



مطالعه آزمایشگاهی و بررسی اثر استفاده از پوزولان‌ها در ماتریس بتن و تاثیر آن بر پارامترهای مقاومتی آن در مقایسه با بتن معمولی

کمیل مومنی^۱، محمد علی رضایت بخش^۲

۱- استادیار فنی - گروه مهندسی عمران - دانشگاه فنی و حرفه‌ای - تهران - ایران

۲- دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران - موسسه جهاد دانشگاهی رشت

Kmomeni@tvu.ac.ir

چکیده

کاهش تولید و مصرف سیمان یکی از موضوعات بسیار مهمی است که در سالیان اخیر مورد توجه محققین و دوستداران محیط زیست بوده است. اثرات مخرب تولید سیمان توسط کارخانه‌ها از طریق انتشار گازهای گلخانه‌ای تاثیرات بسیار منفی و برگشت ناپذیری بر محیط زیست دارد. در این پژوهش به بررسی تاثیر به کارگیری پوزولان طبیعی و الیاف پلی پروپیلن و الیاف فولادی در سن عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه می‌پردازیم. نمونه‌های ساخته شده به وسیله آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت خمشی و بررسی ساختار توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مقاومت فشاری و خمشی در تمامی نمونه‌های ساخته شده نشان از افزایش و بهبود بوده است. مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی و الیاف فولادی در سن ۲۸ روز و مقاومت خمشی در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن و حضور پوزولان طبیعی در سن ۲۸ روزه نشان دهنده‌ی بیشترین میزان تغییرات بوده است.

کلمات کلیدی: مقاومت فشاری، پوزولان طبیعی، مقاومت خمشی، الیاف پلی پروپیلن، الیاف فولادی.

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های چندین دهه اخیر در تمامی صنایع، آسیب به محیط زیست بوده است و از طرفی یکی از صنایع که نقش بسزایی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بخصوص CO₂ دارد صنعت سیمان کشور است که رابطه تنگاتنگی با صنعت ساخت و ساز دارد. سیمان به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی روز دنیا محسوب می‌گردد که هر چه میزان مصرف این ماده استراتژیک کمتر گردد به طبع شاهد کاهش مخاطرات زیست محیطی آن نیز خواهیم بود (سکوآی، ۲۰۱۶، ۳). بر اساس برآوردها، انتشار CO₂ از کارخانه‌های سیمان، ۱۱۳ میلیارد مگاتن است که دومین تولید کننده و انتشار دهنده این گاز گلخانه‌ای می‌باشد. تقاضا برای بتن در کشورهای مختلف دنیا بسیار زیاد می‌باشد. طبق تحقیقات صورت گرفته، مصرف بتن پس از مصرف آب، به عنوان بیشترین مصرف شناخته شده است. طبق آمارهای بین المللی، ۵ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای را تولید سیمان تشکیل می‌دهد (ورل و همکاران، ۲۰۰۱، ۲). حدود سی و چهار درصد CO₂ انتشار یافته از تولید سیمان که اغلب به دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی است، در اتمسفر آزاد می‌شود و دو سوم باقی مانده نشان دهنده انتشار CO₂



از فرآیند کربن زدایی سنگ آهک در طول فرآیند کلسینه شدن تولید بتن است (ایزومی و هو، ۲۰۲۱، ۵). سهم CaO در کلینکر حدود ۶۴ تا ۶۷ درصد بوده و باقیمانده شامل اکسید سیلیکون، اکسید آهن و اکسید آلومینیوم است. بنابراین، انتشار CO_2 حاصل از تولید کلینکر به ازای هر کیلوگرم کلینکر به حدود ۰/۵ کیلوگرم می‌رسد. مقدار CO_2 تولید شده در هر تن سیمان به کلینکر سیمان بستگی دارد. این نسبت معمولاً از ۰/۵۱ تا ۰/۹۶ متغیر است. برای فرآیند انتشار CO_2 ناشی از تولید سیمان (فرآیند تولید کلینکر) برای اجرای فرآیند کلسینه کردن مواد، در هر تن تولید کلینکر ۰/۱۳۶ مگاتن کربن تولید می‌شود (هانین بنرم، ۲۰۱۸). بنابراین، با توجه به حجم بالای انتشار CO_2 در تولید سیمان، یافتن راهی جهت کاهش مصرف سیمان در بتن با بهبود مشخصات مهندسی، برای جلوگیری از آلودگی محیط زیست ضروری می‌باشد. از طرفی محققین حوزه بتن سعی کرده‌اند تا با استفاده از مواد افزودنی جایگزین سیمان علاوه بر کاهش میزان مصرف سیمان در بتن موجب افزایش پارامترهای مقاومتی بتن گردند. از جمله افزودنی‌های جایگزین سیمان در بتن می‌توان به نانومواد، مواد شبه سیمانی،

پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی و ... اشاره نمود. در این پژوهش به بررسی استفاده از مواد پوزولانی جایگزین بتن و تاثیر آن بر بهبود پارامترهای مقاومتی و همچنین کاهش اثرات مخرب استفاده از سیمان بر محیط زیست پرداخته می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

تدین و همکارانش در سال ۲۰۱۶ به بررسی بتن حاوی مواد مختلف جایگزین سیمان (زئولیت، متاکائولن و میکروسیلیس) از نظر نفوذ یون کلر در نمونه‌های آزمایشی با قالب مکعبی و تیری شکل در محیط جذر و مدی جزیره قشم پرداختند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از مواد جایگزین برای بهبود دوام بتن بسیار کارآمد است و در طولانی مدت مقدار نفوذ یون کلر را کاهش خواهد داد. بهفرنیا و رستمی در سال ۲۰۱۷ به بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر کربناته شدن بتن حاوی سرباره قلیایی پرداختند. در این تحقیق بخشی از میکروسیلیس را جایگزین سرباره قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد جایگزین کردن ۱۵ درصد سرباره با میکروسیلیس، سبب افزایش مقاومت فشاری می‌شود؛ ضمن اینکه بتن حاوی ذرات میکروسیلیس به دلیل ریزی ذرات نسبت به سرباره، از مقاومت بیشتری نسبت به سرباره برخوردار هستند. بهفرنیا و رستمی در سال ۲۰۱۷ به بررسی اثر میکروسیلیس و نانوسیلیس بر میزان نفوذپذیری بتن حاوی سرباره کوره آهن گدازی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد اضافه نمودن میکروسیلیس، سبب کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود؛ با این وجود افزایش جزئی نانوسیلیس تغییر چندانی در نتایج نفوذ پذیری بتن نخواهد داشت. کریستوفر و همکارانش در سال ۲۰۱۷ به بررسی ساختار و خواص ملات و بتن با خاکستر پوسته برنج به عنوان جانشین جزئی سیمان پرتلند معمولی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد بتن حاوی خاکستر پوسته برنج چگالی یکسانی با بتن با وزن معمولی دارد. همچنین ریز ساختارهای غیرقابل نفوذ خاکستر پوسته برنج در برابر عواملی مانند حملات سولفات، ورود کلرید باعث تولید بتن بادوام می‌شوند (فایوندا و همکاران، ۲۰۱۷، ۳). توماس در سال ۲۰۱۸ به بررسی استفاده از خاکستر پوسته برنج در بتن سبز به عنوان ماده سیمانی مکمل پرداخت. نتایج آن نشان داد افزایش مقدار خاکستر پوسته برنج در بتن به میزان ۱۵ الی ۲۰ درصد پتانسیل خوردگی، کربناته شدن، نفوذ کلرید، حمله اسید و سولفات را کاهش می‌دهد. همچنین بتن حاوی خاکستر پوسته برنج تا ۳۰ درصد می‌تواند کاهش تخلخل و در نتیجه جذب آب را نشان دهد (توماس، ۲۰۱۸، ۳). آکای در پژوهشی به ارزیابی اثر همزمان پوزولان و الیاف فولادی را بر مقاومت فشاری نمونه‌ها در سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار داد که نتایج حاصل، افزایش مقاومت فشاری را نشان داده است (آکای، ۲۰۱۸، ۴). فنگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ با بهره‌گیری از پوزولان خاکستر بادی و سه الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن و پلی‌ونیل الکل آزمایش‌های مقاومت فشاری، خمشی و مقاومت در برابر ضربه ناشی از گوی افتان فلزی را بصورت الیاف منفرد و هیبریدی به انجام رساندند. ایشان بیان داشتند که نمونه‌های حاوی الیاف فولادی مقاومت فشاری بهتر، نمونه‌های حاوی هیبرید الیاف فولادی و هیبرید الیاف



فولاد و پلی پروپیلن مقاومت خمشی بهتر از سایر نمونه‌ها داشته‌اند. مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های حاوی الیاف هیبرید فولاد و پلی پروپیلن بالاتر از سایر نمونه‌ها بوده است (فنگ و همکاران، ۲۰۱۸، ۵). گوچه و همکاران بیان کردند که سیلیکا فوم (SF) توانایی پرکردن ذرات بین سیمان پرتلند معمولی را دارد و این کار را بهتر از مواد ریزدانه در بتن انجام می‌دهد. SF آب کمتری مصرف می‌کند و استحکام بهتری ایجاد می‌کند، بنابراین جایگزین مناسبی برای بخشی از سیمان در بتن است (گوچه و رامیار، ۲۰۱۹، ۲). میلرا و همکارانش در سال ۲۰۱۹ به بررسی استفاده از خاکستر پوسته برنج در بتن و پتانسیل پایداری زیست محیطی آن پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد خاکستر پوسته برنج می‌تواند سبب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نسبت به سیمان پرتلند شده و به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده شود. همچنین سبب افزایش دوام بتن و ایجاد بتنی با کارایی بالا می‌شود (میلر، ۲۰۱۹، ۵). واراهاراجان و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی ارزیابی خصوصیات مکانیکی و فواید زیست محیطی استفاده از خاکستر پوسته برنج و گرد و غبار مرمر در بتن پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از خاکستر پوسته برنج و گرد و غبار مرمر سهم ارزشمند و مثبتی در به حداقل رساندن آلودگی محیط زیست و ایجاد پایدار و تمیز دارد (واراهاراجان و همکاران، ۲۰۲۰، ۵). یونگ پی و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی تخریب و رویکردهای افزایش دوام بتن در محیط دریایی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که میکروسیلیس، خاکستر پوسته برنج و چندین ماده طبیعی دیگر در سیمان می‌تواند مقاومت در برابر نفوذ کلرید و حفظ خواص مکانیکی پس از حمله در آب دریا را بهبود بخشند (یونگ پی و همکاران، ۲۰۲۰، ۳). دیپ و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی بتن مخلوط با میکروسیلیس در محیط اسیدی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که بتن مخلوط میکروسیلیس از دوام بیشتری نسبت به بتن معمولی در محیط اسیدی برخوردار است (دیپ و همکاران، ۲۰۲۰، ۴). ناندا و همکاران در سال ۲۰۲۰ اثر استفاده از پوزولان خاکستر بادی و متاکائولین را بصورت همزمان و منفرد در ترکیب آن با الیاف پلی پروپیلن در مقاومت فشاری و مقاومت خمشی، با نمونه‌های ساخته شده با بتن سیمانی معمولی بررسی کردند. نتایج نشان داد در تمامی موارد افزایش مقاومت فشاری و خمشی وجود داشته است (ناندا و همکاران، ۲۰۲۰، ۳). آوویرا و همکارانش در سال ۲۰۲۱ به بررسی خواص فیزیکی، استحکام و ریز مقیاس تقویت شده با الیاف پلاستیکی بتن حاوی ذرات ریز سرامیک پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ادغام الیاف پلاستیک و ضایعات سرامیکی منجر به کاهش ارزش اسلامپ شده و در نتیجه کارایی بتن تازه را کاهش می‌دهد. همچنین جذب آب با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های ریز سرامیکی و درصد الیاف پلاستیکی کاهش می‌یابد (آوویرا و همکارانش، ۲۰۲۱، ۴). چانداک و همکاران در سال ۲۰۲۱ با جایگزینی ۱۶ درصد وزنی پوزولان متاکائولن معوض سیمان و افزودن الیاف فولادی با کسر حجمی ۱/۵ درصد مقاومت فشاری نمونه‌ها را بهبود بخشیدند (چانداک و همکاران، ۲۰۲۱، ۳). لی و همکاران در سال ۲۰۲۱ با استفاده از پوزولان سیلیکا فوم (SF) معوض بخشی از سیمان در نمونه‌های بتنی حاوی الیاف فولادی با طول‌های متنوع آزمایشات مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت در برابر ضربه ناشی از گوی فلزی را انجام و بیان داشتند که الیاف بلندتر تاثیر بهتری بر مقاومت فشاری دارند و ترکیب الیاف با طول‌های متنوع، مقاومت خمشی و مقاومت در برابر ضربه متوالی گوی را نیز بهتر مستهلک می‌نمایند (لی و همکاران، ۲۰۲۱، ۳). در سال ۲۰۲۲ کارتیک و همکاران تاثیر همزمان پوزولان خاکستر بادی، سیلیکا فوم (SF) و سرباره کوره آهن گدازی (GGBFS) را در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن بصورت منفرد در آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت در برابر ضربه گوی فلزی انجام دادند. نتایج نشان داد که نمونه حاوی الیاف فولادی با طول بلند از سایر نمونه‌ها مقاومت فشاری بالاتری داشته است. این نمونه بهترین نتایج را در آزمون‌های ضربه نیز داشته است (کارتیک و همکاران، ۲۰۲۲، ۵).



۳- روش تحقیق

۳-۱ مواد و مصالح

مواد و مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل سیمان، پوزولان طبیعی، سنگدانه‌ها و الیاف می‌باشد که به صورت مفصل به بررسی آن می‌پردازیم. از سیمان پرتلند معمولی با نام انحصاری سیمان خزر که رده مقاومتی آن ۴۲/۵ نیوتن است و دارای حداقل مقاومت ۲۸ روز ۴۲/۵ مگاپاسگال می‌باشد (۱، ۲، ۲۰۱۱، BS). پوزولان این تحقیق از نوع طبیعی است و خاکستر آتشفشانی است که از دامنه کوهستان آسیاب از شهرستان سیاهکل در استان گیلان نمونه‌برداری شده است. از جمله خواص این خاکستر آتشفشانی می‌توان به ریزدانه بودن و پرکنندگی مناسب به همراه خاصیت چسبندگی اشاره نمود که برای جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی در ماتریس بتن مناسب است. این پوزولان طبیعی دارای سختی کم است که آسیاب نمودن آن را سهل می‌کند. Al_2O_3 و SiO_2 از جمله موادی هستند که به مقدار چشمگیری در این پوزولان وجود دارد که می‌تواند هیدرات سیلیکات کلسیم و هیدرات آلومینات کلسیم را از طریق ترکیبی از هیدروکسید کلسیم تولید شده توسط هیدراسیون سیمان تشکیل دهند. لازم به یادآوری است که استفاده بیش از حد مجاز از پوزولان به جای بخشی از سیمان بر مقاومت نهایی بتن تاثیرگذار است و می‌تواند به آن آسیب بزند و این جایگزینی باید بهینه باشد. در جدول (۱) به بررسی خواص شیمیایی و فیزیکی سیمان پرتلند و پوزولان این پژوهش و سایر پوزولان‌های کاربردی مشهور پرداختیم.

جدول ۱: مقایسه ترکیب شیمیایی و فیزیکی پوزولان معدنی این پژوهش با سیمان، دوده سیلیس (SF) متاکائولن (MK)، خاکستر بادی (FA) سرباره آسیاب شده کوره آهن گدازی (GGBS) (لی و همکاران، ۲۰۱۹، ۶، نکات و همکاران، ۲۰۲۱، ۴، سائوسی و همکاران، ۲۰۲۱، ۵) ژئولیت فوق ریز (SFZ) (چن و همکاران، ۲۰۱۹، ۳).

ترکیبات شیمیایی	سیمان	پوزولان معدنی پژوهش	SF	MK	FA	GGBS	SFZ
SiO_2	۲۲/۹۲	۶۸/۹۸	۹۶/۸۵	۵۲/۵۲	۵۶/۷۳	۳۳/۱۹	۶۲/۸۷
Al_2O_3	۷/۴۱	۱۴/۹۲	۱/۸۸	۴۴/۶۵	۱۹/۳۰	۱۵/۲۴	۱۳/۴۶
Fe_2O_3	۳/۰۸	۱/۹۳	۰/۵	۱/۸۴	۶/۵۸	۰/۶	۱/۳۵
CaO	۵۷/۵۱	۳/۳۴	۰/۲۵	۰/۳۴	۵/۵۴	۴۲/۱۱	۲/۷۱
MgO	۴/۱۳	۲/۸۲	۰	۰	۲/۹۸	۷/۸۹	۲/۳۸
Sor	۱/۷۷	۰/۵۷	۰	۰	۱/۱۲	۲/۶۴	۰/۴۵
K_2O	۰/۶۲	۱/۰۷	۲/۴۱	۲/۶۸	۱/۸۴	۰/۴۲	۱/۳
Na_2O	۰/۳۱	۲/۴۴	۰/۳۹	۰/۰۴	۰/۳۱	۰/۱۶	۲/۲
مشخصات فیزیکی							
Specific gravity	۳/۱۲	۲/۲۴	۲/۲۷	۲/۵۷	۲/۵۰	۲/۸۸	۲/۲۴
Specific surface(m^2/g)	۰/۳۷	۱/۲۳	۱۶/۴۶	۲/۵۴	۰/۳۹	۰/۴۴	۰/۳۱
Particle size(μm)	۹/۳۴	۳/۳۰	۰/۱۴	۳/۵۰	۸/۷۲	۱۵/۸۷	۳/۵۵

با توجه به مطالعات گذشته حداقل ترکیب قابل قبول مجموع سه ترکیب $Fe_2O_3 + Al_2O_3 + SiO_2$ طبق استاندارد ASTM C618 برای پوزولان‌های طبیعی ۷۰ درصد است که این عدد برای پوزولان طبیعی مدنی این پژوهش ۸۵/۸۳ درصد و کاملاً قابل قبول است (۲، ۲۰۱۴، ASTM C618). به منظور ساخت نمونه‌های بتن از ماسه معمولی در ساخت بتن نمونه‌های مورد آزمایش، از ماسه معمولی استفاده شد. ماسه مورد استفاده ریزدانه بوده مدول ریزدانه ۲/۲ تا ۲/۶ است (کویرالا، ۲۰۱۷، ۳). شن استفاده شده در این پژوهش بصورت خرد شده با حداکثر اندازه اسمی ۱۳ میلی متر به عنوان سنگدانه درشت استفاده شد. طبق گزارشات آزمایشگاهی، شن و ماسه ۰/۲۷ درصد رطوبت و ۱/۰۲ درصد جذب آب دارند. چگالی نسبی سیمان پرتلند معمولی و پوزولان‌های آسیاب طبیعی نیز مطابق با EN ۱۰۹۷ آزمایش شد که برای سیمان ۳/۱۲ و برای پوزولان طبیعی ۲/۲۴

بوده است (BS standard, ۱۹۹۸, ۴) بر اساس نتایج اندازه گیری شده، سطح ویژه سیمان پرتلند معمولی و پوزولان آسیاب شده به ترتیب ۰/۳۵ و ۱/۲۳ متر مربع بر گرم است. میانگین اندازه ذرات سیمان پرتلند معمولی و پوزولانهای آسیاب شده به ترتیب ۹/۳۴ میکرومتر و ۳/۵۵ میکرومتر است. فوق روان کننده با چگالی ۱/۰۳ گرم بر سانتی متر مکعب (در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد) برای افزایش جریان پذیری و کمک به پراکندگی ذرات در هر نمونه ملات اضافه می شود. در این پژوهش از دو نوع الیاف استفاده شده است. الیاف پلی پروپیلن و الیاف فولادی در شکل (۱) تصویری از الیاف استفاده شده در پژوهش ارائه شده است. همچنین در جدول (۲) مشخصات الیاف پلی پروپیلن و الیاف فولادی ارائه شده است. نحوه توزیع الیاف در نمونه های ساخته شده به صورت تصادفی می باشد.



شکل ۱: تصویر شماتیک الیاف پلی پروپیلن و الیاف فولادی (۱)

۲-۳ طرح اختلاط، ساخت نمونه و عمل آوری

به منظور بررسی رفتار بتن حاوی پوزولان طبیعی و الیاف می بایست طرح اختلاط مناسب محاسبه و تهیه نمود. در جدول (۳) طرح اختلاط پژوهش ارائه شده است. کسر حجم الیاف اضافه شده به مخلوط، مطابق با مقادیر متوسط مورد استفاده در چندین مطالعه قبلی انجام شد. برای محاسبه، کسر حجمی الیاف در یک متر مکعب بتن، می بایست درصد الیاف (که از نتایج مطالعات قبلی بدست آمده) را در چگالی الیاف ضرب نمود. در تمامی موارد از مقررات مندرج در استاندارد بتن الیافی ASTM C1116 استفاده شد (۲، ۲۰۱۹، ASTM C1609). در کل ۵ طرح اختلاط با نام های C_۱ الی C_۵ می باشد. طرح C_۱ نمونه شاهد بوده است و فاقد هر گونه الیاف و پوزولان طبیعی بوده است. طرح اختلاط C_۲ با پوزولان طبیعی و مقدار بهینه پوزولان جایگزین سیمان در بتن ۱۵ درصد وزنی سیمان محاسبه شد. طرح اختلاط C_۳ حاوی ۱۵ درصد پوزولان طبیعی و ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی است. طرح C_۴ حاوی ۱۵ درصد پوزولان طبیعی و ۰/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن می باشد و در نهایت طرح C_۵ که علاوه بر پوزولان معدنی حاوی ترکیب ۱ درصد الیاف فولادی و ۰/۲۵ درصد الیاف پلی پروپیلن است. به منظور ارزیابی نمونه های ساخته شده بر حسب طرح اختلاط ۵ گانه، نمونه ها به مدت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در آب غوطه ور عمل آوری می شوند. به منظور تهیه بتن برای قالب گیری قبل از افزودن آب و فوق روان کننده به مخلوط بتن، تمام ذرات ریزدانه را در ظرفی با رطوبت ۹۰ درصد مخلوط می کنیم. در مرحله اول مواد خشک سیمانی (سیمان، پوزولان آسیاب) و ماسه را همزمان قرار داده و با سرعت کم به مدت ۲ دقیقه مخلوط، تا مخلوط سیمانی و ماسه حاصل شود. سپس به مدت ۲ دقیقه به تدریج فوق روان کننده را به آب اضافه و مخلوط شد. سپس الیاف (فولاد، پلی پروپیلن یا ترکیبی از این دو) را به مدت ۵ تا ۸ دقیقه و به تدریج و به آرامی با مقادیر تعیین شده قبلی به این مخلوط اضافه می نماییم تا اطمینان حاصل شود که همه الیاف به صورت یکنواخت در ملات پخش شده اند. پس از ۲۴ ساعت، نمونه ها از قالب خارج و نمونه های C_۱ الی C_۵ تا روز آزمایش در آب کاملاً غوطه ور در آب عمل آوری شدند.

جدول ۳: طرح اختلاط نمونه‌های ساخته شده

نام نمونه	جزئیات نمونه‌ها	سیمان (kg/m ³)	پوزولان طبیعی		آب (kg/m ³)	کنده فوق روان (kg/m ³)	آب اسپرمان	ماسه (kg/m ³)	سن (kg/m ³)	الیاف					
			%	kg/m ³						%	kg/m ³	فولادی		پلی پروپیلن	
C _۱	بتن معمولی فاقد افزودنی	۴۳۰	۰	۰	۲۱۵	۴/۳	۰/۵	۷۲۸/۴	۷۲۸/۴	۰	۰	۰	۰		
C _۲	بتن با پوزولان طبیعی	۳۶۵/۵	۱۵	۶۴/۵	۲۱۵	۴/۳	۰/۵	۷۲۸/۴	۷۲۸/۴	۰	۰	۰	۰		
C _۳	بتن با پوزولان و ۱/۵٪ الیاف فولادی	۳۶۵/۵	۱۵	۶۴/۵	۲۱۵	۴/۳	۰/۵	۷۲۸/۴	۷۲۸/۴	۱/۵	۱۱۷/۷۵	۰	۰		
C _۴	بتن با پوزولان و ۰/۵٪ الیاف پلی پروپیلن	۳۶۵/۵	۱۵	۶۴/۵	۲۱۵	۴/۳	۰/۵	۷۲۸/۴	۷۲۸/۴	۰	۰	۰/۵	۳/۱۵		
C _۵	بتن با پوزولان، ۱٪ الیاف فولادی و ۰/۲۵ الیاف پلی پروپیلن	۳۶۵/۵	۱۵	۶۴/۵	۲۱۵	۴/۳	۰/۵	۷۲۸/۴	۷۲۸/۴	۱	۷۸/۵	۰/۲۵	۲/۳		

۳-۳ برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی این پژوهش شامل آزمایش‌های مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر در سن عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مطابق استاندارد BS EN ۱۲۳۹۰-۳:۲۰۰۹ (BS EN ۱۲۳۹۰، ۲۰۰۹، ۱)، مقاومت خمشی بر روی نمونه‌های منشوری ۱۰۰×۱۰۰×۴۰۰ میلی‌متر در سن ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مطابق استاندارد ASTM C ۱۶۰۹ (ASTM C ۱۶۰۹، ۲۰۱۹، ۳) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بر روی نمونه‌های ۴×۴×۸ میلی‌متر می‌باشد.

۴- تجزیه و تحلیل

۴-۱ مقاومت فشاری

در شکل (۲) نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های ساخته شده مکعبی ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر ارائه شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت در تمامی نمونه‌های ساخته شده بر حسب طرح اختلاط ۵ گانه با افزایش سن عمل آوری شاهد افزایش میزان مقاومت فشاری بودیم. بیشترین میزان رشد در میان طرح اختلاط‌های C_۱ تا C_۵ مربوط به C_۳ که حاوی پوزولان طبیعی و ۱/۵ درصد الیاف فولادی می‌باشد. این رشد در هر سه سن عمل آوری مشهود می‌باشد. نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در سن عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب ۵۱٪، ۵۰٪ و ۴۴٪ نسبت به نمونه شاهد (C_۱) افزایش مقاومت فشاری داشته‌اند. نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی در سن ۷ روزه ۴٪ رشد مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌ی بتنی فاقد هر گونه افزودنی داشته است. این افزایش مقاومت در سنین عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب ۳٪ و ۲٪ بوده است. میزان افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی بسیار کم می‌باشد اما سبب کاهش ۱۵ درصدی میزان سیمان گردیده است که این موضوع در ابعاد وسیع سبب کاهش میزان تولید و مصرف سیمان گردیده و به کاهش مخاطرات زیست محیطی حاصل از تولید و مصرف سیمان می‌انجامد و تاثیر اقتصادی بسزایی را به همراه دارد.

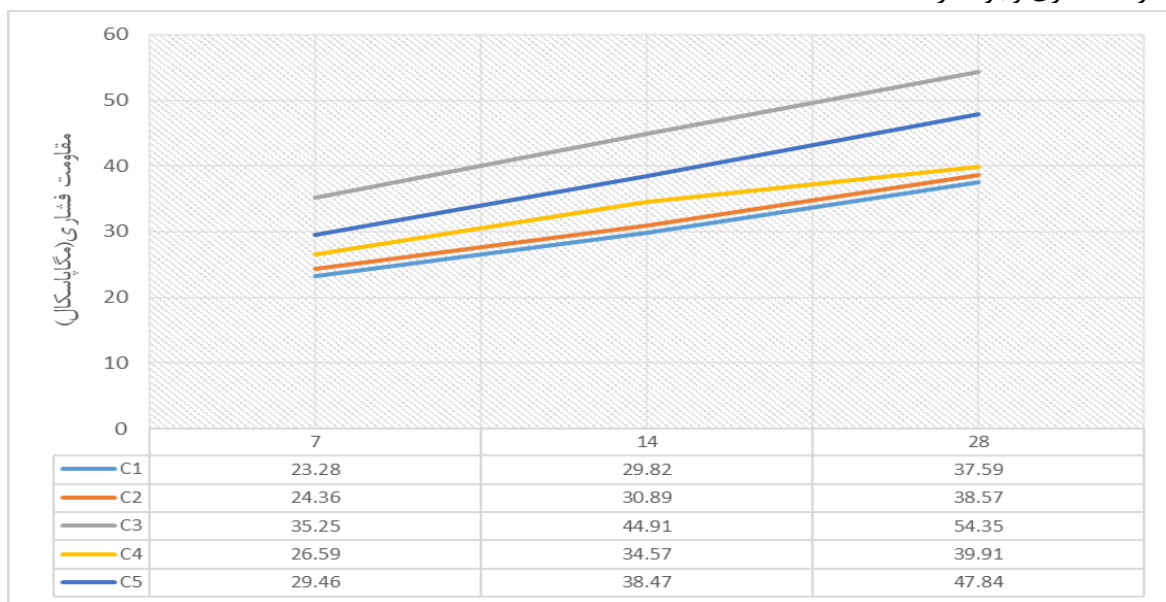
در طرح اختلاط C_۴ که به میزان ۰/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن به نمونه‌ها افزوده شد نیز شاهد افزایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بودیم که به ترتیب شاهد رشد ۱۴٪، ۱۵٪ و ۶٪ نسبت به نمونه‌های فاقد هر گونه مواد افزودنی



می‌باشیم. طرح اختلاط C_5 که شامل ترکیبی از هر دو الیاف استفاده شده در طرح می‌باشد نسبت به نمونه‌های بتنی معمولی افزایش مقاومت فشاری را در برداشته و در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه شاهد رشد ۲۶٪، ۲۹٪ و ۲۷٪ نسبت به نمونه‌های بتنی بدون مواد افزودنی (الیاف و پروپیلن) می‌باشیم.

استفاده از الیاف در ماتریس بتن به دلیل ایجاد همبستگی در اجزای تشکیل دهنده بتن، به کاهش تنش در ترک‌ها منجر می‌گردد که در نهایت موجب کاهش انتشار ترک در سطح نمونه شده و به طبع مقاومت فشاری بتن را نیز ارتقا می‌دهد. الیاف فولادی به دلیل طول بیشتر و قطر بزرگتر نسبت به ابعاد ترک در آغاز تشکیل، از افزایش و گسترش ترک‌های ری اولیه جلوگیری نمی‌کند. با این حال در قبل از لحظه ترک، الیاف فولادی با افزایش تحمل و شکل پذیری از انبساط عمده در ترک‌ها جلوگیری می‌کنند. الیاف پلی پروپیلن با توجه به ابعاد خاص خود اثر بهتری در جلوگیری از گسترش ترک‌های ریز در بتن به عمل می‌آورند. این الیاف در پل زدن بر روی ترک‌های کوچک و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری موثر است. این موضوع در پژوهش‌های الوسابی و همکاران و تحقیقات یو ذکر شده است (الوسابی و همکاران، ۲۰۲۱، ۶، یو و همکاران، ۲۰۲۱، ۹).

به دلیل تعداد زیاد و جهت‌گیری الیاف در بتن، الیاف می‌توانند غلظت تنش را در نوک ترک‌ها کاهش دهند. دوخت ترک در بتن توسط الیاف باعث کاهش انتشار ترک و افزایش مقاومت فشاری می‌شود. البته این امر مستلزم استفاده از مقادیر کافی الیاف است. همچنین؛ باید توجه داشت که مصرف زیاد الیاف، منجر به پدیده گلوله شدن می‌شود. در این زمینه برکوفسکی نیز به نتیجه مشابهی دست یافته است (برکوفسکی، ۲۰۱۵). در مورد تأثیر الیاف فولادی در آزمایش مقاومت فشاری می‌توان گفت که این الیاف به دلیل مدول الاستیسیته بالای خود (در مقایسه با الیاف پلی پروپیلن و بافت سطح ناهموار)، باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه بتن سیمانی معمولی می‌شوند. آنها می‌توانند، فشار را بهتر تحمل کنند و تنش را با انسجام در ماتریس توزیع کنند. استفاده از الیاف در کسرهای با حجم بالا باعث متراکم شدن الیاف در مخلوط و ایجاد منافذ و تخلخل می‌شود. همچنین؛ مقاومت فشاری نمونه‌های بتن الیافی را در مقایسه با نمونه‌های بتن ساده کاهش می‌دهد. این یافته‌ها را می‌توان در نمونه‌های حاوی الیاف هیبریدی نیز مشاهده کرد که به دلیل چگالی الیاف در کسر حجمی، مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف فولادی داشتند. همانطور که نتایج تحقیقات افروغ ثابت و همکاران، (تأثیر الیاف هیبریدی فولاد و پلی پروپیلن بر روی بتن با مقاومت بالا) نشان داد که با جایگزینی جزئی الیاف فولادی با الیاف پلی پروپیلن، کاهش مشابهی در مقاومت فشاری وجود دارد.



شکل ۲: نمودار تغییرات مقاومت فشاری در سنین عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه



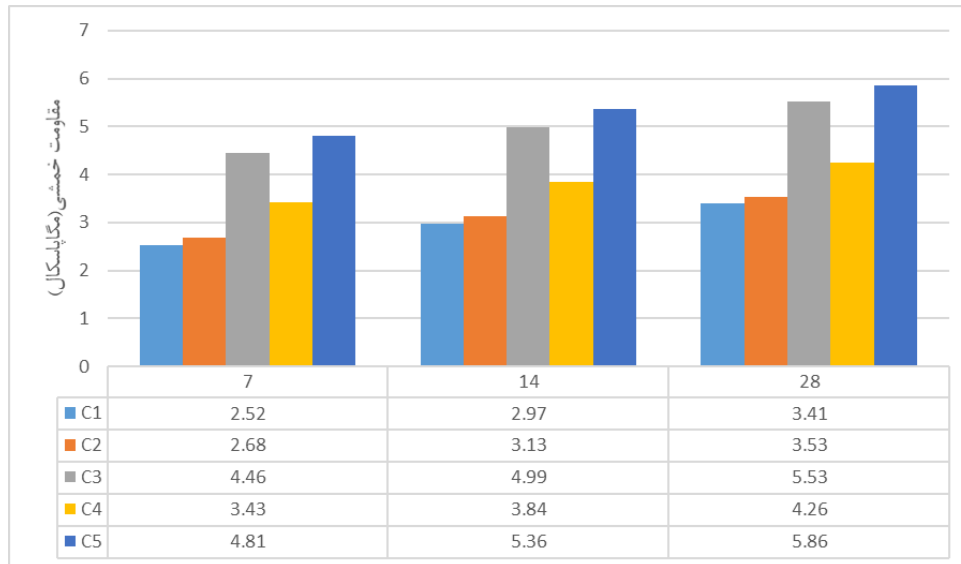
۴-۱ مقاومت خمشی

نمونه‌های منشوری $100 \times 100 \times 400$ میلی‌متری که در ۵ طرح اختلاط C_1 الی C_5 در سنین عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه توسط آزمایش خمشی سه نقطه‌ای مورد ارزیابی و آزمایش قرار گرفت. میزان بارگذاری توسط دستگاه سه نقطه‌ای 0.2 میلی‌متر بر دقیقه بوده است. نمونه‌های منشوری بر روی تیر تکیه‌گاه قرار می‌گیرد و به صورت ثابت قرار می‌گیرد که حرکتی ندارد و ثابت است و می‌توان آن را در جهت عمودی ثابت در نظر گرفت. در شکل ۳ نتایج آزمایش مقاومت خمشی در سن ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه ارائه شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد بیشترین میزان تغییرات مقاومت خمشی مربوط به طرح اختلاط C_5 می‌باشد که حاوی پوزولان طبیعی و الیاف فولادی و پلی پروپیلن می‌باشد که در سن عمل آوری ۲۸ روزه اتفاق افتاده است. این افزایش در حدود ۷۱ درصد نسبت به نمونه‌ی فاقد هر گونه افزودنی می‌باشد. نتایج تجربی نشان داده است که مقاومت خمشی حاصل از ترکیبی از نمونه‌های الیاف فولادی و پلی پروپیلن، نتایج بهتری به دست می‌دهد و این، با یافته‌های یاپ و همکاران مطابقت دارد (یاپ و جومات، ۲۰۱۳، ۶).

بر حسب نتایج به دست آمده مقاومت خمشی ترکیب الیاف‌های (فولادی و پلی پروپیلن) در سن ۷ و ۱۴ روزه در حدود ۹۰ و ۸۰ درصد نسبت به نمونه‌ی بتنی فاقد هرگونه مواد افزودنی می‌باشد. در نمونه‌های منشوری حاوی پوزولان طبیعی (C_2) مشاهده شد که با افزایش سن عمل آوری شاهد افزایش میزان مقاومت خمشی بودیم اما این افزایش بسیار چشمگیر نیست و مقدار رشد آن در سن عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب ۶، ۵ و ۳ درصد می‌باشد. نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در سن عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب ۷۶، ۶۸ و ۶۲ درصد رشد نسبت به نمونه شاهد داشته است. در طرح C_4 که حاوی 0.5 الیاف پلی پروپیلن می‌باشد در تمامی رده‌های سن عمل آوری شاهد افزایش میزان مقاومت خمشی می‌باشیم به طوری که در سن عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ به ترتیب ۳۶، ۲۹ و ۲۶ درصد رشد نسبت به نمونه‌ی فاقد افزودنی بودیم. وجود الیاف در بتن باعث افزایش شکل پذیری آن و افزایش مقاومت خمشی با توزیع نیرو و تاخیر در شکست نمونه می‌شود. این مشاهدات با یافته‌های تحقیقات قبلی که فعالیت پوزولانی آسیاب در تشکیل هیدرات‌های سیمان با کاهش تخلخل و افزایش انسجام ماتریس سیمان هیدراته افزایش می‌یابد و منجر به افزایش قابل توجه استحکام تا ۹۰ روز می‌شود مطابقت دارد (شکل ۳). خان، چالیک و همکاران نتایج مطالعات تجربی خود بر روی نمونه‌های بتن سیمانی معمولی با ترکیب پوزولان طبیعی را به روشی مشابه ارائه کردند (خان، ۲۰۱۱، ۷، چالیک و همکاران، ۲۰۱۴، ۶).

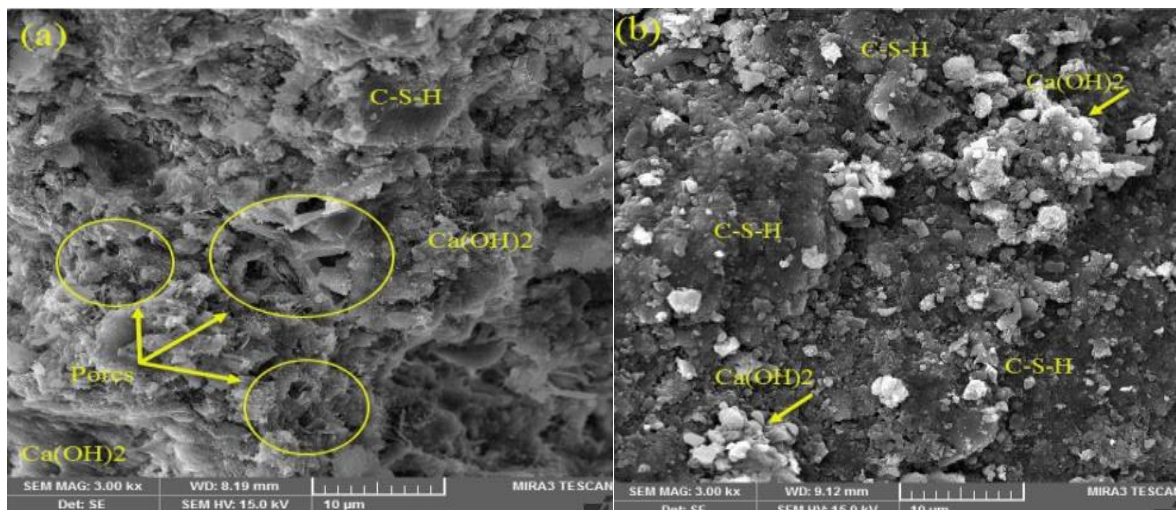
نتایج نشان می‌دهد که الیاف پلی پروپیلن به دلیل طول کوتاه و مدول الاستیسیته کم، نتوانسته‌اند تأثیر زیادی بر مقاومت خمشی داشته باشند و نسبت به نمونه بتن سیمانی معمولی بهبود قابل توجهی نداشته‌اند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که طول الیاف، عامل مهمی در میزان مدول خمشی است. در نمونه‌های منشوری با الیاف ترکیبی فولاد و پلی پروپیلن مشاهده شد که الیاف پلی پروپیلن تا حدودی از رشد ترک‌های ریز جلوگیری می‌کند اما با افزایش فشار، اثر الیاف فولادی بعد از ترک اولیه و ظهور اولین نقطه حداکثر بار می‌باشد که ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سطح مقطع نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. بررسی یک نمونه منشور پس از بارگذاری تا شکست، نشان می‌دهد که تعدادی الیاف فولادی از قسمت شکست خارج می‌شوند. به عبارت دیگر، وقوع چنین پدیده‌هایی در داخل سطح مقطع منشور به دلیل عملکرد مناسب الیاف هیبریدی باعث افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سطح مقطع پس از وقوع اولین ترک می‌شود.



شکل ۳: نمودار تغییرات مقاومت خمشی در سنین عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه

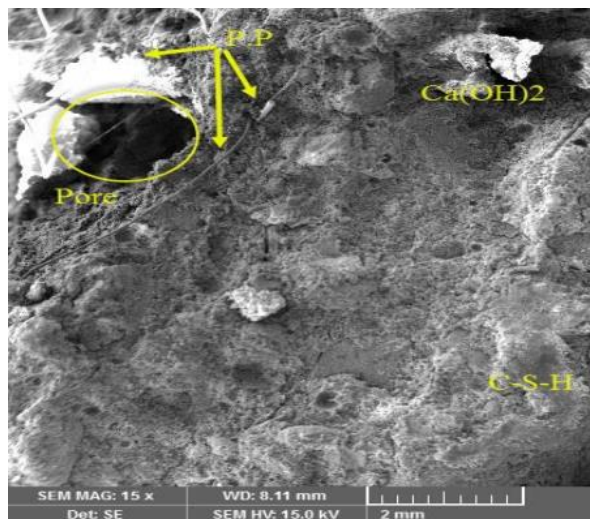
۳-۴ میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ریز ساختارهای بین ماتریس سیمان و الیاف و همچنین؛ تأثیر پوزولان‌ها و الیاف بر ساختار خمیر سیمان، نحوه حذف حفره‌ها و نتایج فعالیت شیمیایی را بررسی می‌کند. در این مطالعه، پس از عمل آوری ۲۸ روزه، نمونه‌های بتن سیمانی معمولی، نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن و هیبریدهای آنها تحت بررسی قرار گرفتند. ابتدا قطعات کوچکی از نمونه (حدود ۴ × ۸ × ۸ میلی متر) که حاوی بتن و الیاف بود با طلا-پالادیوم پوشانده و آزمایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل انجام شد. با مقایسه شکل ۴ که بخش الف مربوط به بتن سیمانی معمولی (طرح شاهد) و شکل ۵ و بخش ب شکل ۴ که مربوط به بتن پوزولانی است، به نظر می‌رسد که در نمونه حاوی پوزولان معدنی واکنش بسیار خوب پوزولانی، کلسیت تولید شده در اثر هیدراسیون بتن، توسط SiO_2 مصرف شده، بتن منسجم‌تری با حفره‌های کمتر، و اترینگیت کمتر و همچنین؛ کلسیت کمتر تولید می‌کند که نتیجه فعالیت پوزولانی خوب این پوزولان است.

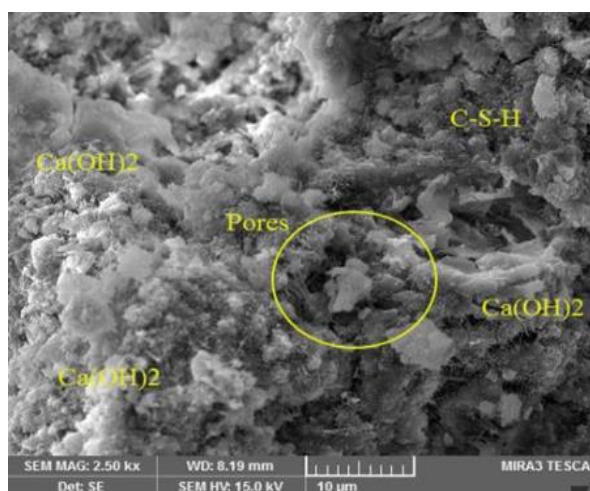


شکل ۴: تأثیر واکنش مطلوب پوزولانی؛ (الف) حضور کلسیت و وجود حفره در بتن سیمانی معمولی، (ب) ترکیب SiO_2 در پوزولان معدنی با کلسیت $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ تشکیل ژل C-S-H بیشتر در بتن پوزولانی

الیاف پلی پروپیلن مخلوط، بتن را ناهمگن می‌کند. تقریباً در تمام میکروگراف‌های SEM، ژل‌های کلسیم سیلیس هیدرات معمولاً با رنگ روشن‌تر و دانه‌های تیره‌تر به نظر می‌رسند، در حالی که ذرات نیمه تیره، شن هستند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، تخلخل نسبتاً زیادی در نمونه حاوی پلی پروپیلن مشاهده می‌شود که باعث ناهمگنی نمونه می‌شود. علاوه بر این، اثر پل زدن توسط الیاف پلی پروپیلن ظاهر شده است که می‌تواند منجر به بهبود استحکام خمشی شود. از طرفی الیاف پلی پروپیلن از نظر شیمیایی بی‌اثر بوده و در محیط قلیایی خمیر سیمان بسیار پایدار هستند. بنابراین، وارد واکنش هیدراسیون سیمان، نمی‌شوند و آن را تسریع نمی‌کنند. میکروگراف نشان می‌دهد که ژل C-S-H به عنوان یک اتصال دهنده در بین الیاف و مصالح مانند ماتریس عمل می‌کند که می‌تواند منافذ را مسدود کرده و نفوذپذیری را کاهش دهد. در واقع، نفوذپذیری کمتر و تخلخل مویرگی کمتر ارتباط نزدیکی با هم دارند.



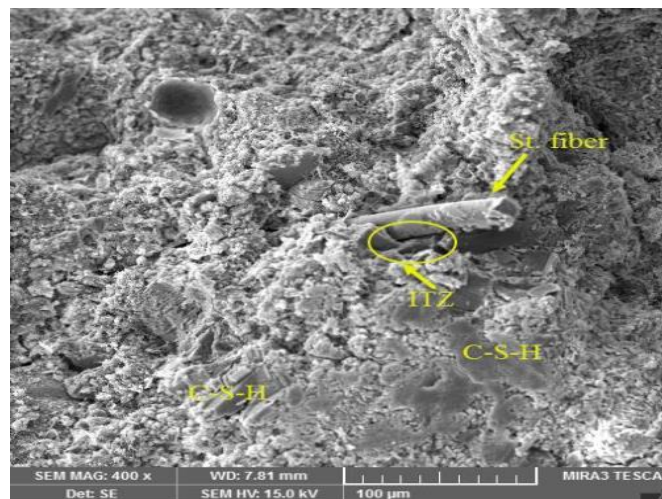
شکل ۵: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای بتن سیمانی معمولی در سن ۲۸ روزگی



شکل ۶: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای بتن پوزولانی حاوی الیاف پلی پروپیلن در سن ۲۸ روزگی

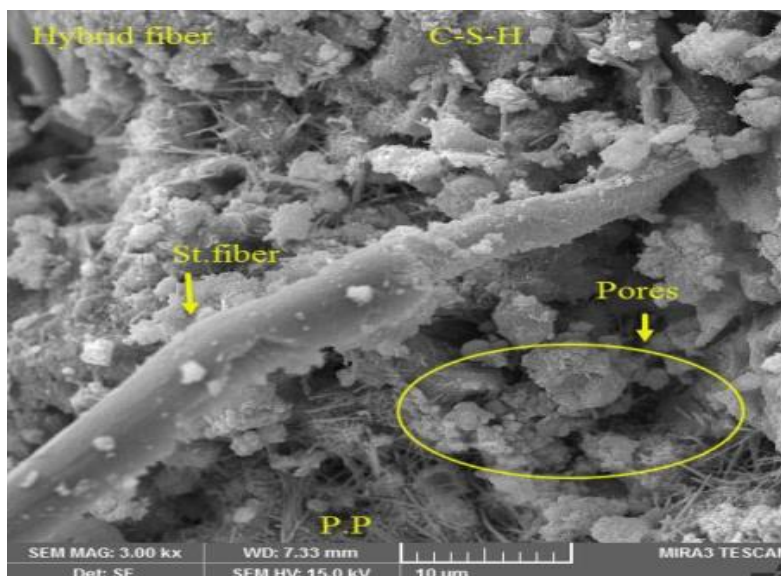
با مقایسه نمونه پلی پروپیلن با نمونه بتن سیمانی معمولی شکل ۵ و ۶ می‌توان نتیجه گرفت که دلیل منافذ بیشتر در نمونه پلی پروپیلن، وجود الیاف و اختلاط ناهمگن آن با ملات بتن است که باعث به دام افتادن هوا در مخلوط و ایجاد منافذ می‌شود.

همچنین؛ تصاویر نشان می‌دهد که میزان و اندازه ژل‌ها C-S-H و کریستال‌ها Ca(OH)_2 در بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن به دلیل وجود پوزولان معدنی محلی، بیشتر است. این افزایش باعث می‌شود ژل C-S-H الیاف را محصور کند و بین آن‌ها پیوند ایجاد کند که می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر منافذ و تخلخل مورگی شود. با این حال، به دلیل آبریزی سطح الیاف پلی پروپیلن، ضخامت لایه آب در منطقه انتقال سطحی (ITZ) بین الیاف و خمیر سیمان، باعث رشد کریستال می‌شود. با این حال، تعداد زیادی کریستال مضر روی سطح الیاف پلی پروپیلن رسوب می‌کنند اما به طور کامل به الیاف نمی‌چسبند. اسمرزوسکی و همکاران مشاهدات مشابهی داشت. این امر، قدرت چسبندگی خمیر سیمان را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر، آبریزی این الیاف اجازه می‌دهد تا پرتلندیت (کریستال‌های هیدروکسید کلسیم ماکرو) به راحتی رشد کند و منطقه انتقال سطحی (ITZ) را متخلخل‌تر کند. به همین دلیل، بیشتر الیاف توسط مقدار کمی ژل C-S-H احاطه شده‌اند و بین خمیر سیمان و الیاف پلی پروپیلن، ناسازگاری وجود دارد که ممکن است باعث ایجاد حفره و همچنین؛ مقاومت فشاری کمتر شود. اما به دلیل ناسازگاری مذکور، ناحیه انتقال، دارای سوراخ‌های بیشتری در الیاف و ماتریس است، بنابراین، تخلخل ضعیف نمونه پلی پروپیلن مشاهده می‌شود و این امر منجر به مقاومت فشاری کمتری می‌شود. علاوه بر همه موارد عنوان شده، ناهمگونی مخلوط پلی پروپیلن، باعث افزایش تعداد فضاهای خالی در ملات می‌شود. در مقایسه با این نمونه با ریز ساختار بتن سیمانی معمولی، به نظر می‌رسد بتن سیمانی معمولی فشرده‌تر و یکنواخت‌تر باشد. اما همانطور که گفته شد اثر قوی C-S-H به دلیل وجود پوزولان و خاصیت پل زدن الیاف پلی پروپیلن تا حدودی از ضعف حفره‌ها می‌کاهد. با بررسی تصویر نمونه بتن سیمانی معمولی، می‌توان دریافت که در نتیجه هیدراسیون، فراوان و ذرات کریستالی در اطراف سنگدانه‌های نمونه بتن سیمانی معمولی، ژل C-S-H تشکیل شده است. اما، این کریستال‌های ناشی از هیدراسیون دارای منافذ بزرگی هستند و یک بلوک ژل کامل و پیوسته را تشکیل نمی‌دهند. در همین حال، حفره‌های آشکار و شکاف‌های وسیعی در منطقه انتقال سطحی (ITZ) وجود دارد که باعث شل شدن ناحیه سطحی می‌شود. این نتایج در شکل ۵ قابل توجه است. در رابطه با بتن سیمانی معمولی، لایه ای از ژل‌های Ca(OH)_2 و C-S-H مستقیماً روی دانه‌های سنگدانه بعد از منطقه انتقال سطحی (ITZ) وجود دارد که باعث شل شدن ناحیه سطحی می‌شود. این نتایج در شکل ۵ قابل توجه است. در رابطه با بتن سیمانی معمولی، لایه ای از ژل‌های Ca(OH)_2 و C-S-H مستقیماً روی دانه‌های سنگدانه بعد از منطقه انتقال سطحی (ITZ) بین ماتریس و سنگدانه تشکیل می‌شود، منطقه ای متشکل از بلورهای بزرگ Ca(OH)_2 و اترینگیت ((محصول هیدراسیون سیمان پرتلند در حضور هیدروکسید کلسیم) (هگزا کلسیم آلومینات سه سولفات هیدرات) $(\text{H}_2\text{O})_{26} \cdot (\text{OH})_{12} \cdot (\text{SO}_4)_3 (\text{Ca}_6\text{Al}_2)$ با تخلخل بالاتر علاوه بر این، در شکل ۴-ب دیده می‌شود که کریستال‌های Ca(OH)_2 عمود بر سنگدانه هستند و روی ژل C-S-H همپوشانی دارند.



شکل ۷: بتن پوزولانی حاوی الیاف فولادی در سن ۲۸ روزگی

با مطالعه ریزساختار در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در شکل ۷، می‌توان دریافت که در ناحیه انتقال سطحی (ITZ) در اطراف الیاف فولادی، اجزای سیمان واکنش هیدراسیون مطلوب و کافی داشتند و همین امر باعث شده است که سطح الیاف فولادی با سیمان هیدراته تقریباً قابل قبول پوشانده شود. علاوه بر آن، الیاف فولادی به خوبی به ماتریس چسبیده و به دلیل خواص فیزیکی مطلوب، با الیاف فولادی فشرده و یکپارچه شده است. الیاف فولادی می‌تواند با جذب یا انتقال حرارت ناشی از واکنش هیدراسیون خمیر اطراف، واکنش هیدراسیون خمیر اطراف را افزایش داده و در نتیجه بر خلاف الیاف پلی پروپیلن که تأثیری در انتقال حرارت ندارند، الیاف فولادی با ماتریس اطراف، منسجم می‌شود. الیاف فولادی در کاهش دما و جلوگیری از تبخیر آب مویرگی و بهم ریختن نسبت W/C موثرتر هستند. توجه به این نکته ضروری است که سطح الیاف فولادی نسبت به سطح سنگدانه‌ها زبرتر است. این الیاف علاوه بر کاهش منافذ، استحکام پیوند در منطقه انتقال سطحی (ITZ) بین الیاف فولادی و ملات سیمان را افزایش می‌دهد که در الیاف پلی پروپیلن به میزان قابل توجهی کمتر است. زبری زیاد و چسبندگی خوب بین الیاف فولادی و ملات باعث انتقال و توزیع نیروها از الیاف به ماتریس و افزایش مقاومت می‌شود. به دلیل همگن بودن فلز، میزان حفره‌ها و تخریب در این نمونه‌ها کمتر از نمونه‌های حاوی پلی پروپیلن است که در استحکام بالاتر نیز نقش عمده‌ای دارد. در نمونه حاوی ترکیبی از الیاف فولادی و پلی پروپیلن، هیچ منطقه انتقال سطحی واضح و مشخصی (ITZ) مشاهده نشد. در بررسی پوسته سطحی الیاف فولادی و پلی پروپیلن و درگیری سطحی آنها مشاهده می‌شود که این سطوح توسط خمیر سیمان هیدراته، پوشیده شده و همگن هستند. نکته قابل توجه دیگر ساختار شبکه‌ای است که الیاف پلی پروپیلن هنگام توزیع در اطراف الیاف فولادی تشکیل می‌دهند. این امر نه تنها نقش هم افزایی اثرات پل زدن الیاف بر روی ترک‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه جداسازی اجزای بتن را از یکدیگر را نیز بهبود می‌بخشد و تا حد زیادی از انتشار ترک‌ها جلوگیری می‌کند و ضمن افزایش قابلیت اطمینان بتن، به دلیل هم افزایی الیاف فولادی و پلی پروپیلن، مقاومت نمونه نیز افزایش می‌یابد. با توجه به خاصیت جلوگیری از تکثیر و اتصال ریز ترک‌ها و پل زدن بر روی آنها توسط الیاف پلی پروپیلن و جلوگیری از ترک‌های بزرگتر توسط الیاف فولادی، چقرمگی این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های دیگر بیشتر است. این محتوا در شکل ۸ قابل مشاهده است. تمام موارد فوق، پوزولان معدنی محلی تأثیر مثبتی در بهبود مقاومت و چقرمگی ماتریس بتن دارد. علاوه بر این، پرتلندیت Ca(OH)_2 و حفره‌های بتن‌های حاوی پوزولان‌های معدنی محلی در اثر فعالیت پوزولانی نسبت به بتن سیمانی معمولی، کاهش می‌یابد و در نتیجه کاهش پرتلندیت، منجر به کاهش قلیائیت بتن می‌گردد.



شکل ۸: بتن پوزولانی حاوی هیبرید الیاف فولاد و پلی پروپیلن در سن ۲۸ روزگی



۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی استفاده از پوزولان طبیعی آسیاب و استفاده همزمان و جداگانه الیاف پلی پروپیلن و فولادی در ماتریس بتن پرداخته شد. برنامه آزمایشگاهی طرح مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و بررسی ساختار بتن به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) پرداخته شد. یکی دیگر از اهداف اصلی این تحقیق کاهش مصرف سیمان به منظور کاهش اثرات مخرب و برگشت ناپذیر تولید و مصرف بتن و کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای از کارخانه‌های سیمان و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی هدف اصلی این پژوهش بوده است. نتایج تحقیق به شرح ذیل است:

۱- پوزولان مورد استفاده در این تحقیق از نوع پوزولان معدنی محلی با خواص سیمانی مناسب بوده و قابلیت استفاده در بتن را دارا است ولی استفاده از آن منوط به استفاده درصد بهینه می‌باشد. طبق آخرین آزمایشات آزمایشگاهی مقدار ۱۵ درصد وزنی سیمان برای تعویض در بتن مناسب است. با توجه به اندازه ذرات این پوزولان که در بخش سوم این پژوهش ارائه شده است فضای بین سنگدانه بزرگ و کوچک را پر کرده و باعث خارج شدن آب مویبندی شده و از این طریق به هیدراتاسیون کمک می‌کند، لذا نسبت آب به سیمان و افزایش استحکام فشاری و دوام را بهبود می‌بخشد.

۲- پوزولان معدنی به دلیل واکنش‌های پوزولانی خوب خود توانست سرعت استحکام را بهبود بخشد، این پوزولان از پرتلندیت و هیدراتاسیون سیمان و آب و SiO_2 استفاده نموده و ژل C-S-H منسجم‌تر و قوی‌تری ساخت. پوزولان معدنی محلی، ژل C-S-H بیشتری نسبت به نمونه بتن سیمانی معمولی تولید کرد و حفره‌ها را به طور قابل توجهی کاهش داد. پرتلندیت بسیار کمتری در نمونه‌های حاوی این پوزولان مشاهده شد. همچنین چسبندگی سنگدانه به ماتریس بهبود یافته است

۳- افزودن الیاف فولادی و پلی پروپیلن موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی گردید. تحت فشار فزاینده، ترک‌ها شروع شده و به سمت جلو حرکت کردند. با نزدیک شدن ترک به الیاف، جداسازی در سطح الیاف و ماتریس به دلیل تنش‌های کششی عمود بر مسیر مورد انتظار ترک پیش‌رونده، آغاز شد. هنگامی که ترک پیش‌رونده به سطح درز مابین ماتریس و الیاف رسید، شدت تنش در بالای ترک کاهش یافت و در نتیجه انتشار ترک حذف و مسدود شد. این فرآیند اثر پل زدن یا جلوگیری از ترک خوردن الیاف در بتن را داشت.

۴- نتایج نشان داد که با افزایش سن بتن، مقاومت فشاری در تمامی نمونه‌ها در هر طرح مخلوط افزایش می‌یابد. نمونه‌ای که به صورت غوطه‌ور در آب عمل آوری شد، در مقایسه با نمونه‌ای که در شرایط محیطی عمل آوری شد، از استحکام بیشتری برخوردار بود. الیاف فولادی مقاومت فشاری را بهتر از الیاف دیگر بهبود می‌بخشد. الیاف فولادی و پلی پروپیلن مقاومت فشاری محوری را تا حدی افزایش می‌دهند، اما کسر حجمی الیاف باید در محدوده بهینه باشد. مقاومت فشاری تک محوری در مقایسه با مقاومت فشاری شامل هر دو نوع الیاف (هیبرید) افزایش معنی داری نداشت. ترکیب دو نوع الیاف در نمونه‌های هیبریدی مقاومت فشاری تک محوری را به طور قابل توجهی افزایش نداد و تأثیر بیشتر آن بهبود در جلوگیری از انتشار ترک بود.

۵- الیاف کوچکتر که بین ترک‌های کوچک پل می‌شوند، رشد ریز ترک‌ها را کنترل می‌کنند و از اتصال آن‌ها جلوگیری می‌کنند و الیاف بزرگتر از ایجاد و گسترش ترک‌های بزرگ جلوگیری می‌کنند و به طور قابل توجهی چقرمگی شکست را بهبود می‌بخشند. الیاف سخت‌تر با مدول الاستیسیته بالاتر منجر به مقاومت در برابر اولین ترک و استحکام نهایی می‌شود و نوع دیگری که تقریباً انعطاف پذیر است منجر به بهبود استحکام خمشی و افزایش ظرفیت کرنش پس از اولین ترک می‌شود.

۶- نتایج آزمایش مقاومت خمشی نشان می‌دهد که الیاف فولادی و پلی پروپیلن موجب افزایش مقاومت خمشی می‌گردد. الیاف به دلیل همبستگی ویژه‌ای که در اجزای تشکیل دهنده بتن ایجاد می‌کند، سبب افزایش مقاومت خمشی بتن می‌گردد. پوزولان معدنی نیز خود به تنهایی سبب افزایش مقاومت خمشی می‌گردد ولی میزان رشد آن نسبت به حالت فاقد افزودنی چشمگیر نیست.



۷-بررسی عکس‌های SEM نشان داد که به دلیل خصوصیات غیرآبگریزی الیاف فولادی، آنها بهتر به ماتریس چسبیده‌اند. در مقابل، الیاف پلی پروپیلن خاصیت آبگریز داشتند و به همین دلیل کریستال‌ها و ورقه‌های مضر در اطراف آنها تشکیل می‌شد به طوری که به خوبی با الیاف پیوند نمی‌خورد و در نتیجه تخلخل در این نمونه‌ها بیشتر مشاهده می‌شد. با این حال، به دلیل خاصیت پل زدن ظریف الیاف پلی پروپیلن، تا حدی ضعف ناشی از منافذ را جبران می‌کنند. نمونه‌های حاوی الیاف هیبریدی نیز به دلیل وجود سوراخ‌هایی در این نمونه‌ها که می‌تواند ناشی از تراکم الیاف و اختلاط نامناسب نمونه باشد، دو خاصیت فوق را نشان دادند.

مراجع

- [۱] Sekoai P.T., Y.K.O., Biofuel Development Initiatives in Sub-Saharan Africa: Opportunities and Challenges. *Climate*, ۲۰۱۶. ۴(۲).
- [۲] Worrell E., P.L., Martin N., Hendriks C., Meida L., Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annu. Rev. Energy Environ*, ۲۰۰۱. ۲۶: p. ۳۰۳-۳۲۹.
- [۳] Izumi Y., I.A., Ho H.J., Calculation of greenhouse gas emissions for a carbon recycling system using mineral carbon capture and utilization technology in the cement industry. *Journal of Cleaner Production*, ۲۰۲۱. ۳۱۲.
- [۴] Hanein T., G.-M.J., Bannerman M., Carbon footprint of calcium sulfoaluminate clinker production. *Journal of Cleaner Production*, ۲۰۱۸. ۱۷۲: p. ۲۲۷۸-۲۲۸۷
- [۵] Fapohunda, C., B. Akinbile, and A. Shittu, Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement—A review. *International Journal of Sustainable Built Environment*, ۲۰۱۷. ۶(۲): p. ۶۷۶۹۲-۵.
- [۶] Thomas, B.S., Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material—A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۲۰۱۸. ۸۲: p. ۳۹۱۳-۳۹۲۳.
- [۷] Akcay B., T.M.A., Performance evaluation of silica fume and metakaolin with identical finenesses in self compacting and fiber reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, ۲۰۱۸. ۱۸۵: p. ۴۳۶-۴۴۴.
- [۸] Jun Feng, W.S., Hongzhou Zhai, Lei Wang, Haolin Dong, Qi Wu, Experimental Study on Hybrid Effect Evaluation of Fiber Reinforced Concrete Subjected to Drop Weight Impacts. *Materials*, ۲۰۱۸. ۱۱(۱۲).
- [۹] Gökçe H., H.D., Ramyar K., Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete. *Construction and Building Materials*, ۲۰۱۹. ۱۹۴: p. ۱-۱۱.
- [۱۰] Miller, S.A., P.R. Cunningham, and J.T. Harvey, Rice-based ash in concrete: A review of past work and potential environmental sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*: ۱۴۶. ۲۰۱۹. p. ۴۳۰-۴۱۶
- [۱۱] Varadharajan, S., A. Jaiswal, and S. Verma. Assessment of mechanical properties and environmental benefits of using rice husk ash and marble dust in concrete In *Structures*. ۲۰۲۰. Elsevier.
- [۱۲] Yi, Y., et al., A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment. *Cement and Concrete Composites*, ۲۰۲۰. ۱۱۳: p. ۱۰۳۶۹۵.
- [۱۳] Tripathi, D., et al., Silica fume mixed concrete in acidic environment. *Materials Today: Proceedings*, ۲۰۲۰. ۲۷: p. ۱۰۰۱-۱۰۰۵.
- [۱۴] Nanda R.P., M.A.K., Behera B., Influence of metakaolin and Recron ۳'s fiber on mechanical properties of fly ash replaced concrete. *Construction and Building Materials*, ۲۰۲۰. ۲۳۶: p. ۱۲۰۹۴۹.
- [۱۵] Awoyera, P.O., O.B. Olalusi, and N. Iweriebo, Physical, strength, and microscale properties of plastic fiber-reinforced concrete containing fine ceramics particles. *Materialia*, ۲۰۲۱. ۱۵: p. ۱۰۰۹۷۰.
- [۱۶] Chandak M., P.P.Y., Influence of Metakaolin and steel fibers on stress strain behavior of concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, ۲۰۲۱. ۱۹۱۳.



- [۱۷] Li J., W.J., Wu Ch., Liu Zh., Li j., Hybrid fibre reinforced ultra-high performance concrete beams under static and impact loads. *Engineering Structures*, ۲۰۲۱. ۲۴۵: p. ۱۱۲۹۲۱.
- [۱۸] Karthik S., R.M.K.S., Murali G., Investigations on the Response of Novel Layered Geopolymer Fibrous Concrete to Drop Weight Impact. *buildings*, ۲۰۲۲. ۱۲(۲).
- [۱۹] BS, Composition, specifications and conformity criteria for common cements, in *Cement Part ۱*. EN ۱۹۷-۱:۲۰۱۱, BSI Standards Publication.
- [۲۰] Liu G., F.M.V.A., Brouwers H. J. H. , Waste glass as binder in alkali activated slag–fly ash mortars. *Materials and Structures*, ۲۰۱۹. ۵۲.
- [۲۱] Venkat G.N., C.K., Ahmed E., NagendraBabu V., Comparative study on mechanical properties and quality of concrete by part replacement of cement with silica fume, metakaolin and GGBS by using M–Sand as fine aggregate. *Materials Today: Proceedings*, ۲۰۲۱. ۴۳.
- [۲۲] Sasui S., K.G., Nam J., Van Riessen A., Nyarko M.H., Effects of waste glass as a sand replacement on the strength and durability of fly ash/GGBS based alkali activated mortar. *Ceramics International*, ۲۰۲۱. ۴۷(۱۵).
- [۲۳] Chen J.J., N.P.L., Kwan A.K.H., Li L.G., Lowering cement content in mortar by adding superfine zeolite as cement replacement and optimizing mixture proportions. *Cleaner production*, ۲۰۱۹. ۲۱۰: p. ۶۶-۷۶.
- [۲۴] ASTM, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. C۶۱۸ ۲۰۱۴.
- [۲۵] Koirala M., R.J.B., CONSTRUCTION SAND, QUALITY AND SUPPLY MANAGEMENT IN INFRASTRUCTURE PROJECT. *International Journal of Advances in Engineering & Scientific Research*, ۲۰۱۷. ۱۴(۴).
- [۲۶] BS, Tests for mechanical and physical properties of aggregates, in Part ۳: Determination of loose bulk density and voids. EN ۱۰۹۷-۳:۱۹۹۸: BSI Standards Publication.
- [۲۷] ASTM, Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete, in *Fiber-Reinforced Concrete -C ۱۱۱۶*, ۲۰۰۶, ASTM: U.S.
- [۲۸] BS, Testing hardened concrete in Part ۳: Compressive strength of test specimens. EN ۱۲۳۹۰-۳:۲۰۰۹, BSI: UK.
- [۲۹] ASTM, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete ,C۱۶۰۹, in *Using Beam With Third-Point Loading*. ۲۰۱۹: U.S.A.
- [۳۰] Alwesabi E.A.H., A.B.B.H., Alshaikh I.M.H., Zeyad A.M., Altheeb A., Alghamdi H., Experimental investigation on fracture characteristics of plain and rubberized concrete containing hybrid steel-polypropylene fiber. *Structures*, ۲۰۲۱, ۳۳: p. ۴۴۲۱–۴۴۳۲.
- [۳۱] Yue J.G., W.Y.N., Beskos D.E., Uniaxial tension damage mechanics of steel fiber reinforced concrete using acoustic emission and machine learning crack mode classification. *Cement and Concrete Composites*, ۲۰۲۱.
- [۳۲] Berkowski P., K.-K.M., Effect of Fiber on the Concrete Resistance to Surface Scaling Due to Cyclic Freezing and Thawing. *Procedia Engineering*, ۲۰۱۵. ۱۱۱: p. ۱۲۱-۱۲۷.
- [۳۳] Yap S.Y., A.U.J., Jumaat M.Z., Enhancement of mechanical properties in polypropylene– and nylon–fibre reinforced oil palm shell concrete. *Materials & Design*, ۲۰۱۳. ۴۹.
- [۳۴] Khan M.I., A.A.M., Properties of natural pozzolan and its potential utilization in environmental friendly concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering* ۲۰۱۱. ۳۸: p. ۷۱-۷۸.
- [۳۵] Celik K., J.M.D., Mancio M., Meral C., Emwas A.H., Mehta P.K., Monteiro P.J.M., High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for Portland cement in self-compacting and sustainable concrete. *Cement & Concrete Composites*, ۲۰۱۴. ۴۵: p. ۱۳۶-۱۴۷.