



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.





نهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی
ICOPMAS 2010
 10-8 آذر ماه (تهران)



ارزیابی مدل Fib برای تخمین عمر مفید خدمات رسانی سازه های بتن مسلح در شرایط محیط دریایی خلیج فارس

علی اکبر رضانیانپور، استاد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، aaramce@aut.ac.ir

احسان جهانگیری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، jahangiri@aut.ac.ir

بابک احمدی، دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، bahmadi@aut.ac.ir

فرزاد مودی، دکترای عمران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، Fmoodi@aut.ac.ir

کلید واژه: بتن مسلح، مدل های عمر مفید، شرایط دریایی، خلیج فارس

1- مقدمه

بحث عمر مفید خدمات رسانی سازه های بتنی از دیدگاه طراحی، تعمیر و نگهداری از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. ساخت سازه هایی با دوام کافی و همچنین تخمین عمر مفید خدمات رسانی باقی مانده سازه های موجود به منظور اقدامات تعمیر-نگهداری از اهداف شبیه سازی رفتار بتن در طول عمر آن از دیدگاه دوام با استفاده از مدل های ریاضی 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. در این راستا، شناخت عوامل خورنده به ویژه عوامل محیطی و پیش بینی میزان گسترش خرابی ها در طی دوره بهره برداری مستلزم آگاهی و مطالعه دقیق در این زمینه می باشد [1]. بنا بر تحقیقات صورت گرفته، یکی از عوامل خرابی زودرس سازه های بتنی مسلح در محیط های خورنده بخصوص محیط دریایی نفوذ یون کلرید به درون بتن می باشد. بطور متوسط، حدود 5/3٪ از وزن آب دریا را نمک های مختلف تشکیل می دهند. این نمک ها در ترکیب با یکدیگر انواع کلروها و سولفات ها (نظیر کلرید سدیم، کلرید و سولفات منیزیم سولفات کلسیم و ...) را تشکیل داده که هر یک از آنها به نحوی موجب تخریب سازه های بتنی مسلح واقع در محیط های دریایی می گردند. از این میان، کلروها نقش غالبی را در شروع و گسترش خرابی های ناشی از خوردگی فولاد مدفون ایفا می کنند [1-4].

با بررسی آیین نامه ها، مشهود است که غالباً مبحث دوام به صورت توصیه ای و ارائه دستورالعمل برای افزایش کیفی آن می باشد. ولی مدل های تخمین عمر مفید خدمات رسانی قادر به بررسی دوام بتن با توجه به مشخصات مصالح و محیط به صورت کمی می باشند. امروزه آیین نامه های معتبر جهانی توجه ویژه ای به امر مدل سازی رفتار بتن در محیط های مخرب دارند و مدل های مختلف توسط محققین و مراکز تحقیقاتی ارائه می شود. با وجود تحقیقات گسترده صورت گرفته در خصوص، مدل سازی ها کماکان با عدم قطعیت های فراوانی روبرو می باشند [5]. مدل ها معمولاً برای شرایط محیطی خاص ارائه و کالیبره می شوند و این عمل باعث می شود که در شرایط محیطی دیگر، نتایج قابل قبولی ارائه ندهند، از طرفی ناشناخته بودن مکانیزم های تخریب سازه های بتن مسلح در شرایط محیط دریایی نیز باعث افزایش عدم قطعیت در مدل ها می باشد. تحقیقات نشان می دهد که مدل هایی که بر پایه تئوری بنا شده اند و شرایط مصالح و عوامل محیطی در آنها منظور و در نهایت از طریق آزمایش ها و تحقیقات، ارزیابی و اصلاح شده است، مدل های کاربردی تر و واقعگرایانه تری می باشند [5].

مدل Fib [6] یکی از معروف ترین مدل های احتمالاتی ارائه شده به منظور تخمین عمر مفید بتن در محیط دریایی می باشد. این مدل در سال 2006 توسط فدراسیون بین المللی بتن در بولتن 34 ارائه شده است. تخمین ضریب انتشار ظاهری، پروفیل یون کلرید و زمان آغاز خوردگی از نتایج قابل استخراج از این مدل احتمالاتی می باشد [6]. در این مقاله، مدل Fib برای شرایط محیطی خلیج فارس حل و ارزیابی شده است. بررسی این مدل بر اساس پروفیل کلرید اخذ شده از دو نمونه بتنی با طرح اختلاط های متفاوت در سنین 6 ماهه و 5 ساله در شرایط محیطی بندرعباس می باشد. این دو نمونه بتنی با شرایط یکسان محیطی، مصالح و پوشش بتنی روی آرماتور با طرح اختلاط های متفاوت (با میکروسیلیس و بدون میکروسیلیس) می باشند.

در این مقاله، در ابتدا مختصراً، مدل Fib شرح داده می‌شود و با معرفی مشخصات آزمونه‌ها و شرایط محیطی بندرعباس، مدل Monte Carlo Method در این مدل احتمالاتی به روش مونت کارلو¹ انجام می‌شود و تحلیل زمان آغاز خوردگی بر اساس تئوری قابلیت اعتماد² می‌باشد.

2- معرفی مدل Fib [6]

فدراسیون بین المللی بتن (fib) در بولتن 34 که در سال 2006 ارائه شده است به روش‌ها و الزامات به منظور ایجاد یک رویه مشخص و صحیح برای مدل سازی پرداخته است و در بحث عمر مفید خدمت‌رسانی، مدلی به منظور تخمین ضریب انتشار و میزان نفوذ یون کلرید به داخل بتن ارائه نموده است. این مدل بر اساس نتایج دو پروژه تحقیقاتی DuraCrete و DARTS که در اروپا صورت گرفته است می‌باشد [6]. در این مدل سعی شده بصورت احتمالاتی، تمام پارامترهای دخیل اعم از مشخصات بتن، پوزولان‌ها، شرایط آب و هوایی، شرایط بهره برداری در تخمین ضریب انتشار و همچنین تخمین میزان نفوذ یون کلرید به درون بتن بر حسب زمان، در نظر گرفته شود. مدل سازی بر پایه معادلات دیفرانسیل قانون انتشار فیک بوده و با در نظر گرفتن ضریب انتشار ظاهری متغیر با زمان به تخمین انتشار ظاهری³ یون کلرید به درون بتن به صورت یک بعدی در بتن بدون ترک می پردازد.

مدل Fib از سه بخش عمده تشکیل شده است. بخش اول، معادله تعیین کننده ضریب انتشار ظاهری می‌باشد که بر اساس آزمایش مهاجرت الکتریکی⁴، شرایط آب و هوایی، مشخصات مخلوط بتن و زمان تخمین زده می‌شود (معادله 1 الی 3). 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 4). بخش سوم این مدل تعیین کننده احتمال وقوع خوردگی در زمان‌های مختلف می‌باشد (معادله 5).

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.

$$D_{app,c} = k_e \cdot D_{RCM,C} \cdot k_t \cdot A(t) \quad (1)$$

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

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

k_e : پارامتر تبدیل محیطی [-] (معادله 2)
 $D_{RCM,C}$: ضریب مهاجرت کلرید [mm^2/year]
 k_t : پارامتر انتقال [-]
 $A(t)$: زیر تابع برای در نظر گرفتن عمر [-] (معادله 3)

b_e : متغیر رگرسیون [k]
 T_{ref} : دمای آزمایش استاندارد [k]
 T_{real} : دمای عضو سازه یا هوای محیط [k]
 α : توان سن [-]
 t_0 : زمان مینا [year]
 t : زمان [year]

$$C_{crit} = C(x=a, t) = C_0 + (C_{S,\Delta x} - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \frac{a - \Delta x}{2\sqrt{D_{app,c}t}} \right] \quad (4)$$

1 - Monte Carlo Method
 2 - Reliability
 3 - Apparent Diffusion
 4 - Rapid Migration Test (NT-Build 492)

C_{crit} : مقدار کلراید بحرانی [درصد وزن سیمان]

$C(x,t)$: مقدار کلراید در عمق x از سطح بتن در زمان t [درصد وزن سیمان]

C_0 : مقدار کلراید اولیه بتن [درصد وزن سیمان]

$C_{S,\Delta x}$: مقدار کلراید در عمق Δx در زمان t [درصد وزن سیمان]

x : عمق متناظر با مقدار کلراید $C(x,t)$ [m]

a : پوشش بتن [mm]

Δx : عمق ناحیه همرفت¹ [mm]

$D_{app,c}$: ضریب انتشار کلراید در بتن [mm²/year]

erf: تابع خطا [-]

$$P\{\} = P_{dep.} = P\{C_{crit.} - C(a, t_{SL}) < 0\} < P_0 \quad (5)$$

$P\{\}$: احتمال از بین رفتن لایه مقاوم

$C_{crit.}$: مقدار کلراید بحرانی درصد وزن سیمان

$C(a, t_{SL})$: مقدار کلراید در عمق a در زمان t_{SL} [درصد وزن سیمان]

a : پوشش بتن [mm]

t_{SL} : عمر بهره‌برداری طراحی [سال]

P_0 : احتمال خرابی هدف بر اساس تئوری تحلیل قابلیت اعتماد

3- بررسی موردی

3-1- آزمون‌ها

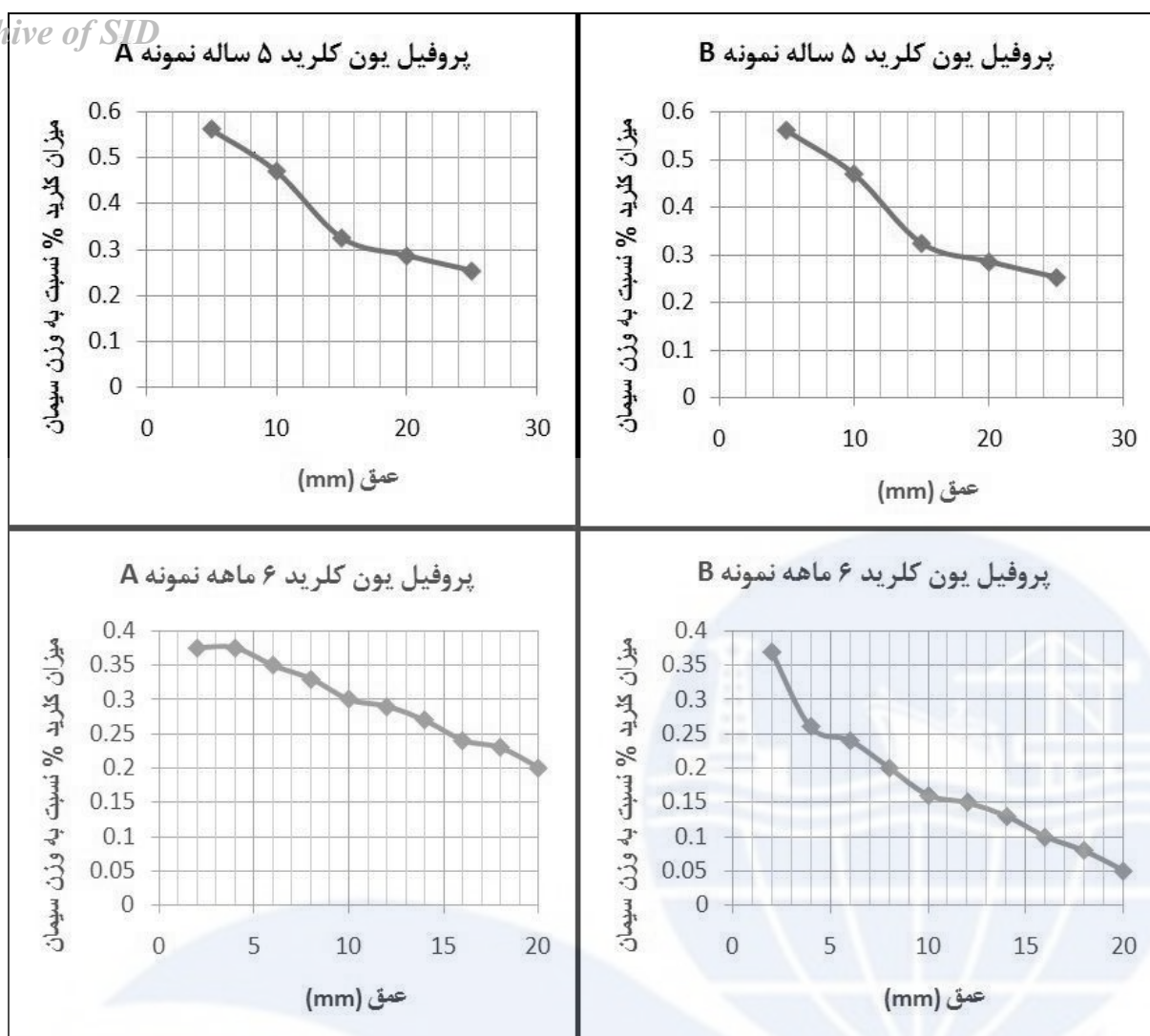
در این مقاله، به بررسی انتشار یون کلرید در دو آزمون بتنی با طرح اختلاط‌های مندرج در جدول 1 پرداخته می‌شود. این آزمون‌ها به صورت آزمون‌های مکعبی استاندارد در شرایط محیطی واقعی دریایی در بندرعباس تهیه و به صورت مستغرق نگهداری شدند. پروفیل یون کلرید این آزمون‌ها در سنین 6 ماه و 5 سال به دست آمد (شکل 1). برای تخمین زمان آغاز خوردگی، پوشش بتن به صورت فرضی بر اساس آیین نامه بتن ایران (آبا) به میزان 6 سانتیمتر در نظر گرفته شده است [7]. به منظور مقایسه نتایج تخمینی مدل‌ها با نتایج آزمایش‌ها، ضریب انتشار ظاهری برای هر آزمون محاسبه شد (جدول 2).

جدول 1) طرح اختلاط

| آزمون‌ها | شرایط قرارگیری | عیار بتن Kg/m ³ | عمل‌آوری (روز) | پوشش (mm) | محل | SF % | W/C |
|----------|----------------|-------------------------------|----------------|-----------|----------|------|-----|
| آزمون A | مستغرق | 400 | 28 | 60 | بندرعباس | 0 | 0.4 |
| آزمون B | مستغرق | 400 | 28 | 60 | بندرعباس | 7 | 0.4 |

جدول 2) مقادیر ضریب انتشار ظاهری آزمون‌ها در سنین مختلف

| ضریب انتشار ظاهری بر حسب mm ² /years | | |
|---|---------|---------|
| سن آزمون | آزمون A | آزمون B |
| 6 ماه | 681 | 138 |
| 5 سال | 56 | 30 |



شکل 1- پروفیل 5 ساله و 6 ماهه یون کلرید آزمونه‌ها

3-2- حل مدل

از آنجایی که این مدل به صورت احتمالاتی بوده و همچنین هنوز نرم افزاری که در برگرفته تمام شرایط برای حل این مدل باشد، تهیه نشده است، حل این مدل نیازمند استفاده از نرم افزارهای مختلف می باشد. برای حل احتمالاتی این مدل از روش مونت کارلو استفاده شد. در این مقاله، نتایج مربوطه در سه بخش ارائه شده است. ابتدا تخمین ضریب انتشار ظاهری، سپس تخمین پروفیل یون کلرید و در نهایت زمان آغاز خوردگی یا همان پایان عمر مفید خدمت رسانی بررسی شده است. برای حل مدل به روش مونت کارلو از نرم افزارهای MathWave 5.3 و Excel 2007 و SPSS 18 استفاده شده است.

3-2-1- روش مونت کارلو

روش‌های مونت کارلو یک دسته از الگوریتم‌های محاسبه گر می‌باشند که محاسبات آن بر پایه نمونه‌گیری‌های تکرار شونده تصادفی می‌باشد. روش‌های مونت کارلو اغلب، هنگام شبیه سازی یک سیستم ریاضی، فیزیکی و اقتصادی استفاده می‌شوند. به دلیل اتکای آنها بر محاسبات تکراری و اعداد تصادفی، روش‌های مونت کارلو اغلب به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که توسط رایانه اجرا شوند. گرایش به استفاده از روش‌های مونت کارلو هنگامی بیشتر می‌شود که محاسبه پاسخ دقیق با کمک الگوریتم‌های قطعی ناممکن یا دشوار و زمان بر باشد [8-9].

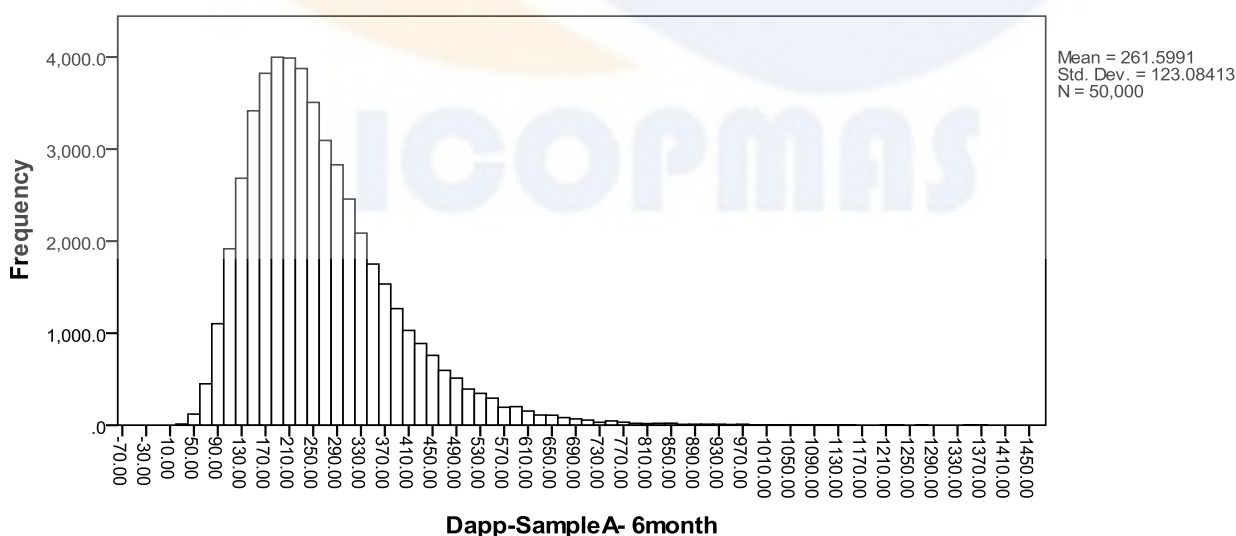
در این مقاله، برای حل احتمالاتی مدل Fib از روش مونت کارلو استفاده شده است. بدین منظور، ابتدا پارامترهای ورودی بر اساس مقدار میانگین، انحراف استاندارد و نوع تابع توزیع مربوط به آن تعیین شد (جدول 3). سپس داده‌های تصادفی برای پارامترهای ورودی، به میزان لازم تولید و مدل حل گردید. در هر بخش، تعداد داده‌های تولید شده و نتایج حاصله از حل مدل به همراه نتایج آزمایش‌ها در شرایط واقعی آورده و مقایسه شده است.

جدول 3) تعیین پارامترهای ورودی به منظور حل مدل Fib برای آزمون‌ها

| آزمون B | آزمون A | پارامتر ورودی | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------|------------------------|--------------------|----------------------|
| 0 | 0 | عدد ثابت | wt-%/cemn. | C_0 | میزان کلرید اولیه |
| N.D(m=2.25, s=1.69) | N.D(m=3.7, s=2.77) | توزیع نرمال | wt-%/cemn. | $C_{(S,\Delta x)}$ | میزان کلرید سطحی |
| B.D(m=60, s=6, min=0, Max=100) | B.D(m=60, s=6, min=0, Max=100) | توزیع بتا | mm | a | پوشش آرماتور |
| 0 | 0 | عدد ثابت | mm | Δx | سطح جایگزین |
| N.D(m=4800, s=700) | N.D(m=4800, s=700) | توزیع نرمال | K | b_E | متغیر رگرسیون |
| 293 | 293 | عدد ثابت | K | T_{reff} | دمای مرجع |
| N.D(m=300.7, s=6.17) | N.D(m=300.7, s=6.17) | توزیع نرمال | K | T_{real} | دمای هوای محیط |
| N.D(m=156.9, s=31.4) | N.D(m=281, s=56.2) | توزیع نرمال | mm ² /years | D_{RCM} | ضریب مهاجرت الکتریکی |
| 1 | 1 | عدد ثابت | - | k_t | پارامتر انتقال |
| .0767 | .0767 | عدد ثابت | year(s) | t_0 | زمان مرجع |
| B.D(m=.3, s=.12, min=0, Max=1) | B.D(m=.3, s=.12, min=0, Max=1) | توزیع بتا | year(s) | a | توان سن |
| B.D(m=.6, s=.15, min=.2, Max=2) | B.D(m=.6, s=.15, min=.2, Max=2) | توزیع بتا | wt-%/cemn. | C_{crit} | میزان کلرید آستانه |

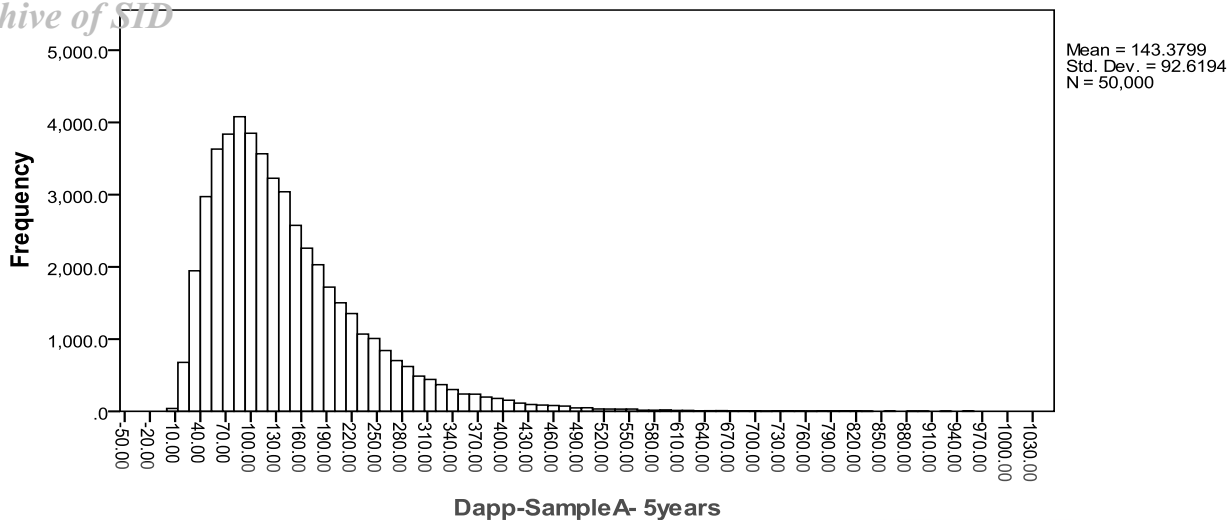
3-2-2- تخمین ضریب انتشار ظاهری

ضریب انتشار یون کلرید به داخل بتن پارامتری برای برآورد تراوایی بتن در برابر نفوذ یون کلرید می باشد که یکی از پارامتر اصلی مدل می باشد [10]. در مدل Fib، این ضریب به کمک معادلات 1 الی 3 محاسبه می شود. در این بخش، به منظور به دست آوردن ضریب انتشار ظاهری برای سنین 6 ماه و 5 سال و مقایسه آن با نتایج واقعی در سن مورد نظر، برای هر پارامتر ورودی پنجاه هزار داده تصادفی تولید شد و نمودار فراوانی مقادیر مختلف ضریب انتشار ظاهری برای هر آزمون در دو سن مورد نظر ترسیم شده است (شکل های 2 الی 5). علاوه بر این، نمودار تغییرات ضریب انتشار ظاهری (میانگین پنجاه هزار ضریب انتشار ظاهری احتمالاتی محاسبه شده برای هر سال) در طول زمان نیز ترسیم شده است (شکل 6).

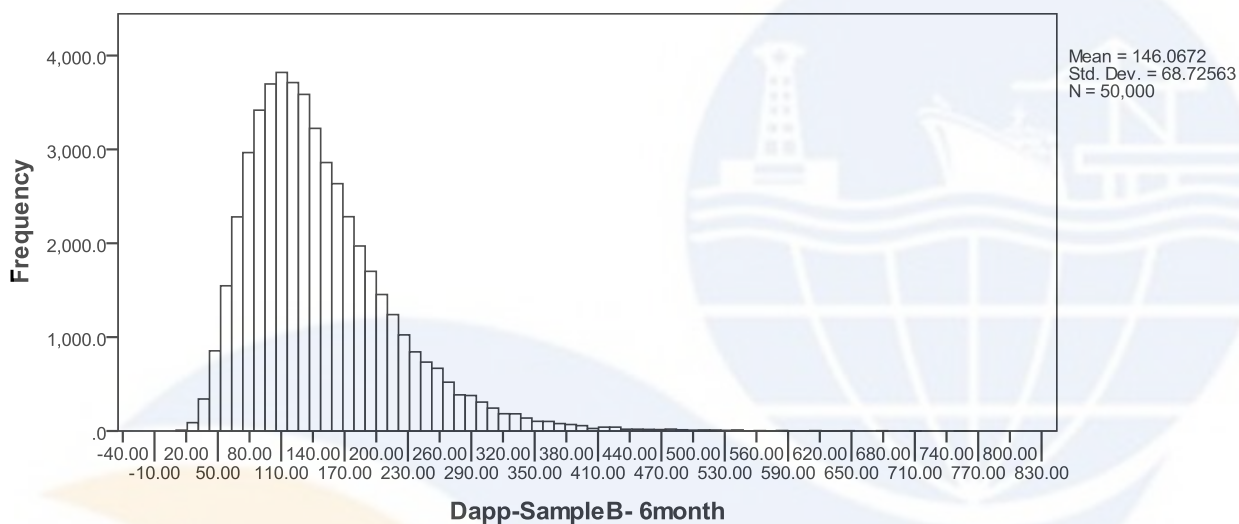


شکل 2) نمودار توزیع مقادیر مختلف ضریب انتشار ظاهری محاسبه شده توسط مدل Fib برای آزمون A، در سن 6 ماه (mm²/years)

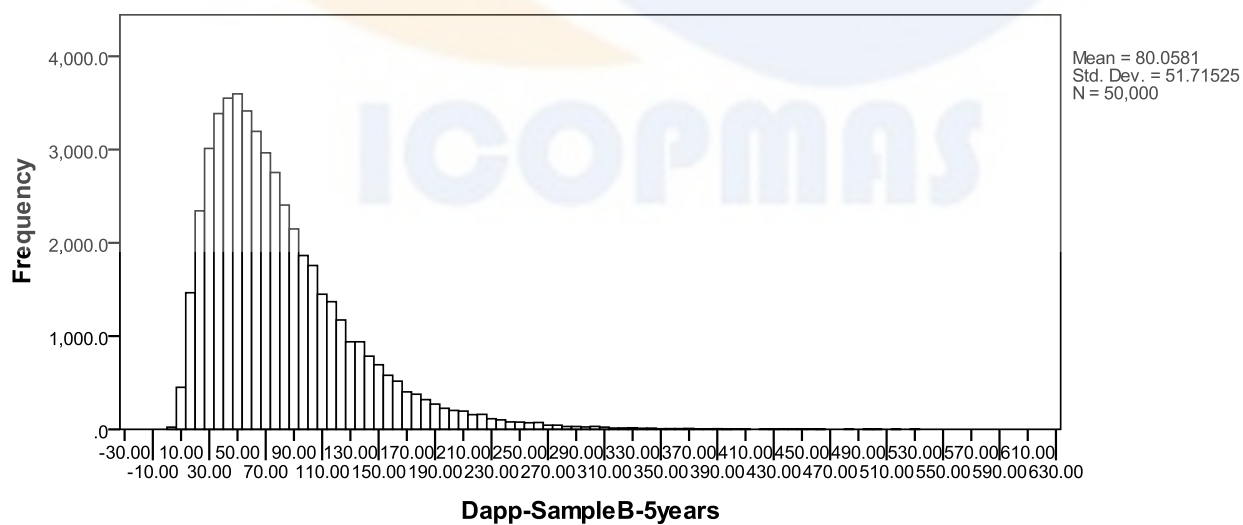
Archive of SID



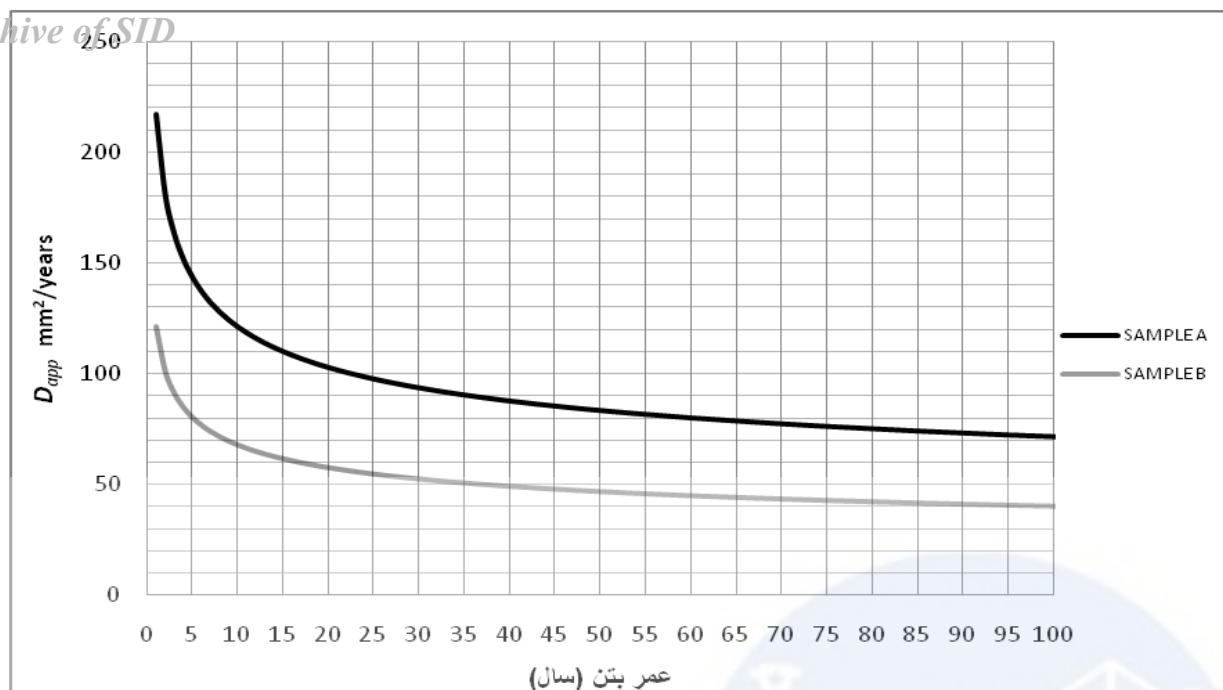
شکل 3) نمودار توزیع مقادیر مختلف ضریب انتشار ظاهری محاسبه شده توسط مدل Fib برای آزمون A، در سن 5 سال (mm^2/years)



شکل 4) نمودار توزیع مقادیر مختلف ضریب انتشار ظاهری محاسبه شده توسط مدل Fib برای آزمون B، در سن 6 ماه (mm^2/years)



شکل 5) نمودار توزیع مقادیر مختلف ضریب انتشار ظاهری محاسبه شده توسط مدل Fib برای آزمون B، در سن 6 ماه (mm^2/years)



شکل 6) تغییرات متوسط ضریب انتشار ظاهری با زمان برای آزمونه های A و B

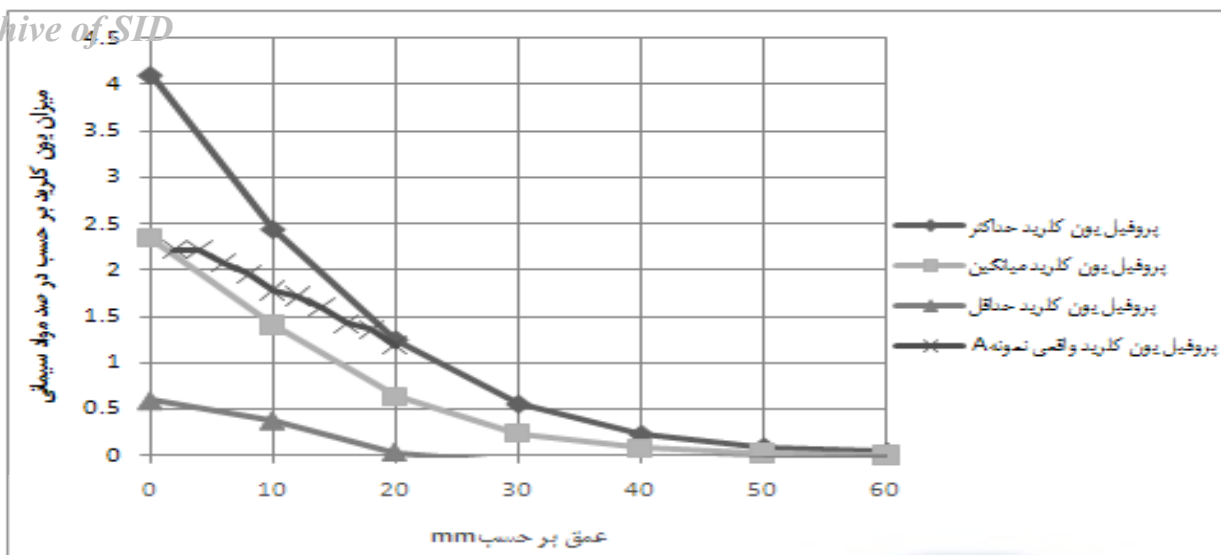
با توجه به شکل های 2 الی 6 و جدول 4، به نظر می رسد که مدل برای تخمین ضریب انتشار ظاهری عملکرد مناسبی از خود نشان نمی دهد. به طوری که در مقایسه ضرایب انتشار تخمین زده شده با مدل Fib با مقادیر واقعی، در برخی موارد تفاوتی در حدود 2 تا 3 برابر مشاهده می شود، البته این تفاوتها در آزمونه B کمتر مشاهده می شود. با تخمین مقادیر بزرگتر مدل نسبت به مقادیر واقعی برای ضریب انتشار ظاهری، می توان پیش بینی نمود که مدل، تراوایی بتن را بیشتر از مقدار واقعی آن لحاظ نموده که هر چند این عمل در جهت ضریب اطمینان بوده ولیکن زمان آغاز خوردگی را کمتر از مقدار واقعی برآورد خواهد نمود.

جدول 4) مقایسه مقادیر ضریب انتشار ظاهری واقعی با مقادیر محاسبه شده توسط مدل Fib

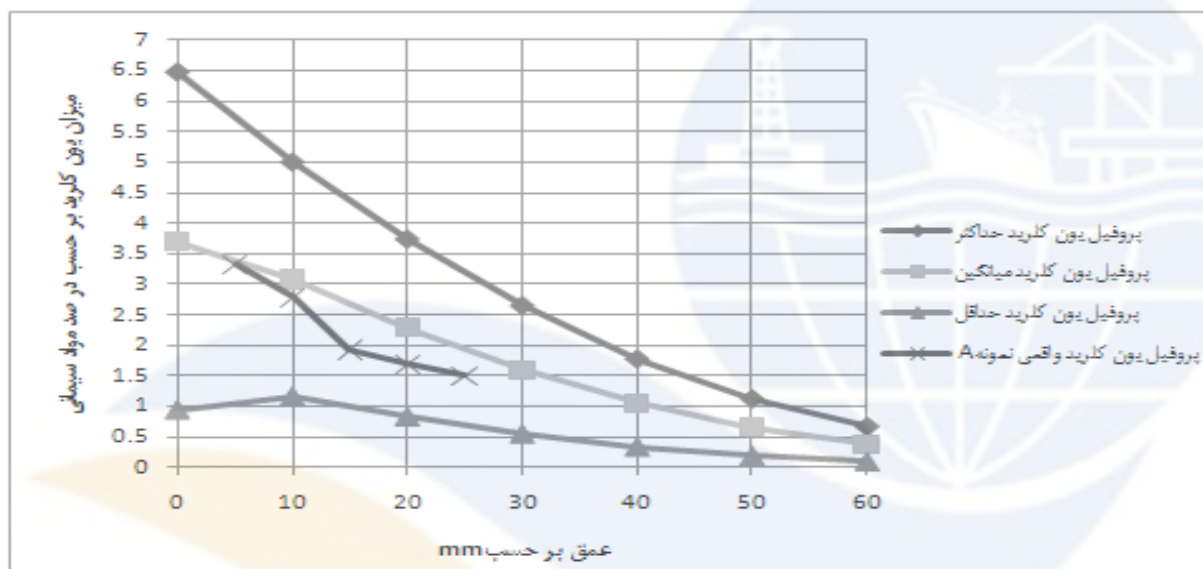
| آزمونه | سن | ضریب انتشار ظاهری واقعی (mm^2/years) | ضریب انتشار ظاهری متوسط (mm^2/years) | ضریب انتشار ظاهری با بیشترین تکرار (mm^2/years) |
|----------|-------|--|--|---|
| آزمونه A | 6 ماه | 681 | 290 | 210 |
| | 5 سال | 56 | 143.4 | 75 |
| آزمونه B | 6 ماه | 138 | 160 | 110 |
| | 5 سال | 30 | 80.1 | 50 |

3-2-3- تخمین پروفیل یون کلرید

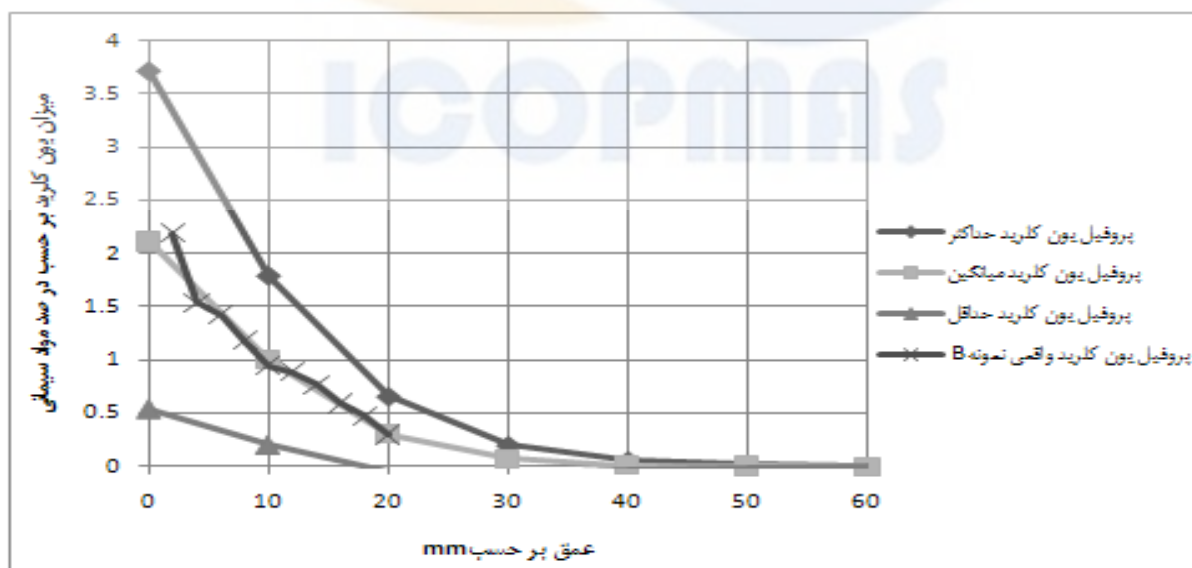
پروفیل یون کلرید نمایش دهنده میزان یون کلرید در اعماق مختلف از سطح بتن می باشد [10]. برای تهیه پروفیل یون کلرید تخمینی به کمک مدل Fib، برای هر پارامتر ورودی تعداد شصت هزار داده تولید شد و برای تحلیل پروفیل یون کلرید تخمینی، سه منحنی به صورت احتمالاتی در نظر گرفته شده است که به همراه پروفیل واقعی یون کلرید ترسیم شده است (شکل های 7 الی 10). منحنی های تخمینی عبارتند از پروفیل یون کلرید میانگین، پروفیل یون کلرید حداقل و پروفیل یون کلرید حداکثر. مقادیر پروفیل یون کلرید حداقل برابر با مقدار میانگین به اضافه انحراف استاندارد و پروفیل یون کلرید حداقل برابر است با مقادیر میانگین منهای انحراف استاندارد می باشد. منحنی هایی که به عنوان پروفیل یون کلرید حداکثر و حداقل در نظر گرفته شده است، بازه تقریبی 70٪ پروفیل یون کلریدهای محتمل را پوشش می دهند. با توجه به شکل های 7 و 8، به نظر می رسد که کماکان نتایج حاصل از مدل Fib برای آزمونه A با واقعیت تفاوت هایی دارد. ولی نکته قابل توجه در مدل های احتمالاتی این است که پروفیل های یون کلرید واقعی در فضای احتمالاتی مدل لحاظ شده و اگر در سازه واقعی، پروفیل یون کلریدهای بیشتری از نقاط مشابه گرفته شود، این عدم قطعیت ها در شرایط واقعی نیز مشاهده شود. با توجه به شکل های 9 و 10، مشاهده می شود که مدل تخمین مناسبی از پروفیل یون کلرید آزمونه B بدست می دهد و این نشان دهنده عملکرد مناسب مدل و احتمالاً تخمین های مناسب زمان آغاز خوردگی می باشد.



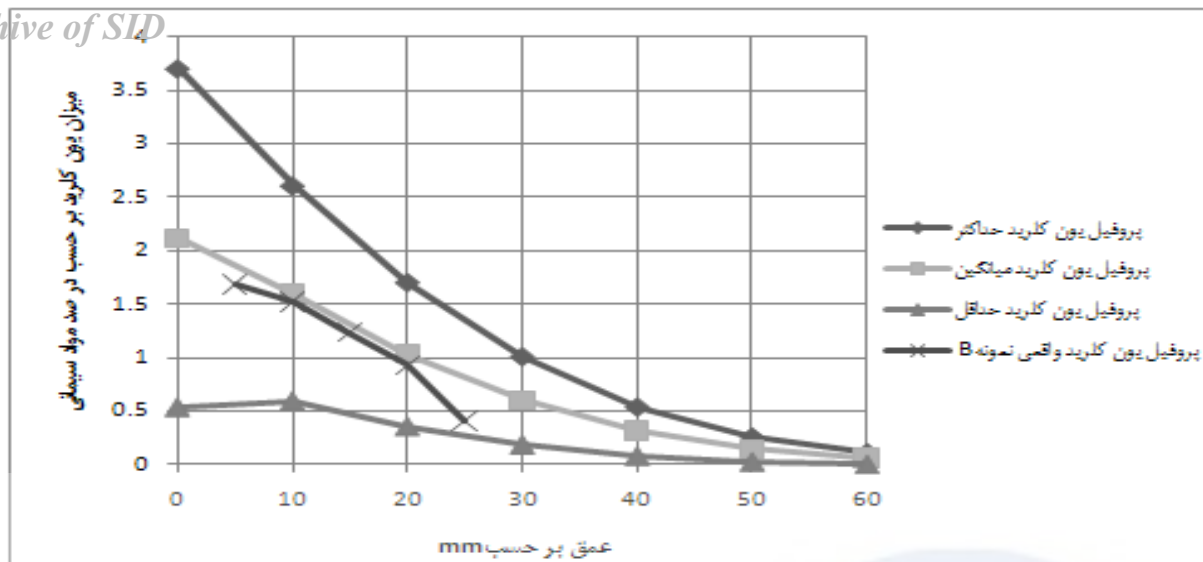
شکل 7) پروقیل یون کلرید های تخمینی و واقعی در سن 6 ماه برای نمونه A



شکل 8) پروقیل یون کلرید های تخمینی و واقعی در سن 5 سال برای نمونه A



شکل 9) پروقیل یون کلرید های تخمینی و واقعی در سن 6 ماه برای نمونه B



شکل 10) پرروفیل یون کلرید های تخمینی و واقعی در سن 5 سال برای نمونه B

3-2-4- عمر مفید خدمت رسانی

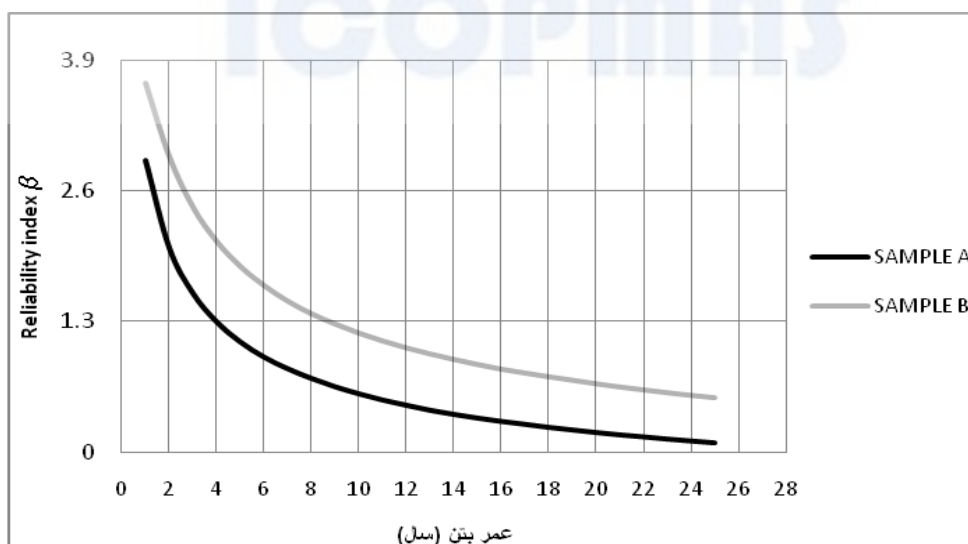
به طور کلی، عمر مفید خدمت رسانی از دو بخش عمده تشکیل شده است، بخش اول بازه‌ای از زمان است که میزان یون کلرید داخل بتن در سطح آرماتور به میزان بحرانی رسیده و پوشش محافظ را از بین برده و خوردگی فولاد مدفون در بتن آغاز شود. بخش دوم بازه‌ای از زمان می‌باشد که خوردگی آغاز شده و تا زمانی که سازه بر اساس ملاحظات بهره برداری قابلیت خدمت رسانی خود را از دست بدهد ادامه می‌یابد. این دوره را دوره گسترش خوردگی می‌نامند [3 و 6]. در مدل Fib (2006)، تنها زمان آغاز خوردگی تخمین زده می‌شود و برای دوره گسترش خوردگی، تنها به پیشنهاداتی ارائه شده است. برای محاسبه احتمال وقوع آغاز خوردگی برای هر نمونه، در هر سال برای پارامترهای ورودی میزان پنجاه هزار داده تصادفی تولید شد و نمودارهای تابع چگالی احتمال وقوع آغاز خوردگی، تابع توزیع تجمعی احتمال وقوع آغاز خوردگی و نمودار تغییرات شاخص قابلیت اعتماد بر حسب زمان به دست آمد (شکل‌های 11-13). بنا بر متن آیین‌نامه Fib، زمان آغاز خوردگی از دیدگاه احتمالاتی زمانی است که شاخص قابلیت اعتماد به مقدار 1/3 برسد. این مقدار تقریباً معادل احتمال آغاز خوردگی 10٪ می‌باشد [5 و 6]. شاخص قابلیت اعتماد بر اساس معادله 6 تعیین می‌شود [5 و 11].

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

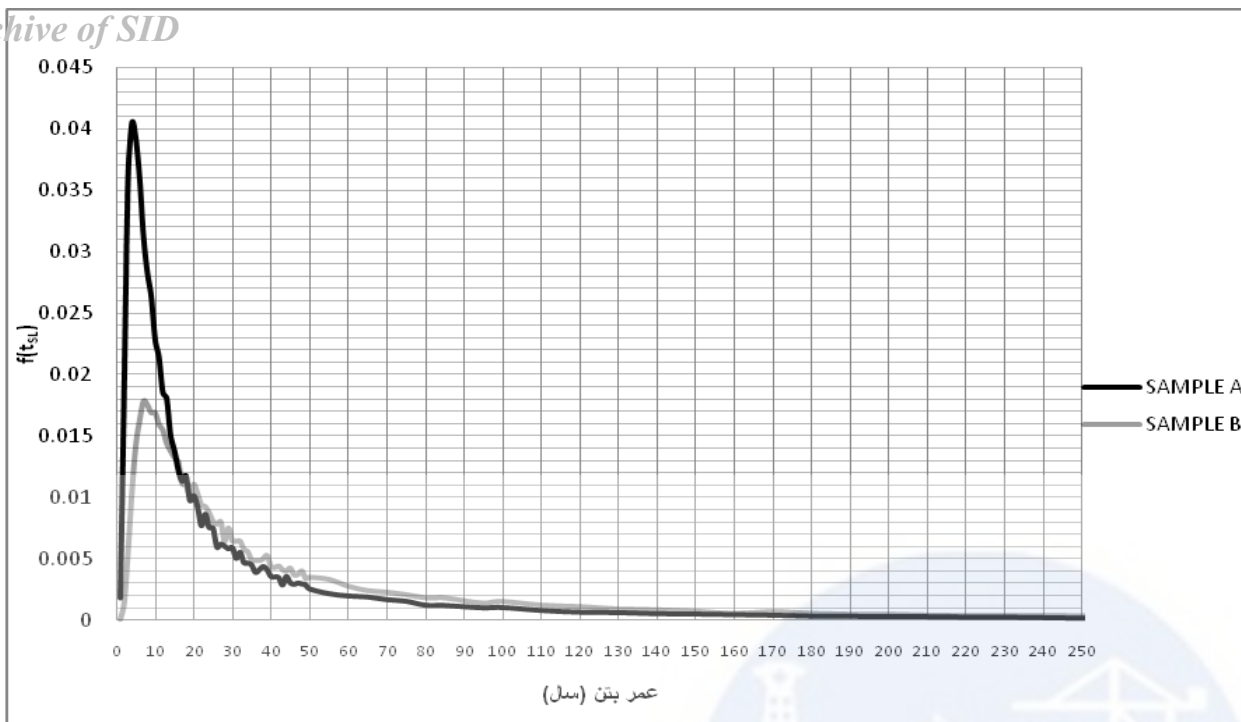
Φ^{-1} = تابع معکوس توزیع تجمعی نرمال استاندارد

β = شاخص قابلیت اعتماد

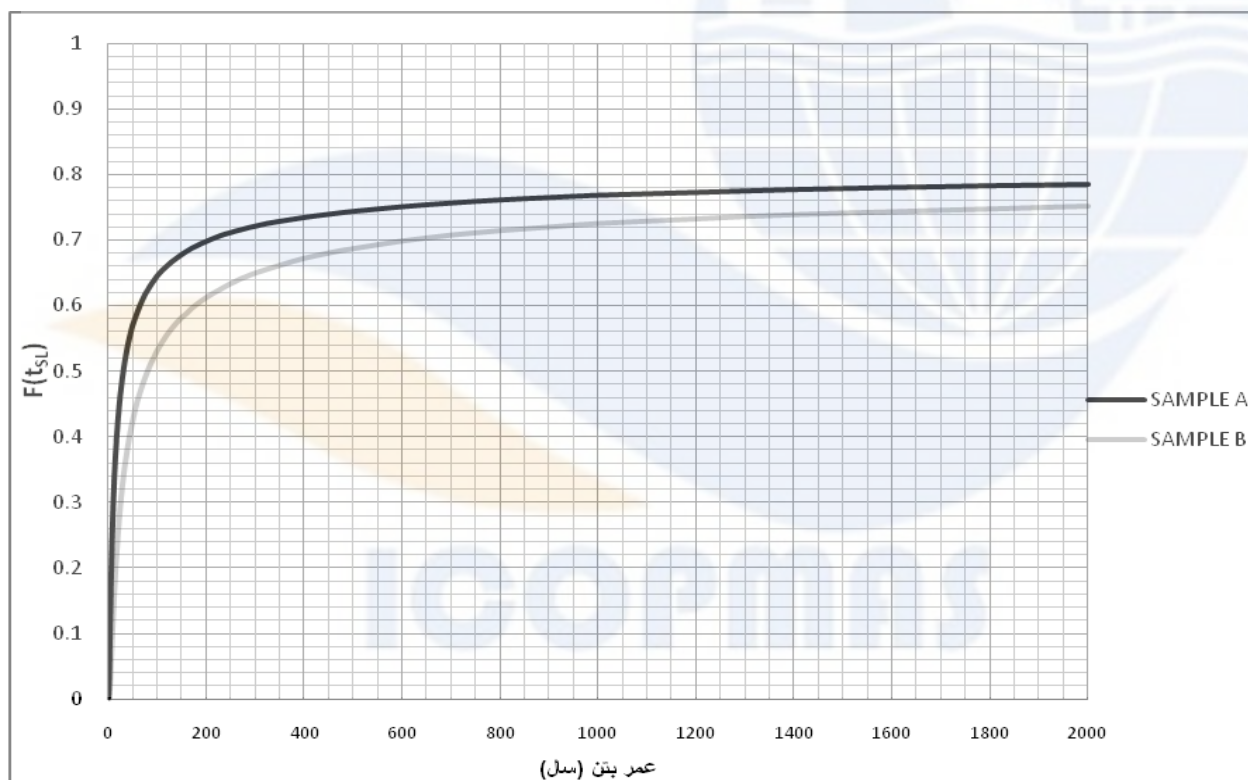
P_F = احتمال شکست



شکل 11) منحنی تغییرات شاخص قابلیت اعتماد برای نمونه های A و B



شکل 12) منحنی چگالی احتمال آغاز خوردگی برای آزمون‌های A و B



شکل 13) منحنی توزیع تجمعی احتمال آغاز خوردگی برای آزمون‌های A و B

تحلیل احتمال آغاز خوردگی تا عمر 2000 سال انجام شده است. شکل‌های 12 و 13 نمایشگر چگالی و میزان احتمال آغاز خوردگی می‌باشند. میزان احتمال آغاز خوردگی در هر سال با توجه به شکل 12 تعیین می‌شود و زمان آغاز خوردگی را شکل 11 براساس ملاحظات قابلیت اعتماد تعیین می‌نماید. با توجه به شکل 11، زمان آغاز خوردگی متناظر با $\beta=1/3$ برای آزمون A، تقریباً 4 سال و برای آزمون B، تقریباً 9 سال می‌باشد. با توجه به بررسی و مقایسه ضریب انتشار ظاهری و پروفیل یون کلرید می‌توان حدس زد که مدل، تخمین مناسبی از زمان آغاز خوردگی برای آزمون A بدست نداده است، ولی برای آزمون B با توجه به تخمین نزدیک ضریب انتشار ظاهری و پروفیل یون کلرید می‌توان حدس زد که تخمین زمان آغاز خوردگی نیز به واقعیت نزدیکتر باشد.

مدل های تخمین عمر مفید خدمت رسانی، توابع ریاضی می باشند که با شیوه های مختلف به دست می آیند. گروهی از مدل ها کاملاً بر پایه مسائل تئوری بوده و گروهی کاملاً تجربی و گروهی بر پایه تئوری بنا می شوند و به کمک آزمایش، اصلاحات لازم روی آنها صورت می گیرد. اساس مدل سازی بر پایه فرضیات ساده ساز می باشد. هر چه این فرضیات بیشتر باشند، می توان پیش بینی نمود که نتایج غیر واقعی تری ارائه می شوند. مدل بررسی شده بر پایه خوردگی کلریدی می باشد، در صورتی که محیط های دریایی ترکیبی از عوامل خوردنده می باشد و تکیه بر یک علت برای تخمین عمر بتن صحیح نمی باشد. از طرفی مدل ها هنگام کالیبره شدن نیاز به انجام آزمایش بر روی نمونه های قرار گرفته در معرض شرایط واقعی دارند. مدل های پیش بینی عمر مفید شرایط خوردنده ای که با آن کالیبره شده اند را شبیه سازی می نمایند و برای شرایط مختلف محیطی، جامعیت خود را از دست داده و نتایج پراکنده ای ارائه می نمایند. امروزه با توجه به عدم قطعیت های فراوان موجود در مدل سازی و همچنین مشخصات محیط و مصالح، مدل های احتمالاتی مورد توجه قرار گرفته اند [5].

امروزه حل مدل ها با رویکردهای احتمالاتی به کاهش هر چه بیشتر عدم قطعیت ها کمک کرده اند و پارامترهای مدل به صورت احتمالاتی مقداری می شوند و می توان با توجه به ملاحظات مختلف، عدم قطعیت ها را به نحوی کنترل شده در مدل وارد نمود. حل احتمالاتی توابع ریاضی که با پارامترهای گسترده ای همراهند، عملاً جز با روش های عددی امکان پذیر نمی باشند. روش مونت کارلو که یک نوع روش عددی می باشد در حل احتمالاتی توابع ریاضی مدل مورد استفاده قرار گرفت. این روش، یکی از روش های عددی مناسب می باشد که توسط رایانه صورت می پذیرد. یکی از عوامل تعیین کننده دقت محاسبات در این روش، تعداد داده های تصادفی تولید شده برای هر پارامتر می باشد که در این مقاله تعداد داده های تصادفی تولید شده در چند مرحله اضافه شد تا میزان بهینه آن در هر تحلیل لحاظ شود.

با توجه به نتایج بدست آمده در این مقاله، به نظر می رسد، با وجود اینکه در این مدل شرایط محیطی و مصالح در نظر گرفته می شود، عدم قطعیت های فراوانی وجود دارد. عوامل تولید این عدم قطعیت ها را می توان ناشناخته ماندن بتن، عدم رفتار یکسان آن در شرایط مختلف و فرضیات ساده ساز مدل سازی دانست. برخی دیگر از عدم قطعیت های موجود در مدل ها از آزمایش های ارزیابی، اصلاح تابع و پارامترهای ریاضی مدل بوجود می آید که با بررسی مدل برای شرایط محلی قابل کاهش می باشند. به منظور کاربرد مدل Fib برای شرایط محیطی و آب و هوایی خلیج فارس، باید اصلاحاتی در این مدل اعمال شود. بدین منظور می توان ضرایب به کار رفته در مدل تخمین ضریب انتشار ظاهری را با آزمایش روی سازه های واقعی اصلاح کرد، یا مدلی جهت تخمین کلرید سطحی بر حسب زمان برای شرایط خاص خلیج فارس ارائه شود و یا انحراف استاندارد برخی پارامترها برای شرایط محیطی و مصالح ایران بر اساس آزمایش ها تعیین گردد.

5- مراجع

[1] رضانیانپور، علی اکبر، پیدایش منصور، سال 1385 " بتن در محیط دریایی"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر

- [2] Vidal.T, Castel.A, François.A, 2005, " Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment " J.Cement and Concrete Research, vol. 35, (2005), pp.226-232.
- [3] Costa.A, Appleton.J , 2002, "Case studies of concrete deterioration in a marine environment in Portugal", J.Cement & Concrete Composites, vol. 24, 2002, pp.169-179.
- [4] Khayat.K.H, Tagnit-Hamou.A, Petrov.N, 2005, "Performance of concrete wharves constructed between 1901 and 1928 at the Port of Montréal", J.Cement and Concrete Research, vol. 35, 2005, PP.226-232.
- [5] Folić.R, 2009, "Durability Design of Concrete Structures – PART 1:Analysis Fundamentals", FACTA UNIVERSITATIS, Architecture & Civil Engineering Vol. 7, No 1, pp. 1-18
- [6] The International Federation for Structural concrete (fib), 2006, "Model Code for Service Life Design", Bulletin 34

[7] آیین نامه بتن ایران (آبا)، 1382، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور

- [8] Lin.J.S, 2001, "Monte Carlo Strategies in Scientific Computing", Department of statistics, Harvard University
- [9] Christian Robert, 2009, "Monte Carlo Methods in Statistics", University Paris Dauphine and CREST, INSEE

[10] مهتا، مونه ئیرو، "ریز ساختار، خواص و اجرای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)" مترجمین: علی اکبر رضانیانپور، پرویز قدوسی، اسماعیل گنجیان انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، سال 1385.

[11] ISO 2394, 1998, "General principles on reliability for structures", Switzerland.