1105.
- [21] J. Zhang, Q. Wang, Z.B. Wang, (2016). *Optimizing design of high strength cement matrix with supplementary cementitious materials*, *Constr. Build. Mater.* 120: 123–136.
- [22] Qing Wang, M.H. Lai, J. Zhang, Zhenbo Wang, J.C.M. Ho, (2020). *Greener engineered cementitious composite (ECC) – The use of pozzolanic fillers and uncoiled PVA fibers*, *Construction and Building Materials* 247: 118211.

- [23] ASTM C1017 / C1017M-13e1, (2013). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [24] ASTM C494 / C494M-19, (2019). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [25] ASTM C1116 / C1116M-10a, (2015). *Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [26] BS EN 12390-3, (2019). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cement Mortar*.
- [27] CECS 44-8. (2009). *Standard Test Methods for Fiber Reinforced Concrete*; China Engineering and Construction Society Press: Beijing, China.
- [28] He Zhu, Duo Zhang, Tianyu Wang, Haoliang Wu, Victor C. Li, (2020). *Mechanical and self-healing behavior of low carbon engineered cementitious composites reinforced with PP-fibers*, *Construction and Building Materials* 259: 119805.
- [29] Ahsan Waqar, Muhammad Basit Khan, et al, (2024). *Investigating the synergistic effects of carbon fiber and silica fume on concrete strength and eco-efficiency*, *Case Studies in Construction Materials* 20: e02967.
- [30] Kun-Mo Lee, Pil Ju Park, (2005). *Estimation of the environmental credit for the recycling of granulated blastfurnace slag based on LCA*, *Resources, Conservation and Recycling* 44: 139–151.
- [31] Valipour M, Yekkalar M, Shekarchi M, Panahi S, (2013). *Environmental assessment of green concrete containing natural zeolite on the global warming index in marine environments*, *Journal of Cleaner Production*, 1-6.
- [32] Xiao-Yong Wang, (2020). *Optimal mix design of low-CO2 blended concrete with limestone powder*, *Construction and Building Materials* 263: 121006.