

اثر دراز مدت نفوذ یون کلراید بر دوام بتن در سواحل خلیج فارس

محمد رضا انسان دوست^۱، ابراهیم زارع^۲
*عضو باشگاه پژوهشگران دانشگاه آزاد اسلامی^۱
مربی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون^۲

Email: e.ehsandoost20@gmail.com

چکیده:

به علت استفاده گسترده از سازه های بتنی در شرایط اقلیمی متفاوت، مسئله آسیب دیدگی این نوع سازه ها و در نتیجه تعمیرات و نگهداری آنها، یکی از موضوعات اصلی مورد بحث کارشناسان بتن را تشکیل می دهد. یکی از عوامل خوردگی فولاد در بتن مسلح در محیط خورنده به ویژه در سواحل خلیج فارس، یون کلرید می باشد. عوامل زیادی بر میزان نفوذ یون کلر در بتن تاثیر گذار می باشند که همه آنها را می توان در کیفیت بتن خلاصه نمود. از طرفی شرایط روپارویی دریا به علت دارا بودن دما و رطوبت بالا و همچنین میزان زیاد یون و املاح، محیطی خورنده برای سازه های بتن آرمه ایجاد می کند. یکی از اصلی ترین موادی که از آن در سازه های بتن آرمه ای در شرایط خورنده استفاده می شود پوشش سطحی است. در این پژوهش عملکرد پنج نوع عمل آوری مختلف در محیط دریایی (خلیج فارس) بررسی شد که عبارت اند از: عمل آوری ۲۷ روزه با آب، عمل آوری ۶ روزه با آب، عمل آوری ۳ روزه با آب، عمل آوری ۱ روزه با آب، عمل آوری با ماده عمل آور و بدون عمل آوری. بر اساس نتایج به دست آمده بهترین عملکرد از نظر مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید بسته به شرایط روپارویی متفاوت است. مشاهدات نشان داد این است که عمل آوری با ماده عمل آور عملکرد مناسبی از نظر مقاومت دارا است

کلمات کلیدی:

یون کلراید، دوام بتن، مناطق جنوب، خلیج فارس

یکی از تهدیدهای عمده دوام بتن در سازه‌های حاشیه خلیج فارس و دریای عمان، یون کلراید است. مکانیسم آسیب دیدگی چنین سازه‌هایی، بدین صورت است که یونهای کلراید در بتن نفوذ کرده و به عمق میلگرد میرسند، و زمانی که مقدار آن به حد بحرانی رسید باعث از بین رفتن لایه محافظ میلگرد شده و خوردگی محلی آغاز میگردد (۱). از طرفی ورود یونهای مهاجم مانند کلراید به فرایندهای مختل انتقال رطوبت بستگی دارد یعنی انتشار، جذب آب و نفوذپذیری. به عبارت دیگر، ویژگی های نفوذ پذیری، نماینده کلیه مکانیسم های انتقال می باشد (2) و بنابراین می توان گفت، زمانی که نفوذپذیری بتن کاهش یابد، دوام آن افزایش پیدا می کند (3-4)

منطقه ای که دائم در معرض چرخه های تر و خشک شدن هست معمولاً نسبت به منطقه ای کاملاً اشباع است، بیشترین آسیب را می بیند. (5) خوردگی فولاد در بتن یکی از مسائل مهم هست که باعث کاهش دوام بتن مسلح می شود. که این کاهش در محیط های دریایی شدید تر است (6) و (7). به طور کلی، زمان شروع خوردگی آرماتور فولادی برای نشان دادن عمر یک سازه بتن مسلح در محیط دریایی است. (8) به عقیده محققان، خوردگی فولاد در بتن ناشی از نفوذ کلراید است. (9) قرار گرفتن در معرض چرخه ای از خشک شدن هوا و مرطوب آب دریا نفوذ نمک کلراید را افزایش می دهد. (10) خوردگی فولاد زمانی رخ می دهد که مقدار کلراید از مقدار pH محلول متفاوت باشد. (11)

هیدروکسید کلسیم در بتن با دی اکسید کربن اتمسفری در طول زمان واکنش نشان می دهد که منجر به کاهش از pH می شود. (12-13) بتن آرمه به طور همزمان با هر دو نفوذ کلراید و هوا آمیخته می شود که منجر به آسیب پذیر می شود (14). برای چند دهه گذشته، تحقیقات گسترده به مطالعه نفوذ کلراید که اغلب مطالعات بر روی فرایند انتشار کلراید در بتن انجام گرفته است. (7-15) مطالعات نشان داد که کاهش pH ناشی از آمیخته شدن با هوازایی است. که این مقدار کلراید باعث شروع خوردگی می شوند. (16) بر این اساس، خوردگی میلگرد فولاد شروع می شود و در محتوای کلراید کمتر هنگامی که بتن با هوا ترکیب شده است اتفاق می افتد. (17) خوردگی افزایش، pH کاهش و محتوای کلراید افزایش می یابد. (18-19)

برخی دیگر از مطالعات نشان می دهد که هوا آمیخته شده سبب تسریع کننده نفوذ نمک کلراید می شود. (20-21) در این میان، هر دو محتوای کلراید کل و عمق نفوذ آن افزایش یافته است. (23)

(22) افزایش غلظت دی اکسید کربن در جو و آمیخته شدن مشکل جدی برای سازه های بتنی ایجاد می کند. (23) به طور خاص، مقاومت در برابر نفوذ کلراید موضوع تحقیق است. (24-25) با توجه به اینکه بتن با مقاومت بالا مورد استفاده در ساخت و ساز های دریایی مانند عرشه پل ها و اسکله ها، سکوه های دریایی و سازه های شناور، که در آن خطر بالایی از خوردگی فولاد در بتن آرمه ناشی از کلراید وجود دارد. (26-27) همانطور که مشهور است، نفوذ یون کلراید به بتن و خوردگی آرماتورهای مدفون در آن یکی از عوامل خرابی زودرس سازه های بتن آرمه می باشد که هر ساله باعث خسارات زیادی می شود (28).

ضریب انتشار یون کلراید در بتن را می توان با انجام آزمایشهایی مانند ASTM C1543(29) و ASTM C1556(30) بدست آورد. این روشها زمان بر و پرهزینه هستند و در عمل غیر کاربردی می باشند. در نتیجه روشهای تسریع کننده جهت سنجش مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید، ارائه شده است. در برخی از این روشها با تسریع نفوذ یون کلراید توسط میدان الکتریکی، ضریب انتشار یون کلراید بدست می آید (31) مانند روش (RCMT). در برخی دیگر، با استفاده از شاخصهایی مانند رسانایی الکتریکی، مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید ارزیابی میگردد (32) اما با توجه به اینکه رسانایی نمونه های بتنی در نتایج اکثر روشهای تسریع یافته ارزیابی نفوذپذیری کلرایدی بتن تاثیرگذار می باشد، رسانایی مایع منفذی نمونه های بتنی نقش اساسی در نتایج این روشها دارند (33).

یافته های تحقیقات گذشته نشان دهنده این موضوع است مشکل دوام است. شرح چند مورد از مشکلات در منطقه خلیج فارس در زیر اشاره شده است: (34-35-36)

ویژگی های مواد تشکیل دهنده و ترکیب ویژگی های طراحی نسبت آب به سیمان (w/c)، درجه تراکم، نوع غلظت آب دریا و تغییر در دما، غلظت بالای یونهای کلراید و سولفات در محیط خلیج فارس، تغییرات زیاد دما و رطوبت در طول شبانه روز، کیفیت پایین مصالح به همراه تکنولوژی نامناسب اجرا (37-38)

معادله دیفرانسیل حاکم بر انتقال کلراید :

بطور کلی در ترکیب دو پدیده انتشار و همرفت، تغییر غلظت در حجم بتن می تواند با قانون دوم فیک به صورت رابطه ۱ بیان شود. (39-40) 41-42

$$J_C^{dif} + J_C^{adv} \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = -\nabla \cdot J_C = -\nabla \cdot (1) \text{ رابطه}$$

C_1 : غلظت کلرید کل بر حسب kg/m^3 بتن

c : شار کلرید بر حسب $\text{kg/m}^2 \text{ s}$

t : زمان بر حسب ثانیه

۲- مروری بر تحقیقات صورت گرفته:

در زمینه دوام بتن در محیط های دریایی کار های تحقیقاتی فراوانی انجام شده است، که به عنوان نمونه می توان به موارد زیر اشاره نمود:

بررسی نفوذ یون کلرید در داخل بتن در محیط دریایی در شرایط جزر و مد و اتمسفری و ناحیه اسپری که در سال ۱۹۹۸ توسط محققین دانشگاه لیسبون منتشر شده است (43) ارزیابی دوام دراز مدت (۱۵ ساله) نمونه های بتنی ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی، سرباره و خاکستر بادی در شرایط محیطی دریایی در سواحل ژاپن تحت شرایط جزر و مد که در سال ۲۰۰۰ منتشر شده است. (44) در ایران نیز در سال ۲۰۰۵ در دانشگاه صنعتی سهند تحقیقی انجام گرفته است که در آن، دوام بتن مسلح حاوی پوزولان های مختلف که در معرض شرایط متفاوت محیطی شبیه سازی شده در آزمایشگاه : آزاد، مغروق و جزر ومد قرار داده شده بودند، در مدت ۶ ماه بررسی شده است (45) همچنین توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، دوام نمونه های بتنی ساخته شده تحت شرایط مختلف در منطقه خلیج فارس بررسی و نتایج آن در سال ۲۰۰۶ منتشر شده است. در تحقیق اخیر، نمونه های ساخته شده در شرایط محیطی واقعی مختلف : در ساحل، ناحیه جزر و مد دریا و کاملاً مغروق در آب دریا در سواحل بندرعباس نگهداری می شدند. (46) در سال ۲۰۰۷ نتیجه یک کار تحقیقاتی در سواحل ۱۱ کشور در مقاله ای تحت عنوان " اثرات محیط دریا بر روی دوام بتن مسلح " منتشر شده است. (47) در سال ۲۰۰۸ مقاله ای با عنوان " اثرات ناحیه جزر ومدی خلیج فارس بر روی دوام بتن حاوی میکروسیلیس " توسط محققین دانشگاه کاونتری منتشر شده است. در مقاله اخیر، نمونه های بتنی در شرایط جزر ومدی شبیه سازی شده در آزمایشگاه و همچنین در سواحل خلیج فارس و حوضچه آب شیرین، نگهداری و تست های مقاومت فشاری و جذب آب بر روی نمونه ها انجام شده است. (48)

تحقیقات گذشته نشان میدهد نفوذ کلرید با جایگزینی درصدی از سیمان با میکروسیلیس (49-50) و متاکائولن (51-52) و همچنین با افزایش مدت رویارویی، کاهش می یابد (53-54-55). همچنین نفوذ کلرید با افزایش زمان رویارویی کاهش می یابد که

این کاهش با افزایش زمان رویارویی به خاطر تأثیر اصلی پارامترهای زیر است. (50).

الف. واکنش محصولات هیدراتاسیون سیمان با یونهای موجود در دریا، یونهای کلرید با تری کلسیم آلومینات واکنش می دهد تا منجر به تشکیل کلروآلومیناتها شود. یونهای منیزیم و سولفات با اجزای سیمان واکنش می دهند تا بروسیت و اترینگایت را تشکیل دهند. که این واکنشها تخلخل بتن را کاهش می دهند. (56) ب. هیدراتاسیون سیمان که منجر می شود به کاهش تخلخل بتن و بر اساس آن ضریب انتشار. این تأثیر مخصوص سنین اولیه بتن می باشد.

۳- منطقه خلیج فارس:

در مناطق ساحلی خلیج فارس آلودگی آب، خاک و اتمسفر به عناصر شیمیایی مضر برای بتن، رطوبت بالا، دما و تشعشعات خورشیدی در حدی است که به روند تخریب سازهها کمک می کند و سرعت آسیب دیدگی را افزایش می دهد. مطالعات و بررسی های آزمایشگاهی نشان داده است که املاح موجود در آب خلیج فارس از اغلب آبهای جهان بیشتر است.

زیاد بودن مقدار کلرید در این آب باعث تخریب انواع سازههای ساحلی و دریایی در این منطقه شده است. مقدار کلرید موجود در علاوه بر این آب های زیر زمینی ۳۷۰۰-۳۰۰۰ PPM و میزان سولفات در آن حدود ۲۴۰۰-۲۰۰۰ PPM آب در حدود در این منطقه شدیداً به یونهای کلرید و سولفات آلوده می باشند دمای هوای منطقه خلیج فارس به علت نزدیکی به خط استوا، در گرمترین ماههای سال حداکثر بین ۳۷ تا ۴۱ درجه سانتیگراد متغیر می باشد. البته دمای سطح بتن زیر نور مستقیم خورشید به ۷۰ تا ۷۵ درجه سانتیگراد می رسد. رطوبت نسبی هوا نیز بین ۴۸ تا ۸۱٪ تغییر می کند شکل ۱



شکل ۱: نمای از خلیج فارس

منافذ را پر می کند و شروع به حرکت از منافذ کوچکتر به منافذ بزرگتر می نماید (66)

بنابراین چون بخشی از رطوبت به صورت بخار آب و بخشی به صورت آب مایع در بتن جایجا می شوند، لازم است تصمیم گرفته شود که انتقال رطوبت بر اساس رطوبت نسبی (h) و یا درجه اشباع آب در منافذ (w) مدل گردد. مدلهای متعددی تاکنون برای پیش بینی توزیع رطوبت در بتن ارائه شده اند (67-68) اما به دلیل اینکه یونهای مهاجم در بتن بهمراه فاز مایع (آب) جایجا می شوند، توصیه شده است که در مدلسازی انتقال یونها در بتن در اثر پدیده همرفت رطوبتی، توزیع رطوبت با استفاده از آب منفذی بررسی شود (70-69). بیزانت (71-72) مدلی را بر اساس انتشار رطوبت نسبی منافذ برای تخمین پروفیل رطوبت نسبی در بتن ارائه کرد که جمع شدگی بتن بر اساس آن اندازه گیری می شد.

ضریب انتقال رطوبت:

یکی از مسائل مهم در مدلسازی توزیع رطوبت در بتن، ضریب انتقال رطوبت (D_w) است که آنهم به چند فاکتور مهم مانند دما، رطوبت نسبی موجود در منافذ، نسبت آب به سیمان، نوع سیمان و مواد پوزولانی، سن بتن، دوره عمل آوری مرطوب، شرایط رویارویی و مدت رویارویی بستگی دارد (74-73). در هر صورت، با توجه به ماهیت جذب رطوبت در منافذ بتن و افت آن در طول زمان، D_w مقادیر متفاوتی خواهد داشت. در سالهای گذشته، برخی روابط تجربی برای تخمین تغییرات D_w نسبت به مقدار w در حالت تر شدن (75-76-77) و در حالت خشک شدن (83-82-81-80-79-78) پیشنهاد شده است که در بین آنها، رابطه (۲) و رابطه (۳) به ترتیب برای حالت تر شدن و حالت خشک شدن، بیشتر مورد استفاده قرار گرفته اند.

$$D_w = D_w^d e^{-\beta w} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$D_w = D_w^s \left[\alpha + \frac{1-\alpha}{1 + \left(\frac{1-w}{1-wcr} \right)^N} \right] \quad \text{رابطه ۳}$$

D_w^d : ضریب انتقال رطوبت خشک در حالت تر شدگی.

D_w^s : ضریب انتقال رطوبت اشباع در حالت دد خشک شدگی.

β : ضریب حساسیت که شدت کاهش D_w را با توجه به افزایش w نشان می دهد.

میزان جزر و مد آب در خلیج فارس در نقاط مختلف آن متفاوت است ولی بالغ بر ۱ تا ۴ متر در قسمت شمالی و ۱ تا ۲ متر در نقاط دیگر آن گزارش شده است (57). مقایسه میان غلظت نمک موجود در آب این منطقه با دیگر مناطق دنیا حاکی از اختلاف شدید آن در این منطقه با دیگر مناطق می باشد به طوری که غلظت میانگین نمک در این منطقه $38,9 \text{ gr/L}$ گزارش داده شده است [58]. در سازه های واقع شده در آب و هوای گرم، دمای زیاد هوا خود به تنهایی به عنوان یک پارامتر منفی عمل کرده و موجب سرعت بخشیدن به مکانیزم های خرابی در بتن می شود به نحوی که مطابق روابط تئوری موجود میان دما و نرخ واکنش های شیمیایی، با افزایش تنها 10°C درجه سانتی گراد دمای محیط، روند تخریب سازه های بتنی حدودا 2 برابر می شود (59)

در مورد رطوبت هوا تغییرات بین 40 تا 95 درصد در طول شبانه روز گزارش داده شده است. کمترین و بیشترین دمای هوا در این منطقه به ترتیب 3 و 50 درجه سانتی گراد و کمترین و بیشترین رطوبت هوا به ترتیب 5 و 95 درصد گزارش داده شده است. تفاوت زیاد موجود میان حداقل و حداکثر رطوبت و دمای محیط موجب می شود تا بتن به دلیل ایجاد تنش های حرارتی و مکانیکی ترک خورده و نفوذ یون های مهاجم به راحتی صورت پذیرد. (60)

مکانیسم انتقال یون کلراید در شرایط جزر و مدی:

در اکثر سازه های مورد مطالعه، اغلب مکانیسم عمده ورود یون کلراید در بتن، انتشار و مکش موئینه است (61-62). مکانیسم غالب ورود در دوره های کوتاه رویارویی (چند ساعت)، به ویژه نزدیک سطوح غیر اشباع یا اشباع جزئی، پدیده جذب سطحی است که به عنوان جذب آب توسط منافذ موئینه و انتقال بوسیله کشش موئینه در بتن تعریف می شود (63). در ادامه روابط حاکم بر شار انتقال رطوبت و کلراید در بتن ارائه خواهد شد.

شار انتقال رطوبت:

جذب سطحی (موئینگی) در نتیجه انتقال موئینه در منافذ بتن ناشی از کشش سطحی بین آب و ساختار متخلخل بتن می باشد. (64-65) آب ابتدا روی سطح منافذ موئینه جذب می شود و سپس زمانیکه رطوبت نسبی افزایش می یابد، آب تقطیر شده و

مشکل عمده سازه های بتنی در منطقه خلیج فارس

خلیج فارس با داشتن شرایط آب و هوایی حاد و موقعیت جغرافیایی استثنایی، هم برای بتن سخت شده و هم برای بتنی که تازه ریخته می شود، منطقه ای مهاجم و خطرناک است. امروزه به لطف پیشرفت علم و اهمیت بحث دوام و کارایی سازه های ساحلی، بسیاری از عوامل موثر بر دوام بتن شناسایی شده و به طور مستمر مورد آزمایش قرار می گیرند. استفاده از پوزولان ها از جمله دوده سیلیس به عنوان افزودنی به دلایل مختلفی در دهه های اخیر توانسته است نظر مهندسين را به

خود جلب کند تا حدی که بتن ساخته شده با دوده سیلیس چنان چه به خوبی نگه داری و عمل آوری شود موجب افزایش مقاومت الکتریکی بتن خواهد شد (84-85). آیین نامه های مختلف از جمله (86) CIRIA-1984 در انگلستان، 2006-BHRC (87) در ایران، 1984-ARAMCO (88) در عربستان سعودی برای ساخت یک بتن پایا در شرایط محیطی مهاجم مهندسين را ملزم به رعایت یک سری محدودیت ها می کنند به نحوی که رعایت این محدودیت ها در نهایت منجر به کاهش نفوذ و انتشار یون کلرید در بتن می شود جدول (2)

جدول 2: مشخصات بتن با دوام در منطقه خلیج فارس

آیین نامه	مواد پوزولانی			نسبت آب به سیمان (W/C)	کم ترین ضخامت پوشش بتن روی آرماتور	مواد سیمانی کل (Kg/m ³)
	GGBS (Cement %)	Fly ash (Cement %)	Silica fume (Cement %)			
BHRC	-	20-50	6-8	<0.4	55-90	<425
CIRIA	50-60	25-30	5-10	<0.45	75-100	-
ARAMCO	-	-	7-8	<0.4	75	360-400

برنامه آزمایشگاهی

مواد و روشهای آزمایشات

در این تحقیق 5 حالت عمل آوری (شامل بدون عمل آوری، عمل آوری در آب به مدت 1،3،6 روز و همچنین عمل آوری با ماده عمل آور) در نظر گرفته شده که تاثیر آن بر روی دو نوع بتن ساده و آمیخته با دوده سیلیس بررسی شده است. آزمون های منشوری در ابعاد 15*15*60 به عنوان آزمون های اصلی برای قرار گیری در محیط خلیج فارس انتخاب شد. طرح اختلاط بتن براساس دستیابی به کارایی یکنواخت با اسلامپ 5 تا 8 سانتی متر برای تمامی حالات انجام شد. مقدار عیار مواد سیمانی با توجه به تجربیات مشابه در دیگر پروژه های تحقیقاتی که به منظور دستیابی به مقدار بهینه مواد سیمانی انجام گرفته بود و همچنین برای مقایسه نتایج با طرح های دیگر پژوهشی به میزان ثابت 400 kg/m³ در نظر گرفته شد. برای طرح اختلاط ابتدا شن و ماسه با حداکثر اندازه دانه 12mm دانه بندی شد. مدول نرمی ریزدانه در حدود 4/3 بود، ولی به دلیل استفاده از

ACI 211 (89) در طراحی و همچنین وجود حدود 37٪ ریزدانه در مصالح درشت دانه، دانه بندی اصلاح گردید تا به حد مورد قبول در استاندارد برسد به این ترتیب که ریز دانه را الک کرده و به دو قسمت زیر الک 1mm و روی الک تقسیم گردید. سپس ریز دانه مصرفی را به نسبت 5 به 1 از مصالح زیر الک 1mm و روی آن تهیه گردید تا مدول نرمی به 3/2 برسد. دانه بندی طرح ها ملزومات ASTM C 33 را برآورده می کند. (90)

پس از آماده سازی آزمون های منشوری که در آزمایشگاه ساخته شده بودند به محل منتقل شدند. میزان نفوذ یون کلرید حسب عمق از سطح بتن در زمان مشخص توسط قانون دوم انتشار پذیر فیک بیان می شود. رابطه های (5 و 4)

$$D_C \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad \text{رابطه 4-}$$

$$C(x,t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_C t}} \right) \right] \quad \text{رابطه 5-}$$

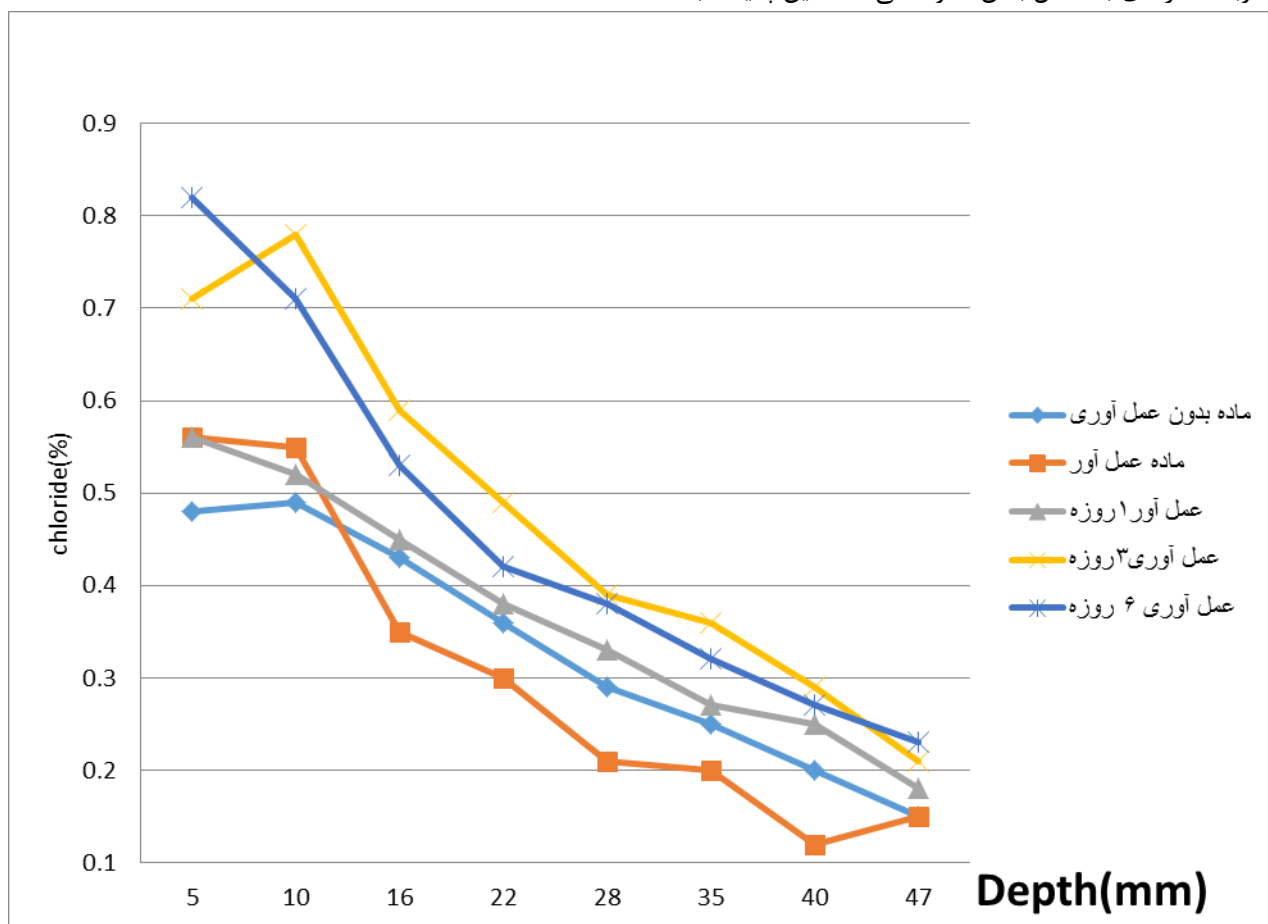
که در آن X فاصله از سطح بتن بر حسب متر، t مدت زمان رویارویی بر حسب ثانیه، D_c ضریب انتشار پذیری بتن بر حسب متر مربع بر ثانیه، C_0 میزان درصد وزنی یون کلر در سطح بتن و $C(x,t)$ میزان درصد وزنی یون کلر در عمق X نسبت به سطح و در زمان t است.

نتایج پروفیل نفوذ یون کلر:

یکی از پدیده های جالب مشاهده شده در نتایج بلند مدت این است که هر چه زمان عمل آوری بیشتر شده میزان نفوذ کلر در بتن نیز بیشتر می شود که این امر به وضوح در نمودار شکل ۱ نمایان است. عمل آوری تاثیر به سزایی در آهنگ نفوذ یون کلر در سنین اولیه قرار گیری در محیط دارد. از دلایل نفوذ بیشتر کلرید در بتن در هنگام بیشتر شدن زمان عمل آوری می توان به این موضوع اشاره کرد که در نمونه های با عمل آوری طولانی مدت تر با آب، رطوبت نسبی بتن در لایه های درونی تر از سطح نمونه بیشتر می شود که از آنجایی که یون کلرید توسط این رطوبت حفره ای به داخل بتن نفوذ می کند، این پدیده باعث

بیشتر شدن نفوذ یون کلر در نمونه می شود. نتایج به دست آمده در این پروژه مطابق مشاهدات Oh و Jang (۲۰۰۷) می باشد (92). همچنین نتایج به دست آمده نشان دهنده کاهش ضریب انتشار پذیری با کاهش مدت زمان عمل آوری است که دلیل این موضوع را نیز می توان علت ذکر شده دانست. از طرف دیگر طبق مشاهدات Khatib و Mangat (۲۰۰۲) عمل آوری در دردمای زیاد باعث ایجاد منافذ حفره ای بیشتر و در نتیجه نفوذ کلر بیشتر می شود (92). پس در نتیجه با توجه به شرایط دمایی و رطوبت خلیج فارس می توان اینطور برداشت کرد که در مجموع در این ناحیه عمل آوری بلند مدت تاثیر مثبتی ندارد و همچنین استفاده از ماده عمل آوری مناسب باشد.

در ناحیه مستغرق بهترین عملکرد از لحاظ کاهش نفوذ یون کلر را نمونه حاوی ماده عمل آور و پس از آن نمونه بدون عمل آوری دارند و عمل آوری با آب، نفوذ یون کلر را بیشتر نموده است.



نمودار ۱: مقایسه مقدار پروفیل یون کلر در شرایط مستغرق برای نمونه های ۳ ساله فاقد میکروسلیس با عمل آوری مختلف

نتایج مقدار کلر سطحی:

در بررسی مقدار کلر سطحی، بهترین و بدترین عملکرد به ترتیب به کمترین و بیشترین مقدار کلر سطحی نسبت داده شده

بدون عمل آوری دارای ضعیف ترین رفتار بودند

است. مطابق جدول ۳ در ناحیه اتمسفر از نظر میزان کلر

سطحی، عمل آوری ۳ روزه دارای بهترین عملکرد و نمونه های

جدول ۳: عملکرد از نظر مقدار کلر سطحی در ناحیه اتمسفر

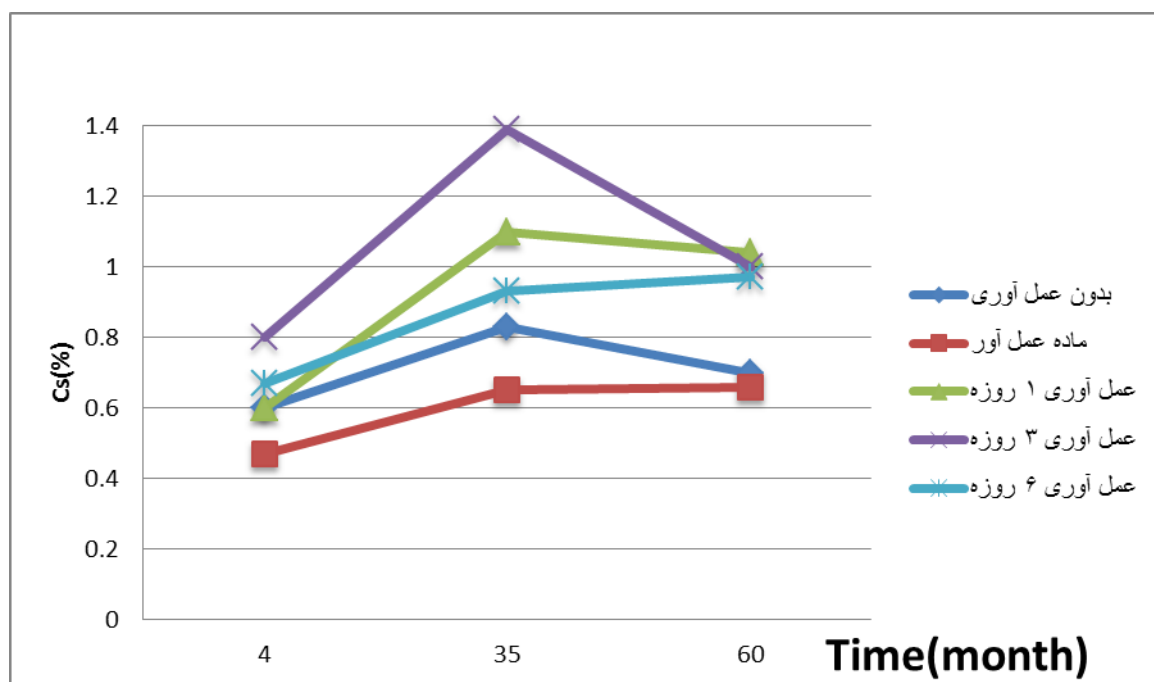
عملکرد از نظر مقدار کلر سطحی در ناحیه جزر و مد در آزمون های حاوی میکروسلیس		عملکرد از نظر مقدار کلر سطحی در ناحیه جزر و مد در آزمون های بدون میکروسلیس		
۲۷ روزه با آب	۳ روزه با آب	۱ روزه با آب	۳ روزه با آب	بهترین عملکرد
بدون عمل آور	۱ روز با آب	بدون عمل آور	ماده عمل آور	بدترین عملکرد

تیرین عملکرد را برای نمونه های با عمل آوری میان ۳ روزه و ۶ روزه می باشد

مطابق نمودار ۲ و جدول ۴، در ناحیه جزرومد، برای طرح اختلاط حاوی میکروسلیس بهترین عملکرد از نظر میزان کلر سطحی برای نمونه های بدون عمل آوری و با ماده عمل است وضعیت

جدول ۴: عملکرد از نظر مقدار کلر سطحی در ناحیه جزر و مد

عملکرد از نظر مقدار کلر سطحی در ناحیه جزر و مد در آزمون های حاوی میکروسلیس		عملکرد از نظر مقدار کلر سطحی در ناحیه جزر و مد در آزمون های بدون میکروسلیس		
بدون عمل آوری	ماده عمل آور	بدون عمل آوری	ماده عمل آور	بهترین عملکرد
۱ روزه با آب	۳ روزه با آب	۶ روزه با آب	۳ روزه با آب	بدترین عملکرد



نمودار ۲: مقدار کلر سطحی در زمان های متفاوت برای بتن فاقد میکروسلیس و دارای نسبت آب به سیمان 0/5 در محیط جزرو مد

نتیجه گیری:

۱- وجود یون سولفات در محیط خورنده مورد آزمایش باعث

کاهش مقاومت فشاری کلیه نمونه های بتن عمل آوری شده در

در این مقاله خلاصه نتایج بدست آمده به شرح زیر می باشد:

این محیط نسبت به محیط شاهد شده است. همچنین مقاومت الکتریکی این نمونه ها نسبت به نمونه های محیط شاهد کاهش چشمگیری داشته است.

۲- نمونه های بتن دارای میکروسیلیس و نسبت آب به مواد سیمانی پایین در کلیه ناحیه ها کمترین ضریب افت مقاومت فشاری را نسبت به بتنهای معمولی دارند.

۳- افزودن میکروسیلیس باعث افزایش میزان کلر سطحی می شود. این پدیده در همه نمونه ها به چشم می خورد که علت این

امر را می توان در این است که با افزودن میکروسیلیس، ریز ساختار بتن بهبود یافته و یون کلر به سختی می تواند در بتن نفوذ کند و این امر باعث انباشت این یون در پوسته بتن می شود.

۴- در ناحیه جزر و مد، برای هر دو طرح اختلاط حاوی میکروسیلیس بهترین عملکرد از نظر میزان کلر سطحی برای نمونه های بدون عمل آوری و با ماده عمل است.

۵- با توجه به کوتاه مدت بودن زمان انجام آزمایش ها، به منظور دستیابی به اطلاعات دقیق تر نیاز به مدت زمان بیشتری است.

restrained shrinkage. *Cem Concr Res* 2007;37(2):200–9.

7-Khatri RP, Sirivivatnanon V. Characteristic service life for concrete exposed to marine environments. *Cem Concr Res* 2003;34:745–52.

8-H.F. Taylor, *Cement Chemistry*, Thomas Telford, 1997.

9-Kovler K, Jensen O.M. editors. Internal curing of concrete, State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee 196-ICC, Report 41, 2007.

10-K. Hong, R. Hooton, Effects of cyclic chloride exposure on penetration of concrete cover, *Cem. Concr. Res.* 29 (9) (1999) 1379–1386.

11-K.Y. Ann, H.-W. Song, Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete, *Corros. Sci.* 49 (11) (2007) 4113–4133.

12-M.G. Richardson, *Carbonation of Reinforced Concrete: Its Causes and Management*, Citis, 1988

13-S. Ahmad, Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review, *Cement Concr. Compos.* 25 (4) (2003) 459–471.

14-A. Neville, Chloride attack of reinforced concrete: an overview, *Mater. Struct* 28 (2) (1995) 63–70.

15-Tsukahara E, Uomota T. Corrosion rate of reinforcing steel bars in cracked concrete. *Trans Jpn Concr Inst* 2000;22:155–66..

16-G. Glass, N. Buenfeld, The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete, *Corros. Sci.* 39 (5) (1997) 1001–1013.

17-S. Hussain, A. Al-Musallam, A. Al-Gahtani, Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete, *Cem. Concr. Res.* 25 (7) (1995) 1543–1555.

تشکر و قدردانی

از اساتید محترم رشته مهندسی عمران دانشگاه خلیج فارس که امکانات لازم در انجام این تحقیق فراهم نمودند، تقدیر و سپاسگزاری می شود.

منابع

1-Meijers S.J., Bijen J.M., De Borst R. & Fraaij A.L.A. (2001). Computational modelling of chloride ion transport in reinforced concrete. *HERON*, 46 (3), ISSN 0046-7316.

2-Basheer P.A.M., Chidiact S.E. & Long A.E. (1996). Predictive models for deterioration of concrete structures. *Construction and Building Materials*, 10(1), 27-37.

3-Malhotra V.M. & Mehta P.K. (1996). *Pozzolanic and cementitious materials. Advances in concrete technology*, 1, Taylor and Francis, London

4-Mehta P.K. (1998). Role of pozzolanic and cementitious material in sustainable development of the concrete industry. In: *Proceedings of 6th International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-178, American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, MI, 1–20.

5-Yuan Q., Shi C., Schutter G.D., Deng D. & He F. (2011). Numerical Model for Chloride Penetration into Saturated Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 305.

6-Cusson D, Hoogeveen T. An experimental approach for the analysis of early-age behavior of high-performance concrete structures under

- 31-A. R. Bagheri and H. Zanganeh, "Comparison of Rapid Tests for Evaluation of Chloride Resistance of Concretes with Supplementary Cementitious Materials," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 2, 4pp. 1175-1182, 2012.
- 32-A. A. Ramezani-pour, A. Pilvar, M. Mahdikhani, and F. Moodi, "Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength," *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 2472-2479, 2011.
- 33-P. E. Streicher and M. G. Alexander, "A chloride conduction test for concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 25, pp. 1284-1294, // 1995.
- 34-Al-Amoudi OSB. Durability of plain and blended cements in marine environments. *Adv Cem Res* 2002;14(3):89–100.
- 35-Al-Ghamdi HA. Effect of curing and mix design on durability of Portland cement and Portland cement – silica fume cement mortars in a hot-marine environment. PhD thesis, Department of Chemistry, University of Aberdeen, UK; 1999.
- 36-Ghoddousi P, Ganjian E, Parhizkar T, Ramezani-pour A. Concrete technology in the environmental conditions of the Persian Gulf. Building and housing research centre publication no. B 283, Tehran, Iran; 1998.
- 37-ولیپور، مهدی، "بررسی انتشار یون کلر بر خوردگی بتن مسلح در شرایط اقلیمی جزیره قشم با در نظر گرفتن شرایط قرارگیری و کاربرد مواد پوزولانی . مختلف"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۸
- 38-Ashrafi, H.R. and Ramezani-pour, A.A., "Service Life Prediction of Silica Fume Concretes", *International Journal of Civil Engineering*. Vol. 5, No. 3., p. 182-197, 2007.
- 39-Martin-Perez B., Pantazopoulou S.J. & Thomas M.D.A. (2001). Numerical solution of mass transport equations in concrete structures. *Computer and structures*, 79, 1251-1264.
- 40-Ishida T., Iqbal P.O. & Anh H.T.L. (2009). Modeling of chloride diffusivity coupled with
- 18-C. Alonso, C. Andrade, J. Gonzalez, Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types, *Cem. Concr. Res.* 18 (5) (1988) 687–698.
- 19-G. Glass, C. Page, N. Short, Factors affecting the corrosion rate of steel in carbonated mortars, *Corros. Sci.* 32 (12) (1991) 1283–1294.
- 20-M.K. Lee, S.H. Jung, B.H. Oh, Effects of carbonation on chloride penetration in concrete, *ACI Mater. J.* 110 (5) (2013).
- 21-H. Hilsdorf, J. Kropp, Performance Criteria for Concrete Durability, CRC Press 2004.
- 22-I.-S. Yoon, O. Çopuroğ˘lu, K.-B. Park, Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete, *Atmos. Environ.* 41 (34) (2007) 7274–7285.
- 23-M.G. Stewart, X. Wang, M.N. Nguyen, Climate change impact and risks of concrete infrastructure deterioration, *Eng. Struct.* 33 (4) (2011) 1326–1337.
- 24-E. Bastidas-Arteaga, A. Chateaufneuf, M. Sánchez-Silva, P. Bressolette, F. Schoefs, Influence of weather and global warming in chloride ingress into concrete: a stochastic approach, *Struct. Saf.* 32 (4) (2010) 238–249.
- 24-Zhutovsky S, Kovler K. Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete. *Cem Concr Res* 2012;42(1):20–6.
- 25-Bentz DP. Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars. *Cement Concr Compos* 2009;31(5):285–9.
- 26-Haug AK, Fjeld S. A floating concrete platform hull made of lightweight aggregate concrete. *Eng Struct* 1996;18(11):831–6.
- 27-Ingebrigtsen T. Stolma Bridge, Norway. *Struct Eng Int* 1999;9(2). 100–102(3).
- 28-A.R. Baqheri, H. Zanganeh, H. Samadzad, and A. L. A. H. Kiani, "Assessing The Durability Of Binary And Ternary Concretes Using Rapid Chloride Resistance Test And The Accelerated Rebar Corrosion Test," presented at the International Congress On Durability Of Concrete, 2012.
- 29-ASTM, "C 1543: Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Pounding," ed, 2010.
- 30-ASTM, "C 1556: Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion," ed, 2011.

- Concretes”, International Journal of Civil Engineering. Vol. 5, No. 3., p. 182-197, 2007.
- 50-Costa, A., Appleton, J., “Chloride penetration into concrete in marine environment - Part I Main parameters affecting chloride penetration”, Materials and Structures/Materiaux et Constructions 32, p. 252-259, May 1999.
- 51-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, p. 63–70, 2013.
- 52-Guneyisi, E., Mermerdas, K., “Comparative study on strength, sorptivity, and chloride ingress characteristics of air-cured and water-cured concretes modified with metakaolin” Materials and Structures 40, pp. 1161–1171, 2007.
- 53-Shekarchi, M., Rafiee, A., Layssi, H., “Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates”, Cement & Concrete Composites 31, pp. 769–775, 2009.
- 54-رفیعی، علیرضا، "بررسی اثر زمان بر آهنگ نفوذ یون کلر در بتن در محیط خلیج فارس با رویکرد احتمال اندیشانه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۶ .
- 55-Comite Euro-International Du Beton (CEB), “Durable Concrete Structure (Design Guide)”, 1992.
- 56-Igarashi, SI., Watanabe, A., Kawamura, M., “Evaluation of capillary pore size characteristics in high-strength concrete at early ages”, Cement and Concrete Research.
- 57-Zwarts, L., Wadden en wadvogels in de Golf, Waddenbulletin 1991-2, pp. 65-68
- 58-Chini, M., Study on the Effect of Silica Fume and Water to Binder ratio on the Diffusion of Chloride Ion in Persian Gulf Region (In Persian), M. s. Thesis, University of Tehran, Iran, June 2004, 127 page s.
- non-linear binding capacity in sound and cracked concrete. Cement and Concrete Research, 39, 913-923.
- 41-Martín-Pérez B., Zibara H., Hooton R.D., Thomas M.D.A. (2000). A study of the effect of chloride binding on service life predictions. *Cement and Concrete Research*, 30, 1215-1223.
- 42-Isgor O.B. A Durability Model for Chloride and Carbonation Induced Steel Corrosion in Reinforced Concrete Members. PhD Thesis in Carlton University, Canada, 2001.
- 43-A. Coasta, J. Appleton, " Chloride penetration into concrete in marine environment " , Materials and Structures Journal, Vol. 32, May 1999, PP 252-259.
- 44-Tarek Uddin Mohammed, Toru Yamaji, Toshiyuki Aoyama, and Hidenori Hamada, " Marine Durability of 15- Year old concrete Specimens Made with Ordinary Portland, Slag and Fly Ash Cements, ACI SP 199-30-2000, PP.451-560.
- 45-H. Karbalayi Faraji, H. Afshin, " Durability of Reinforcement Concrete Containing Pozzolans In Oroomiyeh Lake Environment", M.Sc. Thesis Sahand University of Technology, 2005. (In Persian)
- 46-Ramazanianpour, A.A., Parhizkar, T., Pourkhorshidi, R., Raisghasemi, M., "Assessing Concrete Durability with Different Cements and Pozzolans in Persian Gulf Environment", Concrete journal, Research Report, BHRC Publication No. R-434, 2006. (In Persian)
- 47-Troconis de Rincon , M. Sanchez , V . Millano, R. Fernandez,..." Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries ", Corrosion Science Journal, PP. 2832-2843, 16 March 2007.
- 48-E. Ganjian, H. Sadaghi Pouya, " The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag ", ELSEVIER, Construction and Building Materials, Available online, 2008.
- 49-Ashrafi, H.R. and Ramezaniapour, A.A., “Service Life Prediction of Silica Fume

- based materials. *Materials and Structures*, 35, 134-140.
- 71-Bazant Z.P. & Najjar L.J. (1972). Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. *Materials and Structures*, 5(25), 3-20.
- 72-Bertolini L., Elsener B., Pedferri P. & Polder R. (2004). Corrosion of steel in concrete. *WILEY-VCH Verlag*.
- 73-Isgor O.B. A Durability Model for Chloride and Carbonation Induced Steel Corrosion in Reinforced Concrete Members. PhD Thesis in Carlton University, Canada, 2001.
- 74-Dhir R.K., Hewlett P.C. & Chan Y.N. (1986). Near-surface characteristics and durability of concrete: Assessment and development of in situ test methods. *Magazine of Concrete Research*, 39, 183-194.
- 75-Conciatori D., Laferrière F. & Brühwiler E. (2010). Comprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state for real climate. *Cement and Concrete Research*, 40, 109-118.
- 76-Navarri P. & Andrieu J. (1993). High-intensity infrared drying study: part II. Case of thin coated films. *Chemical Engineering Process*, 32(5), 319-325.
- 77-Buchwald A. Determination of the ion diffusion coefficient in moisture and salt loaded masonry materials by impedance spectroscopy. In: Third international symposium, Vienna; 2000. p. 475-482.
- 78-Martys N. & Ferraris C.F. (1997). Capillary transport in mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, 27(5), 747-60.
- 79-Janž M. (1997). Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels. University of Lund, Lund Institute of technology, *Division of Building Materials*; Report TVBM-3076.
- 80-Janž M. (2002). Moisture diffusivities evaluated at high moisture levels from a series of water absorption tests. *Materials and Structures*, 35, 141-148.
- 59-Mehta, P.K., *Concrete in Marine Environment*, Taylor & Francis Books, 2003, 206 pages.
- 60 Neville, A., *Good Reinforced Concrete in the Arabian Gulf*, *Materials and Structures*, Vol. 33, December 2000, pp. 655-664.
- 61-Hall C. (1989). Water sorptivity of mortars and concretes: a review. *Magazine of Concrete Research*, 41(147), 51-61.
- 62-Nielsen E.P. & Geiker M.R. (2003). Chloride diffusion in partially saturated cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 33, 133-138.
- 63-Malhotra V.M. & Mehta P.K. (1996). Pozzolanic and cementitious materials. *Advances in concrete technology*, 1, Taylor and Francis, London.
- 64-Conciatori D., Laferrière F. & Brühwiler E. (2010). Comprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state for real climate. *Cement and Concrete Research*, 40, 109-118.
- 65-Hanzic L., Kosec L. & Anzel I. (2010). Capillary absorption in concrete and the Lucas-Washburn equation. *Cement and Concrete Composite*, 32, 84-91.
- 66-Bazant Z.P. & Najjar L.J. (1971). Drying of concrete as a nonlinear diffusion problem. *Cement and Concrete Research*, 1(5), 461-73.
- 67-Wanga L. & Ueda T. (2011). Mesoscale modeling of water penetration into concrete by capillary absorption. *Ocean Engineering*, 38, 519-528.
- 68-Carpenter T.A., Davies E.S., Hall C., Hall L.D., Hoff W.D. & Wilson M.A. (1993). Capillary water migration in rock: process and material properties examined by NMR imaging. *Materials and Structures*, 26, 286-292.
- 69-Lockington D., Parlange J. & Dux P. (1999). Sorptivity and the estimation of water penetration into unsaturated concrete. *Materials and Structures*, 32, 342-347.
- 70-Ayano T. & Wittmann F.H. (2002). Drying, moisture distribution, and shrinkage of cement

Conditions on the Diffusion of Chloride Ion into Concrete in Persian Gulf Region and Implications on Service Life Prediction, CONSEC'04, Korea, 2004.

90-Taheri-Motlagh A., Durability of Reinforced Concrete Structures in Aggressive Marine Environment, PhD thesis, IHE Delft, 1998.

91-Oh H.B., Jang. Y.S., Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures, Cement and Concrete Research 37, 2007, pp. 47-53.

92-Khatib J.M., Mangat P.S., Influence of High Temperature and Low-Humidity Curing on Chloride Penetration in Blended Cement Concrete, Cement and Concrete Research 32, 2002, pp. 1743-1753.

81-Conciatori D., Brühwiler E. & Gysler R. (2011). Brine Absorption in Concrete at Low Temperature: Experimental Investigation and Modeling. *Journal of Material in Civil Engineering*, 23, 846-851.

82-Xi Y.P., Bazant Z.P., Molina L. & Jennings HM. (1994b). Moisture diffusion in cementitious materials-Moisture capacity and diffusion. *Advanced Cement Based Materials*, 1, 258-266.

83-Idiart A.E., Lopez C.M. & Carol I. (2011). Modeling of drying shrinkage of concrete specimens at the meso-level. *Materials and Structures*, 44, 415-435.

84-Ghalibafian M., Shekarchi M., Zare, A., & Tadayon M., Chloride Penetration Testing of Silica Fume Concretes under Persian Gulf Conditions, The 6th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Thessaloniki, Greece, 2003, pp. 737-753.

85-Shekarch, M., Tadayon, M., Hoseini, M., Chini, M., Montazer, SH., Alizadeh, R. & Ghods, P. Application of the Water Absorption as a Criterion for the Durability of Concrete Structures in Marine Environments, 4th international Conference on Concrete under Severe Conditions, CONSEC'04, Seoul, Korea, 2004, pp. 369-376.

86-CIRIA, The CIRIA Guide for Concrete Construction in the Gulf Region, Spec. Pub.31, Construction Industry Research and Information Association, Ministry of Housing and Construction, Department of the Environment, London, 1984.

87-BHRC-PN S 428, Code of Practice for Concrete Durability in the Persian Gulf and Oman Sea (In Persian), Building and Housing Research Center, Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran, 2006, 87 pages.

88-ARAMCO, The Saudi Arabian Oil Company concrete specification 09 SAMSS-097, Clause 5.1, Saudi Aramco, Dhahran, Saudi Arabia, 1994.

89-Ghalibafian M., Ghods P., Alizadeh R., Chini M., Hoseini M., Montazer Sh., Effect of Curing