

The effect of natural zeolite and silica fume on durability of steel fiber reinforced concrete exposed to chloride environment

Mojtaba Torabi Golsefidi¹, Mohammad Hajforoush^{2*}

1- M.Sc. Student in Structural Eng., Ahrar Institute of Technology and Higher Education, Rasht, Iran

2- Ph.d. in Structural Eng., Ahrar Institute of Technology and Higher Education, Rasht, Iran

ABSTRACT

The high energy consumption in the cement industry and the emission of CO₂ provide serious environmental threats. Therefore, the use of pozzolanic materials as natural cementitious material can have a direct relation to sustainable development. The current research investigates the effect of natural zeolite and silica fume pozzolans on the durability of fiber-reinforced concrete in chloride environments. The studied specimens contained silica fume of 5 and 10 percent and zeolite of 5, 10, and 15 percent as cement weight substitutes. Moreover, to examine the impact of steel fibers, one percent volume as the optimal percentage, was added to the mixture. The specimens, after being processed, were tested at 28 and 90 days in normal and chloride conditions. Results showed that various specimens in both conditions increased their compressive strength and mainly tensile strength due to the addition of pozzolans, with and without steel fibers. The electrical resistance of specimens without fibers remarkably exceeded that of the control sample. However, the electrical resistance of specimens containing steel fibers considerably lessened compared to those without fibers. The coefficient of chlorine ion migration was lower in samples containing pozzolan and higher in samples with fibers alone, compared to control samples. The results showed exposure to a chloride environment resulted on average in a decrease in compressive strength by 13.4%, tensile strength by 39.72%, and electrical resistance by 76.2% compared to identical samples in a normal environment. Furthermore, the chloride ion penetration coefficient in the samples, compared to the control samples, had a decrease of 24 to 50 percent. The average increase in water absorption in the chloride environment compared to the normal environment was also 73.6 percent.

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 December 2023

Revise Date: 24 March 2024

Accept Date: 03 May 2024

Keywords:

Durability
Natural zeolite
Silica fume
Steel fiber
Compressive strength
Tensile strength
Electrical resistance
Chlorine ion migration

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.425482.3280>

*Corresponding author: Mohammad Hajforoush

Email address: mhajforoush@semnan.ac.ir

اثر پوزولان‌های زئولیت طبیعی و میکروسیلیس بر دوام بتن الیافی در معرض محیط‌های کلریدی

مجتبی ترابی گلسفیدی^۱، محمد حج‌فروش^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، موسسه آموزش عالی احرار، رشت، ایران

۲- دکتری سازه، گروه عمران، مدرس موسسه آموزش عالی احرار، رشت، ایران

چکیده

مصرف بالای انرژی در صنعت تولید سیمان و انتشار گاز کربن دی‌اکسید تولید شده تهدیدهای جدی زیست محیطی را فراهم آورده است. لذا استفاده از مواد پوزولانی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان می‌تواند ضمن ارتقای مشخصه‌های مقاومت و دوام بتن رابطه مستقیمی با توسعه پایدار داشته باشد. در مقاله حاضر اثر پوزولان‌های زئولیت طبیعی در مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد و میکروسیلیس در مقادیر ۵ و ۱۰ درصد جایگزین وزنی سیمان بر خواص مقاومتی و دوام بتن حاوی ۱ درصد حجمی الیاف فولادی دوسرقلابداری در معرض محیط‌های کلریدی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور آزمایش‌های مقاومت‌های فشاری، کششی و الکتریکی و همچنین آزمایش‌های جذب آب نهایی و نفوذ یون کلر روی نمونه‌های ساخته شده انجام شد. خواص ریزساختاری بتن نیز توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های مورد نظر در سنین ۲۸ و ۹۰ روز در هر دو شرایط عادی و کلریدی عمل‌آوری شدند. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد زئولیت طبیعی و ۱۰ درصد میکروسیلیس می‌تواند به عنوان طرح اختلاط بهینه مورد نظر قرار گیرد. اگرچه محیط کلریدی موجب کاهش مقاومت بتن می‌گردد، پوزولان‌های مورد مطالعه در مقاله حاضر می‌تواند این افت مقاومت را به میزان مطلوبی تعدیل نماید. بدین منظور حضور پوزولان‌های زئولیت و میکروسیلیس در بتن الیافی در معرض محیط کلریدی موجب شد مقاومت فشاری ۹۰ روز تا ۱۳/۴ درصد افت نماید. این میزان در خصوص مقاومت‌های کششی و الکتریکی به ترتیب تا ۳۹/۷۲ و ۷۶/۲ درصد نتیجه شده است. همچنین ضریب نفوذ یون کلر در نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد کاهش حدود ۲۴ درصد داشته است. میانگین افزایش جذب آب در محیط کلریدی نسبت به محیط عادی نیز ۷۳/۶ درصد است. از بررسی تصاویر ریزساختاری نیز مشخص گردید که حضور پوزولان‌های زئولیت و میکروسیلیس در بتن می‌تواند بر افزایش تراکم ریزساختار ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده موثر باشد.

کلمات کلیدی: زئولیت طبیعی، میکروسیلیس، الیاف فولادی، ضریب مهاجرت یون کلر، محیط کلریدی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2024.425482.3280	۱۴۰۳/۱۰/۳۰	۱۴۰۳/۰۲/۱۴	۱۴۰۳/۰۲/۱۴	۱۴۰۳/۰۱/۰۵	۱۴۰۲/۰۹/۱۱
10.22065/jsce.2024.425482.3280	محمد حج‌فروش mhajfroush@semnan.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

مسئله افزایش دوام بتن و بهره‌برداری بیشتر از آن امروزه از اهمیت بالایی برخوردار است. زیرا محیط‌های خورنده مانند محیط‌های کلریدی منجر به کاهش قابل توجه دوام و طول عمر مفید بتن می‌شوند. یون‌های کلرید ممکن است از طریق آلاینده‌های مخلوط و یا از منابع خارجی مانند آب دریا و نمک‌های یخ زدایی، وارد بتن شوند. این یون‌ها در صورت رسیدن به غلظت کافی می‌توانند لایه محافظ فولاد را از بین برده و حتی تحت شرایط وجود PH الکترولیت حجمی بالا برای محلول‌های حفره‌ای بتن، موجب وقوع خوردگی حفره‌ای گردند. به همین علت به منظور افزایش دوام و بهبود کارایی بتن در محیط‌های مهاجم از سیمان‌های آمیخته با پوزولان‌ها استفاده می‌شود. پوزولان‌ها موادی سیلیسی یا سیلیس آلومینیومی هستند که به تنهایی خاصیت چسبندگی ندارند یا چسبندگی آنها کم است و به صورت ذرات ریز در مجاورت رطوبت و حرارت معمولی طی واکنش شیمیایی با کلسیم هیدروکسید تولید شده توسط سیمان هیدراته‌کننده واکنش داده و مواد سیمانی اضافی تشکیل می‌دهند که به طور معمول به عنوان جایگزین درصدی از سیمان می‌شود و دوام بتن را بهبود می‌بخشد. [۱]

پوزولان‌ها به صورت طبیعی و مصنوعی وجود دارند که از جمله آنها میکروسیلیس و زئولیت می‌باشد. میکروسیلیس یک محصول جانبی کارخانه‌های تولید فروآلیاژهای سیلیکاتی است که در بتن‌های با مقاومت زیاد معمول جزء جدایی‌ناپذیر است زیرا با خاصیت پراکندگی ذرات سیمان مصرف آب را کاهش می‌دهد، کارایی بتن را افزایش می‌دهد و مقاومت اولیه آن را بهبود می‌بخشد. به دلیل وجود مقادیر زیادی سیلیس آمورف موجود در میکروسیلیس، علاوه بر افزایش مقاومت خمیر سیمان، از طریق بهبود کیفیت اتصال بین خمیر و سنگدانه باعث افزایش مقاومت بتن نیز می‌شود. زئولیت یکی از پوزولان‌های طبیعی است که در ایران به وفور یافت می‌شود و به راحتی قابل استخراج و فرآوری است.

همچنین استفاده از الیاف فولادی در بتن به منظور بهبود بخشیدن به خواص بتن، کاربرد وسیعی در صنعت ساخت و ساز دارد. دلیل این کاربرد گسترده مزایای بیشمار فنی و اقتصادی در استفاده از الیاف فولادی در جسم بتن می‌باشد. بتن مسلح با الیاف فولادی شامل یک کالبد بتنی مرکب از سیمان، مصالح سنگی، آب و همچنین درصدی از الیاف فولادی کوتاه می‌باشد که به‌طور درهم و کاملاً اتفاقی و در جهات مختلف پراکنده شده که وجود الیاف فولادی مشخصات بتن را نسبت به حالت خالص بهبود می‌بخشد. از مزایای استفاده از الیاف فولادی می‌توان به افزایش مقاومت فشاری، خمشی و برشی و همچنین افزایش مقاومت در مقابل ترک خوردگی اشاره کرد، علاوه بر آن استفاده از الیاف فولادی می‌تواند مقاومت در برابر سایش را بهبود بخشد و همچنین می‌تواند در تغییرات دمایی ناگهانی بهبود قابل توجه‌ای را حاصل کند.

حمدا و همکاران در سال ۲۰۲۳ به بررسی تأثیر میکروسیلیس بر خواص بتن سیمانی پایدار پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که بسته به غلظت میکروسیلیس، مقاومت خمشی، کششی و فشاری افزایش یافت. همچنین، میکروسیلیس اندازه منافذ را برای افزایش انقباض ناشی از خشک‌شدگی از طریق واکنش پوزولانی بهبود بخشید. البته در چندین مطالعه معایب میکروسیلیس ذکر شده است که تأثیر منفی بر کارایی و جمع‌شدگی بتن دارد. [۲]

باشا و همکاران در سال ۲۰۲۳ به بررسی زئولیت به‌عنوان ماده سیمانی تکمیلی پرداختند. در این اثرات گنجاندن زئولیت در مخلوط بتن با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال به‌عنوان یک نوع قابل‌قبول از مواد پوزولانی بررسی شده است. هدف از این آزمایش در این مقاله، جایگزینی محتوای سیمان با زئولیت است و تأثیر آن بر خواص مکانیکی بتن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ادغام زئولیت تا ۱۵ درصد منجر به مقدار بهینه مقاومت مکانیکی مخلوط بتن شد. [۳]

گیسا و همکاران در سال ۲۰۲۳ به بررسی خواص بتن سنگدانه بازیافتی با زئولیت پرداختند. مقاومت فشاری بتن با سنگدانه بازیافتی در مقایسه با بتن معمولی ۱۰ درصد کاهش می‌یابد، اما با افزودن ۵ درصد زئولیت، مقاومت آن تا ۳ درصد افزایش می‌یابد. مقاومت کششی با افزودن ۵ درصد زئولیت با بتن سنگدانه‌های بازیافتی کاهش می‌یابد، اما با جایگزینی ۱۰ درصد زئولیت، این کاهش تا ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. مقاومت خمشی با جایگزینی ۵٪ زئولیت در مقایسه با بتن معمولی و بتن سنگدانه بازیافتی ۲۶٪ و ۱۳٪ افزایش می‌یابد.

یابد. برای تعیین دوام بتن، آزمون جذب و آزمون RCPT انجام شد. ظرفیت جذب آب بتن با سنگدانه بازیافتی به میزان ۳۸ درصد کاهش می یابد و نفوذپذیری یون کلرید با جایگزینی ۵ درصد ژئولیت ۵ درصد افزایش می یابد. به منظور به حداقل رساندن مصرف منابع طبیعی و دستیابی به خواص مطلوب، می توان از ژئولیت برای افزایش مقاومت فشاری، خمشی و دوام استفاده کرد. [۴]

حسین زاده و همکاران در سال ۲۰۲۳ به بررسی اثرات فولاد، پلی پروپیلن و الیاف ماکرو پلی پروپیلن با کارایی بالا بر خواص مکانیکی و دوام بتن با مقاومت بالا پرداختند. در این تحقیق بتن با مقاومت بالا با نسبت آب به سیمان ۰/۳۸، ۰/۳۳ و ۰/۲۸ مورد آزمایش قرار گرفت. افزودن PPF و SF کارایی این مخلوط های حاوی مواد سیمانی مکمل را کاهش داد. بالاترین مقاومت فشاری متعلق به مخلوطی است که حاوی ۱٪ SF و ۰/۲ درصد PPF است. بالاترین مقاومت خمشی مخلوط حاوی ۰/۵٪ الیاف HPP با ۱٪ SF است. بتن های تقویت شده با الیاف نسبت به نمونه های غیرالیافی جذب آب ۳۰ دقیقه ای کمتری دارند. کمترین میزان جذب مربوط به نمونه حاوی ۰/۵ درصد PPF با ۲۰ درصد دوده سیلیس به میزان ۰/۵۳ درصد است. [۵]

السیف و الحربی در سال ۲۰۲۲ به بررسی رفتارهای مقاومت، دوام و انقباض بتن لاستیکی تقویت شده با الیاف فولادی پرداختند. نتایج نشان داد که اگرچه زمانی که بخشی از سنگدانه های خرد شده و شن و ماسه با ذرات لاستیک جایگزین شدند، خواص مکانیکی بتن به طور منفی تحت تأثیر قرار گرفت، اما خواص مکانیکی و دوام بتن لاستیکی با الیاف فولادی ۴۰ درصد و لاستیک ۲۰ درصد با بتن معمولی قابل مقایسه است. ظرفیت کرنش خمشی و خواص پس از مقاومت ماکزیمم بتن لاستیکی حاوی ۲۰ درصد لاستیک و الیاف فولادی ۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب به طور قابل ملاحظه ای بهتر از بتن معمولی بود. [۶]

سو و همکاران در سال ۲۰۲۳ به بررسی عملکرد مکانیکی و دوام بتن با الیاف فولادی تایلر بازیافتی پرداختند. نتایج بدست آمده آنان نشان داد که بتن با الیاف تایلر بازیافتی هنگام افزودن درصد حجمی یکسانی از الیاف، روانی بهتری نسبت به نمونه های نظیر دارد. از نظر خواص مکانیکی، افزودن الیاف فولادی تایلر بازیافتی اندکی مقاومت فشاری ۲۸ روزه را افزایش می دهد. مقاومت کششی نیز با الیاف فولادی تایلر بازیافتی اضافه شده تا ۱۵/۴٪ افزایش می یابد که بسیار نزدیک به نمونه با الیاف فولادی صنعتی (۱۶/۹٪) است. نتایج آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک نشان می دهد که هم الیاف فولادی تایلر بازیافتی و هم الیاف فولادی صنعتی اندکی مدول بتن را افزایش می دهند. الیاف فولادی تایلر بازیافتی همچنین با کاهش درصد تغییر مدول دینامیکی نسبی و افزایش ضریب دوام تا ۴/۶ درصد، مقاومت یخ-ذوب را بهبود می بخشد. به طور کلی، الیاف فولادی تایلر بازیافتیها در بتن در مقایسه با یک نوع ISF نازک، تقویت مکانیکی کمی کمتر و کارایی بهتری دارند. این یافته ها می تواند استفاده از الیاف فولادی تایلر بازیافتی را در مخلوط های بتن به عنوان تقویت کننده های مکانیکی تسهیل کند و بازار دیگری را برای بازیافت الیاف لاستیک های زائد فراهم کند. [۷]

دباغی و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی رفتار بتن مسلح با الیاف حاوی ژئولیت و متاکائولین به عنوان پوزولان طبیعی پرداختند. با بررسی نتایج میتوان گفت که الیاف پلی پروپیلن (PP) در افزایش خواص مکانیکی بتن در مخلوط های ژئولیت مؤثرتر بودند، به طوری که مقاومت فشاری و مقاومت کششی نسبت به بتن مرجع به ترتیب ۴۴ و ۲۲ درصد افزایش یافت، در حالی که جذب آب و تخلخل به ترتیب ۴۸ و ۴۵ درصد کاهش یافت. این امر به ویسکوزیته بالاتر مخلوط های ژئولیت نسبت داده می شود که باعث پراکندگی بهتر الیاف در مخلوط و همچنین استحکام پیوند بین الیاف و خمیر به دلیل فعالیت پوزولانی بالای ژئولیت می شود. نتایج آنالیز AFM، UPV، چگالی و حفره های نفوذپذیر نشان داد که مخلوط های بتن حاوی الیاف حاوی ژئولیت طبیعی دارای بیشترین ریزساختار و کمترین تخلخل و نقص در بین تمام مخلوط های مورد بررسی حتی در مقایسه با مخلوط هایی هستند که متاکائولین را با جایگزینی سیمان مشابه ترکیب کرده اند. [۸]

مدهوری و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی بهبود عملکرد بتن ترکیب شده با پودر ژئولیت طبیعی به عنوان ماده سیمانی مکمل پرداختند. در این تحقیق نشان داد که بتن حاوی پودر ژئولیت طبیعی مقاومت فشاری قابل توجهی دارد، یعنی مقاومت به تدریج با توجه به زمان افزایش می یابد. همچنین مقاومت در برابر حملات کلرید و سولفات افزایش یافته است. [۹]

اسواریا و بولا در سال ۲۰۲۱ به بررسی اثر استفاده از ژئولیت و مواد زائد صنعتی در بتن با مقاومت بالا پرداختند. با بررسی نتایج آزمایشات، نشان داده شد که با جایگزینی جزئی سیمان با ژئولیت، متاکائولین، خاکستر بادی و دوده سیلیس، خواص بتن در مقایسه با بتن معمولی افزایش می یابد. همچنین مشاهده شد که تحقیقات محدودی روی ژئولیت با ترکیب مواد زائد صنعتی برای تحلیل سلامت سازه‌ها در نسبت‌های مختلف آب به سیمان انجام شده است. بنابراین، بررسی بیشتر در جنبه های فنی، زیست محیطی، اقتصادی و آموزش عمومی از طریق استفاده از مواد زاید صنعتی به عنوان یک رویکرد پایدار ضروری است. [۱۰]

تا یا و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی استفاده از سنگدانه بازیافت شده در بتن با عملکرد بالا پرداختند. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که سنگدانه بازیافت شده می تواند خواص مکانیکی ماتریس سیمان را بهبود بخشد. به دلیل تخلخل سنگدانه بازیافت شده، آن ها وزن واحد کمتری نسبت به سنگدانه های طبیعی دارند. به همین دلیل سنگدانه بازیافت شده می تواند به طور قابل توجهی کارایی بتن را کاهش دهد. همچنین در این مقاله گزارش شد که استفاده از سنگدانه بازیافت شده قدرت تراکم بتن پرمقاومت را افزایش می دهد. در حالت کلی به نظر می رسد استفاده از سنگدانه بازیافت شده در تولید بتن پرمقاومت امیدوارکننده باشد. در این مقاله توصیه هایی برای مطالعه بیشتر این موضوع ارائه شده است. [۱۱]

پاچیده و قلهکی در سال ۲۰۲۰ به بررسی اثرات افزودن الیاف فولادی و فنر بازیافتی گلوآنیزه بر خواص مکانیکی و ایجاد ترک در بتن ریزدانه در معرض محیط های اسیدی حاوی سولفات منزیم پرداختند. بر طبق آزمایشات انجام شده مشخص شد اضافه کردن الیاف فولادی و فنر بازیافتی باعث بهبود به ترتیب ۵۰ و ۶۰ درصدی مقاومت فشاری و کششی میگردد. علاوه بر آن بر طبق نتایج مشخص شد که استفاده از فنر بازیافتی در مقایسه با الیاف فولادی در محیط کلریدی اثر گذاری بیشتری دارد. [۱۲]

پاچیده و قلهکی در سال ۲۰۲۰ به ارزیابی رفتار ملات حاوی دوده سیلیس و سرباره پس از قرار گیری در معرض حرارت و بررسی خواص مکانیکی آن پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که عمیق ترین اثر استفاده از این دو ماده در دماهای پایین تا ۲۵۰ درجه و بالای ۵۰۰ و بیشتر رخ می دهد. از نظر کمی در دماهای پایین و بالا به ترتیب مقاومت فشاری ۷۳ و ۱۸۰ درصد، مقاومت کششی ۴۵ و ۱۰۰ و مقاومت خمشی ۱۰۶ و ۱۱۲ درصد افزایش یافت. [۱۳] [۱۴]

پاچیده و قلهکی در سال ۲۰۱۹ مطالعه ای بر روی افزودن الیاف فولادی و پلی پرین به بتن و تاثیر آن بر مقاومت پس از قرار گیری در دماهای مختلف انجام دادند. بر طبق بررسی ها مشخص شد اثر آتش بر بتن حاوی الیاف فولادی بیشتر است و آسیب بیشتری می رساند. بر اساس نتایج به دست آمده مقاومت فشاری و کششی بتن حاوی الیاف فولادی به ترتیب ۴۰ و ۵۰ درصد بوده که این مقادیر نسبت به استفاده از الیاف پلی پروپیلن بیشتر بود اما در بحث مقاومت خمشی نتایج تقریباً برابر بود. [۱۵]

ناصرالاسلامی و نعتی در سال ۲۰۱۹ به بررسی اثرات کلسیم استئارات^۱ بر جنبه های مکانیکی و دوام بتن های خود تحکیم یافته شامل میکروسیلیس و ژئولیت طبیعی پرداختند. نتایج نشان داد که در بتن تازه، مواد سیمانی تکمیلی باعث کاهش در قابلیت کارایی و تراکم بتن تازه بدون هیچ تأثیر قابل توجهی بر افت می شود. نتایج ارزیابی بتن سخت شده نیز کاهش تراکم بتن سخت شده یا مقاومت فشاری را نشان داد. به علاوه، تجزیه و تحلیل ریزساختار نشان داد که ترکیب CS هم خمیر سیمان و هم ناحیه گذرای بین سطحی را خراب می کند. در نهایت، اگرچه CS تأثیر ناچیزی بر مقاومت الکتریکی، جذب کل آب، و نفوذپذیری کلرید داشت، اما کاملاً بر نفوذپذیری بتن تحت فشار استاتیک غیر آبی موثر بود. در این راستا، گنجاندن CS علاوه بر جذب کوتاه مدت و بلند مدت آب، عمق نفوذ مویرگی آب را به شدت کاهش می دهد. به عنوان یک مورد در نقطه، ترکیب CS 7 kg/m^3 پارامترهای ذکر شده آخر را به ترتیب ۶۰، ۷۲ و ۴۰ درصد در مقایسه با مخلوط مرجع پس از ۱۲۰ روز عمل آوری مرطوب کاهش داد. [۱۶]

تران و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی ژئولیت طبیعی و کاربرد آن در تولید کامپوزیت بتن پرداختند. این تحقیق برای ارائه بینشی جامع از کاربردهای مرتبط با ساخت و ساز ژئولیت طبیعی انجام شده است. برای این منظور، خواص ساختاری و بنیادی ژئولیت های طبیعی و کاربردهای آن ها در تولید بتن به عنوان پوزولان های طبیعی، عوامل عمل آوری و سنگدانه های سبک را مورد بحث قرار داده شده

¹ stearate

است. همچنین، از طریق تجزیه و تحلیل انتقادی تحقیقات مختلف انجام شده در گذشته، هدف این تحقیق ارائه درک بهتری از تأثیر افزودن ژئولیت‌ها بر عملکرد بتن از نظر کارایی، مقاومت، دوام و نفوذپذیری است. علاوه بر این، چالش‌های فعلی و چشم‌اندازهای آینده در استفاده از ژئولیت‌های طبیعی برای تولید بتن در این تحقیق شرح داده شده است. [۱۷]

صمیمی و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی دوام بتن خودمتراکم حاوی پومیس و ژئولیت در برابر حمله اسیدی، کربناسیون و محیط دریایی پرداختند. برطبق نتایج به دست آمده، بتن‌های خودمتراکم حاوی فومیس مقاومت فشاری حداقل برابر با نمونه شاهد در سنین اولیه و بیشتر از نمونه شاهد در سنین طولانی مدت از خود نشان داد. در مقابل، بتن‌های خودمتراکم حاوی ژئولیت به دلیل وجود تخلخل زیاد در طول آماده سازی مخلوط، مقاومت کمتری در مقایسه با بتن نمونه شاهد از خود نشان داد. این مطالعه در کل نشان دهنده اثر مثبت جایگزینی نسبی سیمان پورتلند به میزان ۱۰ و ۱۵ پومیس و ۱۵ ژئولیت بر بهبود مقاومت شیمیایی در حمله اسیدی است. [۱۸]

براری و همکاران در سال ۱۳۹۷ به بررسی آزمایشگاهی مولفه‌های موثر بر خواص مکانیکی و پایایی بتن فوق توانمند با رویکرد اقتصادی پرداختند. در این آزمایش‌ها نسبت آب به سیمان برای مقایسه نتایج، ثابت در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که متغیرهای در نظر گرفته شده بر مقاومت فشاری بتن‌های پرمقاومت بسیار تأثیر گذار بوده و استفاده از حالات بهینه‌ی طرح‌های فوق می‌تواند سبب بهبود مشخصات مکانیکی بتن شوند به گونه‌ای که با بهینه سازی اجزاء مورد استفاده می‌توان با عیار سیمانی ۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب، به ساخت بتن‌های بسیار توانمند با رویکردی اقتصادی دست یافت. [۱۹]

مارکیو و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن‌های حاوی ژئولیت طبیعی پرداختند. این مطالعه نشان داد که مخلوط بتن تازه حاوی ژئولیت به دلیل سطح بالای آن به دوز بالاتری از فوق روان کننده برای رسیدن به جریان اسلامپ هدفمند نیاز دارد. در حالی که بتن‌های حاوی ژئولیت طبیعی دارای مقاومت فشاری کمتری تا ۹۰ روز پس از سخت شدن هستند، مقاومت فشاری از مقاومت بتن‌های بدون ژئولیت پس از ۱۸۰ روز بیشتر می‌شود. نتایج همچنین اثربخشی قابل توجه استفاده از یک فوق روان کننده و یک عامل حباب کننده هوا در ژئولیت حاوی بتن‌ها را بر نفوذ آب، انقباض ناشی از خشک‌شدگی و مقاومت در برابر یخ زدن و آب شدن بتن نشان می‌دهد. [۲۰]

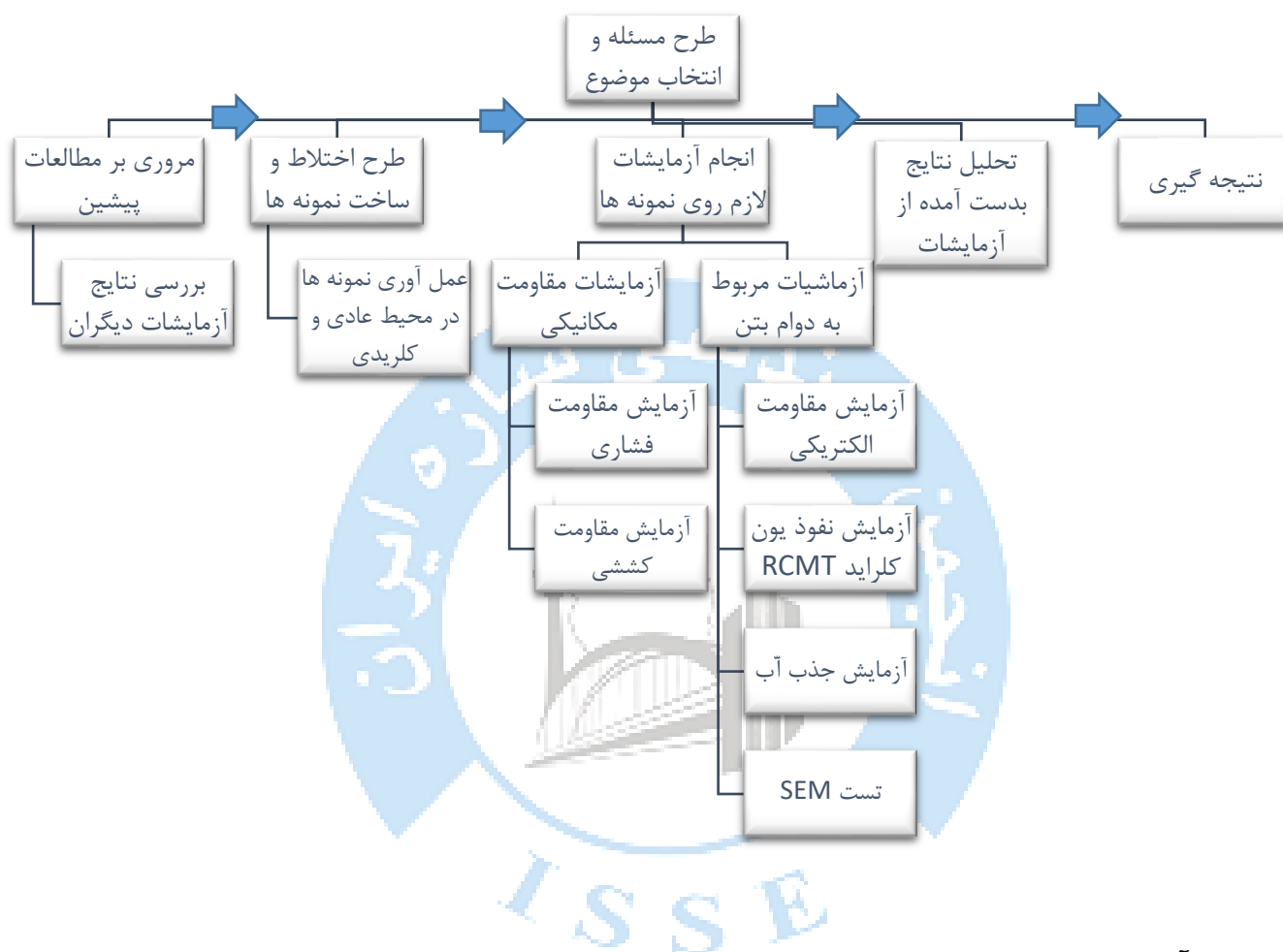
اسکندری و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن تحت تأثیر ترکیب نانو سیلیس و میکرو ژئولیت پرداختند. اثر مواد افزودنی بر خواص مکانیکی (مقاومت فشاری و کششی) و دوام توسط مقاومت الکتریکی (ER) و تست نفوذ سریع کلرید (RCPT) در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بررسی شد. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و پراش اشعه ایکس (XRD) نشان داد که نانوذرات می‌توانند کیفیت بتن را بهبود بخشند. در نتیجه آزمایش‌ها، افزایش خصوصیات مکانیکی قابل توجه نیست، اما باعث کاهش قابل توجه در نفوذ یون کلرید و افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود که گزینه مناسبی برای کنترل خوردگی در سازه‌های بتن مسلح است. [۲۱]

ولی پور و همکاران در سال ۲۰۱۳ به مقایسه پوزولان‌های طبیعی ژئولیت، متاکاولین و میکروسیلیس از نظر تأثیر آن‌ها بر ویژگی‌های دوام بتن در قالب یک مطالعه آزمایشگاهی پرداختند. نتایج نشان داد که به طور کلی، ژئولیت به اندازه میکروسیلیس یا متاکاولین فعال نیست، اگرچه می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای پوزولان‌ها استفاده شود، زیرا ویژگی‌های دوام بهتری دارد و اقتصادی و سازگار با محیط زیست نیز هست. [۲۲]

نجیمی و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی آزمایشگاهی بر روی خواص دوام بتن حاوی ژئولیت به‌عنوان یک پوزولان طبیعی بسیار واکنش پذیر پرداختند. نتایج حاکی از اثربخشی قابل توجه کاربرد ژئولیت طبیعی بر نفوذ آب، نفوذ یون کلرید، نرخ خوردگی و انقباض ناشی از خشک شدن بتن بود. با این حال، عملکرد رضایت بخشی در محیط اسیدی مشاهده نشد. در مجموع، از نقطه نظر عملی، ترکیب ۱۵ درصد ژئولیت طبیعی به‌عنوان یک گزینه مناسب برای بهبود خواص مقاومتی و دوام بتن بهتر عمل نمود. [۲۳]

تخریب محیط زیست در اثر استفاده روز افزون تولید سیمان مورد استفاده در بتن و همچنین اثرات زیست محیطی ناشی از تولید سیمان پرتلند همانند گاز دی اکسید کربن محققان را بر آن داشته است تا بخشی از سیمان مورد نظر را با مصالح پوزولانی از جمله ژئولیت و میکروسیلیس جایگزین نمایند. همچنین با توجه به مقاومت پایین بتن استفاده از الیاف های مختلفی همانند الیاف فولادی در چند دهه

اخیر پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه ساختار بتن به گونه ای است که به راحتی در معرض شرایط کلیدی قرار میگیرد، لذا در این تحقیق به بررسی اثر پوزولان های ژئولیت طبیعی و میکروسیلیس بر دوام بتن الیافی در معرض محیط های کلیدی پرداخته شده است. در ادامه روندنمای مطالعه حاضر ارائه می گردد.



۲- برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش از نمونه های با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ mm برای آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد BS EN 12390-3 [۲۴] و همچنین تست مقاومت الکتریکی طبق استاندارد ASTM C1760 [۲۵] استفاده شده است. همچنین برای تست مقاومت کششی از روش غیرمستقیم یا برزلی که بر اساس استاندارد ASTM C496 [۲۶] صورت می گیرد استفاده گردیده است که برای نمونه های استوانه ای قالبگیری شده یا مغزه گیری شده مورد استفاده قرار می گیرد. در حالت کلی مقاومت کششی بتن به روش غیر مستقیم (دو نیم کردن)، بزرگتر از مقاومت کششی مستقیم و کوچک تر از مقاومت خمشی (مدول گسیختگی) می باشد. تعیین مقاومت کششی بتن به روش دو نیم کردن برای طراحی اعضای سازه ای بتن سبک وزن کاربرد دارد تا مقاومت برشی ارزیابی شده و طول گیرایی میلگرد داخل بتن تعیین گردد. به طور کلی بتن ها مقاومت کششی کمتری نسبت به مقاومت فشاری دارند. به خاطر همین مسئله آرماتورها نقش مهمی در تحمل نیروی کششی در اعضای سازه ای ایفا میکنند. در این روش یک نیروی فشاری قطری با سرعت مشخص در امتداد طول آزمونه استوانه ای بتن اعمال می شود تا گسیختگی رخ بدهد.

برای بررسی تاثیر محیط کلریدی از آزمون نفوذ یون یا RCMT مطابق با استاندارد [۲۷] NT BUILD 492 و [۲۸] ASTM C1202 استفاده شده است. از جمله عوامل مخرب در بتن که سبب کاهش عمر مفید بتن و خوردگی آرماتورها در بتن خواهد گردید، نفوذ یون کلرید می باشد. این آزمایش شبیه سازی حالت غیرپایدار است و مقاومت بتن را در مقابل نفوذ کلرید ارزیابی می کند. نمونه ها به قطر ۱۰۰ میلی متر و ضخامت ۵۰ میلی متر استفاده می شوند. در تست RCMT نمونه ها در مخزن محلول ۱۰ درصد نمک طعام به عنوان محلول کاتولیت قرار داده میشوند و محلول ۰/۳ مول سدیم هیدروکسید به عنوان آنولیت بر روی نمونه ها ریخته می شود. سپس ۳۰ ولت پتانسیل بین الکترودها اعمال می شود. البته جریان اندازه گیری می شود و اگر ضروری باشد پتانسیل اعمال شده باید تنظیم شود. مدت آزمایش بستگی به پتانسیل اعمال شده دارد. برای مثال اگر جریان اولیه حدود ۳۵ میلی آمپر باشد نشان می دهد که پتانسیل ۳۰ ولت مناسب است، بنابراین مدت ۲۴ ساعت کافی است. برای آنکه عمق نفوذ کلرید اندازه گیری شود، نمونه ها را پس از اتمام آزمایش به دو نیم تقسیم می کنند و سپس محلول نیترات نقره ۱/۱ N بر روی سطح شکسته شده اسپری می شود. عمق بتن که تغییر رنگ پیدا می کند به عنوان عمق نفوذ کلرید در نظر گرفته می شود.

۳- مشخصات مصالح و نمونه ها

۳-۱- شن و ماسه

شن مصرفی رودخانه ای با دانه بندی پیوسته بوده و از کارخانه لوله سازی شمال رشت تهیه شده است. ماکزیمم اندازه دانه های آن ۱۲/۵ میلی متر، وزن مخصوص اشباع با سطح خشک 1602 kg/m^3 و جذب آب ۱/۱ درصد می باشد. دانه بندی بر اساس استاندارد ASTM C33 [۲۹] انجام شده است.

ماسه مورد استفاده در نمونه ها رودخانه ای بوده و تحت عنوان ماسه ۶-۰ از کارخانه لوله سازی شمال رشت تهیه شده است. وزن مخصوص ماسه مصرفی در حالت اشباع با سطح خشک برابر 2611 kg/m^3 ، جذب آب آن ۲/۴ درصد بوده است. دانه بندی ماسه مصرفی مطابق استاندارد ASTM C33 [۲۹] می باشد.

۳-۲- سیمان

سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان هگمتان بوده که مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مصرفی در جدول ۱ و جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

ترکیب	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	LOI
درصد تشکیل دهنده	۲۱/۳۲	۴/۸۱	۳/۸۳	۶۲/۸۵	۱/۴۸	۰/۶۹	۰/۴۷	۲/۳۲	-	۲/۰۴

جدول ۲: مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

نوع سیمان	وزن مخصوص [gr/cm ³]	سطح مخصوص [cm ² /gr]	گیرش اولیه [دقیقه]	گیرش نهایی [دقیقه]	انبساط اتوکلاو
سیمان تیپ ۲	۳/۱۵	۲۹۱۰	۱۵۰	۲۰۵	۰/۰۷

۳-۳- میکروسیلیس

میکروسیلیس محصول جانبی تولیدات فلزات خاص در کوره های قوس الکتریکی با واکنش پذیری بالاست و می توان به عنوان جایگزین بخشی از سیمان با هدف بهبود برخی خواص بتن از جمله خواص مکانیکی و دوام استفاده شود. دوده سیلیس مصرفی

تولید کارخانه فروسیلیس ایران است که دارای وزن مخصوص 2200 Kg/m^3 می باشد. این افزودنی بدون حل کردن در آب به حالت خشک و به صورت درصدی از وزن سیمان به مخلوط بتن اضافه شده است. ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مشخصات شیمیایی میکروسیلیس مصرفی

ترکیبات	LOI	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
میکروسیلیس	۳/۵	۰/۰	۲/۰	۱/۵	۲/۰	۱/۰	۸۵/۰

۳-۴- زئولیت طبیعی

زئولیت یکی از پوزولان های طبیعی است که در ایران به وفور یافت می شود و به راحتی قابل استخراج و فرآوری است در جدول ۴ مشخصات زئولیت طبیعی مورد استفاده ارائه شده است.

جدول ۴: مشخصات شیمیایی زئولیت مصرفی

ترکیبات	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	K ₂ O
زئولیت طبیعی	۷۰/۹	۱۲/۴	۱/۲۱	۲/۵۴	۰/۸۳	۰/۲۸	۰/۰۸۹	۴/۴۶

۳-۵- الیاف فولادی

در جدول ۵ مشخصات مکانیکی و فیزیکی الیاف فولادی ارائه شده است.

جدول ۵: مشخصات مکانیکی و فیزیکی الیاف فولادی

چگالی (Kg/m ³)	مقاومت کششی (MPa)	L/D	قطر (mm)	طول (mm)
۷۸۵۰	۱۲۰۰	۴۵	۰.۸	۳۶

۳-۶- روش اختلاط بتن و نمونه ها

در پژوهش انجام شده ابتدا ۱۴ طرح بتن طبق جدول ۶، با ۳ دوز مختلف متشکل از زئولیت طبیعی و میکروسیلیس با و بدون الیاف فولادی با هم ساخته شده است. پس از عمل آوری، نمونه ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه Ctrl که فاقد هرگونه پوزولان و الیاف فولادی است به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد. در طرح های شماره ۲، ۳ و ۴ به ترتیب از زئولیت با درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد استفاده شده است. در طرح های یاد شده از میکروسیلیس ۵ درصد استفاده شده است. همچنین طرح های شماره ۵، ۶، ۷ همان طرح های ۳، ۴ و ۵ هستند با این تفاوت که از میکروسیلیس ۱۰ درصد در آنها استفاده شده است. در طرح شماره ۸ از الیاف فولادی تنها بدون هرگونه پوزولان استفاده شده است. طرح های شماره ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نیز همان طرح های ۲ تا ۷ هستند، با این تفاوت که در آنها از ۱ درصد الیاف فولادی استفاده به عمل آمده است. در نمونه های حاوی الیاف از ۷۸ کیلوگرم بر متر مکعب الیاف فولادی استفاده شده است. مقدار پودر زئولیت ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به ترتیب معادل استفاده از ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. همچنین میکروسیلیس ۵ و ۱۰ درصد نیز بیانگر استفاده از ۵ و ۱۰ کیلوگرم از آن در هر متر مکعب است. در طرح های مختلف از ۱۶۰ کیلوگرم آب و ۴۰۰ کیلوگرم سیمان استفاده شده است، به طوری که نسبت آب به سیمان برابر ۰/۴ است.

جدول ۶: طرح اختلاط مورد استفاده در پژوهش

شماره	ترکیبات	سیمان			میکروسیلیس		پودر زئولیت		الیاف فولادی		آب (kg/m ³)	نسبت آب به مواد چسبنده (w/b)	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	G/S
		(kg/m ³)	(C)%	Kg/m ³	(C)%	Kg/m ³	(V)%	Kg/m ³							
۱	Ctrl	۴۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۶۰	۰/۴	۱۰۲۱/۶	۸۵۱/۳	۱/۲		
۲	S5Z5	۳۶۰	۵	۲۰	۵	۲۰	۰	۰	۱۶۰	۰/۴	۱۰۱۴/۳	۸۴۵/۲	۱/۲		
۳	S5Z10	۳۴۰	۵	۲۰	۱۰	۴۰	۰	۰	۱۶۰	۰/۴	۱۰۱۰/۹	۸۴۲/۴	۱/۲		
۴	S5Z15	۳۲۰	۵	۲۰	۱۵	۶۰	۰	۰	۱۶۰	۰/۴	۱۰۰۷/۶	۸۳۹/۶	۱/۲		
۵	S10Z5	۳۴۰	۱۰	۴۰	۵	۲۰	۰	۰	۱۶۰	۰/۴	۱۰۱۰/۴	۸۴۲/۰	۱/۲		
۶	S10Z10	۳۲۰	۱۰	۴۰	۱۰	۴۰	۰	۰	۱۶۰	۰/۴	۱۰۰۷/۰	۸۳۹/۲	۱/۲		
۷	S10Z15	۳۰۰	۱۰	۴۰	۱۵	۶۰	۰	۰	۱۶۰	۰/۴	۱۰۰۳/۶	۸۳۶/۴	۱/۲		
۸	F1	۴۰۰	۰	۰	۰	۰	۱	۷۸	۱۶۰	۰/۴	۱۰۰۷/۳	۸۳۹/۴	۱/۲		
۹	S5Z5F1	۳۶۰	۵	۲۰	۵	۲۰	۱	۷۸	۱۶۰	۰/۴	۱۰۰۰/۰	۸۳۳/۳	۱/۲		
۱۰	S5Z10F1	۳۴۰	۵	۲۰	۱۰	۴۰	۱	۷۸	۱۶۰	۰/۴	۹۹۶/۶	۸۳۰/۵	۱/۲		
۱۱	S5Z15F1	۳۲۰	۵	۲۰	۱۵	۶۰	۱	۷۸	۱۶۰	۰/۴	۹۹۳/۲	۸۲۷/۷	۱/۲		
۱۲	S10Z5F1	۳۴۰	۱۰	۴۰	۵	۲۰	۱	۷۸	۱۶۰	۰/۴	۹۹۶/۰	۸۳۰/۰	۱/۲		
۱۳	S10Z10F1	۳۲۰	۱۰	۴۰	۱۰	۴۰	۱	۷۸	۱۶۰	۰/۴	۹۹۲/۷	۸۲۷/۲	۱/۲		
۱۴	S10Z15F1	۳۰۰	۱۰	۴۰	۱۵	۶۰	۱	۷۸	۱۶۰	۰/۴	۹۸۹/۳	۸۲۴/۴	۱/۲		

برای آزمایش جذب آب، مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی از نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر مکعبی استفاده شده است. بدین ترتیب ابتدا مخلوط بتن مورد نظر در داخل مکعب‌های مورد نظر به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. سپس به منظور عمل آوری نمونه‌های مزبور، این نمونه‌ها به مدت ۲۸ و ۹۰ روز در داخل حوض آب با دمای معمولی قرار گرفتند.

۴- نتایج آزمایشات انجام شده

در بخش پیش‌رو تحلیل نتایج حاصل از آزمایشات فشاری، کششی، مقاومت الکتریکی، جذب آب و جذب یون کلر انجام شده و تأثیر پوزولان‌های زئولیت طبیعی و میکروسیلیس بر رفتار نمونه‌های مورد مطالعه بررسی گردیده است.

۴-۱- مقایسه نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط عادی و کلریدی

۴-۱-۱- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط عادی

مقایسه و بررسی نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط عادی نشان داد که تمامی نمونه‌ها طبق انتظار نسبت به نمونه Ctrl، در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در افزایش مقاومت داشته‌اند. این افزایش مقاومت در سن ۲۸ روزه در نمونه‌های فاقد الیاف در بهترین حالت در نمونه S10Z15 با تقریباً ۲۷ درصد افزایش و در سن ۹۰ روزه در نمونه S10Z10 با تقریباً ۲۰ درصد افزایش نسبت به نمونه Ctrl همراه بوده که با توجه به نتایج آن در سنین ۲۸ و ۹۰ روز می‌توان نمونه S10Z10 را بعنوان نمونه بهینه در بین نمونه‌های فاقد الیاف انتخاب کرد که باعث افزایش مقاومتی به ترتیب ۲۱/۴۸ و ۲۰/۵ درصدی نسبت به نمونه Ctrl شد.

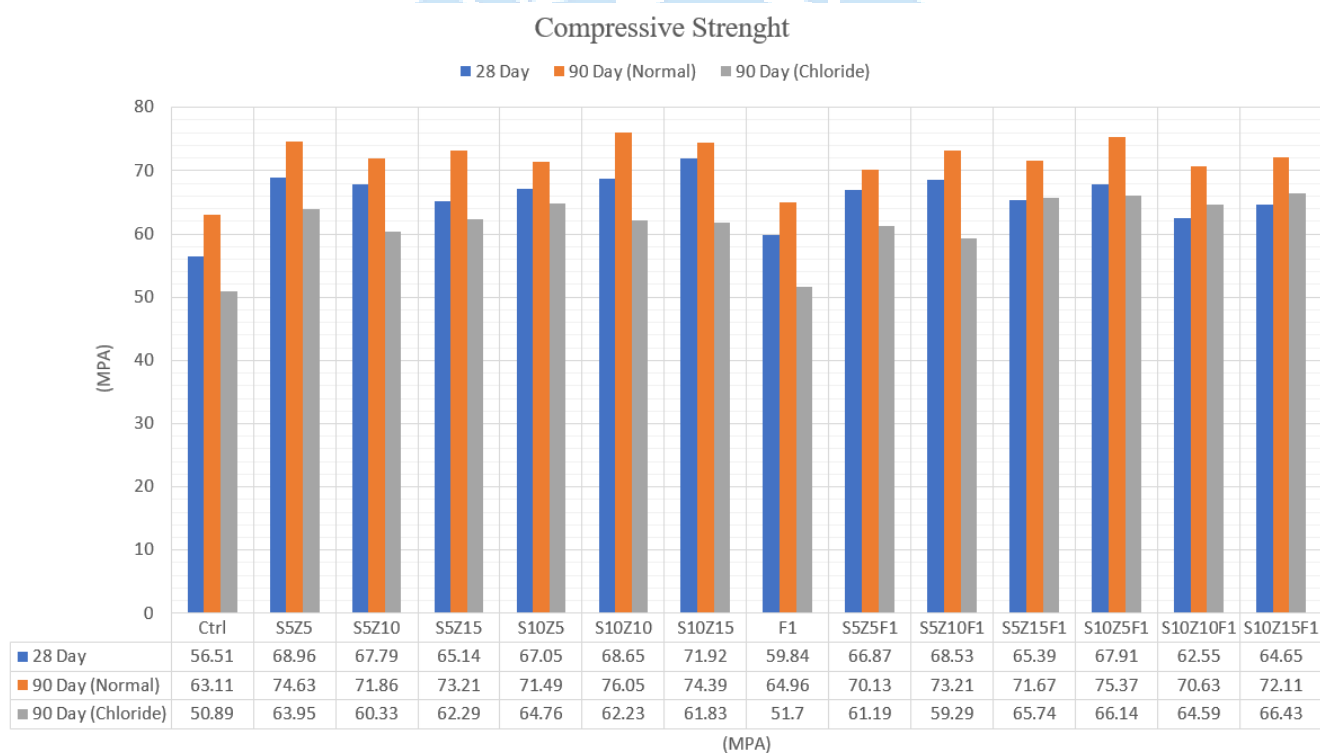
در سن ۲۸ روز بین نمونه‌های حاوی الیاف در شرایط عادی نمونه S5Z10F1 بهترین نتیجه با تقریباً ۲۱ درصد اختلاف و نمونه S10Z5F1 در سن ۹۰ روزه بهترین نتیجه را با تقریباً ۱۹/۵ درصد اختلاف نسبت به نمونه Ctrl نشان داد که میتوان نمونه S10Z5F1 را بعنوان نمونه بهینه باتوجه به نتایج آن در سن ۲۸ و ۹۰ روز انتخاب کرد که باعث افزایشی به ترتیب ۲۰/۱۷ و ۱۹/۴۳ درصدی نسبت به نمونه شاهد شد.

۴-۱-۲- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط کلیدی

در شرایط کلیدی نتایج نشان داد نمونه S10Z5 در بین نمونه‌های فاقد الیاف با ۲۷/۲۶ درصد بیشترین افزایش مقاومت و در بین نمونه‌های دارای الیاف نمونه S10Z15F1 با ۳۰/۵۴ درصد بیشترین افزایش مقاومت نسبت به نمونه Ctrl را حاصل کرده‌اند.

در مورد نمونه‌های فاقد الیاف با توجه به شرایط، بین نمونه‌های S10Z5 و S10Z10 می‌توان تصمیم گرفت که کدام مورد بهتر خواهد بود اما تقریباً میتوان گفت که نمونه S10Z10 در هردو محیط نتیجه مطلوبی را حاصل میکند و میتوان آن را بعنوان نمونه بهینه برای هردو محیط برگزید.

همچنین می‌توان نتایج حاصله در دو محیط عادی و کلیدی را در نمودار میله‌ای شکل ۱ مقایسه کرد.



شکل ۱: مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط عادی و کلیدی

با مقایسه نتایج در هر دو محیط کلیدی و عادی میتوان این نتیجه را گرفت که در بحث مقاومت فشاری در بین نمونه‌ها، نمونه S10Z5F1 بهینه ترین نمونه با تقریباً ۳۰ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد در شرایط کلیدی و ۱۹/۴۳ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد در شرایط عادی در سن ۹۰ روزه خواهد بود.

تحت تأثیر شرایط کلیدی، مشاهده شده است که مقاومت فشاری تمام نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های عادی نظیر خود کاهش یافته است. این اختلاف بین ۲۰/۴ و ۲/۷۵ درصد قرار دارد و به طور متوسط می‌توان گفت که مقاومت فشاری در شرایط کلیدی نسبت به شرایط عادی ۱۳/۴ درصد کمتر است.

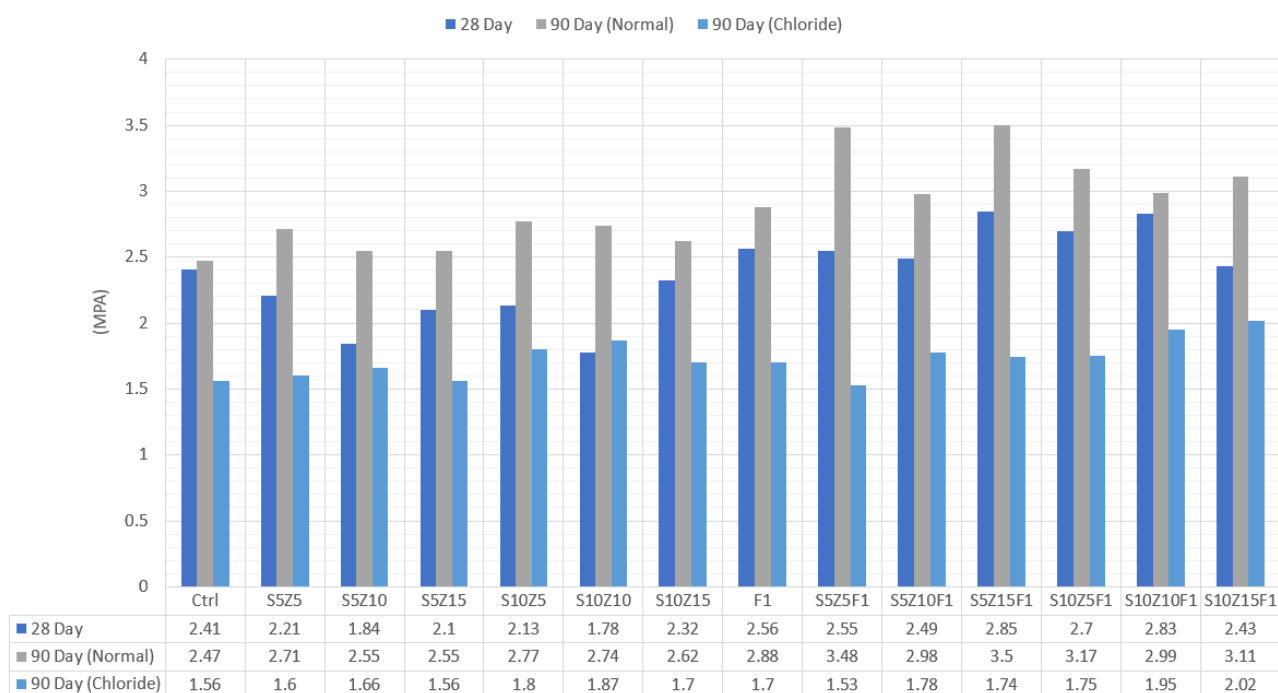
کاهش مقاومت فشاری نمونه ها در محیط کلریدی نسبت به محیط عادی ممکن است به عوامل متعددی بستگی داشته باشد ولی به طور کلی میتوان به مواردی همچون خوردگی الیاف فولادی به دلیل نفوذ یون کلراید و ایجاد خوردگی الکتروشیمیایی و همچنین تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی پوزولانها اشاره کرد. با این حال در تمامی نمونهها در شرایط کلریدی ما با افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه Ctrl در شرایط برابر مواجه خواهیم بود.

۲-۴- مقایسه نتایج مقاومت کششی نمونه ها در شرایط عادی و کلریدی

با بررسی نتایج حاصله که در نمودار میله‌ای شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد، در نمونه‌های فاقد الیاف در سن ۲۸ روز در شرایط عادی کاهش مقاومت کششی مشاهده شد که البته همین نمونه‌ها در سن ۹۰ روز، در هردو شرایط عادی و کلریدی با افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد همراه بودند. بررسی در نمونه‌های فاقد الیاف نشان داد که در سن ۹۰ روز، در شرایط عادی بهترین نتیجه از نمونه S10Z5 با ۱۲/۳۶ درصد افزایش و در شرایط کلریدی بهترین نتیجه از نمونه S10Z10 با ۱۹/۵۶ درصد افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه Ctrl مشاهده شد.

در نمونه‌های دارای الیاف در عمده نمونه‌ها جز نمونه S5Z5F1 شاهد افزایش مقاومت کششی در هردو شرایط محیطی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز نسبت به نمونه Ctrl هستیم. در شرایط محیطی عادی و کلریدی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بهترین نتیجه از نمونه S5Z15F1 با ۱۸/۴۴ و ۴۲ درصد افزایش مقاومت حاصل شد اما در محیط کلریدی بهترین نتیجه از نمونه S10Z15F1 با ۲۹/۳۴ درصد افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد مشاهده شد.

Tensile Strenght



شکل ۲: مقایسه مقاومت کششی نمونه‌ها در شرایط عادی و کلریدی

همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، تأثیر محیط کلریدی بر افت مقاومت کششی نمونه‌ها بیشتر از مقاومت فشاری است. به طوری که مقاومت کششی حداقل ۳۱/۸۳ درصد کاهش یافته است. حداکثر میزان کاهش مقاومت کششی ۵۶/۰۹ درصد است. میانگین مقاومت کششی در شرایط کلریدی نسبت به شرایط عادی ۳۹/۷۲ درصد کاهش یافته است.

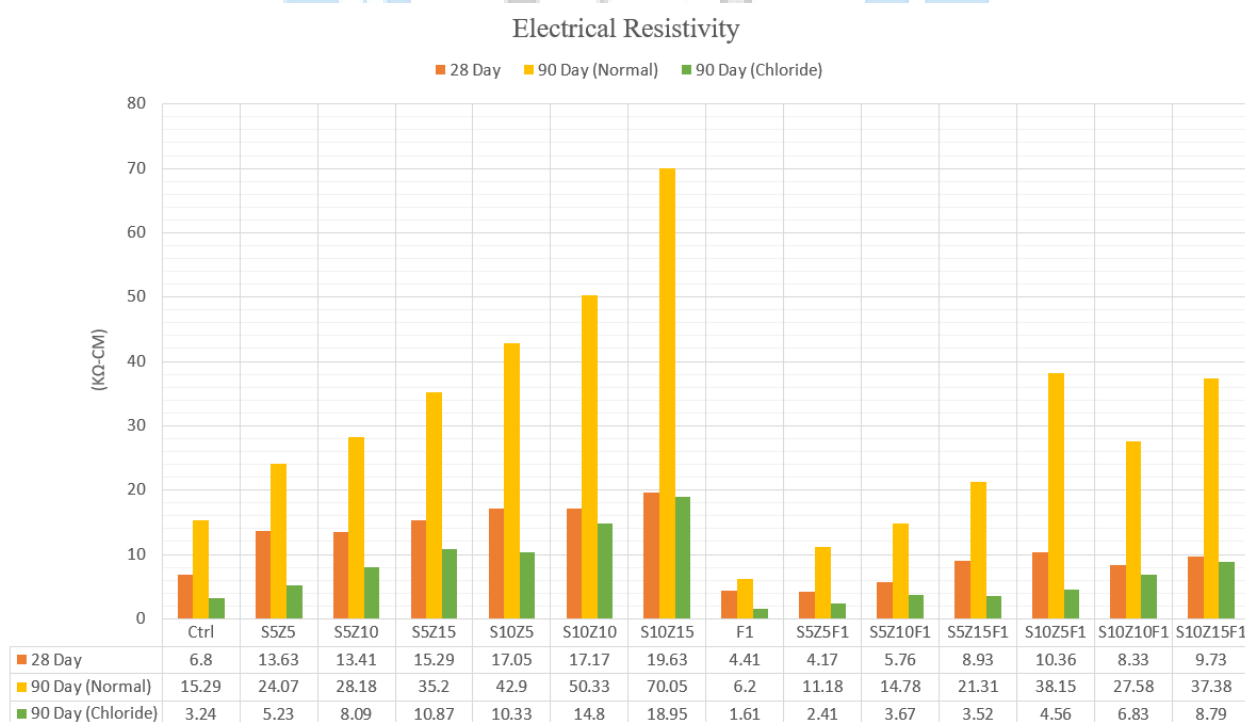
کاهش مقاومت کششی نمونه ها در محیط کلریدی نسبت به محیط عادی نیز میتواند مانند مقاوت فشاری به عوامل متعددی بستگی داشته باشد که به طور کلی میتوان به مواردی همچون خوردگی الیاف فولادی ناشی از نفوذ یون کلراید و ایجاد خوردگی الکتروشیمیایی و نیز تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی پوزولانها اشاره کرد. با این حال در تمامی نمونهها در شرایط کلریدی افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه Ctrl در محیط یکسان مشاهده شد.

در بحث دوام در بخش مقاومت کششی بتن با افزایش پوزولانها به علت پر شدن خلل و فرج بتن و متراکم تر شدن آن و محافظت بهتر از الیاف فولادی نتایج بهتری حاصل می شود.

همچنین با بررسی درصد متفاوت میکروسیلیس و ثابت نگاه داشتن درصد زئولیت، بعنوان یک نتیجه کلی می توان گفت که درصد میکروسیلیس تأثیر ناچیزی بر مقاومت فشاری دارد. این در حالی است که در مورد مقاومت کششی افزودن مقدار میکروسیلیس از ۵ به ۱۰ درصد منجر به تغییر مقاومت کششی تا ۱۱/۳ شده است.

۴-۳- نتایج مقاومت الکتریکی نمونه ها در شرایط عادی و کلریدی

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش مقاومت الکتریکی که نتایج آن در شکل ۳ به نمایش گذاشته شده است، مشاهده شد که در تمامی نمونه های فاقد الیاف با افزایش مواد پوزولانی، افزایش قابل توجهی در مقاومت الکتریکی در هر دو شرایط محیطی ایجاد شد. بر طبق نتایج نمونه S10Z15 با بیشترین درصد پوزولان بهترین عملکرد را از خود نشان داد. در سن برابر ۹۰ روز، در شرایط محیطی عادی و کلریدی به ترتیب ۳۵۸ و ۴۸۴ درصد افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به نمونه Ctrl شاهد رخ داد. در مقابل، در نمونه های دارای الیاف همانطور که انتظار می رفت در دو نمونه F1 و S5Z5F1 به علت کمبود یا عدم حضور پوزولانها کاهش مقاومت الکتریکی رخ داد که این کاهش بتدریج با افزایش درصد پوزولانها رو به افزایش رفته و در نمونه S10Z15F1 به حد نهایی خود در نمونه های مورد آزمایش رسید.



شکل ۳: مقایسه مقاومت الکتریکی نمونه ها در شرایط عادی

مقاومت الکتریکی یکی از روشهای غیر مستقیم برای اندازه گیری تخلخل و نفوذ است و به عنوان شاخصی برای دوام و مقاومت در برابر خوردگی بتن محسوب می شود. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، با قرار گرفتن در معرض محیط کلریدی، مقاومت الکتریکی

نمونه‌ها به شدت دچار کاهش شده است. از مقایسه نظیر به نظیر می‌توان متوجه شد که پس از قرار گرفتن در محیط کلریدی مقاومت الکتریکی بین ۶۹ تا ۸۸ درصد کاهش یافته است. این مقدار به طور متوسط ۷۶/۲ درصد است.

به طور کلی و بر طبق انتظار به علت وجود الیاف فولادی مقاومت الکتریکی به طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند اما با حضور پوزلان‌ها که باعث محافظت بهتر از فولاد و کاهش خوردگی آن می‌شوند، ما شاهد افزایش مقاومت الکتریکی هستیم که این افزایش مقاومت با اضافه کردن بیشتر پوزلان‌ها نیز به تدریج افزایش پیدا می‌کند.

۴-۴- بررسی ضریب مهاجرت یونی نمونه‌ها

۴-۴-۱- نتایج نفوذ یون کلرید نمونه‌ها در سن ۹۰ روزه

نتایج آزمایش ضریب مهاجرت یون کلرید برای نمونه‌ها در سن ۹۰ روزه در جدول ۷ ارائه شده است. همچنین برای درک بهتر در شکل ۴ مقایسه ضریب مهاجرت یون کلرید برای نمونه‌های ۹۰ روزه به صورت نمودار ستونی نشان داده شده است.

جدول ۷: نتایج آزمایش ضریب مهاجرت یون کلرید در سن ۹۰ روز

نمونه	V(volt)	T1	T2	L(mm)	Xd(mm)	t(h)	Dnssm ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	اختلاف با نمونه شاهد (/.)
Ctrl	۳۰	۲۸/۱	۲۸/۶	۵۰	۲۴	۲۴	۱/۲۸	---
S5Z5	۳۰	۲۷/۹	۲۸/۶	۵۰	۱۴	۲۴	۰/۷۲	۴۴/۱
S5Z10	۳۰	۲۷/۸	۲۸/۸	۵۰	۱۲	۲۴	۰/۶۱	۵۲/۷
S5Z15	۳۰	۲۷/۸	۲۸/۸	۵۰	۷	۲۴	۰/۳۳	۷۴/۰
S10Z5	۳۰	۲۷/۸	۲۸/۸	۵۰	۱۴	۲۴	۰/۷۲	۴۴/۰
S10Z10	۳۰	۲۷/۹	۲۸/۸	۵۰	۱۴	۲۴	۰/۷۲	۴۴/۰
S10Z15	۳۰	۲۸/۱	۲۸/۹	۵۰	۱۰	۲۴	۰/۵۰	۶۱/۱
F1	۳۰	۲۷/۷	۲۹/۶	۵۰	۲۹	۲۴	۱/۵۸	۲۳/۳
S5Z5F1	۳۰	۲۷/۷	۲۹/۱	۵۰	۱۸	۲۴	۰/۹۴	۲۶/۴
S5Z10F1	۳۰	۲۷/۹	۲۹/۱	۵۰	۱۵	۲۴	۰/۷۸	۳۹/۳
S5Z15F1	۳۰	۲۷/۷	۲۹/۱	۵۰	۱۱	۲۴	۰/۵۵	۵۶/۹
S10Z5F1	۳۰	۲۸/۱	۲۹/۵	۵۰	۱۵	۲۴	۰/۷۸	۳۸/۸
S10Z10F1	۳۰	۲۸/۱	۲۹/۵	۵۰	۱۵	۲۴	۰/۷۸	۳۸/۸
S10Z15F1	۳۰	۲۷/۷	۲۹/۵	۵۰	۷	۲۴	۰/۳۴	۷۳/۸

باتوجه به مقادیر جدول ۷، ضریب نفوذ یون کلرید به جز نمونه F1 در تمامی نمونه‌ها کمتر از نمونه شاهد بدست آمد. در بین نمونه‌های فاقد الیاف بیشترین کاهش مربوط به نمونه S5Z15 با اختلاف ۷۴ درصدی نسبت به نمونه Ctrl بوده و در بین نمونه‌های با الیاف نیز بیشترین کاهش مربوط به نمونه S10Z15F1 است که با اختلاف ۷۴ درصدی نسبت به نمونه شاهد می‌باشد.

۴-۴-۲- نتایج نفوذ یون کلرید نمونه‌ها در سن ۹۰ روزه در شرایط کلریدی

نتایج آزمایش ضریب مهاجرت یون کلرید برای نمونه‌ها در سن ۹۰ روزه در شرایط کلریدی در جدول ۸ ارائه شده است. همچنین برای درک بهتر در شکل ۴، مقایسه ضریب مهاجرت یون کلرید برای نمونه‌های ۹۰ روزه در شرایط کلریدی به صورت نمودار ستونی نشان داده شده است.

جدول ۸: نتایج آزمایش ضریب مهاجرت یون کلر در سن ۹۰ روز در شرایط کلریدی

نمونه	V(volt)	T1	T2	L(mm)	Xd(mm)	t(h)	Dnssm ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	اختلاف با نمونه شاهد (%)
Ctrl	۳۰	۲۶/۴	۳۰/۱	۵۰	۴۶	۲۴	۲/۵۳	---
S5Z5	۳۰	۲۵/۹	۲۸/۳	۵۰	۲۸	۲۴	۱/۴۵	۴۲/۷
S5Z10	۳۰	۲۵/۷	۲۷/۶	۵۰	۱۶	۲۴	۰/۷۹	۶۸/۹
S5Z15	۳۰	۲۵/۶	۲۶/۹	۵۰	۳۹	۲۴	۲/۰۱	۲۰/۸
S10Z5	۳۰	۲۵/۸	۲۸/۶	۵۰	۲۵	۲۴	۱/۲۹	۴۹/۰
S10Z10	۳۰	۲۵/۸	۲۷/۸	۵۰	۲۵	۲۴	۱/۲۸	۴۹/۶
S10Z15	۳۰	۲۵/۹	۲۷/۷	۵۰	۲۸	۲۴	۱/۴۴	۴۳/۲
F1	۳۰	۲۶/۷	۲۹/۸	۵۰	۴۷	۲۴	۲/۵۹	۲/۳
S5Z5F1	۳۰	۲۵/۸	۲۹/۳	۵۰	۳۲	۲۴	۱/۷۰	۳۳/۱
S5Z10F1	۳۰	۲۵/۷	۲۹/۱	۵۰	۲۵	۲۴	۱/۳۰	۴۸/۷
S5Z15F1	۳۰	۲۵/۹	۲۹/۵	۵۰	۳۶	۲۴	۱/۹۳	۲۳/۹
S10Z5F1	۳۰	۲۵/۹	۲۹/۵	۵۰	۲۸	۲۴	۱/۴۸	۴۱/۶
S10Z10F1	۳۰	۲۵/۸	۲۸/۳	۵۰	۳۲	۲۴	۱/۶۷	۳۴/۱
S10Z15F1	۳۰	۲۵/۸	۲۸/۶	۵۰	۳۴	۲۴	۱/۷۹	۲۹/۴

با توجه به جدول ۸، در این نمونه‌ها نیز ضریب نفوذ یون کلر به جز نمونه F1 در تمامی نمونه‌ها کمتر از نمونه Ctrl بدست آمده است. نمونه S5Z15 و S5Z10 به ترتیب کمترین و بیشترین ضریب نفوذ یون را در بین نمونه‌های فاقد الیاف دارند و دارای اختلافی به ترتیب ۶۸/۹ و ۲۰/۸ درصدی با نمونه شاهد هستند. در بین نمونه‌های حاوی الیاف کمترین ضریب نفوذ یون مربوط به نمونه S5Z10F1 با درصد اختلاف ۴۸/۷ درصدی و در پله بعدی نمونه S10Z5F1 با اختلاف ۴۱/۶ درصدی نسبت به نمونه Ctrl می‌باشد.

۴-۳- تاثیر محیط کلریدی بر ضریب مهاجرت یون کلر نمونه‌های مورد مطالعه

پس از قرار گرفتن در معرض شرایط کلریدی، ضریب مهاجرت یون کلریدی به شدت افزایش یافت. این مسئله نشان دهنده کاهش دوام بتن تحت شرایط کلریدی می‌باشد. به عنوان مثال در نمونه شاهد، ضریب مهاجرت یون کلر ۹۷ درصد افزایش یافته است، در حالی که در بقیه نمونه‌ها این افزایش بین ۳۰/۰۹ و ۵۰۳/۰۴ درصد است.

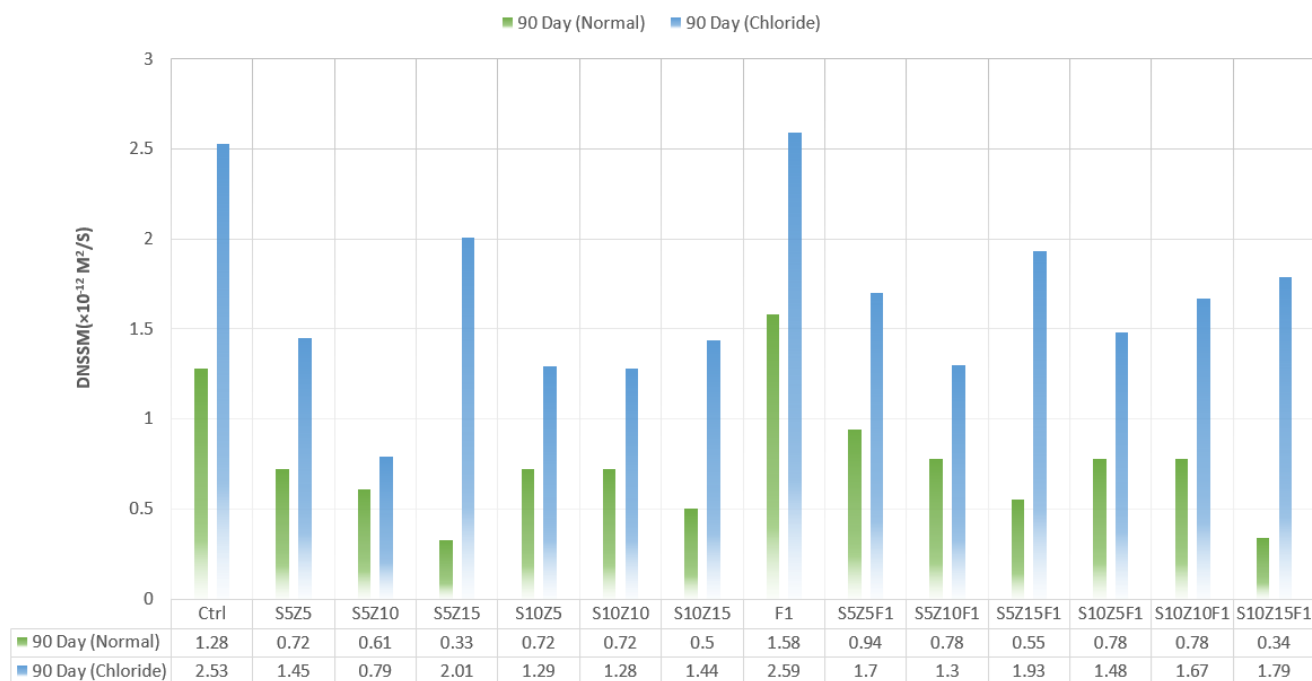
با بررسی نتایج آزمایش‌ها که در شکل ۴ نشان داده شده، مشاهده می‌شود که افزودن پوزولانها با هر نسبتی به نمونه‌های حاوی الیاف، منجر به کاهش ضریب نفوذ یون کلر می‌شود. در نمونه‌های ۲۸ روزه، این کاهش بین ۳۱ تا ۷۳ درصد و در نمونه‌های ۹۰ روزه، به ترتیب در شرایط عادی بین ۳۹ تا ۷۴ درصد و در شرایط کلریدی بین ۲۴ تا ۵۰ درصد متغیر است.

با مقایسه نظیر به نظیر نمونه‌هایی که در معرض محیط کلریدی قرار گرفتند مشاهده می‌شود که ما با کاهش دوام بتن روبه‌رو هستیم اما در حالت کلی به علت پرشدن منافذ بتن با پوزولانها و جلوگیری از نفوذ یون‌های مخرب کلرید به درون بتن به دلیل افزایش کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) توسط پوزولانها، دوام نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد بهبود یافته است. لازم به ذکر است حضور الیاف فولادی در محیط‌های مخرب خود عامل مهمی در کاهش دوام محسوب می‌شود.

استفاده از دوزهای بالای زئولیت (۱۵ درصد)، باعث کاهش اثر بخشی این پوزولان در بحث دوام بتن قرار گرفته در معرض محیط‌های مخرب می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده تقریباً می‌توان گفت درصد مطلوب زئولیت در محیط‌های کلریدی برابر ۱۰ درصد و در محیط‌های عادی ۱۵ درصد می‌باشد که بوسیله آن می‌توان به نتایج مطلوبی در بحث دوام بتن دست یافت.

در بین نمونه‌های حاوی الیاف باتوجه به هردو محیط و اهمیت دوام در شرایط کلریدی، میتوان دو نمونه S5Z10F1 و S10Z5F1 را بعنوان نمونه‌های مطلوب و نمونه S5Z10F1 را بعنوان بهینه ترین حالت در محیط کلریدی در نظر گرفت.

CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT

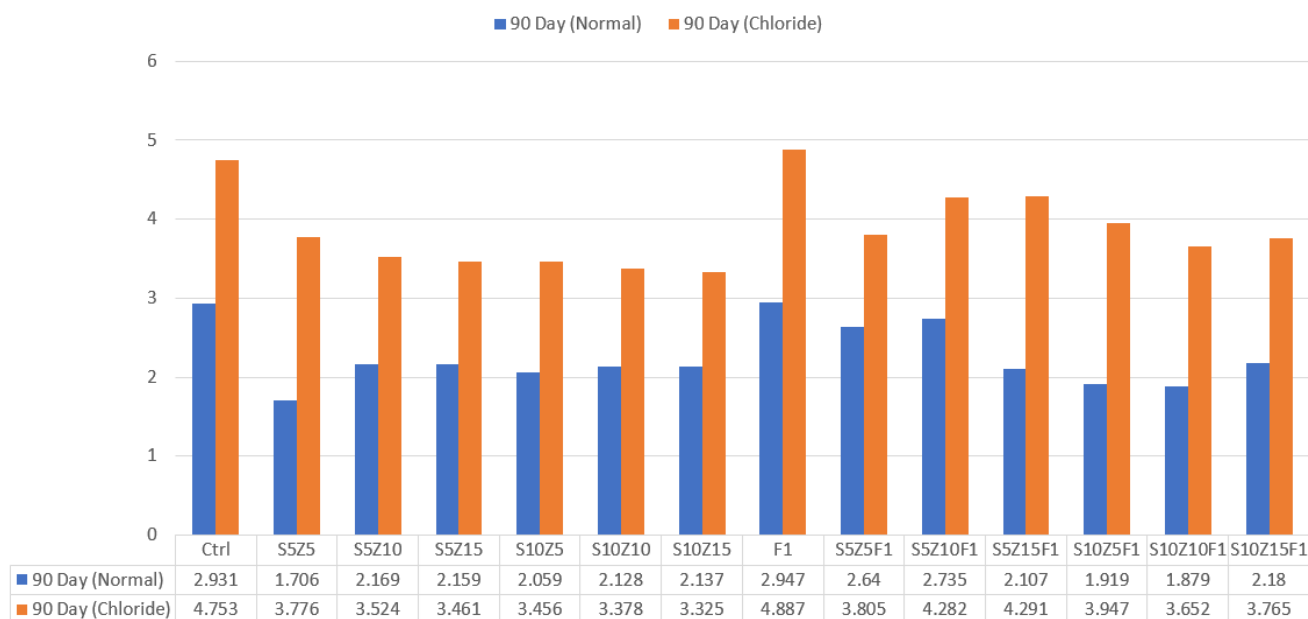


شکل ۴: مقایسه نتایج آزمایش ضریب مهاجرت یون کلر در نمونه‌های مختلف در سن ۹۰ روزه در شرایط عادی و کلریدی

۴-۵- تاثیر محیط کلریدی بر جذب آب نمونه‌ها

جذب آب ۹۰ روزه نمونه‌های مورد مطالعه پس از قرار گرفتن تحت شرایط عادی و کلریدی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده که در شکل ۵ ارائه شده است، جذب آب پس از قرار گرفتن در محیط کلریدی به طور قابل توجهی نسبت به محیط عادی افزایش یافت. این افزایش در بازه ۴۴ و ۱۲۱ قرار دارد. همچنین میانگین افزایش جذب آب در محیط کلریدی نسبت به محیط عادی برابر با ۷۳/۶ درصد است. به طور کلی به علت افزودن پوزولان‌ها مشاهده می‌شود که جذب آب تقریباً در تمامی نمونه‌ها در هردو شرایط عادی و کلریدی نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. همچنین به منظور مقایسه بهتر مقادیر آزمایش به صورت نمودار ستونی در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

Water Absorption



شکل ۵: مقایسه جذب آب نمونه‌های مختلف در شرایط عادی و کلریدی پس از ۹۰ روز

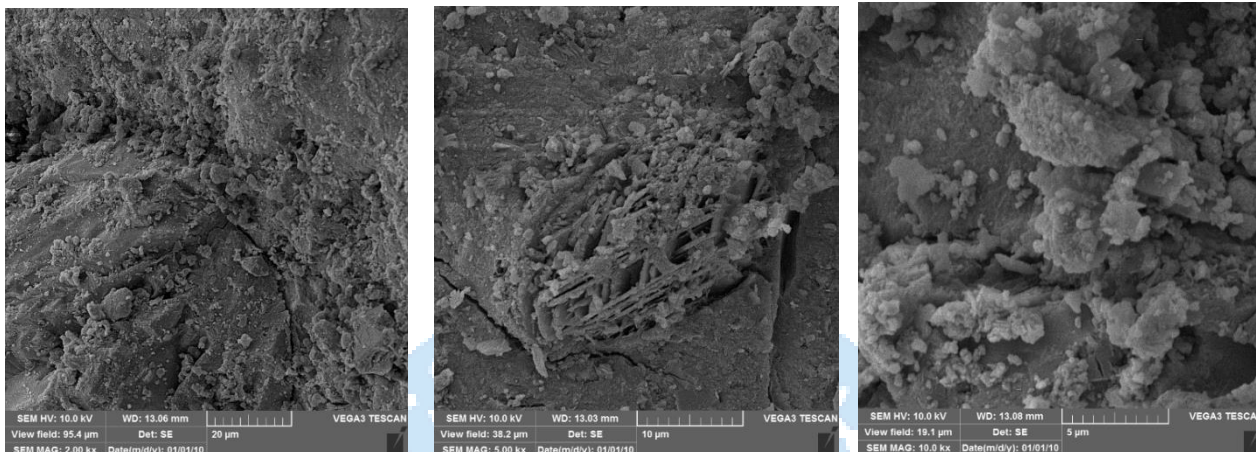
۵- تصاویر میکروسکوپی (SEM)

در شکل های ۶ و ۷، تصاویر ریزساختار میکروسکوپ الکتریکی SEM و همچنین در شکل های ۸ و ۹، به ترتیب آنالیز EDS قبل و بعد از قرارگیری در معرض محیط کلریدی برای نمونه شماره ۱۲ (S10Z5F1) را نشان می‌دهد. این طرح حاوی میکروسیلیس، زئولیت و الیاف فولادی می‌باشد. همانطور که در شکل های پیش از قرارگیری در محیط کلریدی قابل ملاحظه است، ماتریس سیمانی دارای ذرات زیاد واکنش نداده زئولیت می‌باشد که نقش آن را بیشتر بصورت یک پرکننده (filler) نشان می‌دهد. همچنین در بعضی تصاویر شاهد خلل و فرج در بین محصولات هیدراسیون می‌باشیم که این امر میتواند باعث افزایش نفوذپذیری و کاهش دوام شود.

در تصاویر بعد از قرارگیری در محیط کلریدی، مشاهده می‌شود که ترک ها به طور قابل توجهی افزایش یافته‌اند. همانطور که پیشتر بیان شد، وجود خلل و فرج در ساختار اولیه منجر به نفوذ بیشتر یون کلر به داخل خمیره خواهد شد. با رسیدن یون های کلر به الیاف فولادی و خوردگی الیاف، افزایش حجم الیاف باعث تشکیل و گسترش ترک در ریزساختار می‌شود. همچنین با ادامه این روند، کلسیم موجود در ریزساختار که در حالت طبیعی بصورت محصول هیدراسیون در کامپوزیت سیمانی بصورت هیدروکسید کلسیم موجود است، در آب نفوذ کرده در ساختار حل میشود و به مرور از ساختار خارج می‌گردد. این امر افزایش فضاهای خالی و تشدید خوردگی را به همراه خواهد داشت. کاهش قابل ملاحظه کلسیم در نتایج EDS پس از قرارگیری در محیط کلریدی با این مسئله قابل توجیه است.

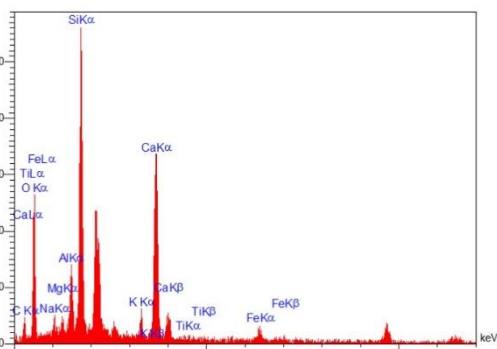
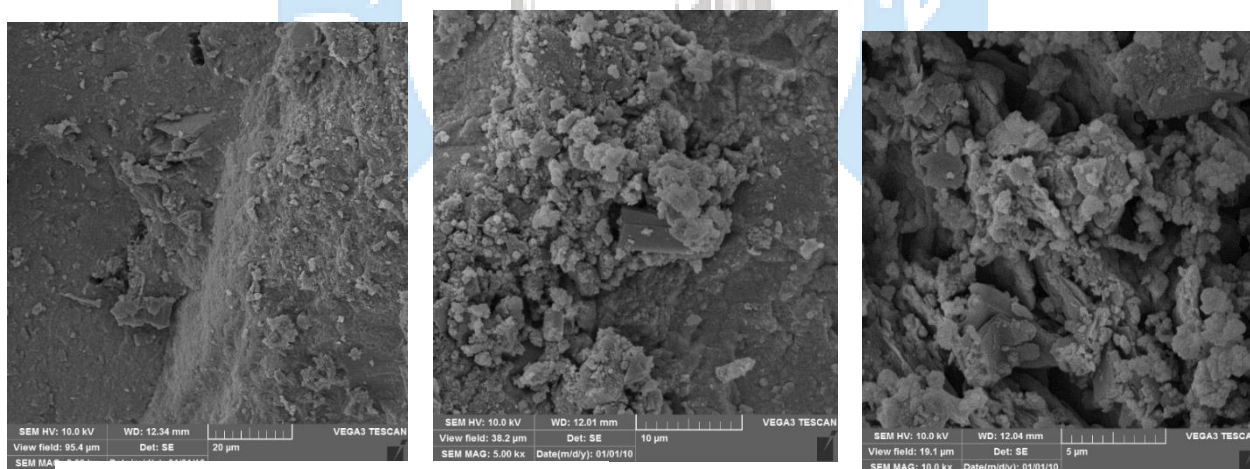
حضور پوزولان‌های زئولیت طبیعی و میکروسیلیس در بتن موجب می‌گردد تا ساختار ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده متراکم‌تر گردد و محصولات سیمانی بیشتری سنگدانه‌ها را در بر گیرند. بنحویکه میزان حفرات در ساختار بتن به وسیله پل زدن ریزساختار بتن کاهش می‌یابد و محصولات تخریبی کمتری شکل می‌گیرد و با ایجاد یک ساختار توپر مقاومت بتن در محیط‌های کلریدی افزایش می‌یابد. همانطور که از تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشاهده میگردد حضور پوزولان‌ها در بتن با افزایش فازهای کریستالی فعال موجب می‌گردد که فعالیت شیمیایی هیدراتاسیون سیمان افزایش یابد. در نتیجه میزان چسبندگی بین خمیر سیمان و الیاف‌های فولادی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر در حضور پوزولان‌های زئولیت طبیعی و میکروسیلیس در بتن از میزان کلسیم هیدروکسید تولیدی در فرایند هیدراتاسیون سیمان کاسته شده و بر میزان ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده افزوده می‌شود. بنابراین مقدار ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده در

ساختار سیمان افزایش می‌یابد. برای نمونه شاهد حضور کریستال‌های فعال نشده موجب می‌گردد که فضای خالی بیشتری در میان ذرات سیمان ایجاد گردد. این موضوع سبب می‌شود که واکنش شیمیایی سیمان به اندازه کافی فعال نشده و مقاومت مکانیکی مورد انتظار بتن حاصل نگردد. تغییر مورفولوژی در مورد پوزولان‌ها حاکی از عملکرد آن‌ها در کاهش تمرکز کلراید در ترکیبات سیمانی و جلوگیری از توسعه روند تولید محصولات تخریبی در بتن می‌گردد. لذا خلل و فرج به وسیله تولیدات هیدراتاسیون پر شده و محصولات خوردگی مانند اترینگایت و گچ کمتری ایجاد می‌گردد.

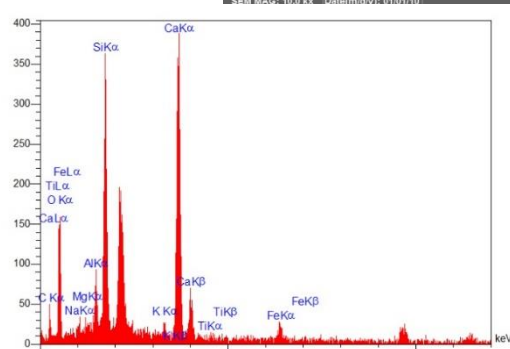


شکل ۶: تصاویر میکروسکوپی نمونه در شرایط عادی

شکل ۷: تصاویر میکروسکوپی نمونه در شرایط کلریدی



شکل ۹: آنالیز EDS نمونه در شرایط کلریدی



شکل ۸: آنالیز EDS نمونه در شرایط عادی

۶- نتیجه گیری

برای کاهش انتشار دی اکسید کربن، استفاده از سیمان را می توان با جایگزینی جزئی با مواد پوزولانی یا ضایعات صنعتی مانند زئولیت، متاکائولین، دوده سیلیس و خاکستر بادی به حداقل رساند. این مواد به علت ریز ساختار بودنشان با پرکردن منافذ، دوام و استحکام بتن را بهبود می بخشد و تخلخل و نفوذپذیری بتن را بدون لطمه به خواص مورد نظر کاهش می دهد همچنین وجود الیاف فولادی باعث بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی بتن میگردد. با بررسی های انجام گرفته میتوان به طور کلی نتایج را به موارد زیر خلاصه کرد :

۱) نمونه های مختلف در شرایط عادی و کلریدی در اثر اضافه نمودن پوزولان های زئولیت و میکروسیلیس با و بدون الیاف فولادی همواره افزایش مقاومت فشاری را تجربه کردند. قرار گیری در محیط کلریدی به طور متوسط باعث کاهش مقاومت فشاری تا ۱۳/۴٪ نسبت به محیط عادی شد.

۲) عمدتاً مقاومت کششی نمونه ها نسبت به نمونه شاهد بیشتر بود (به جز نمونه های ۲۸ روزه حاوی پوزولان فاقد الیاف)، اما با قرار گیری در محیط کلریدی به طور متوسط شاهد کاهش ۳۹/۷۲ درصدی مقاومت نمونه ها نسبت به نمونه شاهد در محیط عادی بودیم.

۳) با توجه به نتایج همواره با افزایش درصد پوزولان ها شاهد افزایش مقاومت الکتریکی هستیم اما به طور کلی بعد از قرار گیری در محیط کلریدی از میزان مقاومت به اندازه ۷۶/۲ درصد به طور متوسط نسبت به محیط عادی کاسته شد.

۴) افزودن پوزولانها با هر نسبتی به نمونه های حاوی الیاف، منجر به کاهش ضریب نفوذ یون کلر شد این کاهش بین ۳۹ تا ۷۴ درصد در شرایط عادی و بین ۲۴ تا ۵۰ درصد در شرایط کلریدی بود. البته این ضریب در نمونه حاوی الیاف تنها، نسبت به نمونه شاهد بیشتر بود.

۵) قرار گیری نمونه ها در محیط کلریدی باعث افزایش جذب آب نمونه ها نسبت به نمونه شاهد در محیط عادی شد، این افزایش به طور میانگین برابر با ۷۳/۶ درصد بود. با مقایسه نمونه ها در محیط یکسان ما شاهد کاهش جذب آب، نسبت به نمونه شاهد در محیط یکسان هستیم.

۶) با بررسی درصد متفاوت میکروسیلیس و ثابت نگاه داشتن درصد زئولیت، بعنوان یک نتیجه کلی می توان گفت که درصد میکروسیلیس تأثیر ناچیزی بر مقاومت فشاری دارد. این در حالی است که در مورد مقاومت کششی افزودن مقدار میکروسیلیس از ۵ به ۱۰ درصد منجر به تغییر مقاومت کششی تا ۱۱/۳ شده است.

۷) با توجه به نتایج بدست آمده تقریباً می توان گفت درصد مطلوب زئولیت در محیط های کلریدی برابر ۱۰ درصد و در محیط های عادی ۱۵ درصد می باشد که بوسیله آن می توان به نتایج مطلوبی در بحث دوام بتن دست یافت.

مراجع

- [1] ASTM C618. (2023) Edition. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International.
- [2] Hamada, M Hussein. Abed, Farid. Herda Yati Binti Katman, Humada, M Ali. Al Jawahery, Mohammed S. Majdi, Ali. Salim T. Yousif, Blessen Skariah Thomas. (2023). Effect of silica fume on the properties of sustainable cement concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 24, Pages 8887-8908, ISSN 2238-7854,
- [3] Basha, Syed Afzal. Vinod, Kumar A. Tej, S. Akhil. Babu, C.G. Mohan. (2023). Evaluation of zeolite as supplementary cementing material. *Materials Today: Proceedings*, ISSN 2214-7853,
- [4] Geetha, S. Lakshmi, S. Muthu. Aarathi, L. Deepak, S. Marshal, T. (2023). Study on properties of recycled aggregate concrete with zeolite. *Materials Today: Proceedings*, Volume 80, Part 2, Pages 1585-1590, ISSN 2214-7853,
- [5] Hosseinzadeh, Haniyeh. Salehi, Amir Masoud. Mehraein, Mojtaba. Asadollahfardi, Gholamreza. (2023). The effects of steel, polypropylene, and high-performance macro polypropylene fibers on mechanical properties and durability of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 386, 131589 ISSN 0950-0618,
- [6] Alsaif, Abdulaziz. Alharbi, Yousef R. (2022). Strength, durability and shrinkage behaviours of steel fiber reinforced rubberized concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 345, 128295, ISSN 0950-0618,
- [7] Su, Peifeng. Li, Miaomiao. Dai, Qingli. Wang, Jiaqing. (2023). Mechanical and durability performance of concrete with recycled tire steel fibers. *Construction and Building Materials*, Volume 394, 132287, ISSN 0950-0618,
- [8] Dabbaghi, Farshad. Sadeghi-Nik, Aref. Nicolas Ali Libre, Nasrollahpour, Sepideh. (2021). Characterizing fiber reinforced concrete incorporating zeolite and metakaolin as natural pozzolans. *Structures*, Volume 34, Pages 2617-2627, ISSN 2352-0124,
- [9] Madhuri, P.V. Kameswara, Rao B. Chaitanya, A. (2021). Improved performance of concrete incorporated with natural zeolite powder as supplementary cementitious material. *Materials Today: Proceedings*, Volume 47, Part 15, Pages 5369-5378, ISSN 2214-7853,
- [10] Iswarya, Gowram. Beulah, M. (2021). Use of zeolite and industrial waste materials in high strength concrete – A review. *Materials Today: Proceedings*, Volume 46, Part 1, Pages 116-123, ISSN 2214-7853,
- [11] Tayeh, Bassam A. Al Saffar, Doha M. Alyousef, Rayed. (2020). The Utilization of Recycled Aggregate in High Performance Concrete. A Review, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 9, Issue 4, Pages 8469-8481, ISSN 2238-7854,
- [12] Pachideh, G. and Gholhaki, M. (2020). An experimental study on the performance of fine-grained concrete incorporating recycled steel spring exposed to acidic conditions. *Advances in Structural Engineering*. 23 (11), 2458-2470.
- [13] Pachideh, G. and Gholhaki, M. (2020). Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag. *Journal of Structural Fire Engineering* Vol. 11 No. 2, 221-246.
- [14] Pachideh, G. and Gholhaki, M. Moshtagh, A. (2019). On the post-heat performance of cement mortar containing silica fume or Granulated Blast- Furnace Slag. *Journal of Building Engineering* 24, 100757.
- [15] Pachideh, G. and Gholhaki, M. (2019). An Experimental Study on the Effects of Adding Steel and Polypropylene Fibers to Concrete on Its Resistance after Different Temperatures. *Journal of Testing and Evaluation* 47 (2), 1606-1620, ISSN 0090-3973.

- [16] Naseroleslami, R. Nemat, M. (2019). The effects of calcium stearate on mechanical and durability aspects of self-consolidating concretes incorporating silica fume/natural zeolite. *Construction and Building Materials*, Volume 225 ,Pages 384-400 ,ISSN 0950-0618,
- [17] Tran, Yen Thi. Lee, Jechan. Kumar, Pawan. Kim, Ki-Hyun. Lee, Sang Soo. (2019). Natural zeolite and its application in concrete composite production. *Composites Part B: Engineering*, Volume 165, Pages 354-364, ISSN 1359-8368,
- [18] Samimi, Kianoosh. Kamali, Bernard Siham. Maghsoudi, Ali Akbar. (2018). Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment, *Construction and Building Materials*, Volume 165, Pages 247-263, ISSN 0950-0618 ,
- [19] Barari, Sajjad. Abbasi, Shahab. Mahdavi, Adeli Mahdi. Cheini, Mehdi. (2018). Laboratory Study of Factors Affecting the Mechanical Properties and Durability of High Performance Concrete with the Economic Approach. *MCEJ*; 18 (3) :37-47
- [20] Markiv, Taras. Sobol, Khrystyna. Franus, Małgorzata. Franus, W ojciech. (2016). Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Volume 16, Issue 4, Pages 554-562, ISSN 1644-9665,
- [21] Eskandari, H. Vaghefi, M. Kowsari, K, (2015). Investigation of Mechanical and Durability Properties of Concrete Influenced by Hybrid Nano Silica and Micro Zeolite, *Procedia Materials Science*, Volume 11, Pages 594-599, ISSN 2211-8128,
- [22] Valipour, Mahdi. Pargar, Farhad. Shekarchi, Mohammad. Khani, Sara, (2013). Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete. A laboratory study, *Construction and Building Materials*, Volume 41, Pages 879-888, ISSN 0950-0618,
- [23] Najimi, Meysam. Sobhani, Jafar. Ahmadi, Babak. Shekarchi, Mohammad, (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan, *Construction and Building Materials*, Volume 35. Pages 1023-1033, ISSN 0950-0618,
- [24] BS EN 12390-3. (2019). Testing hardened concrete Compressive strength of test specimens.
- [25] ASTM C1760. (2012). Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete. ASTM International
- [26] ASTM Standard. (2004). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, ASTM Standard C496, ASTM International, West Conshohocken.
- [27] NT BUILD 492. (1999). Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from non Steady State Migration Experiments. NORDTEST Method
- [28] ASTM C1202. (2022) Edition. Standard Test Method for Electrical indication of concrete's ability to resist choloride ion penetration. ASTM International.
- [29] ASTM C33. (2007). Standard specification for concrete aggregates. ASTM International.