تخمین عمر مفید سازه‌های بتن‌آرمه در شرایط دریایی جزر و مدی

محمد قانونی‌بقا[۱*]، محسنعلی شایانفر[۲]، سعید عسگرانی[۳]، مسعود ذبیحی سامانی[۴]

[۱]عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق؛ ghanoonibagha@iauet.ac.ir
[۲]عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران،قطب علمی پژوهش‌های بنیادین در مهندسی سازه؛ shayanfar@iust.ac.ir
[۳]کارشناسی ارشد، مهندسی عمران-سازه، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ s_asgarani@civileng.iust.ac.ir
[۴]عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند؛ zabihi@piau.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۰۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷

کلمات کلیدی:
سازه‌های بتن مسلح
طراحی برای دوام
ناحیه جزر و مدی
خوردگی ناشی از کلرید
احتمال شروع خوردگی

چکیده

شرایط مهاجم محیط‌های دریایی جزر و مدی به علت حمله یون‌های کلرید و تر و خشک شدن متوالی بتن سبب خوردگی بیش‌ازحد آرماتورها می‌شود. شبیه‌سازی رفتار بتن در زمینه خوردگی می‌تواند در زمینـه کاهش هزینه‌های ناشی از خسارت بسیار مؤثر واقع گردد. در این مقاله با استفاده از تحلیل احتمالاتی مونت‌کارلو، تأثیر تغییرات میانگین و انحراف معیار عمق همرفتی و همچنین سایر پارامترهای مؤثر بر شروع خوردگی در شرایط جزر و مدی بررسی‌شده است. مطابق نتایج تحلیل‌ها، با در نظر گرفتن احتمال خرابی ۱۰٪، عمر مفید سازه در شرایط جزر و مدی با عمق همرفت ۱۰ میلی‌متری، نسبت حالت بدون جزر و مدی در حدود ۱۵ سال کمتر هست. از میان پارامترهای مؤثر بر شروع خوردگی، اثر تغییرات پوشش بتنی بر زمان آغاز خوردگی بسیار زیاد است و عدم توجه کافی به تغییرات پوشش بتنی در حین اجرا باعث کاهش شدید عمر مفید سازه‌های بتن مسلح خواهد شد.

Service-Life Prediction of Reinforced Concrete Structures in Tidal Zone

Mohammad Ghanooni-bagha[1*], Mohsen Ali Shayanfar[2], Saeed Asgarani[3], Masoud Zabihi-Samani[4]

[1]Department of Civil Engineering, East Tehran Branch, IAU, Tehran, Iran; ghanoonibagha@iauet.ac.ir
[2]Centre of Excellence for Fundamental Studies in Structural Engineering, IUST, Tehran, Iran; shayanfar@iust.ac.ir
[3]M.Sc. of Structural Engineering, School of Civil Engineering, IUST; s_asgarani@civileng.iust.ac.ir
[4]Department of Civil Engineering, Parand Branch, IAU, Parand; Iran; zabihi@piau.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 24 Sep. 2016
Accepted: 27 Nov. 2016

Keywords:
RC Structure
Durability Design
Tidal Condition
Chloride Corrosion
Reliability Analysis

ABSTRACT

Aggressive marine environments and tidal conditions due to chloride ions attack and subsequent wetting and drying concrete, lead to excessive corrosion of reinforcing steel that creates destruction. Simulating behavior of corrosion can be effective in reducing the damage, regional investigations are necessary for durability-based design and evaluation of the models proposed for service-life prediction. In this paper Monte Carlo simulation use for service-life prediction of reinforced concrete structures in tidal zone. This study evaluates the influence of mean and standard deviation variations for each of the parameters that affect on the time of corrosion initiation. In tidal condition that studied in this paper, in the case of 10 mm convection depth with respect to non tidal zone, the service life of the structures decrease about 15 years. So it is found the effect of corrosion occurrence to standard deviation of concrete cover that must be noticed in constructions of marine structures.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.11.8]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، خوردگی آرماتورهای فولادی در بتن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین دلایل اصلی خرابی‌های زودرس در سازه‌های بتن‌آرمه شناخته‌شده است[۱]. در سال‌های اخیر تعداد زیادی از سازه‌های بتنی در کشورهای مختلف دنیا و همچنین در ایران در اثر ضعف بتن دچار آسیب‌دیدگی و یا خرابی زودرس شده‌اند. به‌عبارت‌دیگر عمر مفید این سازه‌ها با مقدار پیش‌بینی‌شده تطابق نداشته و بسیار کمتر از آن بوده است[۲، ۳]. در محیط‌های جزر و مدی دریایی معمولاً انتشار یون کلرید به داخل بتن و خوردگی ناشی از آن عامل اصلی خرابی‌ها و کاهش عمر مفید سازه‌های بتن‌آرمه هست[۴، ۵].

در این سازه‌ها که به‌طور کامل اشباع نیستند و مدام تحت تاثیر فرآیندتر و خشک شدن متوالی می‌باشند، نفوذ یون کلر به داخل بتن بسیار سریعتر نسبت به انتشار خالص به‌وقوع می‌پیوندد. در این ساز و کار، انتشارهمراه مکش موئینه مکانیزم ترکیبی داشته و هر چقدر درجه اشباع کمتر باشد اثر مکش موئینه زیادتر می‌شود[۶].

به‌همین خاطر تحقیقات زیادی در خصوص پایایی بتن در شرایط محیطی جزر و مدی انجام‌شده است. یکی از این مطالعات مربوط به تولید نرم‌افزار تخمین عمر مفید سازه‌های بتن‌آرمه در شرایط محیطی خلیج‌فارس و دریای عمان با عنوان DuraPgulf هست[۷].

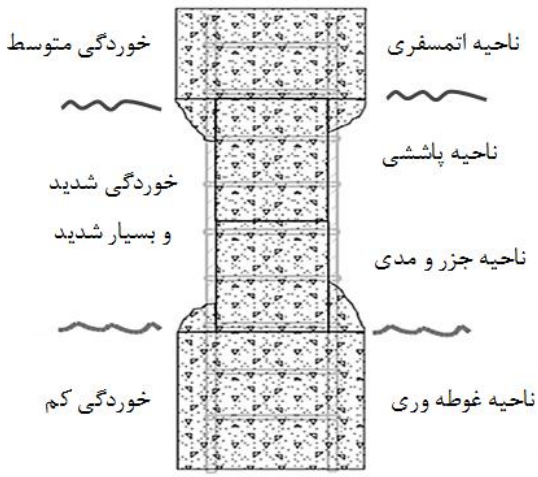
از دیگر تحقیقات، بررسی نفوذ یون کلرید در داخل بتن در محیط دریایی در شرایط جزر و مد و اتمسفری و ناحیه اسپری می‌باشد که در سال ۱۹۹۸ توسط محققین دانشگاه لیسبون منتشر شده است[۸]. این تحقیق شامل ارزیابی دوام دراز مدت (۱۵ساله) نمونه‌های بتنی ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی، سرباره و خاکستر بادی در شرایط محیطی دریایی در سواحل ژاپن تحت شرایط جزر و مدیاست.

همچنین دوام نمونه‌های بتنی ساخته‌شده تحت شرایط مختلف در خلیج‌فارس، توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن بررسی و نتایج آن در سال ۲۰۰۶ منتشرشده است. در تحقیق اخیر، نمونه‌های ساخته‌شده در شرایط محیطی واقعی مختلف: در ساحل، ناحیه جزر و مدی و کاملاً مغروق در آب دریا در سواحل بندرعباس نگهداری می‌شدند[۹]. در سال ۲۰۰۷ نتیجه یک کار تحقیقاتی در سواحل ۱۱ کشور در مقاله‌ای تحت عنوان "اثرات محیط دریا بر روی دوام بتن مسلح" منتشرشده است[۱۰]. در سال ۲۰۰۸ مقاله‌ای با عنوان اثرات ناحیه جزر و مدی خلیج‌فارس بر روی دوام بتن حاوی میکروسیلیس توسط محققین دانشگاه کاونتری منتشرشده است. در مقاله اخیر، نمونه‌های بتنی در شرایط جزر و مدی شبیه‌سازی‌شده در آزمایشگاه و همچنین در سواحل خلیج‌فارس و حوضچه آب شیرین، نگهداری و آزمون‌های مقاومت فشاری و جذب آب بر روی نمونه‌ها انجام‌شده است [۱۱]. در سال ۲۰۱۵ شایانفر و همکاران به بررسی احتمال وقوع خوردگی میلگردهای مدفون در سازه‌های بتن‌آرمه ساخته شده در شرایط غیر جزر و مدی با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی پرداختند[۱۲، ۱۳].

با توجه به اهمیت بیشتر محیط جزر و مدی دریا و شرایط شدیدتر آن، در این مقاله به بررسی تخمین عمر مفید سازه تحت شرایط جزر و مدی برای پیش‌بینی زمان شروع خوردگی می‌پردازیم و تأثیر تغییرات میانگین و انحراف معیار عمق همرفتی و همچنین سایر پارامترها در شرایط جزر و مدی بر وقوع و زمان شروع خوردگی بررسی و میزان تأثیر این ضرایب نشان داده می‌شود. در این راستا، با استفاده از نرم‌افزار متلب و تحلیل احتمالاتی مونت‌کارلو به تخمین عمر مفید سازه‌های بتنی قرارگرفته در شرایط جزر و مدی پرداخته‌شده است.

۲- فرایند وقوع خوردگی و مدل‌سازی انتقال یون کلرید

فرآیند خوردگی که در آن آرماتورها مکرراً خورده می‌شوند، عملی پیچیده است که تا حد زیادی به عوامل محیطی و خارجی همچون دما و رطوبت وابسته هست. شایان‌ذکر است که بار کلرید سطحی و میزان نفوذیون کلرید بسته به نوع قرارگیری در شرایط متفاوت دریاییمقدار متفاوتی خواهد داشت.شکل ۱ شرایط متفاوت دریایی (اتمسفری، پاششی، جزرومدی و غوطه‌وری) را نشان می‌دهد که سازه در معرض آن‌هاقرارگرفته است.



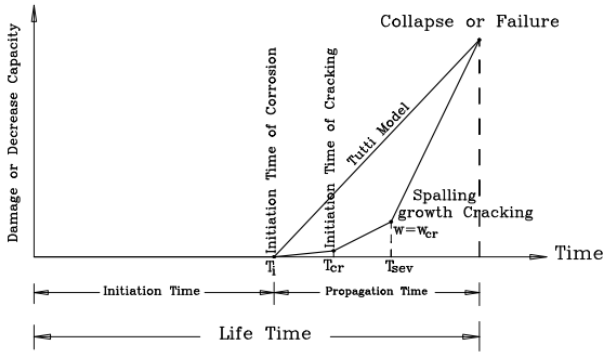
شکل ۱-مقطع بتنی در شرایط محیطی متفاوت تحت خوردگی [۱۴]

در بین شرایط نشان داده‌شده در شکل ۱، حالت جزر و مدی و پاششی به‌عنوان آسیب‌رسان‌ترین شرایط برحسب دوام معرفی‌شده‌اند، درحالی‌که شرایط اتمسفری به سبب نفوذ کمتر یون‌های کلرید دارای اثر تخریبی کمتری هست[۱۴]. در بخش-

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.11.8]

های بعدی فقط به بررسی مخرب‌ترین حالت یعنی شرایط جزر و مدی پرداخته‌شده است.

در سازه‌های بتنی دریایی عمر مفید سازه مشابه شکل ۲ به دو بخش اصلی تقسیم‌بندی می‌شود [۱۳، ۱۵]. دوره آغازین، t_i ،مدتزمانی است که تا شروع خوردگی طول می‌کشد. دوره انتشار، t_p، زمان گسترش خوردگی و کاهش ظرفیت المان بتنی است که می‌تواند مطابق شکل ۲ شامل مرحله ترک خوردگی[۱۵] و یا حتی شامل مرحه پوسته ای شدن المان باشد[۱۶].



شکل ۲-نمایش مفهوم عمر مفید در سازه‌های بتنی در معرض خوردگی ناشی از حمله یون‌های کلرید (مدل اصلاح شده توتی) [۱۵،۱۳]

طول عمر کلی سازه‌های بتنی (t_S)، در معادله (۱) نشان داده شده است:

$$t_s = t_i + t_p \qquad (۱)$$

که در آنt_i مدت‌زمانی است که مقدار کلریددر سطح میلگرد به‌حدی برسد که منجر به تخریب لایه محافظ فولاد و شروع خوردگی شود وt_pمدت‌زمانی که خوردگی میلگرد به یک شرایط بحرانی می‌رسد که ظرفیت سازه بسیار کم شود. ازآنجایی‌که زمان شروع خوردگی تا ترک خوردگی، t_c، در حدود۳سال در نظر گرفته می‌شود [۲، ۱۷]، و بعد از آن ظرفیت سازه با سرعت و شدت زیادی کاهش می‌یابد، چنین مدت‌زمانی در مقایسه بازمان نسبتاً طولانی موردنیاز برای شروع خوردگی قابل‌چشم‌پوشی هست[۱۸]. به‌همین دلیل برای محاسبه عمر مفید، t_i مورد توجه می‌باشد. مقدارt_i نیز وابسته به نفوذ یون کلرید به‌داخل بتن بوده کهاز قانون فیک برآورد می‌شود (رابطه ۲).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad (۲)$$

که در آن C مقدار کلرید در زمان و مکان مشخص، D ضریب انتشار کلرید، x عمق نفوذ و tنشانگر زمان می‌باشند. غلظت کلرید سطحی در یک‌زمان و عمق مشخص (x,t) و در فضای یک‌بعدی با حل تحلیلی معادله بالا و قرار دادن شرایط مرزی C(t=0)=0و $C(x=0)=C_s$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C(x,t) = C_S\left[1 - \mathrm{erf}\,\frac{x-\Delta x}{2\sqrt{D*t}}\right] \qquad (۳)$$

که در آن C_Sغلظت کلرید سطحی و erf تابع خطا هست. زمانی که غلظت کلرید سطحی در سطح آرماتور به حد آستانه یا بحرانی برسد (**$C(x,t)=C_{th}$**)، خوردگی آغاز شده و به‌عنوان عمر مفید قابل‌محاسبه است[۱۹].

۳- پارامترهای مؤثر بر خوردگی

در اینجا ۵ پارامتر مؤثر بر تخمین عمر مفید سازه در معادله (۳) تعریف گردیده و مقادیر آن‌ها مشخص‌شده است. ضمن اینکه در این مقاله توزیع در نظر گرفته‌شده برای همه پارامترهای احتمالاتی توزیع نرمال هست.

۳-۱- کلرید آستانه (C_{th})

حداقل تراکم کلرید لازم برای انهدام لایه منفعل و آغاز خوردگی، کلرید آستانه نامیده می‌شود؛ که به عوامل بسیاری ازجمله آرماتور، محیط‌زیست الکتروشیمیایی بتن، نسبت آب به سیمان، رطوبت، مواد افزودنی و ... بستگی دارد.موسسه استاندارد بریتانیا(استاندارد BS8110) مقدار ۰٫۴٪ وزنی سیمان را به‌عنوان مقدار کلرید آستانه پیشنهاد می‌کند که معادل ۰٫۰۷٪ وزن بتن است[۲۰-۲۲]. همچنین بر طبق fib مقدار ضریب تغییرات برای کلرید آستانه و شرایط جزر و مدی برابر ۲۵٪ در نظر گرفته می‌شود [۲۳] که با توجه به شرایط مختلف قرارگیری و همچنین نوع قطعه بتنی می‌تواند مقادیر جدول ۱ را اختیار کند.

جدول ۱- مقادیر کلرید آستانه

مرجع	مقدار میانگین (wt%cem)	cov (%)	انحراف استاندارد (wt%cem)
[۱۹،۱۴]	۰٫۳	۲۵	۰٫۰۷۵
استاندارد بریتانیا ۱۹۹۷ [۲۲]	۰٫۴	۱۰	۰٫۰۴
		۲۵	۰٫۱
		۴۰	۰٫۱۶
[۱۹،۲۰]	۰٫۵	۲۵	۰٫۱۲۵

۳-۲- غلظت کلرید سطحی (C_s)

مقدار کلرید در سطح بتن، C_s، اساساً نتیجه شرایط محیطی که بتن در آن قرار می‌گیرد، هستکه درنتیجه تجزیه‌وتحلیل رگرسیون از اطلاعات به‌دست‌آمده از نفوذ کلرید بتن و برازش منحنی قانون

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.11.8]

دوم فیک قابل‌محاسبه هست[۲۴]. مقادیر عددی این پارامتر از منابع [۲۳] که در این تحقیق استفاده‌شده در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲-مقادیر غلظت کلرید سطحی

شرایط محیطی	مقدار میانگین (wt%cem)	cov (%)	انحراف استاندارد (wt%cem)
اتمسفری	۱,۰۸۷۶	۷۵	۰,۸۲
جزرومدی	۲,۷۲۹	۷۵	۲,۰۴۷
جزرومدی	۳,۳۸۳	۶۰	۲,۰۳
		۷۵	۲,۵۴
		۹۰	۳,۰۴۵
جزرومدی	۸,۴۳۹	۷۵	۶,۳۳

۳-۳- ضریب انتشار کلرید (D)

انتشار کلرید در بتن، مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلرید را تعیین می‌کند. انتخاب یک سیستم مناسب خمیر و نسبت کمی از آب به خمیر، مقاومت در برابر نفوذ کلرید به‌دلیل ایجاد تخلخل کم را افزایش می‌دهد[۲۴]. مقادیر پارامترهای توزیع احتمالاتی انتشار کلرید در مرجع [۲۳] که در این تحقیق به کار گرفته‌شده در جدول ۳ خلاصه‌شده است.

جدول ۳-مقادیر ضریب انتشار

شرایط محیطی	مقدار میانگین (mm^2/year)	cov (%)	انحراف استاندارد (mm^2/year)
اتمسفری	۳۸,۹۳	۲۰	۷,۷۸۶
جزرومدی	۲۳۷,۹	۲۰	۴۷,۵۸
جزرومدی	۱۲,۹۱	۱۰	۱,۲۹۱
		۲۰	۲,۵۸۲
		۳۰	۳,۸۷۳
جزرومدی	۲۰,۶۸	۲۰	۴,۱۳۶

۴-۳- پوشش بتن (d)

مهم‌ترین عامل تغییرات و خطا در اندازه پوشش سازه‌های بتنی بستگی به عناصر محیط کار مانند نظارت مهندسان، مهارت کارگران و تکنسین‌ها، قوس ناشی از وزن آرماتورها و غیره دارد. مقدار حداقل پوشش بتنی با توجه به مبحث نهم مقررات ملی ساختمان [۲۵]، برای تیر و ستون‌هایی که در معرض شرایط جزر و مدی خلیج‌فارس قرار دارند ۷۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود و همچنین با توجه به مرجع [۲۵] از مقادیر جدول ۴ استفاده خواهد شد.

جدول ۴-مقادیر پوشش بتنی

توضیحات (شرایط)	مقدار میانگین (mm)	cov (%)	انحرافاستاندارد (mm)
تیر–ستون	۶۵	۲۰	۱۳
	۷۵	۱۰	۷,۵
		۲۰	۱۵
		۳۰	۲۲,۵
	۸۵	۲۰	۱۷

۵-۳- عمق ناحیه همرفتی (ΔX)

اگر المان‌های سازه به‌طور متناوب در معرض محلولی با غلظت ثابت و یا متغیر کلرید قرار گیرند، عمق ناحیه همرفتی باید در فرمول تخمین عمر مفید به‌حساب آید. یک المان سازه‌ای که به‌طور متناوب تحت بارگذاری محلول کلریدی است، در طول ذخیره‌سازی هوا توسط دوره‌های زمانی خشک که در طی آن آب موجود در بتن نزدیک به تبخیر سطحی قرار می‌گیرد، منقطع می‌شود و هر دوباره خیس شدن متعاقب آن باعث ایجاد فرآیند مکش مویرگی می‌شود. در مقایسه با فرآیندهای انتشار، انتقال مویینه منجر به جابجایی سریع کلرید به داخل بتن تا عمق ΔX می‌شود که در آن کلرید می‌تواند تا موقعی که یک غلظت اشباع را ایجاد کند انباشته شود. برای بخش‌هایی از سازه که کامل مغروق در غلظت کلرید سطحی هستند این عمق برابر صفر هست؛ اما در مواردی که سازه در شرایط جزر و مدی قرار دارد، ΔX صفر نیست و با استفاده از جدول ۵ مقادیر میانگین و انحراف استاندارد را در برمی‌گیرد.

جدول ۵- مقادیر عمق ناحیه همرفتی

توضیحات (شرایط)	مقدار میانگین (mm)	cov (%)	انحراف استاندارد (mm)
مغروق	۰	۳۵	۰
جزرومدی	۵	۳۵	۱,۷۵
جزرومدی	۱۰	۲۵	۲,۵
		۳۵	۳,۵
		۴۵	۴,۵

سازه موردبررسی ما، سازه‌ای است که با توجه به مرجع [۲۳]، ۴ سال از ساخت آن گذشته و در محیط جزر و مدی هست. مقدار پوشش در نظر گرفته‌شده برای آن ۷۵ میلی‌متر و عمق همرفتی ۱۰ میلی‌متر است. همچنین بر طبق استاندارد بریتانیا [۲۲] مقدار میانگین کلرید آستانه ۰,۴٪ وزنی سیمان خواهد بود. حال با توجه به تغییرات مقادیر میانگین و انحراف استاندارد در جداول ۱ الی ۵، به بحث و بررسی در بخش ۵ می‌پردازیم.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.11.8]

۴- شبیه‌سازی مونت کارلو

با توجه به ذات تصادفی پارامترهای اثرگذار در زمینه خوردگی آرماتورها، در این تحقیق از روش مونت کارلو که از دقیق‌ترین روش‌های شبیه‌سازی است استفادهشد. برنامه نویسی در محیط نرم افزار متلب(Matlab) به‌منظور مطالعه احتمالاتی بر پایه روش مونت کارلو (MonteCarlo) اساس کار این تحقیق می‌باشد. روش مذکور یک ابزار ریاضی کارآمد جهت تعیین احتمال مربوط به یک پیشامد خاص، که خود برآمد مجموعه‌ای از فرآیندهای تصادفی می‌باشد، ارائه می‌دهد. به‌طور کلی، روش مونت‌کارلو از تولید دیجیتال تابع‌ها، متغیرهای تصادفی و در ادامه تحلیل آماری نتیجه تحلیل‌ها متشکل می‌شود. برای مسائل سازه‌ای مورد مورد بررسی یعنی محاسبه عمر مفید سازه در این تحقیق، در ابتدا مجموعه‌ی نمونه‌برداری متناظر با متغیرهای تصادفی بر اساس تابع‌های چگالی احتمالاتی(جدوال ۱ تا۵) تولید می‌شود. سپس مدل ریاضی مربوط به $g(\cdot)$، به‌عنوان تابع حالت حدی(رابطه ۳) که در نتیجه آن امکان تعیین خرابی‌ها جهت نمونه‌های برآمده از متغیرهای تصادفی میسر می‌گردد، انتخاب می‌گردد. در نهایت، بعد از انجام شبیه‌سازی‌ها با بهره‌گیری از مجموعه‌ی نمونه‌برداری تولید شده، به‌سادگی می‌توان از روی تعداد دفعاتی که تابع حالت حدی $g(\cdot)$ نقض گردیده، نسبت به کل تعداد شبیه سازی‌ها به محاسبه احتمال وقوع پرداخت[۲۶].

توزیع‌های احتمالاتی و پارامترهای مربوط به هر متغیر در جدول ۱ تا ۵ مشخص شده اند و برای هر تحلیل نیز به طور ویژه معرفی خواهند شد. رویکرد تولید داده‌ها، روش تبدیل معکوس می‌باشد.

تعداد نمونه‌ها در براورد مقدار میانگین، انحراف معیار و احتمال خرابی یک متغیر تصادفی اهمیت زیادی دارد. در آنالیز مونت‌کارلو هرچه تعداد نمونه‌ها بیشتر باشد، دقت پاسخ به‌دست آمده بیشتر خواهد بود. از آن‌جایی که معیار محاسبه احتمال وقوع خوردگی، شاخص قابلیت اطمینان ۱,۳ یا احتمال خرابی ۱۰٪ می‌باشد[۱۲]، تعداد نمونه‌ها خیلی حساس نبوده و با شبیه‌سازی حدود ۱ میلیون با دقت بسیار بالایی به پاسخ دقیق خواهیم رسید[۲۶].

۵- نتایج شبیه‌سازی‌ها

تغییرات پارامترهای مؤثر بر خوردگی می‌تواند در بیشتر کردن عمر مفید تأثیر بسزایی داشته باشد. در این بخش به تحلیل این تغییرات می‌پردازیم که تأثیر کدام‌یک مهم‌تر است و برای اینکه عمر مفید بیشتری داشته باشیم روی کدام پارامتر بیشتر کارکنیم. ضمن اینکه زمان آغاز خوردگی زمانی است که شاخص قابلیت اعتماد به مقدار ۱,۳ برسد. این مقدار تقریباً معادل احتمال آغاز خوردگی ۱۰٪ هست و این مقدار مبنای مقایسه ما در این مقاله قرارگرفته است[۱۲، ۲۱].

هر نمـودار در این بخش احتمال وقـوع خوردگـی در هرسال را نشان می‌دهد که می‌توان با داشتن این نمودارها فرضاً در سال nام احتمال وقوع خوردگی را در شرایط مشخص شده، محاسبه نمود.

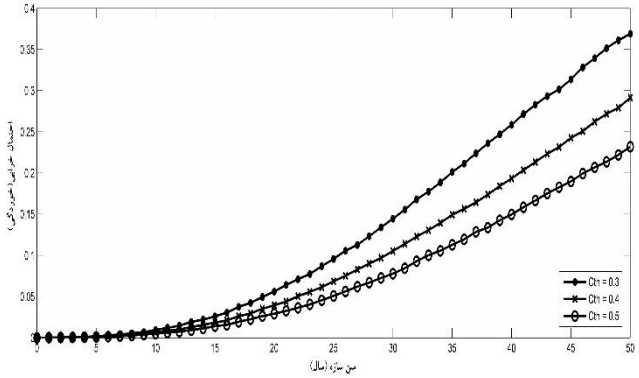
۵-۱- تغییرات میانگین و انحراف استاندارد کلرید آستانه (C_{th})

با ثابت نگه‌داشتن مقادیر میانگین و انحراف استاندارد ۴ پارامتر دیگر و همچنین انحراف استاندارد کلرید آستانه مطابق جدول ۶، نمودار احتمال وقوع خوردگی در طول عمر مفید سازه برای ۳ مقدار میانگین کلرید آستانه، ۰,۳ و ۰,۴ و ۰,۵ (بر حسب درصد وزنی سیمان) در شکل ۳ رسم شده‌اند.

جدول ۶- پارامترهای محاسبه عمرمفید سازه در شکل ۳

پارامتر	Cth	Cs	D	d	Δx
μ	متغیر	۳,۴	۱۲,۹۱	۷۵	۱۰
σ	۰,۲۵	۰,۷۵	۰,۲	۰,۲	۰,۳۵

بر اساس قابلیت اطمینان ۱,۳ یا احتمال ۱۰٪، زمان آغاز خوردگی با درنظر گرفتن کلرید آستانه برابر ۰,۴٪ وزنی سیمان،در حدود ۲۹ سال محاسبه می‌شود. حال اینکه بیشتر در نظر گرفتن کلرید آستانه، عمر مفید را بیشتر و کمتر در نظر گرفتن آن عمر مفید را مطابق شکل ۳ کمتر برآورد می‌نماید.



شکل ۳-اثر تغییرات میانگین کلرید آستانه بر احتمال وقوع خوردگی

حال اثر تغییرات انحراف استاندارد بر احتمال وقوع خوردگی بررسی می‌شود. با فرض ثابت بودن پارامترهای دیگر و همچنین در نظر گرفتن مقدار میانگین ۰,۴٪ وزنی سیمان برای کلرید آستانه، ضریب تغییرات مقادیر ۱۰ و ۲۵ و ۴۰ درصد را می‌گیرد که سه انحـراف استاندارد طبق جدول ۱ خواهیم داشت. مقادیر در نظر گرفته‌شده برای رسم نمودارها به‌صورت زیر می‌باشند.

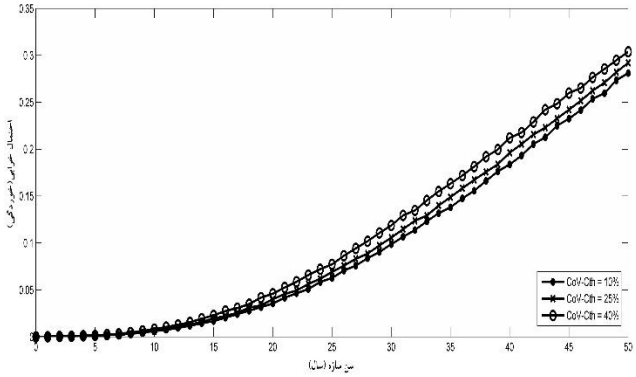
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.11.8]

جدول ۷- پارامترهای محاسبه عمرمفید سازه در شکل ۴

پارامتر	Cth	Cs	D	d	Δx
μ	۰,۴	۳,۴	۱۲,۹۱	۷۵	۱۰
σ	متغیر	۰,۷۵	۰,۲	۰,۲	۰,۳۵

در شکل ۴ پیداست که در عمر مفید معادل ۱۰٪ احتمال خوردگی با افزایش ۱۵ درصدی مقدار ضریب تغییرات کلرید آستانه، از مقدار عمر مفید ۱,۵ تا ۲ سال کاسته می‌شود و با کاهش ۱۵ درصدی مقدار ضریب تغییرات کلرید آستانه، به مقدار عمر مفید ۱ سالی افزوده می‌شود. همین‌طور اینکه در سال‌های اولیه تغییرات داده‌ها اهمیتی در عمر مفید سازه ندارد و در سال‌های انتهایی عمر طراحی ۵۰ ساله این تغییرات محسوس می‌گردند.



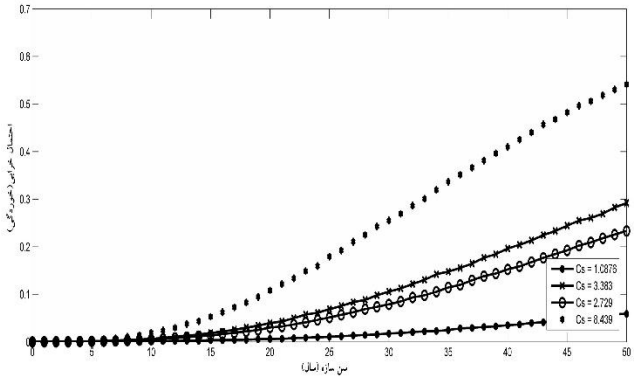
شکل ۴- اثر تغییرات انحراف استاندارد کلرید آستانه بر احتمال وقوع خوردگی

۵-۲- تغییرات میانگین و انحراف استاندارد غلظت کلرید سطحی (C_S)

با افزایش سن سازه مقدار غلظت کلرید سطحی افزایش پیدا می‌کند[۲۳] که نادیده گرفتن آن در طراحی دوام اولیه باعث کاهش عمر مفید سازه خواهدشد. همان‌طور که در شکل ۵ پیداست بیشترین عمر مفید (برابر با احتمال خوردگی ۱۰٪) در پایین‌ترین غلظت کلرید سطحی که مربوط به شرایط اتمسفری است رخ می‌دهد(Cs= ۱,۰۸۷۶).در این غلظت کلرید سطحی خوردگی در ۵۰ سال عمر مفید این سازه با مشخصات معرفی شده در جدول ۸، رخ نمی‌دهد. در بالاترین غلظت کلرید سطحی (Cs= ۸,۴۳۹) در سال ۱۹ ام، احتمال وقوع خوردگی به ۱۰ ٪ می‌رسد.

جدول ۸- پارامترهای محاسبه عمرمفید سازه در شکل ۵

پارامتر	Cth	Cs	D	d	Δx
μ	۰,۴	متغیر	۱۲,۹۱	۷۵	۱۰
σ	۰,۲۵	۰,۷۵	۰,۲	۰,۲	۰,۳۵



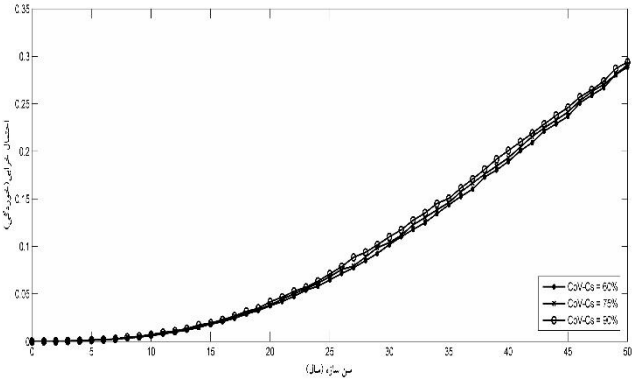
شکل ۵- اثر تغییرات میانگین غلظت کلرید سطحی بر احتمال وقوع خوردگی

برای درنظر گرفتن تأثیر تغییرات انحـراف استانـدارد غلظت کلرید سطحی، مقادیر در نظر گرفته‌شده برای ترسیم نمودارهای شکل۶ در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹- پارامترهای محاسبه عمرمفید سازه در شکل ۶

پارامتر	Cth	Cs	D	d	Δx
μ	۰,۴	۳,۴	۱۲,۹۱	۷۵	۱۰
σ	۰,۲۵	متغیر	۰,۲	۰,۲	۰,۳۵

مطابق شکل ۶ ملاحظه می‌شود، اثر تغییرات میزان انحراف استاندارد غلظت کلرید سطحی تأثیر چندانی بر عمر مفید ندارد و مشاهده می‌شود که هر سه نمـودار تقریباً یکسان شده‌اند. پس می‌توان گفت که پراکندگی داده کلرید سطحی تأثیر چندانی در احتمال خرابی ندارند. به عبارت دیگر،اگر داده‌های کمی هم داشتیم و یا انحراف معیار دقیق غلظت کلرید سطحیمشخصنبود، انتخاب مقادیر متفاوت، تفاوت چندانی در برآورد احتمال وقوع خوردگی سازه ندارد.



شکل ۶- اثر تغییرات انحراف استاندارد غلظت کلرید سطحی بر احتمال وقوع خوردگی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

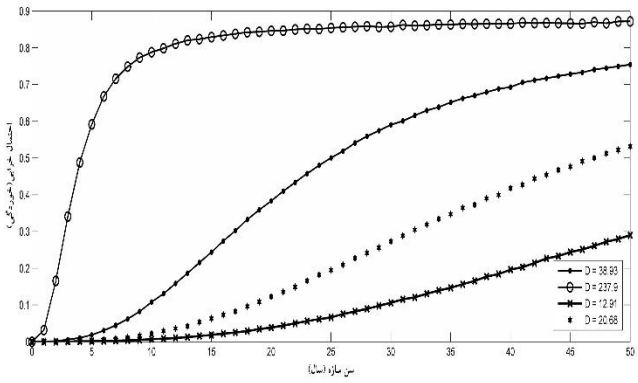
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.11.8]

۵-۳- تغییرات میانگین و انحراف استاندارد ضریب انتشار کلرید (D)

مقدار ضریب انتشار و نفوذ کلرید در بتن نسبت مستقیم با نسبت آب به سیمان (w/c) و افزودنی‌های معدنی دارد. کمترین مقدار D با کمترین مقدار w/c و بیشترین آن با بیشترین مقدار w/cمی‌آید[۲۳]. حال با چهار مقدار ضریب انتشار ارائه شده در جدول ۳، و ثابت نگه داشتن باقی پارامترها طبق جدول ۱۰، چهار نمودار در شکل ۷ به‌دست می‌آید.نمودارهای شکل ۷ نشان‌دهنده این است که هرچه مقدار ضریب انتشار کمتر باشد، عمر مفید بیشتر خواهدشد. در ضریب انتشار ۲۳۷,۹، عمر مفید (معادل احتمال خرابی ۱۰٪) تنها ۱,۵ سال بوده و ملاحظه می‌شود که شیب نمودار در سال‌های اولیه بسیار زیاد است. با کاهش یافتن ضریب انتشار به ۳۸,۹۳ (افزایش کیفیت بتن) عمر مفید به ۹ سال افزایش پیدا می‌کند و در ضریب انتشار ۱۲,۹۱ عمر مفید به ۲۹ سال می‌رسد. پس برای رسیدن به عمر مفید بیشتر با احتمال وقوع کمتر باید نسبت w/cرا حدامکان کم نمود.

جدول ۱۰- پارامترهای محاسبه عمرمفید سازه در شکل ۷

پارامتر	Cth	Cs	D	d	Δx
μ	۰,۴	۳,۴	متغیر	۷۵	۱۰
σ	۰,۲۵	۰,۷۵	۰,۲	۰,۲	۰,۳۵



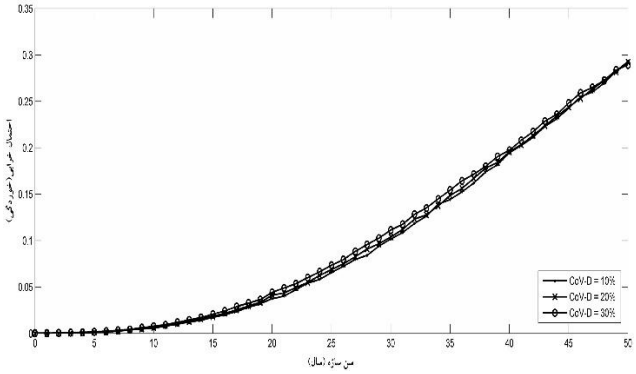
شکل ۷- اثر تغییرات میانگین ضریب انتشار کلرید بر احتمال وقوع خوردگی

به‌مانند تغییرات انحراف استاندارد غلظت کلرید سطحی تغییرات انحراف استاندارد ضریب انتشار نیز تأثیر محسوسی بر عمر مفید و احتمال آن ندارد. مقادیر در نظر گرفته‌شده برای رسم این نمودارها در جدول ۱۱ارائه شدهاست.

جدول ۱۱- پارامترهای محاسبه عمرمفید سازه در شکل ۸

پارامتر	Cth	Cs	D	d	Δx
μ	۰,۴	۳,۴	۱۲,۹۱	۷۵	۱۰
σ	۰,۲۵	۰,۷۵	متغیر	۰,۲	۰,۳۵

در شکل ۸ مشاهده می‌شود که تغییرات انحراف استاندارد ضریب انتشار کلرید نمودارهایی تقریباً مشابه را ایجاد می‌نماید و هر سه نمودار با سه ضریب تغییرات ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ درصد روی‌هم افتاده‌اند و هر سه تقریباً برای سازه موردبررسی، سن ۲۹ سال را پایان عمر مفید می‌دانند.



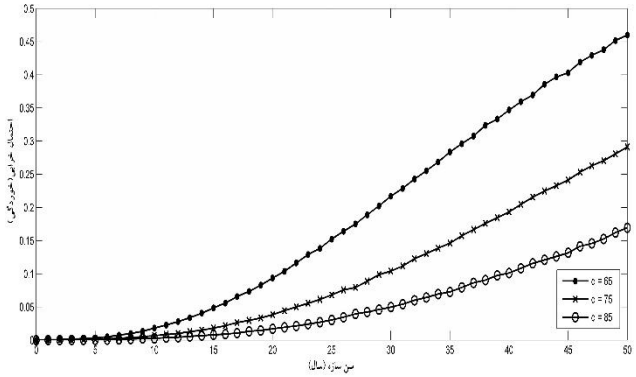
شکل ۸- اثر تغییرات انحراف استاندارد ضریب انتشار کلرید بر احتمال وقوع خوردگی

۵-۴- تغییرات میانگین و انحراف استاندارد پوشش بتنی (*d*)

تأثیر تغییرات میانگین پوشش بتنی هم مانند ضریب انتشار کلرید، محسوس است و مطابق انتظار با بیشتر کردن پوشش، مقدار عمر مفید افزایش و احتمال وقوع کاهش می‌یابد. طبیعتاً بیشترین عمر مفید با پوشش ۸۵ میلی‌متر به‌دست می‌آید.سایر مقادیر(غیر از میانگین پوشش بتنی) در نظر گرفته‌شده برای رسم این نمودارها در جدول ۱۲ارائه شده است.

جدول ۱۲- پارامترهای محاسبه عمرمفید سازه در شکل ۹

پارامتر	Cth	Cs	D	d	Δx
μ	۰,۴	۳,۴	۱۲,۹۱	متغیر	۱۰
σ	۰,۲۵	۰,۷۵	۰,۲	۰,۲	۰,۳۵



شکل ۹- اثر تغییرات میانگین پوشش بتنی بر احتمال وقوع خوردگی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

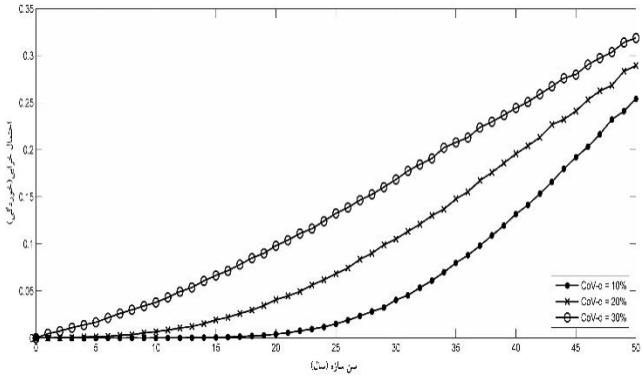
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.11.8]

مطابق شکل ۹، سازه موردبررسی با میانگین ۷۵ میلی‌متر پوشش بتنی در سال ۲۹ به‌احتمال ۱۰٪ می‌رسد، ضمن اینکه برای همین سازه اما با پوشش بتنی ۸۵ میلی‌متر در حدود ۴۱ سال به احتمال وقوع خوردگی ۱۰٪ خواهدرسید که نشان از تأثیر زیاد پوشش بتنی بر عمر مفید سازه دارد. از روی شکل ۹ پیداست که در ۱۰ سال اول تغییر پوشش بتنی تأثیر چندانی بر احتمال خوردگی ندارد، اما با افزایش سن سازه، مشخص است که در احتمال وقوع خوردگی ۱۰٪، با ۱۵ میلی‌متر کاهش و افزایش مقدار پوشش بتنی، عمر مفید سازه حدود ۱۰ سال کاهش و افزایش می‌یابد.

نمودار احتمال خوردگی عمر سازه برای میانگین پوشش بتنی ۷۵ میلی‌متر و سه ضریب تغییرات ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ درصد محاسبه و نتایج در شکل ۱۰ نشان داده شد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود کاهش ضریب تغییرات منجر به افزایش عمر مفید سازه خواهد شد و همین‌طور افزایش آن سبب کاهش عمر مفید می‌شود. مقادیـر زیر برای رسم این نمودارها در نظر گرفته‌شده‌اند.

جدول ۱۳- پارامترهای محاسبه عمرمفید سازه در شکل ۱۰

پارامتر	Cth	Cs	D	d	Δx
μ	۰,۴	۳,۴	۱۲,۹۱	۷۵	۱۰
σ	۰,۲۵	۰,۷۵	۰,۲	متغیر	۰,۳۵



شکل ۱۰- اثر تغییرات انحراف استاندارد پوشش بتنی بر احتمال وقوع خوردگی در میانگین ۷۵ میلی‌متر

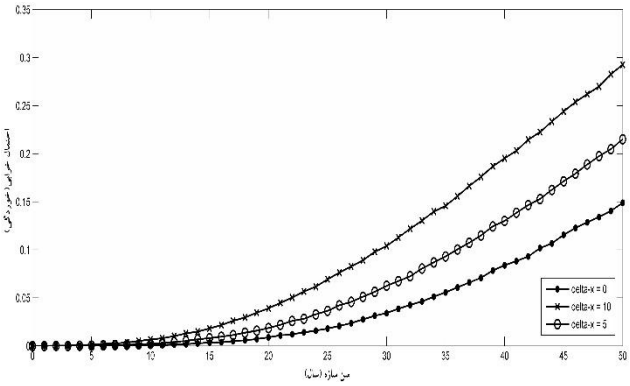
این نمودار نشان‌دهنده آن است که در نظر گرفتن صحیح پراکندگی و تغییرات پوشش بتنی بسیار مهم هست و در مقایسه با پارامترهای دیگر باید حساسیت بیشتری روی انتخاب انحراف استاندارد برای پوشش بتنی داشت و اجرای سازه با دقت بیشتری صورت پذیرد.

۵-۵- تغییرات میانگین و انحراف استاندارد عمق ناحیه همرفتی (ΔX)

در این قسمت به تأثیر به‌خصوص شرایط جزر و مدی بر عمر مفید سازه پرداخته شده است. همان‌طور که از معادله ۳ پیداست می‌توان به کاهش عمر مفید سازه در شرایط جزر و مدی پی برد. در این بخش این تأثیر با داشتن سه مقدار میانگین عمق همرفتی ۰ و ۵ و ۱۰ میلی‌متر بررسی شد. عمق همرفتی صفر یعنی همان حالت مغروق یا اتمسفری که در این حالت بیشترین عمر مفید به‌دست‌آمده است. مطابق شکل ۱۱ با در نظر گرفتن احتمال خوردگی ۱۰٪، در حالت $\Delta X = 0$ عمر مفید سازه چیـزی در حدود ۴۳ سال هست اما در سازه‌ای که در شرایط جزر و مدی است و ΔX دیگر صفر نیست، به‌وضوح پیداست عمر مفید بسته به عمق ناحیه همرفتی، کاهش می‌یابد. در عمق همرفتی ۵ میلی‌متر عمر سازه حدوداً ۷ سال و در عمق همرفتی ۱۰ میلی‌متری عمر سازه حدوداً ۱۵ سال کاهش دارد. برای رسم این نمودارها از مقادیر ارائه شده در جدول ۱۴ استفاده شده است.

جدول ۱۴- پارامترهای محاسبه عمرمفید سازه در شکل ۱۱

پارامتر	Cth	Cs	D	d	Δx
μ	۰,۴	۳,۴	۱۲,۹۱	۷۵	متغیر
σ	۰,۲۵	۰,۷۵	۰,۲	۰,۲	۰,۳۵



شکل ۱۱- اثر تغییرات میانگین عمق ناحیه همرفتی بر احتمال وقوع خوردگی

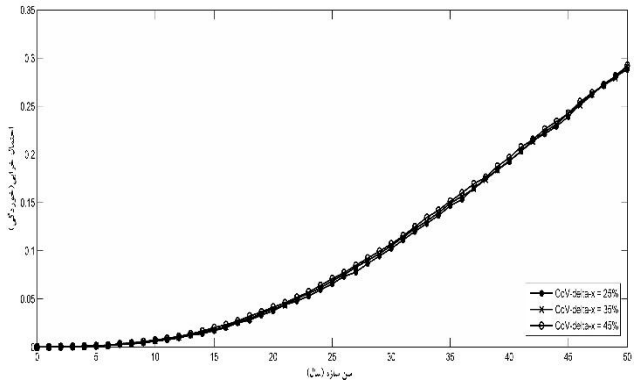
تغییرات در انحراف استاندارد عمق ناحیه همرفتی هم به‌مانند سه پارامتر کلرید آستانه، غلظت کلرید سطحی و ضریب انتشار ناچیز بوده و می‌توان گفت تنها پارامتری که تغییرات انحراف استاندارد آن مهم هست، پوشش بتنی است. مقادیر در نظر گرفته‌شده برای رسم نمودارها به‌صورت زیر هست.

جدول ۱۵- پارامترهای محاسبه عمرمفید سازه در شکل ۱۲

پارامتر	Cth	Cs	D	d	Δx
μ	۰,۴	۳,۴	۱۲,۹۱	۷۵	۱۰
σ	۰,۲۵	۰,۷۵	۰,۲	۰,۲	متغیر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.11.8]



شکل (۱۲) اثر تغییرات انحراف استاندارد عمق ناحیه همرفتی بر احتمال وقوع خوردگی

نتایج حکایت از تأثیر بیشتر تغییرات میانگین ضریب انتشار و همچنین مقدار پوشش بتنی دارد. ضمن اینکه قرار گرفتن سازه در شرایط جزر و مدی خود عاملی مخرب و زودتر به زوال بردن سازه است. با این حساب می‌توان به‌جای افزایش بیشتر از مقدار مجاز پوشش بتنی، ضریب انتشار را با روش‌هایی که موجود هست ازجمله کاهش نسبت آب به سیمان و یا استفاده از افزودنی‌های معدنی، کاهش داد و به بهینه‌ترین حالت مطلوب از نقطه‌نظر مقدار پوشش و ضریب انتشار رسید.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش مونت‌کارلو، تأثیر تغییرات میانگین و انحراف استاندارد ضرایب و به‌طور خاص تأثیر عمق ناحیه همرفتی در حالت جزر و مدیموردبررسی و مقایسه قرار گرفتند. با توجه به اینکه توزیع تمام پارامترها نرمال فرض شده است، اضافه شدن عمق همرفتی به فرمول نفوذ کلرید را می‌توان به این صورت پنداشت که از مقدار پوشش بتنی کمتری در حالت مغروق یا اتمسفری استفاده کرده باشیم. در تمام تحلیل‌ها معیار شروع خوردگی، احتمال وقوع ۱۰٪ درنظر گرفته شد و نتایج زیر بدست آمد.

●تغییرات مقادیر میانگینِکلرید آستانه و کلرید سطحی تأثیر کمتری بر احتمال وقوع خوردگی نسبت به تغییرات میانگینپوشش بتنی، ضریب انتشار و عمق همرفتی دارد.

● نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌هاحکایت از تأثیر بیشتر تغییرات میانگین عمق همرفت، ضریب انتشار و به‌خصوص مقدار پوشش بتنی دارد. به‌طور نمونهبرای سازه موردبررسی با میانگین ۷۵ میلی‌متر پوشش بتنی عمر مفید طراحی سال ۲۹ می‌باشد، اما برای همین سازه با پوشش بتنی ۸۵ میلی‌متر در حدود ۴۱ سال می‌باشد.

●از نمودارها و نتـایج انحراف استـاندارد پارامتـرها می‌توان به این نکته دست‌یافت که پارامتر پوشش بتنی نسبت به بقیه پارامترها احتمالاتی‌تر بوده و حساسیت و تغییرات احتمال وقوع خوردگی سازه نسبت به پراکندگی این پارامتر بسیار زیاد است. تغییرات انحراف استاندارد سایر پارامترها غیر از پوشش بتنی تغییر محسوسی بر عمر مفید و احتمال وقوع ندارد و اثر تغییرات این پارامترها کمتر و غیر احتمالاتی هستند.

●نتایج تحلیل هانشان‌دهنده تأثیر بسیار زیاد شرایط جزر و مدی بر عمر مفید سازه می‌باشد. در حالت ΔX =۱۰ عمر مفید سازه موردبررسی چیـزی در حدود ۲۹ سـال هست و در عمق همرفتی صفر میلی‌متری عمر سازه حدوداً ۱۵ سال افزایش دارد و در حـدود ۴۴ سال عمر می‌کند.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب تشکر و قدرانی خود را از معاونت پژوهش دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهـران شـرق جهـت حمایـت مـالی از ایـن تحقیـق اعـلام می‌نمایند.

۷- مراجع

1- Shayanfar, M.A, Ghanooni-Bagha, M., (2010), *A Study for Corrosion Effects of Reinforcements on Capacity of Bridge Piers via Nonlinear Finite Element Method*, Sharif Journal of Science & Technology Engineering, 28(3), p.59-68. (In Persian)

2- Ghanooni-Bagha, M., (2010), *Estimation of capacity reduction of members in RC structures frame affected by corroded reinforcements*, Jurnal of Marin Engineering, Thesis of Doctoral philosophy. (In Persian)

3- Ghanooni-Bagha, M., Shayanfar, M.A., Shirzadi-Javid, A.A., Ziaadiny, H., (2016), *Corrosion-induced reduction in compressive strength of self-compacting concretes containing mineral admixtures*, Construction and Building Materials, 113, p.221–228.

4- Broomfield, J.P., (2006), *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair*, CRC Press, 2nd edition published in the Taylor & Francis e-Library.

5- Sarja, A. and Vesikari, E., (2006), *Durability Design of concrete structures*, Report of RIREM Technical committee 130-CSL.

6- Duracrete: (2000), *Final Technical Report, Probabilistic performance based durability design of concrete structures*, The European Union- Brite EuRam III.

7- Ghods, P., Alizadeh, R., Chini, M., Hoseini, M., Ghalibafian, M. & Shekarchi, M., (2007), *Durability-based design in the Persian Gulf*, Concrete International", 29(12), p.50–55.

8- Coasta, A., Appleton, J., (1999), *Chloride penetration into concrete in marine environment*, Materials and Structures Journal, Vol. 32, p.252-259.

9- Ramezanianpour, A.A., Parhizgar, T., Pourkhorshidi, A. and Raeesghasemi, A.M. (2006),

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.11.8]

Assessment of Concrete Durability With Different Cement and Pozzolans in Persian Gulf Environment, Technical Report", NO. K434, Building and Housing Research Center, Iran.

10- de Rincón, O.T., Sánchez, M., Millano, V., Fernández, R., de Partidas, E.A., Andrade, C., Martínez, I., Castellote, M., Barboza, M., Irassar, F. and Montenegro, J.C., (2007), *Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries*, Corrosion Science, 49(7), p.2832-2843.

11- Ganjian. H., Sadaghi, P., (2009), *The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag*, Construction and Building Materials, 23(2), p.644-652.

12- Shayanfar, M.A., Barkhordari, M.A., Ghanooni-Bagha, M., (2015), *Probability calculation of rebars corrosion in reinforced concrete using CSS algorithms*, Journal of Central South University. 22(8), p.3141-3150.

13- Shayanfar, M.A., Barkhordari, M.A. & Ghanooni-Bagha, M., (2015), *Estimation of Corrosion Occurrence in RC Structure Using Reliability Based PSO Optimization*. Periodica Polytechnica. Civil Engineering, 59(4), p.531-543.

14- Shekarchi, M., Ghods, P., Alizadeh, R., Chini, M., Hoseini, M., (2008), *DuraPGulf, a Local Service Life Model for the Durability of Concrete Structures in the South of Iran*, Arabian Journal for Science and Engineering. 33(1):77-88.

15- Tutti, K., (1982), *Corrosion of steel in concrete*.

16- Maage, M., Helland, S., Poulsen, E., Vennesland, Ø. and Carlsen, J.E., (1996), *Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment*. ACI Materials Journal, 93(6), p.602-608.

17- Shekarchi, M., Dousti, A., Moradi-Marani, F., (2008), *Effect of chloride ion Bindings on reducing corrosion risk of in reinforced concrete structures in marine environments*, 4th international congress on civil Engineering.

18- Bentz, E.C., (2003), *Probabilistic modeling of service life for structures subjected to chlorides*, ACI Materials Journal, 100 (5), p.391–397.

19- Moradi-Marani, F., Shekarchi, M., Dousti, A, Mobasher, B., (2009), *Investigation of corrosion damage and repair system in a concrete jetty structure*, Journal of Performance of Constructed Facilities, 24(4), p.294-301.

20- Enright, M.P. and Frangopol, D.M., (1998), *Probabilistic analysis of resistance degradation of reinforced concrete bridge beams under corrosion*, Engineering structures, 20(11), p.960-971.

21- du Beton, F.I., (2006), *Model code for service life design*, Bulletin 34.

22- Standard, B.B., (1985), *Structural use of concrete: Code of practice for design and construction: BS8110, Part 1*. British Standards Institution.

23- Ramezanianpour, A.A., Jahangiri, E., Moodi, F., Ahmadi, B., (2014), *Assessment of the service life design model proposed by fib for the Persian-Gulf region*, Journal of Oceanography, Vol 5, Number 17, p.101-112.

24- Bertolini, L., Elsener, B., Pedeferri, P., Redaelli, E., Polder, R.B., (2013), Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair, John Wiley & Sons.

25- Iran National Building Code, (2014), *Design and Construction of Concrete Structures, No. 9*, Housing and Municipal Engineering Ministry.

26- Shayanfar, M.A., Ghanooni-Bagha, M., Jahani, E, (2016), *Reliability theory of structures*, IUST Publication, Tehran, Iran.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.24.11.8]