

مقایسه عملکرد مدل‌های پیش‌بینی عمر مفید سازه‌های بتنی در شرایط کلیدی محیط‌های دریایی

علیرضا باقری^۱، علی تدین^۲

^۱ عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی،
a.bagheri@kntu.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی،
alitadayon@mail.kntu.ac.ir

چکیده

در حال حاضر عمده مدل‌های برآورد عمر مفید سازه‌های بتن مسلح تحت شرایط کلیدی، زمان شروع خوردگی را به عنوان پایان عمر مفید بهره‌برداری انتخاب می‌کنند. بنابراین با مقایسه غلظت کلرید در عمق موردنظر (پوشش بتن روی میلگرد) با غلظت کلرید بحرانی می‌توان زمان شروع خوردگی را تخمین زد. مدل‌های موجود جهت تخمین غلظت کلرید بتن (پروفیل یون کلرید) در طی زمان، پارامترهای ضریب‌انتشار کلرید و غلظت کلرید سطحی به همراه تغییرات آن‌ها در طی زمان، استفاده می‌کنند. به همین منظور نتایج ضریب‌انتشار و کلرید سطحی در نمونه‌های آزمایشگاهی یا سازه‌های واقعی در سنین مختلف استخراج می‌شوند.

در سال‌های اخیر مدل‌های بین‌المللی و داخلی برای پیش‌بینی زمان شروع خوردگی در بتن‌های معمولی و پوزولانی تدوین شده‌اند. مدل Life-365 در آمریکا و کانادا و مدل fib 2006 در اروپا توسط محققین و بر اساس نتایج آزمایشگاهی یا میدانی ارائه شده‌اند. همچنین دو مدل DuraPGulf (DuraQeshm) و دریایا پیدار در ایران و شرایط محیطی خلیج فارس تدوین شده‌اند. در تحقیق حاضر، عملکرد چهار مدل مذکور برای تخمین عمر مفید سازه‌های بتن مسلح بدون استفاده از پوزولان یا حاوی یک نوع پوزولان مقایسه شده‌اند. همچنین با استفاده از روش تفاضل محدود، حل عددی پدیده نفوذ یون کلرید در بتن در شرایط خلیج فارس صورت گرفت. به همین منظور بررسی آزمایشگاهی تعیین ضریب‌انتشار و تغییرات زمانی آن برای بتن‌های بدون پوزولان، حاوی یک پوزولان (دوجزئی) و حاوی دو پوزولان (سه‌جزئی) انجام شد.

واژه‌های کلیدی

مدل پیش‌بینی، عمر مفید، کلرید، دوده سیلیسی، خاکستر بادی، زمان شروع خوردگی

مقدمه

وقوع خوردگی زودرس و تخریب سریع و هزینه‌بر سازه‌های بتن مسلح باعث شد که در دهه ۷۰ میلادی، مفاهیم و مقدمات اولیه در دوام و عمر مفید مطرح شود. پیش‌بینی خوردگی میلگردها در سازه‌های بتن مسلح و دیگر خرابی‌های بتن از مرحله ارائه طرح مخلوط‌های بتن و در زمانی که مصالح و نسبت اجزاء انتخاب و محاسبه می‌شوند، آغاز می‌گردد [۱]. برای پیش‌بینی عمر مفید سازه‌های بتن مسلح معمولاً به صورت محافظه‌کارانه، شروع خوردگی میلگردها، ملاک پایان زمان شروع خوردگی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با مدلسازی نفوذ کلرید به درون بتن، زمان رسیدن به غلظت بحرانی در سطح میلگرد مشخص می‌شود و به عنوان زمان شروع خوردگی در نظر گرفته می‌شود [۱]. هر مدل نفوذ کلرید، ورودی‌های مختلفی از جمله ویژگی‌های بتن، اجزای آن و شرایط محیطی را دریافت می‌کند. همچنین هر مدل مبتنی بر یک فرآیند مشخص از انتقال کلرید در بتن است.

سازه بتنی می‌تواند در شرایط مختلفی در معرض تهاجم یون کلرید قرار گیرد. ساده‌ترین شرایط محیطی دریایی، ناحیه مستغرق است که مکانیزم نفوذ کلرید به درون بتن، پدیده انتشار می‌باشد. شرایط محیطی دیگر پیچیدگی بیش‌تری دارند. به عنوان مثال تر و خشک شدن مکرر سطح بتن در منطقه پاشش یا ناحیه جزرومدی، ساز و کار انتقال کلرید را تغییر می‌دهند. شایان ذکر است که غلظت یون کلرید آب‌دریا به علت تغییرات دما و یا محل رویارویی، متغیر است [۱]. اما از آنجایی که در نظر گرفتن ساز و کارهای مختلف نفوذ و شرایط محیطی مختلف به همراه تأثیرات دما، رطوبت و حتی موجودات دریایی در سطح بتن کار دشواری است، بنابراین مدل‌های پیش‌بینی معمولاً با در نظر گرفتن فرضیات ساده ساز تهیه می‌شوند و عمدتاً با نتایج سازه‌های واقعی اصلاح می‌شوند. هر چه فرضیات ساده‌کننده بیشتر باشند احتمال خطا در تخمین بیش‌تر می‌شود. از طرفی مدل‌ها برای کالیبره شدن نیاز به آزمون‌های قرار گرفته در معرض شرایط واقعی دارند [۲].

مدل سازی نفوذ کلرید و زمان شروع خوردگی

عموماً مدل‌های برآورد مقدار نفوذ کلرید در سازه‌های بتن مسلح در طی زمان، بر پایه معادلات دیفرانسیل قانون فیک برای انتشار استوار می‌باشند. قوانین انتشار فیک علاوه بر محبوبیت بین محققین، از علل فیزیکی، ریاضی و تجربی مناسبی در تخمین رفتار بتن در برابر نفوذ یون کلرید برخوردار می‌باشد. در این تحقیق نیز با استفاده از قانون دوم فیک و معادله دیفرانسیل انتشار یونی به حل و تخمین پروفیل یون کلرید پرداخته شده است. بنابراین در زیر علاوه بر تشریح ساختار مدل‌های موجود، چهار مدل بین‌المللی و داخلی معرفی شده‌اند.

روش‌های مدل سازی

در مدل‌های مبتنی بر روش حل تحلیلی معادله دیفرانسیل انتشار، ضریب انتشار ظاهری استفاده می‌شود. همچنین معمولاً فرض می‌شود که کلرید اولیه صفر است. معادله دیفرانسیل حاکم بر پدیده نفوذ از طریق انتشار یونی به صورت زیر است :

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

حل ریاضی قانون دوم فیک در محیط نیمه‌بینهایت در شرایط ناپایدار و در نظر گرفتن مقیدسازی کلرید به صورت زیر است [۳] :

$$C(x, t) = C_s + (C_i - C_s) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right)$$

در این روابط، D_a ، x ، t ، C ، C_s ، C_i و $\operatorname{erf}()$ به ترتیب ضریب انتشار کلرید ظاهری، عمق بتن، سن رویارویی، کلرید سطحی، کلرید اولیه و تابع خطا می‌باشند. همانطور که از روابط فوق مشخص است، برای تعیین غلظت یون کلرید در بتن در طی زمان به دو پارامتر ضریب انتشار ظاهری و کلرید سطحی به عنوان ورودی‌های اصلی نیاز می‌باشد.

برای استفاده از این رابطه باید ورودی‌ها توسط روش‌های آماری یا تحلیلی بدست آورده شوند. بنابراین یکی از این روش‌ها به این صورت است که از همین رابطه برای استخراج پارامترهای ضریب انتشار ظاهری (D_a) و کلرید سطحی (C_s) در سازه‌ها یا آزمون‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. برای این منظور مقدار کلرید در عمق مختلف اندازه‌گیری می‌شود و سپس با برازش غیرخطی، این دو پارامتر بدست می‌آید [۳].

از طرف دیگر روش عددی، می‌تواند با استفاده از ضریب انتشار لحظه‌ای، پروفیل یون کلرید را تخمین بزند. روش‌های عددی مختلفی برای حل معادله دیفرانسیل انتشار ارائه شده است که روش تفاضل محدود یک‌بعدی رایج‌ترین روش مورد استفاده است. برای حل تفاضل محدود معادله دیفرانسیل انتشار می‌توان با استفاده از روش θ ، که پیشرو برای زمان است، استفاده کرد. در این صورت برای برای معادله دیفرانسیل انتشار به صورت زیر خواهد بود [۴] :

$$\frac{C_i^{t_{k+1}} - C_i^{t_k}}{\Delta t} = D_a \theta \left[\frac{C_{i-1}^{t_{k+1}} - 2C_i^{t_{k+1}} + C_{i+1}^{t_{k+1}}}{\Delta x^2} \right] + D_a (1 - \theta) \left[\frac{C_{i-1}^{t_k} - 2C_i^{t_k} + C_{i+1}^{t_k}}{\Delta x^2} \right], \quad 0 < \theta < 1$$

در صورتی که در رابطه بالا، $\theta=0$ قرار دهیم، روش FTCS (پیشرو زمانی و مرکزی مکانی)، که برای حالت مرکزی در عمق بتن (فاصله از سطح) و پیشرو در زمان است، حل عددی صریح می‌باشد و گسسته‌سازی آن به صورت زیر خواهد بود:

در این روش باید کنترل پایداری حل عددی صورت گیرد. همچنین با توجه به تک‌مرحله‌ای بودن حل، کنترل شرایط مرزی نیز باید انجام شود. علاوه بر فرض شرایط اولیه، همچنین شرایط مرزی برای حل آن باید از طریق یکی از دو شرایط زیر تأمین گردد:

- شرایط مرزی دیرخلة: غلظت یون کلرید در سطح بتن و یا در انتهای قطعه بتنی مقدار مشخصی دارد.
- شرایط مرزی نیومن: تغییرات غلظت کلرید نسبت به عمق قبلی یا بعدی مقدار معینی باشد. به عنوان مثال در سطح بتن یا انتهای قطعه بتنی مشتق غلظت کلرید در مکان برابر صفر باشد.

عوامل مؤثر در انتشار کلرید

اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که ضریب‌انتشار در طول زمان کاهش می‌یابد. یکی از توجیحات این کاهش، پیشرفت هیدراسیون و افزایش تقید کلرید در طول زمان است.

یکی از رایج‌ترین روابطه که وابستگی ضریب‌انتشار به سن را نشان می‌دهد به صورت زیر است [۳]:

$$D_a(t - t_{ex}) = D_0 \left(\frac{t_0}{t - t_{ex}} \right)^\alpha$$

که در این رابطه، α ، عامل زمان، t_{ex} ، سن رویارویی و D_0 ، ضریب‌انتشار ظاهری در زمان t_0 است.

حل تحلیلی معادله دیفرانسیل انتشار با فرض ثابت بودن ضریب‌انتشار در طول زمان است. بنابراین از ضریب‌انتشار میانگین در طول کل زمان رویارویی استفاده می‌شود. بنابراین D_a میانگین ضریب‌انتشار ظاهری در یک دوره زمانی است. در حل عددی معادله دیفرانسیل انتشار، ضریب‌انتشار ظاهری، متغیر زمانی است و در سنین مختلف، مقدار متفاوتی دارد. همچنین ضریب‌انتشار کلرید به دما و شرایط رطوبتی نیز وابسته است.

پارامترهای مهم دیگر که به عنوان ورودی در مدلسازی نفوذ یون کلرید موردنیاز می‌باشد، مقدار کلریدسطحی است. که با گذشت زمان افزایش پیدا می‌کند و پس از مدت زمان مشخصی به مقدار نسبتاً ثابتی می‌رسد. مطالعات زیادی در رابطه با میزان کلریدسطحی در شرایط واقعی انجام شده است. به صورت عمده کلریدسطحی به غلظت کلریدمحیطی، شرایط رویارویی، رطوبت نسبی، دما و نهایتاً کیفیت سطحی بتن وابسته است [۵]. از کلریدسطحی وابسته به زمان در حل تحلیلی تابع خطا قانون دوم فیک نمی‌توان استفاده کرد. بنابراین برای چنین شرایطی، نمی‌توان از این حل ریاضی استفاده کرد و معادلات اصلاح‌شده ارائه شده است [۶].

برای تعیین زمان شروع خوردگی و برآورد عمر مفید، دانستن غلظت کلریدبحرانی لازم است زیرا این غلظت از یون کلرید در مجاورت فولاد باعث از بین رفتن لایه انفعالی می‌شود و با تحقق شرایط کافی، خوردگی آغاز می‌شود. غلظت کلریدبحرانی به موارد متعددی همچون نوع سیمان، نسبت آب به سیمان، میزان C3A سیمان، پوزولان‌ها، دما و رطوبت نسبی بستگی دارد [۷].

معرفی مدل‌های موجود

چهار مدل مطرح در خارج و داخل ایران به صورت اجمالی به صورت زیر معرفی می‌شوند. مدل‌های Life-365 و fib به ترتیب در امریکا و اروپا تهیه شده‌اند. مدل DuraPGulf توسط انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران و با الگو از مدل امریکایی و مدل دریاپایدار توسط مرکز تحقیقات دوام دانشگاه امیرکبیر و اصلاح‌شده مدل اروپایی برای شرایط خلیج فارس ارائه شده‌اند [۸].

مدل Life-365

این مدل توسط کمیته ACI-365 تهیه شده است. برآورد عمر مفید این مدل برای دو مرحله زمان شروع خوردگی و گسترش خوردگی است.

پیش بینی زمان آغاز خوردگی در این مدل، زمان رسیدن مقدار یون کلرید به مقدار بحرانی، در سطح میلگرد، تخمین زده می‌شود. به این منظور در این مدل از روابط قانون انتشار فیک استفاده می‌شود.

مقادیر مربوط به Dref (ضریب‌انتشار مرجع) و m (عامل توانی تغییرات زمانی ضریب‌انتشار) بر اساس جزئیات طرح مخلوط (مانند نسبت آب به موادسیمانی، نوع و مقدار موادسیمانی) برای انجام محاسبات انتخاب می‌گردند. برای آنکه مقدار ضریب انتشار در طی زمان بیش از اندازه کاهش نیابد، رابطه تخمین این ضریب تنها تا ۲۵ سال معتبر است و مقدار مربوط به ۲۵ سال (D25) پس از

این مدت ثابت فرض می‌گردد.

در این مدل اثر دما در ضریب انتشار منظور گردیده است و شرایط قرارگیری در محیط کلریدی (مانند سرعت انباشته شدن یون کلرید بر سطح بتن و حداکثر مقدار آن و زمان لازم برای رسیدن به مقدار حداکثر) بر اساس نوع سازه (مانند عرشه پل و پارکینگ)، شرایط محیطی (مانند محیط دریایی یا نمکهای یخ‌زدا) و موقعیت جغرافیایی تعیین می‌گردد. این مدل قادر به در نظر گرفتن بتن‌های دوجزئی حاوی دوده سیلیسی، خاکستر بادی و سرباره و بتن‌های سه‌جزئی حاوی خاکستر بادی و سرباره در بتن می‌باشد. همچنین تخمین زمان آغاز خوردگی به صورت قطعی و احتمالاتی انجام می‌شود. هر چند در این مدل قابلیت انتخاب کلریدبحرانی وجود دارد اما به صورت پیش‌فرض، برای تمامی نسبت‌های آب به سیمان و پوزولان‌های مختلف، میزان کلریدبحرانی (۰/۰۵٪ وزن بتن) فرض شده است. همچنین کلرید اولیه برای همه مخلوط‌ها و شرایط مختلف، همواره صفر در نظر گرفته می‌شود.

مدل 2006 fib

فدراسیون بین‌المللی بتن (fib) در بولتن شماره ۳۴ به ارائه روش‌ها و الزاماتی برای مدل‌سازی عمر مفید سازه‌های بتنی در شرایط مخرب گوناگون پرداخته است. در قسمت دوم پیوست B این آیین‌نامه، برای عمر مفید سازه‌های بتنی در زمینه‌های خوردگی آرماتور ناشی نفوذ یون کلرید، مدلی احتمالاتی ارائه شده است.

این مدل با در نظر گرفتن ضریب انتشار ظاهری لحظه‌ای مرجع و تبدیل آن به ضریب‌انتشار ظاهری میانگین، به تخمین یون کلرید انتشار یافته به درون بتن بدون ترک به صورت یک‌بعدی می‌پردازد.

این مدل از سه بخش عمده تشکیل شده است. بخش اول، معادلات تعیین کننده ضریب‌انتشار ظاهری میانگین می‌باشد که بر اساس آزمایش تسریع شده مهاجرت یون کلرید، شرایط آب و هوایی، مشخصات مخلوط بتن و زمان، تخمین زده می‌شود. بخش دوم، معادله تعیین کننده میزان یون کلرید در عمق مشخص بر حسب زمان است که بر اساس معادله انتشار فیک و ضریب انتشار ظاهری میانگین می‌باشد. بخش سوم این مدل تعیین کننده احتمال وقوع خوردگی در زمانهای مختلف و تعیین زمان آغاز خوردگی بر اساس تئوری قابلیت اعتماد می‌باشد. رابطه مقایسه کلریدبحرانی و واقعی، مبتنی بر قانون دوم فیک و با استفاده از حل تحلیلی به صورت زیر است:

$$C_{crit} = C(x = a, t) = C_{s,\Delta x} - (C_{s,\Delta x} - C_i) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{a - \Delta x}{2\sqrt{D_{app,C} \cdot t}}\right)$$

ضریب‌انتشار این مدل با توجه به ضریب‌انتشار مرجع ۲۸ روزه آزمایش RCMT و دما و سن بتن محاسبه می‌شود:

$$D_{app,C} = k_e k_t \cdot A(t) \cdot D_{RCM,0}, \quad k_e = \exp\left(b_e \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}}\right)\right), \quad A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a$$

در این روابط،

C_{crit}	غلظت کلرید بحرانی
$C_{s,\Delta x}$	غلظت کلرید در عمق Δx در زمان t
A	ضخامت پوشش بتن روی میلگرد
Δx	ضخامت لایه‌ای از سطح بتن است که در آن عمق، فرآیند نفوذ یون کلرید در بتن از قانون دوم فیک پیروی نمی‌کند.
k_t	ضریب محیطی = ۱

همچنین عامل توانی تغییرات زمانی ضریب‌انتشار کلرید بر اساس اندازه‌گیری‌های واقعی در سازه‌های بتنی و در شرایط مختلف رویارویی بدست آمده است.

در این مدل، مقدار کلریدسطحی در طول زمان به صورت محافظه‌کارانه ثابت و برابر کلریدسطحی حداکثر فرض شده است.

مدل DuraQeshm و DuraPGulf

این دو مدل، در انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران بر اساس نتایج آزمایش در سایت پایایی بندرعباس و قشم تهیه و ارائه شده است. این مدل علاوه بر در نظر گرفتن طرح مخلوط بتن، شرایط محیطی را نیز در نظر می‌گیرد و بر پایه حل عددی معادلات دیفرانسیل قانون انتشار فیک بنا شده است. این مدل قادر به بررسی عملکرد بتن کنترل و بتن‌های دو جزئی حاوی دوده سیلیسی، متاکائولن و ژئولیت می‌باشد.

ضریب انتشار کلرید میانگین برای شرایط رویارویی مختلف (مغروق، پاشش، جزر و مد، اتمسفر و خاک) و بر اساس تغییرات زمانی $f(t)$ ، دما $f(T)$ و رطوبتی $f(h)$ با استفاده از نتایج میدانی ۵ سال بدست آمده است :

$$D_u = D_c f(t) f(T) f(h)$$

کلرید سطحی بر اساس نتایج بدست آمده برای تمامی طرح مخلوطها و شرایط رویارویی پاشش و جزر و مد و همه شرایط جغرافیایی، کلرید سطحی حداکثر برابر ۰/۸٪ وزنی بتن پس از ۱۰ سال می‌باشد. البته از نحوه تغییرات کلرید سطحی در طی زمان اطلاعاتی در دسترس نیست.

این مدل به جای استفاده از ضریب انتشار لحظه‌ای در حل عددی برای تخمین پروفیل کلرید، از ضریب انتشار میانگین استفاده می‌کند که منطقی به نظر نمی‌رسد.

مدل دریا پایدار

این مدل، اصلاح شده مدل fib برای منطقه خلیج فارس می‌باشد و نرم‌افزاری برای آن طراحی شده است. همچنان تحقیقات برای ارتقای این مدل در جریان است. از نتایج ارزیابی پنج سازه در خلیج فارس در طراحی این مدل استفاده شده است. در این مدل، نحوه محاسبه ضریب انتشار ظاهری یون کلرید و مقدار کلرید سطحی، با توجه به داده‌های آماری سایت، اصلاح شده است. در این مدل، ضریب انتشار ظاهری بر اساس نتایج آزمایش مهاجرت سریع کلرید (RCMT)، در سن ۲۸ روز محاسبه می‌شود. برای تخمین ضریب انتشار ظاهری می‌باشد و معادلات تا ۲۵ سال صادق است و از آن پس برای جلوگیری از اتخاذ مقادیر غیر واقعی، ضریب انتشار، ثابت فرض شده و با مقدار متناظر با سن ۲۵ سال باقی خواهد ماند (احمدی، ۱۳۹۳). ثابت در نظر گرفتن ضریب انتشار در سن مشخص در مدل fib ارائه نشده است و از ابتکاراتی است که در مدل ایرانی وجود دارد. در این مدل، مقدار کلرید سطحی به عنوان تابعی از زمان محاسبه می‌شود. میزان کلرید سطحی پس از ۵ تا ۱۰ سال (یا مدت مورد نظر طراح) تا انتها ثابت فرض می‌شود :

$$CS_t = CS_{ref} \times \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^\beta$$

در این مدل، اثر دوده سیلیسی در درصد های مختلف در نظر گرفته شده است و برخلاف مدل اروپایی، عامل توانی تغییرات زمانی ضریب انتشار نیز ارائه شده است.

برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش، عملکرد بتن کنترل، دوجزئی حاوی ۷/۱۵٪ دوده سیلیسی، دوجزئی حاوی ۳۰٪ خاکستریادی و بتن سه جزئی حاوی ۵٪ دوده سیلیسی و ۱۵٪ خاکستریادی در برابر نفوذ کلرید با استفاده از آزمایش مهاجرت سریع کلرید (RCMT) در طی زمان بررسی شده است. همه مخلوطها نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ و عیار مواد سیمانی ۴۲۰ کیلوگرم دارد. برای پیش‌بینی عملکرد مخلوطهای بتنی در برابر نفوذ کلرید در درازمدت، نیاز به دانستن تغییرات زمانی ضریب انتشار وجود دارد. با برآزش آماری نتایج آزمایشگاهی ضرایب انتشار RCMT در سنین مختلف، می‌توان بر اساس رابطه زیر عامل توانی تغییرات زمانی ضریب انتشار را برای هر طرح بدست آورد :

$$D_{RCMT}(t) = D_{RCMT}^{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^k$$

در این رابطه، D_{RCMT}^{ref} ضریب انتشار پایه (۲۸ روز)، t_{ref} سن پایه (۲۸ روز) و k عامل توانی تغییرات زمانی ضریب انتشار بر اساس نتایج آزمایش مهاجرت سریع کلرید در آزمایشگاه می‌باشد که جدول ۱ بر اساس برآزش نتایج آزمایشگاهی ضریب انتشار کلرید بدست آمده است.

جدول ۱- عامل توانی (k) تغییرات ضریب انتشار بر پایه ضریب انتشار ۲۸ روز [۸]

ر ^۲ *	k ₂₈	D _{rcmt} (28)	طرح
۰/۹	۰/۱۹۳	۱۴/۵	0.38C
۰/۹۵	۰/۴۲۲	۶/۲	0.38SF7.5
۰/۹۹	۰/۶۵۰	۱۹/۴	0.38FA30
۰/۹۸	۰/۶۰۷	۱۲/۵	0.38FA15-SF5

* ضریب دقت برآزش

تخمین پروفیل یون کلرید و زمان شروع خوردگی

تخمین‌ها با استفاده از روش تفاضل محدود یک بعدی و با حل پیشرو زمانی و مرکزی مکانی (FTCS)، حل عددی به صورت صریح و در یک مرحله صورت می‌گیرد. با توجه به محدودیت در همگرایی حل عددی، گام‌های زمانی ۱ روزه و گام مکانی ۲ م.م.، برای تخمین پروفیل یون کلرید در زمان موردنظر در نظر گرفته شد. همچنین شرایط اولیه و مرزی به صورت زیر فرض شد [۸]:

- غلظت کلرید در گام زمانی اول تا زمان شروع رویارویی در تمامی عمق‌ها، معادل غلظت کلرید اولیه خواهد بود.
- غلظت کلرید در سطح بتن در طول زمان (همه گام‌های زمانی) مقداری مشخص شده است. این مقادیر با استفاده از نتایج سازه‌های واقعی برای هر مخلوط معلوم است.
- غلظت کلرید در مرز انتهایی (لایه انتهایی قطعه بتنی) برابر با غلظت کلرید اولیه فرض می‌شود (شرط مرزی دیرخله). همچنین با ضخیم در نظر گرفتن قطعه بتنی، شرایط انتهایی طوری است که تغییرات غلظت برابر صفر خواهد بود (شرط مرزی نیومن).
- مشخصات کلی برای تخمین نفوذ کلرید و زمان شروع خوردگی به صورت زیر است:
- ضریب انتشار پایه: ضریب مهاجرت ۲۸ روزه از آزمایش مهاجرت سریع یون کلرید
- کلرید سطحی: استفاده از نتایج سازه‌های واقعی در خلیج فارس برای شرایط پاشش و جزر و مدی [۸]
- تغییرات کلرید سطحی: تعیین زمان رسیدن به حداکثر کلرید سطحی با استفاده از نتایج واقعی
- کلرید اولیه: ۰/۰۵٪ وزنی بتن
- تأثیر دما: (بر اساس اطلاعات خلیج فارس - دمای آزمایشگاه ۲۳ درجه س.گ. و دمای میانگین سالانه محیط خلیج فارس ۲۷ درجه س.گ. فرض شد)
- تا سن ۱ سال - تثبیت ضریب انتشار بعد از ۲۵ سال RCMT - تغییرات ضریب انتشار: بله؛ با استفاده از نتایج آزمایشگاهی
- ورودی کلرید بحرانی: یکسان برای همه طرح‌های مخلوط (معادل ۰/۰۵٪ وزنی بتن)
- همچنین مدل‌های پیش‌بینی و تحقیق فعلی، در جدول ۲ تا ۴ نشان داده شده است.

جدول ۲- ضریب انتشار مرجع و شاخص توانی تغییرات زمانی آن در مدل‌های مختلف (ضرایب انتشار برحسب $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) [۸]

دریا پایدار Fib-modified		DuraQeshm *	Fib 2006 **		Life-365		تحقیق فعلی		
alpha ⁺	D _{rcmt} (28)	D _{app} (90) **	a	D _{rcmt} (28)	m	D(28)	k	D _{rcmt} (28)	طرح مخلوط
۰/۵۸	۲۰/۲	پاشش: ۹/۷	۰/۳	۸/۹	۰/۲	۷/۱۱	۰/۲۱۴	۱۵/۶	0.38C
۰/۵۵	۶/۵	پاشش: ۳/۱۴	-	-	۰/۲	۲/۱	۰/۴۲۲	۶/۲	0.38SF7.5
-	-	-	-	-	۰/۴۴	۷/۱۱	۰/۶۶۶	۱۹/۴	0.38FA30
-	-	-	-	-	-	-	۰/۶۰۷	۱۲/۵	0.38SF5-FA15

* تغییرات زمانی در همه طرح‌ها برابر ۰/۳۱ فرض شده است. مقادیر از کدهای نرم‌افزار استخراج شده است.

** نسبت آب به سیمان ۰/۴

⁺ مقادیر میانگین توزیع احتمالاتی

جدول ۳- کلرید سطحی و تغییرات آن در مدل‌های مختلف (کلرید سطحی بر حسب درصد وزن بتن) [۸]

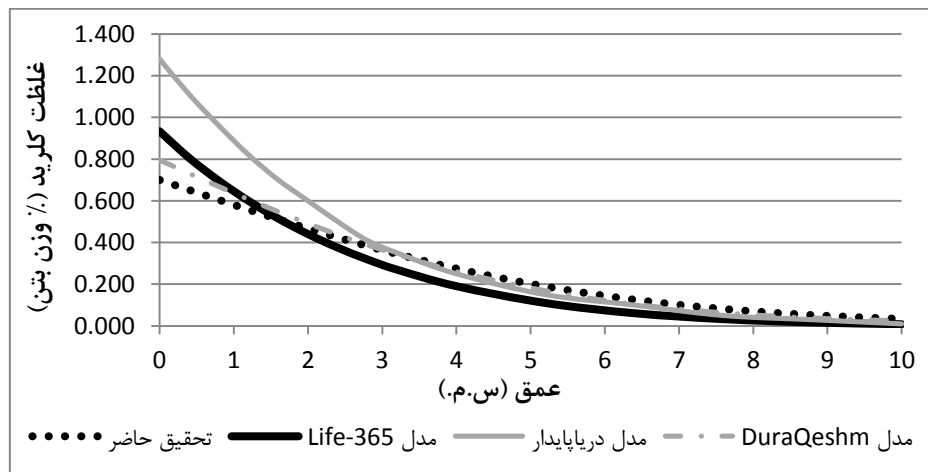
دریا پایدار Fib-modified		DuraQeshm *		Fib 2006		Life-365		تحقیق فعلی		
t _{Cs,max}	C _s	t _{Cs,max}	C _{s,max}	t _{Cs,max}	C _{s,max}	t _{Cs,max}	C _{s,max}	t _{Cs,max}	C _{s,max}	طرح مخلوط
۵	0.05*(t/0.75) ^{1.67}	۱۰	۰/۸	۰	۰/۴۴	۱۰	۱	۱۰	۰/۷	0.38C
۵	0.05*(t/0.75) ^{1.67}			-	-	۱۰	۱	۱۰	۰/۹۵	0.38SF7.5
-	-	-	-	-	-	۱۰	۱	۱۰	۱/۱	0.38FA30
-	-	-	-	-	-	-	-	۱۰	۰/۹۵	0.38SF5FA15

جدول ۴- کلریدبحرانی در مدل‌های مختلف (بر حسب درصد وزن بتن) [۸]

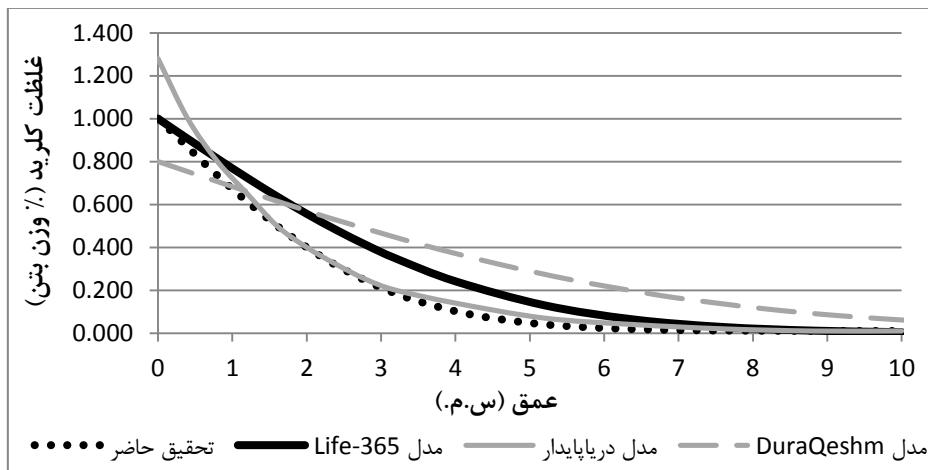
دریابایدار* Fib-modified	DuraQeshm *	Fib 2006	Life-365	تحقیق فعلی	طرح مخلوط
۰/۲	نامشخص	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	0.38C
۰/۱					0.38SF7.5
-					0.38FA30
-	-	-	-	-	0.38SF5-FA30

کلریدسطحی به شدت به شرایط رویارویی وابسته است. به نظر می‌رسد که ضریب‌انتشار بتن در شرایط مختلف رویارویی، اختلاف چندانی نداشته باشد، هر چند در مدل دانشگاه تهران، برای شرایط مختلف رویارویی، ضریب‌انتشار مختلفی نیز فرض است. علاوه بر مدل Life-365، که امکان انتخاب محل قرارگیری سازه را فراهم می‌سازد، تنها مدلی که امکان انتخاب شرایط رویارویی در محیط‌های دریایی را دارد، مدل DuraQeshm است. از گزینه شرایط پاشش که بحرانی‌ترین حالت در بین شرایط رویارویی مختلف است، برای تخمین پروفیل‌های یون کلرید و زمان شروع خوردگی استفاده شد [۸].

از مدل‌های مختلف فوق، جهت تعیین پروفیل‌های یون کلرید برای بتن‌های مختلف، کنترل و دوجزئی استفاده شد. نمونه‌هایی از مقایسه عملکرد آن‌ها در مخلوط‌های مختلف و به صورت قطعی (غیراحتمالاتی) ارائه شده است.



شکل ۱ - تخمین پروفیل یون کلرید طرح کنترل با نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ برای سن ۹ سال [۸]



شکل ۲- پروفیل یون کلرید طرح حاوی ۷/۵٪ دوده‌سلیسی با نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ برای سن ۲۵ سال [۸]

همچنین با فرض پوشش ۶ سانتی متری بتن روی میلگرد، عمر مفید محاسبه شد. نتایج در جدول ۵ نتایج مدل‌ها، بدون تحلیل احتمالاتی و برای مخلوط‌های ارائه شده است.

جدول ۵- مقایسه عمر مفید مبتنی بر زمان شروع خوردگی در مدل‌های پیش‌بینی در عمق ۶ س.م. برای حالت قطعی

دریاپایدار Fib-modified	DuraQeshm	Fib 2006	Life-365	تحقیق فعلی	طرح مخلوط
۸	۹	-	۸	۵	0.38C
۷	۸	۷	۸	-	0.4C
۸۵	۱۲	-	۲۰	۲۰	0.38SF7.5
-	-	-	۱۸	۱۸	0.38FA30
-	-	-	-	۲۴	0.38SF5-FA15

نتیجه گیری

بر اساس بررسی‌های انجام شده، نتایج زیر قابل ارائه می‌باشد :

۱. بر اساس پروفیل‌های یون کلرید تخمینی توسط مدل‌ها موجود، در بتن کنترل، نتایج تحقیق فعلی و مدل Life-365 در همه سنین به یکدیگر نزدیک است و دلیل اصلی آن، مقدار نسبتاً یکسان عامل توانی تغییرات ضریب انتشار است. هرچند ضریب انتشار مرجع (۲۸ روز) در مدل Life-365 کمتر از تحقیق فعلی است، در عوض کلرید سطحی کوچکتر در این پژوهش، باعث شده است که تخمین پروفیل نسبتاً مشابهی بدست آید. مدل دانشگاه تهران در مقایسه با تحقیق فعلی ضریب انتشار نسبتاً یکسانی را تخمین می‌زند اما به علت کلرید سطحی قدری بزرگتر، غلظت کلرید را بیش‌تر نشان می‌دهد. مدل دریاپایدار غلظت کلرید بزرگتر را نشان می‌دهد که دلیل آن کلرید سطحی بزرگتر از سایر مدل‌هاست.

۲. در مخلوط دوجزئی حاوی دوده سیلیسی، مدل دانشگاه تهران غلظت کلرید را بیش‌تر پیش‌بینی می‌کند که به سبب تخمین ضریب انتشار بزرگتر از سایر مدل‌هاست. مدل Life-365 نیز مانند مدل دانشگاه تهران، نفوذ بیش‌تری را نسبت به تحقیق فعلی و مدل دریاپایدار به ویژه در درازمدت نشان می‌دهد که این رفتار از ضریب انتشار و کلرید سطحی نسبتاً بزرگ ناشی می‌شود. در سنین زیاد تحقیق فعلی و مدل دریاپایدار عملکرد نسبتاً مشابهی را پیش‌بینی می‌کنند. مدل دریاپایدار ضریب انتشار کوچکتری نسبت به تحقیق فعلی دارد اما به دلیل کلرید سطحی بزرگتر، در سنین زیاد، غلظت کلرید نزدیکی دارند.

۳. زمان شروع خوردگی در مدل Life-365 و تحقیق فعلی در پوشش بتنی رایج در بتن کنترل، اختلاف زیادی ندارد. این موضوع می‌تواند علاوه بر کلرید بحرانی یکسان، به تشابه پروفیل یون کلرید تخمینی در درازمدت بر می‌گردد. مدل دانشگاه تهران، زمان شروع خوردگی بیشتر و قابل توجهی نسبت به تحقیق فعلی و مدل امریکایی پیش‌بینی می‌کند. دلیل این اختلاف علی‌رغم غلظت بیش‌تر کلرید در سنین مختلف، به کلرید بحرانی بیش‌تر در مدل DuraQeshm بر می‌گردد.

۴. برای مخلوط کنترل، زمان شروع خوردگی در مدل دریاپایدار به صورت میانگین، مقادیر نسبتاً بیش‌تری نسبت به مدل‌های دیگر پیش‌بینی شده است. هرچند که نفوذ کلرید در درازمدت و عمق‌های بیش‌تر از ۵ س.م. در این مدل کمتر از مدل‌های دیگر است، اما تخمین‌های زیاد عمر مفید، ناشی از فرض کلرید بحرانی بزرگ در این مدل است. شایان ذکر است مدل دریاپایدار در مخلوط کنترل همانند مدل دانشگاه تهران، در پوشش‌های بتنی رایج، اختلاف زیادی در تخمین عمر مفید با مدل‌های دیگر ندارد، اما در پوشش ۱۰ س.م. اختلاف با مدل دانشگاه تهران و مدل امریکایی به ترتیب ۱۰ و ۲۵ سال خواهد شد. با آنالیز احتمالاتی (احتمال تجمعی ۰.۱٪)، تخمین‌های منطقی‌تری در تعیین عمر مفید بدست آمد و اختلاف‌ها کمتر شد.

۵. در مخلوط دوجزئی دوده سیلیسی، زمان شروع خوردگی در همه مدل‌ها به جز مدل دریاپایدار، تخمین نسبتاً مشابهی دارند. مدل دریاپایدار در همه پوشش‌های بتنی اختلاف قابل توجهی با مدل‌های دیگری دارد و در پوشش بتنی ۶ س.م.، ۷۰ سال عمر مفید بیش‌تری تخمین می‌زند. این اختلاف زیاد در عمر مفید، علی‌رغم نفوذ کمتر تخمینی در عمق‌های متوسط (۶ س.م.)، به دلیل کلرید بحرانی بسیار بزرگ نسبت به مدل‌های دیگر است.

۶. زمان شروع خوردگی برای مخلوط دو جزئی حاوی خاکستریادی در پوشش ۶ س.م، به دلیل اختلاف کم مدل امریکایی و تحقیق فعلی در سنین میان مدت، نسبتاً مشابه هستند. به دلیل اختلاف غلظت کلرید در درازمدت، زمان شروع خوردگی تحقیق فعلی در پوشش ۱۰ س.م، ۸ سال خواهد شد.

فهرست مراجع

1. Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Polder, R., "*Corrosion of Steel in Concrete - Prevention, Diagnosis, Repair*", WILEY-VCH, 2004.
2. fib Task Group 5.6, "*Model Code for Service Life Design*", fib Bulletin No. 34, Lausanne, Switzerland, 2006.
3. Tang, L., Nilsoon, L., Basheer, M., "*Resistance of Concrete to Chloride Ingress - Testing and modelling*", CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
4. Recktenwald, G.W., "*Finite-Diference Approximations to the Heat Equation*", 2011.
5. Amey, S.L., Johnson, D.A., Miltenberger, M.A., Farzam, H. "*Predicting the service life of concrete marine structures: an environmental methodology*", ACI Structural Journal, 95(2), 205:2014, 1998.
6. Mejlbro, L., & Poulsen, "*Diffusion of chlorides in concrete*", Modern concrete technology, vol. 14, CRC Press, 2006.
7. Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., & Castro, P., "*Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar*", Cement & Concrete Research, 30, 1047:1055, 2000.
۸. تدین، ع.، بررسی پارامترهای انتشار یون کلرید در بتن‌های حاوی سیمان‌های دوجزئی و سه‌جزئی و تخمین عمر مفید آنها در محیط‌های دریایی، "دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۵.