

یادداشت پژوهشی

اثر میکروسیلیس و الیاف پلیمر تقویت شده با فیبر کربنی (CFRP) بر خواص مکانیکی و دوام بتن ژئوپلیمری پایه سرباره کوره بلند آهن

شایان نجمی^۱، آبتین رهبری^۱، احسان درویشان^۲، محسن آدابی^{۳*}

۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی

۲ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی

۳ استادیار، گروه مهندسی متالورژی و مواد، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی

*adabi@riau.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۹/۰۳/۰۷

تاریخ دریافت ۹۸/۰۲/۱۷

چکیده

امروزه صنایع تولید سیمان یکی از منابع مهم تخریب محیط زیست است. این صنایع علاوه بر مصرف مواد اولیه و سوخت یکی از عوامل عمده تولید گازهای گلخانه‌ای در جهان هستند. یکی از راهکارهای کاهش مصرف سیمان، استفاده از مواد پسماند صنایع به جای سیمان است. در همین راستا بتن ژئوپلیمری به تازگی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در این پژوهش اثر میکروسیلیس و الیاف CFRP بر خواص مکانیکی و دوام بتن ژئوپلیمری پایه سرباره کوره بلند بررسی شده است. نمونه‌های مختلف با ترکیب ۰ الی ۱۰٪ میکروسیلیس و همین طور ۰ الی ۳٪ الیاف ساخته و آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی، اولتراسونیک، جذب آب، نفوذپذیری کلرید سریع و مقاومت اسیدی روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن میکروسیلیس تا ۵٪ باعث افزایش ۱۱٪ مقاومت فشاری، ۷/۵٪ مقاومت کششی، ۱۰٪ کاهش جذب آب، ۲۴٪ کاهش نفوذپذیری یون کلر و ۸۸٪ افزایش مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمری شد؛ این در حالی بود که افزودن ۳٪ الیاف CFRP سبب افت ۱۸٪ مقاومت فشاری، ۱/۵٪ مقاومت کششی، ۷٪ افزایش جذب آب، ۲۰٪ افزایش نفوذپذیری یون کلر و ۱۹٪ کاهش مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمری شد. علاوه بر این، بررسی ریزساختاری بتن ژئوپلیمری به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) حاکی از کاهش ترک در نمونه حاوی ۵٪ میکروسیلیس بود. همچنین چسبندگی مناسبی میان الیاف CFRP و بتن ژئوپلیمری مشاهده نشد.

واژه‌های کلیدی: بتن ژئوپلیمری، میکروسیلیس، الیاف CFRP، خواص مکانیکی بتن، دوام بتن

۱- مقدمه

سیمان در جهان است که سبب انتشار حدود ۷٪ از کل گاز CO₂ موجود در جو می‌شود. از طرفی مواد اولیه مورد نیاز برای تولید سیمان تجدید پذیر نبوده و به سرعت در حال کاهش هستند و از سوی دیگر، در بسیاری از ضایعات صنعتی و

ماده اصلی بتن معمولی، سیمان پورتلند (OPC) است که تولید آن نقش عمده‌ای در گرم شدن کره زمین و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. گزارش‌ها حاکی از تولید سالانه ۱/۶ میلیارد تن

مورد بتن‌های ژئوپلیمری پایه سرباره کوره بلند وجود دارد. بر این اساس، هدف از این پژوهش ایجاد بتن ژئوپلیمری پایه سرباره کوره بلند و بررسی اثر پوزولان میکروسیلیس و الیاف CFRP بر خواص مکانیکی و دوام این بتن است. برای این منظور، ابتدا بتن ژئوپلیمری با درصدهای مختلف میکروسیلیس و الیاف CFRP تهیه شده و سپس اثر این افزودنی‌ها روی مقاومت فشاری، مقاومت کششی، نفوذ یون کلر، جذب آب، و مقاومت اسیدی بررسی شدند.

۲- روش انجام آزمایش

۲-۱- مواد استفاده شده

سنگدانه استفاده شده در این پژوهش از شرکت دی در شهریار تهیه شده است که مطابق با استاندارد ASTM C33 [13] است. مدول نرمی سنگدانه ریز (ماسه) برابر $3/4$ و وزن مخصوص آن $2/56 \text{ gr/cm}^3$ است. حداکثر اندازه سنگدانه درشت (شن) برابر $12/5$ میلی‌متر در نظر گرفته شد. دانه‌بندی سنگدانه‌ها مطابق استاندارد ASTM C136 [14] در نظر گرفته شد. جدول (۱) دانه‌بندی سنگدانه‌های استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

سرباره کوره بلند استفاده شده در این پژوهش، از شرکت بنا بنیان زیست فناوری تهیه شد. این سرباره توسط آسیاب گلوله‌ای به مدت ۳۰ دقیقه به صورت پودر در آمده و سپس از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شد. ترکیب شیمیایی سرباره کوره بلند که به روش طیفسنجی فلوئورسانس اشعه ایکس (XRF^1) بدست آمده در جدول (۲) نشان داده شده است. این ترکیب شیمیایی با استاندارد ACI 233R [15] هماهنگی خوبی دارد. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از پودرهای سرباره کوره بلند در شکل (۱ الف) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این پودرها با میانگین اندازه $2/5$ میکرومتر شکلی نامنظم و گوشه دار دارند.

الیاف CFRP از شرکت مواد کامپوزیت نوید خریداری شد. مورفولوژی الیاف در شکل (۱ ب) آورده شده است. الیاف دارای میانگین قطر $6/8$ میلی‌متر و بیشترین طول ۶ میلی‌متر هستند.

کشاورزی موادی با خاصیت سیمانی وجود دارند که بیشتر در محل‌های دفن زباله ریخته می‌شوند. پس از این پسماندها می‌توان به عنوان جایگزین سیمان برای حفظ محیط زیست و رفع مشکل دفع زباله استفاده کرد. تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای برای جایگزینی سیمان پرتلند انجام شده است که یکی از آنها استفاده از مواد چسباننده معروف به ژئوپلیمر است. این مواد چسباننده از واکنش پلیمریزاسیون ماده‌ای غنی از سیلیکون و آلومینیم با یک محلول قلیایی پایه سدیمی یا پتاسیمی بدست می‌آید. محصول نهایی این واکنش ساختار پلیمری سه بعدی از پیوندهای Si-O-Al-O است [1-3]. مواد چسباننده توسط محلول قلیایی فعال شده و تشکیل مواد آمورف (بی‌شکل) می‌دهند [4,5].

یکی از مواد افزودنی که برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن به آن افزوده می‌شود، پوزولان میکروسیلیس است که تقریباً از $96\% \text{ SiO}_2$ تشکیل شده است. تاکنون نقش میکروسیلیس بر افزایش مقاومت و دوام بتن پرتلند در پژوهش‌های بسیاری به اثبات رسیده است. با این حال اثر میکروسیلیس بر ویژگی‌های بتن ژئوپلیمری هنوز چندان بررسی نشده است. گزارش‌های موجود حاکی از آن است که افزودن این پوزولان در بتن ژئوپلیمری با افزایش تشکیل ژل‌های C-S-H، C-A-S-H و N-A-S-H منجر به بهبود استحکام فشاری می‌شود [3,6]. ضمناً افزایش واکنش پذیری میان میکروسیلیس و آلومینیم سرباره کوره بلند، سبب بهبود پلیمریزاسیون و به تبع آن افزایش دوام و مقاومت بتن می‌شود [7,8].

از طرف دیگر یکی از مشکلات بتن ژئوپلیمری مانند بتن معمولی ضعف مقاومت کششی است [9, 10]. اضافه کردن الیاف به بتن باانتقال نیروهای کششی و کاهش انقباض منجر به بهبود مقاومت بتن در برابر ترک می‌شوند. تاکنون اثر الیاف مختلفی مانند فولاد، پلی اتیلن، پلی وینیل الکل، کربن و پلیمر تقویت شده با فیبر کربن بر رفتار بتن ژئوپلیمری مورد بررسی قرار گرفته است [11, 12]. با این وجود، تاکنون پژوهشی در مورد اثر الیاف CFRP روی بتن ژئوپلیمری انجام نشده است. علاوه بر این، بیشتر پژوهش‌های در مورد بتن‌های ژئوپلیمری پایه خاکستر بادی انجام شده است و اطلاعات بسیار کمی در

میکروسیلیس استفاده شده نیز از شرکت صنایع فرو آلیاژ ایران تهیه شد. ترکیب شیمیایی میکروسیلیس که به روش طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) بدست آمده، در جدول (۲) آورده شده است. این ترکیب شیمیایی با استاندارد ACI234R[16] در توافق کامل است. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از پودرهای میکروسیلیس در شکل (۱ ج) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود این پودرها کروی شکل بوده و میانگین اندازه ۲۰۰ نانومتر دارند.

جدول ۱. دانه بندی سنگدانه های استفاده شده

Fine aggregate		
% used	Sieve size (mm)	Sieve No.
5%	4.75	4
15%	2.36	8
30%	1.18	16
25%	0.425	40
20%	0.250	60
5%	0.150	100
Coarse aggregate		
% used	Sieve size (mm)	Sieve No.
50	12.5	1.2
50	9.5	3.8

Table 1. Grading of used aggregates.

۲-۲- مخلوط کردن بتن، آماده سازی نمونه، عمل آوری

به طور کلی مواد ژئوپلیمری برای فعال شدن نیاز به محلول قلیایی دارند. در این پژوهش به منظور فعال نمودن سرباره کوره بلند از مخلوط سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم با نسبت ۲/۵ برابر برای تولید محلول قلیایی استفاده شد. طرز تهیه این محلول بدین ترتیب است که ابتدا محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۸ مولار تهیه شد [17]. برای تهیه این محلول دانه های هیدروکسید سدیم درون آب مقطر ریخته شده و توسط همزن مغناطیسی حل شدند. از آنجا که این حل شدن گرمازا است پیش از ادامه فعالیت، فرصت داده شد تا محلول تا دمای محیط سرد شود [18]. در ادامه محلول هیدروکسید سدیم با محلول سیلیکات سدیم با نسبت ۱ به ۲/۵ مخلوط شدند.

برای طرح مخلوط بتن، از آنجایی که هنوز آیین نامه ای برای طرح مخلوط بتن ژئوپلیمری در دسترس نیست، چگالی بتن ژئوپلیمر ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب فرض شده و دیگر محاسبات بر اساس طرح مخلوط پیشنهادی Venkatesan و همکاران [19] انجام شده است. حجم کل ترکیبی اشغال شده توسط دانه های درشت و ریز ۷۷٪ و نسبت مایع قلیایی به مواد سیمانی برابر ۰/۴۰ در نظر گرفته شد. مقاومت هدف بتن برابر ۴۰ مگاپاسکال به عنوان یک بتن متعارف سازه ای در نظر گرفته شد. جدول (۳) طرح مخلوط بتن را برای نمونه های مختلف نشان می دهد. در شماره گذاری نمونه ها، حرف G نشان دهنده بتن ژئوپلیمری و حروف F و S به ترتیب بیانگر الیاف و میکروسیلیس مورد استفاده هستند. اعداد ذکر شده نیز نشانگر درصد مورد استفاده مصالح است. شایان ذکر است که بتن ژئوپلیمری ساخته شده با ۱۰۰٪ سرباره (GF0S0) به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد.

ابتدا موادی که برای مخلوط کردن احتیاج است، وزن شده و به مدت ۳ تا ۴ دقیقه در شرایط خشک مخلوط شدند. سپس محلول قلیایی که ترکیبی از هیدروکسید سدیم و محلول سیلیکات سدیم است به مخلوط خشک اضافه شد. برای بهبود کارایی بتن، آب و روان کننده به مخلوط اضافه شد. مخلوط کردن حدود ۲-۳ دقیقه ادامه داشته و به شکلی انجام شد که بتن یکنواختی حاصل شود. پس از مخلوط کردن، بتن در قالب ریخته شده و متراکم شد. نمونه ها ۲۴ ساعت در قالب نگهداری شده سپس از قالب باز شده و ۲۸ روز در آب با دمای $24 \pm 1^\circ\text{C}$ نگهداری شدند.

۳- آزمایش های انجام شده

۳-۱- آزمایش فشاری

آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها طبق استاندارد BS 1881-116 [20] انجام شد. نمونه های بتنی مکعبی به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی متر ساخته شده و سپس نمونه ها برای آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. تمام نمونه ها با استفاده از دستگاه جک ۲۰۰ تن تحت بار یکنواخت $140 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ تا زمان شکست نمونه قرار گرفتند.

جدول ۲. ترکیب شیمیایی سرباره و میکروسیلیس

Sample	MgO (wt.%)	Fe ₂ O ₃ (wt.%)	CaO (wt.%)	Al ₂ O ₃ (wt.%)	SiO ₂ (wt.%)
GGBS	11	1.5	38.5	9.5	39.5
Microsilica	0.3	0.8	1.2	1.2	96.5

Table 2. Chemical composition of GGBS and microsilica.

شکل ۱. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از الف) سرباره کوره بلند، ب) الیاف CFRP و ج) میکروسیلیس

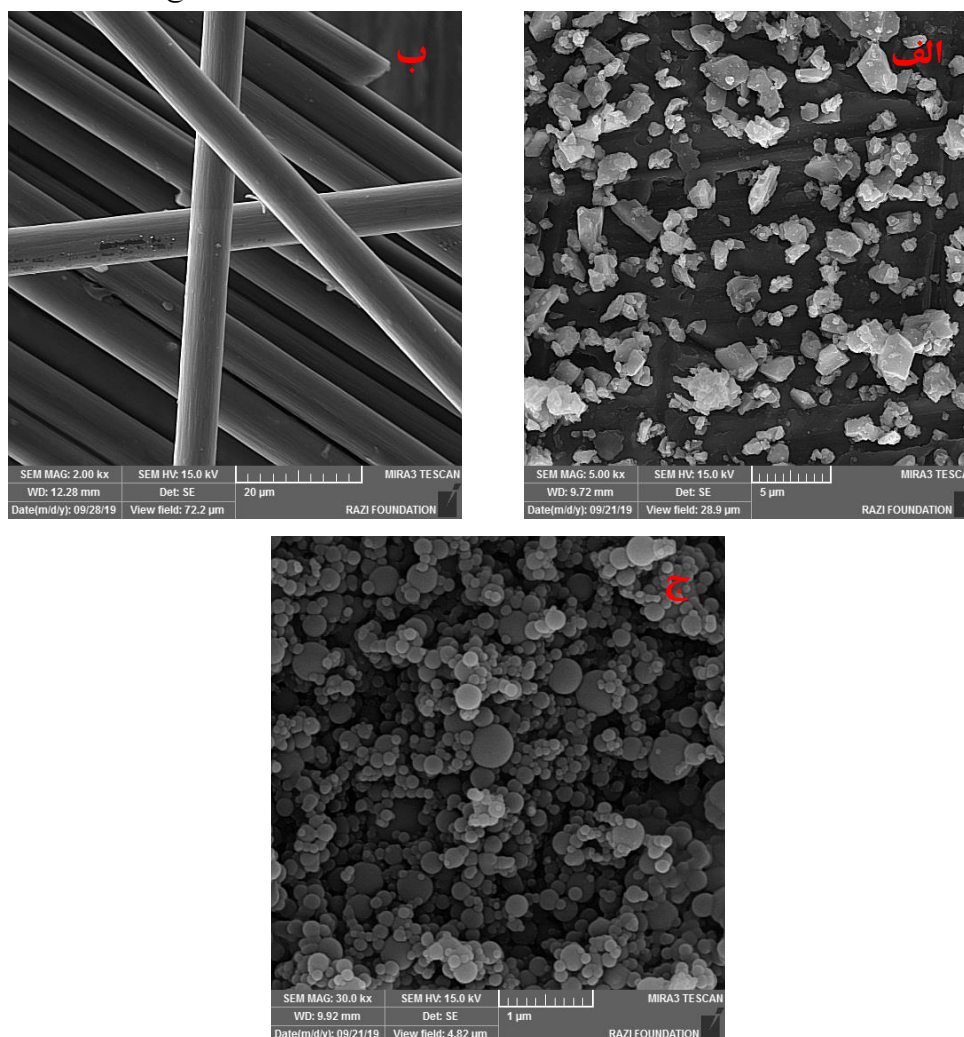


Fig. 1. SEM images of a) GGBS b) CFRP fibers c) microsilica.

جدول ۳. طرح مخلوط بتن

Sample	GGBS (Kg/m ³)	Micro silica (Kg/m ³)	Fiber (Kg/m ³)	Gravel (Kg/m ³)	Sand (Kg/m ³)	Water (Lit/m ³)	Superplasticizer (Lit/m ³)	NaOH (Kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (Kg/m ³)
GF0S0	394	0	0	1201	647	65	7	45	113
GF1.5S0	388.1	0	5.90	1201	647	65	7	45	113
GF3S0	382.2	0	11.80	1201	647	65	7	45	113
GF0S5	374.3	19.7	0	1201	647	65	7	45	113
GF0S10	354.6	39.4	0	1201	647	65	7	45	113
GF1.5S5	368.4	19.7	5.90	1201	647	65	7	45	113
GF1.5S10	348.7	39.4	5.90	1201	647	65	7	45	113
GF3S5	362.5	19.7	11.8	1201	647	65	7	45	113
GF3S10	342.8	39.4	11.8	1201	647	65	7	45	113

Table 3. Mix proportion of concrete.

بیشینه بار قابل تحمل در لحظه گسیختگی نمونه به عنوان مقاومت فشاری در نظر گرفته شد.

۳-۲- آزمایش کششی

آزمایش مقاومت کششی (برزیلی) طبق استاندارد ASTM C496 [21] آزمایش شد. نمونه‌های بتنی استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر ساخته شده و سپس نمونه‌ها برای آزمایش مقاومت کششی برزیلی با استفاده از جک ۲۰۰ تن در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند.

۳-۳- آزمایش اولتراسونیک

آزمایش التراسونیک طبق استاندارد ASTM C97[22] انجام شد. دستگاه اولتراسونیک شامل یک تولید کننده موج و یک وسیله نشان‌گر زمان عبوری موج است. از آنجا که سرعت موج بستگی به ویژگی‌های الاستیک مصالح دارد، این روش می‌تواند به عنوان یک ابزار ساده برای ارزیابی کیفیت بتن به کار رود. برای این آزمایش، نمونه‌های مکعبی به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی متر ساخته شده و سپس نمونه‌ها برای آزمایش در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفت.

۳-۴- آزمایش جذب آب

آزمایش جذب آب طبق استاندارد BS1881-122[23] آزمایش شد. نمونه‌های بتنی مکعبی به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر ساخته شده و پس از ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفت. برای انجام این آزمایش نمونه‌ها پس از عمل‌آوری، در داخل گرمچال (در دمای 50°C و به مدت ۳ روز) خشک شده و وزن شدند. سپس، نمونه‌ها در داخل آب به شکلی قرار گرفتند که $5/0$ سانتی‌متر از کف آن‌ها در داخل آب قرار گرفته و آب از پایین نمونه امکان نفوذ داشته باشد. با تعیین تغییر وزن نمونه در زمان‌های مشخص تا ۲۴ ساعت میزان جذب آب نمونه‌ها تعیین می‌شود.

۳-۵- آزمایش نفوذ پذیری کلرید سریع

آزمایش نفوذپذیری کلریدسریع (RCPT) مطابق با استاندارد ASTM C1202[24] انجام شد. این آزمایش اندازه‌گیری سریع

هدایت الکتریکی بتن باتوجه به مقاومت آن در برابر نفوذ یون کلرید است. نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۵ سانتی‌متر ساخته شده و پس از ۲۸ روز از تاریخ ساخت نمونه مورد آزمایش قرار گرفتند. ولتاژ ۶۰ ولت برای ایجاد تسریع نفوذ یون کلرید بین دو سر سلول که حاوی محلول ۳٪ کلرید سدیم و محلول ۰/۳N هیدروکسید سدیم است به مدت ۶ ساعت برقرار شده و جریان عبوری از نمونه در هر ۳۰ دقیقه تا ۶ ساعت اندازه‌گیری شد. همزمان ناخالصی کلرید و درجه حرارت نیز مانیتور شد. بارکلی که از طریق نمونه‌ها عبور داده شده در واحد کولومب (مقدار الکتریسته برابر با بار $28/6$ ضربدر ۱۰ به توان ۱۸ الکترون یا به عبارت دیگر جریان یک آمپر در یک ثانیه) محاسبه شد. این بار نشان دهنده مقاومت نمونه در برابر نفوذ یون کلرید است. هرچه بارکل بیشتر باشد نفوذپذیری نمونه بیشتر است.

۳-۶- آزمایش مقاومت اسیدی

برای آزمایش مقاومت اسیدی، نمونه‌های بتنی مکعبی به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر ساخته شده و سپس نمونه‌ها برای آزمایش در سن ۲۸ روز در اسید سولفوریک ۵۰٪ قرار داده شدند. در یک سیکل ۲۴ ساعته مقدار درصد افت مقاومت محاسبه شد.

۳-۷- بررسی ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

در این پژوهش از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی TESCAN مدل MIRA3 برای بررسی ریزساختار بتن ژئوپلیمری استفاده شد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- بررسی مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود افزودن میکروسیلیس تا ۵٪ باعث افزایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری شد. با افزایش بیشتر میکروسیلیس و رساندن آن به ۱۰٪ تغییر چندانی روی مقاومت فشاری مشاهده

خوبی دارد. به طور کلی خواص مکانیکی بتن‌های ژئوپلیمری وابستگی زیادی به نسبت $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ دارد. با افزایش این نسبت، میزان حلالیت یون‌ها و فرایند پلیمریزاسیون افزایش می‌یابد که این امر سبب بهبود مقاومت کششی نمونه‌ها می‌شود [19].

شکل ۳. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی بتن ژئوپلیمری

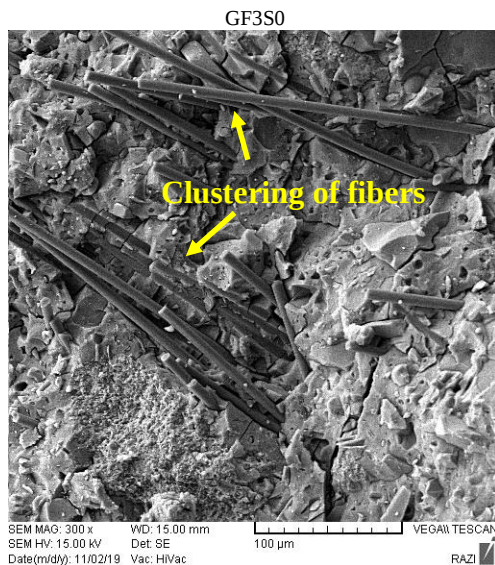


Fig. 3. SEM image of GF3S0 geopolymer concrete.

به عبارت دیگر با افزودن میکروسیلیس، SiO_2 فعال بیشتر می‌شود که سبب ایجاد پیوندهای سیلیکونی (Si-O-Si-O-Si-O) می‌شود. این پیوند زنجیری شکل تمامی اجزا بتن را در کنار یکدیگر نگاه می‌دارد و یک ترکیب پیوسته ایجاد می‌کند. ضمناً نرمی بالای ذرات میکروسیلیس و شکل کروی آنها باعث پر کردن خلل و فرج بتن شده و ساختار متراکم تری ایجاد می‌کند.

در مورد افزودن الیاف CFRP، برخلاف انتظار مشاهده می‌شود که مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی بتن نیز بر اثر افزودن الیاف کاهش می‌یابد، اگرچه این کاهش مقاومت اندک بوده و به ۱/۵٪ محدود می‌شود. در عین حال با افزایش مقدار الیاف از ۱/۵٪ تا ۳٪، مقاومت کششی بتن تغییر چندانی نمی‌کند. به طور کلی الیاف CFRP نه تنها باعث جلوگیری از گسترش ترک‌ها در بتن ژئوپلیمری نمی‌شوند بلکه این الیاف دارای چسبندگی مناسبی با بتن نبوده و نمی‌توانند به شکل مناسبی در بتن مهار

نشود. دلیل این امر می‌تواند به اضافی بودن سیلیس بتن ژئوپلیمری دارای ۱۰٪ میکروسیلیس نسبت داده شود که واکنش ژئوپلیمراسیون نداده و باعث خود خشکیدن^۱ بتن شده است. بدین معنا که آب مورد نیاز بتن جذب شده و آب کافی برای انجام واکنش از دست می‌رود [6]. همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود مقاومت فشاری بتن با افزودن الیاف CFRP کاهش یافت. علت این امر همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، می‌تواند به دلیل خوشه‌ای شدن الیاف در حین فرایند ساخت باشد. روند مشابهی توسط Payakaniti و همکاران [25] برای بتن ژئوپلیمری پایه خاکستر بادی تقویت شده با الیاف کربنی مشاهده شده است.

شکل ۲. اثر میکرو سیلیس و الیاف CFRP بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

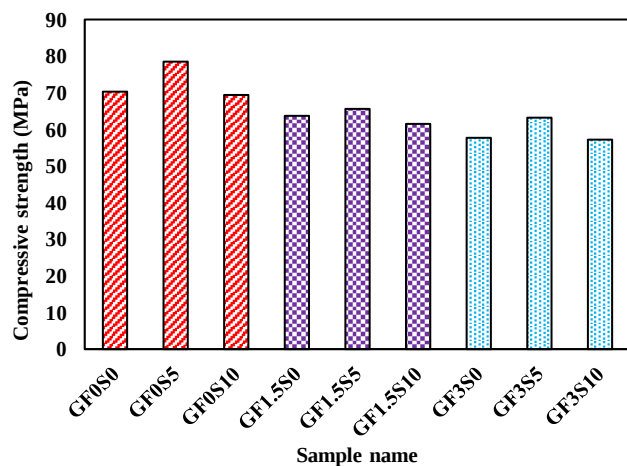


Fig. 2. Effect of micro silica and CFRP fibers on compressive strength of geopolymer concrete.

۴-۲- بررسی مقاومت کششی

نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت کششی (آزمایش برزیلی) پس از عمل آوری ۲۸ روزه در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق شکل، افزودن میکروسیلیس به بتن ژئوپلیمری سبب افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها شد. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود بیشینه مقاومت کششی مربوط به بتن‌های ژئوپلیمری حاوی ۵٪ میکروسیلیس است. این نتیجه با روند مشاهده شده در مقاومت فشاری هماهنگی

¹Self-desiccation

۴-۴- بررسی جذب آب

جذب آب بتن بعد از گذشت زمان ۲۴ ساعت به عنوان اولین و ساده‌ترین آزمایش برای بررسی دوام بتن ژئوپلیمری روی نمونه‌ها انجام شد. همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، جذب آب نمونه‌های بتنی ناشی از پدیده مویینگی در بتن است. با این حال، افزودن میکروسیلیس به میزان قابل توجهی از میزان جذب آب بتن ژئوپلیمری می‌کاهد. با افزودن ۵٪ میکروسیلیس، ۱۰٪ جذب آب نمونه کاهش می‌یابد. مطابق شکل، برای کاهش جذب آب، مقدار ۵٪ میکروسیلیس بهینه بوده و با افزودن ۵٪ دیگر میکروسیلیس جذب آب در حدود ۴٪ افزایش می‌یابد.

این بدان دلیل است که میکروسیلیس موجود در بتن ژئوپلیمری با بهبود فرایند پلیمریزاسیون سبب بهبود چسبندگی و به تبع آن فشرده‌تر شدن بتن می‌شود. علاوه بر این، در صورت عدم واکنش میکروسیلیس که ناشی از اضافی بودن آن است (بتن حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس)، این ماده می‌تواند به عنوان یک پرکننده عمل کرده و خلل و فرج موجود در بتن را کاهش دهد و منجر به کاهش در نفوذ پذیری بتن ژئوپلیمری شود. علاوه بر این، کمک میکروسیلیس به انجام واکنش ژئوپلیمراسیون موجب از بین رفتن آب اضافی بتن شده و ریزترک‌ها را کاهش می‌دهد که خود منجر به کاهش جذب آب بتن می‌شود.

شکل ۶. اثر میکروسیلیس و الیاف CFRP بر جذب آب بتن ژئوپلیمری

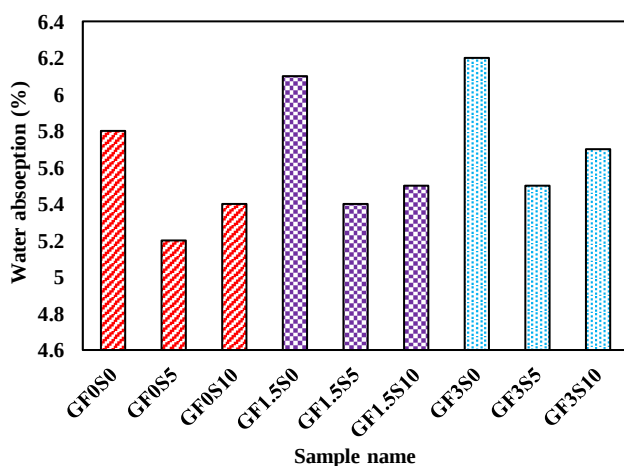


Fig. 6. Effect of micro silica and CFRP fibers on water absorption of geopolymer concrete.

همچنین همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود افزودن الیاف تاثیر منفی برافزایش جذب آب بتن دارد. علت این پدیده،

شوند. در نتیجه با ایجاد اختلال در پیوستگی بتن باعث کاهش مقاومت کششی آن می‌شوند.

شکل ۴. اثر میکروسیلیس و الیاف CFRP بر مقاومت کششی بتن ژئوپلیمری

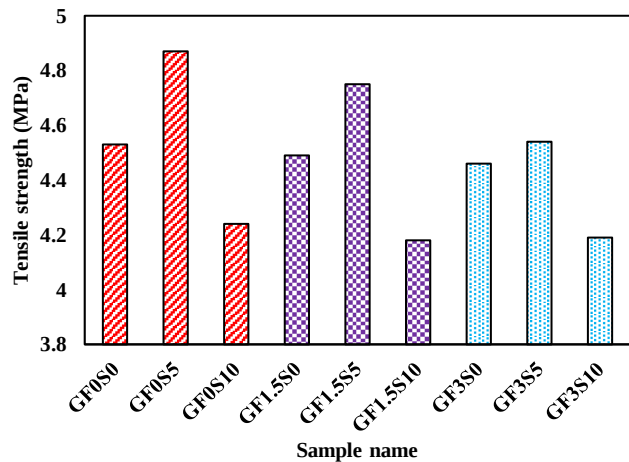


Fig. 4. Effect of micro silica and CFRP fibers on tensile strength of geopolymer concrete.

۴-۳- بررسی آزمون اولتراسونیک

نتایج حاصل از آزمایش اولتراسونیک در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق نتایج بدست آمده، روند تغییرات سرعت پالس بدست آمده مشابه با نتایج آزمایش مقاومت فشاری است؛ یعنی با افزایش درصد میکروسیلیس سرعت پالس ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

شکل ۵. اثر میکروسیلیس و الیاف CFRP بر سرعت پالس بتن ژئوپلیمری

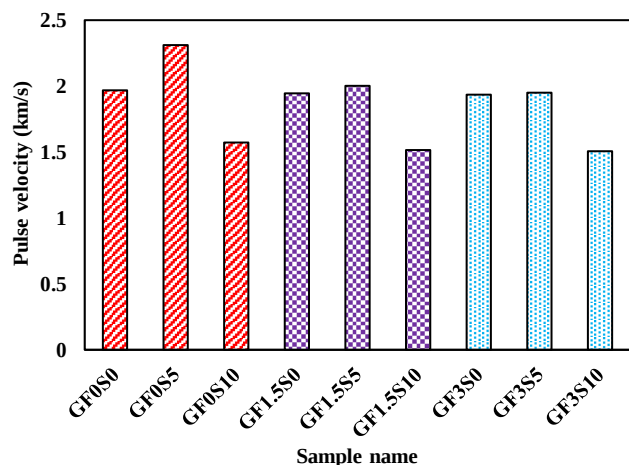


Fig. 5. Effect of micro silica and CFRP fibers on pulse velocity of geopolymer concrete.

۴-۶- بررسی مقاومت اسیدی

شکل (۸) نتایج حاصل از آزمایش مقاومت اسیدی بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل می‌توان مشاهده کرد، افت مقاومت فشاری نمونه شاهد ۵۸/۱ است که با افزودن ۵٪ میکروسیلیس به ۶/۸٪ کاهش یافته است. این پدیده نشانگر اثر قابل توجه میکروسیلیس بر مقاومت در برابر حمله سولفات‌ها دارد. با افزودن ۵٪ دیگر میکروسیلیس مقاومت فشاری نمونه افت می‌کند (۲۰/۵٪ افت مقاومت).

بنابراین می‌توان گفت که در این حالت مقدار ۵٪ میکروسیلیس بهینه بوده و بیش از آن اثر منفی زیادی بر مقاومت اسیدی نمونه دارد. به همین ترتیب با افزودن الیاف، مقاومت اسیدی به شدت کاهش می‌یابد. افزودن ۱/۵٪ الیاف باعث ۶۶/۷٪ افت در مقاومت اسیدی نمونه می‌شود. علت افزایش نفوذپذیری نمونه به علت افزودن الیاف است. به طور کلی نتایج این تحقیق با سایر تحقیقات گذشته همخوانی مناسبی دارد که در آنها پوزولانهای طبیعی و موادی مانند متاکائولن به عنوان مواد پایه ژئوپلیمری استفاده شده است [26,27].

شکل ۸. اثر میکرو سیلیس و الیاف CFRP بر مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمری

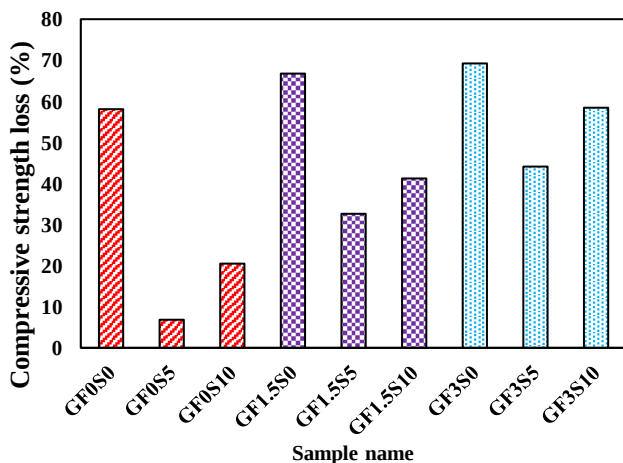


Fig. 8. Effect of micro silica and CFRP fibers on acid resistance of geopolymer concrete.

۴-۷- بررسی ریز ساختار

به منظور درک بهتر اثر میکروسیلیس و الیاف CFRP بر ریزساختار بتن ژئوپلیمری، نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی بررسی شدند.

تغییر در پیوستگی بتن با افزودن الیاف است که راه را برای نفوذ آب به بتن فراهم می‌کند. به طور کلی بتن دارای الیاف دارای وزن مخصوص کمتری (با در نظر گرفتن وزن مخصوص الیاف و بتن) نسبت به بتن بدون الیاف است. پس بتن الیافی متراکم‌تر بوده و دارای حفرات کمتری برای ورود آب به بتن است.

۴-۵- بررسی نفوذ پذیری کلرید سریع

برای انجام آزمایش RCPT، بار عبوری از هر یک از نمونه‌های بتنی اندازه‌گیری شده و نتایج آن در شکل ۷ آورده شد. به طور کلی، روند تغییرات ناشی از افزودن الیاف و میکروسیلیس مشابه با آزمایش جذب آب است. با افزودن میکروسیلیس، نفوذ پذیری یون‌های کلرید کاهش می‌یابد. مطابق شکل، ۵٪ میکروسیلیس مقدار بهینه برای کاهش نفوذپذیری است به طوری که باعث ۲۴٪ کاهش نفوذپذیری می‌شود. به طور کلی میکروسیلیس در مقدار بهینه خود به شکل قابل حل باعث سرعت گرفتن واکنش پلیمریزاسیون شده و مواد اولیه بیشتری را به ژل پلیمری (ژلهای CSH, CASH و NASH) تبدیل می‌کند.

شکل ۷. اثر میکرو سیلیس و الیاف CFRP بر نفوذ پذیری بتن ژئوپلیمری

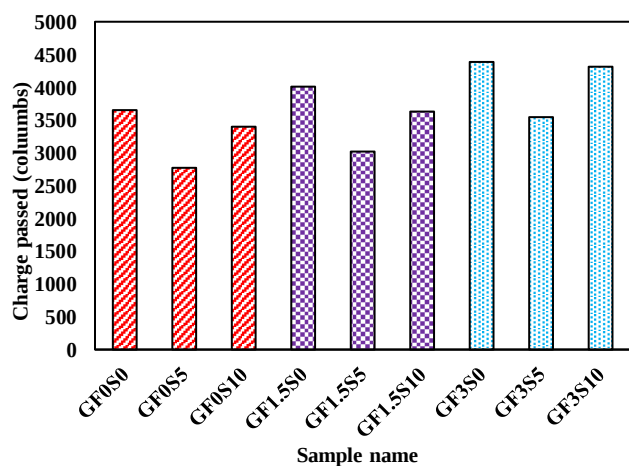


Fig. 7. Effect of micro silica and CFRP fibers on RCPT of geopolymer concrete.

در مورد اثر الیاف می‌توان گفت که مانند آزمایش جذب آب، افزودن الیاف باعث افزایش نفوذپذیری می‌شود. بدترین حالت مربوط به نمونه حاوی ۳٪ الیاف است که دارای نفوذپذیری بیش از ۲۰٪ نسبت به نمونه شاهد است.

شکل ۹. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه ها الف) GF0S0 ب) GF0S5 ج) GF0S10 د) GF3S0

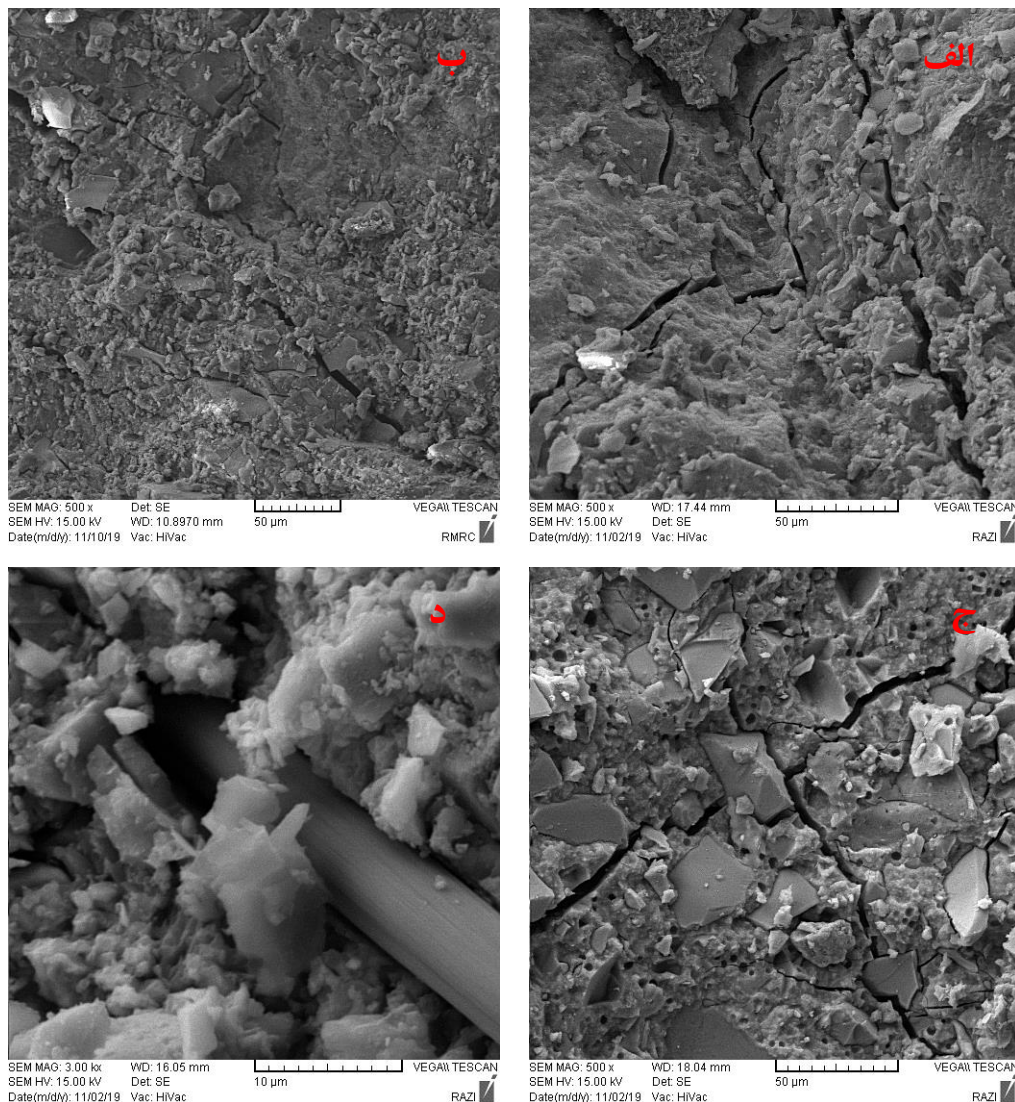


Fig. 9. SEM images of the samples a) GF0S0 b) GF0S5 c) GF0S10 d) GF3S0.

وجود ترک دارای حفرات نسبتاً زیادی است. با افزایش درصد میکروسیلیس، کارایی بتن کاهش یافته و عمل تراکم بتن به خوبی انجام نشده است که منجر به باقیمانده ریز حفرات در بتن شده است. علاوه بر این، در این نمونه ذرات بتن آگلومره شده و دارای یکنواختی کمتری نسبت به نمونه قبل هستند. این نتایج با نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی و همین طور جذب آب سازگار است. هرچه نمونه یکنواخت‌تر و متراکم‌تر باشد مقاومت نمونه بالاتر رفته و جذب آب آن کاهش می‌یابد. شکل (۹ د) نشان می‌دهد که چسبندگی مناسبی بین الیاف CFRP و خمیر مواد چسباننده وجود ندارد.

مطابق شکل (۹)، ریز ترک‌هایی در تمامی تصاویر مشاهده می‌شود که می‌تواند اثر منفی بر مقاومت و دوام بتن داشته باشد. این ترک‌ها به علت وجود آب اضافی در بتن به وجود آمده که به علت تبخیر آب، بتن دچار انقباض و ترک خوردگی شده است.

این ترک‌ها پراکنده بوده و دارای ابعاد و شکل متفاوت هستند. با مقایسه شکل (۹ الف) با شکل (۹ ب) می‌توان مشاهده کرد که نمونه حاوی ۵٪ میکروسیلیس دارای ترک‌های کمتری است که نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهد. این نمونه دارای زل یکنواخت‌تری بوده و دارای مرزهای کمتری از ذرات بتن است. این پدیده منطبق با آزمایش‌های دوام است. شکل (۹ ج) نشان می‌دهد که نمونه حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس علاوه بر

addition of silica fume. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2192053.

[8] Okoye, F., Durgaprasad, J., Singh, N. 2016. Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete, *Ceramics International* 42(2),3000-3006.

[9] Pan, Z., Sanjayan, J. G., Rangan, B. V. 2011 Fracture properties of geopolymer paste and concrete, *Magazine of concrete research*, 63(10),763-771.

[10] Neville A.M., Brooks J.J., Concrete technology, Longman Scientific & Technical England, 1987.

[11] Payakaniti, P., Pinitsoonthorn, S., Thongbai, P., Amornkitbamrung, V. and Chindaprasirt, P. 2018. Effects of carbon fiber on mechanical and electrical properties of fly ash geopolymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 5(6),14017-14025.

[12] Liu, L.P., Zhu, H., He, Y. and Cui, X.M. 2015. Preparation of Carbon Fiber Reinforced Geopolymer Composites. In *Advanced Materials Research* (Vol. 1081, 275-278). Trans Tech Publications.

[13] ASTM C33, A. 2004. Standard specification for concrete aggregates. *American Society for Testing and Material*, West Conshohocken, PA.

[14] ASTM, C 136. (2006). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. *American Society for Testing and Material*. West Conshohocken, PA.

[15] Virgalitte, S.J., Luther, M.D., Rose, J.H., Mather, B., Bell, L.W., Ehmke, B.A., Klieger, P., Roy, D.M., Call, B.M., Hooton, R.D. and Lewis, D.W. 1995. Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete. *American Concrete Institute*, ACI Report 233R-95.

[16] Aldred, J.M., Holland, T.C., Morgan, D.R., Roy, D.M., Bury, M.A., Hooton, R.D., Olek, J., Scali, M.J., Detwiler, R.J., Jaber, T.M. and Ozyildirim, H.C. 2006. Guide for the use of silica fume in concrete. *ACI-American Concrete Institute-Committee: Farmington Hills, MI, USA*, 234.

[17] Dadsetan, S., Siad, H., Lachemi, M. and Sahmaran, M. 2019. Construction and demolition waste in geopolymer concrete technology: a review. *Magazine of Concrete Research*, 71(23), 1232-1252.

[18] Nazari, A., Bagheri, A. and Riahi, S. 2011. Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash. *Materials Science and Engineering: A*, 528(24),7395-7401.

[19] Venkatesan, R.P. and Pazhani, K.C. 2016. Strength and durability properties of geopolymer concrete made with ground granulated blast furnace slag and black rice husk ash. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(6),2384-2391.

[20] BS part 116, 1983, Method for determination of compressive strength of concrete cubes, *British Standards Institution*, London

[21] ASTM, C496/C496M-11. 2011, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر افزودن میکروسیلیس و الیاف CFRP بر خواص بتن ژئوپلیمری پایه سرباره کوره بلند آهن بررسی شد. بعد از ساخت و عمل آوری نمونه‌ها آزمایش‌های مکانیکی و دوام روی هر نمونه انجام شد. خلاصه نتایج بدست آمده از این پژوهش را می‌توان به شرح ذیل بیان نمود:

۱- افزودن میکروسیلیس تا ۵٪ به بتن ژئوپلیمری باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی شد. با این حال افزایش بیش از حد میکروسیلیس (۱۰٪) تاثیر به سزایی روی مقاومت فشاری نداشت.

۲- افزودن الیاف CFRP منجر به کاهش مقاومت فشاری و کششی بتن ژئوپلیمری شد.

۳- رفتار مشابه خواص مکانیکی در مورد دوام بتن ژئوپلیمری مشاهده شد. به عبارت دیگر درصد بهینه استفاده از میکروسیلیس در مورد دوام بتن ژئوپلیمری برابر ۵٪ بود. همچنین استفاده از الیاف CFRP سبب کاهش دوام بتن ژئوپلیمری شد.

۷- مراجع

- [1] Saha, S. and Rajasekaran, C. 2017. Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 146,615-620.
- [2] Mehta, K.P. 2001. Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete international*, 23(10),61-66.
- [3] Phoo-ngernkham, T., Chindaprasirt, P., Sata, V., Hanjitsuwan, S. and Hatanaka, S. 2014. The effect of adding nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Materials & Design*, 55,58-65.
- [4] Khale, D. and Chaudhary, R. 2007. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of materials science*, 42(3),729-746.
- [5] Ma, C.K., Awang, A.Z. and Omar, W. 2018. Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 186,90-102.
- [6] Elchalakani, M., Dong, M., Karrech, A., Li, G., Mohamed Ali, M.S., Xie, T. and Yang, B. 2018. Development of Fly Ash-and Slag-Based Geopolymer Concrete with Calcium Carbonate or Microsilica. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(12), 04018325.
- [7] Lee, N.K., An, G.H., Koh, K.T. and Ryu, G.S. 2016. Improved reactivity of fly ash-slag geopolymer by the

- [22]ASTM C597-02. 2002. Standard test method for pulse velocity through concrete.*Annual Book of American Society of Testing and Materials*,04-02.
- [23] BS 1881-122, 1983, Testing concrete. Method for determination of water absorption.”*British Standards Institution*, London.
- [24]ASTM, C, 2012, Standard test method for electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration.*Annual Book of ASTM Standards*, 4,7.
- [25]Payakaniti, P., Pinitsoonthorn, S., Thongbai, P., Amornkitbamrung, V. and Chindaprasirt, P. 2018. Effects of carbon fiber on mechanical and electrical properties of fly ash geopolymer composite.*Materials Today: Proceedings*, 5(6),14017-14025.
- [26] Khater, H. M. 2013. Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 5(12), 1-12.
- [27] Moon, J., Bae, S., Celik, K., Yoon, S., Kim, K. H., Kim, K. S., & Monteiro, P. J. 2014. Characterization of natural pozzolan-based geopolymetric binders. *Cement and Concrete Composites*,53, 97–104.

Effect of Microsilica and CFRP Fibers on Mechanical and Durability Properties of Ground Granulated Blast Furnace Slag –Based Geopolymer Concrete

Shayan Najmi¹, Abtin Rahbari¹, Ehsan Darvishan², Mohsen Adabi^{3*}

1. Msc, Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

3. Assistant Professor, Department of Metallurgy and Materials Science, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

*adabi@riau.ac.ir

Abstract

Concrete is the most widely used building material in construction industry worldwide and its constituents are easily accessible everywhere. However, cement industry, as the producer of the primary binder of concrete, is one of the effective sources of environment degradation. Cement production needs extraction of mineral resources and burning fuel and causes extensive greenhouse emission due to disintegration of raw materials. Cement production alone is responsible for 7% of global CO₂ emission with estimated annual growth of 4%. Toward environmental sustainability, one way is partially or totally replacing cement by waste or byproducts of other industries such as fly ash, ground granulated blast-furnace slag (GGBS), waste water, metakaolin, and silica fume. Geopolymer is a cementitious material with comparable characteristics to those of ordinary cement produced by alumina- and silica-rich waste materials. Therefore, it does not require energy-intensive and polluting calcination process. Geopolymerization is formed by reaction of silica-alumina under an alkaline solution which creates three dimensional Si-O-Al-O polymeric chains to attain compressive strength, compared to the ordinary cement which develops calcium silicate hydrates (C-S-H) as the main adhesive. Extensive research has conducted on geopolymer concrete. However, more investigations are needed to better understand characteristics of geopolymer concrete containing additives. Fibers have been proved to have a positive effect on mechanical strength of concrete. As well, fillers such as microsilica can improve mechanical and durability of concrete. Moreover, most studies in this area are focused on fly ash-based geopolymers and the investigations on GGBS-based geopolymer are rare in the literature. In this study, mechanical and durability of GGBS-based geopolymer concrete containing CFRP fibers and microsilica was investigated. Different concrete samples with 0-3% CFRP fibers and 0-10% microsilica were prepared and experimentally tested. Sodium Hydroxide (NH) and Sodium Silicate (NS) solutions were used as alkali activators. 8 M NH as well as NS with 14.7 Na₂O and 29.4 SiO₂ were used with the NS/NH ratio of 2.5. Since no standard existed for mix design of geopolymer concrete, proposed mix design by Venkatesan and Pazhani was used. Alkaline to binder ratio of 0.4 was selected with 430 kg/m³ binder. The specimens were tested after 28 days of curing. Next, mechanical and durability tests including compressive strength, tensile strength, ultrasonic pulse velocity, water absorption, RCPT, and acid resistance were conducted on the samples. Also, microstructure of the geopolymer concrete was investigated. Results of experimental tests show that, compressive and tensile strength of geopolymer samples decreased by adding microsilica. However, 5% microsilica was the best value to enhance mechanical properties of geopolymer concrete. On the other hand, microsilica could enhance durability properties of geopolymer concrete so that adding 5% microsilica caused moderate improvement of water absorption and chloride penetration. The greatest impact of microsilica was on acid resistance by which adding 5% microsilica resulted in 88% improvement of compressive strength loss. However, unlike the microsilica, CFRP fibers due to the disruption of concrete integrity had detrimental effect on mechanical properties and durability of the geopolymer concrete. On the other point of view, microstructure study showed that all the specimens had micro cracks that could inversely affect the performance of concrete. Also, SEM images showed that there was not a strong bond between CFRP fibers and binder paste which results low performance of concrete specimens containing fibers.

Keywords: Geopolymer concrete, Micro silica, CFRP Fibers, Concrete Mechanical Properties, Concrete Durability