



مرکز پژوهش‌های مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



ICOPMAS

دهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی
۲۹ آبان لغایت ۱ آذر ۹۱ (تهران-ایران)



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

علی اکبر رمضانیاپور^۱، احسان جهانگیری^۲، فرامرز مودی^۳، بابک احمدی^۴

کلید واژه: بتن، دوام، مدل fib، مدل های احتمالاتی، محیط دریایی خلیج فارس.

چکیده

خسارات ناشی از خوردگی فولاد مدفون در بتن بخش عمده ای از خرابی سازه های بتن مسلح در حاشیه دریاها را در بر گرفته و سالیانه هزینه های بسیار زیادی را در صنعت ساختمان به خود اختصاص داده است. شبیه سازی رفتار بتن در زمینه خوردگی فولاد مدفون می تواند در زمینه کاهش هزینه های ناشی از خسارت بسیار موثر واقع گردد [۱]. مدل fib که در سال ۲۰۰۶ میلادی توسط فدراسیون بین المللی بتن ارائه شده است یکی از بهترین و کاربردی ترین مدل های حال حاضر دنیا می باشد. این مدل فرایندهای خوردگی را به صورت احتمالاتی مدل می نماید [۲]. 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 به علت گرما و رطوبت شدید و همچنین میزان یون کلرید موجود در آب آن، یکی از مخرب ترین محیط های دریای در سطح جهان می باشد [۳]. بدین منظور ۵ سازه بتن مسلح که در سنین مختلف ساخته شده در این منطقه مورد آزمایش قرار گرفته است و نتایج بدست 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.

معرفی

بتن به عنوان یک ماده ساختمانی بسیار مهم، سالهاست که در صنعت ساختمان بکار می رود. غالباً در دهه های گذشته، طراحی اجزاء مخلوط بتن براساس مقاومت صورت می گرفت، ولی اخیراً علاوه بر مقاومت، طراحی براساس دوام بتن نیز در اغلب آیین نامه ها مشاهده می شود که علت این امر را می توان مشکلات جدی بتن مسلح در شرایط محیطی خورنده دانست [۱]. یکی از خورنده ترین شرایط محیطی برای بتن مسلح از نقطه نظر دوام، شرایط دریایی می باشد. ضایعات و خسارات ناشی از اثرات خوردگی روی سازه هایی که در سواحل دریا احداث می گردند، سالانه رقم قابل توجهی از هزینه های صنعت ساختمان را به خود اختصاص می دهد [۲].

عوامل متعددی در شرایط محیطی دریایی بر دوام بتن مسلح موثر می باشند، ولی تحقیقات، گویای نقش غالب خوردگی فولاد مدفون در بتن به علت یون کلرید موجود در سطح میلگرد می باشد. در صورتی که میزان یون کلرید در سطح میلگرد از حد آستانه ۵ بیشتر شود، لایه محافظ از بین رفته و خوردگی فولاد مدفون آغاز می گردد 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 می نهد [۳]. تحقیقات گذشته نشان

^۱ - استاد/رئیس مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن - مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر - aaramce@aut.ac.ir

^۲ - کارشناس ارشد/عضو مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن - مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر - jahangiri@aut.ac.ir

^۳ - استادیار/عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن - مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر - Fmoodi@aut.ac.ir

^۴ - دانشجوی دکتری/عضو مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن - مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر - Bahmadi@aut.ac.ir

می‌دهد که بیش از ۹۰٪ خرابی‌های سازه‌های حاشیه خلیج فارس و دریای عمان، خوردگی فولاد مدفون ناشی از یون کلرید موجود در بتن می‌باشد.

ساخت بنادر 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 بوجود 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 یکی از این قبیل ابزارها بوده و در صورت برخورداری از دقت و صحت مناسب می‌توانند نقش بسیار مهمی در کاهش هزینه‌های طراحی، تعمیرات و نگهداری ایفا نماید [۴].

مدل‌های تخمین عمر مفید مجموعه از روابط ریاضی می‌باشند که بر اساس مکانیزم‌های خوردگی و آزمایش تهیه می‌شوند و قادرند عمر بتن و یا زمان مناسب برای تعمیر را بدست 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 بدست آمده از مطالعات تئوریک با نتایج بدست آمده از آزمایش اصلاح و کالیبره شود و هر چه مدل با نتایج آزمایشی بیشتری کالیبره شده باشد از دقت و صحت مناسبتی برخوردار می‌باشد، 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 نمایند.

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 بدست دهد، این امر سبب می‌شود که تا حدودی عدم قطعیت‌های موجود در این امر کاهش یافته و نتایج نزدیکتر به واقعیت ارائه شود [۵].

در این مقاله در نظر است مدل fib ۲۰۰۶ 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 می‌باشد.

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 بدست 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.

معرفی مدل fib

در استاندارد یون که توسط فدراسیون بین‌المللی بتن (fib) در بولتن شماره 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 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 بصورت احتمالاتی در تخمین ضریب انتشار ظاهری، تخمین میزان نفوذ یون کلرید بر حسب زمان و در نهایت تخمین زمان آغاز خوردگی در نظر گرفته شود. اساس مدل سازی بر پایه حل کرنک معادله دیفرانسیل انتشار قانون دوم فیک می‌باشد [۵].

این مدل از سه بخش عمده تشکیل شده است. بخش اول، معادلات تعیین کننده ضریب انتشار ظاهری می‌باشد که بر اساس آزمایش تسریع شده مهاجرت یون کلرید^۶، شرایط آب و هوایی، مشخصات مخلوط بتن و زمان، تخمین زده می‌شود (معادلات ۱ الی ۳). بخش دوم، معادله تعیین کننده میزان یون کلرید در عمق مشخص بر حسب زمان می‌باشد که بر اساس معادله انتشار فیک و ضریب انتشار ظاهری می‌باشد (معادله ۴). بخش سوم این مدل تعیین کننده احتمال آغاز خوردگی در زمان‌های مختلف و تعیین زمان آغاز خوردگی بر اساس تئوری قابلیت اعتماد^۷ می‌باشد (معادلات ۵ و ۶).

^۶ Rapid Migration Test (NT-Build ۴۹۲)

^۷ Reliability Theory

اکثر پارامترهای ورودی مدل به صورت احتمالاتی مقداردهی می‌شود، 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 می‌شوند.

$$D_{appC} = k_e \times D_{RCM.} \times k_t \times A(t) \quad (1)$$

$$k_e = \exp\left(b_e \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}}\right)\right) \quad (2)$$

$$A(t) = \left(\frac{t}{t_0}\right)^a \quad (3)$$

ke : 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.}: ضریب مهاجرت یون کلرید در بتن [mm²/a]

k_t: متغیر رگرسیون [کلوین] [-]

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

a = نما [-]

t = زمان مبنا [سال]

$$C(x, t) = C_s + (C_{s,\Delta x} - C_s) \times \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{\sqrt{D_{appC} \times t}}\right] \quad (4)$$

C_{Crit}: میزان یون کلرید آستانه [wt.-%/Cement]

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

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

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

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

a: پوشش بتن [mm]

D_x: ناحیه همرفتی [mm]

D_{appC}: ضریب نفوذ ظاهری کلرید در بتن [mm²/years]

t: زمان [سال]

erf: تابع خطا

$$P\{\} = P_{dep} = P\{C_{crit} - C(a, t_{SL}) < 0\} < P \quad (5)$$

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 t_{SL} [wt.-%/c]

P: احتمال شکست هدف (بر اساس میزان اهمیت سازه در نظر گرفته می‌شود)

زمان آغاز خوردگی زمانی است که شاخص قابلیت اعتماد به مقدار ۱/۳ برسد. این مقدار تقریباً معادل احتمال آغاز خوردگی ۱۰٪ می‌باشد [۶۵].

شاخص قابلیت اعتماد بر اساس معادله ۶ تعیین می‌شود

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_F) \quad (6)$$

Φ^{-1} = تابع معکوس توزیع تجمعی نرمال استاندارد

β = شاخص قابلیت اعتماد

P_F = احتمال شکست

ارزیابی مدل

در این قسمت، مدل fib برای شرایط محیطی خلیج فارس مورد ارزیابی قرار گرفته است. روش کار بدین صورت می‌باشد که ابتدا سازه‌های بتن مسلحی در این منطقه با توجه به امکان دسترسی به مستندات طراحی و اجراء، انتخاب شده و مدل‌های برای شرایط سازه‌ها حل شده است. پس از آن از بتن سازه‌های مورد نظر پروفیل یون کلرید تهیه شده و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از مدل 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 مدل سازی میزان کلرید سطحی، این مقدار بر اساس اطلاعات بدست 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 می‌باشند که محاسبات آن بر پایه نمونه‌گیری‌های تکرار شونده تصادفی می‌باشد [۶ و ۷]). برای حل مدل بدین روش از نرم‌افزارهای ۲۰۰۷ Excel، Math wave، SPSS ۱۸ و MATLAB استفاده شده است.

معرفی سازه‌ها

سازه‌های مورد نظر در مجتمع بندری امام خمینی و در منتهی 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

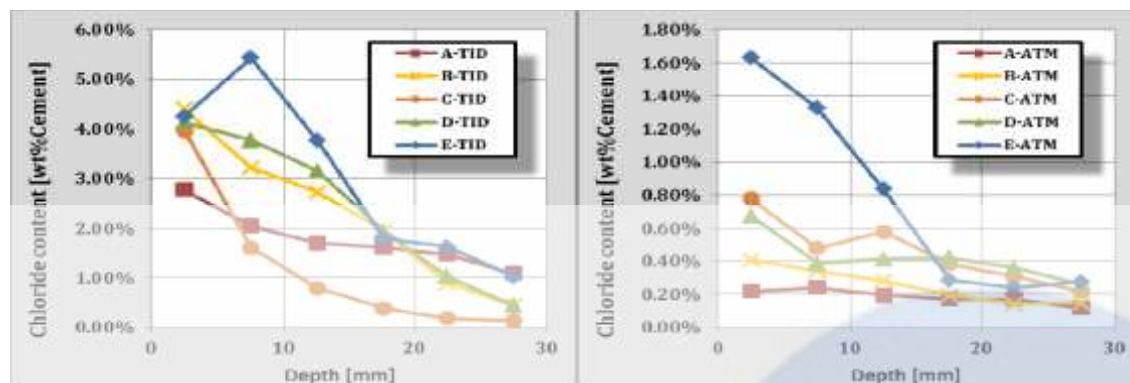
جدول ۱- مشخصات طرح اختلاط

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]

نتایج آزمایش‌ها

آزمایش‌های تعیین عمق میلگرد، تعیین عمق بتن کربناته شده [۸] و تعیین و تحلیل پروفیل یون کلرید [۸ و ۹] 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 (پلکس تغذیه غربی) و B، سه سال (پل راه آهن شرقی)، C، چهار سال (اسکله یدک‌کش‌ها)، D، پنج سال (اسکله غربی) و

E، شش سال (پل کامیون روی غربی) می‌باشد و شرایط قرارگیری اتمسفری با ATM و شرایط قرارگیری جزر و مدی با TID نمایش داده شده است.



شکل ۲ - پروفیل یون کلرید

جدول ۲ - نتایج آزمایش بر روی سازه‌ها

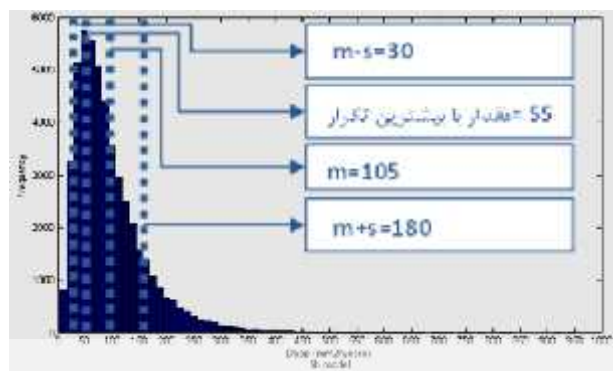
میزان پوشش بتنی		عمق کربناسیون (mm)	میزان یون کلرید سطحی Wt.%/cement	ضریب انتشار mm ² /Years	سن	کد نمونه
*CoV%	میانگین mm					
۱٪	۷۰,۲۵	۱	۰,۳۱	۸۲,۶۵	۲	A-ATM
۷٪	۷۱,۵	۳,۵	۰,۴۶	۴۹,۴۷	۳	B-ATM
۶٪	۷۴,۲	۶	۱,۰۸۷۶	۳۸,۹۳	۴	C-ATM
۵٪	۵۹,۸	۸,۵	۰,۷۲۶	۶۹,۶۹	۵	D-ATM
۱۲٪	۳۸,۹	۹	۱,۹۸۶	۱۵,۳۱	۶	E-ATM
۱٪	۷۰,۲۵	۰	۲,۷۲۹	۲۳۷,۹	۲	A-TID
۷٪	۷۱,۵	۰	۴,۹۸۱	۵۳,۱۳	۳	B-TID
۶٪	۷۴,۲	۰,۵	۳,۳۸۳	۱۲,۹۱	۴	C-TID
۵٪	۵۹,۸	۲	۶,۰۶۳	۲۷,۹۱	۵	D-TID
۱۲٪	۳۸,۴	۳,۵	۸,۴۳۹	۲۰,۶۸	۶	E-TID

* CoV یا ضریب تغییرات از تقسیم انحراف معیار بر مقدار میانگین محاسبه می‌گردد. (s/m*۱۰۰)

حل مدل و مقایسه نتایج

مقایسه ضریب انتشار ظاهری

نتایج خروجی در این مدل به صورت مجموعه‌ای از اعداد می‌باشد 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 بازه اعداد احتمالی اخذ شده برای تخمین ضریب انتشار از بازه صفر تا ۱۰۰۰ mm²/years می‌باشد ولی با احتمال وقوع مختلف.



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

جدول ۳- نتایج تخمین ضریب انتشار ظاهری به کمک مدل fib، کلیه ضرایب انتشار بر حسب mm^۲/years می‌باشد.

کد نمونه	ضریب انتشار ظاهری واقعی	مشخصات آماری ضریب انتشار ظاهری تخمینی		مقدار ضریب انتشار با بیشترین تکرار	ارزیابی ***
		m**	s*		
A-ATM	۸۲,۶۵	۱۰۵	۷۵	۵۵	خوب
B-ATM	۴۹,۴۷	۹۵	۷۲	۵۰	بسیار خوب
C-ATM	۳۸,۹۳	۸۸	۶۹	۴۰	بسیار خوب
D-ATM	۶۹,۶۹	۸۳	۶۵	۳۵	خوب
E-ATM	۱۵,۳۱	۸۰	۶۳	۴۰	ضعیف
A-TID	۲۳۷,۹	۱۰۵	۷۵	۵۵	ضعیف
B-TID	۵۳,۱۳	۹۵	۷۲	۵۰	بسیار خوب
C-TID	۱۲,۹۱	۸۸	۶۹	۴۰	ضعیف
D-TID	۲۷,۹۱	۸۳	۶۵	۴۰	خوب
E-TID	۲۰,۶۸	۸۰	۶۳	۴۰	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 $m+s$ 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.

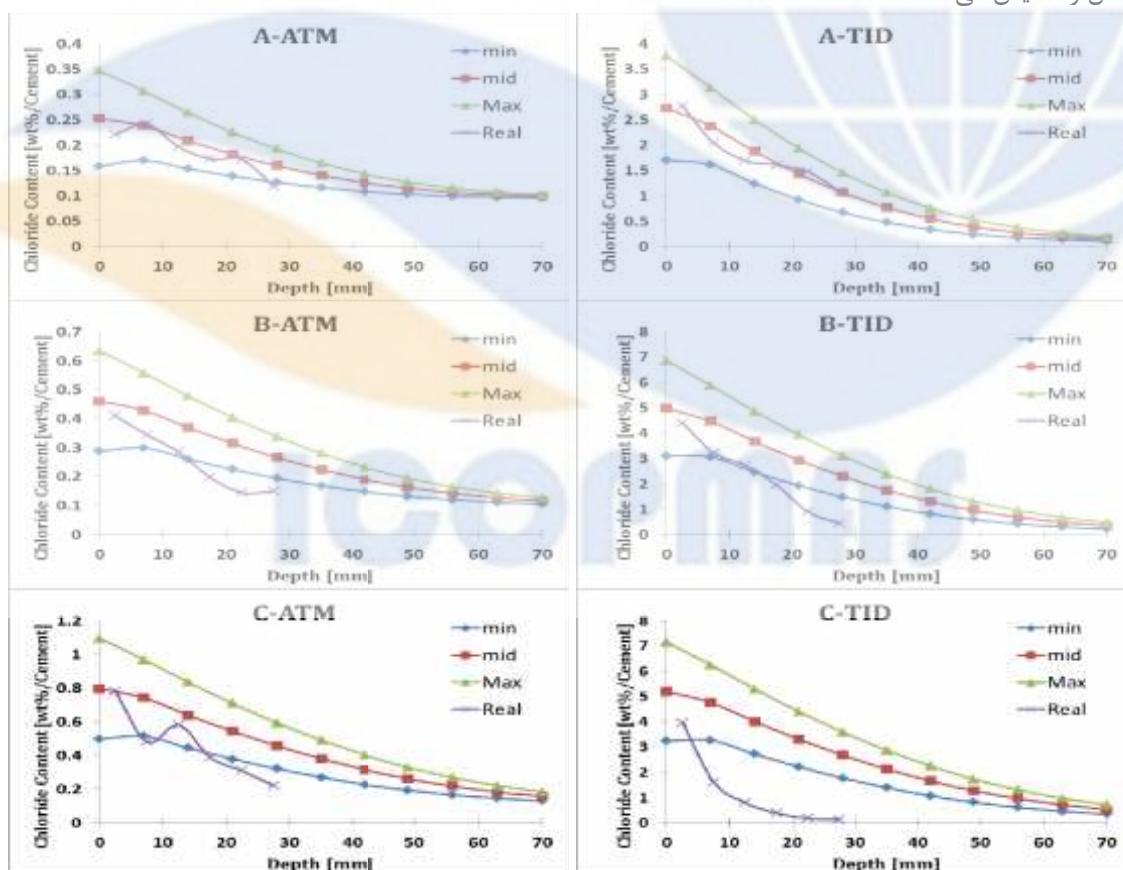
با توجه به جدول ۳ به نظر می‌رسد که نتایج تخمین ضریب انتشار ظاهری در شرایط اتمسفری برای سنین کم نسبت به سنین زیاد مناسبتر می‌باشد. علت این امر را می‌توان در عدم تطابق شرایط محیطی خلیج فارس با شرایطی که این مدل در آن کالیبره شده دانست. این مدل برای سنین پایین در شرایط اتمسفری تخمین‌های مناسبی ارائه می‌دهد 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[^] که تعیین کننده تغییرات ضریب انتشار در طول زمان است، روشن تر شده و مقداری نامناسب این ضریب نمایان می‌گردد.

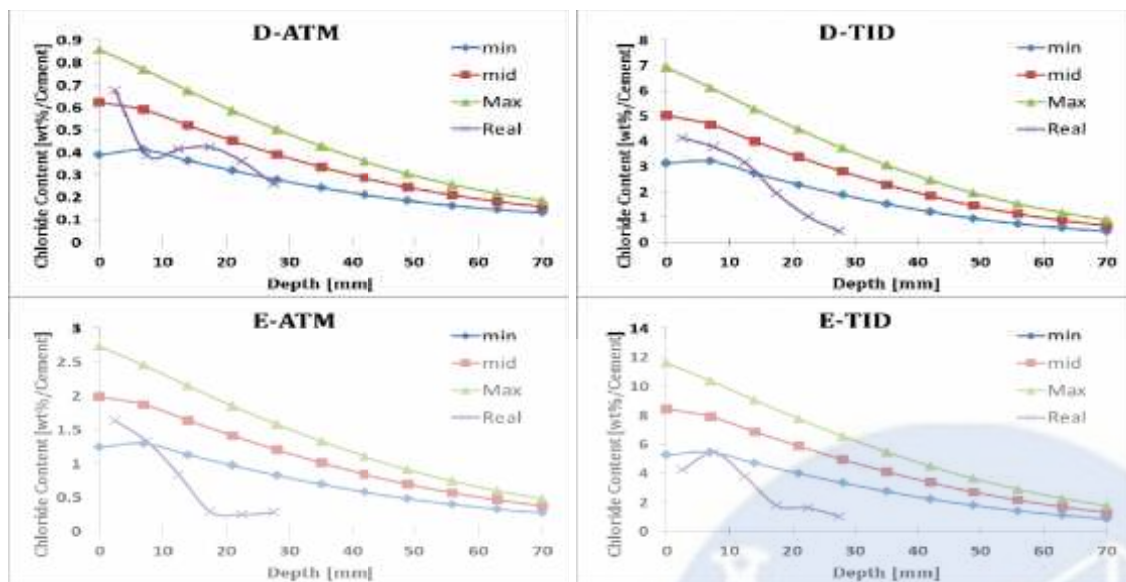
با توجه به نتایج تخمین مدل برای شرایط جزر و مدی، به نظر می‌رسد که مدل روند مشخصی را طی نموده و در برخی موارد نتایج بسیار خوب و در برخی موارد نتایج ضعیفی ارائه نموده است. از آنجا که اغلب میانگین اعداد اخذ شده برای ضریب انتشار بیشتر از مقادیر واقعی می‌باشد، انتظار می‌رود مدل، برای زمان آغاز خوردگی تخمینی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

پروفیل یون کلرید

پروفیل یون کلرید برای نقاط مختلف در سنین مختلف به صورت احتمالاتی بدست آمده است و نتایج خروجی این مدل برای پروفیل یون کلرید به صورت سه بعدی می‌باشد، 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 می‌باشد، از این رو ابتدا تحلیل آماری روی نمودار فراوانی انجام گرفته و حدودی بر اساس مقدار میانگین و انحراف معیار به عنوان بازه محتمل ترین نتایج برای هر نقطه بدست آمده است و برای هر نقطه از سازه سه پروفیل تخمین در نظر گرفته شده است. با برآزش حدود ۶۵ تابع توزیع بر نقاط مختلف، توابع بتا، گاما و لاگ پیرسون تطابق مناسب تری با نتایج دارد و مخصوصاً 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 نصف انحراف معیار در اطراف میزان مقدار میانگین استفاده شده است که این عمل سبب می‌شود بازه ۳۰ الی ۵۰ درصد محتمل ترین پروفیل یون کلریده‌های 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.



[^] Ageing Exponent

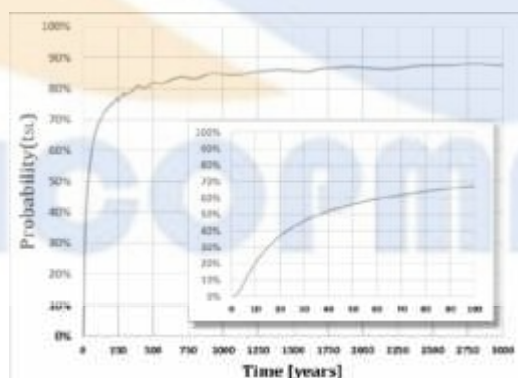


شکل ۴- پروفیل‌های یون کلرید واقعی را به همراه پروفیل‌های یون کلرید تخمینی

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 دهنده قابلیت مدل در تخمین شرایط اولیه بتن می‌باشد ولی با گذر زمان و چشمگیرتر 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 می‌باشد.

تخمین زمان آغاز خوردگی

از آنجایی که این مدل به صورت کاملاً احتمالاتی می‌باشد، 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 مختلف، زمان آغاز خوردگی را نمایش می‌دهد. شکل ۵ نمودار توزیع جمعیتی احتمال وقوع آغاز خوردگی را برای بتن در شرایط جزر و مدی برای ۷۰ میلی‌متر پوشش بتن روی میلگرد را نمایش می‌دهد.



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

مدل *fib* برای تعیین زمان آغاز خوردگی از تئوری قابلیت اعتماد بهره برده و بر اساس این تئوری شاخص قابلیت اعتماد را برای بتن تعیین نموده و هر زمان که این شاخص به مقدار $\frac{1}{3}$ تنزل پیدا نمود 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 اجرایی	پوشش طراحی mm	زمان آغاز خوردگی برای پوشش بتنی طراحی
A-ATM	۷۰,۲۵	۲	۳,۱۰	۶,۱۸	۲۱	۷۰	۲۲
B-ATM	۷۱,۵	۳	۲,۹۰	۵,۸۹	۲۳		
C-ATM	۷۴,۲	۴	۲,۸۸	۵,۸۱	۲۶		
D-ATM	۵۹,۸	۵	۲,۱۷	۴,۹۵	۱۵		
E-ATM	۳۸,۹	۶	۱,۰۳	۳,۱۰	۴		
A-TID	۷۰,۲۵	۲	۲,۴۱	۵,۸۲	۵,۸	۷۰	۵,۸
B-TID	۷۱,۵	۳	۲,۱۰	۵,۳۵	۶		
C-TID	۷۴,۲	۴	۱,۷۶	۵,۱۶	۷		
D-TID	۵۹,۸	۵	۱,۰۵	۳,۹۴	۳,۵		
E-TID	۳۸,۴	۶	۰,۰۰	۱,۸۴	۱,۵		

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.

اصلاح مدل

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

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

روش تعیین پارامترهای احتمالاتی

روش تعیین پارامترهای احتمالاتی و انتخاب تابع توزیع احتمال مناسب در هر بخش بدین صورت می‌باشد که ابتدا کلیه مقادیر محتمل برای هر پارامتر به تفکیک "بتن بدون مواد جایگزین (PC^۹)" و "بتن با دوده سیلیس (PSC^{۱۰})" تعیین شده و اعداد غیر منطقی مانند ضرایب عمر منفی و مقادیر مربوط به نتایج بدست آمده از پروفیل یون کلرید با ضریب همبستگی‌های نامناسب حذف گردیده است (R^۲ < ۰,۸۵) و در نهایت برای گروه‌های PC و PSC داده‌ها جمع آوری شده و نمودار فراوانی آنها ترسیم شده است. سپس با نرم‌افزار قدرتمند MathWave(Easy fit)، برآزش 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 برآزش 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^{۱۲} آن و برآزش مناسب، نسبت به عدم قطعیت‌های موجود عکس‌العکس و العمل 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 [۶، ۱۲، ۱۳ و ۱۴].

اصلاح مدل تخمین ضریب انتشار ظاهری

این مدل ضریب انتشار ظاهری را بر اساس نتایج RCMT در نظر می‌گیرد، از این رو آزمون‌هایی 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 (D_{RCM})، 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 می‌باشد 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 [۱۲، ۱۴ و ۱۵].

جدول ۵ مقادیر پارامترهای معادله ۷ و ۸ را نمایش می‌دهند.

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

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

D_{RCM}: نتیجه آزمایش تسریع شده مهاجرت کلرید RCMT بر حسب mm^۲/years
be: ضریب رگرسیون [-]

T_{ref}: دمای آزمایش RCMT [درجه کلین]

T_{real}: دمای محیط قرارگیری بتن، نزدیکترین ایستگاه هواشناسی [درجه کلین]

جدول ۵- مقادیر پارامترها برای تخمین ضریب انتشار

ضرایب	تابع توزیع	پارامترها توابع	نحوه تعیین
D _{RCM}	نرمال	نتیجه آزمایش m=۰,۲ s=۰,۲ m	انجام آزمایش
t _{ref}	ثابت	سال ۰,۰۷۶۷	سن آزمایش
Be	نرمال	m=۴۸۰۰ s=۷۰۰	مقدار دهی تابع توزیع

^۹ Portland Cement Concrete

^{۱۰} Portland Silica Fume Cement Concrete

^{۱۱} این نرم‌افزار قابلیت برآزش ۶۵ تابع توزیع احتمال بر داده‌ها و امتیازدهی توابع بر اساس توابع ارزیاب را داراست.

^{۱۲} جامعیت تابع توزیع بدین معنی است که اکثر نرم‌افزارهای ریاضی و آمار این توابع را بشناسند.

دمای محیط هنگام آزمایش RCMT	۲۹۸ ^{oK}	مقدار ثابت	T _{ref}
دمای محیطی بتن	m, s	نرمال	T _{real}
مقدار دهی تابع توزیع	$\sigma=0,04$ $\mu=1,37$ $g=-3,35$	لاگنرمال	α_{PC}
مقدار دهی تابع توزیع	$s=0,28$ $\mu=-0,54$	لاگنرمال	α_{PSC}

m و s به ترتیب مقدار میانگین و انحراف می باشد
 σ و μ و γ پارامترهای تابع توزیع لاگنرمال می باشد.

میزان کلرید سطحی

از تحلیل پروفیل یون کلرید با برازش حل کرنک قانون دوم فیک پارامتر مهم کلرید سطحی بدست می آید، تحلیل مذکور با فرض ثابت بودن ضریب انتشار و میزان کلرید سطحی می باشد که منجر به نتایج ضریب انتشار ظاهری و به تبع آن کلرید سطحی ظاهری می گردد حال آنکه نتیجه تحقیقات نشان می دهد که هر دو پارامتر ذکر شده با زمان تغییر می نمایند 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 [۱۴]. در این قسمت در نظر است بر اساس داده های 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 می باشد.

$$C_{St} = C_{S_{ref}} \times \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^{\beta} \quad (9)$$

از داده های ۹ ماهه برای تخمین کلرید سطحی مرجع استفاده شده و برای ضریب β از برازش داده های ۹ ماه با داده های ۵ ساله استفاده شده است. شایان ذکر است بنا به تحقیقات صورت گرفته کلرید سطحی تا مدتی افزایش یافته و از آن پس ثابت می گردد، از این رو به این علت که مدل بر اساس نتایج ۵ ساله کالیبره شده است، مدت تغییرات کلرید سطحی پنج سال پیشنهاد می گردد. که بسته به نظر طراح قابل تغییر می باشد و باید در نظر داشت که میزان کلرید سطحی پس از ۵ سال (یا مدت مدنظر طراح) تا انتها ثابت می ماند [۱۶].

برای تخمین کلرید سطحی مبنا از داده های ۹ ماه که برای هر طرح اختلاط سه عدد موجود است، استفاده شده است، شایان ذکر است که برای پارامترهای کلرید سطحی گروه های PC و PSC در نظر گرفته نشده است، هرچند تحقیقات نشان می دهد که میزان کلرید سطحی به مواد تشکیل دهنده بتن وابسته می باشد ولی به علت کافی نبودن داده ها این فرض اعمال شده است [۱۶]. نحوه مقاداردهی معادله ۹ در جدول ۶ آورده شده است.

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
C _{Sref}	لاگنرمال	$\mu=-3.2, \sigma=0.52,$ $\gamma=0.01$	مقدار دهی تابع توزیع
t _{ref}	ثابت	سال ۰,۷۵	۹ ماه
$\beta_{PC \text{ or } PSC}$	بتا	$a_1=10, \alpha_2=2,5, a=0, b=2$	مقدار دهی تابع توزیع

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 بررسی و ارزیابی گردد. از آنجا که مدل برای شرایط جزر و مدی ارائه شده است، نمونه های مربوط به این شرایط قرارگیری مورد بررسی قرار می گیرد.

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 بدست 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

تخمین به کمک مدل حاضر %wt/conc	بدست آمده از پروفیل یون کلرید %wt/conc	کد مشخصه
m=۰,۲۷۸ s=۰,۱۴	۰,۵۵۲۳٪	A-TID
m=۰,۵۴۲ s=۰,۲۹۷	۱,۰۰۸٪	B-TID
m=۰,۸۷۵ s=۰,۵	۰,۶۸۴۷٪	C-TID
m=۱,۲۷۱ s=۰,۷۷	۱,۲۲۷٪	D-TID
m=۱,۷۲۶ s=۱,۰۹	۱,۷۰۸٪	E-TID

تخمین ضریب انتشار ظاهری

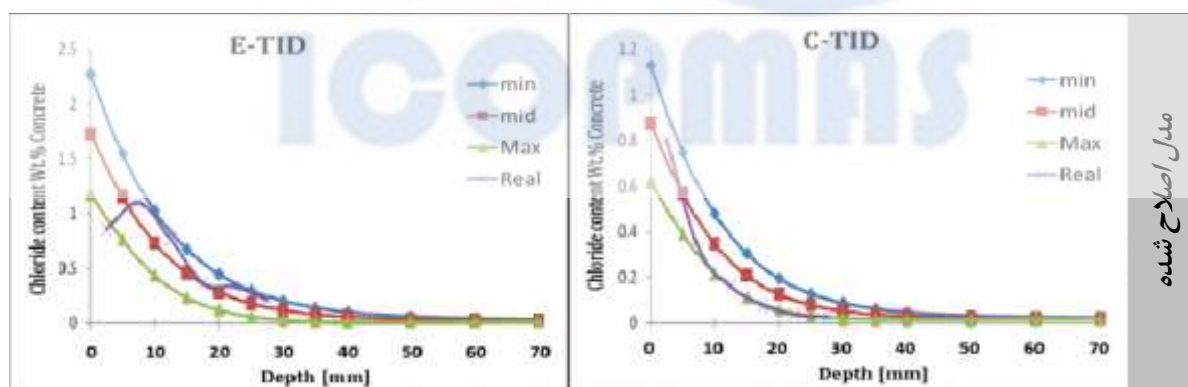
ضریب انتشار ظاهری به کمک مدل ارائه شده برای بتن واقع در بندر امام خمینی در سنین ۲ الی ۶ سال تخمین زده شده و با مقدار واقعی بدست آمده از پروفیل یون کلرید اخذ شده از سازه مقایسه شده است و در جدول ۸ نمایش داده شده است.

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

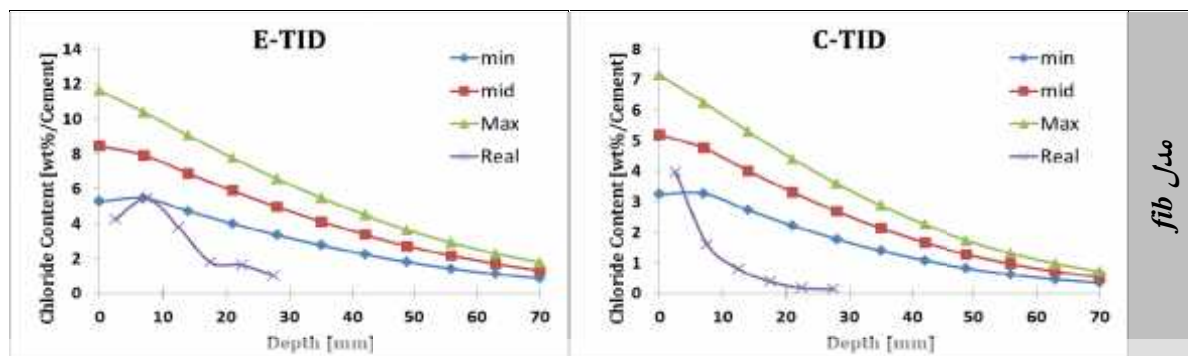
تخمین به کمک مدل اصلاح شده mm ^۲ /years	تخمین به کمک مدل fib mm ^۲ /years	پروفیل یون کلرید D _{app} mm ^۲ /years	کد مشخصه
m=۳۵ s=۲۰	m=۱۰۵ s=۷۵	۲۳۷,۹	A-TID
m=۲۷ s=۲۲	m=۹۵ s=۷۲	۵۳,۱۳	B-TID
m=۲۳ s=۱۹	m=۸۸ s=۶۹	۱۲,۹۱	C-TID
m=۲۰ s=۱۸	m=۸۳ s=۶۵	۲۷,۹۱	D-TID
m=۱۹ s=۱۷	m=۸۰ s=۶۳	۲۰,۶۸	E-TID

تخمین پروفیل یون کلرید

پروفیل یون کلرید به کمک مدل ارائه شده برای بتن واقع در بندر امام خمینی 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.



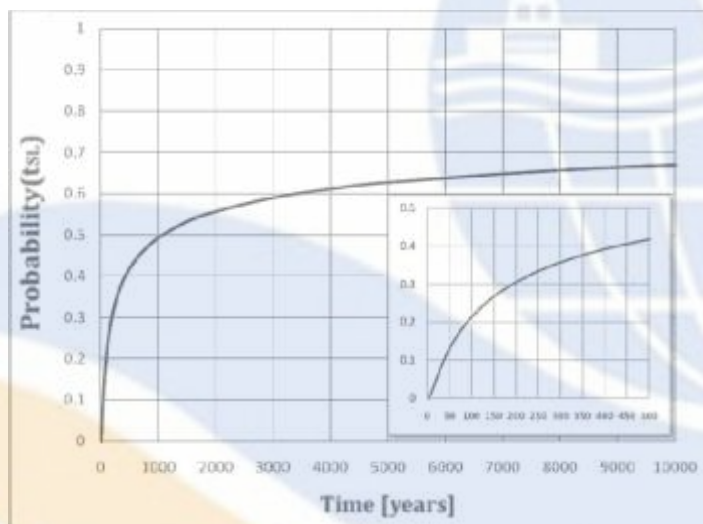
مدل اصلاح شده



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

تخمین زمان آغاز خوردگی

زمان آغاز خوردگی برای سازه بتن مسلح واقع در بندر امام خمینی بر اساس پوشش بتن طراحی شده (۷۰ میلی‌متر)، بدست 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 ۷- منحنی تابع تجمعی احتمال زمان آغاز خوردگی برای سازه بتنی در بندر امام به کمک مدل اصلاح شده برای پوشش بتنی طراحی معادل ۷۰ میلی‌متر

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 می‌باشد. در حالی که این مدل در زمینه مدل‌سازی و ارائه نتایج کاربردی بسیار توانمند می‌باشد ولی نتایج بدست آمده از آن برای شرایط خاص این منطقه غیر قابل اعتماد می‌باشد 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 قرار گرفت، مدل اصلاح شده نیز بررسی و ارزیابی گردد. شایان ذکر است که مدل به کمک داده‌های بدست آمده از تحقیق در ناحیه شرقی خلیج فارس (بندر عباس) اصلاح شده است. نتایج بدست آمده از ارزیابی مدل اصلاح شده نشان دهنده نزدیکتر شدن تخمین‌ها 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 می‌باشد. در نهایت با توجه به مدل‌های بومی موجود در این منطقه که عموماً به صورت قطعی می‌باشند می‌توان گفت که مدل اصلاح شده که به صورت کاملاً احتمالاتی است می‌تواند برای بررسی‌های عمر مفید به صورت احتمالاتی بسیار مفید واقع گردد.

تقدیر و تشکر

از شرکت مشاور تدبیر ساحل پارس مخصوصاً 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.

مراجع

- [۱] Vidal T, Castel A, François R, (۲۰۰۵), Corrosion process and structural performance of a ۱۷ year old reinforced concrete beam stored in chloride environment, J.Cement and Concrete Research; vol. ۳۵, pp.۲۲۶-۲۳۲.
- [۲] Ramezaniapour, A. A. Pourkhorshidi, A. R., (۲۰۰۴) "Iranian Code for Durable Concrete in Persian Gulf and Omman Sea," Building Engineering and Housing Science Journals, Vol.۲, No.۴.
- [۳] Poulsen E, Mejlbro L, (۲۰۰۵), Diffusion of Chloride in Concrete, Taylor & Francis; London and New York
- [۴] Ramezaniapour, A. A., Miyamoto, A., (۲۰۰۰) "Durability of Concrete Structures in the Persian Gulf", Concrete Journal of JCI, Japan, Vol. ۳۸, No.۳.
- [۵] The International Federation for Structural concrete (fib), (۲۰۰۶), Model Code for Service Life Design, Bulletin ۳۴
- [۶] Lin.J.S, (۲۰۰۱), Monte Carlo Strategies in Scientific Computing", Department of statistics, Harvard University
- [۷] Christian Robert, (۲۰۰۹), Monte Carlo Methods in Statistics, University Paris Dauphine and CREST, INSEE
- [۸] ASTM C۱۱۴-۰۰, Standard Test Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards, Vol. ۰۴, ۰۱.
- [۹] Crank J., The Mathematics of Diffusion, ۲nd ed., Oxford Press, London, ۱۹۷۵

[۱۰] حسینی، مقداد. "بررسی اثر استفاده از پوشش هاس سطحی مختلف در نرخ نفوذ یون کلر در بتن در محیط خلیج فارس". پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده فنی دانشگاه تهران. سال ۱۳۸۳

[۱۱] خان زاده مرادلو، مهدی. " تجزیه و تحلیل نتایج پنج ساله پروژه بررسی نفوذ یون کلرید در سازه های بتنی در خلیج فارس ". پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده فنی دانشگاه تهران. سال ۱۳۸۸

- [۱۲] ACI Committee ۳۶۵. ۱R-۴۲: Service-Life Prediction-State of the Art report, ۲۰۰۰.
- [۱۳] Kwon.s.j et al, "Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion", J.Structural Safety vol.۳۱, ۲۰۰۹, PP.۷۵-۸۳
- [۱۴] E.Poulsen, L.Mejlbro, "Diffusion of Chloride in Concrete", Taylor & Francis, London and New York , Jan ۲۰۰۵
- [۱۵] ACI, "User manual of Life-۳۶۵ Service Life Prediction Model", ACI, ۲۰۰۹.
- [۱۶] K.Y. Ann, J.H. Ahn, and J.S. Ryou, "The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures", Construction and Building Materials, ۲۰۰۹, vol. ۲۳, pp. ۲۳۹-۲۴۵.

Evaluation and Modification of the Fib Service-life Design Model for the Persian Gulf Region

A. A. Ramezanipour

Professor, head of Concrete Technology and Durability Research Center, Concrete Technology and Durability Research Center, Amir Kabir University of Technology
aaramce@aut.ac.ir

E. Jahangiri

member of Concrete Technology and Durability Research Center, Concrete Technology and Durability Research Center, Amir Kabir University of Technology
Jahangiri@aut.ac.ir

F. Moodi

assistant professor, member of Concrete Technology and Durability Research Center, Concrete Technology and Durability Research Center, Amir Kabir University of Technology
fmoodi@aut.ac.ir

B. Ahmadi

PhD candidate, member of Concrete Technology and Durability Research Center, Concrete Technology and Durability Research Center, Amir Kabir University of Technology
bahmadi@aut.ac.ir

Abstract:

The damages caused by corrosion of steel buried in the concrete constitutes the major damages in armed concrete structures in sea margins and involves high costs in construction industry. Stimulation of concrete behavior in the field of buried steel corrosion can be influential in decreasing the costs due to damages. The FIB model, which was presented in 2006 by FIB international federation (Federation International du Beton), is one of the best and practical models in the world. This model models the corrosive processes in probabilistic way. The purpose of the present article is to evaluate the FIB model for the environmental condition of the Persian Gulf, and to revise it for using in this condition. It should be mentioned that the marine environment of the Persian Gulf, because of hot weather and high moisture and the amount of Chloride ion in its water, is one of the most destructive marine environments in the world. Therefore, five concrete structures with various ages in this region were examined and the results have been compared to the results of the model. Because of lack of coordination between results and reality, the model has been revised for the environmental condition of Persian Gulf region.

Key words: concrete, durability, FIB design, probabilistic models, Persian Gulf marine environment, Persian Gulf