

بررسی تاثیر درصد پوزولان زئولیت و نسبت آب به سیمان روی ضریب سن بتن واقع در ناحیه جزرومدی و پاششی جزیره قشم

عطیه فراهانی^{۱*}، محمدحسین تدین^۲، محمد شکرچی زاده^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه دانشگاه تهران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه‌های دریایی دانشگاه تهران

۳- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران و سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

چکیده

امروزه سازه‌های بتن مسلح نقش بسیار مهمی در زیرساخت‌های هر جامعه‌ای دارند. بنابراین شرایط و عملکرد این سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نفوذ یون کلرید به داخل بتن در محیط‌های دریایی و خوردنده مانند آب‌های خلیج فارس و جزیره قشم، عامل اصلی در خوردگی میلگرد در سازه‌های بتن مسلح می‌باشد. زئولیت به عنوان پوزولان جایگزین سیمان در طرح اختلاط بتن، موجب کاهش نفوذپذیری بتن و افزایش دوام بتن در سازه‌های بتن مسلح در مناطق خوردنده به منظور کاهش پتانسیل خوردگی میلگرد در بتن نقش به سزایی دارد. نفوذ یون کلرید به داخل بتن بر قانون دوم انتشار فیک استوار است که در این تحقیق از مدلی تجربی برای ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی زئولیت و بتن بدون پوزولان با نسبت‌های آب به سیمان مختلف واقع در ناحیه جزرومدی و پاششی جزیره قشم، به صورت تابعی از زمان رویارویی بتن در محیط کلریدی، دما، نسبت آب به سیمان و مقدار زئولیت استفاده شده است. در این تحقیق به منظور برقراری ارتباط بین مدل ضریب انتشار در ناحیه جزرومدی و ناحیه پاششی، ضریب سن بتن مورد بررسی قرار گرفته است. ضریب سن بتن، عدد توان در تابع زمان در فرمول تجربی ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که ضریب سن بتن در ناحیه پاششی به صورت تابعی خطی از ضریب سن بتن در ناحیه جزرومدی در آزمون‌های با نسبت‌های آب به سیمان مختلف و حاوی زئولیت بدست آمده است. همچنین، ضریب سن بتن با افزایش درصد زئولیت در آزمون‌های حاوی پوزولان زئولیت و افزایش نسبت آب به سیمان در آزمون‌های با نسبت‌های آب به سیمان مختلف در ناحیه جزرومدی با تغییرات اندکی، افزایش و در ناحیه پاششی با تغییرات اندکی، کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی:

بتن، زئولیت، ضریب انتشار یون کلرید، ضریب سن بتن، نسبت آب به سیمان.

Investigation of age factor in Zeolite Concrete in Tidal and splash Zones in Qeshm Island

Atiye Farahani^{1*}, Mohammad Hosein Tadayon²,
Mohammad Shekarchi³

- 1- Ph.D. student of Structural Engineering, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
- 2- Ph.D. student of Marine Structural Engineering, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
- 3- Full Professor and Director of Construction Materials Institute, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Today, concrete structures have a crucial role in the infrastructure of society. The condition and performance of these structures is important. Chloride permeation into concrete is the main factor in corrosion of reinforced concrete in marine environments such as Persian Gulf and Qeshm Island located in south side of Iran. Zeolite as a pozzolanic material increases the durability of concrete and decreases the corrosion potential of reinforcement in corrosive environments. Chloride permeation into concrete is based on Fick's second law of diffusion. In this paper, an empirical model is used to estimate the chloride diffusion coefficient of Zeolite concretes and concretes with no pozzolanic materials as a function of time, temperature, water-to-cement ratio and Zeolite content in tidal and splash zones of Qeshm Island. In order to communicate between the chloride diffusion coefficient in tidal zone and splash zone, the age factor, as power number in time function in formulation of the chloride diffusion coefficient, has been investigated. The results indicated that by increasing the zeolite percent in zeolite concrete specimens and increasing the water-to-cement ratio in concrete specimens with different water-to-cement ratios and without pozzolan, increases with little change in tidal zone and decreases with little change in splash zone.

Keywords:

Concrete, Zeolite, Age factor, Chloride diffusion coefficient, Water-to-cement ratio.

Code : 18E.

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]. زئولیت یک کانی متبلور با ترکیبی از سیلیکات آلومینیوم هیدراته از عناصر قلیایی و قلیایی خاکی می‌باشد. خاصیت پوزولانی زئولیت به دلیل وجود اکسید سیلیسیم (SiO_2) و اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) در ترکیب شیمیایی آن است. این ترکیبات با $\text{Ca}(\text{OH})_2$ حاصل از فرآیند هیدراته شدن سیمان واکنش داده و C-S-H و آلومینوسیلیکات‌های هیدراته تولید می‌کنند. در نتیجه ریزساختار بتن سخت‌شده بهبود یافته و نفوذپذیری بتن در برابر حمله کلریدی کاهش می‌یابد. زئولیت به عنوان یک ماده پوزولانی که در بهبود خواص مکانیکی و شیمیایی بتن موثر است، دارای منابع محدودی در دنیا بوده و در نتیجه تحقیقات محدودی در این زمینه انجام شده است [۱۲]. تحقیقات شکرچی و احمدی [۱۳] در مورد کاربرد زئولیت در بتن در مقایسه با دوده‌سیلیس نشان داده است که فعالیت پوزولانی زئولیت از دوده‌سیلیس کمتر است. آن‌ها همچنین نشان دادند که بتن حاوی ۲۰ درصد جایگزینی زئولیت موجب کاهش ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن می‌شود. از اینرو می‌توان انتظار داشت که بتن مسلح حاوی زئولیت دارای مقاومت مناسبی در برابر خوردگی میلگردها در بتن می‌باشد. بنابراین، زئولیت نیز همچون پوزولان‌های دیگر با انجام واکنش پوزولانی سبب بهبود ریزساختار بتن و کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن در برابر یون کلرید می‌شود [۱۴].

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. در این مدل‌ها، ضریب انتشار یون کلرید در بتن به زمان رویارویی بتن در محیط کلریدی، دما و رطوبت محیط، غلظت یون کلرید موجود در آب، ناحیه قرارگیری در مناطق دریایی، نسبت آب به سیمان، نوع و درصد پوزولان جایگزین سیمان پرتلند و غیره وابسته است. با بررسی ادبیات فنی، جدول ۱، به صورت خلاصه، تاثیر هر یک از این عوامل در ضریب انتشار یون کلرید در بتن و رابطه مربوط به آن را نشان می‌دهد.

جدول ۱- عوامل موثر بر ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن و رابطه‌های آن‌ها در ادبیات فنی

رابطه	عامل
$f_1(t) = \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^n$	زمان رویارویی
$f_2(t) = \frac{1}{1-n} \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^n$	زمان رویارویی
$f_3(t) = \frac{1}{1-n} \left[\left(1 + \frac{t_c}{t}\right)^{1-n} - \left(\frac{t_c}{t}\right)^{1-n} \right] \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^n$	زمان رویارویی
$f_1(T) = \exp\left(\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right)$	دما
$f_2(T) = \frac{T}{T_{ref}} \exp\left(\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right)$	دما
$f(h) = \left[1 + \frac{(1-h)^4}{(1-h_c)^4}\right]^{-1}$	رطوبت نسبی
$f(x) = \left(\varphi + (1-\varphi) \left(\frac{x}{x_s}\right)^m\right)$	فاصله از سطح بتن

که در آن‌ها، t زمان رویارویی بتن در محیط کلریدی بر حسب ماه، t_{ref} زمان مرجع بر حسب ماه، t_c زمان عمل‌آوری بتن بر حسب ماه، n ضریب سن بتن به عبارتی ضریب افزایش‌دهنده مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلرید در بتن با زمان، T دمای محیط کلریدی بر حسب کلوین، T_{ref} دمای مرجع در زمان مرجع بر حسب کلوین، U انرژی فعال‌سازی در فرایند انتشار بر حسب $J.mol^{-1}$ ، R ثابت گازها و برابر $8.314 J.mol^{-1}.K^{-1}$ ، h رطوبت نسبی محیط کلریدی بر حسب درصد، h_c رطوبت نسبی بحرانی، x فاصله از سطح بتن، x_s ضخامت لایه سطحی، φ نسبت ضریب انتشار لایه سطحی به ضریب انتشار ناحیه داخلی بتن و m ضریب اثر عمق می‌باشند.

هدف از این تحقیق، بررسی ضریب سن بتن در تابع زمان مدل‌های ضریب انتشار یون کلرید در بتن می‌باشد. جدول ۲، روابط مربوط به ضریب سن بتن در روابط ضریب انتشار یون کلرید در بتن موجود در ادبیات فنی را نشان می‌دهد. منگات و مولوی^۱ [۱۵] در تحقیق خود، ضریب سن بتن را به صورت تابعی از نسبت آب به سیمان در نظر گرفتند. [۱۶] Life 365، در مدل مربوط به ضریب انتشار پذیری یون کلرید در بتن، ضریب سن بتن را به صورت تابعی از درصد سرباره و خاکستربادی در نظر گرفته است. همچنین، کرنک^۲ [۱۷] ضریب سن بتن را تابع درصد خاکستربادی در نظر گرفته است. عزیزی‌مقدم [۱۸] در تحقیق خود روی آزمون‌های موجود در بندرعباس در جنوب ایران، ضریب سن بتن را عددی ثابت برابر ۰/۲۴ در نظر گرفت. چالی و همکاران^۳ [۱۰] در مطالعه خود روی آزمون‌های حاوی خاکستربادی، ضریب سن بتن را به صورت تابعی از درصد خاکستربادی و نسبت آب به مواد سیمانی در نظر گرفت. Fib [۱۹] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی روی آزمون‌های بتنی حاوی سیمان

¹ Mangat and Molloy

² Crank

³ Chalee et al.

پرتلند، خاکستربادی و سرباره، ضریب سن بتن را برای این بتن‌ها به ترتیب ۰/۳۰، ۰/۶۰ و ۰/۴۵ در نظر گرفت. ساتا و همکاران^۱ [۲۰] نیز در بتن حاوی سیمان پرتلند و دوده‌سیلیس، ضریب سن بتن را برابر ۰/۵۰ در نظر گرفتند.

جدول ۲- رابطه‌های ضریب سن بتن (n) موجود در ادبیات فنی

رابطه n	مدل
$2.5w/c - 0.6$	منگات و مولوی [۱۵]
$0.2 + 0.4(\%FA / 50 + \%SG / 70)$	[۱۶] Life 365
$0.2 + 0.4(\%FA / 50)$	کرنک [۱۷]
در بتن حاوی سیمان پرتلند و دوده‌سیلیس برابر ۰/۲۴	عزیزی‌مقدم [۱۸]
$[-0.0015(w/b) + 0.0034][FA] + [-0.175(w/b) + 0.84]$	چالی و همکاران [۱۰]
در بتن حاوی سیمان پرتلند برابر ۰/۳۰	
در بتن حاوی خاکستر بادی برابر ۰/۶۰	[۱۹] Fib
در بتن حاوی سرباره برابر ۰/۴۵	
در بتن حاوی سیمان پرتلند و دوده‌سیلیس برابر ۰/۵۰	ساتا و همکاران [۲۰]

فراهانی [۲۱] مدلی تجربی برای ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی زئولیت و در بتن بدون زئولیت در جزیره قشم ارائه کرد. در این مدل تجربی، ضریب انتشار یون کلرید در بتن به صورت تابعی از زمان رویارویی در محیط کلریدی، دمای محیط و درصد رطوبت نسبی محیط بدست آمده است. در این مدل، در قسمت تابع زمان که تابعی توانی معکوس از زمان می‌باشد. این تابع زمانی معکوس با عدد توان معادل با ضریب سن بتن است که این ضریب به عنوان ضریب افزایش‌دهنده مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلرید در بتن با زمان به صورت تابعی از درصد پوزولان زئولیت در بتن حاوی زئولیت و به صورت تابعی از نسبت آب به سیمان در بتن بدون پوزولان می‌باشد. در این مقاله، رابطه‌ای بین ضریب سن بتن در ناحیه پاششی و جزرومدی برای بتن حاوی زئولیت و بتن بدون پوزولان بدست آمده است. 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 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 طبیعی زئولیت از شرکت افرند توسکا 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 ۳ مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند و زئولیت را نشان می‌دهد.

¹ Saetta et al.

جدول ۳- مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند و زئولیت

سیمان (%)	زئولیت (%)	
۶۳	۱/۷	اکسید کلسیم (CaO)
۲۱	۶۷/۸	دی اکسید سیلیسیم (SiO ₂)
۵	۱۳/۷	اکسید آلومینیوم (Al ₂ O ₃)
۳/۵	۱/۴	اکسید آهن (Fe ₂ O ₃)
۱/۸	۱/۲	اکسید منیزیم (MgO)
۱/۶	۰/۵	تری اکسید سولفور (SO ₃)
۰/۶	۱/۴	اکسید پتاسیم (K ₂ O)
۰/۵	۲/۰	اکسید سدیم (Na ₂ O)
۲	۱۰/۳	افت وزنی در اثر حرارت (LOI)

۲-۲. طرح‌های اختلاط

طرح‌های بتنی حاوی زئولیت با مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزین سیمان و طرح شاهد (بدون زئولیت) با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ طی مدت زمان‌های ۳، ۹، ۲۷ و ۵۰ ماه در محیط پاششی و جزرومدی جزیره قشم قرار گرفتند. مقدار آب مصرفی در طرح‌های اختلاط ۱۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب بتن می‌باشد. جزئیات ۴ طرح اختلاط در جدول ۴ آمده است.

پس از آماده‌سازی مصالح، کلیه طرح‌ها در محل سایت در دمای 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد ساخته شدند. نتایج آزمایش اسلامپ روی بتن تازه در جدول ۴ آمده است.

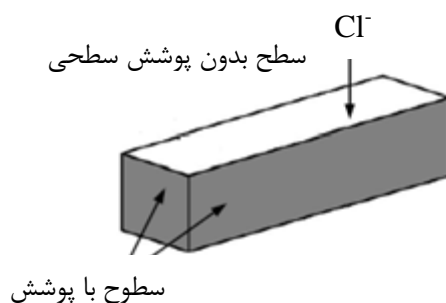
پس از پر کردن قالب‌های منشوری از میز لرزان به منظور تراکم بتن استفاده شده و به مدت ۲۴ ساعت در شرایط محیطی آزمایشگاه نگهداری شدند. پس از باز کردن قالب‌ها، آزمون‌های بتنی به مدت ۳ روز در شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب جزیره قشم عمل‌آوری مرطوب شدند.

جدول ۴- مشخصات نسبت‌های اختلاط

کد نمونه	نسبت آب به مواد سیمانی	عیار سیمان (kg/m ³)	زئولیت (kg/m ³)	مقدار آب (kg/m ³)	فوق روان کننده (kg/m ³)	اسلامپ (cm)
C2	۰/۴	۴۰۰	۰	۱۶۰	۰/۲	۷
ZE10	۰/۴	۳۶۰	۴۰	۱۶۰	۴	۶
ZE20	۰/۴	۳۲۰	۸۰	۱۶۰	۸	۸
ZE30	۰/۴	۲۸۰	۱۲۰	۱۶۰	۱۴	۶

۲-۳. قرارگیری آزمون‌ها در ناحیه‌های پاشش و جزرومد

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 ناحیههای جزرومدی و پاششی قرار داده شدند. محل قرارگیری آزمونها در ناحیه جزر و مد به گونه‌ای انتخاب شد که مجموع زمانهای غوطه‌وری آزمونها در زیر سطح آب دریا با مجموع زمانهای خشک شدن آنها در خارج از آب حدودا برابر باشد. به عبارت دیگر آزمونها در نیمی از زمان کل استقرار، مستغرق باشند (شکل ۲- الف). ارتفاع محل قرارگیری آزمونهای ناحیه پاشش بالاتر از حداکثر ارتفاع مد منطقه و به گونه‌ای 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- ب). میانگین دمای سالیانه جزیره قشم در جدول ۵ آمده است.



شکل ۲- آزمونهای منشوری در ناحیه الف) جزرومدی، ب) پاششی در جزیره قشم

جدول ۵- میانگین دمای سالیانه در جزیره قشم

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

۴-۲. تعیین میزان نفوذ یون کلرید

۴-۲-۱. عملیات پودرگیری از نمونه‌ها

پس از گذشت زمان‌های رویارویی ۳، ۹، ۲۷ و ۵۰ ماه نمونه‌های منشوری در جزیره قشم، اولین مرحله عملیات پودرگیری از نمونه‌ها 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 [۲۲]. عمق متوسط هر لایه پس از خارج کردن پودر نسبت به سطح بتن بدست می‌آید.

۴-۲-۲. 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 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 [۲۳]:

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

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 erf تابع خطا و مطابق رابطه (۳) می‌باشد. میزان یون کلرید اولیه در نمونه‌های بدون پوزولان و در نمونه‌های حاوی زئولیت برابر ۰/۱۵ 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 می آیند.

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

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

به دلیل صرف نظر کردن از ناحیه همرفت^۱ در پروفیل‌های یون کلرید، مکانیزم حاکم در نفوذ یون کلرید در بتن، پدیده انتشار خواهد بود. لذا آزمون‌های بتنی در ناحیه پاششی و جزرومدی 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 می‌باشد و با گذشت زمان کاهش می‌یابد [۲۵]. همچنین با توجه به جدول ۵ 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 ژئولیت در ناحیه‌های پاششی و جزرومدی جزیره قشم مطابق روابط ۴ تا ۹ خواهد شد.

$$D = D_{ref} f_1(t) f_2(T) f_3(h) \quad (4)$$

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].

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

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 نشان‌دهنده وابستگی ضریب انتشار یون کلرید در بتن به زمان رویارویی در محیط کلریدی می‌باشد.

$f_2(T)$ نشان‌دهنده تاثیر دمای آزمون‌ها در محیط کلریدی روی ضریب انتشار یون کلرید در بتن می‌باشد. ارتباط بین D و دما به کمک قانون ارنیوس قابل بیان است [۲۱].

$$f_2(T) = \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (6)$$

¹ Convection zone

که در آن U انرژی فعال‌سازی در فرایند انتشار بر حسب $J.mol^{-1}$ ، R ثابت گازها برابر $8.314 J.mol^{-1}.K^{-1}$ ، 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) می‌باشد. مقدار نسبت U/R در منطقه خلیج فارس برابر $2948 K$ بدست آمده است [۲۴-۲۶].
عامل تاثیر درصد رطوبت نسبی در ضریب انتشارپذیری یون کلرید در بتن می‌باشد.

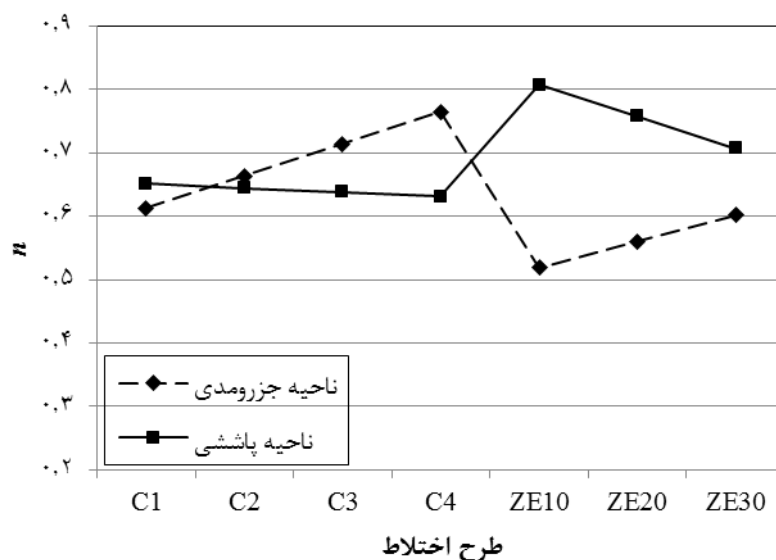
$$f_3(h) = \left[1 + \frac{(100-h)^4}{(100-h_c)^4} \right]^{-1} \quad (7)$$

که در آن h رطوبت نسبی محیط کلریدی بر حسب درصد و hc رطوبت نسبی بحرانی و برابر ۷۵٪ می‌باشد [۲۱]. هدف از این تحقیق، بررسی ضریب سن بتن و ارتباط این ضریب در ناحیه پاششی و جزرومدی در بتن حاوی زئولیت و بتن بدون پوزولان می‌باشد. ضریب سن بتن در بتن حاوی زئولیت مطابق رابطه (۸) به صورت تابع خطی از درصد پوزولان زئولیت جایگزین سیمان پرتلند و در بتن بدون پوزولان مطابق رابطه (۹) به صورت تابع خطی از نسبت آب به سیمان بدست آمده است.

$$n = a ZE/b + c \quad (8)$$

$$n = a W/C + c \quad (9)$$

که در آن ZE درصد پوزولان جایگزین سیمان پرتلند مورد استفاده در طرح مخلوط بتن ($10\% \leq ZE \leq 30\%$) ، W/C نسبت آب به سیمان ($0.35 \leq W/C \leq 0.50$) و a ، b و c ثابت [۲۱] می‌باشد. شکل ۳، ضریب سن بتن در بتن حاوی پوزولان زئولیت و بتن بدون پوزولان با نسبت‌های آب به سیمان مختلف در ناحیه جزرومدی و ناحیه پاششی جزیره قشم را نشان می‌دهد.

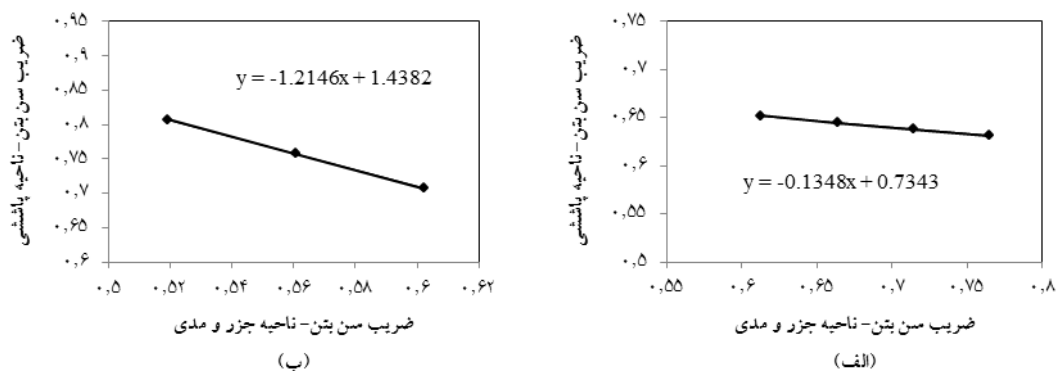


شکل ۳- ضریب سن بتن در ناحیه جزر و مدی و پاششی در آزمون‌های با نسبت‌های آب به سیمان مختلف و حاوی درصد‌های مختلف زئولیت.

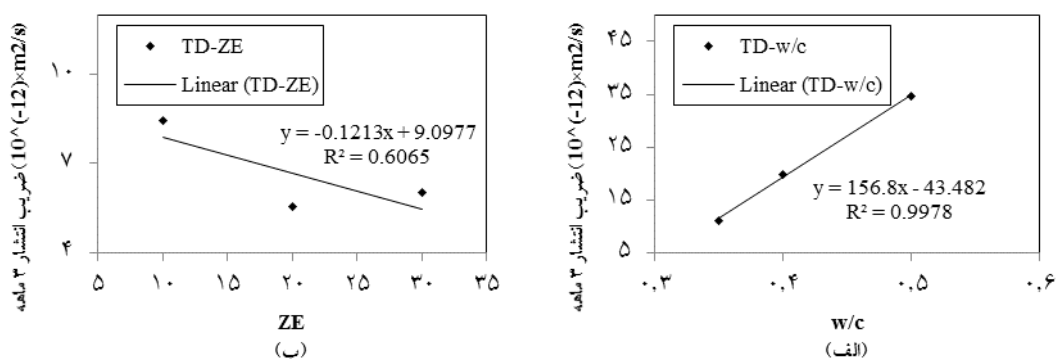
همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ضریب سن بتن با افزایش درصد ژئولیت در آزمون‌های حاوی پوزولان ژئولیت و افزایش نسبت آب به سیمان در آزمون‌های با نسبت‌های آب به سیمان مختلف در ناحیه جزرومدی با تغییرات اندکی، افزایش و در ناحیه پاششی با تغییرات اندکی، کاهش می‌یابد.

۳-۳. ارتباط بین مدل تجربی ضریب انتشار در ناحیه جزر و مدی و پاششی

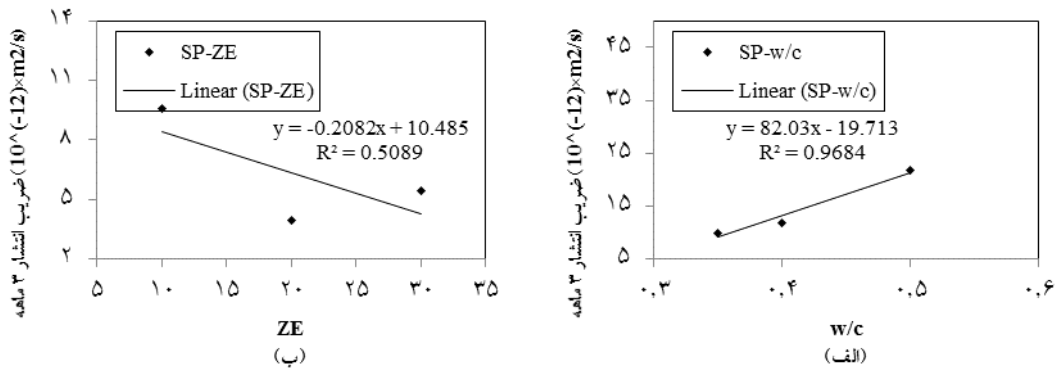
برای برقراری ارتباط بین مدل ضریب انتشار در ناحیه جزر و مدی و ناحیه پاششی، ضریب سن بتن در ناحیه پاششی تابعی خطی از ضریب سن بتن در ناحیه جزر و مدی در آزمون‌های با نسبت‌های آب به سیمان مختلف و حاوی ژئولیت در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴ رابطه خطی بین ضریب سن بتن در ناحیه پاششی و جزر و مدی را نشان می‌دهد. ولی باید توجه داشت که علاوه بر ضریب سن بتن، ضریب انتشار مرجع نیز در ناحیه جزر و مدی و پاششی متفاوت است. در شکل‌های ۵ و ۶ نیز روابط مجزایی برای ضریب انتشار مرجع (سه ماهه) در ناحیه‌های جزر و مدی و پاششی برای بتن با نسبت‌های آب به سیمان مختلف و بتن حاوی درصد‌های مختلف ژئولیت بدست آمده است که با تقریب بسیار خوبی به ضریب انتشار سه ماهه سایت قشم نزدیک است.



شکل ۴- رابطه خطی بین ضریب سن بتن در ناحیه جزر و مدی و پاششی در آزمون‌های (الف) با نسبت‌های آب به سیمان مختلف. (ب) حاوی ژئولیت.



شکل ۵- رابطه خطی ضریب انتشار سه ماهه یون کلرید در بتن در ناحیه جزر و مدی در آزمون‌های (الف) با نسبت‌های آب به سیمان مختلف. (ب) حاوی ژئولیت.



شکل ۶- رابطه خطی ضریب انتشار سه ماهه یون کلرید در بتن در ناحیه پاششی در آزمون‌های (الف) با نسبت‌های آب به سیمان مختلف. (ب) حاوی زئولیت.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدلی برای پیش‌بینی ضریب انتشار یون کلرید در بتن حاوی پوزولان زئولیت و بتن بدون پوزولان با نسبت آب به سیمان مختلف در بلندمدت در ناحیه پاششی و ناحیه جزرومدی جزیره قشم ارائه شده است. این مدل برای بتن حاوی پوزولان زئولیت در بازه ۱۰ تا ۳۰ درصد و برای بتن بدون پوزولان با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ تا ۰/۵۰ قابل استفاده می‌باشد. در این مدل تاثیر پارامترهای زمان رویارویی در محیط کلریدی، دمای بتن و درصد رطوبت نسبی در نظر گرفته شده است. همچنین، تاثیر درصد پوزولان جایگزین سیمان پرتلند و نسبت آب به سیمان در ضریب سن بتن که عدد توان در تابع زمانی معکوس در مدل ضریب انتشار می‌باشد، در نظر گرفته شده است. هدف از این تحقیق، بررسی ارتباط بین ضریب انتشار یون کلرید در بتن در ناحیه پاششی و جزرومدی می‌باشد. به این منظور، علاوه بر برقراری رابطه‌ای خطی برای ضریب سن بتن در ناحیه پاششی و ناحیه جزرومدی به صورت تابعی از درصد پوزولان زئولیت جایگزین سیمان پرتلند و نسبت آب به سیمان، برای ضریب انتشارپذیری سه ماهه یون کلرید در ناحیه پاششی و جزرومدی نیز روابطی بدست آمد. همچنین، نتایج حاکی از آن است که ضریب سن بتن با افزایش درصد زئولیت در آزمون‌های حاوی پوزولان زئولیت و افزایش نسبت آب به سیمان در آزمون‌های با نسبت‌های آب به سیمان مختلف در ناحیه جزرومدی با تغییرات اندکی، افزایش و در ناحیه پاششی با تغییرات اندکی، کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] رضایانپور، ع.ا.، پیدایش، م.، (۱۳۷۶)، "دوام بتن و نقش سیمان های پوزولانی"، نشریه شماره ۲۷۴، چاپ اول، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- [2] شکرچی‌زاده، م.، فراهانی، ع.، تدین، م.ح.، خاقانپور، 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., Choupy, 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., Chindaprasirt, 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] ولی پور، م. (۱۳۸۸). "بررسی انتشار یون کلرید بر خوردگی بتن مسلح در شرایط اقلیمی جزیره قشم با در نظر گرفتن شرایط قرارگیری و کاربرد مواد پوزولانی مختلف"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه های هیدرولیکی، شکرچی زاده، م. (استاد راهنما)، تدین، م. (استاد راهنما)، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران.
- [13]. Ahmadi, B., Shekarchi, M. (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 134-141.
- [14]. Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., Khani, S. (2013). Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study, *Construction and Building Materials*, 41, 879-888.
- [15] Mangat, P.S., Molloy, B.T., "Prediction of long term chloride concentration in concrete", *Materials and Structures*, 27, 338-346, 1994.
- [16] Ehlen, M.A., "Life-365TM Service Life Prediction ModelTM and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides", *Manual of Life-365TM Version 2.1 January 7, 2012, Produced by the Life-365TM Consortium II.*
- [17]. Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*, Oxford University Press, second edition.
- [۱۸] عزیزی مقدم، ب. (۱۳۸۴). "بررسی اثر زمان بر آهنگ نفوذ یون کلر در بتن با توجه به شرایط قرارگیری و پوشش سطحی"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه های دریایی، قالیبافیان، م. (استاد راهنما)، شکرچی زاده، م. (مشاور اول)، تدین، م. (مشاور دوم)، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران.
- [19]. Fib Task Group 5.6, (2006). *Model Code for Service Life Design*, fib Bulletin No. 34, Lausanne, Switzerland.
- [20] 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.
- [۲۱] فراهانی، ع. (۱۳۹۳). "بررسی کارایی مدل های عددی برای مطالعه انتشار یون کلرید در سازه های بتنی در منطقه خلیج فارس"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه، شکرچی زاده، م. (استاد راهنما)، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران.
- [22] NordTest NT Build 443, "Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration" ESPOO, Finland, 1995.
- [23] Luping, T., "Chloride transport in concrete, measurement and prediction", Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, publication P-96:6, 1996, Goteborg, Sweden.
- [24] 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", 2nd report, NO. CMI 8309144: Construction Materials Institute at the University of Tehran, Iran, 2004.
- [25] 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.
- [26] Ghods, P., Alizadeh, R., Chini, M., Hoseini, M., Ghalibafian, M., Shekarchi, M., "Durability-based design in the Persian Gulf", *Concrete International*, 50-55, 2007.