

سیمان به عنوان چسباننده اصلی بتن، سهم عمده‌ای در تولید گازهای گلخانه‌ای و افزایش دمای کره زمین دارد. خرابی زودرس سازه‌های بتنی علاوه بر اتلاف سرمایه‌های عظیم، باعث صرف هزینه‌های هنگفت برای بهسازی یا ساخت مجدد و تأمین مصالح و نیروی انسانی می‌شود. بنابراین افزایش مقاومت و دوام بتن می‌تواند نقش عمده‌ای در توسعه پایدار داشته باشد. به منظور رسیدن به توسعه پایدار بایستی مصالح کمتری در ساخت‌وسازها به ویژه سازه‌های بتنی مصرف نمود و سعی کرد با کاربرد مواد معدنی مناسب و حتی زاید در ترکیبات بتن، بتن‌هایی مقاوم و با دوام زیاد تولید نمود. ایران یکی از کشورهای بزرگ در حال توسعه می‌باشد و دارای رشد روزافزون در ساخت‌وسازهای عمرانی می‌باشد. در این میان بتن به عنوان اصلی‌ترین مصالح در کلیه ساختمان‌ها به شمار می‌آید. افزایش میزان تولید و مصرف سالانه سیمان در کشور، خود حاکی از این گسترش می‌باشد. برخی از مواد معدنی مانند پوزولان‌ها در طبیعت ایران به صورت انبوه وجود دارند که با هزینه کم می‌توان بخشی از سیمان را با این مواد جایگزین نمود و به تبع آن با تولید و مصرف کمتر سیمان و ساخت بتن‌های مقاوم و بادوام، به توسعه پایدار و حفظ محیط زیست کشور کمک شایانی کرد.

استاندارد ASTM C618 [۱]، پوزولان را به این صورت تعریف می‌کند، ماده سیلیس یا سیلیسی آلومیناتی که به خودی خود ارزش چسبندگی ندارند، اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت در درجات حرارت معمولی با

هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی نشان داده و ترکیباتی را به وجود می‌آورد که خاصیت سیمانی و چسبندگی دارند [۱]. واکنش پوزولان‌ها با آهک هیدراته که حاصل از واکنش‌های هیدراته شدن فازهای اصلی سیمان بوده و یا به صورت آزاد در سیمان وجود دارد، موجب تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته می‌شود که برخلاف آهک هیدراته که قابل انحلال در آب است و ممکن است موجب تخریب بتن شود، ماده‌ای پایدار بوده و موجب بهبود خواص مکانیکی و شیمیایی خمیر سیمان می‌گردد. به همین دلیل پوزولان‌ها باعث کاهش تخلخل موئینه و بهبود توزیع اندازه‌ی حفره‌ها در خمیر سیمانی بتن گردیده و کاهش نفوذپذیری و افزایش پایایی بتن در محیط‌های مخرب را به دنبال خواهند داشت. علاوه بر این پوزولان‌ها باعث بهبود ناحیه انتقال بین خمیر سیمان و سنگدانه می‌شوند. ناحیه انتقال بحرانی‌ترین فاز بتن در تعیین مشخصات مکانیکی و پایایی آن است [۲]. متاکائولین ماده‌ای است که حتی پیش از دهه ۱۹۶۰ شناخته شده بود، ولی کاربرد آن به عنوان ماده پوزولانی در سیمان یا به عنوان ماده مکمل جایگزین سیمان در بتن بعد از دهه ۱۹۸۰ مورد علاقه محققان قرار گرفت [۳]. تفاوت اصلی بین متاکائولین و سایر پوزولان‌های مصرفی مصنوعی مانند دوده سیلیس و خاکستر بادی این است که این مواد محصولات فرعی یا ثانویه هستند، در حالی که متاکائولین یک محصول اولیه است، بنابراین متاکائولین را می‌توان با یک فرآیند کنترل شده به منظور دستیابی به محصول مطلوب تولید کرد [۴]. متاکائولین یک ماده پوزولانی است که از کلسینه شدن رس کائولین در

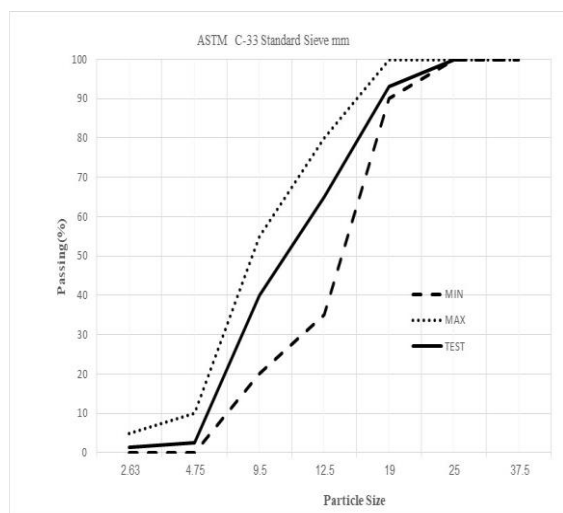
دمای ۶۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد (با توجه به نوع کائولین) به دست می‌آید. حرارت دادن موجب خروج آب شیمیایی کائولین و تغییر ساختار بلوری آن خواهد شد و نهایتاً محصول به یک سیلیکات آلومینیم غیر بلوری تبدیل خواهد شد. مطالعات مختلف نشان داده است که متاکائولین در این فاز از واکنش‌پذیری بالایی برخوردار بوده و قادر است پس از اضافه شدن به خمیر سیمان در اثر واکنش با هیدروکسید کلسیم، ژل سیلیکات کلسیم هیدراته و دیگر فازهای حاوی آلومینات را تولید نموده و منجر به بهبود ریزساختار بتن و ملات گردد [۵]. مطالعات مختلفی در داخل و خارج کشور موجود است که همگی نشان می‌دهند جایگزینی بخشی از سیمان با متاکائولین، موجب بهبود ریزساختار، خواص مکانیکی و دوام بتن خواهد شد [۶].

بتن خودتراکم بتنی است که قابلیت جاری شدن زیاد بدون جداشدگی و آب‌انداختن را دارد. این خواص (قابلیت پرکنندگی، قابلیت عبور، پایداری و عدم جداشدگی و عدم آب‌انداختن) را می‌توان با طرح مخلوط مناسب به دست آورد [۷]. چرخه‌های یخ‌زدن و آب شدن در سطح بتن باعث ایجاد ترک خوردگی در ظاهر شده و به تدریج موجب انبساط پیش‌رونده و فروپاشی آن می‌شود. این آسیب وقتی بصورت جدی بروز می‌کند که درجه اشباع منافذ بتن از ۸۰ درصد بیشتر باشد. در صورتیکه نمک‌های یخ‌زدا در آب مجاور سطح بتن باشد، اثرات مخرب آن در یخبندان و آب‌شدنهای پی‌درپی به مراتب بیشتر خواهد بود [۷].

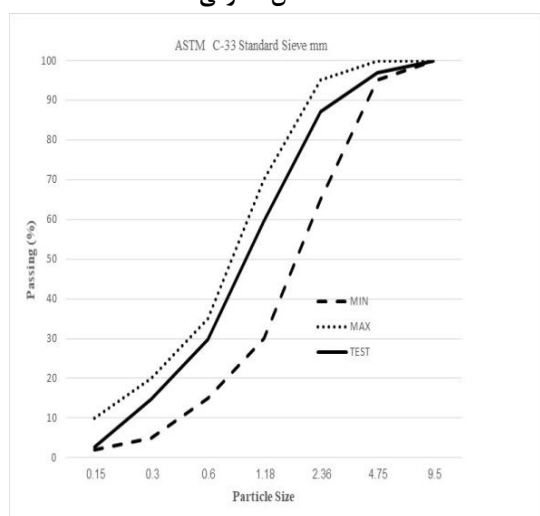
ساجدی و همکاران طی تحقیقی، با جایگزین کردن بخشی از سیمان و پودر سنگ آهک با

متاکائولین به عنوان یک پوزولان فعال، برخی خواص بتن‌های تولیدی شامل رئولوژی، مکانیکی و دوام ارزیابی شدند. خواص خودتراکمی در قالب آزمایش‌های جریان اسلامپ، جعبه L، جعبه U و حلقه J و همین‌طور خواص مکانیکی شامل مقاومت‌های فشاری و کششی دونیم‌شدن و دوام شامل عمق نفوذ آب و نفوذ تسریع‌شده یون کلراید بررسی و اندازه‌گیری شدند. جایگزینی متاکائولین با ۲۰٪ وزن سیمان، منجر به کاهش ۱۶٪ در مقاومت فشاری، افزایش ۲۷٪ در مقاومت کششی و کاهش ۳۵٪ در عمق نفوذ آب و ۲۰٪ در نفوذ تسریع‌شده یون کلراید گردیده است. جایگزینی متاکائولین با ۳۵٪ پودر سنگ آهک، منجر به افزایش ۲۰٪ در مقاومت فشاری، افزایش ۵۷٪ در مقاومت کششی و کاهش ۷۰٪ در عمق نفوذ آب و ۳۵٪ در نفوذ تسریع‌شده یون کلراید گردیده است [۸]. در پژوهشی که توسط عبودوس انجام شد نشان داد که میکروسلیس باعث افزایش مقاومت بتن و متاکائولین موجب کاهش نفوذپذیری می‌شود. وجود ۵ تا ۱۵ درصد متاکائولین و ۵ تا ۱۰ درصد میکروسلیس در مخلوط باعث ماندن بیش از ۹۰ درصد مقاومت پس از ۶ هفته خوردگی توسط اسید می‌شود. از طرفی هرچه مجموع متاکائولین و میکروسلیس بیشتر باشد، میزان جذب آب کاهش بیشتری می‌یابد [۹].

در تحقیق حاضر، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر ماده پوزولانی متاکائولین به عنوان ماده جایگزین سیمان در بتن‌های خودتراکم از حیث تغییراتی که در خواص مقاومتی و دوام بتن‌های مورد اشاره در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن، از عوامل محیطی



الف - شن مصرفی



ب- ماسه مصرفی

شکل ۱: نمودار دانه‌بندی شن و ماسه مصرفی

در این تحقیق، از پودر متاکائولین شرکت جهان پودر دلیجان استفاده گردید. آنالیز فلورسانس اشعه ایکس (XRF) این متاکائولین آماده نیز توسط آزمایشگاه تجزیه مواد معدنی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود صورت گرفت که نتایج آن به شرح جدول ۱ گزارش شد.

مخرب بتن، بوجود خواهد آورد پرداخته شده است. هدف از این تحقیق، انجام آزمایش‌های لازم جهت بررسی تأثیر مصرف متاکائولین در بتن‌های موردنظر و در صورت کسب نتایج رضایت بخش در خواص و دوام بتن، معرفی متاکائولین به عنوان یکی از موارد قابل جایگزین مناسب سیمان در جهت کاهش مصرف سیمان، کاهش مصرف انرژی و گازهای گلخانه‌ای، تولید بتن‌های مقاوم و بادوام و به تبع آنها کمک به حفظ محیط زیست و توسعه پایدار می‌باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- خصوصیات مصالح مصرفی

شن بکارگرفته شده در این تحقیق از نوع شکسته با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر بوده است. منحنی دانه‌بندی شن در شکل ۱-الف به همراه محدوده‌های استاندارد آورده شده است. جهت ساخت آزمون‌های آزمایشگاهی این تحقیق، از ماسه شکسته استفاده گردید. منحنی دانه‌بندی ماسه در شکل ۱-ب نشان داده شده است. سیمان مورد استفاده تحقیق، از نوع سیمان پرتلند نوع ۲ ساخت کارخانه سیمان شاهرود مطابق با استاندارد ASTM C150 می‌باشد. علاوه بر آب، از فوق‌روان‌کننده بر اساس استاندارد ASTM C494 و بر پایه کربوکسیلات انتخاب شد. این فوق‌روان‌کننده به رنگ قهوه‌ای روشن و فاقد نقطه اشتعال و کلر و دارای وزن مخصوص ۱۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و همچنین پودرسنگ ساخت کارخانه قم از الک نمره ۱۲ رد شده استفاده شد.

جدول ۱- آنالیز XRF متاکائولین شرکت جهان پودر دلجان

Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃
۲/۲۶	۰/۸۹	۱/۵۳	۳/۰۹	۰/۰۴	۰/۴۴	۷۴/۳۲	۱۴/۲۳	۱/۲۰	۰/۷۶	۰/۰۸
SrO	PbO	BaO	ZrO ₂	ZnO	CuO	MnO	LOI	Etc	SUM	
۰/۱۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۹۳	۰/۰۱	۱۰۰/۰۰	

مخلوط کن اضافه و در مرحله بعد سیمان و آب باقی مانده به تدریج به مخلوط بتن اضافه شدند. در انتها فوق روان کننده و متاکائولین به تدریج و در طی مدت ۱ تا ۲ دقیقه به مخلوط اضافه و به مدت ۳ دقیقه با هم مخلوط و سپس داخل قالب های استوانه ای ۲۰۰×۱۰۰ میلی متر و تیرهای منشوری مکعب مستطیلی به ابعاد ۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی متر ریخته شدند. پس از ۲۴ ساعت آزمون ها از قالب خارج شدند و در حوضچه آب قرار گرفتند. در مجموع ۵ طرح مخلوط برای ساخت آزمون های آزمایشگاهی بتن خودتراکم حاوی ۰، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ درصد متاکائولین جایگزین سیمان در نظر گرفته شدند. برای هر طرح مخلوط، تعداد ۸ آزمون استوانه ای به ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی متر ساخته شدند. در سن ۷ و ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه، از هر طرح مخلوط، تعداد ۲ آزمون استوانه ای کاملاً مرطوب تحت آزمایش تعیین مقاومت فشاری قرار گرفتند.

عیار واقعی SiO₂ و Al₂O₃ در متاکائولین مورداستفاده در ساخت آزمون ها با توجه به درصد افت حرارتی LOI برابر محاسبات به شرح ذیل است

$$100 - 0/93 = 99/07$$

$$\text{عیار واقعی SiO}_2: (74/32 / 99/07) \times 100 = 75/01$$

$$\text{عیار واقعی Al}_2\text{O}_3: (14/23 / 99/07) \times 100 = 14/36$$

۲-۲- طرح مخلوط

مخلوط های بتن خودتراکم برای مقاومت فشاری هدف ۳۰ مگاپاسکال، بر اساس استاندارد ACI-211-89 طرح شدند که جزئیات طرح مخلوط آن ها در جدول ۲ ارائه شده است. در نام گذاری آزمون ها، حروف SC نشان دهنده بتن خودتراکم، عدد ۳۰ بعد از آن ها بیانگر مقاومت فشاری هدف ۳۰ مگاپاسکال، حرف M نشان دهنده پوزولان متاکائولین و اعداد ذکر شده پس از حرف M معرف درصد متاکائولین جایگزین سیمان در طرح مخلوط های آزمون های آزمایشگاهی می باشند. از استاندارد ASTM C192 جهت ساخت آزمون ها استفاده شد. بر این اساس ابتدا ریزدانه و درشتدانه به مدت ۲ دقیقه با هم مخلوط شدند و سپس یک سوم آب اختلاط به

جدول ۲: طرح مخلوط بتن خودتراکم (یک متر مکعب)

نام طرح	درصد کائولین (%)	سیمان (kg)	آب (kg)	شن (kg)	ماسه (kg)	پودرسنگ (kg)	فوق روان کننده (kg)	متاکائولین (kg)
SC30M0	۰	۵۰۰	۲۵۰	۵۹۱	۸۷۶	۲۶۳	۴	۰
SC30M10	۱۰	۴۵۰	۲۵۰	۵۹۱	۸۷۶	۲۶۳	۳/۶	۵۰
SC30M15	۱۵	۴۲۵	۲۵۰	۵۹۱	۸۷۶	۲۶۳	۳/۴	۷۵
SC30M20	۲۰	۴۰۰	۲۵۰	۵۹۱	۸۷۶	۲۶۳	۳/۲	۱۰۰
SC30M25	۲۵	۳۷۵	۲۵۰	۵۹۱	۸۷۶	۲۶۳	۳	۱۲۵

۲-۳- آزمایش‌های انجام شده

- مقاومت فشاری

برای تعیین مقاومت فشاری بتن طبق استاندارد ASTM C39، از دستگاه Toni Technik ساخت کشور آلمان که در آزمایشگاه تکنولوژی بتن و مصالح ساختمانی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان موجود می‌باشد، استفاده گردید. آزمونه‌های استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متری ساخته شده، داخل دو کفه جک دستگاه گذاشته شدند و تحت نیروی فشاری قرار گرفتند تا به مرحله شکست برسند. مقاومت فشاری آزمونه‌ها از رابطه (۱) محاسبه می‌شود که در آن P_{max} حداکثر بار قرائت شده از روی دستگاه بر حسب نیوتن و A سطح مقطع آزمونه‌ها بر حسب میلی‌مترمربع می‌باشد. مقاومت فشاری (f'_c) همه آزمونه‌ها بر حسب مگاپاسکال محاسبه و به صورت میانگین محاسبه شد.

$$f'_c = \frac{P_{max}}{A} \quad (1)$$

شکل ۲ نحوه آزمایش تعیین مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی ساخته شده در آزمایشگاه را به وسیله دستگاه مربوطه نشان می‌دهد.

- مقاومت بتن در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن

استاندارد ASTM C666 دو روش را برای سنجش مقاومت آزمونه‌های بتن در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن سریع مکرر در محیط آزمایشگاه بیان می‌کند، روش A: یخ‌زدن و آب‌شدن در آب، روش B: یخ‌زدن در هوا و آب‌شدن در آب.



شکل ۲- آزمایش تعیین مقاومت فشاری آزمونه‌ها با دستگاه مربوطه

مطابق استاندارد ASTM C666 تعداد چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن را معمولاً تا ۳۰۰ چرخه و مدت زمان هر چرخه بین ۲ تا ۵ ساعت در نظر می‌گیرند. تغییرات دما از ۱۸- درجه سانتی‌گراد تا ۴+ درجه

می‌باشد. برای انجام این تحقیق، از روش A استاندارد ASTM C666 و برای آزمایش آزمون‌ها از دستگاه یخ‌زدن و آب‌شدن دانشکده عمران دانشگاه سمنان، ساخت شرکت ایرانی «طراحی مهندسی گروک»، استفاده گردید. در شکل ۳ نمایی از دستگاه مذکور و آزمون‌های بتنی تحت چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن داخل آن نشان داده شده است.

آزمایش تعیین لزجت نسبی مخلوط (زمان T_{50}) و نیز ارزیابی جاشدگی (شاخص پایداری دیداری) به همراه آزمایش جریان اسلامپ ارائه شده است. زمان T_{50} مدت زمان رسیدن لبه خارجی دایره بتنی در حال جریان به قطر پخش‌شدگی ۵۰۰ میلی‌متر است که این زمان حین انجام آزمایش جریان اسلامپ با کمک زمان سنج اندازه‌گیری می‌شود.

جدول ۳- بازه‌های مورد پذیرش آزمایش‌های بتن خودتراکم

بازه مقادیر متعارف (حداکثر)	بازه مقادیر متعارف (حداقل)	واحد	آزمایش
۸۰۰	۶۵۰	میلی‌متر	جریان اسلامپ
۵	۲	ثانیه	زمان T_{50cm} (جریان اسلامپ)
۱۰	۰	میلی‌متر	حلقه J
۱	۰/۸	بی‌بعد	جعبه L شکل
۳۰	۰	میلی‌متر	جعبه U شکل



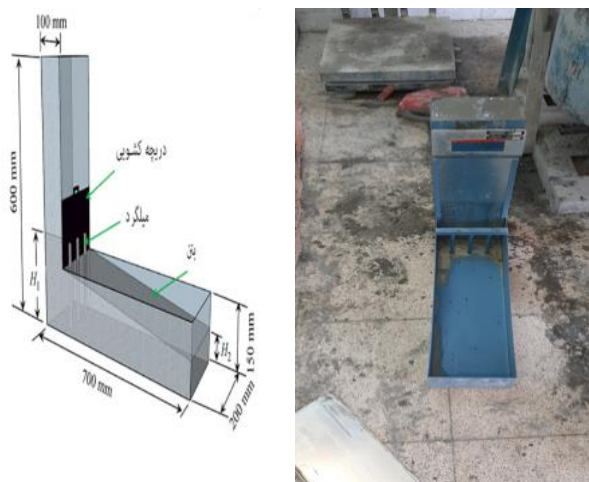
شکل ۳- دستگاه آزمایش اعمال چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن دانشگاه سمنان و آزمون‌های مورد آزمایش

-آزمایش‌های کنترل کیفیت بتن خودتراکم

آزمایش حلقه J (J Ring) مشابه شکل ۴ شبیه آزمایش جریان اسلامپ است و قطر متوسط باید بدست آید. راهنمای اروپایی بتن خودتراکم EFNARC، اندازه‌گیری اختلاف ارتفاع بتن درون حلقه J (با اندازه و میله‌های ارائه شده توسط این راهنما) و بیرون آن را پس از توقف جریان به عنوان معیار قابلیت عبور مطرح کرده است. این اختلاف ارتفاع باید در چهار نقطه اندازه‌گیری شده و میانگین این اعداد برای ارزیابی مورد استفاده قرار گیرد. راهنمای بتن خودتراکم EFNARC حداکثر اختلاف ارتفاع ۱۰ میلی‌متر را مجاز دانسته است.

راهنمای اروپایی بتن خودتراکم EFNARC، آزمایش‌ها و الزاماتی را در خصوص کارایی بتن خودتراکم در هنگام بتن‌ریزی در کارگاه پیشنهاد کرده است. آزمایش‌های بتن خودتراکم مورد نظر این راهنمای اروپایی و بازه‌های مورد پذیرش برای نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۳ آورده شده است. در آزمایش جریان اسلامپ (Slump Flow)، بعد از اینکه جریان دایره بتنی پخش شده متوقف گردید، ابتدا حداکثر قطر پخش‌شدگی و سپس قطر پخش‌شدگی در جهت عمود بر آن برای محاسبه میانگین مطابق شکل ۴ اندازه‌گیری می‌شود. دو

می‌آید. شکل ۵ نمای شماتیک و واقعی آزمایش جعبه L شکل بتن خودتراکم را نمایش می‌دهد.



شکل ۵ نمای شماتیک و واقعی انجام آزمایش جعبه L شکل بتن خودتراکم



شکل ۴- اندازه‌گیری قطر پخش‌شدگی در آزمایش اسلامپ و حلقه J بتن خودتراکم

۳- نتایج و بحث

نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها تحت عناوین خصوصیات بتن تازه خودتراکم، مقاومت فشاری و دوام در بخش‌های بعدی ارائه خواهد شد.

۳-۱- نتایج آزمایش‌های بتن خودتراکم

آزمایش‌های تعیین روانی به وسیله اسلامپ و قابلیت عبورکنندگی، انسداد و جداسازی به وسیله جعبه L و حلقه J انجام گردید. نتایج انجام آزمایش‌های ذکر شده در جدول ۴ آمده است. با توجه به نتایج آزمایش‌های خودتراکم بتن تازه در جدول ۴، طرح‌های مخلوط در محدوده راهنمای بتن خودتراکم EFNARC که در جدول ۳ آمده است، قرار دارند.

در آزمایش جعبه L شکل، پس از توقف جریان بتن، کاهش ارتفاع سطح بتن در قسمت قائم جعبه ΔH_1 (به صورت میانگین سه قرائت در عرض وجهی که جداگر نیز در آن قرار دارد) اندازه‌گیری می‌شود تا به کمک آن عمق بتن (H_1) در قسمت قائم (تفاضل ارتفاع قسمت قائم دستگاه و ΔH_1) مشخص شود. به روش مشابه عمق بتن در انتهای قسمت افقی جعبه H_2 از تفاضل ارتفاع جعبه در قسمت انتهایی (۱۵۰ میلی‌متر) و میانگین سه قرائت ΔH_2 به دست می‌آید. از تقسیم H_2 به H_1 نسبت قابلیت عبور در آزمایش جعبه L شکل به دست

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های بتن تازه خودتراکم

حلقه J (mm)	جعبه L	T50 (SEC)	جریان اسلامپ (mm)	گروه‌بندی
۸/۲	۰/۸۲۱	۳/۴	۶۶۳	SC30M0
۸/۸	۰/۸۳۵	۴/۰	۶۹۲	SC30M10
۹/۲	۰/۸۴۲	۴/۳	۷۱۳	SC30M15
۹/۶	۰/۸۶۷	۴/۶	۷۳۵	SC30M20
۹/۸	۰/۸۸۸	۴/۸	۷۵۴	SC30M25

۳-۲- مقاومت فشاری بتن

متوسط دو آزمون در زمان مورد نظر بدست آمدند

که نتایج در جدول ۵ نشان داده شده اند.

برای هر طرح مخلوط، آزمایش تعیین مقاومت فشاری در ۷، ۲۸، ۵۶، و ۹۰ روز انجام شد و

جدول ۵- نتایج مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی درصد‌های مختلف متاکائولین (MPa)

نام آزمون	۷ روزه	۲۸ روزه	۵۶ روزه	۹۰ روزه	نسبت مقاومت ۹۰ روزه هر آزمون به مقاومت ۲۸ روزه آزمون مرجع SC30M0
SC30M0	۲۳/۸۱	۳۲/۶۲	۳۳/۴۶	۳۳/۹۷	۱/۰۴
SC30M10	۲۳/۵۴	۳۴/۲۱	۳۴/۸۰	۳۵/۳۳	۱/۰۸
SC30M15	۲۳/۴۸	۳۵/۳۱	۳۶/۱۴	۳۷/۰۳	۱/۱۴
SC30M20	۱۷/۳۰	۳۱/۶۴	۳۱/۷۹	۳۱/۹۳	۰/۹۸
SC30M25	۱۴/۱۳	۲۷/۱۴	۲۷/۱۰	۲۶/۸۴	۰/۸۲

مقاومت فشاری ۷ روزه با افزودن ۰، ۱۰، ۱۵٪ متاکائولین جایگزین سیمان در بتن خودتراکم تقریباً مقاومت بتن مرجع داشت ولی افزودن ۲۰ و ۲۵٪ باعث کاهش تا ۴۵٪ شد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه با افزودن ۰، ۱۰، ۱۵٪ متاکائولین جایگزین سیمان در بتن خودتراکم تا ۷٪ بیش از مقاومت بتن مرجع بود ولی افزودن ۲۰ و ۲۵٪ باعث کاهش تا ۱۷٪ شد. مقاومت فشاری ۵۶ روزه با افزودن ۰، ۱۰، ۱۵٪ متاکائولین جایگزین سیمان در بتن خودتراکم تا ۱۰٪ بیش از مقاومت بتن مرجع بود ولی افزودن ۲۰ و ۲۵٪ باعث کاهش تا ۲۰٪ شد. و نهایتاً

مقاومت فشاری ۹۰ روزه با افزودن ۰، ۱۰، ۱۵٪ متاکائولین جایگزین سیمان در بتن خودتراکم تقریباً ۸٪ بیش از مقاومت بتن مرجع بود ولی افزودن ۲۰ و ۲۵٪ باعث کاهش تا ۲۲٪ شد. نتایج نشان می‌دهد که متاکائولین در درازمدت دارای اثر مثبت بر روی مقاومت فشاری دارد و مقاومت ۹۰ روزه آزمون‌های حاوی ۱۵٪ دارای رشد ۱۴٪ نسبت به مقاومت فشاری آزمون ۲۸ روزه مرجع بدون متاکائولین بود و حتی آزمون‌های حاوی ۲۰٪ دارای مقاومت تقریباً یکسان است بنابراین متاکائولین اثر منفی بر روی مقاومت فشاری ندارد.

۳-۳- مقاومت بتن در برابر چرخه یخزدن و

آب شدن

با توجه به اینکه طبق نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته اولیه در جدول ۵، بهبود مقاومت فشاری بتن خودتراکم در طرح مخلوط حاوی ۱۵٪ متاکائولین جایگزین سیمان رخ داد، برای بررسی تأثیر پوزولان متاکائولین بر دوام بتن خودتراکم تحت چرخه‌های یخزدن و آب شدن، آزمون‌های جدید به تعداد ۸ آزمون استوانه‌ای به ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر از هر یک از طرح مخلوط‌های حاوی صفر و ۱۵ درصد متاکائولین جایگزین سیمان ساخته شدند و در حوضچه آب قرار گرفتند، بعد از سپری شدن ۲۸ روز، آزمون‌ها از آب خارج و در دو حالت ذیل قرار گرفتند. تعداد ۴ آزمون استوانه‌ای به ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر از هر طرح مخلوط و در مجموع ۱۶ آزمون در دستگاه یخزدن و آب شدن، تحت ۳۰۰ چرخه یخزدن و آب شدن قرار گرفتند که حدود ۶۰ روز طول کشید، آزمون‌ها از دستگاه خارج و تحت آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری قرار گرفتند. سن بتن در این حالت برابر ۸۸ روز و تقریباً برابر ۹۰ روز بوده است. تعداد ۴ آزمون استوانه‌ای از هر طرح مخلوط و در مجموع ۱۶ آزمون پس از اینکه بعد از ۲۸ روز از حوضچه آب خارج شدند، در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند و

پس از سپری شدن مدت زمان لازم برای اعمال ۳۰۰ چرخه یخزدن و آب شدن آزمون‌های داخل دستگاه یخزدن و آب شدن، که حدود ۶۰ روز طول کشید، هم‌زمان با آن‌ها تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. سن آزمون‌های مورد آزمایش در این حالت نیز برابر ۸۸ روز و تقریباً برابر ۹۰ روز بوده است. بعد از اینکه آزمون‌ها تحت ۳۰۰ چرخه یخزدن و آب شدن قرار گرفتند، میزان تخریب آزمون‌ها با تغییر در مقاومت فشاری و تغییر در وزن آزمون سنجیده شدند.

افت بیش از ۱۰ درصد در مقاومت فشاری و افت بیش از ۵ درصد در وزن آزمون نشان‌دهنده تخریب می باشد. نتایج حاصله در جدول ۶ نشان داده شده است.

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بتن بدون متاکائولین بعد از قرارگیری در ۳۰۰ چرخه یخزدن و آب شدن بیش از ۲۸ درصد کاهش مقاومت و ۴٪ کاهش وزن داشته است که نشان از علامت تخریب در بتن است ولی با افزودن تا ۱۵٪ متاکائولین کمتر از ۲٪ افت مقاومت فشاری و کمتر از ۱٪ افت وزن داشت که نشان دهنده تأثیر بالای متاکائولین در کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام در برابر چرخه های یخزدن و آب شدن است.

جدول ۶- نتایج آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری و افت وزن قبل و بعد از اعمال ۳۰۰ چرخه یخزدن و آب شدن

نام آزمون	مقاومت قبل از چرخه (MPa)	مقاومت بعد از چرخه (MPa)	نسبت مقاومت بعد به قبل چرخه	وزن قبل از چرخه (gr)	وزن بعد از چرخه (gr)	نسبت وزن بعد به قبل چرخه
SC30M0	۳۸/۸۳	۲۷/۳۵	۰/۷۱	۳۸۱۸	۳۶۱۴	۰/۹۶
SC30M15	۴۵/۳۴	۴۴/۲۶	۰/۹۸	۳۶۳۵	۳۵۹۴	۰/۹۹

۴- نتیجه گیری

هدف این تحقیق، انجام آزمایش‌های لازم جهت بررسی تأثیر مصرف متاکائولین بر مقاومت فشاری و دوام بتن‌های خودتراکم بود که کمک به حفظ محیط زیست و توسعه پایدار می‌باشد. نتایج نشان داد که خصوصیات بتن خودتراکم تازه حاوی متاکائولین در محدوده راهنمای اروپایی بتن خودتراکم EFNARC قرار داشتند. مقاومت فشاری درازمدت ۹۰ روزه بتن‌های حاوی تا ۱۵٪ متاکائولین دارای افزایشی تا ۱۴ درصد نسبت به مقاومت ۲۸ روزه نمونه مرجع بدون متاکائولین بودند، بنابراین نه تنها افزودن متاکائولین باعث کاهش مقاومت فشاری نمی‌شود بلکه در درازمدت تأثیر مثبت دارد.

مقاومت فشاری بتن خودتراکم بدون متاکائولین (آزمونه مرجع) بعد از اعمال ۳۰۰ چرخه یخ‌زدن و آب‌شدن نسبت به مقاومت فشاری آزمونه در حالت عادی، به میزان ۲۹ درصد افت داشت که با افزودن ۱۵٪ متاکائولین جایگزین سیمان در بتن

خودتراکم، میزان افت مقاومت فشاری بعد از اعمال ۳۰۰ چرخه یخ‌زدن و آب‌شدن به قبل از اعمال آن، برابر ۲ درصد بود که ۲۷ درصد بهبود مثبت در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن با جایگزین نمودن ۱۵٪ از سیمان با پوزولان متاکائولین حاصل شد.

وزن آزمونه بتن خودتراکم حاوی صفر درصد متاکائولین جایگزین سیمان (آزمونه مرجع) بعد از اعمال ۳۰۰ چرخه یخ‌زدن و آب‌شدن به قبل از اعمال آن به میزان ۴ درصد افت داشته است. با افزودن ۱۵٪ متاکائولین جایگزین سیمان در بتن خودتراکم، میزان افت وزن آزمونه بعد از اعمال ۳۰۰ چرخه یخ‌زدن و آب‌شدن به قبل از اعمال آن، برابر ۱ درصد می‌باشد. به عبارتی با افزودن ۱۵٪ متاکائولین جایگزین سیمان در بتن خودتراکم، ۳ درصد بهبود در وزن آزمونه حاصل شده است که حاکی از بهبود در دوام بتن‌های خودتراکم در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن و رسیدن به بتن با رویکرد توسعه پایدار خواهد شد.

مراجع

[1] ASTM C618-99a. (1999). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concret*, ASTM International, West Conshohocken, PA.

[۲] نادری، محمود، کبودان، علی‌رضا، کارگرفرد، کیمیا، "مطالعه مقاومت فشاری، نفوذپذیری و خوردگی میلگردها در آزمونه‌های بتنی حاوی پوزولان‌های دوده سیلیسی، خاکستر بادی و زئولیت"، نشریه علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۸، شماره ۲، سال ۱۴۰۰، صفحه ۲۸.

[3] Güneysi E, Gesoglu M, Karaoglu S, Mermerdas K. *Permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. Construction and Building Materials*, 2012; 34(1): 120-130.

[۴] بهرامی جوین، ح، مودی، ف، ارزیابی دوام و مقاومت فشاری بتن‌های حاوی متاکائولین، نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی

عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، ۱۹-۲۱ اردیبهشت ماه، ۱۳۹۱

[۵] رضانیانپور، ع، افضلی، ن، بررسی اثر متاکائولین در مجاورت سیمان پرتلند بر دوام بتن‌های توانمند، ششمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران، ایران، ۱۵ مهرماه، ۱۳۹۳.

[6] *Beigi H, Doosti A, Shakerchizadeh M. Investigation of kaolin to Meta-kaolin conversion methods and mechanical properties and durability of concrete containing Meta-kaolin- A review of the technical literature. 9th National Iranian Concrete Conference; 2017; Road, Housing and Urban Development Research Cente.*

[۷] آیین نامه بتن ایران، جلد دوم: مصالح و مسائل اجرایی، ضابطه شماره ۲-۱۲۰، سازمان برنامه و بودجه کشور، امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ویرایش ۱/۱/۱۴۰۰، صفحات ۲۶۷ و ۱۱۵.

[۸] ساجدی، سید فتح‌اله، اورک، میلاد، "تعیین خواص بتن خودتراکم حاوی متاکائولین جایگزین سیمان و پودر سنگ آهک"، فصل‌نامه آنالیز سازه - زلزله، دوره ۱۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰.

[۹] عبدوس، عبدالرضا، "بررسی اثر متاکائولین بر دوام بتن‌های خودتراکم"، پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان، دانشکده فنی مهندسی، ۱۳۹۶.

ارزیابی ویژگی‌های انتشار آکوستیک و خواص مکانیکی بتن توانمند

سرباره‌های مسلح به الیاف بازیافتی پلی استر



هادی بهمنی

دانشجوی دکتری مهندسی سازه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان



محسن نصراللهی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان



محمدعلی رستم‌پور

دانشجوی دکتری مهندسی سازه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

عضو حقیقی انجمن بتن ایران



داود مستوفی‌نژاد

استاد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان

عضو حقیقی انجمن بتن ایران



مجید نیکخواه

دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

این پژوهش به ارزیابی پارامتری آزمون انتشار آکوستیک در بتن پودری با عملکرد زیاد سرباره‌های مسلح به الیاف پلی استر بازیافتی می‌پردازد. استفاده از سرباره در بتن‌های ژئوپلیمری یکی از راهکارهای حذف سیمان در بتن محسوب می‌شود که می‌تواند در بهبود خواص مکانیکی و دوام آن موثر باشد. این جایگزینی سیمان در مواد تشکیل‌دهنده بتن، به‌عنوان ماده چسباننده، در روند ترک‌خوردگی آن اثرگذار است. از طرف دیگر، استفاده از الیاف در بتن نقش زیادی در ارتقای عملکرد کشش و خمش، جذب انرژی، مقاومت در برابر تغییرشکل، و مقاومت در برابر ضربه دارد. این تغییر در رفتار بتن را می‌توان به خوبی در نحوه ترک‌خوردگی آن حین آزمایش‌های مقاومت مصالح مشاهده کرد. آزمون انتشار آکوستیک روشی است که از طریق آن می‌توان به ماهیت و نحوه توزیع ترک‌های رخ داده در آزمون‌های بتنی پی برد. در این آزمون، به‌هنگام ترک‌خوردگی در ماده، امواج مکانیکی منتشر می‌شود که با رسیدن آن به سطح آزمون، می‌توان آن امواج را تحت سیگنال‌های الکتریکی توسط حسگرهای پیزوالکتریک دریافت و تحلیل کرد. در این مطالعه، ۲ آزمون استوانه‌ای استاندارد $200 \times 100 \text{ mm}$ جهت انجام آزمایش فشاری تک‌محوره و ۲ آزمون منشوری به ابعاد $330 \times 70 \times 30 \text{ mm}$ برای انجام آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای همگی از بتن پودری سرباره‌ای با عملکرد زیاد و مسلح به ۳ درصد الیاف پلی استر بازیافتی ساخته شد. دو مشخصه پارامتری مهم انتشار آکوستیک شامل شمار و انرژی در آزمایش‌های فشاری تک‌محوره و خمش ۴ نقطه‌ای آزمون‌های ذکر شده جهت مقایسه با منحنی‌های تنش - کرنش و تنش - خیز مورد مطالعه قرار گرفت. از نتایج به‌دست آمده می‌توان دریافت که در لحظه بار بیشینه، شکست آزمون فشاری نزدیک به $8/3$ برابر انرژی بیشتری نسبت به آزمون‌های خمشی آزاد می‌کند. همچنین، در شکست خمشی که با شروع ریزترک و رشد آن در آزمون‌های نرم مسلح به الیاف رخ می‌دهد، بر خلاف آزمون‌های فشاری، انرژی به مرور و یکنواخت‌تر آزاد می‌شود. کلمات کلیدی: بتن توانمند ژئوپلیمری، انتشار آکوستیک، الیاف پلی استر بازیافتی، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی.

بتن توانمند (HPC)^۱ دارای مشخصات مکانیکی و دوام قابل توجهی است و برای آن مقاومت فشاری بیش از ۵۵ مگاپاسکال و مقاومت خمشی و کششی بیش از ۸ مگاپاسکال در نظر می‌گیرند. منشاء این مشخصات بهینه در چنین بتنی را می‌توان به ریزساختار متراکم آن مرتبط دانست. در طرح مخلوط HPC میزان زیاد سیمان یکی از اجزای اصلی طرح مخلوط آن است. بنابراین، با توجه به مشکلات زیست محیطی ایجاد شده حاصل از فرآیند تولید سیمان، محققین در طرح مخلوط HPC به دنبال حداقل کردن میزان سیمان هستند. استفاده از مواد جایگزین سیمان یکی از راهکارهای مورد مطالعه پژوهشگران بوده است. مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف نشان می‌دهد که جایگزینی سیمان با ۳۰٪ میکروسیلیس می‌تواند علاوه بر کاهش میزان سیمان باعث بهبود مشخصات مکانیکی این نوع بتن شود. یکی دیگر از مواد جایگزین سیمان که توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته است، پودر سنگ آهک است. در تحقیقات انجام شده نشان داده شده است که استفاده از ۳۰٪ پودر سنگ آهک به عنوان جایگزین سیمان در HPC کاهش ناچیز مقاومت فشاری را در پی داشته است. بنابراین، استفاده از پودر سنگ آهک به عنوان جایگزین سیمان برای کاهش اثرات زیست محیطی آن در HPC می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در تحقیقی دیگر که توسط بهمنی و همکاران [۱] انجام گرفت، به بررسی تاثیرات

جایگزینی سیمان با ژئولیت پرداخته شد. در تحقیق آن‌ها نشان داده شد که استفاده از ۱۰٪ ژئولیت به عنوان جایگزین سیمان می‌تواند مشخصات مکانیکی حداقل در چنین بتن پودری را تامین کند.

یکی از راهکارهای دیگر برای توسعه HPC با هدف کاهش اثرات زیست محیطی آن استفاده از تکنولوژی بتن ژئوپلیمری است که در آن به جای سیمان پرتلند از مواد چسباننده دیگر که شامل ماده پایه و فعال ساز هستند، استفاده می‌شود [۲-۴]. امیلی و همکاران [۵] بتن ژئوپلیمری با عملکرد فوق العاده زیاد شامل سرباره، خاکستر بادی و میکروسیلیس را با حداکثر مقاومت فشاری و مقاومت خمشی به ترتیب ۱۷۵ مگاپاسکال و ۱۳/۵ مگاپاسکال در سن ۲۸ روز تحت شرایط عمل‌آوری معمولی توسعه دادند. از سوی دیگر، اثر میکروسیلیس به عنوان جایگزین جزئی سرباره در تولید بتن ژئوپلیمری با عملکرد بسیار زیاد توسط وتزل و میدندورف [۶] با حجم ثابت متاکائولین بررسی شد. حداکثر مقاومت فشاری ۱۷۸/۶ مگاپاسکال برای مخلوط با جایگزینی ۱۲/۵ درصد سرباره با میکروسیلیس به دست آمد و مشخص شد که مقاومت فشاری در آزمون‌های شامل ۱۵ درصد میکروسیلیس کاهش می‌یابد. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که وقتی آزمون‌ها در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شوند، می‌توان به مقاومت بیشتری دست یافت. همچنین، کارایی مخلوط‌ها با محتوای ۲۰ تا ۳۰ درصد میکروسیلیس نسبت به ۱۰ درصد از آن کاهش می‌یابد، اما گنجاندن میکروسیلیس در سطح جایگزینی بیشتر تاثیر مهمی بر خصوصیات مکانیکی دارد.

¹ High-performance concrete

در تحقیقات انجام شده برای توسعه HPC با تکنولوژی ژئوپلیمری تنها به استفاده از مواد قلیایی قوی مانند سدیم هیدروکسید پرداخته شده است. استفاده از این مواد قلیایی قوی، در فعال‌سازی سرباره دارای برخی مشکلات عملی مانند زمان گیرش سریع، ناکارآمدی اقتصادی، تولید انرژی بر و خطر جابه‌جایی مواد مرتبط با pH زیاد است. بنابراین، استفاده از فعال‌کننده‌های کم‌خطر و ارزان‌قیمت قلیایی خاکی مانند کلسیم اکسید و دولومیت کلسینه شده می‌تواند باعث تولید انبوه بتن HPC ارزان قیمت با حداقل کردن اثرات زیست محیطی آن شود [۷-۹]. در این پژوهش، از کلسیم اکسید به‌عنوان فعال‌کننده سرباره استفاده شد.

استفاده از الیاف در بتن معرفی شده علاوه بر ترک‌خوردگی، می‌تواند در ارتقای عملکرد کشش و خمش، جذب انرژی، مقاومت در برابر تغییرشکل، و مقاومت در برابر ضربه موثر باشد. در این راستا، در این پژوهش از الیاف پلی‌استر بازیافتی استفاده شد که همانند بتن ژئوپلیمری آن‌سازگار با محیط زیست باشد. اگرچه با انجام آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای می‌توان به تاثیر استفاده از الیاف در مقاومت خمشی و شکل‌پذیری آن پی برد؛ با این‌وجود امکان‌پذیر روند توسعه ترک‌خوردگی، وقوع ترک‌هایی که قابل مشاهده نیستند، و تشخیص نوع ترک بدون ارزیابی چشمی وجود ندارد. آزمون انتشار آکوستیک روشی است که از طریق آن می‌توان به ماهیت آسیب‌های رخ داده در آزمون پی برد. انتشار آکوستیک (AE) در واقع پدیده‌ای است که در آن امواج الاستیک گذرا از یک منبع متمرکز، درون یک محیط ارتجاعی انتشار می‌یابند [۱۰ و ۱۱]. این امواج که از نوع فراصوت هستند، در اثر آزاد شدن انرژی

کرنشی در ماده که می‌تواند به‌دلیل ایجاد ترک باشد، ایجاد می‌شوند. بنابراین، وقوع آسیب در ماده منجر به انتشار امواج AE می‌گردد. با دریافت این امواج و پردازش سیگنال‌های AE در اعضای آسیب‌دیده سازه‌ای می‌توان نوع، محل و شدت خرابی را شناسایی کرد.

در این مطالعه، آزمایش‌های استاندارد فشاری تک‌محوره و خمش ۴ نقطه‌ای برای آزمون‌های استوانه‌ای و منشوری برای بتن پودری ژئوپلیمری پیشنهادی که مسلح به ۳ درصد الیاف پلی‌استر بازیافتی است، انجام گرفت. مطالعات انجام شده توسط برخی از نویسندگان این تحقیق که در یک مقاله دیگر منتشر شده است، نشان می‌دهد که طرح مخلوط به کار رفته در پژوهش حاضر منجر به کاهش ۵۸ درصدی در ردپای کربن نسبت به بتن HPC معمولی با سیمان می‌شود [۱۲]. در این تحقیق، با انجام آزمون انتشار آکوستیک با استفاده از ۲ حسگر AE و به‌طور همزمان با هر یک از آزمایش‌های استاندارد فشاری تک‌محوره و خمش ۴ نقطه‌ای، به روند توسعه ترک‌خوردگی این آزمون‌ها پرداخته شد. نتایج این تحقیق، شامل منحنی‌های تنش - کرنش فشاری، تنش - جابجایی خمش، و منحنی‌های پارامترهای انرژی و شمار AE در طی زمان است.

۲- مشخصات مصالح و آزمون‌ها

از آنجاکه مشخصات ماده آلومینوسیلیکاتی در اثرگذاری بر خواص بتن HPC-CAM^۳ از اهمیت زیادی برخوردار است، در این پژوهش سرباره‌ای با نرمی m^2/kg (blaine) ۴۸۰ مطابق با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ تهیه شد. جهت فعال کردن سرباره، از پودر کلسیم اکسید (CaO) با

³ High-performance concrete based on calcium oxide-activated materials

² Acoustic Emission

نرمی نزدیک به سرپاره استفاده شد که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول مذکور آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی سرپاره و کلسیم اکسید مطابق با گزارش تولیدکننده (مقادیر درصد وزنی هستند).

نام	سرپاره (%)	کلسیم اکسید (%)	نام	سرپاره (%)	کلسیم اکسید (%)
Al ₂ O ₃	۱۵/۵	۰/۱۳	Na ₂ O	۰/۵	-
SiO ₂	۳۶	۰/۹	Cl	۰/۰۲	-
IFe ₂ O ₃	۱/۱۵	۰/۰۸	S ₂	۱/۳	-
CaO	۳۸	۹۴	Mn ₂ O ₃	۱/۵	-
SO ₃	۰/۵	۰/۰۶	TiO ₂	۱/۴	-
MgO	۸/۷	۰/۵	CaCO ₃	-	۲/۲
K ₂ O	۰/۵	-	افت حرارتی (LOI)	۰/۲۵	۲/۲

این الیاف به میزان ۳ درصد حجمی در طرح مخلوط به کار رفت که در مجموع ۲ آزمونۀ استوانه‌ای استاندارد ۲۰۰×۱۰۰ mm جهت انجام آزمایش فشاری تک‌محوره و ۲ آزمونۀ خمشی به ابعاد ۳۰×۷۰×۳۳۰ mm آزمایش شد. با این حال، فقط نتایج یک آزمونۀ فشاری و یک آزمونۀ خمشی در این مقاله ارائه شده است. جدول طرح مخلوط مورد مطالعه در جدول ۳ آورده شده است.

در این تحقیق، با توجه به اهمیت دانه‌بندی سنگدانه‌ها در بتن‌های با عملکرد زیاد، ماسه سیلیس با اندازه ۵۰ تا ۱۵۰ میکرومتر در نظر گرفته شد. از فوق روان‌کننده بر پایه لیگنو- پلی‌کربوکسیلات نیز جهت سازگاری با مواد ژئوپلیمری استفاده گردید. از الیاف پلی‌استر بازیافتی به طول ۶ mm مطابق با مشخصات فیزیکی و مکانیکی ارائه شده در جدول ۲ استفاده شد. از

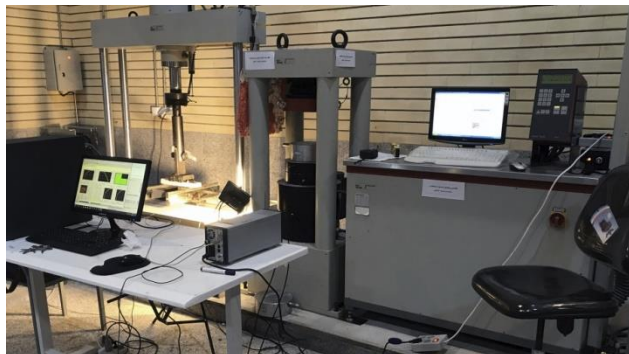
جدول ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف مطابق با اطلاعات شرکت تولیدکننده.

الیاف	مخفف	وزن مخصوص (kg/m ^۳)	مقاومت کششی (MPa)	قطر (mm)	طول (mm)
پلی‌استر	PE	۱۳۴۰	۴۵۰	۰/۰۱۹	۶

جدول ۳- مشخصات طرح‌های اختلاط بتن.

نام	سرپاره (kg/m ^۳)	کلسیم اکسید (kg/m ^۳)	ماسه سیلیس (kg/m ^۳)	آب به مواد سیمانی	فوق روان‌کننده (kg/m ^۳)	الیاف پلی‌استر (kg/m ^۳)
HPC-PE	۹۹۰	۱۱۰	۱۱۰۰	۰/۲	۲۸	۴۰/۲

آزمونه‌ها همگی در سن ۱۴۸ روز تحت آزمایش‌های فشاری تک‌محوره و خمش ۴ نقطه‌ای قرار گرفتند.



شکل ۱- آزمایشات فشار تک‌محوره و خمش ۴ نقطه‌ای به‌همراه ارزیابی انتشار آکوستیک

۴. ارزیابی انتشار آکوستیک

به‌منظور انجام ارزیابی انتشار آکوستیک از دستگاه چهار کاناله AMSY-6 Vallen محصول شرکت Vallen Systeme GmbH مستقر در دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شد. این دستگاه قادر است انرژی آزاد شده در ماده که می‌تواند ناشی از رشد ترک در آن باشد را با استفاده از حسگرهای پیزوالکتریک دریافت کند. این کار از طریق مجموعه تجهیزات انتشار آکوستیک شامل حسگرهای AE، پیش‌تقویت‌کننده‌ها، تقویت‌کننده اصلی، فیلترهای فرکانسی، دستگاه جمع‌آوری داده‌ها (DAQ) و کابل‌های مربوطه انجام می‌گیرد. شکل ۲ نمایی شماتیک از وضعیت قرارگیری این تجهیزات در کنار یکدیگر را نشان می‌دهد. در محل اتصال حسگر به سطح آزمونه باید از ماده کولپنت استفاده شود تا موج مکانیکی منتشر شده در ماده به‌خوبی توسط حسگر دریافت گردد. در این پژوهش از گریس برای

ساخت آزمونه‌ها در آزمایشگاه مصالح دانشگاه صنعتی اصفهان انجام گرفت. با توجه به اینکه تمامی مصالح مورد استفاده در این تحقیق پودری بود، برای اختلاط HPC-CAM مسلح شده به الیاف پلی‌استر بازیافتی از روش اختلاط HPC مطابق تحقیقات گذشته استفاده شد. در ابتدا مواد پودری شامل سرباره، کلسیم اکسید و ماسه سیلیس به مدت ۳ دقیقه مخلوط شدند و سپس آب و فوق‌روان‌کننده به مخلوط اضافه شد و مخلوط کن به مدت ۴ دقیقه دیگر در سرعت کم به مخلوط کردن مواد ادامه داد. بعد از مخلوط شدن کامل مصالح مخلوط کن در سرعت زیاد قرار داده شد و الیاف به آن اضافه گردید و اجازه داده شد که مخلوط کن به مدت ۵ دقیقه دیگر در سرعت زیاد به مخلوط کردن مصالح ادامه دهد. آزمونه‌های ساخته شده، پس از ۲ روز از قالب درآورده شدند و در درون حوضچه آب به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شدند.

۳. آزمایش‌های فشاری تک‌محوره و خمش

آزمایش‌های فشاری تک‌محوره و خمش ۴ نقطه‌ای با استفاده از دستگاه جک فشاری با ظرفیت ۳۰۰ تن و دستگاه مقاومت خمشی با ظرفیت ۱۵ تن - هر دو ساخته شرکت آلمانی Toni Technik - در دانشگاه صنعتی شاهرود صورت پذیرفت. آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C39/C39M-21 [۱۳] و آزمایش مقاومت خمشی ۴ نقطه‌ای نیز بر اساس استاندارد ASTM C78/C78M-21 [۱۴] انجام گرفت و در هر دو بارگذاری به‌صورت جابجایی - کنترل و با نرخ ۱ mm/min تنظیم گردید. شکل ۱ نمایی از تجهیزات ذکر شده جهت انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که

⁴ Data acquisition system

مدت خیزش^{۱۰}، مدت استمرار^{۱۱}، مقاومت سیگنال^{۱۲}، و انرژی اشاره کرد. در این مقاله، علاوه بر پارامتر شمار، از پارامتر انرژی به دلیل توصیف کامل تری از شکل موج سیگنال استفاده شد. این پارامتر از طریق اندازه گیری مساحت زیر نمودار پوش سیگنال در حوزه زمان که به صورت خطی هموار شده است، مطابق با رابطه ۱ بدست می آید.

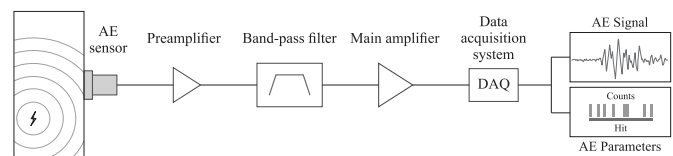
$$S_r = \int_{t_1}^{t_2} f_r(t) dt \quad (1)$$

در این رابطه، f_r تابع پوش سیگنال بر حسب ولت در محدوده زمانی t_1 تا t_2 است.

۵. نتایج و بحث

شکل ۳ (الف) نمودار تنش - کرنش برای نمونه استوانه ای که تحت آزمایش فشاری تک محوره قرار گرفت را نشان می دهد. مطابق این نمودار، نمونه تا تنش فشاری بیشینه ۷۰/۵۳ MPa در کرنش ۰/۰۰۳۳ را تحمل کرده است. نمودار انتشار آکوستیک در شکل ۳ (ب)، تغییرات انرژی آزاد شده AE و نیز تغییرات جمععی پارامتر شمار را در طی زمان آزمایش نشان می دهد. ابعاد دو نمودار به گونه ای ترسیم شده اند که بتوان تغییرات پارامترهای آکوستیک را با تغییرات تنش فشاری مقایسه کرد. تغییرات شیب منحنی جمععی شمار AE نشان می دهد که تا کرنش نزدیک به ۰/۰۰۲ پارامتر شمار با نرخ ثابتی در حال ثبت است؛ اما پس از این کرنش و وقوع ترک های متعدد و عمیق تر، میزان ثبت شمار به بیش از ۲ برابر افزایش پیدا

این منظور استفاده شد. برای هر یک از نمونه های استوانه ای و منشوری ۲ حسگر AE بر روی سطح آن ها نصب گردید. با این حال، در نتایج آورده شده در این مقاله، از اطلاعات کانال ۱ استفاده شد. همچنین، به منظور اطمینان از عملکرد صحیح دستگاه انتشار آکوستیک از آزمایش استاندارد شکست نوک مداد (PLB)^۵ پیش از شروع انجام هر آزمایش استفاده شد.



شکل ۲- سیستم ارزیابی انتشار آکوستیک.

پاسخ انتشار آکوستیک به صورت سیگنال های الکتریکی در حوزه زمان است که توسط حسگرها برای تجهیزات انتشار آکوستیک ارسال می گردد. روش های تحلیلی مختلفی برای بررسی این سیگنال ها وجود دارد که عمده ترین پژوهش ها تاکنون تحلیل های پارامتری را شامل می شود. در این تحلیل، ابتدا با تعریف پارامترهای تنظیم نظیر آستانه^۶، زمان تعریف سیگنال بیشینه (PDT)، زمان تعریف شده برای رویداد (HDT)، و زمان توقف ثبت رویداد (HLT) نحوه ثبت داده ها جهت استخراج پارامترهای AE مشخص می گردد. حد آستانه در انجام آزمایش ها بر روی ۴۲ dB تنظیم شد. از جمله مهمترین پارامترهای AE در حوزه زمان می توان به اصابت^۷، شمار^۸، بیشینه دامنه^۹،

⁸ Count

⁹ Peak amplitude

¹⁰ Risetime

¹¹ Duration

¹² Signal strength

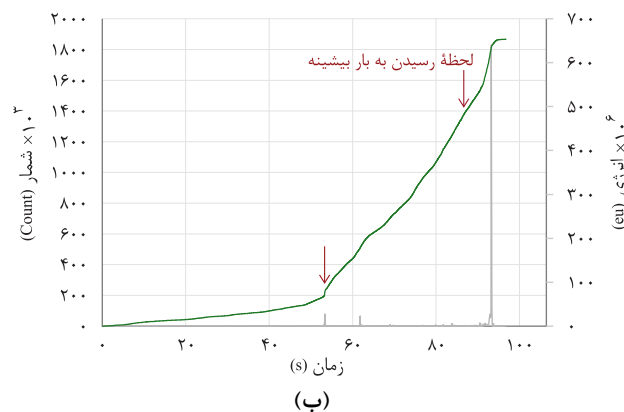
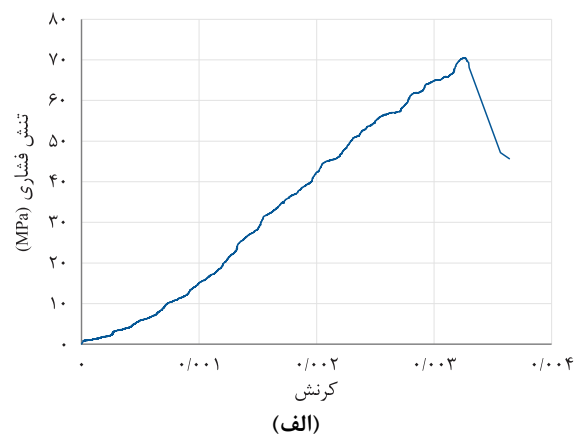
⁵ Pencil lead break

⁶ Threshold

⁷ Hit

آمده برای آزمون مذکور برابر با $9/66 \text{ MPa}$ است که در خیز $0/785 \text{ mm}$ به وقوع پیوست. بررسی منحنی تجمعی شمار AE نشان می‌دهد که در ابتدای آزمایش که رفتار آزمون به صورت الاستیک بوده است، شمار چندانی به ثبت نرسید؛ اما با وقوع اولین ترک‌ها که همزمان انرژی سیگنال قابل توجهی را نیز به همراه داشته است، ثبت شمار در سیستم DAQ با نرخ قابل توجهی افزایش یافت. این نرخ تا کمی پس از رسیدن به بیشینه مقاومت خمشی آزمون تقریباً ثابت است؛ اما پس از آن با وقوع دیگر ترک‌ها و افزایش بازشدگی دهانه ترک‌های قبلی، نرخ ثبت شمار افزایش پیدا کرد. یکی از اصلی‌ترین دلایل افزایش ناگهانی در نمودار انرژی AE را می‌توان ناشی از حرکت یا جداشدگی الیاف از ماتریس سیمانی بتن دانست.

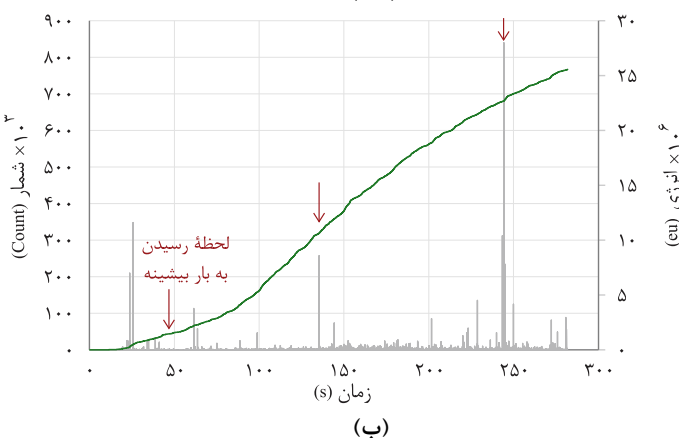
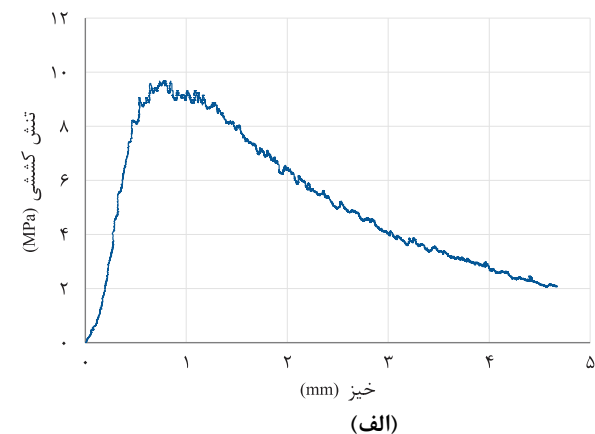
کرده است. از طرف دیگر با بررسی عددی نمودار انرژی AE می‌توان دریافت که با تغییر در میزان ثبت نرخ شمار AE، مقدار انرژی سیگنال نیز با افزایش همراه بوده است که از وقوع ترک‌های مخرب‌تر حکایت دارد. در طی این آزمایش، اولین سیگنال با انرژی قابل توجه نیز در همان کرنش نزدیک به $0/002$ رخ داده است و پس از افت منحنی تنش - کرنش از بار بیشینه و در پی شکسته شدن قطعه‌ای از آزمون، بزرگترین انرژی سیگنال AE ثبت گردید.



شکل ۳- نتایج آزمایش فشار تک محوره

(الف) نمودار تنش - کرنش، و (ب) نمودار پارامتری پاسخ AE.

نمودارهای الف و ب از شکل ۴ به ترتیب منحنی‌های تنش - کرنش و پاسخ انتشار آکوستیک را برای آزمون منشوری در آزمایش خمشی ۴ نقطه‌ای را نشان می‌دهد. مقاومت خمشی به دست



شکل ۴- نتایج آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای
(الف) نمودار تنش - کرنش، و (ب) نمودار پارامتری پاسخ AE.

۶. نتیجه‌گیری

۱- با تحلیل پارامتری سیگنال‌های انتشار آکوستیک می‌توان روند وقوع ترک‌ها را برای آزمون‌های بتنی با طرح مخلوط‌های مختلف پایش کرد. به‌خصوص وجود الیاف در بتن که اثر مستقیم بر نحوه ترک‌خوردگی دارد، محتوای فرکانسی سیگنال‌های AE و روند آزاد شدن انرژی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و می‌توان به‌کمک این آزمون، عملکرد الیاف‌های مختلف را در بتن سنجید.

۲- با بررسی میزان جمععی شمار و مجموع اندازه انرژی آزاد شده در لحظه شکست بتن می‌توان به نوع شکست آن پی برد. ترک‌ها و آسیب‌هایی که بر اثر بار فشاری در بتن ایجاد می‌شود، برای پارامترهای مذکور مقادیر بسیار بزرگ‌تری نسبت به آزمایش خمش استاندارد به‌دست آمد. بنابراین، با بررسی آزمون انتشار آکوستیک برای انواع شکست بتن، می‌توان مدلی برای تشخیص نوع خرابی توسعه داد.

۳- در شکست خمشی که با شروع ریزترک و رشد آن در آزمون‌های نرم مسلح به الیاف رخ می‌دهد، بر خلاف آزمون‌های فشاری، انرژی به مرور و یکنواخت‌تر آزاد می‌شود.

در این پژوهش، به ارزیابی توسعه ترک در بتن پودری با عملکرد زیاد سازگار با محیط زیست از طریق آزمایش انتشار آکوستیک حین آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی پرداخته شد. در این نوع بتن ژئوپلیمری، با حذف سیمان و جایگزینی آن با سرباره و کلسیم اکسید، گام مهمی در کاهش ردپای کربن برداشته شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده در آزمایش انتشار آکوستیک، میزان مجموع شمار ثبت شده در نقطه بار بیشینه برای آزمون‌های فشاری و خمشی به‌ترتیب نزدیک به ۱۳۸۱ و ۴۴ هزار به‌دست آمد. به بیان دیگر، آزمایش فشاری تک‌محوره نسبت به آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای، در لحظه بیشترین باربری، بیش از ۳۱ برابر شمار ثبت کرده است. اگر مجموع انرژی سیگنال AE تا نقطه بار بیشینه برای هر یک از این دو آزمایش بررسی شود، می‌توان دریافت که آزمایش فشار تک‌محوره انرژی آزاد شده ۸/۳ برابری نسبت به آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای دارد. با ارزیابی نتایج آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش می‌توان به نکات زیر پی برد:

- [1] Bahmani, H., Mostofinejad, D., Dadvar, S.A. (2022) "Fiber type and curing environment effects on the mechanical performance of UHPFRC containing zeolite", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, Vol. 46, 4151–4167.
- [2] Puertas, F., Martínez-Ramírez, S., Alonso, S., Vázquez, T. (2000) "Alkali-activated fly ash/slag cements: strength behaviour and hydration products", *Cement Concr. Res.* Vol. 30 (10), 1625–1632.
- [3] Shi, C., Qu, B., Provis, J.L. (2019) "Recent progress in low-carbon binders", *Cement and Concrete Research*, Vol. 122, 227–250.
- [4] Fang, C., Ali, M., Xie, T., Visintin, P., Sheikh, A.H., (2020) "The influence of steel fibre properties on the shrinkage of ultra-high performance fibre reinforced concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 242, 117993.
- [5] Ambily, P.S., and Ravisankar, K. (2014) "Development of ultra-high-performance geopolymer concrete", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 66, pp. 82-89.
- [6] Wetzel, A., and Middendorf, B. (2019). "Influence of silica fume on properties of fresh and hardened ultra-high performance concrete based on alkali-activated slag", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 100, pp. 53-59.
- [7] Bahmani, H., Mostofinejad, D. (2022). *Microstructure of ultra-high performance concrete (UHPC)-a review study. J. Build. Eng.* 50, 104118.
- [8] Bahmani, H., Mostofinejad, D., Dadvar, S.A. (2020). *Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete containing synthetic and mineral fibers. ACI Mater. J.* 117 (3), 155–168.
- [9] Bahmani, H., Mostofinejad, D., Dadvar, S.A., 2020b. *Effects of synthetic fibers and different levels of partial cement replacement on mechanical properties of UHPFRC. J. Mater. Civ. Eng.* 32 (12), 04020361.
- [10] Grosse C. U., and Ohtsu, M. (2008). *Acoustic emission testing. Springer Science & Business Media.*
- [11] Xu, J. G. "Nondestructive evaluation of prestressed concrete structures by means of acoustic emissions monitoring." 2008.
- [12] Mostafaei, H., Bahmani, H., Mostofinejad, D., Wu, C. (2023). *A novel development of HPC without cement: Mechanical properties and sustainability evaluation. J. Build. Eng.* 76, 107262.
- [13] ASTM C39/C39M-21 (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.*
- [14] ASTM C78/C78M-21 (2021). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading); ASTM: Conshohocken, PA, USA.*

امکان سنجی تولید بتن فوق توانمند ژئوپلیمری - مروری بر برخی از پیشرفت‌های اخیر



امیرمحمد رمضانپور
دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران
عضو حقیقی انجمن بتن ایران



محمد شکرچی‌زاده
ریاست هیات مدیره انجمن بتن ایران
استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران
سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران



عرفان عسکری‌پور سرمست
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران
عضو حقیقی انجمن بتن ایران



آرین خانی‌زاد
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک،
دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه
بوخوم آلمان



حمیدرضا رجب‌لو
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده
مهندسی عمران، دانشگاه تهران
عضو حقیقی انجمن بتن ایران



محمدجواد محمدی
کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده
مهندسی عمران، دانشگاه تهران
عضو حقیقی انجمن بتن ایران

چکیده

استفاده گسترده از بتن و طبقه‌بندی آن به عنوان دومین ماده پرمصرف در جهان، آن را به عضوی جدا ناپذیر از صنعت ساخت‌وساز تبدیل کرده است. سیمان به عنوان ماده اصلی تولید بتن، اثرات منفی محیط‌زیستی بسیاری را در فرآیند تولید خود ایجاد می‌کند. با توجه به اینکه در بتن فوق توانمند مقدار سیمان مصرفی ۲ تا ۳ برابر بتن معمولی می‌باشد، معضل آلودگی‌های ناشی از سیمان قابل ملاحظه‌تر می‌باشد. توسعه بتن فوق توانمند ژئوپلیمری به عنوان یک نوع جدید از بتن فوق توانمند معمولی و یک ماده دوست‌دار محیط‌زیست، راه‌حلی مناسب برای کم‌کردن اثرات محیط‌زیستی سیمان می‌باشد. این بتن همچنین دارای مقاومت قابل قبول و دوام فوق‌العاده‌ای، مخصوصاً در محیط‌های اسیدی و با حرارت زیاد می‌باشد. در این مقاله علاوه بر آشنایی با بتن فوق توانمند ژئوپلیمری، ویژگی‌های مکانیکی، دوام و روانی آن با استفاده از مصالح مختلف که در تحقیقات گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است، بررسی می‌شود.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بتن فوق توانمند ژئوپلیمری با استفاده از اکثر مصالح مورد بررسی افزایش و با استفاده از ضایعات لاستیک و سرامیک کاهش می‌یابد و همچنین با افزودن نانوسیلیس نیز، ابتدا روند صعودی و سپس روند نزولی دارد. بسیاری از مصالح مصرفی در تحقیقات گذشته، روانی بتن فوق توانمند ژئوپلیمری را کاهش می‌دهند ولی با استفاده از خاکستر بادی و ضایعات شیشه، روانی افزایش می‌یابد. همچنین، در بررسی مقاومت خمشی و کششی، با افزایش درصد الیاف فولادی و طول آن، افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس و ضایعات شیشه، مقاومت خمشی نیز افزایش می‌یابد و با افزایش درصد جایگزینی ضایعات لاستیک و سرامیک کاهش مقاومت خمشی نتیجه می‌شود. با افزودن نانوسیلیس نیز، مقاومت خمشی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، میکروسیلیس، الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف فولادی و افزایش درصد جایگزینی آن‌ها مقاومت کششی بتن فوق توانمند ژئوپلیمری را افزایش می‌دهد، ولی با افزایش جایگزینی مصالح ضایعاتی، مقاومت کششی کاهش می‌یابد. نانوسیلیس نیز دارای یک مقدار بهینه است که پس از آن مقاومت کششی کاهش می‌یابد. همچنین، افزودن الیاف پلی‌اتیلن در درصد‌های مختلف، تأثیرات متفاوتی بر مقاومت کششی دارد. در بررسی خصوصیات دوامی، با افزایش درصد الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن، ضایعات شیشه و غلظت محلول فعال‌کننده قلیایی، مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: بتن فوق توانمند، بتن فوق توانمند ژئوپلیمری، خصوصیات مکانیکی، دوام، روانی

با پیشرفت و رشد صنعت ساخت‌وساز، نیاز به تولید بتن به صورت تصاعدی افزایش یافت و بتن به عنوان دومین ماده پرمصرف در جهان طبقه‌بندی شد. مقدار سیمان مصرفی برای صنعت ساخت‌وساز سالانه حدود ۲۶۰ میلیون تن برآورد شده است. با توجه به اینکه سنگ آهک منبع اصلی تولید سیمان پرتلند معمولی^۱ (OPC) است، پیش‌بینی شده است که طی چند دهه آینده ممکن است کمبود شدید سنگ آهک رخ دهد و تولید این محصول پر استفاده با مشکل روبرو شود [۷-۱].

تولید سیمان علاوه بر استفاده از منابع طبیعی و ایجاد آلودگی محیط‌زیستی، به انرژی زیادی نیاز دارد. بررسی شده است که تولید ۱ تن سیمان پرتلند معمولی، به ۱٫۵ تن مواد خام نیاز دارد و مقداری معادل کربن‌دی‌اکسید در جو آزاد می‌کند که این مقدار برابر با ۷ تا ۹ درصد کل کربن‌دی‌اکسید آزاد شده در جهان می‌باشد. این امر منجر به توسعه بتن ژئوپلیمری^۲ (GPC) شده است که در آن سیمان با محصولات صنعتی جانبی مانند سرباره کوره آهن‌گدازی، خاکستر بادی، متاکائولن و دیگر محصولات و پوزولان‌های طبیعی، همراه با فعال‌کننده‌های سدیم و پتاسیم جایگزین می‌شود که سهم استفاده از فعال‌کننده‌های سدیم در این بین بیشتر است. ژئوپلیمرها، مواد سه‌بعدی آلومینو سیلیکاتی هستند که در محدوده دمایی ۲۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد با قلیا فعال‌شدن آلومینا

سیلیکات‌های حاصل از محصولات صنعتی جانبی، سخت می‌شوند. ژئوپلیمریزاسیون زیر شاخه فرآیند قلیا فعال‌شدن می‌باشد و یک واکنش شیمیایی است که ساختار آمورف را به ساختار ژئوپلیمری تبدیل می‌کند [۸].

محصولات واکنش ژئوپلیمریزاسیون، از یک شبکه آلومینو سیلیکاتی آمورف تشکیل شده‌اند که ساختار پلیمری آن با شبکه‌سازی مولکولی توصیف می‌شود [۹]. این ریزساختارهای بسیار متراکم که منافذ رسانی آب کم یا عاری از هرگونه منافذ انتقال آب هستند، تأثیر مثبتی بر دوام محصولات ژئوپلیمری می‌گذارند [۱۰]. پذیرفته شده است که هیدرات‌های سیلیکات آلومینیوم کلسیم^۳ (C-A-S-H)، محصول اصلی واکنش در سرباره فعال‌شده با مواد قلیایی هستند [۹ و ۱۱]. با توجه به افزایش محتوای آلومینیوم در سرباره فعال‌شده با مواد قلیایی در مقایسه با سیمان پرتلند، اتصال عرضی بین زنجیره‌های مختلف در فرآیند غالب است که منجر به تشکیل فازهای C-A-S-H می‌شود [۱۲ و ۱۳]. بین مواد قلیا فعال و ژئوپلیمرها تمایزی وجود دارد که به دلیل مواد پایه و محصولات حاصل از واکنش است [۹]. در این صورت، خواص اتصال ژئوپلیمرها نتیجه تشکیل یک شبکه سه‌بعدی آمورف یا نانوکریستال آلومینو سیلیکاتی فرض می‌شوند [۹ و ۱۰]. در صورت استفاده از سرباره به عنوان ماده پایه اصلی در مواد قلیا فعال، وجود کلسیم فازهای C-A-S-H را ایجاد می‌کند که در کنار شبکه آلومینو سیلیکاتی سه‌بعدی آمورف تشکیل می‌شود و منجر به ایجاد ماده‌ای با مقاومت فشاری افزایش یافته می‌شود [۱۴ و ۱۵]. ساختارهای آلومینو سیلیکاتی، گاهی اوقات به عنوان فازهای هیدرات سیلیکات آلومینیوم سدیم^۴ (N-A-S(-H)) نیز شناخته

^۱ Calcium Aluminum Silicate Hydrate

^۲ Sodium Aluminum Silicate Hydrate

^۱ Ordinary Portland Cement

^۲ Geopolymer Concrete

می‌شوند که در کنار فازهای C-A-S-H تشکیل می‌شوند. N نشان‌دهنده سدیم می‌باشد و ممکن است با مواد قلیایی دیگر مانند پتاسیم جایگزین شود. H نمایانگر آب است و در پراتنز نوشته می‌شود، زیرا آب فقط در دوره انتقال وجود دارد و در حالت سخت‌شده موجود نیست. در طی فرآیند سخت‌شدن، یک شبکه آلومینو سیلیکاتی تشکیل می‌شود که عاری از هر گونه آب پیوند شیمیایی است [۹ و ۱۶]. با وجود تحقیقات متعددی که در زمینه فناوری ژئوپلیمر انجام شده است، تلاش بسیار کمی برای توسعه بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری^۵ (UHPGC) صورت گرفته است.

با توجه به اینکه در مخلوط بتن فوق‌توانمند از درشت‌دانه استفاده نمی‌شود، به ملات ساخته شده از سیمان پرتلند گفته می‌شود که دارای مقاومت فشاری فوق‌العاده زیاد، دوام عالی و چقرمگی قابل توجه‌ای می‌باشد. علی‌رغم خصوصیات قابل توجه بتن فوق‌توانمند، نگرانی‌هایی نیز در مورد طرح مخلوط این بتن، به دلیل استفاده زیاد آن از سیمان ایجاد شده است. مقدار سیمان در بتن فوق‌توانمند معمولاً ۷۵۰-۱۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد که ۲ تا ۳ برابر بتن معمولی است و در پی آن اثرات منفی محیط‌زیستی بیشتری ایجاد می‌شود [۱۷].

بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری به عنوان یک ماده دوست‌دار محیط‌زیست، در حال ظهور می‌باشد و توجه جامعه علمی را به خود جلب کرده است. رویکردهای اصلی برای تولید بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری معمولی به شرح زیر است:

(الف) عمل‌آوری محیطی تحت فشار یا عمل‌آوری حرارتی (به منظور حفظ دما).

(ب) استفاده از سرباره و میکروسیلیس برای به دست آوردن روانی قابل قبول و امکان فعال‌شدن مجدد مواد قلیایی در نسبت‌های کم آب به سیمان.

(ج) افزایش سطح مخصوص و کاهش اندازه ذرات مصالح مصرفی.

(د) استفاده از محلول قلیایی پتاسیم و سدیم به عنوان فعال‌کننده در غلظت‌های نسبتاً زیاد.

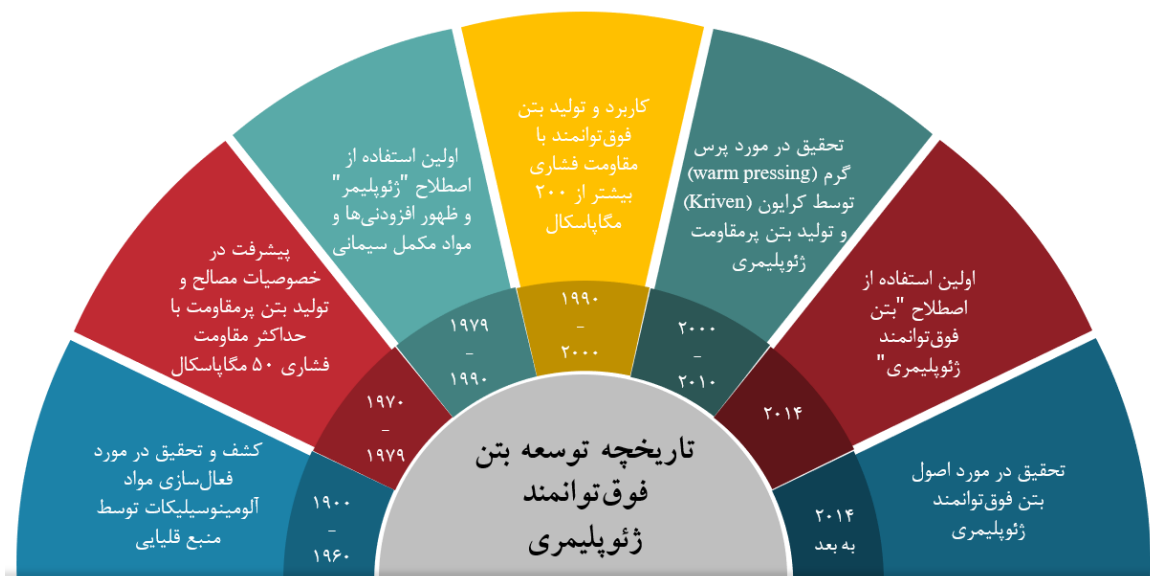
با افزایش موثر مقاومت بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری از طریق فعال‌سازهای قلیایی، این بتن ممکن است به یک جایگزین مناسب برای بتن فوق‌توانمند معمولی برای کاربردهای مهندسی عمران بر اساس دوام و پایداری آن تبدیل شود [۱۷].

۲. تاریخچه و روند توسعه بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری

پس از ساخت و توسعه بتن ژئوپلیمری بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۹۰ و همچنین پدید آمدن بتن فوق‌توانمند و پیشرفت آن از دهه ۹۰ میلادی به بعد، محققین همواره در تلاش برای ساخت بتنی با مقاومت فشاری و دوام زیاد حاوی محصولات ژئوپلیمر بودند که در ابتدا، ساخت بتن پرمقاومت ژئوپلیمری در دهه اول قرن ۲۱ صورت گرفت. در سال ۲۰۱۴، اولین پژوهش منحصر به فرد در مورد بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری، توسط امبیلی^۶ و همکاران [۱۸] انجام گرفت. در این پژوهش بررسی شد که محصولات جانبی صنعتی مانند سرباره و میکروسیلیس، به صورت قابل قبولی می‌توانند در تولید بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری استفاده شوند. همچنین مشاهده شد که مقاومت فشاری و خمشی مخلوط‌های بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری با استفاده از الیاف فولادی بهبود یافت و با افزایش غلظت محلول هیدروکسید در ماده فعال‌کننده قلیایی،

مقاومت فشاری نیز افزایش یافت. پس از آن تا سال ۲۰۱۸ پژوهش قابل توجهی در این زمینه صورت نگرفت و از سال ۲۰۱۹ به بعد تحقیقات گسترده‌ای در حوزه بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری انجام پذیرفت

که تا به امروز به سرعت در حال توسعه می‌باشد. در شکل ۱، خلاصه‌ای از تاریخچه و روند پیشرفت بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری نشان داده شده است.



شکل ۱- تاریخچه توسعه بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری [۱۹]

۱-۲. کاربردها و مزایا

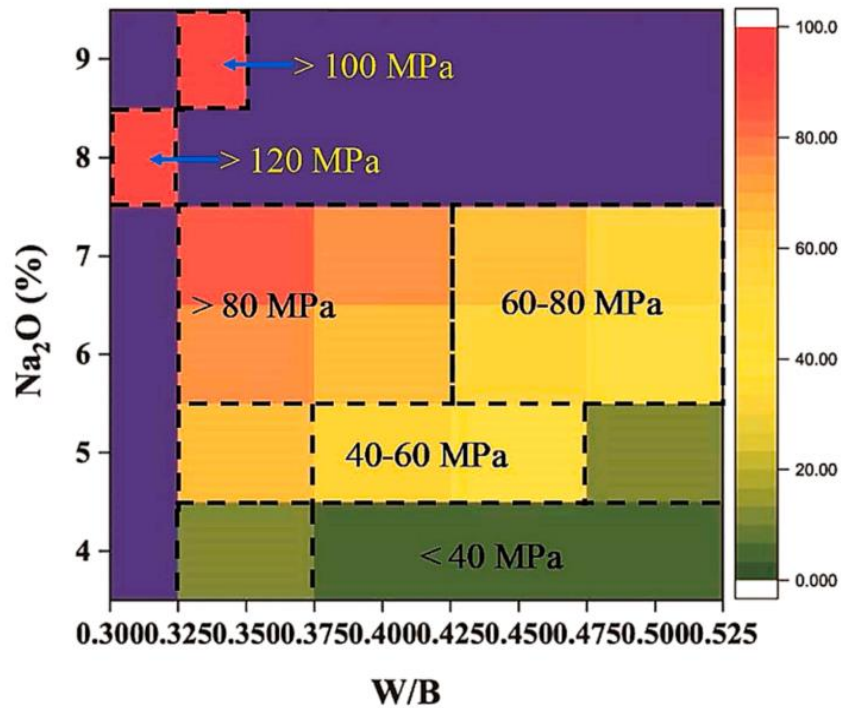
برخی از کاربردها و مزایای این بتن که در سال‌های اخیر به آن توجه شده است عبارتند از: هزینه نسبتاً کمتر، خصوصیات مکانیکی قابل توجه، مقاومت عالی در محیط‌های اسیدی، کاربرد در قطعات پیش‌ساخته در پی کسب مقاومت سریع، روکش‌های مقاوم در برابر آتش، سرامیک‌های نسوز و تثبیت مواد هسته‌ای و دفن زباله‌های سمی. مواد ژئوپلیمری و قلیا فعال به دلیل مقاومت حرارتی بسیار زیاد تا دمای ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و تقریباً ۷۵ درصد افزایش مقاومت در برابر اسیدها، این نوید را می‌دهند که به عنوان بتنی پایدار و با کارایی زیاد در بخش‌های زیرساختی مهم، مورد استفاده قرار گیرند. مقاومت عالی بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری در محیط‌های اسیدی این امکان را ایجاد می‌کند که از این بتن در محیط‌های فاضلابی و تولید لوله‌های فاضلاب که در

مجاورت حمله مواد اسیدی و شیمیایی قرار دارند، استفاده کرد. ویژگی‌هایی مانند محافظت‌تداخلات الکترومغناطیسی، خودتمیزشوندگی و خودحسگری را می‌توان با استفاده از نانومواد خاص در بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری ایجاد کرد که این موضوع به مطالعات گسترده‌ای نیاز دارد. علاوه بر موارد ذکر شده و چندین مورد دیگر، مزیت اصلی این بتن انتشار کمتر گاز کربن‌دی‌اکسید در مقایسه با بتن فوق‌توانمند معمولی به دلیل حذف کامل سیمان در مخلوط آن می‌باشد [۱۷]. در بررسی مقایسه ارزیابی چرخه عمر بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری در مقابل بتن فوق‌توانمند معمولی، مشاهده شد که انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید با استفاده از بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری، ۲۵ تا ۳۵ درصد کاهش می‌یابد [۲۰].

۲-۲. مصالح و طرح مخلوط

در طرح مخلوط بتن فوق توانمند ژئوپلیمری، مصالح مختلف و زیادی استفاده شده است که در سال‌های اخیر، افزودن مواد ضایعاتی نیز به گستره این مصالح اضافه شده است. برای ماده پایه از سربراره، خاکستر بادی و متاکائولن استفاده می‌شود که در میان آن‌ها سربراره سهم بیشتری را در تحقیقات گذشته داشته است. ماسه رودخانه‌ای و پودر کوارتز به عنوان بخش سنگدانه و مواد پودری در اکثر مخلوط‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. برای ماده فعال‌ساز، در بیشتر پژوهش‌های پیشین از سدیم سیلیکات

و سدیم هیدروکسید استفاده شده است و غلظت محلول قلیایی بین ۸ تا ۱۶ مولار، با توجه به ویژگی‌های مورد نظر متغیر بوده است [۱ و ۱۹]. در شکل ۲، نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی و درصد قلیاییت مخلوط برای هر محدوده مقاومت فشاری نشان داده شده است. به عنوان مثال، برای به دست آوردن مقاومت‌های فشاری بیشتر از ۱۲۰ مگاپاسکال، نسبت آب به مواد سیمانی باید کمتر از ۰,۳۲۵ باشد و درصد قلیاییت محیط در حدود ۸٪ در نظر گرفته شود.



شکل ۲- مقاومت فشاری هدف بتن‌های ژئوپلیمری بر مبنای نسبت آب به مواد سیمانی و درصد Na_2O [۲۱]

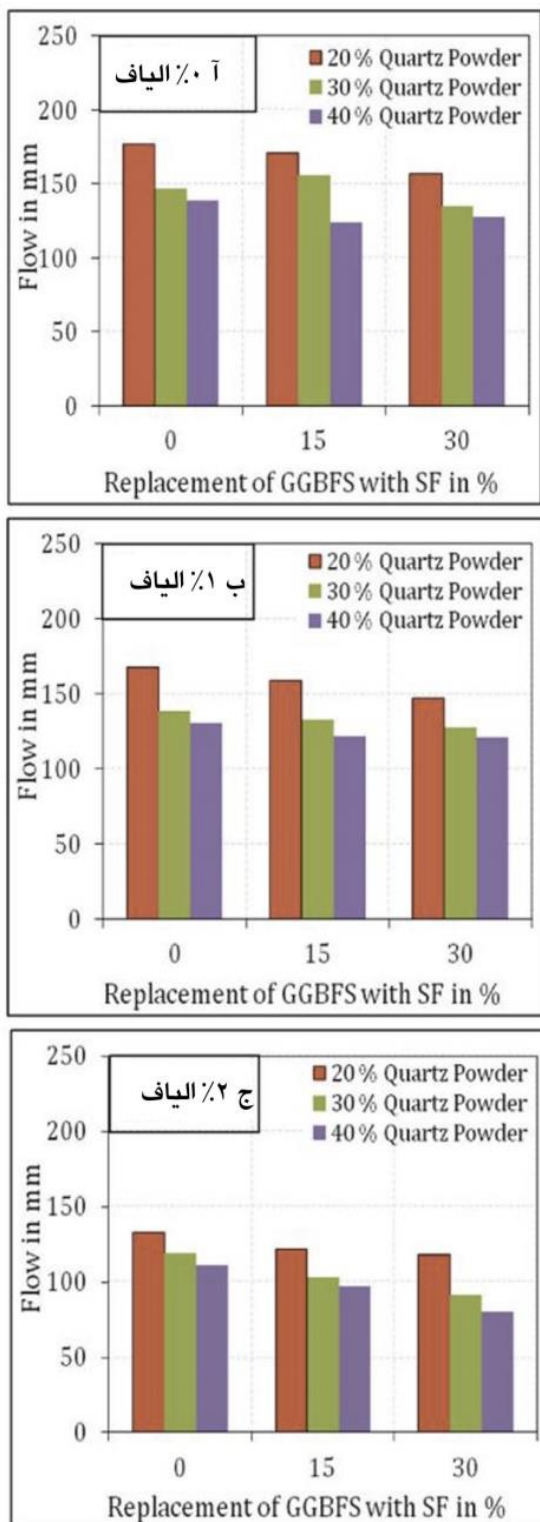
در جدول ۱ نیز، نمونه‌هایی از طرح مخلوط بتن فوق توانمند ژئوپلیمری در تحقیقات گذشته، به همراه مقاومت فشاری و خمشی به دست آمده از آن‌ها مشاهده می‌شود [۸ و ۱۶ و ۱۸ و ۲۲-۳۲].

جدول ۱ - نمونه‌هایی از طرح مخلوط بتن فوق توانمند ژئوپلیمری [۱۹]

مقاومت خشی	مقاومت فشاری	عمل آوری	آب به مواد سیمانی	الیاف فولادی	مولارته	فعال کننده	مواد سیمانی	حداکثر اندازه سنگدانه (mm)	نوع سنگدانه	محققین
-	۱۵۰	محیطی (۲۷°C)	-	-	-	سدیم سیلیکات، سدیم هیدروکسید	سرباره، میکروسیلیس	۲,۳۶	ماسه رودخانه‌ای، پودر کوارتز	کاترول و سربکاران [۸]
۱۲,۱۵	۱۷۵	محیطی	-	-	-	سدیم سیلیکات، سدیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید	سرباره، خاکستر بادی، میکروسیلیس	۲	ماسه رودخانه‌ای، ماسه کوارتز	امیلی و همکاران [۱۸]
-	۱۰۷	محیطی، مایکروپو، حرارتی، اتوکلاو	۰,۱۶	-	۱۲	سدیم سیلیکات، سدیم هیدروکسید	سرباره، سیمان، میکروسیلیس، متاکاوتن	۰,۶	ماسه کوارتز	همکاران [۲۱]
۲۰	۱۲۸	محیطی (۲۰-۲۷°C)	۰,۲	۱,۵	-	سدیم سیلیکات، پتاسیم کرنات	سرباره، سیمان، میکروسیلیس	۰,۶	ماسه رودخانه‌ای، پودر کوارتز	همکاران [۲۳]
-	۱۰۶	محیطی، مایکروپو، حرارتی، اتوکلاو	-	-	۱۲	سدیم سیلیکات، سدیم هیدروکسید	سرباره، سیمان، میکروسیلیس	۱,۶	ماسه کوارتز	همکاران [۲۴]
-	۱۶۰	فشار حرارتی	-	-	۸	سدیم سیلیکات، سدیم هیدروکسید	خاکستر آتشفشانی	۰,۱	خاکستر آتشفشانی	همکاران [۲۵]
۲۳,۴	۱۴۱	فشار حرارتی	۰,۳	۲,۵	-	سدیم سیلیکات، سدیم هیدروکسید	سرباره، خاکستر بادی، میکروسیلیس	۰,۸	-	همکاران [۲۶]
-	۱۸۵	حرارتی	-	-	۸	سدیم سیلیکات، سدیم هیدروکسید	خاکستر آتشفشانی	-	-	همکاران [۲۷]
-	۱۳۴	فشار حرارتی	-	-	۱۶ تا ۸	سدیم سیلیکات، سدیم هیدروکسید	خاکستر بادی	-	-	همکاران [۲۸]
۱۵,۷	۱۱۴	حرارتی	۰,۱۳	۱,۵	-	سدیم سیلیکات، سدیم هیدروکسید	سرباره، خاکستر بادی، میکروسیلیس	۰,۸	-	همکاران [۲۹]
-	۱۷۸,۶	پوشانده شده	۰,۴-۰,۱۷۵	-	۱۰	سدیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید	میکروسیلیس، متاکاوتن	۰,۵	ماسه رودخانه‌ای، پودر کوارتز	میدندورف [۱۶]
۱۲,۸	۱۵۰,۶۱	محیطی (۲۴-۲۶°C)	-	۲	۱۶ تا ۸	سدیم سیلیکات، سدیم هیدروکسید	سرباره، میکروسیلیس	۲,۳۶	ماسه کوارتز	موسوی‌نژاد و سماکی [۳۰]
۳۳,۳	۱۷۰,۴	بخار	۰,۳۲	-	-	سدیم سیلیکات، سدیم هیدروکسید	سرباره، خاکستر بادی، میکروسیلیس	۲,۳۶	ماسه رودخانه‌ای	همکاران [۳۱]
۳۴	۱۱۷,۱	محیطی	-	-	۱۶ تا ۹	سدیم متیل سیلیکات، سدیم هیدروکسید	خاکستر کاه گندم	۱۰	سنگ آهک	السید و القاش [۳۲]

۳-۱. روانی

در تحقیقات گوناگونی، روانی بتن فوق توانمند ژئوپلیمری حاوی مصالح مختلف مانند میکروسیلیس همراه با پودر کوارتز، میکروسیلیس همراه با الیاف فولادی، میکروسیلیس همراه با الیاف پلی پروپیلن، خاکستر بادی و مواد ضایعاتی بررسی شده است. در پژوهشی که توسط کاتیرول^۶ و سریکوماران^۸ انجام گرفت، مشخص شد که خصوصیات بتن تازه با افزایش جایگزینی سرباره با میکروسیلیس و ماسه رودخانه‌ای با پودر کوارتز کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، به‌غیر از نمونه بدون الیاف، حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس و ۳۰ درصد پودر کوارتز، با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس و پودر کوارتز، سطح مخصوص و جذب آب در تمامی نمونه‌ها افزایش (به علت استفاده از مصالح ریزتر) و به تبع آن روانی کاهش یافته است. در پژوهشی که توسط آلتویی و همکاران [۳۳] انجام گرفت، مشخص شد هنگامی که درصد پودر لاستیک ضایعاتی^۹ (WRP) افزایش یافت، جریان‌پذیری بتن فوق توانمند ژئوپلیمری کاهش یافت. افزودن ۱۵٪ پودر لاستیک ضایعاتی کمترین روانی را داشت که می‌توان آن را به ضریب اصطکاک و رفتار آگریز زیاد مواد لاستیکی نسبت داد که مقاومت در برابر جریان را افزایش می‌دهد.



شکل ۳- تاثیر میکروسیلیس و پودر کوارتز بر روانی بتن فوق توانمند ژئوپلیمری (آ) بدون الیاف فولادی (ب) ۱ درصد الیاف فولادی (ج) ۲ درصد الیاف فولادی

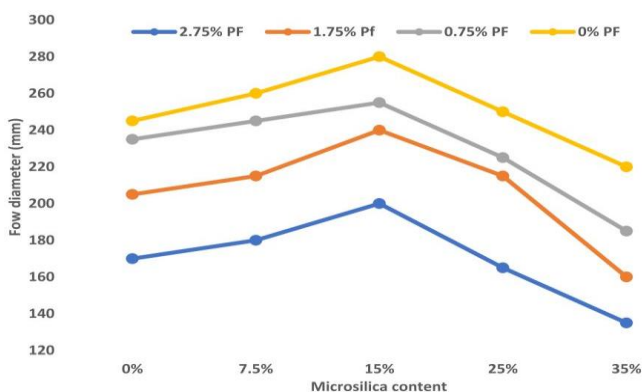
^۶ Kathirvel

^۸ Sreekumaran

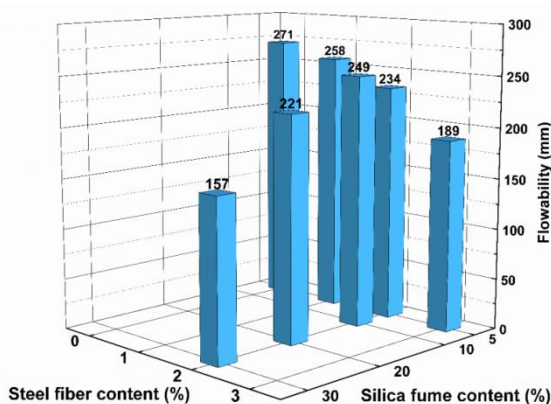
^۹ Waste rubber powder

هنگامی که میکروسیلیس با ۱٪ نانوسیلیس جایگزین شد، روانی به مقدار کمی و به ۱۹۴ میلی‌متر کاهش یافت. روانی با افزایش درصد نانوسیلیس به ۵٪، کاهش بیشتری پیدا کرد و مقدار آن به ۱۸۲ میلی‌متر رسید.

تاهوبا^{۱۱} و همکاران [۳۷] مطالعه‌ای با هدف ارزیابی تأثیر مواد زائد بر عملکرد بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری سازگار با محیط‌زیست شامل شیشه خرد شده، سرامیک و خرده لاستیک انجام دادند. با توجه به شکل ۶، مشاهده می‌شود که روانی بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری به شدت تحت تأثیر استفاده از مواد ضایعاتی قرار گرفته است. افزایش عددهای محور افقی بیانگر افزایش درصد جایگزینی به جای ماسه می‌باشد که به ترتیب برابر با ۷٫۵، ۱۵ و ۲۲٫۵ درصد و منظور از GPC همان بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری معمولی می‌باشد. در هر آزمونه، قطر حداکثر و قطر حداقل اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها به عنوان معیار در نظر گرفته شد. استفاده از شیشه خرد شده تا حدودی روانی را بهبود بخشید که دلیل آن کم بودن جذب آب ذرات شیشه و عدم توانایی جذب آب کافی آن به اندازه ماسه است. روانی بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری بدون ضایعات شیشه ۲۱۵ میلی‌متر بود و با جایگزینی ۷٫۵٪، ۱۵٪ و ۲۲٫۵٪ از آن روانی به ترتیب ۱٫۴٪، ۲٫۴٪ و ۳٫۷۵٪ افزایش یافت، در حالی که استفاده از سرامیک خرد شده و خرده لاستیک، به خصوص در جایگزینی ۲۲٫۵٪، روانی را به مقدار قابل توجهی کاهش داد.



شکل ۴- تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن و میکروسیلیس بر روانی بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری [۳۴]

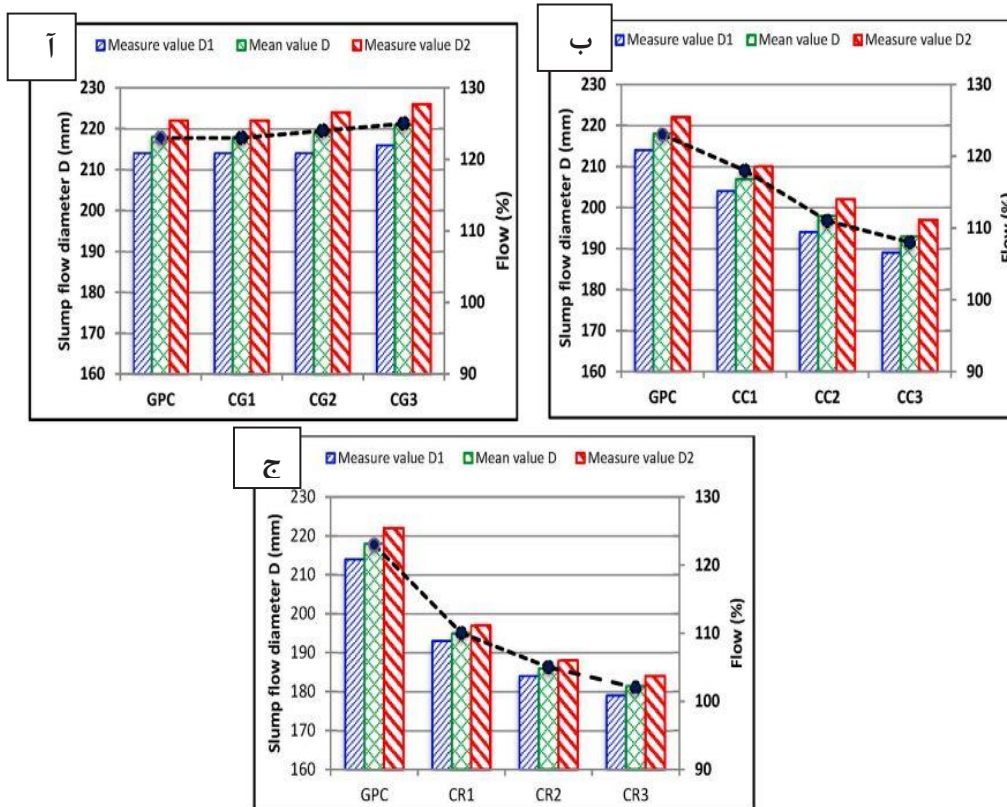


شکل ۵- تأثیر الیاف فولادی و میکروسیلیس بر روانی بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری [۳۵]

پیاوو^۱ و همکاران [۳۶] اثرات نانوسیلیس را در مقادیر مختلف بر ویژگی‌های بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری مطالعه کردند. افزودن بیش از حد نانوسیلیس بر خواص مکانیکی ژئوپلیمرها تأثیر منفی می‌گذارد، زیرا نانوسیلیس دارای سطح مخصوص بزرگتری نسبت به میکروسیلیس است. بنابراین برای اختلاط در مقادیر زیاد به آب بیشتری نیاز است که می‌تواند منجر به اختلاط ناهمگن و یا منافذ بیشتر پس از سخت‌شدن شود. نتایج نشان داد که جریان‌پذیری بتن با افزودن ذرات نانوسیلیس و افزایش مقادیر آن‌ها کاهش یافت.

^{۱۱} Tahwia

^۱ Piao

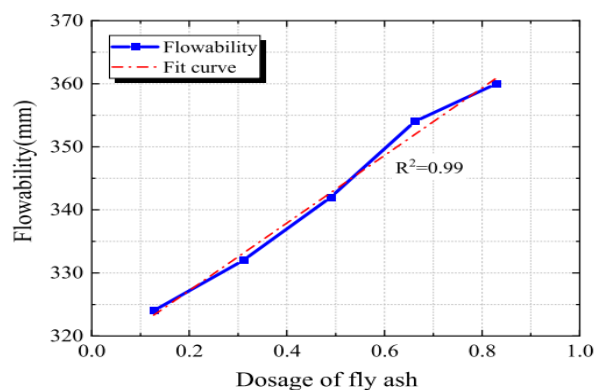


شکل ۶- تاثیر مواد ضایعاتی بر روانی بتن فوق توانمند ژئوپلیمری،
(آ) حاوی شیشه خرد شده، (ب) حاوی سرامیک، (ج) حاوی خرده لاستیک [۳۷]

۳-۲. مقاومت فشاری

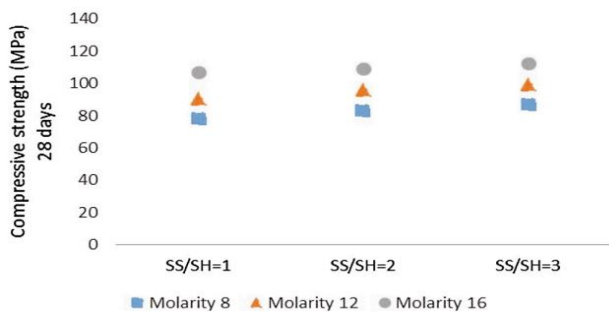
لو^{۱۳} و همکاران [۳۱] اثر الیاف فولادی را بر خصوصیات مکانیکی بتن فوق توانمند ژئوپلیمری بررسی کردند. نتایج استفاده از الیاف فولادی در درصدها و طول‌های مختلف بر مقاومت فشاری در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش درصد الیاف فولادی مقاومت فشاری بتن افزایش یافته است، به خصوص در عمل‌آوری یک روزه با بخار این افزایش مقاومت، به تاخیر افتادن شروع و انتشار ریز ترک‌ها و کم شدن فاصله میان الیاف با افزایش درصد استفاده از الیاف فولادی بوده است.

بر خلاف بسیاری از مصالح که روانی را کاهش دادند، افزایش استفاده از خاکستر بادی، باعث افزایش روانی مخلوط بتن فوق توانمند ژئوپلیمری شده است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با جایگزینی خاکستر بادی در نسبت‌های مختلف، روانی نیز افزایش یافته است [۲۱].



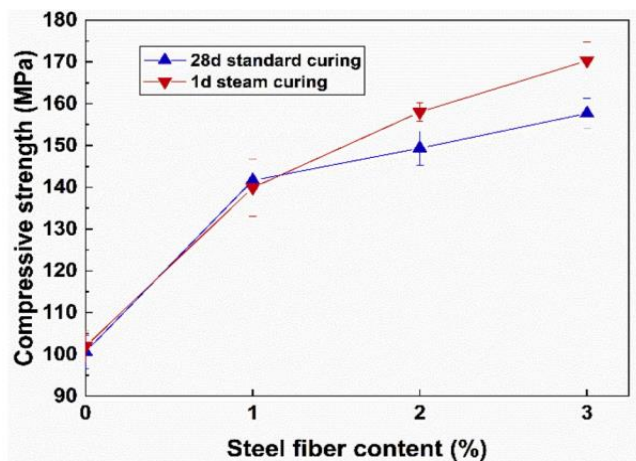
شکل ۷- تاثیر خاکستر بادی بر روانی بتن فوق توانمند ژئوپلیمری [۲۱]

شد. در شکل ۹ مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت محلول و همچنین با افزایش نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید، مقاومت فشاری بتن نیز افزایش یافت. این امر به دلیل آن است که با افزایش غلظت سدیم هیدروکسید، فرآیند ژئوپلیمراسیون افزایش می‌یابد و انحلال آلومینو سیلیکات‌ها سرعت می‌گیرد که در نهایت منجر به افزایش مقاومت شده است.



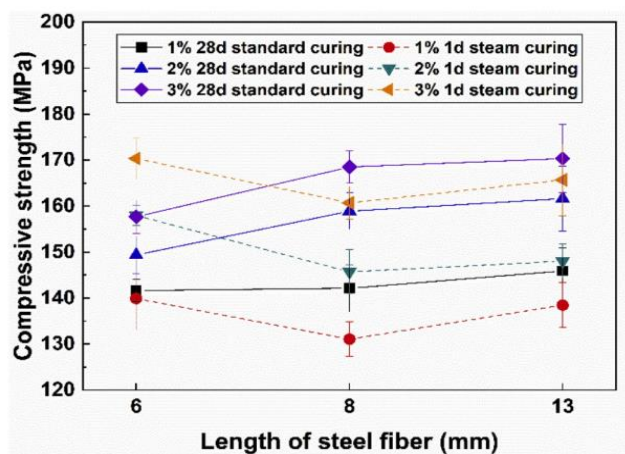
شکل ۹- تاثیر محلول قلیایی بر مقاومت فشاری بتن فوق توانمند ژئوپلیمری [۳۰]

در بررسی اثر جایگزینی ماسه با مواد ضایعاتی و تاثیر آن بر مقاومت فشاری بتن فوق توانمند ژئوپلیمری، همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، مقاومت‌های فشاری در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روز مشاهده می‌شود. با افزایش جایگزینی ضایعات شیشه، مقاومت فشاری تقریباً بدون تغییر بوده و در مواردی افزایش کمی مشاهده شده است. با جایگزینی سرامیک در درصدهای مختلف، مقاومت فشاری به صورت تقریباً یکسان و در حدود ۲۰ مگاپاسکال کاهش یافته است و در آخر با جایگزینی خرده لاستیک به جای ماسه، مقاومت فشاری آزمون‌ها به صورت قابل ملاحظه‌ای و در حدود ۵۰ مگاپاسکال کاهش یافته است. همچنین نتایج حاصل از مطالعه میکروسکوپی نشان داد که استفاده شیشه خرد شده باعث کاهش منافذ و تراکم شدن ماتریس بتن فوق توانمند ژئوپلیمری شد و چسبندگی محصولات ژئوپلیمریزاسیون با ذرات شیشه را بهبود بخشید، که دلیل اصلی افزایش مقاومت در مقایسه با سایر ضایعات مصرفی بود [۳۶].



شکل ۷- تاثیر الیاف فولادی بر مقاومت فشاری بتن فوق توانمند ژئوپلیمری [۳۱]

با توجه به شکل ۸ نیز مشاهده می‌شود در ۲۸ روز عمل‌آوری استاندارد، با افزایش طول الیاف فولادی مقاومت فشاری نیز افزایش یافته است، ولی در عمل‌آوری یک روزه با بخار، با افزایش طول الیاف فولادی به خصوص با طول ۸ میلی‌متر، مقاومت فشاری بتن فوق توانمند ژئوپلیمری کاهش نسبتاً قابل توجهی داشته است.

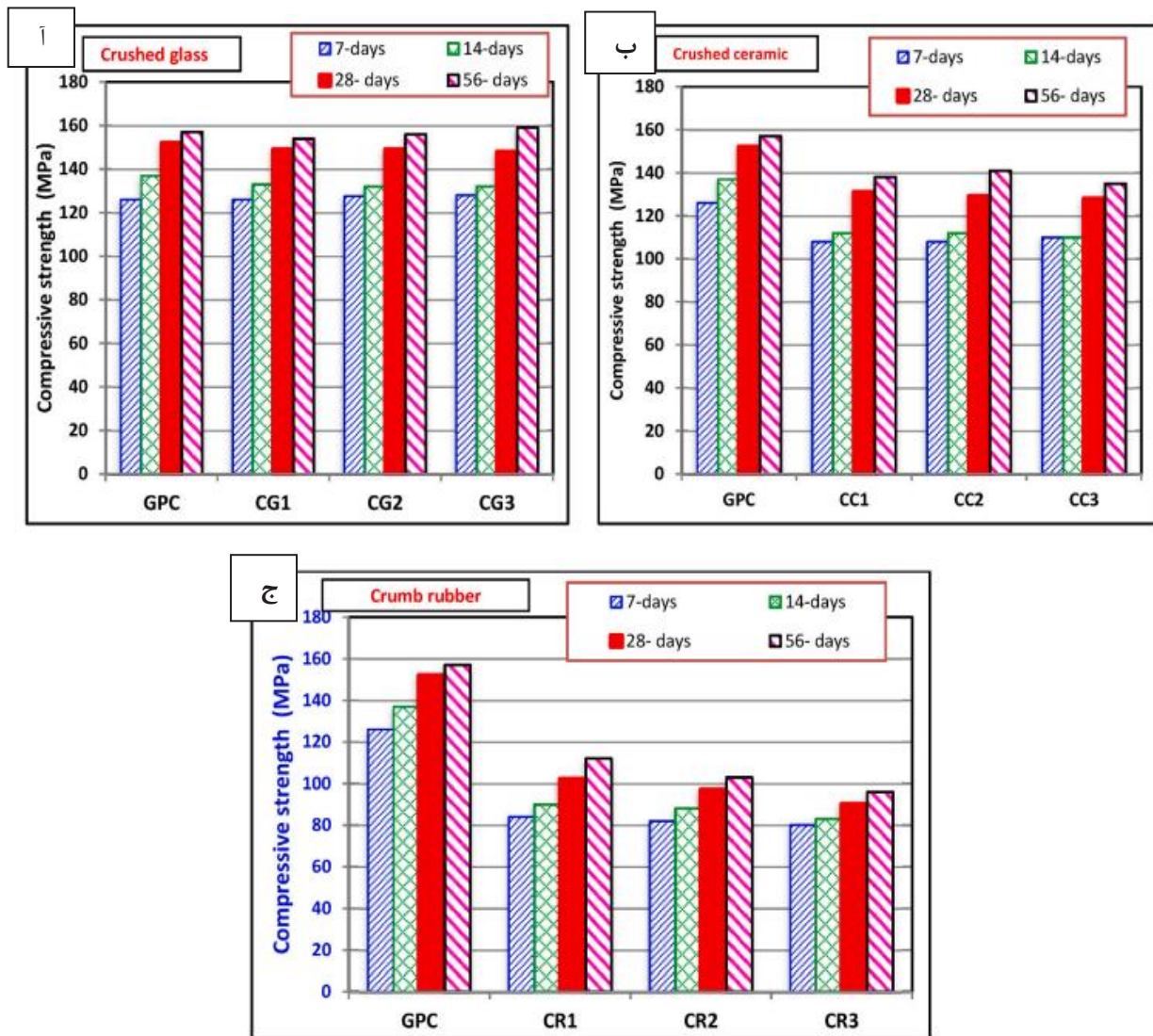


شکل ۸- تاثیر طول الیاف فولادی بر مقاومت فشاری بتن فوق توانمند ژئوپلیمری [۳۱]

پژوهشی توسط موسوی‌نژاد^{۱۳} و سماک^{۱۴} [۳۰] بر خصوصیات بتن فوق توانمند ژئوپلیمری انجام پذیرفت. در این پژوهش اثر محلول قلیایی بر مقاومت فشاری بررسی

^{۱۳} Mousavinejad

^{۱۴} Sammak



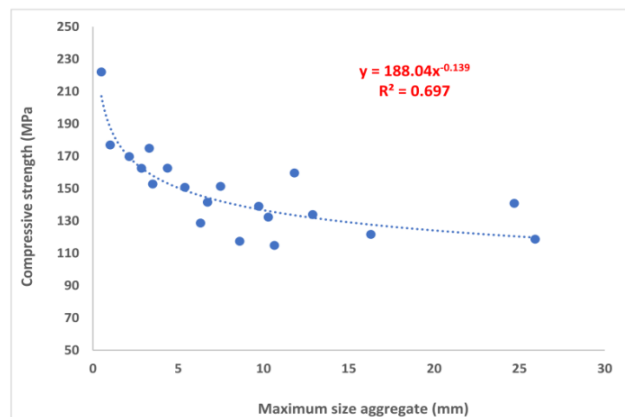
شکل ۱۰- تاثیر مواد ضایعاتی بر مقاومت فشاری بتن فوق توانمند ژئوپلیمری،
 (آ) حاوی شیشه خرد شده، (ب) حاوی سرامیک (ج) حاوی خرده لاستیک [۳۶]

تمامی درصدهای استفاده از الیاف فولادی و در سنین ۷ و ۲۸ روز، مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن فوق توانمند ژئوپلیمری نیز افزایش یافت. علت اصلی افزایش مقاومت فشاری، پر شدن فضاهای خالی، بهبود ریزساختار و چگالی تراکمی بتن با استفاده از میکروسیلیس بوده است. همچنین با بررسی جایگزینی پودر کوارتز در مقادیر ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ مشاهده شد که با افزایش درصد جایگزینی پودر

کاتیروول و سمریکوماران [۸] همچنین اثر میکروسیلیس و پودر کوارتز را بر مقاومت فشاری بتن فوق توانمند ژئوپلیمری بررسی کردند. جایگزینی میکروسیلیس در درصدهای صفر، ۱۵ و ۳۰ انجام گرفت و مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز در نمونه‌های بدون الیاف فولادی، ۱٪ و ۲٪ الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس در

کوارتز، مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز در آزمون‌های بدون الیاف فولادی و حاوی الیاف فولادی افزایش یافت. دلیل اصلی افزایش مقاومت در مخلوط‌های حاوی پودر کوارتز نیز افزایش چگالی تراکمی به علت ذرات ریزتر پودر کوارتز بوده است.

برای ساخت بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری، استفاده از سنگدانه‌های ریز و مواد پرکننده امری ضروری می‌باشد. مصالحی مانند میکروسیلیس، پودر کوارتز، متاکائولن و خاکستر بادی بسیار ریز می‌توانند برای تولید این نوع بتن کاربرد خوبی داشته باشند. شکل ۱۱، مقاومت فشاری بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری را در اندازه‌های مختلف سنگدانه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با کم‌شدن حداکثر اندازه سنگدانه، به دلیل افزایش تراکم و کاهش تخلخل، مقاومت فشاری افزایش یافته است [۱۷].



شکل ۱۱- رابطه مقاومت فشاری بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری با حداکثر اندازه سنگدانه [۱۸-۱۶ و ۲۹ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۵ و ۳۸]

در بررسی مقاومت فشاری بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری حاوی پودر لاستیک ضایعاتی، کاهش مقاومت در بتن را می‌توان به رفتار آبریز و ضریب اصطکاک زیاد آن نسبت داد که باعث ایجاد پیوندهای ضعیف میان عناصر لاستیکی و ژل

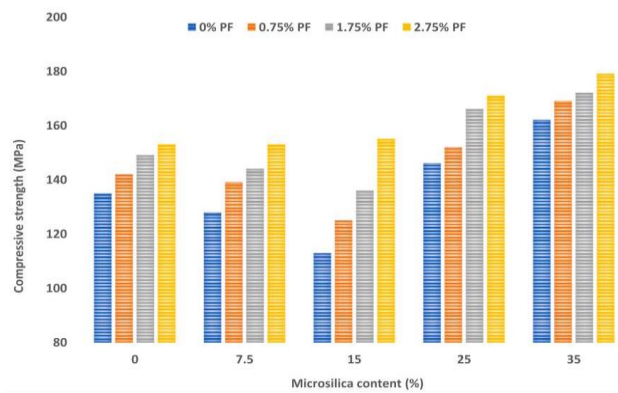
ژئوپلیمر، افزایش نفوذپذیری و در نتیجه ریزساختار با چگالی تراکمی کم می‌شود. از این رو به‌کارگیری ۱۵٪ پودر لاستیک ضایعاتی، مقاومت فشاری ۹۰ روزه را به میزان ۲۵,۴۶٪ در در مقایسه با مخلوط شاهد کاهش داد [۳۳].

ژانگ^{۱۵} و همکاران [۲۰] اثر ریزدانه بتن بازیافتی را بر خصوصیات بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری بررسی کردند. افزودن ریزدانه بتن بازیافتی باعث کاهش محتوای اجزای فعال در مواد پودری معدنی شد و به این دلیل مقاومت فشاری کاهش یافت. با این حال، افزودن ریزدانه بتن بازیافتی توانست تولید محمولات هیدراتاسیون را سرعت و درجه هیدراتاسیون ذرات پودری معدنی را افزایش دهد. که در نتیجه مقاومت فشاری روند افزایشی گرفت. اثر این دو عامل به طور همزمان باعث شد که مقاومت فشاری در هنگام تغییر مقدار ریزدانه بتن بازیافتی، اساساً ثابت باشد.

تایه^{۱۶} و همکاران [۳۴] همچنین اثر میکروسیلیس و پلی‌پروپیلن را بر مقاومت فشاری بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری بررسی کردند. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، نتایج نشان داد که در ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با میکروسیلیس، با افزایش درصد الیاف پلی‌پروپیلن در درصدهای مختلف جایگزینی میکروسیلیس، مقاومت فشاری بتن نیز افزایش یافت.

¹⁵ Zhang

¹⁶ Tayeh



شکل ۱۲- تاثیر الیاف پلی پروپیلن و میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن فوق توانمند ژئوپلیمری [۳۴]

در بررسی تاثیر نانوسیلیس بر مقاومت فشاری، مشاهده شد که مقاومت فشاری آزمونه حاوی ۰/۱ نانوسیلیس ۱۸۴،۱ مگاپاسکال و کمی بیشتر از مخلوط شاهد بود. آزمونه حاوی ۰/۲ نانوسیلیس بیشترین مقاومت فشاری (۱۸۴،۲ مگاپاسکال) را از خود نشان داد. پس از مقدار جایگزینی ۰/۲، مقاومت فشاری به تدریج با افزایش محتوای نانوسیلیس کاهش یافت. افزایش و کاهش مقاومت فشاری به ترتیب ناشی از اثرات مفید و مضر نانوسیلیس بود. افزودن نانوسیلیس می‌تواند واکنش پلیمریزاسیون و مقدار ژل C-A-S-H را به دلیل اثر هسته‌زایی افزایش دهد. همچنین ذرات نانوسیلیس کوچکتر از میکروسیلیس هستند و نانوذرات واکنش نداده می‌توانند منافذ را پر کنند و ساختار محصول را متراکم‌تر کنند و تخلخل را کاهش دهند [۳۹].

در پژوهشی دیگر، اثر الیاف پلی‌اتیلن بر مقاومت فشاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد جایگزینی الیاف فولادی با الیاف

پلی اتیلن، مقاومت فشاری کاهش یافت که به تفاوت در سختی و پراکندگی بین دو نوع الیاف نسبت داده شد. برای مثال مقاومت فشاری با ۰/۲ الیاف فولادی، در بازه ۱۴۶،۵ تا ۱۵۹،۶ مگاپاسکال بود که تقریباً ۱۶،۶ تا ۲۲،۴ درصد بیشتر از مقاومت فشاری با ۰/۲ الیاف پلی‌اتیلن بود که نشان داد الیاف پلی‌اتیلن در یک درصد حجمی، حدود ۰/۲۰ مقاومت فشاری را کاهش داد [۴۰].

۳-۳. مقاومت خمشی و کششی

تحقیقات گوناگونی توسط محققین مختلف بر مقاومت خمشی و مقاومت کششی بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری انجام گرفته است. در پژوهشی، تاثیر طول الیاف فولادی (۶، ۸ و ۱۳ میلی‌متر) در دو نوع عمل‌آوری استاندارد و با بخار بر مقاومت خمشی بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری مورد بررسی قرار گرفت. در ۲۸ روز عمل‌آوری استاندارد، با افزایش طول الیاف فولادی، مقاومت خمشی نیز افزایش یافت ولی در عمل‌آوری یک روزه با بخار، در بتن حاوی ۰/۳ الیاف فولادی، مقاومت خمشی افزایش یافت، اما در بتن‌های حاوی ۱ و ۲ درصد الیاف فولادی، تنها تا طول ۸ میلی‌متر افزایش مقاومت و پس از آن کاهش مقاومت مشاهده شد [۳۱]. مصالح مختلف، اثرات متفاوتی بر مقاومت خمشی و کششی این نوع بتن داشته‌اند که این نتایج در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲- اثرات مصالح مختلف بر مقاومت کششی و خمشی بتن فوق توانمند ژئوپلیمری

نویسندگان	مصالح	پارامتر	مقدار (درصد)	تاثیر
لو و همکاران [۳۱]	الیاف فولادی	مقاومت خمشی	۳ و ۲،۱،۰	افزایش
لو و همکاران [۳۵]	میکروسیلیس	مقاومت خمشی	۳۰ و ۲۰، ۱۰، ۵	افزایش در تمامی مقادیر و کاهش در ۱۰٪ میکروسیلیس
لو و همکاران [۳۵]	الیاف فولادی	مقاومت کششی	۳ و ۲، ۱	افزایش
لو و همکاران [۳۵]	میکروسیلیس	مقاومت کششی	۳۰ و ۲۰، ۱۰، ۵	افزایش در تمامی مقادیر و کاهش در ۱۰٪ میکروسیلیس
تاهویا و همکاران [۳۷]	شیشه خرد شده	مقاومت خمشی	۲۲،۵ و ۱۵، ۷، ۵	افزایش
تاهویا و همکاران [۳۷]	سرامیک	مقاومت خمشی	۲۲،۵ و ۱۵، ۷، ۵	کاهش
تاهویا و همکاران [۳۷]	خرده لاستیک	مقاومت خمشی	۲۲،۵ و ۱۵، ۷، ۵	کاهش
تایه و همکاران [۳۴]	الیاف پلی پروپیلن	مقاومت کششی	۱، ۷۵، ۰، ۷۵، ۰ و ۲، ۷۵	افزایش
تاهویا و همکاران [۳۷]	شیشه خرد شده	مقاومت کششی	۲۲،۵ و ۱۵، ۷، ۵	کاهش
تاهویا و همکاران [۳۷]	سرامیک	مقاومت کششی	۲۲،۵ و ۱۵، ۷، ۵	کاهش
تاهویا و همکاران [۳۷]	خرده لاستیک	مقاومت کششی	۲۲،۵ و ۱۵، ۷، ۵	کاهش
آلتوبی و همکاران [۳۳]	پودر لاستیک ضایعاتی	مقاومت کششی	۱۵ و ۱۰، ۵	کاهش
آلتوبی و همکاران [۳۳]	پودر لاستیک ضایعاتی	مقاومت خمشی	۱۵ و ۱۰، ۵	کاهش
پیوو و همکاران [۳۶]	نانوسیلیس	مقاومت کششی	۵ و ۴، ۳، ۲، ۱	افزایش تا ۳٪ نانوسیلیس و سپس کاهش
آلتوبی و همکاران [۳۹]	نانوسیلیس	مقاومت خمشی	۱۵ و ۱۰، ۵	افزایش تا ۱۰٪ نانوسیلیس و سپس کاهش
کیم و همکاران [۴۰]	الیاف پلی اتیلن	مقاومت کششی	۲ و ۱، ۵، ۱، ۰، ۵	کاهش تا ۱٪، افزایش تا ۱، ۵٪ و کاهش مجدد تا ۲٪

۴-۳. دوام

در مقایسه با سایر خصوصیات بتن فوق توانمند ژئوپلیمری، تحقیقات کمتری بر خواص دوامی این بتن انجام شده است که در این بخش، به مهمترین نتایج به دست آمده از پژوهش‌های پیشین، اشاره شده است.

در تحقیق آلتوبی و همکاران [۳۳]، بر اثر مصالح ضایعاتی روی دوام بتن فوق توانمند ژئوپلیمری، یک ماتریس متراکم بین ژل ژئوپلیمر و الیاف فولادی در تمام مخلوط‌ها مشاهده شد. آزمون‌های حاوی ضایعات شیشه، دارای بهترین عملکرد در مقابل نفوذ یون کلراید بودند. پس از آن، به ترتیب آزمون‌های حاوی ضایعات سنگ مرمر و پودر لاستیک ضایعاتی، مقاومت کمتری در مقابل یون کلراید از خود نشان دادند که مخلوط دارای ۱۵

درصد پودر لاستیک ضایعاتی، با ۲۲۶۴ کلمب کمترین مقاومت را دارا بود. همچنین در بررسی مقاومت الکتریکی مخلوط‌های بتن فوق توانمند ژئوپلیمری، مشاهده شد که احتمال خوردگی در تمامی آزمون‌ها بسیار ناچیز است.

در بررسی دوام بتن فوق توانمند ژئوپلیمری حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن، مشاهده شد که در هر دو آزمایش مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلراید، افزودن الیاف باعث کاهش جریان عبوری یون کلراید از بتن می‌شود. افزودن الیاف پلی پروپیلن، منجر به کاهش جریان عبوری در مقایسه با آزمون‌های حاوی الیاف فولادی تنها، شد و احتمال خوردگی در تمامی آزمون‌ها بسیار ناچیز بود. نتایج آزمایش مهاجرت یون کلراید، بهتر و قابل قبول تر

بوده و مقاومت آزمونه‌ها در محدوده بسیار زیاد قرار گرفت [۳۰].

آیشه^{۱۷} و همکاران [۴۱]، نشان دادند که افزودن الیاف باعث کاهش سرعت جریان در داخل بتن و افزایش دوام بتن با کاهش ترک‌های حاصل از جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن و پلاستیک شد که به این دلیل، نفوذپذیری بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری کاهش یافت.

ژانگ^{۱۸} و همکاران [۴۲] در پژوهشی، بر خصوصیات دوامی و مکانیکی بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری حاوی الیاف فولادی مطالعه کردند. غلظت بیشتر مواد قلیایی در محلول فعال‌کننده قلیایی توانست به طور قابل توجه‌ای مقاومت در برابر مهاجرت یون کلراید را افزایش دهد، که عمدتاً به دلیل تسهیل واکنش ژئوپلیمریزاسیون در یک محیط قلیایی فعال‌تر است که به تخلخل کمتر و کاهش عمق نفوذ یون کلراید منجر شد.

تاهویا و همکاران [۴۳] در پژوهشی دیگر، اثر ضایعات شیشه را بر خصوصیات دوامی بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری بررسی کردند. پس از ۱۲۰ روز ماندن در اسید سولفوریک، تمام آزمونه‌ها وزن اولیه خود را از دست دادند. مخلوط حاوی ۲۲٫۵٪ ضایعات شیشه، ۹۵٪ از جرم خود را از دست داد، در حالی که این مقدار برای مخلوط شاهد ۳٫۳٪ بود. همچنین، مشاهده شد که قرار گرفتن در معرض محلول اسید سولفوریک ۲ درصد، برای بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری مضرتر از قرار گرفتن در معرض محلول منیزیم سولفات ۵ درصد است. در بررسی‌های حرارتی، مشاهده شد که در معرض دمای ۶۰۰-۸۰۰ سانتی‌گراد، سنگدانه ضایعاتی شیشه ارتباط بهتری با ماتریس ژئوپلیمر ایجاد کرد و در کل بتن

فوق‌توانمند ژئوپلیمری حاوی ضایعات شیشه، عملکرد خوبی در محیط با دمای زیاد از خود نشان داد.

در بررسی جذب آب بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری نیز، مشاهده شد که اثر ترکیبی افزودن میکروسیلیس و افزایش مولاریته پتاسیم هیدروکسید، منجر به کاهش ضریب جذب آب شد [۴۴].

۴. جمع‌بندی

با توجه به تحقیقات انجام شده و بررسی آن‌ها در مورد موضوع خصوصیات مکانیکی، دوام و روانی بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری حاوی مصالح مختلف، نتایج زیر حاصل شدند:

* بسیاری از مصالح مصرفی در تحقیقات گذشته مانند الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن، میکروسیلیس، نانوسیلیس، پودر کوارتز و ضایعات لاستیک و سرامیک روانی بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری را کاهش می‌دهند ولی با استفاده از خاکستر بادی و ضایعات شیشه، روانی افزایش می‌یابد.

* با استفاده از الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف پلی‌اتیلن، میکروسیلیس، پودر کوارتز، افزایش غلظت ماده فعال‌ساز و کم کردن حداکثر اندازه ذرات سنگدانه مقاومت فشاری بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری افزایش و با استفاده از ضایعات لاستیک و سرامیک کاهش می‌یابد. همچنین با استفاده از ریزدانه بتن بازیافتی در درصد‌های مختلف، در مقاومت فشاری تغییر محسوسی ایجاد نشد. با افزودن نانوسیلیس نیز مشاهده شد که تا یک درصد بهینه مقاومت فشاری افزایش و پس از آن با افزایش درصد جایگزینی، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

^{۱۷} Aisheh

^{۱۸} Zhang

*در بررسی مقاومت خمشی، با افزایش درصد الیاف فولادی و طول آن، افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس و ضایعات شیشه، مقاومت خمشی نیز افزایش می‌یابد و با افزایش درصد جایگزینی ضایعات لاستیک و سرامیک کاهش مقاومت خمشی نتیجه می‌شود. با افزودن نانوسیلیس نیز مقاومت خمشی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

*با استفاده از میکروسیلیس، الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف فولادی و افزایش درصد جایگزینی آن‌ها، مقاومت کششی بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری افزایش می‌یابد ولی با افزایش جایگزینی ضایعات شیشه، لاستیک و سرامیک مقاومت کششی کاهش می‌یابد و نانوسیلیس هم دارای یک مقدار بهینه بود که پس از آن مقاومت کششی کاهش می‌یابد. افزودن الیاف پلی‌اتیلن نیز در درصدهای

مختلف، تاثیرات متفاوتی بر مقاومت کششی دارد.

*در بررسی خصوصیات دوامی، با افزایش درصد الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن، ضایعات شیشه و غلظت محلول فعال‌کننده قلیایی، مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید افزایش می‌یابد. با افزایش میکروسیلیس و غلظت محلول پتاسیم هیدروکسید، ضریب جذب آب بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری کاهش می‌یابد و همچنین با افزودن ضایعات شیشه، مقاومت خوبی در برابر حرارت‌های زیاد از خود نشان می‌دهد.

با توجه به خصوصیات مکانیکی، روانی و دوام قابل قبول بتن فوق‌توانمند ژئوپلیمری با استفاده از مصالح مختلف، این بتن قابلیت خوبی در کاربردهای مهندسی عمران و در صنعت بتن خواهد داشت و پیش‌بینی می‌شود در سال‌های آتی پیشرفت بسیاری در توسعه آن صورت بگیرد.

۵. مراجع

- [1] H. Bahmani and D. Mostofinejad, "A review of engineering properties of ultra-high-performance geopolymer concrete," *Developments in the Built Environment*, vol. 14, p. 100126, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.dibe.2023.100126.
- [2] B. A. Tayeh, A. Hakamy, M. Amin, A. M. Zeyad, and I. S. Agwa, "Effect of air agent on mechanical properties and microstructure of lightweight geopolymer concrete under high temperature," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, p. e00951, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00951.
- [3] B. A. Tayeh, A. M. Zeyad, I. S. Agwa, and M. Amin, "Effect of elevated temperatures on mechanical properties of lightweight geopolymer concrete," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, p. e00673, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00673.
- [4] A. M. Aly, M. S. El-Feky, M. Kohail, and E.-S. A. R. Nasr, "Performance of geopolymer concrete containing recycled rubber," *Constr. Build. Mater.*, vol. 207, pp. 136–144, May 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.121.
- [5] N. Asim et al., "Emerging sustainable solutions for depollution: Geopolymers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 199, pp. 540–548, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.043.
- [6] Amer I, Kohail M, El-Feky MS, Rashad A, Khalaf MA. Evaluation of using cement in alkali-activated slag concrete. *Int. J. Sci. Technol. Res.* 2020;9(5).

- [7] El-Tair AM, Sharobim KG, Mohammedin H, Kohail M. Improving the reactivity of clay nano-particles in high strength mortars through indirect sonication method. *Int. J. Sci. Technol. Res.* 2020;9:1045-54.
- [8] P. Kathirvel and S. Sreekumaran, "Sustainable development of ultra high performance concrete using geopolymer technology," *Journal of Building Engineering*, vol. 39, p. 102267, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102267.
- [9] J. L. Provis and S. A. Bernal, "Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 44, no. 1, pp. 299–327, Jul. 2014, doi: 10.1146/annurev-matsci-070813-113515.
- [10] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications*, fourth edition, Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France, 2015.
- [11] J. L. Provis, A. Palomo, and C. Shi, "Advances in understanding alkali-activated materials," *Cem. Concr. Res.*, vol. 78, pp. 110–125, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.04.013.
- [12] R. J. Myers, S. A. Bernal, J. D. Gehman, J. S. J. van Deventer, and J. L. Provis, "The Role of Al in Cross-Linking of Alkali-Activated Slag Cements," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 98, no. 3, pp. 996–1004, Mar. 2015, doi: 10.1111/jace.13360.
- [13] C. E. White, L. L. Daemen, M. Hartl, and K. Page, "Intrinsic differences in atomic ordering of calcium (alumino)silicate hydrates in conventional and alkali-activated cements," *Cem. Concr. Res.*, vol. 67, pp. 66–73, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2014.08.006.
- [14] J. Temuujin, A. van Riessen, and R. Williams, "Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes," *J. Hazard. Mater.*, vol. 167, no. 1–3, pp. 82–88, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.12.121.
- [15] J. E. Oh, P. J. M. Monteiro, S. S. Jun, S. Choi, and S. M. Clark, "The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 2, pp. 189–196, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.10.010.
- [16] A. Wetzel and B. Middendorf, "Influence of silica fume on properties of fresh and hardened ultra-high performance concrete based on alkali-activated slag," *Cem Concr Compos*, vol. 100, pp. 53–59, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.03.023.
- [17] S. M. A. Qaidi et al., "Ultra-high-performance geopolymer concrete: A review," *Constr Build Mater*, vol. 346, p. 128495, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128495.
- [18] P. S. Ambily, K. Ravisankar, C. Umarani, J. K. Dattatreya, and N. R. Iyer, "Development of ultra-high-performance geopolymer concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 66, no. 2, pp. 82–89, Jan. 2014, doi: 10.1680/macr.13.00057.
- [19] M. Nodehi and F. Aguayo, "Ultra high performance and high strength geopolymer concrete," *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, vol. 6, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1007/s41024-021-00130-5.
- [20] X. Y. Zhang, M. X. Fan, Y. X. Zhou, D. D. Ji, J. H. Li, and R. Yu, "Development of a sustainable alkali activated ultra-high performance concrete (A-UHPC) incorporating recycled concrete fines," *Journal of Building Engineering*, vol. 67, p. 105986, May 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.105986.
- [21] S. Xu et al., "Development and preliminary mix design of ultra-high-performance concrete based on geopolymer," *Constr Build Mater*, vol. 308, p. 125110, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125110.
- [22] O. A. Mayhoub, E.-S. A. R. Nasr, Y. Ali, and M. Kohail, "Properties of slag based geopolymer reactive powder concrete," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 99–105, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.asej.2020.08.013.

- [23] Y. Zhou, J. Huang, X. Yang, Y. Dong, T. Feng, and J. Liu, "Enhancing the PVA fiber-matrix interface properties in ultra high performance concrete: An experimental and molecular dynamics study," *Constr Build Mater*, vol. 285, p. 122862, May 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122862.
- [24] Y. R. Alharbi, A. A. Abadel, A. A. Salah, O. A. Mayhoub, and M. Kohail, "Engineering properties of alkali activated materials reactive powder concrete," *Constr Build Mater*, vol. 271, p. 121550, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121550.
- [25] N. Ranjbar, A. Kashefi, G. Ye, and M. Mehrali, "Effects of heat and pressure on hot-pressed geopolymer," *Constr Build Mater*, vol. 231, p. 117106, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117106.
- [26] J. Liu et al., "Blast testing of high performance geopolymer composite walls reinforced with steel wire mesh and aluminium foam," *Constr Build Mater*, vol. 197, pp. 533–547, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.207.
- [27] N. Ranjbar, A. Kashefi, and M. R. Maheri, "Hot-pressed geopolymer: Dual effects of heat and curing time," *Cem Concr Compos*, vol. 86, pp. 1–8, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.11.004.
- [28] N. Ranjbar, M. Mehrali, M. R. Maheri, and M. Mehrali, "Hot-pressed geopolymer," *Cem Concr Res*, vol. 100, pp. 14–22, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.05.010.
- [29] J. Liu et al., "Investigations on the response of ceramic ball aggregated and steel fibre reinforced geopolymer-based ultra-high performance concrete (G-UHPC) to projectile penetration," *Compos Struct*, vol. 255, p. 112983, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112983.
- [30] S. H. G. Mousavinejad and M. Sammak, "Strength and chloride ion penetration resistance of ultra-high-performance fiber reinforced geopolymer concrete," *Structures*, vol. 32, pp. 1420–1427, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.03.112.
- [31] Y. Liu, Z. Zhang, C. Shi, D. Zhu, N. Li, and Y. Deng, "Development of ultra-high performance geopolymer concrete (UHFGC): Influence of steel fiber on mechanical properties," *Cem Concr Compos*, vol. 112, p. 103670, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103670.
- [32] T. A. El-Sayed and Y. A. Algash, "Flexural behavior of ultra-high performance geopolymer RC beams reinforced with GFRP bars," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, p. e00604, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00604.
- [33] F. Althoey, O. Zaid, S. Alsulamy, R. Martínez-García, J. de Prado Gil, and M. M. Arbili, "Determining engineering properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete modified with different waste materials," *PLoS One*, vol. 18, no. 5, p. e0285692, May 2023, doi: 10.1371/journal.pone.0285692.
- [34] B. A. Tayeh, M. H. Akeed, S. Qaidi, and B. H. A. Bakar, "Influence of microsilica and polypropylene fibers on the fresh and mechanical properties of ultra-high performance geopolymer concrete (UHFGC)," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, p. e01367, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01367.
- [35] Y. Liu, C. Shi, Z. Zhang, N. Li, and D. Shi, "Mechanical and fracture properties of ultra-high performance geopolymer concrete: Effects of steel fiber and silica fume," *Cem Concr Compos*, vol. 112, p. 103665, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103665.
- [36] R. Piao, T. Oh, G. W. Kim, H.-J. Choi, N. Banthia, and D.-Y. Yoo, "Enhanced microstructure and mechanical properties of cementless ultra-high-performance fiber-reinforced alkali-activated concrete with silicon dioxide nanoparticles," *Constr Build Mater*, vol. 398, p. 132514, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132514.

- [37] A. M. Tahwia, M. Abd Ellatief, A. M. Heneigel, and M. Abd Elrahman, "Characteristics of eco-friendly ultra-high-performance geopolymer concrete incorporating waste materials," *Ceram Int*, vol. 48, no. 14, pp. 19662–19674, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2022.03.103.
- [38] S. H. Ghasemzadeh Mousavinejad and M. Sammak, "An assessment of the fracture parameters of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete (UHPPFRGC): The application of work of fracture and size effect methods," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 117, p. 103157, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.tafmec.2021.103157.
- [39] F. Althoey, O. Zaid, S. Alsulamy, R. Martínez-García, J. de Prado-Gil, and M. M. Arbili, "Experimental study on the properties of ultra-high-strength geopolymer concrete with polypropylene fibers and nano-silica," *PLoS One*, vol. 18, no. 4, p. e0282435, Apr. 2023, doi: 10.1371/journal.pone.0282435.
- [40] G. W. Kim et al., "Hybrid reinforcement of steel–polyethylene fibers in cementless ultra-high performance alkali-activated concrete with various silica sand dosages," *Constr Build Mater*, vol. 394, p. 132213, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132213.
- [41] Y. I. A. Aisheh, D. S. Atrushi, M. H. Akeed, S. Qaidi, and B. A. Tayeh, "Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, p. e01234, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01234.
- [42] Y. Zhang, J. Chen, and J. Xia, "Compressive Strength and Chloride Resistance of Slag/Metakaolin-Based Ultra-High-Performance Geopolymer Concrete," *Materials*, vol. 16, no. 1, p. 181, Dec. 2022, doi: 10.3390/ma16010181.
- [43] A. M. Tahwia, A. M. Heniegal, M. Abdellatief, B. A. Tayeh, and M. A. Elrahman, "Properties of ultra-high performance geopolymer concrete incorporating recycled waste glass," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, p. e01393, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01393.
- [44] M. Abdellatief, H. Alanazi, M. K. H. Radwan, and A. M. Tahwia, "Multiscale Characterization at Early Ages of Ultra-High Performance Geopolymer Concrete," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 24, p. 5504, Dec. 2022, doi: 10.3390/polym14245504.

طرح و پروسه اختلاط مواد مرکب سیمانی مهندسی شده (ECC) در کاربری روسازی های بتنی



مهسا سادات احمدی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ارشد مهندسی راه و ترابری، دانشکده عمران، معماری و هنر دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات
عضو حقیقی انجمن بتن ایران



پرهام حیاتی

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشکده عمران، معماری و هنر دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران
عضو حقیقی انجمن بتن ایران

چکیده

یکی از روسازی های متداول، روسازی بتنی غیر مسلح در زردار¹ (JPCP) است که در ضخامتی حدود ۳۰ سانتی متر احداث می شود. کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC) نوعی بتن الیافی قابل استفاده در روسازی است که با خواص مکانیکی خوب می تواند در پروژه های خاص با محدودیت، جایگزین روسازی های متداول با ضخامتی کمتر در حدود ۵-۷ سانتی متر شود. در ساخت بتن ECC به عنوان یک بتن فوق توانمند نیازمند رعایت الزامات خاصی در انتخاب نوع و درصد حجمی مصالح و دستور اختلاط می باشد. منابع و مراجع مختلف برای ساخت بتن ECC پیشنهاد های متفاوتی ارائه نموده اند اما با توجه به پیچیدگی های ساخت این نوع بتن در این مقاله به بررسی عوامل تاثیر گذار در فرآیند ساخت بتن ECC مطابق با الزامات روسازی های بتنی پرداخته شده است. در این پژوهش به طور کلی ۸ طرح به منظور امکان سنجی کاربرد درشت دانه، نسبت آب به مواد سیمانی، نوع ۲ سیمان پرتلند، نوع ماده جایگزین سیمان، نوع و درصد الیاف، نوع و درصد فوق روان کننده، فرآیند ساخت بتن ECC و کنترل با ضوابط کار پذیری و مکانیکی بتن پرداخته شده است. با توجه به نتایج دستورهای ساخت مشخص گردید که در ساخت بتن ECC از درشت دانه استفاده نشود. همچنین بهتر است از سیمان با ریزی زیاد و خواص مکانیکی خوب، الیاف با درصد بهینه ۲٪ حجم مواد سیمانی، فوق روان کننده فاقد مواد دیرگیر، نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲۸، سرباره و میکروسیلیس به عنوان مواد جایگزین سیمان و مخلوط کن مناسب با امکان تغییر سرعت چرخش جهت اختلاط استفاده شود. کلمات کلیدی: کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC)، درشت دانه، الیاف، مواد جایگزین سیمان، پروسه اختلاط.

۱- مقدمه

ضعف های متعدد بتن مانند رفتار ترد، مقاومت کششی کم، گسترش سریع ترک ها، ظرفیت کرنش کششی بسیار کم (تنها در حدود ۰,۰۱ درصد) و شکل پذیری ناچیز علتی برای استفاده از الیاف در خمیره بتن و ساخت

کامپوزیت های سیمانی الیافی بوده است [۱-۳]. بتن های الیافی^۲ (FRC) نوعی مواد مرکب است که با استفاده از

¹ Joint Plain Concrete Pavemen

² Fiber Reinforced Concrete

الیاف، دوام بتن و خواص مکانیکی بهبود می یابد. خاصیت انعطاف‌پذیری آن باعث می‌شود که بتن الیافی گسیخته نشود. همچنین به علت پراکندگی الیاف در همه جهات، در صورت تشکیل یک ترک، الیاف در جهات مختلف اتصالاتی را به وجود آورده و از گسترش ترک جلوگیری می‌نماید. در واقع بتن الیافی بتنی (یا ملاتی) است که با الیافی طبیعی یا مصنوعی که به طور تصادفی در بتن توزیع شده، مسلح شده است. استفاده از الیاف طبیعی در بتن به لحاظ تاریخی به زمانی پیش از ساخت بتن مسلح معمولی برمی‌گردد. [۴] بتن‌های الیافی توانمند^۳ (HPFRC) نسل پیشرفته‌ی بتن الیافی به شمار می‌آید که در کشش، رفتار کرنش سختی از خود نشان می‌دهد. بتن‌های الیافی توانمند به دو دسته بتن الیافی توانمند بر پایه‌ی مصالح سیمانی^۴ (HPFRCC) و بتن‌های حریره الیافی (SIFCON, SIMCON) تقسیم می‌شود [۵].

^۵ECC (کامپوزیت مهندسی شده یا بتن خم شونده) نوعی خاص از بتن‌های HPFRCC است که توسط پروفسور لی در دانشگاه میشیگان در سال ۱۹۹۳ میلادی به منظور تاکید بر استفاده از اصول ریزسازوکار در انتخاب طرح مخلوط، ارائه کرده است. [۵ و ۶] از روش سعی و خطا برای ساخت بتن ECC استفاده می‌شود. [۱] در ساخت ECC از مصالح رایج ساخت بتن‌های الیافی مانند آب، سیمان، ماسه، پوزولان، فوق کاهنده آب

^۶(HRWRH) و الیاف استفاده می‌شود. برخلاف بتن‌های معمولی، معمولاً در طرح مخلوط و ساخت ECC از سنگدانه درشت به علت افزایش عرض ترک استفاده نمی‌شود [۲۵ و ۲۵] ECC دارای یک طرح مخلوط ثابت نیست بلکه با مصالح مختلف می‌توان به آن دست یافت. [۳]

متناسب با الزامات مورد نیاز هر پروژه می‌توان به تغییر طرح مخلوط بتن‌های ECC اقدام کرد. بتن‌های خود تراکم ECC که از جمله نمونه‌ی آن می‌توان به بتن ECC-M45 اشاره کرد، برای ساخت و ساز با مقیاس‌های بزرگ طراحی و برنامه‌ریزی شده است. [۷ و ۸] بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی شده با مقاومت اولیه زیاد که به اختصار به آن بتن‌های HES-ECC^۷ می‌گویند برای کاربرد آن‌ها در زیرساخت‌های حمل و نقلی طراحی شده است که به بازگشایی و راه اندازی آنها برای عبور و مرور ماشینهای عمومی در کمترین زمان نیاز است. [۹] بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی سبک وزن که به اختصار به آن بتن‌های LW-ECC^۸ نیز می‌گویند برای مکان‌هایی که به بار مرده حداقل نیاز است طراحی و مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۱۰] بتن‌های کامپوزیت سیمانی مهندسی سبز که به اختصار به آن G-ECC^۹ می‌گویند برای به حداکثر رساندن سبکی سازه و پایداری زیرساخت‌ها طراحی شده است. [۱۱ و ۱۲] بتن‌های

6 High-Range Water Reducer

7 High-Early-Strength Engineered Cementitious Composites

8 Low Weight Engineered Cementitious Composites

9 Green Engineered Cementitious Composites

3 Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete

4 High-performance fiber-reinforced cementitious composites

5 Engineered cementitious composite

کامپوزیت سیمانی مهندسی خود ترمیم شونده که به اختصار به آن 'SH-ECC' می گویند، یکی دیگر از خانواده این نوع بتن محسوب می شود و برای بازسازی خصوصیات مکانیکی بعد از خسارت مورد استفاده قرار میگیرند. [۱۴ و ۱۳]

۱-۱- طرح مخلوط

سیمان مصرفی در بتن سیمانی مهندسی شده سیمان پرتلند می باشد. [۱] به علت عدم وجود درشتدانه در اکثر طرح های مخلوط مقدار سیمان مصرفی به نسبت بتن معمولی زیاد است، تولید سیمان آلودگی های زیادی برای محیط زیست دارد بنابراین برای جلوگیری از آلودگی و بهبود خواص این بتن می توان قسمتی از سیمان را با مواد شبه سیمانی جایگزین کرد. مواد سیمانی مصالحی است که در مخلوط با آب سخت می شود.

یک پوزولان نیز بعد از فعال شدن با یک ماده قلیایی مانند آهک با آب سخت می شود. [۱۵] مواد شبه سیمانی مورد استفاده در بتن ECC عبارتند از خاکستر بادی [۵]، میکروسیلیس [۱۶، ۱۷]، پودر کوارتز [۱۸] و سرباره کوره آهن گدازی [۱۹]. رایج ترین پوزولان مورد استفاده در بتن ECC، خاکستر بادی می باشد. در بیشتر تحقیقات از خاکستر بادی کلاس F مطابق الزامات ASTM C [2014] 618 استفاده شده است [۲۰]. نیاز به منابع تولید برق پایدار روز به روز در حال افزایش است. در بسیاری از کشورها در سراسر جهان، از جمله کانادا در حال بررسی و حذف نیروگاه های زغال سنگ

است. این باعث کمبود تولید و عرضه خاکستر بادی می شود در صورتی که یکی از رایج ترین پوزولان برای ساخت ECC خاکستر بادی کلاس F می باشد. بویا و همکاران در ۲۰۲۰ در تحقیقی مقدار جزئی یا کلی خاکستر بادی را با سرباره جایگزین کردند. جایگزینی کلی یا جزئی سرباره باعث افزایش مقاومت کششی و مقاومت خمشی می شود. نتایج نشان می دهد سرباره از خاکستر بادی در کاهش نفوذ آب و نفوذ کلرید موثرتر است. [۲۱] در این پژوهش به جهت بومی سازی بتن از سرباره کوره آهن گدازی و میکرو سیلیس استفاده شده است.

اصل طراحی ECC به الیاف خاصی بستگی ندارد. تصمیم گیری در مورد انتخاب نوع الیاف انتخابی به ویژگی های طبیعی آن ها از جمله خواص مکانیکی، دامنه قطر و خصوصیات سطح، دوام و پایداری و هزینه بستگی دارد. [۲۲] انواع مختلف الیاف در این بتن توسط محققان به کار برده شده است از جمله: پلی وینیل الکل، پلی پروپیلن، پلی اتیلن، فلزی، شیشه ای، پلیمری، آلیاژی، باگاس، سیم تاپر و بازالت. [۵]

مالکی و همکاران در سال ۱۳۹۶ به بررسی تاثیر دو نوع الیاف پلی پروپیلن و پلی وینیل الکل و دو نوع فوق روان کننده بر پایه نفتالین و پلی کربوکسیلات و دو نوع سنگدانه ماسه سیلیسی و ماسه آهکی پرداختند. شکل پذیری هر دو الیاف تقریباً برابر است. در الیاف PVA^{۱۱} برخلاف PP^{۱۲} ترک های مویی بیشتر و ریزتر در سطح بتن ایجاد می شود.

با استفاده از ماسه آهکی شکل پذیری و طاقت خمشی بتن کاهش می یابد. استفاده از فوق روان کننده نفتالین باعث دیرگیر شدن بتن می شود. [۱]

در جدول شماره ۱ طرح مخلوط تعدادی از مقالات ارائه شده است.

جدول ۱- طرح های مخلوط منتخب ECC

مقالات								عنوان
استفاده از سرباره در ECC	استفاده از ECC	استفاده از ECC در مقاوم سازی	مقاله مروری ECC	درصد متفاوت الیاف در ECC	استفاده از ECC در روسازی	استفاده از ECC در روسازی	کتاب مرجع ECC	
۲۰۲۰	۲۰۲۰	۲۰۰۰	۲۰۱۲	۲۰۱۵	۲۰۰۳	۲۰۰۸	۲۰۰۷	سال انتشار
[۴۷]	[۴۶]	[۳۰]	[۲۶]	[۲۵]	[۷]	[۶]	[۵]	شماره مرجع
۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۷	≤۰/۵	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۲۷	۰/۲۶	نسبت آب به مواد چسبنده
-	-	-	-	۱۰	-	-	-	حداکثر اندازه سنگدانه
- ۰/۳۶ ۰/۳۴	۰/۳۴- ۰/۳۶	-	≤۰/۵	۱/۹۵	۰/۵	۰/۳۶	۰/۳۶	نسبت ماسه به مواد چسبنده
۱	۱	۰/۸	-	۱	۱	۱	۱	سیمان
-	-	٪۲۰	-	-	٪۱۰	-	-	میکروسیلیس
۱/۲- ۰/۱۸	۱/۲-۲/۲	-	-	۰/۵	-	۱/۲-۲/۱۸	۱/۲	خاکستر بادی
۱/۲	۱/۲-۲/۲	-	-	-	-	-	-	سرباره
۲	۲	۲	-	۱- ۰/۵ ۲- ۱/۵	۲	۲	۲	الیاف (درصد)
-	-	-	-	-	-	-	۱۲-۶	طول الیاف mm

۲-۱- دستور اختلاط

به طور کلی برای اختلاط این بتن از مخلوط کن گرانشی با حداقل دو سرعت چرخش استفاده می شود. در ابتدا مواد خشک، سیمان، پوزولان و سنگدانه با دور کند در مخلوط کن به مدت یک دقیقه مخلوط شدند و بدون خاموش کردن مخلوط کن ۷۰ درصد آب را اضافه کرده و بلافاصله فوق کاهنده و باقی آب را اضافه کرده و سپس سرعت چرخش مخلوط کن را زیاد کرده و ۲ تا ۳ دقیقه مصالح مخلوط شده است. پس از به دست آمدن ملاتی یکدست و یکنواخت به تدریج شروع به افزودن الیاف کرده و بعد از افزودن کامل الیاف،

حدود ۲ دقیقه ملات با سرعت زیاد مخلوط شد. برای جلوگیری از توده شدن آنها در داخل خمیره بتن باید اقداماتی مانند باد زدن و اسپری کردن آنتی استاتیک به الیاف اندیشید. [۱]

در مقاله ای دیگر مواد جامد شامل: سیمان، خاکستر بادی، ماسه، پودر سنگ و فوق روان کننده در مخلوط کن به مدت دو دقیقه مخلوط شدند و پس از اضافه کردن آب ۵ دقیقه ی دیگر عملیات مخلوط سازی ادامه می یابد. در این زمان مخلوطی روان با گرانیروی مناسب برای توزیع مناسب الیاف به دست آمده است بعد الیاف اضافه شدند و به مدت ۴ دقیقه ی دیگر عملیات مخلوط سازی ادامه

یافت در این مقاله فرایند تهیه ی ECC تازه حداکثر ۱۰ دقیقه به طول کشید. [۱۸]

در بعضی از مقالات برای بازکردن الیاف ابتدا مواد خشک را با الیاف در مخلوط‌کن مخلوط می‌کنند و سپس با اضافه کردن آب و مواد افزودنی به اسلایپ مد نظر می‌رسند اما طبق تجربه این روال باعث کلوخه شدن بیشتر الیاف در خمیر سیمان می‌شود.

طرح مخلوط ارائه شده در کتاب ECC به شرح ذیل است:

۱. اختلاط ماسه خشک به مدت ۲ دقیقه

۲. افزودن تمامی فوق روان کننده محلول در ۹۵-۹۰ درصد آب و اختلاط به مدت ۲ دقیقه

۳. افزودن خاکستر بادی و اختلاط به مدت ۲ دقیقه

۴. افزودن سیمان و اختلاط به مدت ۲ دقیقه

۵. افزودن باقی آب و اختلاط به مدت ۴ دقیقه

۶. اختلاط بتن به مدت ۵ دقیقه جهت همگن سازی مخلوط

۷. افزودن تدریجی الیاف به مخلوط در ۲ دقیقه

۸. اختلاط بتن به مدت ۵ دقیقه جهت همگن سازی مخلوط

در مجموع زمان برای اختلاط این بتن ۲۴ دقیقه می‌باشد. [۵] در جدول شماره ۲ دستور اختلاط بتن ECC در مقالات [۱۸ و ۱۷] ارائه شده است.

جدول ۲- دستور اختلاط

مرجع	[۱]	[۱۸]	[۵]
اقدامات			زمان (دقیقه)
اختلاط ماسه	-	-	۲
اختلاط مواد خشک (سیمان، سرباره و ماسه)	۱	۲	-
اضافه کردن ۹۵-۹۰ درصد آب اختلاط به همراه تمامی مواد فوق روان کننده	۲-۳	۵	۲
اضافه کردن تمام خاکستر بادی	-	-	۲
اضافه کردن تمام سیمان	-	-	۲
اضافه کردن آب باقی مانده به مخلوط	-	-	۴
ترکیب اختلاط با دور تند به مدت ۵ دقیقه جهت همگن شدن مخلوط	-	-	۵
اضافه کردن الیاف	۲	۵	۲
ترکیب مخلوط جهت همگن شدن مخلوط	-	-	۵
مجموع	حدوداً ۱۰	حداکثر ۱۰	۲۴

۲- روند ساخت بتن

۲-۱- مواد و مصالح

۲-۱-۱- مصالح سنگی

ریزدانه (ماسه ۰ تا ۶ میلی‌متر) که از معدن شن باران واقع در استان البرز تهیه شده است. مصالح سنگی ریزدانه دارای مدول نرمی FM برابر ۳/۵۶، درصد رطوبت برابر ۱۰/۳۸، جذب آب برابر ۳/۴،

وزن مخصوص در حالت اشباع با سطح خشک (gr/cm³) برابر ۲/۵۴ و درصد عبوری از الک ۲۰۰ مصالح سنگی ریزدانه مصرفی برابر ۴/۱۴ است. در جدول شماره ۳ دانه بندی ریزدانه مصرفی ارائه شده است.

جدول ۳- دانه بندی مصالح سنگی ریزدانه (ISIRI302)

محل برداشت نمونه: دپوی کارخانه آپتوس		نوع نمونه مصالح سنگی: ماسه ۰-۶ نام معدن مصالح: شن باران		
رد-قبول	محدوده استاندارد	درصد عبوری	اندازه چشمه	شماره الک
قبول	۱۰۰	۱۰۰	۹/۵ م م	#۲/۸
قبول	۸۹	۸۲/۹	۴/۷۵ م م	۴#
قبول	۶۰	۶۲/۸	۲/۳۶ م م	۸#
قبول	۳۰	۴۵/۷	۱/۱۸ م م	۱۶#
قبول	۱۵	۳۲/۷	۰/۶۰ م م	۳۰#
قبول	۵	۱۶/۶	۰/۳۰ م م	۵۰#
قبول	۱	۳/۵	۰/۱۵ م م	۱۰۰#
قبول	۰	۰/۵	۰/۰۷۵ م م	۲۰۰#
		۰/۰	مانده	Pan

در جدول شماره ۴ دانه بندی شن مصرفی ارائه شده است.

جدول ۴- دانه بندی مصالح سنگی درشتدانه

محل برداشت نمونه: دپوی کارخانه پرشین بتن جم		نوع نمونه مصالح سنگی: شن نخودی نام معدن مصالح: مستقر در شهریار تهران	
درصد عبوری	اندازه چشمه	شماره الک	
۱۰۰	۱۹ م م	#۳/۴	
۸۵/۴	۱۲/۵ م م	#۱/۲	
۵۶/۲	۹/۵ م م	#۲/۸	
۳۸/۵	۴/۷۵ م م	۴#	
۱۶/۶	۲/۳۶ م م	۸#	
۴/۸	۱/۱۸ م م	۱۶#	
۰/۸	مانده	Pan	

مواد اسیدی، صاف، قلیایی، املاح و دیگر مواد مضر باشد. آب مصرفی برای ساخت بتن باید به گونه ای حمل و نگهداری شود که از ورود مواد مضر به داخل آن و رشد خزه و مواد آلی در آن جلوگیری به عمل آید آب مصرفی در این پژوهش آب مصرفی آب شرب استان البرز که مطابق استاندارد ASTM C1602 می باشد.

۲-۱-۳- مواد سیمانی

مصالح سنگی درشتدانه دارای جذب آب برابر ۲/۴۵، وزن مخصوص در حالت اشباع با سطح خشک (gr/cm³) برابر ۲/۵۱ واحد، درصد شکستگی در یک جبهه ۸۹ و در دو جبهه ۸۰ و حداکثر قطر سنگدانه ۱۲/۵ میلیمتر است.

۲-۱-۲- آب

آب شرب بدون بو و مزه، تمیز و صاف را می توان در ساخت بتن استفاده کرد. آب باید عاری از مقدار زیادی

۱-۳-۱-۲- سیمان

شماره ۵ مشخصات شیمیایی و در جدول ۶ مشخصات

فیزیکی سیمان مصرفی آورده شده است.

در این پژوهش سیمان مصرفی، سیمان پرتلند تیپ ۲

کارخانه سیمان سپاهان اصفهان می باشد. در جدول

جدول ۵- مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲ سپاهان و مقایسه با محدودیت های استاندارد ملی ایران

خصوصیات شیمیایی استاندارد ۳۸۹ ایران		نتایج آزمایش	ترکیبات شیمیایی
نوع ۲	میزان		
۲۰	کمترین (%)	۲۰/۷۵	SiO ₂
۶	بیشترین (%)	۴/۷۰	Al ₂ O ₃
۶	بیشترین (%)	۴/۱۵	Fe ₂ O ₃
۶	بیشترین (%)	۲/۲۵	MgO
۳	بیشترین (%)	۰/۰۲۵	Cl
-	-	۰/۳	l.R
-	-	۱/۱۰	Free CaO
۸	بیشترین (%)	۵/۷۰	C ₃ A
-	بیشترین (%)	۰/۶۵	Na ₂ O+0.658 K ₂ O
۳	بیشترین (%)	۰/۸۵	کسر وزن در اثر سرخ شدن
۱/۵	بیشترین (%)	۰/۲۴	باقی مانده نامحلول

مقاومت سیمان سپاهان در برابر حملات شیمیایی می باشد. میزان افت وزن ناشی از احتراق سیمان برابر ۰/۸۵ می باشد که کمتر از مقدار تعیین شده در استاندارد ملی ایران است.

نتایج آزمایش ها نشان می دهد که مقادیر اکسید های سولفور و منیزیم به ترتیب برابر ۵/۷ و ۲/۲۵ درصد است که در حدود تعیین شده در استاندارد ملی ایران قرار گرفته اند که بیانگر استاندارد بودن

جدول ۶- مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند تیپ ۲ سپاهان

ویژگی های شیمیایی		نتایج آزمایش	آزمایش های فیزیکی
نوع ۲	میزان		
۲۸۰۰	کمترین	۳۴۹۶	سطح مخصوص (بلین) gr/cm ²
۰/۸	بیشترین	۰/۲	انبساط به روش اتوکلاو (%)
۴۵	کمترین	۱۴۰ اولیه	زمان گیرش به وسیله سوزن ویکات
۳۶۰	بیشترین	۱۸۰ ثانویه	

همانطور که در جدول شماره ۶ آمده است نتایج آزمایش‌ها فیزیکی در محدوده تعیین شده استاندارد ملی ایران ۳۸۹ می‌باشد.

۲-۱-۳-۲- میکروسیلیس

میکروسیلیس مصرفی در این پژوهش، از کارخانه فروآلیاژ ازنآ تهیه شده است. خواص فیزیکی و ترکیبات شیمیایی در جدول ۷ ارائه می‌شود.

جدول ۷- خواص شیمیایی و فیزیکی پودر میکروسیلیس شرکت صنایع فروآلیاژ ازنآ و مقایسه آن با استانداردهای مختلف

میکروسیلیس	JIS A 6207 2016	EN 13263-05	ASTM C 1240-15	ترکیب شیمیایی و فیزیکی
۹۳	۸۵>	۸۵>	۸۵/>	سیلیس (SiO ₂) (%)
۰/۸	۱/۵<	۱/۵<	-	اکسید آلومینیوم (Al ₂ O ₃) (%)
۱/۴	۲<	۲<	-	اکسید آهن (Fe ₂ O ₃) (%)
۰/۸	۱<	۱<	-	اکسید کلسیم آزاد (CaO) (%)
۰/۷	۵<	-	-	اکسید منیزیم (MgO) (%)
۰/۸	۲<	۲<	-	(Na ₂ +0.658 K ₂ O) (%)
۱/۴	-	-	-	کربن (C) (%)
۰/۰۶	۰/۱<	۰/۳<	-	کلر (Cl) (%)
۸	۴-۸/۵	-	-	PH
۱/۶	-	-	۳<	رطوبت (%)
۱/۸	۵<	۴<	۶<	افت سرخ شدن (LOI) (%)
۲۳	۱۵>	۱۵-۳۵	-	سطح ویژه gr/cm ²
۳۲۰	-	-	-	چگالی انبوهی چگال نشده
۱۱۲	۹۵<	-	۱۰۵<	شاخص هیدرولیکی (%)
۰/۹	-	-	۱۰>	مانده روی الک ۴۵ میکرون

ریز باشد. که در میکروسیلیس مصرفی این تحقیق مانده روی الک ۴۵ میکرون برابر ۰/۹ می‌باشد که در محدوده مجاز قرار دارد.

۲-۱-۳-۳- سرباره کوره آهن گدازی

سرباره مصرفی در این پژوهش، از کارخانه ذوب آهن اصفهان است که خواص فیزیکی و شیمیایی سرباره در جدول ۸ ارائه شده است.

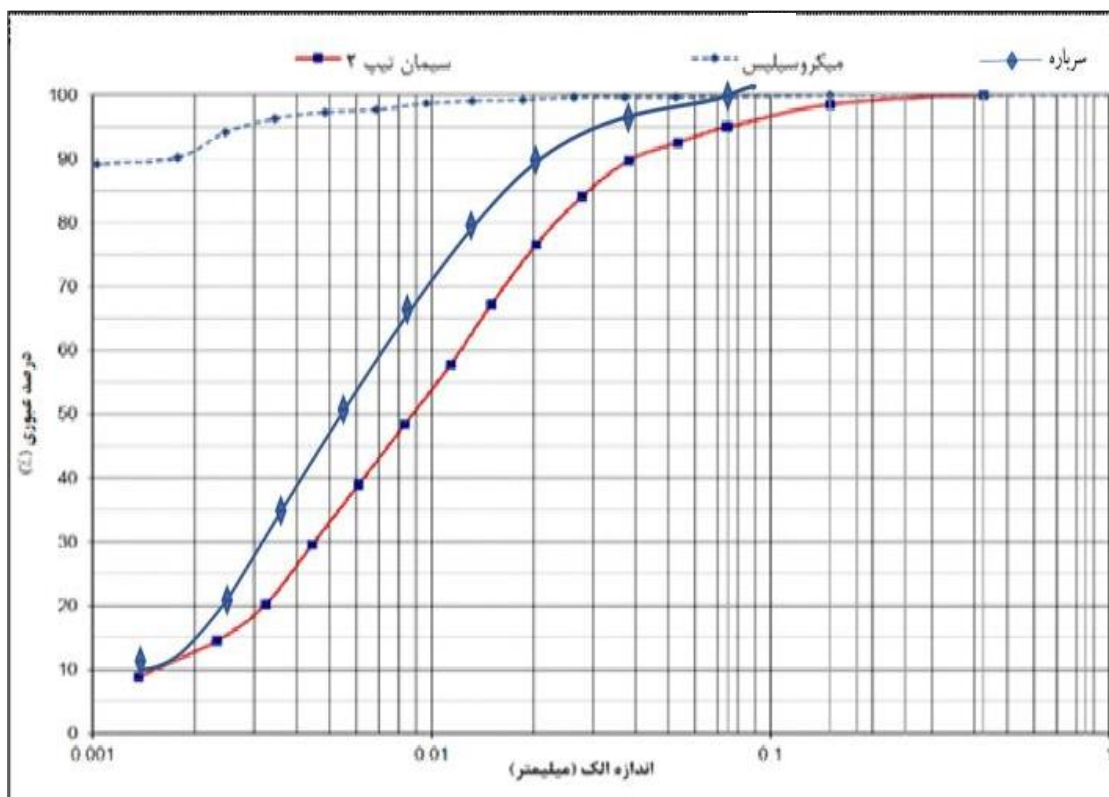
SiO₂ برای میکروسیلیس مصرفی در این تحقیق برابر ۹۳ است که بالاتر از حد استاندارد های ASTM C 1240-15 و EN 13263-05 و JIS A 6207 2016 می‌باشد. بالا بودن سیلیسیم دی اکسید بیانگر فعالیت زیاد این پوزولان است. همچنین شاخص هیدرولیکی آن از میران مجاز ۱۰۵ بیشتر و ۱۱۲ می‌باشد که بیانگر کیفیت مناسب این نوع پوزولان است. پوزولان‌ها برای آن که درواکنش فعال تر باشند باید ذرات آن‌ها به اندازه کافی

جدول ۸ - خواص فیزیکی و شیمیایی سرباره کوره آهن گدازی شرکت ذوب آهن اصفهان و مقایسه با استاندارد B.S 146

پوزولان	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	FeO (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)	S (%)
سرپاره	۳۲	۱۱/۲	۰/۶۷	۴۳/۹	۱۰/۶	۳/۸۱	۱/۴۸	۰/۹
استاندارد B.S 146	CaO/SiO ₂ >1.4	-	۳	CaO/SiO ₂ >1.4	۱۴	۳	۲	۲

دهنده فعالیت مناسب این پوزولان است. در نمودار شماره ۱ دانه بندی سیمان، سرپاره و میکروسیلیس ارائه شده است.

طبق استاندارد ذکر شده باید این رابطه $CaO/SiO_2 > 1.4$ برای سرپاره مصرفی صدق کند. مقدار این پارامتر برای سرپاره مصرفی برابر $1/37$ می باشد که از حد بیشینه $1/4$ کمتر و نشان



نمودار ۱- دانه بندی سرپاره، میکروسیلیس و سیمان نوع ۲

اسلامپ در زمان کم طراحی شده است. این فوق روان کننده قابلیت کاهش میزان آب بتن را تا ۳۰٪ با اسلامپ ثابت دارد به همین دلیل مقاومت فشاری بتن در سنین اولیه و نهایی افزایش می یابد. P9N مطابق با استاندارد ASTM C494، EN934-2، ISIRI2930 می باشد. این HRWR برای استفاده با انواع سیمان و مواد جایگزین سیمان مانند خاکستر بادی، میکروسیلیس و سرپاره سازگار است. فوق روان کننده شرکت

۲-۱-۴- فوق کاهنده آب

در این پژوهش از افزودنی جهت تولید بتن فوق روان با مقاومت زیاد، از سه فوق روان کننده استفاده شد. فوق روان کننده شرکت شیمی ساختمان با نام تجاری Farco PLAST P9N که بر پایه تکنولوژی پلی کربوکسیلات اتر برای ساخت بتن با بیشترین کاهش آب و کسب مقاومت زیاد در سنین اولیه، با حفظ

روان کننده می‌توان به کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، حفظ اسلامپ طولانی و روان سازی بیشتر اشاره کرد.

۲-۱-۵-الیاف

الیاف یکی از اجزای ضروری در ساخت بتن ECC است. در این پژوهش الیاف پلی‌وینیل‌الکل و الیاف پلی‌پروپیلن استفاده شده است. مشخصات الیاف پلی‌وینیل‌الکل که از شرکت ثانی پلاست و الیاف پلی‌پروپیلن که از شرکت نانو نخ و گرانول سیرجان تهیه شده در جدول شماره ۵ ارائه شده است.

شیمی ساختمان با نام تجاری Farco PLAST P10-3R که بر پایه تکنولوژی پلی‌کربوکسیلات‌های اصلاح شده می‌باشد. این نوع افزودنی با خواص حفظ اسلامپ بتن در زمان طولانی تولید گردیده است و برای حمل‌های طولانی، استفاده در شرایط آب و هوایی گرم و ساخت بتن فوق روان همراه با میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره مناسب است. این HRWR نیز برای استفاده با انواع سیمان و مواد جایگزین سیمان مانند خاکستر بادی، میکروسیلیس و سرباره سازگاری است. فوق روان کننده شرکت دماوند سفید پاریسیان با نام تجاری SR340-P که بر پایه تکنولوژی پلی‌کربوکسیلات می‌باشد. از خواص این فوق

جدول ۵- مشخصات الیاف پلی‌وینیل‌الکل و پلی‌پروپیلن

نام الیاف	طول (mm)	قطر (mm)	چگالی (gr/cm ³)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش نهایی (%)
پلی‌وینیل‌الکل	۶	۰/۰۱۶	۱/۳	۱۶۰۰	۳۸	۷
پلی‌پروپیلن	۶	۰/۰۳۵	۰/۹۱	۳۰۰	۳۷	۱۵

در شکل شماره ۱ تصاویر الیاف و روان کننده ارائه شده است.



شکل ۱- مواد و مصالح مصرفی

دانه، در طرح شماره ۲ نسبت آب به مواد چسبنده، در طرح شماره ۳ استفاده از سیمان ساوه، در طرح شماره ۴ و ۵ نوع فوق روان کننده، در طرح شماره ۶ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، در طرح شماره ۷

۲-۲- امکان سنجی روند ساخت بتن ECC

در این پژوهش به روش آزمون و خطا طرح مخلوط و دستور اختلاط انتخاب شده است. طبق جدول شماره ۶ در طرح شماره ۱ نسبت ریزدانه و درشت

درصد الیاف پلی‌وینیل‌الکل و در طرح شماره ۸ گرفته است. استفاده از میکروسیلیس در بتن مورد بررسی قرار

جدول ۶- آزمون و خطا در فرایند انتخاب طرح مخلوط بهینه

طرح ۸	طرح ۷	طرح ۶	طرح ۵	طرح ۴	طرح ۳	طرح ۲	طرح ۱	طرح مخلوط *		
درصد الیاف		نوع فوق روان کننده			نوع پوزولان	نوع سیمان	نسبت آب به مواد سیمانی	درشت دانه	متغیر طرح	
-	-	-	-	-	-	-	۰/۴	شن نخودی	سنگدانه	
۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۶			
۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۶-۰/۳۶	۰/۳	نسبت آب به مواد سیمانی		
-	-	-	-	-	۱	-	-	سازه	سیمان	مواد سیمانی
۱	۱	۱	۱	۱	-	۱	۱	سپاهان		
۱	۱	۱	۱	-	۱	۱	۱	سرپاره		
-	-	-	-	۰/۰۸۶	-	-	-	میکروسیلیس		
-	۲٪-۰/۸	٪۰/۲	٪۰/۲	٪۰/۲	٪۰/۲	٪۰/۲	٪۰/۲	پلی‌وینیل‌الکل		
۲٪-۰/۸	-	-	-	-	-	-	-	پلی پروپیلن		
-	-	-	-	-	٪۰/۱۵-۱/۵	٪۰/۱۵-۱/۵	۰/۵-۱/۵٪	SR340-P		
-	-	-	٪۰/۱۵-۱/۵	-	-	-	-	Farco PLAST P10-3R		
٪۰/۱۵	٪۰/۱۵	٪۰/۱۵-۱/۵	-	٪۰/۱۵	-	-	-	Farco PLAST P9N		

* تمامی مصالح به نسبت حجم سیمان در نظر گرفته شده است.

الیاف را به خوبی در خمیره بتن پراکنده نمی‌کرد. در نهایت از مخلوط‌کن دستی با سه سرعت چرخش کند، متوسط و تند استفاده شد که بهترین و قابل دسترس ترین روش برای اختلاط ECC بوده است. در شکل شماره ۲ بتن تولید شده در دستگاه مخلوط‌کن گرانشی و مخلوط‌کن گرانشی ارائه شده است.

در ابتدای روند ساخت بتن ECC از مخلوط‌کن گرانشی برای ساخت بتن استفاده شد که به علت سرعت چرخش پایین این دستگاه نیروی برشی لازم جهت اختلاط بتن تامین نشد و تمامی مصالح به دیواره‌ی دستگاه چسبیده و بتن پر از کلوخه‌های مواد سیمانی شده بود. در مرحله بعد از مخلوط‌کن گرانشی دارای یک سرعت چرخش بوده



اختلاط با مخلوط کن گرانشی



استفاده از مخلوط کن گرانشی با یک سرعت چرخش و جداسدگی بتن

شکل ۲- اختلاط دستی و استفاده از مخلوط کن گرانشی با یک سرعت چرخش و جداسدگی بتن

الک شماره ۸ عبور داده شد و در آزمون‌های بعد علاوه بر از بین رفتن جداسدگی، خصوصیات ظاهری بتن مانند اسلامپ بهبود یافت.

در طرح مخلوط شماره ۲ امکان سنجی نسبت آب به مواد سیمانی در محدوده ۰/۲۶ تا ۰/۳۲ در ساخت ECC مورد بررسی قرار گرفته است. بعد از ساخت آزمون‌های اولیه مشاهده گردید نسبت آب به مواد سیمانی کمتر از ۰/۲۸ باعث کاهش جریان اسلامپ بتن شده حتی افزایش میزان فوق روان کننده نیز کمکی به ایجاد روانی بتن نکرده و در نتیجه بتن دچار اضافه مصرف شده است. همچنین افزایش نسبت آب به مواد سیمانی همراه با کاهش میزان فوق روان کننده باعث جداسدگی بتن شده است. در شکل شماره ۳ تصاویر طرح های ساخته شده ارائه شده است.

در طرح مخلوط شماره ۱ امکان سنجی کاربرد مصالح سنگی درشت دانه در ساخت بتن ECC مورد بررسی قرار گرفته است. نسبت ریز دانه به درشت دانه برابر ۶۰ به ۴۰ در نظر گرفته شد. در آزمون‌های اولیه به دلیل وجود درشت دانه، الیاف در خمیر بتن به خوبی پراکنده نشده و بقیه مواد جذب درشت دانه شده و تشکیل کلوخه داده و باعث جداسدگی بتن گردیده است. همچنین همانطور که قبلاً ذکر شد، درشت دانه باعث افزایش ترک خوردگی بتن می‌شود و در اکثر مقالات مرتبط با بتن ECC عدم کاربرد درشت دانه تایید شده است. بنابراین با توجه به بازرسی چشمی بتن ساخته شده و نتایج رئولوژی بتن، درشت دانه در ساخت بتن ECC استفاده نشد. آزمون‌های بعدی با ماسه ۰ تا ۶ میلی‌متر انجام شد. با وجود اینکه خصوصیات فیزیکی بتن بهبود یافت اما درصد کمی جدا شدگی و آب انداختگی مشاهده گردید بنابراین ماسه از



نسبت آب به مواد سیمانی کمتر از ۰/۲۸

نسبت آب به مواد سیمانی بیشتر از ۰/۲۸

شکل ۳- نمونه ای از بتن های رد شده مرتبط با طرح مخلوط شماره ۲

مقاومت فشاری و خمشی، سیمان سپاهان برای طرح مخلوط نهایی انتخاب شد. لازم به ذکر است طبق نمونه های ECC ساخته شده با هر دو سیمان، سیمان سپاهان نسبت به سیمان ساوه سازگاری بیشتری با سرپاره دارد. در جدول شماره ۷ نتایج آزمایشات سیمان ارائه شده است.

در طرح شماره ۳ امکان سنجی انتخاب نوع سیمان مصرفی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تاثیر اندازه ذرات سیمان و نتایج آزمایش بلین بر سیمان های ساوه، سپاهان، خمسه، آبیگ و سبزووار دو سیمان پرتلند نوع دو سپاهان و ساوه برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و خمشی انتخاب شد. با توجه به نتایج آزمایش

جدول ۷- نتایج آزمایش های بلین و مقاومت فشاری سیمان ها

مقاومت خمشی (kg/cm ²)	مقاومت فشاری (kg/cm ²)		سطح مخصوص (بلین) gr/cm ²		سیمان
	نتایج آزمایش	استاندارد	نتایج آزمایش	استاندارد	
-	۱۷۵	-	۲۸۰۰	۲۶۸۲	سیمان سبزهوار
-		-		۲۸۵۴	سیمان آبیگ
-		-		۲۹۰۹	سیمان خمسه
۱۰۹/۲		۱۴۹		۳۱۷۸	سیمان ساوه
۱۵۵/۳		۱۹۹/۱		۳۴۹۶	سیمان سپاهان

در شکل شماره ۴ تصاویر سیمان های آزمایش شده ارائه شده است.



سیمان خمسه

سیمان آبیگ

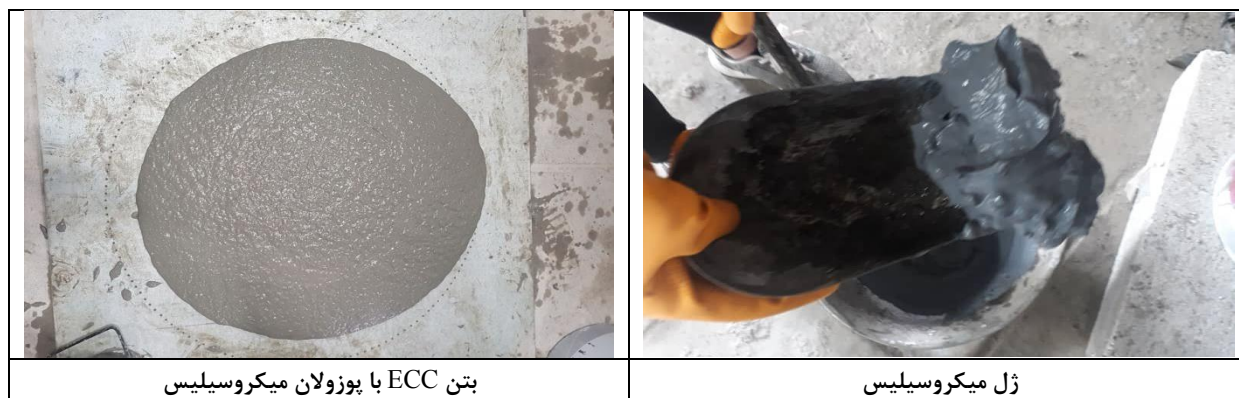
سیمان سبزووار



شکل ۴- تصاویر آزمایش ها سیمان

صورت خشک با سایر مواد خشک سیمان و ماسه، اختلاط به این روش امکان پذیر نمی باشد. بنابراین میکروسیلیس به صورت دوغاب به مخلوط بتن اضافه شد. در شکل ۵ تصاویر طرح شماره ۴ ارائه شده است.

در طرح شماره ۴ امکان سنجی استفاده از میکروسیلیس مورد بررسی قرار گرفته است. در این طرح از میکروسیلیس به عنوان پوزولان به میزان ۸ درصد سیمان استفاده شد. به علت به پراکندگی ذرات میکروسیلیس در هوا در حین اختلاط به



شکل ۵- تصاویر مرتبط با طرح مخلوط شماره ۴

با نام تجاری SR340-P استفاده شد. این ماده ای افزودنی با باقی مصالح سازگاری نداشته و باعث جداشدگی و آب انداختگی بتن شده است. در طرح شماره ۵ از یکی از فوق روان کننده های آب شرکت شیمی ساختمان با نام تجاری P10-3R استفاده شد. این فوق روان کننده بر پایه کربوکسیلات بوده و به علت خاصیت دیرگیرکنندگی، باعث آب انداختگی بتن ECC شده است. به دلیل خاصیت

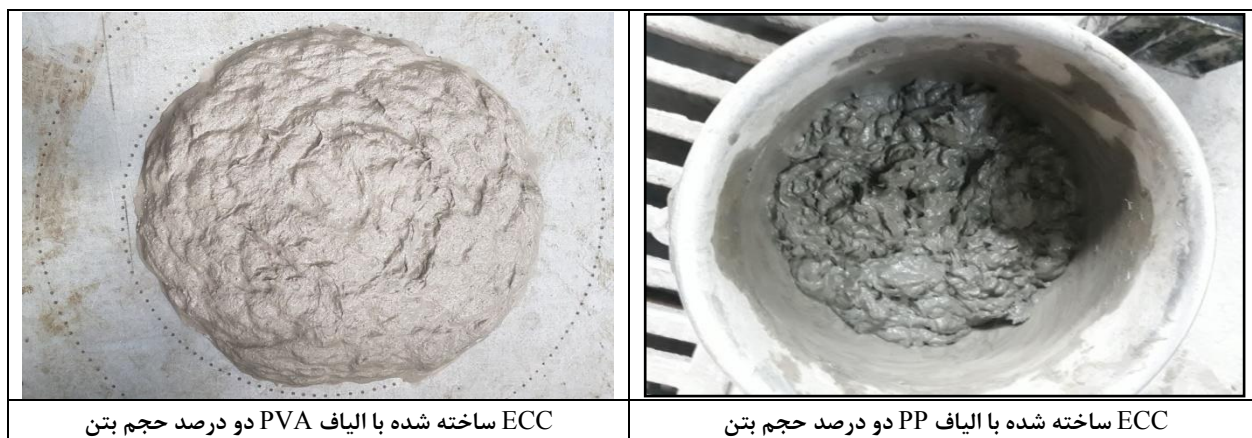
در طرح شماره ۵ و ۶ امکان سنجی انتخاب نوع و درصد فوق روان کننده مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نسبت آب به مواد سیمانی کم در این نوع بتن ها و همچنین لزوم کسب خواص مکانیکی زیاد، وجود فوق روان کننده و فوق کاهنده آب در بتن های ECC ضرورت دارد. در آزمون های اولیه ساخت ECC از فوق کاهنده آب بر پایه کربوکسیلات شرکت دماوند سفید پاریان

دیگرکنندگی این ماده، در ECC دیرتر عمل کرده و پروسه اختلاط را طولانی تر شد. در انتها در طرح شماره ۶ از فوق کاهنده آب P9N شرکت شیمی ساختمان در ساخت بتن استفاده شده است. بعد از ساخت نمونه‌های اولیه با فوق روان کننده به میزان ۰/۱/۵٪، برای جلوگیری از جدا شدن مصالح بتن این مقدار به ۰/۵٪ تغییر پیدا کرده است. در طرح شماره ۷ و ۸ امکان سنجی انتخاب نوع و درصد الیاف مورد بررسی قرار گرفته است. الیاف اصلی در این نوع بتن الیاف پلی‌وینیل‌الکل است که از الیاف پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن، فلزی، شیشه‌ای، پلیمری، آلیاژی، باگاس، سیم وایر و بازالت نیز استفاده می‌شود. در این پژوهش از الیاف PP و PVA با درصد‌های متفاوت استفاده شده است. در الیاف ابتدا مقدار الیاف ۲ درصد حجمی کل بتن (حدود ۸ درصد حجم مواد سیمانی) در نظر گرفته شده بود. در نمونه‌های اولیه الیاف در بتن پخش نشده، به توده‌های سفتی تبدیل شده که در بتن ایجاد ناحیه ضعیف کرده است. در نتیجه میزان الیاف ۲ درصد حجمی مواد سیمانی در نظر گرفته شد. الیاف PP باعث کاهش روانی بتن شده در حالی که در طرح‌هایی که الیاف PVA استفاده شده روانی بتن افزایش یافته است. افزایش درصد الیاف در بتن باعث ایجاد توده‌ی الیافی شده و باعث جداشدگی بتن شده است. الیاف در ماتریس بتن پراکنده نشده و ناحیه ضعیف در بتن سخت شده تشکیل داده و درصد آب انداختگی بتن زیاد است. در صورت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در

پروسه اختلاط دقت بیشتری لازم است. در شکل شماره ۶ تصاویر مرتبط با طرح‌های شماره ۷ و ۸ ارائه شده است.

در آزمون‌های اولیه طبق مقالات برای پخش بهتر و جدا شدن الیاف از یکدیگر، الیاف با مواد و مصالح خشک در مخلوط‌کن مخلوط کرده، به علت وجود رطوبت در مصالح سنگی الیاف توده شده است. در آزمون بعد الیاف در آب مخلوط و بعد به مصالح خشک کم کم اضافه شد که در این روش هم الیاف هم مواد سیمانی کلوخه شد، بنابراین این دستور اختلاط نیز حذف شد. در نهایت با آزمایش و خطای فراوان الیاف بعد از اختلاط مواد خشک و افزودن آب و فوق روان کننده به مخلوط، به خمیر سیمان اضافه شده است.

در بعضی از مقالات از روغنی استفاده شده که روی الیاف را می‌پوشاند و علاوه بر بهبود خواص الیاف باعث پخش بهتر الیاف در خمیر بتن نیز می‌شود. [۵] در این پژوهش از Nnp3000 استفاده شد. این روش باعث پخش بهتر الیاف در بتن شد اما این ماده باعث هوازایی زیادی شده است. در روسازی‌های بتنی میزان هوا یکی از پارامترهای تعیین کننده در دوام می‌باشد در نتیجه استفاده از این روغن تاثیر اولیه مناسبی در پراکندگی الیاف در بتن داشته اما تاثیر ثانویه می‌تواند تاثیر مخربی در دوام روسازی‌های بتنی در شرایط محیطی یخ زدن و آب شدن داشته باشد. بنابراین از پروسه اختلاط حذف شد.



ECC ساخته شده با الیاف PVA دو درصد حجم بتن

ECC ساخته شده با الیاف PP دو درصد حجم بتن

شکل ۶- تصاویر مرتبط با طرح‌های مخلوط شماره ۷ و ۸

۳- نتیجه گیری

۵- نوع و درصد الیاف مصرفی در بتن در کارایی، خواص مکانیکی و دوام بتن ECC تاثیر به سزایی دارد. درصد بهینه الیاف در بتن در حدود ۲ درصد حجم مواد سیمانی است. افزایش درصد الیاف در بتن باعث ایجاد توده ی الیافی شده و باعث جداسدگی بتن می‌گردد.

۶- الیاف PP باعث کاهش روانی بتن شده در حالی که در طرح هایی که الیاف PVA استفاده شده، روانی بتن افزایش یافته است.

۷- در دستور اختلاط بهترین زمان افزودن الیاف، بعد از اختلاط مواد خشک و افزودن آب و فوق روان کننده به مخلوط، در آخرین مرحله انجام گیرد.

با توجه به روند انجام پژوهش، موارد زیر در ارتباط با دستور ساخت بتن ECC به دست آمد:

۱- با توجه به دستور ساخت استفاده از مخلوط کن دستی با امکان تغییر سرعت چرخش بهترین و قابل دسترس ترین روش برای اختلاط ECC بوده است.

۲- عدم استفاده از درشت دانه می‌تواند در تامین الزامات کارایی و مقاومتی تاثیر مثبت داشته باشد. ضمن این که ساخت بتن ECC با درشت دانه می‌بایست با تغییراتی در مخلوط کن مورد بررسی قرار گیرد.

۳- در ساخت بتن ECC می‌بایست از سیمان با بلین زیاد با کنترل مقاومت فشاری و خمشی مورد نیاز استفاده شود.

۴- با توجه به آزمون‌های انجام شده، نسبت بهینه آب به مواد سیمانی ۰/۲۸ در نظر گرفته شود.

۴- فهرست مراجع

- [۱] مالکی. شیرین و کیاچهر بهفرنیا، ۱۳۹۶، بررسی تاثیر نوع مصالح بر ساخت کامپوزیت سیمانی مهندسی شده ECC، ششمین کنفرانس ملی و دومین کنفرانس بین المللی مصالح و سازه های نوین در مهندسی عمران، یزد،
- [۲] مالکی. شیرین و کیاچهر بهفرنیا، ۱۳۹۶، آشنایی با کامپوزیت سیمانی مهندسی شده ECC و کاربردهای آن، ششمین کنفرانس ملی و دومین کنفرانس بین المللی مصالح و سازه های نوین در مهندسی عمران، یزد، دانشگاه یزد،

- [۳] میرزامحمدی، سجاد؛ موسی مظلوم و محمد اکبری جمکرانی، ۱۳۹۸، بررسی آزمایشگاهی تاثیر استفاده از الیاف پلی پروپیلن بر روی خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت های سیمانی مهندسی شده، ششمین کنفرانس ملی پژوهشهای کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی،
- [۴] نادری، محمود، اسمعیلی زاده، & سیامک. (۲۰۱۹). مدل سازی عددی تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP انعطاف پذیر در دماهای بالا. نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۶(شماره ۳)، ۷۱-۸۸.
- [5] Li, V. C., "Engineered Cementitious Composites (ECC) – Material, Structural, and Durability Performance," E. Nawy, Ed., Ed in Concrete Construction Engineering Handbook: CRC Press, 2007.
- [۶] دهقانی، حمزه، & حمزه. (۲۰۲۱). ارزیابی خواص مکانیکی بتن خود ترمیم شونده حاوی میکروارگانسیم. مهندسی عمران مدرس، ۲۱(۱)، ۶۱-۷۱.
- [7] Kong, H. J., Bike, S. and Li, V.C., "Development of a self-compacting engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization. ", *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, pp. 301-309, 2003
- [8] Lepech, M. D. a. L., V.C., "Large scale processing of engineered cementitious composites", *ACI Materials*, 2007
- [9] Wang, S. a. L., V.C., "High early strength engineered cementitious composites", *ACI Materials*, vol. 103, pp. 97-105, 2006.
- [10] Wang, S. a. L., V.C., "Materials design of lightweight PVA-ECC", *Proc., HPRCC*, pp. 379-390, 2003.
- [11] Li, V. C., Lepech, M., Wang, S., Weimann, M. and Keoleian, G., "Development of green ECC for sustainable infrastructure systems.," presented at the Int'l Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, China, Iowa State Univ, 2004.
- [12] Lepech, M. D., Li, V.C., Robertson, R.E. and Keoleian, G.A., "Design of ductile engineered cementitious composites for improved sustainability", *ACI Materials*, 2007.
- [13] Yang, E. H., Yang, Y. and Li, V.C., "Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness", *ACI Materials* 2007.
- [14] Li, V. C. a. Y., E.H", "Self-healing in concrete materials", *Self Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*, Springer, pp. 161-193, 2007.
- [15] Hamad, T. A., Agll, A. A., Hamad, Y. M., & Sheffield, J. W. (2014). Solid waste as renewable source of energy: current and future possibility in Libya. *Case studies in thermal Engineering*, 4, 144-152.
- [16] Li, V. C. (2003). Durable Overlay Systems with Engineered Cementitious Composites (ECC)/Dauerhafte Beschichtungssysteme aus technisch entwickelten zementgebundenen zusammengesetzten Werkstoffen (ECC). *Restoration of Buildings and Monuments*, 9(3), 215-234.
- [17] Li, V. C., Horii, H., Kabele, P., Kanda, T., & Lim, Y. M. (2000). Repair and retrofit with engineered cementitious composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 65(2-3), 317-334.