

ساخت کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده (ECC) با استفاده از مصالح داخلی و تسلیح آنها با استفاده از بافته‌های شیشه

ابراهیم صادقی (کارشناس ارشد)

داود مستوفی‌نژاد (استاد)

علیرضا سلجوقیان* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۲ (دوره ۳۹، شماره ۳، صص. ۲۵-۳۵)، پژوهشی

امروزه به تولید کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده (ECC)، که تحت آزمایش کشش مستقیم از خود رفتار سخت‌شوندگی کرنشی و شکل‌پذیری بالا نشان می‌دهند، توجه می‌شود. به منظور تولید ECC، نیاز به مصالحی نظیر: خاکستر بادی و الیاف PVA است که در داخل کشور موجود نیست. در پژوهش حاضر ۱۳ طرح اختلاط مختلف ECC با استفاده از مصالح موجود در داخل کشور، نظیر: سرباره، پودر سنگ آهک، پوزولان صنعتی، میکروسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلین ساخته شده و مشخصات مکانیکی آنها، شامل مقاومت‌های فشاری و خمشی بررسی شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که استفاده‌ی بهینه از مصالح داخلی، نظیر میکروسیلیس و سرباره به ترتیب به میزان ۱۰ و ۲۸ درصد وزنی سیمان و همچنین استفاده از پوزولان صنعتی به میزان ۲۲٪ وزنی سیمان، باعث بهبود مشخصات مکانیکی ECC می‌شود. در ادامه، بهترین طرح اختلاط ECC با استفاده از سه لایه‌ی بافته‌ی شیشه مسلح شد و تحت آزمایش خمش قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از سه لایه‌ی بافته‌ی شیشه در ECC، باعث افزایش مقاومت خمشی به میزان ۲۷۵٪، نسبت به نمونه‌ی ECC غیرمسلح شده است.

واژگان کلیدی: کامپوزیت سیمانی مهندسی (ECC)، مصالح در دسترس، میکروسیلیس، پوزولان صنعتی، مشخصات مکانیکی.

۱. مقدمه

بتن یکی از مهم‌ترین مصالح ساختمانی شناخته شده در جهان است که در یک قرن گذشته از آن به وفور استفاده شده است. مقاومت کششی و خمشی پایین بتن معمولی و همچنین ترد بودن رفتار آن، مهم‌ترین ضعف بتن است. به همین دلیل، به منظور تحمل تنش‌های کششی در سازه‌های بتنی از میلگردهای فولادی استفاده می‌شود. در تولید بتن از سیمان پرتلند استفاده می‌شود، که تولید آن مستلزم صرف هزینه‌های زیاد و اتلاف انرژی بسیار است. مطالعات نشان می‌دهند که در آینده، میزان تقاضای بتن افزایش خواهد یافت و تولید سیمان، نیازمند مصرف منابع طبیعی و رهاسازی حجم فراوانی از دی‌اکسیدکربن به محیط زیست است. لازم به ذکر است که ۵ تا ۷ درصد از گازهای گلخانه‌یی آزاد شده در جو، ناشی از فرایند تولید سیمان است.^[۱]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۷/۷/۱۴۰۱، اصلاحیه ۲۵/۱۰/۱۴۰۱، پذیرش ۲۵/۱۱/۱۴۰۱.

استناد به این مقاله:

صادقی، ابراهیم، مستوفی‌نژاد، داود، و سلجوقیان، علیرضا، ۱۴۰۲. ساخت کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده (ECC) با استفاده از مصالح داخلی و تسلیح آنها با استفاده از بافته‌های شیشه. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۳)، صص. ۲۵-۳۵. DOI:10.24200/J30.2023.60839.3127

در دهه‌های پیشین، مطالعات فراوانی به منظور ساخت بتن‌های الیافی انجام شده است. نتایج آزمایش‌های کشش مستقیم و خمش چهارنقطه‌یی در مطالعات مختلف نشان می‌دهد که استفاده از الیاف با مقاومت کششی بالا، باعث افزایش مقادیر مقاومت‌های خمشی و کششی می‌شود. کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC)^۱، یکی از انواع بتن‌های الیافی است که در ساختار آن، از الیاف پلیمری نظیر الیاف پلی وینیل‌الکل یا پلی‌اتیلن استفاده می‌شود. از مهم‌ترین مزایای کامپوزیت سیمانی مهندسی شده می‌توان به مقاومت‌های خمشی، کششی و کرنش کششی بالای آن نسبت به بتن معمولی اشاره کرد.^[۲] ظرفیت کرنش کششی اولیه‌ی ECC در دو روز ابتدایی بتن‌ریزی تقریباً برابر ۵٪ است؛ این در حالی است که با گذر زمان، ظرفیت کرنش کششی کاهش می‌یابد و تقریباً به مقدار ثابت ۳٪ می‌رسد، که این میزان ۳۰۰ تا ۵۰۰ برابر بیشتر از بتن معمولی است.^[۳] برخلاف سایر انواع

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سیمان استفاده شده در پژوهش حاضر و مقایسه با مقادیر مجاز.

مقاومت فشاری (MPa)			زمان گیرش (min)		نرمی (m ² /kg)	
۲۸ روزه	۷ روزه	۳ روزه	نهایی	اولیه	-	-
۳۷<	۲۷/۵<	۱۷<	۱۵۰	۹۵	۳۰۰	سیمان مصرفی
-	۱۶<	۱۰<	-	-	۲۸۰<	ASTM C۱۵۰ ^[۱۴]

سیمان، هیدرات سیلیکات کلسیم تولید می‌کند و باعث افزایش دوام و مقاومت بتن می‌شود.^[۱۷، ۱۶] استفاده از مقادیر بالای خاکستر بادی، باعث بهبود خواص مکانیکی، دوام، طول عمر، ظرفیت شکل‌پذیری و پهنای عرض ترک بتن می‌شود. علاوه بر این، نتایج حاکی از آن است که استفاده از خاکستر بادی در ECC، باعث ایجاد ترک‌های مویی متعدد با عرض کم و کاهش تأثیر عوامل مخرب محیطی در بتن می‌شود.^[۱۸]

خاکستر بادی به مقدار وسیعی در کشورهای مختلف دنیا تولید می‌شود؛ این در حالی است که در ایران به دلیل عدم استفاده از سوخت ذغال سنگ در نیروگاه‌های تولید برق، خاکستر بادی تولید نمی‌شود. از اهداف دیگر مورد نظر در پژوهش حاضر، جایگزینی خاکستر بادی با ترکیبی از پوزولان‌های شناخته شده، نظیر: میکروسیلیس، سرباره‌ی گرانوله و پودر سنگ آهک و همچنین پوزولان صنعتی به منظور تولید کامپوزیت سیمانی مهندسی شده با ویژگی‌های سخت‌شدگی کرنشی، چند ترک‌خوردگی و ظرفیت کرنش کششی بالاست.

همان‌طور که در قسمت‌های قبل اشاره شد، مقاومت خمشی و کششی ECC نسبت به سایر انواع بتن الیافی با عملکرد بالا ناچیز است. به همین دلیل استفاده از ECC در مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه متداول نیست. در پژوهش حاضر برای نخستین بار در صنعت بتن به منظور افزایش مقاومت‌های خمشی و کششی پانل‌های ECC، از بافته‌های شیشه استفاده شده است. همچنین پانل‌های ECC مسلح به بافته‌های شیشه را می‌توان به عنوان یک مصالح مناسب به منظور تقویت سازه‌های بتن‌آرمه استفاده کرد.

۲. برنامه‌های آزمایشگاهی

۲.۱. مصالح

سیمان استفاده شده در پژوهش حاضر، سیمان پرتلند نوع II تولید شده در کارخانه‌ی سیمان اردستان است، که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن، به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. مقایسه‌ی مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان استفاده شده در پژوهش حاضر با مقادیر مجاز استانداردهای ASTM C۱۵۰^[۱۹]، نشان‌دهنده‌ی کیفیت مناسب سیمان است. علاوه بر این، در پژوهش حاضر از مصالحی، نظیر: سرباره‌ی کارخانه‌ی ذوب آهن، پوزولان صنعتی شرکت پویا شیمی ساروج، پودر سنگ آهک پیربکران و میکروسیلیس شرکت انا به عنوان پوزولان استفاده شده است.^[۲۰، ۲۱] پوزولان صنعتی، پودر خاکستری رنگ با اندازه‌ی ۰/۳ تا ۰/۱۲۲ میکرون و چگالی ۱/۶ کیلوگرم بر مترمکعب است، که حاوی مقدار قابل توجهی سیلیس فعال است و منجر به واکنش هیدراسیون ثانویه در بتن می‌شود. مشخصات شیمیایی مصالح پوزولانی در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که کلیه‌ی پوزولان‌های استفاده شده در پژوهش حاضر با ضوابط مربوط به استاندارد ASTM ۱۲۴۰ C^[۲۲] مطابقت دارند.

ماسه‌ی سیلیسی استفاده شده در پژوهش حاضر، از شرکت ریخته‌گری چیروک

بتن، ECC دارای دوام بالا در محیط‌های سولفاتی، کلریدی، مناطق گرمسیری و نیز سیکل‌های متوالی انجماد و ذوب‌شدگی است.^[۵-۷] لازم به ذکر است که پژوهشگران در سال‌های پیشین، دوام کامپوزیت سیمانی مهندسی شده را تحت چرخه‌های انجماد و ذوب‌شدگی متوالی و محیط‌های اسیدی و کلریدی بررسی کرده و دریافته‌اند که در حضور مقادیر بالای یون کلر، کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده قادر به حفظ ظرفیت کرنش کششی خود تا بیش از ۳٪ هستند. همچنین نتایج نشان داد که نمونه‌های بتن معمولی پس از ۱۱۰ چرخه‌ی انجماد - ذوب‌شدگی به شدت از بین می‌روند؛ این در حالی است که نمونه‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی شده بدون آن‌که دچار آسیب زیادی شوند، تا ۳۰۰ چرخه دوام می‌آورند.^[۸]

از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی شده، که آن را از سایر انواع بتن متمایز می‌سازد، رفتارهای: سخت‌شوندگی کرنشی، شکل‌پذیری بالا و پدیده‌ی چند ترک‌خوردگی است. برخلاف ECC، که از خود رفتار سخت‌شوندگی کرنشی نشان می‌دهد، سایر انواع بتن الیافی از خود رفتار نرم‌شوندگی کرنشی نشان می‌دهند. در واقع بتن الیافی متداول، پس از رسیدن به بیشینه‌ی تنش کششی گسیخته می‌شود و به سرعت مقاومت خود را از دست می‌دهد؛ این در حالی است که ECC به دلیل رفتار سخت‌شوندگی کرنشی، دچار پدیده‌ی چند ترک‌خوردگی می‌شود و تنش کششی در آن افت نمی‌کند. با ادامه‌ی روند بارگذاری، یکی از ترک‌ها باز و نمونه دچار گسیختگی می‌شود.^[۹، ۱۰] با توجه به رفتار شکل‌پذیر کامپوزیت سیمانی مهندسی شده، از کامپوزیت اخیر به منظور بهبود رفتار المان‌های غیرشکل‌پذیر، مانند دیوارهای بنایی استفاده شده است.^[۱۱، ۱۲] علاوه بر این، با توجه به رفتار متفاوت ECC با بتن معمولی در خمش، مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی رفتار بار - تغییر مکان نمونه‌های منشوری تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌یی توسعه یافته است.^[۱۳]

کامپوزیت سیمانی مهندسی شده ترکیبی از: سیمان، خاکستر بادی، ماسه‌ی سیلیسی، الیاف پلی‌وینیل الکل، آب و فوق روان‌کننده است. در مطالعات پیشین، به منظور ساخت کامپوزیت سیمانی مهندسی شده از الیاف خاص و گران‌قیمتی، نظیر: پلی‌اتیلن و پلی‌وینیل الکل استفاده شده است. الیاف پلی‌وینیل الکل به علت مشخصات هندسی مناسب ارتباط بهتری با ماتریس برقرار می‌کند؛ به همین علت، نمونه‌های ساخته شده با الیاف پلی‌وینیل الکل، دارای طاقت و مقاومت خمشی بیشتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با سایر انواع الیاف است.^[۶، ۱۴] لازم به ذکر است که عدم دسترسی به الیاف پلی‌وینیل الکل در داخل کشور و همچنین قیمت بسیار بالای آن منجر به عدم رغبت به تولید ECC در کشور شده است.^[۱۵] یکی از اهداف پژوهش حاضر، تولید کامپوزیت سیمانی مهندسی شده با استفاده از الیاف در دسترس و ارزان قیمت، نظیر الیاف پلی‌پروپیلن است.

یکی دیگر از مؤلفه‌های مهم و تشکیل‌دهنده‌ی کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده، خاکستر بادی است. خاکستر بادی محصول جانبی نیروگاه‌های تولید برق است، که از سوخت ذغال سنگ استفاده می‌کنند. خاکستر بادی حاوی مقادیر قابل توجهی سیلیس فعال است و فعالیت سیمانی ثانویه دارد. در واقع، خاکستر بادی، یک پوزولان صنعتی است که در ترکیب با کلسیم هیدروکسید ناشی از واکنش هیدراسیون

جدول ۲. ترکیب‌های شیمیایی مصالح استفاده شده در پژوهش حاضر. [۲۱ و ۲۰]

ترکیب‌های شیمیایی	سیمان تیپ II	پوزولان صنعتی	میکروسیلیس	پودر سنگ آهک	سر باره
SiO ₂	۲۲	۸۸/۲	۹۵	۱	۳۲/۵
Al ₂ O ₃	۵	۴/۲	۱/۳۲	۰/۳	۸/۸
Fe ₂ O ₃	۳/۸۲	۱/۶	۰/۸۹	۰/۲	۱
CaO	۶۴	۱/۸	۰/۲۶	۵۴۵	۴۴
MgO	۱/۹	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۵	۶/۸
SO ₃	۱/۵	۰/۰۲	۰/۰۶	-	۲/۵
Na ₂ O	۰/۲۵	۰/۰۸	۰/۱۵	-	-
K ₂ O	۰/۴۹	۰/۵۱	۰/۲۱	-	-

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف استفاده شده در پژوهش حاضر. [۲۳]

نوع الیاف	مقاومت کششی (MPa)	کمیته‌ی طول (mm)	قطر الیاف (μm)
پلی پروپیلن	۴۰۰	۱۰	۱۹

۳.۲.۲. آزمایش مقاومت کششی

به منظور بررسی رفتار کرنش سختی و همچنین محاسبه‌ی تنش و کرنش کششی ECC، آزمایش کشش مستقیم براساس استاندارد ASTM D۳۰۳۹، [۲۷] بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی انجام شده است. نمونه‌های استفاده شده در آزمایش کشش مستقیم به صورت دمبلی‌شکل و با ابعاد ۳۰۰ × ۶۰ × ۱۰ میلی‌متر بوده‌اند. در پژوهش حاضر، از دستگاه HOUNSFIELD مدل H5۰KS استفاده شده است.

۳.۲.۲. روش ساخت نمونه‌ها و طرح اختلاط

نوع مصالح مصرفی، نسبت‌های اختلاط، نحوه‌ی ساخت، روش ریختن کامپوزیت در قالب و نحوه‌ی عمل‌آوری از جمله عوامل تأثیرگذار در شکل‌پذیری ECC است. روش ساخت ECC وابسته به عوامل مختلفی از جمله: ترتیب اختلاط مصالح، مدت زمان اختلاط، سرعت دوران همزن و سرعت اضافه کردن الیاف است، که به شدت در کیفیت کامپوزیت ساخته شده تأثیرگذار هستند.

در پژوهش حاضر، به منظور ساخت کامپوزیت ECC، ابتدا تمام مواد پودری، شامل: سیمان، سر باره، پودر سنگ آهک، میکروسیلیس و پوزولان صنعتی به مدت یک دقیقه با سرعت ۷۰ دور بر دقیقه ترکیب شده‌اند. پس از یک دقیقه، $\frac{1}{3}$ مخلوط آب و فوق روان‌کننده به مواد سیمانی اضافه و اختلاط به مدت دو دقیقه با سرعت ۱۴۰ دور بر دقیقه انجام شده است. سپس اختلاط مواد به مدت یک دقیقه با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه ادامه یافته است. پس از اطمینان از اختلاط کامل مواد، الیاف در مدت ۱۰ دقیقه به ماتریس اضافه شده است. در هنگام افزودن الیاف در فواصل زمانی مناسب، آب باقیمانده طی ۳ تا ۵ مرحله به مخلوط اضافه و پس از هر مرحله اضافه کردن آب، سرعت همزن به مدت ۳۰ ثانیه به ۳۰۰ دور بر دقیقه تغییر داده شده است. در پایان، پس از اضافه کردن تمام الیاف به مخلوط بتن، اختلاط به مدت یک دقیقه با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه انجام شده است. در شکل ۱، ماتریس و مخلوط نهایی کامپوزیت سیمانی مهندسی شده مشاهده می‌شود.

طرح اختلاط‌های ارائه شده در پژوهش حاضر، براساس مطالعات انجام شده بر روی طرح اختلاط‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی شده‌ی حاوی الیاف پلی‌وینیل الکل و همچنین نتایج تجربی حاصل از فعالیت‌های آزمایشگاهی بوده است. اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی ECC در طرح اختلاط‌های مختلف، در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میزان مواد سیمانی به کار رفته در تمامی طرح

تهیه شده است، که به عنوان اولین عرضه‌کننده‌ی ماسه‌ی سیلیسی در ایران شناخته می‌شود و منحصر به معادن بزرگ طبرستان است؛ از جمله مهم‌ترین خواص مکانیکی ماسه‌ی سیلیسی، مقاومت کششی و فشاری بالا، سختی مناسب، دانه‌بندی مناسب (۵۰ - ۲۰۰ میکرومتر) و چگالی برابر با 2600 kg/m^3 است.

همچنین الیاف پلی پروپیلن به طول ۱۲ میلی‌متر از کارخانه‌ی نخ و گرانول سیرجان تهیه شده است. سایر مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف استفاده شده در پژوهش حاضر، در جدول ۳ ارائه شده است. [۲۳] علاوه بر این، به منظور تأمین کارایی مناسب و کاهش تخلخل ECC از فوق روان‌کننده‌ی پلی کربوکسیلات اتر شرکت سیکا با عنوان Sika ۵۱۱۰ استفاده شده است. فوق روان‌کننده‌ی مذکور منطبق بر استاندارد ASTM C۴۹۴، [۲۴] می‌باشد.

۲.۲. شرح آزمایش‌ها

۲.۲.۱. آزمایش مقاومت فشاری

در پژوهش حاضر، به منظور انجام آزمایش مقاومت فشاری از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن استفاده شده است. برای این منظور، ابتدا نمونه‌های مکعبی به ضلع ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده است. سپس نمونه‌ها به مدت ۷ و ۲۸ روز درون حوضچه‌ی آب و پس از پایان عمل‌آوری تحت بارگذاری با سرعت ۹۰۰ الی ۱۸۰۰ نیوتن بر ثانیه قرار گرفتند. لازم به ذکر است که آزمایش مقاومت فشاری براساس استاندارد ASTM C۱۰۹، [۲۵] انجام شده است.

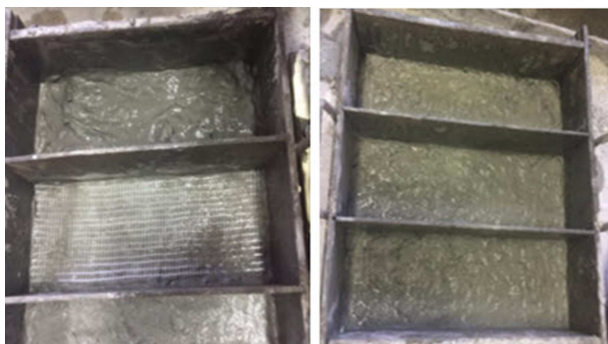
۲.۲.۲. آزمایش مقاومت خمشی

به منظور سنجش مقاومت خمشی در پژوهش حاضر از دستگاه آزمایش خمشی چهارنقطه‌یی به ظرفیت ۵۰ کیلو نیوتن استفاده شده است. برای این منظور نمونه‌های منشوری شکل با ابعاد ۳۵ × ۱۰۰ × ۴۰۰ میلی‌متر ساخته و پس از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری تحت آزمایش خمشی چهارنقطه‌یی مطابق استاندارد ASTM C۱۰۱۸، [۲۶] قرار گرفتند. در آزمایش‌های مذکور نمونه‌ها بر روی دو تکیه‌گاه استوانه‌یی شکل با فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۳۰۰ میلی‌متر و تحت بارگذاری به صورت تغییرمکان کنترل با سرعت ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. جهت ترسیم منحنی بار - تغییرمکان نمونه‌های خمشی، در تمامی نمونه‌ها از یک عدد LVDT در میانه‌ی طول نمونه استفاده شده است.

جدول ۴. طرح‌های اختلاط‌های مختلف ECC بررسی شده در پژوهش حاضر (kg/m^3).

شماره‌ی طرح اختلاط	سیمان	ماسه	سر باره*	میکروسیلیس*	پودر سنگ آهک	آب	الیاف PP	فوق روان‌کننده	پوزولان صنعتی*
۱	۴۶۵	-	(۶۰)۶۸۸	-	۵۱۶	۳۶۵	۱/۷۳	۸/۱	(۱۰)۵۱
۲	۴۶۵	-	(۶۰)۶۸۸	(۱۰)۵۱	۵۱۶	۳۶۵	۱/۷۳	۸/۱	-
۳	۴۶۵	-	(۶۱)۷۳۹	-	۵۱۶	۳۶۵	۱/۷۳	۹/۹	-
۴	۴۶۵	۵۱۶	(۶۰)۶۸۸	(۱۰)۵۱	-	۳۶۵	۱/۷۳	۱۱/۶	-
۵	۴۶۵	-	(۵۹)۶۸۳	(۱۳)۶۹	۴۸۸	۳۶۹	۱/۷۳	۶/۳	-
۶	۴۶۵	-	(۵۹)۶۸۳	-	۴۸۸	۳۶۹	۱/۷۳	۷/۳	(۱۳)۶۹
۷	۶۳۶	۴۶۲	(۵۰)۶۳۶	-	-	۳۸۵	۱/۷۳	۵/۵	-
۸	۵۰۹	۴۶۲	(۶۰)۷۶۳	-	-	۳۸۵	۱/۷۳	۵/۰	-
۹	۷۶۰	۸۱۱	-	-	-	۳۰۰	۱/۷۳	۳۴/۲	(۲۲)۲۱۹
۱۰	۳۸۲	۴۶۲	(۵۰)۳۸۲	-	-	۳۸۵	۱/۷۳	۷/۰۵	(۵۷)۵۱۰
۱۱	۴۳۰	۲۸۷	(۷۰)۱۰۰۴	-	-	۴۳۰	۱/۷۳	۱۷/۰	-
۱۲	۵۷۶	۴۵۶	(۵۵)۶۹۱	-	-	۳۸۵	۱/۷۳	۱۵/۳	-
۱۳	۹۶۹	-	(۲۸)۳۷۷	(۱۰)۱۰۲	۲۱۹	۴۰۸	۱/۷۳	۱۲/۱	-

* اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده‌ی درصد جایگزینی سر باره‌ی میکروسیلیس یا پوزولان صنعتی با سیمان است.



شکل ۲. نحوه‌ی ساخت پانل‌های ECC مسلح به بافته‌های شیشه.

ادامه، لایه‌ی دیگری از بافته‌ی شیشه درون قالب و بر روی ECC قرار گرفت و لایه‌ی دوم ECC به ضخامت ۵ میلی‌متر درون قالب ریخته شد. در پایان، آخرین لایه از بافته‌ی شیشه بر روی ECC قرار گرفت. باید به این نکته توجه داشت که پس از ریختن هر لایه از ECC، قالب و بیره و سطح ECC با ماله صاف شده است. نحوه‌ی ساخت پانل‌های ECC مسلح شده با بافته‌های شیشه، در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

۵.۲. ساخت نمونه‌های کششی

در پژوهش حاضر، به منظور ساخت نمونه‌های کششی، از بهترین طرح اختلاط ECC (طرح اختلاط شماره‌ی ۱۳) استفاده شده است. به منظور بررسی رفتار سخت‌شوندگی کرنشی نمونه‌های ECC، مقایسه‌ی نتایج و همچنین به دست آوردن منحنی تنش - کرنش ناشی از آزمایش کشش مستقیم، ۳ نمونه‌ی کششی مسلح به سه لایه‌ی بافته‌ی شیشه و ۳ نمونه‌ی کششی غیرمسلح ساخته شده است. نمونه‌های ساخته شده پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب، تحت آزمایش کشش مستقیم قرار گرفتند. لازم به ذکر است که طریقه‌ی ساخت نمونه‌های کششی مسلح به بافته‌ی شیشه مشابه نمونه‌های خمشی بوده و در شکل ۳ نشان داده شده است.



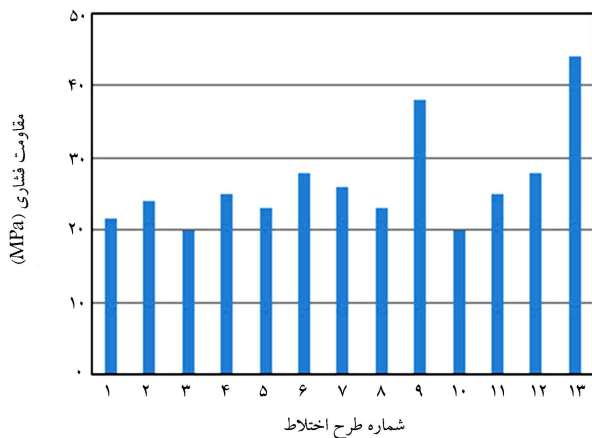
الف) قبل از اضافه شدن الیاف؛ ب) بعد از اضافه شدن الیاف.

شکل ۱. بافت کامپوزیت ECC در مراحل مختلف ساخت.

اختلاط‌ها، در بازه‌ی ۸۸۰ تا ۱۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. به منظور مقایسه‌ی هر چه دقیق‌تر نتایج، درصد الیاف به کار رفته در ماتریس بتن و همچنین نسبت آب به مواد سیمانی در تمامی طرح اختلاط‌ها، یکسان و به ترتیب برابر با ۱/۹٪ (به صورت حجمی) و ۰/۳ در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر، از درصد‌های مختلف پوزولان‌های سر باره، پوزولان صنعتی و میکروسیلیس، به منظور بررسی آثار آنها در خواص مکانیکی طرح اختلاط‌های مختلف ECC استفاده شده است. علاوه بر این از پودر سنگ آهک و ماسه‌ی سیلیسی، به عنوان پرکننده در طرح اختلاط‌ها استفاده شده است.

۴.۲. مسلح کردن ECC با بافته‌های شیشه

پس از دسترسی به بهترین طرح اختلاط ECC (طرح اختلاط شماره‌ی ۱۳)، تأثیر تسلیح پانل‌های ECC با استفاده از بافته‌ی شیشه در مقاومت خمشی بررسی شده است. برای این منظور، ۳ نمونه‌ی مسلح شده به سه لایه‌ی بافته‌ی شیشه، ۳ نمونه‌ی مسلح شده به یک لایه‌ی بافته‌ی شیشه و ۳ نمونه‌ی غیرمسلح ساخته و پس از گذشت ۷ روز عمل‌آوری در آب، تحت آزمایش خمش چهارنقطه‌یی قرار گرفتند. برای ساخت پانل مسلح به سه لایه بافته‌ی شیشه، ابتدا یک لایه بافته‌ی شیشه در کف قالب قرار گرفت و ECC به ضخامت ۵ میلی‌متر درون قالب ریخته شد. در



شکل ۵. مقاومت فشاری طرح اختلاط‌های مختلف ECC در سن ۷ روزه.

با ۷٪ از سرباره در طرح اختلاط شماره ۳ و حضور هر کدام از دو پوزولان اخیر در کنار سیمان، به ترتیب باعث افزایش ۲۰ و ۱۱ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است، که به دلیل درصد بالای سیلیس موجود در میکروسیلیس و پوزولان صنعتی بوده است. از طرف دیگر، جایگزین کردن ۶٪ سرباره به جای سیمان، باعث کاهش ۱۱ درصدی مقاومت فشاری طرح اختلاط شماره ۸ نسبت به طرح اختلاط شماره ۷ شده است؛ که علت آن، جایگزینی بیش از ۵٪ مواد سیمانی با سرباره در طرح‌های اختلاط‌های مختلف است. به بیان دیگر، با کاهش میزان سیمان، میزان کلسیم هیدروکسید ناشی از هیدراسیون سیمان و به دنبال آن واکنش هیدراسیون ثانویه سرباره و کلسیم هیدروکسید کاهش یافته و منجر به افت مقاومت بتن شده است. علاوه بر این، با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که جایگزین کردن پوزولان صنعتی با میکروسیلیس، به میزان ۵/۵٪ مواد سیمانی، باعث افزایش ۲۲ درصدی مقاومت فشاری طرح اختلاط شماره ۶، نسبت به طرح اختلاط شماره ۵ شده است.

۲.۳. نتایج آزمایش خمشی

۱.۲.۳. مدول گسیختگی

منحنی بار - تغییر مکان نمونه‌های خمشی در شکل ۶ مشاهده می‌شود. با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای، اطلاعاتی نظیر مدول گسیختگی، تنش ترک‌خوردگی، بار ترک‌خوردگی و بیشینه و تغییر شکل متناظر با بار بیشینه برای طرح اختلاط‌های مختلف در سن ۷ روزه اندازه‌گیری و در جدول ۵ ارائه شده است؛ که مطابق آن، جایگزین کردن ۷٪ میکروسیلیس به جای سرباره، سبب کاهش ۲۳ درصدی مدول گسیختگی طرح اختلاط شماره ۲ نسبت به طرح اختلاط شماره ۳ شده است. از طرف دیگر، جایگزین کردن میکروسیلیس با پوزولان صنعتی باعث افزایش مدول گسیختگی به میزان ۷۹٪ شده است. لازم به ذکر است که جایگزینی پودر سنگ آهک با ماسه سیلیسی، تأثیر چندانی در مدول گسیختگی نداشته است، ولی افزایش وزن مخصوص ECC را به دنبال داشته است. در طرح اختلاط‌های شماره‌های ۷ و ۸، به ترتیب از ۵۰ و ۶۰ درصد سرباره به جای سیمان استفاده شده است. مطابق نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که جایگزینی ۶٪ از سیمان با سرباره، منجر به کاهش ۲۲ درصدی مدول گسیختگی شده است. این پدیده به دلیل آن است که سرباره به تنهایی خاصیت چسبندگی ندارد و زمانی که در کنار سیمان قرار می‌گیرد، سیمان با ایجاد محیط قلیا فعال، باعث فعال شدن سرباره‌ها و در نتیجه ایجاد چسبندگی می‌شود.



شکل ۳. نحوه ساخت نمونه‌های کششی با بافته‌های شیشه.



شکل ۴. توانایی بالای ECC در فشرده شدن بدون وقوع جداشدگی کامل.

۳. نتایج آزمایشگاهی و بحث روی آنها

۱.۳. نتایج مقاومت فشاری

در پژوهش حاضر، روانی ECC با استفاده از آزمایش میز جریان، مطابق با استاندارد ASTM C ۱۴۳۷^[۲۸] اندازه‌گیری شده است. به منظور پراکندگی کامل و مناسب الیاف در ماتریس، نیاز به روانی بیش از ۱۷۰ میلی‌متر در آزمایش روانی است. در پژوهش حاضر، سعی بر آن بوده است که مقدار روانی برای تمامی طرح اختلاط‌های ECC تقریباً ثابت و بین ۱۸۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود. دقت به این نکته ضروری است که افزایش بیش از حد فوق روان‌کننده، باعث ایجاد تخلخل و حفره بر سطح ECC و نیز کاهش میزان فوق روان‌کننده منجر به کاهش روانی ECC می‌شود. اگر روانی ECC کافی نباشد، به دلیل اینکه حباب‌های هوا توانایی خروج از کامپوزیت را ندارند، عمل خروج هوا با دشواری انجام می‌پذیرد.^[۲۹] شکست کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده در فشار برخلاف سایر مواد سیمانی، بسیار نرم است و برخلاف بتن معمولی و بتن با مقاومت بالا، جداشدگی یا پرتاب ذرات بتن در حین گسیختگی اتفاق نمی‌افتد. در پژوهش حاضر مشاهده شده است که نمونه‌های مکعبی قادرند تا ۱/۳ بعد خود فشرده شوند، بدون آن‌که ذره‌یی از آنها جدا و یا پرتاب شوند (شکل ۴)؛ که این امر به دلیل وجود الیاف در بتن ECC بوده است. اگر چه مقاومت فشاری بتن ECC تفاوت زیادی با سایر بتن‌های الیافی ندارد، اما دارای جذب انرژی به مراتب بیشتر و رفتاری نرم‌تر است؛ که علت آن ایجاد ترک‌های ریز با فواصل بسیار کم در سطح بتن در هنگام اعمال نیروی فشاری بر روی نمونه است. مقاومت فشاری ۷ روزه طرح اختلاط‌های ساخته شده در پژوهش حاضر در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

با توجه به نتایج مقاومت فشاری حاصل از طرح اختلاط‌های شماره‌های ۱، ۲ و ۳ می‌توان نتیجه گرفت که جایگزین کردن میکروسیلیس یا پوزولان صنعتی

جدول ۵. نتایج به دست آمده از آزمایش خمشی چهارنقطه‌یی طرح‌های اختلاط‌های مختلف ECC در سن ۷ روز.

شماره طرح اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)	مدول گسیختگی (MPa)	تنش، ترک خوردگی (MPa)	بار ترک خوردگی (N)	بار بیشینه (N)	تغییر شکل متناظر با بار بیشینه (mm)	E_c (N/mm)	E_{max} (N/mm)	E_u (N/mm)	I_3	I_2	I_1	I_0
۱	۲۱/۵	۴/۸۵	۳/۶	۱۹۵۰	۲۳۴۰	۶/۴	۵۸۴	۱۳۰۴۴	۱۶۸۴۱	۲/۸	۵/۱	۱۰/۴	۱۶/۵
۲	۲۴	۳/۷۵	۲/۵۵	۱۳۶۰	۱۸۱۰	۹/۰	۱۱۹۰	۱۳۷۴۲	۲۳۲۶۶	۴/۰	۸/۴	۱۷/۱	۲۹
۳	۲۰	۴/۹	۳/۴۷	۱۸۵۰	۲۳۷۰	۷/۰	۴۸۸	۱۴۷۲۰	۱۹۹۸۲	۲/۵	۳/۹	۱۰/۰	۱۵/۵
۴	۲۵	۴/۲۳	۳/۷۵	۲۰۰۰	۲۰۵۰	۱۰/۷	۶۳۵	۲۰۸۲۸	۳۲۴۱۱	۳/۸	۷/۶	۱۴/۵	۲۷/۲
۵	۲۳	۳/۱۵	۲/۵	۱۳۳۰	۱۵۳۰	۲/۴	۲۵۳	۱۰۵۴۵	۱۳۴۴۰	۲/۰	۶/۱	۱۰/۱	۱۵
۶	۲۷	۵/۶۵	۴/۹۵	۲۶۴۰	۲۷۴۰	۵/۶	۱۵۶	۱۳۹۳۲	۱۹۱۴۱	۲/۷	۵/۰	۹/۷	۱۴/۳
۷	۲۶	۵/۸۳	۴/۹۷	۲۶۵۰	۲۸۲۰	۵/۹	۶۶۷	۱۴۱۱۴	۲۲۲۱۷	۳/۰	۵/۴	۱۱/۰	۱۷/۴
۸	۲۳	۴/۷۵	۴/۳	۲۳۰۰	۲۳۰۰	۰/۴	۶۹۷	۱۳۸۲۳	۱۲۸۲۳	۲/۵	۴/۸	۹/۴	۱۴/۲
۹	۲۸	۵/۷	۳/۷۵	۱۹۹۰	۲۷۵۰	۹/۶	۶۵۴	۲۲۱۳۷	۲۶۷۵۹	۳/۶	۷/۰	۱۴/۲	۲۳
۱۰	۲۰	۳/۶	۲/۷۵	۱۴۷۰	۱۷۵۰	۱۰/۴	۲۳۰	۱۶۲۳۳	۲۰۰۳۵	۲/۸	۵/۴	۱۱/۰	۱۷/۱
۱۱	۲۵	۴/۷۵	۳/۷۶	۲۰۱۰	۲۳۰۰	۹/۹	۷۶۹	۱۹۲۸۶	۲۳۱۸۵	۳/۹	۸/۱	۱۷/۴	۲۹/۸
۱۲	۲۸	۵/۸	۴/۱۵	۲۲۱۰	۲۸۱۰	۷/۹	۴۸۳	۱۹۳۰۲	۲۲۷۲۹	۳/۱	۵/۵	۱۱/۱	۱۷/۱
۱۳	۴۴	۶	۴/۷	۲۵۱۰	۲۹۰۰	۷/۴	۵۹۲	۱۷۹۰۷	۲۲۶۴۳	۲/۷	۴/۹	۹/۴	۱۴/۴

به طرح اختلاط شماره ۷ (جایگزینی ۵۰٪ از سیمان با سرپاره) کاهش داده است.

۳.۲.۳. شاخص‌های طاقت

استاندارد ASTM C ۱۸۰ [۲۶]، به منظور بررسی شکل‌پذیری نمونه‌ی بتنی از شاخص‌های طاقت (I_0, I_1, I_2, I_3) استفاده می‌کند. هر چه سطح زیر نمودار بار - تغییرمکان بیشتر باشد، در نتیجه مقدار اندیس‌های طاقت نیز بزرگ‌تر می‌شود، که باعث افزایش شکل‌پذیری و میزان جذب انرژی نمونه‌ها می‌شود. به طور کلی I_n از نسبت سطح زیر نمودار بار - تغییرمکان تا $\frac{n+1}{n}$ برابر تغییرمکان اولین ترک خوردگی، به سطح زیر منحنی مذکور تا اولین ترک خوردگی محاسبه می‌شود. اندیس‌های طاقت محاسبه شده برای طرح‌های اختلاط‌های مختلف ECC در سن ۷ روزه، در جدول ۵ ارائه شده است.

در پژوهش حاضر، طرح اختلاط‌های ۱۱، ۲ و ۴ به ترتیب دارای بیشترین مقادیر شاخص‌های طاقت نسبت به سایر طرح اختلاط‌ها بوده‌اند، که پدیده‌ی اخیر به دلیل اتصال مناسب الیاف با ماتریس و ترکیب‌های سیمانی استفاده شده در طرح اختلاط‌های مذکور است. با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که جایگزینی ۷٪ از سرپاره با میکروسیلیس در طرح اختلاط شماره ۲، باعث افزایش شاخص طاقت I_0 به میزان ۸۷٪ نسبت به طرح اختلاط شماره ۳ شده است. از طرف دیگر، جایگزین کردن پودر سنگ آهک با ماسه‌ی سیلیسی (طرح اختلاط‌های شماره‌های ۲ و ۴)، باعث کاهش شاخص طاقت I_0 به میزان ۶٪ شده است. همچنین با توجه به طرح اختلاط‌های شماره‌های ۷ و ۸ می‌توان نتیجه گرفت که جایگزین کردن ۶۰٪ سیمان با سرپاره، سبب کاهش ۱۸ درصدی شاخص طاقت I_0 شده است.

۳.۳. مقایسه‌ی دو طرح اختلاط منتخب ECC

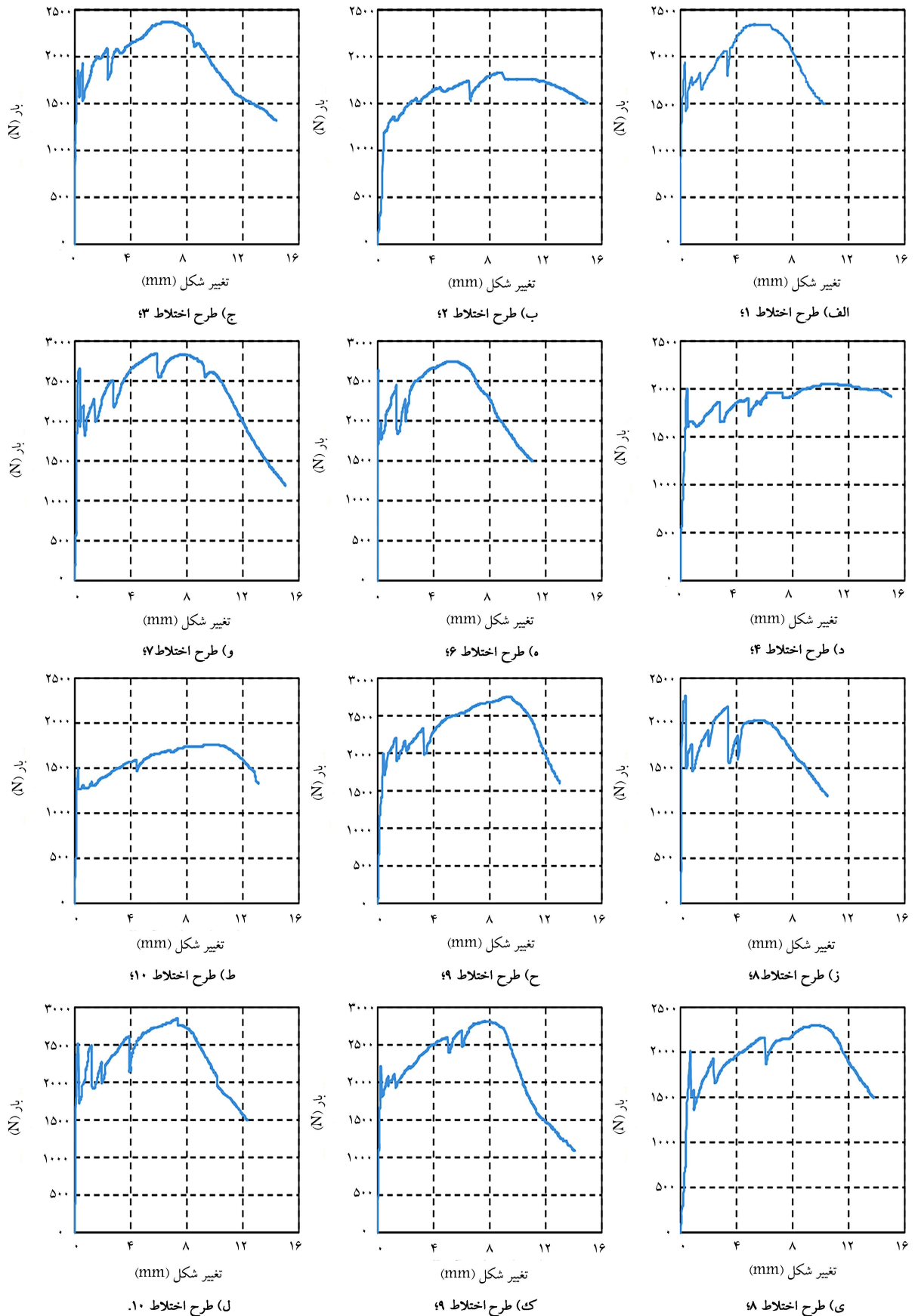
در بخش کنونی، دو طرح اختلاط منتخب ECC مقایسه و در نهایت، بهترین طرح اختلاط به منظور تسلیح با یافته‌های شیشه انتخاب شده است. جایگزینی به ترتیب

در طرح اختلاط شماره ۸، کاهش میزان سیمان و افزایش سرپاره سبب شده است که محیط قلیا فعال ایجاد شده توسط سیمان، نتواند باعث فعال شدن تمامی مقادیر سرپاره‌ی به کار برده شده در طرح اختلاط شماره ۸ شود. با توجه به طرح اختلاط‌های مختلف ساخته شده، درصد بهینه‌ی میکروسیلیس و سرپاره به ازاء نسبت‌های آب به سیمان ۳/۰ تا ۴/۰، به ترتیب برابر ۱۵ و ۵۰ درصد بوده است.

۳.۲.۳. انرژی جذب شده

مقادیر انرژی جذب شده توسط نمونه‌های ECC با استفاده از سطح زیر منحنی بار - تغییرمکان تا نقطه‌ی مورد نظر محاسبه می‌شود. در پژوهش حاضر، میزان جذب انرژی طرح اختلاط‌های مختلف در سن ۷ روزه تا نقطه‌ی ترک خوردگی (E_c)، بار بیشینه (E_{max}) و نقطه‌ی نهایی (E_u) محاسبه و در جدول ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است که نقطه‌ی نهایی، نقطه‌ی با ۸۵٪ بار بیشینه در شاخه‌ی نزولی منحنی بار - تغییرمکان بوده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش خمشی چهارنقطه‌یی، می‌توان نتیجه گرفت که بتن ECC قابلیت جذب انرژی بیشتری نسبت به سایر بتن‌های الیافی دارد. با توجه به طرح اختلاط‌های شماره‌های ۲ و ۴ مشاهده می‌شود که جایگزینی پودر سنگ آهک با ماسه‌ی سیلیسی منجر به افزایش ۳۹ درصدی انرژی جذب شده‌ی نهایی طرح اختلاط شماره ۴ نسبت به طرح اختلاط شماره ۲ شده است. از طرف دیگر، جایگزین کردن ۷٪ از سرپاره با میکروسیلیس، باعث افزایش ۱۶ درصدی انرژی جذب شده‌ی نهایی طرح اختلاط شماره ۲ نسبت به طرح اختلاط شماره ۳ شده است. لازم به ذکر است که استفاده از پوزولان صنعتی به جای میکروسیلیس در طرح اختلاط شماره ۶، افزایش ۴۲ درصدی انرژی جذب شده‌ی نهایی نسبت به طرح اختلاط شماره ۵ را به دنبال داشته است. مطابق با جدول ۴، در طرح اختلاط‌های ۷ و ۸، به ترتیب از ۵۰ و ۶۰ درصد سرپاره به جای سیمان استفاده شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که جایگزین کردن ۶۰٪ سیمان با سرپاره، انرژی جذب شده‌ی نهایی را به میزان ۴۹٪ نسبت



شکل ۶. منحنی بار- تغییر مکان تیرهای منشوری خمشی برای طرح‌های اختلاط‌های مختلف ECC.

جدول ۶. نتایج به دست آمده از آزمایش خمش چهارنقطه‌یی پانل‌های ECC غیرمسلح و مسلح به بافته‌های شیشه.

پانل	تعداد لایه‌های بافته‌ی شیشه	مدول گسیختگی (MPa)	تنش ترک خوردگی (MPa)	بار ترک خوردگی (N)	بار بیشینه (N)	تغییر شکل متناظر بار بیشینه (mm)	E_{max} (N.mm)	E_u (N.mm)	I_0	I_1	I_2	I_3	I_4
ECC - 0	0	7/2	4/8	160	240	19/7	3669	4777	11/5	5/3	2/55	17/7	11/5
ECC - 1	1	18/3	7/8	260	610	19	8412	8820	6/85	3/35	25/5	25/5	15/0
ECC - 3	3	27/0	10/2	240	900	16/4	10134	11200	8/65	3/88	-	20/8	8/65



شکل ۷. پانل ECC مسلح شده به بافته‌های شیشه تحت آزمایش خمش.

۴.۳. نتایج آزمایش خمش برای پانل‌های ECC مسلح به بافته‌های شیشه

شیشه

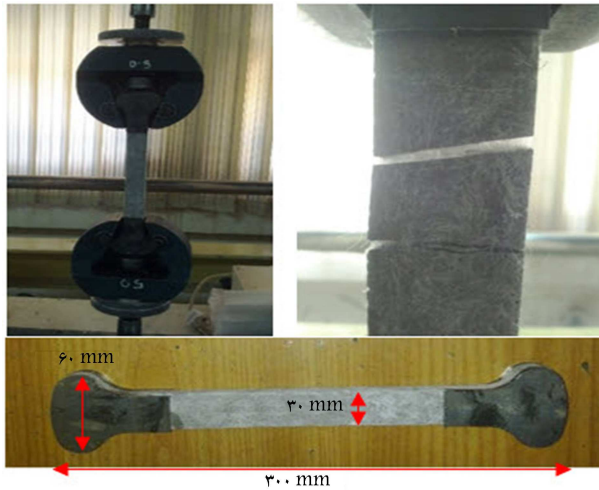
در پژوهش حاضر، برای نخستین بار از بافته‌های شیشه به منظور مسلح کردن بتن ECC استفاده شده است. از جمله مزیت‌های پانل‌های مذکور می‌توان به مقاومت‌های خمشی و کششی مناسب، کرنش کششی بیشتر از ۱٪، شکست نرم، شکل پذیری بالا و مقاومت مناسب در برابر محیط‌های سولفاتی و کلرایدی اشاره کرد. به منظور ساخت پانل‌های ECC مسلح شده به بافته‌های شیشه، از بهترین طرح اختلاط پژوهش حاضر شماره ۱۳ استفاده شده است. ابعاد پانل‌های ECC ساخته شده جهت انجام آزمایش خمش چهارنقطه‌یی برابر با $350 \times 100 \times 10$ میلی‌متر بوده است. در پژوهش حاضر، به منظور مقایسه‌ی نتایج، از پانل‌های ECC مسلح شده به ۱ و ۳ لایه بافته‌ی شیشه استفاده و نتایج حاصل از آن، با پانل‌های ECC غیرمسلح مقایسه شده است. تصویری از پانل ECC مسلح شده به بافته‌های شیشه، تحت آزمایش خمش چهارنقطه‌یی، در شکل ۷ مشاهده می‌شود. منحنی‌های بار-تغییرمکان حاصل از آزمایش خمش چهارنقطه‌یی، مربوط به پانل‌های ECC مسلح و غیرمسلح در شکل ۸ مشاهده می‌شود. علاوه بر این، نتایج به دست آمده از آزمایش خمش چهارنقطه‌یی پانل‌ها، شامل: مدول گسیختگی، تنش اولین ترک خوردگی، بار بیشینه، انرژی‌های جذب شده و شاخص‌های طاقت در جدول ۶ ارائه شده است. با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود که مدول گسیختگی پانل ECC-۳، از مدول گسیختگی پانل‌های ECC-۱ و ECC-۰ به ترتیب ۴۷/۵ و ۲۷۵ درصد بیشتر است. همچنین مقدار تنش ترک خوردگی در پانل ECC-۳، از مقادیر تنش ایجاد شده در پانل‌های ECC-۱ و ECC-۰ به ترتیب ۳۰ و ۱۱۲ درصد بیشتر بوده است. از طرف دیگر، نتایج نشان می‌دهند که افزایش تعداد لایه‌های بافته‌ی شیشه، باعث کاهش تغییرشکل متناظر با بیشینه‌ی نیرو در پانل‌های ECC مسلح

۲۸ و ۱۰ درصد سیمان با سرباره و میکروسیلیس و استفاده از مقدار بهینه‌ی پودر سنگ آهک، باعث ساخت کامپوزیتی با مقاومت فشاری بالا، شکل پذیری عالی و رفتار سخت‌شوندگی کرنشی مناسب در کنار سایر خواص مکانیکی قابل قبول در طرح اختلاط شماره ۱۳ شده است. همچنین جایگزین کردن ۲۲٪ سیمان با پوزولان صنعتی و استفاده از ماسه‌ی سیلیسی، باعث ساخت کامپوزیتی با شکل پذیری بالا و مقاومت فشاری و خمشی مناسب در طرح اختلاط شماره ۹ شده است. لازم به ذکر است که میزان مصرف فوق روان‌کننده در طرح اختلاط شماره ۹ به میزان ۱۶۷٪ بیشتر از طرح اختلاط شماره ۱۳ بوده است.

نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد که مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح اختلاط‌های شماره‌های ۹ و ۱۳ به ترتیب برابر با ۵۰ و ۵۶ مگاپاسکال بوده است. به عبارت دیگر، مقاومت فشاری طرح اختلاط شماره ۱۳ در سنین ۷ و ۲۸ روز، به ترتیب ۱۶ و ۱۲ درصد بیشتر از طرح اختلاط شماره ۹ بوده است. این اختلاف مقاومت به دلیل مواد سیمانی بیشتر در طرح اختلاط شماره ۱۳ بوده است.

نتایج به دست آمده از آزمایش خمش چهارنقطه‌یی، نشان‌دهنده‌ی رفتار سخت‌شوندگی کرنشی برای هر دو طرح اختلاط منتخب در سن ۷ روز است، که در شکل ۶ مشاهده می‌شود. نیروی اولین ترک نمونه‌ی خمشی طرح اختلاط شماره ۱۳، در مقایسه با طرح اختلاط شماره ۹، به میزان ۲۶٪ بیشتر بوده است؛ که این پدیده به دلیل میزان بالای مواد سیمانی و نسبت صحیح اجزاء تشکیل دهنده‌ی طرح اختلاط شماره ۱۳ بوده است. به دلیل شکل‌پذیری بالای طرح اختلاط شماره ۹، سطح زیر منحنی بار-تغییرمکان آن تا بار بیشینه، به میزان ۱۸٪ بیشتر از مقدار مشابه در طرح اختلاط شماره ۱۳ بوده است. لازم به ذکر است که تغییرشکل متناظر با بیشینه‌ی نیرو در طرح اختلاط شماره ۹، ۳۰٪ بیشتر از طرح اختلاط شماره ۱۳ بوده است.

مطابق جدول ۵ مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری طرح اختلاط شماره ۱۳ بیشتر از طرح اختلاط شماره ۹ بوده است. به بیان دیگر، نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که مدول گسیختگی طرح اختلاط شماره ۱۳ به میزان ۵٪ بیشتر از طرح اختلاط شماره ۹ بوده است. این در حالی است که انرژی‌های جذب شده توسط نمونه‌ی ساخته شده با طرح اختلاط شماره ۹ در لحظه‌های اولین ترک خوردگی، بار بیشینه و بار نهایی، به ترتیب به میزان ۱۰، ۲۳ و ۱۸ درصد نسبت به مقادیر مشابه در طرح اختلاط شماره ۱۳ بیشتر بوده است؛ این پدیده به علت شکل‌پذیری بالاتر طرح اختلاط شماره ۹ نسبت به طرح اختلاط شماره ۱۳ بوده است. با توجه به مقایسه‌ی نتایج دو طرح اختلاط منتخب و همچنین غیراقتصادی بودن طرح اختلاط شماره ۹ (به دلیل مصرف زیاد فوق روان‌کننده و قیمت بالای پوزولان صنعتی)، طرح اختلاط شماره ۱۳ به منظور مسلح شدن با بافته‌های شیشه در نظر گرفته شد.



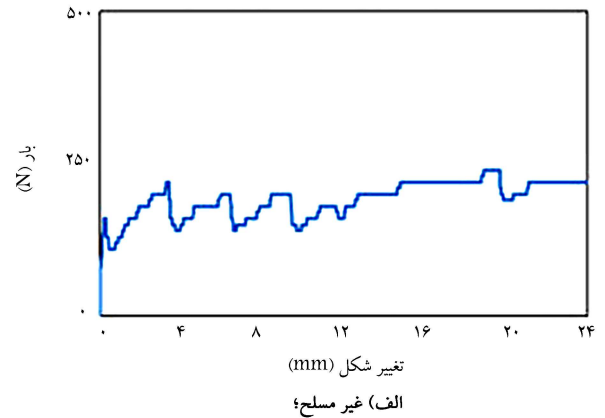
شکل ۹. پانل ECC مسلح شده به بافته‌های شیشه تحت آزمایش کشش مستقیم.

مقاومت کششی بالایی دارد. مطابق جدول ۶، شاخص‌های طاقت I_5 ، I_{10} و I_{20} برای پانل ECC-۳ به ترتیب به میزان ۵۲، ۶۳ و ۸۱ درصد بیشتر از مقادیر مشابه برای پانل ECC-۰ بوده است. به عبارت دیگر، با افزایش مقاومت خمشی پانل‌ها، سطح زیر نمودار بار- تغییرمکان افزایش و به دنبال آن شاخص‌های طاقت افزایش یافته‌اند. لازم به ذکر است که افزایش شاخص‌های طاقت، نشان‌دهنده‌ی افزایش شکل‌پذیری پانل‌هاست، که به دلیل مقاومت کششی بالای بافته‌های شیشه است، که استفاده از آن در پانل‌های ECC، منجر به افزایش شاخص‌های طاقت، میزان جذب انرژی و شکل‌پذیری پانل‌ها می‌شود.

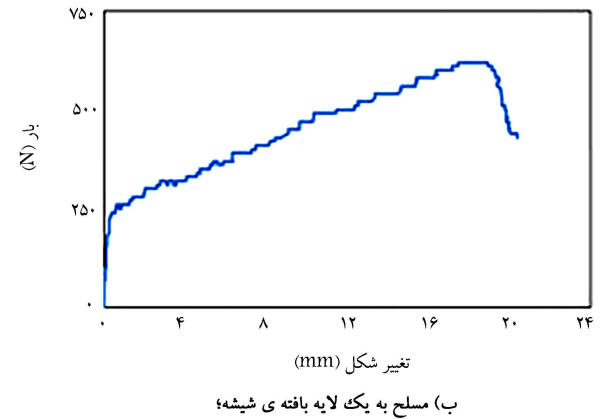
۵.۳. نتایج آزمایش کشش مستقیم پانل‌های ECC مسلح به بافته‌های شیشه

کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده، دویزگی شاخص بسیار مهم دارند، که ECC را نسبت به سایر بتن‌ها متمایز می‌سازد؛ این دویزگی شاخص عبارت‌اند از: رفتارهای سخت‌شوندگی کرنشی و کرنش کششی بیشتر از ۱٪ در پژوهش حاضر، به منظور بررسی رفتار سخت‌شوندگی کرنشی و کرنش کششی ایجاد شده در ECC، به ترتیب از آزمایش خمش چهارنقطه‌ای و کشش مستقیم استفاده شده است. در آزمایش کشش مستقیم، به منظور ثبت صحیح اطلاعات و جلوگیری از ایجاد تمرکز تنش در بالا و پایین نمونه‌های کششی و همچنین جلوگیری از سر خوردن نمونه در دستگاه کشش مستقیم، صفحه‌های فولادی به ضخامت ۲ میلی‌متر به دو وجه قسمت‌های انتهایی نمونه چسبانده شده است. تصویری از پانل ECC مسلح به بافته‌ی شیشه تحت آزمایش کشش مستقیم در شکل ۹ مشاهده می‌شود. منحنی تنش - کرنش پانل ECC غیرمسلح و مسلح به ۳ لایه بافته‌ی شیشه، نیز در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.

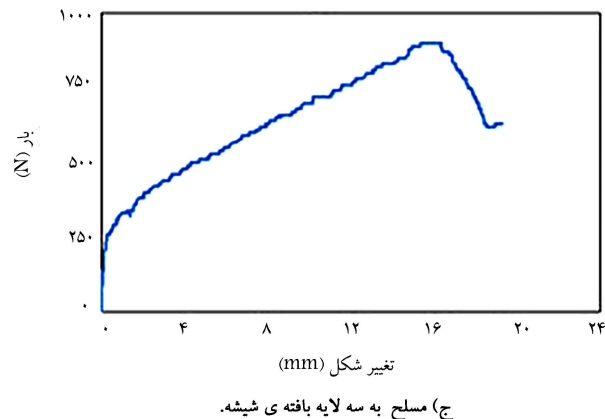
با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که کرنش کششی نمونه‌های ECC مسلح و غیرمسلح، در لحظه‌ی تنش کششی بیشینه، بیشتر از ۱٪ و همچنین شیب هر دو نمودار تا قبل از ایجاد اولین ترک خوردگی با هم برابر بوده است. به علاوه، رفتار سخت‌شوندگی کرنشی برای پانل‌های ECC-N-۳ و ECC-N-۰ مشاهده می‌شود. تنش کششی بیشینه و کرنش کششی متناظر با آن برای پانل ECC-N-۳ که به بافته‌های شیشه مسلح شده است، به ترتیب برابر ۵/۴ مگاپاسکال و ۲/۰۱٪ بوده است. این مقادیر برای پانلی که فاقد بافته‌های شیشه است، به ترتیب برابر ۲/۱۶



تغییر شکل (الف) غیر مسلح؛



(ب) مسلح به یک لایه بافته ی شیشه؛



(ج) مسلح به سه لایه بافته ی شیشه.

شکل ۸. نمودار بار- تغییرمکان پانل‌های ECC.

شده است. به عبارت دیگر، تغییرشکل متناظر با بیشینه‌ی نیرو در پانل ECC-۰، از تغییرشکل متناظر با بیشینه‌ی نیرو در پانل‌های ECC-۱ و ECC-۳، به ترتیب ۴ و ۲۰ درصد بیشتر بوده است. لازم به ذکر است که به علت شکل‌پذیری بالای پانل ECC-۰، گسیختگی در پانل اتفاق نیفتاده است؛ اما ریزترک‌هایی در ناحیه‌ی وسط نمونه‌ی خمشی مشاهده می‌شود.

براساس نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که افزایش تعداد لایه‌های بافته‌ی شیشه منجر به افزایش ظرفیت باربری، سطح زیر نمودار بار- تغییرمکان و همچنین مقادیر انرژی جذب شده توسط پانل‌های ECC مسلح شده به بافته‌های شیشه شده است. به عنوان مثال، مقادیر انرژی جذب شده در بار بیشینه و بار نهایی توسط پانل ECC-۳، به ترتیب ۱۷۶ و ۱۳۴ درصد بیشتر از مقادیر مشابه در پانل ECC-۰ بوده است. این افزایش به دلیل استفاده از بافته‌های شیشه است، که

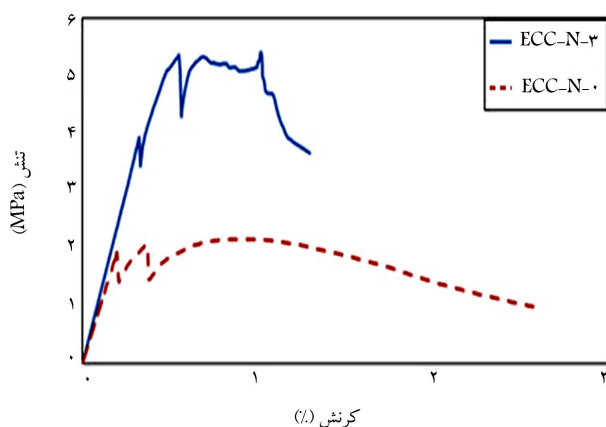
۱. استفاده از پودر سنگ آهک در طرح اختلاط‌ها، باعث افزایش شاخص‌های طاقت و به دنبال آن شکل‌پذیری ECC شده است. لازم به ذکر است که استفاده از ماسه‌ی سیلیسی، باعث افزایش مقادیر مدول گسیختگی، میزان انرژی جذب شده و وزن مخصوص ECC و نیز افزایش مصرف فوق روان‌کننده در ECC شده است؛

۲. براساس نتایج آزمایش خمش، هر چه نسبت سرباره به سیمان در ECC بیشتر باشد، نمونه‌ی ساخته شده، شکل‌پذیری بیشتر و شکستی نرم‌تر دارد. این در حالی است که با افزایش نسبت سرباره به سیمان از ۵/۰ به ۶/۰، میزان مقاومت خمشی، شاخص طاقت و انرژی جذب شده‌ی نهایی، به ترتیب به میزان ۲۲، ۱۸/۵ و ۵۱ درصد کاهش یافته‌اند؛

۳. استفاده از پوزولان صنعتی به میزان بیشینه‌ی ۲۵٪ در طرح اختلاط‌های مختلف، باعث افزایش مقاومت‌های خمشی و فشاری و میزان انرژی جذب شده است. جایگزین کردن ۵/۵٪ پوزولان صنعتی با میکروسیلیس در طرح اختلاط شماره‌ی ۶، به ترتیب باعث افزایش مدول گسیختگی و انرژی جذب شده‌ی نهایی، به میزان ۷۲ و ۴۲ درصد شده است؛

۴. با افزایش تعداد لایه‌های بافته‌ی شیشه در پانل‌های ECC، مقاومت خمشی، میزان انرژی جذب شده و شاخص‌های طاقت افزایش یافته‌اند. میزان مقاومت خمشی پانل‌های ECC مسلح شده به سه لایه‌بافته‌ی شیشه، به ترتیب به میزان ۴۵ و ۲۷۵ درصد بیشتر از مقاومت خمشی پانل‌های ECC مسلح شده به یک لایه‌ی بافته‌ی شیشه و پانل‌های ECC غیرمسلح بوده است؛

۵. نمونه‌های کششی غیرمسلح و مسلح به بافته‌های شیشه، از خود رفتار سخت‌شوندگی کرنشی نشان داده و کرنش کششی آنها، بیشتر از ۱٪ بوده است، این مقدار به مراتب از کرنش کششی بتن معمولی بیشتر است. علاوه بر این، استفاده از بافته‌های شیشه به منظور تسلیح کردن نمونه‌های کششی، باعث افزایش تنش کششی بیشینه به میزان ۱۵٪، نسبت به نمونه‌های کششی غیرمسلح شده است.



شکل ۱۰. منحنی تنش - کرنش کششی پانل‌های ECC مسلح و غیرمسلح.

مگاپاسکال و ۱٪ بوده است. لازم به ذکر است که استفاده از بافته‌های شیشه، باعث افزایش تنش کششی بیشینه‌ی نمونه‌ی ECC-N-3 به میزان ۱۵۰٪، نسبت به پانل ECC-N-0 شده است. این در حالی است که مقادیر کرنش کششی متناظر با تنش کششی بیشینه در نمونه‌های ECC-N-3 و ECC-N-0 تقریباً برابر حدود ۱٪ بوده است.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به منظور تولید کامپوزیت سیمانی مهندسی شده با استفاده از مصالح داخلی در دسترس با خواص مکانیکی مناسب، ۱۳ طرح اختلاط مختلف ساخته شده است. پس از انجام آزمایش مقاومت‌های فشاری و خمشی، نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه و بهترین طرح اختلاط به منظور تسلیح با استفاده از بافته‌های شیشه انتخاب شده است. در نهایت پانل‌های مسلح و غیرمسلح تحت آزمایش خمش چهارنقطه‌یی و کشش مستقیم قرار گرفتند. در ادامه، برخی از نتایج پژوهش حاضر ارائه شده است:

پانویس

1. Engineered Cementitious Composites

منابع (References)

- 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.
- Li, V.C., Fischer, G. and Lepech, M.D., 2004. Crack-resistant concrete material for transportation construction. In *Proceedings of the Transportation Research Board 83rd Annual Meeting*.

- Turk, K. and Nehdi, M.L., 2021. Flexural toughness of sustainable ECC with high-volume substitution of cement and silica sand. *Construction and Building Materials*, 270, p.121438.
- Li, V.C., Fischer, G., Kim, Y.Y. and et al., 2003. Durable link slabs for jointless bridge decks based on strain-hardening cementitious composites. Report for Michigan Department of Transportation RC-1438.
- Li, V.C., 2008. *Engineered cementitious composites (ECC) material, structural, and durability performance*. Concrete Construction Engineering Handbook, Chapter 24, Ed. E. Nawy, CRC Press.
- Li, M., Sahmaran, M. and Li, V.C., 2007. Effect of cracking and healing on durability of engineered cementitious composites under marine environment. *High Per-*

- formance Fiber Reinforced Cement Composites Conference (HPFRCC5), pp.313-322.
7. Ma, Z., Liu, M., Tang, Q. and et al., 2020. Chloride permeability of recycled aggregate concrete under the coupling effect of freezing-thawing, elevated temperature or mechanical damage. *Construction and Building Materials*, 237, p.117648.
 8. Lepech, M.D., Li, V.C., Robertson, R.E. and et al., 2008. Design of green engineered cementitious composites for improved sustainability. *ACI Materials Journal*, 105(6), pp.567-575.
 9. Kanda, T., Zhong, L.Z. and Li, V.C., 2000. Tensile stress-strain modeling of pseudo strain hardening cementitious composite. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12(2), pp.147-156.
 10. Yoo, D.Y., Oh, T., Kang, M.C. and et al., 2021. Enhanced tensile ductility and sustainability of high-strength strain-hardening cementitious composites using waste cement kiln dust and oxidized polyethylene fibers. *Cement and Concrete Composites*, 120, p.104030.
 11. Sharbatdar, M.K. and Tajari, A., 2021. Experimental in-plane seismic strengthening of masonry infilled reinforced concrete frames by engineered cementitious composites (ECC). *Construction and Building Materials*, 293, p.123529.
 12. Sharbatdar, M.K. and Tajari, A. 2021. Engineered cementitious composites effects on seismic strengthening of non-ductile RC frames with masonry infills. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 37.2(1.2), pp.25-37.
 13. Hajiaghameh, M., Mostofinejad, D. and Bahmani, H., 2022. High volume of slag and PP fibers in engineered cementitious composites (ECC): microstructure and mechanical properties. *Magazine of Concrete Research*, pp.1-44.
 14. Wang, Q., Lai, M.H., Zhang, J. and et al., 2020. Greener engineered cementitious composite (ECC)- the use of pozzolanic fillers and uncoiled PVA fibers. *Construction and Building Materials*, 247, p.118211.
 15. Pan, Z., Wu, C., Liu, J. and et al., 2015. Study on mechanical properties of cost-effective poly vinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). *Construction and Building Materials*, 78, pp.397-404.
 16. Zhang, S., Li, V.C. and Ye, G., 2020. Micromechanics-guided development of a slag/fly ash-based strain-hardening geopolymer composite. *Cement and Concrete Composites*, 109, p.103510.
 17. Termkhajornkit, P., Nawa, T., Yamashiro, Y. and et al., 2009. Self-healing ability of fly ash-cement systems. *Cement and Concrete Composites*, 31(3), pp.198-203.
 18. Yang, E.H., Yang, Y. and Li, V.C., 2007. Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness. *ACI Materials Journal*, 104(6), pp.620-628.
 19. ASTM C150./C150M, 2022. Standard specification for Portland cement. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
 20. <http://www.ardestancement.com/>.
 21. <https://www.esfahansteel.com/>.
 22. ASTM C1240., 2020. Standard specification for silica fume used in cementitious mixtures. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
 23. <http://www.impasco.gov.ir/>.
 24. ASTM, C494., 2008. Standard specification for chemical admixtures for concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
 25. ASTM C109., 2007. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). ASTM International, West Conshohocken, PA.
 26. ASTM C1018., 2017. Standard test for flexural toughness and first-crack strength of fiber reinforced concrete (Using Beam with third-point loading). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
 27. ASTM D3039., 2014. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
 28. ASTM C1437., 2020. Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
 29. Saucier, F., Pigeon, M. and Plante, P., 1990. Air-void stability, part III: Field tests of superplasticized concretes. *Materials Journal*, 87(1), pp.3-11.