نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۶، سال ۱۴۰۰، صفحات ۲۶۲۵-۲۶۳۸
DOI: 10.22060/ceej.2020.17458.6573

تاثیر سرباره‌ی مس بر روی مشخصات مکانیکی و انرژی شکست کامپوزیت سیمانی الیافی

موسی مظلوم*، محمد اکبری جمکرانی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

خلاصه: یکی از مهم‌ترین خصوصیت‌های منفی بتن، ضعف آن در کشش و ترک‌خوردگی آن است. به کار بردن الیاف در بتن تا حد زیادی این ضعف را جبران می‌کند. کامپوزیت های سیمانی الیافی نوعی از بتن‌های الیافی می‌باشند که در آن ها به جای استفاده از سنگدانه های درشت، از ریزدانه استفاده می شود. البته مقدار عیار سیمان زیاد آن ها از نظر زیست‌محیطی مشکل‌ساز است که با استفاده از مواد جایگزین سیمان مختلف، تا حدی این مشکل برطرف می‌شود. در این تحقیق تاثیر سرباره مس بر خواص مکانیکی و انرژی شکست کامپوزیت سیمانی مسلح‌شده با الیاف پلی‌پروپیلن بررسی شده است. در واقع سرباره کوره مس و میکروسیلیس جایگزین بخشی از سیمان گردیدند و الیاف پلی‌پروپیلن به خمیر سیمان اضافه شد. به این منظور یک طرح مخلوط شاهد فاقد میکروسیلیس و سرباره مس، ۴ طرح حاوی ۵% ، ۷% ، ۱۰% و ۱۵% میکروسیلیس، و ۴ طرح دارای ۵% ، ۱۰% ، ۲۰% و ۳۰% سرباره مس ساخته شدند. در نهایت مشخص شد که در نمونه‌های دارای میکروسیلیس، آن‌هایی که دارای ۱۵% از این ماده بودند، بیشترین انرژی شکست و مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی را داشتند. در مخلوط‌های حاوی سرباره مس، نمونه‌های دارای ۱۰% و ۲۰% سرباره دارای بیشینه پارامترهای فوق بودند. لازم به ذکر است که چندین نمونه ترکیبی که شامل میکروسیلیس و سرباره مس به صورت هم‌زمان بودند، هم ساخته شدند. با مقایسه نتایج همه طرح مخلوط‌های ذکر شده، مشخص شد که بهترین طرح مربوط به نمونه های ترکیبی حاوی ۱۵% سرباره مس به همراه ۱۵% میکروسیلیس است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۴
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

کلمات کلیدی:
بتن
بتن مسلح شده به الیاف
کامپوزیت سیمانی
میکروسیلیس
پلی‌پروپیلن

۱- مقدمه

بتن یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین مصالح ساختمانی است و ماده‌ای ترد با مقاومت کششی کم می باشد. یکی از انواع مهم آن، بتن الیافی است. این بتن با اضافه کردن الیاف کوتاه به خمیر به منظور بهبود رفتار شکننده آن و جلوگیری از گسترش ترک‌ها ساخته شد. الیاف فوق مانند پل عمل کرده، از گسترش و باز شدن ترک‌ها جلوگیری می‌کند [۱]. کامپوزیت های سیمانی الیافی (FRCC[1]) نوعی از بتن های الیافی می باشند که در آن‌ها به جای استفاده از سنگدانه های درشت، از ریز دانه استفاده می شود. به عبارت دیگر، ترکیبات اصلی تشکیل دهنده ی آن ها آب، سیمان، الیاف و سنگدانه های ریز نظیر ماسه سیلیسی می باشند.

الیاف‌های مختلفی تا به حال در خمیر بتن استفاده شده‌اند. یکی از انواع الیاف مورد استفاده در کامپوزیت‌های سیمانی، الیاف پلیمری می‌باشد. گروهی از محققین با افزودن تنها ۰/۱% حجمی الیاف پلی‌پروپیلن، افزایش مقاومت فشاری و کششی را به ترتیب ۵% و ۹/۷% عنوان کردند [۲]. گروهی دیگر با بررسی مقاومت فشاری و خمشی کامپوزیت‌های سیمانی الیافی، درصد بهینه الیاف پلی پروپیلن را ۱% حجمی بیان کردند [۳]. بنابراین در این تحقیق برای مسلح کردن کامپوزیت سیمانی از الیاف پلی‌پروپیلن استفاده شد. البته نتیجه استفاده از الیاف مختلف در این کامپوزیت ها مورد توجه محققین مختلف بوده است [۵ و ۴].

یکی از مهم‌ترین مشکلات استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی،

1 Fiber reinforced cementitious composites

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Mazloom@sru.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

مقدار عیار زیاد سیمان می‌باشد که برای رفع آن از پوزولان‌های جایگزین سیمان استفاده می‌شود. یکی از این مواد میکروسیلیس است. تحقیقات مظلوم و همکاران نشان می‌دهد استفاده از مقادیر مناسب میکروسیلیس به افزایش مقاومت و دوام بتن در سنین مختلف می‌انجامد [۶]. در واقع آن ها اثر میکروسیلیس را در بتن سبک خود تراکم بررسی‌کردند. در نهایت آن ها اعلام کردند میکروسیلیس باعث افزایش دوام و بهبود خواص مکانیکی این بتن شده است. همچنین این ماده مقاومت فشاری و کششی را به ترتیب ۴۳% و ۲۳% بهبود بخشیده است [۶]. افزودن نانوسیلیس به بتن هم باعث بهتر شدن هیدراسیون، کاهش کارایی و افزایش مقاومت فشاری می‌شود [۸ و ۷]. در پژوهش هایی تاثیر آب مغناطیسی بر خواص مکانیکی بتن های مختلف بررسی شده اند و نتیجه آن شده است که در حضور آب مغناطیسی، تاثیر مثبت میکروسیلیس بر خواص مکانیکی بتن کاهش می یابد [۱۰ و ۹]. مکانیک شکست بتن حاوی میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی توسط صالحی و مظلوم بررسی شد [۱۱]. در نهایت آن‌ها نتیجه گرفتند انرژی شکست اولیه و چقرمگی شکست بهترین طرح حاوی میکروسیلیس به ترتیب ۲۴% و ۱۸% افزایش یافتند.

یکی دیگر از مواد جایگزین سیمان مورد استفاده در بتن، سرباره مس می‌باشد که ماده‌ای دور ریز است. در واقع با توجه به تحقیقات انجام شده توسط محققین مختلف، میتوان از این ماده به عنوان ماده جایگزین بخشی از سیمان استفاده کرد [۱۶-۱۲]. میزان تاثیر سرباره مس بر مشخصات مکانیکی بتن، به نسبت آب به سیمان و مقدار جایگزینی سرباره بستگی دارد [۱۷]. همچنین گروهی از پژوهشگران با استفاده از سرباره مس در خمیر سیمان، رفتار این ملات را بررسی کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که سرباره مس پارامترهای مقاومتی ملات را بهبود می دهد [۱۸]. صالحی و مظلوم اثر سرباره و میکروسیلیس بر انرژی شکست بتن در حضور آب مغناطیسی را بررسی کردند [۱۱]. نتایج آن‌ها نشان داد بر خلاف میکروسیلیس که انرژی شکست را افزایش می‌دهد، سرباره آن را کاهش می دهد. بهترین نمونه آن تحقیق حاوی ۱۰% میکروسیلیس در حضور آب مغناطیسی بود [۱۱]. گروه دیگری از محققین از سرباره مس به عنوان جایگزین سیمان استفاده کردند و بهترین میزان سرباره مس را ۱۰% عنوان کردند [۱۹].

گروهی از پژوهشگران ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی بتن با جای‌گزینی سرباره مس به جای سیمان را بررسی کردند [۲۰]. نتایج آن‌ها نشان داد که بهترین طرح حاوی ۶۰% سرباره بود و پارامترهای مقاومتی را ۲۰% بهبود بخشید.

هدف از این مطالعه، ساخت کامپوزیت سیمانی الیافی دارای خواص مکانیکی و انرژی شکست قابل توجه می‌باشد. نوآوری این تحقیق ارائه یک طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی الیافی با اصلاح طرح مخلوط موجود در مرجع [۵] است. به این منظور به جای سرباره کوره آهن‌گدازی از سرباره مس و به جای الیاف پلی‌وینیل الکل، از الیاف پلی پروپیلن که ارزان تر و در دسترس تر بود، استفاده شد. در واقع برای کاهش مقدار سیمان در این طرح، علاوه بر میکروسیلیس از سرباره مس که ماده ای دور ریز می‌باشد، به صورت تکی و ترکیب با میکروسیلیس استفاده گردید. در نهایت، مقاومت‌های فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست این کامپوزیت برای انتخاب بهترین طرح مخلوط مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

یکی از طرح مخلوط های کامپوزیت سیمانی که در سال ۲۰۱۸ ارائه شده است [۵]، به عنوان مبنای اولیه کار مورد بررسی قرار گرفت. طرح مخلوط مذکور در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به این طرح و امکانات موجود در ایران، طرح مخلوطی ارائه شد که در ادامه به صورت کامل ذکر می‌شود.

۲-۱- مصالح

سیمان استفاده شده در این تحقیق، سیمان پرتلند نوع ۱-۴۲۵ می باشد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن به ترتیب در جدول های ۲ و ۳ آمده اند.

میکروسیلیس مورد استفاده دارای وزن مخصوص ظاهری ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بود و مشخصات آن با استاندارد ASTM C1240 مطابقت داشت [۲۱]. مشخصات شیمیایی و فیزیکی میکروسیلیس مصرفی به ترتیب در جدول های ۳ و ۴ آمده است.

ماسه سیلیسی مورد استفاده با توجه به نوع طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی و ریزدانه بودن تمامی اجزا، سنگ دانه هایی با قطر ۱۳۰ تا ۲۵۰ میکرومتر بودند. مشخصات شیمیایی ماسه سیلیسی در جدول

جدول ۱. طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت (UHP-ECC) [۵]

Table 1. mixed design ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC)

سیمان (kg/m^3)	میکروسیلیس (kg/m^3)	سرباره کوره آهن گدازی(kg/m^3)	ماسه سیلیسی (kg/m^3)	الیاف (kg/m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)	نسبت آب به مواد سیمانی
۸۰۰	۱۵۰	۷۵۰	۵۰۰	۲۰	۲۵	۰/۱۴

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان

Table 2. Physical and mechanical properties of cement

خصوصیت	ریزی بلین (مترمربع بر کیلوگرم)	گیرش اولیه (دقیقه)	گیرش نهایی (دقیقه)	مقاومت ۳ روزه (مگاپاسکال)	مقاومت ۷ روزه (مگاپاسکال)	مقاومت ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	انبساط سیمان با اتوکلاو(٪)
مقدار	۳۳۰	۱۲۰	۲۴۰	۱۷	۲۷	۴۰	۰/۱۵

جدول ۳. مشخصات شیمیایی سیمان، میکروسیلیس، ماسه سیلیسی و سرباره مس

Table 3. Chemical characteristics of cement, silica fume, silica sand and copper slag

	سیمان (٪)	میکروسیلیس (٪)	ماسه‌سیلیسی (٪)	سرباره مس (٪)
SiO_2	۲۱/۳۰	۹۶/۴	۹۸/۱	۳۴
CaO	۶۳/۴۸	۰/۴۹	۰/۰۶	۶/۵
Al_2O_3	۵/۱۳	۱/۳۲	۱/۱	۲
Fe_2O_3	۳/۴۷	۰/۸۷	۰/۱	-
Na_2O	۰/۲۳	۰/۳۱	۰/۵	-
MgO	۲/۵۱	۰/۹۷	-	۱-۵
P_2O_5	-	۰/۱۶	-	-
SO_3	۱/۶۷	۰/۱۰	-	-
K_2O	۰/۵۶	۱/۰۱	۰/۵	-
SiC	-	۰/۵	-	-
C	-	۰/۳	-	-
CL	-	۰/۰۴	-	-
H_2O	-	۰/۰۸	-	-
feo	-	-	-	۴۷-۵۴
CuO	-	-	-	۰/۷
سولفات	-	-	-	۰/۰۲
کلرید	-	-	-	۰/۰۰۳

جدول ۴. مشخصات فیزیکی میکروسیلیس

Table 4. Physical characteristics of silica fume

خصوصیت	چگالی حجمی (kg/m^3)	دانه ها	رنگ	حالت فیزیکی
میکروسیلیس	۲۵۰	کروی و غیرکریستاله (آمورف)	خاکستری روشن	پودر پوزولان

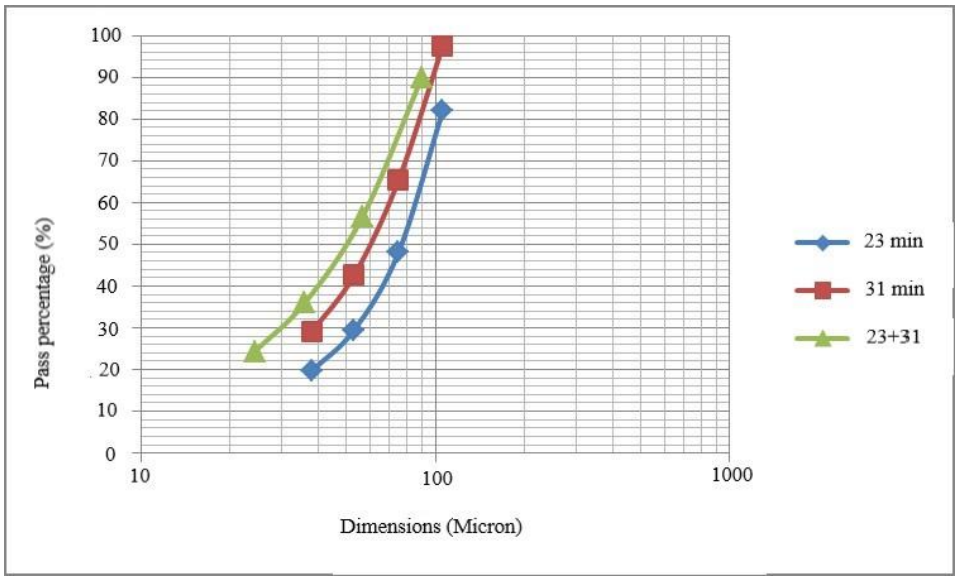
۳ نشان داده شده است. با توجه به آنالیز شیمیایی ماسه سیلیسی، مشاهده می‌شود که مقدار سیلیس موجود در آن بیش از ۹۸% است.

از سرباره مس غیر بلورین در این طرح استفاده شد. مشخصات شیمیایی سرباره مس در جدول ۳ آمده است. با توجه به این جدول، مجموع سه اکسید سیلیس، آلومینیوم و آهن به طور متوسط حدود ۸۵% است. برای پودر کردن ذرات سرباره مس از آسیاب دانشگاه تهران در سه بازه زمانی ۲۳، ۳۱ و ۵۴ =۲۳+۳۱ دقیقه استفاده شد. نمودار توزیع اندازه ذرات سرباره مس مربوط به سه حالت فوق در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به مسائل اقتصادی و نزدیک بودن اندازه ذرات در این سه حالت، سرباره برای استفاده در نمونه های نهایی به میزان ۲۳ دقیقه آسیاب شد. مشخصات فیزیکی سرباره مس در جدول ۵ آمده است.

الیاف مورد استفاده در این مطالعه، الیاف پلی پروپیلن با طول ۱۰ میلی‌متر بود و مشخصات کامپوزیت سیمانی ساخته شده با استاندارد ASTM C1116 مطابقت داشت [۲۲]. مشخصات فیزیکی الیاف در جدول ۶ مشخص شده است.

۲-۲- طرح مخلوط و ساخت نمونه

طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی مسلح شده به الیاف در جدول ۸ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به این جدول، مقدار الیاف مورد استفاده در این تحقیق ۲% حجم کل بوده است. در نام‌گذاری نمونه‌ها، حرف های F، C و M به ترتیب به معنای الیاف، سرباره مس و میکروسیلیس می‌باشند. طرح ۱ نمونه‌ی شاهد (FC۰M۰) بدون میکروسیلیس و سرباره مس است. لازم به ذکر است که در تحقیقات مختلف، درصد بهینه جایگزینی سرباره مختلفی گزارش شده است [۲۰-۱۲]. با توجه به اینکه طرح مخلوط و نوع مصالح مصرفی در مقدار درصد بهینه هر پوزولان موثر است، در این تحقیق طرح‌های ۲ تا ۵ شامل ۵%، ۷%، ۱۰% و ۱۵% میکروسیلیس



شکل ۱. نمودار توزیع اندازه ذرات سرباره مس آسیاب شده

Fig. 1. Distributed size chart of grounded copper slag particles

جدول ۵. مشخصات فیزیکی سرباره مس

Table 5. Physical characteristics of copper slag

خصوصیت	چگالی حجمی (kg/m^3)	دانه ها	رنگ
سرباره مس	۱۷۵۰	شکسته	سیاه

جدول ۶. مشخصات فیزیکی الیاف پلی پروپیلن

Table 6. Physical characteristics of polypropylene fibers

خصوصیت	چگالی حجمی (Kg/m^3)	قطر (µm)	طول (mm)	نقطه ی ذوب (°C)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
الیاف پلی پروپیلن	۹۱۰	۲۳	۱۰	۱۶۵	۲/۷	۴۰۰

جدول ۷. مشخصات فوق روان کننده مصرفی

Table 7. Consumer superplasticizer specifications

خصوصیت	چگالی حجمی	رنگ	حالت فیزیکی	کلراید (ppm)	طبیعت یونی	ترکیب شیمیایی
میزان یا مشخصه	۱ تا ۱/۰۲ کیلوگرم بر لیتر در دمای ۲۰°C	قهوه ای تیره	مایع	حداکثر ۵۰۰	آنیونی	کوپلیمرهای اصلاح شده پلی کربوکسیلیک اسید

و طرح های ۶ تا ۹ شامل ۵% ،۱۰% ،۲۰% و ۳۰% سرباره مس بودند. البته در ابتدا طرحی که دارای ۲۰% میکروسیلیس بود، هم ساخته شد. ولی چون مقاومت و کارایی آن کاهش چشمگیری داشت، لذا از ذکر آن در جدول نتایج صرف نظر شد. همچنین در طرح‌های دارای سرباره مس، چون در نمونه دارای ۳۰% سرباره تمام پارامترهای مقاومتی کاهش یافتند، مقادیر بیش از ۳۰% بررسی نشدند. طرح‌های ۱۰ تا ۱۳ حاوی ترکیب همزمان ۱۰% و ۱۵% میکروسیلیس با ۱۰% و ۲۰% سرباره مس می‌باشند. طرح‌های ۱۴ تا ۱۶ شامل مقدار میکروسیلیس بهینه ۱۵% به همراه مقدار سرباره ۱۲/۵% ، ۱۵% و ۱۷/۵% است.

برای ساخت نمونه ها، ابتدا ماسه سیلیسی و کل الیاف در داخل مخلوط کن به مدت ۵ دقیقه مخلوط گردیدند. سپس میکروسیلیس و سیمان اضافه شدند و مخلوط کن به مدت ۱ دقیقه روشن شد. در نهایت آب و فوق روان کننده به مخلوط اضافه گردیدند و مخلوط کن محصول نهایی را به مدت ۳ دقیقه مخلوط نمود. پس از انجام آزمایش اسلامپ و تایید آن، کامپوزیت سیمانی ساخته شده در داخل قالب‌ها ریخته شد. سپس آن ها به مدت ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاهی و در قالب نگه‌داری شدند. پس از خارج کردن نمونه ها از قالب، آن ها در حوضچه‌های آب در دمای ۲ ± ۲۰ درجه‌ی سانتی گراد نگه داری شدند. یعنی قالب ها بعد از ۱ روز باز شدند و نمونه ها برای مدت ۲۷ روز در آب عمل‌آوری گردیدند تا برای انجام آزمایش آماده شوند.

۲-۳- روش انجام آزمایش

لازم به ذکر است که بخش قابل توجهی از مقاومت کامپوزیت های سیمانی تا سن ۲۸ روزه حاصل می‌شود [۲۴]. هدف این مطالعه نیز بررسی تاثیر هم زمان میکروسیلیس و سرباره مس بر روی مشخصات کامپوزیت های سیمانی بوده است. لذا برای حذف تاثیر سن بر روی جواب ها، پارامتر سن ثابت در نظر گرفته شد، و تمامی آزمایش‌ها در سن ۲۸ روزه انجام شدند.

برای تعیین مقاومت فشاری، نمونه های مکعبی به ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی متر مکعب ساخته شدند و آزمایش مربوطه مطابق استاندارد BS-1881:۱۱۶ [۲۵] انجام شد. همچنین نرخ بارگذاری برابر ۰/۳ مگاپاسکال بر ثانیه بود. دستگاه تعیین مقاومت فشاری در شکل ۲-الف قابل مشاهده است. از این دستگاه برای تعیین مقاومت کششی دو نیمه شدن یا برزیلی هم استفاده شد. در واقع نمونه های مورد استفاده در آزمایش برزیلی استوانه هایی به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی متر بودند. این آزمایش مطابق استاندارد انگلیسی BS-1881:117 [۲۶] انجام شد. همچنین نرخ بارگذاری برابر ۰/۰۲ مگاپاسکال بر ثانیه بود. در این روش، نمونه استوانه ای به صورت افقی در داخل دستگاه جک بتن شکن قرار می گیرد. سپس نیروی فشاری (P) که باعث دو نیمه شدن نمونه می شود، به دست می آید. با استفاده از فرمول (۱) مقدار مقاومت کششی برزیلی بتن (f_t) محاسبه می شود.

جدول ۸. طرح مخلوط کامپوزیت‌های سیمانی مسلح شده به الیاف (kg/m3)

Table 8. Mixed design of fiber-reinforced cement composites (kg/m3)

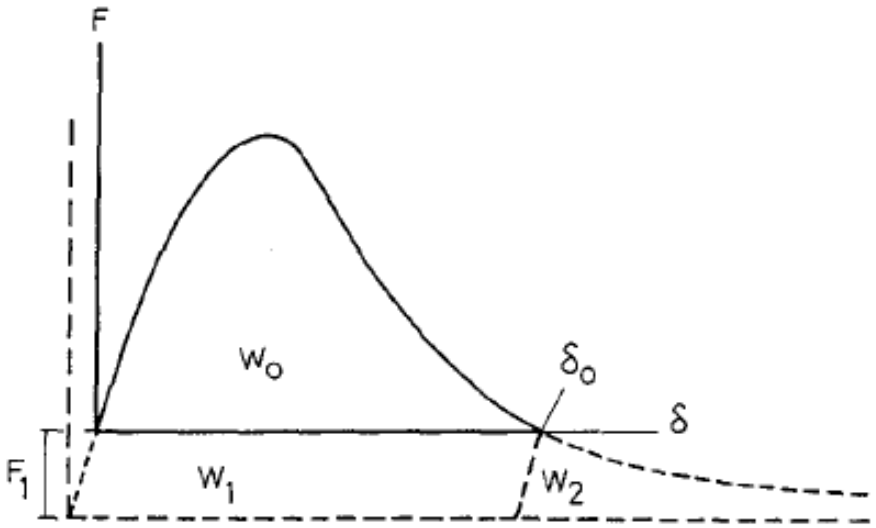
شماره	نام طرح	نسبت آب به مواد سیمانی	سیمان	آب	ماسه سیلیسی	سرباره مس	میکروسیلیس	فوق روان کننده	الیاف
		–							
۱	FC0M0	۰/۲۸	۱۱۲۰	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۰	۰	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۲	FC0M15	۰/۲۸	۹۵۲	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۰	۱۶۸	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۳	FC0M10	۰/۲۸	۱۰۰۸	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۰	۱۱۲	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۴	FC0M7	۰/۲۸	۱۰۴۱/۶	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۰	۷۸/۴	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۵	FC0M5	۰/۲۸	۱۰۶۴	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۰	۵۶	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۶	FC5M0	۰/۲۸	۱۰۶۴	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۵۶	۰	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۷	FC10M0	۰/۲۸	۱۰۰۸	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۱۱۲	۰	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۸	FC20M0	۰/۲۸	۸۹۶	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۲۲۴	۰	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۹	FC30M0	۰/۲۸	۷۸۴	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۳۳۶	۰	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۱۰	FC10M10	۰/۲۸	۸۹۶	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۱۱۲	۱۱۲	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۱۱	FC10M15	۰/۲۸	۸۴۰	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۱۱۲	۱۶۸	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۱۲	FC20M10	۰/۲۸	۷۸۴	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۲۲۴	۱۱۲	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۱۳	FC20M15	۰/۲۸	۷۲۸	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۲۲۴	۱۶۸	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۱۴	FC12.5M15	۰/۲۸	۸۱۲	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۱۴۰	۱۶۸	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۱۵	FC15M15	۰/۲۸	۷۸۴	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۱۶۸	۱۶۸	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۱۶	FC17.5M15	۰/۲۸	۷۵۶	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۱۹۸	۱۶۸	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵

(الف)

(ب)

شکل ۲. الف)دستگاه ADR-Touch برای آزمایش مقاومت فشاری و کششی، ب) دستگاه یونیورسال برای آزمایش مقاومت خمشی

Fig. 2. A) ADR-Touch device for testing compressive and tensile strength, b) Universal device for testing flexural strength



شکل ۳. نمودار نیرو – تغییر مکان مورد استفاده برای محاسبه انرژی شکست نمونه ها

Fig. 3. Force - displacement diagrams used to calculate the fracture energy of samples

$$f_t = \frac{2P}{\pi D.L} \quad (۱)$$

که در آن D و L به ترتیب قطر و طول نمونه استوانه ا ی می باشند.

برای تعیین مقاومت خمشی ۴ نقطه‌ای از دستگاه یونیورسال استفاده شد که در شکل ۲-ب نشان داده شده است. این آزمایش بر روی نمونه‌های مکعب مستطیلی به ابعاد ۳۵×۱۰×۱۰ سانتی‌متر مکعب انجام شد. روش انجام این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C1609 [۲۷] بوده است. سرعت در این بخش از کار که بر اساس جابجایی کنترل می شد، برابر ۰/۵ میلی متر بر دقیقه بود. یکی دیگر از پارامترهای موثر در تعیین خواص بتن، انرژی شکست آن است که از روش های متفاوتی محاسبه می‌شود. در این تحقیق، انرژی شکست نمونه ها (G_F) بر اساس روش تعیین شده در شکل۳ و رابطه ۲ به دست آمده است [۲۸].

$$G_F = \frac{W_0 + 2F_1\delta_0}{A} \quad (۲)$$

که در آن A سطح مقطع شکست است و در این تحقیق همان سطح مقطع تیر می باشد. برای مثال انرژی شکست نمونه FC0M0 در این بخش ارائه می‌شود. در این نمونه W_0 مساحت اندازه گیری شده زیر نمودار نیرو تغییر مکان است که ۵۳۸۳۵ نیوتون-میلی‌متر شده است. همچنین نیروی F_1 ناشی از وزن تیر است و مقدار آن برابر ۷۱/۲ نیوتون می باشد. عبارت δ_0 غییر شکل به دست آمده هنگام گسیختگی تیر است که در این نمونه برابر ۵/۳۷ میلی‌متر شده است. در نهایت مقدار انرژی شکست با جاگذاری مقادیر فوق در رابطه ۲ به دست می آید که برابر ۵/۴۶ نیوتون بر میلی‌متر می شود. این عدد در ردیف اول جدول ۹ آمده است.

۳- نتیجه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌ها در شرایط ذکر شده مورد آزمایش قرار گرفتند. نتیجه های آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست در جدول ۹ نشان داده شده است.

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

در جدول ۹ و شکل ۴ نتایج آزمایش مقاومت فشاری و درصد تغییرات آن در سن ۲۸ روزه بیان شده است. در واقع برای هر آزمایش سه نمونه ساخته شده است و میانگین جواب آن ها در جدول و

شکل فوق آمده است. با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری، مشاهده می‌شود که مقاومت نمونه شاهد ۴۲/۳۸ مگاپاسکال بود. در نمونه های حاوی میکروسیلیس، نمونه دارای ۱۵% میکروسیلیس بیشترین مقاومت را داشت، و مقدار آن ۵۲/۴۳ مگاپاسکال بود. یعنی مقاومت این نمونه ۲۳/۷% نسبت به نمونه شاهد بهبود داشت. از طرفی در نمونه‌های حاوی سرباره مس، نمونه شامل ۲۰% سرباره دارای بالاترین مقاومت بود، و با مقدار ۴۹/۴۲ مگاپاسکال، ۱۶/۶% نسبت به نمونه شاهد قوی تر بود. در نمونه‌های ترکیبی حاوی سرباره مس و میکروسیلیس، نمونه‌های دارای ۱۵% میکروسیلیس بیشترین مقاومت را داشتند. همچنین در نمونه‌های ترکیبی با میکروسیلیس ثابت ۱۵% و مقدار سرباره مس متغیر، مقاومت بهینه مربوط به نمونه حاوی ۱۵% میکروسیلیس و ۱۵% سرباره مس بود، که با مقدار ۵۷/۱۳ مگاپاسکال ، ۳۴/۸% نسبت به نمونه شاهد بهبود داشت.

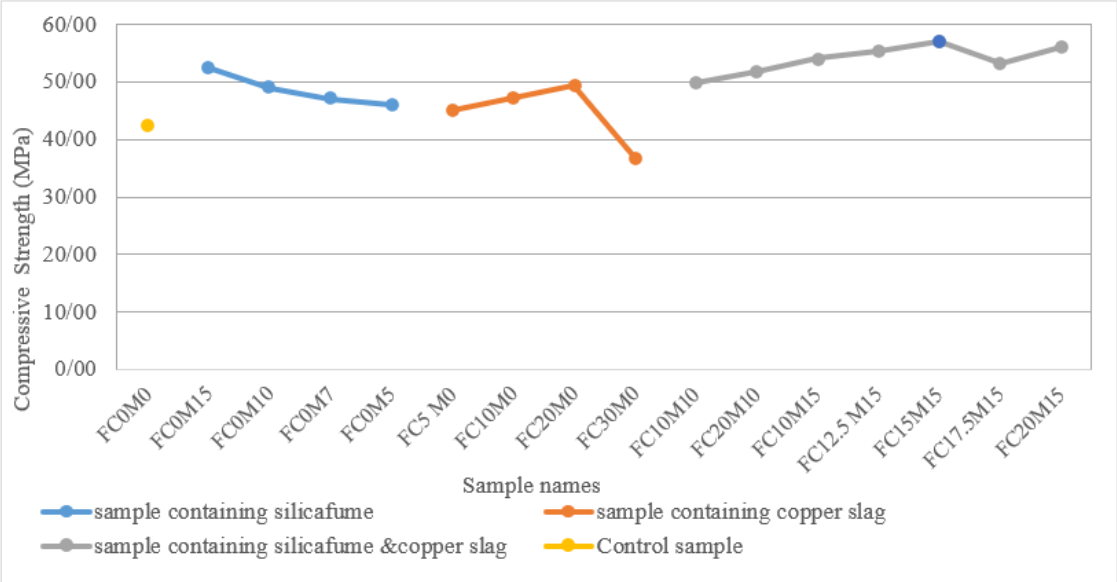
۳-۲- آزمایش مقاومت کششی

در جدول ۹ و شکل ۵ نتایج آزمایش مقاومت کششی و درصد تغییرات آن در سن ۲۸ روزه بیان شده است. با توجه به نتایج آزمایش کششی مشاهده می‌شود که در نمونه های حاوی میکروسیلیس، نمونه ی دارای ۱۵% میکروسیلیس بیشترین مقاومت را داشت و با مقدار ۴/۷۳ مگاپاسکال، ۲۶/۶% نسبت به نمونه شاهد قوی تر بود. از طرفی در نمونه‌های دارای سرباره مس، نمونه حاوی ۱۰% سرباره دارای بالاترین مقاومت کششی بود، که با مقدار ۴/۱۶ مگاپاسکال، ۱۱/۲% بهبود داشت. همچنین در نمونه‌های ترکیبی حاوی سرباره مس و میکروسیلیس، نمونه‌های دارای ۱۵% میکروسیلیس بیشترین مقاومت را داشتند. در نمونه‌های ترکیبی شامل ۱۵% میکروسیلیس و مقدار سرباره مس متغیر، مقاومت بهینه برای نمونه‌ی حاوی ۱۵% میکروسیلیس و ۱۵% سرباره مس بود، که با مقدار ۴/۹۸ مگاپاسکال، ۳۳/۲% نسبت به نمونه شاهد قوی تر بود.

جدول ۹. نتیجه‌های آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست نمونه‌ها

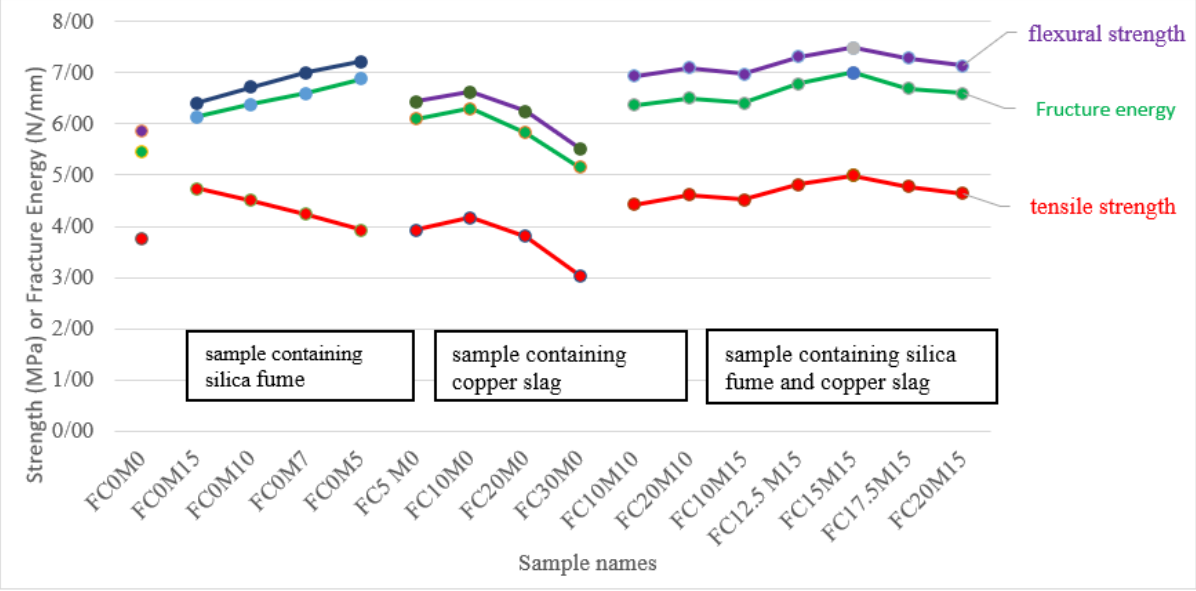
Table 9. Results of compressive, tensile, bending and fracture energy tests of samples

شماره	نام نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	تغییرات مقاومت فشاری (٪)	مقاومت کششی (MPa)	تغییرات مقاومت کششی (٪)	مقاومت خمشی (MPa)	تغییرات مقاومت خمشی (٪)	انرژی شکست (N/mm)	تغییرات انرژی شکست (٪)
۱	FC0M0	۴۲/۳۸	۰/۰۰	۳/۷۴	۰/۰۰	۵/۸۵	۰/۰۰	۵/۴۶	۰/۰۰
۲	FC0M15	۵۲/۴۳	۲۳/۷	۴/۷۳	۲۶/۶	۷/۲۲	۲۳/۴	۶/۸۷	۲۵/۸
۳	FC0M10	۴۸/۹۹	۱۵/۶	۴/۵۱	۲۰/۷	۷/۰۰	۱۹/۷	۶/۵۹	۲۰/۷
۴	FC0M7	۴۷/۱۱	۱۱/۱	۴/۲۳	۱۳/۳	۶/۷۳	۱۴/۹	۶/۳۸	۱۶/۷
۵	FC0M5	۴۵/۹۳	۸/۳	۳/۹۳	۵/۱۷	۶/۴۱	۹/۶	۶/۱۴	۱۲/۳
۶	FC5 M0	۴۵/۰۴	۶/۲	۳/۹۴	۵/۵	۶/۴۴	۱۰/۰	۶/۱۰	۱۱/۷
۷	FC10M0	۴۷/۲۳	۱۱/۴	۴/۱۶	۱۱/۲	۶/۶۲	۱۳/۱	۶/۳۰	۱۵/۳
۸	FC20M0	۴۹/۴۲	۱۶/۶	۳/۸۱	۲/۰	۶/۲۵	۶/۹	۵/۸۳	۶/۷
۹	FC30M0	۳۶/۷۳	-۱۳/۳	۳/۰۵	-۱۸/۴	۵/۵۳	-۵/۴	۵/۱۴	-۵/۷
۱۰	FC10M10	۴۹/۸۵	۱۷/۶	۴/۴۲	۱۸/۳	۶/۹۲	۱۸/۳	۶/۳۶	۱۶/۵
۱۱	FC10M15	۵۴/۰۹	۲۷/۶	۴/۵۲	۲۱/۰	۶/۹۹	۱۹/۴	۶/۴۲	۱۷/۵
۱۲	FC20M10	۵۱/۷۸	۲۲/۱	۴/۶۰	۲۳/۰	۷/۱۰	۲۱/۳	۶/۵۰	۱۸/۹
۱۳	FC20M15	۵۶/۱۰	۳۲/۳	۴/۶۴	۲۴/۳	۷/۱۴	۲۲/۱	۶/۵۹	۲۰/۷
۱۴	FC12.5 M15	۵۵/۳۶	۳۰/۶	۴/۸۲	۲۹/۰	۷/۳۲	۲۵/۱	۶/۸۰	۲۴/۴
۱۵	FC15M15	۵۷/۱۳	۳۴/۸	۴/۹۸	۳۳/۲	۷/۴۸	۲۷/۹	۷/۰۱	۲۸/۳
۱۶	FC17.5M15	۵۳/۳۱	۲۵/۷	۴/۷۸	۲۷/۹	۷/۲۸	۲۴/۴	۶/۶۹	۲۲/۵



شکل ۴. نمودارهای مقاومت فشاری نمونه ها

Fig. 4. Compression resistance diagrams of the samples



شکل ۵. نمودارهای مقاومت کششی و خمشی و انرژی شکست نمونه ها

۳-۳- آزمایش مقاومت خمشی

در جدول ۹ و شکل ۵، نتایج آزمایش مقاومت خمشی چهار نقطه ای و درصد تغییرات آن در سن ۲۸ روزه بیان شده است. با توجه به نتایج آزمایش خمش چهار نقطه‌ای مشاهده می‌شود که در نمونه های حاوی میکروسیلیس، مخلوط دارای ۱۵% میکروسیلیس بیشترین مقاومت را داشت که با مقدار ۷/۲۲ مگاپاسکال، ۲۳/۴% نسبت به نمونه شاهد بهبود داشت. از طرفی در نمونه‌های حاوی سرباره، نمونه دارای ۱۰% سرباره دارای بالاترین مقاومت خمشی

بود، که با مقدار ۶/۶۲ مگاپاسکال، ۱۳/۱% بهبود داشت. همچنین در نمونه‌های ترکیبی شامل سرباره مس و میکروسیلیس، نمونه‌های حاوی ۱۵% میکروسیلیس بیشترین مقاومت را داشتند. در نمونه‌های ترکیبی، درصد بهینه مقاومت خمشی برای نمونه‌ی حاوی ۱۵% میکروسیلیس و ۱۵% سرباره مس بود که با مقدار ۷/۴۸ مگاپاسکال، ۲۷/۹% بهبود داشت.

۳-۴- انرژی شکست

در جدول ۹ و شکل ۵ نتایج مقدار انرژی شکست (G_F) نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه بیان شده است. با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود که در نمونه های حاوی میکروسیلیس، نمونه‌ی دارای ۱۵% میکروسیلیس، بیشترین انرژی شکست را داشت که با مقدار ۶/۸۷ نیوتون بر میلی متر ۲۵/۸% نسبت به نمونه شاهد بهبود داشت. از طرفی در نمونه‌های حاوی سرباره مس، نمونه دارای ۱۰% سرباره دارای بیشترین انرژی شکست بود، که با مقدار ۶/۳ نیوتون بر میلی متر، ۱۵/۳% بهبود داشت. همچنین در نمونه‌های ترکیبی حاوی سرباره مس و میکروسیلیس، نمونه‌های دارای ۱۵% میکروسیلیس بیشترین انرژی شکست را داشتند. در نمونه‌های ترکیبی، درصد بهینه انرژی شکست مربوط به نمونه‌ی حاوی ۱۵% میکروسیلیس و ۱۵% سرباره مس بود که با مقدار ۷/۰۱ نیوتون بر میلی متر ۲۸/۳% بهبود داشت.

۳-۵- جمع بندی نتیجه‌های آزمایشگاهی

با توجه به تحقیقات گذشته، میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست بتن و سایر مواد پایه سیمانی می‌شود [۱۱ و ۷ و ۶]. البته این افزایش با توجه به طرح مخلوط و نوع مصالح متفاوت است. در این تحقیق نیز میکروسیلیس چهار پارامتر فوق را بهبود بخشید. در تحقیقات سایر پژوهشگران، سرباره مس به عنوان جایگزین سیمان استفاده شده است، و این ماده با توجه به نوع طرح مخلوط و مقدار سرباره، اثرهای متفاوتی داشته است [۲۰-۱۲]. در مواردی سرباره مس، مشخصات مکانیکی را تا حدی کاهش و گاهی افزایش داده است. در این تحقیق نیز به عنوان مثال سرباره مس تا میزان جایگزینی ۲۰% باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. البته اثر سرباره در افزایش مقاومت، نسبت به میکروسیلیس کمتر بوده است. سایر محققین هم به برتری میکروسیلیس نسبت به سرباره در این زمینه اشاره کرده اند [۱۱]. لازم به تاکید است که در نمونه‌های ترکیبی این تحقیق، استفاده هم زمان میکروسیلیس و سرباره مس باعث افزایش قابل توجه مشخصات مکانیکی کامپوزیت سیمانی الیافی شده است.

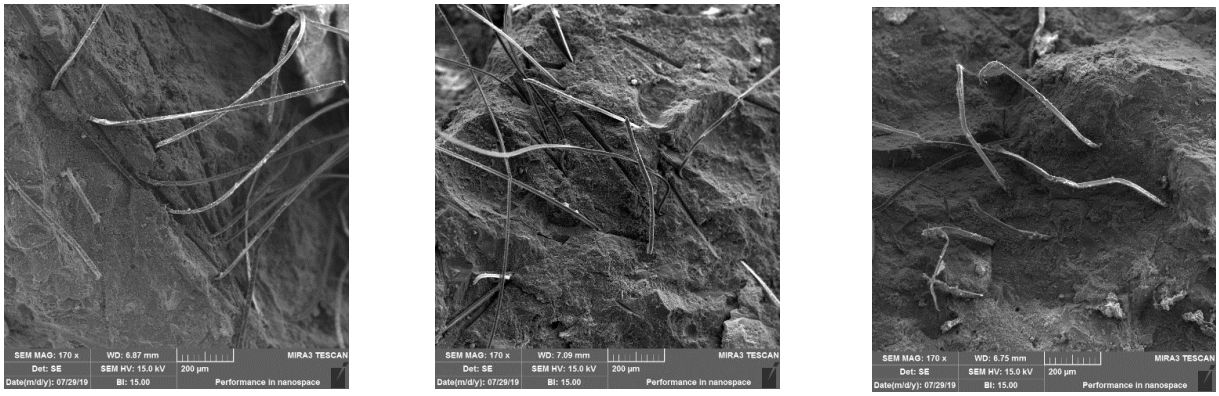
۳-۶- عکس برداری میکروسکوپ الکترونی[1]

نتایج آزمون عکس برداری میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها در شکل ۶ -الف و ب و ج نشان داده شده است. با توجه این تصاویر، توزیع الیاف پلی پروپیلن بسیار همگن و تصادفی بوده است. با توجه به شکل ۶ -الف، که مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۵% میکروسیلیس است، مشاهده می‌شود که این ماده هم به عنوان پرکننده و هم به عنوان پوزولان عملکرد مناسبی داشته است. شکل ۶-ب نشان می دهد که نمونه حاوی ۱۵% سرباره مس به خوبی نمونه قبلی عمل نکرده است و در سطح نمونه ها لبه تیز سوزنی شکل شفاف و خشک مشاهده می‌شود. این موضوع می تواند به علت سنگین بودن و ته نشینی ذرات سرباره و وجود آب آزاد اضافی در سطح نمونه ها باشد. در سطح این نمونه حفره‌های نیمه کروی، ترک های مویی و کانال های مویرگی هم قابل مشاهده است که خود دلیلی بر افزایش تخلخل و کاهش پارامترهای مقاومتی است. در شکل ۶-ج که مربوط به نمونه حاوی ۱۵% میکروسیلیس به همراه ۱۵% سرباره مس است، مشاهده می‌شود که ساختار نمونه ها بسیار همگن و متراکم است. در این شکل تخلخل و حفرات ریزساختار نسبت به سایر نمونه‌ها کمتر است. این موضوع دلیل مهمی برای افزایش پارامترهای مقاومتی و بهبود دوام نمونه فوق می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش های مقاومت فشاری، کششی و خمشی انجام شده، و بررسی مقدار انرژی شکست نمونه‌های کامپوزیت سیمانی الیافی، نتیجه‌های جالب توجهی به دست آمد. در نمونه های فاقد سرباره مس و حاوی میکروسیلیس، با افزایش این ماده، مقاومت های فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست نسبت به نمونه شاهد افزایش یافتند. در واقع برای طرح های حاوی میکروسیلیس، درصد بهینه این ماده ۱۵٪ بود. در مورد طرح های دارای سرباره مس،

1 Scanning Electron Microscopy (SEM)



(ج) (ب) (الف)

شکل ۶. الف) تصویر SEM نمونه حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس؛ ب) تصویر SEM نمونه دارای ۱۵٪ سرباره مس؛ ج) تصویر SEM نمونه حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ سرباره مس

Fig. 6. a) SEM image of a sample containing 15% microsilica; B) Sample SEM image with 15% copper slag; C) Sample SEM image containing 15% microsilica and 15% copper slag

درصد بهینه این سرباره برای آزمایش مقاومت فشاری ۲۰٪ بود، ولی برای کشش، خمش و انرژی شکست درصد بهینه آن ۱۰٪ شد. طرح بهینه نهایی برای مقاومت های فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست که از بین نمونه‌های ترکیبی انتخاب شده است، حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس به همراه ۱۵٪ سرباره مس بود. با ترکیب میکروسیلیس و سرباره مس به عنوان جایگزین سیمان، نه تنها مقدار سیمان مصرفی کاهش قابل توجهی یافت، بلکه اثر افزایش پارامترهای مقاومتی مذکور نیز تشدید شد. در واقع نمونه های حاوی میکروسیلیس دارای ریز ساختار بسیار همگن و متراکمی بودند. این موضوع می تواند دلیل اصلی خصوصیت های مقاومتی خوب آن ها باشد. نمونه های حاوی سرباره مس دارای سطح خشک و حفرات نیمه کروی بودند که عامل مهمی در کاهش مقاومت آن ها بود. طرح بهینه دارای ۱۵% میکروسیلیس به همراه ۱۵% سرباره مس، دارای میزان تخلخل بسیار کم و ریز ساختار بسیار متراکمی شد. این موضوع دلیل مهمی برای انتخاب آن به عنوان بهترین طرح مخلوط این تحقیق به شمار می رود. مقاومت های فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست این طرح نسبت به طرح شاهد به ترتیب ۳۴/۸٪، ۳۳/۲٪ ، ۲۷/۹ ٪و ۲۸/۳٪ افزایش داشتند.

مراجع

[1] M. Mazloom, S. Mirzamohammadi, Thermal effects on the mechanical properties of cement mortars reinforced with aramid, glass, basalt and polypropylene fibers, Advances in Material Research, 8(2) (2019) 137-154.

[2] P.S. Song, S. Hwang, B.C. Sheu, Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes, Cement and Concrete Research, 35(8) (2005) 1546-1550.

[3] A.G. Santos, J.M. Rincón, M. Romero, R. Talero, Characterization of a polypropylene fibered cement composite using ESEM, FESEM and mechanical testing, Construction and Building Materials, 19(5) (2005) 396-403.

[4] S. Yin, R. Tuladhar, F. Shi, M. Combe, T. Collister, N. Sivakugan, Use of macro plastic fibres in concrete: A review, Construction and Building Materials, 93 (2015) 180-188.

[5] K.Q. Yu, J.T. Yu, J.G. Dai, Z.D. Lu, S.P. Shah, Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers, Construction and Building Materials, 158 (2018) 217-227.

[6] M. Mazloom, A. Allahabadi, M. Karamloo, Effect of silica fume and polyepoxide-based polymer on electrical resistivity, mechanical properties, and ultrasonic response of SCLC, Advances in concrete construction, 5(6) (2017) 587-611.

[7] J. Massana, E. Reyes, J. Bernal, N. León, E. Sánchez-Espinosa, Influence of nano-and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete, Construction and Building Materials, 165 (2018) 93-103.

[8] O.A. Naniz, M. Mazloom, Effects of colloidal nano-silica on fresh and hardened properties of self-compacting lightweight concrete, Journal of Building Engineering, 20 (2018) 400-410.

[9] H. Salehi, M. Mazloom, Effect of magnetic field intensity on fracture behaviours of self-compacting lightweight concrete, Magazine of Concrete Research, 71(13) (2018) 665-679.

[10] M. Mazloom, S.M. Miri, Effect of magnetic water on strength and workability of high performance concrete, Journal of Structural and Construction Engineering, 3(2) (2016) 30-41 (in Persian).

[11] H. Salehi, M. Mazloom, Opposite effects of ground granulated blast-furnace slag and silica fume on the fracture behavior of self-compacting lightweight concrete, Construction and Building Materials, 222 (2019) 622-632.

[12] W.A. Moura, J.P. Gonçalves, M.B.L. Lima, Copper slag waste as a supplementary cementing material to concrete, Journal of materials science, 42(7) (2007) 2226-2230.

[13] A. Behnood, "Effects of high temperatures on the high-strength concretes incorporating copper slag as coarse aggregate", Proceedings of the 7th International Symposium on Utilization of High-Strength/Performance Concrete, Washington, DC, USA, (2005) 228-266.

[14] I. Afshoon, Y. Sharifi, Utilization of micro copper slag in SCC subjected to high temperature, Journal of Building Engineering, 29 (2020).

[15] M. Fadaee, R. Mirhosseini, R. Tabatabaei, M.J. Fadaee, Investigation on using copper slag as part of cementitious materials in self compacting concrete, Asian Journal of Civil Engineering, 16(3) (2015) 368-381.

[16] A. Taeb, S. Faghihi, Utilization of copper slag in the cement industry, ZKG international, 55(4) (2002) 98-100.

[17] Y. Feng, Q. Yang, Q. Chen, J. Kero, A. Andersson, H. Ahmed, F. Engström, C. Samuelsson, Characterization and evaluation of the pozzolanic activity of granulated copper slag modified with CaO, Journal of Cleaner Production, 232 (2019) 1112-1120.

[18] Z. Wang, T. Zhang, L. Zhou, Investigation on electromagnetic and microwave absorption properties of copper slag-filled cement mortar, Cement and Concrete Composites, 74 (2016) 174-181.

[19] M.F.M. Zain, M. Islam, S. Radin, S. Yap, Cement-based solidification for the safe disposal of blasted copper slag, Cement and Concrete Composites, 26(7) (2004) 845-851.

[20] S. Lim, W. Lee, H. Choo, C. Lee, Utilization of high carbon fly ash and copper slag in electrically conductive controlled low strength material, Construction and Building Materials, 157 (2017) 42-50.

[21] ASTM C1240. Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious mixtures, ASTM International, 2005.

[22] ASTM C1116, Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete, ASTM International, 2015.

[23] ASTM C494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM International, 2011.

[24] M. Mazloom, S. Mirzamohammadi, Fracture of fibre-reinforced cementitious composite after exposure to elevated temperatures, Magazine of Concrete Research, (2020) DOI: 10.1680/jmacr.19.00401.

[25] BS-1881:116, Testing Concrete Part 116. Method for determination of the compressive strength of concrete Cubes, London, British Standard Institution, 1983.

[26] BS-1881:117, Testing Concrete Part 117. Method for determination of tensile splitting strength, London, British Standard Institution, 1983.

[27] ASTM C1609, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), ASTM International, 2012.

[28] A. Hillerborg, The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete, Materials and structures, 18(4) (1985) 291-296

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Mazloom, M. Akbari Jamkarani, Effect of copper slag on the mechanical properties and fracture energy of fiber reinforced cementitious composite. Amirkabir J. Civil Eng., 53(6) (2021) 2625-2638

DOI: 10.22060/ceej.2020.17458.6573

This page intentionally left blank