Archive of SID

# مدلسازی فرآیند خوردگی کلریدی میلگرد در بتن

**محمدحسین تدین**، دانشجوی دکترای سازه‌های دریایی، گروه مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران،
*tadayon@ut.ac.ir*
**محمد شکرچی‌زاده**، رئیس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران،
*shekarch@ut.ac.ir*
**محسن تدین**، رئیس بخش فناوری بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، *tadayonmoh@yahoo.com*

**چکیده**

سالیانه مبالغ هنگفتی صرف تعمیر و یا تخریب و بازسازی سازه‌های بتنی مسلح به علت اثرات پدیده خوردگی هزینه می‌گردد. با اینکه عوامل موثر بر این پدیده تقریبا شناخته شده می‌باشد، اما میزان تاثیر هر کدام از عوامل بر طول مدت بهره‌برداری تقریبا ناشناخته است. به همین منظور و برای طراحی سازه‌های بتنی مسلح بر اساس عمر مفید، نیاز به مطالعه فرآیند خوردگی و سپس مدلسازی آن شدیدا احساس می‌گردد.
از آنجا که حجم عظیمی از ساخت و سازهای زیربنایی ایران در مناطق جنوبی و حاشیه خلیج فارس و دریای عمان قرار دارد، مطالعه پدیده خوردگی کلریدی ضروری می‌باشد.
در این مقاله، مراحل فرآیند خوردگی کلریدی در بتن مسلح و همچنین مدلسازی و ساز و کار آنها بررسی شده است.

**واژگان کلیدی**:
بتن مسلح، انتشار یون کلرید، مدلسازی، خوردگی میلگردها

www.SID.ir

Archive of SID

## ۱. مقدمه

امروزه سازه‌های بتنی نقشی مهم و حیاتی در زیرساخت‌های هر جامعه‌ای دارند. بنابراین شرایط و عملکرد این سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

سالانه هزینه بسیار زیادی صرف تعمیر، نگهداری و تقویت سازه‌های موجود می‌گردد که پیش‌بینی می‌شود در آینده این هزینه‌ها نیز افزایش یابد. درصد بسیاری از این هزینه‌ها به‌علت دوام ناکافی سازه‌های بتنی می‌باشد. عملیات تعمیر و نگهداری سازه‌ها هزینه‌های دو چندانی در مقایسه با هزینه‌های ساخت اولیه سازه تحمیل می‌کند که می‌تواند اثرات نامطلوبی بر محیط زیست و سرمایه‌های جامعه داشته باشد.

در سال‌های اخیر، تحقیقات بسیار زیادی به‌منظور درک بهتر ساز و کار خرابی بتن نظیر واکنش‌های قلیایی-سنگدانه، یخبندان و آب‌شدن و به‌ویژه خوردگی فولاد در بتن انجام گرفته است. در طراحی سازه‌ها، اغلب تاکید اصلی بر خواص و ظرفیت مکانیکی می‌باشد و طراحی دوام، کیفیت اجرا و مدیریت بهره‌برداری نادیده گرفته می‌شود و به‌ندرت الزامات خاصی برای دوام و عملکرد طولانی مدت سازه وضع می‌گردد. در عمل، تنها وقتی که سازه‌ها دچار مشکلات دوامی گسترده می‌شود، الزامات دوامی جدید در آیین‌نامه‌ها وارد می‌گردد که حتی این الزامات بسیار عقب‌تر از پیشرفت‌های فنی و علمی می‌باشد.

روش سنتی طراحی دوام سازه‌ها بر اساس اعمال الزامات تجویزی برای تضمین کیفیت بتن می‌باشد. به‌طور مثال، حداکثر نسبت آب به سیمان، حداقل ضخامت پوشش بتنی و حداقل یا حداکثر عیار سیمان از الزامات تجویزی مورد استفاده می‌باشند. با استفاده از این الزامات، انتظار می‌رود سازه بتنی عمر مفید طولانی ولی نامعلومی داشته باشد. با استفاده از روش الزامات تجویزی، نمی‌توان تخمینی از تغییر هزینه تعمیر و نگهداری در اثر تغییر طراحی ارائه نمود. به همین دلیل باید از روش طراحی استفاده نمود تا بتوان سازه‌ها را به‌طور ایمن، اقتصادی و با دوام، طراحی و اجرا کرد و هزینه‌های طول عمر مفید آن‌ها را نیز تخمین زد. این روش طراحی، «طراحی بر اساس عملکرد» نام دارد. منظور از عملکرد می‌تواند ظرفیت باربری، دوام، ظاهر، کاربری و غیره باشد. این روش، بر اساس تعیین معیاری برای عملکرد سازه که معمولا تعیین مقادیر حدی می‌باشد، شکل می‌گیرد.

خوردگی فولاد در بتن از اصلی‌ترین عوامل خرابی سازه‌های بتن مسلح در محیط خلیج فارس می‌باشد. این خرابی معمولا به شکل ترک‌خوردگی و قلوه‌کن شدن پوشش بتنی به علت انبساط محصولات خوردگی اطراف میلگرد می‌باشد. در ضمن خوردگی میلگرد در بتن می‌تواند اتصال فولاد و بتن را تضعیف کند. بتن سالم، محافظ خوبی برای میلگرد به حساب می‌آید. محیط قلیایی بتن که معمولا دارای pHبیش از ۱۳ می‌باشد، منجر به ایجاد لایه انفعالی بر روی سطح میلگردها می‌گردد و سرعت خوردگی فولاد بسیار ناچیز می‌شود. پوشش بتنی روی میلگرد نیز حفاظت فیزیکی برای میلگرد به حساب می‌آید و سدی در برابر نفوذ مواد مضر می‌باشد.

برای شروع خوردگی میلگرد، لایه انفعالی محافظ باید به‌صورت موضعی یا عمومی تخریب گردد. از بین رفتن لایه انفعالی می‌تواند به دو دلیل کربناته شدن بتن نزدیک میلگرد (کاهش pH محیط تا حدود ۹) و یا افزایش غلظت یون کلرید تا بیش از حد بحرانی باشد.

امروزه برای طراحی سازه‌های بتنی مسلح در برابر خوردگی فولاد از بتن با نفوذپذیری کم با کاهش نسبت آب به سیمان و استفاده از مواد سیمانی جایگزین سیمان، و در نظر گرفتن ضخامت پوشش بتنی مناسب استفاده می‌شود. در حال حاضر، محققان هنوز برای تخمین میزان خوردگی فولاد در بتن و اثر آن بر دوام سازه بتنی به اجماع نرسیده‌اند زیرا عوامل بسیاری که هنوز کاملا شناخته نشده‌اند بر خوردگی تاثیرگذار می‌باشد. به‌طور مثال می‌توان به عدم قطعیت‌های مرتبط با مصالح و یا میزان خورندگی محیط و یا ساز و کار خوردگی اشاره نمود.

از آن‌جا که هزینه‌های تعمیر و نگهداری سازه‌های بتنی بسیار زیاد است، هنگام طراحی و اجرا، تخمین مقدار خرابی در طول عمر مفید سازه بسیار اهمیت دارد. مدل‌های تخمین عمر مفید سازه می‌توانند مهندسان را برای تصمیم‌گیری در مورد نوع مصالح و مشخصات سازه (همانند ضخامت پوشش بتنی) راهنمایی و کمک نمایند تا به عمر مفید مد نظر دست یابند. در ضمن این مدل‌ها کمک زیادی به برنامه‌ریزی تعمیر، نگهداری و تقویت سازه‌های ساخته شده می‌نمایند. درک ساز و کار و روند خوردگی و همچنین آهنگ خوردگی برای پیش‌بینی کمی عمر مفید سازه بتنی مسلح ضروری می‌باشد. در ضمن تعیین شرط پایان عمر مفید سازه نیز از اهمیت خاصی برخوردار است که باید مشخص گردد. در نتیجه، وجود مدلی برای تخمین عمر مفید سازه برای توسعه منطقی استانداردهای طراحی بر اساس دوام ضروری به‌نظر می‌رسد.

فرآیند خوردگی کلریدی خود دارای چند مرحله می‌باشد. این مراحل به ترتیب شروع خوردگی، توسعه خوردگی، شروع ترک و گسترش ترک می‌باشد. در ادامه به تفکیک به نحوه مدلسازی هر کدام از مراحل فوق پرداخته می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

## ۲- مراحل مدلسازی فرآیند خوردگی

### ۲-۱- شروع خوردگی کلریدی

خوردگی میلگرد فولادی داخل بتن با از بین رفتن لایه انفعالی میلگرد آغاز می‌گردد. برای از بین رفتن لایه انفعالی میلگرد فولادی داخل بتن، باید غلظت کلرید در سطح میلگرد از مقدار معینی (غلظت کلرید بحرانی) بیشتر شود. پس برای مدل‌سازی آن، انتشار یون کلرید مدل می‌شود [۱ و ۲].

اصلی‌ترین عامل نفوذ کلرید به داخل بتن، انتشار می‌باشد. انتشار، حرکت ماده به خاطر اختلاف غلظت از نقطه‌ای به نقطه دیگر می‌باشد [۱ و ۲]. مشاهده شده است که طبق رابطه ۱، مقدار کلرید کل وارد شده به بتن با ریشه زمان رابطه خطی دارد [۳].

$$C_t = C_0 + k_t\sqrt{t} \qquad (۱)$$

$$k_t = ae^{-bx} \qquad (۲)$$

که $C_t$ کلرید کل، $C_0$ غلظت کلرید اولیه موجود در بتن، $k_t$ ضریب نرخ نفوذ کلرید، a و b ضرایب تجربی و x فاصله از دریا است. $k_t$ به عوامل محیطی (مانند فاصله از دریا) و کیفیت بتن بستگی دارد.

برای بیان انتشار یون کلرید در بتن، قانون اول انتشار فیک (رابطه ۳) بیان می‌کند که در حالت پایدار، سرعت انتقال توده جرم در واحد سطح مقطع (J) با اختلاف غلظت $(\partial C/\partial x)$ و ضریب انتشار متناسب (D) است.

$$J = -D\frac{\partial C}{\partial x} \qquad (۳)$$

در شرایط غیر پایدار، غلظت در هر مکان با زمان تغییر می‌کند و رابطه تعادل با قانون دوم انتشار فیک (رابطه ۴) بیان می‌شود که تغییرات در واحد حجم در زمان را بیان می‌کند. در واقعیت انتشار به‌صورت سه‌بعدی می‌باشد.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D\frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D\frac{\partial C}{\partial z}\right) \qquad (۴)$$

در اینجا ضریب انتشار (D) ممکن است ثابت نبوده و تابع متغیرهایی مانند زمان، دما، غلظت، مکان و غیره باشد.

برای حل رابطه دیفرانسیل (۴) نیاز به شرط مرزی کلرید سطحی و شرط اولیه غلظت کلرید اولیه موجود در بتن و همچنین رابطه تغییرات ضریب انتشار یون کلرید با زمان می‌باشد.

در ساده‌ترین حالت، انتشار یک بعدی با کلرید سطحی در طول زمان ثابت ($C_s$)، غلظت کلرید اولیه معادل $C_0$ و ضریب انتشار یون کلرید نیز در طول زمان ثابت فرض می‌شود. در این حالت حل رابطه (۴) به شکل رابطه (۵) خواهد بود (تابع *erf* تابع خطای استاندارد است) [۴].

$$C(x,t) = C_s - (C_s - C_0)erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D.t}}\right) \qquad (۵)$$

در واقعیت ضریب انتشار به زمان، دما و رطوبت محیط، غلظت ماده و غیره وابسته است. برای در نظر گرفتن هر کدام از این عوامل، روابط عددی و تجربی برای D در رابطه ۵ پیشنهاد شده است.

یکی از مدل‌های مشهور و پایه تخمین ضریب انتشار برای دما، رطوبت، مواد سیمانی و زمان‌های مختلف، طبق رابطه ۶ می‌باشد.

$$D = D_0.a_T a_E a_H \qquad (۶)$$

$$a_T = e^{\left[\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T_r}-\frac{1}{T}\right)\right]} \qquad (۷)$$

$$a_E = \left(\frac{t_r}{t}\right)^m \qquad (۸)$$

$$a_H = \frac{(1-h_c)^4}{(1-h_c)^4 + (1-h)^4} \qquad (۹)$$

که $D_0$ ضریب انتشار آزمایشگاهی در زمان $t_r$، $U$ انرژی فعال‌سازی انتشار کلرید (*kJ/mol*)، $R$ ثابت گازها، $T_r$ دما هنگام اندازه‌گیری $D_0$ (*K*)، $T$ دما در زمان $t$ (*K*)، $m$ ضریب وابسته به محیط و مواد سیمانی، $h_c$ رطوبت مرجع (معمولا ۰/۷۵) و $h$ رطوبت نسبی حفرات بتن می‌باشد [۵، ۶ و ۷]. در ضمن برای تخمین $D_0$ در زمان‌های مختلف نیز مدل‌هایی وابسته به نسبت آب به سیمان، مقدار مواد سیمانی و غیره ارائه شده است. همچنین تحقیقات مختلف در شرایط مختلف منجر به ارائه ضرایب مختلف برای روابط فوق می‌گردد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- مدل‌هایی برای تخمین ضریب انتشار یون کلرید در بتن

| مرجع | فرمول | محدودیت و کاربرد |
|---|---|---|
| [۸] | $\sqrt{D}=(-2.181+1.369\,e^{\frac{w}{c}}+\frac{721.8}{C})\times10^{-6}$ | برای بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی |
| | $D=1.636\times10^{-6}\,C^{-1.975}\,(\frac{w}{c})^{0.8662}\;SF^{-0.74}$ | برای بتن حاوی دوده‌سیلیس |
| [۹] | $m=0.2+0.4(\%FA/50+\%SG/70)$ | برای بتن حاوی پوزولان خاکستربادی یا سرباره و بتن بدون پوزولان |
| | $D_{28}=10^{(-12.06+2.4\,w/cm)}$ | |
| | $D_{SF}=D_{28}e^{-0.1646\;SF}$ | برای بتن حاوی دوده‌سیلیس |
| [۱۰] | $m=2.5w/c-0.6$ | برای بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی |

در ادبیات فنی روابطی نیز برای کلرید سطحی متغیر در طول زمان نیز ارائه شده است که برای حالت تغییرات خطی، $c(t)=kt$، رابطه به شکل زیر خواهد بود [۱۱].

$$C(x,t)=kt\left(\left(1+\frac{x^2}{2D.t}\right)erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{D.t}}\right)-\left(\frac{x}{\sqrt{\pi D.t}}\right)e^{\frac{-x^2}{4D.t}}\right) \qquad (۱۰)$$

پارامتر موثر دیگری که باید در نظر گرفته شود، خاصیت مقیدسازی یون‌های کلرید می‌باشد. وقتی یون‌های کلرید داخل بتن می‌شوند، بعضی یون‌ها با خمیر سیمان وارد ترکیب شیمیایی می‌گردند و قید شیمیایی ایجاد می‌شود، تعدادی دیگر به‌صورت فیزیکی جذب ژل سیمان شده یا در منافذ ژل به دام می‌افتند که یون مقید نام دارند. بقیه یون‌ها نیز یون آزاد هستند که در بتن منتشر می‌شوند. در ضمن، مسلما شروع خوردگی به یون‌های آزاد وابسته است.

$$C_t = w_e C_f + C_b \qquad (۱۱)$$

$$\frac{\partial C_t}{\partial t}=\left(w_e+\frac{\partial C_b}{\partial C_f}\right)\frac{\partial C_f}{\partial t}+C_f\frac{\partial w_e}{\partial t} \qquad (۱۲)$$

که $C_t$ غلظت کلرید کل، $C_f$ غلظت کلرید آزاد، $C_b$ غلظت کلرید مقید و $w_e$ مقدار آب قابل تبخیر بتن یا، در حالت اشباع، برابر پوکی بتن می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان رابطه ۱۳ را (با فرض ثابت بودن مقدار آب در زمان مثلا در حالت اشباع) برای تاثیر مقیدسازی بر ضریب انتشار بیان نمود.

$$D=D_{C_f}\frac{1}{1+\frac{1}{w_e}\frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \qquad (۱۳)$$

که $D_{Cf}$ ضریب انتشار یون کلرید آزاد و $\partial C_b/\partial C_f$ ظرفیت مقیدسازی یون می‌باشد [۱۲ و ۱۳]. که با اعمال رابطه یون آزاد و مقید (خطی، *Langmuir*، *Freundlich* و غیره)، ضریب انتشار از رابطه ۱۳ حاصل می‌گردد. به‌طور مثال، رابطه‌ای که دوستی (۱۳۸۷) بر روی آزمونه‌های قرار گرفته در محیط خلیج فارس در بندرعباس به‌دست آورده، به شکل زیر می‌باشد. اساس این رابطه، فرض خطی بودن رابطه کلرید مقید و آزاد می‌باشد [۱۴].

$$C_b=\left(4SF^2-1.02SF+1.1704\right)C_f+\left(-0.002SF^2-0.3SF+0.024\right) \qquad (۱۴)$$

در جریان نفوذ یون کلرید در بتن، علاوه بر انتشار یون، کلرید می‌تواند در اثر نفوذ آب نیز وارد بتن شده و در آن جابجا گردد که با در نظر گرفتن آن می‌توان دقت مدل‌سازی را بهبود بخشید. اثر این عامل به‌صورت افزودن جمله مربوطه به سمت راست رابطه ۴ می‌باشد. برای حالت یک بعدی رابطه به شکل زیر است [۱۵].

$$\frac{\partial C_f}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(D_C{}^{*}\frac{\partial C_f}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(C_f D_h{}^{*}\frac{\partial h}{\partial x}\right) \qquad (۱۵)$$

$$D_C{}^{*}=\frac{D_C}{1+\frac{1}{w_e}\frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \qquad (۱۶)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$D_h^* = \frac{D_h}{1+\frac{1}{w_e}\frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \quad (۱۷)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t}\frac{\partial w_e}{\partial h} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_h \frac{\partial h}{\partial x}\right) \quad (۱۸)$$

که $D_c$ ضریب انتشار یون کلرید، $D_h$ ضریب انتشار رطوبت و $h$ رطوبت نسبی منافذ بتن است.

توزیع دما در داخل بتن برای تاثیر آن بر روی نفوذ کلرید، رطوبت و خوردگی از اهمیت خاصی برخوردار است. توزیع دما را می‌توان توسط قانون انتقال حرارت یا قانون فوریه بدست آورد. توزیع رطوبت داخل بتن نیز از روابط انتشار رطوبت محاسبه می‌گردد [۱ و ۵].

با استفاده از روابط فوق، می‌توان غلظت یون کلرید در هر زمان را در سطح میلگرد محاسبه نمود. حال اگر این غلظت از غلظت یون کلرید بحرانی کمتر باشد، خوردگی شروع نشده است، در غیر این صورت به علت شکست لایه انفعالی، خوردگی شروع شده است. بنابراین یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در تعیین عمر مفید وجود دارد، غلظت کلرید بحرانی می‌باشد. عوامل مختلفی نظیر نوع مواد سیمانی، $pH$ مایع منفذی و غیره بر میزان کلرید بحرانی موثرند که تخمین آن را مشکل می‌سازد. در منابع مختلف، مقدار این پارامتر برای کلرید آزاد یا کلرید کل بیان می‌گردد. در ضمن، یا مستقیما برای آن حدی تعیین می‌شود و یا حدی برای نسبت غلظت کلرید به غلظت یون هیدروکسیل معین می‌گردد. در ادبیات فنی، برای کلرید کل بحرانی مقادیر ۰/۰۴ تا ۸/۳ درصد وزن سیمان، برای کلرید آزاد بحرانی مقادیر ۰/۰۳ تا ۱/۱۶ درصد وزن سیمان (و ۰/۰۴۵ تا ۳/۲۲ مول بر لیتر) و برای نسبت کلرید آزاد به هیدروکسیل مقادیر متفاوتی از ۰/۰۹ تا ۶۳ ارائه شده است. در جدول ۲، تعدادی از این موارد ارائه شده است [۱، ۲، ۵].

جدول ۲- مواردی از غلظت کلریدهای بحرانی ارائه شده در منابع و مراجع مختلف

| نوع بتن | غلظت بحرانی $Cl^-$ | | $Cl^-/OH^-$ | شماره مرجع |
|---|---|---|---|---|
| | کلریدآزاد (٪) | کلرید کل | | |
| | | ۰/۳ تا ۰/۵٪+ | | [۱۶] |
| | ۰/۱۵٪+ | ۰/۲٪+ | | [۱۷] |
| | | ۰/۶٪ (متوسط) + | | [۱۸] |
| | | ۱۵۰۰ تا ۴۰۰۰ppm | | [۱۹] |
| خلیج فارس/پل‌های متفاوت در آمریکا | | ۰/۰۵٪× | | [۲۰ تا ۲۳] |
| پل Krk کرواسی، w/c=۰/۳۶، ۲۰٪ سرباره | | ۰/۶٪+ یا ۰/۱۱٪× | | [۲۴] |
| محلول با pH ۱۱/۶۴ تا ۱۳/۲۲ | | | ۰/۲۵ تا ۰/۸ | [۲۵] |
| | | ۰/۰۷٪× | | [۲۶] |
| بتن حاوی ۰ تا ۳۵٪ خاکستر بادی | | ۰/۹ تا ۰/۳٪+ | | [۲۷] |
| | ۰/۰۲٪ تا ۰/۰۳٪× | ۰/۰۲۸٪ تا ۰/۰۴۱٪× | | [۲۸] |
| پل‌هایی در تایوان | | $8kg/m^3$ | | [۲۹] |
| | ۰/۲۲٪ تا ۰/۲۹٪+ | | | [۳۰] |
| | | ۰/۰۶٪× | | [۳۱] |
| بتن معمولی | | ۱/۵٪ تا ۲/۵٪+ | ۳ تا ۲۰ | [۳۲] |
| | | ۰/۲٪ تا ۰/۴٪+ | | [۳۳] |

+ درصد وزن مواد سیمانی

× درصد وزن بتن

### ۲-۲- توسعه خوردگی

پس از شکستن لایه انفعالی، در صورت وجود هم‌زمان رطوبت و اکسیژن، خوردگی پیشرفت می‌کند. سپس با استفاده از روابط پتانسیل و چگالی جریان خوردگی در آند و کاتد می‌توان با روابط عددی حاکم بر خوردگی، توزیع پتانسیل و در نتیجه توزیع جریان

www.SID.ir

Archive of SID

خوردگی را محاسبه نمود و سرعت خوردگی را تخمین زد. عوامل مختلفی بر خوردگی و تشکیل پیل خوردگی موثر هستند که می‌توان به مهم‌ترین آن‌ها یعنی دما، رطوبت، مقاومت الکتریکی بتن، مقدار کلرید و غلظت اکسیژن اشاره نمود [۱، ۵ و ۳۴].

پدیده خوردگی فولاد نیاز به وجود اکسیژن (چه به‌صورت گاز و چه به‌شکل محلول در آب) دارد. وقتی مقدار اکسیژن کافی نباشد، حتی در صورت عبور غلظت یون کلرید از غلظت بحرانی، خوردگی فولاد توسعه نخواهد یافت. این امر به‌وضوح در سازه‌های بتنی مسلح مغروق در آب که به اکسیژن کافی دسترسی ندارند، قابل مشاهده می‌باشد. وجود اکسیژن در پدیده خوردگی در کاتد بسیار موثر می‌باشد و در صورت کاهش غلظت آن، سرعت خوردگی بسیار کاهش می‌یابد. انتشار اکسیژن را می‌توان از روابط زیر محاسبه نمود.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\phi\left[(1-S)\rho_{O_2,g}+S.\rho_{O_2,d}\right]\right)+\nabla.J_{O_2}-Q_{O_2}=0 \qquad (۱۹)$$

که $\varphi$ پوکی محیط متخلخل، $S$ درجه اشباع محیط متخلخل، $\rho_{O۲,d}$ جرم‌مخصوص اکسیژن محلول در آب منافذ ($kg/m^۳$)، $\rho_{O۲,g}$ جرم‌مخصوص اکسیژن گازی ($kg/m^۳$)، $J_{O۲}$ شار کل اکسیژن ($kg/m^۲s$) و $Q_{O۲}$ نرخ مصرف اکسیژن به‌علت واکنش‌های خوردگی ($kg/m^۳s$) است. مقدار $Q_{O۲}$ از قانون فاراده قابل محاسبه می‌باشد.

$$Q_{O_2}=-\phi S\frac{M_{O_2}i_{corr}}{z_{O_2}F}\frac{A_{bar}}{V_{elem}} \qquad (۲۰)$$

که $M_{O۲}$ وزن مولکولی اکسیژن، $z_{O۲}$ تعداد بار الکتریکی اکسیژن، $i_{corr}$ چگالی جریان خوردگی، $A_{bar}$ سطح مقطع میلگرد در حجم محدود مرجع و $V_{elem}$ حجم محدود مرجع است. شار اکسیژن نیز از روابط زیر محاسبه می‌گردد.

$$J_{O_2}=-\left(D_{O_2,g}\nabla\rho_{O_2,g}+D_{O_2,d}\nabla\rho_{O_2,d}\right)=-\left(D_{O_2,g}K_{O_2}+D_{O_2,d}\right)\nabla\rho_{O_2,d} \qquad (۲۱)$$

$$D_{O_2,g}=\frac{\phi D_O^g}{\Omega}\frac{(1-S)^4}{1+l_m/2(r_m-t_m)} \quad , \quad D_{O_2,d}=\frac{\phi S^4}{\Omega}D_O^d \qquad (۲۲)$$

که $\Omega$ ضریب پیچیدگی منافذ، $r_m$ شعاع متوسط منافذ غیر اشباع، $t_m$ ضخامت لایه آب جذب شده در منافذ با شعاع $r_m$ و $D_O{}^d$ ضریب انتشار اکسیژن محلول ($۱۰^{-۹}\ m^۲/s$) است [۳۵ و ۳۶].

عامل موثر بعدی، مقاومت الکتریکی بتن می‌باشد. اثر مستقیم مقاومت الکتریکی بتن بر خوردگی در میزان پلاریزه‌شدن مقاومتی ظاهر می‌شود. هرچه مقاومت الکتریکی بتن افزایش یابد، سرعت خوردگی میلگرد به علت افزایش انرژی لازم برای انتقال یون‌ها، کاهش می‌یابد. تخمین مقاومت الکتریکی باید بر اساس نتایج آزمایشگاهی و با استفاده از مشخصات بتن انجام گیرد [۱، ۲، ۵ و ۳۴].

با حل رابطه توزیع پتانسیل در آند و کاتد (رابطه ۲۵) و شرایط مرزی (روابط ۲۳ و ۲۴)، می‌توان چگالی جریان خوردگی در هر نقطه و در هر زمان و در نتیجه آهنگ خوردگی (رابطه ۲۶) را محاسبه نمود [۵، ۳۷ تا ۴۲].

$$\phi_a=\phi_{Fe}^0+\beta_a\log\frac{i_a}{i_{0a}} \qquad (۲۳)$$

$$\phi_c=\phi_{O_2}^0+\beta_c\log\frac{i_c}{i_{0c}}-2.303\frac{R_cT}{z_cF}\log\frac{i_L}{i_L-i_c} \qquad (۲۴)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t}=\frac{\partial^2E}{\partial x^2}+\frac{\partial^2E}{\partial y^2} \qquad (۲۵)$$

$$J_{rein}=4.656\times10^{-7}i_{anod} \qquad (۲۶)$$

$$i_L=6.25n_eC_{O_2} \qquad (۲۷)$$

که $E$ پتانسیل ($Volt$)، $R$ ثابت گازها، $T$ دما ($°K$)، $F$ عدد فاراده (۹۶۵۰۰)، $i$ چگالی جریان ($A/m^۲$)، $i.$ چگالی جریان تبادلی نیم واکنش ($A/m^۲$)، $i_L$ چگالی جریان حدی ($A/m^۲$)، $R_c$ مقاومت ویژه الکتریکی بتن ($\Omega m$)، $J_{rein}$ آهنگ خوردگی میلگرد ($kg/m^۲s$)، $\phi_a$ و $\phi_c$ به‌ترتیب پتانسیل سطح پلاریزه شده آند و کاتد (ولت)، $\phi_{Fe}^0$ پتانسیل استاندارد نیم‌پیل آهن (ولت)، $\phi_{O_2}^0$ پتانسیل استاندارد نیم‌پیل اکسیژن (ولت)، $\beta_a$ و $\beta_c$ به‌ترتیب شیب $Tafel$ واکنش آندی و کاتدی ($volt/dec$)، $i_a$ و $i_c$ به‌ترتیب چگالی جریان آند و کاتد ($A/m^۲$)، $i_{.a}$ و $i_{.c}$ به‌ترتیب چگالی جریان تبادلی آند و کاتد ($A/m^۲$)، $R$ ثابت گازها ($J/mol°K$ ۸/۳۱۴)، $z_c$ تعداد الکترون‌های واکنش کاتدی، $n_e$ تعداد الکترون جابجا شده (برای احیای اکسیژن برابر ۴) و $C_{O۲}$ غلظت اکسیژن در محلول منفذی بتن نزدیک ناحیه کاتد سطح میلگرد می‌باشد.

نرخ خوردگی در هر نقطه سطح میلگرد متناسب با چگالی جریان خوردگی می‌باشد که می‌توان آن‌را با دانستن توزیع پتانسیل الکتریکی حول هر نقطه، محاسبه نمود.

www.SID.ir

Archive of SID

$$i = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial E}{\partial n} \qquad (۲۸)$$

که $\rho$ مقاومت ویژه الکتریکی بتن ($ohm\text{-}m$) و $n$ جهت عمود بر خطوط هم پتانسیل است.

برای حالت یک بعدی، حل روابط به‌شکل زیر می‌باشد.

$$\phi_c - \phi_a = I_{corr} R_{con} \qquad (۲۹)$$

یا

$$i_a A_a R_{con} = C_1 + C_2 \log i_a + C_3 \log\left(\frac{i_L}{i_L - r.i_a}\right) \qquad (۳۰)$$

که $I_{corr}$ حداکثر جریان خوردگی، $R_{con}$ مقاومت الکتریکی بتن (اهم)، $A_a$ سطح آند ($m^2$)، $r$ نسبت سطح آند به کاتد (یا نسبت چگالی جریان کاتد به آند) و $C_i$ ضرایب با مقدار مشخص هستند.

به علت پیچیدگی ضرایب و پارامترهای موجود در روابط فوق، و همچنین سختی تعیین آنها حتی در آزمایشگاه، تحقیقات مختلفی برای ارائه روابط تجربی نیز صورت گرفته است.

رابطه تجربی زیر توسط *Ghods* و همکاران پیشنهاد شده است.

$$i_{corr} = \frac{I_{corr}}{A_s} = -0.00133 + \frac{3}{\rho} - 0.000383\ln\left(C_{O_2}\right) + 0.333\frac{\ln\left(C_{O_2}\right)}{\rho} \qquad (۳۱)$$

که $A_s$ سطح مقطع میلگرد می‌باشد [۴۳ و ۴۴].

رابطه تجربی زیر برای چگالی جریان خوردگی ($\mu A/cm^2$) توسط *Kong* پیشنهاد شده است [۴۵].

$$\ln i_{corr} = 8.617 + 0.618\ln Cl - \frac{3034}{T} - 0.005\rho \qquad (۳۲)$$

که $Cl$ غلظت کلرید اطراف میلگرد ($kg/m^3$)، $\rho$ مقاومت ویژه الکتریکی بتن ($k\Omega.cm$) و $T$ دمای اطراف میلگرد ($^\circ K$) است.

بنابراین، با استفاده از رابطه عددی و یا روابط تجربی فوق می‌توان در هر زمان میزان پیشرفت خوردگی را بدست آورد.

### ۲-۳- ترک‌خوردن ناشی از خوردگی و مقاومت باقیمانده

پس از محاسبه آهنگ خوردگی در هر نقطه سطح میلگرد و در زمان، می‌توان میزان اکسید آهن تولیدی را محاسبه نمود. با توجه به افزایش حجم محصولات خوردگی نسبت به فولاد اولیه، علاوه بر کاهش سطح مقطع میلگرد و کاهش پیوستگی بتن و میلگرد، بتن پس از مدتی، دچار تنش داخلی ناشی از انبساط محصولات خوردگی می‌گردد. این تنش ابتدا ترک‌هایی اطراف میلگرد و سپس تا سطح بتن ایجاد می‌نماید و حتی می‌تواند باعث قلوه‌کن شدن پوشش بتنی روی میلگرد گردد. این مدل‌ها به دو حالت خوردگی یکنواخت و غیر یکنواخت تقسیم می‌شوند که تعدادی از آنها در ادامه مشاهده می‌گردد.

ترک ناشی از خوردگی به علت تنش‌های ناشی از انبساط محصولات خوردگی ایجاد می‌گردد. با فرض ایجاد محصولات خوردگی به‌صورت یکنواخت اطراف میلگرد، می‌توان پدیده ترک‌خوردگی بتن را به سه مرحله تقسیم نمود؛ ۱) انبساط آزاد: پس از شکست لایه انفعالی توسط یون‌های کلرید، طی فرآیندهای مشخصی، محصولات خوردگی در آند تشکیل می‌گردد. در این مدل به علت وجود لایه انتقالی بین بتن و میلگرد و هوای موجود، فرض می‌شود یک حلقه فضای خالی اطراف میلگرد وجود دارد که انبساط محصولات خوردگی می‌تواند آن را پر نماید. حجم این حلقه فضای خالی به سطح جانبی میلگرد، نسبت آب به سیمان، درجه هیدراته‌شدن و درجه تراکم وابسته است. وقتی مقدار کل محصولات خوردگی ($W_T$) کمتر از مقدار لازم محصولات خوردگی برای پر کردن فضای خالی اطراف میلگرد ($W_P$) باشد، تشکیل این محصولات تنشی به بتن اطراف وارد نمی‌نماید. ۲) ایجاد تنش: وقتی $W_T$ از $W_P$ بیشتر گردد، تشکیل این محصولات به بتن اطراف تنش وارد می‌کند و با پیشرفت خوردگی، این تنش افزایش می‌یابد. ۳) ایجاد ترک: وقتی $WT$ به مقدار بحرانی محصولات خوردگی ($W_{crit}$) برسد، تنش ناشی از افزایش حجم محصولات خوردگی از تنش کششی بتن بیشتر می‌شود و پوشش بتنی میلگرد ترک می‌خورد.

$$W_P = \rho_{rust} V_P = \pi\rho_{rust} d_0 D \qquad (۳۳)$$

که $\rho_{rust}$ جرم‌مخصوص محصولات، $V_P$ حجم کل منافذ متصل به‌هم اطراف میلگرد، $D$ قطر میلگرد و $d$. ضخامت حلقه فضای خالی اطراف میلگرد (فرض شده است که بسیار کمتر از $D$ می‌باشد)، است.

www.SID.ir

Archive of SID

$$W_{crit} = \rho_{rust}\left[\pi(d_s + d_0)D + \frac{W_{st}}{\rho_{st}}\right] \quad (۳۴)$$

که $d_s$ ضخامت حلقه محصولات خوردگی برای ایجاد تنش کششی بحرانی، $W_{st}$ جرم آهن خورده شده و $\rho_{st}$ جرم مخصوص آهن است.

$$d_s = \frac{Cf_t'}{E_{ef}}\left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + v_c\right) \quad (۳۵)$$

$$E_{ef} = \frac{E_c}{1 + \varphi_{cr}} \quad (۳۶)$$

که $C$ ضخامت پوشش بتنی، $f_t'$ مقاومت کششی بتن، $a$ شعاع میلگرد با محصولات خوردگی بدون ایجاد ترک ($D/۲+d_0$)، $b$ فاصله مرکز میلگرد تا سطح بتن ($a+C$)، $v_c$ ضریب پواسون بتن، $E_c$ مدول ارتجاعی بتن و $\varphi_{cr}$ ضریب خزش بتن می‌باشد.

$$\frac{dW_{rust}}{dt} = \frac{k_p}{W_{rust}} \Rightarrow {W_{rust}}^2 = 2\int_0^t k_p\, dt \quad (۳۷)$$

$$k_p = \frac{0.098\pi}{\alpha} D i_{corr} \quad (۳۸)$$

که $\alpha$ برای $Fe(OH)_3$ معادل ۰/۵۲۳ و برای $Fe(OH)_2$ برابر ۰/۶۲۲، $W_{rust}$ مقدار محصولات خوردگی تولید شده ($mg/mm$)، $t$ زمان خوردگی (سال)، $k_p$ نرخ تولید محصولات و $i_{corr}$ نرخ متوسط سالانه خوردگی ($mA/ft^2$) می‌باشد. بنابراین زمان بحرانی یعنی زمان لازم برای ایجاد $W_{crit}$ با فرض نرخ خوردگی ثابت، به‌شکل زیر محاسبه می‌گردد.

$$t_{cr} = \frac{{W_{crit}}^2}{2k_p} \quad (۳۹)$$

البته برای نرخ خوردگی متغیر، از رابطه انتگرالی بالا استفاده می‌گردد [۴۶].

مدل دیگر برای پیش‌بینی ترک ناشی از خوردگی، ابتدا میزان ضخامت حلقه محصولات خوردگی را به‌شکل زیر ارائه می‌کند.

$$d_s(t) = \frac{W_{rust}(t)}{\pi(D + 2d_0)}\left(\frac{1}{\rho_{rust}} - \frac{\alpha_{rust}}{\rho_{st}}\right) \quad (۴۰)$$

که $d_s$ ضخامت حلقه محصولات خوردگی، $W_{rust}$ جرم محصولات خوردگی، $D$ قطر میلگرد، $d_0$. ضخامت حلقه فرضی معادل منافذ بتن بین میلگرد و بتن، $\rho_{rust}$ جرم‌مخصوص محصولات خوردگی، $\rho_{st}$ جرم‌مخصوص فولاد و $\alpha_{rust}$ ضریب نوع محصول خوردگی می‌باشد. جرم محصولات خوردگی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$W_{rust}(t) = \sqrt{2\int_0^t \frac{0.105\pi D i_{corr}(t)}{\alpha_{rust}} dt} \quad (۴۱)$$

که $i_{corr}$ چگالی جریان خوردگی ($\mu A/cm^2$) است. با ایجاد این محصولات، حلقه خوردگی ایجاد شده تنش شعاعی ($\sigma_r$) و تنش مماسی ($\sigma_\theta$) ایجاد می‌کند که تنش انبساطی بین حلقه خوردگی و بتن به‌صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$P_1 = -\sigma_r(a) = \frac{E_{ef} d_s(t)}{a\left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} v_c\right)} \quad (۴۲)$$

که $E_{ef}$ ضریب ارتجاعی موثر بتن، که $v_c$ نسبت پواسون بتن، $a$ شعاع داخلی استوانه بتنی تحت فشار ($D/۲+d_0$) و $b$ شعاع خارجی استوانه بتنی تحت فشار ($C+D/۲+d_0$) و $C$ پوشش بتنی روی میلگرد است. ترک اولیه وقتی اتفاق می‌افتد که تنش مماسی در شعاع $a$ از مقاومت کششی ($f_t$) بیشتر شود. سپس ترک در جهت شعاعی ادامه می‌یابد و در شعاع $r_0$. متوقف می‌شود و به وضعیت خود تعادلی می‌رسد. در قسمت ترک نخورده خارجی، هنوز تئوری ارتجاعی برقرار است. به‌علت تقارن، تغییرمکان شعاعی صفر است. مقدار تغییرمکان شعاعی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$u(r) = c_1(r_0) r + \frac{c_2(r_0)}{r} \quad (۴۳)$$

که $c_1$ و $c_2$ ضرایب تابع $r_0$. هستند.

$$\sigma_r(r) = \frac{E_{ef}}{1 - {v_c}^2}\left[(1 + v_c)c_1(r_0) - \frac{(1 - v_c)c_2(r_0)}{r^2}\right] \quad (۴۴)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$\sigma_\theta(r)=\frac{E_{ef}}{1-v_c^{\,2}}\left[(1+v_c)c_1(r_0)+\frac{(1-v_c)c_2(r_0)}{r^2}\right] \quad (۴۵)$$

سپس روابطی برای ضرایب فوق ارائه شده است و در نهایت مجموع عرض تمام ترک‌ها به‌شکل زیر محاسبه می‌گردد.

$$w_c=\frac{4\pi d_s(t)}{(1-v_c)(a/b)^{\sqrt{\alpha}}+(1+v_c)(b/a)^{\sqrt{\alpha}}}-\frac{2\pi bf_t}{E_{ef}} \quad (۴۶)$$

که $\alpha$ ضریب کاهش سختی ناشی از ترک می‌باشد [۴۷].

مدل دیگر پیش‌بینی ترک در بتن، نرخ انبساط حجم و جرم محصولات خوردگی را به‌شکل روابط ۴۷ و ۴۸ ارائه می‌کند [۴۸].

$$\alpha_\rho=\frac{(D+d_0+u_r-r(t))(d_0+u_r+r(t))}{r(t)(2D-r(t))} \quad (۴۷)$$

$$W_{rust}=\pi\rho_{rust}(D+d_0+u_r-r(t))(d_0+u_r+r(t)) \quad (۴۸)$$

که $D$ قطر میلگرد، $d$. ضخامت حلقه معادل فضای خالی ناحیه انتقالی، $u_r$ تغییرمکان شعاعی دیواره داخلی بتن در تماس با محصولات خوردگی و $r$ کاهش شعاع میلگرد است. از آنجا که تمامی ابعاد معرفی شده بسیار کمتر از قطر میلگرد هستند، روابط زیر برقرار است.

$$\alpha_\rho=\frac{d_0+u_r}{r(t)}+1 \quad (۴۹)$$

$$W_{rust}=\pi\rho_{rust}D(d_0+u_r+r(t)) \quad (۵۰)$$

از طرفی رابطه زیر برقرار است.

$$W_{rust}=\sqrt{\frac{0.196\pi Di_{corr}t}{\alpha_{rust}}} \quad (۵۱)$$

که $i_{corr}$ چگالی جریان خوردگی ($\mu A/cm^2$)، $t$ زمان از شروع خوردگی ($s$) و $\alpha_{rust}$ عدد ثابت مربوط به نوع محصول خوردگی است. با استفاده از برابری دو رابطه بالا و تغییرمکان شعاعی بحرانی برای ایجاد ترک، می‌توان زمان ایجاد ترک را محاسبه نمود.

$$t=\frac{16\alpha_{rust}D\rho_{rust}^{\,2}\alpha_\rho^{\,2}}{i_{corr}(\alpha_\rho-1)^2}(d_0+u_r)^2 \quad (۵۲)$$

بر اساس نظریه ارتجاعی، تغییر مکان شعاعی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$u_r=(C_1+C_2)p \quad (۵۳)$$

$$C_1=\frac{R_1(1+v_c)}{E_c}+C_{cr} \quad (۵۴)$$

$$C_2=\frac{R_1(1+v_s)(1-2v_s)}{E_s} \quad (۵۵)$$

$$C_{cr}=\int_0^a\frac{2(1-v_c^{\,2})}{\pi E_cR_1}\left(\frac{K_I}{p}\right)^2da \quad (۵۶)$$

که $R_1$ شعاع میلگرد، $E_c$ و $v_c$ ضریب ارتجاعی و نسبت پواسون بتن، $E_s$ و $v_s$ ضریب ارتجاعی و نسبت پواسون فولاد، $p$ تنش شعاعی حاصل از انبساط محصولات، $K_I$ ضریب شدت تنش در نوک ترک و $a$ فاصله مرکز میلگرد تا نوک ترک می‌باشد.

$$K_I=\frac{(a^2+R_2^{\,2})p}{(R_2^{\,2}-R_1^{\,2})}\sqrt{\pi a}\left(\alpha f\frac{R_1^{\,2}}{a^2+R_1^{\,2}}+(1-\alpha)F_1\right) \quad (۵۷)$$

$$K_{Ic}=\sqrt{E_cG_f} \quad (۵۸)$$

$$p_{\max}=\frac{K_{Ic}(R_2^{\,2}-R_1^{\,2})(a^2+R_1^{\,2})}{(a^2+R_2^{\,2})(\alpha fR_1^{\,2}+(a^2+R_1^{\,2})(1-\alpha)F_1)\sqrt{\pi a}} \quad (۵۹)$$

که $R_2$ مجموع شعاع میلگرد و ضخامت پوشش بتنی، $\alpha$ ضریب درگیری میلگرد و بتن (برای اتصال کامل برابر صفر و برای عدم درگیری برابر یک)، $f$ و $F_1$ توابع بدون بعد وابسته به $a/R_1$، $K_{Ic}$ ضریب شدت تنش بحرانی نوک ترک و $G_f$ انرژی شکست بتن (در حدود ۵ $N/m$) است.

www.SID.ir

Archive of SID

تحقیقات در عمل نشان داده‌اند که خوردگی میلگرد در سمت نفوذ یون کلرید بیشتر از سمت دیگر می‌باشد یعنی توزیع خوردگی در سطح میلگرد غیر یکنواخت می‌باشد.

$$\Delta r_{sd}(\theta)=\frac{1}{2}(\delta_{\max}-\delta_{\min})(1+\sin^3\theta-\cos^2\theta)+\delta_{\min}-R_0 \qquad (۶۰)$$

که $R$. شعاع اولیه میلگرد، $\Delta r_{sd}$ افزایش شعاع میلگرد نسبت به شعاع اولیه به‌علت افزایش حجم محصولات خوردگی و $\delta_{max}$ و $\delta_{min}$ به‌ترتیب حداکثر و حداقل تغییر شعاع سطح میلگرد می‌باشد. برای تعیین تنش معادل این تغییر حجم، فرض می‌شود که حلقه نازکی به‌جای میلگرد تحت تنش حرارتی نامتقارن قرار گرفته (حلقه حرارتی) و می‌توان میزان درجه حرارت را به‌شکل زیر فرض نمود.

$$T(\theta)=\frac{1-v_r^{\ 2}}{(1+v_r)^2}\frac{1}{w\alpha_T}\Delta r_{sd}(\theta) \qquad (۶۱)$$

که $v_r$ نسبت پواسون حلقه حرارتی (معمولا مشخصات محصولات خوردگی)، $\alpha_T$ ضریب انبساط حرارتی حلقه و $w$ ضخامت حلقه حرارتی می‌باشد. عمق نفوذ خوردگی در بتن بالای میلگرد، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\Delta r_p(\theta)=\frac{1}{\alpha_1-1}\Delta r_{sd}(\theta) \qquad (۶۲)$$

که $\alpha_1$ نسبت حجم محصولات خوردگی به حجم آهن اولیه خورده شده است. بنابراین جرم آهن خورده شده در واحد طول میلگرد از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$M_{st}=\rho_{st}\int_0^{2\pi}\Delta r_p(\theta)R_0 d\theta=\frac{R_0\rho_{st}}{\alpha_1-1}\int_0^{2\pi}\Delta r_{sd}(\theta)d\theta \qquad (۶۳)$$

که $\rho_{st}$ جرم‌مخصوص آهن می‌باشد. به‌علت پوکی خمیر سیمان در محل اتصال با میلگرد، در ابتدای شروع خوردگی، مقداری از محصولات منبسط شونده بدون ایجاد تنش وارد فضای متخلخل می‌شوند. می‌توان این فضا را که وابسته به ابعاد میلگرد، نسبت آب به سیمان، درجه هیدراته‌شدن و میزان تراکم می‌باشد، حلقه‌ای به ضخامت ۱۰ تا ۲۰ میکرون فرض نمود. در خوردگی غیریکنواخت، فرض می‌شود در یک سمت علاوه بر افزایش حجم خوردگی، این فضای خالی کاملا پر می‌شود ولی در سمت دیگر شاید محصولات نتوانند حتی این فضا را پر نمایند. بنابراین برای تخمین میزان تغییر شعاع، روابط زیر پیشنهاد شده است.

$$\Delta r_{sd}(\theta)_{\max}=\delta_{\max}+d_p \quad , \quad \Delta r_{sd}(\theta)_{\min}=0.05(\delta_{\max}+d_p) \qquad (۶۴)$$

$$\Delta r_{sd}(\theta)=[0.525+0.475(\sin^3\theta-\cos^2\theta)](\delta_{\max}+d_p) \qquad (۶۵)$$

$$M_{st}=1.8055\frac{R_0\rho_{st}}{\alpha_1-1}(\delta_{\max}+d_p) \qquad (۶۶)$$

که $d_p$ ضخامت حلقه معادل پوکی خمیر سیمان است. با استفاده از روش‌های عددی و مخصوصا اجزای محدود، می‌توان مقدار میلگرد خورده شده $M_{st}$ برای شروع ترک و گسترش آن‌را تخمین زد. سپس با استفاده از قانون فاراده برای خوردگی فولاد، زمان شروع ترک ($t_{ick}$) و گسترش آن ($t_{pck}$) محاسبه می‌گردد.

$$t_{ick}=\frac{nFM_{st,ick}}{i_{cor}A.m} \quad , \quad t_{pck}=\frac{nF(M_{st,pck}-M_{st,ick})}{i_{cor}A.m} \qquad (۶۷)$$

که $n$ تعداد مول الکترون در مول آهن خورده شده (برابر ۲)، $m$ جرم اتمی آهن ($56\ g$)، $F$ ثابت فاراده ($۹۶۵۰۰\ A.s/mol$)، $A$ سطح جانبی واحد طول میلگرد ($m^2$)، $i_{cor}$ نرخ خوردگی ($A/m^2$)، $M_{st,ick}$ و $M_{st,pck}$ به‌ترتیب افت جرم بحرانی میلگرد برای شروع ترک و گسترش آن می‌باشد [۴۹].

در دیگر مدل توزیع غیریکنواخت خوردگی، فرض می‌گردد شکل هندسی افزایش حجم ناشی از خوردگی میلگرد، به‌شکل بیضی با ابعاد قطر کوچک $a$ و قطر بزرگ $b$ باشد.

$$K_I^A=F_A q\sqrt{\pi a/Q} \qquad (۶۸)$$

$$F_A=\frac{\sqrt{2Q}}{\pi}(A.M_{1A}+B.M_{2A}+C.M_{3A}+D) \qquad (۶۹)$$

$$Q=1+1.464(a/b)^{1.65} \qquad (۷۰)$$

که $K_I$ ضریب شدت تنش، $q$ تنش ناشی از خوردگی و دیگر ضرائب موجود با روابطی مشخص به $a$ و $b$ وابسته هستند. حال اگر $K_I$ در بیرونی‌ترین نقطه بیضی فرضی (نقطه $A$) محاسبه گردد و کمتر از $K_{IC}^{ini}$ (چقرمگی شکست اولیه) باشد، ترک شروع نشده است، اگر

www.SID.ir

Archive of SID

بیشتر از $K_{IC}^{ini}$ و کمتر از $K_{IC}^{un}$ (چقرمگی شکست غیرپایدار یا ضریب شکست $K$ مضاعف) باشد، توسعه پایدار ترک روی می‌دهد و اگر بیشتر از $K_{IC}^{un}$ باشد، توسعه ناپایدار ترک اتفاق می‌افتد. حال برای تعیین میزان ضریب شدت تنش (چقرمگی شکست) بحرانی $K_{IC}^{A}$ می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود.

$$\frac{K_{IC}^{A}}{K_{IC}^{s}} = \sqrt{\frac{c}{h}}\left(\frac{V}{1000c \times 2r_1}\right)^{\frac{\sqrt{6.5C_v}}{\pi}} \quad (۷۱)$$

که $K_{IC}^{s}$، $V$، $h$ و $C_v$ به‌ترتیب چقرمگی شکست، حجم، ارتفاع (حداکثر ۲ متر) و ضریب تغییرات چقرمگی (در محدوده ۰/۰۱۳ تا ۰/۲۳۰) در آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای تیر شکاف‌دار، $c$ پوشش بتنی روی آرماتور و $r_1$ شعاع میلگرد می‌باشد. تنش داخلی ناشی از خوردگی و تغییرشکل ناشی از آن مربوط به هر کدام از ضرایب $K$ را می‌توان با روابط زیر به‌دست آورد.

$$q = \frac{K}{F_A\sqrt{\pi a/Q}} \quad (۷۲)$$

$$u = \frac{q(1+\theta_c)(r_1+\delta)}{E_{co}}\left(\frac{f_{cm}}{f_{cmo}}\right)^{1/3}\left[\frac{(r_1+\delta)^2 + r_2^2}{r_2^2 - (r_1+\delta)^2} + \mu\right] \quad (۷۳)$$

که $q$ تنش داخلی همه‌جانبه ناشی از خوردگی، $u$ تغییرشکل شعاعی ناشی از خوردگی، $E_{co}$=۲.۱۵×۱۰$^{۴}$ $MPa$، $f_{cmo}$=۱۰ $MPa$، $f_{cm}$ مقاومت فشاری استوانه‌ای ۲۸ روزه پوشش بتنی، $\mu$ نسبت پواسون بتن، $\theta_c$ ضریب خزش پوشش بتن، $r_2$ فاصله سطح بتن تا مرکز میلگرد و $\delta$ ضخامت حلقه معادل پوکی خمیر سیمان است. جرم فولاد مصرف شده در طول خوردگی ($mg/mm$) و زمان آن (با فرض نرخ خوردگی ثابت) از روابط زیر قابل محاسبه است.

$$M_s = \frac{\pi\rho_s\{(r_1+\delta+u)^2 - r_1^2\}}{\alpha_1 - 1} \quad (۷۴)$$

$$t_r = \frac{M_s^{\,2}}{0.392\pi\alpha.r_1 J_{cor}} \quad (۷۵)$$

که $\rho_s$ جرم‌مخصوص میلگرد فولادی، $\alpha$ نسبت جرم مولکولی آهن بر جرم مولکولی محصولات خوردگی، $\alpha_1$ نسبت حجم محصولات خوردگی به حجم آهن اولیه خورده شده و $J_{cor}$ متوسط نرخ خوردگی سالیانه می‌باشد [۵۰].

برای تخمین مقاومت پیوستگی باقیمانده در اثر ترک، رابطه زیر پیشنهاد شده است. رابطه اول برای حالت غیر خطی و رابطه دوم برای حالت خطی می‌باشد [۵۱].

$$f_{bond} = \frac{1}{1+0.8w_{crack}} f_0 \quad (۷۶)$$

$$f_{bond} = (1-0.3w_{crack}) f_0 \quad (۷۷)$$

که $f_{bond}$ مقاومت پیوستگی باقیمانده پس از ایجاد ترک، $f$. مقاومت پیوستگی طراحی و $w_{crack}$ عرض ترک در سطح بتن است.

### ۲-۴- معتبرسازی مدل

در تمامی مراحل مدل‌سازی و همچنین در انتها، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، با نتایج واقعی (آزمایشگاهی یا در محل) مقایسه می‌گردد. این مقایسه برای اعتبار سنجی مدل‌سازی‌های ذکر شده برای سازه‌های موجود و هم‌چنین اصلاح مدل‌سازی برای منطقه خاص انجام می‌گیرد. مقایسه در هر مرحله امکان انتخاب نزدیک‌ترین مدل به نتایج موجود را فراهم می‌کند و مقایسه نهایی، اعتبار مدل را برای استفاده در طراحی سازه‌های با شرایط مشابه را فراهم می‌سازد.

## ۳- مدل‌های موجود

در حال حاضر، مدل‌های تخمین عمر مفید سازه‌های بتن مسلح در برابر خوردگی، فقط تا شروع خوردگی را مدل می‌کنند. در این مدل‌ها، یا به مرحله توسعه خوردگی و پس از آن پرداخته نشده است و یا نهایتا مدتی پس از شروع خوردگی را به عنوان پایان عمر مفید سازه فرض می‌کنند. علت این امر، همانطور که گفته شد، پیچیدگی پدیده پیشرفت خوردگی و همچنین نبود تحقیقات کافی در این زمینه در بتن می‌باشد. در ادامه به اختصار به ذکر چند مدل موجود پرداخته می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

### ۳-۱- مدل *TransChlor* [۵۲]:

در این مدل، حرکت یون‌های کلرید در بتن با دو ساز و کار انتشار و جریان همرفت در محیط آبی تعریف شده است. در این مدل، دو واکنش شیمیایی کربناته‌شدن (برگشت‌ناپذیر) و جذب یون‌های کلرید توسط خمیر سیمان (برگشت‌پذیر) در نظر گرفته شده است. رابطه عمومی این مدل شامل انتشار حرارتی، کربناته‌شدن، انتقال رطوبتی و انتقال یون کلرید می‌باشد.

در مدل‌سازی مقدار یون کلرید در بتن، برای رابطه یون آزاد و مقید از رابطه *Freundlich* بهره گرفته شده است. رابطه تجربی زیر نیز برای تخمین ضریب انتشار یون کلرید استفاده می‌گردد.

$$D_{Cl} = 0.0943e^{\alpha(T-T_0)}e^{7.899w/c} \qquad (۷۸)$$

که $\alpha$ انرژی فعال‌سازی مدل برابر ۰/۰۲۶ ($1/^{\circ}C$) و $T_0$ دمای مرجع ($۲۰^{\circ}C$) می‌باشد. روش حل این مدل، با روش‌های عددی اجزای محدود و تفاضل محدود می‌باشد.

### ۳-۲- مدل *Meijers* [۵۳ و ۵۴]:

این مدل با فرض همگن بودن بتن، از سه رابطه دیفرانسیلی سهموی برای انتقال حرارت، رطوبت و یون کلرید استفاده می‌کند. در این مدل، رابطه کلرید آزاد و مقید نیز طبق رابطه *Langmuir* فرض شده است. جابجایی یون کلرید به دو شکل انتشار و همرفت می‌باشد و روش حل عددی این مدل روش اجزای محدود است.

### ۳-۳- مدل *Life-۳۶۵*$^{TM}$ [۹]:

تخمین زمان شروع خوردگی در این مدل بر اساس قانون دوم فیک صورت می‌گیرد. ضریب انتشار تابعی از زمان و دما فرض شده است. روابطی برای تخمین ضریب انتشار در سن ۲۸ روز ارائه کرده است (جدول ۱). در این مدل اثر مواد بازدارنده خوردگی (نیتریت کلسیم و آمین‌ها و استرها)، پوشش‌ها، میلگردهای با روکش اپوکسی و میلگردهای زنگ‌نزن نیز اعمال می‌گردد.

برای حل معادله نفوذ کلرید در بتن، از روش تفاضل محدود یک بعدی (دیوار و دال) و دو بعدی (ستون) استفاده شده است. در ضمن، مقدار کلرید بحرانی در این روش برابر ۰/۰۵ درصد وزنی بتن (در حدود ۰/۴ وزنی سیمان) می‌باشد.

### ۳-۴- مدل *fib* [۱۸]:

این مدل بر اساس تحقیقات دو پروژه *Duracrete* و *DARTS* با حمایت اتحادیه اروپا پیشنهاد شده است. بر مبنای قانون دوم فیک می‌باشد که البته قابل ذکر است، اصل روش، احتمالاتی می‌باشد. مقدار یون کلرید بحرانی متوسط (مقدار متوسط توزیع احتمالاتی مربوطه) معادل ۰/۶ درصد وزن سیمان است.

### ۳-۵- مدل *DuCom* [۵۵]:

این مدل، ابتدا با استفاده از مشخصات طرح اختلاط بتن و اندازه و ابعاد قطعه، محاسبات هیدراته‌شدن و ریزساختار بتن را انجام می‌دهد و سپس به مدل‌سازی شروع خوردگی می‌پردازد. انتقال و تعادل رطوبت، یون کلرید (و یا یون کلسیم)، دی‌اکسیدکربن و اکسیژن با استفاده از روابط دیفرانسیلی اولیه مدل می‌گردند.

### ۳-۶- مدل *DuraCrete* [۵۶]:

این مدل برای طراحی سازه‌ها به‌روش ضرایب جزیی ارائه شده است. برای تعیین ضرایب مدل و ضرایب جزیی طراحی، جداول مفصلی ارائه شده است تا از آن‌ها برای طراحی استفاده گردد. این مدل نیز بر مبنای قانون دوم فیک بنا شده است.

### ۳-۷- مدل *DuraPGulf* [۲۰]:

این مدل که در انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران ایجاد شده است، مدلی ساده ولی با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های محلی در خلیج فارس می‌باشد. در این مدل، از قانون دوم فیک برای مدل‌سازی نفوذ کلرید استفاده شده است و اثرات زمان، دما و رطوبت نیز در آن لحاظ شده است. این مدل برای بتن‌های حاوی دوده‌سیلیسی، با پوشش‌های مختلف سطح بتن و طول مدت عمل‌آوری مختلف نیز قابل استفاده است. این روش با استفاده از اجزای محدود، قانون دوم فیک را با گام‌های زمانی یک ماه حل می‌کند و در عمق حضور میلگرد، اگر غلظت کلرید به غلظت بحرانی (۰/۰۷ درصد وزن بتن) رسیده باشد، شروع خوردگی را اعلام می‌کند.

## ۴. نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب فوق، می‌توان بطور خلاصه نتایج زیر را عنوان نمود:

- با توجه با اهمیت طراحی سازه‌ها بر اساس عملکرد، نیاز به مدلسازی ابعاد مختلف رفتار سازه و به‌ویژه عمر مفید سازه‌ها احساس می‌گردد.

www.SID.ir

Archive of SID

- در سازه‌های بتن مسلح، فرآیند خوردگی میلگردها از عوامل تعیین کننده عمر مفید سازه می‌باشد و بنابراین مدلسازی آن اجتناب ناپذیر به‌نظر می‌رسد.
- برای مدلسازی فرآیند خوردگی میلگرد در بتن، می‌توان آن را به مراحل شروع خوردگی، پیشرفت یا توسعه خوردگی و ترک‌خوردن ناشی از محصولات خوردگی، تقسیم نمود.
- در تمامی مراحل مدلسازی، ضرایبی وجود دارد که باید با آزمایش چه در آزمایشگاه و چه در محیط واقعی به آنها دست یافت تا مدل بدست آمده برای آن شرایط محیطی قابل استفاده باشد.
- مطمئنا آخرین و شاید مهم‌ترین بخش مدلسازی، اعتبارسنجی آن با نتایج واقعی باشد. بنابراین اهمیت احداث سایت‌های تحقیقاتی مخصوصا در زمینه دوام و بویژه مبحث خوردگی روشن و واضح است.

## ۵- مراجع


۱- مهتا، پ. کومار، مترجم رمضانیانپور، علی اکبر و همکاران (۱۳۸۳)، "ریز ساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

۲- نویل، آدام، مترجم فامیلی، هرمز (۱۳۷۸)، "خواص بتن"، بازنگری چهارم، ابوریحان بیرونی، تهران، ایران.

۳- Meira, G.R., Andrade C., Padaratz I.J., Alonso, C., Borba, J.C. (۲۰۰۷), "Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete", Cement & Concrete Composites, ۲۹, ۶۶۷:۶۷۶.

۴- Basheer L, Kropp J, Cleland DJ. (۲۰۰۱), "Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review", Constr Build Mater, ۱۵, ۹۳:۱۰۳.

۵- Isgor, O. B. (۲۰۰۱), "A durability model for chloride and carbonation induced steel corrosion in reinforced concrete members", PhD Thesis, Carlton University.

۶- Saetta A.V., Scotta R.V., Vitaliani R.V. (۱۹۹۳), "Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete", ACI Materials Journal, ۹۰(۵), ۴۴۱:۴۵۱.

۷- Martin-Perez, B. (۱۹۹۹), "Service Life Modelling of R.C. Highway Structures Exposed to Chlorides", PhD Thesis, University of Toronto.

۸- Izquierdo, D. (۲۰۰۳), "Bases de diseno para un tratamiento probabilista de los procesos de corrosion de armaduras en el hormigon", PhD thesis, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, Spain.

۹- Ehlen, M.A. (۲۰۱۲), "Life-۳۶۵$^{TM}$ Service Life Prediction Model$^{TM}$", Manual of Life-۳۶۵$^{TM}$ v۲.۱, Life-۳۶۵ Consortium II.

۱۰- Mangat, P.S., Molloy, B.T. (۱۹۹۴), "Prediction of long term chloride concentration in concrete", Materials and Structures, ۲۷, ۳۳۸:۴۶.

۱۱- Amey, S.L., Johnson, D.A., Miltenberger, M.A., Farzam, H. (۱۹۹۸), "Temperature Dependence of Compressive Strength of Conversion-Inhibited High Alumina Cement Concrete", ACI Structural Journal, ۹۵(۱), ۲۷:۳۶.

۱۲- Martin-Perez, B., Zibara, H., Hooton, R.D., Thomas, M.D.A. (۲۰۰۰), "A study of the effect of chloride binding on service life predictions", Cement and Concrete Research, ۳۰, ۱۲۱۵:۱۲۲۳.

۱۳- Kim, K.H., Cha, S.W., Jang, S.Y. (۲۰۰۸), "Development of Chloride Penetration Analysis Program Considering Exposure Conditions of Temperature and Humidity", The ۳rd ACF International Conference, ۱۱۰۹:۱۱۱۶.

۱۴- دوستی، علی (۱۳۸۷)، "بررسی رابطه میان یون کلرید آزاد و مقید در سازه‌های بتنی موجود در شرایط محیطی خلیج فارس"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

۱۵- Al-Gadhib, A.H. (۲۰۱۰), "Numerical Simulation of Chloride Diffusion in RC Structures and the Implications of Chloride Binding Capacities and Concrete Mix", International Journal of Civil & Environmental Engineering, ۱۰(۵), ۲۲:۳۵.

۱۶- RILEM TC ۱۲۴-SRC (۱۹۹۴), "Draft Recommendation for Repair Strategies for Concrete Structures Damaged by Reinforcement Corrosion", Materials & Structures, ۲۷, ۴۱۵:۴۳۶.


www.SID.ir

Archive of SID

۱۷- ACI Committee ۲۲۲ (۱۹۸۵), "Corrosion of Metals in Concrete", ACI Journal, ۸۲(۱), ۳:۳۲.

۱۸- fib Task Group ۵.۶ (۲۰۰۶), "Model Code for Service Life Design", fib Bulletin No. ۳۴, Lausanne, Switzerland.

۱۹- Cao, F., Greve, D.W., Oppenheim, I.J. (۲۰۰۵), "Development of Microsensors for Chloride Concentration in Concrete," Sensors, ۲۰۰۵ IEEE Conference, Irvine, CA, USA.

۲۰- Shekarchi, M., Ghods, P., Alizadeh, R., Chini, M., Hoseini, M. (۲۰۰۸), "DuraPGulf, a Local Service Life Model for the Durability of Concrete Structures in the South of Iran", The Arabian Journal for Science and Engineering, ۳۳(۱B), ۷۷:۸۸.

۲۱- Hooton, R.D., Bentz, E.C., Kojundic, A. (۲۰۰۹), "Long-Term Chloride Penetration Resistance of Bridge Decks Made with Silica Fume Concretes", ۸۸th TRB Annual Meeting.

۲۲- Hooton, R.D., Bentz, E.C., Kojundic, A. (۲۰۱۰), "Long-term Chloride Penetration Resistance of Silica Fume Concretes based on Field Exposure", ۲nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure, RILEM PRO ۷۰, Delft, Netherlands.

۲۳- Ghods, P., Alizadeh, R., Chini, M., Hoseini, M., Shekarchi, M., Ramezanianpour, A.A (۲۰۰۵), "The Effect of Different Exposure Conditions on the Chloride Diffusion into Concrete in the Persian Gulf Region", ۳rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, Vancouver, Canada.

۲۴- Oslakovic, I.S., Bjegovic, D., Mikulic, D. (۲۰۱۰), "Evaluation of service life design models on concrete structures exposed to marine environment", Materials & Structures, ۴۳, ۱۳۹۷:۱۴۱۲.

۲۵- Goni, S., Andrade, C. (۱۹۹۰), "Synthetic Concrete Pore Solution Chemistry and Rebar Corrosion Rate in the Presence of Chlorides", Cement & Concrete Research, ۲۰(۴), ۵۲۵:۵۳۹.

۲۶- Konin, A., François, R., Arliguie, G. (۱۹۹۸), " Penetration of chlorides in relation to the microcracking state into reinforced ordinary and high strength concrete", Materials & Structures, ۳۱, ۳۱۰:۳۱۶.

۲۷- Chalee, W., Jaturapitakkul, C., Chindaprasirt, P. (۲۰۰۹), "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in Seawater", Marine Structures, ۲۲, ۳۴۱:۳۵۳.

۲۸- Cheung, M.S., Kyle B.R. (۱۹۹۶), "Service Life Prediction of Concrete Structures by Reliability Analysis", Construction & Building Materials, ۱۰(۱), ۴۵:۵۵.

۲۹- Liang, M.T., Huang, R., Feng, S.A., Yeh, C.J. (۲۰۰۹), "Service Life Prediction of Pier for the Existing Reinforced Concrete Bridges in Chloride-Laden Environment", Journal of Marine Science and Technology, ۱۷(۴), ۳۱۲:۳۱۹.

۳۰- Hussain, S.E., Al-Gahtani, A.S., Rasheeduzzafar (۱۹۹۶), "Chloride Threshold for Corrosion of Reinforcement in Concrete", ACI Materials Journal, ۹۳(۶), ۱:۵.

۳۱- Maage, M., Helland, S., Carlsen, J.E. (۱۹۹۷) "Service Life Prediction of Marine Structures", ACI SP۱۷۰-۳۷, ۷۲۳:۷۴۴.

۳۲- Lambert, P., Page, C.L., Vassie, P.R.W. (۱۹۹۱), "Investigations of Reinforcement Corrosion. ۲. Electrochemical Monitoring of Steel in Chloride-Contaminated Concrete", Materials & Structures, ۲۴, ۳۵۱:۳۵۸.

۳۳- Glass, G.K., Buenfeld, N.R. (۱۹۹۵), "Chloride threshold levels for corrosion induced deterioration of steel in concrete", ۱st RILEM Workshop on Chloride Penetration into Concrete, RILEM PRO ۲, St Rémy lès Chevreuse, France.

۳۴- The European Union (۱۹۹۸), "Modelling of Degradation", Brite EuRam III.

۳۵- Song, H.W., Kim, H.J., Saraswathy, V., Kim, T.H. (۲۰۰۷), "A Micro-mechanics Based Corrosion Model for Predicting the Service Life of Reinforced Concrete Structures", International Journal of Electrochemical Science, ۲, ۳۴۱:۳۵۴.

۳۶- Hussain, R.R., Ishida, T. (۲۰۱۱), "Computer-aided oxygen transport model of mass and energy simulation for corrosion of reinforced steel", Automation in Construction, ۲۰, ۵۵۹:۵۷۰.

۳۷- Hussain, R.R., Ishida, T. (۲۰۰۷), "Modeling of corrosion in RC structures under variable chloride environment based on thermodynamic electro-chemical approach", The International Symposium on Social Management Systems, Yichan, China.

www.SID.ir

Archive of SID

۳۸- Dao, L.T.N., Dao, V.T.N., Kim, S.H., Ann, K.Y. (۲۰۱۰), "Modeling Steel Corrosion in Concrete Structures- Part ۱: A New Inverse Relation between Current Density and Potential for the Cathodic Reaction", International Journal of Electrochemical Science, ۵, ۳۰۲:۳۱۳.

۳۹- Dao, L.T.N., Dao, V.T.N., Kim, S.H., Ann, K.Y. (۲۰۱۰), "Modeling Steel Corrosion in Concrete Structures- Part ۲: A Unified Adaptive Finite Element Model for Simulation of Steel Corrosion", International Journal of Electrochemical Science, ۵, ۳۱۴:۳۲۶.

۴۰- Soleimani, S., Ghods, P., Isgor, O.B., Zhang, J. (۲۰۱۰), "Modeling the kinetics of corrosion in concrete patch repairs and identification of governing parameters", Cement & Concrete Composites, ۳۲, ۳۶۰:۳۶۸.

۴۱- Isgor, O.B., Ghani Razaqpur, A. (۲۰۰۶), "Modelling steel corrosion in concrete structures", Materials & Structures, ۳۹, ۲۹۱:۳۰۲.

۴۲- Maruya, T., Hsu, K., Takeda, H., Tangtermsirikul, S. (۲۰۰۳), "Numerical Modeling of Steel Corrosion in Concrete Structures due to Chloride Ion, Oxygen and Water Movement", Journal of Advanced Concrete Technology, ۱(۲), ۱۴۷:۱۶۰.

۴۳- Ghods, P., Isgor, O.B., Pour-Ghaz, M. (۲۰۰۷), "A practical method for calculating the corrosion rate of uniformly depassivated reinforcing bars in concrete", Materials & Corrosion, ۵۸(۴), ۲۶۵:۲۷۲.

۴۴- Ghods, P., Isgor, O.B., Pour-Ghaz, M. (۲۰۰۸), "Experimental verification and application of a practical corrosion model for uniformly depassivated steel in concrete", Materials & Structures, ۴۱, ۱۲۱۱:۱۲۲۳.

۴۵- Gu, X., Li, C. (۲۰۱۱), "FEM Analysis of the Concrete Structure Life Under the Condition of the Chloride Ion Corrosion", ۴th International Conference on Information and Computing, IEEE, Phuket Island, Thailand.

۴۶- Liu, Y., Weyers, R.E. (۱۹۹۸), "Modeling the Time-to-Corrosion Cracking in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures", ACI Material Journals, ۹۵(۶), ۶۷۵:۶۸۱.

۴۷- Li, C.Q., Melchers, R.E., Zheng, J.J. (۲۰۰۶), "Analytical Model for Corrosion-Induced Crack Width in Reinforced Concrete Structures", ACI Structural Journal, ۱۰۳(۴), ۴۷۹:۴۸۷.

۴۸- Wang, X.L., Zheng, J.J., Wu, Z.M. (۲۰۰۶), " Fracture model for predicting concrete cover-cracking induced by steel corrosion based on interface bond state", Journal of Shanghai University, ۱۳(۳), ۲۱۹:۲۲۴.

۴۹- Xia, N., Liang, R.Y., Payer, J., Patnaik, A.K. (۲۰۱۱), "A Study of Concrete Cracking Behavior Due to Non-uniform Corrosion of Reinforcing Bars", DoD Corrosion Conference, CA, USA.

۵۰- Zhang, X.G., Wang, X.Z., Lu, Z.H., Xing, F. (۲۰۱۱), "Analytic model of non-uniform corrosion induced cracking of reinforced concrete structure", Journal of Central South University of Technology, ۱۸(۳), ۹۴۰:۹۴۵.

۵۱- Thoft-Christensen, P. (۲۰۰۷), "Modelling the loss of steel-concrete bonds in corroded reinforced concrete beams", ۱۳th IFIP WG ۷.۵ Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems: Assessment, Design and Life-Cycle Performance, Kobe, Japan, ۲۳۳:۲۳۹.

۵۲- Conciatori, D., Laferrière, F., Brühwiler, E. (۲۰۱۰), "Comprehensive Modeling of Chloride Ion and Water Ingress into Concrete Considering Thermal and Carbonation State for Real Climate", Cement & Concrete Research, ۴۰, ۱۰۹:۱۱۸.

۵۳- Meijers, S.J.H., Bijen, J.M.J.M., de Borst, R., Fraaij, A.L.A. (۲۰۰۵), "Computational Results of a Model for Chloride Ingress in Concrete Including Convection, Drying-Wetting Cycles and Carbonation", Materials & Structures, ۳۸, ۱۴۵:۱۵۴.

۵۴- Meijers, S.J.H. (۲۰۰۳), "Computational Modelling of Chloride Ingress in Concrete", PhD Thesis, Delft University of Technology, Netherland.

۵۵- Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T. (۲۰۰۳), " Multi-scale Modeling of Concrete Performance: Integrated Material and Structural Mechanics", Journal of Advanced Concrete Technology, ۱(۲), ۹۱:۱۲۶.

۵۶- Malikakkal, N. C. (۱۹۹۴), "Chloride diffusion in concrete/prediction of the onset of corrosion in reinforced concrete structures", M.Sc. Thesis, King Fahad University of Petroleum & Minerls.

www.SID.ir