

316D-3

بررسی اثر چرخه‌های جذر و مد بر نفوذ یون کلراید در بتن

- ۱- اکبر صفری، دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین
- ۲- محمد شکرچی‌زاده، سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران
- ۳- مهدی نعمتی چاری، دانشجوی دکتری سازه در دانشگاه تهران

Email: chari@ut.ac.ir

چکیده

یکی از عوامل گزندبارتر بودن شرایط جزر و مدی نسبت به شرایط مستغرق در حاشیه خلیج فارس، نفوذ بیشتر یون کلراید در بتن و متعاقباً افزایش غلظت کلراید در مجاورت میلگردهاست. از اینرو در این مقاله سعی شد تا میزان نفوذ کلراید در شرایط جزر و مدی و شرایط مستغرق با استفاده از مدل‌سازی عددی با هم مقایسه شود. همچنین تأثیر تعداد چرخه‌های جذر و مد روزانه، بر روند نفوذ یون کلراید در بتن بررسی شود. نتایج این مطالعه، نشان داد که میزان نفوذ یون کلراید در بتن در شرایط جزر و مدی به مراتب بیشتر از شرایط مستغرق در مدت مشابه است. همچنین نتایج نشان داد که افزایش تعداد چرخه‌های جزر و مد تا سه بار در شبانه‌روز، اثر قابل ملاحظه‌ای در افزایش میزان نفوذ یون کلراید در بتن دارد.

واژه‌های کلیدی: جزر و مد، مدل‌سازی، نفوذ یون کلراید

۱- مقدمه

در طراحی سازه‌های بتنی، در نظر گرفتن عوامل مخربی که بتن باید در مدت بهره‌برداری در معرض آن قرار گیرد، ضروری است [۱]. شرایط رویارویی یک سازه بتنی در محیط دریایی، نقش بسزایی در نفوذ کلراید ایفا می‌نماید [۲]. به همین دلیل، میزان آسیب‌پذیری یک سازه بتنی واقع در ساحل دریا، وابستگی زیادی به محل قرارگیری بتن نسبت به تراز آب دریا دارد. با توجه به شرایط قرارگیری المان‌های سازه‌ای نسبت به تراز آب دریا، پنج ناحیه مجاورت تعریف شده است که عبارتند از پاششی، جزر و مدی، مستغرق، مدفون در خاک و اتمسفری [۳-۴]. در هر یک از این نواحی، مکانیزم نفوذ کلراید در بتن متفاوت است و تحت تأثیر شرایط محیطی از جمله رطوبت، دما، باد و همچنین تابش نور خورشید قرار دارد [۵].

جزر و مد، پایین و بالا رفتن آب دریا طبق یک زمان‌بندی معین، غالباً دو مرتبه در روز، می‌باشد که علت آن نیروی جاذبه ماه و کشیدن آب نزدیک به آن به طرف خود است. در هر منطقه دریایی، زمان بین دو مد متوالی در بالاترین نقطه آن، ۱۲ ساعت و ۲۵ دقیقه و فاصله بین یک مد و جزر متوالی ۶ ساعت و ۱۳ دقیقه می‌باشد. در اثر جزر و مد، بخشی از سازه که بین تراز جزر و مد قرار دارد، چندین بار در روز در معرض تر و خشک شدن، گرم و سرد شدن (به علت تفاوت بین دمای هوا و آب دریا) و در مناطق سردسیر، یخ زدن و آب شدن یخ قرار می‌گیرد. اختلاف تراز جزر و مد از ۰/۵ تا ۱۵ متر در مناطق مختلف، متغیر است. اندازه، عمق و بازشدگی یک دریا، تأثیر قابل توجهی روی تراز جزر و مد دارد [۶].

در ناحیه جزر و مدی بطور همزمان یون‌های مختلف منجمله یون کلراید با ساز و کار انتشار در عمق بتن حرکت کرده و اثر همزمان انتشار و مکش موئینه، مکانیزم ترکیبی حرکت یون‌ها به داخل بتن را به وجود می‌آورد. در بتن‌های در معرض محیط‌های دریایی، نفوذ یون کلراید می‌تواند تاسه برابر بیشتر از سازه‌های معمولی باشد [۷]. زیرا مقادیر زیادی از آب حاوی یون کلراید در هنگام تر شدن بتن به داخل آن مکیده شده و هنگامیکه بتن در معرض هوای محیط قرار می‌گیرد، رطوبت سطح آن خشک می‌شود و مقدار زیادی از یون‌های کلراید روی سطح بتن به جای می‌ماند. تکرار فرایند تر و خشک شدن بتن، غلظت کلراید در محیط داخلی بتن را افزایش می‌دهد، تا حدی که ممکن است غلظت یون کلراید در منافذ بتن از غلظت یون کلراید آب دریا بیشتر شود [۸].

خرابی سازه‌های بتنی در خلیج فارس رو به افزایش است که عمدتاً به دلیل خوردگی میلگرد درون بتن ناشی از کلراید است. میانگین دمای بیش از ۳۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی بین ۷۰ تا ۹۰ درصد در حاشیه خلیج فارس، آنرا به یکی از مهاجم‌ترین محیط‌های دریایی تبدیل نموده است [۹]. در نتیجه لازم است در این مناطق تدابیر ویژه‌ای در نظر گرفته شود تا بتوان از خوردگی محتمل میلگردهای مدفون در بتن و متعاقباً آسیب‌دیدگی سازه‌های بتنی جلوگیری نمود.

یکی از راهکارهای کاهش خطر آسیب‌دیدگی سازه‌های بتنی در مجاورت سواحل، محاسبات دقیق‌تر فرایند نفوذ یون کلراید در بتن و پیش‌بینی پروفیل یون کلراید در بتن تحت تأثیر عوامل مختلف منجمله چرخه‌های جزر و مد است. از اینرو در این مقاله سعی شده است تا با در نظر گرفتن اثر تغییرات دما و رطوبت در فرایند نفوذ یون کلراید در بتن، همچنین چرخه‌های جزر و مد، پروفیل یون کلراید در بتن پیش‌بینی شود. بدین منظور یک مدل عددی با استفاده از نرم افزار MATLAB تهیه شده و نتایج حاصل از مدل، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۲- مکانیسم انتقال یون کلراید در شرایط جزر و مدی

در اکثر سازه‌های مورد مطالعه، اغلب مکانیسم عمده ورود یون کلراید در بتن، انتشار و مکش موئینه است [۱۰-۱۱]. مکانیسم غالب ورود یون‌ها در دوره‌های کوتاه رویارویی (چندساعت)، 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 می‌شود [۱۲]. در ادامه روابط حاکم بر شار انتقال رطوبت و کلراید در بتن ارائه خواهد شد.

۲-۱- شار انتقال رطوبت

جذب سطحی (موئینی) در نتیجه انتقال موئینه در منافذ بتن ناشی از کشش سطحی بین آب و ساختار متخلخل بتن می‌باشد [۱۳-۱۴]. آب ابتدا روی سطح منافذ موئینه جذب می‌شود و سپس زمانیکه رطوبت نسبی افزایش می‌یابد، آب تقطیر شده و منافذ را پر می‌کند و شروع به حرکت از منافذ کوچکتر به منافذ بزرگتر می‌نماید [۱۵].

مدل‌های متعددی تاکنون برای پیش‌بینی توزیع رطوبت در بتن ارائه شده‌اند [۱۶-۲۰]، اما به دلیل اینکه یون‌های مهاجم در بتن به همراه فاز مایع (آب) جابجا می‌شوند، توصیه شده است که در مدلسازی انتقال یون‌ها در بتن در اثر پدیده همرفت رطوبتی، توزیع رطوبت با استفاده از آب منفذی بررسی شود [۲۱-۲۳]. بنابراین، بیشتر محققان [۲۴-۳۵] سعی کردند تا توزیع رطوبت در بتن را چه در شرایط تر شدن و چه در حالت خشک شدن با توجه به درجه اشباع آب، w (بخشی از فضاهای خالی که با آب پر می‌شوند)، پیش‌بینی نمایند. با استفاده از پارامتر w برای شرایط هم‌دما، تعریف ساده شار کل رطوبت (J_m) برای هم بخار و هم مایع می‌تواند با معادله زیر بیان گردد [۳۶]، طوری‌که:

$$J_m = -D_w \nabla w \quad (1)$$

که D_w ، ضریب معادل انتقال کل رطوبت بر حسب m^2/s در حالت مایع می‌باشد.

۲-۲- شار انتقال کلراید

۱-۲-۲- تقید کلراید

کل یون‌های کلرایدی که در داخل بتن وجود دارند و یا به داخل آن نفوذ می‌کنند به صورت آزاد باقی نخواهند ماند. برخی از آنها با محصولات حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و به شکل نمک فریدل در می‌آیند و برخی از یون‌های کلراید به طور فیزیکی جذب هیدرات‌های مختلف سیمان می‌شوند؛ به عبارت دیگر قسمتی از یون‌های کلراید به صورت کلراید مقید در آمده و فقط بخشی از یون‌های کلراید به صورت آزاد باقی می‌ماند [۳۲،۳۳]. در حقیقت بخش آزاد کلراید است که مسئول تخریب بتن در ساختمان‌های بتن‌آرمه می‌باشد. در عمل تقید کلراید می‌تواند به عنوان عاملی برای جلوگیری و یا به تأخیر انداختن خوردگی با کاهش غلظت یون‌های کلراید در محلول منفذی عمل نماید [۸،۳۴]. رابطه کلراید آزاد و کلراید مقید را می‌توان مطابق رابطه (۲) نوشت [۳۵]:

$$C_t = w_e C_f + C_b \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial C_f}{\partial C_t} = \frac{1}{w_e + \left(\frac{\partial C_b}{\partial C_f}\right)} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $\frac{\partial C_b}{\partial C_f}$ به نام ایزوترم تقید کلراید شناخته می‌شود که از طریق آزمایشگاهی (تجربی) بدست می‌آید [۳۶]. یکی از ایزوترم‌های تقید، ایزوترم لانگمیر بوده که طبق رابطه زیر بیان می‌شود [۳۷]:

$$C_b = \frac{\alpha C_f}{1 + \beta C_f} \quad (3)$$

در رابطه فوق، α و β ثابت‌هایی هستند که با توجه به ترکیب سیمان و مواد پوزولانی و نسبت آنها، تغییر می‌کنند. سرچی و همکارانش [۳۸] مقادیر α و β را به ترتیب $1/67$ و $4/08$ برای خمیر سیمان پرتلند معمولی با $w/c = 0/5$ بدست آوردند و C_b بر حسب mol/L و $mmol/g$ سیمان بیان می‌شوند.

۲-۲-۲- انتشار و همرفت کلراید

پدیده انتشار کلراید در آب آزاد بصورت ریاضی می‌تواند بوسیله قانون فیک و طبق رابطه زیر بیان می‌شود [۳۹].

$$J_c^{dif} = -w_e D_c \nabla C_f \quad (4)$$

که J_c^{dif} ، شار یون کلر در اثر پدیده انتشار (بر حسب kg/m^2s بتن) و D_c ، ضریب انتشار بر حسب m^2/s و w_e ، مقدار آب قابل تبخیر (بر حسب m^3 آب قابل تبخیر بر m^3 بتن) است. همچنین C_f ، مقدار کلراید آزاد بر حسب kg/m^3 محلول منفذی است. علامت منفی، بیانگر نفوذ در جهت مخالف افزایش غلظت یون کلراید می‌باشد. از طرفی زمانیکه مکانیسم انتقال کلراید، جریان رطوبت در منافذ بتن باشد، شار کلراید می‌تواند طبق رابطه (۵) نوشته شود:

$$J_c^{adv} = u C_f \quad (5)$$

که J_c^{adv} ، شار یون کلراید در اثر پدیده همرفت (بر حسب kg/m^2s بتن) و u ، سرعت متوسط انتقال رطوبت در بتن بر حسب m/s است. در حقیقت u در هر نقطه از بتن، مطابق رابطه (۶) قابل محاسبه می‌باشد:

$$u = -w_e^{tot} D_w \nabla w \quad (6)$$

که w و w_e^{tot} به ترتیب درجه اشباع منافذ بتن در هر نقطه و کل آب قابل تبخیر در منافذ بتن اشباع شده می‌باشد.

۳-۲-۲- معادله دیفرانسیل حاکم بر انتقال کلراید

بطور کلی در ترکیب دو پدیده انتشار و همرفت، تغییر غلظت در حجم بتن می‌تواند با قانون دوم فیک به صورت رابطه زیر بیان شود [۳۴،۳۵،۴۰]:

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = -\nabla \cdot J_c = -\nabla \cdot (J_c^{dif} + J_c^{adv}) \quad (7)$$

که C_t ، غلظت کلراید کل بر حسب kg/m^3 بتن، J_c ، شار کلراید بر حسب kg/m^2s و t ، زمان بر حسب ثانیه است. با توجه به اینکه طرف چپ معادله بر حسب کلراید کل و طرف راست معادله بر حسب کلراید آزاد می‌باشد، برای یکسان کردن دو طرف معادله می‌توان ارتباط غلظت کلراید کل (C_t) با غلظت کلراید آزاد (C_f) و غلظت کلراید مقید (C_b) را طبق رابطه (۸) بیان نمود [۳۶]، در نتیجه:

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{\partial C_t}{\partial C_f} \frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial C_f} (C_b + w_e C_f) \frac{\partial C_f}{\partial t} = \left(\frac{\partial C_b}{\partial C_f} + w_e \right) \frac{\partial C_f}{\partial t} \quad (8)$$

با جایگزینی رابطه‌های (۴)، (۵) و (۸) در رابطه (۷) داریم:

$$\left(\frac{1}{w_e^{tot}} \frac{\partial C_b}{\partial C_f} + w \right) \frac{\partial C_f}{\partial t} = \nabla \cdot (w D_c \nabla C_f + D_w \nabla w C_f) \quad (9)$$

۳-۲- 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 عمل‌آوری مرطوب، شرایط رویارویی و مدت رویارویی بستگی دارد [۴۰-۴۳]. 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 [۱۰، ۴۴-۴۶] و در حالت خشک شدن [۱۴، ۱۸، ۲۳، ۲۴، ۲۹، ۴۷-۴۹] پیشنهاد شده است که در بین آنها، رابطه (۱۰) و رابطه (۱۱) به ترتیب برای حالت تر شدن و حالت خشک شدن، بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

$$D_w = D_w^d e^{-\beta w} \quad (10)$$

$$D_w = D_w^s \left[\alpha + \frac{1-\alpha}{1 + \left(\frac{1-w}{1-w_{cr}} \right)^N} \right] \quad (11)$$

که در آنها، D_w^d و D_w^s به ترتیب، ضریب انتقال رطوبت خشک در حالت تر شدگی و ضریب انتقال رطوبت اشباع در حالت خشک شدگی است. β ، ضریب حساسیت است که شدت کاهش D_w را با توجه به افزایش w نشان می‌دهد. مقادیر D_w^d ، β و D_w^s برای بتن‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ تا ۰/۵۵، مطابق جدول ۱ ارائه شده است [۵۰]. همچنین ونگ ضرایب α ، w_{cr} و N را به ترتیب برابر ۰/۰۵، ۰/۷۹۲ و ۶ بین نمود [۵۱].

جدول ۱- پارامترهای مربوط به روابط (۱۰) و (۱۱) (در دمای $23^\circ C$) [۵۰]

نسبت آب به سیمان	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۵۵
$D_w^d \times 10^{-8} (m^2/s)$	۳/۸	۳/۶	۳/۴	۳/۰
β	۲/۸	۲/۱	۱/۵	۱/۱
$D_w^s \times 10^{-10} (m^2/s)$	۲/۲	۲/۶	۲/۸	۳/۳

۴-۲- ضریب انتشار کلراید

دانستن ضریب انتشار کلراید خمیر سیمان سخت شده به منظور پیش بینی زمان آغاز خوردگی، مهم است [۵۲]. بعضی از محققین روابطی را برای ضریب انتشار کلراید بر اساس روش های عددی و تجربی متفاوت و با توجه به عوامل مختلف تأثیرگذار روی آن، پیشنهاد کرده اند [۵۳-۵۴]. طبق پیشنهاد کمیته *Life-365* انجمن بتن آمریکا [۵۵]، ضریب انتشار یون کلراید برای بتن ۲۸ روزه می تواند از رابطه (۱۲) بدست آید:

$$D_{ref,28} = 10^{-12.06+2.4\frac{w}{c}} \left(\frac{m^2}{s}\right) \quad (12)$$

لازم به ذکر است که بطور کلی، سه نوع از عوامل وجود دارند که روی ضریب انتشار کلراید در بتن اثر می گذارند [۵۶]. مورد اول، عاملی است که ساختار منافذ بتن را تحت تأثیر قرار می دهد مانند نسبت آب به مواد سیمانی، افزودنی های معدنی (مانند دوده سیلیس، خاکستر بادی و سرباره کوره آهن گدازی) و افزودنی های شیمیایی (مانند کاهنده های آب، حبابسازها و منبسط کننده ها). مورد دوم، عاملی است که رشد ساختار منافذ بتن را تحت تأثیر قرار می دهد مانند شرایط عمل آوری، سن و واکنش پذیری مواد سیمانی. مورد سوم شرایط تراوایی مانند گرادیان هیدرولیکی، زمان نفوذ و مؤلفه شیمی محیط نفوذ می باشد. با توجه به کلیه مطالعات انجام شده و عوامل تأثیرگذار روی ضریب انتشار یون کلراید، می توان رابطه زیر را برای اصلاح ضریب انتشار کلراید ارائه نمود [۱۶، ۱۷]:

$$D_{Cl} = D_{ref} \left(\frac{w}{c}, 28\right) \cdot F_1^{Cl}(t_e) \cdot F_2^{Cl}(w) \cdot F_3^{Cl}(C_{Cl}) \cdot F_4^{Cl}(T) \quad (13)$$

که در آن، ضریب D_{ref} به عنوان ضریب مرجع انتشار کلراید تعریف می شود که اثر نسبت w/c و زمان عمل آوری بتن ($t_e=28$) را محاسبه می نماید. سایر ضرایب اصلاحی نیز به شرح زیر می باشد:

$$F_1^{Cl}(t) = \left(\frac{28}{t}\right)^m \quad (14)$$

$$F_2^{Cl}(w) = \left[1 + \left(\frac{1-w}{1-w_c}\right)^4\right]^{-1} \quad (15)$$

$$F_3^{Cl}(C_{Cl}) = [1 - k_{ion}(C_f)]^m \quad (16)$$

$$F_4^{Cl}(T) = e^{\left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad (17)$$

که $F_1^{Cl}(t)$ ، $F_2^{Cl}(w)$ و $F_3^{Cl}(C_{Cl})$ و $F_4^{Cl}(T)$ به ترتیب ضرایب اصلاحی مربوط به سن بتن، درصد اشباع منافذ بتن، غلظت کلراید در محلول منفذی بتن و دمای بتن می باشد. همچنین m ، فاکتور سن و مقدار آن برای بتن با سیمان پرتلند معمولی، 0.7 است [۵۷، ۵۸]. w_c ، w ، درجه اشباع منافذ و w_c ، درجه اشباعی است که ضریب انتشار کلراید در آن، نصف ضریب انتشار در شرایط اشباع می باشد ($w_c=0.75$) [۱۷]. ضمناً ثابت های k_{ion} و m توسط زی [۳۶] کالیبره شده و مقدار آن $k_{ion} = 8/333$ و $m = 0.5$ پیشنهاد شده است، زمانیکه C_f نسبت به وزن بتن بیان شود. انرژی فعال شدگی فرآیند انتشار کلراید، R ثابت گازها، T_{ref} دمای مرجعی که در آن D_{ref} محاسبه شده است (برحسب کلوین) و T دمای بتن (کلوین) می باشد [۱۷].

۲-۵- شرایط مرزی انتقال رطوبت

زمانیکه بتن در معرض اتمسفر قرار دارد، اختلاف رطوبت بین سطح و ریزاقلیم آن باعث تبادل رطوبت در سطح مشترک آنها می شود. اگر رطوبت اتمسفر از رطوبت تعادل سطح بتن، کمتر باشد، آب مایع در منافذ سطحی به سمت اتمسفر تبخیر خواهد شد و بنابراین موجب افزایش مکش مویینه و یک جریان داری به سمت سطح می شود [۵۹]. اگر رطوبت اتمسفر، بیشتر باشد، فرایند معکوس رخ می دهد. موقعیکه بتن اشباع نشده در معرض آب مایع قرار می گیرد، فشار مویینه در منافذ سطحی به صفر رسیده و موجب گرادیان فشار مویینه قابل توجه در سطح بتن و متعاقباً یک جریان داری شدید به داخل بتن می شود [۱۱]. بنابراین شرایط مرزی رطوبت می تواند طبق رابطه ۱۸ نوشته شود.

$$w(x=0, t>0) = w_s(t) = \begin{cases} w_{env} & \text{خشک شدن} \\ 1.0 & \text{تر شدن} \end{cases} \quad (18)$$

برای انتقال رطوبت، شار جرم سطحی در رابطه زیر داده شده است [۱۷،۶۰]:

$$J_m^n = -D_w \left(\frac{\partial w}{\partial n} \right)_s = B_w (w_{sur} - w_{env}) \quad (19)$$

که J_m^n ، نرمال شار رطوبت بر سطح بتن و B_w ، ضریب انتقال رطوبت سطحی (m/s) است [۱۷،۴۸]. همچنین w_{sur} و w_{env} ، به ترتیب مقدار w در سطح بتن و w معادل رطوبت محیط بیرونی بتن می‌باشند. زمانیکه سطح بتن در معرض ترشدگی قرار می‌گیرد، w_{env} برابر یک و زمانیکه در معرض خشک‌شدگی قرار می‌گیرد، برابر معادل رطوبت نسبی محیط با توجه به رابطه ایزوترم واجذب می‌باشد. ایزوترم واجذب هم‌دمای مصالح سیمانی، به صورت تجربی از ارزیابی مقدار رطوبت موجود در مصالحی که با رطوبت‌های نسبی مختلف در محیط اطراف در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به تعادل رسیده‌اند، بدست می‌آید [۶۱]. برای هر مقدار رطوبت نسبی محیط، یک ایزوترم واجذب، بیانگر مقدار رطوبت در دمای معین است. متعارف‌ترین معادله ایزوترم واجذب، رابطه BET^1 است [۶۲]. البته رابطه بین رطوبت نسبی و مقدار رطوبت در منافذ بتن پیچیده و غیر خطی است و می‌تواند طبق رابطه زیر نوشته شود.

$$w_{en} = \frac{(1-k)[1+(C-1)k]h_{env}}{(1-kh)[1+(C-1)kh_{env}]} \quad (20)$$

که C ، پارامتر جذب بخار آب مدل BET ؛ k ، پارامتر مدل BET ؛ V ، مقدار بخار لازم برای تک‌لایه (ظرفیت تک‌لایه‌ای) و w_{en} ، مقدار آب در خمیر سیمان معادل بر حسب gr/gr است. لازم به ذکر است که پارامتر C ، جذب بخار آب کل، جذب پنهان بخار آب و دما را مد نظر قرار می‌دهد. این پارامترهای، طبق روابط (۲۱) تا (۲۴) محاسبه می‌شوند.

$$n = \left(2.5 + \frac{15}{t_e} \right) (0.33 + 2.2w/cm) \text{ if } t_e > 5 \text{ days and } 0.3 < w/cm < 0.6 \quad (21)$$

$$C = e^{\frac{855}{T}} \quad (22)$$

$$k = \frac{(1-\frac{1}{n})C-1}{C-1} \quad 0 < k < 1 \quad (23)$$

که در آنها، T و t_e به ترتیب رطوبت نسبی محیط، دمای بتن ($^{\circ}K$) و سن هیدراتاسیون معادل (روز) می‌باشد. B_w می‌تواند با استفاده از ضخامت معادل (t_e) بتن در مجاورت سطح واقعی در معرض و D_w بتن تعیین شود؛ طوریکه $B_w = D_w/t_e$ با مقایسه نتایج تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی، بزانت [۶۳] گزارش کرد که مقدار ضخامت معادل محیطی، ۰/۷۵ میلی‌متر است.

همچنین با توجه به اینکه در شرایط اتمسفری، رطوبت نسبی محیط (هوا) در حال نوسان می‌باشد، روابط (۲۴) و (۲۵) [۳۴] که یک تابع سینوسی است، می‌تواند برای مدلسازی رطوبت و دمای هوا در نظر گرفته شود.

$$T_{env} = \frac{T_{max}+T_{min}}{2} + \frac{T_{max}-T_{min}}{2} \sin \left(2\pi \frac{(t+t_0)}{365} \right) \quad (24)$$

$$h_{env} = \frac{h_{max}+h_{min}}{2} + \frac{h_{max}-h_{min}}{2} \sin \left(2\pi \frac{(t+t_0)}{365} \right) \quad (25)$$

که T_{min} ، T_{max} ، h_{min} و h_{max} به ترتیب دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی حداقل و رطوبت نسبی حداکثر محیط اطراف المان بتنی می‌باشند.

¹Brunauer-Emmett-Teller

۲-۶- شرایط مرزی انتقال کلراید

و همکارانش [۶۴] بصورتی دیگر شرایط مرزی برای شار تعریف شده انتقال کلراید را طبق رابطه زیر بیان نمودند:

$$J_{Cl}^s = B_{Cl}(C_{env} - C_s) + \bar{u}c_0 = B_{Cl}(C_{env} - C_s) + B_w C_{env}(w_{env} - w_s) \quad (26)$$

که J_{Cl}^s ، شار سطحی کلراید بر حسب m/s است. آکیتا [۶۵]، مقادیر B_{Cl} را در محدود $2/43$ تا $7m/s - 4/17 \times 10^{-7}$ اعلام کرد.

۲-۷- انتشار دما

برای محاسبه تأثیر حرارت در مود انتقال یونهای کلراید و رطوبت در بتن، توزیع حرارت درون بتن باید تعیین شود. شار حرارتی در بتن تحت اثر گرادیان دما توسط قانون هدایت حرارتی فوری که به صورت زیر است، بدست می‌آید:

$$q = -\lambda \nabla T \quad (27)$$

که q شار هدایت گرمایی (W/m^2)، λ ضریب هدایت حرارتی ($W/m.C$) و T دمای بتن (C) می‌باشد. علامت منفی در معادله فوق، نشان‌دهنده آن است که حرارت در مسیر کاهش دما انتقال می‌یابد. البته هدایت گرمایی در بتن به آرامی با مقدار آب افزایش می‌یابد و تحت تأثیر دما، تغییراتش کم است و می‌توان آنرا ثابت فرض کرد [۴۲]. مقادیر معمول هدایت گرمایی برای بتن اشباع بین $1/4$ و $3/6 W/m.C$ می‌باشد [۶۶] پروفیل دما در بتن با اعمال الزامات بقای انرژی تعیین می‌شود، یعنی:

$$\rho_c c_q \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) \rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(D_t \nabla T) \quad (28)$$

که ρ_c چگالی بتن (kg/m^3)، c_q ظرفیت گرمایی ویژه (J/kgC) است.

برای ساده‌سازی، فرض می‌شود که چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه بتن با تغییر در مقدار رطوبت و دما ثابت باقی می‌مانند [۱۷]. محدوده رایج برای مقدار ظرفیت گرمایی ویژه برای بتن معمولی بین 840 و $1170 J/kg.C$ می‌باشد [۶۶].

۲-۷-۱- شرایط مرزی انتقال دما

حل معادله (۲۸) بستگی به سطح دمای موجود در مرزهای عضو بتن مسلح دارد. انتقال دما در سطح بتن از معادله زیر بدست می‌آید:

$$J_h^s = B_T(T - T_{en}) \quad (29)$$

که J_h^s شار سطحی دما بر حسب m/s است. بزانت و تانگوتای بعد از اینکه نتایجشان را با داده‌های آزمایشگاهی تطبیق دادند، B_T را $0.07 W/m^2.C$ بیان کردند.

۳- مدلسازی انتقال کلراید در شرایط جزر و مدی و تعریف مسأله

۳-۱- روش اجزاء محدود

در روش اجزاء محدود، غلظت یون کلراید در یک جسم بی‌نهایت کوچک، بوسیله یک تابع شکل و غلظت کلراید نقطه‌ای بیان می‌شود [۶۵]. همچنین با استفاده از روش اجزاء محدود، سری معادلات دیفرانسیل غیرخطی درگیر به معادلات قابل حل تبدیل می‌شود [۶۷]. برای این منظور، ابتدا با حل معادله انتشار - همرفت کلراید و استفاده از روش باقیمانده وزنی گالرکین و قضایای گرین و دیورژانس به ماتریس‌های ظرفیت و سختی و نیرویی می‌رسیم و در این مرحله با گسسته‌سازی این معادله هم در زمان و هم در مکان به فرم زیر می‌رسیم که با حل این معادله در هر بازه زمانی به مقادیر متغیر اصلی $\{\phi_i^{n+1}\}_{n \times 1}$ مسأله خواهیم رسید.

$$[[I] + \theta \cdot \Delta t \cdot [C^{n+1}]^{-1} [K^{n+1}]] \{\phi_i^{n+1}\} = [[I] - (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot [C^n]^{-1} [K^n]] \{\phi_i^n\} + \quad (30)$$

$$[\theta \cdot \Delta t \cdot [C^{n+1}]^{-1} \{F_t^{n+1}\}] + [(1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot [C^n]^{-1} \{F_t^n\}]$$

$$[A]_{n \times n} \{\phi_i^{n+1}\}_{n \times 1} = \{b\}_{n \times 1} \quad (31)$$

که در آن $\Delta t, C, K, F$ و θ به ترتیب بازه زمانی، ماتریس ظرفیت، ماتریس سختی، بردار نیرویی و پارامتر تعیین کننده روش حل است. در روش ضمنی، $\theta = 1$ است که با استفاده از این روش جواب‌های پایدار بدست می‌آید.

همچنین در روش اجزاء محدود با تقسیم المان اصلی به المان‌های کوچکتر، پارامترهای مورد نیاز همچون مقدار دما، رطوبت و غلظت کلراید در هر یک از این گره‌های این المان‌های کوچک بدست می‌آید. برای تعیین مقادیر دما، رطوبت و کلراید در المان بتنی، الگوریتم شکل ۱ مد نظر قرار گرفته است. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، با اختصاص مشخصات مصالح و ابعاد المان بتنی و در نهایت انجام فرایند تحلیل، مقادیر پارامترهای مورد نظر بدست می‌آیند.

۳-۲- مدل‌سازی

به منظور آنالیز توزیع یون کلراید در بتن، لازم است که تاریخچه دمایی و رطوبتی آن تعیین گردد. بدین منظور، مدل مورد نظر در این تحقیق، در هر بازه زمانی ابتدا توزیع دما، سپس توزیع رطوبت و در نهایت توزیع کلراید در بتن را محاسبه می‌نماید و از مقادیر بدست آمده در این بازه زمانی به عنوان مقادیر اولیه در بازه زمانی بعدی استفاده می‌نماید؛ این روند تا پایان آنالیز ادامه خواهد داشت. لازم به ذکر است که در هر گام زمانی آنالیز، ضرایب مدل مانند ضرایب D و B با توجه به تاریخچه دمایی، رطوبت و کلراید محاسبه شده و به هر المان اختصاص می‌یابد تا اثر تغییر این پارامترها روی نتایج مدل در نظر گرفته شود.

۳-۳- تعریف مسأله

۳-۳-۱- مشخصات بتن

در این تحقیق، سه نسبت آب به سیمان ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰ با عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات بتن در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات بتن برای تخمین مقدار نفوذ یون کلراید در بتن

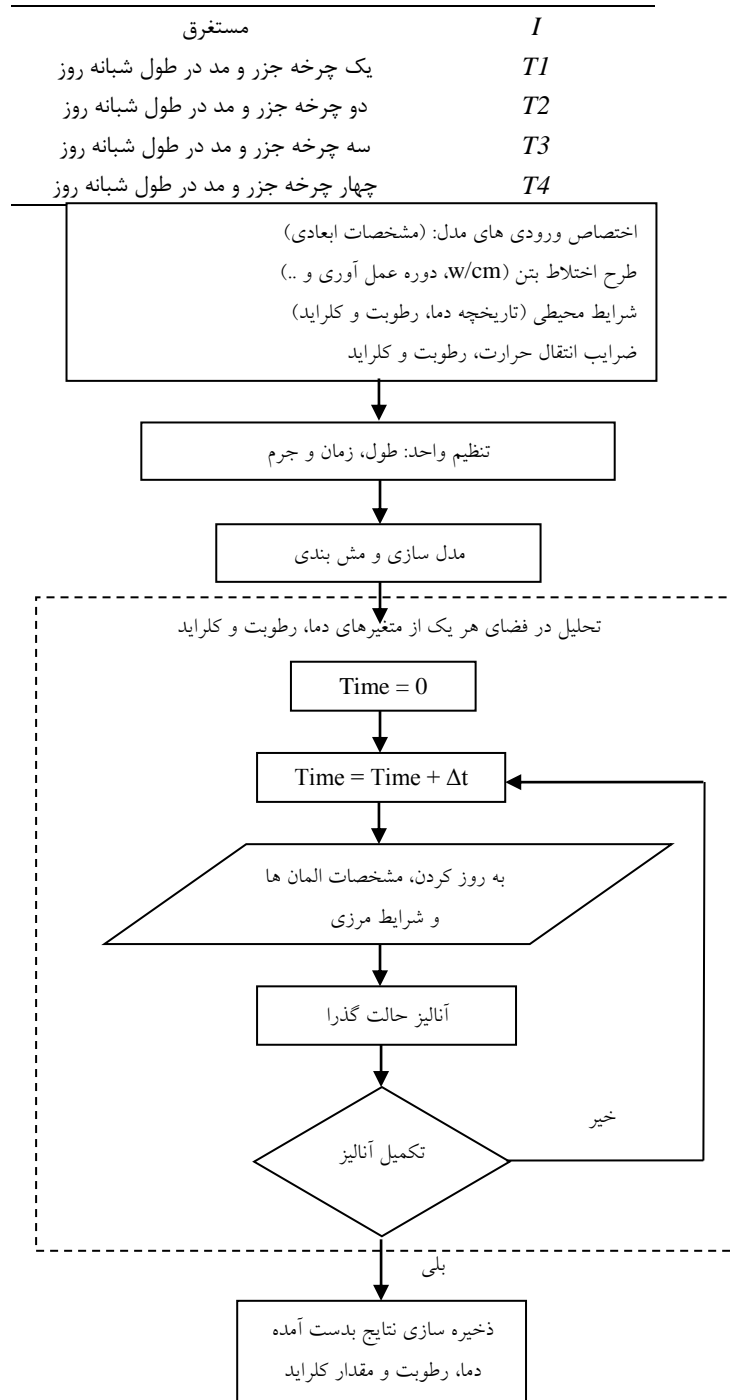
شماره نمونه	عیار سیمان	نسبت آب به سیمان
۱	۴۰۰	۰/۴
۲	۴۰۰	۰/۴۵
۳	۴۰۰	۰/۵

۳-۳-۲- شرایط رویارویی

در این مطالعه فرض شد بتن با مشخصات جدول شماره ۲، پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در معرض آب حاوی یون کلراید با غلظت ۲/۱۵ درصد وزنی و به مدت ۵ و ۱۰ سال قرار گرفته است. شرایط رویارویی در دو حالت مستغرق و جزر و مدی با یک، دو، سه و چهار چرخه کامل جزر و مد در شبانه‌روز طبق جدول شماره ۳، مد نظر قرار گرفته است. میزان یون کلراید نفوذ کرده تا عمق ۵۵ میلیمتری بتن پس از پنج و ده سال با استفاده از مدل عددی ارائه شده، مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین لازم به ذکر است که دمای محیط رویارویی (آب نمک و هوای پیرامون) با توجه به رابطه (۲۴) و رطوبت نسبی محیط رویارویی (هوای پیرامون)، با توجه به رابطه (۲۵) محاسبه و منظور می‌شود.

جدول ۳- شرایط رویارویی

مشخصه شرایط رویارویی	شرایط رویارویی
----------------------	----------------



شکل ۱- الگوریتم مدل اجزاء محدود در فضای تحلیل دما، رطوبت و کلراید

۳-۲- پارامترهای مدل

در این مقاله آنالیزها روی یک نمونه یک بعدی بطول ۷۵ میلی متر صورت می گیرد که المان های آن در نزدیکی سطح مشترک بین بتن و آب کوچک هستند و هر چه از این سطح به سمت داخل بتن پیش می رویم، المانها بزرگتر می شوند. کوچک اختیار کردن المانها در نزدیکی سطح مشترک به این دلیل است که تغییرات همزمان دما و رطوبت و کلراید در این ناحیه با دقت نسبتاً بهتری بدست آیند. در جدول ۴ و ۵ پارامترهایی که در آنالیزها به کار می روند، ذکر شده اند.

جدول ۴- ورودی ها و مشخصات آنالیز

ظرفیت گرمایی ویژه ($j/kg.C$)	چگالی بتن (kg/m^3)	بازه زمانی	کلراید اولیه	درصد اشباع اولیه	دمای اولیه نمونه	تعداد گره	تعداد المان
۹۵۰	۲۳۰۰	۱ ساعت	۰	٪۱۰۰	۲۳ °C	۳۱	۳۰
کلراید بیرونی (٪منافذ محلول)	هدایت گرمایی سطح ($j/m2.s.C$)	C_3A (٪سیمان)	سیلیکافیوم (٪سیمان)	h_{max}	h_{min}	T_{max} °C	T_{min} °C
۲/۱۵	۱۳/۵	۵	۱	٪۹۰	٪۶۵	۳۰	-۱۰

جدول ۵- پارامترهای آنالیز برای نسبت‌های مختلف آب به سیمان

$w/c=۰/۵$	$w/c=۰/۴۵$	$w/c=۰/۴$	شرح
$۱/۳۵۰ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۳۵۰ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۳۵۰ \times ۱۰^{-۶}$	$D_t (m^2/s)$
$۳/۵۱۱ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۲/۶۶۴ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۲/۰۲۱ \times ۱۰^{-۱۱}$	$D_c \left(\frac{m^2}{s}\right)$
$۶/۱۷۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۶/۱۷۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۶/۱۷۹ \times ۱۰^{-۶}$	$B_t \left(\frac{m}{s}\right)$
$۳/۵۱۱ \times ۱۰^{-۸}$	$۲/۶۶۴ \times ۱۰^{-۸}$	$۲/۰۲۱ \times ۱۰^{-۸}$	$B_c \left(\frac{m}{s}\right)$

۴- نتایج و بحث

مقدار نفوذ کلراید در شرایط مستغرق و رویارویی بتن با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۰ تا ۰/۵۰ در برابر چرخه‌های مختلف جزر و مد در شکل‌های ۲ تا ۷ نشان داده شده است. همچنین میزان غلظت کلراید آزاد در عمق ۵۰mm از سطح بتن در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد چرخه‌های جزر و مد و همچنین افزایش نسبت آب به سیمان، نفوذ یون کلراید در بتن افزایش یافته است.

جدول ۳- غلظت کلراید در عمق ۵۰mm بتن پس از پنج سال رویارویی

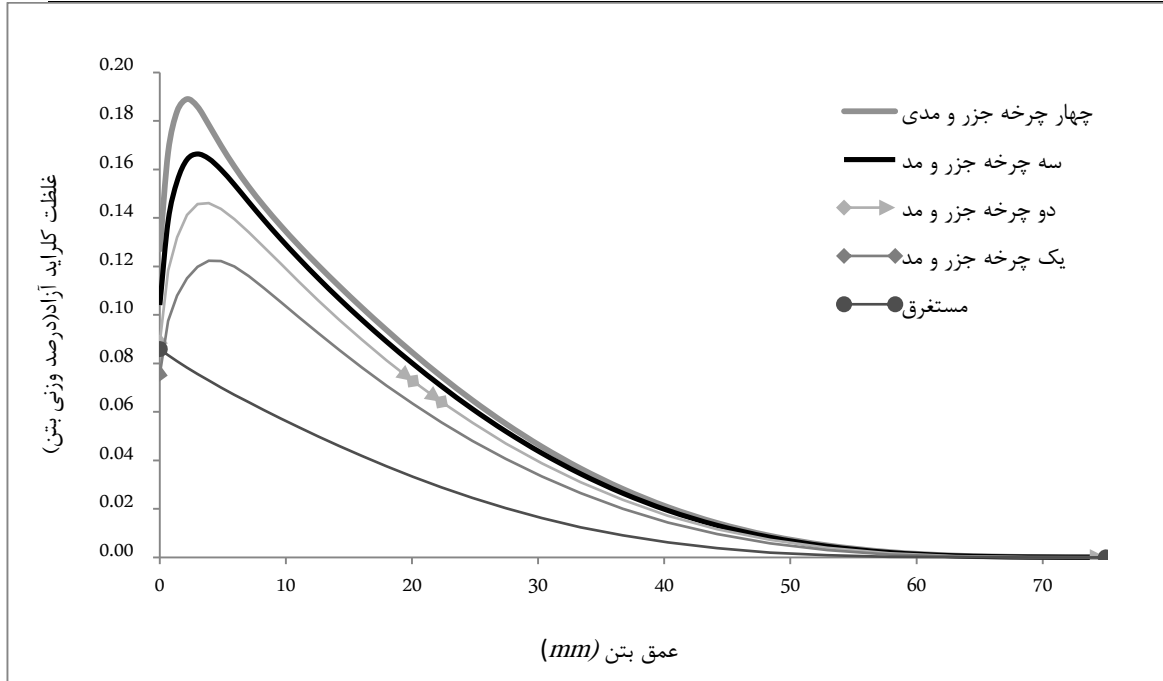
غلظت کلراید در عمق ۵۰mm (درصد وزنی بتن)			شرح
$w/c=۰/۵۰$	$w/c=۰/۴۵$	$w/c=۰/۴۰$	
۰/۰۱۳۹	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۱۴	غلظت کلراید در عمق ۵۰mm (درصد وزنی بتن) در شرایط I
۰/۰۲۶۲	۰/۰۱۲۸	۰/۰۰۴۵	غلظت کلراید در عمق ۵۰mm (درصد وزنی بتن) در شرایط T1
۰/۰۲۹۲	۰/۰۱۴۸	۰/۰۰۵۶	غلظت کلراید در عمق ۵۰mm (درصد وزنی بتن) در شرایط T2
۰/۰۳۱۹	۰/۰۱۶۹	۰/۰۰۶۴	غلظت کلراید در عمق ۵۰mm (درصد وزنی بتن) در شرایط T3
۰/۰۳۵۲	۰/۰۱۸۴	۰/۰۰۶۹	غلظت کلراید در عمق ۵۰mm (درصد وزنی بتن) در شرایط T4
۰/۵۳	۰/۴۵	۰/۳۱	نسبت غلظت کلراید در شرایط I به شرایط T1
۰/۴۸	۰/۳۹	۰/۲۵	نسبت غلظت کلراید در شرایط I به شرایط T2
۰/۴۴	۰/۳۴	۰/۲۲	نسبت غلظت کلراید در شرایط I به شرایط T3
۰/۳۹	۰/۳۲	۰/۲۰	نسبت غلظت کلراید در شرایط I به شرایط T4

جدول ۴- غلظت کلراید در عمق ۵۰mm بتن پس از ده سال رویارویی

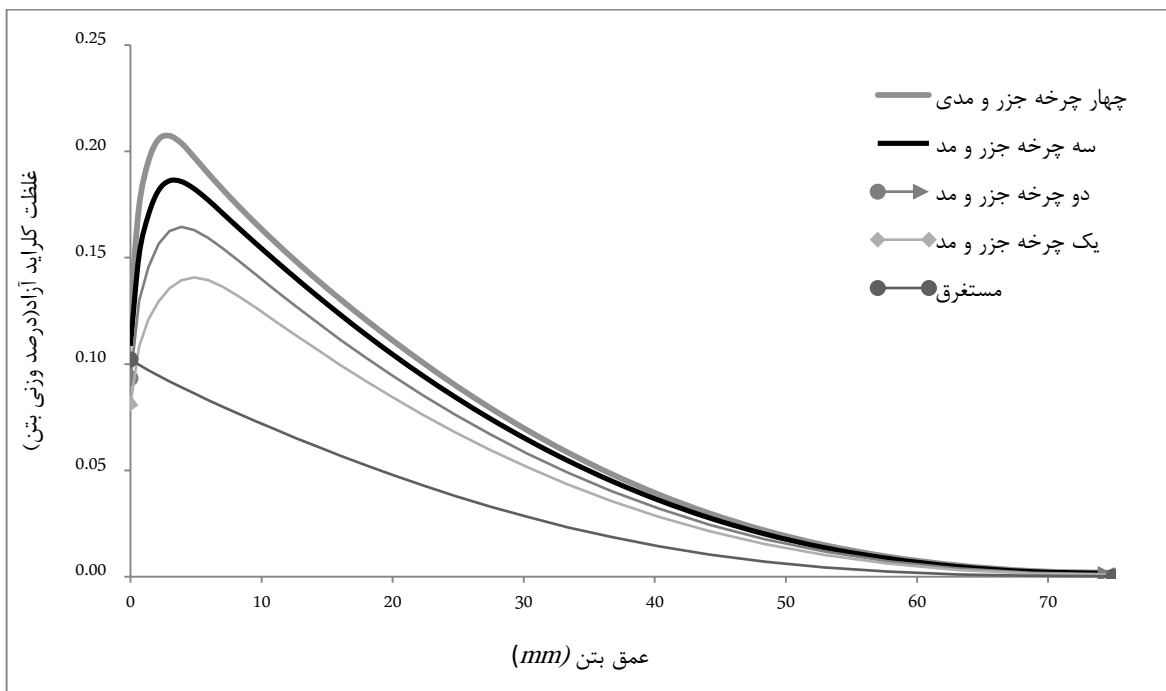
غلظت کلراید در عمق ۵۰mm (درصد وزنی بتن)			شرح
$w/c=۰/۵۰$	$w/c=۰/۴۵$	$w/c=۰/۴۰$	
۰/۰۲۴۴	۰/۰۱۸۵	۰/۰۰۸۵	غلظت کلراید در عمق ۵۰mm (درصد وزنی بتن) در شرایط I
۰/۰۶۱۱	۰/۰۳۵۸	۰/۰۱۸۷	غلظت کلراید در عمق ۵۰mm (درصد وزنی بتن) در شرایط T1

۰/۰۶۷۶	۰/۰۴۰۸	۰/۰۲۲۱
۰/۰۷۳۶	۰/۰۴۶۰	۰/۰۲۴۸
۰/۰۸۰۷	۰/۰۴۹۵	۰/۰۲۶۵
۰/۵۶	۰/۵۲	۰/۴۵
۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۳۸
۰/۴۷	۰/۴	۰/۳۴
۰/۴۳	۰/۳۷	۰/۳۲

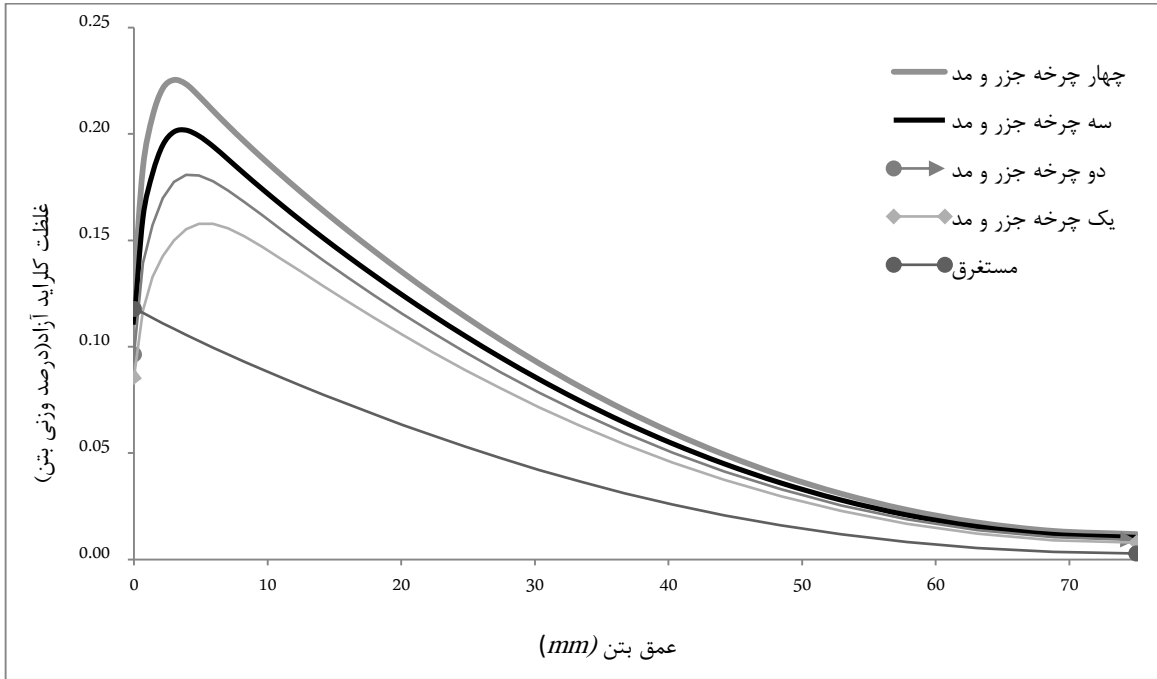
غلظت کلراید در عمق 50 mm (درصد وزنی بتن) در شرایط $T2$
 غلظت کلراید در عمق 50 mm (درصد وزنی بتن) در شرایط $T3$
 غلظت کلراید در عمق 50 mm (درصد وزنی بتن) در شرایط $T4$
 نسبت غلظت کلراید در شرایط I به شرایط $T1$
 نسبت غلظت کلراید در شرایط I به شرایط $T2$
 نسبت غلظت کلراید در شرایط I به شرایط $T3$
 نسبت غلظت کلراید در شرایط I به شرایط $T4$



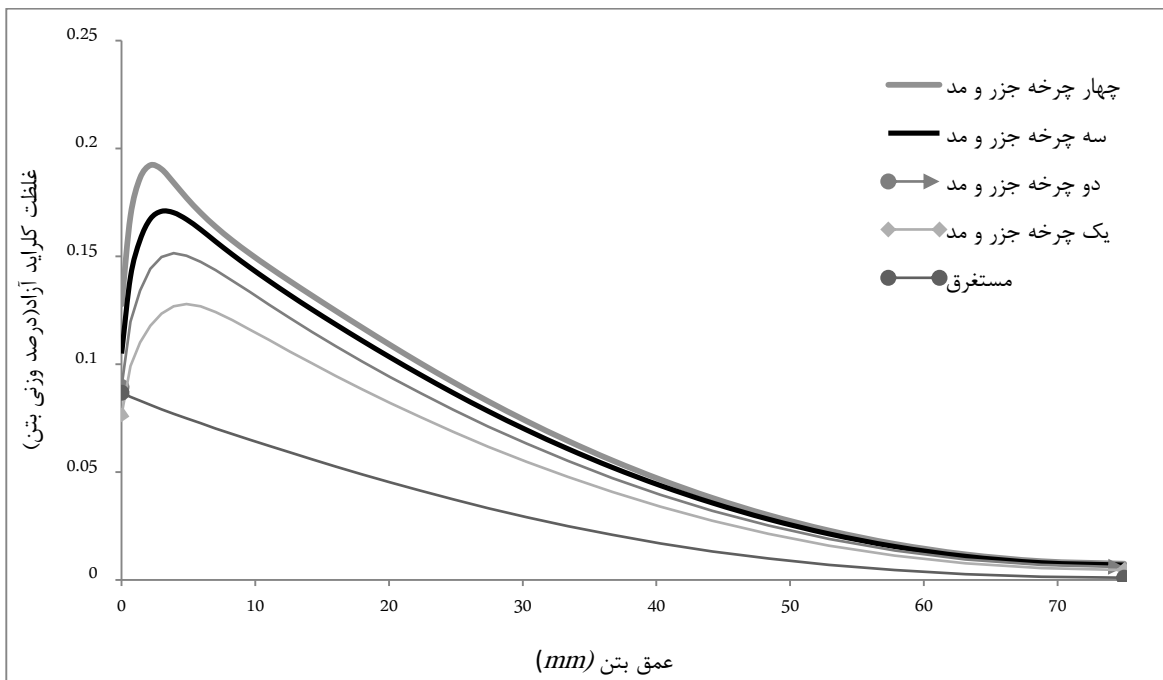
شکل ۲- پروفیل نفوذ کلراید در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ پس از پنج سال در شرایط مختلف رویارویی



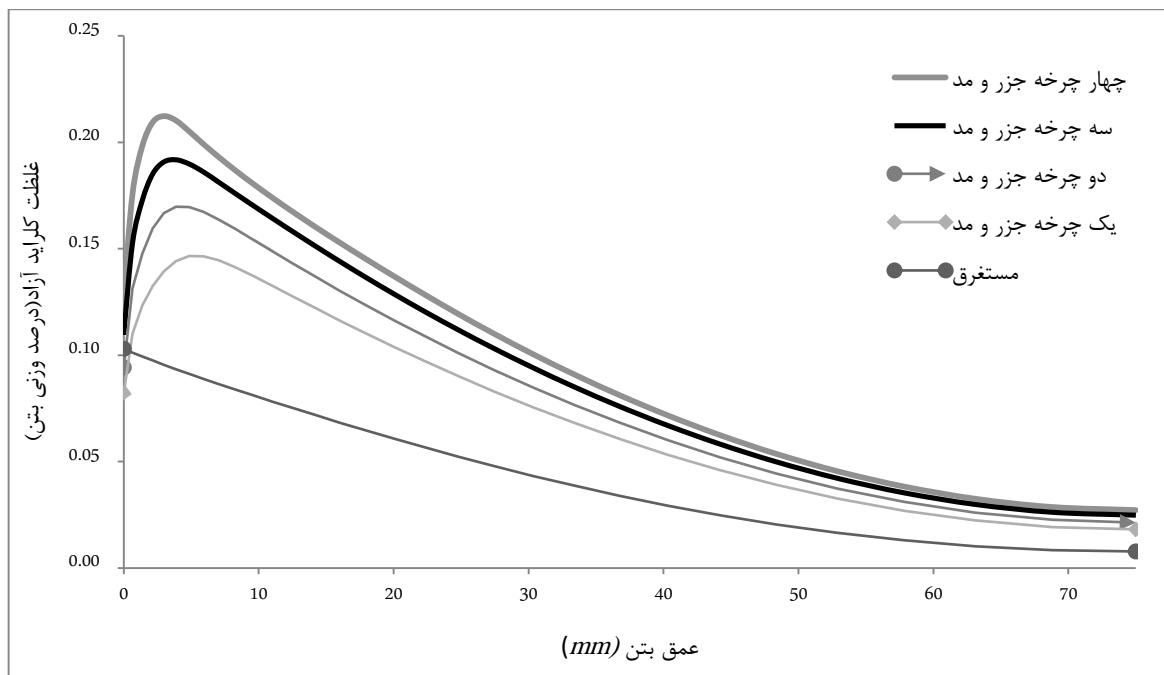
شکل ۳- پروفیل نفوذ کلراید در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ پس از پنج سال در شرایط مختلف رویارویی



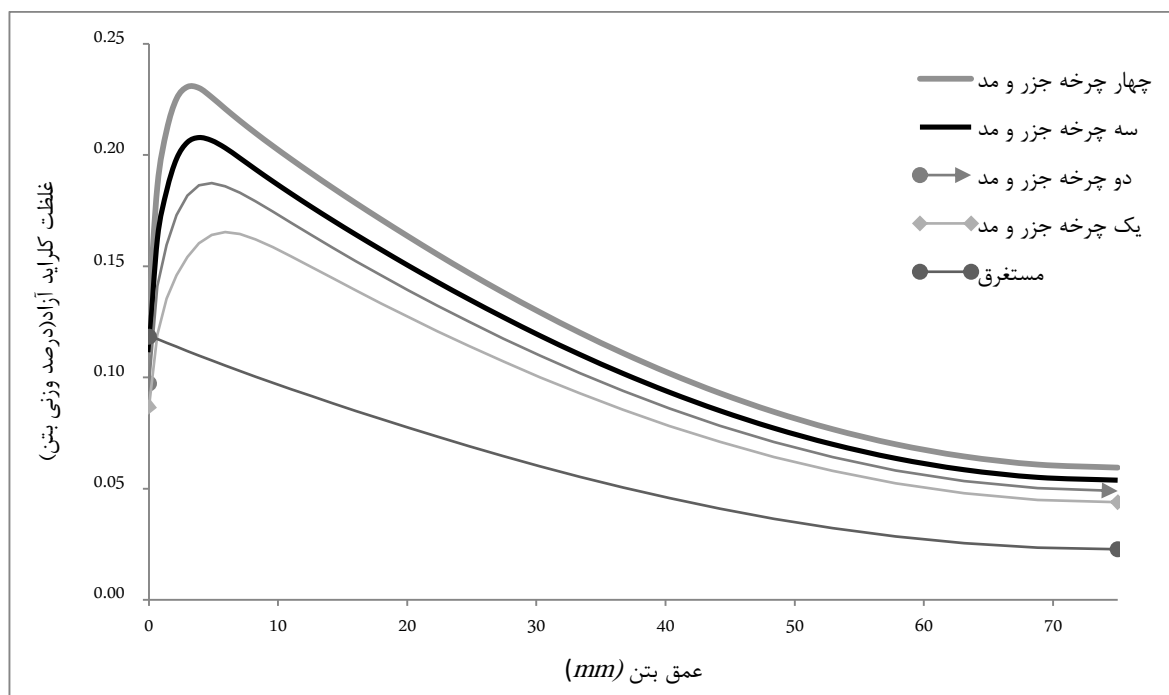
شکل ۴- پروفیل نفوذ کلراید در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵ پس از پنج سال در شرایط مختلف رویارویی



شکل ۵- پروفیل نفوذ کلراید در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴ پس از ده سال در شرایط مختلف رویارویی



شکل ۶- پروفیل نفوذ کلراید در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ پس از ده سال در شرایط مختلف رویارویی



شکل ۷- پروفیل نفوذ کلراید در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵ پس از ده سال در شرایط مختلف رویارویی

با توجه به جداول ۳ و ۴ و شکل‌های ۲ تا ۷، همانطور که انتظار می‌رود با افزایش نسبت آب به سیمان، غلظت کلراید نیز افزایش می‌یابد؛ بطوریکه با افزایش نسبت آب به سیمان، غلظت کلراید آزاد در شرایط مستغرق و پس از پنج سال رویارویی از ۰/۰۱۴ تا ۰/۰۱۳۹ (حدود ۱۰ برابر) زیاد شده است. این افزایش برای شرایط جزر و مدی با چهار چرخه کامل جزر و مد در شبانه روز، حدود ۵ برابر است.

نکته قابل توجه در مقایسه شرایط رویارویی مستغرق و شرایط جزر و مدی، سهم قابل توجه همرفت رطوبت در انتقال کلراید است. سهم همرفت رطوبت در انتقال یون کلراید به دلیل شرایط جزر و مدی در آنالیزهای انجام شده در این تحقیق، از ۴۷ درصد تا ۸۰ درصد متغیر بوده است. در هر صورت، سهم همرفت در انتقال کلراید در مقایسه با انتشار کلراید، قابل توجه می‌باشد. در مقایسه تعداد چرخه‌های جزر و مد، می‌توان اظهار داشت که افزایش تعداد چرخه‌های جزر و مد در شبانه روز، باعث افزایش غلظت کلراید در عمق 50mm شده است؛ بطوریکه پس از ده سال رویارویی، غلظت کلراید در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ از ۰/۰۱۸۵ در شرایط مستغرق تا ۰/۰۴۶۰ در شرایط مواجهه با سه چرخه جزر و مد در شبانه‌روز، افزایش یافته است. البته میزان افزایش غلظت کلراید در شرایط رویارویی با چهار چرخه جزر و مد به ۰/۰۴۹۵ افزایش یافته است. مقایسه غلظت کلراید آزاد در شرایط رویارویی با تعداد چرخه‌های مختلف جزر و مد، نشان می‌دهد که افزایش تعداد چرخه‌های جزر و مد تا ۳ مرتبه در شبانه‌روز باعث افزایش قابل توجه غلظت کلراید شده است؛ لیکن در تعداد چرخه‌های بیشتر جزر و مد، این افزایش چشمگیر نمی‌باشد.

در همه منحنی‌های غلظت کلراید در شرایط جزر و مدی، یک قله در عمق حدود ۱۰ میلی‌متری از ابتدای پوشش بتنی مشاهده می‌گردد که به این قسمت ناحیه همرفتی^۱ گفته می‌شود. بخشی از رطوبت موجود در ناحیه همرفتی در هر دوره جزر از بتن خارج شده و آب حاوی یون کلراید در دوره مد بعدی، جای آن را می‌گیرد. تجمع کلراید در انتهای منطقه همرفتی و عدم امکان انتشار کافی در ناحیه داخلی بتن، باعث تجمع یون کلراید در این نقطه و ایجاد یک نقطه با حداکثر مقدار کلراید می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مدل اجزاء محدود برای بررسی انتقال یون کلراید در بتن در شرایط مستغرق و جزر و مدی با استفاده از معادله همرفت - انتشار ساخته شده و با استفاده از آن، میزان نفوذ یون کلراید در بتن در شرایط فوق و با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ و ۰/۵ محاسبه شده است. نتایج بدست آمده، نشان داد که میزان نفوذ یون کلراید در بتن در شرایط جزر و مدی به مراتب بیشتر از شرایط مستغرق در مدت مشابه است. همچنین نتایج نشان داد که افزایش تعداد چرخه‌های جزر و مد تا سه بار در شبانه‌روز، اثر قابل ملاحظه‌ای در افزایش میزان نفوذ یون کلراید در بتن دارد.

۶- مراجع

- [1] Kumar Mehta, "Concrete in the marineenvironment", 1991.
- [2] Lindvall, A., "Environmental Actions and Response-Reinforced Concrete, Structures Exposed in Road and Marine Environment.", Publication P-11, Department of Building Materials, Chalmers University of Technology, SE- 412,96 Goteborg.
- [3] Allen, R.T.L, "Concrete in coastal structures", 1998, Thomas Telford.
- [4] M.N.Haque, H. Al-Khaiat, B. John, "Climatic zones_ A prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf", Building and Environment journal PP.2410-2416 4 April 2006.
- [5] Comite Euro-International du Beton (CEB), Bulletin 238, "New Approach to Durability Design.", May 1997.

[۶] برمک عزیزی مقدم، "بررسی اثر زمان بر آهنگ نفوذ یون کلر در بتن با توجه به شرایط قرار گیری و پوشش سطحی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۸۴.

¹ Convection zone

- [V] قدوسی، پرویز و دیگران، "فن آوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس، آسیب شناسی و ارزیابی آن"، چاپ اول، بهار ۱۳۷۸
- [8] Taheri-Motlagh, A. "Durability of Reinforced Concrete Structures in Aggressive Marine Environment", Thesis presented for the degree of doctor, Delft University of Technology, 1998.
- [9] Ghoddousi, P., Ganjian, E., Parhizgar, T., Ramezani-pour A.A., , "Concrete Technology in the Environmental Conditions of Persian Gulf," BHRC Publication, No. B 283, Spring 1998.
- [10] Hall C. (1989). Water sorptivity of mortars and concretes: a review. Magazine of Concrete Research, 41(147), 51-61.
- [11] Nielsen E.P. & Geiker M.R. (2003). Chloride diffusion in partially saturated cementitious material. Cement and Concrete Research, 33, 133-138.
- [12] Martys N. & Ferraris C.F. (1997). Capillary transport in mortar and concrete. Cement and Concrete Research, 27(5), 747-60.
- [13] 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
- [14] Hanzic L., Kosec L. & Anzel I. (2010). Capillary absorption in concrete and the Lucas-Washburn equation. Cement and Concrete Composite, 32, 84-91.
- [15] Bazant Z.P. & Najjar L.J. (1971). Drying of concrete as a nonlinear diffusion problem. Cement and Concrete Research, 1(5), 461-73.
- [16] Wanga L. & Ueda T. (2011). Mesoscale modeling of water penetration into concrete by capillary absorption. Ocean Engineering, 38, 519-528.
- [17] Saetta A.V., Scotta R. & Vitaliani, R.V. (1993a). Analysis of chloride diffusion in partially saturated concrete. ACI Materials Journal, 90(5), 441-451.
- [18] Janz 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.
- [19] Iqbal P.O. & Ishida T. (2009). Modeling of chloride transport coupled with enhanced moisture conductivity in concrete exposed to marine environment. Cement and Concrete Research, 39, 329-339.
- [20] 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.
- [21] Lockington D., Parlange J. & Dux P. (1999). Sorptivity and the estimation of water penetration into unsaturated concrete. Materials and Structures, 32, 342-347.
- [22] McCarter W.J., Watson D.W. & Chrisp T.M. (2001). Surface zone concrete: drying, absorption, and moisture distribution. Journal of Materials in Civil Engineering, 13, 49-57.
- [23] Ayano T. & Wittmann F.H. (2002). Drying, moisture distribution, and shrinkage of cement based materials. Materials and Structures, 35, 134-140.
- [24] Janz M. (2002). Moisture diffusivities evaluated at high moisture levels from a series of water absorption tests. Materials and Structures, 35, 141-148.
- [25] Ishida T., Maekawa K. & Kishi T. (2007). Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history. Cement and Concrete Research, 37, 565-578.
- [26] Qin M., Belarbi R., Ait-Mokhtar A. & Nilsson LO. (2009). Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials. Construction and Building Materials, 23, 967-975.
- [27] Lin G., Liu Y. & Xiang Z. (2010). Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride environments. Cement and Concrete Composite, 32, 571-579.
- [28] Zhang M., Ye G. & Breugel K. (2011). Microstructure-based modeling of water diffusivity in cement paste. Construction and Building Materials, 25, 2046-2052.
- [29] 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.
- [30] Glouannec Z.P. & Salagnac P. (2012). Estimation of moisture transport coefficients in porous materials using experimental drying kinetics. International Journal of Heat and Mass Transfer, 48, 205-215.
- [31] Maekawa K., Ishida T. & Kishi T. (2003). Multi-scale modeling of concrete performance—integrated materials and structural mechanics. Journal of Advanced Concrete Technology (JCI), 1(2), 91-126.
- [32] Tuutti (1982a). Corrosion of Steel in Concrete. Swedish foundation for concrete research, Stockholm.
- [33] Das B.B. & Pandey S.P. (2011). Influence of Fineness of Fly Ash on the Carbonation and Electrical Conductivity of Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE), 23(9), 1365-1368.

- [34] 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.
- [35] Ishida T., Iqbal P.O. & Anh H.T.L. (2009). Modeling of chloride diffusivity coupled with non-linear binding capacity in sound and cracked concrete. *Cement and Concrete Research*, 39, 913-923.
- [36] Xi Y.P. & Bazant Z.P. (1999). Modeling chloride penetration in saturated concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(1), 58-65.
- [37] Yuan Q., Shi C., De Schutter G., Audenaert K. & Deng D. (2009). Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review. *Construction and Building Materials*, 23, 1-13.
- [38] Sergi W., Yu S.W. & Page C.L. (1992). Diffusion of chloride and hydroxyl ions in cementitious materials exposed to a saline environment. *Magazine of Concrete Research*, 44(158), 63-9.
- [39] Crank J. *The mathematics of Diffusion* (2nd Ed). Clarendon, Oxford, 1975.
- [40] Isgor O.B. *A Durability Model for Chloride and Carbonation Induced Steel Corrosion in Reinforced Concrete Members*. PhD Thesis in Carlton University, Canada, 2001.
- [41] Guzmán S., Gálvez J.C. & Sancho J.M. (2011). Cover cracking of reinforced concrete due to rebar corrosion induced by chloride penetration. *Cement and Concrete Research*, 41, 893-902.
- [42] Bazant Z.P. & Thonguthai W. (1988b). Pore pressure and drying of concrete at high temperature. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 104 (EM5), 1059-1079.
- [43] 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.
- [44] Navarri P. & Andrieu J. (1993). High-intensity infrared drying study: part II. Case of thin coated films. *Chemical Engineering Process*, 32(5), 319-325.
- [45] Dietl C., Winter E. & Viskanta R. (1998). An efficient simulation of heat and mass transfer processes during drying of capillary porous hygroscopic materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(22), 3611-3625.
- [46] 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.
- [47] Xi Y.P., Bazant Z.P., Molina L. & Jennings H.M. (1994b). Moisture diffusion in cementitious materials-Moisture capacity and diffusion. *Advanced Cement Based Materials*, 1, 258-266.
- [48] Kodikara J. & Chakrabarti S. (2005). Modeling of Moisture Loss in Cementitiously Stabilized Pavement Materials. *International Journal of Geomechanics*, Dec.:295-303.
- [49] 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.
- [۵۰] مهدی نعمتی چاری، "مدلسازی انتقال کلراید در بتن با در نظر گرفتن اثر دما و رطوبت"، رساله دکتری، دانشگاه تهران، ۱۳۹۳ (آماده برای دفاع).
- [51] Wong S.F., Wee T.H., Swaddiwudhipong S. & Lee S.L. (2001). Study of water movement in concrete. *Magazine of Concrete Research*, 53(3), 205-220.
- [52] Delagrave A., Bigas J.P., Ollivier J.P., Marchand J. & Pigeon M. (1997b). Influence of the interfacial zone on chloride diffusivity of mortars. *Journal of Advanced Cement-Based Materials*, 5(3&4), 86-92.
- [53] Oh B.H. & Jang S.Y. (2003b). Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 37, 47-53.
- [54] Sun Y.M., Liang M.T. & Chang T.P. (2012). Time/depth dependent diffusion and chemical reaction model of chloride transportation in concrete. *Applied Mathematical Modelling*, 36, 1114-1122.
- [55] ACI 365.1, *Service-Life Prediction—State-of-the-Art Report*. Reported by ACI Committee 365, 2000.
- [56] Alexander M.G. & Magee B.J. (1999). Durability performance of concrete containing condensed silica fume. *Cement and Concrete Research*, 29, 917-922.
- [57] Bamforth P., Gjørsv O., Sakai K. & Bantia N. (2000a). Spreadsheet model for reinforcement corrosion in structures exposed to chloride. *Concrete Under Severe Condition 2: Environment and Loading*, 1, 64-75.
- [58] Song H.W., Shim H.B., Petcherdchoo A., Park S.K. (2009). Service life prediction of repaired concrete structures under chloride environment using finite difference method. *Cement and Concrete Composites*, 31, 120-127.
- [59] Mainguy M., Coussy O. & Baroghel-Bouny V. (2001). The role of air pressure in the drying of weakly permeable materials. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 127(6), 582-592.
- [60] Akita H., Fujiwara T. & Ozaka Y. (1997). A Practical Procedure for the Analysis of Moisture Transfer within Concrete Due to Drying. *Magazine of Concrete Research*, 49(179), 129-137.

- [61] McCarte W.J. (1993). Influence of surface finish on sorptivity on concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5,130-136.
- [62] Brunauer S., Emmett .PH. & Teller E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of American Chemical Society*, 60, 309-319.
- [63] Bazant Z.P. & Najjar L.J. (1972). Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. *Materials and Structures*, 5(25), 3-20.
- [64] Oh B.H. & Jang S.Y. (2007). Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 37, 47-53.
- [65] Han S.H. (2007). Influence of diffusion coefficient on chloride ion penetration of concrete structure. *Construction and Building Materials*, 21, 370-378.
- [66] Neville, A. (1981). *Properties of Concrete* (third ed.). Longman Scientific & Technical.(779 pp.)
- [67] Zienkiewicz O.C. & Taylor R.L. *The Finite Element Method* (4th Ed). McGraw-Hill, Berkshire, England, UK, 1997.