

مجله علمی - پژوهشی

مهندسی عمران مدرس

دوره بیست و دوم، شماره ۴، سال ۱۴۰۱

بررسی عملکرد ترکیب مواد سیمانی بر خواص مکانیکی و دوام در برابر اثر توأم 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، ماتاکائولن و زئولیت پرداخته شده است. در این راستا، مطالعات ریزاساختاری هم با استفاده از آنالیز XRD و SEM به صورت مقایسه‌ای در دو شرایط عمل آوری آب و قرار گرفتن در مععرض چرخه ذوب و یخ انجام شده است. که جایگزینی سیمان با زئولیت و ماتاکائولن 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٪ ماتاکائولن (CLM) و ۱۵٪ آهک و ۱۵٪ زئولیت (CLZ) مورد آزمایش و تجزیه و تحلیل قرار گرفت که مشخص شد به ترتیب نمونه CL 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، ۲۲ 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 CLZ و CLM همواره میزان تخریب کمتری نسبت به نمونه شاهد از خود نشان دادند. به گونه‌ای که در پایان آزمایش، درصد کاهش وزن به ترتیب ۴۸,۷٪ و ۷۵,۲٪ کمتر از نمونه شاهد بوده است. علاوه بر این بر اساس نتایج آزمایش جذب موییگی آب مشخص شد نمونه‌های CLZ و CLM در سنین اولیه نفوذپذیری کمتری نسبت به مخلوط CC داشته و این رفتار در سنین بالاتر نیز با عملکرد منا سبتری ادامه یافته است. همچنین نتایج حاصل از مقاومت خمی ایانگر تأثیر مثبت افزودنی‌ها در تمامی نمونه‌ها با گذشت زمان، بر روند افزایش مقاومت خمی است به گونه‌ای که به ترتیب برای نمونه CL و CLZ نسبت به نمونه شاهد، افزایش مقاومت خمی در ۲۸ روزه به میزان ۴۲,۳۹٪ و ۵۷٪ درصد بوده است. تأثیر مثبت آهک هیدراته به دلیل خاصیت خمیری بالا در افزایش مقاومت خمی مخلوط‌های حاوی متاکائولن و زئولیت کاملاً مشهود است و موجب افزایش ویژگی‌های مکانیکی در تمامی سنین نمونه‌ها شده است، ولی باعث ضعف در عملکرد دوام نسبت به نمونه شاهد گردید. این موضوع در مخلوط‌های کامپوزیتی حاوی آهک با متاکائولن یا زئولیت رفع گردیده و نتایج آزمایش‌های دوام بیانگر بهبود قابل ملاحظه هر دو پوزولان به خصوص در زئولیت می‌باشد، لذا بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان گفت با بهبود خواص مکانیکی و دوامی مخلوط‌های CLZ و CLM، استفاده از افزودنی متاکائولن یا زئولیت در بتون حاوی آهک هیدراته راه حلی مناسب برای رفع چالش عدم امکان بهره‌برداری زودهنگام در روسازی بتني است.

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

نمک‌های یخ‌زدا است. این نمک‌های یخ‌زدا با عملکرد یونی سبب کاتدی شدن سطوح شده و طبعاً عمل یخ‌زدگی رو سازی را از بین برده و یا به تأخیر می‌اندازد. ولی این روش دارای معایبی است که علاوه بر مشکلات زیست‌محیطی باعث نفوذ یون‌های کلرید آزاد از طریق حفرات موئینگی و در نهایت خوردنی روسازی‌ها می‌شوند [3-5]. از آنجاکه آهک در بتون، به عنوان پرکننده حفره‌ها موجب کاهش تخلخل می‌شود و میزان نیاز آب را کاهش می‌دهد، می‌توان از آن در بهبود کارایی و مقاومت بتون استفاده نمود [6]. آهک هیدراته به عنوان یک افزودنی بهمنظور افزایش مقاومت مخلوط بتون و یا مخلوط‌های آسفالتی در روسازی راه مورد استفاده قرار می‌گیرد که جایگزینی بهینه ۳۰٪-۱۵٪ از آن می‌تواند منجر به بهبود برخی از خواص دوام روسازی صلب بتني شود [7]. از آنجاکه به کارگیری منابع جایگزین سیمان در تولید بتون حائز اهمیت است، استفاده از پوزولان‌ها به دلیل مزایایی همچون صرفه اقتصادی، بالا بردن مقاومت و جلوگیری از ترک خوردن سطحی گسترده بتون به عنوان جایگزین بخشی از سیمان معرفی شده است [8]. دو پوزولان متاکائولن و زئولیت به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بدایل کاهش ساختار ناهمگن بتون، محصول پوزولانیک پایدار و ریزساختار متراکم برای بهبود دوام سازه‌های بتني به صنعت ساخت معرفی شده‌اند. به لحاظ

۱- مقدمه

یکی از موضوعات مهم در طراحی و ساخت روسازی‌های بتني، عمر سرویس‌دهی آن‌هاست. شرایط محیطی و کیفیت بتون از پارامتر‌های تأثیرگذار در میزان عمر سرویس‌دهی این نوع روسازی‌ها می‌باشدند [1]. استفاده از روسازی بتني به دلیل فراوانی مصالح بکار رفته و سازگاری بهتر با محیط‌زیست در مقایسه با آسفالت می‌تواند منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای گردد و به طور کلی این نوع روسازی می‌تواند جایگزین مناسبی برای روسازی‌های آسفالتی به شمار آید [2]

از طرف دیگر، روسازی بتني از معایب نظریه ترک و شکستگی رنج می‌برد و از این‌رو همواره بهبود دوام آن موردن توجه مهندسان بوده است. جمع شدگی و انبساط ناشی از پدیده ذوب و یخ که موجب ترک و تخریب سطح می‌شود یکی از عوامل اصلی نابودی روسازی بتني است. از آنجا که کترول و کاهش ترک در روسازی‌ها یک اصل بسیار حیاتی است، تحقیق در مورد آثار مخرب سیکل‌های یخ‌بندان و انجام زدایی در روسازی بتون سودمند و پر اهمیت است.

روش‌های مختلفی برای افزایش دوام و استحکام روسازی‌ها در برابر پدیده ذوب و یخ وجود دارد. یکی از روش‌های کاربردی و معمول در جاده‌ها برای جلوگیری از ایجاد لایه‌های یخ، پاشش

اساس تأثیر باهم ذوب و انجامد و یخ زدایی با نمک، ترکیب کامپوزیتی پوزولان 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 کترل(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 $0.4/0$ و نسبت شن به ماسه برابر با $0.82/0$ 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. نوع نمونه‌بتن، شامل بتن شاهد بدون افزودنی (CC)، نمونه‌بتن آهک هیدراته(CL)، نمونه‌بتنی با آهک هیدراته و پوزولان زئولیت (CLZ) و متاکائولن (CLM) هر کدام به مقدار 15% به عنوان جایگزین سیمان ساخته شد که مصالح مصرفی آن سنگدانه‌های شکسته شده با ابعاد $6-12 \times 6-12$ میلی متر به عنوان شن نخودی، سنگدانه‌ها با ابعاد $12-19 \times 12-19$ میلی متر به عنوان شن بادامی و دانه‌های ریز طبیعی با حداقل اندازه 6 میلی متر به عنوان ماسه است. در کلیه نمونه‌ها از افزودنی کاهنده قوی آب به عنوان فوق روان کننده با چگالی 1311 g/cm^3 بر پایه زنجیره‌های اصلاح شده پلی کربوکسیلات اتر (PS10) استفاده شده است. درصد میزان مصرف فوق روان کننده به گونه‌ای انتخاب شد که اسلامپ بتن تازه 7 cm به دست آید. علاوه بر این برای افزایش روانی و مقاومت بالا در برابر پدیده ذوب و یخ به مقدار 0.1% هوایا 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 ارائه شده به موارد مذکور اختصاص یافته است.

بابک احمدی و همکاران (۲۰۱۳)، در پژوهشی نشان دادند افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی 10% زئولیت در مقایسه با بتن بدون پوزولان از سن ۲۸ روز به بعد اتفاق می‌افتد [9]. Vejmelková و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقی در یافتن مقدار بیشینه جایگزینی زئولیت برای بهبود خواص مکانیکی و مقاومت در برابر ذوب و یخ 20% است و در این صورت مقاومت فشاری و مقاومت خمسی بتن حاوی زئولیت پس از ۲۸ روز، با افزایش این مقدار زئولیت کاهش می‌یابد. [10]. مطبق با پژوهش Skripkiunas و Girskas (۲۰۱۷) جایگزینی 10% 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، $1/6$ برابر در نمونه‌های بدون هوا و $3/5$ برابر در مخلوط‌های با هوا کاهش نشان داد [11] 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 100 Mpa با جایگزینی 10% متاکائولن را بهینه اعلام کردند، که با توجه به خواص پرکننده آن تراکم بتن بهبودیافته و نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد [13]. با توجه به اینکه 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/m³)

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/m³)

۱

۲

۳

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

۱-۴-۲ آنالیز SEM

مشاهدات میکروسکوپی اسکن الکترونی توسط طیف‌سنگی اشعه X روی پوزولان‌ها توسط آشکارسازهای BSE, SE, FEI ESEM بزرگنمایی‌های مختلف توسط میکروسکوپ QUANTA 200 انجام گرفت. قبل از تصویرگیری، نمونه‌ها در حمام الکل، 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.

۵-۱-۲ جذب آب مؤینه

این آزمایش منطبق با استاندارد [16] ASTM C1585، روی سه قطعه استوانه‌ای به ابعاد ۵۰×۱۰۰ میلی‌متر برای هر طرح مخلوط صورت گرفت. ضربی جذب مؤینگی (S) بعد از ۲۴ ساعت برای هر طرح مخلوط در سنین مختلف همچون ۷، ۱۸۰، ۳۶۵، ۲۸، ۵۶، ۹۰ روز اندازه‌گیری شد.

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

این آزمایش مطابق با بند ۳ استاندارد ۱۷۰۴۱ INSO و منطبق بر استاندارد [17] ASTM C672 است که پس از عمل آوری کامل نمونه‌ها در سن ۵۶ روز در دستگاه شبیه‌ساز محیطی طبق

۱-۲ آزمایش‌ها

۱-۱ مقاومت فشاری

از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰mm×۱۰۰mm برای تعیین مقاومت فشاری کلیه نمونه‌ها مطابق با استاندارد EN12390-2 [14] استفاده شد و آزمایش در سنین مختلف [۱۸۰، ۱۳۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶، ۹۰] روز صورت گرفت. میانگین مقاومت سه نمونه به عنوان مقاومت فشاری نمونه‌ها در نظر گرفته شد.

۲-۱-۲ مقاومت خمی

آزمایش مقاومت خمی بر روی تیر ساده با ابعاد ۶۰۰×۱۵۰×۱۵۰ mm با بارگذاری نقطه‌ای در نقاط یک‌سوم دهانه بر اساس استاندارد [15] ASTM C78 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 لحظه 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 (A) λ 1.5406 Ca Kα (40 در عملیاتی در ۴۰

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

نتیجه این مطالعه در به‌کارگیری زئولیت، افزایش مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی بوده است که با نتایج مطالعه احمدی و همکارانش [9] در بررسی تأثیر جایگزینی سیمان با درصد-هایی از زئولیت و میکروسیلیس، 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.

۲-۳ مقاومت خمی

از آنجایی که مقاومت خمی (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 خمی 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 خمی نمونه CL در سنین ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب به میزان ۲۸٪ و ۲۵٪ بیشتر از نمونه CC است. این بهبود مقاومت خمی را می‌توان به‌واسطه 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٪، ۲۳٪، ۳۵٪ 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٪ زئولیت نیز چشم‌گیرتر شد. در این راستا نرخ متاکائولن و ۱۵٪ زئولیت نیز چشم‌گیرتر شد. در این راستا نرخ رشد مقاومت فشاری دو نمونه CLZ و CLM در حدفاصل سنین ۷ تا ۹۰ روز بسیار قابل توجه و به طور یکنواخت پیشرفت داشت که برای نمونه CLM از ۳۲ تا ۴۴ درصد و برای نمونه CLZ از ۳۵ تا ۵۵ درصد افزایش رخداده است و پس از آن با شیب کمتری تا ۳۶۵ روز ادامه یافت. از سن ۳۶۵-۷ روز نمونه حاوی زئولیت مقاومت بیشتری از نمونه حاوی متاکائولن نشان داد.

مقاومت بیشتر در سنین اوایله در نمونه حاوی متاکائولن نسبت به نمونه حاوی زئولیت مربوط به تأثیر ریزدانگی بر افزایش سرعت هیدراتاسیون و همچنین خاصیت فیلری متاکائولن است. درحالی که در سنین بالاتر به دلیل فعالیت پوزولانی بالای زئولیت ($42/65mg$) 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

شکل ۱. مقاومت فشاری مخلوطها در مدت زمان عمل آوری (برای همه سنین)

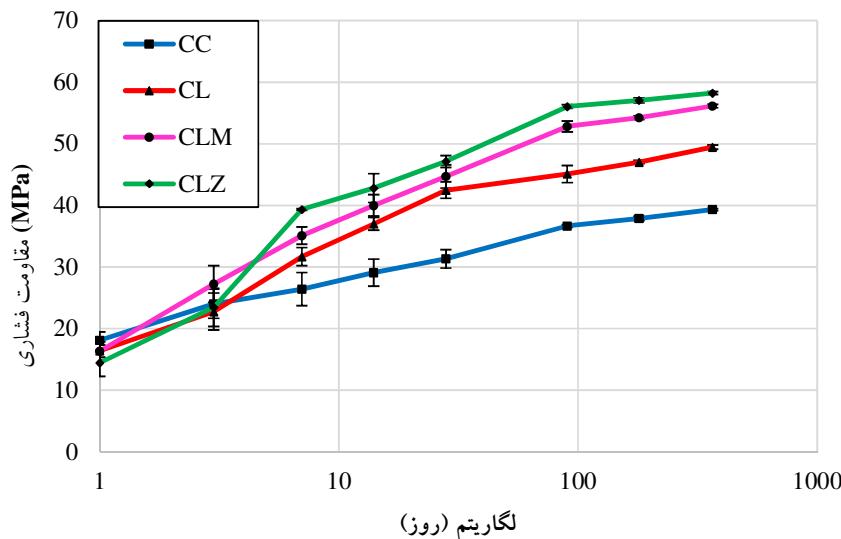


Fig. 1. Evolution of compressive strength of mixtures with curing time.

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

علاوه بر این، مقاومت خمثی نمونه CLM به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه ۴۲٪ و ۴۰٪ بیشتر از نمونه CC است. در بررسی مقاومت خمثی مخلوط‌های بتنی مورد مطالعه مشخص شد که استفاده از ۱۵٪ متاکائولن و ۱۵٪ آهک هیدراته به جای سیمان، منجر به افزایش ۴۲٪ مقاومت خمثی در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه شاهد می‌شود و این اختلاف در سن ۹۰ روز به ۵٪ کاهش یافت. Khan و همکاران [18]. با جایگزینی ۱۰٪ متاکائولن در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز به بهبود مقاومت خمثی دست یافتد. در این مطالعه، نتایج مربوط به بهبود مقاومت خمثی 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 خمثی همانگی 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 خمثی را نسبت به دیگر نمونه‌ها داشتند. این افزایش به دلیل فعالیت پوزولانی زئولیت در تسريع روند فرآیند تبدیل C-S-H به Ca(OH)₂ پوزولانیک است که به میزان بیشتری

شکل ۲. مقاومت خمشی مخلوط‌ها در دوره عمل‌آوری

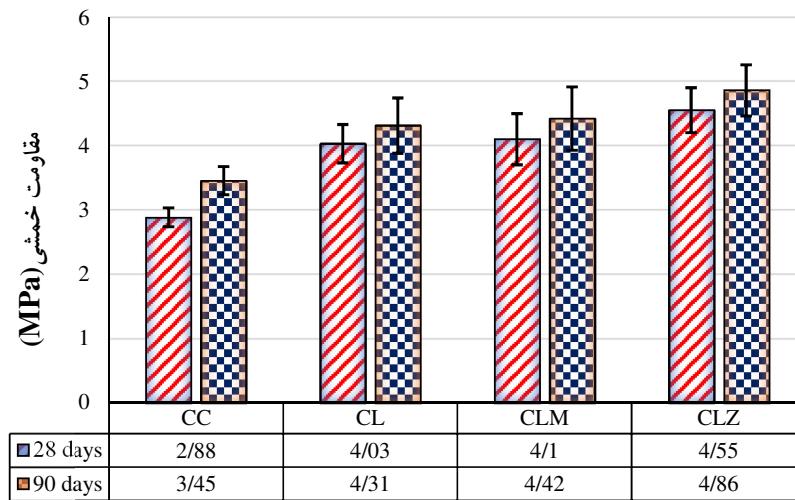


Fig. 2. Evolution of Flexural strength of mixtures with curing time.

کاهش میزان حفرات موئینگی مربوط به ماهیت میکروفیلری متاکائلن و همچنین تولید محصولات پوزولانیک در این بتن است که طبعاً باعث پرشدن حفرات و همچنین انقطاع مسیرهای ارتباطی بین حفرات موئینگی می‌شود.

۴-۳ 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 به صورت پیوسته افزایشی بوده که تا سیکل ۳۵ و ۴۰ با شدت زیاد و سپس تا انتهای به صورت روند ثابت ادامه یافت. میزان افت وزنی نمونه CL، پس از ۵۵ سیکل اثر باهم ذوب و یخ‌بندان و نمک یخ‌زدا ۸۰٪ بیشتر در مقایسه با مقدار متناظر در نمونه شاهد بود.

۳-۳ جذب موئینگی آب

نتایج مقدار ضریب جذب موئینگی بعد از ۲۴ ساعت برای کلیه نمونه‌های مورد مطالعه در سنین ۷، ۲۸، ۹۰، ۱۸۰، ۳۶۵ (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٪، ۱۱٪، ۱۰٪ 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 CL و CLM 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 عمل آوری

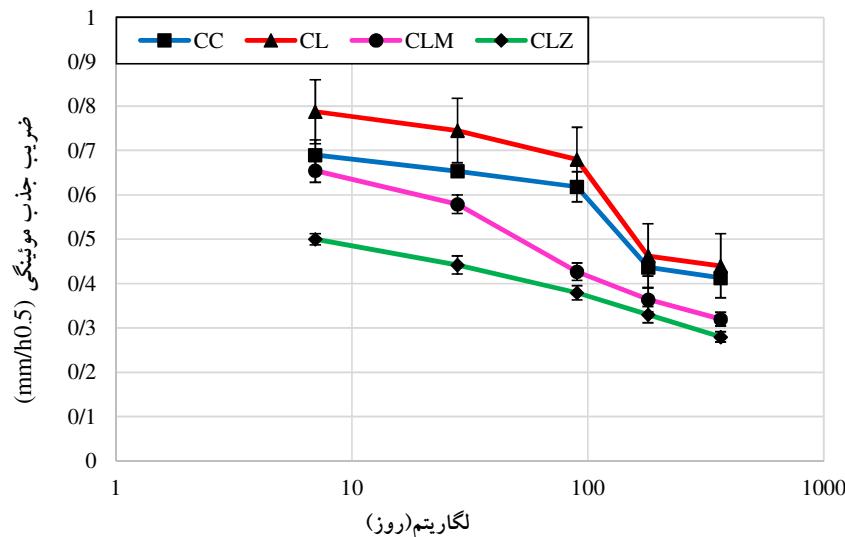


Fig. 3. Capillary absorption at different curing ages (mm/h0.5).

ذوب و یخ ثابت بوده و تغییرات زیادی نداشت. این مخلوط در سیکل ۵۵، 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 ریزاساختار 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 انجام‌داد است که بر اساس نتایج نمونه‌های CL و CLM 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 تش داخلي از طریق انجام مکرر از عوامل اصلی نابودی بتن است. کمترین میزان فروپاشی ماتریس بتنی در نمونه‌های CL و CLZ به CLZ قوی پیوست که این افت وزنی به مرتب در مخلوط 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.

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 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 به دست آمده 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)، شب تغییرات افت وزنی مخلوط CLZ در تمام سیکل‌های

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

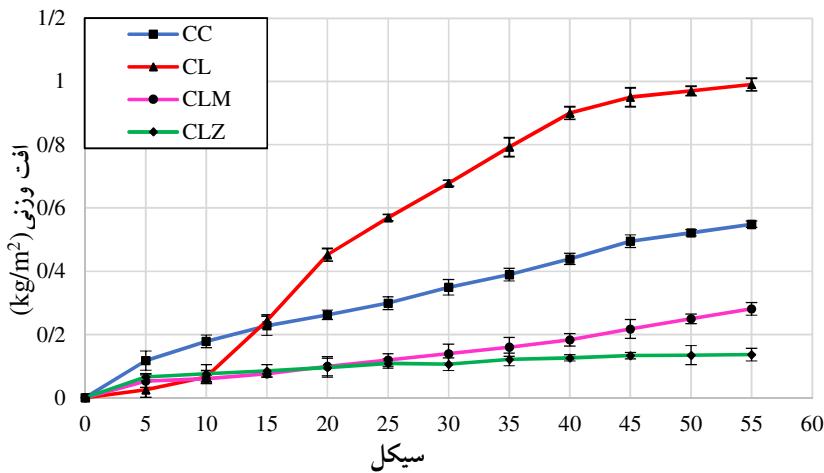


Fig. 4. Weight loss per freeze-thaw cycle for four mixtures studied.

تصاویر SEM از نمونه‌ها پس از چرخه همزمان ذوب و یخ و شرایط نمک‌ذابی، نمونه‌های CLZ-TF و CLM-TF دارای CSH و CL-TF هستند، حفره و منفذ 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 CLZ-TF سیمان با پوزولان منجر به ساختار متراکم و بهبود مقاومت بتن در چرخه‌های همزمان ذوب و یخ و یخ‌ذابی با نمک می‌شود. تجزیه و تحلیل EDX از نمونه‌های مختلف در شرایط عمل آوری در آب و در معرض چرخه انجماد و یخ‌ذابی با نمک نشان می‌دهد، نسبت Ca / Si در CLZ و CLM در شرایط عمل آوری آب کمتر از CC و CL بود. در CLZ و CLM قله‌های Si بیشتری مشاهده می‌شود که به واکنش پوزولانی و خواص ذاتی متاکائولون 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 Si / Ca / CL-TF از CL-TF و CC-TF نسبت به CLM-TF به طور قابل توجهی کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که در انجماد و یخ‌ذابی با نمک یون کلسیم از بتن خارج می‌شود. در مقابل، جایگزینی متاکائولون و زئولیت به CSH دلیل فعالیت پوزولانی و واکنش هیدراتاسیون بالا

۵-۳ آنالیز کافی‌شناسی و ریزساختار

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 متاکائولون در بتن آهکی منجر به کاهش تخلخل توسط تشکیل CSH و اترینگایت در ساختار بتن می‌شود. فعالیت پوزولان متاکائولون 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 بگذارد. با توجه به

هموژن 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 زدایی با نمک

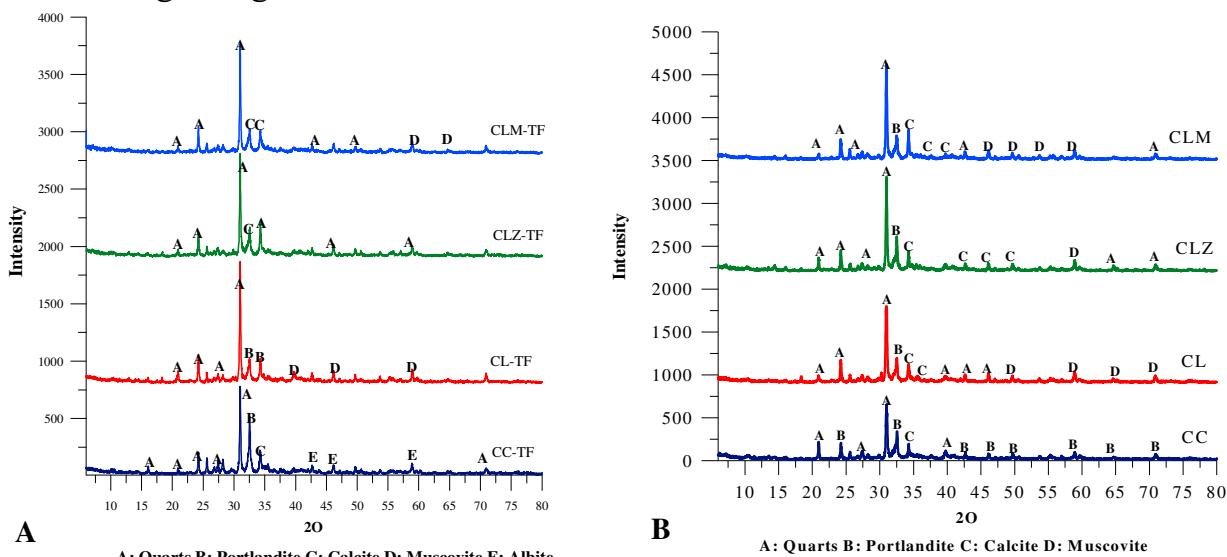


Fig. 5. A) XRD analysis of mixtures studied in control condition and B) that are exposed to 54 cycles of Thawing- Freezing (TF) and salt pouring.

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

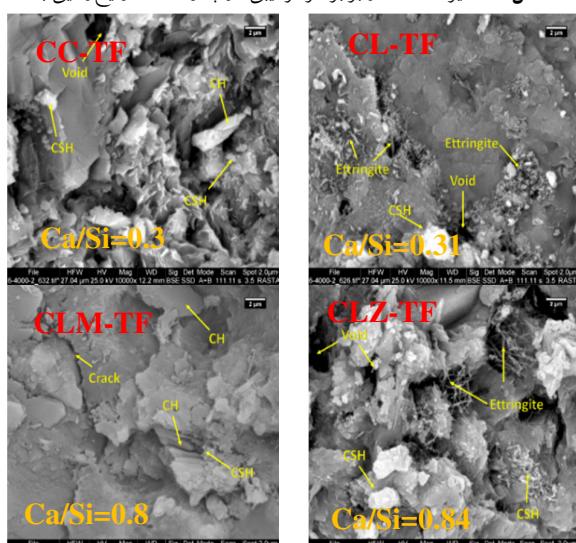


Fig. 7. SEM analysis of different mixtures after simultaneous freeze-thaw cycles and de-icing salt condition

شکل ۶. آنالیز SEM مخلوط‌ها بعد از عمل آوری

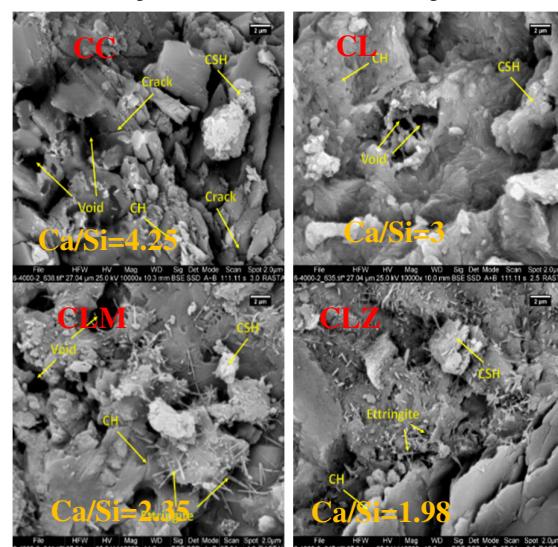


Fig. 6. SEM analysis of different mixtures after water curing condition

۶-۳ نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی بهبود خواص مکانیکی و دوام روسازی‌های بتنی در برابر تأثیر با هم ذوب و انجماد و یخ زدایی 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 بتونی 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 سولفات‌منیزیم 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., Lgcm, 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 (CLZ) و ۱۵٪ آهک و ۱۵٪ زئولیت (CLM) 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 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 خمی 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 مویینگی 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 بتونی است، در این مطالعه از آهک هیدراته برای افزایش ویژه مکانیکی و دوام در سنین اولیه بتن استفاده

- co_ncrete. *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. Kilinçarslan, 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 Besheli¹, Kianoosh Samimi^{2*}, Fereydoon Moghadas Nejad³, Ehsan Darvishan⁴

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.