

## بررسی تأثیر استفاده از پوزولان‌های میکروسیلیس، متاکائولن و زئولیت و الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت در برابر نفوذ یون کلر در بتن در شرایط محیطی جزیره قسم\*

محمد شکرچی زاده<sup>(۱)</sup> مهدی ولی پور<sup>(۲)</sup> فرهاد پرگر<sup>(۳)</sup>

**چکیده** امروزه کاهش عمر مفید، هزینه‌های تعمیر و بازسازی سازه‌های بتنی آسیب دیده در اثر خوردگی و دیگر عوامل مخرب در مناطق خوردنده مانند سواحل خلیج فارس صدمات جبران‌ناپذیری بر اقتصاد کشور و توسعه پایدار در این مناطق وارد کرده است. بنابراین لزوم بررسی و شناخت رفتار بتن در چنین مناطقی برای افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی و جلوگیری از تخریب زودرس آن‌ها ضروری می‌باشد. بدیهی است که از جمله مهم‌ترین عوامل تخریب چنین سازه‌هایی، نفوذ یون کلر و خوردگی ناشی از آن می‌باشد. یکی از راه‌های نفوذناپذیری بتن استفاده از پوزولان‌های مختلف برای بهبود ریزساختار بتن است. در این تحقیق، عملکرد سه پوزولان میکروسیلیس (۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد جایگزینی)، متاکائولن (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزینی) و زئولیت (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزینی) و الیاف پلی پروپیلن به منظور افزایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج، نشان دهنده عملکرد مثبت آزمون‌های حاوی پوزولان در مقایسه با بتن بدون پوزولان است.

**واژه‌های کلیدی** پایایی بتن، نفوذ یون کلر، میکروسیلیس، متاکائولن، زئولیت.

## Effect of Silica Fume, Metakaolin, Zeolite and Polypropylene Fiber on Chloride Diffusion in Concrete

M. Shekarchizadeh M. Valipour F. Pargar

**Abstract** Rapid concrete deterioration in Persian Gulf region has become one of the major concerns since it shortens the structure life span and increases the maintenance costs. The main cause of such concrete failure is claimed to be chloride permeation and subsequent corrosion. Pozzalns are widely being used in order to construct more durable concrete as a functional solution to this problem. The paper reports the performance of concrete incorporating silica fume (replacement level of 5%, 7.5% and 10%), metakaolin (replacement level of 5%, 10% and 15%), zeolite (replacement level of 10%, 20% and 30%) and Polypropylene Fiber in the binder to resist the chloride penetration in aggressive environments. The results showed that specimens containing pozzolans function better than control concretes.

**Key Words** Concrete Durability, Chloride Penetration, Silica Fume, Metakaolin, Zeolite

\*نسخه اول مقاله در تاریخ ۸۹/۱/۲۲ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۹/۴/۲۲ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

(۲) نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

(۳) کارشناس ارشد، انستیتو مصالح ساختمانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

## مقدمه

[3,4].

در سال‌های اخیر، مشکلات ایجاد شده برای سازه‌های بتنی در مناطق گزندبار دنیا از جمله خلیج فارس موجب شده تا بحث پایایی بتن در چنین مناطقی اهمیت خاصی پیدا کند؛ به طوری که امروزه پایایی بتن در طراحی و ساخت سازه‌های زیربنایی هر کشوری از اصلی‌ترین عوامل می‌باشد. کاهش نسبت آب به سیمان و استفاده از پوزولان‌های مختلف از جمله روش‌های مهم به منظور بهبود پایایی بتن است. پوزولان‌های مورد استفاده در کشور ما اغلب میکروسیلیس و تا حدودی متاکائولن و اخیراً نیز پوزولان طبیعی ژئولیت می‌باشد. میکروسیلیس یک سوپر پوزولان با مشخصاتی است که اکثر مهندسين با آن آشنایی دارند. متاکائولن نیز یک پوزولان بسیار فعال است. مواد خام اولیه در تولید متاکائولن، رس کائولن می‌باشد. کائولن، یک ماده‌ی معدنی بسیار ریز سفید و رسی است که در دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، این مواد رسی بیشتر آب جذب شده خود را از دست می‌دهند. دمایی که در آن کائولینیت که اصلی‌ترین جز تشکیل دهنده ی کائولن، به واسطه‌ی هیدراکسیونیزاسیون آب از دست می‌دهد، بین ۵۰۰ الی ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. به منظور تولید متاکائولن رس کائولن را تا محدوده دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت می‌دهند [1]. متاکائولن موجب ارتقاء خواص مکانیکی بتن در کوتاه‌مدت و درازمدت می‌شود. استفاده از متاکائولن ریز ساختار، مقاومت فشاری بتن و مقاومت در برابر نفوذ یون کلر آن را بهبود می‌بخشد [۲].

Boddy و هم‌کاران (۲۰۰۱) و هم‌چنین Gruber و هم‌کاران (۲۰۰۱) نفوذ یون کلر را در ۳۶۵ و ۱۰۹۵ روز پس از رویارویی اندازه‌گیری کردند. نتایج، نشان می‌دهند که با کاهش نسبت آب به سیمان و با افزایش درصد جایگزینی متاکائولن، میزان نفوذ یون کلر کاهش می‌یابد

ژئولیت نیز یک کانی متبلور با ترکیبی از سیلیکات آلومینیم هیدراته از عناصر قلیائی و قلیائی-خاکی می‌باشد. خواص پوزولانی ژئولیت‌ها به علت وجود اکسیدهای سیلیسیم و آلومینیم در ترکیب شیمیایی آن‌ها است. تحقیقات متعدد نشان می‌دهد که ژئولیت خواص پوزولانی قابل توجهی دارد. هم‌چنین باید اشاره نمود که ژئولیت، دارای ساختار داخلی خاصی به صورت شبکه‌ی کریستالی سه بعدی است و سطح داخلی آن بسیار زیاد است و به این دلیل دو ویژگی تبادل یونی (ion exchange) و جذب سطحی (surface absorption) در این ماده پوزولانی بسیار شاخص است [5-10]. نتایج تحقیقی که توسط Tatematsu و هم‌کاران در سال ۱۹۹۶ انجام گرفت، نشان دهنده ی توقف واکنش‌های آلكالینی سنگدانه‌ها و کاهش خوردگی میل‌گرد در بتن در سیمان‌های حاوی ژئولیت است که موجب جلوگیری از تخریب سازه‌های بتنی می‌شود [11]. تحقیق جامعی که توسط Ahmadi و Shekarchi در مورد کاربرد ژئولیت در بتن در مقایسه با پوزولان‌های میکروسیلیس و خاکستر بادی در سال ۲۰۰۹ انجام شده، نشان داد که بتن حاوی ۲۰ درصد جایگزینی ژئولیت موجب کاهش جذب آب و ضریب انتشارپذیری یون کلر می‌شود. هم‌چنین نفوذپذیری گاز بتن‌های با جایگزینی ۱۰ درصد ژئولیت کاهش می‌یابد [12]. محققین دیگر نیز نشان دادند که ژئولیت در زمینه‌ی انتشار یون کلر، ضعیف‌تر از میکروسیلیس و بهتر از خاکستر بادی عمل می‌کند [13]. بنابراین از مجموع مطالب ارائه شده می‌توان انتظار داشت که هر سه پوزولان میکروسیلیس، متاکائولن و ژئولیت در راستای بهبود ریز ساختار و نفوذ ناپذیری و در نتیجه دوام بتن در مناطق خورنده، عملکرد مثبتی داشته باشند. در همین راستا، انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران در سال ۱۳۸۶ با حمایت سازمان منطقه‌ی آزاد قشم

سیلیسی - آهکی می‌باشند. هم چنین مجموع سنگدانه‌ها به طور تقریبی ۱۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و بزرگترین اندازه‌ی سنگدانه‌ی مورد استفاده، ۱۹ میلی‌متر می‌باشد. قابل ذکر است که به منظور تامین روانی بتن تازه از مواد فوق روان کننده با پایه کربوکسیلات استفاده شده است. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، در طرح‌های اختلاط حاوی زئولیت مقدار فوق روان کننده مورد نیاز برای رسیدن به روانی مورد نظر از سایر مواد پوزولانی بیشتر است. دلیل اصلی این موضوع، خاصیت جذب سطحی بسیار شدید در زئولیت است. در عین حال، مطالعات دیگری که انجام شده، نشان می‌دهد در صورت انتخاب فوق‌روان‌کننده متناسب با پایه‌ی متفاوت می‌توان مقدار افزودنی شیمیایی را کاهش داد.

برای اندازه‌گیری یون کلر، آزمون‌های منشوری  $15 \times 15 \times 60$  سانتی‌متری ساخته شده و به مدت سه روز تحت شرایط محیطی منطقه‌ی عمل‌آوری، مرطوب شدند. پس از عمل‌آوری، مطابق استاندارد ASTM G109، سطوح جانبی و فوقانی آزمون‌ها با پوشش سطحی با پایه پلی‌اورتان که در برابر شرایط حاد جنوب بسیار مقاوم است، پوشانده شده تا فقط سطح تحتانی بتن قالب‌گیری شده در معرض نفوذ یون کلر قرار گیرد (شکل (۱)) [16]. آزمون‌های منشوری در اردیبهشت ماه ۱۳۸۷ در دو شرایط رویارویی جزرومد و پاشش در جزیره قشم قرار داده شدند (شکل (۲)).

اقدام به احداث دومین سایت تحقیقات پایایی بتن در جزیره‌ی قشم نمود. دارا بودن یکی از بزرگ‌ترین مناطق آزاد کشور، لزوم توسعه‌ی سرمایه‌گذاری و گسترش سازه‌های زیربنایی و هم‌چنین واقع شدن در منطقه‌ی خلیج فارس بعنوان مهاجم‌ترین محیط دریایی از جمله دلایل انتخاب این جزیره به منظور اجرای این طرح تحقیقاتی است. در این تحقیق، آهنگ نفوذ یون کلر با ساختن آزمون‌های بتنی حاوی پوزولان‌های میکروسیلیس (۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد جایگزینی)، متاکائولن (۱۰، ۱۵ درصد جایگزینی) و زئولیت (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزینی) و الیاف پلی‌پروپیلن با استفاده از مصالح محلی و در شرایط رویارویی محیطی جزرومد و پاشش که از بحرانی‌ترین نواحی قرارگیری بتن می‌باشند [14,15]، بررسی و نتایج حاصل با بتن شاهد مقایسه شده است.

### ساخت آزمون‌ها

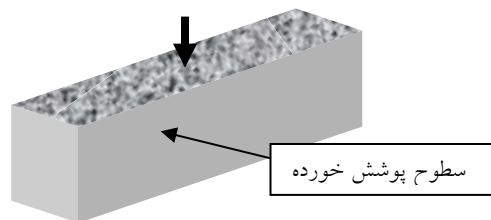
ساخت آزمون‌های بتنی با استفاده از سیمان پرتلند تیپ دو کارخانه سیمان هرمزگان و مصالح سنگی تهیه شده از منطقه انجام پذیرفت. آنالیز شیمیایی پوزولان‌های مصرفی در جدول (۱) و مشخصات طرح‌های اختلاط در جدول (۲) ارائه شده است. در کلیه طرح‌های اختلاط نسبت آب به مواد سیمانی  $0/4$ ، مقدار آب  $160$  کیلوگرم بر متر مکعب و مصالح سنگی ریزدانه به صورت گردگوشه و

جدول ۱ آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان‌های مورد مصرف

عنوان	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	L.O.I
سیمان	۲۱	۵	۳/۵	۶۳	۱/۸	۱/۶	۰/۵	۰/۶	۲
میکروسیلیس	۹۳/۱۶	۱/۱۳	۰/۷۲	—	۱/۶	۰/۰۵	—	—	۱/۵۸
متاکائولن	۵۱/۸۵	۴۳/۸۷	۰/۹۹	۰/۲	۰/۱۸	—	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۵۷
زئولیت	۶۷/۷۹	۱۳/۶۶	۱/۴۴	۱/۶۸	۱/۲	۰/۵	۲/۰۴	۱/۴۲	۱۰/۳۲

جدول ۲ مشخصات نسبت‌های اختلاط

اسلامپ (cm)	فوق روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )	مقدار الیاف (kg/m <sup>3</sup> )	پوزولان جایگزین (kg/m <sup>3</sup> )	عیار مواد سیمانی (kg/m <sup>3</sup> )	کد نمونه
۷	۰/۲	-	-	۴۰۰	C2
۶	۱/۲	-	۲۰	۳۸۰	SF5
۵	۱/۴	-	۳۰	۳۷۰	SF7.5
۸	۱/۶	-	۴۰	۳۶۰	SF10
۵	۰/۸	-	۲۰	۳۸۰	MK5
۵/۵	۱/۴	-	۴۰	۳۶۰	MK10
۸	۱/۶	-	۶۰	۳۴۰	MK15
۶	۴	-	۴۰	۳۶۰	ZE10
۸	۸	-	۸۰	۳۲۰	ZE20
۶	۱۴	-	۱۲۰	۲۸۰	ZE30
۷	۱۶	۰/۹	۴۰	۳۶۰	SF10P0
۱۰	۷	۱/۸	۴۰	۳۶۰	SF10P1



شکل ۱ شمای نمونه‌های منشوری پس از اجرای پوشش



شکل ۲ نمونه‌های منشوری واقع در ناحیه‌ی جزرو مد

مشاهده می‌شود، در سن ۷ روزه تمامی آزمون‌های حاوی پوزولان به‌جز آزمون‌های ZE20 و ZE30 نسبت به آزمون شاهد افزایش مقاومت داشته‌اند که بیشترین این مقدار، مربوط به آزمون SF10P0 با ۶۲ درصد افزایش نسبت به آزمون شاهد می‌باشد. جالب توجه این‌که آزمون‌های ZE20 و ZE30 به ترتیب با ۶ و ۱۹ درصد کاهش، مقاومت کم‌تری نسبت به آزمون شاهد داشته‌اند. در سن ۲۸ روزه نیز کلیه آزمون‌های حاوی پوزولان به‌جز آزمون ZE30 نسبت به آزمون شاهد افزایش مقاومت داشته‌اند؛ به طوری که آزمون SF10P1 با ۴۹ درصد افزایش نسبت به آزمون شاهد بیشترین افزایش مقاومت را دارد؛ در حالی که آزمون ZE30 در این سن نسبت به آزمون شاهد ۱۵ درصد کاهش مقاومت را نشان داده است. در نتیجه آزمون‌های حاوی میکروسیلیس در ترکیب با الیاف پلی‌پروپیلن بهترین عملکرد و آزمون‌های حاوی ژئولیت با درصد جایگزینی بیشتر از ۱۰٪، ضعیف‌ترین عملکرد را از لحاظ بهبود مقاومت فشاری داشته‌اند. این در حالی است که مقاومت فشاری آزمون‌های ZE10، بیش از مقاومت فشاری آزمون‌های SF5 و MK5 است.

### تعیین میزان نفوذ یون کلر

پس از نه ماه از آغاز زمان رویارویی، اولین مرحله عملیات پودرگیری برای تعیین میزان نفوذ یون کلر در محل سایت انجام شد. برای این منظور، دستگاه پروفیل‌گیری و گیره‌ی نگهداری متناسب با آزمون‌های منشوری، طراحی و ساخته شد (شکل (۳)). پودرهای تهیه شده به آزمایشگاه انستیتو مصالح ساختمانی منتقل و مطابق استاندارد ASTM C114 [17] عملیات محلول‌سازی انجام و سپس با استفاده از روش اسپکتوفتومتری، مقدار یون کلر مشخص شد. نتایج حاصله توسط نرم‌افزارهای مربوطه تجزیه و تحلیل و مقادیر ضریب انتشارپذیری و کلر سطحی با استفاده از برازش معادله‌ی دوم فیک به‌دست آمد [۱۸].

### نتایج و بحث

**مقاومت فشاری بتن سخت شده.** مقاومت فشاری آزمون‌ها با ساخت آزمون‌های مکعبی  $150 \times 150 \times 150$  میلی‌متری اندازه‌گیری شد. نتایج مربوط به متوسط مقاومت فشاری سه آزمون‌های بتنی در سنین ۷ و ۲۸ روز در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج



شکل ۳ جزئیات عملیات پودرگیری از آزمون‌ها در محل سایت تحقیقاتی

جدول ۳ مقاومت فشاری آزمون‌های حاوی پوزولان و آزمون شاهد در سنین ۷ و ۲۸ روزه

کد آزمون	مقاومت فشاری ۷ روزه	درصد افزایش نسبت به شاهد	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد
C2	۲۷	شاهد	۳۸	شاهد
SF5	۳۴	۱۲۴	۴۵	۱۲۰
SF7.5	۴۱	۱۵۲	۵۰	۱۳۳
SF10	۳۸	۱۴۰	۵۲	۱۳۹
MK5	۳۲	۱۱۷	۴۳	۱۱۵
MK10	۳۶	۱۳۳	۴۵	۱۱۹
MK15	۳۹	۱۴۲	۴۷	۱۲۵
ZE10	۳۸	۱۴۰	۴۷	۱۲۵
ZE20	۲۶	۹۴	۴۰	۱۰۶
ZE30	۲۲	۸۱	۳۲	۸۵
SF10P0	۴۴	۱۶۲	۵۴	۱۴۵
SF10P1	۴۳	۱۵۸	۵۶	۱۴۹

۱۰ درصد کاهش می‌یابد. هم‌چنین مقدار کلر سطحی نیز با افزایش درصد جایگزینی کم می‌شود؛ به طوری که این مقدار از ۰/۷۵ به ۰/۶۲ کاهش یافته و میانگین سه مقدار ۰/۷ است. با توجه به کاهش نفوذ یون کلر در عمق مشخص نسبت به آزمون شاهد در آزمون‌های SF5، SF7.5، SF10 که به ترتیب ۵۷ و ۷۰ و ۸۱ درصد است، می‌توان نتیجه گرفت که مناسب‌ترین عملکرد مربوط به آزمون SF10 می‌باشد. بنابراین در ناحیه‌ی جزرومد، درصد بهینه جایگزینی میکروسیلیس بین ۷/۵ تا ۱۰ درصد تخمین زده می‌شود.

آزمون‌های حاوی متاکائولن MK5، MK10، MK15 به ترتیب ۶۰، ۸۳ و ۸۶ درصد کاهش نفوذ یون کلر در عمق مشخص ۲۰ میلی‌متر و ۸۰، ۹۰ و ۹۲ درصد کاهش در ضریب انتشارپذیری نسبت به آزمون شاهد داشته‌اند. میزان کلر سطحی نیز به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۹۲ و ۱/۰۷ درصد وزنی بتن می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با بررسی پارامترهای نفوذ یون کلر در عمق مشخص و ضریب انتشارپذیری، عملکرد آزمون‌های حاوی متاکائولن بهتر از آزمون‌های شاهد بوده، ولی میزان کلر سطحی آن‌ها بیشتر از آزمون شاهد است. بنابراین با در نظر گرفتن هر سه پارامتر مذکور، می‌توان درصد

**پروفیل یون کلر.** پروفیل‌های یون کلر کل (محلول در اسید) حاصل از برازش مقادیر کلر در عمق‌های مختلف بتن، مربوط به آزمون‌های حاوی پوزولان و آزمون شاهد در ناحیه‌های جزرومد و پاشش به ترتیب در نمودارهای (۱) و (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است مقدار کلر بحرانی طبق تحقیقات قبلی به دست آمده از سازه‌های واقعی در منطقه‌ی خلیج فارس، ۰/۰۷ درصد وزنی بتن در نظر گرفته شده است که در نمودارهای مربوط به پروفیل آزمون‌ها مشخص می‌باشد [19,20].

هم‌چنین از دیگر پارامترهای حاصل از تجزیه و تحلیل نتایج برازش که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند، می‌توان به مقادیر یون کلر در عمق ۲۰ میلی‌متر، ضریب انتشارپذیری و مقادیر کلر سطحی اشاره کرد که به ترتیب در جداول (۴)، (۵) و (۶) ارائه شده‌اند. باید یادآور شد که ضریب رگرسیون ( $r^2$ ) در محاسبه‌ی ضریب انتشارپذیری بیش از ۰/۹۶ بوده است.

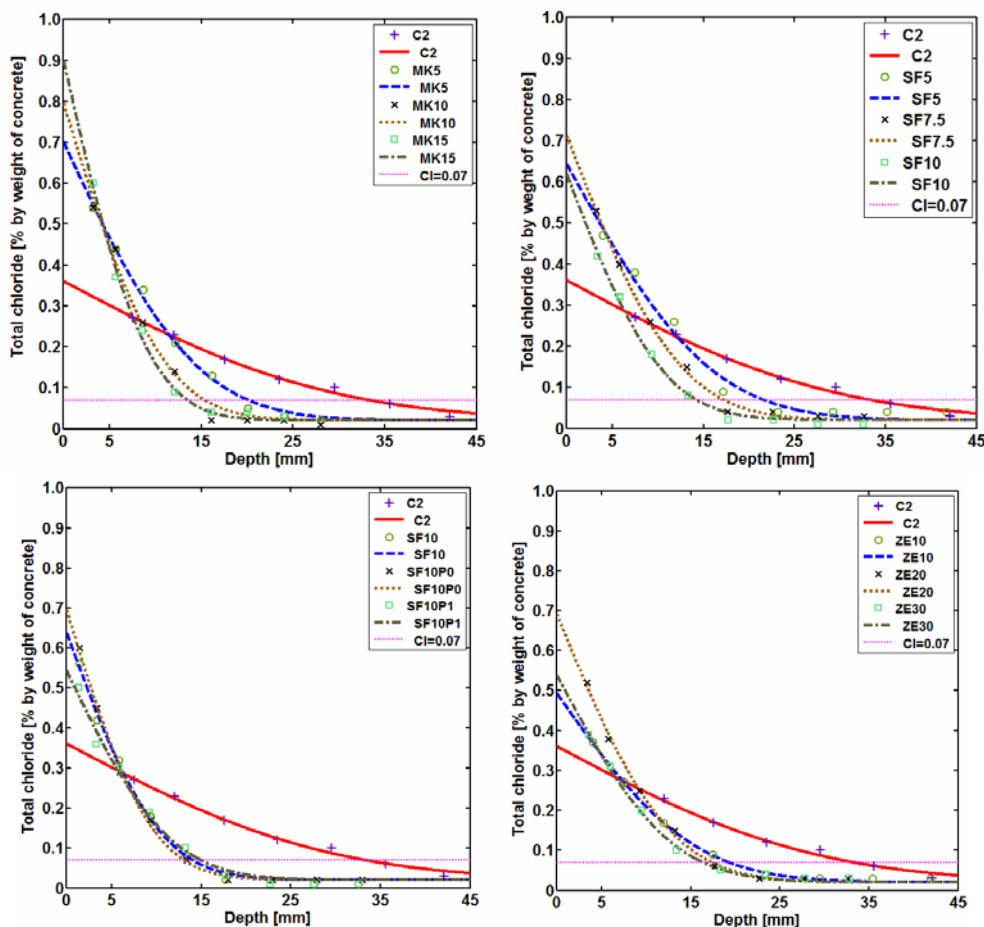
همان‌طور که از نتایج مربوط به ناحیه‌ی جزرومد برمی‌آید، در آزمون‌های حاوی پوزولان میکروسیلیس با افزایش میزان درصد جایگزینی میکروسیلیس، میزان نفوذ یون کلر در عمق ۲۰ میلی‌متر و مقدار ضریب انتشارپذیری نسبت به آزمون شاهد (C2) به ترتیب ۲۴ و

SF10P1 نسبت به آزمون شاهد عملکرد بهتری داشته‌اند. نفوذ یون کلر در آزمون SF10P0 و در عمق مشخص ۲۰ سانتی‌متر در مقایسه با آزمون SF10 حدود ۳ درصد کاهش نشان می‌دهد؛ در حالی که همین پارامتر در آزمون SF10P1 حدود ۳ درصد افزایش نفوذ یون کلر را داشته است. روند این تغییرات در بررسی ضریب انتشارپذیری و کلر سطحی نیز مشاهده می‌شود؛ به طوری که آزمون‌های فوق به ترتیب ۲ درصد کاهش و ۳ درصد افزایش را در پارامتر ضریب انتشارپذیری نشان می‌دهند. کلر سطحی آزمون SF10P0 با مقدار ۰/۶۸ درصد وزنی بتن در مقایسه با SF10 افزایش و آزمون SF10P1 با مقدار ۰/۵۲ درصد نسبت به وزن بتن کاهش یافته است. بنابراین آزمون SF10P0 در مقایسه با آزمون SF10P1، نسبت به آزمون SF10 عملکرد مناسب‌تری داشته است.

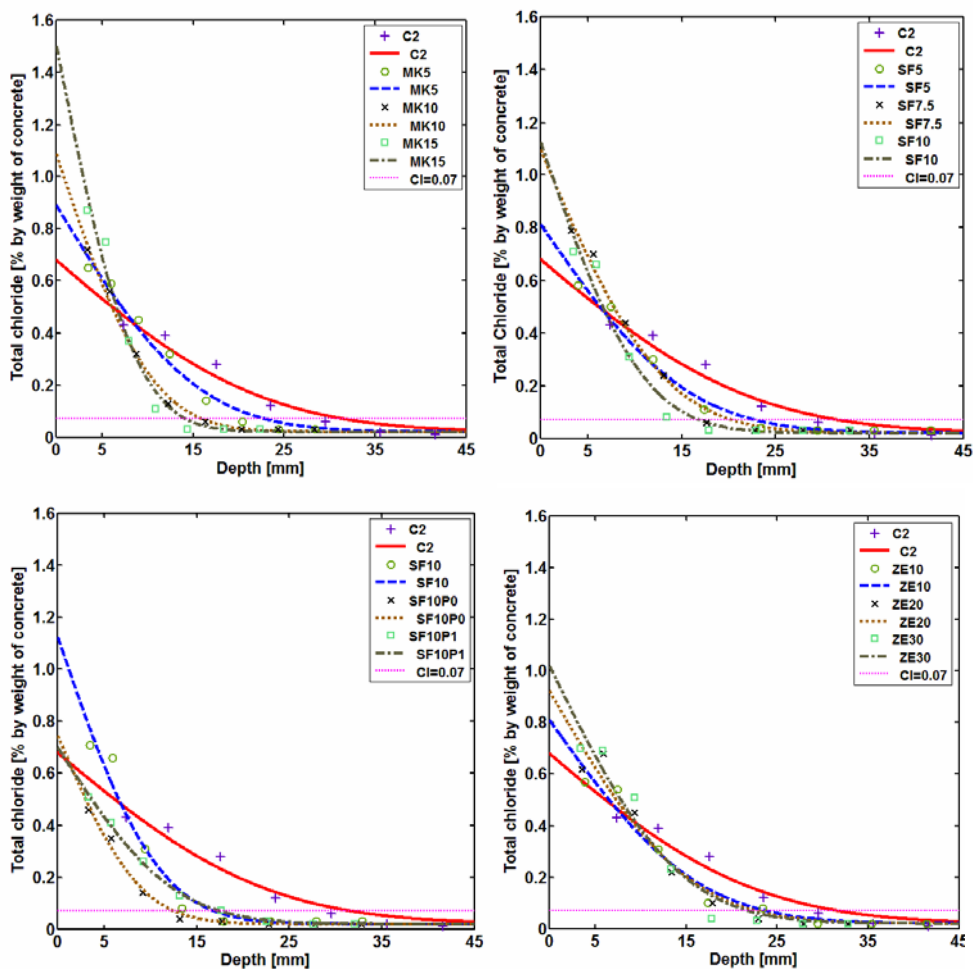
بهینه‌ی جایگزینی متاکائولن را بین ۵ تا ۱۰ درصد وزنی بتن در نظر گرفت.

در ناحیه‌ی جزرومد، مقادیر کاهش نفوذ یون کلر در عمق مشخص و ضریب انتشارپذیری آزمون‌های حاوی زئولیت مقادیر تقریباً یکسانی را نشان می‌دهند. البته میزان کلر سطحی در این آزمون‌ها بیشتر از آزمون شاهد است و آزمون ZE20 بیشترین میزان در بین آزمون‌های حاوی زئولیت را دارا می‌باشد. مقدار کاهش کلر در عمق ۲۰ میلی‌متر بین ۴۸ تا ۶۱ درصد به دست آمده است.

مقایسه‌ی آزمون‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن در ترکیب با ۱۰ درصد میکروسیلیس، نشان دهنده‌ی عملکرد متفاوت آن‌ها نسبت به آزمون حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس است. هرچند که هر دو آزمون SF10P0 و



نمودار ۱ پروفیل‌های یون کلر آزمون‌های حاوی پوزولان در ناحیه‌ی قرارگیری جزرومد



نمودار ۲ پروفیل‌های یون کلر آزمون‌های حاوی پوزولان در ناحیه ی قرارگیری پاشش

جدول ۴ مقادیر نفوذ یون کلر در عمق ۲۰ میلی‌متری بتن در طرح اختلاط‌های مختلف (درصد وزنی بتن)

کد آزمون	ناحیه ی جزرومد	درصد کاهش نسبت به آزمون شاهد	ناحیه ی پاشش	درصد کاهش نسبت به آزمون شاهد
C2	۰/۱۵۱	شاهد	۰/۱۹۲	شاهد
SF5	۰/۰۶۵	۵۷	۰/۱۰۲	۴۷
SF7.5	۰/۰۴۶	۷۰	۰/۰۷۴	۶۱
SF10	۰/۰۲۸	۸۱	۰/۰۴۰	۷۹
MK5	۰/۰۶۱	۶۰	۰/۱۰۵	۴۵
MK10	۰/۰۲۶	۸۳	۰/۰۳۴	۸۲
MK15	۰/۰۲۲	۸۶	۰/۰۲۴	۸۷
ZE10	۰/۰۴۶	۶۹	۰/۱۱۳	۴۱
ZE20	۰/۰۴۷	۶۹	۰/۱۰۱	۴۷
ZE30	۰/۰۴۴	۷۱	۰/۰۹۲	۵۲
SF10P0	۰/۰۲۴	۸۴	۰/۰۲۳	۸۸
SF10P1	۰/۰۳۴	۷۸	۰/۰۴۸	۷۵



جدول ۵ نتایج ضریب انتشارپذیری یون کلر در طرح اختلاطهای مختلف (متر مربع بر ثانیه)

کد نمونه	ناحیه ی جزرومد		ناحیه ی پاشش	
	۱۰-۱۲D×	درصد کاهش نسبت به شاهد	۱۰-۱۲D×	درصد کاهش نسبت به شاهد
C2	۱۱/۰۷	شاهد	۶/۶۶	شاهد
SF5	۲/۳۹	۷۸	۳/۱۶	۵۳
SF7.5	۱/۹۴	۸۲	۲/۲۰	۶۷
SF10	۱/۳۷	۸۸	۱/۵۰	۷۸
MK5	۲/۲۷	۸۰	۳/۰۸	۵۴
MK10	۱/۱۴	۹۰	۱/۳۸	۷۹
MK15	۰/۸۶	۹۲	۰/۹۵	۸۶
ZE10	۲/۱۱	۸۱	۳/۴۳	۴۸
ZE20	۲/۰۰	۸۲	۲/۹۳	۵۶
ZE30	۲/۱۴	۸۱	۲/۶۰	۶۱
SF10P0	۱/۱۴	۹۰	۱/۰۱	۸۵
SF10P1	۱/۷۰	۸۵	۲/۰۱	۷۰

جدول ۶ نتایج محاسباتی کلر سطحی آزمونهای بتنی در طرح اختلاطهای مختلف (درصد وزنی بتن)

کد نمونه	ناحیه ی جزرومد	ناحیه ی پاشش
C2	۰/۳۴	۰/۶۶
SF5	۰/۷۵	۰/۷۹
SF7.5	۰/۶۹	۱/۰۸
SF10	۰/۶۲	۱/۱۱
MK5	۰/۷۵	۰/۸۷
MK10	۰/۹۲	۱/۰۷
MK15	۱/۰۱	۱/۴۸
ZE10	۰/۵۸	۰/۷۹
ZE20	۰/۶۸	۰/۹۰
ZE30	۰/۵۱	۱/۰۰
SF10P0	۰/۶۸	۰/۷۳
SF10P1	۰/۵۲	۰/۶۸

آزمایش در ناحیه ی جزرومد داشته است. از طرفی، آزمونهای SF5 و MK5 با مقدار تقریبی ۶۰ درصد کاهش در میزان نفوذ یون کلر در عمق مشخص و مقدار تقریبی ۸۰ درصد کاهش در ضریب انتشارپذیری نسبت به آزمون شاهد در بین آزمونهای حاوی پوزولان

با تحلیل نتایج، می توان نتیجه گرفت که در مجموع آزمون MK15 با ۸۶ و ۹۲ درصد به ترتیب بیشترین میزان درصد کاهش در نفوذ یون کلر در عمق ۲۰ میلی متر و بیشترین کاهش ضریب انتشارپذیری را دارد که بدین ترتیب، بهترین عملکرد را در میان آزمونهای مورد

توجه به اختلاف درصد کاهش قابل ملاحظه ۳۷ و ۲۵ درصدی به ترتیب برای پارامترهای مقدار نفوذ یون کلر و ضریب انتشارپذیری بین آزمون‌های MK5 و MK10 در مقایسه با اختلاف ۵ و ۷ درصدی همین مقادیر بین آزمون‌های MK10 و MK15، چنین استنتاج می‌شود که درصد جایگزینی بهینه برای پوزولان متاکائولن در این ناحیه بین ۵ تا ۱۰ درصد می‌باشد.

آزمون‌های ZE10، ZE20، ZE30 شامل ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزینی پوزولان طبیعی ژئولیت به ترتیب شاهد ۴۱، ۴۷ و ۵۲ درصد کاهش نفوذ یون کلر در عمق مشخص و ۴۸، ۵۶ و ۶۱ درصد کاهش ضریب انتشارپذیری نسبت به آزمون شاهد است. مقادیر کلر سطحی نیز ۰/۷۹، ۰/۹ و ۱ درصد وزنی بتن می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مطابق دو پوزولان قبلی در این ناحیه، روند افزایش درصد کاهش در نفوذ یون کلر در عمق مشخص و ضریب انتشارپذیری و هم‌چنین کاهش در مقادیر کلر سطحی با افزایش درصد جایگزینی پوزولان تکرار شده است. باید توجه داشت که در این پوزولان، اختلاف درصد کاهش بین دو درصد جایگزینی متوالی اندک می‌باشد؛ به طوری که بین آزمون‌های ZE10 و ZE20 و آزمون‌های ZE20 و ZE30 به ترتیب ۶ و ۵ درصد اختلاف درصد کاهش در مقدار نفوذ یون کلر و ۵ درصد اختلاف درصد کاهش در ضریب انتشارپذیری مشاهده می‌شود. بنابراین، با بررسی همه نتایج حاصله می‌توان درصد جایگزینی بهینه برای پوزولان طبیعی ژئولیت را بین ۱۰ تا ۲۰ درصد تخمین زد.

آزمون‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن در ترکیب با پوزولان میکروسیلیس در ناحیه‌ی پاشش، شامل کدهای SF10P0 و SF10P1 در مقایسه با آزمون شاهد عملکرد بهتری داشته‌اند؛ به طوری که به ترتیب ۸۸ و ۷۵٪ در میزان نفوذ یون کلر در عمق ۲۰ سانتی‌متر و ۸۵ و ۷۰٪ در ضریب انتشارپذیری نسبت به آزمون شاهد کاهش نشان می‌دهند. ولی در مقایسه با آزمون SF10، عملکرد آزمون SF10P0 بهتر از آزمون SF10P1 بوده است.

عملکرد ضعیف‌تری داشته‌اند. هم‌چنین آزمون MK15 با ۱/۰۱ درصد وزنی بتن کلر سطحی بیشترین و آزمون ZE30 با ۰/۵۱ درصد وزنی بتن کم‌ترین میزان کلر سطحی را در بین آزمون‌های حاوی پوزولان داشته‌اند.

نتایج مربوط به ناحیه‌ی پاشش، کاهش میزان نفوذ یون کلر و ضریب انتشارپذیری را با افزایش مقدار درصد جایگزینی میکروسیلیس نشان می‌دهد. درصد کاهش میزان نفوذ یون کلر و ضریب انتشارپذیری برای آزمون‌های SF5، SF7.5، SF10 در مقایسه با آزمون شاهد به ترتیب ۴۷، ۶۱ و ۷۹ درصد و ۵۳، ۶۷ و ۷۸ درصد می‌باشد. این در حالی است که مقدار کلر سطحی در این آزمون‌ها با افزایش درصد جایگزینی روند صعودی داشته و به ترتیب ۰/۷۹، ۱/۰۸ و ۱/۱۱ درصد وزنی بتن است. با توجه به اختلاف ۱۴ درصدی در کاهش نفوذ یون کلر و ضریب انتشارپذیری بین آزمون‌های SF5 و SF7.5 و اختلاف ۱۸ درصدی در کاهش نفوذ یون کلر و ۱۱ درصدی در کاهش ضریب انتشارپذیری در آزمون‌های SF7.5 و SF10 و با توجه به مقادیر کلر سطحی هر سه آزمون می‌توان به این نتیجه رسید که با تغییرات اندک رخ داده، درصد جایگزینی بهینه میکروسیلیس برای این ناحیه نیز بین ۷/۵ و ۱۰ درصد است.

در آزمون‌های حاوی متاکائولن نیز همانند آزمون‌های حاوی میکروسیلیس، روند کاهشی نفوذ یون کلر در عمق مشخص و ضریب انتشارپذیری و افزایش مقدار کلر سطحی نسبت به آزمون شاهد، البته با مقادیر متفاوت تکرار شده است. درصدهای کاهش ۴۵، ۸۲ و ۸۷ برای نفوذ یون کلر در عمق مشخص و ۵۴، ۷۹ و ۸۶ برای ضریب انتشارپذیری در مقایسه با آزمون شاهد به ترتیب در آزمون‌های MK5، MK10 و MK15 نشان دهنده‌ی این روند کاهشی می‌باشد. البته مقادیر کلر سطحی ۰/۸۷، ۱/۰۷ و ۱/۴۸ درصد وزنی بتن به ترتیب برای آزمون‌های MK5، MK10 و MK15 نیز بیانگر روند صعودی نسبت به کلر سطحی آزمون شاهد است. با

این ناحیه نسبت به دیگر آزمون‌های حاوی پوزولان عملکرد ضعیف‌تری داشته‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان نفوذ یون کلر در کلیه آزمون‌های واقع در ناحیه پاشش به‌جز آزمون‌های SF10P0 بیشتر از ناحیه‌ی جزرومد می‌باشد. دلیل عملکرد متفاوت آزمون SF10P0 را می‌توان ناشی از تاثیر متفاوت شرایط محیطی دانست. تقریباً در تمامی آزمون‌های حاوی پوزولان‌های مختلف با افزایش درصد جایگزینی پوزولان تاثیر تغییر شرایط رویارویی کم‌تر می‌شود؛ به طوری که در هر سه پوزولان میکروسیلیس، متاکائولن و زئولیت کم‌ترین درصد افزایش نفوذ یون کلر آزمون‌های ناحیه‌ی پاشش نسبت به ناحیه‌ی جزرومد در بیشترین درصد جایگزینی هر پوزولان مشاهده می‌شود.

از جمع‌بندی نتایج ارائه شده در هر دو ناحیه‌ی جزرومد و پاشش می‌توان درصدهای بهینه‌ی هر پوزولان را در ناحیه‌های جزرومد و پاشش معرفی نمود. آزمون‌های SF10، MK10 و ZE10 در ناحیه‌ی جزرومد و آزمون‌های SF10، MK10 و ZE20 در ناحیه‌ی پاشش نسبت به دیگر آزمون‌های حاوی پوزولان در پارامترهای مورد بررسی، عملکرد مناسب‌تری داشته‌اند. هم‌چنین در هر سه پارامتر مورد بررسی، نفوذ یون کلر در عمق ۲۰ میلی‌متری، ضریب انتشارپذیری و کلر سطحی، آزمون‌های حاوی پوزولان عملکرد بهتری نسبت به آزمون‌های شاهد نشان داده‌اند. با این حال آزمون MK10 در هر دو ناحیه‌ی جزرومد و پاشش، بهترین عملکرد را داشته است.

نکته‌ی قابل توجه این‌که با وجود کاهش قابل ملاحظه مقدار نفوذ یون کلر و ضریب انتشارپذیری در آزمون‌های حاوی پوزولان نسبت به آزمون شاهد، مقدار کلر سطحی در این آزمون‌ها نسبت به آزمون شاهد افزایش محسوسی داشته است. به این ترتیب در آزمون‌های با طرح‌های اختلاط متفاوت در شرایط قرارگیری یکسان، مقدار کلر سطحی زیاده‌تر، نشان‌دهنده‌ی

اختلاف درصد کاهش در مقدار نفوذ یون کلر در عمق ۲۰ میلی‌متری بین آزمون‌های SF10P0 و SF10P1 با آزمون SF10 به ترتیب ۹ و ۴٪ می‌باشد. این اختلاف در ضریب انتشارپذیری، ۷٪ و ۸٪ است که نشان دهنده‌ی عملکرد بهتر بتن‌های حاوی الیاف پروپیلن نسبت به بتن بدون الیاف می‌باشد. مقدار کلر سطحی نیز در هر دو آزمون با مقادیر ۰/۷۳ و ۰/۶۸٪ وزنی بتن نسبت به آزمون SF10 کاهش یافته است. بنابراین در مجموع، چنین استنتاج می‌شود که آزمون SF10P0 عملکرد مناسب‌تری نسبت به آزمون SF10P1 داشته است و افزایش در میزان استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن الزاماً این عملکرد را بهبود نمی‌بخشد.

در نهایت، بررسی نتایج کلیه‌ی آزمون‌های حاوی پوزولان‌های مختلف و هم‌چنین آزمون‌های بدون پوزولان با نسبت آب به سیمان مختلف در این ناحیه نشان می‌دهد که آزمون SF10P0 با ۸۸٪ و آزمون MK15 با ۸۷٪ بیشترین و آزمون ZE10 با ۴۱٪ کم‌ترین میزان درصد کاهش نفوذ یون کلر در عمق مشخص ۲۰ میلی‌متری را نسبت به آزمون شاهد داشته‌اند. هم‌چنین آزمون MK15 به همراه SF10P0 با ۸۶٪ و آزمون ZE10 با ۴۸٪ به ترتیب بیشترین و کم‌ترین میزان درصد کاهش ضریب انتشارپذیری را نسبت به آزمون شاهد در ناحیه پاشش نشان داده‌اند. در همین راستا، آزمون‌های MK15 با ۱/۴۸٪ و آزمون‌های ZE10 و SF5 با مقدار یکسان ۰/۷۹٪ وزنی بتن به ترتیب بیشترین و کم‌ترین مقدار کلر سطحی را در بین آزمون‌های حاوی پوزولان دارا هستند.

با توجه به نتایج ارائه شده در حالت کلی، می‌توان استنباط نمود که در ناحیه‌ی پاشش و در بین آزمون‌های بدون پوزولان و با نسبت آب به سیمان متفاوت آزمون C1 بهتر عمل کرده است. هم‌چنین مقایسه‌ی نتایج آزمون‌های حاوی پوزولان‌های مختلف نشان می‌دهد که آزمون‌های MK15 و SF10P0 بهترین عملکرد را داشته‌اند. از طرفی، آزمون‌های SF5، MK5، ZE10 در

مقدار نفوذ یون کلر و ضریب انتشارپذیری بتن می‌باشد و نشان می‌دهد نظر به این‌که پوزولان‌ها با اصلاح ریز ساختار بتن و کاهش ضریب انتشارپذیری برای ورود یون کلر مانع ایجاد می‌کنند و این کلر در سطح باقی می‌ماند.

۷. از جمع‌بندی نتایج ارائه شده می‌توان درصدهای بهینه‌ی هر پوزولان را در ناحیه‌های جزر و مد و پاشش معرفی نمود. در ناحیه‌ی جزر و مد، هر سه طرح اختلاط حاوی میکروسیلیس، متاکائولن و ژئولیت با ۱۰٪ جایگزینی و در ناحیه‌ی پاشش طرح حاوی میکروسیلیس و متاکائولن با ۱۰٪ جایگزینی و طرح حاوی ژئولیت با ۲۰٪ جایگزینی نسبت به دیگر آزمونه‌های حاوی پوزولان در پارامترهای مورد بررسی عملکرد بهینه‌ای داشته‌اند. بدیهی است انتخاب نوع پوزولان در هر پروژه علاوه بر پارامترهای فنی به در دسترس بودن پوزولان و پارامترهای اقتصادی نیز بستگی دارد.

۸. در بررسی عملکرد پوزولان‌های مختلف، ترتیب اولویت عملکرد مطلوب به صورت متاکائولن، میکروسیلیس و ژئولیت می‌باشد. با این حال، آزمونه MK10 در هر دو ناحیه‌ی جزر و مد و پاشش بهترین عملکرد را داشته است.

۹. استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن موجب عملکرد مناسب‌تر بتن در شرایط محیطی مهاجم شده است.

بدیهی است که نتایج ارائه شده در مدت زمان نه ماهه است و برای دستیابی به نتایج تکمیلی و قابل اطمینان‌تر نیاز به مطالعات دراز مدت می‌باشد. هم‌چنین مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که توجه به ملاحظات مقاومتی در طراحی، نمی‌تواند ضامن تأمین عمر مفید سازه‌ها باشد و به منظور تأمین عمر مفید یک سازه باید به مسائل پایایی نیز توجه نمود.

مقاومت بیشتر بتن در اجازه‌ی انتشار یون کلر به داخل بتن می‌باشد. به نظر می‌رسد که افزایش مقدار کلر سطحی پدیده‌ای است که نشان دهنده‌ی کاهش مقدار نفوذ یون کلر و ضریب انتشارپذیری بتن می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

۱. استفاده از پوزولان در طرح اختلاط بتن، نقش مهمی در افزایش طول عمر مفید سازه‌های بتنی در شرایط محیطی مهاجم از جمله خلیج فارس دارد.

۲. عمل‌آوری کوتاه مدت (سه روز) منجر به نفوذ مقدار زیاد یون کلر در بتن می‌شود؛ بنابراین، تحت این شرایط حتی بتن‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و بدون پوزولان در نواحی جنوبی خلیج فارس برای مقابله با شرایط گزندبار کفایت نمی‌کنند.

۳. ضریب انتشارپذیری آزمونه بدون پوزولان در ناحیه‌ی جزر و مد، بیشتر از ناحیه‌ی پاشش است. این در حالی است که با کاربرد پوزولان در طرح‌های اختلاط، ضریب انتشارپذیری آزمونه‌های حاوی پوزولان در ناحیه‌ی پاشش، بیشتر از ناحیه‌ی جزر و مد می‌باشد.

۴. در نسبت آب به سیمان یکسان و در صورت استفاده از پوزولان، مقدار ضریب انتشارپذیری در آزمونه‌های حاوی پوزولان در مقایسه با آزمونه بدون پوزولان در هر دو ناحیه پاشش و جزر و مد کاهش می‌یابد.

۵. مقدار کلر سطحی به ترتیب در نواحی پاشش، جزر و مد کاهش می‌یابد.

$$Cs(\text{پاشش}) > Cs(\text{جزر و مد})$$

۶. با وجود کاهش قابل ملاحظه، مقدار نفوذ یون کلر و ضریب انتشارپذیری در آزمونه‌های حاوی پوزولان نسبت به آزمونه شاهد، مقدار کلر سطحی در این آزمونه‌ها نسبت به آزمونه شاهد افزایش محسوسی داشته است. بنابراین، می‌توان استنباط نمود که افزایش مقدار کلر سطحی پدیده‌ای مثبت و در راستای کاهش

## مراجع

1. Bonakdar, A., Bakhshi, M., Ghalibafian, M., "Properties of High-performance Concrete Containing High Reactivity Metakaolin", 7th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, Washington DC. USA, Vol. 1, pp 228-295, (2005).
۲. شکرچی زاده؛ محمد، میردامادی؛ علیرضا، بنکدار؛ ابوذر، بخشی؛ مهدی، "بهبود خواص بتن‌های توانمند با استفاده از متاکائولن"، مجله‌ی تحقیقات بتن، شماره‌ی ۲، صفحات ۵۵-۶۳، (۱۳۸۷).
3. Boddy, A., Hooton, R., Gruber, K., "Long-term Testing of the Chloride-penetration Resistance of Concrete Containing High-reactivity Metakaolin", Cement and Concrete Research, 31 (5), pp 759-765, (2001).
4. Gruber, KA., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R., Thomas, M., "Increasing Concrete Durability with High-reactivity Metakaolin", Cement and Concrete Research, 23 (6), pp 479-484, (2001).
5. Feng, N.Q., Hsia-ming, Y., Li-Hong, Z., "The Strength Effect of Mineral Admixture on Cement Concrete", Cement and Concrete Research, Volume 18, Issue 3, pp 464-472, (1988).
6. Feng, N.Q., Li, G.Z., Zang, X.W., "High-Strength and Flowing Concrete Zeolitic Mineral Admixtures", Cement, Concrete and Aggregates, Volume 12, Issue 2, pp 61-69, (1990).
7. Liguori, B., Caputo, D., Marroccoli, M., Colella, C., "Evaluation of Zeolite-bearing Tuffs as Pozzolanic Addition for Blended Cements", *Eighth CANMET/ACI International conference on fly Ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete*, (2004).
8. Perraki, T., Kakali, G., Kontoleon, F., "The Effect of Natural Zeolites on the Early Hydration of Portland Cement", Microporous and Mesoporous Materials, Volume 61, Issues 1-3, pp 205-212, 18, (2003).
9. Poon, C. S., Lam, L., Kou, S.C., Lin, Z.S., "A Study on the Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cement Pastes", Construction and Building Materials, Volume 13, Issue 8, pp 427-432, (1999).
10. Chan, S.Y.N., Ji, X., "Comparative Study of the Initial Surface Absorption and Chloride Diffusion of High Performance Zeolite, Silica Fume and PFA Concretes", Cement and Concrete Composites, Volume 21, Issue 4, pp 293-300, (1999).
11. Tatematsu, H., Nakamura, T., Koshimizu, H., "Zeolites", Abstract, (1996).
12. Ahmadi, B., Shekarchi, M., "Use of Natural Zeolite as a Supplementary Cementitious Material", Cement and Concrete Composites, Volume 32, Issue 2, pp 134-141, (2010).
13. ACI 224, "Protection of metals in concrete against corrosion", (2001).
14. Shekarchi, M., Rafiee, A., Layssi, H., "Long-term Chloride Diffusion in Silica Fume Concrete in Harsh Marine Climates", Cement & concrete composite, Volume 31, Issue 10, pp 769-775, (2009).
15. Ghods, P., Chini, M., Alizadeh, A., Hoseini, M., Shekarchi, M., Ramezaniapur, A.A., "The Effect of Different Exposure Conditions on the Chloride Diffusion into Concrete in the Persian Gulf Region", 3th ConMat'05, Vancouver, Canada, 10 pages, (2007).

16. ASTM G109, "Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments", (2003).
17. ASTM C114-00, "Standard Test Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01.
۱۸. رفیعی؛ علیرضا. "بررسی اثر زمان بر آهنگ نفوذ یون کلر در بتن در محیط خلیج فارس با رویکرد احتمال اندیشانه"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران، (۱۳۸۶).
19. Shekarchi, M., Moradi-Marani, F., Pargar, F., "Corrosion Damage of a Reinforced Concrete Jetty Structure in the Persian Gulf: a Case Study, Structure and Infrastructure Engineering, p .1-13, (2009).
20. Pargar, F., Layssi, H., Shekarchi, M., "Investigation of Chloride Threshold Value in an Old Concrete Structure. *Fifth International Conference on Concrete under Severe Conditions, Environment and Loading, CONSEC'07 conference, France, June 4-6, (2007).*