

ارزیابی نفوذ یون کلرید در بتن‌های الیافی حاوی متاکائولن و پومیس تحت شرایط غوطه‌وری و جزرومد

کیانوش صمیمی^{۱*}، مهیارپاکان^۲

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

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

*k_samimi@sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۲۵

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از الیاف در بتن برای افزایش فاصله درز اتصال دال‌های بتنی و کاهش ترک در روسازی‌های بتنی و سازه‌های پل متداول شده است. با این حال، رفتار دوام بتن الیافی در برابر نفوذ یون کلرید به ویژه در اندازه‌گیری غلظت یون کلرید کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه ۶ طرح مخلوط شامل بتن معمولی (به عنوان بتن شاهد) و یک طرح مخلوط از بتن الیافی (بدون پوزولان) حاوی الیاف پلی الفین (4 kg/m^3) و پلی پروپیلن ($0/8 \text{ kg/m}^3$) به همراه دو طرح از بتن معمولی و دو طرح از بتن الیافی حاوی پومیس یا متاکائولن (با 15% جایگزینی سیمان) در نظر گرفته شد. پس از مطالعه خواص مکانیکی نمونه‌های بتنی، عملکرد بتن‌های مذکور در برابر نفوذ یون کلرید به کمک شبیه‌سازی محیط دریایی بررسی شد. همچنین برای ارزیابی منافذ موجود در طرح مخلوط‌ها مطالعات ریزساختاری به وسیله آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز اسکن توموگرافی کامپیوتری (سی‌تی‌اسکن) انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن متاکائولن و پومیس موجب افزایش مقاومت مکانیکی و دوام در برابر نفوذ کلرید در هر دو بتن معمولی و بتن الیافی شده است. بر این اساس، مقاومت فشاری پومیس و متاکائولن به نسبت نمونه معمولی 30% و 15% افزایش در سن ۳۶۵ روز نشان داد. همچنین، بیشینه عمق میزان نفوذ یون کلرید آزاد، مقید و کل در بتن الیافی با 15% جایگزینی سیمان با متاکائولن به ترتیب 44% ، 40% و 40% کاهش نسبت به نمونه شاهد در شرایط غوطه‌وری داشت و همچنین در شرایط جزر و مد نیز به ترتیب 25% ، 25% و 33% درصد کاهش مشاهده شد. بر اساس آنالیز سی‌تی‌اسکن و نتایج SEM در این مطالعه، بتن‌های حاوی پوزولان دارای سطح متخلخل‌تر می‌باشند و نسبت Ca/Si به دلیل رسوب‌زدایی به میزان قابل توجهی در آن‌ها کاهش می‌یابد که این میزان برای نمونه حاوی متاکائولن $0/4$ نشان می‌دهد که به نسبت نمونه کنترلی $1/1$ کاهش داشته است. همچنین، نتایج نشان داد که با وجود تخلخل سطحی در بتن‌های حاوی پوزولان، نسبت Ca/Si و غلظت مایع منفذی نقش اساسی در دوام آن‌ها در برابر نفوذ یون کلرید ایفا می‌کنند.

واژگان کلیدی: پومیس، ریزساختار، متاکائولن، یون کلرید.

۱. مقدمه

یکی از موارد مهم در طراحی و ساخت سازه های بتنی عمر مفید آنهاست. عوامل محیطی و کیفیت طرح اختلاط بتن از پارامترهایی هستند که در طول عمر سازه های بتنی نقش بسزایی را ایفا می کنند. در اجرای سازه های بتنی معایبی مانند ترک خوردگی، جمع شدگی، شکستگی و ... وجود دارد که به تازگی برای رفع این معضلات، بتن الیافی از سوی کارشناسان عمرانی به منظور اجرا در این زمینه به ویژه در زمینه ساخت و ساز در صنعت حمل و نقل همچون روسازی های بتنی و پایه های پل پیشنهاد شده است. بتن تقویت شده با الیاف، ترکیبی از الیاف با سایر اجزای بتن است که علاوه بر کاهش عرض ترک باعث افزایش مقاومت در برابر ضربات مکانیکی شدید می شود [1,2]. در راستای افزایش طول عمر مفید سازه های بتنی، دوام پایه های پل در مجاورت محیط های دریایی به دلیل قرارگیری مداوم آنها در معرض انتشار یون کلرید یکی از چالش های مهم در زمینه مهندسی عمران به شمار می آید. پس، به منظور بهبود مخاطرات این چالش، در این تحقیق از الیاف به منظور کاهش ایجاد ترک که منجر به نتایج سودمندی در افزایش دوام می شود، استفاده شد. سپس به منظور ارتقاء دوام، از مواد پوزولانی پومیس و متاکائولن جایگزین ۱۵٪ از سیمان در بتن استفاده شد. از سوی دیگر، بر مبنای مطالعه یونگ و همکاران با وجود اینکه مواد افزودنی سیمانی باعث افزایش دوام سازه های دریایی می شود ولی به دلیل کاهش قلیائیت مایع منفذی، آستانه کلرید در بتن را کاهش می دهند [3]. همچنین توماس پیشتر گزارش داده بود که با افزایش جایگزینی خاکستر بادی از ۰٪ به ۵۰٪ آستانه کلرید در بتن از ۰٫۷٪ به ۰٫۲٪ کاهش می یابد [4]. حمله یون کلرید در بتن بیشتر هنگامی رخ می دهد که یون های کلرید موجود در نمک ها، آب دریا و یا آب های آلوده به سطح بتن نفوذ می کنند. لازم به ذکر است که سازه برای تحت تأثیر قرار گرفتن حملات کلریدی نیازی به قرارگیری دقیقاً در ساحل را ندارد. زیرا این ماده مخرب از طریق هوا منتقل می شود و می تواند حتی با فاصله چند صد متر از دریا در بتن نفوذ نماید. به طور کلی، بسیاری از یون های کلرید با ترکیبات سیمانی به طور عمده با تری کلسیم آلومینات (C_3A) واکنش داده و

کلریدهای پیچیده پایداری را شکل می دهند [3]. با توجه به وضعیت یون های کلرید در بتن، آنها می توانند به دو شکل ظاهر شوند: بخشی از یون های کلرید با هیدرات های خمیر سیمان واکنش می دهند و بخش دیگری که ناچیز هم نیستند روی ماتریس سیمانی به صورت فیزیکی متصل و ثابت می شوند. به دلیل تفاوت رفتاری انواع یون کلرید همچون یون کلرید آزاد و یون کلرید مقید شده در سازوکار نفوذ در بتن، همواره شناخت ماهیت هر یک از موارد مذکور حائز اهمیت است [4,5]. کلریدهای آزاد که به صورت یونی در محلول وجود دارند همواره در مایع منفذی متحرک هستند و می توانند بر غلظت محلول یا پتانسیل شیمیایی ماتریس سیمانی تأثیر بگذارند. آنها با توانایی تحرک بالاتر نقش تعیین کننده ای در میزان خوردگی دارند [6]. از سوی دیگر، کلریدهای مقید شده به صورت فیزیکی توسط $C-S-H$ ها جذب می شوند و یا به صورت شیمیایی بیشتر به شکل مونوکلروآلومینات های کلسیم هیدراته و یا نمک فریدل ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) مقید می شوند. بر اساس مطالعه یوسال و همکاران، گرایش ظرفیت اتصال کلرید در بتن با افزودن خاکستر آتش فشانی و سرباره کوره ذوب آهن افزایش می یابد [3]. به دنبال آن، کلرید آزاد کمتری برای شروع فرآیند خوردگی در دسترس خواهد بود. افزودن خاکستر آتش فشانی و سرباره کوره ذوب آهن در بتن به دلیل مقدار زیاد آلومینات در آنها منجر به افزایش مقدار C_3A در ماتریس سیمانی می شود. علاوه بر این، افزایش مقدار سیلیکات کلسیم هیدراته که در واکنش های پوزولانی تشکیل می شوند، به عنوان عامل ثانویه در افزایش ظرفیت مقید نمودن یون های کلریدی در ماتریس سیمانی به شمار می آیند. بنابراین، طبق تحقیق بالا، بتن های حاوی خاکستر آتش فشانی و سرباره کوره ذوب آهن (با مقادیر بالای آلومینات) مقاومت بهتری در برابر نفوذ یون های کلرید از خود نشان می دهند [3]. بر اساس مطالعات انجام شده، بیشتر مواد پوزولانی باعث افزایش دوام بتن در برابر حملات کلریدی می شوند [7-9] که تأثیر آنها در میزان ظرفیت اتصال یون های کلرید مقید شده به عواملی همچون سطح مخصوص حفرات، ماهیت محصولات هیدراتاسیون و نسبت CaO/SiO_2 متغیر است [10]. در این

محیط‌های دریایی تحت شرایط غوطه‌وری و جزر و مدی در ادبیات موضوع وجود ندارد. بنابراین، مطالعه و بررسی این نقصان می‌تواند در پیشگیری از تخریب‌های ناشی از یون کلرید به ویژه در پروژه‌های عمرانی حاشیه خلیج فارس که دومین ناحیه مخرب در دنیا به شمار می‌آید، مثمر به ثمر واقع شود [10]. بدین منظور از اهداف این تحقیق به بررسی اثر جایگزینی ۱۵٪ سیمان با پودر پومیس و متاکائولن بر مقاومت فشاری و خمشی در نمونه‌های بتن معمولی و بتن الیافی از سنین اولیه تا درازمدت با در نظر گرفتن مقادیر ثابت سنگدانه و نسبت آب به سیمان برای همه طرح مخلوط‌ها بود. سپس به منظور ارزیابی دوام در برابر محیط‌های دریایی، مقدار یون کلرید آزاد و مقید در کلیه نمونه‌های بتنی در اعماق مختلف نفوذ تحت دو شرایط غوطه‌وری و جزرومدی به روش پتانسیومتری اندازه‌گیری شد. همچنین برای استدلال نتایج به‌دست‌آمده، مطالعه ریزساختاری به کمک آزمایش SEM-EDX و سی‌تی‌اسکن به‌منظور ارزیابی میزان تخلخل و ارتباط آن بادوام در برابر نفوذ یون کلرید در بتن معمولی و بتن الیافی حاوی دو پوزولان پومیس و متاکائولن صورت گرفت.

۲. مواد

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ II مطابق با استاندارد ASTM C150، پودر پوزولان طبیعی پومیس واقع در شهر خاش (جنوب شرقی ایران) و پوزولان نیمه مصنوعی متاکائولن از شهر تهران استفاده شد. ویژگی‌های فیزیکی و آنالیز شیمیایی مواد سیمانی در جدول شماره (۱) ارائه شده است. برای همه طرح اختلاط‌ها، ماسه طبیعی با حداکثر اندازه ۴٫۷۵ میلی‌متر به عنوان سنگدانه ریز و شن با اندازه اسمی ۴٫۷۵-۱۹ میلی‌متر به عنوان سنگدانه درشت استفاده شد. در این مطالعه از الیاف پلی الفین و پلی پروپیلن به ترتیب با طول ۵۰ و ۱۲ میلی‌متر استفاده شد در این مطالعه از یک فوق روان کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات‌اتر و همچنین از حباب هوازا به میزان ۰٫۱ درصد جرمی مواد سیمانی، برای کلیه نمونه‌ها استفاده شد.

۳. برنامه آزمایشگاهی

راستا، یکی از مواردی که در این مقاله به آن پرداخته خواهد شد بررسی تأثیر دو پوزولان پومیس و متاکائولن بر میزان یون کلرید مقید شده در بتن معمولی و بتن الیافی می‌باشد. پوزولان طبیعی پومیس در ایران به وفور در شهر خاش و اسکندران یافت می‌شود. پومیس یک ماده پوزولانی آتشفشانی طبیعی بوده و متشکل از مواد معدنی و خاکستر آتشفشانی تلفیقی است که در هنگام فوران آتشفشان از آن خارج می‌شود. پژوهشگران دریافتند که جایگزینی سیمان با پومیس در بتن باعث افزایش مقاومت فشاری در سنین درازمدت، کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید در مقایسه با بتن بدون پوزولان می‌شود [5,11,12]. به تازگی کاظمیان و همکاران روی سیکل‌های نفوذ یون کلر در ملات حاوی پومیس پرداختند، که نتایج از بهبود ۷۵ درصدی عملکرد نمونه‌های حاوی پومیس شد [13]. علاوه بر این، استفاده از الیاف در بتن حاوی پومیس یک روش معمول برای بهبود دوام بتن در برابر خوردگی است [14]. بر اساس تحقیق منتشر شده توسط رمضانیان پور و همکاران، بتن الیافی حاوی الیاف پلی پروپیلن مقاومت بالایی در برابر نفوذ یون کلرید از خود نشان می‌دهد [15]. بر اساس نتایج زاید و همکاران، بتن الیافی حاوی پومیس عملکرد خوبی بر مبنای مقاومت خمشی، کششی و جذب مؤئینه از خود نشان می‌دهد [14]. متاکائولن دیگر ماده پوزولانی‌ای هست که در این تحقیق استفاده شده است. این ماده آمورف و غیر بلوری، ذرات آن به شکل ورقه‌ای هستند. متاکائولن از طریق کلسینه شدن رس کائولن خالص شده در دمای بالای ۷۰۰-۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شوند. متاکائولن همواره از سال ۱۹۹۰ با موفقیت به‌عنوان افزودنی در بتن استفاده شده است [16]. گروبر و همکاران نشان دادند که استفاده از ۸٪ و ۱۲٪ متاکائولن به شکل قابل‌توجهی ضریب انتشار یون کلرید در بتن را کاهش می‌دهد [17]. همچنین در مطالعه‌ای دیگر روی اثر مقدار آلومینیوم موجود در متاکائولن بر روی کلر مقید پرداختند [18]. استفاده از پوزولان‌ها درافزایش دوام بتن در محیط دریایی مورد توجه بوده است [19]. با این حال، اطلاعاتی درباره تأثیر پومیس و متاکائولن در میزان نفوذ یون کلرید آزاد و مقید در بتن معمولی و الیافی در معرض

Specific surface area:	2900	3920	4500
cm ² /g			
Ca (OH) ₂ fixed: mg	-	350	450

Table 1. Physical properties and chemical analysis of Type II Portland cement, metakaolin and pumice.

۳-۲- مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری روی ۷۲ نمونه مکعبی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر مکعب در سنین مختلف ۱، ۳، ۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۵ روز مطابق با استاندارد ASTM C39 / C39M-12 انجام شد. برای هر طرح اختلاط، آزمایش بر روی سه نمونه انجام شد و مقدار متوسط به عنوان مقاومت فشاری ارائه شد.

۳-۳- مقاومت خمشی

این آزمون با بارگذاری در نقطه مرکزی یک تیر خمشی منشوری به ابعاد ۱۵×۱۵×۶۰ سانتی متر مکعب در سنین مختلف ۷، ۲۸، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۵ روز برای همه طرح مخلوط های مورد مطالعه مطابق بر استاندارد ASTM C293 صورت گرفت. مقاومت خمشی هر طرح مخلوط بر مبنای مقدار متوسط آزمون بر روی سه نمونه در نظر گرفته شد.

۳-۴- مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید در محیط دریایی

۳-۴-۱- چگونگی عملکرد دستگاه شبیه سازی محیط دریایی

در این مقاله، غلظت یون های کلرید کلی، آزاد و همچنین مقید شده، تحت شرایط غوطه وری و جزر و مدی اندازه گیری شد. برای این آزمایش، دستگاهی متشکل از ۲ مخزن یکی برای شبیه سازی نفوذ یون کلرید در شرایط غوطه وری (مخزن شماره ۱) و دیگری برای شبیه سازی انتشار یون کلرید در شرایط جزر و مدی (مخزن شماره ۲) طراحی شد (شکل های ۱ و ۲). در مخزن شماره ۱، از یک پمپ آب و یک شیر برقی برای پمپاژ و تخلیه محلول نمک از مخزن شماره ۲ برای روند جزر و مد در هر ۱۲ ساعت به منظور شبیه سازی شرایط جزرومدی نزدیک به محیط دریایی استفاده شد. همچنین برای هر محفظه یک فن طراحی شد تا نمونه ها در شرایط جزر و مدی خشک شوند. غلظت محلول نمکی در این مطالعه ۴۰ گرم بر لیتر و درجه حرارت در دو مخزن در طول آزمایش ۲۳±۲ درجه سانتی گراد به صورت ثابت در کل دوره آزمایش در نظر گرفته شد.

۳-۱- طرح مخلوط ها و نحوه آماده سازی نمونه ها

تهیه و عمل آوری کلیه نمونه های بتنی با استفاده از آب شهری انجام شد. نسبت اختلاط شش مخلوط بتنی تهیه شده در این تحقیق در جدول شماره (۲) ارائه شده است. در تهیه نمونه های بتنی، ابتدا سنگدانه ها با ۳ آب مورد نیاز طرح در مخلوط کن ریخته و سپس اختلاط به مدت ۳ دقیقه انجام شد. در مرحله بعد، مواد سیمانی به مخلوط اضافه شده و اختلاط به مدت یک دقیقه ادامه یافت. پس از آن، فوق روان کننده، حباب هوازا و آب باقیمانده طرح اضافه شده و اختلاط تا زمان حصول ترکیب همگن تقریباً به مدت ۲ دقیقه ادامه یافت. پس از تهیه مخلوط بتنی، قالب های مکعبی و استوانه ای برای نمونه گیری پر شدند. سپس برای جلوگیری از دست رفتن رطوبت نمونه ها، به مدت ۲۴ ساعت در اتاق مرطوب با دمای ۲۲±۲ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. بر اساس استاندارد ASTM C192، بعد از ۲۴ ساعت قالب برداری صورت گرفت و نمونه ها برای انجام آزمایش های متعدد در سنین مختلف در آب نگهداری شدند.

جدول ۱. خواص فیزیکی و آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II، متاکائولن و پومیس.

پومیس متاکائولن سیمان	درصد وزنی اکسیدها (%)	تیپ II	
Loss on ignition	1.3	0.76	2.26
SiO ₂	21.74	80.76	65.9
Al ₂ O ₃	5.0	15.69	17.61
Fe ₂ O ₃	4.0	0.23	0.25
CaO	63.04	1.46	8.76
MgO	2	0.05	4.52
SO ₃	2.3	0.12	-
CO ₂	-	0.38	-
CaSO ₄	-	0.01	-
Cl	-	0.04	-
Insoluble residue	0.60	-	-
(Na ₂ O%+0.658K ₂ O %)	1	-	-
Na ₂ O+K ₂ O	-	-	0.41
Free Cao	1.4	-	-
Humidity	-	-	0.15
C ₃ S	45.5	-	-
C ₂ S	28.0	-	-
C ₃ A	6.5	-	-
C ₄ AF	12.2	-	-
Density: g/cm ³	3.15	2.49	2.58

روش پس از استخراج کلریدهای موجود در نمونه توسط حلال‌های مناسب (اسید نیتریک و آب) برای فرآیند فیلتراسیون انجام شد (شکل شماره ۴). در این آزمایش از دستورالعمل AFREM 1997 برای اندازه‌گیری غلظت یون کلرید کلی و آزاد در نمونه‌ها استفاده شد [21,22]. پس از آن، مقدار کلریدهای مقید شده با تفریق یون کلرید کلی از یون کلرید آزاد به دست آمد.

شکل ۳. دستگاه پروفایل گیری استفاده شده در این مطالعه برای بدست آوردن نمونه‌های پودری در اعماق مختلف از سطح تماس.

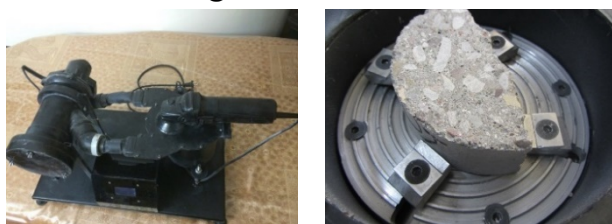


Fig. 4. The profiling machine used in this study to obtain powder samples at different depths of the contact surface.

شکل ۴. از بین رفتن و اندازه‌گیری کلرید آزاد و کلی، الف) دستگاه

فیلتراسیون، ب) دستگاه پتانسیومتر.

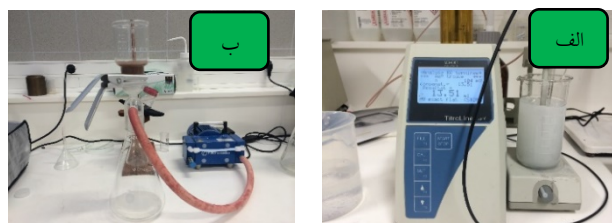


Fig. 5. Dissolution and measurement of free and total chloride, a) filtration device, b) potentiometer device.

۳-۵- آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

برای بررسی ساختار، شناخت فازهای هیدراتاسیون و مورفولوژی نمونه‌های بتنی غوطه‌ور شده در آب شهری از دستگاه FEI ESEM Quanta 200 استفاده شد. همچنین از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX)^۱ به منظور آنالیز عنصری سطح بتن بمنظور بررسی پدیده آبستتگی استفاده شد. برای این منظور نمونه‌های بتنی به قطعات ۱۰×۱۰ میلی‌متر برش داده شده و با یک‌لایه نازک از طلا پوشانده شدند و سپس سطح آن‌ها توسط دستگاه ارزیابی شد. آزمون SEM می‌تواند در شناخت فازهای هیدراتاسیون کمک فراوانی بکند.

این آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد $\phi 100 \times H60$ میلی‌متر در سن ۵۶ روز انجام شد. همچنین، برای هر طرح اختلاط سه نمونه در نظر گرفته شد. سطح کلیه نمونه‌ها به غیر از سطح فوقانی با رزین اپوکسی شد تا نفوذ یون‌های کلرید تنها از یک جهت نمونه صورت می‌گیرد [20]. این آزمایش برای شرایط غوطه‌وری و جزر و مدی در طی مدت ۲۶۰ روز برای کلیه طرح اختلاط‌ها انجام شد. در پایان آزمایش، نمونه‌ها به روش برزیلی به دو قطعه شکسته می‌شوند، که از یک قطعه به منظور اندازه‌گیری یون کلرید کلی، آزاد و مقید شده به روش پتانسیومتری استفاده می‌شود.

شکل ۱. شمای دستگاه آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی انتشار یون کلرید در شرایط غوطه‌وری و جزر و مد.

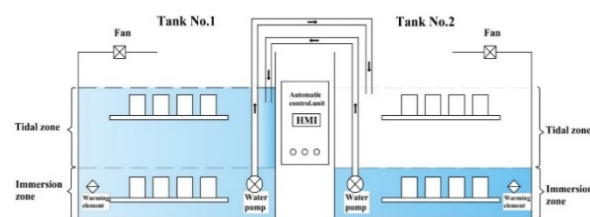


Fig. 2. Schematic of a laboratory device to simulate the release of chlorine ions under immersion and tidal conditions.

شکل ۲. الف) دستگاه شبیه‌سازی محیط غوطه‌وری و جزر و مد، ب) چگونگی قرارگیری نمونه‌ها در شرایط غوطه‌وری و جزر و مد.



Fig. 3. a) Simulators immersion environment and tides, b) placement of the samples in terms of immersion and tide.

۳-۴-۲- اندازه‌گیری یون‌های کلرید کلی، آزاد و مقید

در این مطالعه، پروفایل‌گیری از نمونه نیم قطعه بتنی در اعماق مختلف به توالی ۴ میلی‌متر با استفاده از دستگاه کاملاً اتوماتیک با دقت ۰٫۲ میلی‌متر که فقط برای این مطالعه و دیگر پروژه تحقیقاتی در گذشته ساخته شده بود، انجام شد (شکل شماره ۳). مقدار کلرید آزاد را می‌توان با اندازه‌گیری مقدار کلریدهای محلول در آب محاسبه کرد. اندازه‌گیری با رسوب محلول نیترات نقره با استفاده از دستگاه پتانسیومتر انجام شد. این

¹ Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

۳-۶- آزمون اسکن توموگرافی رایانه‌ای (CT scan)

استفاده شد. این آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۸۰ میلی‌متر که در آب شهری نگهداری شده‌اند، انجام شد.

آنالیز سی‌تی‌اسکن یک روش ارزشمند برای دریافتن حفره‌های موجود در نمونه بتنی است. با این روش می‌توان مقایسه‌ای بین نمونه‌های ساخته شده از لحاظ تخلخل سطحی داشت. در این پژوهش، از دستگاه اسکنر Toshiba Aquilion 16 CT

جدول ۲. نسبت مواد تشکیل دهنده بتن در طرح مخلوط‌های مورد مطالعه (kg/m^3).

الیاف پلی الفین	الیاف پلی پروپیلن	فوق روان کننده	حباب هوازا	ماسه شن	نسبت آب به مواد سیمانی	پومیس متاکائولن	سیمان	آب	کد طرح
-	-	2.02	0.37	1030	0.36	-	370	133.2	CC
-	-	2.25	0.37	1030	0.36	55.5	314.5	133.2	P15
-	-	2.38	0.37	1030	0.36	55.5	314.5	133.2	M15
4	0.8	3.41	0.37	1030	0.36	-	370	133.2	PO
4	0.8	3.9	0.37	1030	0.36	55.5	314.5	133.2	PO+P15
4	0.8	4.44	0.37	1030	0.36	55.5	314.5	133.2	PO+M15

Table 2. Concrete components ratio in the design of the studied mixtures (kg/m^3).

هر نمونه بتنی به ضخامت ۱ میلی‌متر با منبع ثابت اشعه X در حالت ۱۲۰ کیلوولت و ۷۵ میلی‌آمپر اسکن شد. در پایان، تصاویر به دست آمده از سی‌تی‌اسکن توسط نرم‌افزار ImageJ (v1.52) برای بررسی ساختار بتن مورد پردازش قرار گرفت (شکل شماره ۵).
شکل ۵. تصویر روند آنالیز سی‌تی‌اسکن: الف) دستگاه سی‌تی‌اسکن، ب) نتایج خروجی از آنالیز سی‌تی‌اسکن.

هر نمونه بتنی به ضخامت ۱ میلی‌متر با منبع ثابت اشعه X در حالت ۱۲۰ کیلوولت و ۷۵ میلی‌آمپر اسکن شد. در پایان، تصاویر به دست آمده از سی‌تی‌اسکن توسط نرم‌افزار ImageJ (v1.52) برای بررسی ساختار بتن مورد پردازش قرار گرفت (شکل شماره ۵).
شکل ۵. تصویر روند آنالیز سی‌تی‌اسکن: الف) دستگاه سی‌تی‌اسکن، ب) نتایج خروجی از آنالیز سی‌تی‌اسکن.

در نتیجه توزیع غیریکنواخت الیاف در ماتریس سیمانی دارد. زیرا در نتیجه توزیع غیریکنواخت و تجمع کمتر الیاف در بعضی از قسمت‌ها، فضاهای متخلخل در بتن ایجاد می‌شود که به دنبال آن منجر به کاهش مقاومت فشاری در بتن الیافی می‌شود. در واقع، اختلاط الیاف باعث نقص در ساختار فشاری بتن می‌شود که ناشی از ظهور منطقه ضعیف انتقال بین الیاف و دیگر اجزای بتن است [23]. علاوه بر این، مناطق حاوی الیاف می‌توانند باعث افزایش تجمع تنش و ایجاد ترک‌هایی در نزدیکی فضاهای انتقال شوند [24]. این نتایج با مطالعات انجام شده در ادبیات گذشته روی بتن تقویت شده با الیاف هماهنگی دارد [25-28].

شکل ۶. مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های مورد مطالعه در سنین مختلف نگهداری.

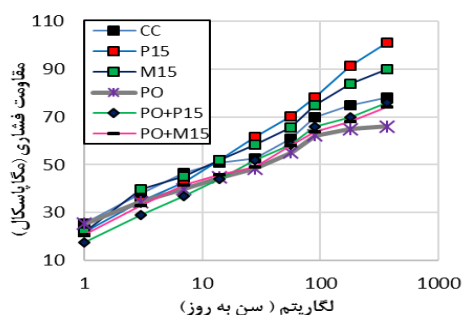


Fig. 6. Compressive strength of the studied mixtures at

شکل ۵. تصویر روند آنالیز سی‌تی‌اسکن: الف) دستگاه سی‌تی‌اسکن، ب) نتایج خروجی از آنالیز سی‌تی‌اسکن.

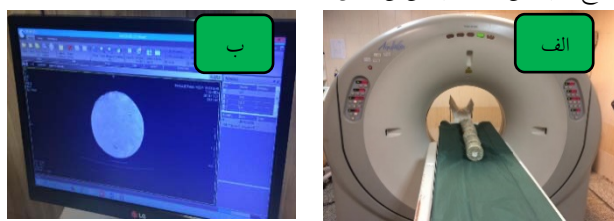


Fig. 1. Image of CT scan analysis process: a) CT scan machine, b) Results of CT scan analysis.

۴. نتایج

۴-۱- مقاومت فشاری

رشد مقاومت فشاری مخلوط‌ها در سنین ۱، ۳، ۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۵ به عنوان تابعی از زمان (روز) در شکل (۶) ارائه شده است. بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل (۶)، مقاومت فشاری در مخلوط‌های M15 و P15 از سن ۱۴ تا ۳۶۵ روز در مقایسه با بتن شاهد (CC) بیشتر است. اما، این افزایش در مخلوط P15 قابل توجه تر از مخلوط M15 است. مقاومت فشاری در مخلوط P15 به ترتیب ۱،۰۳، ۱،۱۷، ۱،۱۵، ۱،۱۱، ۱،۲۲ و ۱،۳ برابر بیشتر از بتن شاهد در سنین ۱۴، ۲۸،

at different curing ages.

بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل (۷)، بیشترین مقاومت خمشی مربوط به مخلوط PO+P15 در سن ۳۶۵ روز و کمترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه شاهد (CC) در سن ۷ روزه است. مقاومت خمشی مخلوط PO + P15، ۱،۳۷، ۱،۴۲، ۱،۳۸، ۱،۳۱ و ۱،۳ برابر بیشتر از مقاومت خمشی نمونه شاهد به ترتیب در سنین ۷، ۲۸، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۵ روز است. جایگزینی سیمان با ۱۵٪ متاکائولن یا پومیس در بتن معمولی باعث افزایش مقاومت خمشی در تمام سنین نگهداری شد. علاوه بر این، با استفاده از الیاف پلی الفین و پلی پروپیلن در تمام سنین نگهداری، افزایش قابل ملاحظه‌ای در روند رو به رشد مقاومت خمشی نسبت به بتن شاهد مشاهده شد. این رفتار مثبت وقتی که پوزولان‌ها به ویژه در حالتی که ۱۵٪ پومیس به جای سیمان در بتن الیافی استفاده شد، به مراتب قابل ملاحظه‌تر بود. بر اساس این مطالعه، استفاده از مواد پوزولانی به ویژه پودر پومیس در بتن معمولی و الیافی برای افزایش مقاومت خمشی مؤثر است.

۳-۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDX)

در این مطالعه برای بررسی اثر دو پوزولان متاکائولن و پومیس روی ریزساختار و ترکیبات فازی بتن معمولی و بتن الیافی، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به همراه طیف سنجی EDX از نمونه‌های مورد مطالعه در سن ۳۶۵ روز در شرایط نگهداری در آب گرفته شد. بر اساس تصاویر نشان داده شده در شکل (۸)، CSH و CH، دو ترکیب هیدراته شده اصلی برای کلیه نمونه‌ها مشاهده شدند. تصاویر SEM از نمونه CC نشان می‌دهد که فازهای CSH (آمورف) و CH (بلوری) به خوبی در سرتاسر سنگدانه‌ها پخش شده‌اند. همچنین مورفولوژی دیگری همچون آلبیت یا کوارتز در نمونه CC مشاهده شد. تصاویر SEM از مخلوط‌های P15 و M15 نشان می‌دهد که استفاده از پودر پوزولان منجر به تولید فاز اترینگایت (E) شد که به دنبال تخلخل ساختار نمونه را افزایش داده است. مورد مذکور با نتیجه ارائه شده در خصوص حفره‌های موجود در بتن سخت شده بر اساس آنالیز

different curing ages.

بر اساس نتایج به دست آمده، روند افزایش مقاومت فشاری متاکائولن و پومیس در بتن معمولی در مقایسه با مخلوط متناظر در بتن الیافی یکسان می‌باشد. اثر مثبت هر دو پوزولان در افزایش مقاومت فشاری به دلیل واکنش‌پذیری بالا بر مبنای میزان مصرف Ca(OH)_2 همان‌گونه که در جدول (۱) ارائه شده است، می‌باشد. مقدار بالای مصرف Ca(OH)_2 در پوزولان پومیس در مقایسه با متاکائولن منجر به افزایش واکنش‌های پوزولانی در نمونه‌های حاوی پومیس به نسبت نمونه‌های حاوی متاکائولن می‌شود [4,10].

بنابراین به دنبال واکنش‌های پوزولانی ژل سیلیکات کلسیم بیشتری تولید می‌شود که در افزایش مقاومت فشاری نقش بسزایی دارد. شایان ذکر است که مقاومت فشاری بالا بیانگر مقدار کم آب قابل تبخیر و همچنین رفتار دوامی بالا ناشی از مقدار بالای آب غیرقابل تبخیر می‌باشد [4]. این اثر توسط مخلوط حاوی ۱۵٪ پومیس در مخلوط‌های P15 و PO + P15 از نتایج ارائه شده در شکل (۶) به خوبی مشهود است. نتیجه تأثیر مثبت متاکائولن و پومیس در مقاومت فشاری بتن با نتایج آزمایشگاهی تحقیقات قبلی انجام شده روی انواع مختلف بتن با متاکائولن و پومیس رابطه نزدیکی دارد [4,5,26,29].

۲-۴- مقاومت خمشی

مقاومت خمشی مخلوط‌ها بر اساس متوسط مقاومت سه نمونه آزمایش شده پس از سنین ۷، ۲۸، ۹۰، ۱۸۰ و ۳۶۵ روز در شکل (۷) ارائه شده است.

شکل ۷. مقاومت خمشی طرح مخلوط‌های مورد مطالعه در سنین مختلف نگهداری.

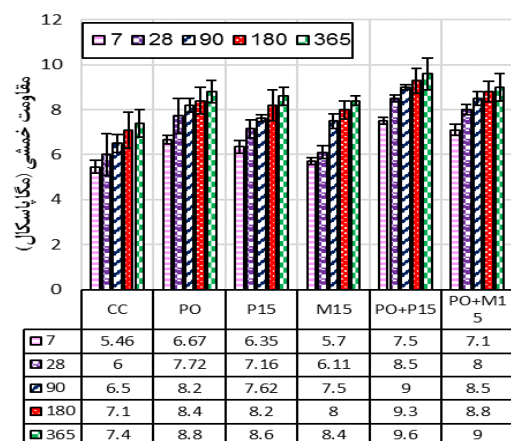
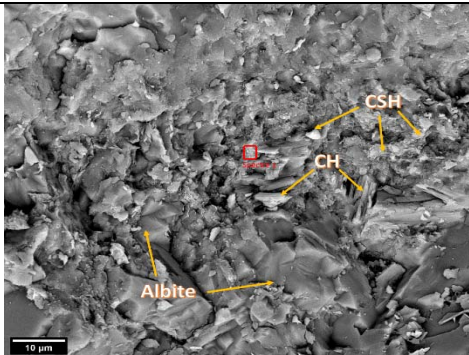
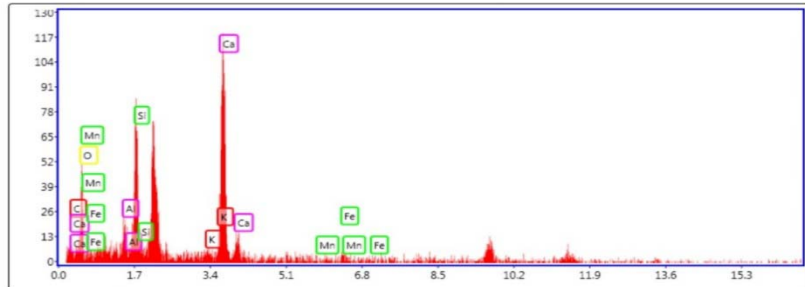
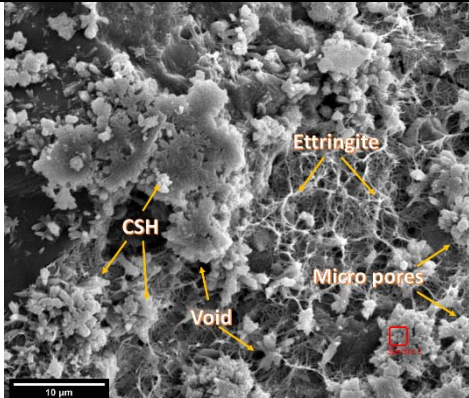
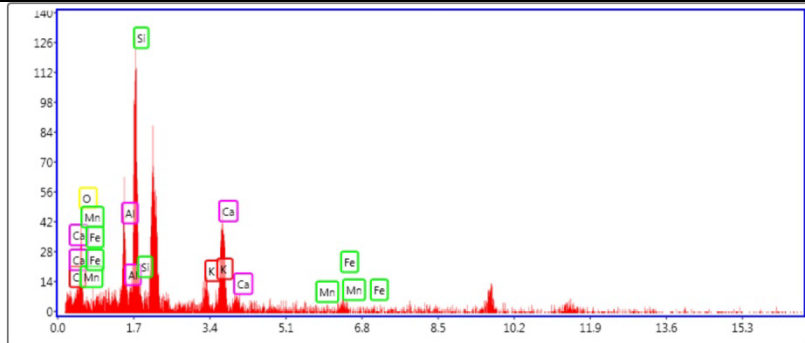
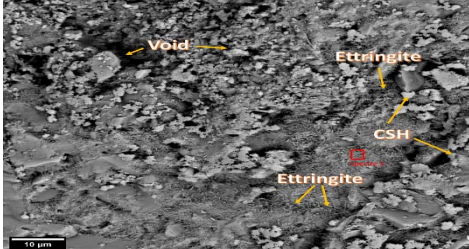
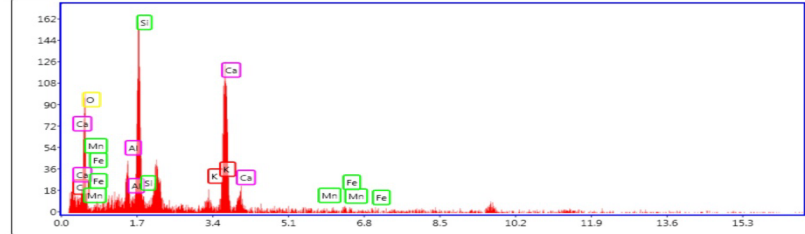


Fig. 7. Flexural strength of the design of the studied mixtures

سی‌تی‌اسکن در بخش بعدی مطابقت دارد. شکل‌گیری اترینگایت در مخلوط‌های حاوی پوزولان به دلیل Al_2O_3 موجود در پودر متاکائولن و پومیس است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۸)، تصویر SEM از مخلوط PO نشان از وجود حفرات ساختاری ناشی از توزیع غیریکنواخت الیاف در بتن است. با این حال، حفرات بیشتری در مخلوط‌های PO + P15 و PO + M15 در مقایسه با نمونه‌های دیگر مشاهده شد. بر اساس این نتایج، تشکیل اترینگایت مشابه در مخلوط‌های P15 و M15 به ترتیب برای ساختار PO + P15 و PO + M15 مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که جایگزینی سیمان با پوزولان و استفاده از الیاف یک اثر هم‌افزایی در ایجاد یک ساختار متخلخل را دارند.

شکل ۸: تصاویر SEM و طیف‌سنجی EDX از نمونه‌های مورد مطالعه در سن ۳۶۵ روز نگهداری در آب.

CC			C	0.17	Ca/Si = 1.5
			O	45.44	
			Al	4.01	
			Si	14.8	
			K	1.09	
Ca	30.63				
Mn	1.46				
Fe	2.4				
Status: Idle CPS: 657 DT: 3.2 Lsec: 7.7 0 Cnts 0.000 keV Det: Element-C28					
P15			C	0.13	Ca/Si = 0.9
			O	51.14	
			Al	5	
			Si	17.78	
			K	1.63	
Ca	22.41				
Mn	0.72				
Fe	1.19				
Status: Idle CPS: 645 DT: 3.1 Lsec: 7.8 0 Cnts 0.000 keV Det: Element-C28					
M15			C	0.33	Ca/Si = 0.4
			O	38.34	
			Al	9.29	
			Si	28.25	
			K	3.48	
Ca	16.08				
Mn	0.85				
Status: Idle CPS: 894 DT: 3.5 Lsec: 7.8 0 Cnts 0.000 keV Det: Element-C28					

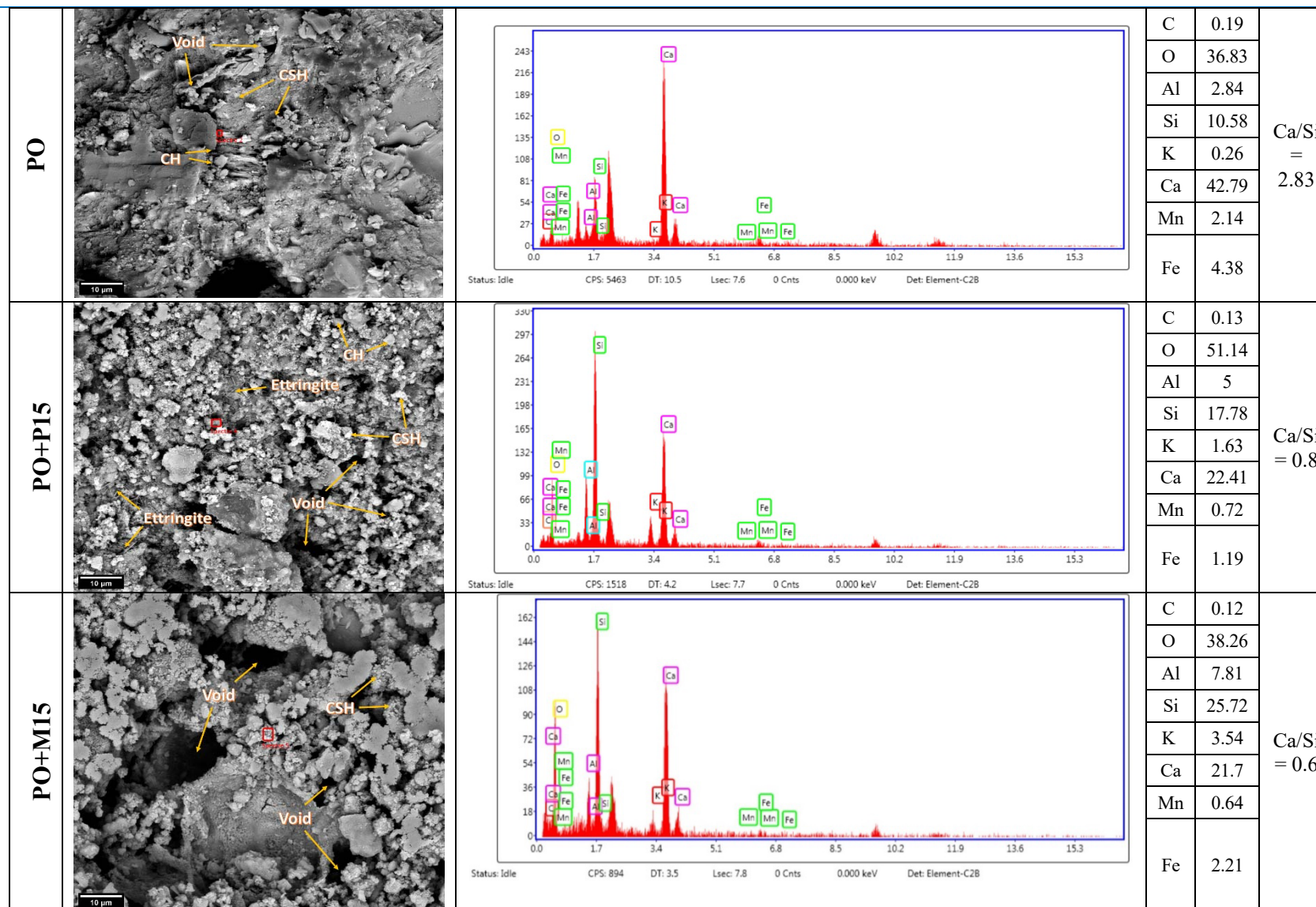


Fig. 8. SEM images and EDX spectroscopy of the studied samples at 365 days of water curing.

سی‌تی‌اسکن که می‌تواند منجر به شناسایی حفره‌ها در سازه بتنی شود را نشان می‌دهد. در نهایت برای درک بهتر از رفتار بتن در این شرایط، حفرات شمارش و اندازه‌گیری شدند. بر اساس تصاویر نشان داده‌شده در شکل (۹)، نمونه‌های حاوی پوزولان معرف ساختار متخلخلی در بتن هستند. در مخلوط‌های M15 و PO+M15، سطح تجمعی حفرات در سطح مقطع بسیار بیشتر از مخلوط‌های دیگر است (جدول ۳). علاوه بر این، بیشترین مقدار در اندازه متوسط منافذ و تعداد حفرات در ساختار مخلوط PO+M15 نشان می‌دهد که طرح مذکور به‌مراتب متخلخل‌تر است. همچنین، شکل (۹) منحنی تراکم توزیع حفرات در نمونه‌های بتنی عمل‌آوری شده در آب را نشان می‌دهد. منحنی تراکم توزیع حفرات بر مبنای مدل لورنتز است که کاملاً با توزیع حفره‌ها در ساختار بتن هماهنگی دارد. در این مورد، عملکرد نقطه اوج لورنتز با شکل زنگوله‌ای و دم‌های گسترده‌تر از نظر ظاهری بسیار نزدیک‌تر از عملکرد گوسی است که در مطالعات قبلی استفاده شده بود [33]. بر اساس شکل (۹)، منحنی توزیع نرمال در قسمت اول متمرکز شده و در هر دو طرف کاهش می‌یابد و مساحت کل منافذ بیشتر در محدوده کمتر از ۱ میلی‌متر مربع برای همه نمونه‌ها است. برای مخلوط CC، توزیع اندازه منافذ محدود است در حالیکه در مخلوط‌های M15 و PO+M15 گسترده‌تر است. این نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی متاکائولن دارای حفره‌های بیشتری نسبت به نمونه شاهد هستند. درحالی‌که حفرات مخلوط‌های P15 و PO+P15 بسیار کمتر از M15 و PO+M15 است.

جدول (۳) پارامترهای به دست آمده از نرم‌افزار Image J را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی پوزولان با سیمان منجر به افزایش تعداد حفرات در ساختار بتن می‌شود. همان‌طور که نشان داده‌شده است مخلوط PO+M15 حاوی الیاف و متاکائولن، دارای تخلخل بیشتری در مقایسه با مخلوط‌های دیگر است و همچنین نمونه شاهد دارای اندازه متوسط منافذ کمتری است. این نتایج نشان می‌دهد که هم الیاف و هم پوزولان تخلخل را در ساختار بتن افزایش می‌دهند. بنابراین، میزان تخلخل در بتن (CC < PO+M15 < M15 < PO+P15 < P15 < PO) با نتایج ریزساختار از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی هماهنگی کامل دارد.

از سوی دیگر فاز CH نیز به‌ندرت در ساختار مخلوط‌های حاوی پوزولان مشاهده می‌شود که می‌تواند به دلیل حضور مواد پوزولانی در ماتریس سیمانی و مصرف CH در واکنش‌های پوزولانی برای تولید ژل CSH پوزولانی در طی ۳۶۵ روز نگهداری در آب باشد. به دنبال این فرآیند باعث افزایش خواص مکانیکی در مخلوط‌های حاوی متاکائولن و پومیس می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که با وجود تخلخل ناشی از تولید اترینگایت در مخلوط‌های حاوی پوزولان، خواص مکانیکی بالای آن‌ها متأثر از مصرف پورتلاندیت برای تولید ژل CSH پوزولانی در آن‌ها است.

بر مبنای ادبیات موضوع، می‌توان نتیجه گرفت که CSH دارای مورفولوژی درخشان و گچی است [28]. همچنین، نشان داده شده است که فاز CSH را می‌توان با نسبت مولی Ca/Si شناسایی کرد. کمترین و بیشترین نسبت مولی Ca/Si در فاز CSH به ترتیب ۰٫۷ و ۲٫۱ است [30]. از سوی دیگر، استفاده از ترکیبات پوزولانی منجر به کاهش نسبت Ca/Si در مقایسه با سیمان پرتلند خالص می‌شود. این مسئله می‌تواند ناشی از فراوانی عنصر Si و کمبود یا فقدان عنصر Ca در ترکیبات پوزولانی باشد [31]. بر اساس نتایج طیف EDX از نمونه‌های مورد مطالعه، نسبت Ca/Si در مخلوط‌های CC و PO در مقایسه با دیگر نمونه‌ها بیشتر است که این نسبت زیاد به ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند ارتباط دارد. قابل ذکر است که نسبت Ca/Si در نمونه‌های حاوی پوزولان کمتر از ۱ است، که می‌تواند به دلیل مقدار کم یون کلسیم و مقدار زیاد سیلیس در مواد پوزولانی باشد.

۴-۴- نتایج آنالیز سی‌تی‌اسکن

در این مطالعه، طرح مخلوط‌های مختلفی پس از ۳۶۵ روز عمل‌آوری در آب با سی‌تی‌اسکن اشعه ایکس مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین جهت بررسی دقیق‌تر، تمرکز روی همه تصاویر سی‌تی‌اسکن در ابعاد مزوسکوپی انجام شد و پارامترهایی همچون اندازه متوسط منافذ و توزیع آن‌ها با نرم‌افزار Image J ارزیابی شدند. بدین ترتیب که نقاط تاریک به عنوان حفرات درون ساختار بتن فرض شد و سپس آنالیز اندازه ذرات در محدوده آستانه بین ۷۰ تا ۸۵ برای حداقل اندازه متوسط ذرات بیش از ۰٫۵ میلی‌متر مربع اندازه‌گیری شد [32]. شکل (۹) مراحل فرآیند ارزیابی تصویر

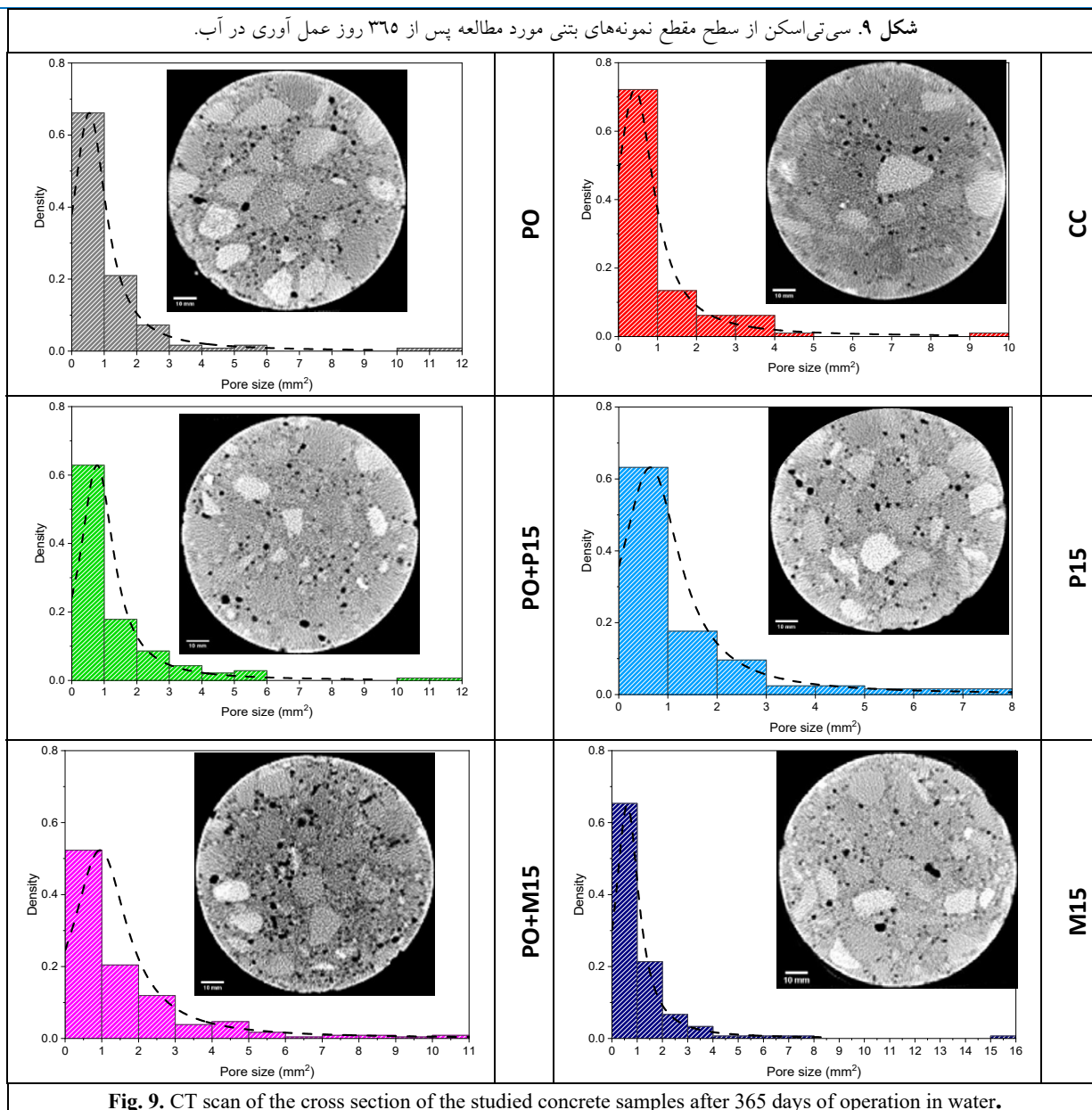


Fig. 9. CT scan of the cross section of the studied concrete samples after 365 days of operation in water.

جدول ۳. اندازه متوسط، تعداد و سطح کلی حفرات نمونه های بتنی مورد مطالعه پس از ۳۶۵ روز عمل آوری در آب.

کد طرح	اندازه متوسط حفرات (میلی متر مربع)	تعداد	مساحت کل (میلی متر مربع)
CC	1.027	97	99.71
P15	1.2	125	155.2
M15	1.25	151	189
PO	1.120	124	139.01
PO+P15	1.31	132	173.1
PO+M15	1.1	240	341.2

Table 3. Average size, number and overall surface area of concrete samples studied after 365 days of water curing.

شکل ۱۰: غلظت یون کلرید آزاد در اعماق مختلف نمونه‌های بتنی مورد مطالعه تحت اثر شرایط غوطه‌وری و جزر و مد.

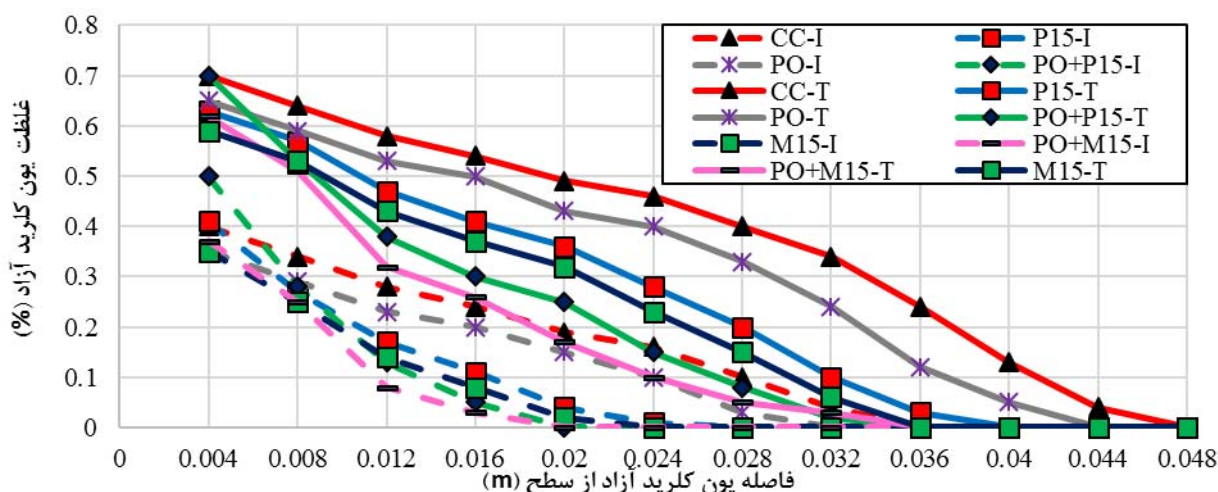


Fig. 10. The concentrations of free chlorine ions in the concrete samples were measured at different depths under the impact of immersion and tidal conditions.

شکل ۱۱: غلظت یون کلرید کلی در اعماق مختلف نمونه‌های بتنی مورد مطالعه تحت اثر شرایط غوطه‌وری و جزر و مد.

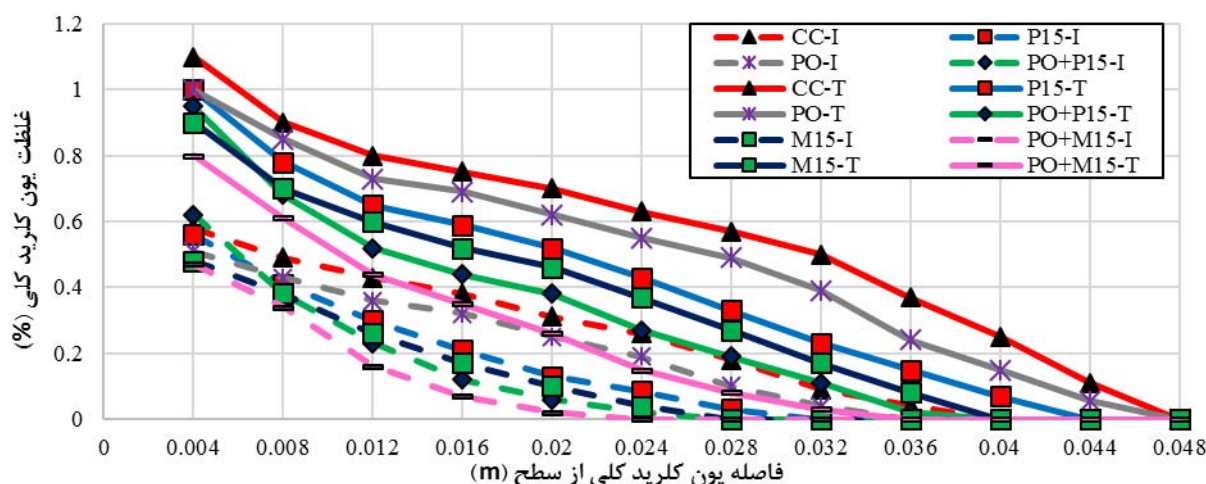


Fig. 11. The concentrations of total chlorine ions in the concrete samples were measured at different depths under the impact of immersion and tidal conditions.

شکل ۱۲: غلظت یون کلرید مقید در اعماق مختلف نمونه‌های بتنی مورد مطالعه تحت اثر شرایط غوطه‌وری و جزر و مد.

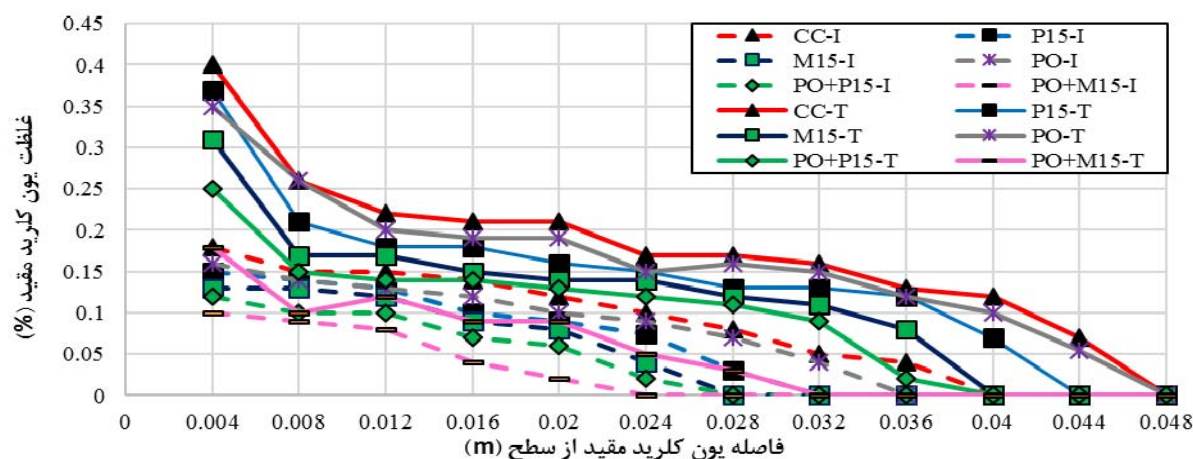


Fig. 12. The concentrations bound chlorine ions in the concrete samples were measured at different depths under the impact of immersion and tidal conditions.

۵-۴- نفوذ یون کلرید در شرایط محیط دریایی

شبیه سازی شده

اشکال ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب پروفایل هایی از یون کلرید آزاد، کلی و مقید را در اعماق مختلف در هر ۴ میلیمتر از نمونه های مورد مطالعه تحت اثر شرایط غوطه وری (I) و جزر و مد (T) در محلول نمکی با غلظت ۴۰ گرم بر لیتر در طی ۲۶۰ روز آزمایش را نشان می دهند. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل های (۱۰، ۱۱ و ۱۲) میزان نفوذ کلرید تحت شرایط جزر و مد در مقایسه با شرایط غوطه وری به دلیل تولید بلورهای نمکی کریستالیزه روی سطح بتن در فرآیند تر و خشک شدن در طی دوره آزمایش بیشتر است.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل های (۱۰، ۱۱ و ۱۲) میزان نفوذ کلرید تحت شرایط جزر و مد در مقایسه با شرایط غوطه وری به دلیل تولید بلورهای نمکی کریستالیزه روی سطح بتن در فرآیند تر و خشک شدن در طی دوره آزمایش بیشتر است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۰)، مقدار یون های کلرید آزاد تحت شرایط غوطه وری و جزر و مدی در تمام اعماق مخلوط PO نسبت به بتن شاهد کمتر بود. همچنین، مخلوط های M15 و P15 مقدار یون کلرید آزاد کمتری را در مقایسه با بتن شاهد از خود نشان دادند. برحسب این نتایج، اثر مثبت جایگزینی متاکائولن و پومیس به جای سیمان در بتن الیافی (PO+M15 و PO+P15) در راستای کاهش میزان کلرید آزاد کاملاً مشهود است و نشان دهنده عمق نفوذ کمتر از ۲ سانتی متر است و نسبت به نمونه شاهد ۵۸,۳ درصد کمتر است. این اثر مثبت در طرح PO+M15 بیشتر مشهود بود. در شکل (۱۱)، مقدار یون های کلرید کلی تحت اثر شرایط غوطه وری و جزر و مد در همه مخلوط ها همان روند ظاهر شده در نمودار مربوط به مقدار یون های کلرید آزاد را نشان می دهد. بر مبنای نتایج آنالیز سی تی اسکن، میزان تخلخل سطحی بر پایه میانگین اندازه منافذ در مخلوط PO بیشتر از نمونه شاهد است. این مسئله در بتن الیافی حاوی متاکائولن و یا پومیس قابل ملاحظه هست. برعکس، نتایج غلظت کلرید آزاد و کلی نشان می دهد که اختلاط الیاف با مواد سیمانی همچون متاکائولن و پومیس برای کاهش نفوذ کلرید در بتن

مقید است. بدین ترتیب در هنگام نفوذ کلرید، دو عامل مهم همچون کاهش غلظت مایع منفذی توسط واکنش های پوزولانی که منجر به کاهش رسانایی می شود و همچنین تبدیل منافذ پیوسته به منافذ ناپیوسته در بتن الیافی نقش مهمی را در مقایسه با عامل تخلخل ایفا می کنند [34].

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۲)، مقدار کلرید مقید در کلیه اعماق نمونه شاهد (CC) در شرایط غوطه وری و جزر و مد در مقایسه با سایر طرح مخلوط ها بیشتر بود. مقدار کم کلرید مقید در مخلوط های حاوی متاکائولن یا پومیس به دلیل زیر قابل توجیه است:

مقدار کلرید های مقید شده در بتن به نسبت CaO/SiO_2 بستگی دارند [35]. نسبت پائین CaO/SiO_2 در ماتریس سیمانی نمونه های بتنی حاوی متاکائولن یا پومیس منجر به کاهش ظرفیت اتصال یون های کلرید می شود. زیرا بار مثبت بر روی سطح منافذ اندک است که به دنبال آن منجر به کاهش جذب یون های کلرید با بار منفی می شوند. در متاکائولن و یا پومیس، مقادیر CaO و SiO_2 به ترتیب بیشتر و کمتر از سیمان است. بنابراین، مخلوط های حاوی پوزولان دارای نسبت CaO/SiO_2 کمتری نسبت به مخلوط فاقد پوزولان هستند که در نهایت منجر به کاهش ظرفیت اتصال فیزیکی کلریدها در آن مخلوط ها می شود. نتایج به دست آمده از یون های کلرید مقید برای مخلوط های حاوی پوزولان در این تحقیق با نتایج T, Nguyen (۲۰۰۶) برای مخلوط های مبتنی بر CEM [36] V و نتیجه ارائه شده توسط صمیمی و همکاران [37] مطابقت داشت.

۵. نتیجه گیری

جایگزینی سیمان پرتلند به میزان ۱۵٪ با پومیس یا متاکائولن در بتن معمولی و بتن الیافی به دلیل واکنش پوزولانی آنها در افزایش مقاومت فشاری موثر است. بر این اساس، مقاومت فشاری پومیس و متاکائولن به نسبت نمونه معمولی ۳۰٪ و ۱۵٪ افزایش در سن ۳۶۵ روز نشان داد. برعکس، استفاده از الیاف پلی پروپیلن و پلی الفین به دلیل توزیع غیریکنواخت آنها در بتن تأثیر منفی بر افزایش مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد دارد. با این حال، افزایش مقاومت خمشی با استفاده از

الیاف در بتن محقق شد، به صورتی که، در نمونه حاوی الیاف پومیس و متاکائولن به ترتیب ۲۹٪ و ۲۱٪ افزایش مقاومت خمشی نشان دادند. علاوه بر این، اختلاط پومیس و متاکائولن باعث افزایش مقاومت خمشی در هر دو بتن معمولی و الیافی شدند. ساختار داخلی بتن‌ها با آنالیز سی‌تی‌اسکن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی ترکیبات پوزولانی تخلخل سطحی بیشتری نسبت به مخلوط‌های بدون افزودنی دارند. همچنین، مخلوط PO+M15 با افزایش اندازه متوسط منافذ نمایانگر طیف وسیعی از بیشترین حفرات در ساختار بتن در مقایسه با دیگر نمونه‌ها می‌باشد که کاملاً با تصاویر برگرفته از آزمایش SEM مطابقت دارد.

تصاویر SEM از مخلوط‌های حاوی پوزولان نشان داد که استفاده از پودر پوزولان منجر به تولید فاز اترینگایت (E) گردیده که متعاقباً منجر به افزایش تخلخل در ساختار نمونه می‌شود. مورد مذکور با نتیجه ارائه شده در خصوص حفره‌های موجود در بتن سخت شده بر اساس آنالیز سی‌تی‌اسکن مطابقت دارد. همچنین، تصویر SEM از مخلوط PO نشان از وجود حفرات ساختاری ناشی از توزیع غیریکنواخت الیاف در بتن است. با این حال، حفرات بیشتری در مخلوط PO + M15 در مقایسه با نمونه‌های دیگر مشاهده شد. بر مبنای تصاویر SEM فاز CH به‌ندرت در ساختار مخلوط‌های حاوی پوزولان مشاهده می‌شود که می‌تواند به دلیل مصرف CH در واکنش‌های پوزولانی برای تولید ژل CSH پوزولانی باشد. متعاقباً این فرآیند باعث افزایش خواص مکانیکی در مخلوط‌های حاوی متاکائولن و پومیس می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که با وجود تخلخل ناشی از تولید اترینگایت در مخلوط‌های حاوی پوزولان، خواص مکانیکی بالای آن‌ها متأثر از مصرف پورتلاندیت برای تولید ژل CSH پوزولانی در آن‌ها است. همچنین طیف EDX نمونه‌های حاوی پوزولان نشان می‌دهد که نسبت Ca/Si در آن‌ها کمتر از نمونه‌های فاقد پوزولان است.

اختلاط پومیس و متاکائولن در بتن معمولی و الیافی منجر به کاهش مقدار یون‌های کلرید کلی، آزاد و مقید در شرایط غوطه‌وری و جزر و مد شد. بر این اساس، بیشترین عمق میزان

نفوذ یون کلرید آزاد، مقید و کل در بتن الیافی با ۱۵ درصد جایگزینی سیمان با متاکائولن به ترتیب ۴۴٪، ۴۰٪ و ۴۰٪ کاهش نسبت به نمونه شاهد در شرایط غوطه‌وری داشت و همچنین در شرایط جزر و مد نیز به ترتیب ۲۵٪، ۲۵٪ و ۳۳٪ درصد کاهش مشاهده شد. میزان کلرید مقید کاهش یافته در مخلوط‌های حاوی پوزولان می‌تواند به دلیل مقدار کم نسبت CaO/SiO_2 برگرفته از آنالیز شیمیایی و همچنین نسبت پائین Ca/Si ناشی از طیف EDX در این مخلوط‌ها در مقایسه با نمونه‌های بدون پوزولان باشد. به دنبال این بار مثبت در ماتریس سیمانی کاهش و بالطبع ظرفیت اتصال یون‌های کلرید با بار منفی پائین خواهد بود.

بر مبنای نتایج آنالیز سی‌تی‌اسکن، میزان تخلخل سطحی بر پایه میانگین اندازه منافذ در مخلوط PO بیشتر از نمونه شاهد است. این مسئله در بتن الیافی حاوی متاکائولن و یا پومیس بیشتر نمایان است. برعکس، نتایج غلظت کلرید آزاد و کلی نشان می‌دهد که اختلاط الیاف با مواد سیمانی همچون متاکائولن و پومیس برای کاهش نفوذ کلرید در بتن مفید است. بدین ترتیب در هنگام نفوذ کلرید، دو عامل مهم همچون کاهش غلظت مایع منفذی توسط واکنش‌های پوزولانی که منجر به کاهش رسانایی می‌شود و همچنین تبدیل منافذ پیوسته به منافذ ناپیوسته در بتن نقش مهمی را در مقایسه با عامل تخلخل سطحی ایفا می‌کنند.

بر اساس مطالعات متعدد در ادبیات گذشته، ترکیب الیاف در بتن می‌تواند مقاومت خمشی را افزایش داده و همچنین میزان ترک‌خوردگی را کاهش دهد. با این حال، همواره بررسی نفوذ یون کلرید یکی از عوامل ضروری برای ارزیابی دوام سازه‌های بتنی حاوی الیاف بوده است. با توجه به نتایج، توصیه می‌شود برای افزایش خواص مکانیکی و مقاومت در برابر نفوذ کلرید در محیط‌های دریایی، از ۱۵٪ جایگزینی سیمان با پومیس در بتن الیافی برای مصارف صنعت حمل‌ونقل همچون روسازی‌های بتنی و پایه‌های پل استفاده شود.

۶. قدردانی

نویسندگان مقاله تشکر ویژه‌ای از جناب آقای مهندس

Building Materials, 198, 207–217.

- [9]- Omrane M., S. Kenai, E. H. Kadri, A. Aït-Mokhtar, 2017 Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan, *Journal of Cleaner Production*, 165, 415–430.
- [10]- 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.
- [11]- Chambua S. T., Y. A. C. Jande, R. L. Machunda, 2021 Strength and Durability Properties of Concrete Containing Pumice and Scoria as Supplementary Cementitious Material, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021.
- [12]- Soleimani A., S. A. H. Hashemi, 2018 Investigation of mechanical and durability properties of lightweight concrete containing Pumice, *Journal of Structural Engineering and Geo-Techniques*, 8(1), 55–67.
- [13]- Kazemian M., S. Sedighi, A. A. Ramezani pour, F. Bahman-Zadeh, A. M. Ramezani pour, 2021 Effects of cyclic carbonation and chloride ingress on durability properties of mortars containing Trass and Pumice natural pozzolans, *Structural Concrete*.
- [14]- Zeyad A. M., A. H. Khan, B. A. Tayeh, 2020 Durability and strength characteristics of high-strength concrete incorporated with volcanic pumice powder and polypropylene fibers, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 806–818.
- [15]- Ramezani pour A. A., M. Esmaeili, S. A. Ghahari, M. H. Najafi, 2013 Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers, *Construction and Building Materials*, 44, 411–418.
- [16]- Al-Khalili A. M., A. S. Ali, A. J. Al-Taie, 2021 Effect of metakaolin and silica fume on the engineering properties of expansive soil, *Journal of Physics: Conference Series*, 1895(1), 801–807.
- [17]- Gruber K. A., T. Ramlochan, A. Boddy, R. D. Hooton, M. D. A. Thomas, 2001 Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin, *Cement and Concrete*

رحمت‌الله حکیمی مدیرعامل محترم شرکت مهندسان مشاور ایمن راه برای حمایت مالی این پروژه تحقیقاتی دارند. همچنین از آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید بهشتی برای کمک به آزمایش‌های ریزساختاری، تشکر می‌نمایند.

۷. منابع

- [1]- Fu Q., D. Niu, J. Zhang, D. Huang, M. Hong, 2018 Impact response of concrete reinforced with hybrid basalt-polypropylene fibers, *Powder Technology*, 326, 411–424.
- [2]- Karataş M., A. Benli, A. Ergin, 2017 Influence of ground pumice powder on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars, *Construction and Building Materials*, 150(3), 467–479.
- [3]- Uysal M., K. Yilmaz, M. Ipek, 2012 The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 27(1), 263–270.
- [4]- Samimi K., S. Kamali-Bernard, A. Akbar Maghsoudi, M. Maghsoudi, H. Siad, 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, 292–311.
- [5]- Samimi K., S. Kamali-Bernard, A. A. Maghsoudi, 2018 Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment, *Construction and Building Materials*, 165, 247–263.
- [6]- Samimi K., G. R. D. Kamaragi, R. Le Roy, 2019 Microstructure, thermal analysis and chloride penetration of self-compacting concrete under different conditions, *Magazine of Concrete Research*, 71(3), 126–143.
- [7]- Kasaniya M., M. D. A. Thomas, E. G. Moffatt, 2021 Pozzolanic reactivity of natural pozzolans, ground glasses and coal bottom ashes and implication of their incorporation on the chloride permeability of concrete, *Cement and Concrete Research*, 139, 106259.
- [8]- Wang Y., Z. Shui, X. Gao, R. Yu, Y. Huang, S. Cheng, 2019 Understanding the chloride binding and diffusion behaviors of marine concrete based on Portland limestone cement-alumina enriched pozzolans, *Construction and*

- and durability of selfconsolidating concretes (SCC) containing volcanic pumice ASH, *Asian Journal of Civil Engineering*, 13(4), 521–530.
- [30]- Koushkbaghi M., M. J. Kazemi, H. Mosavi, E. Mohseni, 2019 Acid resistance and durability properties of steel fiber-reinforced concrete incorporating rice husk ash and recycled aggregate, *Construction and Building Materials*, 202, 266–275.
- [31]- Cardenas H., K. Kupwade-Patil, S. Eklund, 2011 Recovery from Sulfate Attack in Concrete via Electrokinetic Nanoparticle Treatment, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7), 1103–1112.
- [32]- Fan Y. F., H. Y. Luan, 2013 Pore structure in concrete exposed to acid deposit, *Construction and Building Materials*, 49, 407–416.
- [33]- Skarżyński Ł., J. Tejchman, 2016 Experimental investigations of fracture process in concrete by means of X-ray micro-computed tomography, *Strain*, 52(1), 26–45.
- [34]- Mohd Nasir, N.A., Abu Bakar, N., Safiee, N.A. and Abdul Aziz, F.N.A., 2021. Permeation-durability properties of metakaolin blended concrete containing rubber. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp.1-16.
- [35]- Beaudoin J. J., V. S. Ramachandran, R. F. Feldman, 1990 Interaction of chloride and CSH, *Cement and Concrete Research*, 20(6), 875–883.
- [36]- Nguyen T. Q., 2006 Numerical modelling of chloride ingress into saturated concrete, 2006.
- [37]- Samimi K., A. A. Shirzadi Javid, 2020 Magnesium Sulfate (MgSO₄) Attack and Chloride Isothermal Effects on the Self-consolidating Concrete Containing Metakaolin and Zeolite, *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*.
- Composites*, 23(6), 479–484.
- [18]- Gbozee M., K. Zheng, F. He, X. Zeng, 2018 The influence of aluminum from metakaolin on chemical binding of chloride ions in hydrated cement pastes, *Applied Clay Science*, 158, 186–194.
- [19]- Yi, Y., Zhu, D., Guo, S., Zhang, Z. and Shi, C., 2020. A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment. *Cement and Concrete Composites*, 113, p.103695.
- [20]- Deby F., 2010 Rapport de synthèse sur les mesures de migration des chlorures, 2010.
- [21]- AFREM A., 1997 Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, *Compte rendu des Journées Techniques AFPC*.
- [22]- Arliguie G., H. Hornain, *GranDuBé: Grandeurs associées à la Durabilité des Bétons*. Presses des Ponts, 2007.
- [23]- Hu X., Y. Guo, J. Lv, J. Mao, 2019 The Mechanical Properties and Chloride Resistance of Concrete Reinforced with Hybrid Polypropylene and Basalt Fibres, *Materials*, 12(15), 2371.
- [24]- Wang J., Q. Dai, R. Si, S. Guo, 2019 Mechanical, durability, and microstructural properties of macro synthetic polypropylene (PP) fiber-reinforced rubber concrete, *Journal of Cleaner Production*, 234, 1351–1364.
- [25]- San Nicolas R., M. Cyr, G. Escadeillas, 2014 Performance-based approach to durability of concrete containing flash-calcined metakaolin as cement replacement, *Construction and Building Materials*, 55, 313–322.
- [26]- Dinakar P., P. K. Sahoo, G. Sriram, 2013 Effect of Metakaolin Content on the Properties of High Strength Concrete, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(3), 215–223.
- [27]- Hassan A. A. A., M. Lachemi, K. M. A. Hossain, 2013 Effect of metakaolin and silica fume on rheology of self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, 110(6), 723–724.
- [28]- Richardson I. G., G. W. Groves, 1993 Microstructure and microanalysis of hardened ordinary Portland cement pastes, *Journal of Materials Science*, 28(1), 265–277.
- [29]- Ramezani pour A. A., M. Samadian, M. Mahdikhani, 2012 Engineering properties

Evaluation of chloride ion penetration in fibrous concretes containing metakaolin and pumice under immersion and tidal conditions

Kianoosh Samimi^{1*}, Mahyar Pakan²

1..Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2..PhD Student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

* k_samimi@sbu.ac.ir

Abstract

In the past, fiber reinforced concretes (FRC) was used mainly in pavements and industrial floors however, FRC has a number of other uses as well, with recent uses including bridges, hydraulic structures, tunnels, pipes, canal linings and safety vaults. On the other hand, the resistance of FRC against to penetration of chloride ions, especially bonded chloride, has received less attention. In addition, the prior literature's results on chloride ions bound in different concretes have always been varied. This study analyses the mechanical characteristics of fibrous and normal concretes (NC) containing two pozzolans of metakaolin and pumice using microstructural investigation. Also, the chloride isothermal under marine environment was studied by simulating the immersion and tidal conditions. This study can be beneficial for use in different applications such as paving and bridges which are under the influence of chloride ion penetration. The first goal of this study is to increase the flexural strength of the pavement layer in order to reduce its thickness which can be economical, and the second goal is to study the durability performance of NC and FRC containing of cementitious material (pumice and metakaolin) with respect to the aggressive medium that is a determining factor in the lifetime of concrete structures. It is generally acknowledged that blocking the paths of chloride penetration by densifying the microstructures of the concrete can be a fundamental solution using pozzolanic reaction produced by pozzolans to enhance the durability of concrete. In the last years, metakaolin and pumice has been introduced as a highly active and effective pozzolan for the partial replacement of cement in concrete. Metakaolin and pumice consumes the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ that is produced from the cement hydration process rapidly and effectively and in addition to CSH, phases like C_2ASH_8 (stratlingite), C_4AH_{13} and C_3ASH_6 (hydrogarnet) are produced. These pozzolanic products enhance the structural properties of concrete and also contribute to total pore refinement. In this study, six concrete mixtures with a control mixture without any addition are prepared and tested in hardened states. Afterwards, the resistance to chloride penetration both in immersion and tidal conditions is investigated. Accordingly, first, the compressive strength and flexural strength test were performed on hardened states to assess the mechanical resistance of the different prepared mixtures at early ages and up to 365 days. Then, the microstructure study of six prepared mixtures were investigated by using Scanning Electron Microscope (SEM), EDX spectrum and CT scan test. Finally, the chloride penetration resistance of the different concrete mixtures was evaluated by measuring water-soluble chloride profile, bonding and total chloride in immersion and tidal conditions. In both the immersion and the tidal conditions, durability results show that metakaolin and pumice have a significant effect on the increasing chloride penetration resistance. This impact was far more apparent in pumice-containing samples. However, the concretes containing pozzolans have a porous structure, according to computed tomography scan (CT scan) analysis and microstructure results in this study, and the Ca / Si ratio is considerably lowered owing to decalcification. Also, the results showed that despite the structural porosity in concretes containing pozzolans, factors such as Ca / Si ratio and pore solution concentration play a very important role in their durability against chloride ion in the simulated marine environment.

Keywords: Chloride ion, Metakaolin, Microstructure, Pumice.