

## بررسی اثر مقادیر مختلف الیاف سینتیک بر عملکرد مکانیکی و دوام کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC)

مقاله علمی - پژوهشی

مهدی کوهی آذرتولون، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

جعفر سبحانی<sup>\*</sup>، دانشیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

سیدمحمد میرحسینی، دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

احسان‌اله ضیغمی، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

محمدرضا بصیری، استادیار، گروه مهندسی نساجی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [sobhani@bhrc.ac.ir](mailto:sobhani@bhrc.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۲۴۲-۲۲۳

### چکیده

در این پژوهش، تأثیر افزودن الیاف سینتیک بر خواص مکانیکی و دوام کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC) با استفاده از چهار مخلوط مختلف شامل یک مخلوط شاهد (فاقد الیاف) و سه مخلوط حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم الیاف سینتیک در هر مترمکعب کامپوزیت سیمانی مهندسی شده، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن الیاف سینتیک به‌طور قابل‌توجهی مقاومت کششی شکافتی، چقرمگی و مقاومت پسماند را بهبود می‌بخشد. به‌طور خاص، مخلوط حاوی ۳۰ کیلوگرم الیاف سینتیک بیشترین مقاومت کششی شکافتی (۱۰،۷۳ مگاپاسکال) و چقرمگی (۱۷۴ نیوتن-میلی‌متر) را نشان داد. با این حال، افزایش مقدار الیاف سینتیک به بیش از ۱۰ کیلوگرم منجر به کاهش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته شد. از نظر دوام، افزودن الیاف سینتیک تأثیرات متفاوتی داشت: مخلوط حاوی ۳۰ کیلوگرم الیاف سینتیک کم‌ترین جذب آب را نشان داد که می‌توان از نتایج کاهش ترک‌های سطحی دانست و همچنین با افزایش میزان الیاف مخلوط‌ها، مقدار عمق نفوذ آب و نفوذ یون کلرید افزایش یافت که احتمالاً به دلیل ایجاد منافذ ریز در اطراف الیاف و افزایش نفوذ پذیری داخلی است. این نتایج نشان می‌دهد که الیاف سینتیک با ایجاد شبکه‌ای از رشته‌ها در ماتریس کامپوزیت سیمانی مهندسی شده، تنش‌های کششی را توزیع کرده و با بروز اثر پل زدن، از گسترش ترک‌ها جلوگیری می‌کنند. این امر منجر به افزایش انرژی شکست و بهبود رفتار مکانیکی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده می‌شود، اما ممکن است تأثیر منفی بر برخی از خواص دوام داشته باشند. در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که مخلوط حاوی ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتیک به‌عنوان ترکیب بهینه از نظر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته شناخته می‌شود، در حالی که مخلوط حاوی ۳۰ کیلوگرم الیاف سینتیک برای بهبود مقاومت کششی و چقرمگی مناسب است.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC)، الیاف سینتیک، مقاومت فشاری، چقرمگی، نفوذپذیری، رفتار مکانیکی

### ۱- مقدمه

تسلیح دارای محدودیت‌هایی از جمله مقاومت خمشی و کششی کم، سختی محدود، عرض ترک‌های بزرگ و رفتار شکننده تحت بارهای کششی و خمشی است. افزایش تقاضا برای

بتن به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین مواد ساختمانی در سطح جهان شناخته شده و به‌طور گسترده‌ای در ساخت سازه‌های مختلف و زیرساخت‌های جاده‌ای استفاده می‌شود. با این حال، بتن بدون

مدول الاستیسیته در حالی که شکل‌پذیری کافی حفظ شود، می‌تواند بطور قابل توجهی کارایی آن را افزایش دهد، زیرا این ویژگی‌ها برای طراحی سازه‌های حیاتی هستند (Liu et al., 2023). استفاده از انواع مختلف الیاف نشان داده شده است که مقاومت کششی و چقرمگی بتن را افزایش می‌دهد (Pakravan et al., 2016; Ahmed and Maalej, 2009; Yao et al., 2003). الیاف ماکروسنتتیک، به عنوان مثال، خواص مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشند (Chen and Liu, 2005; Cheng and Huang, 2022). استفاده از الیاف با اندازه‌های مختلف به طور مؤثر انتشار و توزیع ترک در بتن را کنترل می‌کند (Meng and Khayat, 2018; Wang et al., 2019; Zhu et al., 2024). الیاف پلی‌اتیلن (PE) و فولادی تأثیر مثبتی بر مقاومت کششی بتن با عملکرد بالا دارد (Shi et al., 2020). استفاده از الیاف فولادی و پلی‌اتیلن در ECC عملکرد را تحت بارگذاری مکرر بهبود می‌بخشد و به طور مؤثر عرض ترک را در طول بارگذاری خمشی کنترل می‌کند (Malhotra et al., 2000; Zhu et al., 2020). استفاده از الیاف فولادی و پلی‌اتیلن ظرفیت و مقاومت کششی ECC را افزایش می‌دهد (Torres et al., 2017). مطالعات همچنین نشان داده‌اند که استفاده از الیاف پلی‌اتیلن و پلی‌وینیل الکل به طور قابل توجهی خواص مکانیکی ECC را بهبود می‌بخشد (Zhang et al., 2020). الیاف بر اساس اندازه به دو دسته تقسیم می‌شوند: میکروالیاف و ماکروالیاف. میکروالیاف‌ها، که معمولاً ۶ تا ۲۰ میلی‌متر طول و ده‌ها میکرون قطر دارند، تأثیر محدودی بر عملکرد ساختاری تحت تغییر شکل‌های بزرگ دارند. در مقابل، ماکروالیاف‌ها، که از ۳۰ تا ۶۰ میلی‌متر طول و بیش از ۰٫۳ میلی‌متر قطر دارند، ظرفیت باربری و کنترل ترک‌های قابل مشاهده را فراهم می‌کنند که پس از شکست ماتریس، مشابه با میله‌های تقویت‌کننده عمل می‌کنند (Chen et al., 2013).

تولید جهانی بتن سالانه بیش از ۱۰ میلیارد تن است و هر تن تولید سیمان پورتلند تقریباً یک تن دی‌اکسید کربن را در جو منتشر می‌کند (Qiu et al., 2016; Zhu et al., 2014). استفاده گسترده از ماسه بستر رودخانه به عنوان سنگدانه ریز در بتن منجر به تخریب محیط‌زیست، از جمله فرسایش بستر رودخانه و افزایش آسیب‌پذیری در برابر سیلاب‌ها و طوفان‌ها شده است (Zhang et al., 2016). ECC که نیاز به سنگدانه‌های درشت را حذف می‌کند، جایگزینی پایدار ارائه می‌دهد. با این حال، مقدار سیمان بیشتر نسبت به بتن معمولی هزینه‌ها و انتشار کربن را

زیرساخت‌های پیشرفته شهری منجر به افزایش قابل توجه در مصرف بتن و سیمان شده و این امر به تخلیه منابع طبیعی و انتشار مقادیر زیادی دی‌اکسید کربن منجر می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که تولید سیمان تقریباً ۵ تا ۷ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی را تشکیل می‌دهد (Shoji et al., 2022; Ramezani and Esfahani, 2018; Modarres and Ghalehnavi, 2024; Hasani et al., 2021). در حالی که بتن‌های مسلح شده با الیاف (FRC) بخشی از این مشکلات را حل می‌کنند، آن‌ها همچنان رفتار نرم‌شوندهی کششی و شکل‌پذیری محدود را نشان می‌دهند (Ravichandran et al., 2022). کامپوزیت‌های سیمانی تقویت‌شده با خاصیت سخت‌شدن کرنش (SHCC) که به عنوان کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده (ECC) نیز شناخته می‌شوند، برای غلبه بر این چالش‌ها توسعه یافته‌اند. ECCها از استراتژی مدیریت شکست منحصربه‌فردی استفاده می‌کنند که توزیع الیاف را به طور کارآمد تضمین کرده و مقاومت در برابر ترک و چقرمگی را افزایش می‌دهد (Soe et al., 2013). ECCها که در دهه ۱۹۹۰ توسط لی و همکارانش معرفی شدند، یک دسته تخصصی از بتن مسلح فوق‌العاده با عملکرد بالا (UHPFRC) بر اساس تئوری میکرومکانیک هستند (Kafodya and Okonta, 2020; Kanda et al., 2002; Li, 1998; Zarei et al., 2022; Li et al., 2002). بتن معمولی، ECC پس از ترک اولیه رفتار سخت‌شدن کرنشی از خود نشان می‌دهد که مشابه با فلزات شکل‌پذیر است، با ظرفیت کرنش ۳۰۰ تا ۵۰۰ برابر بیشتر از بتن معمولی. علاوه بر این، ECC نشان می‌دهد که کنترل عرض ترک تحت بارگذاری با ترک‌های میکرو که به طور یکنواخت گسترش یافته و به دلیل طراحی میکرومکانیکی خود در حدود ۶۰ میکرومتر تثبیت می‌شوند (Gillani et al., 2020). استفاده انحصاری از ماسه نرم در فرمولاسیون ECC ظرفیت کرنشی را افزایش داده و ترک‌خوردگی چندگانه را تقویت می‌کند (Li, 1993; Mishra et al., 2008; Wu, 1995; Zhang and Leng, 2008). با این حال، عدم وجود سنگدانه‌های درشت در ECC منجر به مصرف بالاتر سیمان می‌شود که معمولاً در فرمولاسیون‌های استاندارد بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است (Asgar and Khattak, 2024). اگرچه ECC برای کاربردهای سازه‌ای امیدوارکننده است، اما مقاومت فشاری نسبتاً پایین‌تر آن در مقایسه با سایر مواد بتنی همچنان یک محدودیت محسوب می‌شود (Ruan et al., 2018; Choucha et al., 2018). بهبود مقاومت فشاری و

شیمیایی مصالح مصرفی در جدول ۲ آورده شده است. برای اطمینان از کارایی مخلوطها از فوق روان کننده با مشخصات مشخص شده در جدول ۳، استفاده شد.

علاوه بر این، شکل ۳ نتایج آنالیز اندازه دانه برای سیمان پرتلند معمولی (OPC)، ماسه سیلیس، میکروسیلیس، دوده سیلیس (SF) و سرباره کوره بلند آهنگدازی (GGBFS)، همراه با منحنیهای مربوطه را نشان می دهد. تصویر الیاف سیستتیک مورد استفاده در شکل ۴ و ویژگیهای آن در جدول ۴ ارائه شده است. مقدار مصالح مصرفی در هر طرح مخلوط در جدول ۵ ارائه شده است.

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۱- فرآیند مخلوط کردن

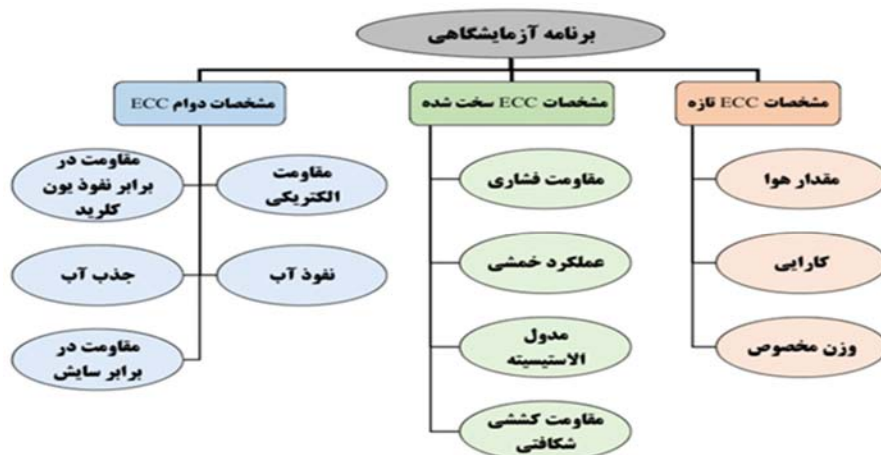
فرآیند مخلوط کردن با ترکیب اولیه مصالح سیمانی و ماسه سیلیس در یک مخلوط کن بتنی به مدت ۳ دقیقه آغاز شد. سپس، آب و فوق روان کننده به تدریج اضافه شدند تا به یک مخلوط یکنواخت دست یابیم. در نهایت، الیاف به آرامی درون مخلوط کن اضافه شدند تا از تراکم و گلوله شدن الیاف جلوگیری شود. پس از اینکه الیاف به طور کامل ترکیب شدند، مخلوط کردن به مدت ۳ دقیقه ادامه یافت تا توزیع یکنواخت الیاف را تضمین کند (ASTM C31, 2022; ASTM C511, 2022).

افزایش می دهد (Liu et al., 2018). برای کاهش این مسئله، مواد سیمانی مکمل (SCM) مانند پودرسرباره کوره بلند آهنگدازی (GGBFS) و دوده سیلیس می توانند به عنوان جایگزین جزئی سیمان استفاده شوند. تحقیقات نشان داده اند که گنجاندن GGBFS و دوده سیلیس مقاومت فشاری ECC را افزایش می دهد (Wang et al., 2020).

یک نوآوری کلیدی این تحقیق، استفاده از GGBFS و دوده سیلیس برای کاهش مصرف سیمان و در نتیجه مقابله با نگرانیهای زیست محیطی مرتبط با انتشار دی اکسید کربن است. این تحقیق با انجام آزمایشهای تجربی نشان داده شده در شکل ۱، هدف دارد تا اثرات همزمان الیاف سیستتیک بر خواص تازه، سخت شده و دوام ECC حاوی این الیاف را ارزیابی کند.

### ۲- مصالح

در این مطالعه آزمایشگاهی، محصولات فرعی صنعتی، شامل دوده سیلیس (SF) و سرباره کوره بلند آهنگدازی (GGBFS)، همراه با سیمان پرتلند معمولی (OPC)، ماسه سیلیس و میکروسیلیس برای ایجاد کامپوزیت های سیمانی مهندسی شده (ECC) مورد استفاده قرار گرفتند. تصاویر مصالح مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. خواص مکانیکی سیمان مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ خلاصه شده است و ترکیبات



شکل ۱. برنامه آزمایشگاهی تعیین مشخصات کامپوزیت سیمانی مهندسی شده



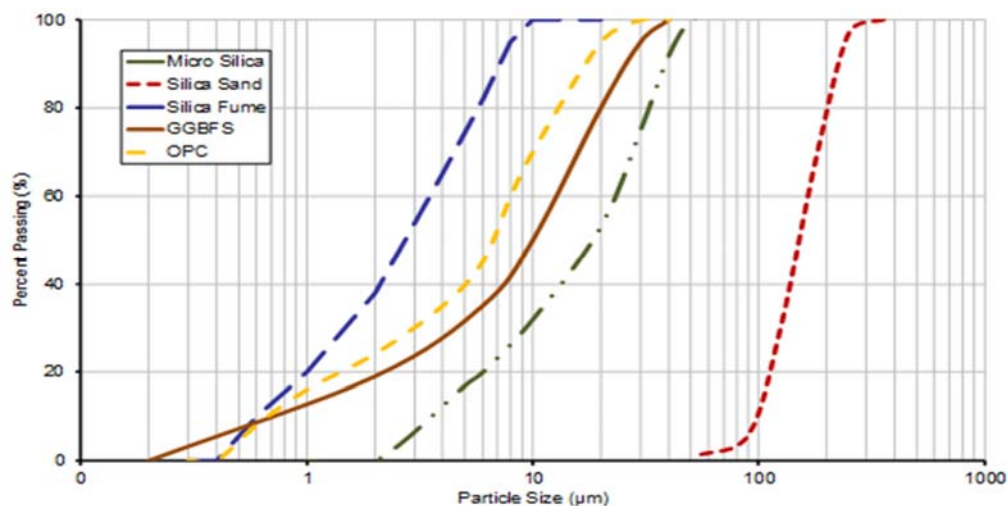
شکل ۲. مصالح مورد استفاده (الف) ماسه سیلیسی، (ب) پودر سرباره کوره آهنگدازی، (پ) سیمان، (ت) سیلیس میکرونیزه، (ث) دوده سیلیس

جدول ۱. مشخصات سیمان مصرفی

مقدار	ویژگی‌ها
۳۰۰	نرمی
۴۰	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
۷	زمان گیرش نهایی (ساعت)
۱۰	مقاومت فشاری ۳ روزه (مگاپاسکال)
۱۶	مقاومت فشاری ۷ روزه (مگاپاسکال)
۳۲	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)

جدول ۲. مشخصات فوق روان کننده

ظاهر	مایع قهوه‌ای روشن
یون کلرید	کمتر از ۰/۱ درصد
<b>PH</b>	۶/۵-۷/۵
وزن مخصوص (گرم بر سانتی مترمکعب)	۱/۱
نقطه انجماد	۲



شکل ۳. نمودار توزیع دانه‌بندی سیمان، سیلیس میکرونیزه، ماسه سیلیسی، دوده سیلیس و پودر سرباره کوره آهنگدازی

جدول ۳. مشخصات شیمیایی دوده سیلیس، پودر سرباره کوره آهن‌گدازی، سیمان، سیلیس میکرونیزه (درصد)

ماده	دوده سیلیس	پودر سرباره کوره آهن‌گدازی	سیمان	سیلیس میکرونیزه
SiO <sub>2</sub>	90.36	37.82	22.33	98
CaO	0.83	37.8	61.45	0.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.43	12.58	4.8	1.05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.58	1.35	3.5	0.4
MgO	0.89	4.89	2.7	0.18
K <sub>2</sub> O	1.46	0.41	0.62	0.9
Na <sub>2</sub> O	0.66	0.33	0.37	0.5
So <sub>3</sub>	-	0.62	2.4	0.02

جدول ۵. مشخصات مخلوطها (کیلوگرم بر مترمکعب).

کد مخلوط	الیاف سینتتیک (درصد)
R	۰
S1	۱۰ (۰/۵)
S2	۲۰ (۱)
S3	۳۰ (۱/۵)

\*سیمان: ۷۰۰، دوده سیلیس: ۵۰، پودر سرباره کوره

آهن‌گدازی: ۳۵۰، ماسه سیلیسی: ۵۰۰.

میکرو سیلیس: ۲۲۰، آب: ۲۲۰



شکل ۴. تصویر الیاف سینتتیک.

جدول ۴. مشخصات الیاف سینتتیک.

نوع الیاف	الیاف سینتتیک
طول (میلی‌متر)	60
قطر (میلی‌متر)	0.4-0.5
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	570-660
مدول الاستیسیته (GPa)	6
چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	0.9

### ۳-۳- ارزیابی همگنی مخلوطها

شکل ۵ (الف) مخلوط تازه ECC و شکل ۵ (ب) مخلوط سخت‌شده را نشان می‌دهد. شکل ۵ (ب) نشان‌دهنده بازرسی بصری سطح مخلوط سخت‌شده با تأکید بر همگنی نمونه‌های ECC تولید شده می‌باشد.

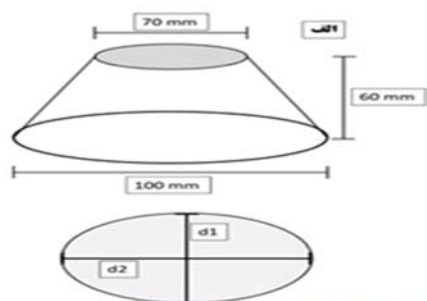
### ۳-۴- روش آزمون

#### ۳-۴-۱- ویژگی‌های ECC تازه

ویژگی‌های ECC تازه، مانند وزن مخصوص، درصد هوای ناخواسته و مینی‌اسلامپ، مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایش‌ها برای ارزیابی قابلیت کارایی و مشخصات ECC تازه انجام شد، که کاربرد آن در پروژه‌های ساخت‌وساز حیاتی است. برای تعیین کارایی مخلوط ECC، میانگین دو قطر عمودی مخلوط به‌عنوان میزان اسلامپ ارائه شده است (شکل ۶ الف). آزمون تعیین درصد هوای کامپوزیت سیمانی مهندسی شده توسط ASTM C231 (2022) انجام شد (شکل ۶ ب). علاوه بر این،

#### ۳-۲- قالب‌گیری و عمل‌آوری

نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای بر مبنای استانداردهای ASTM C31 (2022) و ASTM C511 (2022) ساخته شدند. پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها با روکش مناسب پوشانده شده و به مدت ۲۴ ساعت در محیط کنترل‌شده با دمای ۲۵ ± ۲ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. پس از این دوره عمل‌آوری اولیه، نمونه‌های قالب‌گیری‌شده برای عمل‌آوری مرطوب تا زمان آزمون به یک مخزن آب منتقل شدند.

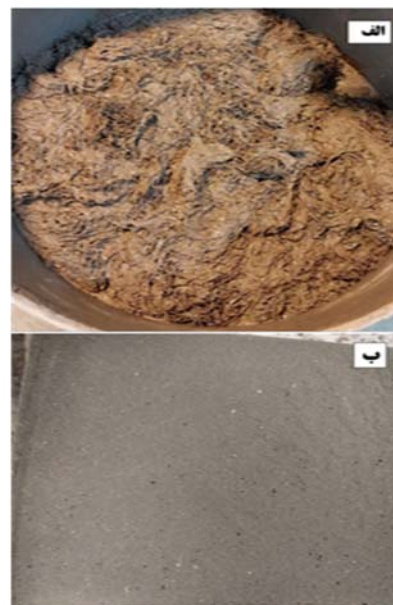


شکل ۶. الف) آزمون مینی اسلامپ، ب) آزمون وزن مخصوص،  
پ) آزمون درصد هوا

### ۳-۴-۳- آزمون عملکرد خمشی

مقاومت خمشی کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده (ECC) با استفاده از نمونه‌های تیر منشوری با ابعاد  $150 \times 150 \times 550$  میلی‌متر توسط استاندارد ASTM C1609/C1609M-19a ارزیابی شد. آزمایش‌ها در سن ۲۸ روز تحت شرایط بارگذاری نقطه سوم برای شبیه‌سازی توزیع تنش واقعی انجام شد. یک نرخ بارگذاری کنترل شده ۰٫۱ میلی‌متر بر دقیقه برای اطمینان از یک افزایش تدریجی و سازگار در بار، به حداقل رساندن هر گونه تأثیر بالقوه یا شوک اعمال شد. نمونه‌ها به‌طور پیوسته تا زمان شکست بارگذاری شدند و حداکثر بار اعمالی در کیلونیوتن ثبت شد. سه نمونه تکرار شده برای هر مخلوط مورد آزمایش قرار گرفتند و میانگین مقاومت خمشی محاسبه و به‌عنوان مقدار مقاومت خمشی هر مخلوط گزارش شد. تیر خمشی در حین انجام آزمون در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

اندازه‌گیری وزن مخصوص کامپوزیت سیمانی مهندسی شده با استاندارد ASTM C138 (2022) انجام شد (شکل ۶ پ).

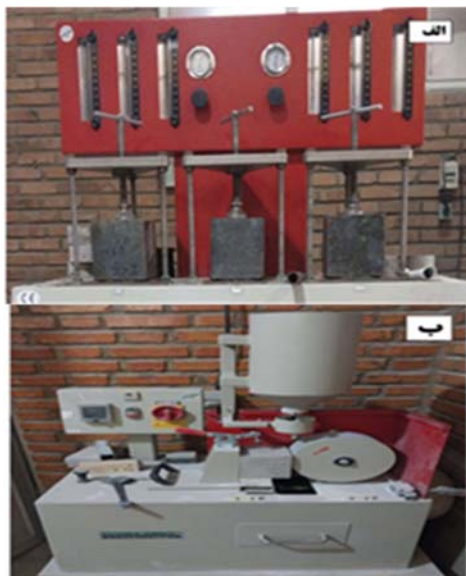


شکل ۵. الف) مخلوط تازه کامپوزیت سیمانی مهندسی شده،  
ب) سطح داخلی مخلوط سخت شده

### ۳-۴-۲- آزمون مقاومت فشاری

نمونه‌های مکعبی تهیه شده با ابعاد  $100 \times 100 \times 100$  میلی‌متر برای آزمایش مقاومت فشاری آماده شدند. برای هر مخلوط، سه نمونه در سنین عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق با استاندارد BS EN 12390-3 (2019) مورد آزمون قرار گرفتند. مقاومت فشاری با اعمال یک نرخ بارگذاری ثابت  $0.6 \pm 0.2$  نیوتن بر میلی‌متر مربع بر ثانیه تعیین شد. پس از آن، بار به‌طور مداوم و به آرامی افزایش یافت تا از هر گونه شوک یا ضربه ناگهانی تا زمانی که نمونه به حداکثر ظرفیت تحمل بار خود برسد، جلوگیری شود. این روش ارزیابی دقیق و قابل اعتماد، مقاومت فشاری کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده (ECC) را تضمین می‌کند.

در برابر نفوذ آب اندازه‌گیری شد. تعدادی از نمونه‌ها در حین انجام آزمون در شکل ۸-الف مشاهده می‌شود. عمق نفوذ کمتر نشان‌دهنده دوام بیشتر، به‌ویژه در محیط‌های در معرض رطوبت است.



شکل ۸. الف) آزمون نفوذ آب، ب) آزمون مقاومت سایشی

### ۳-۴-۷- جذب آب

جذب آب ECC توسط DIN EN 1338 (2003) تعیین شد. نمونه‌ها خشک شدند و برای محاسبه درصد جذب آب، درون آب غوطه‌ور شدند و نهایتاً نمونه‌ها به‌طور منظم توزین شدند. جذب آب کمتر نمونه‌ها نشان‌دهنده کاهش تخلخل و افزایش دوام، به‌ویژه جهت قرارگیری کامپوزیت سیمانی مهندسی شده در محیط‌های مستعد رطوبت است.

### ۳-۴-۸- آزمون مقاومت در برابر سایش (روش چرخ پهن)

مقاومت سایشی مخلوط ECC با استفاده از روش چرخ پهن دورانی بر مبنای ASTM C944 (2012) مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها در معرض یک ابزار چرخان به تعداد دوره مشخصی قرار گرفتند و پس از آن عرض ساییدگی ایجادشده بر روی آزمون اندازه‌گیری شد. آزمون در حین آزمون در شکل ۸-ب مشاهده می‌شود. مقادیر عرض ساییدگی کمتر نشان‌دهنده مقاومت بیشتر در برابر سایش است که بیانگر مناسب بودن مصالح برای سطوح پرترافیک و کاربردهای صنعتی می‌باشد.



شکل ۷. تیر خمشی حین آزمون

### ۳-۴-۹- آزمون مقاومت کششی شکافتی

مقاومت کششی شکافتی کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده (ECC) با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر توسط استاندارد ASTM C496 (2017) ارزیابی شد. آزمایش‌ها در سن ۲۸ روزه برای ارزیابی رفتار کششی مخلوط‌ها انجام شد. سه نمونه برای هر مخلوط مورد آزمایش قرار گرفتند و میانگین نتیجه به دست‌آمده مقاومت شکست کششی محاسبه و به عنوان مقدار نهایی گزارش شد. این روش آزمون، اندازه‌گیری دقیق و قابل اطمینان ویژگی‌های کششی ECC را تضمین می‌کند.

### ۳-۴-۵- مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته مخلوط‌ها با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد  $150 \times 300$  میلی‌متر تهیه و با ASTM C469 (2002) ارزیابی شدند. نمونه‌ها تحت بارگذاری محوری قرار گرفته و تنش و کرنش در محدوده الاستیک اندازه‌گیری شدند. مدول الاستیسیته به‌صورت شیب بخش خطی منحنی تنش-کرنش محاسبه شد. آزمایش‌ها تحت دمای کنترل شده و رطوبت نسبی ثابت برای اطمینان از دقت بالا و تکرارپذیری نتایج انجام شدند.

### ۳-۴-۶- مقاومت در برابر نفوذ آب

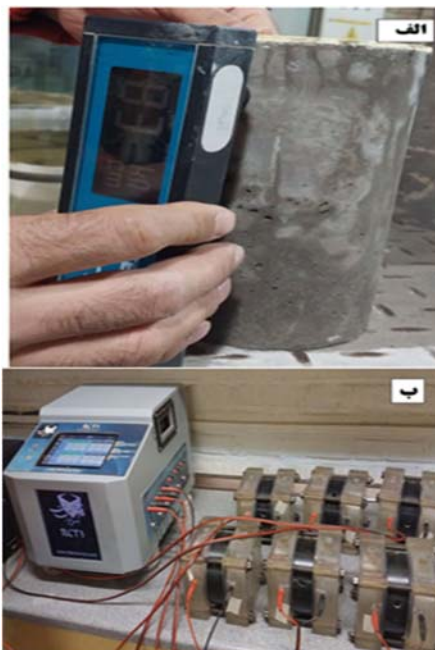
مقاومت در برابر نفوذ آب ECC بر اساس استاندارد EN12390-8 (2009) بررسی شد. نمونه‌ها در معرض فشار آب قرار گرفتند و عمق نفوذ آب برای تعیین توانایی مقاومت مخلوط

### ۳-۴-۹- مقاومت در برابر نفوذ یون کلر

مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید مخلوط ECC توسط ASTM (2012) C1202 ارزیابی شد (شکل ۹-الف). نمونه‌ها در معرض یک پتانسیل الکتریکی قرار گرفتند و کل بار عبور داده شده اندازه‌گیری شد. مقادیر بار کمتر نشان‌دهنده نفوذپذیری یون کلرید کاهش یافته است که نشان‌دهنده دوام مصالح مورد استفاده در محیط‌های دریایی یا مناطقی است که در معرض نمک‌های یخ‌زدایی قرار دارند.

### ۳-۴-۱۰- آزمایش مقاومت سطحی الکتریکی (SR)

مقاومت الکتریکی مخلوط ECC با استفاده از روش چهار نقطه‌ای بر مبنای (AASHTO T358 (2015) اندازه‌گیری شد (شکل ۹-ب). این آزمون توانایی ماده مقابل مقاومت در برابر عبور جریان الکتریکی را که مستقیماً به نفوذپذیری و دوام آن مرتبط است، ارزیابی می‌کند. مقادیر مقاومت بالاتر، نفوذپذیری کمتر و دوام بیشتر را نشان می‌دهد، به‌ویژه در محیط‌هایی که مقاومت در برابر خوردگی اهمیت بالایی دارد.



شکل ۹. الف) آزمون مقاومت الکتریکی

ب) آزمون نفوذ یون کلرید

### ۴- نتایج و بحث

#### ۴-۱- مشخصات ECC تازه

در این مطالعه، سه پارامتر کلیدی شامل وزن مخصوص، مقدار هوای غیر عمد و اسلامپ برای چهار مخلوط کامپوزیت سیمانی مهندسی شده شامل R، S1، S2 و S3 اندازه‌گیری شد. نتایج آزمون‌های مخلوط تازه کامپوزیت سیمانی مهندسی شده در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. مشخصات مخلوط تازه.

کد مخلوط	اسلامپ (سانتی‌متر)	هوای غیر عمد (درصد)	وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)
R	24	2.7	2256
S1	19	4.2	2265
S2	17	3.6	2269
S3	15	3.1	2271

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که وزن مخصوص مخلوط‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی شده بین ۲۲۵۶ تا ۲۲۷۱ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر بود، که نشان‌دهنده تفاوت در تراکم و چگالی آن‌ها است. مخلوط S3 با وزن مخصوص ۲۲۷۱ کیلوگرم بر مترمکعب، بیشترین چگالی را داشت، در حالی که مخلوط R با ۲۲۵۶ کیلوگرم بر مترمکعب، کم‌ترین چگالی را نشان داد. مقدار هوای غیر عمد نیز بین ۲٫۷ تا ۴٫۲ درصد متغیر بود، که مخلوط S1 با ۴٫۲ درصد هوا، بیشترین مقدار و مخلوط R با ۲٫۷ درصد، کم‌ترین مقدار را داشت. مخلوط S1، علیرغم درصد هوای بالاتر، مقاومت فشاری بالاتری نیز نشان داد. از طرفی، اسلامپ مخلوط‌ها بین ۱۵ تا ۲۴ سانتیمتر متغیر بود، که مخلوط R با اسلامپ ۲۴ سانتیمتر، بیشترین کارایی و مخلوط S3 با اسلامپ ۱۵ سانتیمتر، کم‌ترین کارایی را داشتند. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده تأثیر افزودن الیاف بر کارایی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده هست که با افزایش میزان الیاف، کارایی مخلوط نیز کاهش داشت.

#### ۴-۲- مقاومت فشاری

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری نشان داد که تمام مخلوط‌های مورد بررسی با افزایش سن، افزایش مقاومت فشاری را تجربه کردند. این روند مطابق با انتظارات تئوری است، زیرا فرآیند هیدراتاسیون سیمان با گذشت زمان ادامه می‌یابد و منجر به افزایش تراکم و مقاومت می‌شود. نتایج آزمون مقاومت فشاری

میزان تخلخل نمونه‌ها با افزایش مقدار الیاف در کامپوزیت سیمانی مهندسی شده اشاره داشت.

نتایج مقاومت فشاری طرح‌های مورد مطالعه با سه مرجع مختلف مقایسه شده است. سویی و همکاران 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 (soe et al., 2013). شاهرمان و همکاران 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 (sahmaran et al., 2009). زانگ و همکاران مشخصات مکانیکی بتن‌های پرمقاومت حاوی مواد جایگزین سیمان را مورد بررسی قرار دادند که مقاومت فشاری ۶۰ تا ۱۱۰ مگاپاسکال بدست آمد (zhang et al., 2020).

#### ۴-۳- عملکرد خمشی

نتایج تعیین عملکرد خمشی در جدول ۸ و منحنی عملکرد خمشی مخلوط‌های مورد بررسی در شکل ۱۰ ارائه شده است. مقاومت خمشی یکی از شاخص‌های کلیدی برای ارزیابی عملکرد کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تحت بارهای خمشی است. در این مطالعه، مقاومت خمشی چهار مخلوط کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (R, S1, S2 و S3) بررسی شد.

جدول ۸. نتایج آزمون تعیین مشخصات عملکرد خمشی

کد مخلوط	مقاومت خمشی (کیلوگرم)	f600 (N)	f150 (N)	چقرمگی (نیوتن.میلیمتر)
R	94.87	19078	0	100
S1	94.17	15635	24099	109
S2	78.86	35257	45565	122
S3	75.25	37413	87536	174

نتایج نشان داد که مخلوط R که فاقد الیاف سینتتیک است با مقاومت خمشی ۹۴٫۸۷ کیلونیوتن، بیشترین مقاومت را در بین مخلوط‌های مورد بررسی داشت. مخلوط S1 (با ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتتیک) با مقاومت خمشی ۹۴٫۱۷ کیلونیوتن، عملکردی بسیار نزدیک به مخلوط R داشت، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت الیاف در بهبود مقاومت خمشی است. از طرفی، مخلوط S2 (با ۲۰ کیلوگرم الیاف) و S3 (با ۳۰ کیلوگرم الیاف) به ترتیب مقاومت‌های خمشی ۷۸٫۸۶ و ۷۵٫۲۵ کیلونیوتن داشتند. این

در جدول ۷ ارائه شده است. بیشترین افزایش مقاومت در بازه ۷ تا ۲۸ روز مشاهده شد، که نشان‌دهنده فاز سریع هیدراتاسیون در این دوره است. پس از ۲۸ روز، افزایش مقاومت با شیب کم‌تری ادامه یافت، که مطابق با رفتار معمول بتن در فاز بلندمدت هیدراتاسیون است.

جدول ۷. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

کد مخلوط	۷ روزه (مگاپاسکال)	۲۸ روزه (مگاپاسکال)	۹۰ روزه (مگاپاسکال)
R	64.2	91.2	104
S1	82.8	106.9	114.7
S2	72.8	86.4	103.3
S3	64.8	82.6	100.1

مقایسه بین مخلوط‌ها نشان داد که مخلوط S1 به‌طور قابل توجهی بیشترین مقاومت فشاری را در تمام سنین داشت. مقاومت ۲۸ روزه این مخلوط (۱۰۶٫۹ مگاپاسکال) نه تنها بالاتر از سایر مخلوط‌ها بود، بلکه در رده بتن‌های با مقاومت بالا قرار می‌گیرد. جالب توجه است که این مخلوط، علیرغم داشتن بیشترین درصد هوا (۴٫۲ درصد)، بیشترین مقاومت فشاری را نیز نشان داد. در مقابل، مخلوط R و S3 کم‌ترین مقاومت فشاری را داشتند. مقاومت ۲۸ روزه این مخلوط‌ها به ترتیب ۹۱٫۲ و ۸۲٫۶ مگاپاسکال بود. این تفاوت ممکن است به دلیل تفاوت در ترکیب مصالح، درصد هوای موجود یا وجود الیاف سینتتیک باشد. با این حال، مقاومت ۹۰ روزه مخلوط R (۱۰۴ مگاپاسکال) نشان می‌دهد که این مخلوط پتانسیل بالایی برای کاربردهای بلندمدت دارد. از طرفی، مخلوط S2 مقاومت فشاری متوسطی داشت، اما مقاومت ۹۰ روزه آن (۱۰۳٫۳ مگاپاسکال) به نسبت نزدیک به مخلوط R و S1 بود.

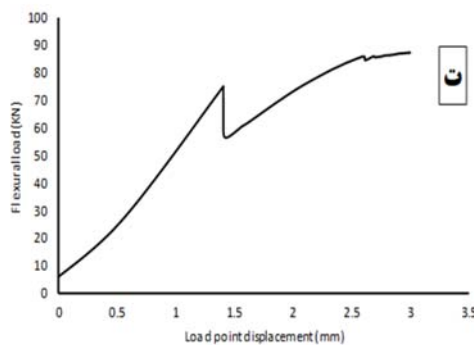
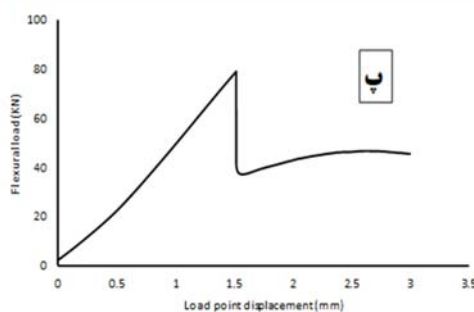
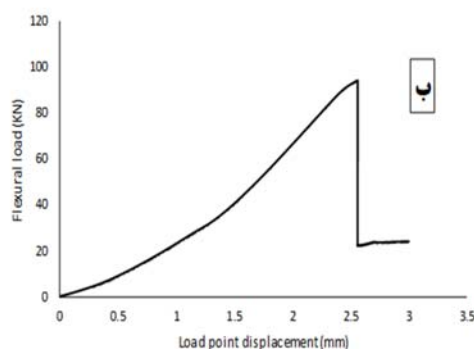
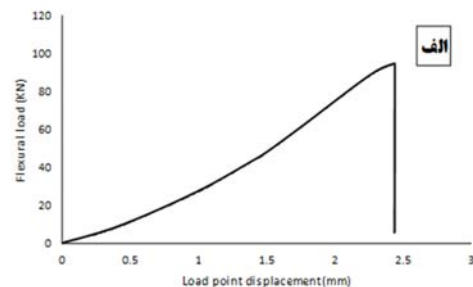
افزودن الیاف سینتتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری داشت. مخلوط R که فاقد الیاف است، با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۹۱٫۲ مگاپاسکال، پایه‌ای برای مقایسه فراهم کرد. با افزودن ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتتیک (مخلوط S1)، مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ۱۰۶٫۹ مگاپاسکال رسید. با افزایش مقدار الیاف به ۲۰ کیلوگرم (مخلوط S2) و ۳۰ کیلوگرم (مخلوط S3)، مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ترتیب به ۸۶٫۴، ۸۲٫۶ و ۷۵٫۲۵ مگاپاسکال کاهش یافت. روند کاهش مقاومت فشاری آزمون‌ها با افزایش مقدار الیاف موجود مخلوط‌ها در سنین ۷ و ۹۰ روزه نیز مشاهده شد. از دلایل این روند کاهشی می‌توان به بیشتر شدن

مقاومت خمشی طرح‌های مورد مطالعه با کارهای سایر محققین مقایسه گردیده است. مدرس و همکاران عملکرد خمشی و فشاری کامپوزیت سیمانی مهندسی شده را مورد بررسی قرار دادند مقاومت خمشی بین ۲٫۸ تا ۱۱٫۹ مگاپاسکال بود (modares et al., 2024). پاکروان و همکاران مشخصات مکانیکی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده را مورد بررسی قرار دادند که مقاومت خمشی بین ۸٫۵ تا ۹٫۲ مگاپاسکال به دست آمد (pakravan et al., 2016). ژانگ و همکاران مشخصات مکانیکی بتن‌های پرمقاومت حاوی مواد جایگزین سیمان را مورد بررسی قرار دادند مقاومت خمشی آنها بین ۹ تا ۲۳ مگاپاسکال به دست آمد (zhang et al., 2020).

مقاومت پسماند کامپوزیت سیمانی مهندسی شده شاخصی برای ارزیابی رفتار کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تحت بارهای تکراری و خستگی است. در این مطالعه، مقاومت پسماند در دو سطح بارگذاری (f150 و f600) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که مخلوط S3 (با ۳۰ کیلوگرم الیاف) با مقاومت پسماند f150 برابر ۸۷۵۳۶ نیوتن و f600 برابر ۳۷۴۱۳ نیوتن، بیشترین مقاومت پسماند را داشت. این موضوع به‌وضوح نشان‌دهنده تأثیر مثبت الیاف در بهبود رفتار کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تحت بارهای خمشی است، زیرا الیاف با جلوگیری از گسترش ترک‌ها، مقاومت پسماند را افزایش می‌دهند. در مقابل، مخلوط R (فاقد الیاف) با مقاومت پسماند f150 برابر صفر و f600 برابر ۱۹۰۷۸ نیوتن، کم‌ترین مقاومت پسماند را در بین مخلوط‌های مورد بررسی نشان داد. این تفاوت چشم‌گیر نشان می‌دهد که الیاف نقش کلیدی در بهبود مقاومت پسماند دارند. مخلوط S1 و S2 نیز به‌ترتیب مقاومت‌های پسماند متوسطی داشتند، که نشان‌دهنده این است که افزایش مقدار الیاف (از ۱۰ به ۲۰ کیلوگرم) تأثیر مثبت اما غیرخطی بر مقاومت پسماند دارد.

چقرمگی شاخصی برای ارزیابی توانایی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده در جذب انرژی قبل از شکست است. در این مطالعه، چقرمگی با استفاده از پارامتر T150 اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که مخلوط S3 (با ۳۰ کیلوگرم الیاف) با چقرمگی ۱۷۴ نیوتن-میلی‌متر، بیشترین مقدار چقرمگی را در بین مخلوط‌های مورد بررسی داشت. این موضوع به‌وضوح نشان‌دهنده تأثیر مثبت الیاف در افزایش چقرمگی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده است، زیرا الیاف با جذب انرژی و جلوگیری از گسترش ترک‌ها، چقرمگی را بهبود می‌بخشند.

کاهش مقاومت در مخلوط‌های با الیاف بیشتر نشان‌دهنده کاهش پیوستگی و یکپارچگی مخلوط با افزودن میزان بیشتر الیاف به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده باشد.



شکل ۱۰. منحنی عملکرد خمشی (الف) مخلوط R، (ب) مخلوط S1، (پ) مخلوط S2 و (ت) مخلوط S3+

مخلوط S1، به‌طور جزئی کاهش یافت (۷,۰۴ مگاپاسکال). با این حال، با افزایش مقدار الیاف به ۲۰ کیلوگرم در هر متر مکعب کامپوزیت سیمانی مهندسی شده، مقاومت کششی شکافتی مخلوط S2، به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت و به مقدار ۸,۹۸ مگاپاسکال رسید. این افزایش نشان‌دهنده این است که الیاف سینتیک با جلوگیری از گسترش ترک‌ها و توزیع تنش‌ها، مقاومت کششی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده را بهبود می‌بخشند. بیشترین مقاومت کششی شکافتی در مخلوط S3 (با ۳۰ کیلوگرم الیاف در هر متر مکعب) به میزان ۱۰,۷۳ مگاپاسکال مشاهده شد، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت افزایش مقدار الیاف سینتیک بر مقاومت کششی شکافتی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده است. مخلوط S2 با ۲۰ کیلوگرم الیاف سینتیک در هر متر مکعب کامپوزیت سیمانی مهندسی شده ۲۲,۷ درصد و همچنین مخلوط S3 با ۳۰ کیلوگرم الیاف سینتیک در هر متر مکعب کامپوزیت سیمانی مهندسی شده ۴۶,۶ درصد مقاومت کششی شکافتی بیشتری به نسبت مخلوط R که فاقد الیاف است، داشتند. این تفاوت‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که افزودن الیاف سینتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده می‌تواند مقاومت کششی شکافتی را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشد.

در مقابل، مخلوط R (فاقد الیاف) با چقرمگی ۱۰۰ نیوتن-میلی‌متر، کم‌ترین چقرمگی را نشان داد. این تفاوت قابل‌توجه نشان می‌دهد که الیاف نقش کلیدی در افزایش چقرمگی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده دارند. مخلوط S1 و S2 نیز به‌ترتیب چقرمگی‌های ۱۰۹ و ۱۲۲ نیوتن-میلی‌متر داشتند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن الیاف سینتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت خمشی، مقاومت پسماند و چقرمگی دارد. در حالی که مخلوط R (فاقد الیاف) بیشترین مقاومت خمشی را داشت، مخلوط S3 (با ۳۰ کیلوگرم الیاف) بیشترین مقاومت پسماند و چقرمگی را نشان داد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که الیاف با جلوگیری از گسترش ترک‌ها و جذب انرژی، رفتار کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تحت بارهای خمشی را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشند. با این حال، افزایش مقدار الیاف (از ۱۰ به ۳۰ کیلوگرم) تأثیر مثبتی بر عملکرد خمشی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده داشت، که نشان‌دهنده اهمیت مقدار الیاف برای دستیابی به خواص مطلوب است.

#### ۴-۴- مقاومت کششی شکافتی

مقاومت کششی شکافتی یکی از شاخص‌های کلیدی برای ارزیابی رفتار کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تحت بارهای کششی است. در این مطالعه، مقاومت کششی شکافتی چهار مخلوط کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (R، S1، S2 و S3) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از این آزمون در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج نشان داد که مخلوط R (فاقد الیاف) با مقاومت کششی شکافتی ۷,۳۲ مگاپاسکال، پایه‌ای برای مقایسه فراهم کرد. مخلوط S1 (با ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتیک در هر متر مکعب) با مقاومت کششی شکافتی ۷,۰۴ مگاپاسکال، کاهش جزئی را نشان داد، در حالی که مخلوط S2 (با ۲۰ کیلوگرم الیاف سینتیک در هر متر مکعب) و S3 (با ۳۰ کیلوگرم الیاف سینتیک در هر متر مکعب) به‌ترتیب مقاومت‌های کششی شکافتی ۸,۹۸ و ۱۰,۷۳ مگاپاسکال داشتند.

افزودن الیاف سینتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت کششی شکافتی داشت. مقاومت کششی شکافتی مخلوط R (فاقد الیاف سینتیک) ۷,۳۲ مگاپاسکال، بدست آمد. با افزودن ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتیک در هر متر مکعب کامپوزیت سیمانی مهندسی شده مقاومت کششی شکافتی

جدول ۹. نتایج آزمون‌های مقاومت کششی برزیلی

و مدول الاستیسیته		
کد مخلوط	مقاومت کششی برزیلی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
R	7.32	44.20
S1	7.04	56.40
S2	8.98	54.00
S3	10.73	51.00

الیاف سینتیک با ایجاد شبکه‌ای از رشته‌ها در ماتریس کامپوزیت سیمانی مهندسی شده، از گسترش ترک‌ها جلوگیری می‌کنند و تنش‌های کششی را در سراسر ماتریس توزیع می‌کنند. این مکانیزم باعث افزایش مقاومت کششی و بهبود رفتار کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تحت بارهای کششی می‌شود. با افزایش مقدار الیاف، تراکم این شبکه افزایش می‌یابد و در نتیجه مقاومت کششی بهبود می‌یابد.

#### ۴-۵- مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته یکی از شاخص‌های مهم برای ارزیابی رفتار کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تحت بارهای الاستیک است. در این مطالعه، مدول الاستیسیته چهار مخلوط کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (S1, R, S2 و S3) اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۹ ارائه شده است.

نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف سینتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تأثیر قابل توجهی بر مدول الاستیسیته دارد. مخلوط R (فاقد الیاف) با مدول الاستیسیته ۴۴,۲۰ گیگاپاسکال، پایه‌ای برای مقایسه فراهم کرد. با افزودن ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتیک در هر مترمکعب مخلوط S1، مدول الاستیسیته به‌طور قابل توجهی افزایش یافت و به ۵۶,۴۰ گیگاپاسکال رسید. این افزایش نشان‌دهنده این است که الیاف با ایجاد شبکه‌ای از رشته‌ها در ماتریس، سختی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده را افزایش می‌دهند و رفتار الاستیک آن را بهبود می‌بخشند. با این حال، با افزایش مقدار الیاف سینتیک به ۲۰ کیلوگرم در هر مترمکعب مخلوط S2 و ۳۰ کیلوگرم الیاف سینتیک به مخلوط S3، مدول الاستیسیته به ترتیب به ۵۴,۰۰ و ۵۱,۰۰ گیگاپاسکال کاهش یافت. مدول الاستیسیته مخلوط S1 با ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتیک در هر مترمکعب کامپوزیت سیمانی مهندسی شده ۲۷,۶ درصد، مخلوط S2 با ۲۰ کیلوگرم الیاف سینتیک در هر مترمکعب ۲۲,۲ درصد و مخلوط S3 با ۳۰ کیلوگرم الیاف سینتیک در هر مترمکعب ۱۵,۴ درصد به نسبت مخلوط R افزایش داشت.

این تفاوت‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که افزودن الیاف سینتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده می‌تواند مدول الاستیسیته را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد.

الیاف سینتیک با ایجاد شبکه‌ای از رشته‌ها در ماتریس کامپوزیت سیمانی مهندسی شده، سختی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده را افزایش می‌دهند و رفتار الاستیک آن را بهبود می‌بخشند. این مکانیزم باعث افزایش مدول الاستیسیته و بهبود رفتار کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تحت بارهای الاستیک می‌شود. با افزایش مقدار الیاف، تراکم این شبکه افزایش می‌یابد و در نتیجه مدول الاستیسیته بهبود می‌یابد. با این حال، افزایش بیش از حد الیاف ممکن است منجر به توزیع ناهمگن و ایجاد نقاط ضعف در ساختار کامپوزیت سیمانی مهندسی شده شود.

#### ۴-۶- جذب آب

نتایج آزمایش جذب آب در چهار مخلوط کامپوزیت سیمانی مهندسی شده مخلوط‌های مورد بررسی (S1, R, S2 و S3) در دو بازه زمانی ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد و نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰. نتایج آزمون‌های تعیین مشخصات دوام

آزمون	مخلوط			
	S3	S2	S1	R
جذب آب نیم ساعته (درصد)	0.4	0.6	0.5	0.5
جذب آب ۲۴ ساعته (درصد)	1.0	1.8	1.5	1.3
عرض سایش (mm)	16	17	16	15
عمق نفوذ آب (mm)	6	5	4	4
مقاومت ویژه الکتریکی (kΩ.cm)	۷۹	۸۲	۸۵	۸۰
مقدار نفوذ یون کلرید (کولمب)	۱۷۳	۱۶۵	۱۶۰	۸۷

نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف سینتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تأثیر متفاوتی بر جذب آب دارد. مخلوط R که فاقد الیاف است با جذب آب ۰,۵ درصد در ۳۰ دقیقه و ۱,۳ درصد در ۲۴ ساعت، بدست آمد. با افزودن ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتیک در هر مترمکعب به مخلوط S1، جذب آب در ۳۰ دقیقه بدون تغییر باقی ماند (۰,۵ درصد)، اما جذب آب در ۲۴ ساعت به‌طور جزئی افزایش یافت و به ۱,۵ درصد رسید. این افزایش ممکن است به دلیل ایجاد منافذ ریز در اطراف الیاف سینتیک باشد. با افزایش مقدار الیاف سینتیک به ۲۰ کیلوگرم در هر مترمکعب کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (مخلوط S2)، جذب آب در ۳۰ دقیقه به ۰,۶ درصد و در ۲۴ ساعت به ۱,۸ درصد افزایش یافت. این افزایش نشان‌دهنده این است که الیاف سینتیک با ایجاد شبکه‌ای از منافذ ریز، جذب آب را در کامپوزیت سیمانی مهندسی شده حاوی الیاف افزایش می‌دهند. با این حال، با افزایش مقدار الیاف سینتیک به ۳۰ کیلوگرم در هر مترمکعب کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (مخلوط S3)، جذب آب در ۳۰ دقیقه به ۰,۴ درصد و در ۲۴ ساعت به ۱,۱ درصد کاهش یافت. این کاهش ممکن است به دلیل تراکم بیشتر و توزیع مناسب الیاف سینتیک در این مخلوط باشد.

سینتتیک، ۵۰ درصد بیشتر از مخلوط R بدست آمد. این تفاوت‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که افزودن الیاف سینتتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده می‌تواند نفوذ آب را افزایش دهد.

#### ۴-۸- مقاومت الکتریکی

نتایج آزمون تعیین مقاومت الکتریکی سطحی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده در جدول ۱۰ ارائه شد. در جدول ۱۱ ارتباط با مقدار مقاومت الکتریکی و رده خوردگی که در آیین نامه بتن ایران آمده نیز ارائه شد.

جدول ۱۱. ارتباط بین مقاومت الکتریکی و رده خوردگی (آیین نامه بتن ایران)

مقاومت ویژه الکتریکی (kΩ.cm)	رده خوردگی
>۱۰۰	خیلی کم
۲۰-۱۰۰	کم
۱۰-۲۰	کم تا متوسط
۵-۱۰	زیاد
کمتر از ۵	خیلی زیاد

نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف سینتتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تأثیر متفاوتی بر مقاومت الکتریکی سطحی دارد.

مخلوط فاقد الیاف با مقاومت الکتریکی ۸۰ کیلو اهم-سانتی متر، پایه‌ای برای مقایسه فراهم کرد. با افزودن ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده در مخلوط S1، مقاومت الکتریکی به‌طور جزئی افزایش یافت و به ۸۵ کیلو اهم-سانتی متر رسید. با افزایش مقدار الیاف سینتتیک به ۲۰ کیلوگرم در هر مترمکعب در مخلوط S2، مقاومت الکتریکی به ۸۲ کیلو اهم-سانتی متر کاهش یافت. با افزایش مقدار الیاف سینتتیک به ۳۰ کیلوگرم در هر مترمکعب از کامپوزیت سیمانی مهندسی شده در مخلوط S3، مقاومت الکتریکی به ۷۹ کیلو اهم-سانتی متر کاهش یافت. این کاهش نشان‌دهنده این است که الیاف سینتتیک با ایجاد شبکه‌ای از منافذ ریز، مقاومت الکتریکی را کاهش می‌دهند. مقاومت الکتریکی مخلوط S1 با ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتتیک، ۶,۲۵ درصد و مخلوط S2 با ۲۰ کیلوگرم الیاف سینتتیک در هر مترمکعب الیاف سینتتیک ۲,۵ درصد بیشتر از مخلوط R بود و همچنین مقاومت الکتریکی مخلوط S3 با ۳۰ کیلوگرم الیاف سینتتیک در هر مترمکعب، ۱,۲۵ درصد مقاومت الکتریکی کمتری به نسبت مخلوط R داشت. این

جذب آب در ۲۴ ساعت مخلوط S1 با ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتتیک در هر مترمکعب ۱۵,۴ درصد و مخلوط S2 با ۲۰ کیلوگرم الیاف سینتتیک در هر مترمکعب ۳۸,۵ درصد بیشتر از مخلوط R بود و همچنین جذب آب در ۲۴ ساعت مخلوط S3 با ۳۰ کیلوگرم الیاف سینتتیک در هر مترمکعب کامپوزیت سیمانی مهندسی شده ۱۵,۴ درصد کمتر از مخلوط R بدست آمد. این تفاوت‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که افزودن الیاف سینتتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده می‌تواند جذب آب را تحت تأثیر قرار دهد. الیاف سینتتیک با ایجاد شبکه‌ای از رشته‌ها در ماتریس کامپوزیت سیمانی مهندسی شده، می‌تواند منافذ ریز ایجاد کند که جذب آب را افزایش می‌دهند. این مکانیزم باعث می‌شود که جذب آب تحت تأثیر مقدار و توزیع الیاف قرار گیرد. نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن الیاف سینتتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تأثیر قابل‌توجهی بر جذب آب دارد و مخلوط S3 با ۳۰ کیلوگرم الیاف سینتتیک در هر مترمکعب کامپوزیت سیمانی مهندسی شده کم‌ترین جذب آب را نشان داد.

#### ۴-۷- نفوذ آب

نتایج آزمایش نفوذ آب که در جدول ۱۰ نشان داده شد، میزان عمق نفوذ آب در چهار مخلوط کامپوزیت سیمانی مهندسی شده مورد مطالعه در این پژوهش (R, S1, S2, S3) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف سینتتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تأثیر قابل‌توجهی بر نفوذ آب دارد. مخلوط R فاقد الیاف دارای عمق نفوذ آب به میزان ۴ میلی‌متر است. با افزودن ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتتیک در هر متر مکعب کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (مخلوط S1)، عمق نفوذ آب بدون تغییر در اندازه ۴ میلی‌متر باقی ماند. با افزایش مقدار الیاف سینتتیک به ۲۰ کیلوگرم در مخلوط S2، عمق نفوذ آب به ۵ میلی‌متر افزایش یافت. این افزایش ممکن است به دلیل ایجاد منافذ ریز در اطراف الیاف سینتتیک باشد. با افزایش مقدار الیاف به ۳۰ کیلوگرم در هر متر مکعب در مخلوط S3، عمق نفوذ آب به ۶ میلی‌متر افزایش یافت. این افزایش نشان‌دهنده این است که الیاف با ایجاد شبکه‌ای از منافذ ریز، نفوذ آب را درون ماتریس کامپوزیت سیمانی مهندسی شده افزایش می‌دهند.

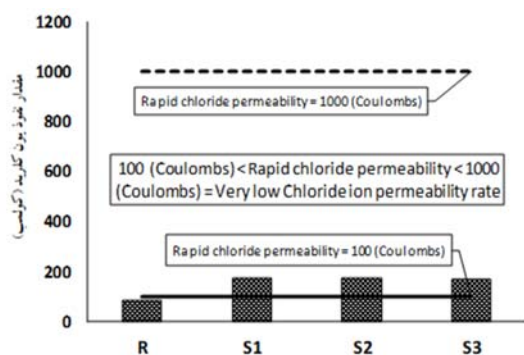
عمق نفوذ آب در مخلوط S2 که دارای ۲۰ کیلوگرم الیاف سینتتیک در هر مترمکعب از کامپوزیت سیمانی مهندسی شده هست ۲۵ درصد بیشتر و مخلوط S3 با ۳۰ کیلوگرم الیاف

رسید. این افزایش ممکن است به دلیل ایجاد منافذ ریز در اطراف الیاف باشد که مسیرهایی برای نفوذ یون‌ها فراهم می‌کند.

جدول ۱۲. رده‌های نفوذپذیری یون کلرید (آیین نامه بتن ایران)

مقدار نفوذ یون کلرید (کولمب)	نفوذپذیری یون کلرید
> 4000	زیاد
2000 - 4000	متوسط
1000 - 2000	کم
100 - 1000	خیلی کم
100 >	ناچیز

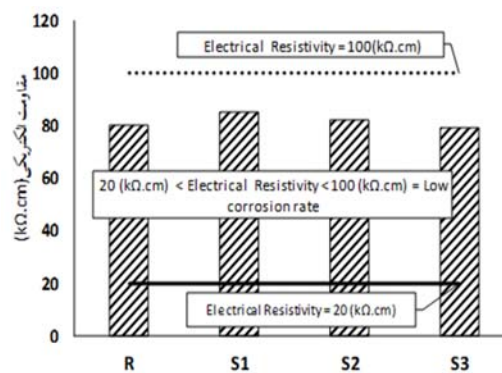
با افزایش مقدار الیاف به ۲۰ کیلوگرم در مخلوط S2، مقدار نفوذ یون کلرید به ۱۶۵ کولمب افزایش یافت. افزایش مقدار الیاف سیستتیک به ۳۰ کیلوگرم در مخلوط S3، مقدار نفوذ یون کلرید به ۱۷۳ کولمب افزایش یافت. مقدار نفوذ یون کلرید در مخلوط S1 با ۱۰ کیلوگرم الیاف سیستتیک در هر مترمکعب ۸۳٫۹ درصد، مخلوط S2 با ۲۰ کیلوگرم الیاف سیستتیک ۸۹٫۷ درصد و مخلوط S3 با ۳۰ کیلوگرم الیاف سیستتیک در هر مترمکعب ۹۸٫۹ درصد بیشتر از مخلوط R حاصل شد. در شکل ۱۲ مقدار نفوذ یون کلرید در مخلوط‌های مورد بررسی با مقادیر ارائه شده در آیین نامه بتن ایران برای تعیین میزان نفوذپذیری بتن مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل ۱۲. مقایسه مقدار نفوذ یون کلرید مخلوط‌ها

همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود مقدار نفوذ یون کلرید در مخلوط فاقد الیاف در رده نفوذ ناچیز و سایر مخلوط‌ها در رده نفوذ خیلی کم یون کلرید قرار می‌گیرد که این مورد نشان دهنده میزان دوام بالای مخلوط‌های مورد بررسی می‌باشد. الیاف سیستتیک با ایجاد شبکه‌ای از رشته‌ها در ماتریس کامپوزیت سیمانی مهندسی شده، می‌تواند منافذ ریز ایجاد کند که

تفاوت‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که افزودن الیاف سیستتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده می‌تواند مقاومت الکتریکی را تحت تأثیر قرار دهد. مقادیر بدست آمده از آزمون تعیین مقاومت الکتریکی و مقادیر ارائه شده در آیین نامه بتن ایران برای رده بندی از نظر خوردگی در شکل ۱۱ مورد مقایسه قرار گرفت.



شکل ۱۱. مقایسه نتایج مقاومت الکتریکی

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود مخلوط‌های مورد بررسی در این تحقیق در رده خوردگی کم قرار می‌گیرند که این موضوع نشان دهنده دوام مناسب مخلوط‌های مورد بررسی در این تحقیق می‌باشد.

الیاف سیستتیک با ایجاد شبکه‌ای از رشته‌ها در ماتریس کامپوزیت سیمانی مهندسی شده، می‌تواند منافذ ریز ایجاد کند که مقاومت الکتریکی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این مکانیزم باعث می‌شود که مقاومت الکتریکی تحت تأثیر مقدار و توزیع الیاف قرار گیرد. با افزایش مقدار الیاف، تراکم این شبکه افزایش می‌یابد و در نتیجه مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد.

#### ۹-۴- مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید

نتایج آزمایش تعیین مقاومت کامپوزیت سیمانی مهندسی شده در برابر نفوذ یون کلرید ( - Rapid Chloride Penetration Test (RCPT) در جدول ۱۰ نشان داده شد. در جدول ۱۲ رده‌بندی بتن بر اساس میزان نفوذ یون کلرید توسط آیین نامه بتن ایران نیز ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف سیستتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تأثیر قابل توجهی بر مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید دارد. مخلوط R فاقد الیاف است، با مقدار نفوذ یون کلرید ۸۷ کولمب، پایه‌ای برای مقایسه فراهم کرد. با افزودن ۱۰ کیلوگرم الیاف سیستتیک (مخلوط S1)، مقدار نفوذ یون کلرید به‌طور قابل توجهی افزایش یافت و به ۱۶۰ کولمب

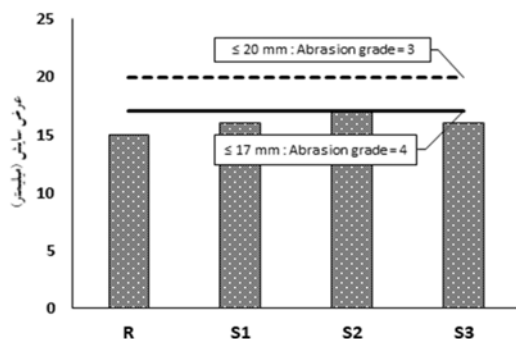
سایش

به ۱۷ میلی متر افزایش یافت. با این حال، با افزایش مقدار الیاف سینتتیک به ۳۰ کیلوگرم در هر مترمکعب در مخلوط S3، میزان سایش به ۱۶ میلی متر رسید.

جدول ۱۳. رده مقاومت در برابر سایش

ردۀ سایش	حداکثر مقدار مجاز طول سایش (میلی متر)
۱	۲۶
۲	۲۳
۳	۲۰
۴	۱۷

در شکل ۱۴ نتایج آزمون مقاومت در برابر سایش مخلوط‌های مورد بررسی و مقادیر تعیین شده جهت معرفی رده سایش بتن توسط آیین نامه بتن ایران مورد مقایسه قرار گرفته است.



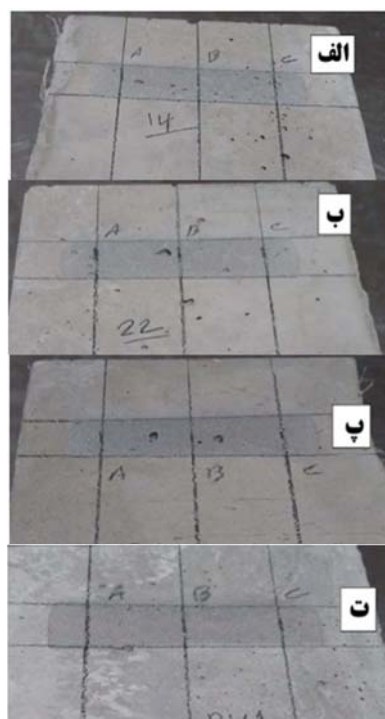
شکل ۱۴. مقایسه رده سایش مخلوط‌ها

با مشاهده مقایسه نتایج بدست آمده و مقادیر تعیین رده سایشی در آیین نامه بتن ایران که در شکل ۱۴ ارائه شده است، مشاهده می‌شود که مخلوط‌های مورد بررسی در این تحقیق دارای رده سایشی درجه ۴ هستند که نشان دهنده مقاومت بالای آنها در برابر سایش و دوام مناسب جهت بکارگیری در شرایط مختلف کاربری می‌باشد. عرض سایش آزمون مخلوط‌های S1 و S3 به میزان ۷ درصد و آزمون مخلوط S2 به مقدار ۱۴ درصد به نسبت مخلوط R که فاقد الیاف است افزایش داشت. این تفاوت‌ها به وضوح نشان می‌دهد که افزودن الیاف سینتتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده می‌تواند مقاومت سایشی را تحت تأثیر قرار دهد. با این حال، افزایش مقدار الیاف تأثیر زیادی بر مقاومت سایشی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده نداشت.

مسیرهایی برای نفوذ یون‌ها فراهم می‌کنند. این مکانیزم باعث می‌شود که مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید تحت تأثیر مقدار و توزیع الیاف قرار گیرد. با افزایش مقدار الیاف، تراکم این شبکه افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار نفوذ یون کلرید افزایش می‌یابد.

#### ۴-۱۰- مقاومت در برابر سایش

نتایج آزمون تعیین مقاومت سایشی در جدول ۱۰ ارائه شده است. تصاویر آزمون‌ها پس اتمام آزمون در شکل ۱۳ نشان داده شده است. جدول ۱۳ حداکثر مقدار مجاز طول سایش برای تعیین رده سایشی بتن را بر مبنای آیین نامه بتن ایران نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. سطح آزمون پس از آزمون مقاومت سایشی (الف)

مخلوط R، (ب) مخلوط S1، (پ) مخلوط S2 و (ت) مخلوط S3

نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف سینتتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده تأثیر متفاوتی بر مقاومت سایشی دارد. مخلوط R که فاقد الیاف سینتتیک هست با میزان سایش ۱۵ میلی متر دارای کمترین عرض سایش ایجاد شده بعد از آزمون می‌باشد. با افزودن ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتتیک در هر مترمکعب (مخلوط S1) میزان سایش به طور جزئی افزایش یافت و به ۱۶ میلی متر افزایش یافت. با افزایش مقدار الیاف سینتتیک به ۲۰ کیلوگرم در هر مترمکعب (مخلوط S2) میزان عرض

## ۵- نتیجه گیری

کامپوزیت سیمانی مهندسی شده را بهبود می‌بخشد. با این حال، افزایش مقدار الیاف به ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم منجر به کاهش مدول الاستیسیته شد.

- مخلوط S3 با ۳۰ کیلوگرم الیاف سینتیک کم‌ترین جذب آب را داشت. این کاهش ناشی از تراکم بیشتر و توزیع مناسب الیاف در ماتریس کامپوزیت سیمانی مهندسی شده است که منافذ را کاهش می‌دهد. با این حال، مخلوط‌های S1 و S2 جذب آب بیشتری داشتند.

- با افزایش حجم الیاف سینتیک در مخلوط‌ها میزان نفوذ آب نیز افزایش یافت به طوری که بیشترین نفوذ آب (۶ میلی‌متر) در مخلوط S3 مشاهده شد.

- مخلوط S1 با ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتیک مقاومت الکتریکی بیشتری داشت، اما افزایش مقدار الیاف منجر به کاهش مقاومت الکتریکی شد. این کاهش به دلیل ایجاد منافذ ریز و کاهش پیوستگی ماتریس کامپوزیت سیمانی مهندسی شده است. این نتایج نشان می‌دهد که الیاف سینتیک می‌تواند تأثیر منفی بر خواص الکتریکی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده داشته باشد. - بیشترین میزان نفوذ یون کلرید با ۱۷۳ کولمب در مخلوط S3 حاصل شد. طبق نتایج بدست آمده با افزایش حجم الیاف موجود در نمونه مقدار نفوذ یون کلرید افزایش یافت.

- مخلوط R کم‌ترین میزان سایش را داشت، اما افزودن الیاف سینتیک تأثیر چندانی بر مقاومت سایشی نداشت. این نتایج نشان می‌دهد که الیاف تأثیر محدودی بر بهبود مقاومت سایشی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده دارند. با این حال، مخلوط S3 با ۳۰ کیلوگرم الیاف سینتیک عملکرد بهتری نسبت به مخلوط‌های دیگر داشت.

## ۶- مراجع

-Ahmed, S. F. U., & Maalej, M. (2009). Tensile strain hardening behavior of hybrid steel-polyethylene fibre reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 23(1), 96-106. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.01.009

-Asghar, M. F., & Khattak, M. J. (2024). Evaluation of mixture design and tensile characteristics of polyvinyl alcohol (PVA)-fiber reinforced HMA mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 17, 258-279. doi.org/10.1007/s42947-022-00233-3

- افزودن الیاف سینتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC) تأثیر قابل توجهی بر کارایی مخلوط‌ها داشت. با افزایش مقدار الیاف، میزان اسلامپ مخلوط‌ها کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش کارایی است. این تغییرات به دلیل ایجاد شبکه‌ای از الیاف در ماتریس کامپوزیت سیمانی مهندسی شده رخ داده است.

- استفاده از الیاف سینتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC) باعث افزایش دانسیته مخلوط‌ها شد. با افزایش مقدار الیاف، وزن مخصوص مخلوط‌ها افزایش یافت، که نشان می‌دهد الیاف سینتیک با پر کردن فضای خالی و افزایش تراکم، چگالی مخلوط‌ها را بهبود بخشیده‌اند.

- مخلوط S1 با ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتیک در هر مترمکعب بیشترین مقاومت فشاری (۱۰۶,۹ مگاپاسکال) را نشان داد. با این حال، افزایش مقدار الیاف به ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم در هر مترمکعب منجر به کاهش مقاومت فشاری شد.

- مخلوط R فاقد الیاف) بیشترین مقاومت خمشی در برابر ایجاد اولین ترک (۹۴,۸۷ کیلونیوتن) را داشت که با ایجاد اولین ترک، آزمون دچار جداشدگی کامل گردید، اما در مخلوط S3 با ۳۰ کیلوگرم الیاف سینتیک در هر مترمکعب شاهد کاهش میزان مقاومت خمشی در برابر اولین ترک خوردگی به نسبت مخلوط فاقد الیاف و بیشترین میزان مقاومت پسماند و چقرمگی که نشان‌دهنده توانایی آزمون در جذب انرژی و تحمل تغییر شکل‌های پلاستیک است، در بین مخلوط‌های مورد بررسی بودیم. این نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف سینتیک به کامپوزیت سیمانی مهندسی شده باعث افزایش میزان جذب انرژی و جلوگیری از گسترش ترک‌ها شده و رفتار خمشی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده را تحت بارهای خمشی بهبود می‌بخشد. این ویژگی برای کاربردهایی که نیاز به مقاومت در برابر بارهای خمشی دارند، بسیار مهم است.

- مخلوط S3 با ۳۰ کیلوگرم الیاف سینتیک بیشترین مقاومت کششی شکافتی (۱۰,۷۳ مگاپاسکال) را داشت. این بهبود ناشی از توانایی الیاف در توزیع تنش‌ها و جلوگیری از رشد ترک‌ها در ماتریس کامپوزیت سیمانی مهندسی شده است.

- مخلوط S1 با ۱۰ کیلوگرم الیاف سینتیک بیشترین مدول الاستیسیته (۵۶,۴ گیگاپاسکال) را نشان داد. این افزایش به دلیل ایجاد شبکه‌ای از الیاف است که سختی و رفتار الاستیک

- and Civil Engineering, 12(3), 261–269. [doi.org/10.1007/s11709-017-0394-x](https://doi.org/10.1007/s11709-017-0394-x).
- Deutsches Institut für Normung. (2003). Concrete paving blocks - Requirements and test methods (DIN EN 1338).
- European Committee for Standardization. (2009). Testing hardened concrete - Part 8: Depth of penetration of water under pressure (EN 12390-8).
- Feng, Z., Zhou, Y., Sui, L., & Zhu, Z. (2022). Optimal design of a low-cost high-performance hybrid fiber engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 345, 128372. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128372](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128372)
- Gillani, S. A. A., Toumi, A., & Turatsinze, A. (2020). Effect of surface preparation of substrate on bond tensile strength of thin bonded cement-based overlays. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13, 197–204. [doi.org/10.1007/s42947-019-0101-5](https://doi.org/10.1007/s42947-019-0101-5)
- Hasani, M., Moghadas Nejad, F., Sobhani, J., & Chini, M. (2021). Mechanical and durability properties of fiber reinforced concrete overlay: Experimental results and numerical simulation. *Construction and Building Materials*, 268, 121083. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121083](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121083)
- Iranian Concrete Code Volume II Materials and Construction, No.120-2, Last Edition 22/11/2021.
- Kafodya, I., & Okonta, F. (2020). Compressive and tensile strength properties of pre-compressed and soaked natural fiber reinforced lime—fly ash stabilised soil. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13, 497–509. [doi.org/10.1007/s42947-020-0074-4](https://doi.org/10.1007/s42947-020-0074-4)
- Kanda, T., & Li, V. C. (1998). Interface property and apparent strength of high-strength hydrophilic fiber in cement matrix. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(1), 5–13. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1998\)10:1\(5\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:1(5))
- Kang, S. T., Choi, J. I., Koh, K. T., Lee, K. S., & Lee, B. Y. (2016). Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete. *Composite Structures*, 145, 37–42. [doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.075](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.075)
- Kim, J. K., Kim, J. S., Ha, G. J., & Kim, Y. Y. (2007). Tensile and fiber dispersion performance of ECC (engineered cementitious composites) produced with ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1096–1105. [doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.006](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.006)
- Lee, K. M., & Park, P. J. (2005). Estimation of the environmental credit for the recycling of granulated blast furnace slag based on LCA. *Resources, Conservation and Recycling*, 44(2), 139–151. [doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.11.004](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.11.004)
- Li, V. C. (1993). From micromechanics to structural engineering the design of cementitious composites for civil engineering applications. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 471, 1–12.
- Li, V. C., Mishra, D. K., & Wu, H. C. (1995). Matrix design for pseudo-strain-hardening fiber
- ASTM International. (2002). Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression (ASTM C469). *West Conshohocken*.
- ASTM International. (2012). Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration (ASTM C1202). *West Conshohocken*.
- ASTM International. (2017). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens (ASTM C496/C496M). *West Conshohocken*.
- ASTM International. (2019). Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading) (ASTM C1609/C1609M-19a). *West Conshohocken*.
- ASTM International. (2022). Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field (ASTM C31-22). *West Conshohocken*.
- ASTM International. (2022). Standard specification for mixing rooms, moist cabinets, moist rooms, and water storage tanks used in the testing of hydraulic cements and concretes (ASTM C511-22). *West Conshohocken*.
- ASTM International. (2022). Standard test method for air content of freshly mixed concrete by the pressure method (ASTM C231-22). *West Conshohocken*.
- ASTM International. (2022). Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete (ASTM C138-22). *West Conshohocken*.
- Bremner, T. W., Hover, K. C., Poston, R. W., Broomfield, J. P., Joseph, T., Price, R., et al. (2001). Protection of metals in concrete against corrosion (ACI 222 R-01). Reported by ACI Committee 222. British Standards Institution. (2019). Standard test method for compressive strength of cement mortar (BS EN 12390-3).
- Chen, B., & Liu, J. (2005). Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 913–917. [doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.035](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.035).
- Chen, Z., Yang, Y., & Yao, Y. (2013). Quasi-static and dynamic compressive mechanical properties of engineered cementitious composite incorporating ground granulated blast furnace slag. *Materials & Design*, 44, 500–508. [doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.037](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.037)
- Cheng, Y., & Huang, X. (2022). Application of municipal solid waste incineration bottom ash into engineered cementitious composites. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15, 1106–1117. [doi.org/10.1007/s42947-021-00075-5](https://doi.org/10.1007/s42947-021-00075-5)
- Choucha, S., Benyahia, A., Ghrici, M., & Mansour, M. S. (2018). Effect of natural pozzolan content on the properties of engineered cementitious composites as repair material. *Frontiers of Structural*

- Performance Concrete (UHPC)—A review. *Journal of Building Engineering*, 57, 104922. doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104922
- Ruan, Y., Han, B., Yu, X., Li, Z., Wang, J., Dong, S., & Ou, J. (2018). Mechanical behaviors of nano-zirconia reinforced reactive powder concrete under compression and flexure. *Construction and Building Materials*, 162, 663–673. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.063
- Sahmaran M, Li VC. (2009). Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. *Cem Concr Res* 39:1033–43.
- Shi, F., Pham, T. M., Hao, H., & Hao, Y. (2020). Post-cracking behavior of basalt and macro polypropylene hybrid fibre reinforced concrete with different compressive strengths. *Construction and Building Materials*, 262, 120108. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120108
- Shoji, D., He, Z., Zhang, D., & Li, V. C. (2022). The greening of engineered cementitious composites (ECC): A review. *Construction and Building Materials*, 327(11), 126701. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126701
- Sobhani, J., & Pourkhorshidi, A. R. (2021). The effects of cold-drawn crimped-end steel fibers on the mechanical and durability of concrete overlay. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 54(2), 319–330. doi.org/10.22059/cej.2020.297941.1657
- Soe, K. T., Zhang, Y. X., & Zhang, L. C. (2013). Impact resistance of hybrid-fiber engineered cementitious composite panels. *Composite Structures*, 104, 320–330. doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.01.029
- Torres, A., Brandt, J., Lear, K., & Liu, J. (2017). A looming tragedy of the sand commons. *Science*, 357(6355), 970–971. doi.org/10.1126/science.aao0503
- Waqar, A., Khan, M. B., Afzal, M. T., Radu, D., Gălățanu, T., Cazacu, C. E., & Almujiabah, H. R. (2024). Investigating the synergistic effects of carbon fiber and silica fume on concrete strength and eco-efficiency. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02967. doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02967
- Wang, Q., Lai, M. H., Zhang, J., Wang, Z., & Ho, J. C. M. (2020). Greener engineered cementitious composite (ECC)—The use of pozzolanic fillers and uncoiled PVA fibers. *Construction and Building Materials*, 247, 118211. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118211
- Wang, Q., Yi, Y., Ma, G., & Luo, H. (2019). Hybrid effects of steel fibers, basalt fibers and calcium sulfate on mechanical performance of PVA-ECC containing high-volume fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 97, 357–368. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.01.009
- Yao, W., Li, J., & Wu, K. (2003). Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cement and Concrete Research*, 33(1), 27–30.
- reinforced cementitious composites. *Materials and Structures*, 28, 586–595. doi.org/10.1007/BF02473191
- Li, V. C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A., & Saito, T. (2002). Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC). *Materials Journal*, 99(5), 463–472.
- Liu, D., Yu, J., Qin, F., Zhang, K., & Zhang, Z. (2023). Mechanical performance of high-strength engineering cementitious composites (ECC) with hybridizing PE and steel fibers. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01961. doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01961
- Liu, Y., Zhou, X., Lv, C., Yang, Y., & Liu, T. (2018). Use of silica fume and GGBS to improve frost resistance of ECC with high-volume fly ash. *Advances in Civil Engineering*, 2018(1), 7987589. doi.org/10.1155/2018/7987589
- Malhotra, V. M. (2000). Role of supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions. *In Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century*, 5–6.
- Mehta, P. K. (2002). Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concrete International*, 24(7), 23–28. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010
- Meng, W., & Khayat, K. H. (2018). Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost-effective UHPC. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4), 04018030. doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002212
- Modarres, Y., & Ghalehnovi, M. (2024). Comparison of the mechanical performance of concrete reinforced with recycled steel fibers from waste tires and hooked-end steel fibers at ambient and high temperatures. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 57(1), 61–83. doi.org/10.22059/cej.2023.349788.1877.
- Pakravan, H. R., Jamshidi, M., & Latifi, M. (2016). Study on fiber hybridization effect of engineered cementitious composites with low- and high-modulus polymeric fibers. *Construction and Building Materials*, 112, 739–746. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.112
- Qiu, J., Tan, H. S., & Yang, E. H. (2016). Coupled effects of crack width, slag content, and conditioning alkalinity on autogenous healing of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 73, 203–212. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.013
- Ramezani, A. R., & Esfahani, M. R. (2018). Evaluation of hybrid fiber reinforced concrete exposed to severe environmental conditions. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 51(1), 119–130. doi.org/10.7508/cej.2018.01.007
- Ravichandran, D., Prem, P. R., Kaliyavaradhan, S. K., & Ambily, P. S. (2022). Influence of fibers on fresh and hardened properties of Ultra High

-Zhu, H., Zhang, D., Wang, T., Wu, H., & Li, V. C. (2020). Mechanical and self-healing behavior of low carbon engineered cementitious composites reinforced with PP-fibers. *Construction and Building Materials*, 259, 119805.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119805**

-Zhu, S., Zhang, Y. X., & Lee, C. K. (2024). An experimental study on hybrid fiber reinforced engineered cementitious composite link slabs under static and fatigue loadings. *Engineering Structures*, 300, 117254.

**doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117254**

-Zhu, Y., Zhang, Z., Yang, Y., & Yao, Y. (2014). Measurement and correlation of ductility and compressive strength for engineered cementitious composites (ECC) produced by binary and ternary systems of binder materials: Fly ash, slag, silica fume and cement. *Construction and Building Materials*, 68, 192–198.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.080**

**doi.org/10.1016/S0008-8846 (02)00913-4**

-Zarei, A., Rooholamini, H., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Evaluating the properties of concrete pavements containing crumb rubber and recycled steel fibers using response surface methodology. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15, 470–484.

**doi.org/10.1007/s42947-021-00049-7**

-Zhang, J., & Leng, B. (2008). Transition from multiple macro-cracking to multiple micro-cracking in cementitious composites. *Tsinghua Science and Technology*, 13(5), 669–673.

-Zhang, J., Wang, Q., & Wang, Z. (2016). Optimizing design of high strength cement matrix with supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 120, 123–136.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.100**

-Zhang, L., Liu, W., Wang, L., & Ling, Z. (2020). On-axis and off-axis compressive behavior of pultruded GFRP composites at elevated temperatures. *Composite Structures*, 236, 111891.

**doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111891**

# Investigating the Effect of Various Synthetic Fiber Contents on the Mechanical Performance and Durability of Engineered Cementitious Composites (ECC)

*Mahdi Kouhiazar Tulun, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.*

*Jafar Sobhani, Associate Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.*

*Seyed Mohammad Mirhosseini, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.*

*Ehsanollah Zeighami, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.*

*Mohammadreza Basiri, Assistant Professor, Department of Textile Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.*

*E-mail: sobhani@bhrc.ac.ir*

Received: January 2025- Accepted: April 2025

## ABSTRACT

This research investigates the influence of synthetic fiber incorporation on the mechanical properties and durability of engineered cementitious composites (ECC) through the examination of four distinct mixtures: a control mixture (fiber-free) and three mixtures containing 10, 20, and 30 kg of synthetic fibers per cubic meter of ECC. The experimental findings revealed that including synthetic fibers significantly enhances tensile cracking strength, toughness, and residual strength. The mixture with 30 kg of synthetic fibers demonstrated the highest tensile cracking strength (10.73 MPa) and toughness (174 N·mm). However, exceeding a fiber content of 10 kg resulted in a decline in compressive strength and modulus of elasticity. Regarding durability, the addition of synthetic fibers exhibited mixed effects: the mixture containing 30 kg of synthetic fibers displayed the lowest water absorption, attributable to reduced surface cracking. Conversely, as the fiber content increased, the depth of water penetration and chloride ion ingress also rose, likely due to the formation of micro-pores around the fibers and an increase in internal permeability. The results indicate that synthetic fibers create a network of strands within the ECC matrix, which effectively distributes tensile stresses and prevents crack propagation through a bridging mechanism. Leads to increased fracture energy and enhanced mechanical performance of the ECC, although it may come with some trade-offs in specific durability characteristics. In conclusion, this study identifies the mixture containing 10 kg of synthetic fibers as the optimal formulation regarding compressive strength and modulus of elasticity. In comparison, the mixture with 30 kg of synthetic fibers is deemed most effective for improving tensile strength and toughness.

**Keywords:** Engineered Cementitious Composites (ECC), Synthetic Fibers, Compressive Strength, Toughness, Permeability, Mechanical Behavior