

## مقایسه ضریب انتشار یون کلرید در بتن واقع در جزیره قشم با مدل‌های موجود در ادبیات فنی

عطیه فراهانی<sup>۱\*</sup>، محمدحسین تدین<sup>۱</sup>، محمد شکرچی‌زاده<sup>۱</sup>

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

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 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 مقایسه ضریب انتشار یون کلرید در آزمون‌های بتنی واقع در منطقه جزر و مدی جزیره قشم با مدل‌های ارائه شده در ادبیات فنی برای ضریب انتشار یون کلرید در بتن پرداخته شده است. در این مطالعه آزمون‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۵۰ و بدون پوزولان و آزمون‌های حاوی ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد دوده‌سیلیس با نسبت آب به سیمان ثابت و برابر ۰/۴۰ طی مدت زمان ۵۰ ماه رویارویی در منطقه جزر و مدی جزیره قشم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که ضریب انتشار یون کلرید در بتن در منطقه جزر و مدی جزیره قشم با تقریب مناسبی با نتایج حاصل از اغلب مدل‌های بررسی شده بخصوص در آزمون‌های حاوی دوده‌سیلیس مطابقت دارد.

### واژگان کلیدی:

بتن مسلح، دوده‌سیلیس، ضریب انتشار یون کلرید، مدل، ناحیه جزر و مدی.

کد: 140D

\* مسئول مکاتبات

# Comparison of Chloride Diffusion Coefficient of Concrete in Qeshm Island and Literatures's Models

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

## Abstract

Today, concrete structures have a crucial role in the infrastructure of society. The condition and performance of these structures are important. Marine environments located in hot regions such as Persian Gulf are the most destructive environments for reinforced concrete structures. Concrete degradation in the chloride environment is 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 compares the chloride diffusion coefficient based on concrete mix designs containing silica fume (5, 7.5 and 10%) with constant water to binder ratio (0.4), and without pozzolan by different water to cement ratios (0.35, 0.4 and 0.5). These mixes are exposed to sea water in a durability site in tidal zone of Qeshm Island for 50 months. This comparison indicates that the chloride diffusion coefficient of concrete specimens in tidal zone of Qeshm Island fit well with most of investigated models, especially in concrete specimens with silica fume.

## Keywords:

Chloride diffusion coefficient, Model, Reinforced concrete, Silica fume, Tidal zone.

Code : 140 D.

## ۱. مقدمه

دوام و پایداری سازه‌های بتن مسلح به عوامل متعددی از جمله خوردگی میلگردها ناشی از نفوذ یون کلرید به داخل بتن، کربناسیون، نسبت آب به سیمان، ترک‌های سطحی، رطوبت نسبی، دما، ضخامت پوشش بتنی روی میلگرد بستگی دارد [۱]. خوردگی ناشی از نفوذ یون کلرید به داخل بتن مهمترین عامل تخریب بتن مسلح به خصوص در مناطق جنوبی کشور که دارای نرخ تبخیر بالا، دما و شوری آب زیاد هستند، می‌باشد [۲]. محققان زیادی حمله کلریدی را عامل اصلی تخریب بتن و در نهایت گسیختگی سازه‌های بتن مسلح (مانند عرشه پل‌ها) در محیط‌های دریایی خورنده معرفی کردند [۳-۵]. یکی از راهکارها برای افزایش دوام و طول عمر مفید سازه‌های بتن در مناطق دریایی، استفاده از پوزولان‌ها مانند دوده سیلیس می‌باشد [۶]. کاربرد دوده سیلیس در بتن به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند موجب کاهش حجم منافذ موئینه می‌شود. این در حالی است که درجه هیدراسیون سیمان در بتن ثابت می‌ماند. دوده سیلیس موجب بهبود ریز ساختار ناحیه انتقالی (ITZ) در بتن شده و انتشار یون کلرید به داخل بتن را کاهش می‌دهد [۷]. شکرچی و همکاران [۶] به مقدار بهینه‌ای برای دوده سیلیس برابر ۷/۵٪ وزنی مواد سیمانی در منطقه خلیج فارس به منظور کاهش ضریب انتشار یون کلرید در بتن دست یافتند. علاوه بر کاربرد پوزولان‌هایی همچون دوده سیلیس در طرح مخلوط بتنی، مقدار نسبت آب به سیمان نیز در میزان انتشارپذیری یون کلرید به داخل بتن در محیط‌های دریایی و خورنده موثر است. تحقیقات حاکی از آن است که با کاهش نسبت آب به سیمان در بتن ضریب انتشار یون کلرید در بتن کاهش می‌یابد. زیرا که با کاهش نسبت آب به سیمان در طرح مخلوط بتنی، مقدار آب موجود در منافذ موئینه بتن کاهش یافته و محصولات پدیده هیدراسیون این منافذ را پر می‌کند و در نتیجه این امر موجب بهبود بتن از لحاظ دوام و نفوذپذیری خواهد شد [۸ و ۹]. محققان زیادی مدل‌های عددی و تجربی برای تخمین ضریب انتشار یون کلرید در بتن پیش‌بینی کردند. در جدول ۱ به برخی از این مدل‌ها اشاره شده است. در جدول ۲ نیز پارامترهای موجود در این مدل‌ها معرفی می‌شود.

جدول ۱- مدل‌های عددی و تجربی برای تخمین ضریب انتشار یون کلرید در بتن

محدودیت و کاربرد	فرمول	مدل
برای بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی	$\sqrt{D} = (-2.181 + 1.369 \exp(w/c) + 721.8/C) \times 10^{-6}$	Izquierdo et al. [10]
برای بتن حاوی دوده سیلیس	$D = 1.636 \times 10^{-6} C^{-1.975} (w/c)^{0.8662} SF^{-0.74}$	Life365 [11]
برای بتن حاوی پوزولان خاکسترآبی یا سرباره و بتن بدون پوزولان	$D = D_{ref} \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \exp \left[ \frac{U}{R} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]$ $m = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70)$	
برای بتن حاوی دوده سیلیس	$D_{SF} = D_{PC} e^{-0.1646SF}$	
برای بتن حاوی پوزولان خاکسترآبی، سرباره یا دوده سیلیس و بتن بدون پوزولان	$D = D_{ref} \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \cdot \frac{T}{T_{ref}} \exp \left[ \frac{U}{R} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]$	Ferreira [12]
برای بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی	$D = D_{ref} \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m$ $m = 2.5w/c - 0.6$	Mangat and Molloy [13]

<sup>1</sup> Interfacial Transition Zone

جدول ۲- معرفی پارامترهای مدل‌های ضریب انتشار ارائه شده در جدول ۱

پارامتر	تعریف پارامتر
$C$	مقدار سیمان بر حسب $\text{kg.m}^{-3}$
$D$	ضریب انتشار یون کلرید در بتن بر حسب $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
$D_{PC}$	ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی سیمان پرتلند بر حسب $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
$D_{ref}$	ضریب انتشار مرجع بر حسب $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
$D_{SF}$	ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی پوزولان دوده‌سیلیس بر حسب $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
$FA$	مقدار خاکستریادی بر حسب درصد
$m$	ضریب سن بتن
$R$	ثابت گازها ( $8.314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
$SF$	مقدار دوده‌سیلیس بر حسب درصد
$SG$	مقدار سرباره بر حسب درصد
$t$	زمان بر حسب روز
$t_{ref}$	زمان مرجع بر حسب روز
$T$	دما بر حسب کلوین
$T_{ref}$	دمای مرجع بر حسب کلوین
$U$	انرژی فعال‌سازی در فرایند انتشار بر حسب $\text{J.mol}^{-1}$
$w/c$	نسبت آب به سیمان

در این مقاله مدل‌های تجربی ارائه شده برای ضریب انتشار یون کلرید در بتن در ادبیات فنی با نتایج ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن برای نمونه‌های حاوی دوده‌سیلیس و بدون پوزولان موجود در سایت انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران واقع در جزیره قشم مقایسه می‌شود.

## ۲. مطالعات آزمایشگاهی

### ۲-۱. مصالح مصرفی

سیمان مصرفی در طرح‌های اختلاط سیمان پرتلند نوع ۲ هرمزگان 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 دوده‌سیلیس از کارخانه فرو آلیاژ ازنا تهیه شده است. طرح‌های اختلاط به منظور تامین روانی بتن تازه از مواد فوق روان کننده با پایه کربوکسیلات استفاده شده است. جدول ۳ مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند و دوده‌سیلیس را نشان می‌دهد.

جدول ۳- مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند و دوده سیلیس

سیمان (%)	دوده سیلیس (%)	
۶۳	-	اکسید کلسیم (CaO)
۲۱	۹۳/۲	دی اکسید سیلیسیم (SiO <sub>2</sub> )
۵	۱/۱	اکسید آلومینیوم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
۳/۵	۰/۷	اکسید آهن (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
۱/۸	۱/۶	اکسید منیزیم (MgO)
۱/۶	-	تری اکسید سولفور (SO <sub>3</sub> )
۰/۶	-	اکسید پتاسیم (K <sub>2</sub> O)
۰/۵	-	اکسید سدیم (Na <sub>2</sub> O)
۲	۱/۶	افت وزنی در اثر حرارت (LOI)

## ۲-۲. طرح‌های اختلاط

طرح‌های بتنی حاوی دوده سیلیس با مقادیر ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد جایگزین سیمان و طرح شاهد (بدون دوده سیلیس) با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ طی مدت زمان‌های ۳، ۹، ۲۷ و ۵۰ ماه در محیط جزر و مدی جزیره قشم قرار گرفتند. جزئیات ۴ طرح اختلاط در جدول ۴ آمده است.

پس از آماده‌سازی مصالح، کلیه طرح‌ها در محل سایت در دمای  $20 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد ساخته شدند.

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

جدول ۴- مشخصات نسبت‌های اختلاط

کد آزمون	نسبت آب به مواد سیمانی	عیار سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	دوده سیلیس (kg/m <sup>3</sup> )	مقدار آب (kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )
C1	۰/۳۵	۴۰۰	۰	۱۴۰	۰/۳۵
C2	۰/۴	۴۰۰	۰	۱۶۰	۰/۲
C4	۰/۵۰	۴۰۰	۰	۲۰۰	۰/۰
SF5	۰/۴	۳۸۰	۲۰	۱۶۰	۱/۲
SF7.5	۰/۴	۳۷۰	۳۰	۱۶۰	۱/۴
SF10	۰/۴	۳۶۰	۴۰	۱۶۰	۱/۶

## ۲-۳. قرارگیری آزمون‌ها در منطقه جزر و مد

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. سپس آزمون‌های منشوری به محل اسکله کاوه واقع در جزیره قشم منتقل شده و در منطقه جزر و مدی قرار داده می‌شوند. در ناحیه جزر و مد، آزمون‌ها داخل سبدهای مشبک پلاستیکی به نحوی قرار می‌گیرند که سطوح پوشش نخورده به سمت بالا باشد. کلیه سبدها به هم بسته می‌شوند تا آزمون‌ها در اثر برخورد امواج جابجا نشوند. سبدهای حاوی آزمون‌ها بر روی یک سطح صاف بتن ریزی شده در منطقه جزر و مد دریا قرار داده می‌شود. محل قرارگیری آزمون‌ها در ناحیه جزر و مد به گونه‌ای انتخاب شده که مجموع زمان‌های

غوطه‌وری آزمونه‌ها در زیر سطح آب دریا با مجموع زمان‌های خشک شدن آنها در خارج از آب حدوداً برابر باشد. به عبارت دیگر آزمونه‌ها در نیمی از زمان کل استقرار، اشباع باشند (شکل ۱). میانگین دمای سالیانه جزیره قشم در جدول ۵ آمده است.



شکل ۱- آزمونه‌های منشوری در ناحیه جزر و مدی در جزیره قشم

جدول ۵- میانگین دمای سالیانه در جزیره قشم

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
دما (°C)	۲۶/۴	۳۰/۰	۳۲/۵	۳۴/۶	۳۴/۴	۳۲/۶	۲۹/۰	۲۴/۳	۱۹/۹	۱۷/۵	۲۰/۱	۲۳/۱

## ۲-۴. تعیین میزان نفوذ یون کلرید

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

پس از گذشت زمان‌های رویارویی ۳، ۹، ۲۷ و ۵۰ ماه آزمونه‌های منشوری در جزیره قشم، اولین مرحله عملیات پودرگیری از آزمونه‌ها 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 آزمونه 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 [۱۴]. 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 کل 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 یون کلرید به عنوان یک عامل بسیار مهم در کاهش پایداری بتن، مکانیزم‌های

نفوذ یون کلرید 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 [۱۵]:

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

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

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

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

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

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

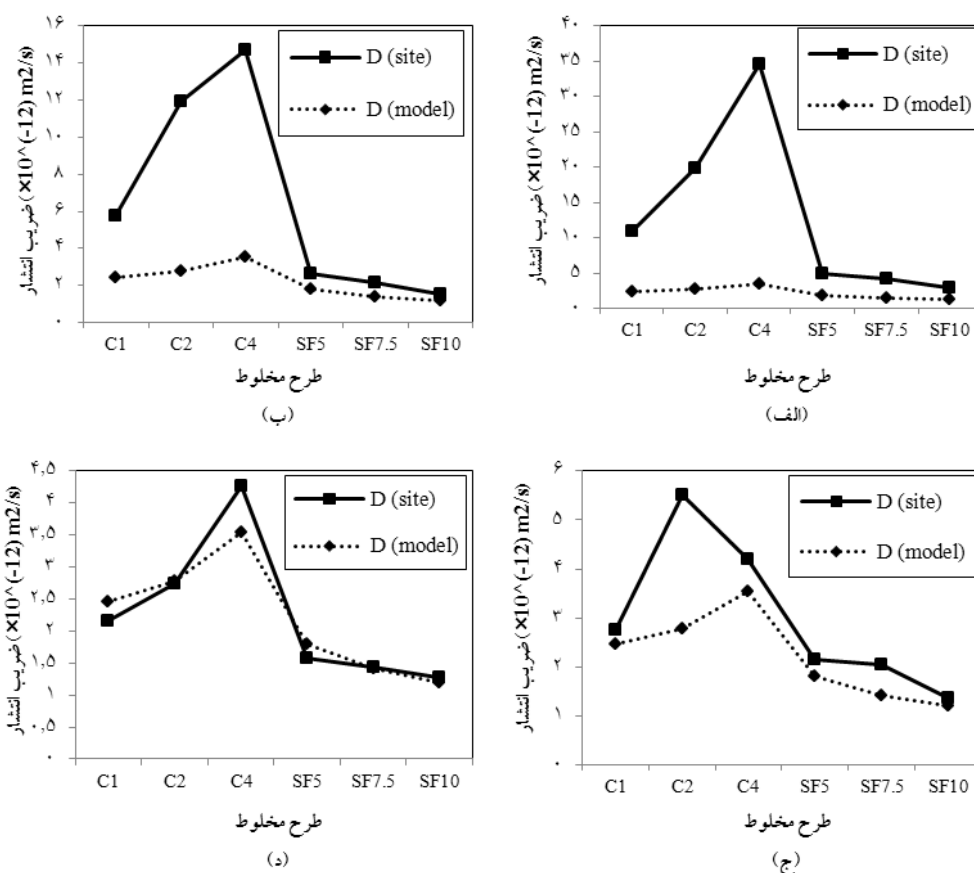
که در آن  $C$  میزان درصد وزنی یون کلرید کل،  $x$  فاصله از سطح بتن بر حسب متر،  $t$  مدت زمان رویارویی بر حسب ثانیه،  $D$  ضریب انتشار یون کلرید در بتن بر حسب متر مربع بر ثانیه،  $C_s$  میزان درصد وزنی یون کلرید در سطح بتن،  $C_i$  میزان درصد وزنی یون کلرید اولیه و  $\operatorname{erf}$  تابع خطا و مطابق رابطه (۳) می‌باشد. میزان یون کلرید اولیه در آزمون بدون پوزولان برابر ۰/۱۵ درصد وزنی بتن و در آزمون‌های حاوی دوده‌سیلیس 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. مقایسه مدل‌های ضریب انتشار موجود در ادبیات فنی با نتایج حاصل از سایت قشم

#### ۳-۲-۱. Izquierdo و همکاران [۱۰]

مدل Izquierdo و همکاران مدلی برای تخمین ضریب انتشار یون کلرید به داخل بتن در ناحیه جزر و مدی یک محیط دریایی برای بتن حاوی دوده‌سیلیس و بتن بدون پوزولان ارائه کرده است (جدول ۱). در این مدل تاثیر مقدار سیمان، مقدار دوده‌سیلیس و نسبت آب به سیمان در طرح مخلوط بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مدل مذکور با ضریب انتشار یون کلرید در آزمون‌های بدون پوزولان موجود در سایت قشم در کوتاه‌مدت مطابقت ندارد. این در حالی است که مدل مذکور در بلندمدت مدل مناسبی برای ضریب انتشار یون کلرید در آزمون‌های بدون پوزولان به حساب می‌آید. همچنین این مدل به منظور تخمین ضریب انتشار یون کلرید در آزمون‌های حاوی دوده‌سیلیس، مدل مناسبی می‌باشد. در مجموع مدل Izquierdo و همکاران در بلندمدت مدل مناسبی برای ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن حاوی پوزولان دوده‌سیلیس و بتن بدون پوزولان در منطقه قشم به حساب می‌آید.

لازم به ذکر است همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با گذشت زمان رویارویی آزمون‌ها در محیط کلریدی نتایج حاصل از سایت و مدل مذکور ضریب انتشارپذیری کاهش می‌یابد. علت این امر تکمیل فرایند هیدراسیون و پر شدن منافذ بتن با محصولات هیدراسیون با گذشت زمان می‌باشد. این در حالی است که مدل Izquierdo و همکاران تاثیر زمان رویارویی آزمون‌ها در محیط کلریدی را در مدل خود مشاهده نکرده است.

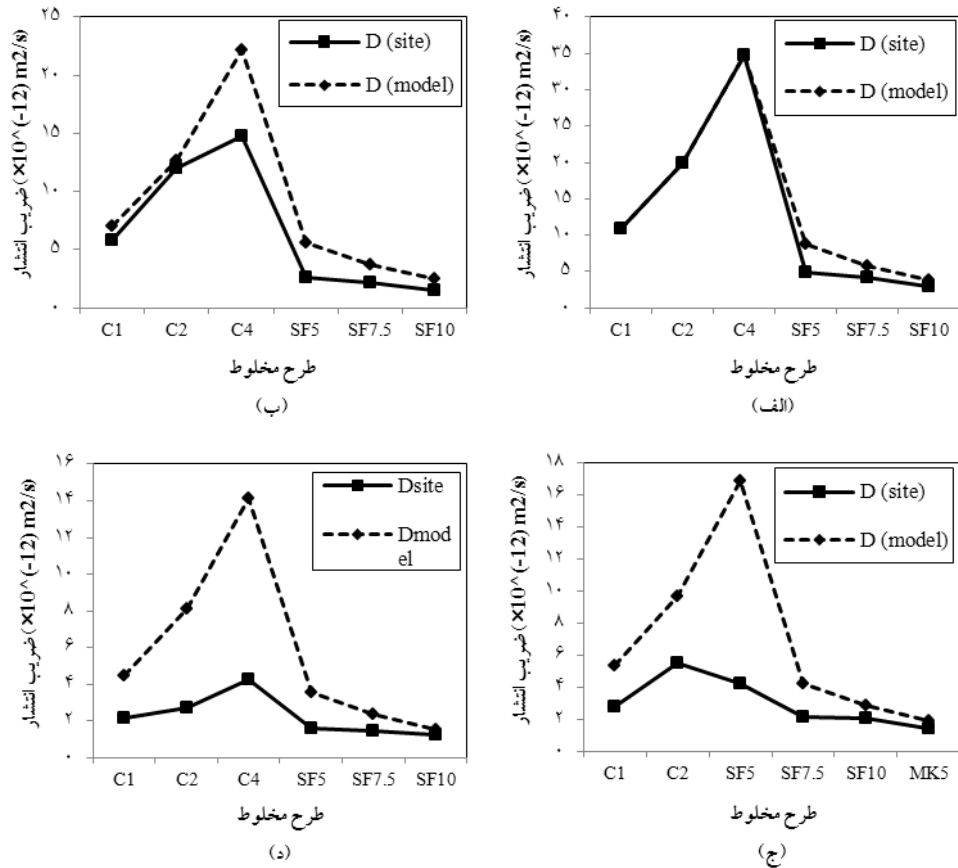


شکل ۲- مقایسه ضریب انتشار مدل Izquierdo و همکاران [۱۰] با نتایج سایت قشم پس از (الف) ۳ ماه، (ب) ۹ ماه، (ج) ۲۷ ماه، (د) ۵۰ ماه رویارویی در محیط کلریدی.

### ۳-۲-۲. Life 365 [۱۱]

در مدل Life 365 ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی سیمان پرتلند به صورت تابعی از زمان رویارویی آزمون‌ها در محیط کلریدی و همچنین دمای آزمون پیش‌بینی شده است. در این مدل تاثیر پوزولان مصرفی مانند خاکستر بادی و سرباره در طرح اختلاط بتن در ضریب سن بتن ( $m$ ) مشاهده می‌شود. Life 365 برای آزمون‌های حاوی پوزولان دوده‌سیلیس تا مقدار ۱۵ درصد جایگزین سیمان پرتلند نیز مدلی ارائه کرده است که به صورت ضریبی از مدل ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی سیمان پرتلند می‌باشد (جدول ۱). نتایج حاصل از مدل مذکور و نتایج حاصل از سایت قشم در ناحیه جزر و مدی، در بلندمدت و در آزمون‌های حاوی پوزولان دوده‌سیلیس تقریباً بر هم منطبق می‌باشند. در این مدل نتایج سایت قشم مربوط به آزمون‌های با نسبت آب به سیمان مختلف در بلندمدت مطابقت ندارد. اختلاف این مدل با نتایج ضریب انتشار یون کلرید در آزمون‌های بدون پوزولان در منطقه قشم احتمالاً ناشی از تفاوت در نوع و کیفیت سیمان مورد استفاده در آزمون‌های واقع در منطقه قشم و آزمون‌های ساخته شده برای استخراج مدل Life 365 می‌باشد.

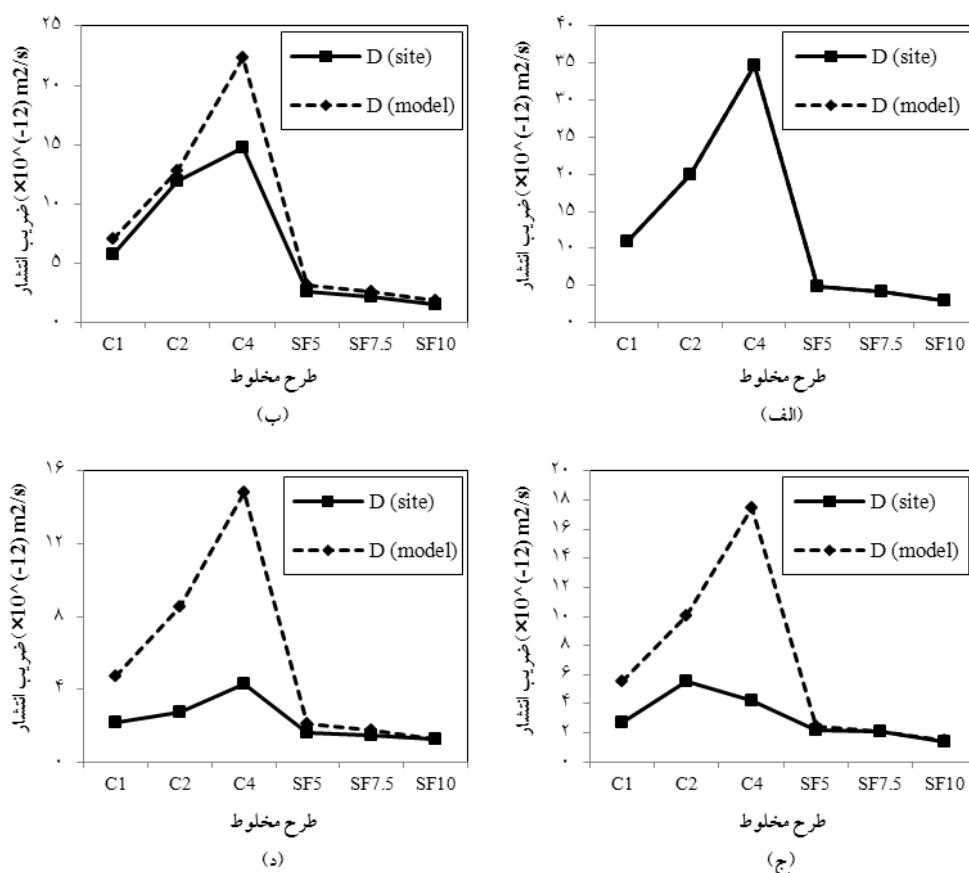




شکل ۳- مقایسه ضریب انتشار مدل Life 365 [۱۱] با نتایج سایت قشم پس از (الف) ۳ ماه، (ب) ۹ ماه، (ج) ۲۷ ماه، (د) ۵۰ ماه رویارویی در محیط کلریدی.

### ۳-۲-۳- Ferreira [۱۲]

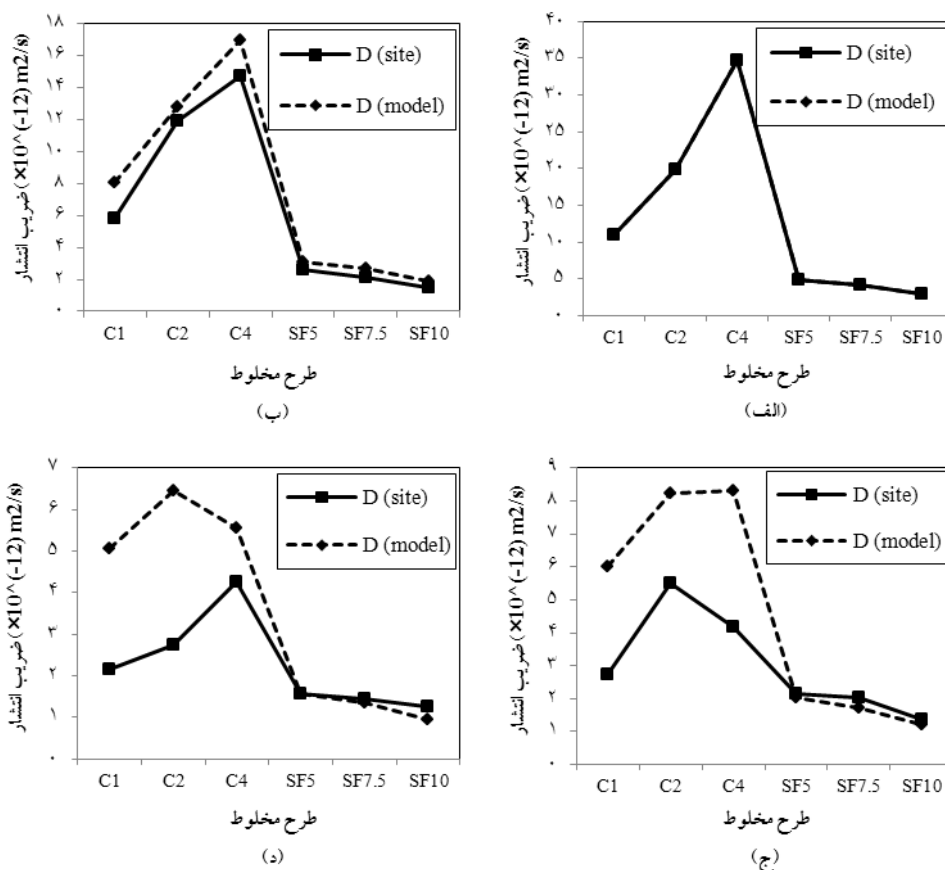
Ferreira در مدل خود تاثیر دما و زمان رویارویی آزمون بتنی در محیط کلریدی بر ضریب انتشار یون کلرید در بتن مورد بررسی قرار می‌دهد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، این مدل برای آزمون‌های حاوی پوزولان دوده‌سیلیس در ناحیه جزر و مدی دارای مطابقت بسیار مناسبی با نتایج سایت قشم می‌باشد. در حالیکه مدل مذکور برای آزمون‌های با نسبت آب به سیمان مختلف و بدون پوزولان مدل مناسبی به شمار نمی‌رود. اختلاف این مدل با ضریب انتشار یون کلرید در آزمون‌های بتنی بدون پوزولان واقع در منطقه قشم می‌تواند ناشی از تفاوت در نوع و خواص سیمان مصرفی در طرح اختلاط بتن آزمون‌های Ferreira با آزمون‌های موجود در منطقه قشم باشد.



شکل ۴- مقایسه ضریب انتشار مدل Ferreira [۱۲] با نتایج سایت قشم پس از (الف) ۳ ماه، (ب) ۹ ماه، (ج) ۲۷ ماه، (د) ۵۰ ماه رویارویی در محیط کلریدی.

### ۳-۲-۴. Mangat and Molloy [۱۳]

این مدل تاثیر زمان رویارویی آزمون‌های حاوی سیمان پرتلند و بدون پوزولان در محیط کلریدی برای تخمین ضریب انتشار یون کلرید به داخل بتن را مورد بررسی قرار داده است. همچنین تاثیر نسبت آب به سیمان در ضریب سن بتن مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از مدل مذکور و نتایج حاصل از سایت قشم، پس از سه ماه رویارویی با محیط کلریدی در ناحیه‌های جزر و مد کاملاً بر هم منطبق می‌باشند. دلیل این امر، استفاده از نتایج سه ماهه رویارویی به عنوان  $D_{ref}$  در مدل می‌باشد. قابل ذکر است ضریب انتشار آزمون‌های بدون پوزولان حاصل از مدل در ناحیه جزر و مدی و در کوتاه‌مدت با تقریب مناسبی با نتایج حاصل از سایت مشابه است. این در حالی است که در بلندمدت آزمون‌های بدون پوزولان و با نسبت آب به سیمان مختلف در این مدل مطابقت خوبی با نتایج سایت قشم ندارد. همچنین با توجه به شکل ۵ می‌توان گفت این مدل برای آزمون‌های حاوی پوزولان دوده‌سیلیس نیز مدل مناسبی خواهد بود.



شکل ۵- مقایسه ضریب انتشار مدل Mangat and Molloy [۱۳] با نتایج سایت قشم پس از (الف) ۳ ماه، (ب) ۹ ماه، (ج) ۲۷ ماه، (د) ۵۰ ماه رویارویی در محیط کلریدی.

از طرفی با استمرار پدیده هیدراسیون و کاهش تدریجی منافذ موئینه و پر شدن تخلخل‌های موجود در بافت بتن با محصولات هیدراسیون چنین بر می‌آید که ضریب انتشار یون کلرید در بتن تابع زمان رویارویی در منطقه جزر و مدی می‌باشد و با گذشت زمان کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل‌های ۲ تا ۵ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب انتشار یون کلرید در همه آزمون‌های بتنی در کوتاه مدت بیشتر است و به تدریج با گذشت زمان کاهش می‌یابد. با توجه به شکل‌های مذکور، ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی پوزولان دوده‌سیلیس با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ از آزمون شاهد (بدون پوزولان) با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ کمتر است. همچنین با افزایش نسبت آب به سیمان در آزمون‌های بدون پوزولان از ۰/۳۵ به ۰/۵۰ و کاهش مقدار دوده‌سیلیس از ۱۰٪ به ۵٪ مقدار ضریب انتشار یون کلرید در بتن افزایش می‌یابد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

مدل‌های ارائه شده توسط Izquierdo و همکاران، Ferreira, Life 365 و Mangat and Molloy، مدل‌های مناسبی برای تخمین ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن حاوی پوزولان دوده‌سیلیس در ناحیه جزر و مدی جزیره قشم به شمار می‌روند. همچنین مدل‌های ارائه شده توسط Ferreira, Life 365 و Mangat and Molloy، مدل‌های مناسبی برای تخمین ضریب انتشار کوتاه‌مدت یون کلرید در بتن بدون پوزولان و در ناحیه جزر و مدی جزیره قشم محسوب می‌شوند. در حالیکه، مدل ارائه شده توسط Izquierdo و همکاران مدل مناسبی برای ضریب انتشار بلندمدت یون کلرید در بتن بدون پوزولان می‌باشد.

اختلاف برخی از مدل‌ها با نتایج ضریب انتشار یون کلرید در آزمون‌های بدون پوزولان در منطقه قشم احتمالاً ناشی از تفاوت در نوع و کیفیت سیمان مورد استفاده در آزمون‌های واقع در منطقه قشم و آزمون‌های ساخته شده برای استخراج این مدل‌ها می‌باشد.

ضریب انتشار یون کلرید در بتن تابع زمان رویارویی در منطقه جزر و مدی جزیره قشم می‌باشد و با گذشت زمان کاهش می‌یابد. ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی پوزولان دوده‌سیلیس با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ از آزمون شاهد (بدون پوزولان) با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ کمتر است. همچنین با کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش مقدار دوده‌سیلیس در طرح مخلوط بتن مقدار ضریب انتشار یون کلرید در بتن کاهش می‌یابد.

## مراجع

- [1] Ahmad, S., "Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review", *Cement and Concrete Composites*, 25(4-5), 459-471, 2003.
- [2] Temperley, T.G., "Corrosion phenomena in the coastal areas of the Persian Gulf", *Journal of Corrosion Science*, 5, 581-589, 1965.
- [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., Ramezani-pour, A.A., "Concrete technology in the environmental conditions of Persian Gulf", Iran: BHRC Publication, 1998.
- [6] Shekarchi, M., Rafiee, A., Layssi, H., "Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates", *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 769-775, 2009.
- [7] Neville, A., "Good reinforced concrete in the Arabian Gulf", *Materials and Structures*, 33(234), 655-664, 2000.
- [8] Hobbs, D.W., "Aggregate influence on chloride ion diffusion into concrete", *Cement and Concrete Research*, 29(12), 1995-1998, 1999.
- [9] Slamecka, T., Skvara, F., "The effect of water ratio on microstructure and composition of the hydration products of Portland cement pastes", *Cement Research*, 46(4), 152-158, 2002.
- [10] Izquierdo, D., "Bases de diseño para un tratamiento probabilista de los procesos de corrosión de armaduras en el hormigón", PhD thesis, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, Spain, 2003, 617 pp.
- [11] Ehlen, M.A., Life-365™ Service Life Prediction Model™ and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, Manual of Life-365™ Version 2.1 January 7, 2012, Produced by the Life-365™ Consortium II.
- [12] Ferreira, R.M., "Optimization of RC structure performance in marine environment", *Engineering Structures*, 32, 1489-1494, 2010.
- [13] Mangat, P.S., Molloy, B.T., "Prediction of long term chloride concentration in concrete", *Materials and Structures*, 27, 338-46, 1994.
- [14] NordTest NT Build 443, "Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration" ESPOO, Finland, 1995.
- [15] Luping, T., "Chloride transport in concrete, measurement and prediction", Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, publication P-96:6, 1996, Goteborg, Sweden.