

بررسی اثر ضریب انتقال رطوبت در بتن بر پایداری سازه‌های بتنی در معرض یون کلراید

۱- مهدی نعمتی چاری، دانشجوی دکتری سازه در دانشگاه تهران

۲- محمد شکرچی‌زاده، سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

۳- مهدی چینی، کارشناس ارشد بتن در انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

Email: chari@ut.ac.ir

چکیده

نفوذ یون کلراید در سازه‌های بتنی حاشیه خلیج فارس و دریای عمان، عامل اصلی تخریب اکثر سازه‌های بتنی به ویژه سازه‌های در معرض چرخه‌های جزر و مد، می‌باشد. از آنجاییکه نفوذ یون کلراید در شرایط جزر و مدی، متأثر از پدیده توأم همرفت - انتشار است، در این مقاله سعی شده است تا اثر ضریب انتقال رطوبت بر دوام سازه‌های بتنی بررسی گردد. بدین منظور، یک مدل اجزاء محدود برای بررسی انتقال یون کلراید در بتن در شرایط همرفت - انتشار ساخته شده و با استفاده از آن، میزان نفوذ یون کلراید در بتن با طرح‌های اختلاط مختلف با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۰ تا ۰/۵۵ محاسبه شده است. نتایج بدست آمده، نشان داد که کاهش ضریب انتقال رطوبت در چرخه‌های جزر و مد، باعث کاهش قابل ملاحظه نفوذ یون کلراید و در نتیجه افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی در شرایط جزر و مدی شده است.

واژه‌های کلیدی: پایداری، روش اجزاء محدود، ضریب انتقال رطوبت، مدلسازی، نفوذ کلراید.

۱- مقدمه

یکی از تهدیدهای عمده دوام بتن در سازه‌های حاشیه خلیج فارس و دریای عمان، یون کلراید است. مکانیسم آسیب‌دیدگی چنین سازه‌هایی، بدین صورت است که یون‌های کلراید در بتن نفوذ کرده و به عمق میلگرد می‌رسند، و زمانیکه 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 مختلف انتقال رطوبت بستگی دارد، یعنی انتشار، جذب آب و نفوذپذیری. به عبارت دیگر، ویژگی‌های نفوذپذیری، نماینده کلیه مکانیسم‌های انتقال می‌باشد [۲] و بنابراین می‌توان گفت، زمانیکه نفوذپذیری بتن کاهش یابد، دوام آن افزایش پیدا می‌کند [۳-۴].

در بین شرایط محیطی متعدد، منطقه در معرض چرخه‌های تر و خشک شدن معمولاً نسبت به منطقه‌ای که در آب دریا مستغرق و کاملاً اشباع است، بیشترین آسیب را می‌بیند [۵]. بنابراین کنترل مکانیسم‌های حاکم بر انتقال کلراید در چرخه‌های تر و خشک شدن، می‌تواند در یافتن راهکارهای بهبود سطح دوام بتن در برابر چرخه‌های جزر و مد ناشی از آب دریا مؤثر باشد. با توجه به اینکه انتقال کلراید در معرض چرخه‌های تر و خشک شدن (جزر و مد) ناشی از ترکیب دو پدیده انتشار کلراید و همرفت رطوبت است [۶]، می‌توان شار رطوبت و عوامل مؤثر بر آن را یکی از دلایل حاکم بر انتقال کلراید در شرایط جزر و مدی دانست. از آنجاییکه شار رطوبت در بتن متأثر از ضریب انتقال رطوبت در منافذ بتن است، در این مطالعه سعی شده تا اثر تغییرات

ضریب انتقال رطوبت در نفوذ یون کلراید در بتن با نسبت‌های مختلف آب به سیمان از ۰/۴۰ تا ۰/۵۵ بررسی شود. بدین منظور، یک مدل اجزاء محدود برای محاسبه توزیع رطوبت و کلراید در بتن ساخته شده و با استفاده از آن، میزان یون کلراید وارد شده در منافذ بتن و سهم پدیده همرفت ناشی از چرخه‌های تر و خشک شدن، مورد مقایسه 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 [۷-۸]. مکانیسم غالب ورود 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 [۹]. در ادامه روابط حاکم بر شار انتقال رطوبت و کلراید در بتن ارائه خواهد شد.

۲-۱- شار انتقال رطوبت

جذب سطحی (موئینگی) در نتیجه انتقال موئینه در منافذ بتن ناشی از کشش سطحی بین آب و ساختار متخلخل بتن می‌باشد [۱۰-۱۱]. 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 [۱۲]. بنابراین چون بخشی از رطوبت به صورت بخار آب و بخشی به صورت آب مایع در بتن جایجا می‌شوند، 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 پیش‌بینی توزیع رطوبت در بتن ارائه شده‌اند. بزانت [۱۳-۱۴] مدلی را بر اساس انتشار رطوبت نسبی منافذ برای تخمین پروفیل رطوبت نسبی در بتن ارائه کرد که جمع‌شدگی بتن بر اساس آن اندازه‌گیری می‌شد. بعد از وی، محققان دیگری [۱۵-۱۶] توزیع رطوبت در بتن را بر اساس تغییرات رطوبت نسبی اغلب در حالت خشک‌شدگی و بعضاً در حالت تر شدگی بتن بررسی کردند؛ اگرچه مشخص شده است که رطوبت در حین جذب آب به دلیل نیروهای موئینه در مقایسه با فرایند انتشار بخار آب در بتن جایجا می‌شود [۱۷]. از طرفی به دلیل اینکه یون‌های مهاجم در بتن به‌مراه فاز مایع جایجا می‌شوند، توصیه شده است که در مدلسازی انتقال یون‌ها در بتن در اثر همرفت رطوبتی، توزیع رطوبت با استفاده از آب منفذی بررسی شود [۱۸-۲۰]. بنابراین، بیشتر محققان [۲۱-۲۲] سعی کردند تا توزیع رطوبت در بتن را چه در شرایط تر شدن و چه در حالت خشک‌شدن 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 هم‌دم، تعریف ساده شار کل رطوبت (J_m) برای هم بخار و هم مایع می‌تواند با معادله زیر بیان گردد [۳۳]، 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

۲-۲-۱- تقید کلراید

زمانیکه یون‌های کلراید در سیستم منافذ بتن نفوذ می‌کنند، برخی از یون‌ها از طریق محلول منفذی به روی ساختار جامد بتن منتقل شده و ثابت می‌شوند. به عبارت دیگر کلراید در بتن به دو صورت: ۱- محلول در مایع منفذی و ۲- مقید شده توسط اجزاء سیمان و محصولات هیدراتاسیون [۳۵-۳۶] وجود دارد. تقید کلراید نه تنها مقدار کل کلراید آزاد در محلول منفذی را کاهش می‌دهد، بلکه به مقدار قابل توجهی سرعت انتقال آنها را کم می‌کند [۳۷]. رابطه کلراید آزاد و کلراید مقید را می‌توان مطابق رابطه (۲) نوشت [۳۴]:

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

در رابطه (۲)، dC_b/dC_f به نام ایزوترم تقید کلراید شناخته می‌شود که از طریق آزمایشگاهی (تجربی) بدست می‌آید [۳۸]. یکی از ایزوترم‌های تقید، ایزوترم لانگمیر بوده که طبق رابطه زیر بیان می‌شود [۳۹]:

$$C_b = \frac{\alpha C_f}{1 + \beta C_f} \quad (۳)$$

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 [۴۰] مقادیر α و β را به ترتیب ۱/۶۷ و ۴/۰۸ برای خمیر سیمان پرتلند معمولی با $w/c = ۰/۵$ بدست آوردند و C_b بر حسب $mmol/g$ و mol/L 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 [۴۱].

$$J_c^{dif} = -w_e D_c \nabla C_f \quad (۴)$$

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:

$$J_c^{adv} = u C_f \quad (۵)$$

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:

$$u = -w_e^{tot} D_w \nabla w \quad (۶)$$

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.

۲-۲-۳- 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 [۳۷، ۳۸، ۴۲]:

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = -\nabla \cdot J_c = -\nabla \cdot (J_c^{dif} + J_c^{adv}) \quad (۷)$$

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 [۳۸]، در نتیجه:

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{\partial C_t}{\partial C_f} \frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial C_f} (C_b + w_e C_f) \frac{\partial C_f}{\partial t} = \left(\frac{\partial C_b}{\partial C_f} + w_e \right) \frac{\partial C_f}{\partial t} \quad (۸)$$

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

$$\left(\frac{1}{w_e^{tot}} \frac{\partial C_b}{\partial C_f} + w \right) \frac{\partial C_f}{\partial t} = \nabla \cdot (w D_c \nabla C_f + D_w \nabla w C_f) \quad (۹)$$

۲-۳- 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 روبرویی و مدت روبرویی بستگی دارد [۴۲-۴۵]. 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 [۷، ۱۶، ۴۶-۴۸] و در حالت خشک شدن [۹، ۲۰، ۲۵، ۲۶، ۳۱، ۴۹-۵۱] 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^s و D_w^d 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. نویسندگان این مقاله در تحقیق قبلی خود [۵۲]، مقادیر D_w^s ، β و D_w^d را برای بتن‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ تا ۰/۵۵، مطابق جدول ۱ ارائه کرده است. همچنین ونگ ضرایب α ، w_{cr} و N را به ترتیب برابر ۰/۰۵، ۰/۷۹۲ و ۶ بین نمود [۵۳].

جدول ۱- پارامترهای مربوط به روابط (۱۰) و (۱۱) (در دمای ۲۳°C) [۵۲]

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

۲-۴- ضریب انتشار کلراید

دانستن ضریب انتشار کلراید خمیر سیمان سخت‌شده به منظور پیش‌بینی زمان آغاز خوردگی، مهم است [۵۴]. بعضی از محققین روابطی را برای ضریب انتشار کلراید بر اساس روش‌های عددی و تجربی متفاوت و با توجه به عوامل مختلف تأثیرگذار روی آن، پیشنهاد کرده‌اند [۵۵-۵۶]. طبق پیشنهاد کمیته *Life-365* انجمن *ACI* [۵۷]، ضریب انتشار یون کلراید برای بتن ۲۸ روزه می‌تواند 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 می‌گذارند [۵۸]. مورد اول، عاملی است که ساختار منافذ بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهد مانند نسبت آب به مواد سیمانی، افزودنی‌های معدنی (مانند دوده سیلیس، خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی) و افزودنی‌های شیمیایی (مانند کاهنده‌های آب، حبابسازها و منبسط کننده‌ها). مورد دوم، عاملی است که رشد ساختار منافذ بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهد مانند شرایط عمل‌آوری، سن و واکنش‌پذیری مواد سیمانی. مورد سوم شرایط تراوایی مانند گرادیان هیدرولیکی، زمان نفوذ و مؤلفه شیمی محیط نفوذ می‌باشد. با توجه به کلیه مطالعات انجام شده و عوامل تأثیرگذار روی ضریب انتشار یون کلراید، می‌توان رابطه زیر را برای اصلاح ضریب انتشار کلراید ارائه نمود [۱۸]:

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

که در آن، ضریب $D_{ref}(w/c, t_0)$ به عنوان ضریب مرجع انتشار کلراید تعریف می‌شود که اثر نسبت w/c و زمان عمل‌آوری بتن ($t_0=28$) را محاسبه می‌نماید. سایر ضرایب اصلاحی نیز به شرح زیر می‌باشد:

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

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

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

که $F_1^{Cl}(t)$ ، $F_2^{Cl}(w)$ و $F_3^{Cl}(C_{Cl})$ به ترتیب ضرایب اصلاحی مربوط به سن بتن، درصد اشباع منافذ بتن و غلظت کلراید در محلول منفذی بتن می‌باشد. همچنین m ، فاکتور سن و مقدار آن برای بتن با سیمان پرتلند معمولی، 0.7 است [۵۹-۶۰]. w ، درجه اشباع منافذ و w_c ، درجه اشباعی است که ضریب انتشار کلراید در آن، نصف ضریب انتشار در شرایط اشباع می‌باشد [۱۹]. ضمناً ثابت‌های k_{ion} و m توسط زی [۳۸] 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.

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 می‌شود. 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 به سمت سطح می‌شود [۶۱]. اگر رطوبت اتمسفر، بیشتر باشد، فرایند معکوس رخ می‌دهد. موقعیکه بتن اشباع نشده در معرض آب مایع قرار می‌گیرد، فشار مویینه در منافذ سطحی به صفر رسیده و موجب گرادیان فشار مویینه قابل توجه در سطح بتن و متعاقباً یک جریان دارسی شدید به داخل بتن می‌شود [۸]. انتقال رطوبت از محیط خارجی به سطح بتن (تر شدگی) و یا بالعکس (خشک شدگی)، طبق رابطه زیر [۱۹ و ۶۲]، ارزیابی می‌گردد:

$$J_m^n = B_w(w_{sur} - w_{env}) \quad (17)$$

که J_m^n ، نرمال شار رطوبت بر سطح بتن و B_w ، ضریب انتقال رطوبت سطحی (m/s) است [۱۹ و ۵۰]. 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 20 درجه سانتی‌گراد به تعادل رسیده‌اند، بدست می‌آید [۶۳]. برای هر مقدار رطوبت نسبی محیط، یک ایزوترم واجذب، بیانگر مقدار رطوبت در دمای معین است. متعارف‌ترین معادله ایزوترم واجذب، رابطه BET^1 است [۶۴]. البته رابطه بین رطوبت نسبی و مقدار رطوبت در منافذ بتن پیچیده و غیر خطی است و می‌تواند طبق رابطه زیر نوشته شود.

$$w_{en} = \frac{(1-k)[1+(C-1)k]h_{env}}{(1-kh)[1+(C-1)kh_{env}]} \quad (18)$$

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) محاسبه می‌شوند.

$$n = \left(2.5 + \frac{15}{t_e}\right) (0.33 + 2.2w/cm) \quad \text{if } t_e > 5 \text{ days and } 0.3 < w/cm < 0.6 \quad (19)$$

$$C = e^{\frac{855}{T}} \quad (20)$$

¹ Brunauer-Emmett-Teller

$$k = \frac{(1-\frac{1}{n})^{c-1}}{c-1} \quad 0 < k < 1 \quad (21)$$

که در آنها، J_{env} و T 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، بزانن [۱۳] گزارش کرد که مقدار ضخامت معادل محیطی، ۰/۷۵ میلی‌متر است.

۲-۶- شرایط مرزی انتقال کلراید

و همکارانش [۶۵] صورتی دیگر شرایط مرزی برای شار تعریف شده انتقال کلراید را طبق رابطه زیر بیان نمودند:

$$J_{Cl}^s = B_{Cl}(C_{env} - C_s) + \bar{u}c_0 = B_{Cl}(C_{env} - C_s) + B_w C_{env}(w_{env} - w_s) \quad (22)$$

که J_{Cl}^s شار سطحی کلراید بر حسب m/s است. آکیتا [۶۲]، مقادیر B_{Cl} را در محدود ۲/۴۳ تا $4/17 \times 10^{-7} m/s$ اعلام کرد.

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

۳-۱- روش اجزاء محدود

طبق تحقیقات انجام شده، روش اجزاء محدود (FEM) بطور دقیقی غلظت کلراید آزاد را تخمین می‌زند. غلظت یون کلراید در یک جسم بی‌نهایت کوچک، بوسیله یک تابع شکل و غلظت کلراید نقطه‌ای بیان می‌شود [۶۶]. همچنین با استفاده از روش اجزاء محدود، سری معادلات دیفرانسیل غیرخطی درگیر به معادلات قابل حل تبدیل می‌شود [۶۷].

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 مطابق الگوریتم شکل ۱، طوری ساخته می‌شود که ابتدا رطوبت و در نهایت توزیع کلراید در بتن را محاسبه نماید. لازم به ذکر است که در هر گام زمانی آنالیز، ضرایب مدل مانند ضرایب D و B با توجه به تاریخچه رطوبت و کلراید محاسبه شده و به هر المان اختصاص می‌یابد تا اثر تغییر این پارامترها روی نتایج مدل در نظر گرفته شود.

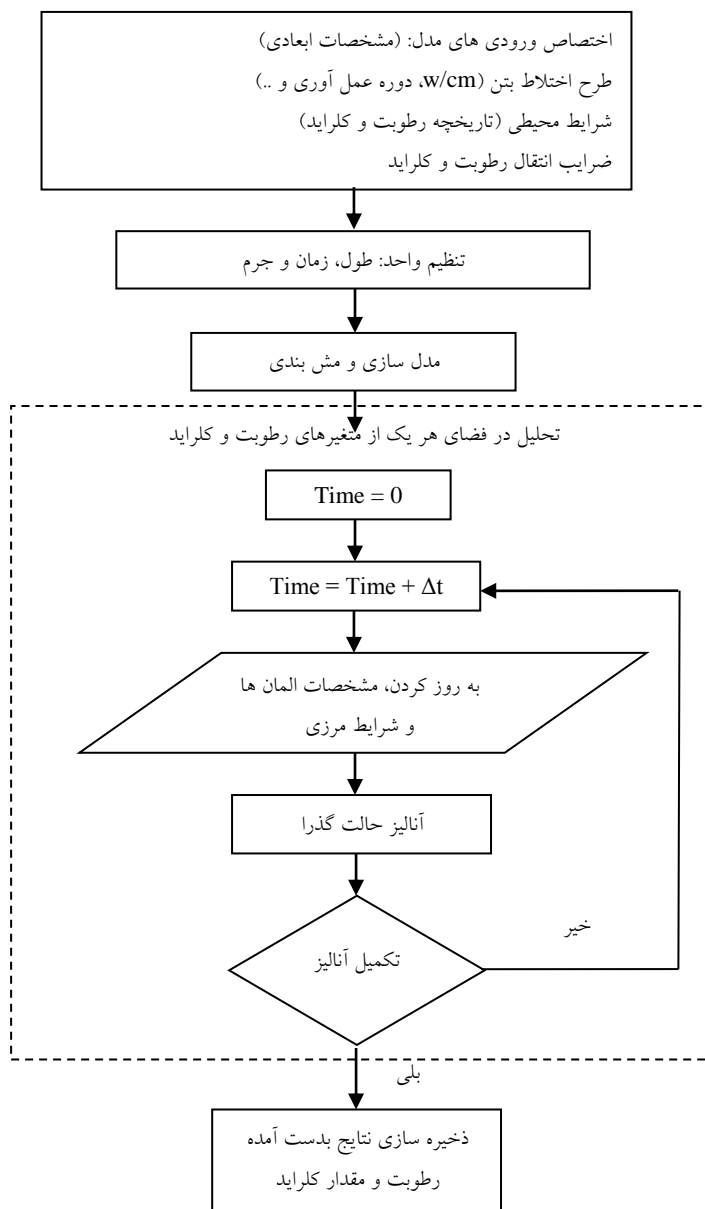
۳-۳- تعریف مسأله

۳-۳-۱- مشخصات بتن

در این تحقیق، چهار نسبت آب به سیمان مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، چهار طرح اختلاط مطابق جدول ۲ تهیه شده است. همچنین، جذب آب کل بتن (درصد تبخیر آزمون بتنی اشباع در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد) طبق جدول ۳ محاسبه و قابل مشاهده می‌باشد. همانطوریکه ملاحظه می‌گردد، با افزایش نسبت w/c ، درصد جذب آب افزایش یافته است.

۳-۳-۲- شرایط رویارویی

فرض می‌گردد بتن با طرح‌های اختلاط جدول ۲، پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در معرض آب حاوی یون کلرید به اندازه ۲/۱۵ درصد وزنی و به مدت ۵ سال قرار دارد. شرایط رویارویی در دو حالت مستغرق و جزر و مدی با دو چرخه کامل جزر و مد در شبانه‌روز مد نظر قرار داده شده است. میزان یون کلراید قابل نفوذ به عمق ۵۰ میلیمتری بتن پس از پنج سال با استفاده از مدل عددی ساخته شده، مورد ارزیابی قرار گرفته و سهم پدیده همرفت و متعاقباً ضریب انتقال رطوبت در نفوذ کلراید تخمین زده خواهد شد. همچنین لازم به ذکر است که دمای محیط رویارویی (آب نمک و هوای پیرامون) برابر ۲۳ درجه سانتی‌گراد و متوسط رطوبت نسبی محیط رویارویی (هوای پیرامون)، ۶۵ درصد است.



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

جدول ۲- طرح های اختلاط بتن و مقدار آب قابل تبخیر

w/c	وزن اجزا در طرح های اختلاط مختلف (kg/m ³)				شماره طرح
	شن *	ماسه *	مقدار آب اختلاط	عیار سیمان	
۰/۴	۹۱۳	۹۱۳	۱۵۰	۳۷۵	Mix 1
۰/۴۵	۹۰۳	۹۰۳	۱۶۹	۳۷۵	Mix 2
۰/۵	۸۹۴	۸۹۴	۱۸۸	۳۷۵	Mix 3
۰/۵۵	۸۸۴	۸۸۴	۲۰۶	۳۷۵	Mix 4

* وزن مصالح سنگی بر حسب شرایط اشباع با سطح خشک ارائه شده است. همچنین وزن مخصوص بتن، ۲۳۵۰ kg/m³ فرض شده است.

جدول ۳- جذب آب کل بتن (تخمین شده)

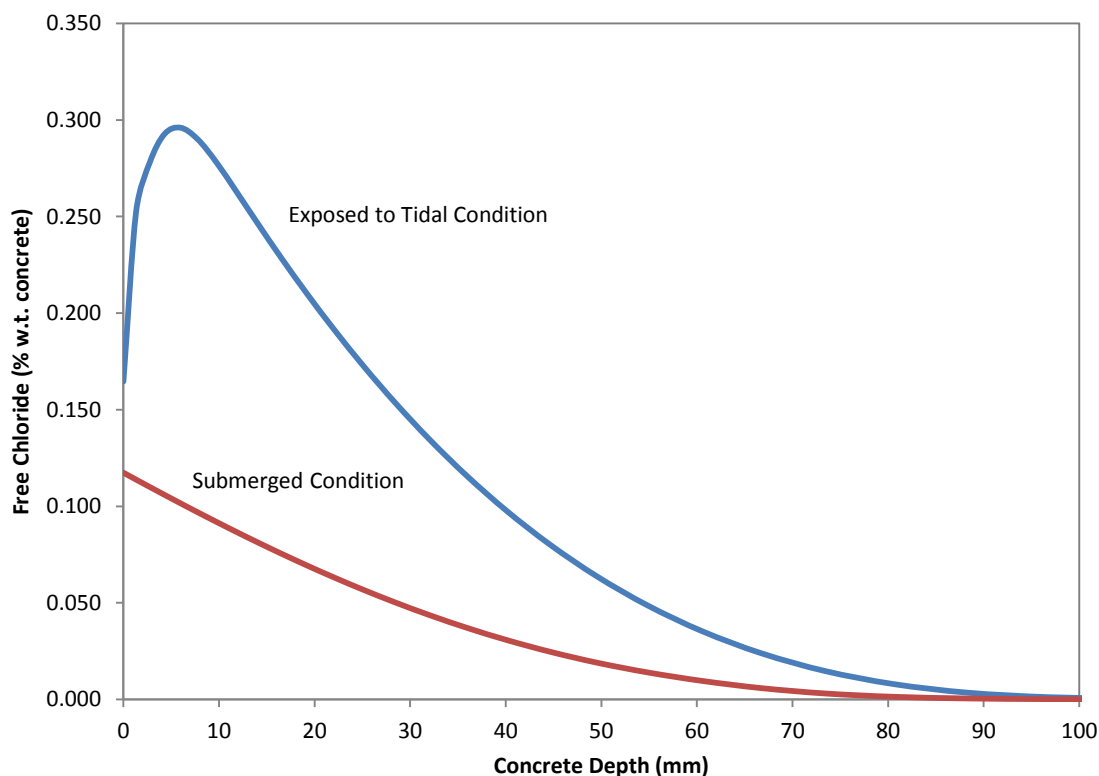
شماره طرح اختلاط	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4
درصد جذب آب کل پس از ۲۸ روز	۵/۸	۶/۶	۷/۵	۸/۴

۴- نتایج و بحث

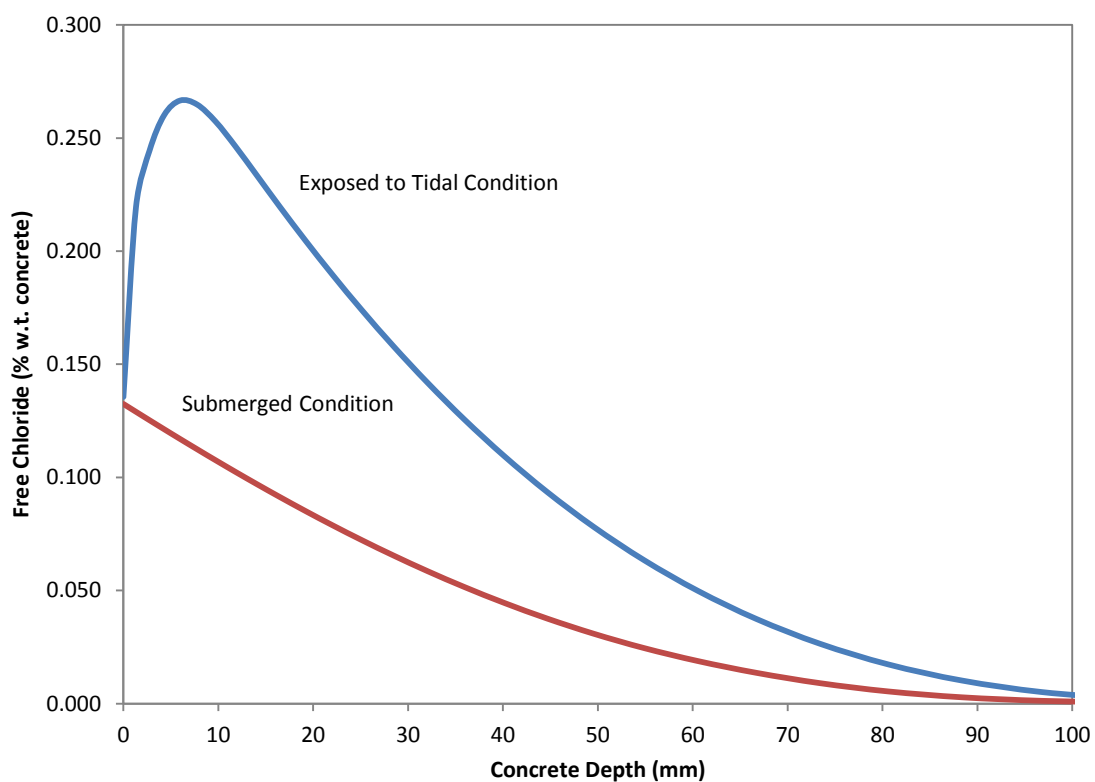
مقدار نفوذ کلراید در شرایط مستغرق و شرایط جزر و مدی برای بتن با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۰ تا ۰/۵۵ در شکل‌های ۲ تا ۵ نشان داده شده است. همچنین میزان غلظت کلراید آزاد در عمق ۵۰mm از سطح بتن در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت آب به سیمان، نفوذ یون کلراید در بتن افزایش یافته است. این افزایش هم برای شرایط مستغرق و هم برای شرایط جزر و مدی قابل مشاهده است.

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

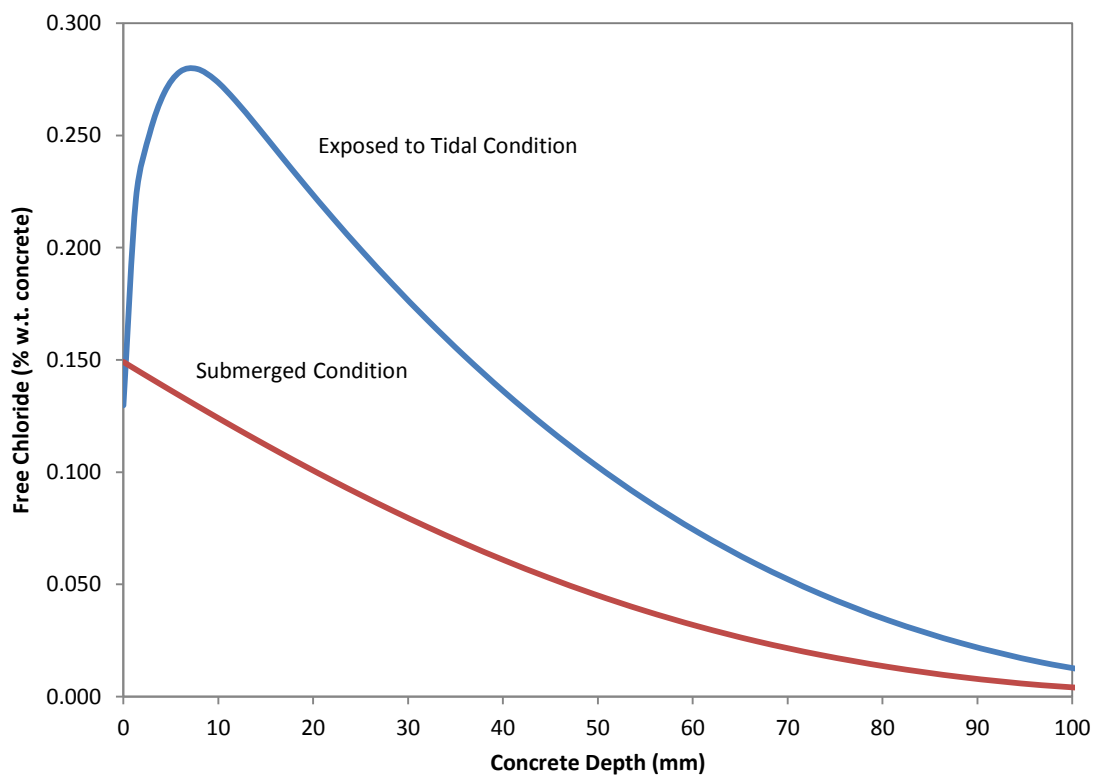
غلظت کلراید در عمق ۵۰mm (درصد وزنی بتن)				شرح
۰/۵۵	۰/۵۰	۰/۴۵	۰/۴۰	نسبت آب به سیمان
۰/۰۶۲	۰/۰۴۶	۰/۰۳۱	۰/۰۱۹	غلظت کلراید در عمق ۵۰mm (درصد وزنی بتن) در شرایط مستغرق
۰/۱۲۹	۰/۱۰۴	۰/۰۷۸	۰/۰۶۴	غلظت کلراید در عمق ۵۰mm (درصد وزنی بتن) در شرایط جزر و مدی
۰/۴۸	۰/۴۴	۰/۴۰	۰/۳۰	نسبت غلظت کلراید در شرایط مستغرق به شرایط جزر و مدی



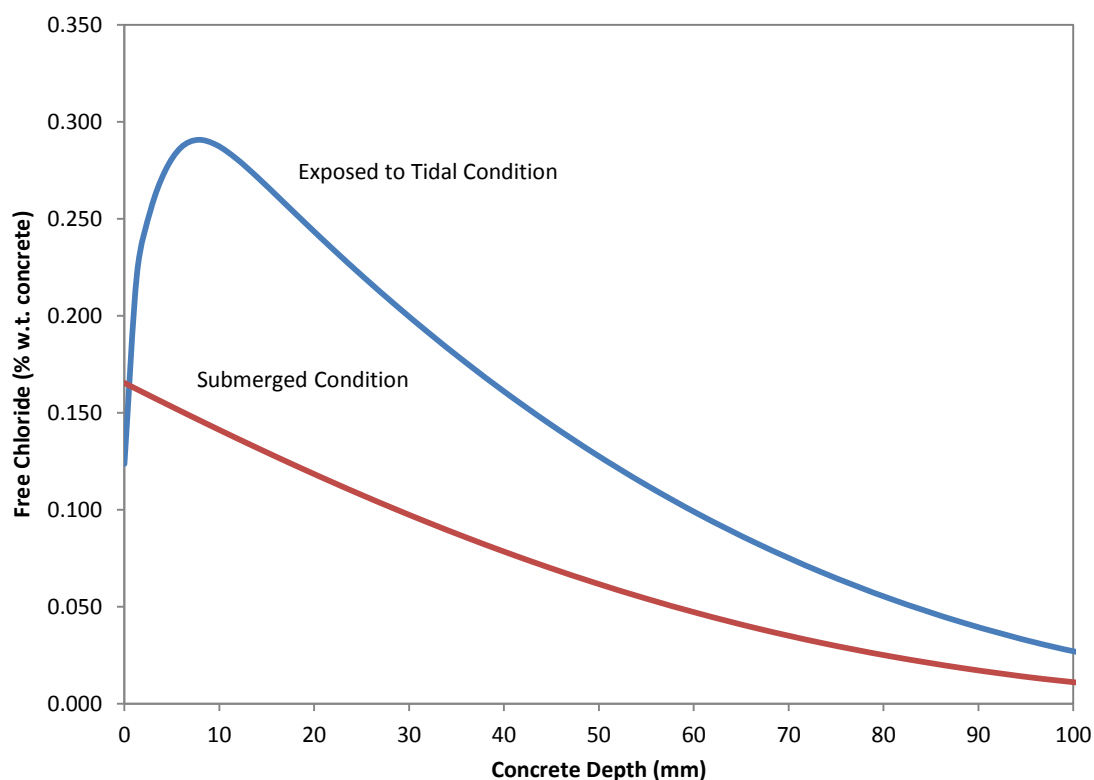
شکل ۲- پروفیل نفوذ کلراید در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ پس از پنج سال رویارویی



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



شکل ۴- پروفیل نفوذ کلراید در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ پس از پنج سال روبارویی



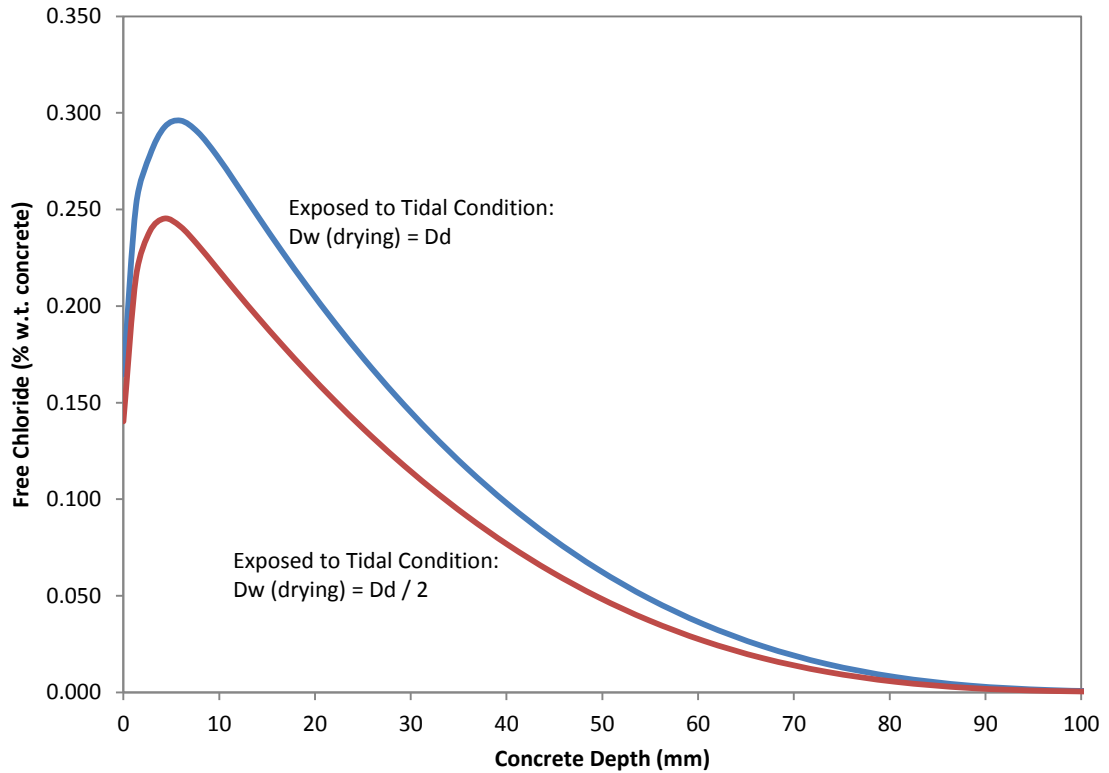
شکل ۵- پروفیل نفوذ کلراید در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ پس از پنج سال روبارویی

در شرایط مستغرق با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۰ تا ۰/۵۵، غلظت کلراید آزاد در عمق 50mm از ۰/۱۹ درصد به ۰/۰۶۲ درصد وزن بتن افزایش یافته است. به عبارت دیگر، پس از پنج سال، غلظت کلراید در عمق 50mm در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵، ۳/۳ برابر غلظت کلراید در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ بوده است. در آنسو و در شرایط جزر و مدی، میزان غلظت کلراید در عمق 50mm به مراتب بیشتر از شرایط مستغرق است؛ طوریکه غلظت کلراید در شرایط جزر و مدی نسبت به شرایط مستغرق در بتن‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ تا ۰/۵۵ از ۰/۰۶۴ تا ۰/۱۲۹ درصد وزن بتن متغیر می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که همرفت رطوبت، بیش از نیمی از سهم ورود کلراید را به خود اختصاص داده است. البته سهم انتقال کلراید در اثر پدیده همرفت رطوبت در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰، حدود ۷۰ درصد است. همچنین پس از پنج سال قرار گرفتن در معرض جزر و مد، غلظت کلراید آزاد در عمق 50mm بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵، ۲/۰ برابر غلظت کلراید آزاد در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ بود.

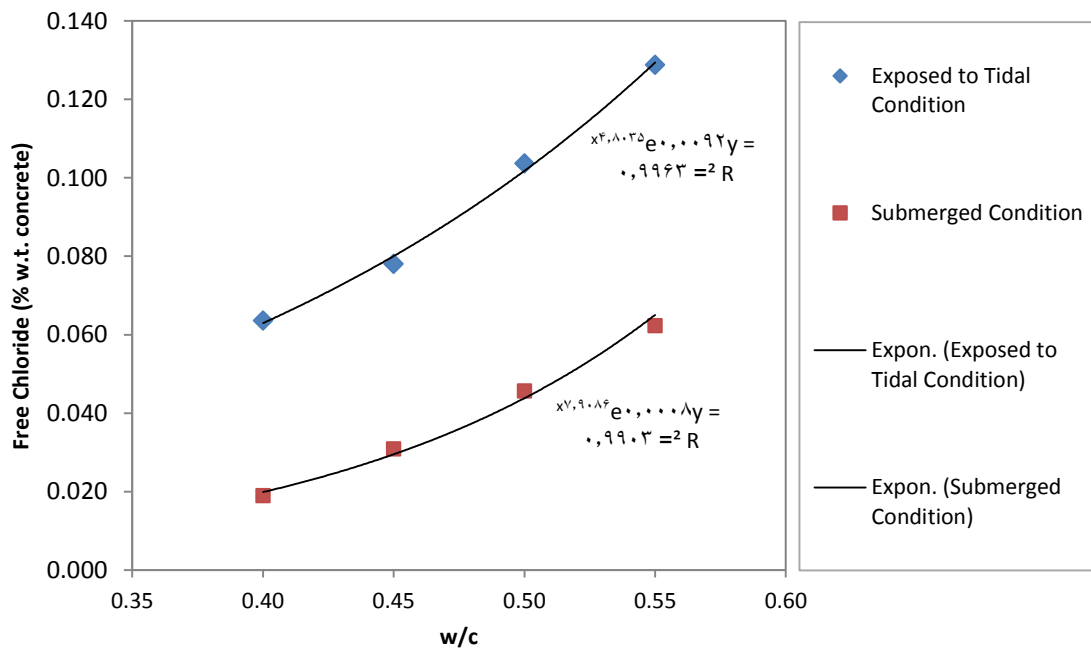
نکته مهم در پدیده همرفت، این است که ابتدا باید منافذ بتن در دوره جزر (خشک شدن) خالی از رطوبت شده تا امکان ورود رطوبت حاوی یون کلراید در دوره مد (تر شدن) فراهم باشد. از آنجائیکه ضریب انتقال رطوبت در دوره خشک شدن بسیار کمتر از ضریب انتقال رطوبت در دوره تر شدن است، بنابراین پتانسیل خالی شدن منافذ بتن از رطوبت در دوره جزر، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است؛ طوریکه اگر با یک روش مناسب، ضریب انتقال رطوبت در دوره خشک شدن، کاهش یابد، رطوبت کمتری از بتن در فرایند جزر خارج شده و در نتیجه پتانسیل ورود کلراید به همراه رطوبت در دوره بعدی مد کاهش می‌یابد. شکل ۶، پروفیل یون کلراید بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ را در شرایطی که ضریب انتقال رطوبت در دوره خشک شدن آن، به نصف کاهش یافته است، نشان می‌دهد. همانطوریکه مشاهده می‌شود، ۲۳ درصد از مقدار یون کلراید در عمق 50mm بعد از پنج سال روبارویی کاهش یافته است.

از طرف دیگر، شکل ۷ غلظت کلراید در عمق 50mm را پس از پنج سال قرار گرفتن در معرض جزر و مد و شرایط مستغرق نشان می‌دهد. همانطوریکه مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت آب به سیمان، شیب افزایش غلظت کلراید در بتن، بیشتر می‌شود. این امر نشان‌دهنده تأثیر قابل ملاحظه نسبت آب به سیمان و اثر آن روی ضرایب انتقال رطوبت و انتشار کلراید در بتن و متعاقباً افزایش

امکان ورود کلراید در بتن‌های با نسبت آب به سیمان بیشتر می‌باشد. البته لازم به ذکر است که شیب افزایش غلظت کلراید در شرایط جزر و مدی بیشتر از حالت مستغرق است.



شکل ۶- پروفیل نفوذ کلراید در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ پس از پنج سال رویارویی



شکل ۷- غلظت کلراید در عمق ۵۰mm بتن پس از پنج سال رویارویی

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک مدل اجزاء محدود برای بررسی انتقال یون کلراید در بتن در شرایط همرفت - انتشار ساخته شده و با استفاده از آن، میزان نفوذ یون کلراید در بتن با طرح‌های اختلاط مختلف با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۰ تا ۰/۵۵ محاسبه شده است. نتایج بدست آمده، نشان داد که همرفت رطوبت، بیش از نیمی از سهم ورود کلراید را به خود اختصاص داده است؛ طوریکه سهم انتقال کلراید در اثر پدیده همرفت رطوبت در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰، حدود ۷۰ درصد بوده است. همچنین ۵۰ درصد کاهش ضریب انتقال رطوبت دوره خشک شدن بتن، باعث کاهش حدود ۲۳ درصد از مقدار یون کلراید در عمق ۵۰mm بتن بعد از پنج سال رویارویی شده است.

۶- تشکر و قدردانی

لازم است از همکاران انستیتو مصالح ساختمانی در پیشبرد تحقیق حاضر، تشکر و قدردانی می‌شود.

۷- مراجع

- [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] Arteaga E.B., Sánchez-Silva M., Chateaufneuf A. & Silva M.S. (2008). Coupled reliability model of biodeterioration, chloride ingress and cracking for reinforced concrete structures. *Structural Safety*, 30, 110-129.
- [7] Hall C. (1989). Water sorptivity of mortars and concretes: a review. *Magazine of Concrete Research*, 41(147), 51-61.
- [8] Nielsen E.P. & Geiker M.R. (2003). Chloride diffusion in partially saturated cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 33, 133-138.
- [9] Martys N. & Ferraris C.F. (1997). Capillary transport in mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, 27(5), 747-60.
- [10] 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.
- [11] Hanzic L., Kosec L. & Anzel I. (2010). Capillary absorption in concrete and the Lucas-Washburn equation. *Cement and Concrete Composite*, 32, 84-91.
- [12] Bazant Z.P. & Najjar L.J. (1971). Drying of concrete as a nonlinear diffusion problem. *Cement and Concrete Research*, 1(5), 461-73.
- [13] Bazant Z.P. & Najjar L.J. (1972). Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. *Materials and Structures*, 5(25), 3-20.

- [14] Bertolini L., Elsener B., Pedferri P. & Polder R. (2004). Corrosion of steel in concrete. *WILEY-VCH Verlag*.
- [15] 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.
- [16] Aquino W., Hawkins N.M. & David A.L. (2004). Moisture Distribution in Partially Enclosed Concrete. *ACI Materials Journal*, 101(4), 259-265.
- [17] Peuhkuri R., Rode C. & Hansen K.K. (2008). Non-isothermal moisture transport through insulation materials. *Building and Environment*, 43, 811-822.
- [18] Wanga L. & Ueda T. (2011). Mesoscale modeling of water penetration into concrete by capillary absorption. *Ocean Engineering*, 38, 519-528.
- [19] Saetta A.V., Scotta R. & Vitaliani, R.V. (1993a). Analysis of chloridediffusion in partially saturated concrete. *ACI Materials Journal*, 90(5), 441-451.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Lockington D., Parlange J. & Dux P. (1999). Sorptivity and the estimation of water penetration into unsaturated concrete. *Materials and Structures*, 32, 342-347.
- [24] 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.
- [25] Ayano T. & Wittmann F.H. (2002). Drying, moisture distribution, and shrinkage of cement based materials. *Materials and Structures*, 35, 134-140.
- [26] Janz M. (2002). Moisture diffusivities evaluated at high moisture levels from a series of water absorption tests. *Materials and Structures*, 35, 141-148.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Zhang M., Ye G. & Breugel K. (2011). Microstructure-based modeling of water diffusivity in cement paste. *Construction and Building Materials*, 25, 2046-2052.
- [31] 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.
- [32] 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.

- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Tuutti (1982a). Corrosion of Steel in Concrete. Swedish foundation for concrete research, Stockholm.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Xi Y.P. & Bazant Z.P. (1999). Modeling chloride penetration in saturated concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(1), 58-65.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Crank J. The mathematics of Diffusion (2nd Ed). Clarendon, Oxford, 1975.
- [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] 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.
- [44] Bazant Z.P. & Thonguthai W. (1987b). Pore pressure and drying of concrete at high temperature. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 104 (EM5), 1059-1079.
- [45] 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.
- [46] Navarri P. & Andrieu J. (1993). High-intensity infrared drying study: part II. Case of thin coated films. *Chemical Engineering Process*, 32(5), 319–325.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] Kodikara J. & Chakrabarti S. (2005). Modeling of Moisture Loss in Cementitiously Stabilized Pavement Materials. *International Journal of Geomechanics*, Dec.:295-303.
- [51] 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.

[۵۲] مهدی نعمتی چاری، "مدلسازی انتقال کلراید در بتن با در نظر گرفتن اثر دما و رطوبت"، رساله دکتری، دانشگاه تهران، ۱۳۹۳ (آماده برای دفاع).

- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] ACI 365.1, Service-Life Prediction—State-of-the-Art Report. Reported by ACI Committee 365, 2000.
- [58] Alexander M.G. & Magee B.J. (1999). Durability performance of concrete containing condensed silica fume. *Cement and Concrete Research*, 29, 917-922.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] McCarte W.J. (1993). Influence of surface finish on sorptivity on concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5,130-136.
- [64] Brunauer S., Emmett .PH. & Teller E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of American Chemical Society*, 60, 309-319.
- [65] 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.
- [66] Han S.H. (2007). Influence of diffusion coefficient on chloride ion penetration of concrete structure. *Construction and Building Materials*, 21, 370–378.
- [67] Zienkiewicz O.C. & Taylor R.L. *The Finite Element Method* (4th Ed). McGraw-Hill, Berkshire, England, UK, 1997.