

# بررسی اثرات افزایش چرخه‌های تر و خشک شدن روی نفوذ یون کلراید در بتن اشباع نشده: شبیه‌سازی شرایط پاششی

دریافت مقاله: ۱۳-۰۵-۱۳۹۷

پذیرش مقاله: ۱۲-۱۰-۱۳۹۷

مه‌دی نعمتی چاری (نویسنده مسئول)

استادیار بخش فناوری بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

m.neamti@bhrc.ac.ir

اکبر صفری

فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه از دانشگاه آزاد اسلامی (واحد قزوین)

Akbar.safary@gmail.com

بابک احمدی

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

b.ahmadi@bhrc.ac.ir

جعفر سبحانی

دانشیار بخش فناوری بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

sobhani@bhrc.ac.ir

## چکیده:

یکی از عوامل کاهش عمر مفید سازه‌های بتن مسلح که در معرض شرایط جزر و مدی و پاششی سواحل دریاها قرار دارند، ورود کلراید بیشتر در سطح بتن به دلیل چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی و افزایش آن در مجاورت میلگردهای مدفون و در نتیجه زنگ‌زدگی آنها و تخریب بتن است. از اینرو در این مقاله سعی شده است تا تأثیر تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن روزانه، بر روند نفوذ یون کلراید در بتن با استفاده از مطالعات عددی بر اساس روش اجزاء محدود بررسی شود. نتایج این مطالعه، نشان داد که میزان نفوذ یون کلراید در بتن با طرح‌های اختلاط مختلف با زیاد شدن تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن روزانه افزایش می‌یابد؛ بطوریکه غلظت کلراید نفوذ کرده در عمق  $50\text{mm}$  و غلظت کلراید حداکثر در بتنی که ۱۰ سال در معرض دو چرخه تر و خشک شدن روزانه قرار گرفته نسبت به بتنی که در شرایط مستغرق واقع گردیده است، به طور متوسط و به ترتیب  $2/4$  و  $2/0$  برابر شده است. این نسبت‌ها با افزایش تعداد چرخه‌های روزانه تا ۲۴ چرخه، به ترتیب به  $4/2$  و  $3/7$  برابر افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن روزانه تا ۱۰۰ چرخه (مشابه شرایط پاششی)، مقدار کلراید حداکثر و همچنین مقدار کلراید در عمق  $50\text{mm}$  بتن تغییرات قابل توجهی نداشته است. واژه‌های کلیدی: بتن اشباع نشده، یون کلراید، چرخه‌های تر و خشک شدن، شرایط پاششی، مدلسازی عددی

مجاورت بتن با یون‌های مهاجم، یکی از عوامل اصلی آسیب‌دیدگی سازه‌های بتن مسلح می‌باشد. یکی از این یون‌های مهاجم، یون کلراید است که در آب دریاها به مقدار زیادی موجود بوده و پس از نفوذ در بتن سازه‌های دریایی، باعث خوردگی میلگردهای مدفون در آن و تخریب سازه‌ها می‌شود [۶-۱].

یکی از عوامل مهمی که در انتقال یون کلراید در بتن مؤثر است، شرایط تر و خشک شدن متوالی بتن و تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن می‌باشد. مطالعات انجام شده، نشان داد که تر و خشک شدن، سهم قابل توجهی در افزایش انتقال یون کلراید در بتن دارد [۷-۱۰].

سازه‌های بتنی در شرایط جزر و مدی، معمولاً دو چرخه روزانه جزر و مد را تجربه می‌نمایند، لکن در شرایط پاششی، تعداد این چرخه‌ها نامشخص است و بسته به تراز قرارگیری سازه از سطح آب، سرعت باد و ارتفاع امواج، دما و رطوبت محیط، تغییر می‌نماید. از طرفی هنگامی که چرخه‌های تر و خشک شدن روزانه، زیاد می‌شود، می‌توان گفت که دیگر تنها محدود به سازه‌های دریایی نیست و نواحی قابل نوسان در مخازن آب یا فاضلاب را نیز در بر می‌گیرد [۱۱]. بنابراین به منظور طراحی سازه‌های بتنی، لازم است پروفیل یون کلراید در بتن در معرض تعداد قابل توجه چرخه‌های تر و خشک شدن، تخمین زده شود.

محمودی و همکارانش [۱۲] با شبیه‌سازی فیزیکی محیط دریا و شرایط نگهداری نمونه‌ها در آزمایشگاه، تاثیر شرایط محیطی بر مقاومت فشاری، میزان نفوذ یون کلراید و شدت خوردگی آرماتور در سنین مختلف بتن را بررسی کردند و دریافته‌اند که نمونه‌های قرار گرفته در منطقه پاششی، دارای بیشترین افت مقاومتی هستند و همچنین ناحیه پاششی دارای بیشترین مقدار نفوذ یون کلراید در داخل منافذ بتن می‌باشد که این امر باعث کاهش بیشتر مقاومت الکتریکی بتن و افزایش شدت خوردگی آرماتور شده است. یکی از محدود مدلسازی‌های انجام شده برای بررسی ناحیه پاششی و تأثیر آن بر نفوذ یون کلراید در بتن، مدل پراکاش [۱۳] می‌باشد که با استفاده از روش تفاضل محدود، عمر مفید سازه‌های بتنی در معرض نفوذ یون کلراید را پیش‌بینی کرده است. وی با استفاده از نتایج بدست آمده، دریافت که عمر مفید سازه‌های موجود در نواحی اتمسفری، جزر و مدی و پاششی به صورت زیر می‌باشد:

### ناحیه پاششی > ناحیه جزر و مدی > ناحیه اتمسفری

مطالعه تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که مطالعات عددی قابل توجه برای بتنی که در معرض چرخه‌های زیاد تر و خشک شدن مانند شرایط پاششی قرار می‌گیرند، انجام نشده 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 تر و خشک شدن تا حدود یکصد بار در شبانه روز، پروفیل یون کلراید در بتن پیش‌بینی شود و اثر افزایش چرخه‌های تر و خشک شدن در نفوذ یون کلراید بررسی شود. بدین منظور یک مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB تهیه شده و نتایج حاصل از مدل، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

### ۲- مکانیسم انتقال یون کلراید

در سازه‌های دریایی که در معرض تر و خشک شدن قرار دارند، انتشار و مکش موئینه، مکانیسم عمده ورود یون کلراید در بتن است [۱۴]. مکانیسم غالب ورود یون‌ها در دوره‌های کوتاه رویارویی (چند ساعت)، به ویژه نزدیک سطوح غیر اشباع یا اشباع جزئی، پدیده مکش موئینه بوده که به عنوان جذب آب توسط منافذ موئینه و انتقال رطوبت بوسیله کشش موئینه در بتن تعریف می‌شود [۱۵].

نعمتی و همکارانش [۱۰] با استفاده از تحقیقات مارتین پرز [۱۶]، معادلات دیفرانسیل حاکم بر فرایند انتقال رطوبت و کلراید ( $\phi$ ) در شرایط جزر ومدی را با توجه به رابطه (۱)، طبق جدول ۱ و شرایط مرزی طبق جدول ۲ دسته‌بندی نمودند.

$$\kappa \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot J^1 + \nabla \cdot J^2 = 0 \quad (۱)$$

جدول ۱- ارتباط بین رابطه (۱) و معادلات دیفرانسیل حاکم

فیزیک مسأله	$\phi$	$\kappa$	$J^1$	$J^2$
انتقال رطوبت	$w$	$l$	$-D_w \nabla w$	-
انتقال یون کلراید	$C_b + w_e C_f$	$\frac{1}{w_e^{tot}}$	$-w D_c \nabla C_f$	$-D_w \nabla w C_f$

جدول ۲- شرایط مرزی حاکم بر فرایند انتقال

فیزیک مسأله	$\phi$	$\phi_{env}$	$J^{n1}$	$J^{n2}$
انتقال رطوبت	$w_s$	$w_{env}$	$B_w (w_{env} - w_s)$	0
انتقال یون کلراید	$C_{f_s}$	$C_{env}$	$B_c (C_{env} - C_{f_s})$	$B_w (w_{env} - w_s) C_{env}$

که  $J^1$  مربوط به عبارت انتشار و  $J^2$  مربوط به عبارت همرفت است. در جداول ۱ و ۲، متغیرها عبارتند از:

$w$ : درجه اشباع منافذ بتن

$w_e$ : آب قابل تبخیر در منافذ بتن

$w_e^{tot}$ : کل آب قابل تبخیر در منافذ بتن

$w_s$ : آب قابل تبخیر در منافذ بتن در محل تماس بتن با محیط اطراف (مرز)

$w_{env}$ : آب قابل تبخیر معادل در محیط اطراف بتن

$C_f$ : کلراید آزاد در محلول منفذی

$C_b$ : کلراید مقید در بتن

$C_{f_s}$ : کلراید آزاد در منافذ بتن در محل تماس بتن با محیط اطراف (مرز)

$C_{env}$ : کلراید آزاد در محیط اطراف بتن

$\frac{\partial C_b}{\partial C_f}$ : ایزوترم تقید کلراید

$D_w$ : ضریب انتقال رطوبت ( $m^2/s$ )

$D_c$ : ضریب انتشار کلراید آزاد ( $m^2/s$ )

$B_w$ : ضریب شار سطحی انتقال رطوبت است و برابر  $B_w = \frac{D_w}{0.75 \text{ mm}}$  می‌باشد [۱۷].

$B_c$ : ضریب شار سطحی انتشار یون کلراید است که در محدود  $2/43$  تا  $4/17 \times 10^{-7} m/s$  می‌باشد [۱۸].

ضریب انتقال رطوبت در فرآیند تر شدن و خشک شدن طبق روابط (۲) و (۳) و ضرایب آن با استفاده از تحقیقات نعمتی و همکارانش [۱۹] در تحقیق حاضر در نظر گرفته شد.

$$D_w = D_w^d e^{-\beta w} \quad (۲)$$

$$D_w = D_w^s \left[ \alpha + \frac{1-\alpha}{1 + \left( \frac{1-w}{1-w_{cr}} \right)^N} \right] \quad (3)$$

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

زمانیکه سطح بتن در معرض ترشدگی قرار می‌گیرد،  $w_{env}$  برابر یک و زمانیکه در معرض خشک شدگی قرار می‌گیرد، برابر معادل رطوبت نسبی محیط با توجه به رابطه ایزوترم واجذب می‌باشد. رابطه بین رطوبت نسبی و مقدار رطوبت در منافذ بتن پیچیده و غیر خطی است و می‌تواند طبق رابطه (۴) نوشته شود [۲۰-۲۱]:

$$w_{env} = \frac{(1-k)[1+(C-1)k]h_{env}}{(1-kh_{env})[1+(C-1)kh_{env}]} \quad (4)$$

پارامترهای رابطه (۴)، طبق روابط (۵) تا (۷) محاسبه می‌شوند:

$$n = \left( 2.5 + \frac{15}{t_e} \right) (0.33 + 2.2w/c) \quad (5)$$

$$C = e^{\frac{855}{T+273}} \quad (6)$$

$$k = \frac{(1-\frac{1}{n})C-1}{C-1} \quad 0 < k < 1 \quad (7)$$

که در آنها،  $T$ ،  $t_e$ ، به ترتیب رطوبت نسبی محیط، دمای بتن ( $^{\circ}C$ ) و سن هیدراتاسیون معادل (روز) می‌باشد. در جدول ۱، رابطه کلراید آزاد و کلراید مقید با استفاده از ایزوترم لانگمیر<sup>۱</sup> و طبق رابطه (۸) بیان می‌شود [۲۲]:

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

سرچی و همکارانش [۲۳] 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  $C_f$  برحسب mol/L و mmol/g سیمان بیان می‌شوند). همچنین ضریب انتشار یون کلراید آزاد برای بتن ۲۸ روزه می‌تواند با توجه به مطالعات نعمتی [۱۰] و با استفاده از رابطه (۹) بدست آید:

$$D_{ref,28} = 10^{-11.58 + 2.4 \frac{w}{c}} \left( \frac{m^2}{s} \right) \quad (9)$$

با توجه به مطالعات انجام شده اخیر و عوامل تأثیرگذار روی ضریب انتشار یون کلراید، می‌توان رابطه زیر را برای اصلاح ضریب انتشار کلراید ارائه نمود [۲۴-۲۵]:

$$D_{cl} = D_{ref} \left( \frac{w}{c}, 28 \right) \cdot F_1^{cl}(t_e) \cdot F_2^{cl}(w) \cdot F_3^{cl}(C_{cl}) \cdot F_4^{cl}(T) \quad (10)$$

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:

$$F_1^{cl}(t) = \left( \frac{28}{t} \right)^n \quad (11)$$

$$F_2^{cl}(w) = \left[ 1 + \left( \frac{1-w}{1-w_c} \right)^4 \right]^{-1} \quad (12)$$

$$F_3^{cl}(C_{cl}) = [1 - k_{ion}(C_f)^m] \quad (13)$$

$$F_4^{cl}(T) = e^{\left[ \frac{U}{R} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (14)$$

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  $n$ ، فاکتور سن بوده و مقدار آن برای بتن با سیمان پرتلند معمولی، ۰/۲ است [۲۶-۲۷].  $w$ ، درجه اشباع منافذ و  $w_c$ ، درجه اشباعی است که ضریب انتشار کلراید در آن، نصف ضریب انتشار در شرایط اشباع می‌باشد ( $w_c=۰/۷۵$ ) [۲۴]. ضمناً ثابت‌های  $k_{ion}$  و  $m$  توسط زی [۲۸]

<sup>۱</sup> Langmuir

کالیبره شده و مقادیر آنها به ترتیب  $8/333$  و  $0/5$  پیشنهاد شده است، زمانیکه  $C_f$  نسبت به وزن بتن بیان شود.  $U$ ، 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 [۲۴].

نعمتی و همکارانش [۱۰]، صحت مدل ارائه شده را در تحقیقاتشان با استفاده از مقایسه نتایج بدست آمده در سایت تحقیقاتی دانشگاه تهران در جزیره قشم با خروجی مدل، بررسی نمودند و عملکرد مناسب این مدل را نشان دادند.

### ۳- تعریف فضای آنالیز

#### ۳-۱- مشخصات بتن

در این تحقیق، سه نسبت آب به سیمان  $0/40$ ،  $0/45$  و  $0/50$  با مقدار سیمان  $400$  کیلوگرم در متر مکعب مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات بتن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین فرض شده است مقدار آب قابل تبخیر در بتن مجموع مقدار آب قابل تبخیر در خمیر سیمان و جذب آب سنگدانه‌ها می باشد. هرچند بتن با مشخصات دیگر نیز می تواند برای آنالیز مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۳- مشخصات نمونه‌های بتن در معرض کلراید

شماره نمونه	۱	۲	۳
نسبت آب به سیمان	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۵۰
$(\text{kg}/\text{m}^3)$ عیار سیمان	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
$C_3A$ (% وزن سیمان)	۶/۶	۶/۶	۶/۶
$(\text{kg}/\text{m}^3)$ آب قابل تبخیر بتن	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵
کلراید اولیه (% وزن بتن)	۰	۰	۰
$D_w^d \times 10^{-8} (\text{m}^2/\text{s})$	۳/۸	۳/۶	۳/۴
$\beta$	۲/۸	۲/۱	۱/۵
$D_w^s \times 10^{-10} (\text{m}^2/\text{s})$	۲/۲	۲/۶	۲/۸
$\alpha$	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
$w_{cr}$	۰/۷۹۲	۰/۷۹۲	۰/۷۹۲
$N$	۶	۶	۶
$B_w \times 10^{-6} (\text{m}/\text{s})$		$D_w \times 10^{-3}/0.75$	
$D_C \times 10^{-11} (\text{m}^2/\text{s})$	۲/۱۴	۲/۸۲	۳/۷۲
$B_C \times 10^{-8} (\text{m}/\text{s})$	۳/۳	۳/۳	۳/۳

#### ۳-۲- شرایط روبارویی

در این مطالعه فرض شد بتن، در معرض آب حاوی یون کلراید با غلظت  $2/15$  درصد وزنی و به مدت ۵ و ۱۰ سال قرار گرفته است. شرایط روبارویی در دو حالت مستغرق و چرخه‌های تر و خشک شدن با ۱، ۲، ۳، ۴، ۶، ۱۲، ۲۴، ۳۰، ۳۶، ۴۲، ۴۸، ۵۴، ۶۶، ۷۸ و ۱۰۰ چرخه کامل تر و خشک شدن در شبانه‌روز، مدل شد. در هر چرخه، شش بازه زمانی برای انجام آنالیز در حالت تر شدن و شش بازه زمانی برای آنالیز در حالت خشک شدن در نظر گرفته شده است؛ بطوریکه طول بازه زمانی آنالیز با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن کاهش می‌یابد. همچنین لازم به ذکر است که دمای محیط روبارویی (آب حاوی یون کلراید و هوای پیرامون) و رطوبت نسبی محیط روبارویی (هوای پیرامون)، با توجه به شرایط آب و هوایی شهر بندرعباس در مدل ساخته شده، منظور شد (جدول ۴) [۱۱].

### ۳-۳- پارامترهای مدل

در این مقاله آنالیزهای عددی، روی یک نمونه یک بعدی بطول ۱۵۰ میلی‌متر صورت گرفت که طول المان‌های آن در نزدیکی سطح مشترک بین بتن و آب دریا، کوچک بوده و هر چه از سطح رویارویی به سمت عمق بتن پیش می‌رویم، طول المان‌ها بزرگتر می‌شوند. کوچک اختیار کردن طول المان‌ها در نزدیکی سطح رویارویی، به این دلیل است که تغییرات همزمان رطوبت و کلراید در این ناحیه با دقت بهتری محاسبه شوند. در جدول ۵، پارامترهایی ورودی مدل، نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این پارامترها با توجه به روابط ارائه شده در بخش دوم تحقیق حاضر و نتایج تحقیقات نعمتی [۱۰] انتخاب شده است.

جدول ۴- شرایط محیطی

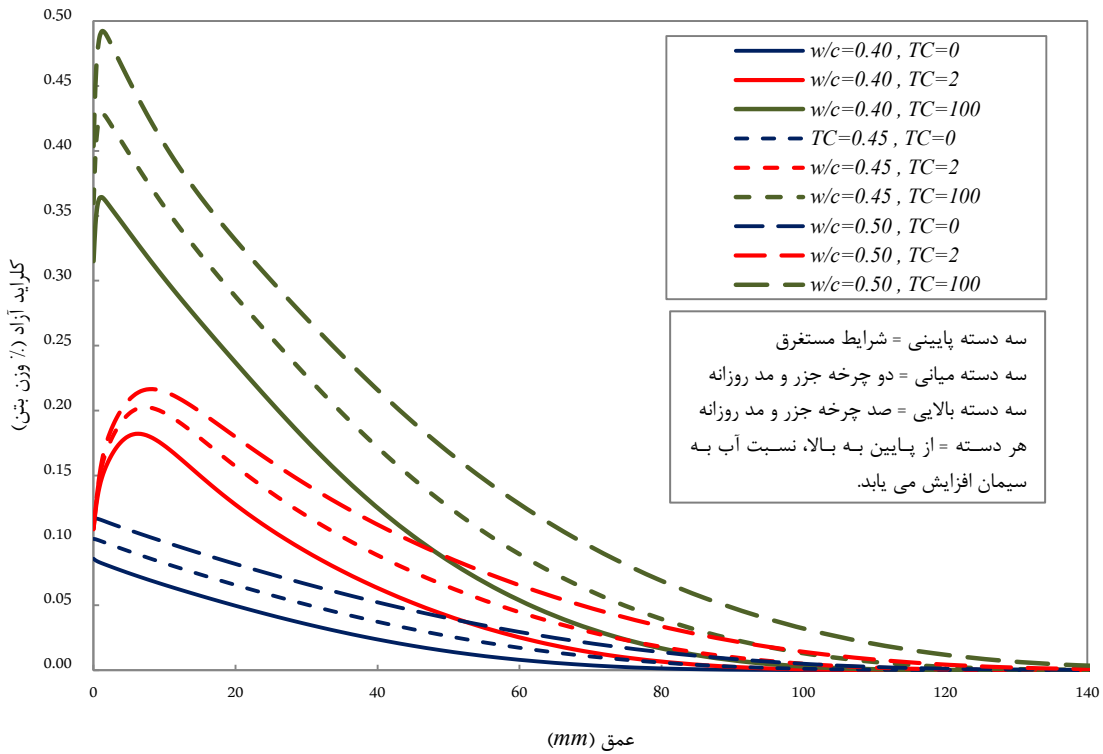
شرح	بندرعباس
متوسط دما (°C)	۲۷
متوسط رطوبت نسبی (%)	۶۵
جدول ۵- مشخصات هندسی مدل عددی	
تعداد گره	۵۱
تعداد المان	۵۰
نسبت طول المان بزرگتر به المان کوچکتر	۴
طول کل نمونه (mm)	۱۵۰

### ۴- نتایج و بحث

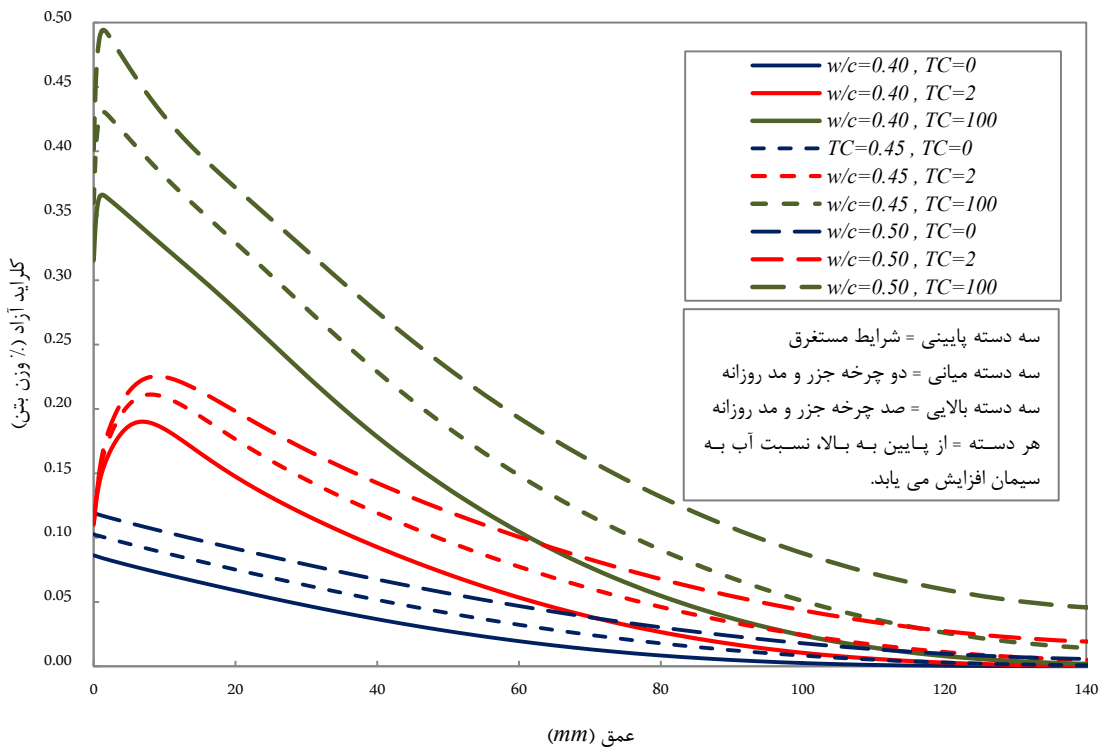
پروفیل یون کلراید برای بتن با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۰، ۰/۴۵، و ۰/۵۰ که در شرایط مستغرق، دو چرخه روزانه تر و خشک شدن و یکصد چرخه روزانه تر و خشک شدن، قرار دارد، در شکل ۱ نشان داده شده است. پروفیل‌های شکل ۱ نشان می‌دهد که با افزایش نسبت آب به سیمان، مقدار کلراید حداکثر (مقدار بیشینه کلراید) و مقدار کلراید آزاد در عمق‌های بیشتر، افزایش می‌یابد.

همچنین در شرایط یکصد چرخه روزانه تر و خشک شدن، مقدار کلراید بیشتری نسبت به شرایط جزر و مدی (دو چرخه روزانه تر و خشک شدن) و شرایط مستغرق در بتن نفوذ کرده است. نکته مهم در پدیده همرفت، این است که ابتدا باید منافذ بتن در دوره خشک شدن، خالی از رطوبت شده تا امکان ورود رطوبت حاوی یون کلراید در دوره تر شدن بعدی فراهم باشد. هر چه تعداد دوره‌های خشک شدن، بیشتر باشد، امکان ورود کلراید بیشتری در دوره تر شدن بعدی فراهم می‌آید [۹]. همچنین با افزایش زمان رویارویی از پنج سال به ده سال، کلراید بیشتری در کلیه شرایط در بتن نفوذ کرده است. نمودارهای شکل ۲، اثر تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن را بر مقدار کلراید در عمق ۵۰ میلی‌متر، کلراید حداکثر و عمقی که در آن، مقدار کلراید به مقدار بیشینه خود می‌رسد، نشان می‌دهد.

عمقی که مقدار کلراید حداکثر در آن اتفاق می‌افتد، با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن، از حدود ۱۰ mm به ۱ mm کاهش می‌یابد (شکل‌های ۲-الف و ۲-ب). دلیل کاهش عمق کلراید حداکثر، این است که با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن روزانه، مدت زمانی که سطح بتن در معرض یک دوره خشک شدن، قرار می‌گیرد، کاهش می‌یابد. بنابراین عمق همرفتی بتن نیز کم شده و در نتیجه عمق کلراید حداکثر، کاهش می‌یابد. افزایش نسبت آب به سیمان، نیز باعث افزایش عمق کلراید حداکثر می‌شود، زیرا با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۰ به ۰/۵۰، ضریب انتقال رطوبت در حالت خشک شدن، حدود ۲۷ درصد زیاد شده و در نتیجه متوسط عمق همرفتی بتن تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. گذشت زمان، تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی عمق کلراید حداکثر نداشته است؛ طوریکه با افزایش زمان رویارویی از ۵ سال به ۱۰ سال، متوسط عمق همرفتی در تعداد چرخه‌های مختلف تر و خشک شدن، حدود ۴ درصد افزایش یافته است. دلیل این امر، وابستگی بیشتر عمق همرفتی بتن به ضرایب انتقال رطوبت و تعداد چرخه‌های روزانه تر و خشک شدن است. در سنین بیشتر، عمق همرفتی بتن به مقدار تقریباً ثابتی رسیده است.

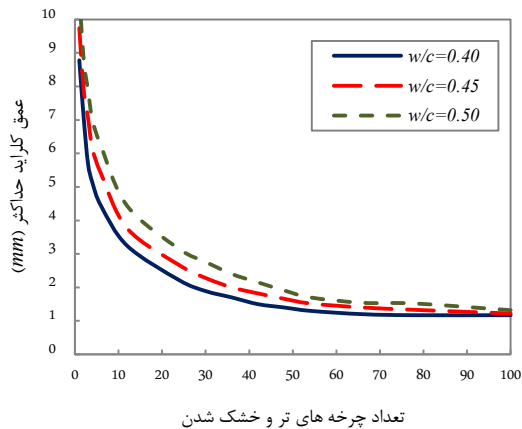


الف - بعد از پنج سال قرارگیری

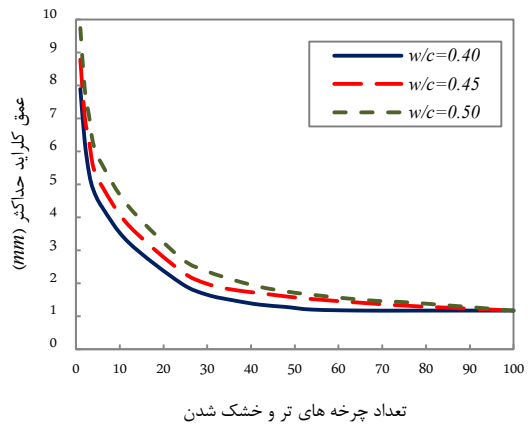


ب - بعد از ده سال قرارگیری

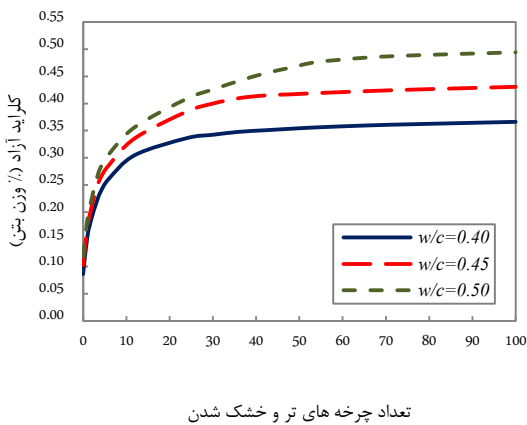
شکل ۱- پروفیل یون کلراید آزاد بعد از پنج و ده سال قرارگیری در معرض شرایط مستغرق، دو چرخه و صد چرخه جزر و مد روزانه برای بتن با نسبت های مختلف آب به سیمان



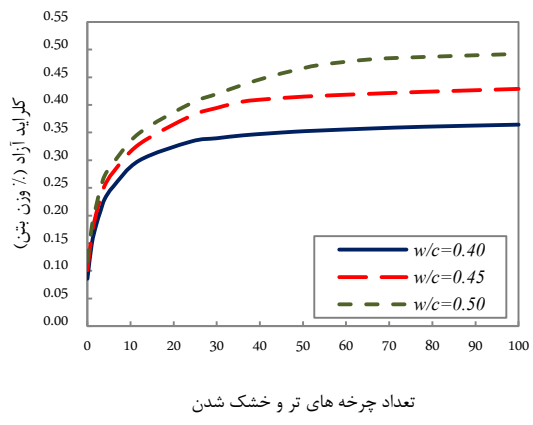
الف - عمق کلراید حداکثر بعد از ده سال



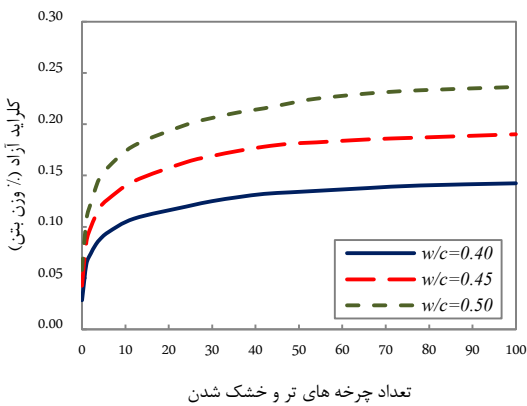
ب - عمق کلراید حداکثر بعد از پنج سال



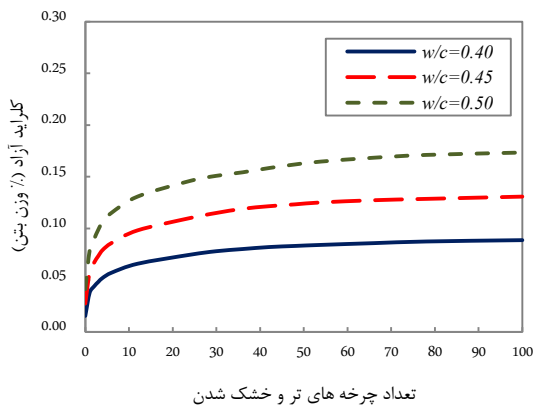
ت - غلظت یون کلراید حداکثر بعد از ده سال



پ - غلظت یون کلراید حداکثر بعد از پنج سال



ج - مقدار کلراید آزاد در عمق ۵۰ میلیمتری بعد از ده سال



ث - مقدار کلراید آزاد در عمق ۵۰ میلیمتری بعد از پنج سال

شکل ۲- بررسی اثر تعداد چرخه های تر و خشک شدن روزانه روی انتقال یون کلراید



با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک‌شدن، مقدار کلراید حداکثر، زیاد شده و در تعداد چرخه‌های بالاتر، به یک مقدار تقریباً ثابت رسیده است (شکل ۲-ب). مقدار کلراید حداکثر در شرایط جزر و مد عادی و شرایط ۲۴ چرخه روزانه تر و خشک شدن، به ترتیب حدود ۲/۰ و ۳/۷ برابر مقدار یون کلراید حداکثر در شرایط مستغرق است. علیرغم افزایش تعداد چرخه‌های روزانه از ۲۴ تا ۱۰۰ چرخه، مقدار کلراید حداکثر تنها ۰/۵ برابر مقدار کلراید حداکثر در شرایط مستغرق، افزایش یافته است (جدول ۶). دلیل این امر، کوتاه شدن مدت زمان هر دوره خشک شدن است؛ زیرا علیرغم افزایش تعداد دوره‌های خشک شدن، در نهایت مقدار کل رطوبت تبخیر شده در طول شبانه‌روز، نقش اصلی در ورود رطوبت حاوی کلراید در دوره‌های تر شدن بعدی را دارد؛ بطوریکه افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن، بعد از ۲۴ چرخه در شبانه‌روز، تغییر محسوسی در مقدار کلراید جذب شده در اثر پدیده همرفت و در نتیجه افزایش مقدار کلراید حداکثر را ندارد. البته مقدار کلراید حداکثر با افزایش زمان رویارویی، نیز تغییر محسوسی نکرده است (شکل ۲-ت). لکن افزایش نسبت آب به سیمان، باعث افزایش مقدار کلراید حداکثر در همه سنین شده است؛ زیرا افزایش ضریب انتقال رطوبت در طول دوره خشک شدن، باعث خروج رطوبت بیشتر از سطح بتن و ایجاد امکان برای ورود رطوبت حاوی کلراید در دوره‌های بعدی تر شدن می‌گردد. افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۰ تا ۰/۵۰، مقدار کلراید حداکثر را در شرایط ۱۰۰ چرخه جزر و مد تا حدود ۴۰ درصد افزایش داده است.

جدول ۶- مقایسه مقدار کلراید در چرخه‌های تر و خشک‌شدن

عمق ۵۰ میلی‌متر	میانگین نسبت کلراید در شرایط تر و خشک شدن نسبت به حالت مستغرق	تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن
۲/۴	۲/۰	۲
۲/۹	۲/۵	۴
۴/۰	۳/۷	۲۴
۴/۴	۴/۰	۴۸
۴/۷	۴/۲	۱۰۰

همچون مقدار کلراید حداکثر، مقدار کلراید در عمق ۵۰mm نیز با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن، زیاد می‌شود تا جاییکه مقدار کلراید آزاد در تعداد چرخه‌های بالاتر، به یک مقدار تقریباً ثابت می‌رسد (شکل ۲-ث و ۲-ج). ولی بر خلاف مقدار کلراید حداکثر، افزایش زمان رویارویی، باعث افزایش غلظت کلراید در عمق ۵۰mm می‌گردد. همچنین با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۰ تا ۰/۵۰، مقدار کلراید در عمق ۵۰mm تا بیش از ۷۰ درصد افزایش یافته است.

در جدول ۶، میانگین نسبت کلراید در عمق ۵۰mm و مقدار کلراید حداکثر ارائه شده است. با افزایش تعداد چرخه‌های روزانه تا حدود ۲۴ چرخه، مقدار کلراید در عمق ۵۰mm به شدت افزایش یافته است. لکن در تعداد چرخه‌های روزانه بیشتر، به دلیل عدم تغییر قابل ملاحظه مقدار کلراید حداکثر، تغییر محسوسی در مقدار کلراید در عمق ۵۰mm نیز دیده نمی‌شود. در حقیقت، مقدار کلراید در عمق ۵۰ میلی‌متر، تابعی از ضریب انتشار کلراید، مقدار کلراید حداکثر و عمق آن و همچنین زمان رویارویی است؛ بطوریکه مقدار کلراید در عمق ۵۰mm یک نمونه بتن با افزایش مقدار کلراید حداکثر و زمان رویارویی، زیاد می‌شود.

چنانچه شرایط پاششی تا حدودی مشابه شرایط تر و خشک شدن با تعداد چرخه‌های زیاد روزانه (بیش از ۲۴ چرخه) در نظر گرفته شود، می‌توان گفت که مقدار کلراید در عمق ۵۰mm، در شرایط پاششی نسبت به شرایط جزر

و مدی، بیش از ۲ برابر بوده است. همچنین مقدار کلراید در عمق  $50\text{ mm}$ ، در شرایط جزر و مدی نسبت به شرایط مستغرق، نیز حدود ۲ برابر بود. این نتیجه بیانگر اهمیت پدیده همرفتی در ورود یون کلراید در بتن می‌باشد. البته با توجه به عدم قطعیت تعداد و مدت چرخه‌های تر و خشک شدن روزانه در شرایط پاششی، پیش‌بینی دقیق مقدار نفوذ کلراید، بسیار دشوار و شاید غیر ممکن باشد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن، نسبت آب به سیمان و زمان رویارویی روی انتقال یون کلراید در بتن مطالعه شد. نتایج کسب شده به شرح زیر قابل بیان می‌باشد:

- افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن روزانه به ۲ و ۲۴ چرخه، باعث افزایش مقدار کلراید حداکثر به ترتیب به میزان  $2/0$  و  $3/7$  برابر حالت مستغرق و افزایش مقدار کلراید در عمق  $50\text{ mm}$  به میزان  $2/0$  و  $4/0$  برابر حالت مستغرق شده است. لیکن در تعداد چرخه‌های بیشتر از ۲۴ مورد، این افزایش قابل توجه نبوده است.

- افزایش زمان رویارویی، تغییر محسوسی در میزان کلراید حداکثر و عمق آن نداشته است. هرچند مقدار کلراید در عمق  $50\text{ mm}$ ، با افزایش زمان رویارویی از ۵ سال به ۱۰ سال، بطور متوسط بیش از ۴۰ درصد زیاد شده است.

- افزایش نسبت آب به سیمان، باعث افزایش مقدار کلراید حداکثر و عمق آن و در نتیجه مقدار کلراید در عمق  $50\text{ mm}$  تا ۷۰ درصد شده است.

- مقدار یون کلراید بیشتری در شرایط پاششی (با چرخه‌های تر و خشک شدن روزانه زیاد) نسبت به شرایط جزر و مدی و مستغرق در طول زمان در بتن نفوذ کرده است. هرچند نسبت مقدار نفوذ کلراید در شرایط پاششی، با توجه به متغیر بودن شرایط و تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن، قابل پیش‌بینی دقیق نمی‌باشد.

#### ۶- تشکر و قدردانی:

بدین وسیله از زحمات همکاران در بخش فناوری بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی با بت حمایت از این پژوهش تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### ۷- مراجع

1. Gjorv, O. E., Vennesland, Ø., "Diffusion of chloride ions from seawater into concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 9, No. 2, pp.229-238, (1979).
2. Costa, A., Appleton, J., "Chloride penetration into concrete in marine environment – Part I: Main parameters affecting chloride penetration", *Materials and Structures*, Vol. 32, No. 4, pp. 252-259, (1999).
3. Oh, B. H., Jang, S. Y., Shin, Y. S., "Experimental investigation of the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structures", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 55, No. 2, pp.117-124, (2003).
4. Dehwah, H. A. F., Maslehuddin, M., Austin S. A., "Long-term effect of sulfate ions and associated cation type on chloride-induced reinforcement corrosion in Portland cement concretes", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 24, No. 1, pp. 17-25, (2002).
5. Oh, B. H., Jang, S. Y., "Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures", *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 1, pp. 47-53, (2007).
6. Olajumoke, A. M., Oke, I. A., Fajobi, A. B., Ogedengbe, M. O., "Engineering failure analysis of a failed building in Osun State, Nigeria", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 9, No. 1, pp. 8-15, (2009).
7. J. Kropp, J., Hilsdorf, H. K., "Performance criteria for concrete durability", *RILEM Report 12*. Cornwall: T.J Press, (1995).
8. Akindahunsi, A., Falade, F. A., Afolayan, J. O., Oke, I. A., "Characterization and Mathematical Modeling of Chloride Diffusion in Lagos Coastal Waters", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 10, No. 3, pp. 169-177, (2010).

۹. نعمتی چاری، مهدی، محمد شکرچی زاده و مهدی چینی، "بررسی اثر ضریب انتقال رطوبت در بتن بر پایایی سازه‌های بتنی در معرض یون کلراید"، ششمین کنفرانس ملی بتن، تهران، مهر ۱۳۹۳.
10. Nemati Chari, M., Shekarchi, M., Tadayon, M.H., Moradian, M., "Prediction of chloride ingress into blended cement concrete: Evaluation of a combined short-term laboratory-numerical procedure", *Construction and Building Materials*, Vol. 162, pp. 649-669, (2018)
۱۱. چینی، مهدی، "بررسی تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی و درصد دوده سیلیس بر آهنگ نفوذ یون کلر در بتن در محیط خلیج فارس"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۸۳.
۱۲. محمودی، امین و همکاران، "بررسی دوام بتن مسلح در محیط دریایی خورنده شدید بر حسب موقعیت قرار گیری بتن نسبت به تراز آب دریا"، نشریه مهندسی دریا، سال پنجم، شماره ۱۰، پاییز و زمستان ۸۸.
13. Prakash, J., "Predicted service life of chloride transport equation using finite difference scheme", *International journal of mathematical science and applications*, Vol. 1, No. 2, pp. 451-462, (2011).
14. Nielsen, E. P., Geiker, M. R., "Chloride diffusion in partially saturated cementitious material", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 1, pp. 33-138, (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. Martin-Perez B, "Service life modelling of R.C. highway structures exposed to chlorides", PhD thesis, university of Toronto, (1999).
17. Bazant ZP, Najjar LJ, "Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete", *Materials and Structures*, Vol. 5, No. 25, pp. 3-20, (1972).
18. 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).
19. 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).
20. McCarter WJ, "Influence of surface finish on sorptivity on concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 5, pp. 130-136, (1933).
21. Brunauer S, Emmett PH, Teller E, "Adsorption of Gases in Multimolecular Layers", *Journal of American Chemical Society*, Vol. 60, pp. 309-319, (1938).
22. 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).
23. 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).
24. 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).
25. Alexander MG, Magee BJ, "Durability performance of concrete containing condensed silica fume", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 917-922, (1999).
26. 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).
27. 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).
28. Xi YP, Bazant ZP, "Modeling chloride penetration in saturated concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 58-65, (1999).

# Investigation on the Effects of Increasing in Wetting/Drying Cycles on Chloride Ingress into Unsaturated Concrete: A Simulation of Splash Condition

**Mehdi Nemati Chari**

Assistant professor, Housing and Urban Development Research Center (BHRC)  
m.neamti@bhrc.ac.ir

**Akbar Safari**

MSc in Civil Engineering, Structural Engineering from Islamic Azad University (Qazvin Branch)  
Akbar.safary@gmail.com

**Babak Ahmadi**

Assistant professor, Housing and Urban Development Research Center (BHRC)  
b.ahmadi@bhrc.ac.ir

**Jafar Sobhani**

Assistant professor, Housing and Urban Development Research Center (BHRC)  
sobhani@bhrc.ac.ir

## **Abstract**

The chloride ingress into concrete and corrosion of steel reinforcement due to wetting/drying (WD) cycles is a main issue caused to reduce the service life of reinforced concrete structures. In this paper, the effects of WD cycles on chloride penetration in concrete were studied using a finite element based numerical model. The results showed that the chloride ingress into concrete increased with increasing in daily WD cycles. The chloride concentration after 10 years at depth of 50 mm and the maximum chloride concentration of the submerged specimen were 2.4 and 2.0 times lower than the specimen exposed to 2 and 24 WD cycles, respectively. These ratios increased up to 4.2 and 3.7 when the WD cycle increased to 24 cycles. The numerical model outputs also indicated that the chloride concentration at depth of 50 mm and the maximum chloride closely tended up to a constant amount by increasing the number of WD cycle up to 100 cycles (similar to splash condition).

**Keywords:** Unsaturated concrete, Chloride ion, Wetting and drying cycles, Splash zone, Numerical modeling