

ارزیابی و اصلاح مدل تخمین عمر مفید ارائه شده توسط *fib* برای شرایط محیطی و مصالح خلیج فارس

علی اکبر رمضانپور^۱، احسان جهانگیری^{۲*}، فرامرز مودی^۳، بابک احمدی^۴

۱- استاد دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر، مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: aaramce@aut.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: jahangiri@aut.ac.ir

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: fmoodi@aut.ac.ir

۴- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: bahmadi@aut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱/۲۷

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۷

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۳، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

چکیده

خسارات ناشی از خوردگی فولاد مدفون در بتن بخش عمده‌ای از خرابی سازه‌های بتن مسلح در حاشیه دریاها را در بر گرفته و سالیانه هزینه‌های بسیار زیادی را در صنعت ساختمان به خود اختصاص داده است. شبیه‌سازی رفتار بتن در زمینه خوردگی فولاد مدفون می‌تواند در زمینه کاهش هزینه‌های ناشی از خسارت بسیار موثر واقع گردد. مدل *fib* که در سال ۲۰۰۶ میلادی توسط فدراسیون بین‌المللی بتن ارائه شده است یکی از بهترین و کاربردی‌ترین مدل‌های حال حاضر دنیا می‌باشد. این مدل فرایندهای خوردگی را به صورت احتمالاتی مدل می‌نماید. در این مقاله در نظر است مدل *fib* برای شرایط محیطی و مصالح خلیج فارس ابتدا ارزیابی و سپس برای کاربرد در این شرایط اصلاح گردد. شایان ذکر است که محیط دریای خلیج فارس به‌علت گرما و رطوبت شدید و همچنین میزان یون کلرید موجود در آب آن، یکی از مخرب‌ترین محیط‌های دریای در سطح جهان است. بدین منظور ۵ سازه بتن مسلح که در سنین مختلف ساخته شده در این منطقه مورد آزمایش قرار گرفته است و نتایج به‌دست آمده با نتایج حاصل از مدل مقایسه شده است. در ادامه با مشاهده ناهماهنگی نتایج با واقعیت، مدل برای شرایط محیطی و مصالح این منطقه اصلاح شده است.

کلمات کلیدی: بتن، دوام، مدل *fib*، مدل‌های احتمالاتی، محیط دریایی خلیج فارس.

۱. مقدمه

اغلب در دهه‌های گذشته براساس مقاومت صورت می‌گرفت، ولی اخیراً علاوه بر مقاومت، طراحی دوام بتن نیز در اغلب آیین‌نامه‌ها مشاهده می‌شود که علت این امر را می‌توان مشکلات جدی بتن مسلح در شرایط محیطی خورنده دانست (Vidal et al., 2005).

بتن به‌عنوان یک ماده ساختمانی بسیار مهم، سالهاست که در صنعت ساختمان به‌کار می‌رود. اگرچه طراحی اجزای مخلوط بتن

صحت مناسب‌تری برخوردار است، بدین سبب غالباً مدل‌ها به شرایط محیطی و مصالحی که در آن کالیبره شده‌اند بسیار وابسته بوده و ممکن است برای شرایط محیطی و مصالح دیگر نتایج قابل اعتمادی ارائه ننمایند.

مدل fib که در سال ۲۰۰۶ میلادی توسط فدراسیون بین‌المللی بتن ارائه شده است. این مدل فرایندهای خوردگی را به صورت احتمالاتی مدل کرده و قادر است احتمال آغاز خوردگی را در سنین مختلف به دست دهد، این امر سبب می‌شود که تا حدودی عدم قطعیت‌های موجود در این امر کاهش یافته و نتایج نزدیکتر به واقعیت ارائه شود (fib Model Code, 2006).

در این مقاله در نظر است مدل ۲۰۰۶ fib برای شرایط محیطی و مصالح خلیج فارس ابتدا ارزیابی و سپس برای کاربرد در این شرایط اصلاح گردد. شایان ذکر است که محیط دریای خلیج فارس به علت گرما و رطوبت شدید و همچنین میزان یون کلرید موجود در آب آن یکی از مخرب‌ترین محیط‌های دریای در سطح دنیا است. به منظور نیل به اهداف این مقاله ۵ سازه بتن مسلح که در سنین مختلف ساخته شده در این منطقه مورد آزمایش قرار گرفته است و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از مدل مقایسه شده است. در ادامه با مشاهده ناهماهنگی نتایج با واقعیت برنامه آزمایشی در نظر گرفته شده و مدل برای شرایط محیطی و مصالح این منطقه اصلاح شده است.

۲. معرفی مدل fib

در استاندارد که توسط فدراسیون بین‌المللی بتن (fib) در بولتن ۳۴ تحت عنوان "Model Code for Service Life Design" تهیه و ارائه شده است، در مورد روش‌ها و الزامات جهت ایجاد یک رویه مشخص و صحیح برای مدل‌سازی نفوذ یون کلرید، به بحث پرداخته شده است و در نهایت مدلی جهت تخمین ضریب انتشار و میزان نفوذ یون کلرید به داخل بتن ارائه شده است.

این مدل بر اساس دو پروژه تحقیقاتی DuraCrete و DARTS است که در اروپا صورت گرفته است. می‌باشد. در این مدل سعی شده تمام پارامترهای دخیل اعم از مشخصات بتن، پوزولان‌ها، شرایط آب و هوایی و شرایط بهره‌برداری به صورت احتمالاتی در تخمین ضریب انتشار ظاهری، تخمین میزان نفوذ یون کلرید بر حسب زمان و در نهایت تخمین زمان آغاز خوردگی در نظر گرفته

یکی از خورنده‌ترین شرایط محیطی برای بتن مسلح از نقطه نظر دوام، شرایط دریایی است. ضایعات و خسارات ناشی از اثرات خوردگی روی سازه‌هایی که در سواحل دریا احداث می‌گردند، سالانه رقم قابل توجهی از هزینه‌های صنعت ساختمان را به خود اختصاص می‌دهد (Ramezani pour et al., 2004).

عوامل متعددی در شرایط محیطی دریایی بر دوام بتن مسلح موثر هستند، ولی تحقیقات، گویای نقش غالب خوردگی فولاد مدفون در بتن به علت یون کلرید موجود در سطح میلگرد است. در صورتی که میزان یون کلرید در سطح میلگرد از حد آستانه^۱ بیشتر شود، لایه‌ی محافظ از بین رفته و خوردگی فولاد مدفون آغاز می‌گردد و با پیشرفت فرآیند خوردگی و تولید محصولات آن که حجمی بیش از ۵ الی ۶ برابر فولاد دارد، پوشش بتنی روی میلگرد ترک خورده و شرایط برای خوردگی فولاد مهیاتر گشته و سازه بتنی رو به زوال می‌نهد (Poulsen et al., 2005). تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که بیش از ۹۰٪ خرابی‌های سازه‌های حاشیه خلیج-فارس و دریای عمان، خوردگی فولاد مدفون ناشی از یون کلرید موجود در بتن است.

ساخت بندر عظیم در حاشیه خلیج فارس و هزینه‌های کلان اختصاص داده شده در این بخش و همچنین شرایط محیطی بسیار مخرب این منطقه برای سازه‌های بتنی به علت دما و رطوبت زیاد و یون‌های محلول در آب آن، این الزام را به وجود می‌آورد که در راستای طراحی سازه‌هایی بادوام و همچنین مدیریت و نگهداری پس از ساخت، ابزاری برای بررسی کمی دوام بتن مسلح در این منطقه در دست باشد. مدل‌های تخمین عمر مفید خدمت رسانی از این قبیل بوده و در صورت برخورداری از دقت و صحت مناسب می‌توانند نقش مهمی در کاهش هزینه‌های طراحی، تعمیرات و نگهداری ایفا نمایند (Ramezani pour et al., 2000).

مدل‌های تخمین عمر مفید مجموعه از روابط ریاضی هستند که بر اساس مکانیزم‌های خوردگی و آزمایش تهیه می‌شوند و قادرند عمر بتن و یا زمان مناسب برای تعمیر را به دست دهند. با این حال با توجه به ناشناخته‌ها و پیچیدگی‌های بتن عملاً بدست آوردن مدلی که کاملاً رفتار بتن را شبیه‌سازی نماید امر غیرممکن بوده، از این رو عموماً سعی می‌شود که روابط به دست آمده از مطالعات تئوریک با نتایج به دست آمده از آزمایش اصلاح و کالیبره شود و هر چه مدل با نتایج آزمایشی بیشتری کالیبره شده باشد از دقت و

¹ Threshold Value

$$C(x, t) = C_0 + (C_{s,Dx} - C_0) \times \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x-Dx}{2\sqrt{D_{app,C} \times t}} \right] \quad (۴)$$

C Crit: میزان یون کلرید آستانه [wt.-%/Cement]

C (x, t): میزان یون کلرید در عمق x در زمان t [wt.-%/Cement]

C₀: میزان یون کلرید اولیه بتن [wt.-%/Cement]

C_{s,Dx}: میزان یون کلرید در عمق Dx و در زمان معین t [wt.-%/Cement]

x: عمق (سطح بتن عمق صفر تلقی شده و به داخل سطح زیاد می شود) [mm]

a: پوشش بتن [mm]

D_x: ناحیه همرفتی [mm]

D_{app,C}: ضریب نفوذ ظاهری کلرید در بتن [mm²/years]

t: زمان [سال]

erf: تابع خطا

$$P\{ \} = P_{dep} = P\{ C_{crit} - C(a, t_{SL}) < 0 \} < P_0 \quad (۵)$$

P{ } : احتمال آغاز خوردگی

a: پوشش بتن [mm]

C_{crit}: میزان یون کلرید آستانه [wt.-%/c]

C (a, t SL): میزان یون کلرید در عمق a در زمان SL [wt.-%/c]

P₀: احتمال شکست هدف (بر اساس میزان اهمیت سازه در نظر گرفته می شود).

زمان آغاز خوردگی زمانی است که شاخص قابلیت اعتماد به مقدار ۱/۳ برسد. این مقدار تقریباً معادل احتمال آغاز خوردگی ۱۰٪ می باشد (Lin, 2001; fib Model Code, 2006).

۳. ارزیابی مدل

در این قسمت، مدل fib برای شرایط محیطی خلیج فارس مورد ارزیابی قرار گرفته است. روش کار بدین صورت است که ابتدا سازه های بتن مسلحی در این منطقه با توجه به امکان دسترسی به مستندات طراحی و اجرا، انتخاب شده و مدل های برای شرایط سازه ها حل شده است. پس از آن از بتن سازه های مورد نظر پروفیل یون کلرید تهیه شده و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از مدل

شود. اساس مدل سازی بر پایه حل کرنک معادله دیفرانسیل انتشار قانون دوم فیک است (fib Model Code, 2006).

این مدل از سه بخش عمده تشکیل شده است. بخش اول، معادلات تعیین کننده ضریب انتشار ظاهری است که بر اساس آزمایش تسریع شده مهاجرت یون کلرید^۱، شرایط آب و هوایی، مشخصات مخلوط بتن و زمان، تخمین زده می شود (معادلات ۱ الی ۳). 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 است (معادله ۴). بخش سوم این مدل تعیین کننده احتمال آغاز خوردگی در زمان های مختلف و تعیین زمان آغاز خوردگی بر اساس نظریه قابلیت اعتماد^۲ است (معادلات ۵ و ۶). اکثر پارامترهای ورودی مدل به صورت احتمالاتی مقداردهی می شود، بدین معنی که تعیین پارامترهای ورودی به صورت تابع توزیع بوده و بر اساس احتمالات مختلف، پارامترهای ورودی بر اساس مقدار میانگین، انحراف معیار و تابع توزیع، مقداردهی می شوند.

$$D_{app,C} = k_e \times D_{RCM,0} \times k_t \times A(t) \quad (۱)$$

$$k_e = \exp \left(b_e \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right) \quad (۲)$$

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \quad (۳)$$

k_e: متغیر تبدیل محیطی

b_e: متغیر رگرسیون [کلوین] [k]

T_{ref}: دمای استاندارد آزمایش [کلوین] [k]

T_{real}: دمای عضو بتن مسلح یا دمای هوای پیرامون [کلوین] [k]

D_{RCM,0}: ضریب مهاجرت یون کلرید در بتن [mm²/a]

k_t: متغیر رگرسیون [کلوین] [-]

A(t): زیرتابع در نظر گیرنده کهنگی (سن بتن) [-]

a = نما [-]

t₀ = زمان مبنا [سال]

¹ Rapid Migration Test (NT-Build 492)

² Reliability Theory

۳-۲. نتایج آزمایش‌ها

آزمایش‌های تعیین عمق میلگرد، تعیین عمق بتن کربناته شده (ASTM C114-00) و تعیین و تحلیل پروفیل یون کلرید (ASTM C114-00; Crank, 1975) صورت گرفته و به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۲ نمایش داده شده است. نقاط مختلف نمونه‌گیری با کد A, B, C, D و E شناخته می‌گردد که A، کد نمونه اخذ شده از سازه با سن دو سال (باکس تغذیه غربی) و B، سه سال (پل راه آهن شرقی)، C، چهار سال (اسکله یدک-کش‌ها)، D، پنج سال (اسکله غربی) و E، شش سال (پل کامیون روی غربی) است و شرایط قرارگیری جزر و مدی با TID نمایش داده شده است.

جدول ۲: نتایج آزمایش بر روی سازه‌ها

کد نمونه	سن	ضریب انتشار mm ² /Years	میزان یون کلرید سطحی Wt.%/cement	عمق کربناسیون (mm)	میزان پوشش بتنی	
					میانگین mm	CoV %
A-ATM	۲	82.65	0.31	1	70.25	1%
B-ATM	۳	49.47	0.46	3.5	71.5	7%
C-ATM	۴	38.93	1.0876	6	74.2	6%
D-ATM	۵	69.69	0.726	8.5	59.8	5%
E-ATM	۶	15.31	1.986	9	38.9	12%
A-TID	۲	237.9	2.729	0	70.25	1%
B-TID	۳	53.13	4.981	0	71.5	7%
C-TID	۴	12.91	3.383	0.5	74.2	6%
D-TID	۵	27.91	6.063	2	59.8	5%
E-TID	۶	20.68	8.439	3.5	38.4	12%

* CoV یا ضریب تغییرات از تقسیم انحراف معیار بر مقدار میانگین محاسبه می‌گردد. (s/m*100)

۳-۳. حل مدل و مقایسه نتایج

۳-۳-۱. مقایسه ضریب انتشار ظاهری

نتایج خروجی در این مدل به صورت مجموعه‌ای از اعداد است که برای بررسی بهتر نتایج حاصله نیاز به بررسی‌های آماری است. شکل ۳ نمودار فراوانی داده‌های خروجی مدل برای ضریب انتشار ظاهری برای بتن با عمر ۲ سال را نمایش می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت که اگرچه بازه اعداد احتمالی اخذ شده برای تخمین ضریب انتشار از بازه صفر تا ۱۰۰۰ mm²/years، اما با احتمال وقوع مختلف است.

مقایسه شده است. شایان ذکر است بر اساس پارامترهای ورودی مدل، آزمون‌هایی در آزمایشگاه ساخته شده و آزمایش تسریع شده مهاجرت یون کلرید RCMT بر روی آن‌ها صورت گرفته است و با توجه به محدودیت مدل در مدل‌سازی میزان کلرید سطحی، این مقدار بر اساس اطلاعات به دست آمده از پروفیل‌های یون کلریدهای اخذ شده از سازه در نظر گرفته شده است.

با توجه به ماهیت احتمالاتی این مدل، برای حل آن از روش مونت کارلو استفاده شده است (روش‌های مونت کارلو یک دسته از الگوریتم‌های محاسبه‌گر، بر پایه نمونه‌گیری‌های تکرار شونده تصادفی است (Lin, 2001; Christian, 2009)). برای حل مدل بدین روش از نرم‌افزارهای Excel 2007, Math wave, SPSS 18 و MATLAB 9 استفاده شده است.

۳-۱. معرفی سازه‌ها

سازه‌های مورد نظر در مجتمع بندری امام خمینی (ره) و در متهی الیه خلیج فارس (منطقه غرب خلیج فارس) واقع شده است. سازه‌های مدنظر متشکل از ۵ سازه مجزا بوده که در دوره‌های مختلف زمانی اجرا شده است. شکل ۱ نمایی از سازه‌ها و جدول ۱ مشخصات طرح اختلاط بتن را نمایش می‌دهد.



شکل ۱: نمایی از سازه‌های مورد بررسی

جدول ۱: مشخصات طرح اختلاط

۰/۳۵	نسبت آب به مواد سیمانی
۴۵۰	میزان سیمان تیپ ۲ [Kg/m ³]
۷٪	درصد دوده سیلیس
۸۶۴	میزان ماسه [kg]
۲۶۰	میزان نخودی [kg]
۶۰۶	میزان بادامی [kg]

نرم‌افزار Matlab و SPSS و Mathwave انجام شده که نتایج آن به صورت کیفی در این جدول مشاهده می‌شود.

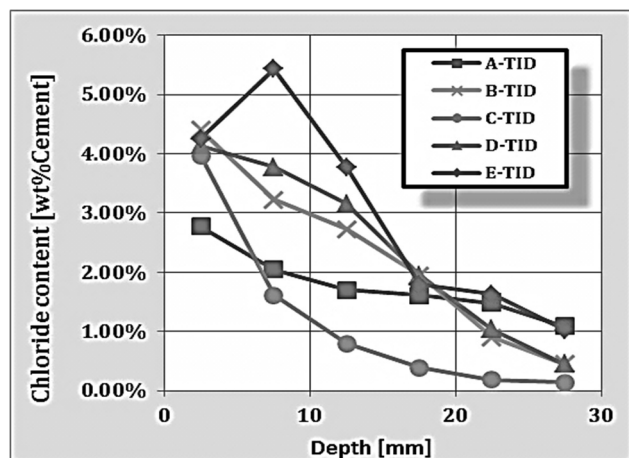
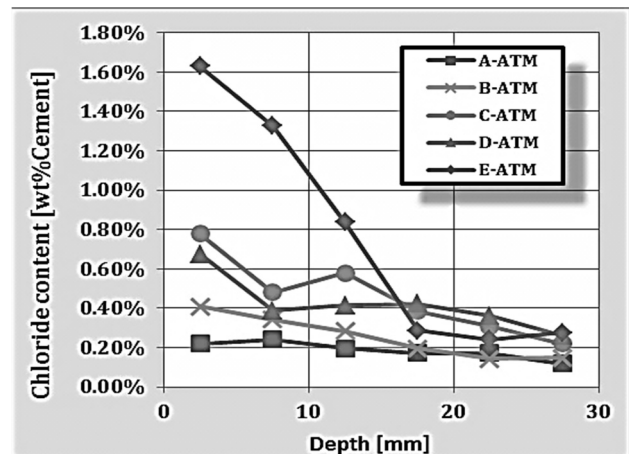
با توجه به جدول ۳ به نظر می‌رسد که نتایج تخمین ضریب انتشار ظاهری در شرایط اتمسفری برای سنین کم نسبت به سنین زیاد مناسب‌تر است. علت این امر را می‌توان در عدم تطابق شرایط محیطی خلیج فارس با شرایطی که این مدل در آن کالیبره شده دانست. این مدل برای سنین پایین در شرایط اتمسفری تخمین‌های مناسبی ارائه می‌دهد که این نشان دهنده قابلیت مدل در تخمین ضریب انتشار اولیه است، ولی با گذر زمان و بروز عدم تطابق بین نتایج با واقعیت، اثر توان عمر^۱ که تعیین کننده تغییرات ضریب انتشار در طول زمان است، روشن‌تر شده و مقداره‌ی نامناسب این ضریب نمایان می‌گردد.

با توجه به نتایج تخمین مدل برای شرایط جزر و مدی، به نظر می‌رسد که مدل روند مشخصی را طی نموده و در برخی موارد نتایج بسیار خوب و در برخی موارد نتایج ضعیفی ارائه نموده است. از آنجا که اغلب میانگین اعداد اخذ شده برای ضریب انتشار بیشتر از مقادیر واقعی می‌باشد، انتظار می‌رود مدل، برای زمان آغاز خوردگی تخمینی کمتر از واقعیت ارائه نماید.

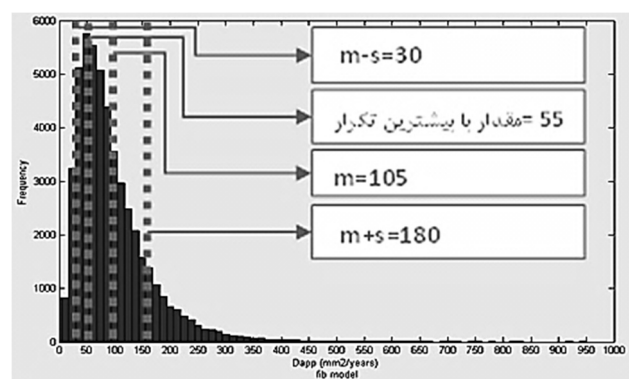
۲-۳-۳. پروفیل یون کلرید

پروفیل یون کلرید برای نقاط مختلف در سنین مختلف به صورت احتمالاتی به دست آمده است و نتایج خروجی این مدل برای پروفیل یون کلرید به صورت سه بعدی است، که اگر فضای سه بعدی فرض شود و محور X نشان دهنده عمق از سطح بتن باشد و محور Z میزان یون کلرید، محور Y فراوانی اعداد اخذ شده برای میزان یون کلرید در هر عمق است؛ از این رو ابتدا تحلیل آماری روی نمودار فراوانی انجام شده و حدودی بر اساس مقدار میانگین و انحراف معیار به عنوان بازه محتمل‌ترین نتایج برای هر نقطه بدست آمده است. و برای هر نقطه از سازه سه پروفیل تخمین در نظر گرفته شده است.

با برازش حدود ۶۵ تابع توزیع بر نقاط مختلف، توابع بتا، گاما و لاگ‌پیرسون تطابق مناسب‌تری با نتایج دارد و به خصوص تابع بتا تطابق بسیار مناسبی داشته و از این رو برای بررسی‌های احتمالاتی پروفیل یون کلرید از تابع توزیع بتا استفاده شده است. برای در نظر گرفتن حدودی برای پروفیل یون کلرید تخمینی از بازه‌ای به میزان



شکل ۲: پروفیل یون کلرید



شکل ۳: نمودار فراوانی ضریب انتشار ظاهری تخمینی توسط مدل fib برای سن دو سال

در جدول ۳ نتایج تحلیل ضریب انتشار ظاهری برای کلیه نمونه‌ها آورده شده است که بنا بر تحلیل‌های احتمالاتی صورت گرفته مقادیر میانگین ضرایب انتشار ظاهری و انحراف از معیار و همچنین مقادیر تقریبی ضریب انتشار ظاهری با بیشترین تکرار آورده شده است و برای ارزشیابی نتایج این مدل، فرایند آماری و احتمالاتی با

^۱ Ageing Exponent

مختلف، زمان آغاز خوردگی را نمایش می‌دهد. شکل ۵ نمودار توزیع تجمعی احتمال وقوع آغاز خوردگی را برای بتن در شرایط جزر و مدی برای ۷۰ میلیمتر پوشش بتن روی میلگرد را نمایش می‌دهد.

مدل fib برای تعیین زمان آغاز خوردگی از تئوری قابلیت اعتماد بهره برده و بر اساس این نظریه شاخص قابلیت اعتماد را برای بتن تعیین نموده و هر زمان که این شاخص به مقدار $1/3$ تنزل پیدا نمود را زمان آغاز خوردگی می‌نامد.

زمان آغاز خوردگی برای کلیه نمونه‌ها بر اساس پوشش بتنی موجود و طراحی به کمک مدل fib تخمین زده شده و در جدول ۴ به همراه میزان شاخص قابلیت اعتماد و ضریب اطمینان فعلی سازه بر اساس سن و میزان پوشش بتنی آن آورده شده است.

جدول ۴: زمان آغاز خوردگی تخمین زده شده به کمک مدل

کد	پوشش اجرایی (mm)	سن بتن (سال)	شاخص قابلیت اعتماد فعلی	ضریب اطمینان فعلی	زمان آغاز خوردگی برای پوشش بتنی طراحی (mm)	زمان آغاز خوردگی برای پوشش بتنی طراحی
A-ATM	70.25	2	3.10	6.18	21	22
B-ATM	71.5	3	2.90	5.89	23	
C-ATM	74.2	4	2.88	5.81	26	
D-ATM	59.8	5	2.17	4.95	15	
E-ATM	38.9	6	1.03	3.10	4	
A-TID	70.25	2	2.41	5.82	5.8	
B-TID	71.5	3	2.10	5.35	6	5.8
C-TID	74.2	4	1.76	5.16	7	
D-TID	59.8	5	1.05	3.94	3.5	
E-TID	38.4	6	0.00	1.84	1.5	

همان‌گونه که از نتایج تخمین ضریب انتشار و پروفیل یون کلرید انتظار می‌رفت، زمان‌های آغاز خوردگی تخمینی اعداد کم و به نظر غیر واقعی بوده و استفاده از این مدل برای شرایط محیطی خلیج فارس احتمالاً منجر به تخمین‌های بدور از واقعیت و یا بسیار محافظه‌کارانه شده و باعث می‌گردد هزینه‌های ساخت و نگهداری سازه بتنی افزایش یافته و در زمانی که نیاز نباشد اقدام به تعمیر شود و یا میزان پوشش بتنی روی میلگرد بیش از مقدار مورد نیاز در نظر گرفته شود.

۴. اصلاح مدل

بررسی مدل fib که یکی از بهترین مدل‌های تخمین زمان آغاز خوردگی است، نشان می‌دهد که اساس این مدل بسیار قوی در تجزیه تحلیل و همچنین ارائه نتایج بسیار کاربردی برای برآوردهای عمر مفید است ولی متأسفانه به علت عدم تطابق پارامترهای مدل با شرایط محیطی خلیج فارس، نتایج غیر قابل اعتمادی ارائه می‌نماید.

نصف انحراف معیار در اطراف میزان مقدار میانگین استفاده شده است که این عمل سبب می‌شود بازه ۳۰ الی ۵۰ درصد محتمل‌ترین پروفیل یون کلریدهای تخمینی برای بررسی پروفیل یون کلرید بر اساس تابع توزیع بتا انتخاب شود. شکل ۴ نتایج مقایسه پروفیل یون کلرید واقعی را با مقادیر تخمینی توسط مدل را نمایش می‌دهد.

جدول ۳: نتایج تخمین ضریب انتشار ظاهری به کمک مدل fib، کلیه ضرایب انتشار بر حسب mm^2/years است.

کد نمونه	ضریب انتشار ظاهری واقعی	مشخصات آماری ضریب انتشار ظاهری تخمینی		مقدار ضریب انتشار با بیشترین تکرار	ارزیابی***
		m**	s*		
A-ATM	82.65	75	105	55	خوب
B-ATM	49.47	72	95	50	بسیار خوب
C-ATM	38.93	69	88	40	بسیار خوب
D-ATM	69.69	65	83	35	خوب
E-ATM	15.31	63	80	40	ضعیف
A-TID	237.9	75	105	55	ضعیف
B-TID	53.13	72	95	50	بسیار خوب
C-TID	12.91	69	88	40	ضعیف
D-TID	27.91	65	83	40	خوب
E-TID	20.68	63	80	40	متوسط

* S: انحراف معیار داده‌های تخمینی

** m: مقدار میانگین داده‌های تخمینی

*** ارزیابی کیفی بدین صورت طبقه بندی شده است (شکل ۳):

ضعیف: ضریب انتشار واقعی در بازه $m \pm s$ قرار نگرفته است.

متوسط: ضریب انتشار واقعی در بازه $m \pm s$ قرار گرفته و مقدار آن بین بازه پرتکرارترین مقدار و m-s یا در بازه $m \pm s$ و میانگین می‌باشد.

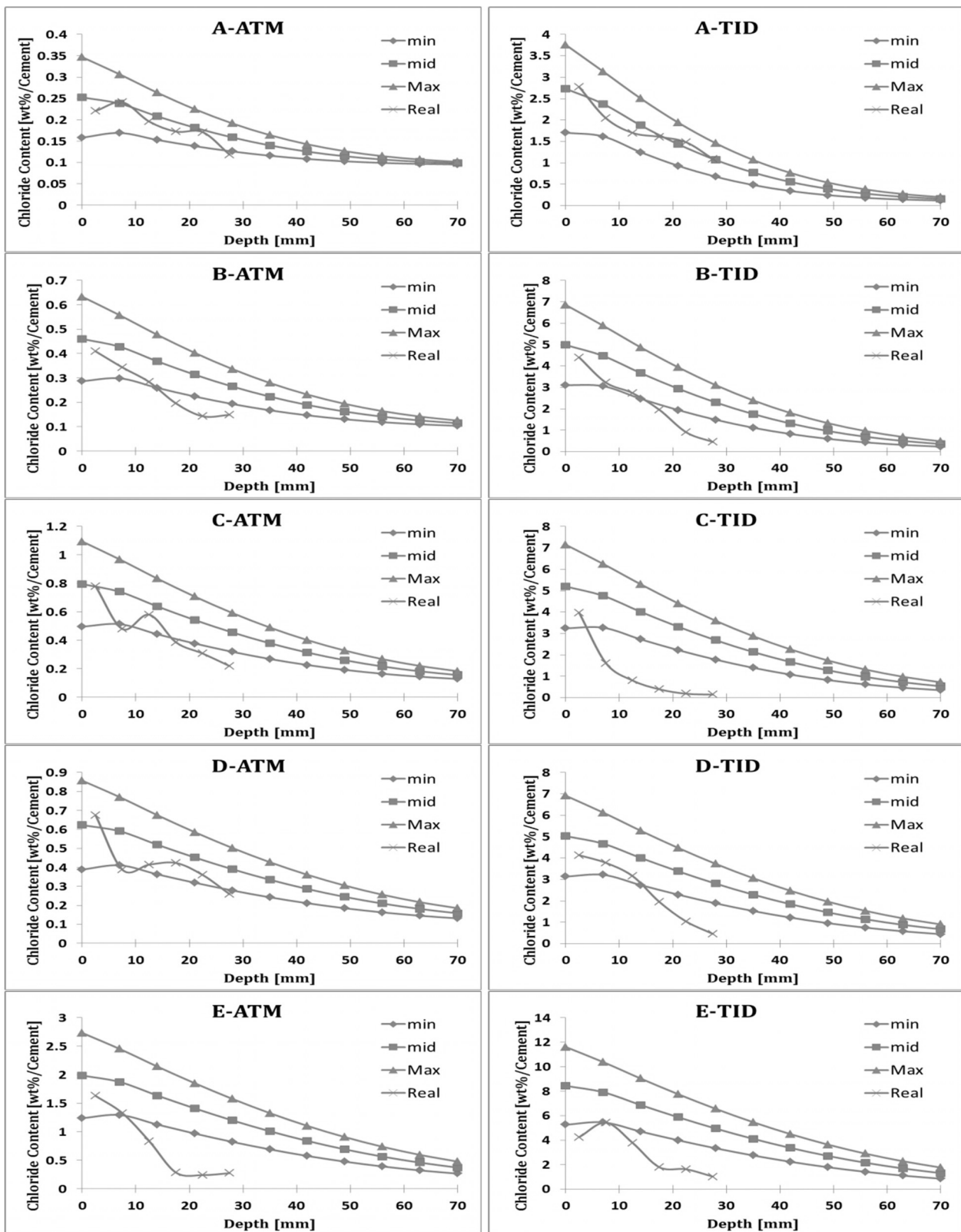
خوب: ضریب انتشار واقعی در بازه $m \pm s$ قرار گرفته و مقدار آن بین بازه پرتکرارترین مقدار و میانگین می‌باشد.

بسیار خوب: ضریب انتشار واقعی در بازه $m \pm s$ قرار گرفته و مقدار در محدوده پرتکرارترین مقادیر می‌باشد.

در شکل ۴ مشاهده می‌شود که مدل برای نمونه‌های با سنین کم نتایج مطلوبی ارائه نموده است و همان‌گونه که در بخش تخمین ضریب انتشار ذکر شد، این امر نشان دهنده‌ی قابلیت مدل در تخمین شرایط اولیه بتن می‌باشد ولی با گذر زمان و چشمگیری شدن اثر شرایط محیطی و تغییرات ضریب انتشار، مدل، تخمینی بیش از مقادیر واقعی ارائه نموده است و انتظار می‌رود که زمان آغاز خوردگی تخمینی توسط این مدل کمتر از مقدار واقعی بوده و یکی از مهمترین دلایلی که کلیه مدل‌های غیر بومی برای شرایط خلیج فارس نتایج نامطلوب ارائه می‌دهند، عدم تطابق شرایط محیطی که مدل در آن کالیبره شده با شرایط خلیج فارس است.

۳-۴. تخمین زمان آغاز خوردگی

از آنجایی که این مدل به صورت کاملاً احتمالاتی است، اکثر مقادیر ورودی و کلیه نتایج خروجی به صورت احتمالاتی می‌باشد. از این رو این مدل برای زمان آغاز خوردگی یک عدد در نظر نمی‌گیرد و نتایج خروجی به صورت نموداری است که در سطوح احتمال

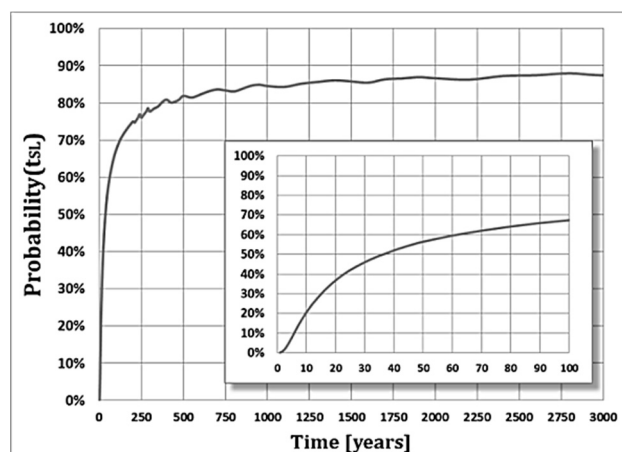


شکل ۴: پروفیل‌های یون کلرید واقعی را به همراه پروفیل‌های یون کلرید تخمینی

تعیین پارامترهای احتمالاتی تشریح شده و پس از آن نتایج اصلاح مدل در هر بخش ارائه می‌گردد.

۴-۱-۱. روش تعیین پارامترهای احتمالاتی

روش تعیین پارامترهای احتمالاتی و انتخاب تابع توزیع احتمال مناسب در هر بخش بدین صورت است که ابتدا کلیه مقادیر محتمل برای هر پارامتر به تفکیک "بتن بدون مواد جایگزین (PC)" و "بتن با دوده سیلیس (PSC)" تعیین شده و اعداد غیر منطقی مانند ضرایب عمر منفی و مقادیر مربوط به نتایج به دست آمده از پروفیل یون کلرید با ضریب همبستگی‌های نامناسب حذف گردیده است ($R2 < 0.85$) و در نهایت برای گروه‌های PC و PSC داده‌ها جمع‌آوری شده و نمودار فراوانی آنها ترسیم شده است. سپس با نرم‌افزار قدرتمند^۳ MathWave (Easy fit)، برازش داده‌ها بر توابع توزیع احتمال صورت گرفته است و بهترین توابع انتخاب می‌شود و سپس به کمک نرم‌افزار MatLab پارامترهای مربوط به توابع تعیین گردیده و در نهایت توابع توزیع به روش شبیه‌سازی مونت کارلو بررسی شده و عدم قطعیت‌های موجود در داده‌های آزمایشگاهی (نتایج حاصل از پروفیل یون کلرید و نتایج آزمایش تسریع شده) برای توابع توزیع منتخب بررسی شده و پارامترهای آماری برای داده‌های خروجی مدل ارزیابی شده است. لازم به ذکر است که برخی توابع احتمالاتی برازش بهتری نسبت به تابع انتخاب شده داشته ولی در بررسی تابع توزیع به روش شبیه‌سازی مونت کارلو، نتایج مطلوبی ارائه نداده و در بررسی تابع توزیع با اعمال عدم قطعیت داده‌های آزمایشی، مدل از واقعیت دور شده است، از این رو توابعی انتخاب شده‌اند که علاوه بر جامعیت^۴ آن و برازش مناسب، نسبت به عدم قطعیت‌های موجود عکس‌العمل مناسب نشان دهند (حساسیت کم نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی). در نهایت سعی شده ضرایب تا حدی که به اساس کار لطمه وارد نشود، گرد شود (Lin, 2001; Kwon et al., 2009; Poulsen et al., 2005).



شکل ۵: نمودار توزیع تجمعی احتمال وقوع آغاز خوردگی را برای بتن در شرایط جزر و مدی برای ۷۰ میلیمتر پوشش بتن روی میلگرد

به نظر می‌رسد که اگر این مدل بر اساس نتایج آزمایش در شرایط محیطی و مصالح خلیج فارس اصلاح و کالیبره گردد، می‌تواند نقش بسیار مثبت و کاربردی در ساخت سازه‌های با دوام و با عمر مفید موردنظر و همچنین نگهداری سازه‌های بتن مسلح را در این منطقه ایفا کند.

برای اصلاح این مدل برای شرایط محیطی و مصالح این منطقه برنامه آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. تعداد ۹ طرح اختلاط بتن با طرح‌های متداول منطقه در نظر گرفته شده و بر روی نمونه‌ها در سنین ۲۸ روز آزمایش‌های متعدد دوام تسریع شده صورت گرفته و نمونه‌ها در شرایط مشابه خلیج فارس قرار داده شده و در سنین مختلف تا ۵ سال مورد آزمایش قرار گرفته است. سپس سعی شده پارامترهای تأثیرپذیر از شرایط محیطی و مصالح اصلاح گردد. شایان ذکر است که اطلاعات مورد نیاز برای اصلاح مدل عموماً توسط نگارندگان مقاله به دست آمده و در برخی از موارد برای تکمیل اطلاعات موجود از منابع معتبر دیگر استفاده شده است که در هر بخش، اطلاعات با ذکر منبع آورده شده است.

۴-۱-۱. اصلاح مدل و تعیین پارامترها

مدل fib در بخش‌های قبل به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است و در این قسمت در نظر است که برخی پارامترهای آن به کمک آزمایش‌های صورت گرفته اصلاح شده و در برخی موارد قسمت‌هایی به این مدل اضافه گردد. در ادامه ابتدا روش

^۱ Portland Cement Concrete

^۲ Portland Silica Fume Cement Concrete

^۳ این نرم‌افزار قابلیت برازش ۶۵ تابع توزیع احتمال بر داده‌ها و امتیازدهی توابع بر اساس توابع ارزیابی را داراست.

^۴ جامعیت تابع توزیع بدین معنی است که اکثر نرم‌افزارهای ریاضی و آمار این توابع را بشناسند.

۴-۱-۲. اصلاح مدل تخمین ضریب انتشار ظاهری

۴-۱-۳. میزان کلرید سطحی

از تحلیل پروفیل یون کلرید با برازش حل کرنک قانون دوم فیک پارامتر مهم کلرید سطحی به دست می‌آید، تحلیل مذکور با فرض ثابت بودن ضریب انتشار و میزان کلرید سطحی است که منجر به نتایج ضریب انتشار ظاهری و به تبع آن کلرید سطحی ظاهری می‌گردد حال آنکه نتیجه تحقیقات نشان می‌دهد که هر دو پارامتر ذکر شده با زمان تغییر می‌نمایند و فرض ثابت بودن آنها با مشکل روبرو است و اگر بتوان ارتباطی بر حسب زمان برای این پارامترهای ظاهری یافت، امکان تخمین پروفیل یون کلرید آتی بتن فراهم خواهد شد (Poulsen et al, 2005). در این قسمت در نظر است بر اساس داده‌های پروفیل یون کلریدهای ۹ ماه و ۵ ساله، مدلی برای تخمین میزان یون کلرید سطحی آتی بتن ارائه شود. تابع ریاضی کلی مدل به صورت معادله ۹ است.

$$CS_t = CS_{ref} \times \left(\frac{t}{t_{ref}}\right)^{\beta} \quad (9)$$

از داده‌های ۹ ماهه برای تخمین کلرید سطحی مرجع استفاده شده و برای ضریب β از برازش داده‌های ۹ ماه با داده‌های ۵ ساله استفاده شده است. شایان ذکر است بنا به تحقیقات صورت گرفته کلرید سطحی تا مدتی افزایش یافته و از آن پس ثابت می‌گردد، از این رو به این علت که مدل بر اساس نتایج ۵ ساله کالیبره شده است، مدت تغییرات کلرید سطحی پنج سال پیشنهاد می‌گردد. که بسته به نظر طراح قابل تغییر می‌باشد و باید در نظر داشت که میزان کلرید سطحی پس از ۵ سال (یا مدت مدنظر طراح) تا انتها ثابت می‌ماند (Ann et al., 2009). برای تخمین کلرید سطحی مبنا از داده‌های ۹ ماه که برای هر طرح اختلاط سه عدد موجود است، استفاده شده است، شایان ذکر است که برای پارامترهای کلرید سطحی گروه‌های PC و PSC در نظر گرفته نشده است، هرچند تحقیقات نشان می‌دهد که میزان کلرید سطحی به مواد تشکیل دهنده بتن وابسته می‌باشد ولی به علت کافی نبودن داده‌ها این فرض اعمال شده است (Ann et al., 2009). نحوه مقداردهی معادله ۹ در جدول ۶ آورده شده است.

۵. تحلیل و ارزیابی مدل اصلاح شده با نتایج بدست آمده از سازه واقعی

در این بخش در نظر است مدل اصلاح شده، به کمک نمونه-های اخذ شده از بندر امام خمینی (ره) بررسی و ارزیابی گردد. از

این مدل ضریب انتشار ظاهری را بر اساس نتایج RCMT در نظر می‌گیرد، از این رو نمونه‌هایی با طرح اختلاط‌های مشخص تهیه شده و آزمایش RCMT در سن ۲۸ روز صورت گرفته است. با توجه به در دست داشتن ضریب انتشار ظاهری برای هر ۹ طرح اختلاط در سنین ۳ ماه (یک پروفیل)، ۹ ماه (چهار پروفیل)، ۳ سال (یک پروفیل) و ۵ سال (یک پروفیل) و ضرایب انتشار اولیه (DRCM)، توان عمر در دو گروه PC و PSC به صورت احتمالاتی تعیین شده است. صورت کلی مدل برای تخمین ضریب انتشار ظاهری به صورت معادله‌های ۷ و ۸ است و این معادلات تا ۲۵ سال صادق بوده و از آن پس برای جلوگیری از اتخاذ مقادیر غیر واقعی، ضریب انتشار ثابت شده و با مقدار برابر با سن ۲۵ سال تا انتها ثابت می‌ماند (Poulsen et al., 2005; Kwon et al., 2009). جدول ۵ مقداردهی پارامترهای معادله ۷ و ۸ را نمایش می‌دهند.

$$D_{app,t} = D_{ref} \times \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^{\alpha} \quad (7)$$

$$D_{ref} = D_{RCM} \times \exp\left(b_e \times \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}}\right)\right) \quad (8)$$

DRCM: نتیجه آزمایش تسریع شده مهاجرت کلرید RCMT
بر حسب $mm^2/years$
be: ضریب رگرسیون [-]
Tref: دمای آزمایش RCMT [درجه کلین]
Treal: دمای محیط قرارگیری بتن، نزدیکترین ایستگاه هواشناسی [درجه کلین]

جدول ۵: مقداردهی پارامترها برای تخمین ضریب انتشار

ضرایب	تابع توزیع	پارامترها توابع	نحوه تعیین
DRCM	نرمال	نتیجه آزمایش $m=$ $s=0.2$ m	انجام آزمایش
tref	ثابت	0.0767	سن آزمایش
Be	نرمال	$m=4800$ $s=700$	مقدار دهی تابع توزیع
Tref	مقدار ثابت	298 oK	دمای محیط هنگام آزمایش RCMT
Treal	نرمال	m, s	دمای محیطی بتن
aPC	لاگنرمال	$s=0.04$ $\mu=1.37$	مقدار دهی تابع توزیع
aPSC	لاگنرمال	$s=0.28$ $\mu=-0.54$	مقدار دهی تابع توزیع

m و s به ترتیب مقدار میانگین و انحراف معیار می‌باشد.
g و μ و σ پارامترهای تابع توزیع لاگنرمال می‌باشد.

۵-۲. تخمین ضریب انتشار ظاهری

ضریب انتشار ظاهری به کمک مدل ارائه شده برای بتن واقع در بندر امام خمینی (ره) در سنین ۲ الی ۶ سال تخمین زده شده و با مقدار واقعی به دست آمده از پروفیل یون کلرید اخذ شده از سازه مقایسه شده است و در جدول ۸ نمایش داده شده است.

جدول ۸: نتایج تخمین ضریب انتشار ظاهری به کمک مدل اصلاح شده در مقایسه با تخمین مدل fib و مقدار بدست آمده از آزمایش

تخمین به کمک مدل اصلاح شده mm ² /years	تخمین به کمک مدل fib mm ² /years	پروفیل یون کلرید Dapp mm ² /years	کد مشخصه
m=35 s=20	m=105 s=75	237.9	A-TID
m=27 s=22	m=95 s=72	53.13	B-TID
m=23 s=19	m=88 s=69	12.91	C-TID
m=20 s=18	m=83 s=65	27.91	D-TID
m=19 s=17	m=80 s=63	20.68	E-TID

۵-۳. تخمین پروفیل یون کلرید

پروفیل یون کلرید به کمک مدل ارائه شده برای بتن واقع در بندر امام خمینی (ره) در سنین ۴ و ۶ سال تخمین زده شده و با مقدار واقعی پروفیل یون کلرید اخذ شده از سازه مقایسه شده است و در شکل ۷ نمایش داده شده است.

آنجا که مدل برای شرایط جزر و مدی ارائه شده است، نمونه‌های مربوط به این شرایط قرارگیری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۶: مقدار دهی پارامترهای معادله ۹ برای تخمین کلرید سطحی بر حسب درصد وزنی نسبت به بتن

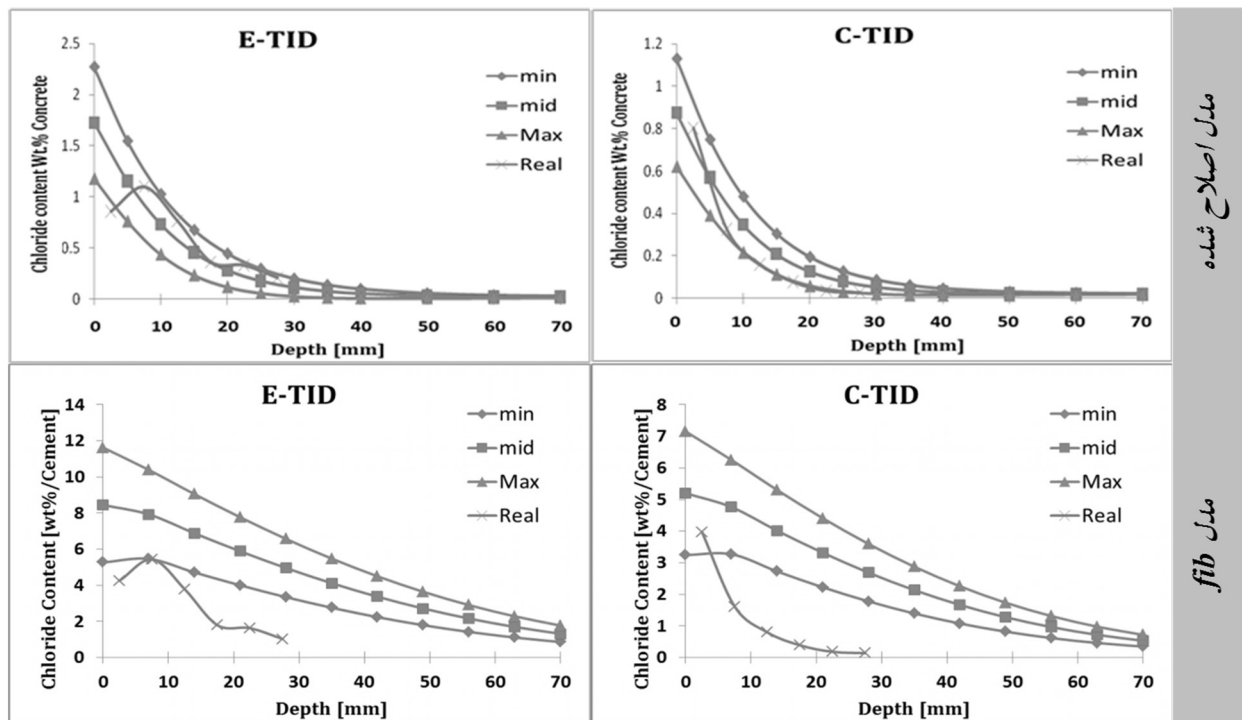
ضرایب	تابع توزیع	پارامترها توابع	نحوه تعیین
Csref	لاگنرمال	$\mu=3.2, s=0.52, g=0.01$	مقدار دهی تابع توزیع
tref	ثابت	0.75 سال	۹ ماه
β PC or PSC	بتا	$a1=10, a2=2.5, a=0, b=2$	مقدار دهی تابع توزیع

۵-۱. تخمین میزان کلرید سطحی

به کمک مدل ارائه شده، میزان کلرید سطحی برای بتن واقع در بندر امام خمینی در سنین ۲ الی ۶ سال تخمین زده شده و با مقدار واقعی به دست آمده از پروفیل یون کلرید اخذ شده از سازه مقایسه شده است و در جدول ۷ نمایش داده شده است.

جدول ۷: نتایج تخمین میزان یون کلرید سطحی به کمک مدل پیشنهادی و مقایسه با مقادیر بدست آمده از پروفیل یون کلرید

کد مشخصه	بدست آمده از پروفیل یون کلرید % wt/conc	تخمین به کمک مدل حاضر % wt/conc
A-TID	0.5523%	m=0.278 s=0.1
B-TID	1.008%	m=0.542 s=0.297
C-TID	0.6847%	m=0.875 s=0.5
D-TID	1.227%	m=1.271 s=0.77
E-TID	1.708%	m=1.726 s=1.09



شکل ۷: پروفیل‌های یون کلرید تخمینی توسط کلیه مدل‌ها در مقایسه با یکدیگر و پروفیل یون کلرید واقعی برای سنین ۴ و ۶ سال

۴-۵. تخمین زمان آغاز خوردگی

قرار گرفت، مدل اصلاح شده نیز بررسی و ارزیابی گردد. شایان ذکر است که مدل به کمک داده‌های به دست آمده از تحقیق در ناحیه شرقی خلیج فارس (بندر عباس) اصلاح شده است. نتایج به دست آمده از ارزیابی مدل اصلاح شده نشان دهنده نزدیکتر شدن تخمین ها به واقعیت می‌باشد و لازم به ذکر است این مدل هنوز هم با عدم قطعیت و کمی و کاستی‌هایی روبروست که یکی از علل آن آزمایش‌های محدود و علت اصلی آن عدم قطعیت‌های ذاتی مسئله است. در نهایت با توجه به مدل‌های بومی موجود در این منطقه که عموماً به صورت قطعی هستند می‌توان گفت که مدل اصلاح شده که به صورت کاملاً احتمالاتی است می‌تواند برای بررسی‌های عمر مفید به صورت احتمالاتی بسیار مفید واقع گردد.

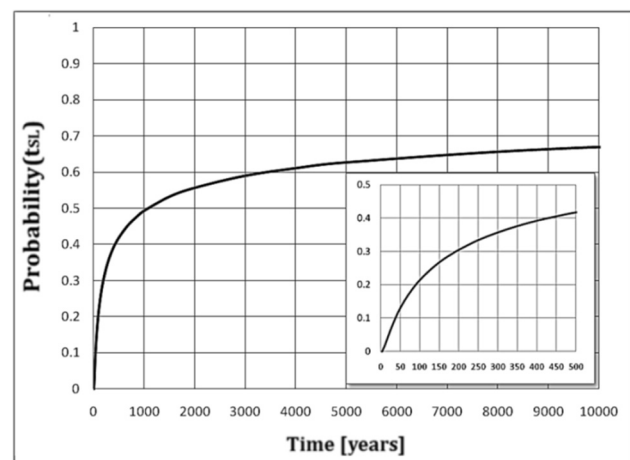
۷. سپاسگزاری

از شرکت مشاور تدبیر ساحل پارس به خصوص جناب مهندس طاحونی، بخش مهندسی عمران سازمان بنادر و دریانوردی جناب مهندس شاکری‌نیا، انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران و همکاران در مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

- ACI Committee 365., 2000. 1R-42: Service-Life Prediction-State of the Art report.
- ACI., 2009. User manual of Life-365 Service Life Prediction Model.
- ASTM C114-00., 2000. Standard test method for chemical analysis of hydraulic cement. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01.
- Ann, K. Y.; Ahn, J.H.; Ryou, J.S., 2009. The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures. *Construction and Building Materials*, (23): 239-245.
- Christian, R., 2009. Monte carlo methods in statistics. University Paris Dauphine and CREST, INSEE, 1-4 pp.
- Crank, J., 1975. *The Mathematics of diffusion*, 2nd ed., Oxford Press, London, 411 pp.

زمان آغاز خوردگی برای سازه بتن مسلح واقع در بندر امام خمینی (ره) بر اساس پوشش بتن طراحی شده (۷۰ میلیمتر)، به دست آمده و شکل ۸ منحنی تابع تجمعی احتمال زمان آغاز خوردگی آن را نمایش می‌دهد و بر اساس احتمال ۱۰٪ یا قابلیت اطمینان ۱/۳ زمان آغاز خوردگی تخمین زده شده است. مدل اصلاح شده زمان آغاز خوردگی را ۳۵/۵ سال برآورد نموده است، در حالی که مدل *fib* این زمان را ۵/۵ سال برآورد نموده است.



شکل ۸: منحنی تابع تجمعی احتمال زمان آغاز خوردگی برای سازه بتنی در بندر امام خمینی (ره) به کمک مدل اصلاح شده برای پوشش بتنی طراحی معادل ۷۰ میلیمتر

۶. نتیجه‌گیری

استفاده از مدل‌های در فرآیندهای طراحی و تعمیرات و نگهداری باعث کاهش هزینه‌های مطالعات اولیه ساخت و همچنین نگهداری آن می‌گردند و این در صورتی است که مدل‌ها منطبق با شرایط محیطی و مصالح مورد نظر باشد. در این تحقیق مشاهده می‌شود که مدل *fib* که یکی از معروف‌ترین مدل‌های حال حاضر دنیا است برای شرایط خلیج فارس مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج نشان دهنده عدم تطابق مدل با شرایط محیطی و مصالح این منطقه است. در حالی که این مدل در زمینه مدل سازی و ارائه نتایج کاربردی بسیار توانمند می‌باشد ولی نتایج به دست آمده از آن برای شرایط خاص این منطقه غیر قابل اعتماد است از این رو سعی شده در این تحقیق پارامترهای تاثیرپذیر از شرایط محیطی و مصالح مورد بررسی و اصلاح قرار گیرد و در نهایت همان‌گونه مدل اصلی مورد بررسی

- Journals, 2(4) 33-44.
- Ramezaniapour, A. A.; Miyamoto, A., 2000. Durability of concrete structures in the Persian Gulf. Concrete Journal of JCI, Japan, 38(3): 117-129.
- The International Federation for Structural concrete (fib)., 2006. Model Code for Service Life Design. Bulletin 34.
- Vidal, T.; Castel, A.; François, R., 2005. Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment. Journal of Cement and Concrete Research, (35): 226-232.
- Kwon, s.j et al., 2009. Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion. Journal of Structural Safety, (31):75-83.
- Lin, J.S., 2001. Monte carlo strategies in scientific computing. department of statistics, Harvard University, 344P.
- Poulsen, E.; Mejlbro, L., 2005. Diffusion of chloride in concrete. Taylor Francis, London and New York. 422P.
- Ramezaniapour, A. A.; Pourkhorshidi, A. R., 2004. Iranian code for durable concrete in Persian Gulf and Oman Sea. Building Engineering and Housing Science