

بررسی عملکرد ترکیب مواد سیمانی بر خواص مکانیکی و دوام در برابر اثر توأمان ذوب و یخ و نمک یخ‌زدا برای بهره‌برداری زودهنگام روسازی‌های بتنی

عارف ابراهیمی بشلی^۱، کیانوش صمیمی^{۲*}، فریدون مقدس نژاد^۳، احسان درویشان^۴

۱- دانش آموخته دکتری عمران، دانشگاه آزاد اسلامی رودهن، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران

۲- استادیار دانشگاه شهید بهشتی تهران، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست

۳- استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست

۴- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی رودهن، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران

k_samimi@sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۶

چکیده

یکی از اهداف متولیان راه، بهره‌برداری به‌موقع و سریع از فرودگاه‌ها و آزادراه‌ها است که در روسازی بتنی این امر به دلیل رفتار متفاوت آن با روسازی آسفالتی در مراحل اولیه اجرا، یکی از چالش‌های مهم است. در این پژوهش با هدف بهبود خواص مکانیکی و دوام در برابر اثر باهم پدیده ذوب و یخ و نمک‌زدایی سطحی به ویژه در سنین اولیه برای رفع مشکل عدم امکان بهره‌برداری زودهنگام از روسازی‌های بتنی به کمک اثر ترکیب مواد سیمانی مختلف از جمله آهک هیدراته، متاکائولن و ژئولیت پرداخته شده است. در این راستا، مطالعات ریزساختاری هم با استفاده از آنالیز XRD و SEM به صورت مقایسه‌ای در دو شرایط عمل‌آوری آب و قرار گرفتن در معرض چرخه ذوب و یخ انجام شده است. که جایگزینی سیمان با ژئولیت و متاکائولن در بتن آهکی منجر به کاهش تخلخل و تراکم یکپارچه با تشکیل CSH در ساختار بتن شد. بر همین اساس بهبود خواص مکانیکی و دوام روسازی‌های بتنی در برابر تأثیر باهم ذوب و انجماد و یخ‌زدایی با نمک بر اساس چهار طرح اختلاط شامل بتن شاهد (CC) و سه نمونه دیگر حاوی ۱۵٪ آهک (CL)، ۱۵٪ آهک و ۱۵٪ متاکائولن (CLM) و ۱۵٪ آهک و ۱۵٪ ژئولیت (CLZ) مورد آزمایش و تجزیه و تحلیل قرار گرفت که مشخص شد به ترتیب نمونه CL، CLM و CLZ نسبت به نمونه شاهد، افزایش مقاومت فشاری در سنین اولیه داشته‌اند به‌گونه‌ای که در تست ۷ روزه به ترتیب باعث افزایش مقاومت فشاری به میزان ۲۰، ۳۲ و ۴۸ درصد شده است.

که در طول آزمایش هم این افزایش ادامه یافت. در آزمایش چرخه ذوب و یخ پس از طی ۵۵ سیکل، مخلوط های CLM و CLZ همواره میزان تخریب کمتری نسبت به نمونه شاهد از خود نشان دادند. به گونه ای که در پایان آزمایش، در صد کاهش وزن به ترتیب ۴۸٫۷٪ و ۷۵٫۲٪ کمتر از نمونه شاهد بوده است. علاوه بر این بر اساس نتایج آزمایش جذب مویینگی آب مشخص شد نمونه های CLM و CLZ در سنین اولیه نفوذپذیری کمتری نسبت به مخلوط CC داشته و این رفتار در سنین بالاتر نیز با عملکرد مناسبتی ادامه یافته است. همچنین نتایج حاصل از مقاومت خمشی بیانگر تأثیر مثبت افزودنی ها در تمامی نمونه ها با گذشت زمان، بر روند افزایش مقاومت خمشی است به گونه ای که به ترتیب برای نمونه CL، CLM و CLZ نسبت به نمونه شاهد، افزایش مقاومت خمشی در ۲۸ روزه به میزان ۳۹، ۴۲ و ۵۷ در صد بوده است. تأثیر مثبت آهک هیدراته به دلیل خاصیت خمیری بالا در افزایش مقاومت خمشی مخلوط های حاوی متاکائولن و زئولیت کاملاً مشهود است و موجب افزایش ویژگی های مکانیکی در تمامی سنین نمونه ها شده است، ولی باعث ضعف در عملکرد دوام نسبت به نمونه شاهد گردید. این موضوع در مخلوط های کامپوزیتی حاوی آهک با متاکائولن یا زئولیت رفع گردیده و نتایج آزمایش های دوام بیانگر بهبود قابل ملاحظه هر دو پوزولان به خصوص در زئولیت می باشد، لذا بر اساس نتایج این پژوهش می توان گفت با بهبود خواص مکانیکی و دوامی مخلوط های CLM و CLZ، استفاده از افزودنی متاکائولن یا زئولیت در بتن حاوی آهک هیدراته راه حلی مناسب برای رفع چالش عدم امکان بهره برداری زودهنگام در روسازی بتنی است.

واژگان کلیدی: دوام، ذوب و یخ، ریزساختار، زئولیت، متاکائولن، آهک هیدراته

۱- مقدمه

یکی از موضوعات مهم در طراحی و ساخت روسازی های بتنی، عمر سرویس دهی آن هاست. شرایط محیطی و کیفیت بتن از پارامتر های تأثیر گذار در میزان عمر سرویس دهی این نوع روسازی ها می باشد [1]. استفاده از روسازی بتنی به دلیل فراوانی مصالح بکار رفته و سازگاری بهتر با محیط زیست در مقایسه با آسفالت می تواند منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه ای گردد و به طور کلی این نوع روسازی می تواند جایگزین مناسبی برای روسازی های آسفالتی به شمار آید [2]

از طرف دیگر، روسازی بتنی از معایب نظیر ترک و شکستگی رنج می برد و از این رو همواره بهبود دوام آن مورد توجه مهندسان بوده است. جمع شدگی و انبساط ناشی از پدیده ذوب و یخ که موجب ترک و تخریب سطح می شود یکی از عوامل اصلی نابودی روسازی بتنی است. از آنجا که کنترل و کاهش ترک در روسازی ها یک اصل بسیار حیاتی است، تحقیق در مورد آثار مخرب سیکل های یخ بندان و انجماد زدایی در روسازی بتن سودمند و پراهمیت است.

روش های مختلفی برای افزایش دوام و استحکام روسازی ها در برابر پدیده ذوب و یخ وجود دارد. یکی از روش های کاربردی و معمول در جاده ها برای جلوگیری از ایجاد لایه های یخ، پاشش

نمک های یخ زدا است. این نمک های یخ زدا با عملکرد یونی سبب کاندی شدن سطوح شده و طبعاً عمل یخ زدگی رو سازی را از بین برده و یا به تأخیر می اندازد. ولی این روش دارای معایبی است که علاوه بر مشکلات زیست محیطی باعث نفوذ یون های کلرید آزاد از طریق حفرات موئینگی و در نهایت خوردگی روسازی ها می شوند [3-5]. از آنجا که آهک در بتن، به عنوان پرکننده حفره ها موجب کاهش تخلخل می شود و میزان نیاز آب را کاهش می دهد، می توان از آن در بهبود کارایی و مقاومت بتن استفاده نمود [6]. آهک هیدراته به عنوان یک افزودنی به منظور افزایش مقاومت مخلوط بتن و یا مخلوط های آسفالتی در روسازی راه مورد استفاده قرار می گیرد که جایگزینی بهینه ۳۰٪- ۱۵٪ از آن می تواند منجر به بهبود برخی از خواص دوام روسازی صلب بتنی شود [7]. از آنجا که به کارگیری منابع جایگزین سیمان در تولید بتن حائز اهمیت است، استفاده از پوزولان ها به دلیل مزایایی همچون صرفه اقتصادی، بالا بردن مقاومت و جلوگیری از ترک خوردن سطحی گسترده بتن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان معرفی شده است [8]. دو پوزولان متاکائولن و زئولیت به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بدلیل کاهش ساختار ناهمگن بتن، محصول پوزولانیک پایدار و ریزساختار متراکم برای بهبود دوام سازه های بتنی به صنعت ساخت معرفی شده اند. به لحاظ

اساس تأثیر باهم ذوب و انجماد و یخزدایی با نمک، ترکیب کامپوزیتی پوزولان و آهک هیدراته جایگزین سیمان مورد بررسی قرار گرفت.

در این پژوهش برای بررسی دقیق‌تر تأثیر آهک و پوزولان‌های مختلف در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن، چهار مخلوط شامل نمونه کنترل (CC)، نمونه حاوی ۱۵ درصد آهک هیدراته جایگزین سیمان (CL)، نمونه حاوی ۱۵ درصد آهک هیدراته و ۱۵ درصد متاکائولن جایگزین سیمان (CLM) و نمونه حاوی ۱۵ درصد آهک هیدراته و ۱۵ درصد زئولیت جایگزین سیمان (CLZ) مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای ساخت نمونه‌ها از طرح اختلاط با نسبت ثابت آب به مواد سیمانی برابر با ۰/۴ و نسبت شن به ماسه برابر با ۰/۸۲ استفاده شده است که طرح اختلاط متداول است. سیمان مصرفی از نوع II تهران، آب از نوع آشامیدنی و افزودنی‌ها شامل آهک هیدراته و پوزولان متاکائولن از تهران و زئولیت از سمنان (مرکز ایران) است. ۴ نوع نمونه بتنی، شامل بتن شاهد بدون افزودنی (CC)، نمونه بتنی آهک هیدراته (CL)، نمونه بتنی با آهک هیدراته و پوزولان زئولیت (CLZ) و متاکائولن (CLM) هر کدام به مقدار ۱۵٪ به عنوان جایگزین سیمان ساخته شد که مصالح مصرفی آن سنگ‌دانه‌های شکسته شده با ابعاد ۶-۱۲ میلی متر به عنوان شن نخودی، سنگ‌دانه‌ها با ابعاد ۱۹-۱۲ میلی متر به عنوان شن بادامی و دانه‌های ریز طبیعی با حداکثر اندازه ۶ میلی متر به عنوان ماسه است. در کلیه نمونه‌ها از افزودنی کاهنده قوی آب به عنوان فوق روان کننده با چگالی 1.311 g/cm^3 بر پایه زنجیره‌های اصلاح‌شده پلی کربوکسیلات اتر (PS10) استفاده شده است. درصد میزان مصرف فوق روان کننده به گونه‌ای انتخاب شد که اسلامپ بتن تازه ۷ cm به دست آید. علاوه بر این برای افزایش روانی و مقاومت بالا در برابر پدیده ذوب و یخ به مقدار ۰/۱ هوازا در کلیه طرح اختلاط‌ها استفاده شد.

اهمیت این دو نوع پوزولان در رفتارهای بتن و از طرفی تخریب قابل توجه بتن متأثر از پدیده ذوب و یخ و نفوذ یون کلرید ناشی از عملیات یخ‌زدایی روسازی‌های بتنی، پژوهش ارائه‌شده به موارد مذکور اختصاص یافته است.

بابک احمدی و همکاران (۲۰۱۳)، در پژوهشی نشان دادند افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی ۱۰٪ زئولیت در مقایسه با بتن بدون پوزولان از سن ۲۸ روز به بعد اتفاق می‌افتد [9]. Vejmeková و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقی دریافتند مقدار بیشینه جایگزینی زئولیت برای بهبود خواص مکانیکی و مقاومت در برابر ذوب و یخ ۲۰٪ است و در این صورت مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن حاوی زئولیت پس از ۲۸ روز، با افزایش این مقدار زئولیت کاهش می‌یابد. [10]. منطبق با پژوهش Girska و Skripkiunas (۲۰۱۷) جایگزینی ۱۰٪ وزنی سیمان با افزودن زئولیت منجر به افزایش مقاومت در برابر چرخه ذوب و یخ در بتن می‌شود. اتلاف جرم پس از ۲۸ سیکل ذوب و یخ در نمونه‌های حاوی زئولیت، ۱/۶ برابر در نمونه‌های بدون هوا و ۳/۵ برابر در مخلوط‌های با هوا کاهش نشان داد [11]. Zheng و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از زئولیت طبیعی کلسینه شده دوام بتن را بهبود بخشیدند، ضمن اینکه گزارش کردند که مقاومت در برابر یخ‌زدگی بتن حاوی زئولیت بعد از ۱۵۰ سیکل بهتر است [12].

Dinakar و همکاران (۲۰۱۳) متاکائولن را به عنوان یک ماده پوزولانی با عملکرد مطلوب برای تولید بتن با دوام و افزایش مقاومت فشاری بیش از ۱۰ Mpa با جایگزینی ۱۰٪ متاکائولن را بهینه اعلام کردند، که با توجه به خواص پرکننده آن تراکم بتن بهبود یافته و نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد [13]. با توجه باینکه تأثیر ذوب و یخ روی بتن‌های حاوی دو پوزولان متاکائولن و زئولیت در تحقیقات گذشته انجام و به اختصار در مقدمه اشاره شد و از طرفی هدف این پژوهش بر این است که با بالا بردن خواص مکانیکی و دوام روسازی‌های بتنی از طریق ترکیب آهک با مواد پوزولانی مختلف، بتوان یک راهکار مناسب برای کاهش میزان تخریب ناشی از دو اثر همزمان پدیده ذوب و یخ را ارائه نمود. حسب بررسی ما تاکنون تحقیق مشابه یافت نشد. بر این

طرح اختلاط مخلوط‌های بتن در جدول شماره (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. طرح اختلاط مخلوط‌های بتن (kg/m^3)

Mix name	Water (W)	Cement (C)	Lime	Metakaolin	Zeolite	Superplasticizer	Air	W/C	Gravel (6-12)	Gravel (12-19)	Sand (0-6)
CC	168	420	0	0	0	2.29	0.420	0.4	270	540	990
CL	168	357	63	0	0	3	0.420	0.4	270	540	990
CLM	168	294	63	63	0	4.57	0.420	0.4	270	540	990
CLZ	168	294	63	0	63	7.14	0.420	0.4	270	540	990

Table 1. Mix design of concrete mixtures (kg/m^3)

۱-۲ آزمایش‌ها

۱-۱-۲ مقاومت فشاری

از نمونه‌های مکعبی با ابعاد $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ برای تعیین مقاومت فشاری کلیه نمونه‌ها مطابق با استاندارد EN12390-2 [14] استفاده شد و آزمایش در سنین مختلف ۳۶۵، ۱۸۰، ۱۳۷، ۱۴۲، ۲۸، ۵۶، ۹۰ روز صورت گرفت. میانگین مقاومت سه نمونه به عنوان مقاومت فشاری نمونه‌ها در نظر گرفته شد.

۲-۱-۲ مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی بر روی تیر ساده با ابعاد $60 \times 150 \times 150\text{mm}$ با بارگذاری نقطه‌ای در نقاط یک سوم دهانه بر اساس استاندارد ASTM C78 [15] در سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام گرفت. در سیستم بارگذاری، بارهای اعمالی بین ۳ تا ۶ درصد بار نهایی محاسبه شده و سرعت بارگذاری در حدود ۰٫۹ تا ۱٫۲ لحاظ شد.

۳-۱-۲ آنالیز XRD

برای تجزیه و تحلیل ساختار کریستال، اندازه کریستال، درجه بلورینگی مواد سیمانی در شرایطی همچون ذوب و یخ از دستگاه ایکس آر دی استفاده شد. تجزیه و تحلیل XRD با استفاده از پراش سنج اشعه ایکس Bruker D8 با تابش تک‌رنگ $\text{Ca K}\alpha$ (40 kV , $15.406\text{ \AA}$) در عملیاتی در ۴۰

کیلوولت و ۳۰ میلی‌آمپر و یک آشکارساز خطی سریع روی مواد مختلف پودر انجام شد.

۲-۱-۴ آنالیز SEM

مشاهدات میکروسکوپی اسکن الکترونی توسط طیف‌سنجی اشعه X روی پوزولان‌ها توسط آشکارسازهای SE, BSE در بزرگنمایی‌های مختلف توسط میکروسکوپ FEI ESEM QUANTA 200 انجام گرفت. قبل از تصویرگیری، نمونه‌ها در حمام الکترولیت، استون یا آب توسط دستگاه اولتراسونیک مارک Elma به مدت ۲۰ دقیقه شستشو شدند و برای رسانایی سطحی از پوشش طلا استفاده شد که به روش PVD در دستگاه COXEM انجام شد.

۲-۱-۵ جذب آب موئینه

این آزمایش منطبق با استاندارد ASTM C1585 [16]، روی سه قطعه استوانه‌ای به ابعاد 50×100 میلی‌متر برای هر طرح مخلوط صورت گرفت. ضریب جذب موئینگی (S) بعد از ۲۴ ساعت برای هر طرح مخلوط در سنین مختلف همچون ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰، ۱۸۰، ۳۶۵ روز اندازه‌گیری شد.

۲-۱-۶ ذوب و یخ به همراه یخ‌زدایی با نمک

این آزمایش مطابق با بند ۳ استاندارد INSO 17041 و منطبق بر استاندارد ASTM C672 [17] است که پس از عمل‌آوری کامل نمونه‌ها در سن ۵۶ روز در دستگاه شبیه‌ساز محیطی طبق

دیده شد که این افزایش مقاومت می‌تواند به دلیل واکنش‌های پوزولانی از یک طرف و از طرف دیگر به واسطه تسریع شدن اثر هیدراتاسیون به کمک اثر هسته سازی پوزولان‌ها و کاهش تخلخل مربوط باشد. همچنین مقدار مقاومت فشاری در سنین اولیه خواص کند بودن هیدراتاسیون در ماتریس‌های سیمانی حاوی پوزولان‌ها را تأیید می‌کند.

نتیجه این مطالعه در به‌کارگیری ژئولیت، افزایش مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی بوده است که با نتایج مطالعه احمدی و همکارانش [9] در بررسی تأثیر جایگزینی سیمان با درصد-هایی از ژئولیت و میکروسلیس، بر روی مقاومت بتن هماهنگی داشته است. همچنین نتایج این پژوهش در به‌کارگیری متاکائولن برای بهبود خواص مکانیکی مخلوط‌های بتنی مشابه مطالعه‌ای بوده است که بالاترین میزان مقاومت فشاری با جایگزینی ۱۵٪ متاکائولن به‌جای سیمان گزارش شده است.

۳-۲ مقاومت خمشی

از آنجایی که مقاومت خمشی (مدول گسیختگی) به دلیل آنکه قابلیت شکل‌پذیری، جذب انرژی و شرایط بحرانی بارگذاری روسازی در زمان بهره‌برداری را نشان می‌دهد، به عنوان عامل بسیار ویژه و ضروری در طراحی روسازی بتنی به شمار می‌آید. مقاومت خمشی بتن بستگی به نسبت‌های اختلاط، اندازه و مقدار سنگ درشت‌دانه دارد که البته در تمامی نمونه‌های این پارامترها یکسان است. نتایج این آزمایش مطابق شکل (۲) نشان‌دهنده افزایش مقاومت خمشی نمونه CL در سنین ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب به میزان ۲۸٪ و ۲۵٪ بیشتر از نمونه CC است. این بهبود مقاومت خمشی را می‌توان به واسطه حضور آهک هیدراته با خاصیت نگهداری آب و خمیری بالا و همچنین ایجاد محیط قلیایی بیشتر و تسهیل در واکنش هیدراتاسیون مرتبط دانست.

استاندارد، ۵۵ سیکل انجام شد که پس از اتمام میزان پوسته‌شدن سطح بتن به صورت چشمی اندازه‌گیری شد که در آن اندازه و شکل نمونه‌ها و عکس یا هر کلمه توصیفی از سطح بتن گزارش و ثبت شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌ها در شکل (۱) بر اساس تابعی از لگاریتم روزهای عمل‌آوری، نشان داده شده است که آهک هیدراته موجب افزایش مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف شد، به شکلی که مقاومت فشاری در مخلوط CL در مقایسه با بتن شاهد ۲۰٪، ۲۱٪، ۲۳٪، ۳۵٪، ۲۵٪ و ۲۵٪ بیشتر به ترتیب در سنین ۷، ۱۴، ۲۸، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۵ روز است. این رفتار مثبت آهک در افزایش مقاومت فشاری بتن به ترتیب با افزودن ۱۵٪ متاکائولن و ۱۵٪ ژئولیت نیز چشم‌گیرتر شد. در این راستا نرخ رشد مقاومت فشاری دو نمونه CLZ و CLM در حداقل سنین ۷ تا ۹۰ روز بسیار قابل توجه و به‌طور یکنواخت پیشرفت داشت که برای نمونه CLM از ۳۲ تا ۴۴ درصد و برای نمونه CLZ از ۳۵ تا ۵۵ درصد افزایش رخ داده است و پس از آن با شیب کمتری تا ۳۶۵ روز ادامه یافت. از سن ۷-۳۶۵ روز نمونه حاوی ژئولیت مقاومت بیشتری از نمونه حاوی متاکائولن نشان داد.

مقاومت بیشتر در سنین اولیه در نمونه حاوی متاکائولن نسبت به نمونه حاوی ژئولیت مربوط به تأثیر ریزدانی بر افزایش سرعت هیدراتاسیون و همچنین خاصیت فیلری متاکائولن است. درحالی‌که در سنین بالاتر به دلیل فعالیت پوزولانی بالای ژئولیت ($42/65mg$) در مقایسه با مقدار متناظر در متاکائولن ($37/74mg$)، مخلوط CLZ مقاومت فشاری بیشتری نسبت به مخلوط CLM از خود نشان می‌دهد. به طورکلی با توجه به نمودار شکل (۱)، آثار مثبت افزودن پوزولان بر مقاومت فشاری به تدریج و با افزایش سن نمونه‌ها

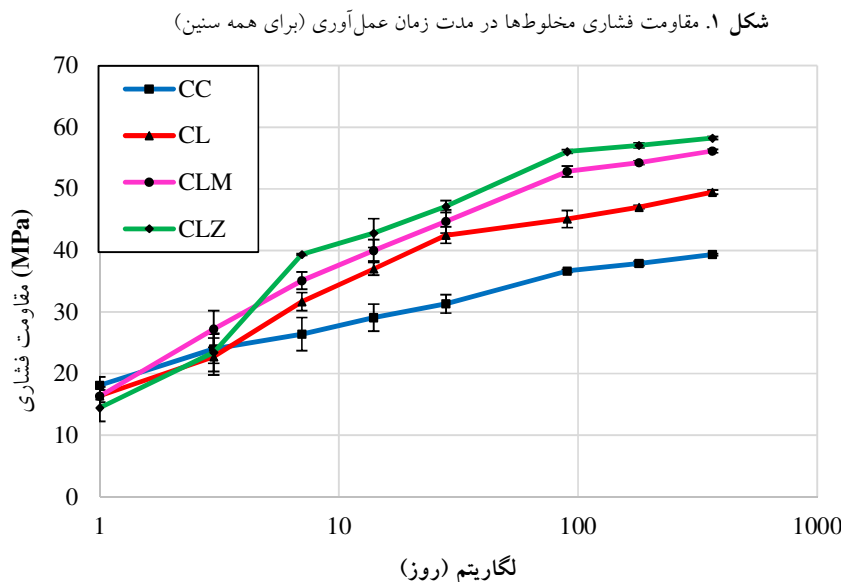


Fig. 1. Evolution of compressive strength of mixtures with curing time.

در مقایسه با CH در افزایش مقاومت بتن مؤثر است، در نتیجه مقاومت خمشی و فشاری بالاتری نسبت به نمونه CLM کسب کرد. بر اساس نتایج ارائه شده مربوط به مقاومت خمشی در این تحقیق، استفاده از مقدار ثابت ۱۵٪ ژئولیت طبیعی کلینوپتیلولیت و ۱۵٪ آهک هیدراته به جای سیمان با گذشت زمان، مقاومت خمشی را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، Karakurt و همکاران [20] با جایگزینی درصدهای مختلف ژئولیت طبیعی کلینوپتیلولیت، با افزایش درصد ژئولیت به تدریج کاهش مقاومت خمشی را دریافتند، این روند کاهش مقاومت خمشی با افزایش درصد ژئولیت را هم Kılınçarslan نیز تأیید کرده است [21]. نتایج ارائه شده در شکل (۲)، تأثیر مثبت آهک هیدراته در افزایش مقاومت خمشی نمونه‌های بتن را نشان داد، که این روند مثبت با استفاده از پوزولان متاکائولن و ژئولیت به مراتب بیشتر خواهد بود.

علاوه بر این، مقاومت خمشی نمونه CLM به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه ۴۲٪ و ۴۰٪ بیشتر از نمونه CC است. در بررسی مقاومت خمشی مخلوط‌های بتنی مورد مطالعه مشخص شد که استفاده از ۱۵٪ متاکائولن و ۱۵٪ آهک هیدراته به جای سیمان، منجر به افزایش ۴۲٪ مقاومت خمشی در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه شاهد می‌شود و این اختلاف در سن ۹۰ روز به ۲۸٪ کاهش یافت. Khan و همکاران [18]. با جایگزینی ۵٪ و ۱۰٪ متاکائولن در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز به بهبود مقاومت خمشی دست یافتند. در این مطالعه، نتایج مربوط به بهبود مقاومت خمشی با استفاده از جایگزینی ۱۵٪ متاکائولن به جای سیمان با نتایج ارائه شده توسط Al-alaily و همکاران [19] در خصوص نقش مثبت متاکائولن در افزایش مقاومت خمشی هماهنگی دارد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۲)، در سن ۲۸ و ۹۰ روز مخلوط CLZ افزایش ۵۸٪ و ۴۱٪ نسبت به نمونه CC و با مقادیر ۴،۵۵ MPa و ۴،۸۶ MPa بیشترین مقاومت خمشی را نسبت به دیگر نمونه‌ها داشتند. این افزایش به دلیل فعالیت پوزولانی ژئولیت در تسریع روند فرآیند تبدیل $\text{Ca}(\text{OH})_2$ به C-S-H پوزولانیک است که به میزان بیشتری

شکل ۲. مقاومت خمشی مخلوط‌ها در دوره عمل‌آوری

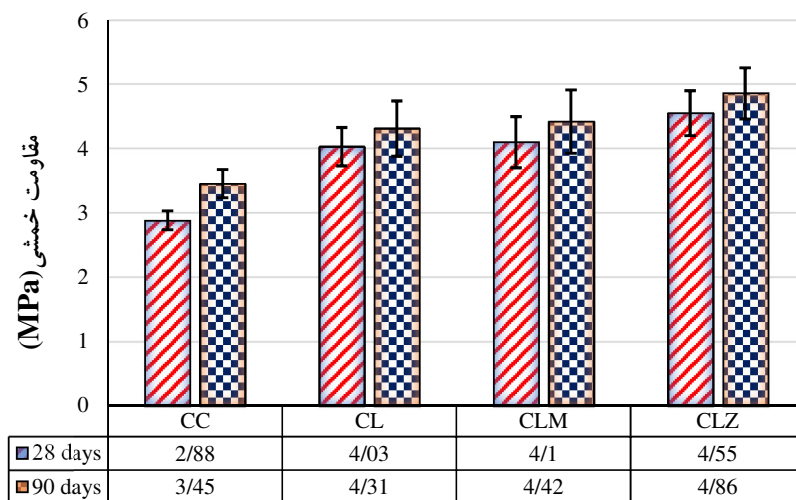


Fig. 2. Evolution of Flexural strength of mixtures with curing time.

کاهش میزان حفرات موئینگی مربوط به ماهیت میکروفیبری متاکائولن و همچنین تولید محصولات پوزولانیک در این بتن است که طبعاً باعث پر شدن حفرات و همچنین انقطاع مسیرهای ارتباطی بین حفرات موئینگی می‌شود.

۳-۴ مقاومت در برابر اثر ترکیبی ذوب و انجماد و یخ‌زدایی با نمک

افت وزنی چهار نمونه مورد مطالعه در طی ۵۵ سیکل ذوب و یخبندان به همراه اثر مخرب نمک یخ‌زدا در شکل (۴) ارائه شده است که نمونه CL تا ۱۰ سیکل اولیه آزمایش، کمترین افت وزنی را در مقایسه با تمام نمونه‌ها به دلیل خاصیت جذب و نگهدارندگی آب توسط آهک از خود نشان داد. ولی بعد از سیکل ۱۵، مقدار افت وزنی آن در مقایسه با دیگر نمونه‌ها، همواره تا آخر آزمایش بیشتر بود. این روند منفی افت وزنی به‌صورت پیوسته افزایشی بوده که تا سیکل ۳۵ و ۴۰ با شدت زیاد و سپس تا انتها به صورت روند ثابت ادامه یافت. میزان افت وزنی نمونه CL، پس از ۵۵ سیکل اثر باهم ذوب و یخبندان و نمک یخ‌زدا ۰.۸٪ بیشتر در مقایسه با مقدار متناظر در نمونه شاهد بود.

۳-۳ جذب موئینگی آب

نتایج مقدار ضریب جذب موئینه بعد از ۲۴ ساعت برای کلیه نمونه‌های مورد مطالعه در سنین ۷، ۲۸، ۹۰، ۱۸۰، ۳۶۵ در شکل (۳) نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۳)، ضریب جذب موئینگی در نمونه CL در تمامی سنین آزمایش، بیشتر از دیگر نمونه‌ها بوده است. به شکلی که این ضریب در نمونه CL به ترتیب ۱۴٪، ۱۴٪، ۱۱٪، ۵٪ و ۷٪ بیشتر از نمونه CC در سنین ۷، ۲۸، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۵ روز است. البته با افزایش سن هیدراتاسیون از سن ۹۰ روز به بعد مقدار جذب موئینگی در این نمونه نزدیک به مقدار متناظر در بتن شاهد است. علت افزایش حفرات موئینگی در نمونه CL می‌تواند مربوط به ترکیبات آهک و در نتیجه تولید مقدار زیاد پورتلاندیت و به دنبال آن تبدیل زود هنگام هیدروکسید کلسیم به هیدرات سیلیکات کلسیم که در نهایت منجر به ایجاد حفرات موئینگی در بین محصولات هیدراتاسیون می‌شود، دانست. در مقابل ضریب جذب موئینگی در نمونه CLM و CLZ در تمامی سنین آزمایش در مقایسه با بتن شاهد کمتر است. به شکلی که در سن ۳۶۵ روز این مقدار ۲۸٪ و ۳۸٪ کمتر از بتن شاهد شد. علت عملکرد مثبت مخلوط‌های حاوی پوزولان

شکل ۳. جذب موئینگی در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

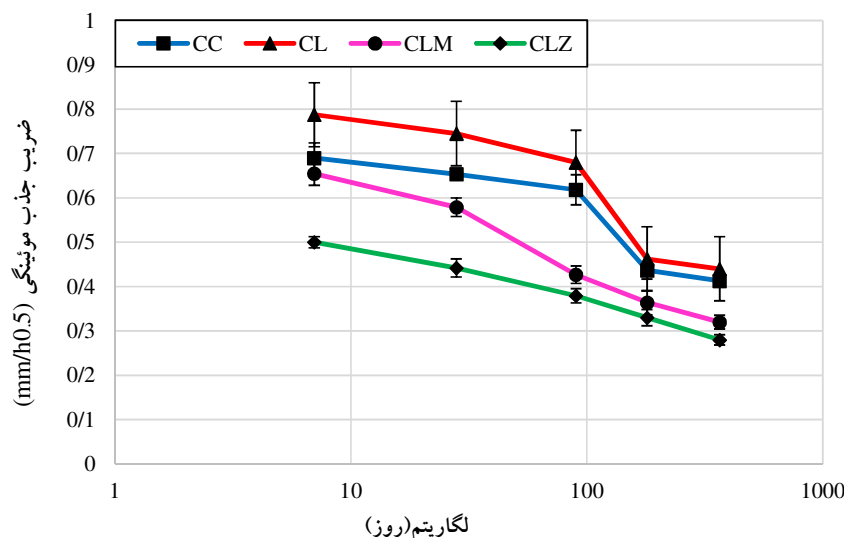


Fig. 3. Capillary absorption at different curing ages (mm/h0.5).

ذوب و یخ ثابت بوده و تغییرات زیادی نداشت. این مخلوط در سیکل ۵۵، ۲، ۷۵٪ کمتر از نمونه شاهد کاهش وزن داشت که کمترین میزان افت وزنی در میان نمونه‌های مورد مطالعه بوده است. نتایج این پژوهش نشان داد افزودن زئولیت با کاهش حفرات قابل نفوذ، بهبود ریزساختار بتن، سبب ممانعت از نفوذ و آسیب پدیده ذوب و یخ در بتن می‌شود. منافذ بسته از عوامل افزایش مقاومت در برابر یخ‌زدگی است و در مقابل منافذ موئینه محل اصلی شکل‌گیری انجماد است که بر اساس نتایج نمونه‌های CLM و CLZ در این دو پارامتر عملکرد خوبی نشان دادند. بر اساس نتایج مطالعات گذشته افزایش حجم ۹ درصدی یخ، و فشار هیدرولیکی در منافذ و ایجاد تنش داخلی از طریق انجماد مکرر از عوامل اصلی نابودی بتن است. کمترین میزان فروپاشی ماتریس بتنی در نمونه‌های CLM و CLZ به وقوع پیوست که این افت وزنی به مراتب در مخلوط CLZ کمتر است. با توجه به نتایج این پژوهش، استفاده از پوزولان زئولیت و متاکائولن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان منجر به بهبود مقاومت بتن در برابر چرخه ذوب و یخ می‌شود.

علت عملکرد ضعیف نمونه CL در این آزمایش می‌تواند به دلیل میزان جذب موئینگی بالای این طرح اختلاط باشد، به طوری که با افزایش میزان جذب آب از طریق حفره‌های موئینه و انبساط آن‌ها در زمان یخ‌زدگی، زمینه تخریب و خوردگی بتن فراهم شد. در نقطه مقابل، نمونه CLM همواره در ۵۵ سیکل آزمایش میزان افت وزنی کمتری در مقایسه با بتن شاهد را نشان داده است. به شکلی که میزان افت وزنی آن در پایان ۵۵ سیکل ۴۸،۷٪ کمتر از بتن شاهد شده است. دلیل آن را می‌توان به هم‌افزایی به‌دست‌آمده بین متاکائولن و ماتریس سیمانی که در نتیجه باعث کاهش نفوذپذیری به ویژه از طریق حفره‌های موئینه با توجه به خاصیت میکروفیلری متاکائولن و به دنبال آن افزایش مقاومت سطحی بتن را به ارمغان می‌آورد، بیان نمود. نتایج این مطالعه در خصوص تأثیر استفاده از متاکائولن در بهبود مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب و یخ و افزایش طول عمر و دوام بتن با مطالعات انجام شده توسط Joshaghani و همکاران (۲۰۱۷) [22] هماهنگی دارد. برحسب شکل (۴)، شیب تغییرات افت وزنی مخلوط CLZ در تمام سیکل‌های

شکل ۴. افت وزنی در هر چرخه از ذوب و یخ برای چهار مخلوط مورد مطالعه

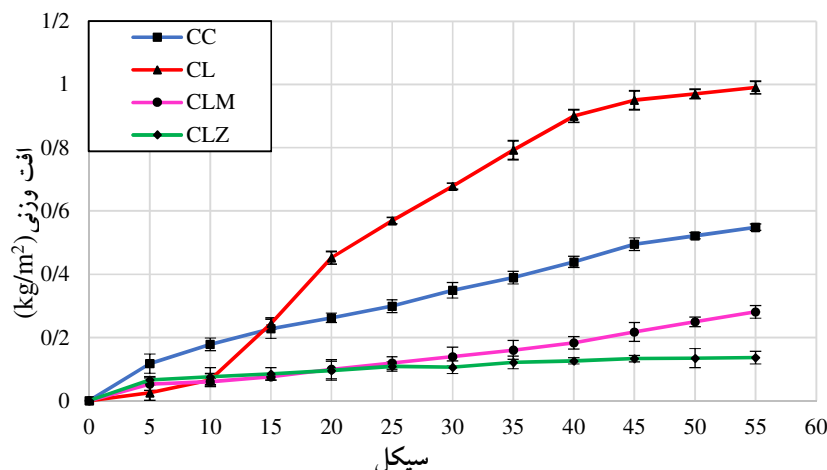


Fig. 4. Weight loss per freeze-thaw cycle for four mixtures studied.

تصاویر SEM از نمونه‌ها پس از چرخه همزمان ذوب و یخ و شرایط نمک‌زدایی، نمونه‌های CLM-TF و CLZ-TF دارای حفره و منافذ کمتری نسبت به CC-TF و CL-TF هستند، که به شکل‌گیری CSH بیشتر در نمونه‌های CLM-TF و CLZ-TF مرتبط است. این نتیجه نشان می‌دهد که جایگزینی سیمان با پوزولان منجر به ساختار متراکم و بهبود مقاومت بتن در چرخه‌های همزمان ذوب و یخ و یخ‌زدایی با نمک می‌شود. تجزیه و تحلیل EDX از نمونه‌های مختلف در شرایط عمل آوری در آب و در معرض چرخه انجماد و یخ‌زدایی با نمک نشان می‌دهد، نسبت Ca / Si در CLM و CLZ در شرایط عمل آوری آب کمتر از CC و CL بود. در CLM و CLZ قله‌های Si بیشتری مشاهده می‌شود که به واکنش پوزولانی و خواص ذاتی متاکائولن و زئولیت نسبت داده می‌شود. علاوه بر این، قله‌های Ca در CL و CC مشاهده می‌شود که به دلیل وجود $Ca(OH)_2$ در این مخلوط‌ها است. با این حال، نسبت Ca / Si از CC-TF و CL-TF نسبت به CLM-TF و CLZ-TF به طور قابل توجهی کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که در انجماد و یخ‌زدایی با نمک یون کلسیم از بتن خارج می‌شود. در مقابل، جایگزینی متاکائولن و زئولیت به دلیل فعالیت پوزولانی و واکنش هیدراتاسیون بالا CSH

۳-۵ آنالیز کانیه شناسی و ریز ساختار

شکل (۵) آنالیز XRD نمونه‌ها در شرایط کنترل و قرار گرفتن در معرض چرخه ذوب و یخ (TF) را نشان می‌دهد که نتایج نشان می‌دهد شدت پیک ترکیبات مربوط به مخلوط‌های پوزولانی به‌طور معنی‌داری تغییر نکرده است. علاوه بر این، شدت CH کاهش می‌یابد و فاز کلسیت در الگوهای پراش پرتو X غالب است. این نتایج نشان می‌دهد جایگزینی پوزولان با سیمان باعث بهبود مقاومت بتن می‌شود به طوری که CLM و CLZ عملکرد بهتری در برابر شرایط تهاجمی نشان می‌دهند. شکل (۶ و ۷) آنالیز SEM مخلوط‌ها را نشان می‌دهد و تجزیه و تحلیل آن نشان‌دهنده مراحل ریزساختاری شامل تشکیل ژل CH و CSH در تمام نمونه‌ها است. فاز CH در CL به دلیل بالا بودن میزان Ca(OH)_2 در مخلوط بتن مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی سیمان با زئولیت و متاکائولن در بتن آهکی منجر به کاهش تخلخل توسط تشکیل CSH و اترینگایت در ساختار بتن می‌شود. فعالیت پوزولان متاکائولن و زئولیت منجر به پر شدن ذرات ژل شده و ژل CSH متراکم‌تر و یکپارچه می‌شود که باعث افزایش خواص دوام می‌شود. این سازوکار در سنین مختلف می‌تواند بر خاصیت ریزساختار و دوام بتن تأثیر بگذارند. با توجه به

هموزن بوجود آورده که مقاومت بتن را در شرایط سخت محیطی بهبود می‌بخشد.

شکل ۵. آنالیز XRD نمونه‌ها (الف) در شرایط کنترل و (ب) در معرض ۵۵ سیکل ذوب و یخ و نمک یخ‌زدا

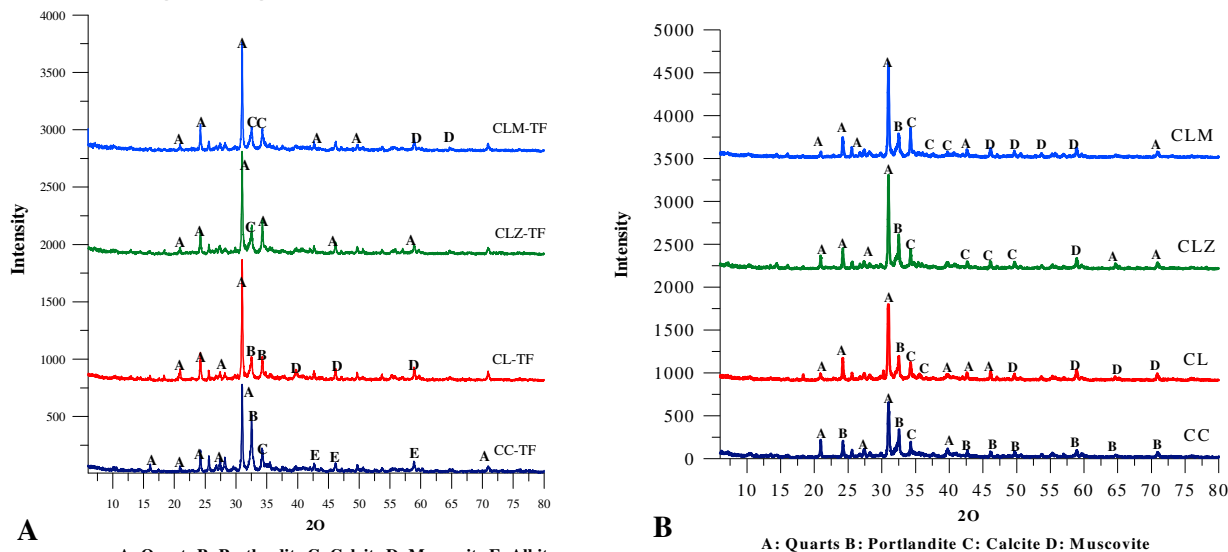


Fig. 5. A) XRD analysis of mixtures studied in control condition and B) that are exposed to 54 cycles of Thawing- Freezing (TF) and salt pouring.

شکل ۶. آنالیز SEM مخلوط‌ها بعد از عمل‌آوری

شکل ۷. آنالیز SEM در برابر اثر ترکیبی ذوب و انجماد و یخ‌زدایی با نمک

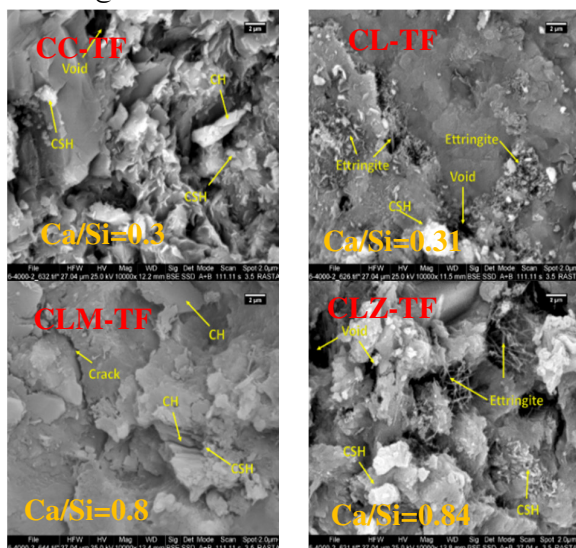


Fig. 7. SEM analysis of different mixtures after simultaneous freeze-thaw cycles and de-icing salt condition

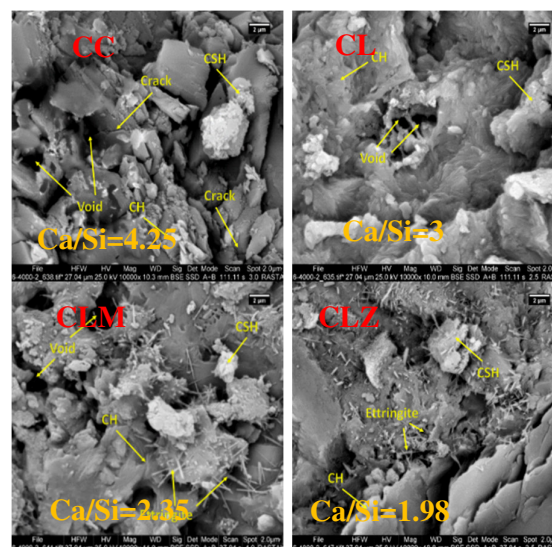


Fig. 6. SEM analysis of different mixtures after water curing condition

۳-۶ نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی بهبود خواص مکانیکی و دوام روسازی‌های بتنی در برابر تأثیر باهم ذوب و انجماد و یخ‌زدایی با نمک پرداخته شده است. بر پایه نتایج آزمایشگاهی به دست

شد که موجب بهبود ویژگی‌های مکانیکی ولی کاهش دوام نمونه‌ها شد. پس برای جبران این نقص، از مخلوط‌های کامپوزیتی حاوی آهک و متاکائولن یا زئولیت استفاده شد. این افزودنی‌ها علاوه بر رفع آن نقص، موجب بهبود بیشتر در عملکرد بتن شد و نقش زئولیت بسیار مهم‌تر از متاکائولن بوده است. در نتیجه توصیه می‌شود از بتن آهکی حاوی ۱۵٪ زئولیت طبیعی برای روسازی‌های بتنی استفاده شود تا ویژگی‌های مکانیکی و دوام آن در سنین اولیه افزایش یابد.

۶. مطالعه رفتار مخلوط مورد مطالعه از نظر انواع مختلف جمع شدگی و همچنین رفتار آن‌ها در برابر باران اسیدی در دست بررسی است. پیشنهاد می‌شود رفتار این بتن‌ها در برابر حملات سولفات منیزیم و همچنین واکنش‌های قلیایی - سیلیس برای تحقیقات آینده در نظر گرفته شود.

منابع

- [1] Samimi, K., Kamali-Bernard, S., Maghsoudi, A.A., Maghsoudi, M. and Siad, H., 2017. Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes. *Construction and building materials*, 151, pp.292-311. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.071>.
- [2] E.K. Anastasiou, A. Liapis, I. Papayianni, Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials, *Resour. Conserv. Recycl.* 101 (2015) 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.009>.
- [3] Samimi, K., Kamali-Bernard, S., Maghsoudi, A.A., Lgcgm, S.K.B. and Civil, E.A.A.M., 2018. Resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes: pumice and zeolite effect. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 12(3), pp.250-259.
- [4] Farnam Y, Esmaeeli HS, Zavattieri PD, Haddock J, Weiss J. Incorporating phase change materials in concrete pavement to melt

آمده از بتن شاهد (CC) و سه نمونه دیگر که هر کدام به ترتیب حاوی ۱۵٪ آهک (CL)، ۱۵٪ آهک و ۱۵٪ متاکائولن (CLM) و ۱۵٪ آهک و ۱۵٪ زئولیت (CLZ) هستند، با استفاده از تجزیه و تحلیل به دست آمده، نتایج به شرح زیر استنباط شده است:

۱. جایگزینی ۱۵ درصد آهک به جای سیمان در بتن منجر به افزایش مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد شد که با جایگزینی متاکائولن یا زئولیت در بتن با پایه آهک بیشتر شد. این افزایش مقاومت فشاری در نمونه CL در مقایسه با CC، از ۲۰ تا ۳۵ درصد، برای نمونه CLM از ۳۲ تا ۴۴ درصد و برای نمونه CLZ از ۳۵ تا ۵۵ درصد بوده است.

۲. بر اساس نتایج ارائه شده، در سن ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه CLZ افزایش ۵۸٪ و ۴۱٪، نمونه CLM افزایش ۴۱٪ و ۲۸٪ و نمونه CL، افزایش ۳۹٪ و ۲۴٪ نسبت به CC در مقاومت خمشی را نشان داده است که بیانگر تأثیر مثبت طرح اختلاط‌های هر دو پوزولان زئولیت یا متاکائولن در سنین اولیه است.

۳. بعد از ۵۵ سیکل انجماد و ذوب، مخلوط CL به دلیل جذب بالای موینگی عملکرد ضعیفی را نشان داد ولی نمونه‌های CLM و CLZ به دلیل بهبود واکنش هیدراتاسیون، کاهش تخلخل و افزایش تراکم ریزساختار بتن، کمترین کاهش وزن و خوردگی سطح را نشان دادند.

۴. نتیجه SEM نشان داد جایگزینی مواد پوزولانی متاکائولن و زئولیت با سیمان در بتن مبتنی بر آهک، با تشکیل ساختار متراکم CSH در آن بهبود می‌بخشد. آنالیز XRD نمونه‌ها نشان می‌دهد شدت پیک ترکیبات مربوط به مخلوط‌های پوزولانی به طور معنی‌داری تغییر نکرده است. علاوه بر این، شدت CH کاهش و فاز کلسیت در الگوهای پراش X غالب شد.

۵. از آنجاکه بهره‌برداری زود هنگام یکی از چالش‌های روسازی بتنی است، در این مطالعه از آهک هیدراته برای افزایش ویژه مکانیکی و دوام در سنین اولیه بتن استفاده

- cocrete. Constr Build Mater. 2017;142:117–27.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.056>.
- [12] Zheng X, Zhang J, Ding X, Chu H, Zhang J. Frost resistance of internal curing concrete with calcined natural zeolite particles. Constr Build Mater. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123062>
- [13] P. Dinakar, P.K. Sahoo, G. Sriram, Effect of Metakaolin Content on the Properties of High Strength Concrete, Int. J. Concr. Struct. Mater. 7 (2013) 215–223. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0045-0>.
- [14] BS EN 12390-2:2019 Testing hardened concrete. Making and curing specimens for strength tests.
- [15] ASTM C78 / C78M-15a, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), (2015). https://doi.org/10.1520/C0078_C0078M-15A.
- [16] ASTM C1585-11, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, (2011). <https://doi.org/10.1520/C1585-11>.
- [17] ASTM C672 / C672M-03, Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals (Withdrawn 2012), (2003). https://doi.org/10.1520/C0672_C0672M-03.
- [18] S.U. Khan, M.F. Nuruddin, N. Shafiq, Strength Development of Concrete Incorporating Metakaolin and PVA Fibres, Appl. Mech. Mater. 567 (2014) 505–510. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.567.505>.
- [19] H.S. Al-alaily, A.A.A. Hassan, Refined statistical modeling for chloride permeability and strength of concrete containing metakaolin, Constr. Build. Mater. 114 (2016) 564–579. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.187>.
- [20] C. Karakurt, H. Kurama, I.B. Topçu, Utilization of natural zeolite in aerated concrete production, Cem. Concr. Compos. 32 (2010) 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.10.002>.
- snow and ice. Cem Concr Compos [Internet]. 2017;84:134–45. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.002>.
- [5] Samimi, K., Farahani, M., Pakan, M. and Shirzadi Javid, A.A., 2022. Influence of Pumice and Metakaolin on Compressive Strength and Durability of Concrete in Acidic Media and on Chloride Resistance under Immersion and Tidal Conditions. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 46(2), pp.1153-1175. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00637-4>
- [6] S.A. Barbhuiya, J.K. Gbagbo, M.I. Russell, P.A.M. Basheer, Properties of fly ash concrete modified with hydrated lime and silica fume, Constr. Build. Mater. 23 (2009) 3233–3239. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.001>.
- [7] J.H. Filho, M.H.F. Medeiros, E. Pereira, P. Helene, G.C. Isaia, High-Volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test, J. Mater. Civ. Eng. 25 (2013) 411–418. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000596](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000596).
- [8] K. Samimi, G.R. Dehghan Kamaragi, R. Le Roy, Microstructure, thermal analysis and chloride penetration of self-compacting concrete under different conditions, Mag. Concr. Res. 71 (2019) 126–143. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00367>.
- [9] B. Ahmadi, J. Sobhani, M. Shekarchi, M. Najimi, Transport properties of ternary concrete mixtures containing natural zeolite with silica fume or fly ash, Mag. Concr. Res. 66 (2014) 150–158. <https://doi.org/10.1680/macr.13.00224>.
- [10] E. Vejmelková, D. Koňáková, T. Kulovaná, M. Keppert, J. Žumár, P. Rovnaníková, Z. Keršner, M. Sedlmajer, R. Černý, Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance, Cem. Concr. Compos. 55 (2015) 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.013>.
- [11] Girskas G, Skripkiūnas G. The effect of synthetic zeolite on hardened cement paste microstructure and freeze-thaw durability of

of concrete, Adv. Concr. Constr. 5 (2017) 241–255.
<https://doi.org/10.12989/acc.2017.5.3.241>.

- [21] Ş. Kiliçarslan, The effect of zeolite amount on the physical and mechanical properties of concrete, Int. J. Phys. Sci. 6 (2011) 3041–3046. <https://doi.org/10.5897/IJPS10.164>.
- [22] A. Joshaghani, M.A. Moeini, M. Balapour, Evaluation of incorporating metakaolin to evaluate durability and mechanical properties

Investigating the performance of cementitious composition on mechanical properties and durability against the combined effects of freeze-thaw cycles and desalination salt in early utilization of concrete pavements

Aref Ebrahimi Besheli ¹, Kianoosh Samimi ^{2*}, Fereydoon Moghadas Nejad ³, Ehsan Darvishan ⁴

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

² Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University

³ Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology

⁴ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Roudehen, Iran.

Abstract

One of the main objectives of infrastructure managers is the timely and rapid operation of airports and freeways. A goal that is challenging when utilizing concrete pavements, due to their different behavior during the initial stages of implementation. This research aims to improve the mechanical characteristics of concrete pavements and increase their durability against the combined effects of the freeze-thaw cycle and surface desalination, especially during early ages. This paper examines the use of cementitious material in combination with hydrated lime, metakaolin, and zeolite to remove the hurdles to the early operability of concrete pavements. To this end, micro-structural studies have been performed using XRD and SEM analysis and comparisons in two states of water processing and exposure to freeze-thaw cycle. During which replacing cement with zeolite and metakaolin in calcareous concrete resulted in reduced porosity and homogeneous density with the formation of CSH in the concrete structure.

Accordingly, improvements in the mechanical properties and durability of concrete pavements against the combined effects of freeze-thaw cycle and surface desalination were studied and analyzed in four mixtures of Control Concrete (CC), 15% lime (CL), 15% lime, and 15% Metakaolin (CLM) and 15% lime and 15% Zeolite (CLZ). It was noted that at age of 7 days the CLM, CL, and CLZ samples showed an increase of 20%, 32%, and 48% respectively compared to the CC sample. This increase continued throughout the study. During the freeze-thaw test and after 55 cycles the CLM and CLZ samples always exhibited lower degradation and showed a weight loss of 48.7% and 75.2% less than the CC sample. In addition, as per the results of the capillary absorption test the CLM and CLZ mixtures had at lower ages had less permeability than the CC mixture and this behavior continued with better performance at older ages.

Also, the results of flexural strength indicate the positive effect of additives in all samples over time, and at 28 days, the CL, CLM, and CLZ samples increased flexural strength by 39%, 42%, and 57% respectively in comparison to the CC sample. The positive effect of hydrated lime due to its high paste property in increasing the flexural strength of mixtures containing metakaolin and zeolite is quite evident and has increased the mechanical properties at all ages of the samples, but has weakened the durability performance compared to the control sample. This issue has been addressed in composite mixtures containing lime with metakaolin or zeolite, and the results of durability tests indicate a significant improvement in both pozzolans, especially in the zeolite. It can therefore be concluded that with improving mechanical characteristics and durability of CLM and CLZ mixtures, utilizing metakaolin and zeolite in concrete containing hydrated lime is a suitable solution to eliminate the challenges of early usage in concrete pavements.

keywords: Durability, Thawing and Freezing, Microstructure, Zeolite, Metakaolin, Hydrated lime.