

Studying the compressive strength, permeability and reinforcement corrosion of concrete samples containing silica fume, fly ash and zeolite

Mahmood Naderi^{1*}, Alireza Kaboudan², Kimiya Kargarfard³

1- Professor, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2. Ph.D. Student, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

3. M.S graduated student, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

ABSTRACT

Reinforced concrete is the most commonly used construction material. The durability of reinforced concrete mostly depends on the surrounding environmental and exposure conditions such as carbonation, corrosion, and freezing and thawing. Corrosion of steel in concrete is one of the major causes of premature deterioration of reinforced concrete structures, leading to structural failure and is largely controlled by the permeability of the concrete cover to protect the steel reinforcement from corrosion. Therefore, the effect of silica fume, fly ash and zeolite pozzolans on the compressive strength, permeability and reinforcement corrosion is evaluated in this investigation. The compressive strength of 7 and 28-day concrete samples results show that silica fume results in compressive strength increase with respect to the control sample (without any pozzolans). Except for the samples containing zeolite with replacement weight percentages equal to 5, 10 and 15 percentage and fly ash with replacement weight percentage equal to 5 percentage, in other cases the compressive strength of 28-day samples containing fly ash and zeolite are lower than that of the control sample. The results of cylindrical chamber test also represent the permeability reduction of the 7-day samples containing these pozzolans with respect to the control sample. Based on the half-cell method test results, it is also observed that the resistance to corrosion of reinforcement concrete containing silica fume and zeolite is improved by using these pozzolans.

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 November 2018

Revise Date: 02 November 2018

Accept Date: 02 November 2018

Keywords:

Silica fume, Zeolite, Fly ash,
Cylindrical chamber method,
Reinforcements corrosion,
Half-cell method

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.154574.1697

*Corresponding author: Mahmood Naderi

Email address: profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

مطالعه مقاومت فشاری، نفوذپذیری و خوردگی میلگردها در نمونه‌های بتنی حاوی

پوزولان‌های دوده سیلیسی، خاکستر بادی و زئولیت

محمود نادری^{۱*}، علیرضا کبودان^۲، کیمیا کارگرفرد^۳

۱- استاد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

چکیده

بتن مسلح متداول‌ترین مصالح در ساخت و ساز است. دوام بتن مسلح، عمدتاً به شرایط قرارگیری و محیط اطراف آن همچون کربناته شدن، خوردگی، انجماد و ذوب شدن بستگی دارد. خوردگی فولاد در بتن، یکی از دلایل عمده زوال زودرس سازه‌های بتنی مسلح می‌باشد که منجر به خرابی سازه‌ای می‌گردد و به مقدار قابل توجهی تحت تأثیر نفوذپذیری پوشش بتنی می‌باشد که آرماتورها را در برابر خوردگی حفظ می‌کند. از این رو، در این تحقیق اثر پوزولان‌های دوده سیلیسی، خاکستر بادی و زئولیت بر مقاومت فشاری، نفوذپذیری و خوردگی میلگردها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد که دوده سیلیسی موجب افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه کنترل (فاقد پوزولان) شده است. جز برای نمونه‌های حاوی زئولیت در درصدهای وزنی جایگزینی برابر با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد و خاکستر بادی در درصد وزنی برابر با ۵ درصد، در سایر موارد مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه حاوی خاکستر بادی و زئولیت نسبت به مقاومت فشاری نمونه کنترل کمتر است. نتایج آزمایش "محفظه استوانه‌ای" نیز بیانگر کاهش نفوذپذیری نمونه‌های ۷ روزه حاوی این پوزولان‌ها نسبت به نمونه کنترل می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج روش نیم‌پیل، مقاومت نمونه‌های بتنی مسلح حاوی دوده سیلیسی و زئولیت در برابر خوردگی در اثر استفاده از این پوزولان‌ها بهبود یافته است.

کلمات کلیدی: نفوذپذیری، دوده سیلیسی، زئولیت، خاکستر بادی، روش محفظه استوانه‌ای، خوردگی آرماتورها، روش نیم‌پیل

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.154574.1697	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.154574.1697	۱۴۰۰/۰۲/۳۰	۱۳۹۸/۰۲/۰۳	۱۳۹۸/۰۲/۰۳	۱۳۹۷/۱۱/۱۶	۱۳۹۷/۰۸/۱۱
محمود نادری profmahnoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

پایایی بتن یکی از مهمترین خصوصیات آن می‌باشد. لازم است بتن در طول عمر سازه شرایطی را که برای آن طراحی شده تحمل نماید. طبق تعریف کمیته ۲۰۱ انستیتوی بتن آمریکا (ACI)، دوام بتن حاوی سیمان پرتلند به توانایی آن برای مقابله با عوامل هوازدگی، تهاجم شیمیایی، سایش و یا هر فرآیندی که به آسیب دیدگی می‌انجامد، گفته می‌شود. بنابراین بتن پایا بتنی است که تا حدود زیادی شکل اولیه، کیفیت و قابلیت خدمت‌رسانی خود را در شرایط محیطی حاکم حفظ نماید [۱].

عوامل تهاجم قادر به نفوذ به داخل بتن می‌باشند. بنابراین نفوذپذیری به عنوان یکی از عوامل دوام مورد توجه خاصی قرار گرفته است. ضریب نفوذپذیری مشخصه‌ای از بتن است که به وسیله آن می‌توان اطلاعات مناسبی از ریزساختار و کیفیت بتن به دست آورد. در مطالعات دوام نظیر بررسی دوام در برابر نفوذ یون کلرید و حملات سولفاتی، در اغلب موارد سیال مهاجم از خارج به داخل بتن نفوذ می‌کند. بنابراین نفوذپذیری که بیان کننده سهولت و یا صعوبت ورود سیال به داخل محیط متخلخل بتن می‌باشد، در بسیاری از منابع معتبر نفوذپذیری به عنوان مهم‌ترین عامل دوام بتن مطرح شده است.

در سال‌های اخیر تعداد زیادی از سازه‌های بتنی در مناطق دریایی کشورهای مختلف دنیا دچار آسیب‌دیدگی و یا خرابی زودرس شده‌اند. بررسی نفوذپذیری بتن مصرفی در سازه‌های دریایی به دو دلیل دارای اهمیت است. اولین دلیل دوام و پایایی بتن در برابر حملات سولفاتی و حملات به وسیله نمک‌های منیزیم و نفوذ سایر سیالات مضر به داخل بتن می‌باشد. دومین دلیل اثر آن بر خوردگی میلگردها و فولاد مدفون در بتن است. در مناطق دریایی، خوردگی آرماتورها در بتن از جمله رایج‌ترین خرابی‌ها در سازه‌های بتن آرمه بوده و یکی از مهم‌ترین مشکلاتی است که مهندسان عمران امروزه در نگهداری سازه‌های بتن آرمه با آن مواجه می‌باشند. در ایران با وجود دارا بودن یکی از خورنده‌ترین محیط‌های دریایی در دنیا تحقیقات بسیار زیادی در این خصوص صورت نگرفته است. از یک طرف خلیج فارس به دلیل دارا بودن دما و رطوبت زیاد به عنوان یکی از محیط‌های خورنده شناخته می‌شود و از طرف دیگر بسیاری از سازه‌ها به طور مستقیم و یا غیرمستقیم در تماس با آب هستند. لذا ارزیابی دوام سازه‌های بتنی در معرض عوامل خورنده بسیار حائز اهمیت است.

به طور کلی دو نوع سازه و کار برای خوردگی وجود دارد: خوردگی ناشی از کربناته شدن و خوردگی ناشی از کلریدها. کربناته شدن فرآیندی است که در آن کربن دی‌اکسید از هوا وارد بتن می‌شود. کربن دی‌اکسید موجود در آب درون منافذ بتن حل می‌شود و اسید کربنیک تشکیل می‌شود. این فرآیند در بتن‌های با نفوذپذیری کم، روند کندی دارد و بیشتر برای سازه‌هایی که عمر مفید چند صد ساله دارند یا سازه‌هایی که در معرض تجمع کربن دی‌اکسید هستند مهم است. کربناته شدن در بتن اشباع به کندی اتفاق می‌افتد. اما در بتنی که رطوبت نسبی آن بین ۵۰ تا ۷۰ درصد است، روند آن سریع است. کربناته شدن با کاهش PH بتن در اطراف میلگرد همراه است که باعث از بین رفتن لایه بتنی محافظ می‌شود. در نتیجه زمانی که کربناته شدن به سطح میلگردها می‌رسد، در صورت وجود رطوبت و اکسیژن کافی، خوردگی اتفاق می‌افتد [۲]. آسیب دیدگی بتن بر اثر خوردگی فولاد مدفون در آن، به صورت انبساط، ترک خوردگی و از بین رفتن پوشش بتنی فولاد ظاهر می‌شود. از بین رفتن چسبندگی بین فولاد و بتن و کاهش سطح مقطع آرماتور ممکن است منجر به شکست سازه‌ای شود. تحقیقات اخیر انجام شده در زمینه خوردگی میلگرد در مراجع [۳-۹] قابل مشاهده است.

روش‌های مختلفی برای ارزیابی خوردگی میلگرد در بتن وجود دارد. بعضی از روش‌ها کیفی هستند و صرفاً احتمال بروز خوردگی را تعیین می‌کنند. روش‌های جدیدتر کمی هستند و می‌توانند برای ارزیابی وسعت خوردگی به کار روند. روش کاهش جرم، اندازه‌گیری مقاومت پلازماسیون، روش‌های گام جریان، گام پتانسیل و روش ماکروپیل از جمله روش‌های ارزیابی خوردگی آرماتور می‌باشند.

بهینه‌سازی مصالح ساختمانی از جمله بتن یکی از پایه‌های توسعه پایدار می‌باشد و اصول ابتدایی آن در صرفه‌جویی در برداشت از منابع طبیعی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، حفظ محیط زیست و به کارگیری ضایعات صنعتی و ... استوار است. سیمان به عنوان یکی از اجزاء تشکیل دهنده بتن انرژی فراوانی برای تولید آن مصرف می‌شود و موجب تولید گاز کربنیک می‌شود.

از راه‌های بهسازی تولید سیمان، جایگزین کردن بخشی از آن با مواد افزودنی معدنی ارزان قیمت و در دسترس است که پوزولان‌ها به خصوص پوزولان‌های طبیعی از جمله این مواد می‌باشند. به این ترتیب که بخشی از سیمان با مواد پوزولانی جایگزین می‌شود که نه تنها عمدتاً ارزان قیمت‌تر از مواد خام اصلی سیمان می‌باشند و احتیاجی به عملیات حرارتی پرهزینه ندارد، بلکه موجب بهبود خواص سیمان از دیدگاه‌های مختلف مکانیکی و دوام می‌گردند.

استاندارد ASTM C618 پوزولان را به این صورت تعریف می‌کند: ماده سیلیس یا سیلیسی آلومیناتی که به خودی خود ارزش چسبندگی ندارند، اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت در درجات حرارت معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی نشان داده و ترکیباتی را به وجود می‌آورد که خاصیت سیمانی و چسبندگی دارند [۱۰]. واکنش پوزولان‌ها با آهک هیدراته که حاصل از واکنش‌های هیدراته شدن فازهای اصلی سیمان بوده و یا به صورت آزاد در سیمان وجود دارد، موجب تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته می‌شود که برخلاف آهک هیدراته که قابل انحلال در آب است و ممکن است موجب تخریب بتن شود، ماده‌ای پایدار بوده و موجب بهبود خواص مکانیکی و شیمیایی خمیر سیمان می‌گردد. به همین دلیل پوزولان‌ها باعث کاهش تخلخل مؤئینه و بهبود توزیع اندازه‌ی حفره‌ها در خمیر سیمانی بتن گردیده و کاهش نفوذپذیری و افزایش پایایی بتن در محیط‌های مخرب را به دنبال خواهند داشت. علاوه بر این پوزولان‌ها باعث بهبود ناحیه انتقال بین خمیر سیمان و سنگدانه می‌شوند. ناحیه انتقال بحرانی‌ترین فاز بتن در تعیین مشخصات مکانیکی و پایایی آن است.

خاکسترهای حاصل از سوختن زغال سنگ و بعضی از محصولات باقیمانده در آن، سیلیس ناپایدار حاصل از بعضی از عملیات متالورژی و روبره‌دان شده حاصل از صنایع آهن گدازی مواد زائد صنعتی هستند که برای مصرف به عنوان مواد افزودنی معدنی در بتن مناسب می‌باشند. کشورهای صنعتی مانند ایالات متحده، روسیه، فرانسه، آلمان، ژاپن و بریتانیا از بزرگترین تولید کنندگان خاکستر بادی، سیلیس ناپایدار و سرباره آهن‌گدازی دان شده می‌باشند. علاوه بر این مصالح، چین و هند توانایی تولید مقادیر زیادی خاکستر پوسته برنج را دارند.

بسیاری از خواص بتن با اضافه کردن مواد پوزولانی بهبود می‌یابد. بعضی از این تأثیرات ناشی از تأثیر فیزیکی ذرات پوزولان بوده و بعضی دیگر بر اثر واکنش‌های شیمیایی پوزولانی به وجود می‌آید. استفاده از انواع پوزولان به عنوان ماده جایگزین سیمان در بتن علاوه بر کمک به کاهش مصرف سیمان و انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای، خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری در سنین بالا و دوام بتن نظیر نفوذپذیری را بهبود می‌بخشد [۱۱-۱۲]. از تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از پوزولان‌ها در بتن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

برخی محققان دریافته‌اند که دوده سیلیسی مقاومت بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روز را بهبود می‌بخشد و اثر عمده این ماده در مقاومت فشاری بتن بین ۳ تا ۲۸ روز (در دمای عمل آوری معمول) اتفاق می‌افتد [۱۳-۱۵]. در مقاله‌ای گزارش شده است که دوده سیلیسی به عنوان یک ماده شناخته شده پوزولانی سبب بهبود خواص مکانیکی بتن تا حد زیادی می‌شود. ضمن آنکه دوده سیلیسی در بتن تخلخل را کاهش می‌دهد و سبب بهبود دوام بتن می‌گردد و اضافه کردن آن در بتن می‌تواند به طور مؤثر نرخ تخریب بتن در برابر عوامل مخرب را کاهش دهد [۱۶].

زئولیت با کاهش تخلخل و بهبود ساختار ناحیه انتقال بین ماتریس سیمان و سنگدانه باعث کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود [۱۷-۲۰]. تحقیقات متعددی نشان داده‌اند که زئولیت خواص پوزولانی قابل توجهی دارد. فعالیت پوزولانی زئولیت‌ها بستگی به ترکیبات شیمیایی و کانی‌شناسی آنها دارد. خواص پوزولانی زئولیت‌ها به علت وجود SiO_2 و Al_2O_3 در ترکیب شیمیایی آنها می‌باشد. این ترکیبات با Ca(OH)_2 ایجاد شده در طول هیدراتاسیون سیمان واکنش می‌دهند و آن را تبدیل به ژل C-S-H و آلومینوسیلیکات‌های هیدراته می‌کنند. در نتیجه ریزساختار بتن سخت شده بهبود می‌یابد و بتن نفوذناپذیرتر می‌شود [۲۱].

خاکستر بادی ماده‌ای است با ذرات بسیار ریز کروی شکل که از پسماند حاصل از احتراق پودر ذغال سنگ در نیروگاه‌های حرارتی به دست می‌آید [۲۲-۲۴]. از خاکستر بادی کم‌کلسیم، به طور وسیع در بتن‌های معمولی و دارای مقاومت زیاد به عنوان جایگزین سیمان استفاده می‌شود. در بتن‌های معمولی، مقدار جایگزینی حتی به ۵۰ درصد هم می‌رسد. دلیل استفاده از این ماده در بتن با مقاومت زیاد،

کاهش تولید حرارت و کسب مشخصات دوامی بهتر است [۲۵-۲۶]. در صورت وجود شرایط مطلوب عمل آوری، بتن های حاوی خاکستر بادی دارای مقاومت فشاری درازمدت بیشتری نسبت به بتن با سیمان پرتلند است [۲۷]. استفاده از مواد جایگزین سیمان مانند خاکستر بادی و دوده سیلیسی موجب بهبود ریزساختار ماتریس سیمانی بتن می گردد که کاهش قابل توجه نفوذپذیری بتن را نتیجه می دهد [۲۸].

به دلیل اهمیت موضوع دوام بتن، در این تحقیق اثر دوده سیلیسی، خاکستر بادی و زئولیت بر مقاومت فشاری، نفوذپذیری نمونه های بتنی و خوردگی میلگردها با استفاده از روش "محفظه استوانه ای" [۲۹] و روش نیم پیل [۳۰] مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از دو طرح اختلاط استفاده شده است. طرح اختلاط اول مربوط به نمونه های بتنی شامل پوزولان های دوده سیلیسی، خاکستر بادی و زئولیت می باشد که مقاومت فشاری و نفوذپذیری آنها مورد بررسی قرار گرفته است. طرح اختلاط دوم نیز شامل پوزولان های دوده سیلیسی و زئولیت می باشد که خوردگی میلگردها در نمونه های ساخته شده با استفاده از این طرح اختلاط و روش نیم پیل ارزیابی شده است. نمونه های ساخته شده با استفاده از این طرح اختلاط برای شبیه سازی ناحیه جزر و مد تحت سیکل های متوالی تر و خشک شدن در آب-نمک قرار گرفتند.

۲- آزمایش های انجام شده

۲-۱- اندازه گیری نفوذپذیری با استفاده از روش "محفظه استوانه ای"

برای اندازه گیری نفوذپذیری با استفاده از این روش، ابتدا یک صفحه فلزی با استفاد از چسب اپوکسی بر روی نمونه چسبانده شده و پس از سخت شدن آن دستگاه نفوذپذیری بر روی صفحه فلزی سوار می شود. به منظور آب بندی بهتر و عدم نفوذ آب به خارج از محفظه فشار، از یک واشر لاستیکی که بین دستگاه نفوذپذیری و صفحه فلزی قرار می گیرد، استفاده می شود. بعد از قرار دادن واشر، دستگاه نفوذپذیری با فشار به پایین و چرخش در جای خود قرار می گیرد. سپس، آب از طریق دریچه تعبیه شده درون محفظه فشار ریخته می شود. جهت خروج هوای محبوس احتمالی نیز شیر تخلیه هوا بر روی دستگاه تعبیه شده است. با چرخاندن دسته اعمال فشار، قسمت متحرک سیلندر به طرف پایین حرکت می کند که این حرکت موجب ایجاد فشار و در نتیجه نفوذ آب در بتن می شود. به علت نفوذ پیوسته آب به درون نمونه بتنی، ویسکوزیته سیال و اصطکاک داخلی بتن، از فشار درون سیلندر کاسته شده که باید با چرخاندن مجدد دسته اعمال فشار، فشار در مقدار مورد نظر (از فشار ۵ بار که به مدت ۵ ساعت اعمال می شود در این تحقیق استفاده شده است) ثابت نگه داشته شود. همچنین باید در فواصل زمانی مناسب عدد میکرومتر که نشان دهنده مقدار پایین آمدن پیستون می باشد قرائت شود. در ابتدای آزمایش سرعت کاهش فشار بیشتر می باشد و با گذشت بیشتر زمان از شروع آزمایش، سرعت کاهش فشار کمتر می گردد. با حاصل ضرب سطحی از نمونه که در تماس با آب قرار دارد (سطح داخلی صفحه فلزی) و قرائت میکرومتر، مقدار حجم آب نفوذ کرده به نمونه بتنی در هر لحظه قابل محاسبه می باشد. با توجه به زمان سپری شده از آزمایش نیز نرخ نفوذ آب را می توان محاسبه کرد. روند انجام آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است.



د) قرائت عمق نفوذ



ج) دو نیم کردن نمونه



ب) انجام آزمایش "محفظه استوانه ای"



الف) صفحه فلزی چسبانده شده بر روی نمونه

شکل ۱: آزمایش نفوذپذیری "محفظه استوانه ای"

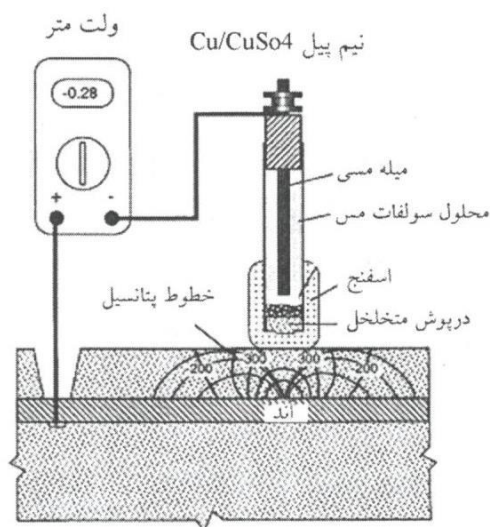
از مزایای این روش می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- دستگاه آزمایش بسیار ساده است.
- میزان نفوذپذیری را به صورت کمی ارائه می کند.
- دستگاه در عین سادگی دارای دقت بالایی است.
- هزینه ساخت دستگاه کم بوده و هر بار انجام آزمایش نیز هزینه بسیار کمی دارد.
- قابلیت تکرار آزمایش وجود دارد.

۲-۲- آزمایش اندازه گیری پتانسیل نیم پیل

وقتی یک فلز در یک محلول غوطه ور می شود، اختلاف پتانسیلی در فصل مشترک مایع و جامد به دلیل توزیع غیریکنواخت بار در فازهای مایع و جامد به وجود می آید. تعیین اختلاف پتانسیل ثابت در سطح بین میلگرد و بتن غیر ممکن می باشد. بنابراین الکتروود دیگری برای تکمیل مدار الکتریکی باید تعریف شود. پتانسیل اندازه گیری شده بین این دو الکتروود پتانسیل پیل نامیده می شود که مجموع پتانسیل دو نیم پیل است [۳۱].

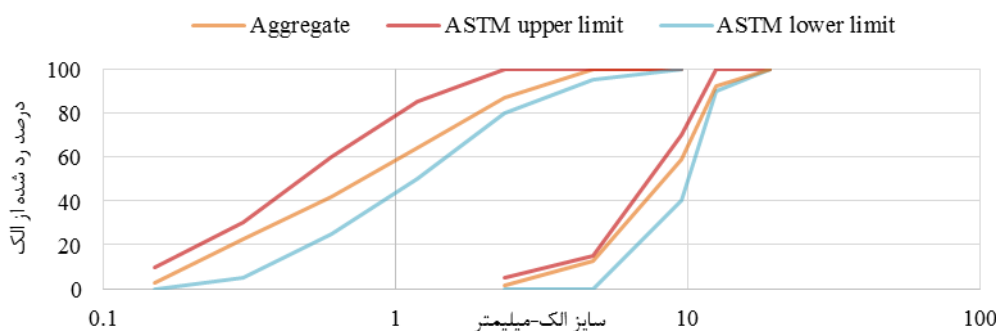
با استفاده از یک الکتروود مرجع که دارای یک پتانسیل نیم پیلی است و صفر در نظر گرفته می شود، همیشه یک اختلاف پتانسیل ثابت به دست خواهد آمد. هر واکنش نیم پیلی می تواند به عنوان نقطه مرجع انتخاب شود. طبق یک قرارداد جهانی پتانسیل نیم پیل هیدروژن در یون هیدروژن به عنوان نقطه صفر در نظر گرفته شده است. همه پتانسیل نیم پیل های دیگر می توانند نسبت به الکتروود مرجع استاندارد و هیدروژن محاسبه شوند. اندازه گیری پتانسیل نیم پیل متداول ترین روش مورد استفاده در ارزیابی وضعیت خوردگی سازه های بتن مسلح، خصوصاً عرشه پل ها است. از طریق اندازه گیری اختلاف پتانسیل بین الکتروود نیم پیل قرار گرفته بر روی سطح بتن با میلگرد موجود در زیر آن ارزیابی صورت می پذیرد. الکتروودهای مرجع $Cu/CuSO_4$ ، $Ag/AgCl$ و SCE بطور معمول مورد استفاده قرار می گیرند. اگر از الکتروود کالومل به عنوان الکتروود مرجع استفاده شود، با آنکه دقت بالایی دارد، ولی به دما بسیار حساس می باشد. $ASTM C876$ قواعد کلی برای محاسبه خوردگی فولاد در بتن را ارائه می دهد. اندازه گیری پتانسیل نیم پیل در بررسی خوردگی سازه ها یکی از متداول ترین روش ها است که دارای مزایای زیادی از قبیل تخمین سریع گسترش خوردگی (به عنوان آزمایش غیرمخرب)، کم هزینه بودن، کاربرد آسان و به کار بردن اطلاعات به عنوان راهنمایی برای اندازه گیری های خوردگی می باشد.



شکل ۲: اندازه گیری پتانسیل نیم پیل [۳۲].

۳- مراحل تحقیق

در این مقاله، اثر پوزولان‌های مختلف که جایگزین سیمان پرتلند تیپ ۲ شده‌اند، بر مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه‌های بتنی با استفاده از روش "محفظه استوانه‌ای" بررسی شده است. همچنین خوردگی میلگردها با استفاده از آزمایش نیم‌پیل مورد ارزیابی قرار گرفته است. طرح‌های اختلاط مطابق جدول ۱ می‌باشند. برای ارزیابی مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی ۷ و ۲۸ روزه و جهت انجام آزمایش نفوذپذیری از نمونه‌های مکعبی ۷ روزه ساخته شده با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر و پوزولان‌های دوده سیلیسی، خاکستر بادی و زئولیت با درصدهای وزنی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن سیمان پرتلند تیپ ۲ (طرح اختلاط اول) استفاده شده است. درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نیز با استفاده از استاندارد ASTM C642 [۳۳] محاسبه گردیده است. نمونه‌های ساخته شده با استفاده از طرح اختلاط دوم نیز پس از سیکل‌های متوالی تر و خشک شدن در آب-نمک مورد آزمایش نیم‌پیل مطابق استاندارد ASTM C876 جهت ارزیابی خوردگی میلگردها قرار گرفتند. بدین منظور از پوزولان‌های دوده سیلیسی با درصد وزنی جایگزینی برابر با ۷/۵ درصد و همچنین زئولیت با درصدهای وزنی جایگزینی برابر با ۱۲/۵، ۱۵ و ۱۷/۵ استفاده شده است. در طرح اختلاط‌ها سعی شده پارامترهای مؤثری چون نسبت آب به سیمان، حداکثر اندازه سنگدانه و دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌ها تقریباً ثابت نگه داشته شود و اثر درصدهای وزنی جایگزینی مواد پوزولانی مختلف ارزیابی شود. سنگدانه‌ها طبق استاندارد ASTM C136-06 [۳۴] دانه بندی شده‌اند (شکل ۳).



شکل ۳: منحنی‌های دانه بندی سنگدانه‌ها.

جدول ۱: طرح اختلاط نمونه‌های بتنی استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها.

فوق روان کننده (درصد)	آب (Kg/m^3)	سیمان (Kg/m^3)	شن (Kg/m^3)	ماسه (Kg/m^3)	نسبت آب به سیمان	
-	۱۷۵	۳۵۰	۶۹۲	۹۹۸	۰/۵	طرح اختلاط ۱
۰/۴۲	۱۶۲	۴۰۵	۶۷۵	۹۹۳	۰/۴	طرح اختلاط ۲

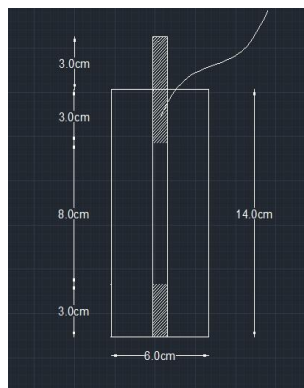
برای ساخت قالب جهت انجام آزمایش نیم‌پیل از پروژه انجام شده در دانشگاه تگزاس استفاده شده است [۳۵]. آزمایش نیم‌پیل از طریق اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل بین الکتروود نیم‌پیل قرار گرفته بر روی سطح بتن با آرمانور موجود در زیر آن انجام می‌گیرد. الکتروود مرجع مورد استفاده در این آزمایش الکتروود کالومل که از شرکت آذر الکتروود تهیه شده است می‌باشد.

نمونه‌های استوانه‌ای پس از ۷ روز عمل‌آوری در حوضچه آب، به مدت ۲۴ ساعت در ظرف آب محتوی ۱۶۵ گرم بر لیتر نمک NaCl قرار گرفتند. سپس به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد قرار داده شدند. این فرآیند تر و خشک شدن جهت شبیه‌سازی ناحیه جزر و مد به مدت ۳/۵ ماه صورت گرفت. با توجه به حساس بودن الکتروود کالومل نسبت به دما قرائت‌ها برای هر ۶ نمونه صورت می‌گرفت و بعد از

اتمام قرائت، ۶ نمونه دیگر از محلول آب-نمک بیرون آورده می‌شدند و قرائت‌ها مجدداً تکرار می‌گردید. از ۶ نقطه که روی هر نمونه استوانه‌ای علامت‌گذاری شده بود جهت انجام قرائت‌ها استفاده گردید. قرائت‌ها بر روی ۳ نقطه (نقاط ۱، ۲ و ۳) که در فواصل ۴، ۷، ۱۰ سانتی متر از سه نمونه علامت‌گذاری شده بودند و ۱۸۰ درجه مقابل این نقاط (نقاط ۴، ۵، ۶) انجام گردید. برای قرائت در زیر الکتروود کالومل، اسفنجی قرار داده می‌شود.



ج) عمل آوری نمونه‌ها در آب

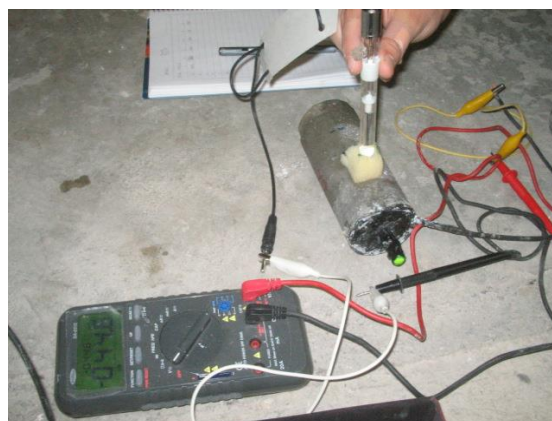


ب) نمونه استوانه‌ای



الف) قالب‌های ساخته شده جهت انجام آزمایش نیم‌پیل

شکل ۴: قالب و نمونه‌های استفاده شده جهت انجام آزمایش نیم‌پیل.



شکل ۵: انجام قرائت نیم‌پیل.

در این تحقیق نامگذاری نمونه‌ها براساس نوع پوزولان مصرفی و درصد وزنی جایگزینی صورت گرفته است. بدین صورت که در ابتدا نام پوزولان و سپس درصد جایگزینی آن ذکر شده است. SF بیانگر دوده سیلیسی، FA بیانگر خاکستر بادی و ZE ژئولیت می‌باشد. برای مثال SF5 بیانگر نمونه ساخته شده با استفاده از دوده سیلیسی و درصد وزنی جایگزینی برابر با ۵ درصد می‌باشد. نمونه فاقد پوزولان نیز C0 نامگذاری شد.

سیمان مورد استفاده در این تحقیق سیمان تیپ ۲ آبیک می‌باشد. همچنین دوده سیلیسی و فوق روان‌کننده مصرفی با نام Super viscose 20 HE از شرکت نامیکاران قزوین، ژئولیت از شرکت نگین پودر سمنان و خاکستر بادی از شرکت تجهیزات بتن خاورمیانه تهیه گردیدند. برای چسباندن صفحه فلزی زیرسری به نمونه‌های بتنی جهت انجام آزمایش نفوذپذیری با استفاده از "محفظه استوانه‌ای"، از چسب دو مؤلفه‌ای تهیه شده از شرکت مقاوم تدبیر قشم استفاده گردید. آب مورد نیاز برای ساخت نمونه‌ها نیز آب شرب شهر قزوین می‌باشد. لازم به ذکر است که تمامی آزمایش‌ها در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) صورت گرفته است. آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان‌های مصرفی استفاده در جداول ۲-۵ آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲

L.O.I	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اجزا تشکیل دهنده
۱/۸۸	۱/۸۹	۰/۶۸	۰/۳۷	۳/۲۲	۶۲/۲۸	۳/۸۶	۴/۷۶	۲۰/۷۹	درصد وزنی

جدول ۳: مشخصات آنالیز شیمیایی دوده سیلیسی

C	SiC	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اجزا تشکیل دهنده
۰/۳۰	۰/۵۰	۰/۱۰	۱/۰۱	۰/۳۱	۰/۹۷	۰/۴۹	۰/۳۷	۱/۳۲	۹۳/۶۰	درصد وزنی

جدول ۴: مشخصات آنالیز شیمیایی زئولیت

L.O.I	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اجزا تشکیل دهنده
۱۰/۶۴	۰/۰۶۸	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۷۹	۴/۸۳	۰/۹۷	۱۱/۱۴	۶۸/۹۵	درصد وزنی

جدول ۵: مشخصات آنالیز شیمیایی خاکستر بادی

SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اجزا تشکیل دهنده
۰/۰۸	۱/۰۱	۰/۵۹	۱/۰۹	۴/۹۴	۴/۴۲	۲۵/۱۱	۶۱/۳۴	درصد وزنی

۴- نتایج بدست آمده با استفاده از آزمایش‌ها

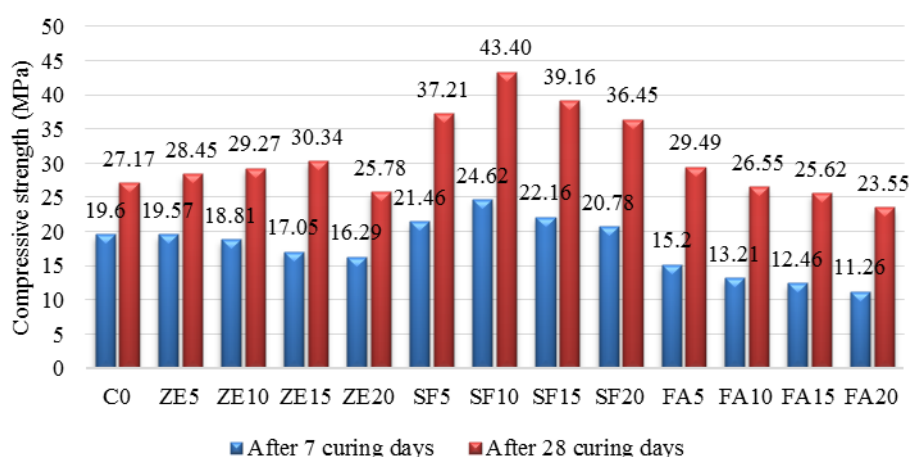
۴-۱- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ساخته شده با استفاده از طرح اختلاط اول و درصد های وزنی جایگزینی مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است.

مطابق شکل، مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه حاوی زئولیت کمتر از مقاومت فشاری نمونه کنترل می‌باشد و با افزایش مقدار آن مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. کاهش مقاومت فشاری در مورد زئولیت با درصد وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۵ درصد بسیار ناچیز بوده و تقریباً مقاومت فشاری آن با مقاومت فشاری نمونه کنترل برابر می‌باشد. مقدار کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه کنترل برای درصدهای وزنی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۰/۱۵، ۴/۰۳، ۱۳/۰۱ و ۱۶/۸۹ درصد می‌باشد. همانطور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش مدت زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز افزایش پیدا کرده است. با افزایش مقدار زئولیت تا درصد وزنی جایگزینی حدود ۱۵ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها افزایش یافته و در تمامی حالات از مقاومت فشاری نمونه کنترل بیشتر است. در درصد وزنی برابر با ۲۰ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به نمونه کنترل ۵/۱۲ درصد کاهش یافته است. مقدار افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های ساخته شده با استفاده از زئولیت برای درصدهای وزنی برابر با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نسبت به نمونه کنترل برابر با ۴/۷۱، ۷/۷۳، ۱۱/۶۷ درصد می‌باشد. نتایج مقاومت فشاری با نتایج گزارش شده در تحقیقات پیشین مطابقت دارد [۳۶-۳۸]. به عنوان مثال در مرجع [۳۸] کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های حاوی درصدهای وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد نسبت به نمونه کنترل به ترتیب برابر با ۱/۰۰، ۶/۱۰ و ۲۲/۷۷ درصد گزارش شده است. مطابق این مرجع، درصدهای وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۱۰ و ۱۵ درصد به ترتیب باعث افزایش ۴/۰۳ و ۷/۳۹ درصدی مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به نمونه کنترل شده و در درصد وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۲۰ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه، ۴/۰۱ درصد نسبت به نمونه کنترل کاهش یافته است.

نمونه‌های ساخته شده با استفاده از دوده سیلیسی در تمامی درصدهای وزنی استفاده شده دارای مقاومت فشاری ۷ روزه بیشتری نسبت به نمونه کنترل می‌باشند. با جایگزین کردن سیمان با دوده سیلیسی تا حدود ۱۰ درصد وزنی سیمان مقاومت فشاری افزایش یافته و با افزایش بیشتر مقدار دوده سیلیسی مقاومت فشاری کاهش یافته است. مقدار افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های ساخته شده با استفاده از دوده سیلیسی در درصدهای وزنی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۹/۴۹، ۲۵/۶۱، ۱۳/۰۶ و ۶/۰۲ درصد می‌باشد. بنابراین مقدار درصد وزنی بهینه دوده سیلیسی برای رسیدن به مقاومت فشاری بیشینه حدود ۱۰ درصد وزن سیمان می‌باشد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی در درصدهای وزنی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب ۳۶/۹۶، ۵۹/۷۲، ۴۴/۱۲ و ۳۴/۱۶ درصد نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه کنترل افزایش داشته است. براساس تحقیقات پیشین، درصد وزنی جایگزینی بهینه دوده سیلیسی برای رسیدن به بیشینه مقاومت فشاری حدود ۱۰ درصد وزن سیمان می‌باشد [۳۹-۴۱]. مطابق تحقیق انجام شده در مرجع [۳۹]، با افزایش مقدار وزنی دوده سیلیسی تا حدود ۱۰ درصد وزنی سیمان، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌ها افزایش یافته و با افزایش بیشتر مقدار دوده سیلیسی تا ۲۰ درصد وزن سیمان مقاومت فشاری کاهش می‌یابد و در تمامی مقادیر وزنی ذکر شده مقاومت فشاری نسبت به نمونه کنترل بیشتر است. برای مثال در مرجع [۳۹]، درصد افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونه کنترل در درصدهای وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۸/۳۸، ۲۵/۲۴، ۱۳/۲۲ و ۲/۷۸ درصد گزارش شده است.

در مورد نمونه‌های ساخته شده با استفاده از خاکستر بادی مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار خاکستر بادی، همانند ژئولیت مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌ها کاهش پیدا کرده و در تمامی حالا مقاومت فشاری نسبت به مقاومت فشاری نمونه کنترل کمتر است. کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه کنترل در درصدهای وزنی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۲۲/۴۵، ۳۲/۶۰، ۳۶/۴۳ و ۴۲/۵۵ درصد می‌باشد. با افزایش مدت زمان عمل‌آوری به ۲۸ روز، با وجود افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها، جز در درصد وزنی برابر با ۵ درصد، مقاومت فشاری نمونه‌ها همچنان نسبت به نمونه کنترل کمتر است. مقدار افزایش مقاومت فشاری در درصد وزنی برابر با ۵ درصد نسبت به نمونه کنترل برابر با ۸/۵۴ درصد و مقدار کاهش آن در درصدهای وزنی برابر با ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۲/۲۸، ۵/۶۹ و ۱۳/۳۴ درصد می‌باشد. کاهش مقاومت فشاری با افزایش مقدار وزنی خاکستر بادی در مراجع [۴۲-۴۴] گزارش شده است. برای مثال مطابق نتایج مرجع [۴۲]، جایگزین کردن ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزن سیمان با خاکستر بادی به ترتیب موجب کاهش ۱۳/۸۵، ۲۵/۷۱ و ۳۴/۵۱ درصدی مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونه کنترل می‌شود. همچنین در مرجع [۴۳] درصد کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی خاکستر بادی در درصدهای وزنی جایگزینی برابر با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد نسبت به نمونه کنترل به ترتیب برابر با ۷/۹۴، ۱۶/۸۸ و ۲۷/۰۶ درصد گزارش شده است.



شکل ۶: مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه حاوی پوزولان‌های مختلف.

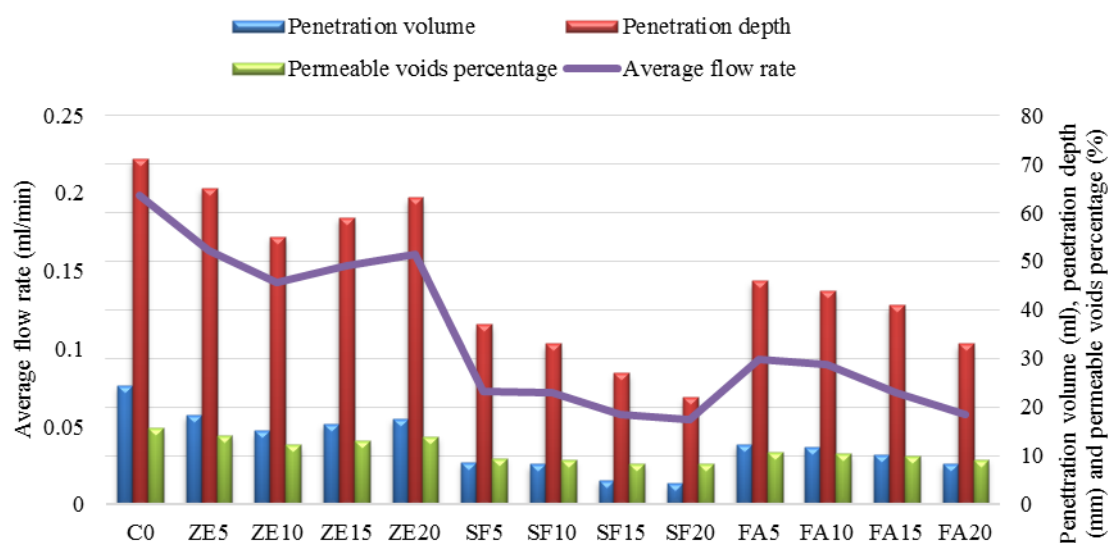
از میان پوزولان‌های استفاده شده در این تحقیق نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه حاوی دوده سیلیسی افزایش مقاومت نسبت به نمونه کنترل داشته‌اند. بنابراین دوده سیلیسی نسبت به ژئولیت و خاکستر بادی در افزایش مقاومت فشاری مؤثرتر عمل کرده است.

۴-۲- نتایج آزمون‌های نفوذپذیری و درصد حجمی منافذ نفوذپذیر

نمونه‌های ۷ روزه ساخته شده حاوی پوزولان‌های مختلف با استفاده از روش "محفظه استوانه‌ای" تحت آزمایش نفوذپذیری قرار گرفتند. همچنین با استفاده از استاندارد ASTM C642 مقدار درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نمونه‌ها محاسبه گردید. نتایج به دست آمده برای حجم نفوذ، عمق نفوذ، متوسط نرخ نفوذ و درصد حجمی منافذ نفوذپذیر در شکل ۷ نشان داده شده است. براساس مطالعات انجام شده پیشین، برای ارزیابی نفوذپذیری نمونه‌های بتنی معمولاً از ضریب نفوذپذیری به دست آمده با اندازه‌گیری دبی ثابت ورودی یا خروجی آب به نمونه‌های بتنی استفاده می‌شود. در این تحقیق از حجم آب نفوذ کرده به دست آمده با استفاده از روش محفظه استوانه‌ای برای ارزیابی نمونه‌های بتنی استفاده شده است که درک ملموس‌تری نسبت به ضریب نفوذپذیری برای ارزیابی نفوذپذیری نمونه‌های بتنی فراهم می‌کند. در نتیجه برای صحت‌سنجی نتایج نفوذپذیری، از ضرایب نفوذپذیری گزارش شده در تحقیقات پیشین استفاده شده است و مقایسه انجام شده بر اساس تأثیر پوزولان‌های مورد استفاده بر افزایش یا کاهش ضریب نفوذپذیری نمونه‌های بتنی می‌باشد. به دلیل متفاوت بودن جنس مصالح مصرفی، طرح اختلاط، شرایط آزمایشگاهی و ... نتایج گزارش شده با هم متفاوت می‌باشند.

مطابق شکل ۷، افزودن زئولیت در تمامی درصد‌های وزنی جایگزینی مورد استفاده در این تحقیق موجب کاهش نفوذپذیری نسبت به نمونه کنترل شده است. با جایگزین کردن سیمان با زئولیت تا ۱۰ درصد وزن آن مقادیر حجم نفوذ، عمق نفوذ و متوسط نرخ نفوذ کاهش یافته و با افزایش بیشتر مقدار زئولیت مقادیر آنها افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار درصد وزنی جایگزینی بهینه زئولیت برای رسیدن به کمترین مقدار نفوذ حدود ۱۰ درصد وزن سیمان می‌باشد. مقدار دقیق درصد وزنی جایگزینی بهینه زئولیت با کوچکتر کردن بازه‌های درصد وزنی جایگزینی به دست می‌آید. نتایج به دست آمده برای درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نیز با نتایج به دست آمده با استفاده از آزمایش "محفظه استوانه‌ای" مطابقت دارد. مشاهده می‌شود که کاهش درصد حجمی منافذ نفوذپذیر موجب کاهش پارامترهای نفوذپذیری گردیده است. در درصد‌های وزنی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد مقادیر حجم نفوذ نسبت به نمونه کنترل به ترتیب ۲۵/۰۲، ۳۸/۲۰، ۳۲/۴۷ و ۲۸/۰۰ درصد کاهش یافته است. این مقادیر برای عمق نفوذ به ترتیب برابر با ۸/۴۵، ۲۲/۵۴، ۱۶/۹۰ و ۱۱/۲۷ درصد می‌باشد. بر اساس مرجع [۴۵]، افزودن زئولیت تا ۱۰ درصد وزن سیمان موجب کاهش ضریب نفوذپذیری گردیده و با افزایش مقدار آن ضریب نفوذپذیری افزایش می‌یابد. مقدار کاهش ضریب نفوذپذیری نسبت به نمونه کنترل در درصد وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۱۰ درصد برابر با ۲۴/۷۷ درصد گزارش شده است.

نتایج به دست آمده برای مقادیر مختلف وزنی دوده سیلیسی کاهش مقدار نفوذپذیری را با افزایش مقدار این پوزولان نشان می‌دهد. مطابق شکل، بیشترین مقدار نفوذپذیری برای نمونه ساخته شده با استفاده از دوده سیلیسی با مقدار درصد وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۵ درصد و کمترین مقدار نفوذپذیری برای درصد وزنی جایگزینی برابر با ۲۰ درصد به دست آمده است. مقادیر کاهش حجم نفوذ نسبت به نمونه کنترل برای درصد‌های وزنی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ به ترتیب برابر با ۶۴/۸۲، ۶۶/۳۵، ۷۹/۶۱ و ۸۲/۵۱ درصد به دست آمده است. مقادیر کاهش عمق نفوذ نیز به ترتیب برابر با ۴۰/۸۵، ۴۹/۳۰، ۶۱/۹۷ و ۶۹/۰۱ درصد می‌باشد. درصد حجمی منافذ نفوذپذیر نیز با افزایش مقادیر وزنی دوده سیلیسی کاهش یافته است. مشاهده می‌شود که جایگزینی سیمان با دوده سیلیسی موجب افزایش دوام نمونه‌ها گردیده است. در مرجع [۴۶]، نفوذپذیری نمونه‌های بتنی در دو رده مقاومتی ۲۵ و ۳۰ مگاپاسکال با مقادیر مختلف دوده سیلیسی ارزیابی شده است. بر اساس نتایج گزارش شده، افزایش دوده سیلیسی موجب کاهش نفوذپذیری نمونه‌های بتنی نسبت به نمونه کنترل شده است. برای مثال جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد سیمان با دوده سیلیسی برای نمونه‌های بتنی با رده مقاومتی ۲۵ مگاپاسکال به ترتیب موجب کاهش ۳۷/۷۹ و ۵۰/۲۳ درصدی ضریب نفوذپذیری نسبت به نمونه کنترل شده است. همچنین این اعداد برای نمونه‌های بتنی با رده مقاومتی ۳۰ پاسکال به ترتیب ۲۳/۷۷ و ۳۴/۴۳ درصد به دست آمدند. در مرجع [۴۷] نیز کاهش ضریب نفوذپذیری نسبت به نمونه کنترل برای درصد‌های وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۱۰ و ۲۰ درصد به ترتیب ۸۸/۷۳ و ۹۲/۹۶ درصد گزارش شده است.



شکل ۷: مقادیر حجم نفوذ، عمق نفوذ، متوسط نرخ نفوذ و درصد حجمی منافذ نفوذپذیر برای نمونه‌های ساخته شده حاوی پوزولان‌های مختلف.

همانند دوده سیلیسی و زئولیت، افزودن خاکستر بادی نیز در جهت کاهش نفوذپذیری در تمامی مقادیر وزنی مورد استفاده از این پوزولان عمل کرده است. بیشترین نفوذ مربوط به نمونه ساخته شده با استفاده از این پوزولان در درصد وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۵ درصد و کمترین مقدار آن مربوط به نمونه ساخته شده با درصد وزنی جایگزینی برابر با ۲۰ درصد می‌باشد. افزودن خاکستر بادی در درصدهای وزنی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب موجب کاهش ۴۹/۳۳، ۵۲/۴۷، ۵۷/۹۶ و ۶۵/۶۵ درصدی حجم نفوذ نسبت به نمونه کنترل گردیده است. همچنین مقادیر عمق نفوذ به ترتیب ۳۵/۲۱، ۳۸/۰۳، ۴۲/۲۵ و ۵۳/۵۲ درصد نسبت به نمونه کنترل کاهش یافته است. کاهش نفوذپذیری نمونه‌های ساخته شده با استفاده از خاکستر بادی نیز با بررسی مقادیر درصد حجمی منافذ نفوذپذیر قابل توجه است. مطابق نتایج گزارش شده در مرجع [۴۸]، با جایگزین کردن سیمان با خاکستر بادی در بتن‌های با رده مقاومتی ۲۸، ۳۳ و ۳۸ مگاپاسکال ضریب نفوذپذیری کاهش می‌یابد و با افزایش رده مقاومتی از ضریب نفوذپذیری نیز کاسته می‌شود. برای مثال، جایگزین کردن ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزن سیمان با خاکستر بادی در نمونه‌های بتنی با رده مقاومتی ۳۸ مگاپاسکال ضریب نفوذپذیری را به ترتیب ۱۵/۹۸، ۲۰/۲۴، ۲۱/۶۲ و ۲۶/۲۱ درصد نسبت به نمونه کنترل کاهش می‌دهد.

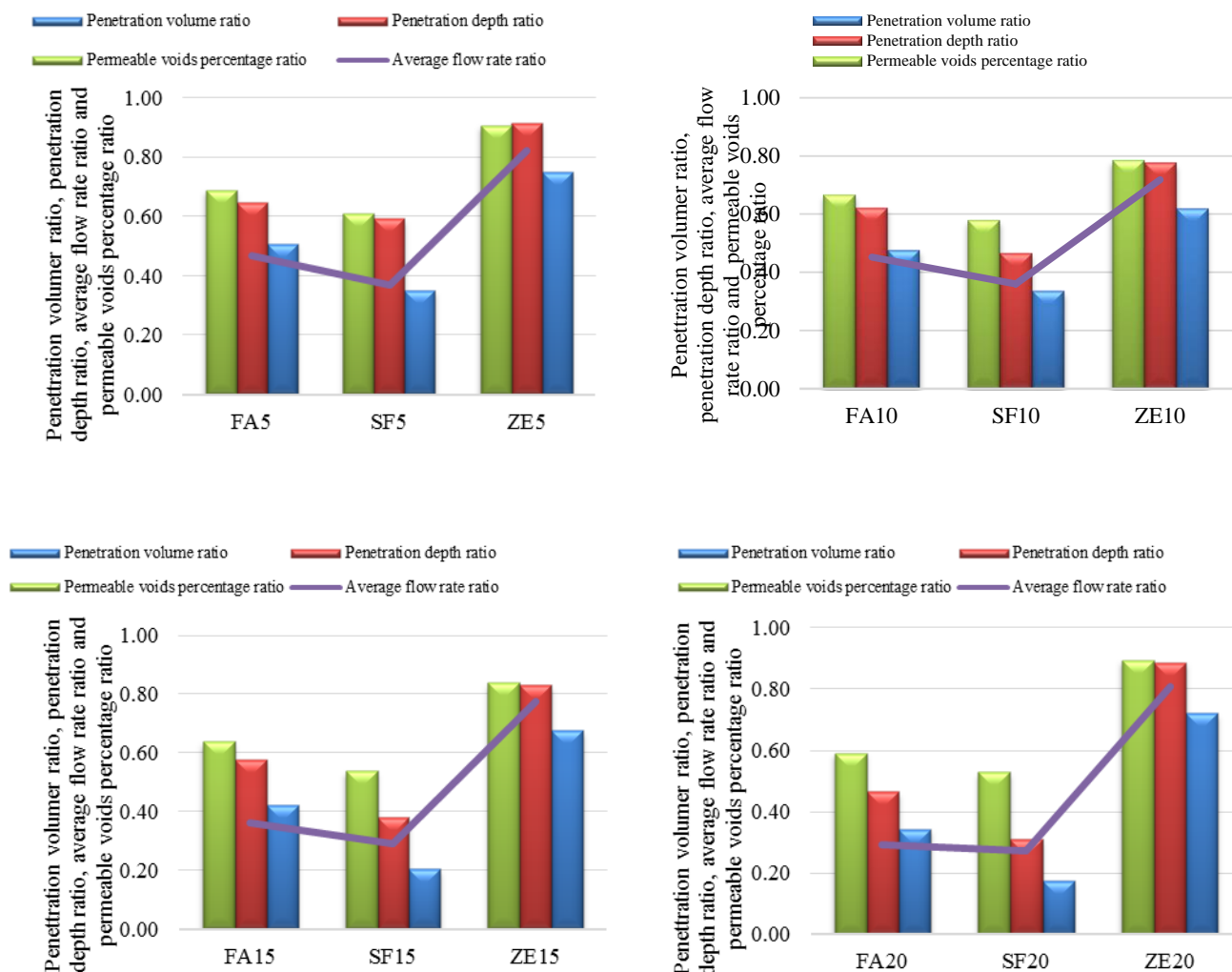
کاهش نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان مربوط به تأثیرات فیزیکی ذرات پوزولان و واکنش شیمیایی پوزولانی مطابق رابطه (۱) می‌باشد. یک ماده پوزولانی هنگام مخلوط شدن با آب هیچگونه ارزش و خاصیت چسبندگی و سخت شدن ندارد. فعل و انفعال پوزولانی بین اجزای سیلیس یا سیلیس آلومینیاتی یک پوزولان با هیدروکسید کلسیم در معرض رطوبت اتفاق می‌افتد و خواص چسبندگی و سیمانی حاصل می‌شود. ژل C-S-H تولید شده با پر کردن منافذ موجود در بتن و قطع ارتباط بین منافذ موجب کاهش نفوذپذیری می‌شود.



مقادیر بیش از اندازه پوزولان واکنش نخواهند داد و بنابراین مانند یک ماده اضافی ناکارآمد رفتار خواهند کرد. مطابق نتایج، جایگزینی سیمان با زئولیت به مقدار بیشتر از ۱۰ درصد وزنی سیمان موجب افزایش نفوذپذیری شده است. افزایش نفوذپذیری به دلیل کاهش مقدار سیمان در اثر جایگزین کردن آن با زئولیت (رقیق شدگی سیمان) می‌باشد.

جهت بررسی مؤثرترین پوزولان در کاهش نفوذپذیری، نسبت مقادیر پارامترهای نفوذپذیری محاسبه شده و درصدهای حجمی منافذ نفوذپذیر نمونه‌های ساخته شده با استفاده از پوزولان‌های مختلف به مقادیر متناظر در نمونه کنترل در درصدهای وزنی یکسان در شکل ۸ رسم شده است. براساس نتایج مشاهده می‌شود که دوده سیلیسی در کاهش نفوذپذیری نسبت به زئولیت و خاکستر بادی در

درصدهای وزنی یکسان مؤثرتر عمل کرده است. نمونه‌های حاوی خاکستر بادی نیز نسبت به نمونه‌های حاوی زئولیت نفوذناپذیرتر می‌باشند. بنابراین در درصدهای وزنی یکسان پوزولان‌های استفاده شده در این تحقیق، زئولیت کمترین تأثیر را در کاهش نفوذپذیری دارد و دوده سیلیسی به عنوان کارآمدترین پوزولان در کاهش نفوذپذیری عمل کرده است.



شکل ۸: نسبت مقادیر پارامترهای نفوذپذیری نمونه‌های حاوی پوزولان به مقادیر متناظر نمونه کنترل در درصدهای وزنی جایگزینی یکسان.

۴-۳- نتایج به دست آمده با استفاده از مون نیم‌پیل

نمونه‌های استوانه‌ای بعد از ۷ روز عمل آوری در محلول آب نمک قرار گرفته و سیکل‌های تر و خشک را طی کردند. باتوجه به تحقیقات پیشین میزان شدت و سرعت خوردگی آرماتورها در محیط تر و خشک بیشتر از محیط تر می‌باشد. زیرا در محیط تر و خشک احتمال دسترسی آرماتورها به اکسیژن بیشتر است. دلیل این امر را می‌توان بدین نحو توجیه کرد که در مرحله خشک شدن، آب از سطح بتن تبخیر می‌شود و در نتیجه غلظت یون موجود به دلیل کاهش آب در محلول موجود در منافذ، در قسمت خشک بتن افزایش می‌یابد. در مرحله تر شدن، آب نمک در مدت زمان خیلی کوتاه از طریق عملکرد مویبندی وارد بتن می‌شود. از این رو وقتی فرآیند تر و خشک شدن بتن برای مدت زمان طولانی ادامه می‌یابد، غلظت یون کلر در بتن به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند.

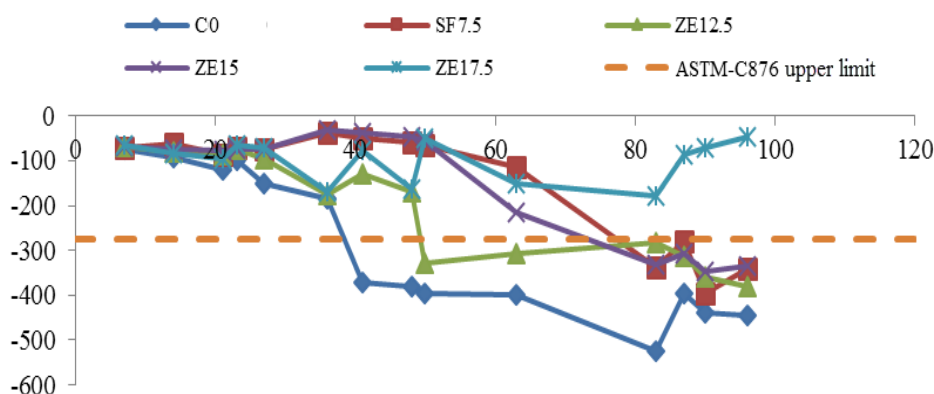
حدود پیشنهادی برای احتمال خوردگی آرماتور با توجه به انتخاب الکتروود کالومل به عنوان الکتروود مرجع طبق استاندارد ASTM C876 به صورت زیر است:

- پتانسیل های بیشتر از ۱۲۶ میلی ولت: با احتمال بیش از ۹۰ درصد هیچ خوردگی در آرماتور در زمان آزمایش وجود ندارد.
- پتانسیل بین ۱۲۶ میلی ولت و ۲۷۶ میلی ولت: فعالیت خوردگی در آن ناحیه نامشخص است.
- پتانسیل های بیشتر از ۲۷۶ میلی ولت: با احتمال بیش از ۹۰ درصد، در آرماتور در زمان آزمایش خوردگی وجود دارد.

نتایج آزمایش نیم پیل در شکل ۹ نشان داده شده است. برای گرفتن نتیجه قطعی در مورد خوردگی نیاز به انجام این آزمایش در مدت زمان طولانی تری می باشد. زیرا خوردگی یک فرآیند طولانی مدت است و برای نتیجه قطعی نیاز به تست های تکمیلی همچون آزمایش نفوذپذیری یون کلر می باشد. با این وجود با استناد به نتایج بدست آمده نمونه های حاوی ژئولیت با درصد وزنی جایگزینی برابر با ۱۷/۵ درصد و دوده سیلیسی عملکرد خوبی از خود نشان داده اند.

مطابق شکل ۱۰، بعد از شکست نمونه حاوی ژئولیت با درصد وزنی جایگزینی برابر با ۱۷/۵ درصد هیچ گونه خوردگی بر روی آرماتور مشاهده نشده است. در ناحیه بتن در تماس با میلگرد نیز علائم ناشی از خوردگی دیده نشد. بعد از شکست نمونه حاوی ۷/۵ درصد دوده سیلیسی نیز هیچ خوردگی بر روی میلگرد با چشم قابل مشاهده نبود (شکل ۱۱). ولی در بتن اطراف میلگرد علائم زنگ زدگی مشاهده می شد. در اشکال ۱۲ و ۱۳ به ترتیب نمونه های حاوی ۱۲/۵ و ۱۵ درصد ژئولیت جایگزین سیمان بعد از ۱۰۰ روز در محیط مشابه با جذر و مد بعد از شکستن نمونه بتنی نشان داده شده اند. در این نمونه ها خوردگی بر روی میلگردها و اثرات آن بر روی بتن اطراف مشاهده گردید، ولی مقدار آن کمتر از نمونه شاهد بود. خوردگی در نمونه کنترل در سطح وسیع تری قابل مشاهده بود. علائم خوردگی نیز در بتن اطراف آرماتور به وضوح دیده شد (شکل ۱۴).

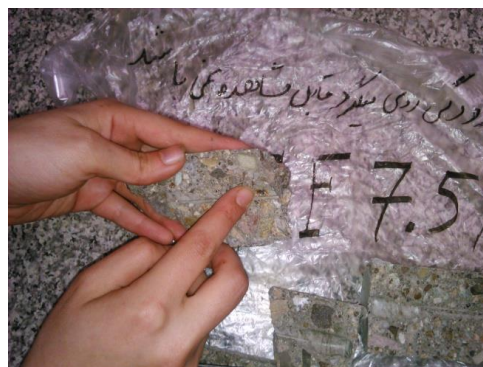
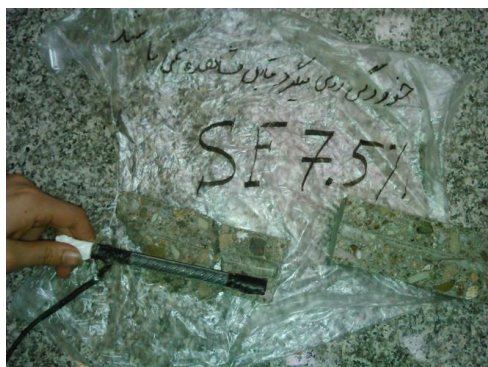
بر اساس تحقیقی که در زمینه خوردگی میلگردها صورت گرفته است، با جایگزین کردن سیمان با دوده سیلیسی مقاومت در برابر خوردگی افزایش می یابد [۴۹]. این نتیجه گیری با استفاده از درصد های وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۶ و ۱۲ درصد و اندازه گیری مقاومت الکتریکی نمونه ها حاصل شده است. مطابق نتایج گزارش شده، جایگزینی سیمان با دوده سیلیسی در مقادیر وزنی برابر با ۶ و ۱۲ درصد موجب افزایش ۲/۵ و ۵ برابری مقاومت الکتریکی نسبت به نمونه کنترل می شود. اثر مطلوب افزودن دوده سیلیسی در کاهش خوردگی نیز در مرجع [۵۰] به دلیل کاهش جذب آب و افزایش مقاومت الکتریکی گزارش شده است. اثر ژئولیت بر خوردگی میلگردها در درصد های وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد در مرجع [۵۱] مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده، نمونه دارای درصد وزنی جایگزینی برابر با ۱۵ درصد دارای کمترین نرخ خوردگی میلگردها است. کاهش خوردگی میلگردها در اثر افزودن ژئولیت در مرجع [۵۲] نیز گزارش شده است. در این مرجع درصد وزنی جایگزینی سیمان برابر با ۱۵ درصد به عنوان درصد بهینه در کاهش نرخ خوردگی میلگردها معرفی گردیده است.



شکل ۹: نتایج قرائت نیم پیل.



شکل ۱۰: نمونه حاوی ۱۷/۵ درصد ژئولیت جایگزین سیمان پس از ۱۰۰ روز در محیط مشابه جذر و مد.



شکل ۱۱: نمونه حاوی ۷/۵ درصد دوده سیلیسی جایگزین سیمان پس از ۱۰۰ روز در محیط مشابه جذر و مد.



شکل ۱۲: نمونه حاوی ۱۲/۵ درصد ژئولیت جایگزین سیمان پس از ۱۰۰ روز در محیط مشابه جذر و مد.



شکل ۱۳: نمونه حاوی ۱۵ درصد ژئولیت جایگزین سیمان پس از ۱۰۰ روز در محیط مشابه جذر و مد.



شکل ۱۴: نمونه کنترل پس از ۱۰۰ روز در محیط مشابه جذر و مد.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق مقاومت فشاری، نفوذپذیری و خوردگی میلگردها در نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان‌های دوده سیلیسی، خاکستر بادی و ژئولیت مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که:

۱- دوده سیلیسی در درصد‌های وزنی مورد استفاده در این تحقیق موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه نسبت به نمونه کنترل می‌شود. همچنین درصد بهینه دوده سیلیسی که موجب بیشینه مقاومت فشاری می‌شود، حدود ۱۰ درصد وزنی سیمان می‌باشد.

۲- افزودن ژئولیت موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه نسبت به نمونه کنترل می‌شود. در مورد نمونه‌های ۲۸ روزه افزودن ژئولیت تا درصد وزنی جایگزینی حدود ۱۵ درصد موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه کنترل شده است. در درصد وزنی برابر با ۲۰ درصد مقاومت فشاری نمونه حاوی ژئولیت نسبت به نمونه کنترل کمتر است.

۳- افزودن خاکستر بادی در درصد‌های وزنی مورد استفاده در این تحقیق موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شود. مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه در درصد‌های وزنی جایگزینی مورد استفاده در این تحقیق کمتر از مقاومت فشاری نمونه کنترل می‌باشد. در مورد نمونه‌های ۲۸ روزه (جز برای درصد وزنی جایگزینی برابر ۵ درصد) نیز این روند صادق است.

۴- افزودن دوده سیلیسی موجب کاهش پارامترهای نفوذپذیری نمونه‌های ۷ روزه شده است. در تمامی درصد‌های وزنی جایگزینی مورد استفاده در این تحقیق، نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی از نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه کنترل برخوردار می‌باشند.

۵- با افزودن خاکستر بادی همانند دوده سیلیسی نفوذپذیری نمونه‌های ۷ روزه کاهش یافته است. در تمامی درصد‌های وزنی جایگزینی مورد استفاده در این تحقیق مقدار نفوذپذیری کمتر از نمونه کنترل است.

۶- در تمامی درصد‌های وزنی جایگزینی مورد استفاده در این تحقیق نفوذپذیری نمونه‌های ۷ روزه حاوی ژئولیت نسبت به نمونه کنترل کمتر است. درصد وزنی جایگزینی بهینه ژئولیت که در آن کمترین نفوذپذیری حاصل می‌شود حدود ۱۰ درصد وزن سیمان می‌باشد.

۷- در درصد‌های وزنی جایگزینی یکسان، دوده سیلیسی در کاهش نفوذپذیری مؤثرترین پوزولان نسبت به خاکستر بادی و ژئولیت می‌باشد. همچنین در مقادیر وزنی جایگزینی یکسان، نمونه‌های حاوی خاکستر بادی نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه‌های حاوی ژئولیت دارند.

۸- افزودن دوده سیلیسی (درصد وزنی جایگزینی برابر ۷/۵ درصد) میزان خوردگی میلگرد را نسبت به نمونه فاقد پوزولان کاهش می‌دهد. به گونه‌ای که پس از گذشت ۱۰۰ روز در محیط شبیه‌سازی شده با شرایط جذر و مد هیچگونه خوردگی میلگردها در نمونه‌های حاوی این پوزولان مشاهده نشد. تنها مقدار اندکی زنگ آهن در داخل بتن قابل رویت بود.

۹- افزودن زئولیت میزان خوردگی را نسبت به نمونه فاقد پوزولان کاهش می‌دهد. به گونه‌ای که پس از گذشت ۱۰۰ روز در محیط شبیه‌سازی شده با شرایط جذر و مد هیچگونه خوردگی در میلگردها در نمونه های حاوی ۱۷/۵ درصد پوزولان زئولیت جایگزین سیمان مشاهده نشد. حتی در بتن‌های اطراف میلگرد نیز هیچگونه اثری از خوردگی نبود. در مورد نمونه های حاوی ۱۲/۵ و ۱۵ درصد زئولیت، خوردگی بر روی میلگرد و اثرات آن بر روی بتن اطراف میلگرد قابل مشاهده بود. ولی این میزان خوردگی کمتر از نمونه شاهد گزارش شد.

۱۰- استفاده از پوزولان های مختلف به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در طرح اختلاط بتن، تاثیر مطلوبی در کاهش میزان خوردگی میلگردها و افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی مسلح در محیط‌های دریایی دارد. ولی در این بین زئولیت به دلیل دسترسی آسان و به صرفه بودن از نظر اقتصادی و سازگاری آن با محیط زیست به نظر می‌رسد جایگزین مناسبی برای پوزولان هایی چون میکروسیلیس باشد.

مراجع

- [1] ACI Committee. (2001), Protection of Metals in Concrete against Corrosion (ACI 222-01), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [2] Brown, M.C. (2002), Corrosion protection service life of epoxy coated reinforcing steel in Virginia Bridge Decks. Ph.D Thesis, faculty of the Virginia polytechnic Institute and state university.
- [3] Verma, S.K., Bhadauria, S.S. and Akhtar, S. (2014). Monitoring corrosion of steel bars in reinforced concrete structure. The scientific world journal, pp.1-9.
- [4] Castel, A., Khan, I. and Gilbert, R.I. (2015). Development Length in Reinforced Concrete Structures Exposed to Steel Corrosion: A Correction Factor for AS3600 Provisions. Australian Journal of Structural Engineering, 16 (2), pp. 89-98.
- [5] Otieno, M., Beushausen, H. and Alexander, M. (2011). Prediction of corrosion rate in RC Structures - A critical review. Modelling of Corroding Concrete Structures, pp.15-37
- [6] Yuan, Y., Ji, Y. and Jiang, J. [2009]. Effect of corrosion layer of steel bar in concrete on time-variant corrosion rate. Materials and Structures, 42(10), pp.1443-1450.
- [7] Masadeh, S. (2015). Performance of Galvanized Steel Reinforcement in Concrete in Sea and Dead Sea Water. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 3(5), pp. 46-53.
- [8] Masadeh, S. (2015). The Effect of Added Carbon Black to Concrete Mix on Corrosion of Steel in Concrete. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 3(4), pp. 271-276.
- [9] Petersen, R.B. and Melchers, R.E. (2012). Long -term corrosion of cast iron cement lined pipes. Proceedings of corrosion and prevention, 23, pp. 1-10
- [10] ASTM C 618-99a. (1999). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concret, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [11] Hossain, K. M. A. (2004). Chloride induced corrosion of reinforcement in volcanic ash and pumice based blended concrete. Cement and Concrete Composites, 39 (2), pp 201-210
- [12] Hossain, K. M. A., and Lachemi, M. (2003). Corrosion resistance and Chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar. Cement and Concrete Composites, 34 (4), pp. 695-702.
- [13] Shah, S.P. and Ahmad, S.H. (1994). High performance concrete. Properties and applications. New York: McGraw-Hill
- [14] Detwiler, R. J., Bhatti, J. I. and Bhattacharja, S. (1996). Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements. Skokie: Portland Cement Association
- [15] Kjellsen, K. O., Wallevik, O. H. and Hallgren, M. (1999). On the compressive strength development of high performance concrete and paste - effect of silica fume. Materials and Structures, 32 (1), pp. 63-69.

- [16] Diab, A.M., Awad, A.E.M., Elyamany, H.E. and Elmoaty, A.E.M.A. (2012). Guidelines in compressive strength assessment of concrete modified with silica fume due to magnesium sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 36. pp 311–318.
- [17] Massazza, F. (1998). Pozzolana and pozzolanic cements. *Lea's chemistry of cement and concrete*, 4th ed, pp 471–631.
- [18] Shi, H.S., Xu, B.W. and Zhou, X.C. (2009). Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete. *Constr Build Mater*. 23 (5), pp 1980–1985.
- [19] Najimi, M. (2010). Investigating the properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious materials, Building and Housing Research Center, Tehran
- [20] Canpolat, F., Yılmaz, K., Köse, M.M., Sümer, M. and Yurdusev, M.A. (2004). Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. *Cement and Concrete Research*, 34 (5), pp 731–735.
- [21] Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C. and Lin, Z.S. (1999). A study on the hydration rate of natural Zeolite blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 13 (8), pp 427–432.
- [22] Bilodeau, A., Sivasundaram, V., Painter, K.E. and Malhotra, V.M. (1994). Durability of concrete incorporating high volumes of fly ash from sources in US. *ACI Mater. J.*, 91 (1), 3–12.
- [23] Joshi, R.C. and Lohita, R.P. (1997). *Fly ash in concrete: production, properties and uses*. Amsterdam: Gordon and Breach.
- [24] Han, S.H., Kim, J.K. and Park, Y. D. (2003). Prediction of compressive strength of fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 33 (7), pp 965–971.
- [25] Oner, A., Akyuz, S. and Yildiz, R. (2005). An Experimental Study on Strength Development of Concrete Containing Fly Ash and Optimum Usage of Fly Ash in Concrete, *Cement and Concrete Research*, 35 (6), pp 1165–1171.
- [26] Poon, C.S., Lam, L. and Wong, Y.L. (2000). A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*, 30 (3), pp 447–455.
- [27] Neville, A.M. (1995). *Properties of concrete*. London: Longman.
- [28] Chahal, N. and Siddique, R. (2013). Permeation properties of concrete made with fly ash and silica fume: Influence of ureolytic bacteria. *Construction and Building Materials*, 49, pp 161–174.
- [29] Naderi, M. (2010). Determine of concrete, stone, mortar, brick and other construction materials permeability with cylindrical chamber method. Registration of Patent in Companies and industrial property Office. Reg. N. 67726. Iran.
- [30] ASTM C876. (1991) "Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete".
- [31] Ramachandran, V. S. and Beaudoin, J. J. (1999). *Hand book of analytical techniques in concrete science and technology*. institute for research in construction national research council Canada, Ottawa, Ontario, Canada.
- [32] NORDTEST Project. (2002). Calibration of the electrochemical methods for the corrosion rate measurement of steel in concrete, SP Swedish National.
- [33] ASTM C642-06. (2006). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [34] ASTM C136-06. (2006). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [35] Trejo, D. and Halmer, C. (2009). Corrosion Performance tests for reinforcing steel in concrete: test procedures. Report No: FHWA/Tx-09/04825-P1, Texas Transportation Institute, Texas A & M University System.
- [36] Canpolat, F., Yılmaz, K., Köse, M.M., Sümer, M. and Yurdusev, M.A. (2004). Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production, *Cement and Concrete Research*, 34 (5), pp 731–735.
- [37] Vejmelková, E., Ondráček, M. and Černý, R. (2012). Mechanical and Hydric Properties of High-Performance Concrete Containing Natural Zeolites. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 6 (3), pp 186–189.

- [38] Sreeharsha, N. and Ramana, K. V. (2016). Study On the Strength Characteristics of Concrete with Partial Replacement of Cement by Zeolite and Metakaolin. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5 (12), pp 20363–20371.
- [39] Ajileye, F.V. (2012). Investigations on microsilica (Silica Fume) as partial cement replacement in concrete. *Global Journal of Research In Engineering*, 12 (1), pp 17–23.
- [40] Muhit, I.B., Ahmed, S.S., Amin, M.M. and Raihan, M.T. (2013). Effects of silica fume and fly ash as partial replacement of cement on water permeability and strength of high performance concrete. In: 4th International Conference on Advances in Civil Engineering, Delhi: IDES Conference Publishing System, pp 108–115.
- [41] Kazemi., M.A., Baig, M. A. and Hesamuddin, M. (2015). Investigations on Micro Silica (Silica Fume) as Partial Replacement of Cement in Concrete. *International Journal of Science and Research*, 6 (4). pp 2273–2277.
- [42] Marthong, C., Agrawal, T.P. and Marthong, C., (2012). Effect of fly ash additive on concrete properties. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2 (4), pp 1986–1991.
- [43] Joshi, R. (2017). Effect on Compressive Strength of Concrete by Partial Replacement of Cement with Fly ash. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4 (2), pp 315–318.
- [44] Saha, A.K. (2018). Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable environment research*, 28 (1), pp 25–31.
- [45] Ahmadi, B. and Shekarchi, M. (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), pp 134–141.
- [46] Mittal, T., Borsaikia, A. and Talukdar, S. (2013). Effect of silica fume on some properties of concrete. In: *International Conference on Structural Engineering Construction and Management*. Kandy, pp 1–7.
- [47] Hustad, T., Løland, K.E. and Gjørsv, O.E. (1989). Effect of Condensed Silica Fume on the Permeability of Concrete. In: *Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Malhotra: American Concrete, pp 307–319.
- [48] Islam, M.M. and Islam, M.S. (2013). Strength and durability characteristics of concrete made with fly-ash blended cement. *Australian Journal of Structural Engineering*, 14 (3), pp 303–319.
- [49] Dotto, J.M.R., De Abreu, A.G., Dal Molin, D.C.C. and Müller, I.L. (2004). Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars. *Cement and concrete composites*, 26 (1), pp 31–39.
- [50] Hou, J. and Chung, D.D.L. (2000). Effect of admixtures in concrete on the corrosion resistance of steel reinforced concrete. *Corrosion Science*, 42 (9), pp 1489–1507.
- [51] Nooman, M.T. (2016). Effect of Zeolite Inclusion on Some Properties of Concrete and Corrosion Rate of Reinforcing Steel Bars Imbedded in Concrete. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 13 (6), pp 51–59.
- [52] Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B. and Shekarchi, M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 35, pp 1023–1033.