

## مدلسازی انتقال یون کلراید در بتن در معرض شرایط جزر و مدی: بررسی اثر نسبت آب به سیمان روی غلظت بیشینه کلراید

مهدی نعمتی چاری \*

عضو هیات علمی بخش فناوری بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

اکبر صفری

کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین

محمد شکرچی زاده

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

مهدی چینی

عضو هیات علمی بخش فناوری بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

### چکیده

نفوذ یون کلراید و متعاقباً خوردگی میلگرد مدفون در بتن، یکی از دلایل اصلی تخریب بتن در سواحل خلیج فارس و دریای عمان است. شدت این تخریب در چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن به مراتب بیشتر از سایر شرایط مانند شرایط مستغرق و اتمسفری می‌باشد. بنابراین برای طراحی سازه‌های بتن مسلح بر اساس عملکرد، لازم است انتقال توام رطوبت و یون کلراید در بتن غیر اشباع بوسیله مدلسازی دقیق عددی بررسی شود. از این رو در این مقاله، معادلات حاکم بر انتقال رطوبت و یون کلراید در بتن، بررسی شده و با استفاده از مدلسازی عددی بر اساس روش اجزاء محدود، پروفیل یون کلراید با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر آن، محاسبه شد. مقایسه داده‌های مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از سایت تحقیقاتی دانشگاه تهران در ساحل بندرعباس، بیانگر توانایی مدل ارائه شده در پیش‌بینی پروفیل یون کلراید در بتن بود. ضمناً خروجی مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش نسبت آب به سیمان بتن از ۰/۴۰ به ۰/۴۵، مقدار بیشینه پروفیل کلراید، کاهش یافته و بعد از آن تا ۰/۵۵، مقدار بیشینه پروفیل کلراید، به آرامی افزایش یافته است؛ در صورتیکه نسبت مجموع وزن کلراید وارد شده در بتن به وزن بتن، تا ۵۰ درصد زیاد شده است.

واژه‌های کلیدی: بتن، پروفیل، روش اجزاء محدود، مدلسازی عددی، یون کلراید.

\* نویسنده مسئول: m.nemati@bhrc.ac.ir

## ۱- مقدمه

کلراید با استفاده از ضریب انتشار کلراید در بتن اشباع و حل بسته کرنک<sup>۶</sup> پیش‌بینی می‌شود [۷-۱۰]. این روش برای پیش‌بینی یون کلراید در شرایط مستغرق مناسب است، لکن در شرایط جزر و مدی با خطاهایی روبروست [۱۱]. برخی از محققان با صرف‌نظر گرفتن از عمق همرفتی (عمقی از بتن که درصد رطوبت آن در چرخه‌های تر و خشک شدن، دچار تغییر می‌شود و همیشه اشباع نیست) و استفاده از مقدار بیشینه پروفیل کلراید در انتهای عمق همرفتی و ضریب انتشار کلراید، اقدام به پیش‌بینی پروفیل یون کلراید در شرایط تر و خشک شدن کرده‌اند [۱۲ و ۱۳]. بنابراین بررسی اثر عوامل مختلف مانند نسبت آب به سیمان روی مقدار بیشینه پروفیل کلراید از اهمیت زیادی در تخمین پروفیل کلراید در بتن برخوردار بوده است.

در این مقاله چهار طرح مخلوط بتن با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۰، ۰/۴۵، ۰/۵۰، و ۰/۵۵ ساخته شده و ضریب انتقال رطوبت و ضریب انتشار کلراید آن تعیین شد. سپس سعی شده است تا با در نظر گرفتن اثر تغییرات دما و رطوبت در فرایند نفوذ یون کلراید در بتن، پروفیل یون کلراید در بتن نیمه اشباع در معرض شرایط جزر و مدی (چرخه‌های تر و خشک شدن) پیش‌بینی شود. بدین منظور یک مدل عددی تهیه شده و داده‌های حاصل از مدل، به منظور ارزیابی صحت آن با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از سایت‌های تحقیقاتی دانشگاه تهران واقع در اسکله فولاد شهر بندرعباس و اسکله کاوه جزیره قشم مقایسه شد. در نهایت با استفاده از مدل ساخته شده و نتایج آزمایشگاهی، اثر نسبت آب به سیمان روی مقدار بیشینه پروفیل یون کلراید و عمق همرفتی بتن بررسی شد.

## ۲- مکانیسم انتقال یون کلراید

در اکثر سازه‌های مورد مطالعه، اغلب مکانیسم عمده ورود یون کلراید در بتن، انتشار و مکش موئینه است [۱۴]. مکانیسم غالب ورود یون‌ها در دوره‌های کوتاه رویارویی (چند ساعت)، به‌ویژه نزدیک سطوح غیر اشباع یا اشباع جزئی، پدیده جذب سطحی است که به‌عنوان جذب آب توسط منافذ موئینه و انتقال به‌وسیله کشش موئینه در بتن تعریف می‌شود [۱۵]. در ادامه روابط حاکم بر شار انتقال دما، رطوبت و یون کلراید در بتن ارائه خواهد شد.

در طراحی سازه‌های بتنی، در نظر گرفتن عوامل مخربی که بتن باید در مدت بهره‌برداری در معرض آن قرار گیرد، ضروری است [۱]. یکی از این عوامل مخرب، نفوذ یون کلراید در بتن واقع در سواحل می‌باشد. 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 بتن نسبت به تراز آب دریا، پنج ناحیه مجاورت تعریف شده است که عبارتند از پاششی<sup>۱</sup>، جزر و مدی<sup>۲</sup>، مستغرق<sup>۳</sup>، مدفون در خاک<sup>۴</sup> و اتمسفری<sup>۵</sup> [۲]. در هر یک از این نواحی، مکانیزم نفوذ یون کلراید در بتن متفاوت است و تحت تأثیر برخی از شرایط محیطی از جمله رطوبت، دما، باد و همچنین تابش نور خورشید و یا کلیه این شرایط قرار دارد [۳].

یون‌های مهاجم مانند یون کلراید در عمق بتنی که در معرض تر و خشک شدن قرار دارد، با دو مکانیسم نفوذ می‌کند. در عمق بتن (که معمولاً نزدیک به حالت اشباع است)، یون کلراید با فرایند انتشار حرکت می‌کند؛ در صورتی که در بخش همرفتی (که منافذ بتن کاملاً اشباع نیست)، انتشار و مکش موئینه، مکانیزم ترکیبی حرکت یون‌ها می‌باشد. در بتن‌های در معرض چرخه‌های تر و خشک شدن سواحل دریا، نفوذ یون کلراید می‌تواند تا سه برابر بیشتر از سازه‌های معمولی باشد [۴]. زیرا به نظر می‌رسد مقادیر زیادی از آب حاوی یون کلراید در هنگام تر شدن بتن به داخل آن مکیده شده و هنگامی که 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 [۵ و ۶].

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 ناشی از عوامل مختلف، به‌ویژه چرخه‌های تر و خشک شدن است. هرچند تاکنون به میزان زیادی از محاسبات ساده بر اساس قانون دوم فیک استفاده شده است که در آن بتن با شرایط مستغرق فرض شده و پروفیل یون

<sup>4</sup> Soil zone

<sup>5</sup> Atmospheric zone

<sup>6</sup> Crank

<sup>1</sup> Splash zone

<sup>2</sup> Tidal zone

<sup>3</sup> Submerged zone

## ۱-۲- انتشار دما

بنابراین، بیشتر محققان [۲۵-۳۲] 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 [۳۳]، طوری که:

$$J_m = -D_w \nabla w \quad (4)$$

که  $D_w$  ضریب معادل انتقال کل رطوبت بر حسب  $m^2/s$  در حالت مایع می‌باشد. با صرف نظر کردن از اثرات ثقلی و با توجه به بقاء جرم آب در منافذ بتن، هدایت آب، رشد ساختار منافذ و افت رطوبت در اثر هیدراتاسیون [۲۲]، همچنین قانون دوم فیک، نرخ انتقال رطوبت در واحد سطح در یک جهت معین، متناسب با گرادیان غلظت آب ( $w$ ) در همان جهت است. در نتیجه، درجه اشباع منافذ خمیر سیمان یا بتن،  $w$ ، باید معادله دیفرانسیل زیر را ارضاء نماید [۱۵]:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot (J_m) \pm Q_w = 0 \quad (5)$$

که  $Q_w$  بیانگر رطوبت مصرف شده در فرایندهای هیدراتاسیون، خود خشک‌شدگی و یا تولید شده در سایر فرایندهای شیمیایی مانند کربناتاسیون است. با فرض عدم واکنش‌های فوق و مصرف یا تولید رطوبت اضافی در منافذ بتن ( $Q_w=0$ ) و همچنین ساختار جامد ریزساختار بتن، چگالی ثابت محلول منفذی و شرایط هم‌دمایی، جایگزینی رابطه (۴) در رابطه (۵) منجر به رابطه (۶) خواهد شد [۳۴]:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot (J_m) = D_w \nabla^2 w \quad (6)$$

در بتن‌های با مقاومت معمولی، کاهش در مقدار آب منفذی ( $w$ ) در اثر خود-خشک‌شدگی خیلی کم است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. این فرض حتی زمانی که فرایند هیدراتاسیون هنوز کامل نیست هم درست است. لازم به ذکر است صحت رابطه (۶) در دو مطالعه مجزا بررسی و تأیید شده است [۳۵-۳۶].

## ۳-۲- انتقال کلرید

### ۱-۳-۲- تقید کلراید

کل یون‌های کلرایدی که در داخل بتن وجود دارند و یا به داخل آن نفوذ می‌کنند، به صورت آزاد باقی نمانند. به عبارت

برای محاسبه تأثیر درجه حرارت در فرایند 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 فوریه که به صورت زیر است، به دست می‌آید:

$$q = -\lambda \nabla T \quad (1)$$

که  $q$  شار هدایت گرمایی ( $W/m^2$ )،  $\lambda$  ضریب هدایت حرارتی ( $W/m.C$ ) و  $T$  دمای بتن ( $^{\circ}C$ ) 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 آن را ثابت فرض کرد [۱۶]. مقادیر معمول هدایت گرمایی برای بتن اشباع بین  $1/4$  تا  $3/6 W/m.C$  می‌باشد [۱۷]. پروفیل دما در بتن با توجه به قانون بقای انرژی تعیین می‌شود، به طوری که:

$$\rho_c c_q \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) \rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (D_t \nabla T) \quad (2)$$

$$D_t = \frac{\lambda}{\rho_c c_q}, B_t = \frac{\zeta}{\rho_c c_q} \quad (3)$$

که  $\rho_c$  چگالی بتن ( $kg/m^3$ ) و  $c_q$  ظرفیت گرمایی ویژه ( $J/kg.C$ )، هدایت گرمایی و  $\zeta$ ، هدایت گرمایی سطح ( $j/m^2.S.C$ ) است. برای ساده‌سازی، فرض می‌شود که چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه بتن با تغییر در مقدار رطوبت و دما، ثابت باقی می‌مانند [۱۸]. محدوده رایج مقدار ظرفیت گرمایی ویژه برای بتن معمولی بین  $840$  تا  $1170 J/kg.C$  می‌باشد [۱۷].

## ۲-۲- انتقال رطوبت

جذب سطحی (موینگی) در نتیجه انتقال مویینه در منافذ بتن ناشی از کشش سطحی بین آب و ساختار متخلخل بتن می‌باشد [۱۹]. آب ابتدا روی سطح منافذ مویینه جذب می‌شود و سپس زمانی که رطوبت نسبی افزایش می‌یابد، آب تقطیر شده و منافذ را پر می‌کند و شروع به حرکت از منافذ کوچکتر به منافذ بزرگتر می‌نماید [۲۰]. مدل‌های متعددی تاکنون برای پیش‌بینی توزیع رطوبت در بتن ارائه شده‌اند [۲۱ و ۲۲]، اما به دلیل این که یون‌های مهاجم در بتن به همراه فاز مایع (آب) جابه‌جا 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 [۲۳ و ۲۴].

دیگر قسمتی از یون‌های کلراید به صورت کلراید مقید در آمده و فقط بخشی از یون‌های کلراید به صورت آزاد باقی می‌مانند [۲۹] و [۳۰]. در حقیقت بخش آزاد کلراید است که مسئول تخریب بتن در ساختمان‌های بتن مسلح 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 [۵] و [۳۱]. رابطه کلراید کل، کلراید آزاد و مقید را می‌توان مطابق رابطه (۷) نوشت [۳۲]:

$$C_t = w_e C_f + C_b \Rightarrow \frac{\partial C_f}{\partial C_t} = \frac{1}{w_e + \left(\frac{\partial C_b}{\partial C_f}\right)} \quad (7)$$

در رابطه (۷)،  $\frac{\partial C_b}{\partial C_f}$  به نام ایزوترم تقید کلراید شناخته می‌شود که از طریق آزمایشگاهی (تجربی) به دست می‌آید [۳۳]. یکی از ایزوترم‌های تقید، ایزوترم لانگمیر بوده که طبق رابطه زیر بیان می‌شود [۳۷]:

$$C_b = \frac{\alpha C_f}{1 + \beta C_f} \quad (8)$$

در رابطه فوق،  $\alpha$  و  $\beta$  ثابت‌هایی هستند که با توجه به ترکیب سیمان و مواد پوزولانی و نسبت آنها، تغییر می‌کنند. «سرجی» و همکارانش [۳۸] مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  را به ترتیب ۱/۶۷ و ۴/۰۸ برای خمیر سیمان پرتلند معمولی با  $w/c = ۰/۵$  بدست آوردند ( $C_b$  و  $C_f$  بر حسب mol/L و mmol/g سیمان بیان می‌شوند).

### ۲-۳-۲- انتشار و همرفت کلراید

پدیده انتشار کلراید در آب آزاد به صورت ریاضی می‌تواند به وسیله قانون فیک و طبق رابطه زیر بیان شود [۳۹].

$$J_c^{dif} = -w_e D_c \nabla C_f \quad (9)$$

که  $J_c^{dif}$ ، شار یون کلراید در اثر پدیده انتشار (بر حسب  $\text{kg/m}^2\text{s}$  بتن) و  $D_c$ ، ضریب انتشار بر حسب  $\text{m}^2/\text{s}$  و  $w_e$ ، مقدار آب قابل تبخیر (بر حسب  $\text{m}^3$  آب قابل تبخیر بر  $\text{m}^3$  بتن) است. همچنین  $C_f$ ، مقدار کلراید آزاد بر حسب  $\text{kg/m}^3$  محلول منفذی است. علامت منفی، بیانگر نفوذ در جهت مخالف افزایش غلظت یون کلراید می‌باشد. از طرفی زمانی که مکانیسم انتقال کلراید، جریان رطوبت در منافذ بتن باشد، شار کلراید می‌تواند طبق رابطه (۱۰) نوشته شود:

$$J_c^{adv} = u C_f \quad (10)$$

$$u = -w_e^{tot} D_w \nabla w \quad (11)$$

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.

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

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

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = -\nabla \cdot J_c = -\nabla \cdot (J_c^{dif} + J_c^{adv}) \quad (12)$$

که  $C_t$ ، غلظت کلراید کل بر حسب  $\text{kg/m}^3$  بتن،  $J_c$ ، شار کلراید بر حسب  $\text{kg/m}^2\text{s}$  و  $t$ ، زمان بر حسب ثانیه است. با توجه به این که 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 (۵) بیان نمود [۳۳]، در نتیجه:

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{\partial C_t}{\partial C_f} \frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial C_f} (C_b + w_e C_f) \frac{\partial C_f}{\partial t} = \left(\frac{\partial C_b}{\partial C_f} + w_e\right) \frac{\partial C_f}{\partial t} \quad (13)$$

با جای‌گزینی رابطه‌های (۹)، (۱۰) و (۱۳) در رابطه (۱۲) داریم:

$$\left(\frac{1}{w_e^{tot}} \frac{\partial C_b}{\partial C_f} + w\right) \frac{\partial C_f}{\partial t} = \nabla \cdot (w D_c \nabla C_f + D_w \nabla w C_f) \quad (14)$$

### ۲-۴- ضرایب انتقال

#### ۲-۴-۱- ضریب انتقال حرارت

هدایت حرارتی، قابلیت بتن برای انتقال حرارت است و مقدار جریان حرارتی عبور کرده از واحد سطح تحت گرادیان حرارتی به مقدار واحد را نشان می‌دهد. از طرفی، ضریب انتشار حرارتی، سهولت و یا صعوبت حرکت گرما در بتن را نشان می‌دهد [۴۱].  $\text{ACI 207.4}$ ، ضریب انتشار حرارت برای بتن با سنگدانه‌های آهکی و کوارتز را به ترتیب،  $۱/۳$  و  $۱/۵ \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  گزارش کرده است.

## ۲-۴-۲- ضریب انتقال رطوبت

یکی از مسائل مهم در مدلسازی توزیع رطوبت در بتن، ضریب انتقال رطوبت ( $D_w$ ) است که آن هم 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 [۱۶، ۴۰ و ۴۲]. 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 [۴۴-۴۳] و در حالت خشک شدن [۲۱، ۲۵، ۲۶ و ۴۵] پیشنهاد شده است که در بین آنها، رابطه (۱۵) و رابطه (۱۶) به ترتیب برای حالت تر شدن و حالت خشک شدن، بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

$$D_w = D_w^d e^{-\beta w} \quad (15)$$

$$D_w = D_w^s \left[ \alpha + \frac{1-\alpha}{1 + \left(\frac{1-w}{1-w_{cr}}\right)^N} \right] \quad (16)$$

که در آنها،  $D_w^s$  و  $D_w^d$  به ترتیب، ضریب انتقال رطوبت خشک در حالت ترشدگی و ضریب انتقال رطوبت اشباع در حالت خشک‌شدگی است.  $\beta$ ، ضریب حساسیت است که شدت کاهش  $D_w$  را با توجه به افزایش  $w$  نشان می‌دهد.

## ۲-۴-۳- ضریب انتشار کلراید

دانستن ضریب انتشار کلراید خمیر سیمان سخت‌شده به منظور پیش‌بینی زمان آغاز خوردگی، مهم است [۴۷]. 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 [۴۸-۴۹]. طبق پیشنهاد کمیته Life-365 انجمن بتن آمریکا [۵۰] و با توجه به مطالعات نعمتی [۵۱]، ضریب انتشار یون کلراید آزاد برای بتن ۲۸ روزه می‌تواند از رابطه (۱۷) بدست آید:

$$D_{ref,28} = 10^{-11.58 + 2.4 \frac{w}{c}} \left( \frac{m^2}{s} \right) \quad (17)$$

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 و ۵۲]:

$$D_{Cl} = D_{ref} \left( \frac{w}{c}, 28 \right) \cdot F_1^{Cl}(t_e) \cdot F_2^{Cl}(w) \cdot F_3^{Cl}(C_{Cl}) \cdot F_4^{Cl}(T) \quad (18)$$

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

$$F_1^{Cl}(t) = \left( \frac{28}{t} \right)^m \quad (19)$$

$$F_2^{Cl}(w) = \left[ 1 + \left( \frac{1-w}{1-w_c} \right)^4 \right]^{-1} \quad (20)$$

$$F_3^{Cl}(C_{Cl}) = \left[ 1 - k_{ion}(C_f) \right]^m \quad (21)$$

$$F_4^{Cl}(T) = e^{\left[ \frac{U}{R} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (22)$$

که  $F_1^{Cl}(t)$ ،  $F_2^{Cl}(w)$ ،  $F_3^{Cl}(C_{Cl})$  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 می‌باشد. همچنین  $m$  فاکتور سن و مقدار آن برای بتن با سیمان پرتلند معمولی، ۰/۲ است [۵۳-۵۴].  $w$ ، درجه اشباع منافذ  $w_c$ ، درجه اشباعی است که ضریب انتشار کلراید در آن، نصف ضریب انتشار در شرایط اشباع می‌باشد ( $w_c=0/75$ ) [۱۸]. ضمناً ثابت‌های  $k_{ion}$  و  $m$  توسط زی [۳۳] کالیبره شده و مقادیر آن‌ها به ترتیب ۸/۳۳۳ و ۰/۵ پیشنهاد شده است، زمانی که  $C_f$  نسبت به وزن بتن بیان شود.  $U$ ، انرژی فعال‌شدگی فرآیند انتشار کلراید،  $R$ ، ثابت گازها،  $T_{ref}$ ، دمای مرجعی است که در آن  $D_{ref}$  محاسبه شده است (برحسب کلوین) و  $T$ ، دمای بتن (کلوین) می‌باشد [۱۸].

## ۲-۵-۲- شرایط مرزی

### ۲-۵-۲-۱- شرط مرزی انتقال دما

حل رابطه (۲) بستگی به سطح دمای موجود در مرزهای عضو بتن مسلح دارد. انتقال دما در سطح بتن از معادله زیر به دست می‌آید:

$$J_T^S = B_T(T - T_{env}) \quad (23)$$

که  $J_T^S$ ، شار سطحی دما بر حسب m/s است.  $B_T$ ، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است و مقدار آن در تماس با هوا و آب، به ترتیب ۱۱/۶ و  $300 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$  می‌باشد [۵۵].

همچنین با توجه به این که در شرایط اتمسفری دمای محیط (هوا) در حال نوسان می‌باشد، رابطه (۲۲) [۳۱] که یک تابع سینوسی است، می‌تواند برای مدلسازی دمای هوا در نظر گرفته شود.

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

معادله ایزوترم واجذب، رابطه BET<sup>1</sup> است [58]. البته رابطه بین رطوبت نسبی و مقدار رطوبت در منافذ بتن پیچیده و غیر خطی است و می تواند طبق رابطه زیر نوشته شود.

$$W_{env} = \frac{(1-k)[1+(C-1)k]h_{env}}{(1-kh_{env})[1+(C-1)kh_{env}]} \quad (27)$$

که  $C$ ، پارامتر جذب بخار آب مدل BET؛  $k$ ، پارامتر مدل BET و  $W_{env}$ ، مقدار آب در خمیر سیمان معادل بر حسب  $gt/gt$  است. لازم به ذکر است که پارامتر  $C$ ، جذب بخار آب کل، جذب پنهان بخار آب و دما را مد نظر قرار می دهد. این پارامترهای، طبق روابط (28) تا (30) محاسبه می شوند.

$$n = \left(2.5 + \frac{15}{t_e}\right) (0.33 + 2.2w/cm) \quad (28)$$

$$C = e^{\frac{855}{T}} \quad (29)$$

$$k = \frac{(1-\frac{1}{n})C-1}{C-1} \quad 0 < k < 1 \quad (30)$$

که در آن ها،  $T$  و  $t_e$  به ترتیب رطوبت نسبی محیط، دمای بتن ( $^{\circ}K$ ) و سن هیدراتاسیون معادل (روز) می باشد.  $B_w$  می تواند با استفاده از ضخامت معادل ( $l_e$ ) بتن در مجاورت سطح واقعی در معرض  $D_w$  بتن تعیین شود؛ طوری که  $B_w = D_w/l_e$ . با مقایسه نتایج تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی، بزانت [59] گزارش کرد که مقدار ضخامت معادل محیطی،  $0.75$  میلی متر است.

### ۲-۵-۳- شرط مرزی انتقال کلراید

«ا» و همکارانش [60] به صورتی دیگر شرایط مرزی برای شار

تعریف شده انتقال کلراید را طبق رابطه زیر بیان نمودند:

$$J_{Cl}^S = B_{Cl}(C_{env} - C_s) + \bar{u}C_0 = \quad (31)$$

که  $J_{Cl}^S$ ، شار سطحی کلراید بر حسب  $m/s$  است. آکیتا [61]، مقادیر  $B_{Cl}$  را در محدود  $2/43$  تا  $4/17 \times 10^{-7} m/s$  اعلام کرد.

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

به منظور بررسی نسبت آب به سیمان روی مقدار بیشینه غلظت کلراید رویروفیل یون کلراید در بتن، چهار طرح مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان  $0/40$ ،  $0/45$ ،  $0/50$  و  $0/55$  مد نظر قرار گرفت و با استفاده از روش ترکیبی آزمایشگاهی- عددی، ضریب انتقال رطوبت و ضریب انتشار کلراید در بتن تعیین شد.

که  $T_{env}$ ،  $T_{max}$ ،  $T_{min}$  و  $t_0$  به ترتیب دمای نسبی محیط، حداکثر دمای متوسط روزانه در سال، حداقل دمای متوسط روزانه در سال، بازه زمانی آنالیز (روز) و سن بتن (روز) می باشد که با این رابطه می توان دمای محیط را در ساعات مختلف شبانه روز و در تمام روزهای سال بدست آورد.

### ۲-۵-۲- شرط مرزی انتقال رطوبت

زمانی که بتن در معرض اتمسفر قرار دارد، اختلاف رطوبت بین سطح و ریزاقلم 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 [56]. 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 گرادبان فشار مویینه قابل توجه در سطح بتن و متعاقباً یک جریان داری شدید به داخل بتن می شود [14]. بنابراین شرایط مرزی رطوبت می تواند طبق رابطه (25) نوشته شود.

$$w(x=0, t > 0) = \begin{cases} W_{env} & \text{خشک شدن} \\ 1.0 & \text{تر شدن} \end{cases} \quad (25)$$

برای انتقال رطوبت، شار جرم سطحی در رابطه زیر داده شده است [18 و 34]:

$$J_m^n = -D_w \left(\frac{\partial w}{\partial n}\right)_s = B_w(w_{sur} - w_{env}) \quad (26)$$

که  $J_m^n$ ، نرمال شار رطوبت بر سطح بتن و  $B_w$ ، ضریب انتقال رطوبت سطحی ( $m/s$ ) است [18]. همچنین  $w_{sur}$  و  $w_{env}$ ، به ترتیب مقدار  $w$  در سطح بتن و  $w$  معادل رطوبت محیط بیرونی بتن می باشند. زمانیکه سطح بتن در معرض ترشدگی قرار می گیرد،  $w_{env}$  برابر یک و زمانیکه در معرض خشک شدگی قرار می گیرد، برابر معادل رطوبت نسبی محیط با توجه به رابطه ایزوترم واجذب می باشد. ایزوترم واجذب هم دمای مصالح سیمانی، به صورت تجربی از ارزیابی مقدار رطوبت موجود در مصالحی که با رطوبت های نسبی مختلف در محیط اطراف در دمای  $20$  درجه سانتی گراد به تعادل رسیده اند، به دست می آید [57]. متعارف ترین

### ۱-۳- مصالح و طرح اختلاط

حداقل رساندن اثر سطح جداره‌های قالب روی نتایج آزمایش‌ها، سطح آزمون‌ها به ضخامت ۲/۵cm در هر وجه برش زده شد.

طراحی مخلوط‌های بتن، مطابق روش ACI 211.1 انجام شد. کلیه اجزاء تشکیل دهنده بتن شامل سیمان، مصالح سنگی، آب و فوق روان‌کننده مطابق استانداردهای ASTM فراهم گردید. مشخصات شیمیایی سیمان در جدول شماره ۱ ارائه شده است. مصالح سنگی ریزدانه و درشت‌دانه از مصالح کف رودخانه و از جنس سیلیسی-آهکی تهیه شد. وزن مخصوص حالت اشباع با سطح خشک (SSD) و جذب آب مصالح سنگی به ترتیب ۲/۵۵ و ۲/۸٪ برای ریزدانه و ۲/۵۷ و ۱/۶٪ برای درشت‌دانه‌ها بود. طرح مخلوط بتن و مشخصات بتن تازه و سخت شده به ترتیب در جداول ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. به منظور دستیابی به تراکم مناسب و پرهیز از جداشدگی مخلوط بتن سعی شد تا اسلامپ بتن در محدود ۱۰±۲/۵cm حفظ گردد. برای حصول اسلامپ ذکر شده، از فوق روان‌کننده با پایه شیمیایی پلی کربوکسیلات استفاده شد. البته با توجه به مقدار آب بیشتر مخلوط‌های بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ و ۰/۵۵، اسلامپ بیشتری حاصل گردید.

### ۱-۲-۳- تعیین ضریب انتقال رطوبت

کلیه آزمون‌ها در آون با دمای ۱۱۰±۵°C خشک شده و سپس در دسیکاتور تا دمای ۲۳±۲°C خنک شد. وزن آزمون‌ها قبل و بعد از دسیکاتور کنترل شد تا از عدم تبادل رطوبتی آزمون‌ها، اطمینان حاصل شود. سپس آزمون‌ها در آب با دمای ۲۳±۲°C مستغرق شد و میزان جذب رطوبت آنها در بازه‌های زمانی مختلف تا اشباع شدن کامل منافذ اندازه‌گیری شد.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی (درصد وزنی)

ترکیبات	سیمان نوع ۲
CaO	۶۳/۸
SiO <sub>2</sub>	۲۴/۴
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۸
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۱
SO <sub>3</sub>	۱/۵
MgO	۴/۴
K <sub>2</sub> O	۰/۷۹
Na <sub>2</sub> O	۰/۰۸
C <sub>3</sub> S	۵۵
C <sub>2</sub> S	۲۳
C <sub>3</sub> A	۵
C <sub>4</sub> AF	۹
LOI	۱/۱۲
IR	۰/۳۲

### ۲-۳- آماده‌سازی آزمون‌ها و روش آزمایش

ساخت مخلوط بتن و قالب‌گیری آنها مطابق استاندارد ASTM C192 انجام شد. بدین منظور آزمون‌های مکعبی با ابعاد ۱۵cm تهیه شده و برای کم کردن اثر هیدراتاسیون روی نتایج آزمایش‌های جذب آب و افت رطوبت، به مدت یکسال در شرایط عمل‌آوری مرطوب نگهداری شد. آزمون‌های مورد استفاده در تعیین ضریب انتشار کلراید به مدت ۹۰ روز عمل‌آوری شدند. ضمناً برای به

جدول ۲- طرح مخلوط بتن

وزن اجزا در طرح‌های اختلاط مختلف (kg/m <sup>3</sup> )				مصالح تشکیل دهنده
W55	W50	W45	W40	
۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰	سیمان نوع ۲ (کارخانه تهران)
۱۹۳	۱۷۵	۱۵۸	۱۴۰	آب (شرب تهران)
۰/۵۵	۰/۵۰	۰/۴۵	۰/۴۰	نسبت آب به سیمان (W/C)
۱۱۱۲	۱۱۴۱	۱۱۷۰	۱۱۹۵	ماسه ۰-۸mm (متوساک تهران)
۵۹۹	۶۱۴	۶۳۰	۶۴۵	شن ۹/۵-۱۹mm (متوساک تهران)
۰	۰	۰/۲۸۰	۰/۷۰۰	فوق روان‌کننده

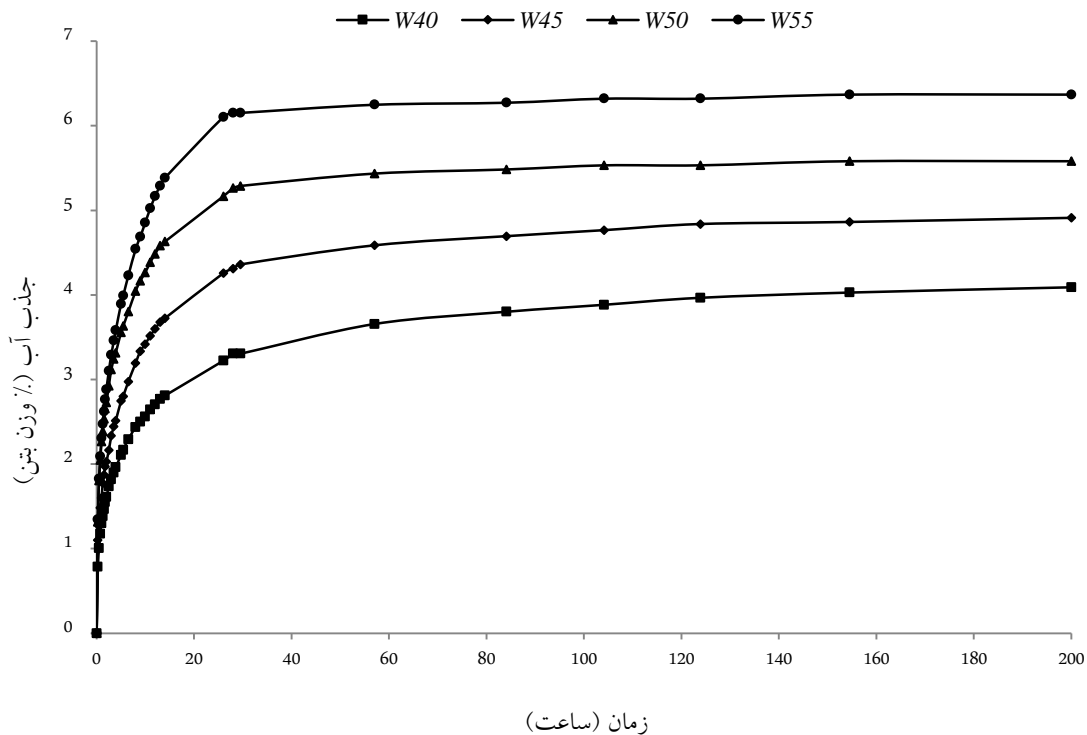
بعد از اتمام دوره جذب رطوبت، آزمون‌ها در محفظه کنترل شده با رطوبت نسبی  $30 \pm 2$  درصد و دمای  $23 \pm 2^\circ C$  و در معرض خشک شدن قرار داده شدند. در این فرایند، جرم آزمون‌ها و متعاقباً میزان افت رطوبت آن‌ها اندازه گرفته شد. نتایج جذب آب و افت رطوبت به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. میزان درصد اشباع منافذ (بخشی از منافذ که با رطوبت پر شدند) با تقسیم کردن میزان رطوبت جذب شده و یا افت رطوبت در طول زمان بر میزان رطوبت لازم برای اشباع کردن آزمون کاملاً خشک، محاسبه شد. با استفاده از مدل عددی اجزاء محدود مبتنی بر معادله دیفرانسیل ارائه شده در رابطه (۶) و روش وزن‌سنجی [۶۲] که در آن مجموع مربع اختلاف تغییرات رطوبت بدست آمده از آزمایش و نتایج بدست آمده از مدل عددی در بازه‌های زمانی مختلف، به حداقل رسانده می‌شود، ضریب انتقال رطوبت مخلوط‌های بتن با توجه به روابط ارائه شده در بخش دوم مقاله حاضر و مطابق جدول ۵ تعیین شد.

جدول ۳- نتایج آزمایش اسلامپ و درصد هوای بتن تازه برای طرح‌های مخلوط بتن

مشخصات بتن تازه	W55	W50	W45	W40
اسلامپ (cm)	۲۴	۱۸	۱۲	۱۱
درصد هوا	۱/۲	۱/۹	۲/۲	۳/۴

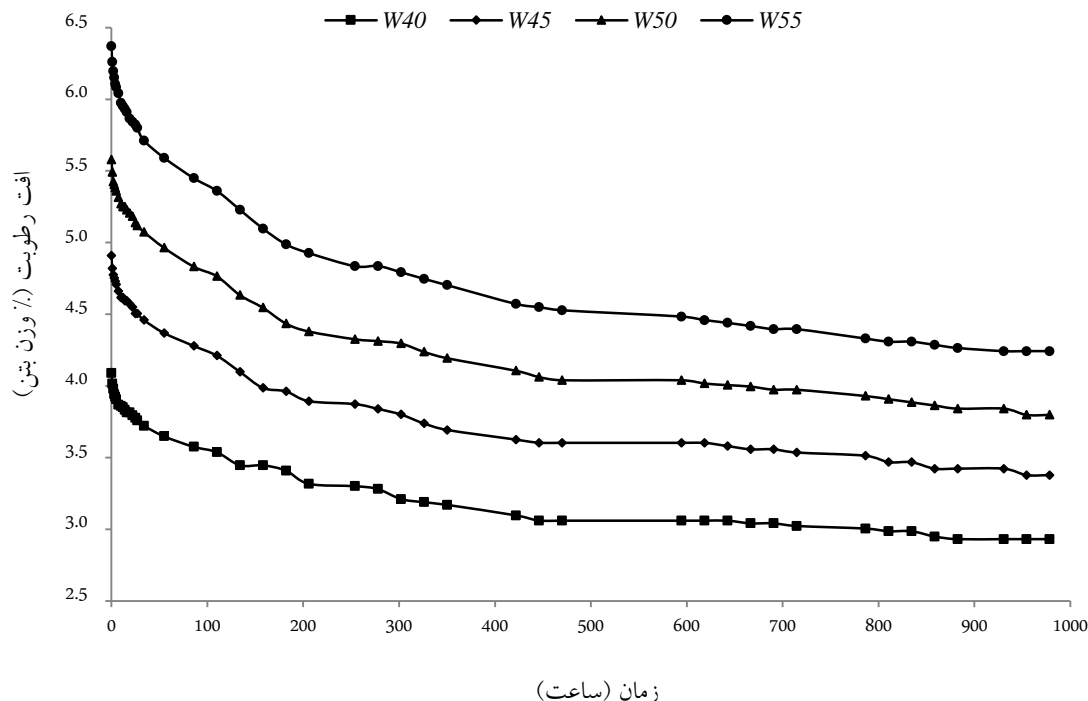
جدول ۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن سخت شده (MPa) برای طرح‌های مخلوط بتن (آزمون مکعبی)

سن بتن (روز)	W55	W50	W45	W40
۳	۹/۸	۱۲/۵	۱۷/۷	۲۲/۱
۷	۱۷/۳	۲۲/۴	۲۸/۰	۳۰/۴
۲۸	۳۱/۱	۳۴/۱	۳۹/۱	۴۲/۷
۹۰	۳۵/۲	۴۰/۳	۴۴/۶	۴۹/۰
۳۶۵	۴۱/۳	۴۵/۴	۴۸/۹	۵۱/۰



شکل ۱- جذب آب آزمون‌های  $12/5cm$  بتن با طرح مخلوط‌های مختلف در آب با دمای  $23^\circ C$





شکل ۲- افت رطوبت آزمون‌های  $12/5cm$  بتن با طرح مخلوط‌های مختلف در محفظه با دمای  $23^{\circ}C$  و رطوبت  $30\%$

مشخص، میزان غلظت کلراید در محلول اندازه‌گیری می‌شد تا از ثبات غلظت نمک اطمینان حاصل گردد.

پس از یک سال استغراق در حوضچه آب نمک، از سطح در معرض هر آزمون، در اعماق مختلف (حداقل شش عمق) پودر خشک تهیه شده و مقدار کلراید کل (محلول در اسید) پودرها در آزمایشگاه شیمی به روش تیتراسیون تعیین شد. نتایج غلظت کلراید در اعماق مختلف در جدول ۶ نشان داده شده است.

با استفاده از مدل عددی اجزاء محدود مبتنی بر معادله دیفرانسیل ارائه شده در رابطه (۱۴) و صرف‌نظر کردن از بخش همرفتی معادله مذکور با توجه به مستغرق بودن آزمون‌ها، مجموع مربع اختلاف تغییرات غلظت کلراید بدست آمده از آزمایش و نتایج بدست آمده از مدل عددی حداقل شد. در پیش‌بینی پروفیل یون کلراید در مدل عددی، روابط ارائه شده در بخش دوم مقاله و همچنین تقید کلراید، در نظر گرفته شد. متعاقباً ضریب انتشار کلراید مخلوط‌های بتن با توجه به تطابق خروجی مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی مطابق جدول ۷ تعیین گردید.

جدول ۵- پارامترهای ضریب انتقال رطوبت

مخلوط بتن	W55	W50	W45	W40
$D_w^d \times 10^{-8} (m^2/s)$	۳/۰	۳/۴	۳/۶	۳/۸
$\beta$	۱/۱	۱/۵	۲/۱	۲/۸
$D_a^s \times 10^{-10} (m^2/s)$	۳/۸	۲/۸	۲/۶	۲/۲

\* ضرایب  $\alpha$ ،  $W_{er}$  و  $N$  را به ترتیب برابر  $0/05$ ،  $0/792$  و  $6$  تخمین شده شد.

### ۳-۲-۲- تعیین ضریب انتشار کلراید

پس از ۹۰ روز عمل‌آوری آزمون‌های بتنی، پنج وجه هر آزمون با استفاده از پوشش اپوکسی در برابر نفوذ یون کلراید عایق شد. آزمون‌های پوشش داده شده پس از خشک شدن پوشش اپوکسی در آب آهک، اشباع شدند و سپس به مدت یک سال در حوضچه حاوی آب نمک (NaCl) با غلظت ۳ درصد مستغرق شدند. سرپوش حوضچه آب نمک، آب‌بندی شده تا از تبخیر آب و تغییر غلظت کلراید در محلول جلوگیری شود. در بازه‌های زمانی

جدول ۶- غلظت کلراید در اعماق مختلف آزمون‌های بتنی

مخلوط بتن	گام‌های پودرگیری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
W40	عمق (mm)	۲/۴	۷/۰	۱۳/۱	۱۹/۰	۲۵/۰	۳۱/۰	۳۷/۰	۴۳/۰
	کلراید کل	۰/۱۷۱	۰/۱۳۴	۰/۰۸۱	۰/۰۴۹	۰/۰۳۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰
W45	عمق (mm)	۲/۴	۷/۰	۱۲/۹	۱۸/۹	۲۴/۹	۳۰/۸	۳۶/۶	۴۲/۶
	کلراید کل	۰/۱۳۳	۰/۰۹۲	۰/۰۷۹	۰/۰۴۴	۰/۰۳۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۴
W50	عمق (mm)	۲/۵	۷/۰	۱۳/۰	۱۹/۰	۲۵/۰	۳۱/۰	۳۷/۰	۴۲/۹
	کلراید کل	۰/۲۰۱	۰/۱۶۷	۰/۱۱۹	۰/۰۹۰	۰/۰۶۱	۰/۰۳۴	۰/۰۱۵	۰/۰۰۴
W55	عمق (mm)	۲/۵	۷/۰	۱۲/۹	۱۸/۹	۲۵/۰	۳۱/۰	۳۶/۹	۴۲/۹
	کلراید کل	۰/۱۱۶	۰/۰۸۱	۰/۰۶۰	۰/۰۵۰	۰/۰۲۸	۰/۰۱۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۹

$$[I] + \theta \cdot \Delta t \cdot [C^{n+1}]^{-1} [K^{n+1}] \{\phi_i^{n+1}\} = \quad (۳۲)$$

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

$$[A]_{n \times n} \{\phi_i^{n+1}\}_{n \times 1} = \{b\}_{n \times 1} \quad (۳۳)$$

که در آن  $F, K, C, \Delta t$  و  $\theta$  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.

شکل ۳، الگوریتم مدل اجزاء محدود برای پیش‌بینی پروفیل یون کلراید را نشان می‌دهد. همانطوری که مشاهده می‌شود، بعد از اختصاص ویژگی‌های مصالح و مشخصات ابعادی المان بتنی، مش‌بندی و اختصاص مقادیر هر المان یا گره صورت می‌گیرد. سپس مقدار دما، رطوبت و کلراید در سه فاز مجزا در طول زمان پیش‌بینی می‌شود. لازم به ذکر است که نتایج دما در فاز آنالیز رطوبت و نتایج دما و رطوبت هر گره در فاز آنالیز توزیع کلراید به مدل ساخته شده، اختصاص می‌یابد تا اثر تغییرات دما و رطوبت در انتقال یون کلراید در نظر گرفته شود.

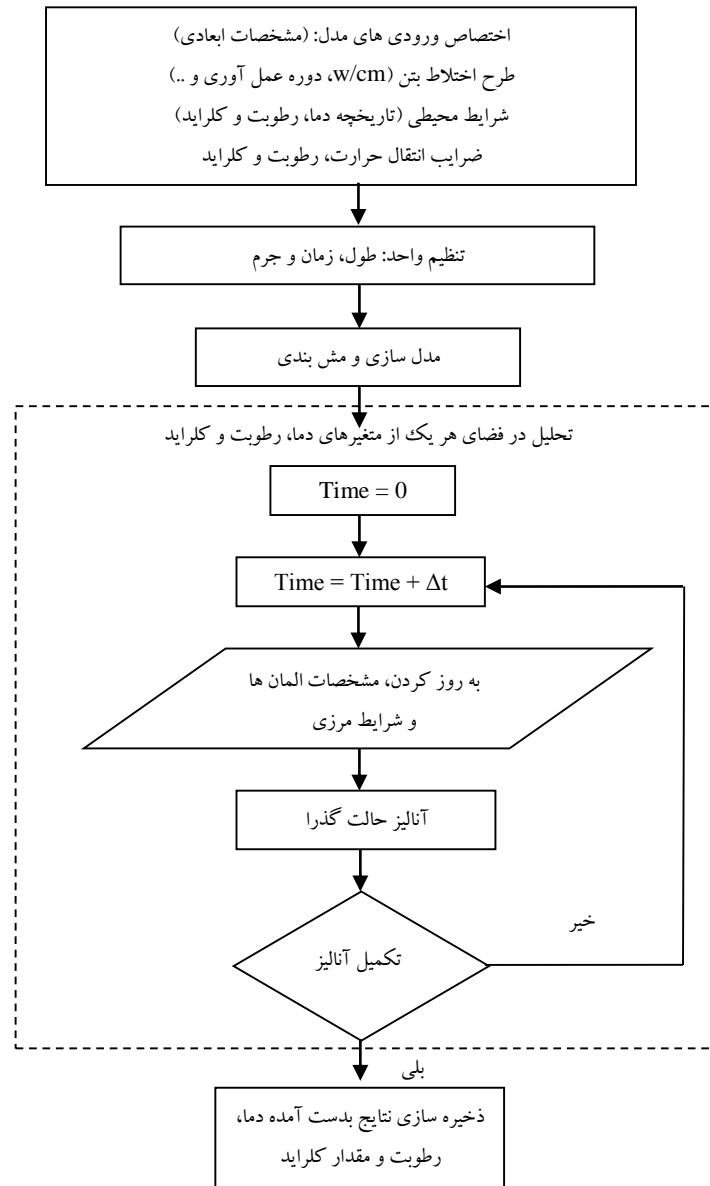
جدول ۷- ضریب انتشار کلراید

مخلوط بتن	W55	W50	W45	W40
ضریب انتشار کلراید آزاد ( $\times 10^{-11} m^2/s$ )	۴/۶	۳/۶	۲/۷	۳/۵

#### ۴- مدل‌سازی انتقال کلراید و تعریف مسأله

##### ۴-۱- روش اجزاء محدود

در روش اجزاء محدود، غلظت یون کلراید در یک جسم بی‌نهایت کوچک، به وسیله یک تابع شکل و غلظت کلراید نقطه‌ای بیان می‌شود [۶۱]. همچنین با استفاده از روش اجزاء محدود، سری معادلات دیفرانسیل غیرخطی درگیر به معادلات قابل حل تبدیل می‌شود [۶۳]. 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 دست می‌یابیم که با حل این معادله در هر بازه زمانی به مقادیر متغیر اصلی  $\{\phi_i^{n+1}\}_{n \times 1}$  مسأله خواهیم رسید:



شکل ۳- الگوریتم مدل اجزاء محدود در فضای تحلیل دما، رطوبت و کلراید

#### ۲-۴- صحت سنجی و ارزیابی

بندرعباس و نمونه دوم به مدت ۵۰ ماه در در شرایط جزر و مدی

اسکله کاوه جزیره قشم قرار داشتند. مشخصات دمایی و رطوبتی بندرعباس و قشم در جدول ۹ نشان داده شده است [۶۴]. همچنین باید متذکر شد که دمای اولیه نمونه‌ها، ۲۳ درجه سانتیگراد بوده و نمونه‌ها قبل از قرارگیری در محیط دریایی خلیج فارس (با مقدار کلراید ۲/۱۵ گرم در لیتر)، در حالت اشباع قرار داشتند.

برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده از مدل عددی، لازم است نتایج حاصل از این مدل با نتایج آزمایشگاهی برای این منظور، پروفیل‌های آزمایشگاهی یون کلراید که از آنالیز شیمیایی دو نمونه بتنی به دست آمده، مبنای ارزیابی صحت عملکرد مدل عددی ارائه شده، قرار گرفت. مشخصات نمونه‌های بتن در جدول ۸ ارائه شده است.

برای مدلسازی انتقال دما، رطوبت و کلراید، معادلات دیفرانسیل ۲، ۶ و ۱۴ با در نظر گرفتن شرایط مرزی ارائه شده در روابط ۲۳،

لازم به ذکر است که نمونه اول، به مدت پنج سال در شرایط جزر و مدی (با دو چرخه کامل در شبانه روز) در اسکله فولاد شهر

شکل ۴، نتایج مدل عددی را در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. شکل ۴-الف و ۴-ب به ترتیب مربوط به نمونه‌های بتن در بندرعباس و جزیره قشم می‌باشد. در نمودارهای شکل ۴، پروفیل خط چین، مربوط به نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از آنالیز شیمیایی نمونه‌های بتن در آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران و پروفیل خط پر، مربوط به پیش‌بینی مدل عددی ارائه شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل عددی، بیانگر توانایی مدل در پیش‌بینی پروفیل یون کلراید در بتن در شرایط جزر و مدی می‌باشد.

#### ۵- بررسی اثر نسبت آب به سیمان روی مقدار بیشه غلظت کلراید

باتوجه نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده از تخمین ضریب انتقال رطوبت و ضریب انتشار کلراید آزاد در بخش ۳، همچنین حصول اطمینان از صحت مدل عددی ساخته در بخش ۴، می‌توان پروفیل یون کلراید را در شرایط جزر و مدی بندرعباس تخمین زد. بدین منظور شرایط محیطی بندرعباس مطابق جدول ۹ و طرح‌های مخلوط بتن مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شد. پروفیل یون کلراید پیش‌بینی شده برای چهار مخلوط بتن با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۰ تا ۰/۵۵ پس از ۵ سال رویارویی با آب حاوی NaCl به غلظت ۲/۱۵ گرم در لیتر در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۰ تا ۰/۵۵، میزان نفوذ یون کلراید در بتن در عمق ۵۰ میلیمتر از ۰/۱۲۳ به ۰/۱۹۸ زیاد شده و به عبارت دیگر حدود ۶۱ درصد افزایش یافته است. همچنین مقدار بیشینه پروفیل کلراید از ۰/۳۶۹ درصد برای مخلوط W40 به مقدار ۰/۳۴۱ درصد برای مخلوط W45 کاهش یافته و سپس تا میزان ۰/۳۶۵ برای مخلوط W55 افزایش یافته است. دلیل بیشتر بودن میزان بیشینه پروفیل کلراید در مخلوط W40 نسبت به مخلوط W45، کمتر بودن مقدار ضریب انتشار کلراید مخلوط W40 نسبت به مخلوط W45 بوده است.

۲۶ و ۳۱ به روش اجزاء محدود حل شد (جدول ۱۰). مشخصات مصالح شامل ضرایب انتقال حرارت، رطوبت و کلراید با توجه به روابط ارائه شده، در فرایند آنالیز به مدل اختصاص یافت.

جدول ۸- مشخصات نمونه‌های بتن در معرض کلراید

شماره نمونه	۱	۲
نسبت آب به سیمان	۰/۴۵	۰/۴۰
عیار سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	۴۰۰	۴۰۰
C <sub>3</sub> A (% وزن سیمان)	۶/۶	۷/۰
آب قابل تبخیر (kg/m <sup>3</sup> )	۱۴۵	۱۲۰
کلراید اولیه (% وزن بتن)	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۶۴

جدول ۹- شرایط محیطی

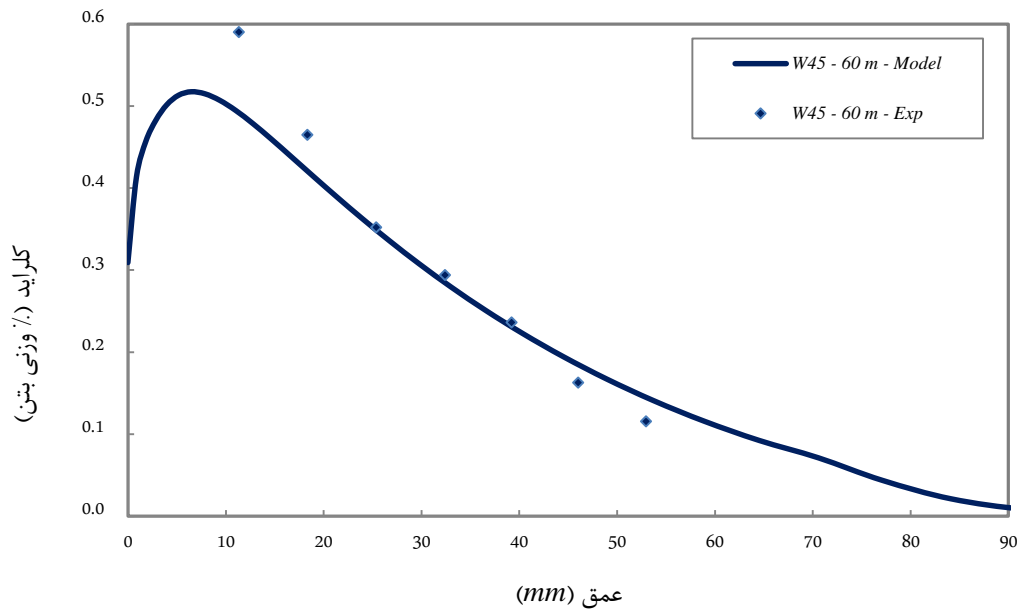
شرح	بندرعباس	قشم
$T_{max}$ °C	۱۸/۱	۱۸/۱
$T_{min}$ °C	۳۴/۵	۳۴/۶
متوسط رطوبت نسبی (%)	۶۵	۶۹

جدول ۱۰- معادلات دیفرانسیل استفاده شده در مدل‌سازی فرایند

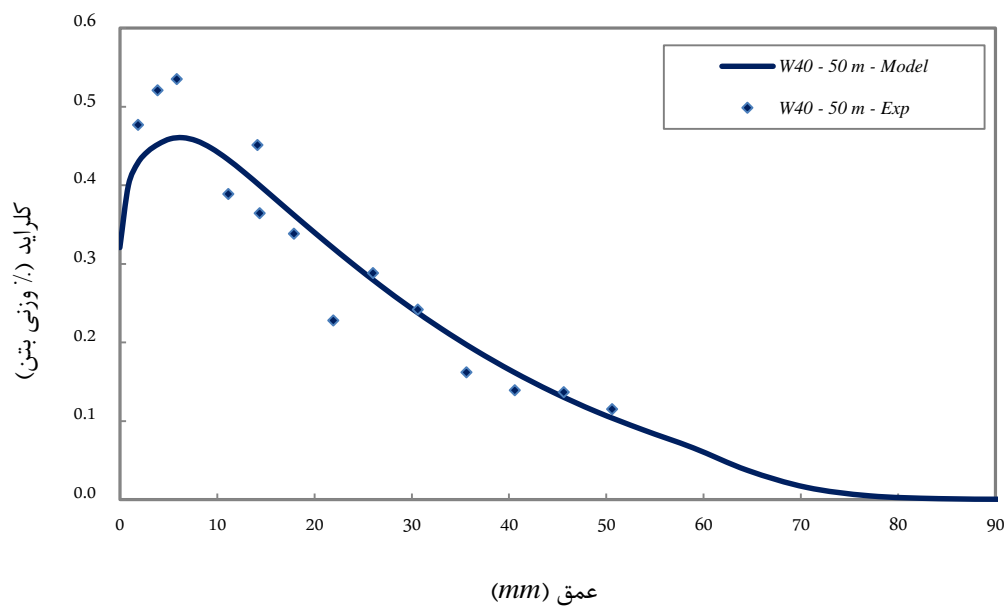
انتقال کلراید شرایط جزر و مدی

معادلات دیفرانسیل حاکم

$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(D_t \nabla T)$	$T$
$\frac{\partial w}{\partial t} = D_w \nabla^2 w$	$w$
$\left( \frac{1}{w_e^{tot}} \frac{\partial C_b}{\partial C_f} + w \right) \frac{\partial C_f}{\partial t} = \nabla \cdot (w D_c \nabla C_f + D_w \nabla w C_f)$	$Cl$
شرایط مرزی	
$J_T^S = B_T(T - T_{env})$	$T$
$J_m^n = B_w(w_{sur} - w_{env})$	$w$
$J_{Cl}^S = B_{Cl}(C_{env} - C_s) + B_w C_{env}(w_{env} - w_s)$	$Cl$



الف- نمونه نگهداری شده در ساحل بندرعباس (نمونه ۱)

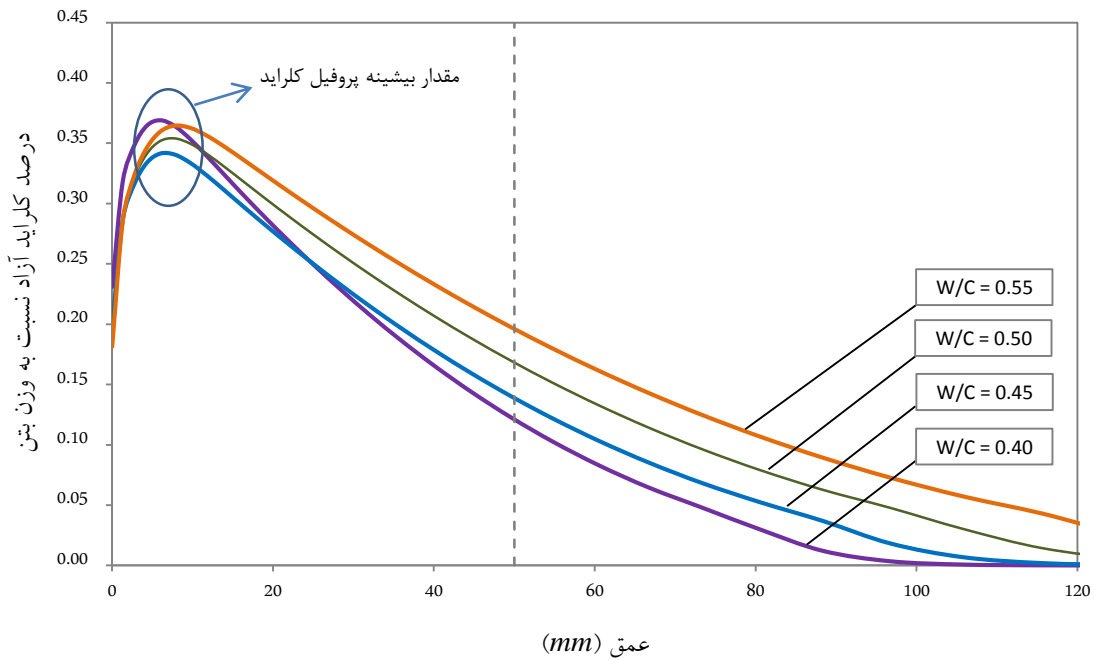


ب- نمونه نگهداری شده در جزیره قشم (نمونه ۲)

شکل ۴- مقایسه نتایج آزمایش (نمونه واقعی) و مدل عددی ۱ و ۲، پس از حدود پنج سال رویارویی

در این شرایط، به دلیل ضریب انتشار رطوبت کمتر مخلوط  $W40$ ، انتهای عمق همرفتی بتن تجمع می‌نماید. بنابراین رابطه ضریب کلراید وارد شده به دلیل پدیده همرفت تا عمق همرفتی بتن انتشار رطوبت و ضریب انتقال کلراید در میزان بیشینه غلظت کلراید روی پروفیل کلراید، تعیین کننده است. به عبارت دیگر هر چقدر میزان ضریب انتشار کلراید کمتر و ضریب انتقال رطوبت بیشتر باشد، کلراید بیشتر در انتهای عمق همرفتی تجمع کرده و مقدار بیشینه پروفیل کلراید، افزایش می‌یابد.

در این شرایط، به دلیل ضریب انتشار رطوبت کمتر مخلوط  $W40$ ، انتهای عمق همرفتی بتن تجمع می‌کند. در مخلوط‌های  $W50$  و  $W55$  به دلیل بیشتر بودن ضریب انتشار رطوبت نسبت به مخلوط  $W45$ ، کلراید بیشتری به دلیل پدیده همرفتی وارد بتن شده و در



شکل ۵- اثر نسبت آب به سیمان روی پروفیل یون کلراید، پس از حدود پنج سال رویارویی

نشده است. مقایسه داده‌های مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از سایت تحقیقاتی دانشگاه تهران در اسکله فولاد شهر بندرعباس و اسکله کاوه جزیره قشم، بیانگر توانایی مدل ارائه شده در پیش‌بینی پروفیل یون کلراید در بتن بود. همچنین با استفاده از نتایج تست‌های انجام شده در شرایط آزمایشگاهی و تحلیل مدل عددی ساخته شده برای پنج سال رویارویی بتن در شرایط جزر و مدی خلیج فارس، نتایج زیر حاصل شد:

- با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۰ تا ۰/۵۵، میزان نفوذ یون کلراید در بتن در عمق ۵۰ میلیمتر از ۰/۱۲۳ به ۰/۱۹۸ و به عبارت دیگر حدود ۶۱ درصد افزایش یافته است.

- با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۰ تا ۰/۴۵، مقدار بیشینه پروفیل کلراید کاهش می‌یابد. در صورتی که با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۵۰ تا ۰/۵۵، مقدار بیشینه پروفیل کلراید افزایش یافته است.

- با افزایش نسبت آب به سیمان، مجموع کلراید وارد شده در بتن به صورت نمایی و تا ۵۰ درصد افزایش یافته است.

- با افزایش نسبت آب به سیمان، عمق ناحیه همرفتی، اندکی افزایش داشته است.

چنانچه مقدار کلراید کل وارد شده به بتن بعد از پنج سال رویارویی در شرایط جزر و مدی با استفاده از انتگرال گرفتن زیر نمودارهای شکل ۵ اندازه‌گیری شود، به ترتیب مقادیر ۰/۰۹۹، ۰/۱۰۶، ۰/۱۲۶ و ۰/۱۴۸ درصد وزن بتن می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش نسبت آب به سیمان، میزان نفوذ کلراید در بتن به صورت نمایی و تا ۵۰ درصد افزایش یافته است. عمق همرفتی بتن برای مخلوط با نسبت‌های آب به سیمان مختلف، بین ۶ تا ۸ میلیمتر محاسبه شده است. با افزایش نسبت آب به سیمان، عمق همرفتی بتن اندکی افزایش داشته است؛ لکن این افزایش، چندان محسوس نبوده است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، معادلات حاکم بر انتقال حرارت، رطوبت و یون کلراید در بتن، بررسی شده و با استفاده از مدل‌سازی عددی به روش اجزاء محدود، توزیع حرارت، رطوبت و کلراید در بتن محاسبه شد. همچنین عوامل مؤثر بر انتقال یون کلراید در بتن مانند دما و رطوبت در نظر گرفته شد. با توجه به تعداد زیاد نمودارهای دما و رطوبت (در هر چرخه جزر و مد)، نتایج آن‌ها در مقاله حاضر ارائه

- [13] Martin-Perez B, "Service life modelling of R.C. highway structures exposed to chlorides", PhD thesis, university of Toronto, 1999.
- [14]. Nielsen EP, Geiker MR, "Chloride diffusion in partially saturated cementitious material", Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 133-138, 2003.
- [15]. Martys N, Ferraris CF, "Capillary transport in mortar and concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 5, pp. 747-760, 1997.
- [16]. Bazant ZP, Thonguthai W, "Pore pressure and drying of concrete at high temperature. Journal of the Engineering Mechanics Division", Vol. 104, No. 5, pp. 1059-1079, 1978.
- [17]. Neville A, "Properties of Concrete", third ed., Longman Scientific & Technical, 1981.
- [18]. Saetta AV, Scotta R, Vitaliani RV, "Analysis of chloride diffusion in partially saturated concrete". ACI Materials Journal, Vol. 90, No. 5, pp. 441-451, 1993.
- [19]. Conciatori D, Laferrière F, Brühwiler E, "Comprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state for real climate", Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp. 109-118, 2010.
- [20] Bazant ZP, Najjar LJ, "Drying of concrete as a nonlinear diffusion problem", Cement and Concrete Research, Vol. 1, No. 5, pp. 461-473, 1971.
- [21]. Janz M, "Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels", University of Lund, Lund Institute of technology, Division of Building Materials; Report TVBM-3076, 1997.
- [22]. Iqbal PO, Ishida T, "Modeling of chloride transport coupled with enhanced moisture conductivity in concrete exposed to marine environment.", Cement and Concrete Research, Vol. 39, pp. 329-339, 2009.
- [23]. Lockington D, Parlange J, Dux P, "Sorptivity and the estimation of water penetration into unsaturated concrete", Materials and Structures, Vol. 32, pp. 342-347, 1999.
- [24]. McCarter WJ, Watson DW, Chrisp TM, "Surface zone concrete: drying, absorption, and moisture distribution", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 13, pp. 49-57, 2001.
- [25]. Janz M, "Moisture diffusivities evaluated at high moisture levels from a series of water absorption tests", Materials and Structures, Vol. 35, pp. 141-148, 2002.
- [26]. Conciatori D, Brühwiler E, Gysler R, "Brine Absorption in Concrete at Low Temperature: Experimental Investigation and Modeling", Journal of Material in Civil Engineering, Vol. 23, pp. 846-851, 2011.
- [27]. Glouannec ZP, Salagnac P, "Estimation of moisture transport coefficients in porous materials

## ۷- تشکر و قدردانی

از انستیتو مصالح ساختمانی و آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران برای حمایت از آزمایش‌های انجام شده، تشکر می‌شود.

## ۸- مراجع

- [1]. Mehta K, "Concrete in the marine environment", Elsevier Applied Science, 1991.
- [2]. Haque MN, Al-Khaiat H, John B, "Climatic zones - A prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf", Building and Environment journal, pp. 2410-2416, 2006.
- [3]. Comite Euro-International du Beton (CEB), Bulletin 238, "New Approach to Durability Design", 1997.
- [۴]. قدوسی و همکاران، "فن آوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس، آسیب شناسی و ارزیابی آن"، چاپ اول، بهار ۱۳۷۸.
- [5]. Taheri-Motlagh A, "Durability of Reinforced Concreted Structures in Aggressive Marine Environment", Thesis presented for the degree of doctor, Delft University of Technology, 1998.
- [6]. Ghoddousi P, Ganjian E, Parhizgar T, Ramezani-pour AA, "Concrete Technology in the Environmental Conditions of Persian Gulf", BHRC Publication, No. B 283, Spring 1998.
- [7] Zhang J, Mcloughlin I, Buenfeld N, "Modelling of chloride diffusion into surface-treated concrete", Cement and Concrete Composite, Vol. 20, No. 4, pp. 253-261, 1998.
- [8] Kirkpatrick TJ, Weyers RE, Anderson-Cook CM, Sprinkel MM, "Probabilistic model for the chloride-induced corrosion service life of bridge decks", Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 12, pp. 1943-1960, 2002.
- [9] Vivas E, Boyd A, Hamilton HR, "Determination of chloride diffusion coefficient of concrete using open-circuit potential measurements", Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 4, pp. 603-609, 2004.
- [10] Shi X, Xie N, Fortune K, Gong J, "Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview", Construction and Building Materials, Vol. 30, pp. 125-138, 2012.
- [11] Guimaraes ATC, Helene PRL, "Diffusion of Chloride Ions in Unsaturated Concrete: Forecast of Service Life in a Wet-Dry Environment", ACI Special Publication, Vol. 229, pp. 175-194, 2005.
- [12] Tuutti K, "The effect of individual parameters on chloride induced corrosion", In L.O. Nilsson (Ed.), Chloride penetration into concrete structures, Goteberg, Sweden, pp. 18-25, 1983.

- [39]. Crank J, "The mathematics of Diffusion (2nd Ed). Clarendon, Oxford, 1975.
- [40]. Isgor OB, "A Durability Model for Chloride and Carbonation Induced Steel Corrosion in Reinforced Concrete Members", PhD Thesis in Carlton University, Canada, 2001.
- [41] ACI 207.4, "Cooling and insulating systems for Mass Concrete", Reported by ACI Committee 207, 2005.
- [42]. Dhir RK, Hewlett PC, Chan YN, "Near-surface characteristics and durability of concrete: Assessment and development of in situ test methods", Magazine of Concrete Research, Vol. 39, pp. 183-194, 1986.
- [43]. Navarri P, Andrieu J, "High-intensity infrared drying study: part II", Case of thin coated films. Chemical Engineering Process, Vol. 32, No. 5, pp. 319-325, 1993.
- [44]. Dietl C, Winter E, Viskanta R, "An efficient simulation of heat and mass transfer processes during drying of capillary porous hygroscopic materials. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, No. 22, pp. 3611-3625, 1998.
- [45]. Xi YP, Bazant ZP, Molina L, Jennings HM, "Moisture diffusion in cementitious materials-Moisture capacity and diffusion", Advanced Cement Based Materials, Vol. 1, pp. 258-266, 1994.
- [46]. Idiart AE, Lopez CM, Carol I, "Modeling of drying shrinkage of concrete specimens at the meso-level", Materials and Structures, Vol. 44, pp. 415-435, 2011.
- [47]. Delagrave A, Bigas JP, Ollivier JP, Marchand J, Pigeon M, "Influence of the interfacial zone on chloride diffusivity of mortars", Journal of Advanced Cement-Based Materials, Vol. 5, No. 3&4, pp. 86-92, 1997.
- [48]. Oh BH, Jang SY, "Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures", Cement and Concrete Research, Vol. 37, pp. 47-53, 2003.
- [49]. Sun YM, Liang MT, Chang TP, "Time/depth dependent diffusion and chemical reaction model of chloride transportation in concrete", Applied Mathematical Modelling, Vol. 36, pp. 1114-1122, 2012.
- [50]. ACI 365.1, "Service-Life Prediction—State-of-the-Art Report", Reported by ACI Committee 365, 2000.
- [51]. مهدي نعمتي چاري، "مدلسازی انتقال کلراید در بتن با در نظر گرفتن اثر دما و رطوبت"، رساله دکتری، دانشگاه تهران، ۱۳۹۴.
- [52]. Alexander MG, Magee BJ, "Durability performance of concrete containing condensed silica fume", Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 917-922, 1999.
- using experimental drying kinetics", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp. 205-215, 2012.
- [28]. Maekawa K, Ishida T, Kishi T, "Multi-scale modeling of concrete performance-integrated materials and structural mechanics", Journal of Advanced Concrete Technology (JCI), Vol. 1, No. 2, pp. 91-126, 2003.
- [29]. Tuutti, "Corrosion of Steel in Concrete", Swedish foundation for concrete research, Stockholm, 1982.
- [30]. Das BB, Pandey SP, "Influence of Fineness of Fly Ash on the Carbonation and Electrical Conductivity of Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE), Vol. 23, No. 9, pp. 1365-1368, 2011.
- [31]. Martín-Pérez B, Zibara H, Hooton RD, Thomas MDA, "A study of the effect of chloride binding on service life predictions", Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1215-1223, 2000.
- [32]. Ishida T, Iqbal PO, Anh HTL, "Modeling of chloride diffusivity coupled with non-linear binding capacity in sound and cracked concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 39, pp. 913-923, 2009.
- [33]. Xi YP, Bazant ZP, "Modeling chloride penetration in saturated concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 58-65, 1999.
- [34]. Akita H, Fujiwara T, Ozaka Y, "A Practical Procedure for the Analysis of Moisture Transfer within Concrete Due to Drying", Magazine of Concrete Research, Vol. 49, No. 179, pp. 129-137, 1997.
- [35]. Nemati Chari M, Shekarchi M, Sobhani J, Nemati Chari M, "The effect of temperature on the moisture transfer coefficient of cement-based mortars: An experimental investigation", Construction and Building Materials, Vol. 102, No. 1, pp. 306-317, 2016.
- [36]. Nemati Chari M, Shekarchi M, Ghods P, Moradian M, "A simple practical method for determination of moisture transfer coefficient of mature concrete using a combined experimental-numerical approach", Concrete and Computers, Vol. 18, No. 3, pp. 367-388, 2016.
- [37]. Yuan Q, Shi C, De Schutter G, Audenaert K, Deng D, "Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment - A review", Construction and Building Materials, Vol. 23, pp. 1-13, 2009.
- [38]. Sergi W, Yu SW, Page CL, "Diffusion of chloride and hydroxyl ions in cementitious materials exposed to a saline environment", Magazine of Concrete Research, Vol. 44, No. 158, pp. 63-69, 1992.



- [53]. Bamforth P, Gjorv O, Sakai K, Bantia N, "Spreadsheet model for reinforcement corrosion in structures exposed to chloride", Concrete Under Severe Condition 2: Environment and Loading, Vol. 1, pp. 64-75, 2000.
- [54]. Song HW, Shim HB, Petcherdchoo A, Park SK, "Service life prediction of repaired concrete structures under chloride environment using finite difference method", Cement and Concrete Composites, Vol. 31, pp. 120-127, 2009.
- [55] Mehta PK and Monterio PJM, "Concrete Structure, Properties and Materials". (3Ed), Prentice Hall, New Jersey, 2006.
- [56]. Mainguy M, Coussy O, Baroghel-Bouny V, "The role of air pressure in the drying of weakly permeable materials", Journal of Engineering Mechanics (ASCE), Vol. 127, No. 6, pp. 582-592, 2001.
- [57]. McCarte WJ, "Influence of surface finish on sorptivity on concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 5, pp. 130-136, 1993.
- [58]. Brunauer S, Emmett PH, Teller E, "Adsorption of Gases in Multimolecular Layers", Journal of American Chemical Society, Vol. 60, pp. 309-319, 1938.
- [59]. Bazant ZP, Najjar LJ, "Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete", Materials and Structures, Vol. 5, No. 25, pp. 3-20, 1972.
- [60]. Oh BH, Jang SY, "Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures", Cement and Concrete Research, Vol. 37, pp. 47-53, 2007.
- [61]. Han SH, "Influence of diffusion coefficient on chloride ion penetration of concrete structure", Construction and Building Materials, Vol. 21, pp. 370-378, 2007.
- [62] Samson E, Maleki K, Marchand J, Zhang T, "Determination of the Water Diffusivity of Concrete Using Drying/Absorption Test Results", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 5, No. 7, pp. 1-12, 2008.
- [63]. Zienkiewicz OC, Taylor RL, "The Finite Element Method", (4th Ed), McGraw-Hill, Berkshire, England, UK, 1997.

[۶۴]. مهدی چینی، "بررسی تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی و درصد دوده سیلیس بر آهنگ نفوذ یون کلر در بتن در محیط خلیج فارس"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۸۳..

## Chloride Transport Modeling in Concrete Subjected to Tidal Condition: Effect of Water to Cement Ratio on Maximum Chloride Concentration

Mehdi Nemati Chari\*

Faculty member of Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC)

Akbar Safary

MSc, Qazvin Islamic Azad University

Mohammad Shekarchizadeh

Professor, Department of Civil Engineering, University of Tehran

Mahdi Chini

Faculty member of Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC)

### Abstract

Chloride penetration into concrete and consequently corrosion of reinforcing steel is one of the main causes of concrete deterioration in Persian Gulf and Sea of Oman. Concrete deterioration exposed to tidal condition is very severe when compared to the atmospheric exposure condition. Therefore, it is necessary to accurately model the simultaneous moisture and chloride ingress into concrete for durability-based design of reinforced concrete structures. In this study, a finite element model was developed to numerically solve the governing differential equations of moisture and chloride transfer. Comparison of the model output with the ones obtained from experimental works in Bandar Abbas and Qeshm research sites showed that the proposed model can predict the chloride profile with good accuracy. By using the test results, the model output showed that the maximum chloride concentration decreased with increasing in water to cement ratio (w/c) from 0.40 to 0.45 and then slowly increased with increasing in w/c up to 0.55. Although, the total chloride concentration, which ingress into concrete, increased up to 50 %.

**Keywords:** Concrete, Profile, Finite Element Method, Numerical Modeling, Chloride Ion.

---

\* Corresponding Author: m.nemati@bhrc.ac.ir