

تحقیقات بتن

سال شانزدهم، شماره اول

بهار ۱۴۰۲

ص ۱۸ - ۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵

مطالعه آزمایشگاهی اثر ریزدانه و درصد الیاف بر رفتار و ظرفیت ترک خوردگی مواد مرکب سیمانی مهندسی شده (ECC)

محمد رضا اصفهانی *

استاد دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

محمد امیری

دانشجوی دکتری عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

در این پژوهش آزمایشگاهی اثر استفاده از الیاف پلی پروپیلن (PP)، غبار کوره ذوب آهن، سرپاره آهن مذاب، پودر سنگ معدنی، ماسه شسته طبیعی و میکروسیلیس بجای الیاف پلی وینیل الکل (PVA)، خاکستری بادی و ماسه سلیس برای بهبود خواص مکانیکی و شکل پذیری مواد مرکب سیمانی مهندسی (ECC) مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ۱۲ طرح اختلاط متفاوت بررسی شد. سپس نمونه‌های فشاری و خمشی برای مخلوط‌ها ساخته و آزمایش شدند. مشاهده شد که استفاده هم‌زمان از میکروسیلیس و غبار کوره ذوب آهن با ایجاد شکل پذیری و افزایش مقاومت ماده مرکب می‌تواند جایگزین مناسبی برای خاکستر بادی باشد. پودر سنگ معدنی در یک ترکیب مناسب می‌تواند جایگزین ماسه سلیس در ترکیب ECC شود. در نسبت سیمان به مواد سیمانی برابر ۱/۲۵ بهترین عملکرد برای ECC به دست آمد. با افزایش درصد الیاف از ۱ به ۱/۵ مقدار مقاومت خمشی ۶۵ درصد و خیز وسط دهانه ۲۱/۷ درصد افزایش یافت و درصد بهینه الیاف PP برای شروع رفتار سخت‌شوندگی مقدار ۱/۵ درصد به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: مواد مرکب سیمانی مهندسی، پودر سنگ معدنی، غبار کوره ذوب آهن، میکروسیلیس، الیاف پلی پروپیلن.

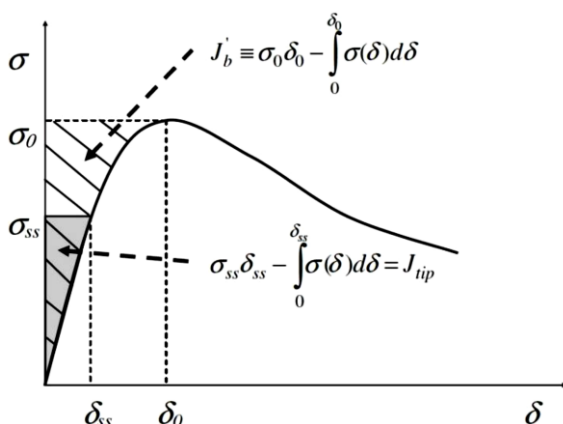
* نویسنده مسئول: esfahani@um.ac.ir

۱- مقدمه

ماتریس، ECC رفتار سخت شوندگی و شکل پذیری کرنشی بیش از ۱٪ تا ۸٪ از خود نشان می‌دهد. براساس تئوری ریزساختاری برای ایجاد رفتار کرنش-سختی در کامپوزیت مسلح به الیاف غیر ممتد با توزیع تصادفی لازم است حالت پایدار ترک خوردگی^۷ اتفاق افتد. معیار مقاومت و معیار انرژی دو پارامتر لازم برای دستیابی به رفتار شکل پذیر و حالت پایدار ترک خوردگی می‌باشند. در معیار مقاومتی باید حداکثر مقدار تنش پل بندی (σ_{cu}) بزرگتر از مقاومت ترک خوردگی (σ_{cs}) ماتریس باشد و شکست به صورت گسیختگی الیاف، لغزش یا بیرون کشیدگی الیاف صورت می‌گیرد [۶، ۷]. در معیار انرژی، شکل گسترش ترک با استفاده از انرژی گسترش ترک کنترل می‌گردد و برای ایجاد رفتار سخت شوندگی همواره باید رابطه (۱) برقرار باشد [۸، ۹].

$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_m} \leq \sigma_{ss} \delta_{ss} - \int_0^{\delta_{ss}} \sigma(\delta) d\delta \quad (1)$$

در رابطه ۱ J_{tip} بیانگر چقرمگی ماتریس برای محتوای کم ماتریس است، K_m (چقرمگی شکست) و E_m (مدول الاستیسیته) به طرح اختلاط کامپوزیت شامل نسبت آب به سیمان و ریزدانه حساس می‌باشد. همچنین می‌توان J_{tip} را به صورت کار خارجی انجام شده منهای انرژی تلف شده ناشی از تغییر شکل فنر غیر الاستیک در محل ترک تا مقدار δ_{ss} همانند شکل ۱ در نظر گرفت. در صورت برقرار نبودن رابطه ۱، الیاف در ناحیه ترک قادر به باربری بیشتر نبوده و این امر منجر به باز شدن ترک و از دست رفتن ظرفیت باربری ماده مرکب سیمانی و رفتار نرم شوندگی آن می‌شود [۱۰].



شکل ۱- انرژی مکمل و انرژی متناظر با سختی شکست لبه ترک [۱۱]

مواد مرکب سیمانی مسلح شده به الیاف^۱ را می‌توان در سه دسته کلی گروه بندی کرد. گروه اول، مواد مرکب با درصد کم الیاف (< ۱٪ حجم الیاف) که ترک های ناشی از جمع شدگی بتن را کاهش می‌دهد. گروه دوم شامل مواد مرکب با درصد الیاف متوسط (۲٪ < حجم الیاف < ۱٪) که سبب بهبود خواص مکانیکی شامل مدول گسیختگی، چقرمگی شکست و مقاومت در برابر ضربه می‌شود. گروه سوم موسوم به مواد مرکب سیمانی توانمند^۲ شناخته شده‌اند و دارای درصد الیاف بین ۵ تا ۲۰ می‌باشند. رفتار سخت شوندگی کششی^۳ و ظرفیت کرنش کششی تا ۱/۵ درصد از خصوصیات این گروه مواد می‌باشد [۱، ۲].

مواد مرکب سیمانی مهندسی^۴ (ECC) یک نوع خاص از HPRCC است که با قوانین ریزساختاری^۵ طراحی می‌شود. در ساخت HPRCC مقدار مقاومت از درجه اهمیت بالاتری نسبت به دوام و شکل پذیری برخوردار می‌باشد هر چند در ساخت ECC شکل پذیری از درجه اهمیت بیشتری نسبت به مقاومت برخوردار است. این کامپوزیت از سیمان، آب، الیاف با درصد حجمی کم و سنگ دانه های ریز با بزرگترین اندازه ۰/۲ میلی متر و مواد روان کننده ساخته می‌شوند که بر خلاف مواد متعارف پایه سیمانی دارای رفتار سخت شوندگی کششی بعد از اولین ترک خوردگی مانند فلزات هستند [۳، ۴].

مشخصات مواد مرکب سیمانی مسلح به الیاف به طور کلی به مشخصات ماتریس، الیاف و سطح مشترک^۶ ماتریس و الیاف بستگی دارد. خواصی نظیر مدول ارتجاعی، تخلخل، اندازه و تراکم ترک های مویی و مقاومت از پارامترهای تأثیرگذار ماتریس در رفتار ماده مرکب هستند. مدول ارتجاعی، مقاومت کششی، نسبت طول به قطر الیاف، شکل و مقدار الیاف از خواص تأثیرگذار الیاف و همچنین مقدار چسبندگی، ساز و کار چسبندگی (شیمیایی یا اصطکاکی) از مشخصات سطح مشترک، خواص تأثیرگذار بر رفتار ماده مرکب نهایی می‌باشند [۵].

بهبود و بهینه کردن خصوصیات سطح تماس بین الیاف و ماتریس مهم ترین بخش در فرایند طراحی ECC است. با وجود ترد بودن

⁵ Micromechanical

⁶ Interface

⁷ Steady State Cracking

¹ Fiber Reinforced cementitious composite (FRCC)

² High Performance FRCC (HPRCC)

³ Strain Hardening

⁴ Engineering Cementitious Composite (ECC)

اتیلن^۲ (PE) و پلی ونیل الکل (PVA) با درصدحجمی کمتر از ۲٪ به مراتب در ساخت ECC استفاده شده است [۴]. در سال‌های اخیر استفاده از الیاف پلی پروپیلن (PP) که قیمت به مراتب پایین‌تری دارند مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱۶]. خصوصیات رفتاری ماده مرکب شامل رفتار مکانیکی، انرژی شکست، خستگی، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی به عملکرد فصل مشترک و نحوه جداشدن و بیرون آمدن الیاف بستگی دارد. در صورتی که از گسیختگی الیاف جلوگیری شود، تغییر شکل‌های فراتر از حالت خطی ماده مرکب، سبب شروع گسیختگی فصل مشترک می‌شود. مقاومت و طول الیاف و همچنین مقدار چسبندگی در سطح مشترک عواملی هستند که تأثیر مستقیم بر گسیختگی الیاف دارند [۱۷]. تحقیقات زیادی بر روی اثر استفاده از افزودنی‌های معدنی مانند فوم سیلیکا^۳، خاکستر بادی^۴، پودر سنگ معدنی و خاکستر کوره آهن^۵ بر روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ECC با الیاف PVA انجام شده است [۱۸-۲۱]. اما تحقیقات در مورد اثر بخشی افزودنی‌های معدنی و اثر نوع و اندازه ریزدانه‌ها برای ECC ساخته شده از الیاف PP محدود بوده است [۲۲]. بر اساس پژوهش لی^۶ [۲۳]، خصوصیات فیزیکی اصلی ECC ساخته شده از الیاف PVA و ریزدانه سیلیسی مطابق جدول ۱ آمده است بنابراین چنانچه طرح اختلاطی شرایط جدول ۱ را برآورده سازد می‌تواند به عنوان یک نوع ECC تلقی گردد [۲۳]. از جمله معایب اصلی ECC قیمت بالای این ماده مرکب به دلیل وجود الیاف PVA-REC و ریزدانه سیلیسی است لیکن در صورت استفاده برای مرمت و تقویت در حجم کم، هزینه قابل توجه نخواهد بود. در کشورهای ژاپن، کره، استرالیا، نیوزلند و آمریکا از این مواد استفاده شده است ولی هنوز کاهش هزینه و بهینه کردن هزینه ساخت این کامپوزیت پارامتر مهمی است [۱۰]. در این پژوهش نوع جدیدی از ECC را با استفاده از مصالح در دسترس بومی، سازگار با محیط زیست و مقرون به صرفه تولید و بررسی می‌شود، بدین منظور الیاف PVA با PP که قیمت کمتری دارند جایگزین شد. همچنین به منظور کاهش هزینه اقتصادی و اثرات زیان‌بار زیست محیطی، از پودر سنگ، غبار کوره ذوب

برای دستیابی به رفتار کرنش-سختی مناسب بهتر است یک فاصله مناسب بین انرژی تکمیلی (J_b) و چقرمگی ماتریس (J_{tip}) ایجاد نمود، برای این منظور هم می‌توان چقرمگی ماتریس را کاهش داد و یا J_b را افزایش داد. کاهش J_{tip} همراه با کاهش سختی ماتریس می‌باشد که سبب کم شدن تنش متناظر اولین ترک خوردگی ماتریس شده و زیاد مطلوب نمی‌باشد و راهکار مناسب افزایش J_b می‌باشد [۱۱]. نسبت آب به سیمان، نسبت سنگ‌دانه به سیمان، اندازه سنگ‌دانه و میزان مصرف پوزولان‌ها عوامل بسیار تأثیرگذار بر مشخصات ماتریس هستند. کاهش نسبت آب به سیمان سبب افزایش مقاومت کششی و سختی شکست ماتریس می‌شود اما دست‌یابی به رفتار کرنش-سختی را دشوارتر خواهد کرد [۱۲]. سنگ‌دانه‌ها هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ اندازه و نوع نقش مهمی در خصوصیات رفتاری و دوام ECC دارند. حضور سنگ‌دانه‌هایی با اندازه بزرگتر از فاصله بین الیاف باعث گلوله شدن الیاف^۱ و اندرکنش بیشتر الیاف در خمیر بین سنگ‌دانه‌ها می‌شود. بنابراین افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها مانع توزیع و پخش شدن یکنواخت الیاف در ماتریس سیمان می‌شود. همچنین حضور سنگ‌دانه‌ها در ماتریس سیمان باعث افزایش سردرگمی مسیر شکست، چقرمگی شکست و مقاومت در برابر گسترش ترک شده و در نتیجه انرژی بیشتری برای ایجاد شکست لازم خواهد بود [۱۳]. چنانچه سنگ‌دانه‌ها به اندازه کافی ریز (در حدود ۱۱۰ میکرون و کمتر) باشند، چون چسبندگی بین سنگ‌دانه و سیمان کمتر از چسبندگی بین دانه‌های سیمان است، سبب کاهش انرژی شکست ماتریس می‌شوند. بالا رفتن تنش اصطکاکی و در نتیجه افزایش احتمال آسیب دیدن الیاف بر اثر سایش و خراشیده شدن توسط ماتریس و همچنین ایجاد تخلخل قابل توجه در ماتریس از اثرات ریزدانه زیاد در ماتریس می‌باشند [۱۴].

محاسبات میکرومکانیکی قطر الیاف کمتر از ۵۰ میکرومتر (μm) را برای دستیابی به شکل‌پذیری بالا با وجود درصد کم الیاف نشان داده است بنابراین الیاف پلیمری که با چنین قطری ساخته میشوند مقدم‌تر از الیاف فولادی هستند که قطر آنها بین ۱۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتر است [۱۵]. الیاف پلیمری با وزن مولکولار بالا مانند پلی

⁴ Fly Ash

⁵ Granulated Ground Blast Furnace Slag

⁶ Li

¹ Balling

² Polyethylene

³ Silica Fume

آهن (غبار) و سرباره آهن مذاب (سرباره) که ارزان تر و فرایند تولید آن‌ها سبب آزاد شدن دی‌اکسید کربن کمتری به طبیعت می‌شود استفاده شده است. اثر نوع و اندازه سنگ‌دانه‌ها و افزودنی معدنی، نسبت اختلاط و درصد الیاف مورد بررسی قرار می‌گیرد و برای هر طرح اختلاط نمونه‌های فشاری و خمشی تهیه شده و نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت یک طرح اختلاط بهینه با خواص فیزیکی و مکانیکی قابل قبول پیشنهاد می‌گردد.

۲- مطالعه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح

طرح اختلاط اولیه‌ای که توسط لی [۲۳]، برای ECC گزارش شده است شامل سیمان، آب، خاکستر بادی، ماسه سیلیسی، الیاف پلی‌وینیل

الکل^۱ (PVA) و فوق روان کننده است. این تحقیق با الگو گرفتن از طرح اختلاط اولیه لی به دنبال جایگزین مناسب برای الیاف، خاکستر بادی و ماسه سیلیس در طرح اختلاط ECC است. الیاف PVA به دلیل پرداخت سطحی قیمت بالایی دارند بنابراین در این مقاله از الیاف پلی‌پروپیلن^۲ (PP) با خصوصیات مطابق جدول ۲ استفاده شد. مواد ریزدانه (پودر سنگ (SP)، میکروسیلیس (Mi)، سرباره آهن مذاب (S) و غبار کوره ذوب آهن (Q)) با حداکثر اندازه ۰/۲ میلی‌متر و خصوصیات مطابق جدول ۳ برای ساخت مورد استفاده قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی اثر نوع و اندازه سنگ‌دانه‌ها، سنگ‌دانه‌های ماسه شسته در دو اندازه ۰/۳ و ۱/۱۸ میلی‌متر استفاده شده است. سیمان مصرفی از نوع تیپ یک با دانسیته ۳۱۵۰ kg/m^۳ و فوق‌روان کننده از نوع برپایه کربوهیدروکسیکات با دانسیته ۱۰۸۰ kg/m^۳ است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی اصلی ECC [23]

چگالی (g/cc)	مقاومت خمشی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش کششی نهایی (%)	مقاومت کششی نهایی (MPa)	مقاومت اولین ترک (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)
۰/۹۵-۲/۳۰	۱۰-۳۰	۱۸-۳۴	۱-۸	۴-۱۲	۳-۷	۲۰-۹۵

جدول ۲- خصوصیات الیاف PP

الیاف	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	درصد تغییر طول (%)	چگالی (Kg/m ^۳)	طول (mm)	قطر (μm)
PP	۴۸۰	۸/۸۴	۲۵	۹۱۰	۱۲	۱۲

جدول ۳- خصوصیات شیمیایی سیمان، میکروسیلیس، پودر سنگ، سرباره و غبار

مصالح	سیمان (C)	میکروسیلیس (Mi)	پودر سنگ (SP)	سرباره (S)	غبار (Q)
% اجزا شیمیایی					
SiO ₂	۱۸/۱۱	۹۲/۲۶	۰/۳	۱۸/۰۴	۶/۶
Al ₂ O ₃	۴/۴۲	۰/۸۹	۰/۱	۳/۱۸	۰/۳
Fe ₂ O ₃	۳/۰۹	۱/۹۷	۰/۱	۲۷/۵۲	۳۲/۱
CaO	۶/۳۴	۰/۴۹	-	۳۲/۹۷	۱۵/۱
MgO	۱/۳۱	۰/۹۶	۰/۲	۹/۱۳	۴/۸
Na ₂ O	۰/۴۱	۰/۴۲	-	۰/۷	۴
K ₂ O	۰/۷۹	۱/۳۱	-	۰/۳۸	۳
So ₃	۳/۵۴	۰/۳۳	-	۰/۱۸	۴
CaCo ₃	-	-	۹۸/۸	-	-
چگالی (Kg/m ^۳)	۳۱۵۰	۲۵۰۰	۲۷۰۰	۲۱۷۰	۲۸۵۰

² Polypropylene (PP)

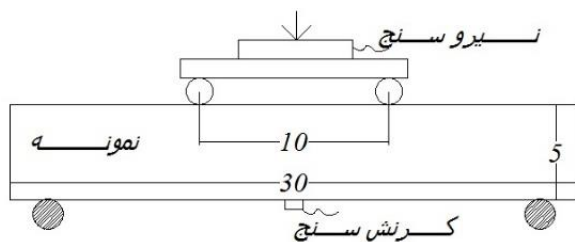
¹ Polyvinyl Alcohol (PVA)

۲-۲- اختلاط مصالح

اضافه می‌گردد، سپس کل مخلوط به مدت ۳ دقیقه با دور تند اختلاط و ماده مرکب لزوج خودمترکم حاصل شد.

به منظور بررسی اثر نوع و اندازه سنگ‌دانه‌ها و افزودنی معدنی، نسبت اجزا و تأثیر درصد الیاف، ۱۲ طرح اختلاط بررسی شد. طرح اختلاط‌ها در سه گروه مورد بررسی قرار گرفت. در گروه اول چهار افزودنی معدنی شامل پودرسنگ، میکروسیلیس، سرباره و غبار به‌عنوان جایگزین خاکستر بادی بررسی شد. با نتایج بدست آمده از گروه اول و انتخاب افزودنی مناسب، در گروه دوم اثر نوع و اندازه ریزدانه‌های به‌عنوان جایگزین ماسه سیلیس بر خصوصیات مکانیکی ECC بررسی شد. درصد الیاف برای گروه یک و دو ۱/۵ درصد در نظر گرفته شده است. در نهایت در گروه سوم اثر درصد الیاف PP بر رفتار ECC بررسی شد. مقاومت خمشی و فشاری و همچنین ظرفیت ترک‌خوردگی متعدد طرح اختلاط‌ها مورد بحث قرار گرفت. در جدول ۴ طرح اختلاط‌های مورد بررسی بر حسب وزن سیمان آمده است. به منظور ترکیب مصالح ابتدا مواد سیمانی و ریزدانه به صورت خشک با هم ترکیب شد تا کاملاً با یکدیگر مخلوط شوند سپس فوق‌روان‌کننده همراه با ۹۰ درصد آب به مخلوط اضافه می‌شود، پس از دستیابی به یک مخلوط همگن، الیافی که به وسیله فشار باد از هم جدا شده و فرآوری شده است به تدریج به مخلوط اضافه شده و مابقی آب

۲-۳- ارزیابی مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها
به منظور بررسی خواص مکانیکی ماده مرکب ساخته شده از هر طرح اختلاط، آزمایش فشار و خمش انجام شد. برای ارزیابی مقاومت فشاری از هر طرح اختلاط، مطابق ASTM سه نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر تهیه شد و پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه در حوضچه آب سرد، تحت آزمایش فشاری قرار گرفتند. همچنین مطابق با استاندارد ASTM C78، برای آزمایش خمش چهار نقطه‌ای، سه نمونه منشوری با ابعاد ۵۰×۱۰۰×۳۰۰ میلی‌متر تهیه و پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه در حوضچه آب تحت آزمایش خمش مطابق شکل ۲ قرار گرفتند. اندازه‌ها در شکل ۲ بر حسب سانتی‌متر است.



شکل ۲- آزمایش خمش چهار نقطه‌ای (ابعاد بر حسب سانتیمتر)

جدول ۴- نسبت اجزا ECC

شناسه	گروه	توضیحات	الیاف PP	سیمان	آب	ماسه سیلیس	ماسه شسته	میکرو سیلیس	پودر سنگ	غبار	سرباره	فوق روان کننده
M1		پودر سنگ بجای خاکستر بادی		۱	۰/۷۳	۰/۸	۰	۰	۱/۲	۰	۰	۰/۰۱۴
M2	گروه اول	میکروسیلیس بجای خاکستر بادی	۱/۵٪	۱	۰/۷۳	۰/۸	۰	۱/۲	۰	۰	۰	۰/۰۲۲
M3		سرباره بجای خاکستر بادی		۱	۰/۷۳	۰/۸	۰	۰	۰	۱/۲	۰	۰/۰۲۲
M4		غبار بجای خاکستر بادی		۱	۰/۷۳	۰/۸	۰	۰	۰	۱/۲	۰	۰/۰۴
M5		شسته ۰/۳ م.م بجای سیلیس با سرباره		۱	۰/۷۳	۰/۸	۰	۰/۱	۰	۰	۱/۲	۰/۰۱
M6		شسته ۱/۱۸ م.م بجای سیلیس با سرباره		۱	۰/۶	۰/۸	۰	۰/۱	۰	۰	۱/۲	۰/۰۱
M7	گروه دوم	پودر سنگ بجای سیلیس با سرباره	۱/۵٪	۱	۰/۷۳	۰	۰	۰/۱	۰/۸	۰	۱/۲	۰/۰۲۲
M8		پودر سنگ بجای سیلیس با غبار		۱	۰/۷۳	۰	۰	۰/۱	۰/۸	۱/۲	۰	۰/۰۳۲
M9		پودر سنگ بجای سیلیس با غبار		۱	۰/۹	۰	۰	۱	۱/۲	۰/۶	۰	۰/۰۳۳
M10		پودر سنگ بجای سیلیس با غبار		۱	۰/۹	۰	۰	۰/۵	۱/۲	۰/۳	۰	۰/۰۳
M11	گروه سوم	درصد الیاف ۱										طرح اختلاط M10 با درصد الیاف ۱
M12		درصد الیاف ۰/۵										طرح اختلاط M10 با درصد الیاف ۰/۵

۳- بحث و نتایج آزمایش‌ها

۳-۱- گروه اول: اثر افزودنی‌های معدنی

خاکستر بادی با وجود دارا بودن مقاومت خمشی مناسب ماتریس سبب کاهش سختی و مدول الاستیسیته ماتریس شده است و جابجایی خمشی را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است. مطابق شکل ۴ در هر دو نمونه ریزترک‌ها شکل گرفته است ولی توسعه و گسترش ریزترک‌ها در نمونه M4 بیشتر است.



M1



M2



M3

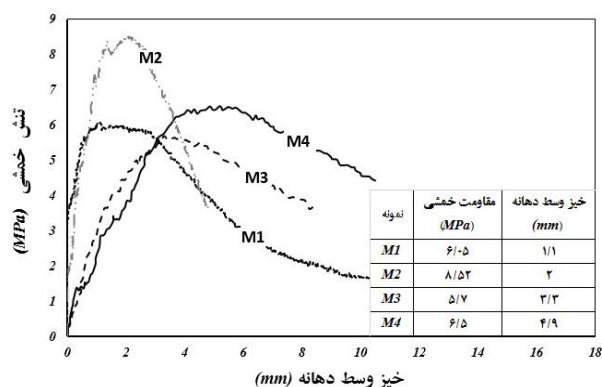


M4

شکل ۴- گسترش و توزیع ترک خوردگی ماده مرکب به ازای مواد افزودنی مختلف

در شکل ۵ مقاومت فشاری به ازای مواد افزودنی مختلف آمده است. مشاهده می‌گردد میکروسیلیس به سبب خاصیت پوزلانی سبب افزایش مقاومت فشاری شده است. همچنین اندازه بزرگتر ذرات پودر سنگ در مقایسه با سایر مواد سبب افزایش مقاومت فشاری شده است. سرباره و غبار با وجود دارا بودن SiO_2 و CaO در ساختار خود و پتانسیل خاصیت پوزلانی مقاومت فشاری پایینی را ایجاد کرده‌اند. در ECC شکل پذیری از درجه اهمیت بیشتری

به منظور بررسی اثر جایگزینی افزودنی‌های معدنی بجای خاکستر بادی، در این قسمت چهار طرح اختلاط با افزودنی معدنی شامل پودر سنگ، میکروسیلیس، سرباره و غبار به‌عنوان جایگزین خاکستر بادی بررسی شد. خصوصیات شیمیایی و طرح اختلاط نمونه‌ها در جدول ۳ و ۴ آورده شده است. نمونه‌های ساخته شده پس از عمل آوری ۲۸ روزه تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای و آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. در شکل ۳ نمودار تنش - جابجایی وسط دهانه نمونه‌ها تحت خمش و در شکل ۴ توزیع ترک خوردگی نمونه‌ها نشان داده شده است. در شکل ۳ بیشترین تنش خمشی به‌عنوان مقاومت خمشی^۱ و جابجایی متناظر با آن به‌عنوان جابجایی خمشی آمده است

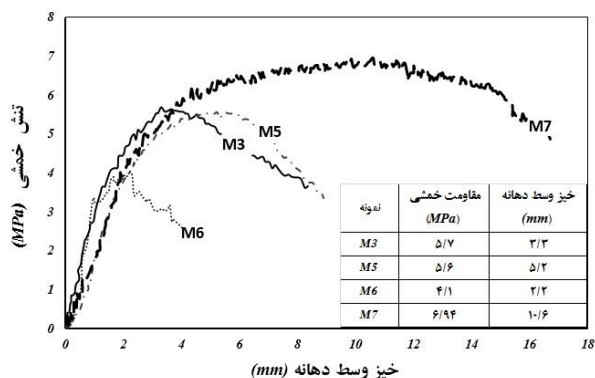


شکل ۳- نمودار تنش - تغییر مکان وسط دهانه نمونه خمشی به ازای مواد افزودنی مختلف

مقاومت خمشی نمونه‌ها M1، M2، M3 و M4 به ترتیب ۶/۰۵، ۸/۵۲، ۵/۱۷ و ۶/۱۵ مگاپاسکال با جابجایی وسط دهانه ۱/۱، ۳، ۳/۳ و ۴/۹ میلی‌متر به ترتیب به دست آمد. مشاهده می‌گردد که افزودن پودر سنگ معدنی و میکروسیلیس در نمونه‌های M1 و M2، سبب افزایش سختی و مدول الاستیسیته ماتریس شده است و پودر سنگ به سبب اینکه دارای اندازه بزرگتری از ذرات میکروسیلیس هستند سختی بیشتری در ماتریس ایجاد کرده است. همان‌گونه که در شکل ۴ آمده است در نمونه M1 و M2 ریزترک‌ها شکل نگرفته است و توسعه ترک اولیه سبب شکست نمونه شده است. افزودن سرباره و غبار در نمونه‌های M3 و M4 به‌عنوان جایگزین

¹ Flexural Strength

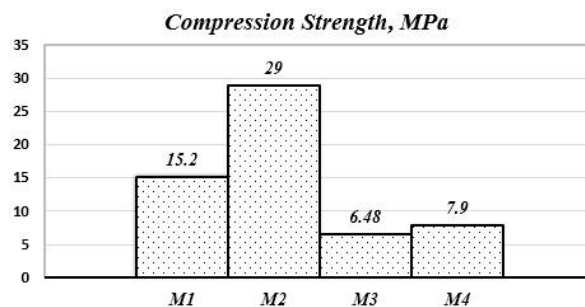
سیلیس با ماسه شسته با اندازه ذرات یکسان مقدار مقاومت خمشی تقریباً ثابت ماند ولی جابجایی خمشی با افزایش ۵۸ درصدی از ۳/۳ به ۵/۲ میلی متر سوق پیدا کرد. از سوی دیگر با جایگزینی ماسه سیلیس با پودر سنگ معدنی با اندازه ذرات یکسان، مقدار مقاومت خمشی ۲۲ درصد و جابجایی خمشی ۲۲۱ درصد به ترتیب از ۵/۷ به ۶/۹۴ مگاپاسکال و ۳/۳ به ۱۰/۶ میلی متر افزایش پیدا کرد.



شکل ۶- نمودار تنش - تغییر مکان وسط دهانه نمونه خمشی به ازای ریزدانه مختلف

همچنین افزایش اندازه ذرات ماسه شسته از ۰/۳ به ۱/۱۸ میلی متر سبب کاهش مقاومت خمشی و جابجایی خمشی شد. در شکل ۷ توسعه و توزیع ترک خوردگی نمونه‌ها آمده است. مشاهده می‌گردد که افزایش اندازه ریزدانه‌ها به دلیل افزایش سختی ماتریس و تغییر مسیر حرکت ترک، پتانسیل شکل‌گیری ریزترک‌ها را ندارد و نمونه با گسترش یک ترک دچار شکست شده است. با جایگزینی ماسه سیلیس با ماسه شسته و پودر سنگ معدنی با اندازه ذرات یکسان به سبب کاهش سختی و مدول الاستیسیته ماتریس، توسعه و شکل‌گیری ریزترک‌ها تسهیل شد و حالت ترک خوردگی پایدار اتفاق افتاده است. بنابراین مطابق با نمودار شکل ۶ مشاهده می‌گردد هر چقدر توسعه ریزترک‌ها بیشتر باشد رفتار شکل‌پذیر و سخت‌شوندگی بیشتری در ماده مرکب اتفاق خواهد افتاد. در حالت جایگزینی ماسه سیلیس با پودر سنگ معدنی ظرفیت ایجاد ریزترک‌ها و توسعه حالت ترک خوردگی پایدار بشدت افزایش یافت و رفتار ماده مرکب بسیار شبیه ECC شد. مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل ۸ آمده است. بیشترین مقاومت فشاری مربوط به طرح M6 با اندازه ذرات ۱/۱۸ میلی متر

نسبت به مقاومت برخوردار است و بر اساس معیار انرژی شکست هر چقدر مقدار سختی ماتریس کمتر باشد حالت ترک خوردگی پایدار که لازمه رفتار سخت‌شوندگی ECC است رخ خواهد داد بنابراین مطابق نتایج بدست آمده سرباره و غبار به دلیل ایجاد پتانسیل جابجایی خمشی بالا و توسعه ریزترک‌ها در ساختار ماتریس می‌توانند جایگزین مناسبی برای خاکستر بادی در طرح اختلاط ECC باشند.



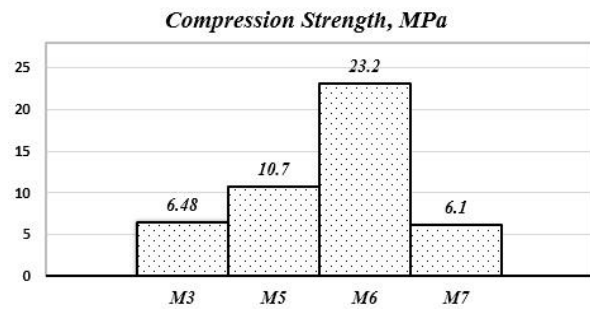
شکل ۵- مقاومت فشاری ماده مرکب به ازای مواد افزودنی مختلف

۲-۳- گروه دوم: اثر اندازه و نوع سنگ‌دانه در ECC

بر اساس نتایج بدست آمده از قسمت پیشین مشاهده شد استفاده از سرباره و غبار بجای خاکستر بادی در طرح اختلاط اولیه‌ای که توسط لی^۱ [۲۳]، برای ECC گزارش شده است پتانسیل ایجاد رفتار سخت‌شوندگی و توزیع ریزترک‌ها که از مشخصه اصلی ECC است را دارا هستند. همچنین به منظور بالابردن مقاومت فشاری نمونه‌ها، میکروسیلیس با نسبت ۱۰ درصد جرمی سیمان در تمامی طرح اختلاط‌ها در نظر گرفته شد. در این قسمت به منظور بررسی اثر اندازه و نوع ریزدانه در ساختار ECC، ۵ طرح اختلاط مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا چهار ریزدانه از نوع ماسه سیلیس (طرح M3)، ماسه شسته با دو اندازه ۰/۳ میلی متر (طرح M5) و ۱/۱۸ میلی متر (طرح M6) و پودر سنگ (طرح M7) با استفاده از سرباره بررسی شد. در شکل ۶ نمودار تنش - جابجایی وسط دهانه نمونه‌ها تحت خمش نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که ریزدانه‌های سیلیس سختی و مدول الاستیسیته بیشتری نسبت به پودر سنگ و ماسه شسته ۰/۳ میلی متری در ماتریس ایجاد کرده‌اند ولی مقاومت خمشی و جابجایی وسط دهانه کمتری در مقایسه با دو ریزدانه دیگر ایجاد شده است. با جایگزینی ماسه

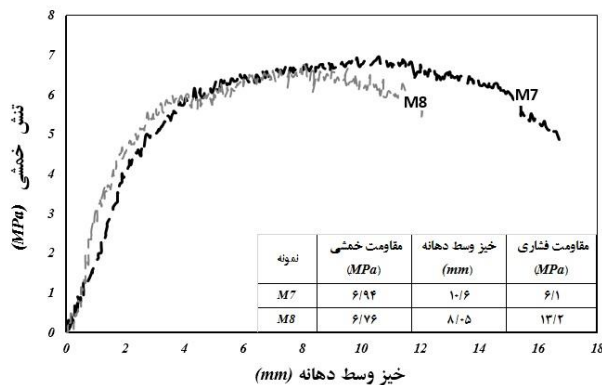
¹ Li

گزارش شد. برخلاف رفتار شکل پذیر و سخت شونده طرح M7، کمترین مقاومت فشاری برای این طرح حاصل شد که استفاده از این مواد را برای المان‌های سازه‌ای غیرممکن می‌سازد و یک نقص اصلی برای طرح اختلاط به حساب می‌آید.



شکل ۸- مقاومت فشاری ماده مرکب به ازای ریزدانه مختلف

بر اساس نمودار تنش - جابجایی وسط دهانه نشان داده شده در شکل ۹ مشاهده گردید که غبار سبب افزایش سختی و مدول الاستیسیته ماتریس می‌شود. مقاومت فشاری از ۶/۱ به ۱۳/۲ مگاپاسکال افزایش یافت ولی مقاومت خمشی از ۶/۹۴ به ۶/۷۶ مگاپاسکال و جابجایی خمشی از ۱۰/۶ به ۸/۰۵ میلی‌متر کاهش یافت. با وجود کاهش ۲/۶ درصدی مقاومت خمشی و ۲۴ درصدی جابجایی خمشی طرح M8 در مقایسه با طرح M7، مقاومت فشاری ۱۱۶ درصد افزایش یافت و همچنین مشاهده روند نمودار تنش - جابجایی و گسترش و توسعه ریزترک‌ها نشان داده شده در شکل ۱۰، پتانسیل بالا غبار برای ایجاد رفتار شکل پذیر و سخت شونده ماده مرکب را نشان می‌دهد. بنابراین به دلیل افزایش مقاومت فشاری و توسعه ریزترک‌های بیشتر، غبار به عنوان جایگزین مناسبتری برای خاکستر بادی در طرح اختلاط ECC در نظر گرفته شد و در ادامه به منظور بهبود رفتار فشاری طرح اختلاط به بررسی نسبت اجزا تشکیل دهنده ECC پرداخته می‌شود.



شکل ۹- نمودار تنش - تغییر مکان وسط دهانه نمونه خمشی به ازای غبار و سربراره



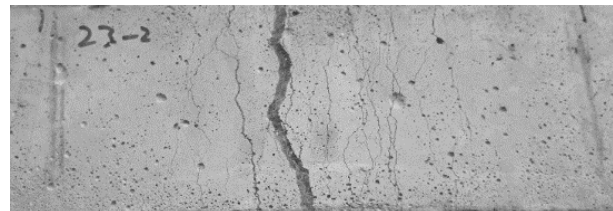
M3



M5



M6



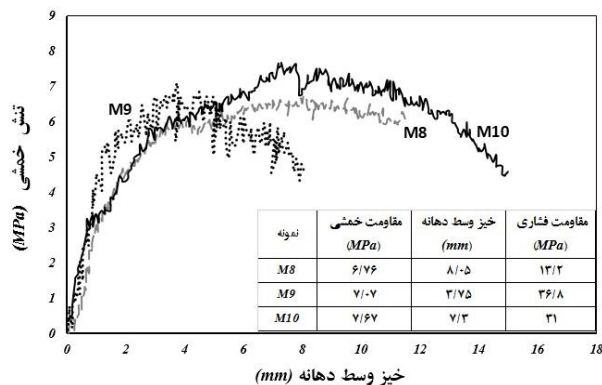
M7

شکل ۷- گسترش و توزیع ترک خوردگی ماده مرکب به ازای ریزدانه مختلف

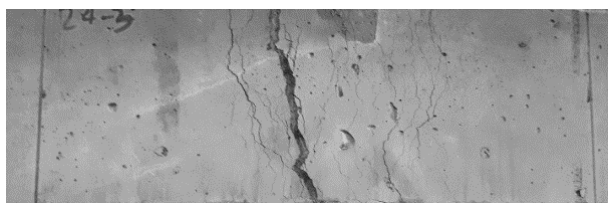
۳-۳- گروه دوم: مقایسه عملکرد سربراره آهن مذاب و غبار کوره ذوب آهن و نسبت اجزا تشکیل دهنده ECC نتایج به دست آمده در قسمت‌های پیشین نشان داد که با جایگزینی ماسه سیلیس با پودر سنگ و خاکستر بادی با سربراره و غبار رفتار ماده مرکب به سمت رفتار شکل پذیر مشابه ECC سوق پیدا می‌کند اما مقاومت فشاری پایین نمونه‌های شکل پذیر نقص اصلی طرح‌های پیشین است.

در این قسمت به منظور مقایسه عملکرد سربراره و غبار بر رفتار ECC یک طرح با همان نسبت‌های طرح M7 و تنها جایگزینی

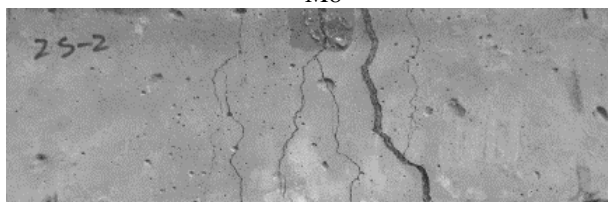
نسبت سیمان به مواد سیمانی مطابق شکل ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌گردد که توسعه ریز ترک‌های متعدد و برقراری حالت ترک خوردگی پایدار سبب ایجاد رفتار شکل‌پذیر و سخت‌شونده ماده مرکب ساخته شده بر اساس طرح M10 شده است. مقاومت خمشی ۷/۶۷ مگاپاسکال، جابجایی خمشی ۷/۳ میلی‌متر و مقاومت فشاری ۳۱ مگاپاسکال ظرفیت قابل قبولی برای طرح M10 ایجاد نموده است که بتوان از آن به عنوان ECC نام برد.



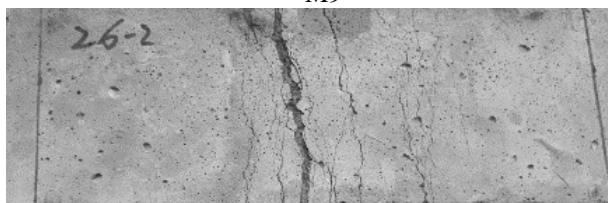
شکل ۱۱- نمودار تنش - تغییر مکان وسط دهانه نمونه خمشی به ازای نسبت اجزا مختلف



M8



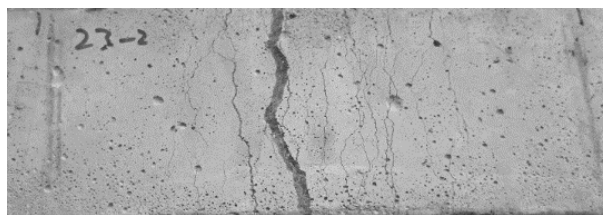
M9



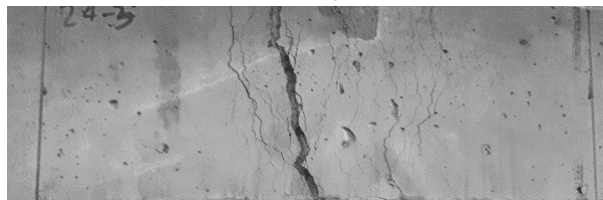
M10

شکل ۱۲- گسترش و توزیع ترک خوردگی ماده مرکب به ازای نسبت اجزا مختلف

۴-۳- گروه سوم: مقایسه درصد الیاف بر عملکرد ECC برای دستیابی به رفتار شکل‌پذیر و حالت پایدار ترک خوردگی



M7

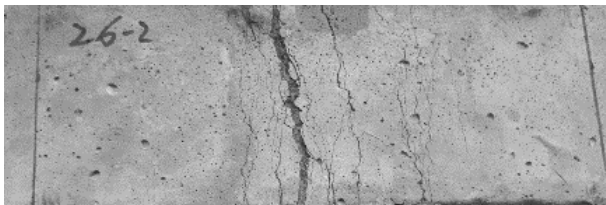


M8

شکل ۱۰- گسترش و توزیع ترک خوردگی ماده مرکب به ازای غبار و سرباره

نتایج بخش‌های پیشین نشان داد که حضور میکروسیلیس و پودر سنگ معدنی در طرح اختلاط ماده مرکب مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد و حضور غبار سبب کاهش مقاومت فشاری می‌شود. بنابراین در این بخش با ثابت نگه داشتن نسبت آب به مواد سیمانی (شامل سیمان، میکروسیلیس و غبار) در محدوده ۰/۳، طرح M9 با افزایش ۵۰ درصدی مقدار پودر سنگ و کاهش ۵۰ درصدی غبار ساخته شد. نمودار تنش - جابجایی وسط دهانه و نتایج آزمایش فشاری نمونه‌ها در شکل ۱۱ آمده است. مشاهده می‌گردد که در طرح M9 مقاومت فشاری از ۱۳/۲ مربوط به طرح M8 به ۳۶/۸ مگاپاسکال و مقاومت خمشی از ۶/۷۶ به ۷/۰۷ مگاپاسکال افزایش یافت اما جابجایی خمشی از ۸/۰۵ مربوط به طرح M8 به ۳/۷۵ میلی‌متر کاهش یافت. بنابراین در طرح M9 افزایش ۱۷۸ درصدی مقاومت فشاری و ۴/۶ درصدی مقاومت خمشی در راستای بهبود خواص مکانیکی ماده مرکب است ولی کاهش ۱۱۵ درصدی جابجایی خمشی سبب کاهش شکل‌پذیری و سخت‌شوندگی ماده مرکب شده است. همچنین مشاهده توزیع ترک خوردگی و تشکیل ریز ترک‌ها در شکل ۱۲ بیانگر دور شدن طرح M9 از رفتار شکل‌پذیر و سخت‌شونده مورد انتظار از ECC است. مطابق نتایج بخش‌های پیشین مشاهده گردید که افزایش مقدار میکروسیلیس سختی ماتریس را افزایش می‌دهد و مانع از توسعه حالت ترک خوردگی پایدار می‌شود، بنابراین در طرح M10 با ثابت نگه داشتن مقدار آب و پودر سنگ معدنی، نسبت سیمان به میکروسیلیس و غبار دو برابر طرح M9 در نظر گرفته شد. با کاهش مقدار میکروسیلیس و غبار یا به سخن دیگر افزایش

روند نمودار تنش - جابجایی و همچنین توزیع و توسعه ترک خوردگی نشان داده شده در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که برای دست‌یابی به یک رفتار شکل‌پذیر و سخت‌شونده توسعه ریزترک‌ها انکار ناپذیر است و گسترش آن وابسته به مقدار الیاف است بطوریکه در نمونه‌های با درصد الیاف کمتر از ۱/۵، نمونه‌ها بدون شکل‌گیری ریزترک‌های متعدد و الیاف در زمان پل‌زدن روی ترک به جای بیرون آمدن تمایل به گسیخته شدن دارند. (گسیخته شدن الیاف سبب کاهش شکل-پذیری می‌شود) و همچنین نمودار تنش - جابجایی از سطح زیر نمودار کمتری برخوردار است. در درصد الیاف ۱/۵ لغزش الیاف درون ماتریس همراه با رفتار لغزش-سختی است و همین امر سبب توسعه ریزترک‌ها و سبب ایجاد شکل‌پذیری بالا می‌گردد.



M10



M11

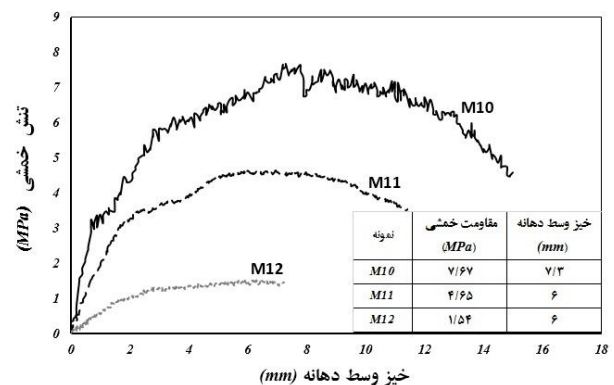


M12

شکل ۱۴- گسترش و توزیع ترک خوردگی ماده مرکب به ازای درصد الیاف مختلف

به منظور بررسی مقاومت ترک‌خوردگی نمونه‌ها، از آزمون کششی نمونه‌های هشتی شکل^۱ که در AASHTO T132 شرح داده شده است، استفاده شد. نتایج مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در شکل ۱۵ آمده است. برای درصدهای کمتر از ۱، افزایش الیاف سبب افزایش مقاومت فشاری شده است ولی افزایش بیشتر از مقدار ۱ درصد الیاف به دلیل افزایش زمان اختلاط برای

بر اساس معیار انرژی لازم است مقدار انرژی تکمیلی (J_b) افزایش یابد. مقدار الیاف و خصوصیات ماتریس از عوامل تاثیرگذار بر J_b هستند بنابراین الیاف و ماتریسی که بتواند انرژی تکمیلی را افزایش دهند یک طراحی مناسب برای ECC هستند. در بخش‌های پیشین نقش ریزدانه‌ها و مواد افزودنی بررسی شد و نهایتاً طرح M10 مورد پذیرش قرار گرفت. با توجه به اهمیت مقدار الیاف بر رفتار ECC و همچنین مشکلاتی مانند صعوبت در ساخت و بتن‌ریزی و نگرانی از توزیع مناسب الیاف، در این بخش به بررسی درصد الیاف PP بر رفتار ECC پرداخته می‌شود. بدین منظور سه طرح اختلاط M10، M11، M12 که به ترتیب دارای ۱/۵، ۱ و ۰/۵ درصد حجمی الیاف PP هستند مورد بررسی قرار گرفت. در زمان ساخت نمونه‌ها مشاهده گردید که درصدهای بالاتر الیاف سبب پدیده گلوله شدن و توزیع نامناسب الیاف می‌شود بنابراین بیشترین درصد الیاف ۱/۵ در نظر گرفته شد. در شکل ۱۳ نمودار تنش - جابجایی وسط دهانه نمونه‌ها تحت خمش نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که افزایش مقدار الیاف با کنترل ترک‌خوردگی از طریق پل‌زدن روی ترک‌ها و جلوگیری از افزایش عرض ترک و انتقال تنش از ماتریس به الیاف سبب افزایش مقدار سختی ماتریس، مقاومت خمشی و جابجایی خمشی شده است. بطوریکه با افزایش درصد الیاف از ۰/۵ به ۱ مقدار مقاومت خمشی با افزایش ۲۰۲ درصد از ۱/۵۴ به ۴/۶۵ مگاپاسکال و جابجایی خمشی یکسان ۶ میلی‌متر می‌رسد. همچنین با افزایش درصد الیاف از ۱ به ۱/۵ مقدار مقاومت خمشی با افزایش ۶۵ درصد از ۴/۶۵ به ۷/۶۷ مگاپاسکال و جابجایی خمشی با افزایش ۲۱/۷ درصدی از ۶ به ۷/۳ میلی‌متر می‌رسد.



شکل ۱۳- نمودار تنش خمشی و تغییر مکان وسط دهانه به ازای درصد الیاف مختلف

¹ Briquette Tension Test

مکانیکی طرح M10 در محدوده اعداد جدول ۱ قرار دارد، بنابراین طرح M10 را می‌توان به‌عنوان یک نوع جدید ECC معرفی نمود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌صورت آزمایشگاهی در گام اول اثر چهار افزودنی‌ها معدنی شامل پودر سنگ، میکروسلیس، سرباره آهن مذاب و غبار کوره ذوب آهن به‌عنوان جایگزین خاکستر بادی در طرح اختلاط ECC بررسی شد و در گام دوم با توجه به نتایج به‌دست آمده از گام اول، اثر اندازه و نوع سنگ‌دانه بر رفتار ECC بررسی شد و نهایتاً یک طرح اختلاط بهینه به‌دست آمد. در گام سوم اثر مقدار الیاف بر رفتار ماده مرکب به‌دست آمده بررسی شد. در نمونه‌ها مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، جابجایی وسط دهانه نمونه خمشی و توزیع و توسعه ریزترک‌ها بررسی گردید. بر اساس آزمایش‌ها، نتایج زیر حاصل گردید:

- سرباره آهن مذاب و غبار کوره ذوب آهن به‌دلیل ایجاد پتانسیل جابجایی خمشی بالا و توسعه ریزترک‌ها در ساختار ماتریس، جایگزین مناسبی برای خاکستر بادی در طرح اختلاط ECC هستند.

- ریزدانه‌های سلیس سختی و مدول الاستیسیته بیشتری نسبت به پودر سنگ و ماسه شسته با اندازه ذرات یکسان در ماتریس ایجاد می‌کنند ولی مقاومت خمشی و جابجایی خمشی کمتری به نسبت دو ریزدانه دیگر ایجاد می‌شود به‌طوری‌که با جایگزینی ماسه سلیس با ماسه شسته جابجایی وسط دهانه نمونه خمشی ۵۸ درصد افزایش و با جایگزینی ماسه سلیس با پودر سنگ معدنی جابجایی وسط دهانه نمونه خمشی ۲۲۱ درصد پیدا می‌کند.

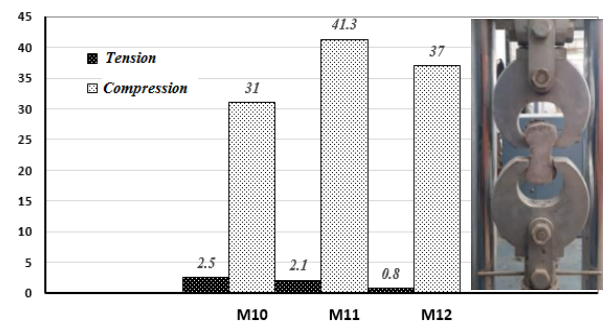
- افزایش اندازه ریزدانه‌ها به دلیل افزایش سختی ماتریس و تغییر مسیر حرکت ترک، پتانسیل شکل‌گیری و توسعه ریزترک‌ها را ندارد و سبب کاهش مقاومت خمشی و جابجایی وسط دهانه نمونه خمشی ماده مرکب می‌شود.

- نسبت اجزا در طرح اختلاط ECC بر رفتار ماده مرکب تأثیر می‌گذارد. و در نسبت سیمان به مواد سیمانی برابر ۱/۲۵ بهترین عملکرد برای ECC به‌دست می‌آید.

- افزایش مقدار الیاف با کنترل ترک‌خوردگی از طریق پل زدن

توزیع الیاف و ایجاد هوای اضافه بیشتر در ماتریس سبب کاهش ۲۵ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است.

Compression and Tension Strength, MPa



شکل ۱۵- مقاومت فشاری و کششی ماده مرکب به ازای درصد الیاف مختلف

با وجود کاهش مقاومت طرح M10 با افزایش مقدار الیاف طرح M11، کماکان مقاومت بدست آمده مقدار قابل قبولی برای استفاده در المان‌های سازه‌ای می‌باشد. همچنین مشاهده می‌گردد که افزودن الیاف سبب افزایش مقاومت ترک‌خوردگی شده است و مقاومت ۰/۸، ۲/۱ و ۲/۵ مگاپاسکال برای نمونه‌های M12، M11 و M10 به ترتیب حاصل شد. با افزایش مقدار درصد الیاف، نسبت مقاومت کششی به فشاری برای طرح M11، M12، M10 و به ترتیب ۲، ۵ و ۸ درصد بدست می‌آید. مشاهده می‌گردد که الیاف و خصوصیات سطحی^۱ آن پارامتر اصلی در کنترل نوع ترک‌خوردگی است و حجم الیاف سبب افزایش انرژی تکمیلی منحنی $\sigma(\delta)$ می‌شود، بنابراین می‌توان یک حجم بحرانی (V_f^{crit}) تعریف نمود که بالاتر از آن رفتار سخت‌شوندگی کششی اتفاق افتد. بر اساس نتایج بدست آمده می‌توان حجم بحرانی را برای الیاف PP در این تحقیق برابر ۱/۵ درصد حجمی در نظر گرفت.

بررسی ۱۲ طرح اختلاط معرفی شده مطابق جدول ۴ نشان داد که طرح M10 با مقاومت فشاری، خمشی و ترک‌خوردگی برابر ۳۱، ۷/۶۷ و ۲/۵۰ مگاپاسکال به ترتیب، دارای شکل‌پذیری مناسب مطابق شکل ۱۳ و ظرفیت ترک‌خوردگی متعدد مطابق شکل ۱۴ است. همچنین چگالی برابر ۱۷۴۷ کیلوگرم بر مترمکعب برای طرح اختلاط M10 اندازه‌گیری شد. در مقایسه با پژوهش لی [۲۳] و جدول ۱ مشاهده می‌گردد که خصوصیات فیزیکی و

¹ Interface properties

structural engineering-the design of cementitious composites for civil engineering applications." (1993).

[10] Deng, Mingke, and Shuo Yang. "Cyclic testing of unreinforced masonry walls retrofitted with engineered cementitious composites." *Construction and Building Materials* 177 (2018): 395-408.

[11] Li, Victor C., H. Stang, and H. Krenchel. "Micromechanics of crack bridging in fibre-reinforced concrete." *Materials and structures* 26, no. 8 (1993): 486-494.

[12] Li, V. C., Mishra, D. K., & Wu, H. C. (1995). Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites. *Materials and Structures*, 23(11), 536-595.

[13] Sahmaran, Mustafa, Mohamed Lachemi, Khandaker MA Hossain, Ravi Ranade, and Victor C. Li. "Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites." *ACI Materials Journal* 106, no. 3 (2009): 308.

[14] Li, Victor C., Shuxin Wang, and Cynthia Wu. "Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)." *Materials Journal* 98, no. 6 (2001): 483-492.

[15] Said, Shwan H., and Hashim Abdul Razak. "Structural behavior of RC engineered cementitious composite (ECC) exterior beam-column joints under reversed cyclic loading." *Construction and Building Materials* 107 (2016): 226-234.

[16] Felekoglu, Burak, Kamile Tosun-Felekoglu, Ravi Ranade, Qian Zhang, and Victor C. Li. "Influence of matrix flowability, fiber mixing procedure, and curing conditions on the mechanical performance of HTPP-ECC." *Composites Part B: Engineering* 60 (2014): 359-370.

[17] Li, Victor C., and Henrik Stang. "Interface property characterization and strengthening mechanisms in fiber reinforced cement-based composites." *Advanced cement-based materials* 6, no. 1 (1997): 1-20.

[18] Kim, Jin-Keun, Jeong-Su Kim, Gee Joo Ha, and Yun Yong Kim. "Tensile and fiber dispersion performance of ECC (engineered cementitious composites) produced with ground granulated blast furnace slag." *Cement and concrete research* 37, no. 7 (2007): 1096-1105.

[19] Zhou, Jian, Shunzhi Qian, M. Guadalupe Sierra Beltran, Guang Ye, Klaas van Breugel, and Victor C. Li. "Development of engineered cementitious composites with limestone powder and blast furnace slag." *Materials and structures* 43, no. 6 (2010): 803-814.

[20] Altwair, Nurdeen M., MA Megat Johari, and SF Saiyid Hashim. "Flexural performance of green

روی ترک‌ها و جلوگیری از افزایش عرض ترک و انتقال تنش از ماتریس به الیاف سبب افزایش مقدار سختی، مقاومت خمشی و جابجایی وسط دهانه نمونه خمشی ECC می‌شود. بطوریکه با افزایش درصد الیاف از ۱ به ۱/۵ مقدار مقاومت خمشی ۶۵ درصد و جابجایی وسط دهانه نمونه خمشی ۲۱/۷ درصد افزایش می‌یابد. - گسترش و توسعه ریزترک‌ها متعدد وابسته به مقدار الیاف است و برای هر طرح اختلاط یک درصد الیاف بحرانی وجود دارد که پس از آن رفتار شکل‌پذیر رخ می‌دهد. درصد بهینه الیاف PP برای شروع رفتار سخت‌شوندگی مقدار ۱/۵ درصد بدست آمد. - استفاده از الیاف کوتاه PP همراه با طرح اختلاط مهندسی از پودر سنگ معدنی و میکروسلیس و غبار کوره آهن سبب تولید ماده مرکب سیمانی (ECC) با خصوصیات سخت‌شوندگی و جذب انرژی بالایی می‌شود.

۵- مراجع

[1] Batson, G., E. Jenkins, and R. Spatney. "Steel fibers as shear reinforcement in beams." In *Journal Proceedings*, vol. 69, no. 10, pp. 640-644. 1972.

[2] Stang, Henrik, Victor C. Li, and Herbert Krenchel. "Design and structural applications of stress-crack width relations in fibre reinforced concrete." *Materials and Structures* 28, no. 4 (1995): 210-219.

[3] Li, V. C. "Engineered cementitious composites-tailored composites through micromechanical modeling, *Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future*, Canadian Society of Civil Engineers, 1997, edited by N. Banthia, A. Bentur, and A. Mufti: 38.

[4] Li, Victor C., Shuxin Wang, and Cynthia Wu. "Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)." *Materials Journal* 98, no. 6 (2001): 483-492.

[5] Li, Victor C. "Engineered cementitious composites (ECC) material, structural, and durability performance." 2008.

[6] Li, Victor C., and Christopher KY Leung. "Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites." *Journal of engineering mechanics* 118, no. 11 (1992): 2246-2264.

[7] Li, Victor C., and Hwai-Chung Wu. "Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites." (1992): 390-398.

[8] Li, Victor C. "Performance driven design of fiber reinforced cementitious composites." (1992).

[9] Li, Victor C. "From micromechanics to

engineered cementitious composites containing high volume of palm oil fuel ash." *Construction and Building Materials* 37 (2012): 518-525.

[21] Keskinates, Muhammer, and Burak Felekoğlu. "The influence of mineral additive type and water/binder ratio on matrix phase rheology and multiple cracking potential of HTPP-ECC." *Construction and Building Materials* 173 (2018): 508-519.

[22] Gödek, Eren, Kamile Tosun Felekoğlu, Muhammer Keskinates, and Burak Felekoğlu. "Development of flaw tolerant fiber reinforced cementitious composites with calcined kaolin." *Applied Clay Science* 146 (2017): 423-431.

[23] Li, Victor C. "Engineered cementitious composites (ECC) material, structural, and durability performance." 2008.

Experimental investigation of the effects of aggregate and fiber percentage on the behavior and cracking potential of Engineered Cementitious Composites

Mohammad Reza Esfahani *

Professor, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Mohammad Amiri

Ph.D. Student, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

The aim of this study is to determine the effect of replacing polyvinyl alcohol (PVA) fibers, fly ash (FA), and silica aggregate with polypropylene (PP) fibers, ground blast furnace slag (GBFS), iron furnace dust, limestone powder (LSP), natural sand, and microsilica to improve the mechanical properties and ductility of Engineered Cementitious Composites (ECC). Twelve different mixtures of ECC were designed and prepared. For each mixture, flexural and compression specimens were made and tested. The combination of microsilica and GBFS increases the strength and ductility of the composite, making it a viable alternative to fly ash. Replacement of silica sand with LSP that contains the appropriate composition can enhance ECC. The best results were achieved in ECC when the cementitious materials ratio was 1.25. By increasing the percentage of PP fibers from 1 to 1.5, the flexural strength increased by 65 percent, the middle span deflection of the flexural specimen increased by 21.7 percent, and the optimal amount of PP fibers to initiate hardening was 1.5 percent.

Keywords: Engineered Cementitious Composite, limestone powder, Ground Blast Furnace Slag, polypropylene fibers, microsilica.

* Corresponding Author: esfahani@um.ac.ir