

## مدل سازی ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی پوزولان متاکائولن در منطقه پاششی جزیره قشم

عطیه فراهانی<sup>۱\*</sup>، محمد حسین تدین<sup>۱</sup>، محمد شکرچی زاده<sup>۱</sup>

۱. انستیتو مصالح ساختمانی، دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

Email: a\_farahani87@ut.ac.ir

Tel: 09189557886

### چکیده

امروزه سازه‌های بتنی نقش بسیار مهمی در زیرساخت‌های هر جامعه‌ای دارند. بنابراین شرایط و عملکرد این سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سال‌های اخیر تعداد زیادی از سازه‌های بتنی در مناطق دریایی کشورهای مختلف دنیا و مخصوصاً خلیج فارس دچار آسیب‌دیدگی و یا خرابی زودرس شده‌اند. تخریب بتن در محیط‌های کلریدی و خورنده از جمله رایج‌ترین این خرابی‌ها در سازه‌های بتن مسلح بوده و یکی از مهمترین مشکلاتی است که مهندسان عمران امروزه در نگهداری سازه‌های بتن مسلح با آن مواجه می‌باشند. بنابراین لزوم بررسی فرایند انتشار یون کلرید و تخمین ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن به منظور تخمین عمر مفید سازه‌های بتنی در شرایط محیطی مهاجم همچون منطقه خلیج فارس ضروری به نظر می‌رسد.

در مطالعه حاضر به مدل‌سازی ضریب انتشار یون کلرید در بتن بر اساس طرح مخلوط‌های بتنی حاوی پوزولان متاکائولن با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت و با ۵۰ ماه رویارویی در منطقه پاششی جزیره قشم پرداخته شده است. این مدل تجربی بر اساس قانون دوم انتشار فیک و تحلیل خطی رگرسیون روی نتایج سایت قشم بدست آمده است. نتایج حاصل از سایت در منطقه پاششی با تقریب بسیار مناسبی با نتایج حاصل از مدل مطابقت دارد. نتایج نشان می‌دهد افزایش درصد جایگزینی متاکائولن در کاهش مقدار ضریب انتشار یون کلرید در بتن موثر می‌باشد. همچنین ضریب انتشار یون کلرید در بتن با گذشت زمان کاهش و با افزایش دما افزایش می‌یابد.

### واژگان کلیدی:

بتن مسلح، ضریب انتشار یون کلرید، متاکائولن، مدل‌سازی، ناحیه پاششی.

کد: 139D.

\*مسئول مکاتبات



# Modeling of Chloride Diffusion Coefficient of Concrete with Metakaolin in Splash Zone of Qeshm Island

Atiye Farahani<sup>1\*</sup>, Mohammad Hosein Tadayon<sup>1</sup>,  
Mohammad Shekarchizadeh<sup>1</sup>

1. Construction Materials Institute, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Email: a\_farahani87@ut.ac.ir

Tel: 09189557886

Today, concrete structures have a crucial role in the infrastructure of society. The condition and performance of these structures are important. In recent years, a number of concrete structures in marine environments of different countries especially Persian Gulf region have suffered damage or premature failure. Concrete degradation in the chloride environment is the most common failure of reinforced concrete structures and an important problem for civil engineers today faced with the maintenance of them. Thus, investigation of chloride diffusion phenomenon and prediction of chloride diffusion coefficient are necessary for service life estimation in aggressive environment such as Persian Gulf region.

The present study develops an experimental model to predict the chloride diffusion coefficient based on concrete mix designs containing metakaolin with constant water to binder ratio. These mixes are exposed to sea water in a durability site in Qeshm Island for 3, 9, 27 and 50 months. This empirical model is developed by applying linear regression analysis based on Fick's second law on the experimental results. This comparison indicates that the predicted chloride diffusion coefficient is in good relation with diffusivity of field specimens. The results indicate that adding the metakaolin has strong effect on reducing the chloride diffusion coefficient in reinforced concrete structures. This study also confirmed that the chloride diffusion coefficient increases with temperature and decreases over time.

## Keywords:

Chloride diffusion coefficient, Reinforced concrete, Metakaolin, Modelling, Splash zone.

Code : D.

## ۱. مقدمه

بتن به عنوان یک ماده ساختمانی، نزدیک به دو قرن است که در صنعت ساختمان به کار می‌رود. خرابی‌های زودرس به خصوص در سازه‌های موجود در مناطق دریایی و خورنده، نگرانی وسیعی را در اذهان طراحان بتن به وجود آورده است. لذا گسترش کاربرد بتن و بتن مسلح به عنوان مصالح ساختمانی با دوام در سازه‌ها، شناخت خواص بتن، تکنولوژی و کاربرد صحیح آن را برای تامین عمر مفید طراحی شده ضروری می‌سازد [۱ و ۲]. نفوذ یون کلرید در سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی یکی از دلایل آغاز و گسترش خوردگی بتن می‌باشد [۳-۵]. خلیج فارس به عنوان یک محیط دریایی مهاجم با نرخ تبخیر و دمای بالا و بخصوص غلظت‌های زیاد نمک نسبت به سایر دریاها، جهان تاثیر بسزایی در خوردگی میلگردها در سازه‌های بتن مسلح دارد [۶ و ۷]. بنابراین دوام و خدمت‌پذیری سازه‌های بتنی در منطقه خلیج فارس باید کنترل شود. یکی از عوامل با اهمیت در افزایش دوام سازه‌های بتنی در محیط‌های کلریدی و خورنده، استفاده از مواد پوزولانی به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند مورد استفاده در طرح مخلوط بتن می‌باشد [۸-۱۱]. متاکائولن یک پوزولان بسیار فعال با پایه سیلیسی است که مواد خام اولیه در تولید آن، رس کائولن می‌باشد. رس کائولن یک ماده معدنی است که در دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، بیشتر آب جذب شده خود را از دست می‌دهد. کائولینیت به عنوان جزء اصلی تشکیل دهنده کائولن، در دمای بین ۵۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، دی هیدراکسیونیته شده و آب خود را از دست می‌دهد [۱۲ و ۱۳]. مطالعات نشان داده است استفاده از ۱۰ درصد متاکائولن جایگزین سیمان در طرح مخلوط بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳ دارای مقاومت فشاری تسلیم بیشتر و نفوذ پذیری کمتری در برابر یون کلرید نسبت به طرح حاوی دوده سیلیس جایگزین سیمان می‌باشد [۱۴ و ۱۵]. نتایج حاصل از مقایسه بتن حاوی ۱۰ درصد متاکائولن با بتن معمولی با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ نشان داد بتن حاوی متاکائولن دارای قابلیت انتقال یون کلرید کمتری نسبت به بتن شاهد می‌باشد [۱۶]. بررسی تاثیر زمان رویارویی در نمونه‌های حاوی متاکائولن روی میزان نفوذ یون کلرید در بتن نشان داد با گذشت زمان رویارویی در محیط کلریدی، افزایش درصد متاکائولن جایگزین سیمان و کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، میزان نفوذ یون کلرید در بتن کاهش می‌یابد [۱۷ و ۱۸]. همچنین، Gruber و همکاران نشان دادند با افزایش درصد جایگزینی سیمان با متاکائولن به میزان ۸ تا ۱۲ درصد وزنی سیمان در بتن، مقدار ضریب انتشار یون کلرید در بتن در مقایسه با نمونه شاهد به میزان ۵۰ تا ۶۰ درصد کاهش می‌یابد [۱۸].

به منظور تخمین عمر مفید سازه‌های بتنی در مناطق کلریدی پیش‌بینی ضریب انتشار یون کلرید حائز اهمیت می‌باشد. از این‌رو محققان زیادی مدل‌هایی عددی و تجربی برای تخمین ضریب انتشار یون کلرید در بتن ارائه کردند. Boufiza و همکاران در مدل خود ضریب انتشار یون کلرید در بتن را تابع نسبت آب سیمان بدست آوردند. این مدل برای بتن حاوی سرباره و دوده سیلیس و همچنین بتن بدون افزودنی و یا بتن حاوی خاکستر بادی قابل کاربرد است [۱۹]. در سال ۲۰۰۷، Luping و Gulikers ضریب انتشار یون کلرید در بتن در محیط دریایی را به صورت تابعی از زمان رویارویی ارائه کردند [۲۰]. در Life 365 نیز ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی سیمان پرتلند تابعی از زمان رویارویی در محیط کلریدی و دمای نمونه بتنی در نظر گرفته شده است. همچنین با استفاده از ضریبی وابسته به مقدار دوده سیلیس جایگزین سیمان پرتلند در ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی سیمان پرتلند، ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی دوده سیلیس بدست می‌آید [۲۱]. Saetta و همکاران در مدل خود کلیه پارامترهای موثر در ضریب انتشار یون کلرید در سازه بتنی واقع در محیط دریایی چون دما، رطوبت نسبی بتن و همچنین زمان رویارویی بتن در محیط کلریدی را در نظر گرفته است [۲۲]. Mangat و Molloy نیز در مدل خود ضریب انتشار یون کلرید در بتن را به صورت تابعی توانی از زمان رویارویی نمونه‌های بتنی در محیط کلریدی در نظر گرفت. توان یا ضریب سن بتن در محیط کلریدی را نیز به صورت تابعی از نسبت آب به سیمان پیش‌بینی کرد [۲۳].

مدل تجربی ارائه شده در این مقاله، ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی متاکائولن در بلند مدت در منطقه پاششی جزیره قشم را پیش‌بینی می‌کند. نتایج ارائه شده در این تحقیق برای مدل‌سازی عمر مفید سازه‌های بتن مسلح در معرض محیط دریایی و خورنده حائز اهمیت می‌باشد.

## ۲. مطالعات آزمایشگاهی

## ۲-۱. مصالح مصرفی

سیمان مصرفی در طرح‌های اختلاط سیمان پرتلند نوع ۲ هرمرگان می‌باشد. مصالح سنگی ریزدانه به صورت گرد گوشه و سیلیسی-آهکی و مصالح سنگی درشت دانه به صورت شکسته و آهکی با بزرگترین اندازه سنگدانه ۱۹ میلی‌متر و مخلوط سنگدانه با نسبت ۶۲ درصد درشت دانه به ۳۸ درصد ریزدانه می‌باشند. همچنین پوزولان طبیعی متاکائولن از شرکت آسان سرام تهیه شده است. در طرح‌های اختلاط به منظور تامین روانی بتن تازه از مواد فوق روان کننده با پایه کربوکسیلات استفاده شده است. همچنین درصد جذب آب سنگدانه‌ها محاسبه شده و قبل از ساخت بتن با اندازه‌گیری درصد رطوبت سنگدانه‌ها، مقدار آب طرح اختلاط اصلاح شد. جدول ۱ مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند و متاکائولن را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند و متاکائولن

سیمان (%)	متاکائولن (%)	
۶۳	۰/۲	اکسید کلسیم (CaO)
۲۱	۵۱/۹	دی اکسید سیلیسیم (SiO <sub>2</sub> )
۵	۴۳/۹	اکسید آلومینیوم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
۳/۵	۰/۹۹	اکسید آهن (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
۱/۸	۰/۱۸	اکسید منیزیم (MgO)
۱/۶	-	تری اکسید سولفور (SO <sub>3</sub> )
۰/۶	۰/۱۲	اکسید پتاسیم (K <sub>2</sub> O)
۰/۵	۰/۰۱	اکسید سدیم (Na <sub>2</sub> O)
۲	۰/۵۷	افت وزنی در اثر حرارت (LOI)

## ۲-۲. طرح‌های اختلاط

طرح‌های بتنی حاوی متاکائولن با مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزین سیمان و طرح شاهد (بدون متاکائولن) با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ طی مدت زمان‌های ۳، ۹، ۲۷ و ۵۰ ماه در محیط پاششی جزیره قشم قرار گرفتند. مقدار آب مصرفی در طرح‌های اختلاط ۱۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب بتن می‌باشد. جزئیات ۴ طرح اختلاط در جدول ۲ آمده است. پس از آماده‌سازی مصالح، کلیه طرح‌ها در محل سایت در دمای  $20 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد ساخته شدند. نتایج آزمایش اسلامپ روی بتن تازه در جدول ۲ آمده است.

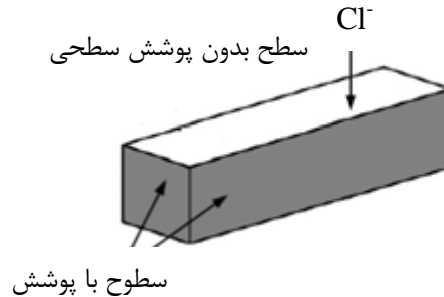
پس از پر کردن قالب‌های منشوری از میز لرزان به منظور تراکم بتن استفاده شده و به مدت ۲۴ ساعت در شرایط محیطی آزمایشگاه نگهداری شدند. پس از باز کردن قالب‌ها، نمونه‌های بتنی به مدت ۳ روز در شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب جزیره قشم عمل‌آوری مرطوب شدند.

جدول ۲- مشخصات نسبت‌های اختلاط

کد نمونه	نسبت آب به مواد سیمانی	عیار سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	متاکائولن (kg/m <sup>3</sup> )	مقدار آب (kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )	اسلامپ (cm)
C2	۰/۴	۴۰۰	۰	۱۶۰	۰/۲	۷
MK5	۰/۴	۳۸۰	۲۰	۱۶۰	۰/۸	۵
MK10	۰/۴	۳۶۰	۴۰	۱۶۰	۱/۴	۵/۵
MK15	۰/۴	۳۴۰	۶۰	۱۶۰	۱/۶	۸

### ۲-۳. قرارگیری آزمون‌ها در منطقه پاشش

پس از پایان عمل‌آوری، چهار سطح جانبی و سطح تحتانی آزمون‌های منشوری با پوشش سطحی با پایه پلی اورتان که در برابر شرایط حاد جنوب بسیار مقاوم است، پوشانده شد تا نفوذ یون کلرید به صورت یک بعدی صورت گیرد (شکل ۱).



شکل ۱- شمای آزمون‌های منشوری پس از اجرای پوشش

آزمون‌های منشوری به محل اسکله کاوه واقع در جزیره قشم منتقل شده و در منطقه پاششی قرار داده شدند. ارتفاع محل قرارگیری آزمون‌های ناحیه پاشش بالاتر از حداکثر ارتفاع مد منطقه و به گونه ای انتخاب شده است که آزمون‌ها هیچ‌گاه در طول سال در آب دریا مستغرق نباشند. به طوریکه تنها پاشش آب دریا بر روی آن‌ها وجود داشته باشد (شکل ۲). میانگین دمای سالیانه جزیره قشم در جدول ۳ آمده است.



شکل ۲- آزمون‌های منشوری در ناحیه پاششی در جزیره قشم

جدول ۳- میانگین دمای سالیانه در جزیره قشم

DEC.	NOV	OCT.	SEP.	AGU.	JULY	JUNE	MAY	APR.	MAR.	FEB.	JAN.	ماه
۱۹/۹	۲۴/۳	۲۹/۰	۳۲/۶	۳۴/۴	۳۴/۶	۳۲/۵	۳۰/۰	۲۶/۴	۲۳/۱	۲۰/۱	۱۷/۵	دما (°C)

### ۲-۴. تعیین میزان نفوذ یون کلرید

#### ۲-۴-۱. عملیات پودرگیری از آزمون‌ها

پس از گذشت زمان‌های رویارویی ۳، ۹، ۲۷ و ۵۰ ماه آزمون‌های منشوری در جزیره قشم، اولین مرحله عملیات پودرگیری از آزمون‌ها طبق استاندارد NT Build 443 برای تعیین میزان نفوذ یون کلرید در محل سایت انجام شد. طبق این استاندارد

لایه‌ای به ضخامت یک میلی‌متر از روی نمونه برداشته شده که به دلیل تاثیر عوامل دیگر بر نفوذ یون کلرید از جمله کلرشتگی یا بلوری شدن بر روی آن آزمایشی انجام نمی‌شود. پس از آن در حداقل ۸ لایه از بتن پودرگیری می‌شود [۲۴]. عمق متوسط هر لایه پس از خارج کردن پودر نسبت به سطح بتن بدست می‌آید.

### ۲-۴-۲. تعیین میزان یون کلرید در پودرهای تهیه شده

اندازه‌گیری درصد یون کلرید به کمک دستگاه اسپکتروفتومتری و دستگاه تیتراسیون طبق ASTM C1152 انجام شده است.

### ۳. تجزیه و تحلیل نتایج

#### ۳-۱. محاسبه ضریب انتشارپذیری

یون کلرید هم از محیط خارجی (بیرونی)، در صورت تماس با خاک آلوده یا آب دریا، و هم از محیط داخلی (مصالح حاوی یون کلر) وارد بتن می‌شوند. با توجه به اهمیت زیاد نفوذ کلر به عنوان یک عامل بسیار مهم در کاهش پایایی بتن، مکانیزم‌های نفوذ یون کلر به داخل بتن باید به خوبی شناخته شوند. انتشار یون کلرید به داخل بتن در یک محیط دریایی یکی از مهمترین مکانیزم‌های نفوذ یون کلرید به داخل بتن می‌باشد. طبق رابطه (۱) میزان نفوذ یون کلرید بر حسب فاصله از سطح بتن در زمان مشخص توسط قانون دوم انتشار Fick در حالت یک بعدی بیان می‌شود [۲۵]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

از حل معادله دیفرانسیل فوق با شرایط مرزی و اولیه زیر، رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$C(x=0, t > 0) = C_s$$

$$C(x > 0, t = 0) = C_i$$

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \operatorname{erf}(x / \sqrt{4Dt}) \quad (2)$$

$$\operatorname{erf}(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a e^{-\beta^2} d\beta \quad (3)$$

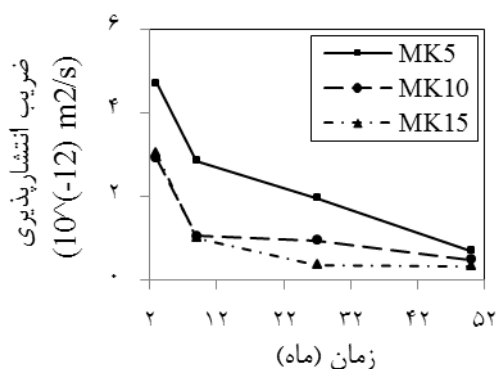
که در آن  $C$  میزان درصد وزنی یون کلرید،  $x$  فاصله از سطح بتن بر حسب متر،  $t$  مدت زمان رویارویی بر حسب ثانیه،  $D$  ضریب انتشار یون کلرید در بتن بر حسب متر مربع بر ثانیه،  $C_s$  میزان درصد وزنی یون کلرید در سطح بتن،  $C_i$  میزان درصد وزنی یون کلرید اولیه و  $\operatorname{erf}$  تابع خطا و مطابق رابطه (۳) می‌باشد. میزان یون کلرید اولیه در نمونه بدون پوزولان برابر ۰/۰۱۵ درصد وزنی بتن و در نمونه‌های حاوی متاکاژولن برابر ۰/۰۱ درصد وزنی بتن بدست آمده است. از برازش هر پروفیل یون کلرید بر حسب عمق پودرگیری با رابطه (۲) و با استفاده از نرم افزار MATLAB اعداد  $C_s$  و  $D$  بدست می‌آیند.

## ۳-۲. ارائه مدل تجربی ضریب انتشار یون کلرید در بتن

در این تحقیق مدلی برای پیش‌بینی ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی پوزولان متاکائولن در بلندمدت بر اساس نتایج آزمایشگاهی در منطقه پاششی جزیره قشم بدست آمده است. در این مدل تاثیر عواملی چون زمان رویارویی آزمون‌ها در منطقه پاششی، دمای آزمون‌ها، رطوبت نسبی آزمون‌ها در محیط دریایی و درصد پوزولان متاکائولن جایگزین سیمان پرتلند روی ضریب انتشار یون کلرید در بتن مورد بررسی قرار گرفته است.

به دلیل صرف نظر کردن از ناحیه همرفت<sup>۱</sup> در پروفیل‌های یون کلرید، مکانیزم حاکم در نفوذ یون کلرید در بتن، پدیده انتشار خواهد بود. لذا آزمون‌های بتنی در ناحیه پاششی اشباع فرض شده و به همین جهت رطوبت نسبی آزمون‌ها برابر ۱۰۰ درصد بوده و رطوبت نسبی بتن در مقدار ضریب انتشار یون کلرید در بتن بی‌تاثیر خواهد شد.

از طرفی با استمرار پدیده هیدراته شدن و کاهش تدریجی منافذ موئینه و پر شدن تخلخل‌های موجود در بافت بتن با محصولات فرایند هیدراته شدن چنین بر می‌آید که ضریب انتشار یون کلرید در بتن تابع زمان رویارویی در منطقه پاششی می‌باشد و با گذشت زمان کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب انتشار یون کلرید در بتن در کوتاه‌مدت بیشتر است و به تدریج با گذشت زمان کاهش می‌یابد. بعد از گذشت مدت زمان معینی رویارویی در محیط کلریدی، مقدار ضریب انتشار یون کلرید به مقدار ثابتی نزدیک می‌شود [۲۵].



شکل ۳- وابستگی ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی متاکائولن به زمان رویارویی

همچنین با توجه به جدول ۳ و بازه تغییرات دما از ۱۷/۵ تا ۳۴/۷ درجه سانتی‌گراد در جزیره قشم، دما نیز یکی از عوامل موثر در ضریب انتشار یون کلرید در بتن در محیط دریایی به حساب می‌آید.

در نهایت، ضریب انتشار یون کلرید در بتن با استفاده از روش چند متغیره و با اعمال تحلیل رگرسیون با مقدار عددی  $R^2=0.9$  در بتن حاوی پوزولان متاکائولن در منطقه پاششی جزیره قشم مطابق روابط ۴ تا ۷ خواهد شد.

$$D = D_{ref} f_1(t) f_2(T) \quad (4)$$

که در آن  $D$  ضریب انتشار یون کلرید در بتن بر حسب  $m^2/s$  و  $D_{ref}$  ضریب انتشار مرجع یون کلرید در بتن پس از ۳ ماه رویارویی در محیط کلریدی بر حسب  $m^2/s$  می‌باشد.

$f_1(t)$  نشان‌دهنده تاثیر زمان رویارویی آزمون‌ها در محیط کلریدی روی ضریب انتشار یون کلرید در بتن می‌باشد. ارتباط بین  $D$  و زمان رویارویی به کمک یک تابع توانی معکوس قابل بیان است [۲۱-۲۳].

<sup>1</sup> Convection zone

$$f_1(t) = \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^n \quad (5)$$

که در آن  $t$  زمان رویارویی آزمون در محیط کلریدی بر حسب ماه،  $t_{ref}$  زمان رویارویی مرجع و برابر ۳ ماه و  $n$  ضریب سن بتن و نشان دهنده وابستگی ضریب انتشار یون کلرید در بتن به زمان رویارویی در محیط کلریدی و مطابق رابطه (۶) به صورت تابع خطی از درصد پوزولان متاکائولن جایگزین سیمان پرتلند بدست آمده است.

$$n = 0.15MK/15 + 0.6 \quad (6)$$

که در آن  $MK$  درصد پوزولان جایگزین سیمان پرتلند مورد استفاده در طرح مخلوط بتن ( $5\% \leq MK \leq 15\%$ ) می باشد.  $f_2(T)$  نشان دهنده تاثیر دمای آزمونها در محیط کلریدی روی ضریب انتشار یون کلرید در بتن می باشد. ارتباط بین  $D$  و دما به کمک قانون ارنیوس قابل بیان است [۲۱ و ۲۲].

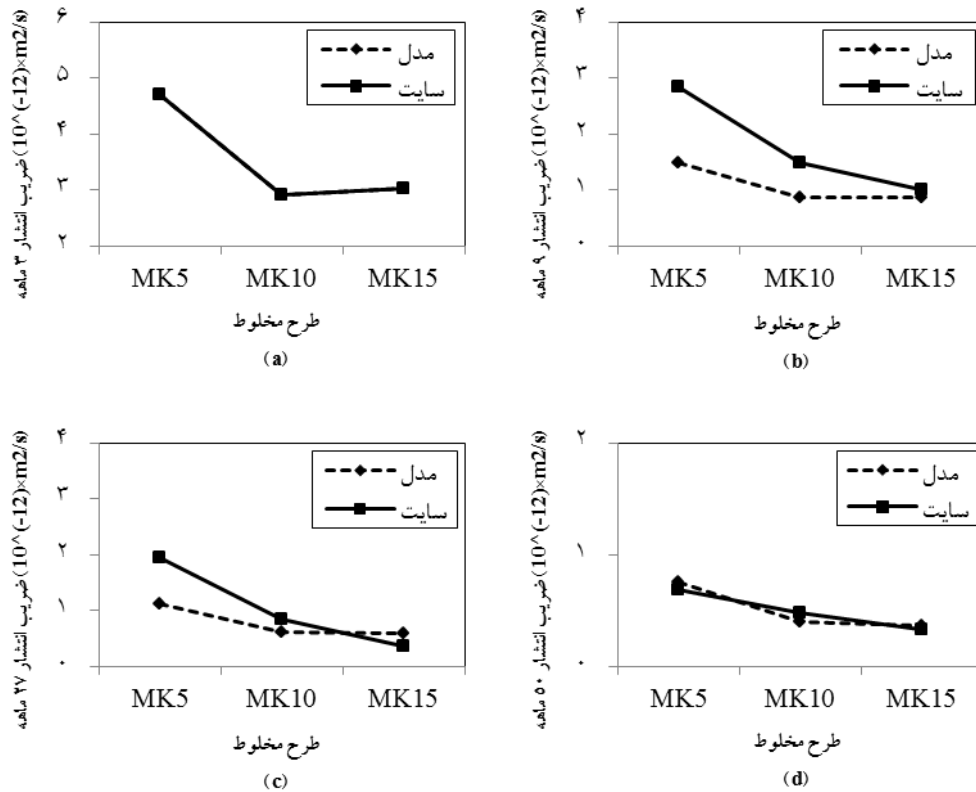
$$f_2(T) = \exp \left[ \frac{U}{R} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (7)$$

که در آن  $U$  انرژی فعال سازی در فرایند انتشار بر حسب  $J.mol^{-1}$ ،  $R$  ثابت گازها برابر  $8.314 J.mol^{-1}.K^{-1}$ ،  $T$  دمای آزمون در محیط کلریدی بر حسب کلوین ( $K$ ) و  $T_{ref}$  دمای مرجع پس از ۳ ماه رویارویی در محیط کلریدی بر حسب کلوین ( $K$ ) می باشد. مقدار نسبت  $U/R$  در منطقه خلیج فارس برابر  $2948 K$  بدست آمده است [۲۸-۲۶].

### ۳-۳. صحت سنجی مدل

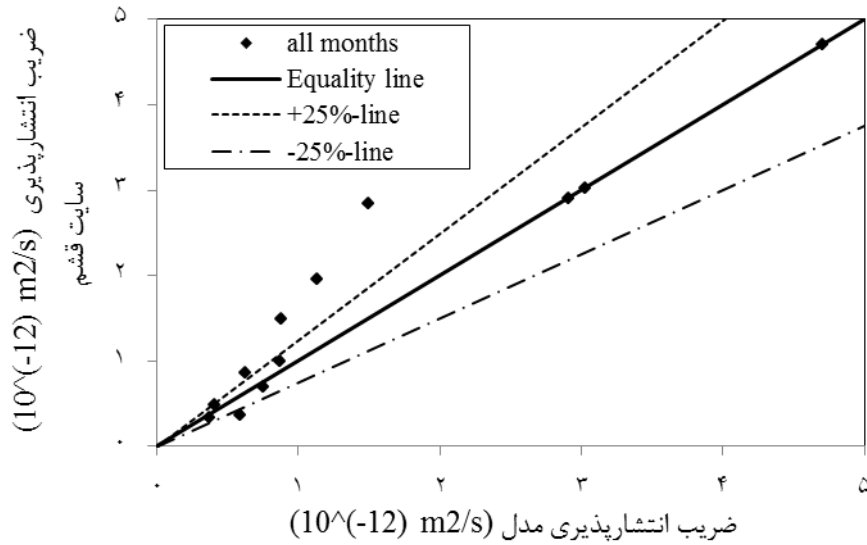
برای صحت سنجی مدل ارائه شده در بخش ۳-۲ برای بتن حاوی پوزولان متاکائولن در منطقه پاششی جزیره قشم، نتایج حاصل از این مدل در زمان ۳، ۹، ۲۷ و ۵۰ ماه رویارویی با ضریب انتشار یون کلرید در آزمونهای قرار گرفته در محیط کلریدی در زمانهای مذکور مقایسه شده است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده می شود اکثر دادههای مربوط به مدل با تقریب بسیار مناسبی با ضریب انتشار یون کلرید در آزمونها منطبق می باشد. ارتباط بین ضریب انتشار تجربی حاصل از آزمونها در محل و ضریب انتشار پیش بینی شده در شکل ۵ نشان می دهد که اکثر دادهها روی خط  $y=x$  و در بازه  $\pm 25\%$  قرار گرفته اند و در نتیجه ضریب انتشار پیش بینی شده با مقدار عددی رگرسیون بالایی برابر ۰/۹ با دادههای واقعی مطابقت دارد.





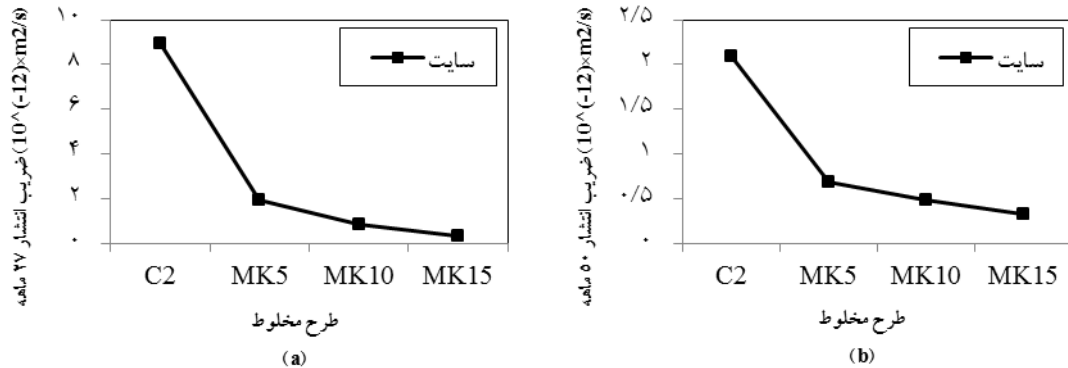
شکل ۴- مقایسه ضریب انتشار یون کلرید در بتن در سایت قشم و مدل در زمان (a) ۳ ماه، (b) ۹ ماه، (c) ۲۷ ماه، (d) ۵۰ ماه رویارویی در محیط کلریدی.

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود ضریب انتشار یون کلرید حاصل از سایت قشم و مدل در زمان سه ماه رویارویی در محیط کلریدی کاملاً با هم مطابقت دارند. دلیل این امر، استفاده از نتایج سه ماهه رویارویی به عنوان مرجع در مدل می‌باشد. همچنین، ضریب انتشار یون کلرید حاصل از مدل و نتایج سایت قشم در منطقه پاششی در زمان نه ماه رویارویی، مطابقت کافی ندارند. دلیل این امر اختلاف دمای زیاد بین دمای ماه نهم با دمای  $21/2^{\circ}\text{C}$  و ماه سوم با دمای  $34/2^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. این در حالی است که اختلاف دما بین ماه ۲۷ ام با دمای  $34/7^{\circ}\text{C}$  و ماه سوم با دمای  $34/2^{\circ}\text{C}$  و ماه ۵۰ ام با دمای  $34/6^{\circ}\text{C}$  و ماه سوم با دمای  $34/2^{\circ}\text{C}$  کمتر است.



شکل ۵- مقایسه ضریب انتشار یون کلرید در بتن در سایت قشم و مدل در ناحیه پاششی.

با توجه به شکل ۶ ضریب انتشار یون کلرید در بتن با جایگزینی پوزولان متاکائولن نسبت به نمونه بدون پوزولان و با نسبت آب به مواد سیمانی یکسان و برابر ۰/۴۰ در میان مدت (۲۷ ماه رویارویی در منطقه پاششی جزیره قشم) و در بلندمدت (۵۰ ماه رویارویی در منطقه پاششی جزیره قشم) کاهش یافته است. از این رو می توان نتیجه گرفت جایگزینی بخشی از سیمان با مواد پوزولانی تاثیر بسزایی در افزایش دوام سازه های بتنی در مناطق دریایی و خورنده دارد.



شکل ۶- مقایسه ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی متاکائولن و بدون آن در ناحیه پاششی جزیره قشم در (a) میان مدت (۲۷ ماه)، (b) بلندمدت (۵۰ ماه).

#### ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق، مدلی برای پیش بینی ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی پوزولان متاکائولن در بلندمدت در ناحیه پاششی جزیره قشم ارائه شده است. این مدل برای بتن حاوی پوزولان متاکائولن در بازه ۵ تا ۱۵ درصد قابل استفاده می باشد. در این مدل تاثیر پارامترهای زمان رویارویی در محیط کلریدی، دمای بتن و درصد پوزولان جایگزین سیمان پرتلند در نظر گرفته شده است. مقایسه مدل ضریب انتشار یون کلرید در بتن با ضریب انتشار آزمونهای موجود در منطقه قشم نشان می دهد که مدل و نتایج منطقه قشم با تقریب بسیار مناسبی با هم مطابقت دارند. مدل پیش بینی شده برای بتن حاوی متاکائولن حاکی از آن است که ضریب انتشار یون کلرید در بتن با گذشت زمان و کاهش دما کاهش می یابد. همچنین نتایج حاصل از آزمونهای در معرض ناحیه

پاششی حاکی از آن است که با افزایش مقدار پوزولان جایگزین سیمان پرتلند در طرح اختلاط بتن مقدار ضریب انتشار یون کلرید در بتن کاهش می‌یابد. علاوه بر این، ضریب انتشار یون کلرید در بتن در کوتاه‌مدت با گذشت زمان کاهش یافته و در بلندمدت به تدریج به مقدار ثابتی خواهد رسید.

## مراجع

- [۱] رضانیانپور، ع.ا.، پیدایش، م.، (۱۳۷۶). "دوام بتن و نقش سیمان های پوزولانی"، نشریه شماره ۲۷۴، چاپ اول، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- [۲] شکرچی‌زاده، م.، فراهانی، ع.، تدین، م.ح.، خاقانیپور، ر.، (۱۳۹۲). "بررسی تاثیر متاکائولن بر غلظت کلرید سطحی و ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن در منطقه خلیج فارس"، دومین کنفرانس بین المللی صنعت سیمان و محیط زیست، تهران.
- [3] Vaysburd, A.M., Emmons, P.H., "Corrosion inhibitors and other protective systems in concrete repair: concepts or misconcepts", *Cement and Concrete Composites*, 26(3), 255-263, 2004.
- [4] Alizadeh, R., Ghods, P., Chini, M., Hoseini, M., Ghalibafian, M., Shekarchi, M., "Effect of curing conditions on the service life design of RC structure in the Persian Gulf region", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(1), 2-8, 2008.
- [5] Ghoddousi, P., Ganjian, E., Parhizkar, T., Ramezaniapour, A.A., "Concrete technology in the environmental conditions of Persian Gulf", Iran: BHRC Publication, 1998.
- [6] Temperley, T.G., "Corrosion phenomena in the Coastal areas of the Persian Gulf", *Journal of Corrosion Science*, 5, 581-589, 1965.
- [7] Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., Khani, S., Moradian, M., "In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment", *Construction and Building Materials*, 46, 63-70, 2013.
- [8] Mangat, E.S., Khatib, J.M., Molloy, B.T., "Microstructure, chloride diffusion and reinforcement corrosion in blended cement paste and concrete", *Cement and Concrete Composites*, 6, 73-81, 1994.
- [9] Habert, G., Choupay, N., Montel, J.M., Guillaume, D., Escadeillas, G., "Effects of the secondary minerals of the natural pozzolans on their pozzolanic activity", *Cement and Concrete Research*, 38, 963-975, 2008.
- [10] Chalee, W., Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P., "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater", *Marine Structures*, 22, 341-353, 2009.
- [11] Roy, S.K., Chye, L.K., Northwood, D.O., "Chloride ingress in concrete as measured by field exposure tests in the atmospheric, tidal and submerged zones of a tropical marine environment", *Cement and Concrete Research*, 23, 1289-1306, 1993.
- [۱۲] شکرچی‌زاده، م.، میردامادی، ع.، بنکدار، ا.، بخشی، م.، (۱۳۸۷). "بهبود خواص بتن‌های توانمند با استفاده از متاکائولن"، مجله تحقیقات بتن، شماره ۲، صفحه ۶۳-۵۵.
- [13] 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, 2005, pp 228-295.
- [14] Poon, C., Kou, S., Lam, L., "Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete", *Construction and Building Materials*, 20(10), 858-865, 2006.
- [15] Ganjian, E., Sadeghi Pouya, H., "The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag", *Construction and Building Materials*, 23(2), 644-652, 2009.
- [16] Zhang, M.H., Malhotra, V.M., "Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete", *Cement and Concrete Research*, 25 (8), 1713-1725, 1995.
- [17] Boddy, A., Hooton, R.D., Gruber, K.A., "Long-term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin", *Cement and Concrete Research*, 31(5), 759-765, 2001.
- [18] Gruber, K.A., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R.D., Thomas, M.D.A., "Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin", *Cement and Concrete Research*, 23 (6), 479-484, 2001.
- [19] Boulfiza, M., Sakai, K., Banthia, N., Yoshida, H., "Prediction of Chloride Ions Ingress in Uncracked and Cracked Concrete", *ACI Materials Journal*, 100(1), 38-48, 2003.
- [20] Luping, T., Gulikers, J., "On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete", *Cement and Concrete Research*, 37, 589-595, 2007.

- [21] Ehlen, M.A., "Life-365<sup>TM</sup> Service Life Prediction Model<sup>TM</sup> and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides", Manual of Life-365<sup>TM</sup> Version 2.1 January 7, 2012, Produced by the Life-365<sup>TM</sup> Consortium II.
- [22] Sietta, A.V., Scotta, R.V., Vitaliani, R.V., "Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete", *ACI Materials Journal*, 90(5), 441-451, 1993.
- [23] Mangat, P.S., Molloy, B.T., "Prediction of long term chloride concentration in concrete", *Materials and Structures*, 27, 338-346, 1994.
- [24] NordTest NT Build 443, "Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration" ESPOO, Finland, 1995.
- [25] Luping, T., "Chloride transport in concrete, measurement and prediction", Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, publication P-96:6, 1996, Goteborg, Sweden.
- [26] Chini, M., Ghods, P., Alizadeh, R., Hoseini, M., Montazer, Sh., Shekarchi, M., Ghalibafian, M., "Developing the first version of the model for service life prediction of reinforced concrete structures in Persian Gulf and Oman Sea", 2<sup>nd</sup> report, NO. CMI 8309144: Construction Materials Institute at the University of Tehran, Iran, 2004.
- [27] Shekarchi, M., Ghods, P., Alizadeh, R., Chini, M., Hoseini, M., "DuraPGulf, a local service life model for the durability of concrete structures in the south of Iran", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 33(1B), 77-88, 2008.
- [28] Ghods, P., Alizadeh, R., Chini, M., Hoseini, M., Ghalibafian, M., Shekarchi, M., "Durability-based design in the Persian Gulf", *Concrete International*, 50-55, 2007.