ارائه یک مدل احتمالاتی برای توزیع خوردگی یکنواخت در سکوهای ثابت فلزی در خلیج فارس

بهروز عسگریان[۱]، حسین غلامی [۲*]، سعید اصیل قره باغی[۳]

[۱] استاد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ Asgarian@kntu.ac.ir
[۲] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ HGholami@mail.kntu.ac.ir
[۳] استادیار، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ Asil@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۷

کلمات کلیدی:
خوردگی یکنواخت
سکوهای فولادی فراساحل
مدل احتمالاتی
قابلیت اعتماد سازه‌ای
شبیه‌سازی مونت کارلو

چکیده

جهت ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌ای و یا تحلیل ریسک سازه‌های فولادی فراساحل موجود، ضروری است که یک مدل احتمالاتی با پارامترهای آماری مشخص بر حسب تابعی از زمان برای پیش‌بینی عمق خوردگی درازمدت ارائه گردد. هدف از این مطالعه، ارائه یک مدل احتمالاتی برای خوردگی یکنواخت فولاد سازه‌ای در سکوهای فراساحل موجود در خلیج‌فارس می‌باشد. بدین‌منظور، اندازه‌گیری‌های میدانی عمق خوردگی برای اعضای مستغرق جمع‌آوری گردیده و مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار می‌گیرد تا یک تابع توزیع چگالی احتمال برای تعیین پراکندگی و تغییرات مقادیر عمق خوردگی در طول زمان معرفی گردد. برای پیش‌بینی عمق خوردگی، دو مدل احتمالاتی با رویکرد متفاوت و با پارامترهای وابسته به زمان پیشنهاد می‌گردد. به منظور انجام مطالعه تطبیقی، کاربرد مدل‌های ارائه شده بر روی تحلیل قابلیت اعتماد یک ورق فولادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج تحلیل آماری، نتایج پیش‌بینی‌های بدست‌آمده از مدل پیشنهادی تطابق خوبی با داده‌های میدانی دارد.

A Probabilistic Model for Uniform Corrosion in Offshore Steel Structures in Persian Gulf

Behrouz Asgarian[1], Hossein Gholami[2*], Saeed Asil Gharebaghi[3]

[1] Professor, Civil and Environmental Faculty, Khaje Nasir Toosi University; Asgarian@kntu.ac.ir
[2] PhD Student, Civil and Environmental Faculty, Khaje Nasir Toosi University; hgholami@mail.kntu.ac.ir
[3] Assistant Professor, Civil and Environmental Faculty, Khaje Nasir Toosi University; Asil@kntu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 29 Nov. 2016
Accepted: 29 Jul. 2017

Keywords:
Uniform Corrosion
Offshore Steel Structure
Probabilistic Model
Structural Reliability
Monte Carlo Simulation

ABSTRACT

For structural reliability assessment or risk analysis of aging offshore steel structures, it is essential to have a probabilistic model, which contains specific statistical parameters, and predicts long term corrosion loss as a function of time. The aim of this study is to propose such model for offshore jacket platforms in the Persian Gulf. Field measurements for material loss due to uniform corrosion for submerged members in seawater have been collected and statistically analyzed to identify the probability density distribution function for dispersion and variation of corrosion loss value according to the passage of time. To predict the corrosion loss, two probabilistic models with different approaches and time dependent parameters are suggested, based on the statistical analysis results. For a comparative study, the application of aforementioned models on the reliability analysis of a simple plate structure is investigated. Prediction results, obtained from the proposed probabilistic models, are consistent well with filed measurements.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.5.3]

۱ - مقدمه

توصیف پدیده خوردگی تحت شرایط محیط خورنده دریا و نحوه تغییرات آن در طول زمان برای تخمین میزان زوال فولاد و متعاقب آن کاهش مقاومت سازه‌هایی که در معرض آب دریا هستند، می‌تواند حائز اهمیت باشد. زوال ناشی از خوردگی می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر طول عمر اجزای سازه‌ای در محیط آب دریا داشته باشد. در حالیکه در اغلب موارد پوشش محافظ و حفاظت کاتدی بکار گرفته می‌شود، اما بدلایل مختلف این حفاظت‌ها بطور کامل موثر نیستند[۱].خوردگی می‌تواند عامل بروز خسارتهای اقتصادی عظیمی باشد. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، تا حدود ۱۱٪ از کل موجودی آهن هر ساله بدلیل خوردگی از بین می‌رود(حدود ۳۰٪ تولید سالیانه). سازمان جهانی خوردگی هزینه سالانه خوردگی در سراسر جهان را در حدود ۲/۴ تریلیون دلار تخمین می‌زند(حدود ۳٪ مجموع تولید ناخالص داخلی در کل دنیا)[۲].در ایالات متحده میزان خسارت سالیانه حدود ۶٪ تولید داخلی می‌باشد. هزینه اقتصادی برای همه اشکال خوردگی در ایالات متحده حدود ۴٪ تولید ناخالص ملی برآورد شده است[۳]. همچنین خوردگی می‌تواند منجر به کاهش قابلیت اعتماد سازه، افزایش هزینه تعمیرات، افزایش زمان توقف بهره‌برداری بعلت خرابی یا تعمیر سکو و افزایش عواقب ناشی از گسیختگی گردد. همچنین خوردگی می‌تواند اثرات زیان‌بار زیست محیطی را نیز ایجاد نماید. بر اساس آمار موجود، در طول ۱۰ سال اخیر مجموع ۲۳۱۳ مورد از انتشار و نشت مواد هیدروکربوری از تاسیسات فراساحل گزارش شده است. شایع‌ترین علت این حوادث، گسیختگی مکانیکی بعلت خوردگی و عوامل مخرب مرتبط با آن بوده است[۴].

تاکنون تلاشهای فراوانی برای توسعه مدل‌های خوردگی- زمان برای اعضای موجود در آب دریا صورت گرفته است. عمده این تحقیقات به دودسته کلی تقسیم می‌گردد:

۱- مدلهای کاملا تجربی

۲- مدل‌های مطابق با نظریه‌های خوردگی.

مدلهای کاملا تجربی از برازش منحنی بر داده‌های درازمدت خوردگی و تعیین پارامترهای آن بدست می‌آید. این مدل‌ها برای موقعیت‌هایی با شرایط مشابه قابل استفاده هستند.

شناخته‌شده ترین مدل از نوع دوم، مدل پیشنهادی توسط ساوت‌ول و همکاران[۵] می‌باشد. مدل پیشنهاد شده برای آبهای گرمسیری و برای مدلسازی درازمدت خوردگی در شرایط بی‌هوازی که نسبتا سریع رخ می‌دهد ارائه شده است. رینهارت و همکاران[۶] مدلی را برای نرخ خوردگی با درنظرگیری اثرات پارامترهای دما و اکسیژن موجود در آب در یک ترکیب خطی پیشنهاد نمودند که برای داده‌های خوردگی در مدت زمان یک سال واسنجی شده‌اند و به‌نظر می‌رسد مدل پیشنهادی در خارج از محدوده زمانی تعریف شده معتبر نمی‌باشد. ایوانس[۷] و توماشو[۸] یک مدل نظری را ارائه کردند که در آن فرآیند خوردگی با انتقال یون از میان لایه زنگ کنترل می‌شود. چرنف و همکاران[۹] نیز از یک مفهوم مشابه استفاده کردند، بجز آنکه در مدل آنها انتقال خوردگی به سطح خورده شده با محدودیت‌های انتشار اکسیژن کنترل می‌شود. آنها همچنین برای اصلاح مدل خود ضرایب نیمه‌تجربی را برای درنظرگیری اثرات دمای آب، سرعت و شوری پیشنهاد نمودند. ملچرز[۱۰] یک مدل چندفازی را بر اساس مکانیزم‌های شناخته شده‌ی تجربی و نظری برای فرآیند خوردگی درازمدت پیشنهاد کرد که هرکدام از فازها در زمان خودش فرآیند خوردگی را کنترل می‌نماید. در فاز اول، اکسیداسیون با نرخ رسیدن اکسیژن به سطح فلز کنترل می‌شود. با این حال لایه زنگ همچنان بسیار نازک می‌باشد. مقدار خوردگی بصورت تقریبی با استفاده از یک تابع خطی تخمین زده می‌شود. در فاز دوم، تشکیل لایه زنگ باعث کاهش تامین اکسیژن به سطح خورده شده می‌شود. در این مرحله معادلات پخش دارای پاسخ تحلیلی هستند. در فازهای سوم و چهارم خوردگی توسط فرآیند بی‌هوازی کنترل می‌شود. در این مراحل با افزایش ضخامت لایه زنگ، دسترسی به اکسیژن برای سطح خورده شده دشوارتر می‌گردد. این امر باعث می‌شود شرایط برای توسعه یک فرآیند بی‌هوازی فراهم گردد. در این مرحله باکتری‌های کاهنده سولفات[۱] در صورت تامین شرایط می‌توانند رشد نمایند. متابولیسم رشد این باکتری‌ها بسته به شرایط تامین ماده مغذی دارد. در ابتدای بخش بی‌هوازی(فاز سوم) یک دوره رشد سریع باکتری‌های کاهنده سولفات و متعاقب آن نرخ خوردگی بالا وجود خواهد داشت و در دوره بعدی(فاز چهارم) با به تعادل رسیدن و پایداری رشد SRB میزان نرخ خوردگی نیز کاهش می‌یابد. در اینجا فرض شده است که میزان خوردگی نهایتا با یک تابع خطی افزایش می‌یابد. پارامترهایی مربوط به مدل پیشنهادی که ۴ فاز فرآیند خوردگی را توصیف می‌نماید، بر اساس داده‌های موجود برای خوردگی در مناطق مختلف واسنجی شده‌اند. مقدار این پارامترها بعنوان تابعی از دمای آب بعنوان یک متغیر مهم که بر روی سایر عوامل تاثیرگذار بر خوردگی موثر می‌باشد ارائه شده است.

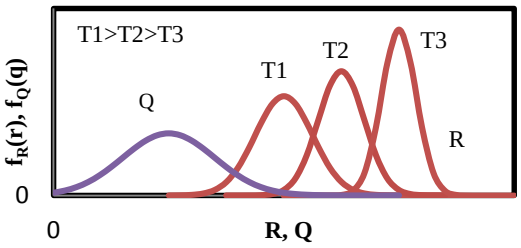
ادبیات فنی در حوزه خوردگی بسار وسیع می‌باشد. تئوری‌های خوردگی متداول که عمدتا شامل اصول کلی و واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌باشد، برای خوردگی کوتاه مدت و تحت شرایط نسبتا ایده‌آل ارائه شده است([۱۱]، [۱۲]، [۸]). این نظریه‌ها بندرت قادر خواهند بود، اطلاعات عملی مربوط به کاهش مقاومت سازه‌ای مانند میزان محتمل زوال مواد را برای سازه‌ای خاص تحت شرایط قرارگیری مشخص، فراهم نمایند. یک رویکرد عملی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.5.3]

جایگزین می‌تواند استفاده از تجربیات بدست آمده در گذشته و یا استفاده از نتایج و داده‌های تست‌های انجام شده بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی تحت شرایط مشخص باشد[۱۳]. با این حال هردو روش مذکور نمی‌تواند به صورت عمومی و در همه موقعیت‌ها مورد استفاده قرار گیرد. برای هر سازه با توجه به نوع و ترکیبات فولاد بکار رفته در آن و شرایط محیطی مشخص ساختگاه، اطلاعات محدودی برای پیش‌بینی رفتار سازه در برابر خوردگی وجود خواهد داشت.

ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌ای در طول زمان نیازمند پیش‌بینی صحیح عملکرد آتی سازه می‌باشد. با توجه به تاثیر خوردگی در مقاومت عمومی سازه، یک مدل زوال[۲] مناسب برای درک کمی صحیح از چگونگی فرآیند خوردگی و تعیین رفتار آن بعنوان تابعی از زمان و تحت تاثیر عوامل مختلف محیطی ضروری می‌باشد. برای محاسبه احتمال شکست با استفاده از نظریه‌های احتمال، تابع چگالی احتمال مقاومت سازه‌ای R(t) در لحظه t می‌تواند با $f_R(r.t)$ نشان داده شود که در آن r یک متغیر تصادفی وابسته به زمان t می‌باشد. در نتیجه میزان خوردگی بر روی مقاومت سازه‌ای اثرگذار خواهد بود. یک مدل زوال مربوط به خوردگی، مقدار خوردگی قابل انتظار بعد از گذشت زمان مشخص، به همراه عدم قطعیت مربوط به آن را بیان می‌نماید. این موضوع می‌تواند با اختصاص یک تابع چگالی احتمال برای خوردگی در طول زمان نشان داده شود. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود، با گذشت زمان، تابع چگالی احتمال حاشیه‌ای مقاومت دارای میانگین کمتر و همچنین مسطح‌تر خواهد شد[۱]. این امر نشان‌دهنده کاهش قابلیت اعتماد در طول زمان می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت افزایش میانگین خوردگی(یا کاهش میانگین مقاومت) و عدم قطعیت‌های مرتبط با آن و اثر زمان بر روی آنها خواهد بود.



شکل ۱-تابع چگالی احتمال مقاومت(R) و بار(Q) در زمان های مختلف

این مقاله تلاش دارد توصیف احتمالاتی مناسبی را برای خوردگی اعضاء فولادی سکوهای دریائی در منطقه خلیج فارس بعنوان تابعی از زمان ارائه نماید. با توجه به عوامل زیادی که بر روی خوردگی اثرگذار هستند، استفاده از یک چارچوب احتمالاتی برای مدلسازی رفتار خوردگی در طول زمان ضروری می‌باشد. این چارچوب یک توزیع احتمالاتی وابسته به زمان را ارائه می‌نماید که پارامترهای این توزیع در طول زمان تغییر خواهند کرد. با توجه به نقش خوردگی عمومی(یکنواخت) در مقاومت کلی سازه، در این مطالعه تنها به اثر خوردگی یکنواخت پرداخته خواهد شد. بعلاوه با توجه به محدودیت‌های موجود در داده‌های بدست آمده از گزارش‌های بازرسی انجام شده از سکوهای فراساحل، تنها به اعضای غوطه‌ور در آب دریا که تحت اثر حفاظت کاتدیک قرار دارند، پرداخته خواهد شد. در این راستا این تحقیق می‌کوشد یک مدل احتمالاتی پیش‌بینانه برای برآورد میزان خوردگی در طول زمان ارائه نماید. بدین منظور از داده‌های بدست آمده از گزارش‌های بازرسی صورت گرفته از ۲۰ سکوی موجود در خلیج فارس استفاده شده است.

۲-انواع خوردگی

فرم و اشکال مختلف خوردگی که در عمل رخ می‌دهد می‌تواند بسیار متفاوت باشد. در جدول ۱ انواع خوردگی و مشخصات آنها بیان شده است. خوردگی که تحت عنوان خوردگی عمومی(یکنواخت)[۳] شناخته می‌شود، از بین رفتن مواد در یک ناحیه گسترده از ورق یا بخشی از آهن می‌باشد. مقدار این نوع خوردگی معمولا بصورت میانگین عمق نفوذ خوردگی از یک طرف ورق بیان می‌گردد. خوردگی عمومی در ورق‌ها و اعضای سازه‌ای منجر به کاهش کلی مقاومت سازه‌ای می‌گردد. خوردگی حفره‌ای برای سازه‌های نگهداری از جمله مخازن تحت فشار بسیار مهم بوده و به میزان کمتر برای ناوگان حمل و نقل دریایی و سکوهای فراساحل حائز اهمیت است. خوردگی شیاری عمدتا به فولاد ضدزنگ مورد استفاده در اجزای اتصالات از جمله پیچ و مهره مربوط می‌شود. خوردگی گالوانیک ناشی از تفاوت در خواص مواد در ناحیه تحت حرارت جوش می‌باشد و می‌تواند برای ملاحظات مقاومتی اتصالات و مقاومت کلی آنها مهم باشد. تحقیقات نشان داده است که مشخصات مواد از جمله مدول الاستیسیته و تنش تسلیم بدلیل خوردگی عضو تحت تاثیر قرار نمی‌گیرند[۱۴].خوردگی عمومی(یکنواخت) مهمترین شکل خوردگی برای فولاد آلیاژی کم و متوسط[۴] می باشد[۱۵]. این نوع فولاد متداولترین نوع فولاد برای مصارف صنعتی در سازه‌هایی همچون سکوهای فراساحل، اسکله و پایانه‌های نفتی و سازه‌های نزدیک به ساحل می‌باشد. سایر اشکال خوردگی از جمله خوردگی حفره‌ای و یا خوردگی موضعی می‌تواند در فولادهای پرمقاومت دارای اهمیت باشد. خوردگی در محیط دریا می‌تواند در شرایط مختلف محیطی از جمله در هوای آزاد، ناحیه تحت تاثیر شرایط جزر و مدی و ناحیه مستغرق ایجاد شود. واضح است که در این شرایط طیف گسترده‌ای از رویدادهای خوردگی قابل مشاهده خواهد بود، به ویژه آنکه با اثرات پوشش محافظ(رنگ) و یا حفاظت کاتدی نیز درهم تنیده شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.5.3]

جدول ۱- انواع خوردگی و مشخصات آنها[۱]

نوع خوردگی	ویژگی‌ها و مشخصات	نواحی متاثر	اثرات
عمومی (یکنواخت)	تقریبا یکنواخت در طول یک ناحیه وسیع	ورق ها	کاهش ضخامت ورق کاهش ظرفیت سازه
حفره‌ای	نفوذ حفره‌ای موضعی شدید	ورق‌ها، جزئیات موضعی	کاهش موضعی ضخامت و تشدید تنش احتمال نشت
شیاری	نفوذ طولی موضعی شدید	اتصالات، زیر واشرها و غیره	تشدید تنش موضعی خرابی موضعی
گالواتیک	موضعی	تماس فلزات مختلف با یکدیگر تفاوت در ترکیبات فلز ناحیه تحت اثر حرارت در جوش ها	از بین رفتن شدید مواد بصورت موضعی

فرآیند خوردگی فولاد در محیط دریا بدلیل طبیعت پیچیده این پدیده بسیار متنوع بوده و عوامل دارای عدم قطعیت فراوانی بر روی آن اثرگذار هستند. این امر تعیین دقیق مقدار خوردگی در طول زمان را غیرممکن می‌سازد. از جمله این موارد می‌توان به در دسترس بودن اکسیژن، شوری آب دریا، میزان کربنات، PH آب، دمای آب، سرعت ذرات آب، روئیدنی‌های دریایی و باکتری‌ها، وضعیت سطح فولادی، ترکیب آلیاژ فولادی و همچنین آلاینده‌های موجود در آب دریا اشاره کرد.

۳-جمع‌آوری اطلاعات خوردگی

همان‌طور که اشاره گردید، برای ارائه مدل خوردگی یکنواخت از داده‌های بدست آمده از اندازه‌گیری ضخامت دیواره اعضای لوله‌ای مستغرق در آب دریا و مقایسه آنها با ضخامت اولیه اعضا حین ساخت استفاده شده است. جزئیات اندازه‌گیری خوردگی برای هر سکو در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول منظور از عمر سکو، مدت زمان سپری شده از لحظه نصب سکو تا انجام بازرسی می‌باشد. همچنین برای هر سکو تعداد اندازه‌گیری‌های انجام شده در المان های مختلف سکو، عمق آب محل نصب سکو، جنس مواد و همچنین میانگین و انحراف معیار مقادیر خوردگی حاصل از اندازه‌گیری ارائه شده است. کلیه اندازه‌گیری‌ها در مکان‌های مختلف زیرآب با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری التراسونیک انجام شده است. مطابق با آنچه در گزارش‌های بازرسی اشاره شده است، کلیه دستگاه‌ها قبل و بعد از اندازه‌گیری با استفاده از قطعات با ابعاد مشخص واسنجی شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌گردد، اطلاعات مورد استفاده در این مطالعه، از اندازه‌گیری ضخامت دیواره و محاسبه خوردگی برای ۲۰ سکو و مجموع ۱۵۵۹ نقطه اندازه‌گیری جمع‌آوری شده است. میزان خوردگی اندازه‌گیری شده(کاهش ضخامت دیواره) در بازه‌های مشخص باتوجه به عمر سکو در جدول ۳ خلاصه شده است.

۴-مدل احتمالاتی مقدار میانگین

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که روند تغییرات خوردگی در همه زمان‌ها بصورت خطی تغییر نمی‌نماید، اما پس از گذشت سالهای آغازین می‌توان رفتار خوردگی را بصورت خطی مدلسازی نمود[۱]. در این مطالعه با توجه به بررسی رفتار سکوهای ثابت فلزی در دریا که حداقل ۳۵ سال از عمر آنها گذشته است، رفتار خوردگی بصورت خطی فرض می‌گردد. مدل عمومی ارائه شده برای میانگین مقدار خوردگی در طول زمان در شکل ۲ ارائه شده است. این مدل بر اساس محاسبه میانگین خوردگی در ۲۰ سکو که بر پایه میانگین‌گیری مقادیر خوردگی در ترازهای مختلف هر سکو بدست آمده است، استخراج شده است.

جدول ۲- مشخصات سکوها و اندازه‌گیری های صورت گرفته

سکوی هدف	عمر سکو(سال)	عمق آب محل نصب(متر)	تعداد نقاط	جنس فولاد	میانگین خوردگی	انحراف معیار
P۱	۳۷	۴۸/۵۰	۱۷۵	API 5L-Gr. B	۲/۶۰۶۳	۰/۶۶۴۸
P۲	۳۷	۴۸/۸۰	۸۹	API 5L-Gr. B	۲/۵۷۱۲	۰/۵۲۱۳
P۳	۳۶	۴۷/۹۰	۱۰۲	API 5L-Gr. B	۲/۴۳۱۲	۰/۳۲۸۱
P۴	۳۹	۴۹/۴۰	۷۳	API 5L-Gr. B	۲/۷۹۳۶	۰/۲۵۶۴
P۵	۳۶	۴۸/۸۰	۶۶	API 5L-Gr. B	۲/۳۵۷۰	۰/۷۲۱۴
P۶	۳۶	۴۸/۸۰	۹۲	API 5L-Gr. B	۲/۳۵۹۴	۰/۵۰۹۱
P۷	۳۹	۴۶/۷۰	۸۷	API 5L-Gr. B	۲/۸۳۳۷	۰/۷۵۶۵
P۸	۳۸	۴۷/۶۰	۱۷۴	API 5L-Gr. B	۲/۷۰۵۸	۰/۷۴۴۸
P۹	۳۷	۴۶/۷۰	۶۴	API 5L-Gr. B	۲/۶۰۳۵	۰/۴۱۷۵
P۱۰	۳۶	۴۹/۱۰	۶۰	API 5L-Gr. B	۲/۴۵۶۰	۰/۳۲۶۳
P۱۱	۳۹	۴۵/۴۰	۶۱	API 5L-Gr. B	۲/۸۵۲۰	۰/۳۹۶۷
P۱۲	۳۹	۴۳/۶۰	۶۹	API 5L-Gr. B	۲/۸۰۵۵	۰/۵۱۰۹
P۱۳	۳۶	۴۶/۳۰	۶۹	API 5L-Gr. B	۲/۴۴۵۹	۰/۲۵۸۷
P۱۴	۳۵	۴۵/۷۰	۳۲	API 5L-Gr. B	۲/۲۲۵۱	۰/۲۸۱۴
P۱۵	۳۵	۴۳/۹۰	۹۴	API 5L-Gr. B	۲/۳۷۹۴	۰/۶۳۹۱
P۱۶	۳۸	۴۸/۲۰	۹۵	API 5L-Gr. B	۲/۷۶۸۱	۰/۶۳۱۹
P۱۷	۳۸	۴۹/۱۰	۴۴	API 5L-Gr. B	۲/۶۵۹۴	۰/۳۴۱۸
P۱۸	۳۷	۴۵/۱۰	۳۷	API 5L-Gr. B	۲/۵۶۰۰	۰/۲۱۲۵
P۱۹	۳۸	۴۵/۱۰	۳۳	API 5L-Gr. B	۲/۶۰۲۷	۰/۱۲۳۷
P۲۰	۳۸	۴۲/۷۰	۴۳	API 5L-Gr. B	۲/۶۴۱۳	۰/۱۰۰۶

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.5.3]

جدول ۳- مقادیر مختلف خوردگی در زمان های مختلف

عمق خوردگی (mm)	عمر (سال)				
	۳۵	۳۶	۳۷	۳۸	۳۹
۰/۸-۱/۰	۱	۰	۰	۰	۰
۱/۰-۱/۲	۰	۲	۲	۵	۰
۱/۲-۱/۴	۴	۲	۲	۲	۰
۱/۴-۱/۶	۲	۶	۵	۲	۲
۱/۶-۱/۸	۸	۱۴	۶	۶	۴
۱/۸-۲/۰	۱۰	۳۰	۱۹	۱۶	۷
۲/۰-۲/۲	۲۶	۴۴	۳۹	۲۵	۱۱
۲/۲-۲/۴	۲۶	۷۲	۴۴	۲۵	۱۸
۲/۴-۲/۶	۱۷	۱۰۸	۶۳	۶۹	۳۵
۲/۶-۲/۸	۱۰	۶۶	۸۸	۱۱۲	۷۰
۲/۸-۳/۰	۱۰	۱۹	۲۸	۲۹	۵۶
۳/۰-۳/۲	۳	۸	۲۰	۳۳	۲۸
۳/۲-۳/۴	۴	۵	۱۸	۳۰	۲۲
۳/۴-۳/۶	۱	۱	۶	۱۲	۱۰
۳/۶-۳/۸	۰	۴	۱۱	۹	۷
۳/۸-۴/۰	۱	۴	۶	۲	۱۰
۴/۰-۴/۲	۰	۱	۱	۲	۴
۴/۲-۴/۴	۱	۱	۲	۲	۲
۴/۴-۴/۶	۲	۱	۵	۲	۳
۴/۶-۴/۸	۰	۱	۰	۲	۱
۴/۸-۵/۰	۰	۰	۰	۲	۰
۵/۰-۵/۲	۰	۰	۰	۱	۰
۵/۲-۵/۴	۰	۰	۰	۰	۰
۵/۴-۵/۶	۰	۰	۰	۰	۰
۵/۶-۵/۸	۰	۰	۰	۱	۰
۵/۸-۶/۰	۰	۰	۰	۰	۰

در این محاسبات تنها از داده‌های بدست آمده در ناحیه مستغرق استفاده شده است و داده‌های مورد استفاده، شامل ناحیه‌ی پاشش[5] و همچنین اعضایی که در تماس با خاک بستر دریا هستند، نمی‌شود. با توجه به اتمام عمر طراحی این سازه‌ها محتمل است که سیستم حفاظت کاتدیک بطور کامل اثرگذاری خود را از دست داده باشد. با توجه به نبود داده‌های قابل استناد در زمان قبل از ۳۵ سال عمر سکو، فرض می‌شود که اثر حفاظت کاتدیک بعد از اتمام عمر طراحی که برای سازه‌های مورد مطالعه ۲۵ سال درنظر گرفته می‌شود، بطور کامل از بین می‌رود. فلذا مدل پیشنهادی از سال ۲۵ به بعد عمر سکو اعتبار دارد.

در اینجا مدل احتمالاتی خوردگی ملچرز[۱۰] با اعمال تغییراتی برای پیش‌بینی عمق خوردگی با درنظرگیری اثرات عوامل دارای عدم قطعیت بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$c(t) = g(t) \times b + \epsilon(t) \qquad (۱)$$

که در آن $g(t)$ تابع مقدار میانگین، b ضریب انحراف[6] و $\epsilon(t)$ تابع عدم قطعیت با میانگین صفر می‌باشد.

با توجه به **شکل ۲** برای تعیین مقدار میانگین خوردگی یکنواخت در هرزمان، تابع مقدار میانگین به فرم زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$g(t) = 0.13t - 2.30 \quad for\ t \geq 25\ Years \qquad (۲)$$

ضریب انحراف b، اختلاف بین مقادیر میانگین بدست آمده توسط رابطه فوق و مقادیر حداقل و حداکثر بدست آمده در اندازه‌گیری‌ها را انعکاس می‌دهد. مطابق نتایج بدست آمده، مقدار این ضریب مابین ۱/۰۵ و ۰/۹۵ متغیر می‌باشد. برای درنظرگیری اثرات پراکندگی مقادیر این ضریب و در نبود داده‌های کافی برای برآورد دقیق آن، تابع توزیع احتمال بتا بفرم زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱۶].

$$f_X(x) = \frac{1}{B(q,r)} \frac{(x-a)^{q-1}(b-x)^{r-1}}{(b-a)^{q+r-1}} \qquad (۳)$$

$$B(q,r) = \int_{.}^{1} t^{q-1}(1-t)^{r-1}dt \qquad (۴)$$

که در آن $B(q,r)$ تابع بتا و پارامترهای a و b بترتیب مقادیر کمینه و بیشینه X می‌باشند. در توزیع بتا می‌توان با استفاده از تغییر پارامترها، اشکال مختلف متناسب با اهداف مهندسی را نمایش داد. در اینجا با فرض پارامترهای $r = ۳$ و $q = ۳$ و حدود تابع ۰/۹۵ و ۱/۰۵ از این توزیع استفاده می‌شود.

تابع $\epsilon(t)$ عدم‌قطعیت‌های ناشی از تفاوت در موقعیت قرارگیری سکو، تفاوت در شرایط محیطی و خطا در مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها را بیان می‌نماید. بر این اساس، تابع عدم قطعیت $\epsilon(t)$ با یک تابع توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار برابر $\sigma(t)$ تعریف می‌شود. تغییرات واریانس در طول زمان در **شکل ۳** نشان داده شده است. بر اساس روندی که در شکل دیده می‌شود، مقدار انحراف معیار می‌تواند بصورت تقریبی با رابطه زیر بیان گردد:

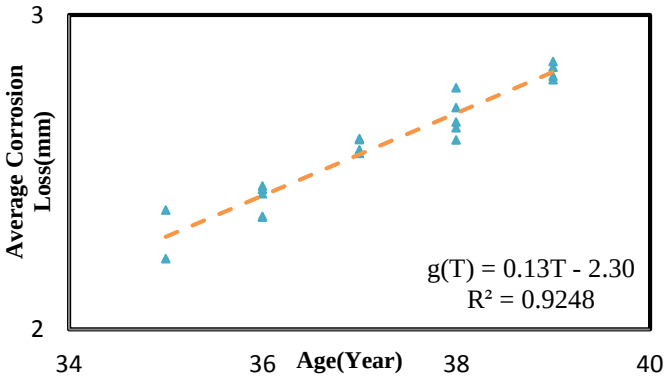
$$\sigma(t) = \sqrt{0.0197T - 0.44} \qquad (۵)$$

همان طور که اشاره گردید، انتظار می‌رود با گذشت زمان پراکندگی داده‌ها افزایش یافته و به تبع آن واریانس نیز افزایش یابد. مقدار میانگین خوردگی در طول زمان نیز دارای روند افزایشی می‌باشد. بنظر می‌رسد با توجه به یکسان نبودن تعداد اندازه‌گیری‌های ضخامت در طی سالهای مختلف و نبود رویه مشخص برای تعیین محل اندازه‌گیری‌ها، تغییرات مقادیر واریانس داده‌ها بر خلاف روند مشاهده شده در میانگین داده‌ها، دارای روند کاملا پیش‌بینی شده نمی‌باشد.

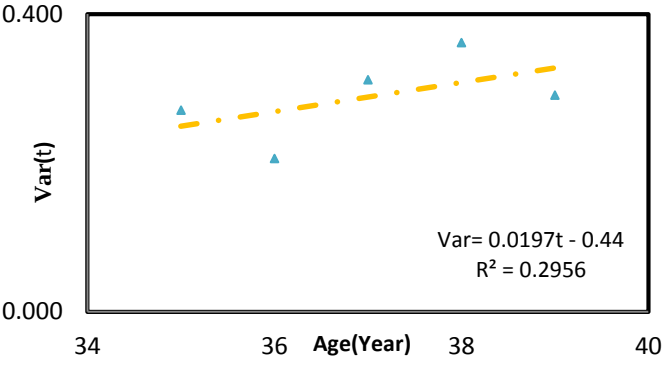
در بخش‌های بعدی کاربرد مدل احتمالاتی ارائه شده در غالب یک مثال عددی بیان خواهد شد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.5.3]



شکل ۲- تغییرات میانگین در در طول زمان در مدل مقدار میانگین

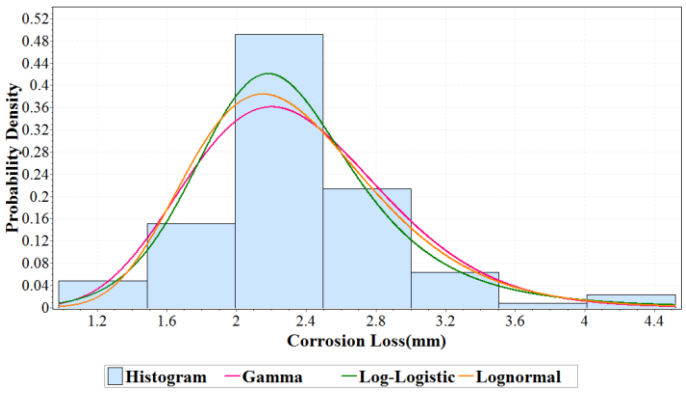


شکل ۳- تغییرات واریانس در طول زمان در مدل مقدار میانگین

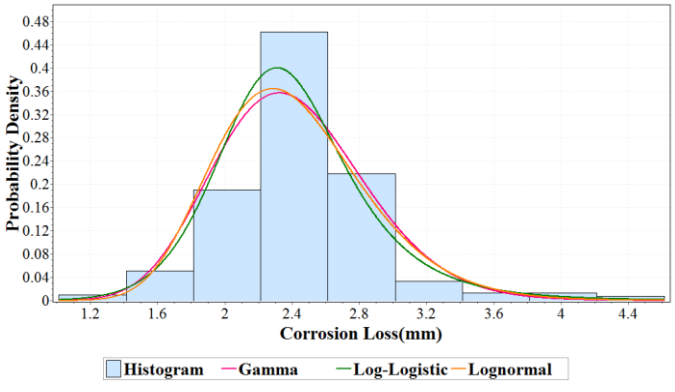
۵-مدل احتمالاتی لوگ لجستیک

در بخش قبل با اقتباس از مدل‌های خوردگی عمومی ارائه شده و اعمال برخی تغییرات بر روی آنها، یک مدل احتمالاتی برای خوردگی ارائه گردید. در این بخش یک مدل احتمالاتی جدید برای توصیف پراکندگی آسیب خوردگی در طول زمان ارائه می‌گردد.

بدین‌منظور مقادیر اندازه‌گیری شده برای خوردگی مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار می‌گیرد و برای سالهای مختلف عمر سکو نمودار پراکندگی خوردگی تعیین می‌گردد. نمودار بدست آمده با استفاده از پنج تابع توزیع احتمال غیرمنفی شامل لوگ‌نرمال، لوگ‌لجستیک، ویبول، توانی و گاما مورد برازش قرار گرفت. پارامترهای هرکدام از توابع توزیع با استفاده از روش برآورد درست‌نمایی بیشینه[۷] محاسبه شده است. در شکل ۴ توابع توزیع احتمال خوردگی برازش داده شده به همراه هیستوگرام داده‌های اندازه‌گیری شده برای خوردگی در سالهای مختلف نشان داده شده است. هرکدام از توابع در زمان‌های مختلف با استفاده از آزمون نیکویی برازش اندرسون-دارلینگ[۱۷] و آزمون کالماگورف-اسمیرانف[۱۸] مورد ارزیابی قرار گرفته است و میزان تبعیت هرکدام از توابع توزیع از داده‌های بدست آمده مشخص گردیده است. این آزمون‌ها میزان انحراف تابع توزیع تجمعی تجربی از تابع توزیع تجمعی فرض شده را اندازه‌گیری می‌نماید. هر میزان مقدار آماره بدست آمده از این آزمون ها کمتر باشد، بیانگر تطابق بیشتر توزیع فرض شده با داده‌های اندازه‌گیری دارد. در جدول ۴ مقدار آماره بدست آمده در هر دو آزمون برای هر تابع توزیع در سالهای مختلف نشان داده شده است. همچنین در شکل ۵ نتایج آزمون نیکویی برازش برای عمر ۳۵ سال و در بازه اطمینان ۹۵٪ نمایش داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که تابع توزیع لوگ‌لجستیک بهترین برازش را بر داده‌ها خواهد داشت و نمایش بهتری را برای توزیع احتمالاتی خوردگی برای سکوهای واقع در خلیج فارس دارا خواهد بود.



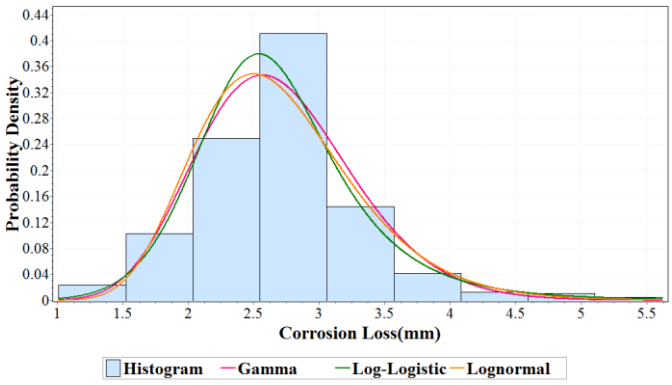
الف) ۳۵ سال



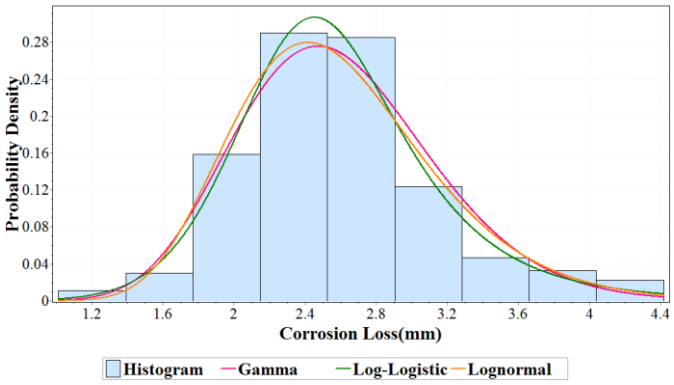
ب) ۳۶ سال

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

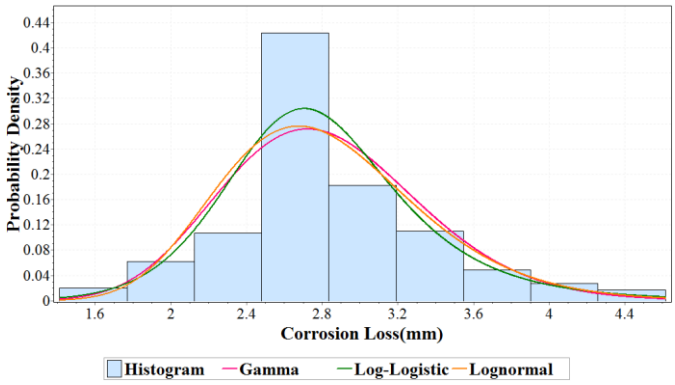
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.5.3]



د) ۳۸ سال



ج) ۳۷ سال

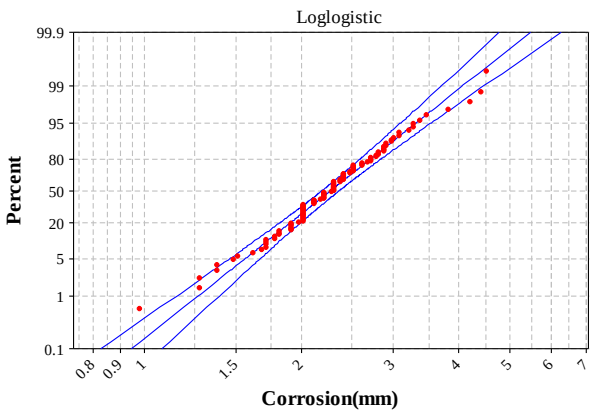


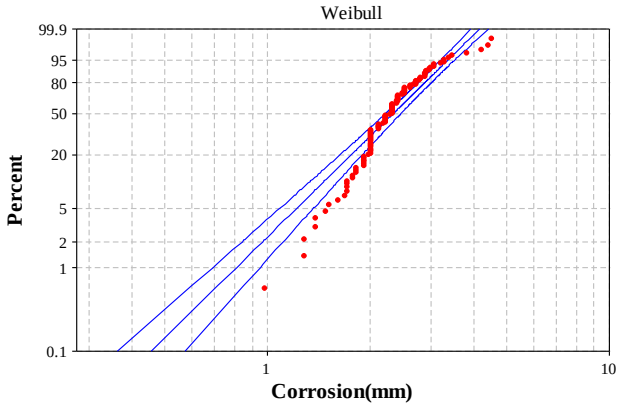
ه)۳۹ سال

شکل ۴- توابع توزیع احتمالاتی برازش داده شده و هیستوگرام داده‌های اندازه‌گیری شده در سال‌های مختلف عمر سکو

جدول ۴- نتایج آزمون نیکویی برازش برای توابع توزیع احتمال مختلف

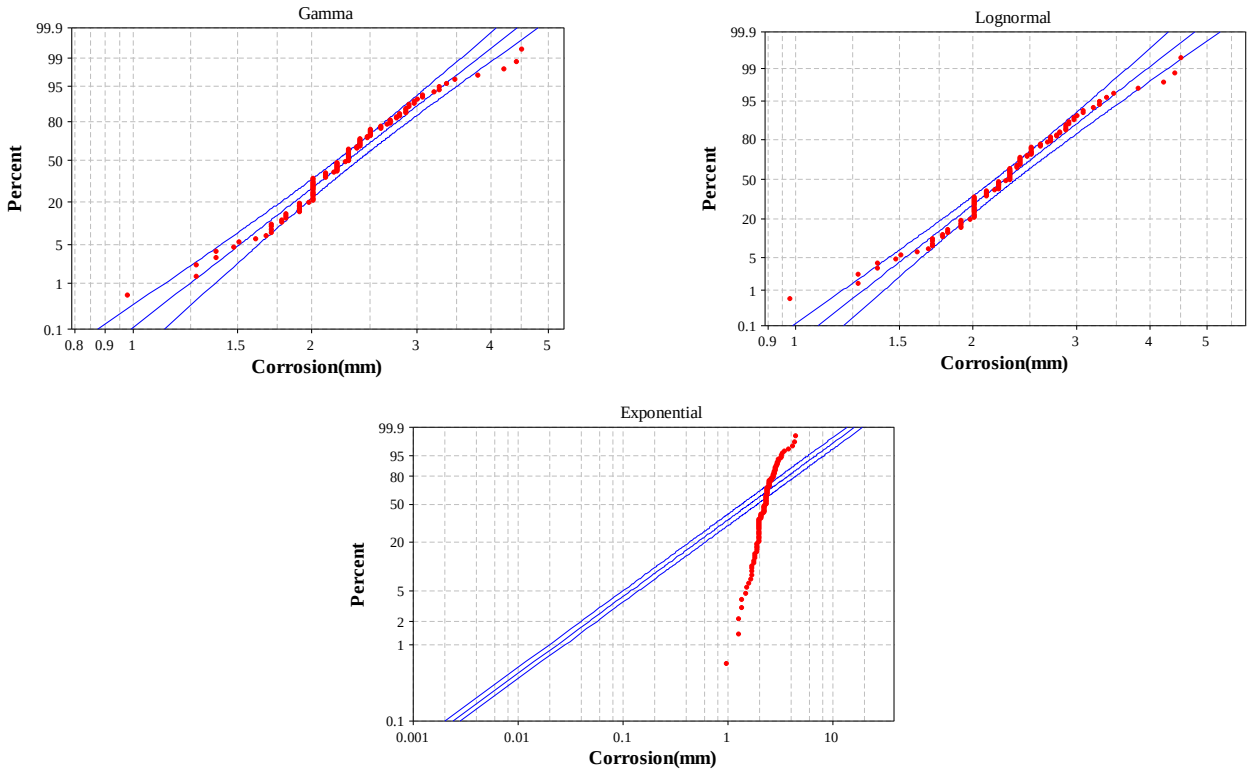
تابع توزیع	عمر بهره برداری(سال)					
	آزمون اندرسون-دارلینگ					
	۳۵	۳۶	۳۷	۳۸	۳۹	میانگین
لوگ‌لجستیک	۰/۷۱۲۳	۵/۶۵۰۱	۲/۴۲۴۸	۶/۵۹۱۹	۲/۱۱۸۹	۳/۴۹۹۹۴
گاما	۱/۴۴۳۲	۷/۱۹۴۰	۳/۶۳۴۸	۷/۵۷۵۲	۳/۲۰۳۱	۴/۶۱۰۰۶
لوگ‌نرمال	۱/۱۰۰۴	۷/۳۹۷۶	۳/۷۲۷۸	۸/۴۲۸۴	۳/۱۹۷۱	۴/۷۷۰۲۶
ویبول	۲/۹۷۰۱	۱۱/۷۷۳	۸/۲۶۵۱	۱۰/۴۴۰۱	۷/۲۰۶۶	۸/۱۳۰۹۶
توانی	۳/۳۳۸۵	۱۸/۴۴۴	۱۱/۸۹۸	۲۱/۵۴۵	۹/۹۶۹۱	۱۳/۰۳۸۹۲
	آزمون کالماگورف-اسمیرانف					
لوگ‌لجستیک	۰/۰۹۷۴۷	۰/۱۲۹۰۱	۰/۰۹۱۰۱	۰/۱۴۲۳۹	۰/۱۰۳۶۳	۰/۱۱۲۷۰۲
گاما	۰/۱۰۳۷۰	۰/۱۲۴۰۳	۰/۱۰۶۲۹	۰/۱۳۱۱۱	۰/۱۰۴۸۴	۰/۱۱۳۹۹۴
لوگ‌نرمال	۰/۱۰۴۲۱	۰/۱۳۰۰۱	۰/۱۰۲۶۵	۰/۱۴۶۲۵	۰/۱۱۱۹۸	۰/۱۱۹۰۱۸
ویبول	۰/۱۲۷۴۳	۰/۱۴۳۷۳	۰/۱۴۹۷۷	۰/۱۷۶۴۷	۰/۱۴۹۲۹	۰/۱۴۹۳۳۸
توانی	۰/۱۵۷۸۷	۰/۲۰۳۰۱	۰/۱۶۲۳۸	۰/۲۱۸۸۷	۰/۱۷۷۳۹	۰/۱۸۳۹۰۴





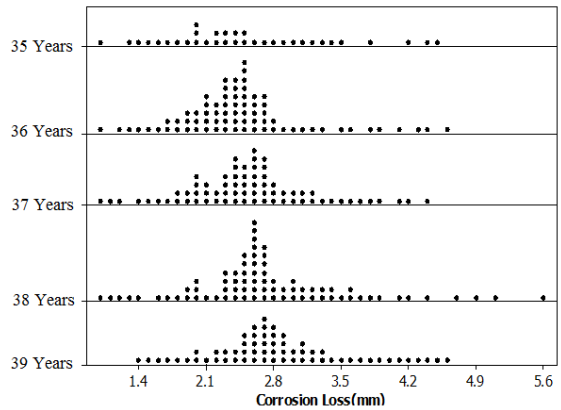
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.5.3]

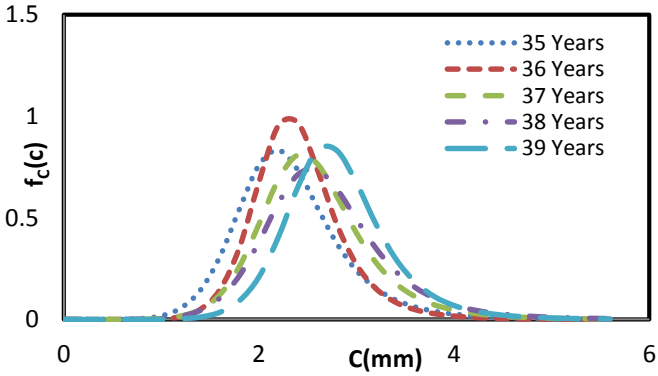


شکل ۵- دیاگرام احتمالاتی در سال ۳۵ عمر سکو در بازه اطمینان ۹۵٪

بر اساس تجزیه و تحلیل آماری فوق و پس از انتخاب تابع توزیع لوگ لجستیک برای نشان دادن وضعیت خوردگی یکنواخت در سالهای مختلف عمر سکو، یک مدل احتمالاتی وابسته به زمان پیشنهاد می‌گردد. در شکل ۶ تغییرات عمق خوردگی و پراکندگی آن در سال‌های مختلف عمر سکو نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، داده‌ها دارای پراکندگی زیادی بوده اما همانطور که قبلا نیز بحث گردید، داده‌ها از توزیع مشخصی پیروی می‌کنند. در شکل ۷ تغییرات تابع توزیع احتمال برازش داده شده بر داده‌ها در طول زمان نشان داده شده است. همان طور که در بخش نخست نیز مورد بحث قرار گرفت، انتظار می‌رود با گذشت زمان مقدار میانگین خوردگی افزایش یافته و همچنین پراکندگی داده‌ها نیز افزایش یابد. این موضوع در شکل ۷ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۶- پراکندگی داده‌های اندازه‌گیری شده در سال‌های مختلف



شکل ۷- تابع توزیع احتمال لوگ‌لجستیک بدست آمده از داده‌های اندازه‌گیری شده در سالهای مختلف عمر سکو

با توجه به تغییرات مقادیر خوردگی در طول زمان یک توزیع با فرم ثابت اما با پارامترهای متغیر در زمان استفاده می‌گردد. توزیع دوپارامتری لوگ لجستیک مطابق با رابطه ۶ بصورت زیر نوشته می‌شود[۱۹]:

$$f_C(c) = \frac{\beta}{\alpha} \frac{(\frac{C}{\alpha})^{\beta-1}}{(1+(\frac{C}{\alpha})^{\beta})^2} \qquad (۶)$$

$$E(C) = \frac{\alpha b}{Sinb}.\ \beta > 1, \qquad b = \pi/\beta \qquad (۷)$$

$$Var(C) = \alpha^2 \left(\frac{2b}{sin2b} - \frac{b^2}{Sin^2 b} \right), \qquad \beta > 2 \qquad (۸)$$

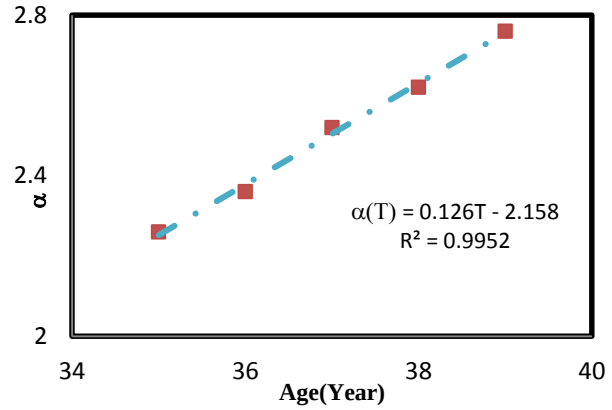
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.5.3]

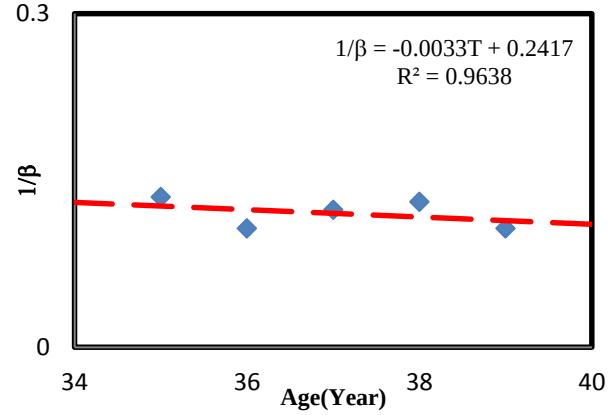
که در آن پارامتر α ضریب مقیاس و پارامتر β ضریب شکل بوده و c مقدار عمق خوردگی می‌باشد. روابط ۷ و ۸، مقادیر میانگین و واریانس با فرض توزیع لوگ لجستیک داده‌ها را بیان می‌نمایند. با توجه به تغییرات مقادیر خوردگی، مقادیر ضرایب α و β متغیر بوده و در طول زمان تغییر می‌نمایند. تغییرات این ضرایب در طول زمان در اشکال شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده است. در صورت برازش خطی به مقادیر بدست آمده، مقدار این پارامترها در زمان T با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\alpha = 0.126T - 2.158 \; For \; T \geq 25 \; Years \qquad (۹)$$

$$\beta = \frac{1.0}{-0.0033T + 0.2417} \; For \; T \geq 25 \; Years \qquad (۱۰)$$

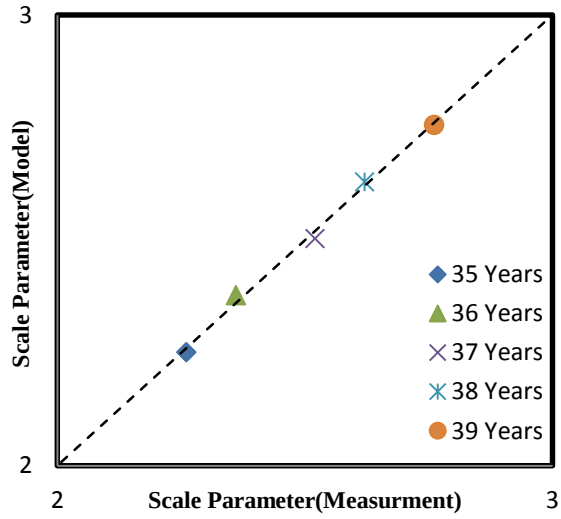


شکل ۸- تغییرات ضریب مقیاس در طول زمان در مدل لوگ لجستیک

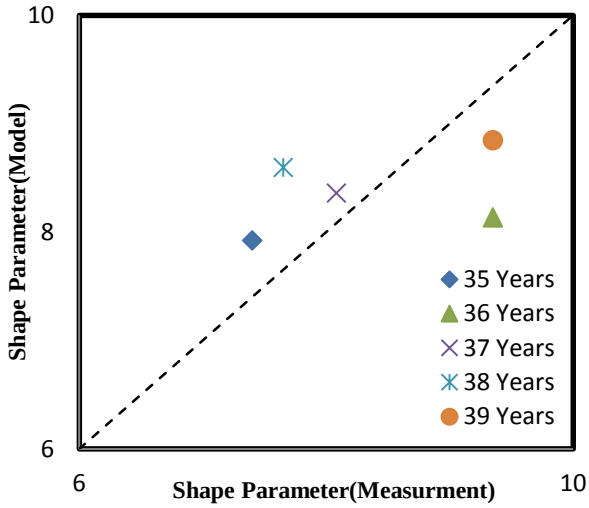


شکل ۹- تغییرات ضریب شکل در طول زمان در مدل لوگ لجستیک

اشکال **شکل ۱۰** و**شکل ۱۱** دقت معادلات فوق را در تخمین ضرایب شکل و مقیاس و مقایسه تطبیقی بین پارامترهای بدست آمده از داده‌های اندازه‌گیری شده برای خوردگی و پارامترهای بدست آمده از مدل احتمالاتی ارائه شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- مقایسه بین ضریب مقیاس بدست آمده از مدل احتمالاتی و داده‌های اندازه‌گیری



شکل ۱۱- مقایسه بین ضریب شکل بدست آمده از مدل احتمالاتی و داده‌های اندازه‌گیری

با توجه به توزیع فرض شده و با استفاده از رابطه ۷، برای تخمین مقدار میانگین خوردگی یکنواخت تا سال T ام عمر سکو رابطه بصورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$C_{Mean}(T) = \frac{-0.0013T^2 + 0.1181T - 1.6384}{Sin(-0.0103T + 0.759)} \qquad (۱۱)$$

با توجه به بازه زمانی که اندازه‌گیری‌های میدانی در طول آن صورت پذیرفته است، رابطه فوق از سال ۲۵ تا سال ۵۰ عمر سکو معتبر می‌باشد و در سایر زمان‌ها لازم است ملاحظات لازم برای استفاده از این رابطه درنظر گرفته شود. همچنین رابطه فوق می‌تواند برای محاسبه نرخ خوردگی در هرلحظه با استفاده از مشتق گیری از آن نسبت به زمان، مورد استفاده قرار گیرد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.5.3]

در جدول ۵ پارامترهای توزیع احتمالاتی شامل ضرایب شکل و مقیاس و همچنین مقادیر میانگین و واریانس بدست آمده از مدل احتمالاتی پیشنهادی و پارامترهای بدست آمده از اندازه‌گیری‌های مستقیم در سالهای مختلف عمر سکو خلاصه شده است.

جدول ۵- مقایسه بین پارامترهای استخراج شده از مدل و اندازه‌گیری‌ها

عمر سرویس (سال)	مدل لوگ لجستیک α	مدل لوگ لجستیک β	مدل لوگ لجستیک میانگین (mm)	مدل لوگ لجستیک واریانس	اندازه‌گیری‌ها α	اندازه‌گیری‌ها β	اندازه‌گیری‌ها میانگین (mm)	اندازه‌گیری‌ها واریانس
۳۵	۲/۲۵۲	۷/۹۴۹	۲/۳۲۱	۰/۲۹۷	۲/۲۶۰	۷/۴۰۰	۲/۳۴۰۲	۰/۳۲۸
۳۶	۲/۳۷۸	۸/۱۶۳	۲/۴۴۸	۰/۳۱۲	۲/۳۶۰	۹/۳۵۰	۲/۴۰۸۱	۰/۲۰۶
۳۷	۲/۵۰۴	۸/۳۸۹	۲/۵۷۴	۰/۳۲۵	۲/۵۲۰	۸/۰۸۰	۲/۵۹۲۶	۰/۳۱۲
۳۸	۲/۶۳۰	۸/۶۲۸	۲/۷۰۰	۰/۳۳۷	۲/۶۲۰	۷/۶۵۰	۲/۶۹۹۹	۰/۳۶۲
۳۹	۲/۷۵۶	۸/۸۸۱	۲/۸۲۵	۰/۳۴۸	۲/۷۶۰	۹/۳۵۰	۲/۸۲۰۸	۰/۲۸۱

۶- مثال عددی

در این مثال کاربرد مدل‌های احتمالاتی آسیب خوردگی، ارائه شده و تاثیر آنها بر روی شاخص قابلیت اعتماد نشان داده شده است. برای ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌ای تحت شرایط دارای عدم قطعیت مقادیر خوردگی، از یک ورق فولادی ساده بعنوان یک سازه نمونه استفاده شده است[۱]. در اینجا فرض می‌گردد که h و d بترتیب بیانگر عرض اسمی و ضخامت ورق باشند. بار محوری یکنواخت به اندازه Q بر ورق اعمال می‌گردد. نیروی Q مطابق با آنچه در جدول ۶ گزارش شده است، دارای توزیع نرمال با پارامترهای ذکر شده می‌باشد. تابع مقاومت ورق در هر لحظه برحسب تنش تسلیم ورق S_y و سطح مقطع کاهش یافته براثر خوردگی از یک طرف ورق با $R(t)$ بصورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$R(t) = S_y h\big(d - c(t)\big) \qquad (۱۲)$$

تنش تسلیم S_y، با استفاده از توزیع نرمال و پارامترهای ذکر شده در جدول ۶ مدلسازی می‌گردد.

جدول ۶- خلاصه مفروضات مثال عددی

شماره	متغیر	میانگین	انحراف معیار	نوع توزیع
۱	$Q[kN]$	۲۰۰	۲۳	توزیع نرمال
۲	$S_y[MPa]$	۳۰۰	۱۰	توزیع نرمال
۳	$d[mm]$	۱۰	-	متعین
۴	$h[mm]$	۱۰۰	-	متعین

در اینجا تابع حالت حدی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$G = R - Q \qquad (۱۳)$$

بر اساس مدل‌های احتمالاتی پیشنهادی، توزیع پراکندگی مقادیر خوردگی در سالهای مختلف متفاوت می‌باشد. در این بخش برای تعیین توزیع مقدار خوردگی از مدل مقدار میانگین ارائه شده در بخش ۴ و همچنین مدل پیشنهادی جدید در بخش ۵ استفاده شده است. همچنین برای مقایسه بهتر بین نتایج بدست آمده از مدل‌های پیشنهادی و داده‌های اندازه‌گیری خوردگی، مقدار احتمال شکست با استفاده از داده‌های بدست‌آمده از اندازه‌گیری نیز محاسبه شده است. پارامترهای بدست آمده از مدل احتمالاتی مربوط به توزیع لوگ‌لجستیک در جدول ۵ ذکر شده است. مقدار احتمال شکست و شاخص قابلیت اعتماد با استفاده از روش نمونه‌گیری مونت‌کارلو و با فرض انحراف معیار احتمال شکست هدف برابر ۰/۰۲ برای سالهای مختلف و در ۳ حالت مطابق با جدول ۷ بدست می‌آید. در هرسال، تعداد نمونه مورد نیاز برای رسیدن به انحراف معیار هدف ذکر شده است. همچنین تفاوت مقدار احتمال شکست منتج از مدل‌های پیشنهادی در این مقاله نسبت به احتمال شکست بدست آمده از نتایج اندازه‌گیری‌ها نیز بصورت درصد انحراف نسبی بیان شده است.

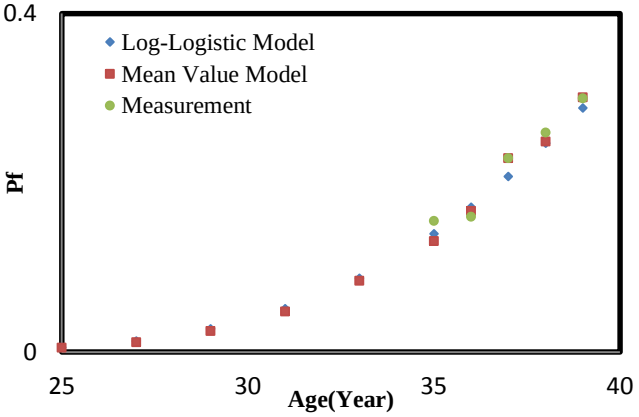
جدول ۷- خلاصه نتایج مثال عددی

T [Year]	مدل لوگ لجستیک Pf	Relative Deviation (%)	β	N_{Pf}	مدل مقدار میانگین g(t) [mm]	Var.	Pf	Relative Deviation (%)	β	N_{Pf}	اندازه گیری Pf	β	N_{Pf}
۲۵	۰/۰۰۶	-	۲/۵۳۸	۴۴۷۱۶۴	۰/۹۸۰	۰/۰۵۴	۰/۰۰۵	-	۲/۵۶۸	۴۸۶۸۸۳	-	-	-
۲۷	۰/۰۱۳	-	۲/۲۱۹	۱۸۶۶۵۳	۱/۲۴۳	۰/۰۹۳	۰/۰۱۲	-	۲/۲۶۴	۲۰۹۵۹۸	-	-	-
۲۹	۰/۰۲۷	-	۱/۹۲۰	۸۸۷۵۱	۱/۵۰۵	۰/۱۳۲	۰/۰۲۵	-	۱/۹۶۰	۹۷۴۹۰	-	-	-
۳۱	۰/۰۵۱	-	۱/۶۳۳	۴۶۳۶۲	۱/۷۶۸	۰/۱۷۲	۰/۰۴۸	-	۱/۶۶۵	۴۹۶۳۲	-	-	-
۳۳	۰/۰۸۷	-	۱/۳۵۸	۲۶۱۷۴	۲/۰۳۰	۰/۲۱۱	۰/۰۸۴	-	۱/۳۷۷	۲۷۱۵۶	-	-	-
۳۵	۰/۱۴۰	۹/۶۸	۱/۰۸۱	۱۵۳۸۶	۲/۲۹۳	۰/۲۵۱	۰/۱۳۱	۱۵/۴۸	۱/۱۲۱	۱۶۵۵۲	۰/۱۵۵	۱/۰۱۶	۱۳۶۴۰
۳۶	۰/۱۷۱	۶/۸۸	۰/۹۴۸	۱۲۰۹۳	۲/۴۲۴	۰/۲۷۰	۰/۱۶۷	۴/۳۸	۰/۹۶۸	۱۲۵۱۴	۰/۱۶۰	۰/۹۹۵	۱۳۱۳۵
۳۷	۰/۲۰۸	۹/۱۷	۰/۸۱۴	۹۵۳۷	۲/۵۵۵	۰/۲۹۰	۰/۲۲۹	۰/۰۰	۰/۷۴۲	۸۴۱۹	۰/۲۲۹	۰/۷۴۲	۸۴۱۹
۳۸	۰/۲۴۷	۵/۰۰	۰/۶۸۴	۷۶۲۸	۲/۶۸۶	۰/۳۱۰	۰/۲۴۹	۴/۲۳	۰/۶۷۸	۷۵۴۷	۰/۲۶۰	۰/۶۴۵	۷۱۳۶
۳۹	۰/۲۸۹	۳/۶۷	۰/۵۵۶	۶۱۶۰	۲/۸۱۸	۰/۳۲۹	۰/۳۰۱	۰/۳۳	۰/۵۲۲	۵۸۱۰	۰/۳۰۰	۰/۵۲۵	۵۸۳۸

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.5.3]

در شکل ۱۲ تغییرات متغیر احتمال شکست(P_f) با استفاده از مدل‌های مختلف احتمالاتی و نیز داده‌های اندازه‌گیری شده در طول زمان نمایش داده شده است. مطابق با آنچه مشاهده می‌گردد، احتمال شکست بدست آمده با استفاده از مدل‌های پیشنهادی تطابق قابل قبولی با نتایج بدست آمده از داده‌های اندازه‌گیری شده برای خوردگی دارد. این امر نشان می‌دهد مدل پیشنهادی بخوبی تغییرات و پراکندگی داده‌های بدست‌آمده از اندازه‌گیری را منعکس می‌نماید. همچنین تغییرات احتمال شکست برای این نمونه در طول زمان را می‌توان با دقت مناسبی با یک منحنی درجه ۲ نشان داد.



شکل ۱۲- تغییرات احتمال شکست در طول زمان

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، نحوه تغییرات خوردگی در طول زمان در سکوهای ثابت فلزی در خلیج‌فارس مورد بررسی قرار گرفته، یک مدل احتمالاتی برای پیش‌بینی عمق خوردگی در زمان موردنظر توسعه داده شد. در این راستا از داده‌های بدست‌آمده از اندازه‌گیری‌های میدانی ضخامت دیواره اعضای لوله‌ای مستغرق در آب دریا شامل بیست سکوی موجود در خلیج‌فارس استفاده شده است. داده‌های استفاده شده مربوط به سکوهایی با طول عمر بین ۳۵ تا ۴۰ سال می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که توزیع لوگ لجستیک بهتر از سایر توابع توزیع متداول احتمالاتی و با تقریب قابل قبولی می‌تواند بیانگر وضعیت خوردگی در سکوهای فلزی موجود در آب دریا باشد. بهمین منظور و برای تعیین توزیع میزان خوردگی در هر زمان، یک تابع توزیع لوگ لجستیک با پارامترهای متغیر در زمان پیشنهاد شده است. همچنین یک مدل احتمالاتی مقدار میانگین بر مبنای مدل‌های احتمالاتی پیشین نیز ارائه گردیده است. مقایسه بین نتایج بدست آمده از مدل‌های احتمالاتی پیشنهاد شده در این مقاله و داده‌های بدست آمده از اندازه‌گیری‌ها نشان‌دهنده تطابق قابل قبولی میان این دو می‌باشد.

کلید واژگان

1- Sulfate Reducing Bacteria(SRB)
2- Degradation Model
3- Uniform Corrosion
4- Mild and Low Alloy Steel
5- Splash Zone
6- Bias Factor
7- Maximum Likelihood Estimation

۸ - مراجع

1-Melchers, R.E., (2003), *Probabilistic Model for Marine Corrosion of Steel for Structural Reliability Assessment*, Journal of Structural Engineering, 129:11, 1484-1493.

2-Velazquez, J., Weide, J., Hernandez, E., Hernandez, H.H., (2014), *Statistical modelling of pitting corrosion: extrapolation of the maximum pit depth growth*, Int. J. Electrochem. Sci. 9, p. 4129-4143.

3-Paik, J.K., Melchers, R.E., (2008), *Corrosion Wastage in Aged Structures*, Condition Assessment of Aged Structures, 1st Edition, ISBN-9781845693343

4-HSR, (2003), *Offshore hydrocarbon release statistics and analysis*, H.HID Statistics Report 2002, Health and Safety Executive, UK.

5-Southwell, C.R., Bultman, J.D., Hummer C.W., (1979), *Estimating Service Life of Steel in Seawater*, in Seawater Corrosion Handbook, edition M. Schumacher (Park Ridge, NJ: Noyes Data Corp.), p. 374-387.

6-Reinhart, F.M., Jenkins, J.F., (1972), *Corrosion of Materials in Surface Seawater after 12 and 18 Months of Exposure*, Technical Note N-1213 (Port Hueneme, CA: Naval Civil Engineering Laboratory).

7-Evans, U.R. , (1966), *The Corrosion and Oxidation of Metals: Scientific Principles and Practical Applications*, London, U.K.: Edward Arnold Publishers, Ltd., p. 819-849.

8-Tomashev, N.D., *Theory of Corrosion and Protection of Metals* (New York, NY: The MacMillan Co., 1996).

9-Chernov, B.B., Ponomarenko, S.A., (1991), *Physiochemical modeling of metal corrosion in seawater*, Protection of Metals 27(5): p. 612-615.

10-Melchers, R.E., (2003), *Modeling of Marine Immersion Corrosion for Mild and Low-Alloy Steels—Part 1: Phenomenological Model*, CORROSION, 59(4), p. 319-334.

11-Evans, U.R., (1960), *The corrosion and oxidation of metals: Scientific principles and practical applications*, Edward Arnold, Ltd., London.

12 - Jones, D., (1996), *Principles and prevention of corrosion*, 2nd Ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.5.3]

13-LaQue, F.L., (1975), *Marine corrosion—Causes and prevention*, Wiley, New York.
14- Schumacher, M., (1979), *Seawater corrosion handbook*, Noyes Data Corporation, N.J.
15-Melcher, R.E., *Modeling of Marine Immersion Corrosion for Mild and Low-Alloy Steels—Part 2: Uncertainty Estimation*, CORROSION. 2003;59(4), p. 335-344.
16-Melchers, R.E., (1999), *Structural reliability analysis and prediction*, 2nd edition, John Wiley & Sons.
17-Anderson, T.W., Darling, D.A., (1954), *A test of goodness-of-fit*, J. Am. Stat. Assoc. 49 p. 765–769.
18-Benjamin, J.R., Cornell, A. (1970), *Probability, statistics and decision for civil engineers*, McGraw-Hill: New York.
19-Shoukri, M.M., Mian, I.U.M., Tracy, D.S., (1988), Sampling Properties of Estimators of the Log-Logistic Distribution with Application to Canadian Precipitation Data, The Canadian Journal of Statistics, 16 (3), p. 223–236

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.5.3]