

قابلیت اعتماد سازه‌های فولادی دریایی در مقابل خوردگی

محمد رضا معرف زاده^۱

۱- استادیار دانشکده پدافند غیرعامل دانشگاه امام حسین (ع)

mmrfzd@ihu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۳/۲۷]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۱/۲۵]

چکیده- تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌های فولادی که در معرض خوردگی ناشی از مجاورت با آب دریا است از اهمیت بالایی برای حصول اطمینان از سطح ایمنی این سازه‌ها برخوردار است. این تحلیل نیازمند مدلی برای نمایش فرآیند ایجاد خوردگی در طول زمان و نااطمینانی‌های مربوط به آن است. در این مقاله یک مدل جدید مبتنی بر زنجیره مارکوف ارائه می‌شود که خواص احتمالاتی تا مرتبه دوم (میانگین و انحراف معیار) داده‌های مربوط به اتلاف‌های خوردگی را در درازمدت اقتناع می‌کند. این مدل استوکستیک مبتنی بر مدل خوردگی Melchers است که در گذشته مفصلاً با مشاهده میدانی و نیز داده‌های واقعی کالیبره شده است. اگرچه مشاهده میدانی خوردگی درازمدت، برای فولادهای در معرض آب دریا (فولادهای دریایی) نادر است، در این نوشتار نشان داده خواهد شد که به ویژه برای انحراف معیار، مدل جدید بخوبی قادر به هماهنگی با داده‌های طولانی‌مدت موجود می‌تواند باشد. این در حالی است که مدل‌های دیگر مانند فرآیند گاما قابلیت مدل کردن انحراف معیار داده‌ها را در شرایط خاصی ندارند.

واژگان کلیدی: قابلیت اعتماد، خوردگی، آب دریا، فرآیند استوکستیک، زنجیره مارکوف، فرآیند گاما.

۱- مقدمه

تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌های فولادی‌ای که در معرض خوردگی ناشی از آب دریا قرار دارند، بسیار بااهمیت برای سازه‌های ساحلی و نیز فراساحلی است. این سازه‌ها اغلب بسیار گران بوده و دارای پیامدهای پیچیده و نیز هزینه‌های فراوان در صورت وقوع خرابی است. از آنجا که خوردگی سازه‌های فولادی موجب استهلاک مقاومت سازه‌ای به صورت تدریجی در طول زمان می‌شود، مبحث ارزیابی ایمنی برای سازه‌های جدید فولادی (آنان که در مرحله طراحی است) و نیز برای آنهایی که در حال خدمت می‌باشند (سازه‌های موجود) از اهمیت بالایی برخوردار است. برای سازه‌های جدید، ارزیابی ایمنی می‌تواند اطمینان دهد که مقدار مناسبی از ذخیره خوردگی^۱ (یا فولاد فناشونده) تأمین شده است. برای سازه‌های موجود ارزیابی ایمنی معمولاً به این لحاظ مفید است که تراز جاری ایمنی را ارزیابی می‌نماید و همچنین امکان ارائه سیاست‌های تعمیراتی بهینه را فراهم می‌آورد. این سیاست‌ها

معمولاً عبارتند از برنامه‌ریزی بازرسی‌های دوره‌ای و نیز اقدامات تعمیراتی برای نگهداری سازه در سطح ایمنی قابل قبول. خوردگی دریایی پدیده پیچیده‌ای بوده و معمولاً تحت اثر عوامل مختلفی ایجاد می‌شود که هر یک دارای نااطمینانی‌های مربوط به خود است. برای خوردگی منطقه غرقاب، فاکتورهای مؤثر بر خوردگی عبارتند از: در دسترس بودن اکسیژن، شوری آب دریا، میزان کربنات، pH، دمای آب، سرعت آب، گیاهان دریایی و باکتری‌ها، وضعیت سطح فولادی، آلودگی آب و نیز ترکیب آلیاژی فولاد [۵]. از آنجا که هر یک از این فاکتورهای مؤثر دارای درجه‌ای از نااطمینانی ذاتی مربوط به خود است، هرگونه پیش‌بینی درخصوص وضعیت سازه فولادی در آینده، خود حاوی نااطمینانی حاصل از تجمع آن نااطمینانی‌ها خواهد بود. بعلاوه حتی اگر این فاکتورها ثابت فرض شوند، می‌توان انتظار داشت که مشاهده خوردگی خود دارای درجه‌ای از نااطمینانی باشند زیرا که عموماً اندازه‌گیری‌ها درست و بی‌نقص نیستند. معمولاً آنچه در یک عملیات واقعی در نظر گرفته می‌شود انجام تعدادی آزمایش روی آب دریای تحت مطالعه است. نتایج این آزمایش‌ها در تحلیل‌های آماری برای استنباط

1. Corrosion Allowance

مدل‌های احتمالاتی استفاده می‌شود.

از مطالب بالا این نتیجه گرفته می‌شود که به دو مبحث در تحلیل قابلیت اعتماد باید توجه شود: (۱) تفسیر داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها به منظور استخراج و یا پیشنهاد یک مدل برای توصیف رفتار عمومی و نمایش گرایش خوردگی مورد انتظار به عنوان تابعی از زمان و (۲) تفسیر داده‌ها با استفاده از تحلیل‌های آماری با هدف نیل به روشی مناسب برای برخورد با اطلاعات نااطمینانی و سپس استخراج یا پیشنهاد مدل احتمالاتی مناسب. مبحث اول در سوابق پژوهشی، معمولاً با توسل به یک قانون ساده توان^۱، که مبتنی بر ایده‌های کلاسیک علوم خوردگی است، برخورد شده است [۱]. در حد، این قانون یک تابع خطی (یک «نرخ خوردگی») سازگار با ایده‌های سنتی در مهندسی درخصوص خوردگی [۲] خواهد شد. البته قابل گفتن است که پیرو پژوهش‌های مفصل‌تر انجام شده در سال‌های اخیر روشن شده است که قانون ساده توان یا تابع خطی می‌تواند به ویژه در خوردگی‌های طولانی مدت معتبر نباشد [۵].

مبحث دوم یعنی مدل کردن احتمالاتی فرآیند خوردگی برای احتساب نااطمینانی‌ها نیز در سوابق پژوهشی توجه شده است. با استفاده از داده‌های آزمایش‌های میدانی، تخمین نااطمینانی‌های خوردگی فولاد در نقاط مجزا در طول زمان انجام گرفته است [۴ و ۶]. پژوهشگران دیگر استفاده از طبیعت احتمالاتی فرآیند استهلاک برای مدل کردن فرآیند خوردگی و در نتیجه نااطمینانی‌های آنرا پیشنهاد کرده‌اند [۳]. در یکی از این روش‌ها، تابع استهلاک-زمان (مانند قانون توان) با لحاظ نرخ استهلاک به عنوان یک متغیر تصادفی استفاده شده است. این روش حاکی از فرض وابستگی کامل مراحل خوردگی در زمان بوده و در نتیجه نمی‌تواند تغییرپذیری‌های زمانی را تحلیل نماید [۳]. در یک روش کامل‌تر، یک فرآیند استوکستیک برای توصیف فرآیند خوردگی استفاده می‌شود. در میان فرآیندهای استوکستیک، فرآیندهای حرکت براون^۲ و گاما^۳ به علت داشتن

خواص ویژه، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. برای نمونه، پرش‌ها در فرآیند گاما دارای نمونه‌های یک‌به‌یک غیرمنفی در طول زمان است که سازگاری خوبی را با ویژگی‌های خوردگی ایجاد می‌کند. این فرآیند امکان رفتن تعداد پرش‌ها به سمت بی‌نهایت را فراهم کرده و بدین ترتیب قابلیت مدل کردن فرآیندهای پیوسته را در طول زمان ایجاد می‌نماید [۱۱ و ۱۲]. با این حال، محدودیت‌های مهمی در به کار بستن فرآیند گاما در عمل وجود دارد. علت این امر تناسب خطی واریانس این فرآیند با مقدار زمان سپری شده است. این خاصیت فرآیند گاما ریشه در فرض استقلال نمونه‌های خود (یعنی مقدارافزایش خوردگی) دارد. این بدان معناست که اگر داده‌های موجود، وجود حالت غیر خطی را در واریانس نشان دهند، فرآیند گاما تغییرپذیری مربوطه را دست بالا و یا دست پایین پیش‌بینی خواهد کرد. این مطلب متأسفانه سبب پیامدهایی در تخمین ایمنی و قابلیت اعتماد سیستم سازه‌ای مربوطه خواهد داشت.

در این مقاله، قابلیت اعتماد سازه‌های فولادی با استفاده از یک مدل استوکستیک برای فرآیند خوردگی پیشنهاد می‌شود که قابلیت نمایش خواص آماری/احتمالاتی داده‌های موجود خوردگی را دارد. این مدل استوکستیک از مدل خوردگی پیشنهادی Melchers [۵]، به قسمت خطی آن برای توصیف سیر میانگین خوردگی در درازمدت بهره می‌گیرد. واریانس داده‌های خوردگی با استفاده از کاربردی جدید از زنجیره مارکوف ارائه شده و تغییرپذیری رفتار خوردگی تا حد مرتبه دوم (یعنی میانگین و انحراف معیار در طول زمان)، مدل خواهد شد. این روش امکان مدل کردن واریانس داده‌هایی را که حالات غیرخطی در طول زمان دارند را فراهم می‌آورد. داده‌های خوردگی که در این پژوهش استفاده می‌شود از اندازه‌گیری‌های اتلاف جرمی نمونه‌های فولادهای نرم با آلیاژ پایین که در معرض آب دریاها، مختلف در منطقه غرقاب است اخذ شده‌اند. بنابراین مدلی که در این مقاله ارائه می‌شود فقط برای این‌گونه فولادها است. باید اضافه کرد که در این

1. Power Law
2. Brownian Motion
3. Gamma

مقاله خوردگی های محلی^۱ لحاظ نمی شوند.

پارامترهایی که چهار فاز یادشده را توصیف می نمایند به وسیله Melchers و همکارانش [۵ و ۷] با داده های موجود خوردگی کالیبره شده اند. فاز ۴ همگی به وسیله مقدار اولیه C_0 و شیب r_c تعریف می شود. در مطالبی که در ادامه می آیند مدل خوردگی در درازمدت می تواند چنان تصور شود که اتلاف خوردگی به صورت خیالی در زمان صفر شروع شده در ادامه در نقطه ای دیگر در زمان، شکل واقعی خود را می گیرد. بنابراین فاز ۴، به شکل ریاضیاتی با عبارت $C(t) = C_0 + r_c t$ نمایش داده می شود که در آن C_0 مقدار (خیالی) اولیه و r_c نرخ خوردگی درازمدت است.

تلاش های گذشته در کالیبره کردن پارامترهای مدل [۵ و ۷] نشان داده اند که دمای میانگین آب دریا، متغیر با اهمیتی بوده است. همان گونه که در ادامه شرح داده خواهد شد، این متغیر برای سازگار کردن داده های اخذ شده از منابع مختلف استفاده می شود. متغیرهای بیشتری می توانند روی خوردگی مؤثر بوده و بنابراین روی تغییرپذیری آن تأثیر بگذارند. با این وجود متغیرها می توانند به داده هایی که از نمونه های مختلف خوردگی استخراج شده اند به شکل مستقیم مرتبط دانسته شوند.

۳- داده های خوردگی

در تحلیل ایمنی سازه های زیربنایی در طول عمر آنان، بیشتر داده های خوردگی ای مورد نیاز است که از نمونه های در معرض آب دریا، به مدت طولانی گرفته شده باشند. از شکل (۱) مستقیماً ملاحظه می شود که داده های کوتاه مدت که فازهای ۱-۳ را توصیف می نمایند تنها اطلاعاتی در خصوص وضعیت های گذرا ارائه می دهند و به خوردگی های درازمدت که در فاز ۴ توصیف شده اند مستقیماً مربوط نمی شوند. بنابراین تنها اطلاعاتی مفید خواهند بود که مربوط به مشاهده درازمدت باشند. متأسفانه تنها اطلاعات چند منبع که حاوی داده های خوردگی درازمدت، در دسترس است که به شکل خلاصه تشریح می شوند. لازم به گفتن است که این داده ها برای آب های با دماهای مختلف ارائه شده اند.

یک نکته مهم در این مبحث امکان آلوده بودن آب های تحت

۲- مدل خوردگی (مدل Melchers)

در سوابق تحقیقاتی مدل های مختلفی برای نمایش خوردگی دریایی پیشنهاد شده اند [۱۶] می تواند برای یک مرور سریع ملاحظه شود). در این مقاله مدل پیشنهادی Melchers [۵] برای توصیف مقدار میانگین خوردگی فولاد در طول زمان استفاده می شود شکل (۱) این مدل از آنجا که دارای مبانی تئوریک وزینی بوده، بر اساس مشاهده میدانی دراز مدت استوار بوده و ضمناً تداوم خوردگی را حتی در شرایط غیر هوازی تضمین می نماید، می تواند مدل قابل قبولی محسوب شود. همچنین نشان داده خواهد شد که این مدل با داده های میدانی استناد شده در این مقاله نیز همخوانی خوبی را نشان می دهد. همان گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، این مدل چهار فاز پی در پی را برای لحاظ خوردگی در نظر می گیرد. دو فاز اول آن که با اصطلاح فازهای "هوازی" خوانده می شوند بیشتر تحت تأثیر وجود اکسیژن است. نقطه AP نقطه شروع فازهای ۳ و ۴ که فازهای "غیرهوازی" خوانده می شوند است. فاکتورهای متفاوتی در این فازهای جدید (فازهای غیرهوازی ۳ و ۴) مشارکت دارند که از جمله آنان می توان فعالیت های باکتریایی در آب دریا را عنوان کرد [۵ و ۱۰]. شواهد قابل توجهی وجود دارد که نشان می دهند که فرآیند خوردگی نهایتاً نرخ یکنواختی در درازمدت به خود می گیرد. این رویداد در در فاز ۴ به شکل یک خط نمایش داده شده است.

شکل ۱- مدل پیشرفت خوردگی در زمان [۵] ملاحظه شود)

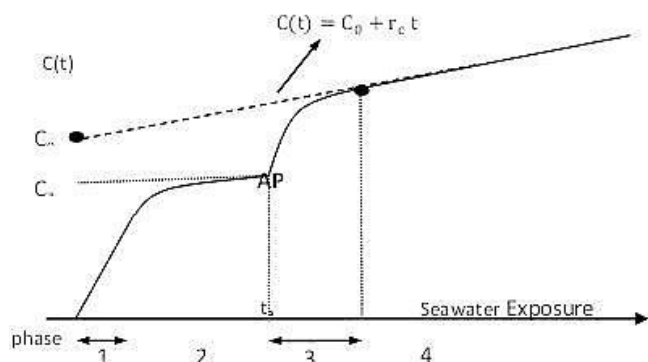


Fig. 1. Corrosion progression model in time (see [5])

1. Pitting Corrosion

گرفتن توضیح نویسنده گزارشی که داده‌ها از آن اخذ شده‌اند این امکان تشخیص داده شد که منطقه هالیفکس می‌تواند آلوده باشد و بنابراین، منطقه یاد شده از این مطالعه کنار گذاشته شد.

خوردگی منطقه غرقاب در این برنامه آزمایشی برای دوره‌های زمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ سال در معرض قرارگیری آب دریا اندازه‌گیری شده است. نتایج برای انواع مختلفی از فولاد و آهن به دست آمده‌اند که بعضی از آنان در حال حاضر، رایج نیست. (جدول ۱)، داده‌های اتلاف خوردگی دارای «آهن‌های نوردشده» (N، P و M) و همچنین «فولادهای عادی» (B، D، E و F) برای سه منطقه باقیمانده و (جدول ۲) ترکیب شیمیایی نمونه‌های آزمایش را به شکل خلاصه بیان کرده‌اند.

ب) منطقه کانال پاناما [۱۵]

دومین مجموعه داده‌هایی که در اینجا استفاده می‌شود ترکیبی از نتایج اندازه‌گیری اتلاف خوردگی است که پس از ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ سال در معرض آب دریا قرار گرفتگی نمونه‌ها در محیط دریایی گرمسیری در منطقه کانال پاناما انجام شده است. از این داده‌ها، تنها داده‌های مربوط به فولادهای کربنی، فولادهای کم آلیاژ و آهن‌های پرداخت شده در نظر گرفته شده و فولادهای حاوی کرم بالا حذف شدند. بدین ترتیب ۴ فولاد کربنی، ۲ فولاد کم آلیاژ و ۲ فولاد پرداخت شده با رفتار خوردگی عموماً مشابه باقی مانده‌اند که در جدول (۳) داده‌های مربوط به خوردگی آنان آورده شده‌اند. ترکیب شیمیایی این فولادها نیز در جدول (۴) آمده‌اند.

برای برنامه‌های مختلف آزمایشی، با وجود بعضی تفاوت‌ها، تمامی فولادها می‌توانند به‌عنوان فولادهای نرم کم‌آلیاژ طبقه‌بندی شوند.

۴- پردازش داده‌ها

۴-۱- تصحیح دما

مجموعه داده‌های مناسب، البته به تعداد و اندازه کافی ضرورت یک تحلیل آماری است. این مهم می‌تواند در این مطالعه با ترکیب مجموعه داده‌های بالا به دست آید. البته به شرط آنکه داده‌ها را چنان تعدیل نمود که تفاوت در دمای آب دریا در هر منطقه در آن مجموعه‌ها لحاظ شود.

مطالعه است. امروزه این مطلب کاملاً شناخته شده است [۸] که خوردگی می‌تواند به شکل قابل ملاحظه‌ای (نسبت به آب‌های غیرآلوده) در مکان‌هایی که شرایط تغذیه فراهم‌تر است افزایش یابد. این شرایط، امکان اتفاق خوردگی‌های میکروبیولوژیکی را فراهم می‌آورد. اینچنین شرایطی به‌خصوص برای خوردگی‌های درازمدت اهمیت دارد [۸]. در حال حاضر روابط عددی دقیق میان افزایش مقادیر اتلاف خوردگی و مقدار غلظت مواد مغذی در آب دریا در منطقه خوردگی در دست نیست. به این دلیل داده‌های خوردگی برای مناطقی که مظنون به آلودگی است در تحلیل‌های این مطالعه از مجموعه داده‌ها حذف خواهند شد.

جدول ۱- نتایج خوردگی عمومی برای مناطق غرقاب

Site	Mean-seawater Temp. (°C)	Steel type	Corrosion (mm) Loss		
			5 years	10 years	15 years
Plymouth	12.5	N	0.41	0.68	0.79
		P	0.51	0.82	0.91
		M	0.54	0.75	1.25
		B	0.42	0.66	0.89
		D	0.47	0.72	0.86
		E	0.47	0.78	0.86
Auckland	17.5	F	0.53	0.77	1.07
		N	0.40	0.62	0.83
		P	0.40	0.59	0.95
		M	0.43	0.63	0.78
		B	0.44	0.75	1.21
		D	0.48	0.69	1.13
Colombo	28.5	E	0.44	0.73	1.42
		F	0.44	0.79	1.39
		N	0.45	0.81	1.22
		P	0.39	0.88	1.18
		M	0.49	0.79	1.10
		B	0.51	1.03	1.21
		D	0.58	1.06	1.70
		E	0.59	1.08	1.72
		F	0.50	0.98	1.43

Note: The figures are converted from weight losses in terms of grams per 1000 square centimetres to an equivalent thickness of steel in mm using the relationship: thickness (mm)=(grams corrosion loss per 1000 cm²) / (7.8 × 100). A uniform specific gravity of 7.8 grams/cm³ is assumed.

Table 1. General corrosion results for immersion zones

داده‌هایی که در این پژوهش استفاده می‌شوند عبارتند از:

الف) داده‌های هالیفکس / پلایموث / آکلند / کلمبو [۱۳ و ۱۴]

قدیمی‌ترین برنامه آزمایشی خوردگی درازمدت، چهار سایت را تحت مطالعه گرفته است: هالیفکس (کانادا)، پلایموث (انگلیس)، آکلند (نیوزلند) و کلمبو (سريلانكا). با در نظر

$$C' = C + C'_0 - C_0 \quad (۳)$$

$$t' = t \exp[0.0254 (T - T')] \quad (۴)$$

در این روابط نمادهای پریم دار به مقادیر دمای T' ارتباط می‌یابند و نمادهای بدون پریم اشاره به داده‌ها در دمای T دارند. C و t بدین ترتیب اتلاف خوردگی و زمان متناظر آن در دمای T است و دو مقدار C_0 و C'_0 نیز با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. به منظور انجام تحلیل داده‌ها در این مقاله، تمامی داده‌ها (ارائه شده در جداول بخش ۳) با استفاده از دستورالعمل بالا در دمای مشترک $T = 12.5^\circ C$ (دمای منطقه پلایموت) تبدیل می‌شوند.

از آنجا که تنها خوردگی درازمدت، شرح داده شده در فاز ۴ مدل Melchers در اینجا مورد توجه است، بنابراین تنها دو پارامتر C_0 و r_C شکل (۱) لازم است در نظر گرفته شوند. اثر دمای آب دریا روی این پارامترها به شکل زیر پیش‌تر پیشنهاد شده است [۷]:

$$C_0 = 0.141 - 0.00133 T \quad (۱)$$

$$r_C = 0.039 \exp(0.0254 T) \quad (۲)$$

T در این روابط دمای میانگین سالانه آب دریا است. با استفاده از این روابط و با فرض آنکه تغییرپذیری داده‌ها با دما تغییر نمی‌یابند، می‌توان نشان داد که مقادیر اتلاف خوردگی و زمان‌های اتفاق متناظر آنان خواهند شد:

جدول ۲- ترکیب شیمیایی فولادهای استفاده شده در برنامه آزمایشی هالیفاکس/پلایموت/آکلند/کلمبو (برحسب درصد وزنی)

key	Description	C	Si	S	P	Mn	Cr	Ni	Cu
Rolled irons	N Low Moor Wrought iron	0.015	0.145	0.0125	0.1135	0.02	-	-	0.021
	P Swedish charcoal iron	0.03	0.03	0.019	0.022	0.02	-	-	0.063
	M Ingot iron	0.035	0.035	0.033	0.0175	0.065	-	-	0.042
Ordinary Steels	B Mild steel, high S and P	0.215	0.17	0.103	0.067	0.34	-	-	0.072
	D 0.4% carbon steel	0.4	0.2	0.049	0.045	0.85	-	-	0.048
	E Mild steel, low S and P	0.345	0.2	0.025	0.027	0.715	-	-	0.076
	F Mild steel, 0.7%Mn	0.24	0.16	0.063	0.048	0.68	-	-	0.087

Table 2. Composition of steels used in Halifax/Plymouth/Auckland/Colombo test program (% by weight)

جدول ۳- نتایج خوردگی عمومی خوردگی غرقاب منطقه کانال پاناما (دمای میانگین آب دریا = $27.6^\circ C$)

Key	type	Corrosion loss (mm)				
		1 year	2 years	4 years	8 years	16 years
A	Carbon-steel	0.15	0.21	0.41	0.66	1.17
B	Carbon-steel	0.14	0.23	0.38	0.69	1.24
C	Carbon-steel	0.11	0.20	0.38	0.58	Not reported
D	Carbon-steel	0.15	0.23	0.38	0.71	1.24
I	Low-Alloy steel	0.15	0.22	0.53	0.66	1.22
K	Low-Alloy steel	0.16	0.24	0.38	0.64	1.14
S	Wrought iron	0.17	0.20	0.36	0.56	Not reported
T	Wrought iron	0.16	0.24	0.38	0.66	1.12

Note: the figures in Table are converted from corrosion losses originally recorded in mils: 1mm = 0.0254 mils

Table 3. General corrosion results for immersion zones measured in Panama Canal (mean-seawater Temperature = $27.6^\circ C$)

جدول ۴- ترکیب شیمیایی فولادهای استفاده شده در برنامه آزمایشی منطقه کانال پاناما (برحسب درصد وزنی)

key	Description	C	Si	S	P	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo
C-steels	A C steel (pickled)	0.24	0.008	0.027	0.04	0.48	0.03	0.051	0.08	-
	B C-steel (machined)									
	C C steel (mill Scale)									
	D C steel (0.3% Cu) (Pickled)	0.22	0.009	0.033	0.019	0.44	Trace	0.14	0.35	-
Low-Alloy Steels	I Low-Alloy St. (Pickled)	0.08	0.06	0.026	0.007	0.47	0	1.54	0.87	-
	K Low-Alloy St. (Pickled)	0.078	0.04	0.022	0.058	0.75	Trace	0.72	0.61	0.13
Wrought irons	S Wrought iron (machined)	0.04	0.098	0.018	0.141	0.038	Trace	0.006	0.02	-
	T Wrought iron (as received)									

Table 4. Composition of steels used in Panama Canal test program (% by weight)

۴-۲- توصیف احتمالاتی مرتبه دوم

تحلیل اولیه داده‌ها در دمای مشترک $T = 12.5^\circ\text{C}$ نشان می‌دهد که مقادیر میانگین اتلاف خوردگی‌ها سازگاری خوبی را در تمامی حالات دارد. با این وجود پراکندگی داده‌ها رفتار متفاوتی را در فولادهای کم کربن و با کربن بالا (فولادهای دارای به ترتیب کمتر و بیشتر از ۰/۱٪ کربن) نشان می‌دهند. انحراف معیار داده‌ها نشان می‌دهند که فولادهای کم کربن دارای مقادیر نسبتاً پایینی در طول تمامی دوره زمانی قرار گرفتن در معرض آب دریا به جز منطقه پلایموث است.

داده‌های منطقه پلایموث پرش قابل ملاحظه‌ای را در سال ۱۵ نشان می‌دهند. همان‌گونه که می‌توان در جدول (۱) ملاحظه نمود، این پرش به علت اتلاف خوردگی بسیار بیشتر در فولاد نوع M در این منطقه در این زمان است. ضرورت سازگاری با داده‌های دیگر نشان می‌دهد که این رویداد باید یک برون افتادگی احتمالاً ناشی از خطا در گزارش و یا وضعیت غیرعادی قرار گرفتن نمونه فولاد در آب دریا باشد. به این دلیل، این نقطه در تحلیل‌هایی که در ادامه می‌آیند در نظر گرفته نمی‌شود. بدون لحاظ این نقطه، انحراف معیار این گروه فولادها حدود (و یا کمتر از) ۰/۰۵ میلی‌متر است.

در فولادهای با کربن بالا، مقادیر میانگین‌ها بالاتر بوده و نیز پراکندگی بیشتری نسبت به فولادهای کم کربن مشاهده می‌شود. بنابراین انحراف معیارها در این فولادها، در بعضی مناطق، گرایش به افزایش در زمان‌های با مقادیر بالا دارند.

۵- مدل کردن استوکستیک خوردگی

۱-۵- فرمول‌بندی

اگرچه خوردگی اساساً یک فرآیند پیوسته است معذالک در اینجا مدل خوردگی به شکل زیر ساده‌سازی خواهد شد. این فرآیند در طول زمان به بازه‌های زمانی کوچکی تقسیم‌بندی شده به گونه‌ای که در طول هر بازه زمانی، خوردگی مقداری ثابت خواهد داشت. در این طرح ناپیوسته زمانی، فرض کنید که خوردگی تجمعی در زمان t با $C(v)$ نمایش داده شود که در آن نماد v تعداد بازه‌های زمانی سپری شده را نشان می‌دهد. به علاوه فرض کنید که طول بازه‌های زمانی در تمام تحلیل ثابت

و برابر Δt گرفته شوند. بنابراین کل زمان سپری شده برابر با $t = v \cdot \Delta t$ خواهد شد. برای چنین مدلی با پرش‌های ناپیوسته، یک مقدار به‌هنگام شده خوردگی عبارت خواهد بود از:

$$C(v) = C(v-1) + \Delta C(v) \quad (5)$$

که در آن $C(v-1)$ مقدار خوردگی در بازه زمانی فعلی $v-1$ و $\Delta C(v)$ نمو خوردگی در نقطه شروع بازه زمانی v می‌باشد شکل (۲). از آنجا که خوردگی یک فرآیند غیرکاهشی است بنابراین واضح است که $\Delta C(v)$ باید کمیتی غیرمنفی باشد. خوردگی در بازه زمانی v می‌تواند همچنین به شکل جمع تک تک نمو‌های انجام شده تا آن بازه زمانی با احتساب مقدار اولیه C_0 (مقدار خوردگی در زمان صفر) نشان داده شود:

$$C(v) = C_0 + \sum_{i=1}^v \Delta C(i) \quad v = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

هر چند طول بازه زمانی Δt ، کمیتی تعیینی^۱ در نظر گرفته شده است اما مقدار مطلق نمو‌های $\Delta C(i)$ مقادیری تصادفی فرض می‌شوند. در این مقاله هدف یافتن مدلی است که فرآیند خوردگی تحت مطالعه یعنی $C(t)$ را نمایش دهد و برای نیل به این هدف قابلیت کالیبره شدن با داده‌های موجود را حداقل تا مرتبه دوم (یعنی میانگین و انحراف معیار) داشته باشد. همچنین هدف دوم آن است که مدل به‌گونه‌ای باشد که بتوان تغییرپذیری‌های زمانی فرآیند خوردگی را به وسیله‌ی آن نشان داد.

شکل ۲- فرآیند خوردگی به شکل فرآیند ناپیوسته زمانی

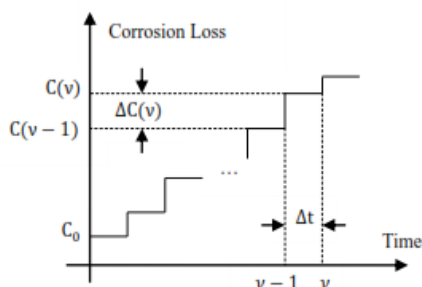


Fig. 2. Corrosion Process in time-discrete indication

در این مقاله برای رسیدن به اهداف بالا، مدل زنجیره مارکوف پیشنهاد می‌شود. اینچنین مدلی می‌تواند چارچوب استوکستیک مناسبی را ایجاد نماید. علت این امر آن است که زنجیره مارکوف فرض می‌کند که نمو‌های مجاور وابسته است که این

تجمعی $Var[C(v)]$ رافراهم می‌آورد که هیچ چیزی جز تبدیل زنجیره مارکوف به فرآیند گاما و وجود استقلال نموها نیست.

۲-۵- میانگین و واریانس زنجیره مارکوف در بازه‌های مختلف زمانی

برای استفاده از زنجیره مارکوف به عنوان مدل استوکستیک فرآیند خوردگی لازم است میانگین و واریانس آن در نقاط مختلف زمانی محاسبه شود. این مقادیر در صورتی قابل دسترسی است که اصطلاحاً ماتریس‌های تک گام انتقال، $P^{(v-1,v)}$ ، n گام انتقال، $P^{(v-1,v-1+n)}$ و بردار مقدار اولیه، P_0 ، استخراج و به کار گرفته شوند. برای انجام این کار، قدم اول تعیین فضای حالت‌های مختلف برای خوردگی است. در اینجا حالت‌های خوردگی به صورت پلکانی به شکل $(l = 0, 1, 2, \dots)$ $C_l = l \cdot \Delta s$ «یک گام خوردگی» است. بنابراین عناصر ماتریس تک گام و n گام انتقال خواهند شد:

$$[P^{(v-1,v)}]_{ij} = \Pr\{C(v) = j \cdot \Delta s \mid C(v-1) = i \cdot \Delta s\} \quad (10)$$

$$[P^{(v-1,v-1+n)}]_{ij} = \Pr\{C[(v-1) + n] = j \cdot \Delta s \mid C(v-1) = i \cdot \Delta s\} \quad (11)$$

لازم به گفتن است که اگر زنجیره مارکوف همگن زمانی باشد (که در اینجا فرض می‌شود که اینچنین است) آنگاه می‌توان نشان داد عناصر ماتریس‌های تک گام و n گام بالا می‌توانند به شکل $[P^{(0,1)}]_{ij} = \Pr\{C(1) = j \cdot \Delta s \mid C(0) = i \cdot \Delta s\}$ و $[P^{(0,n)}]_{ij} = \Pr\{C(n) = j \cdot \Delta s \mid C(0) = i \cdot \Delta s\}$ در آن $C(0) = C_0$ مقدار خوردگی در زمان صفر است نشان داده شوند. آخرین ماتریس به سادگی در این حالت می‌تواند از ضرب n باره ماتریس تک گام انتقال در خودش به دست آید. با استفاده از تعریف بالا امید ریاضی (میانگین) و واریانس زنجیره مارکوف خواهد شد:

$$E[C(v) \mid C_0 = c_0] = \sum_{i=l_0}^{N_{\max}} i \cdot \Delta s [P^{(0,v)}]_{l_0,i} \quad (12)$$

$$Var[C(v) \mid C_0 = c_0] = \sum_{i=l_0}^{N_{\max}} \{i \cdot \Delta s - E[C(v) \mid C_0 = c_0]\}^2 \cdot [P^{(0,v)}]_{l_0,i} \quad (13)$$

که در آنان $N_{\max} = C_{\max} / \Delta s$ و C_{\max} مقدار بیشینه خوردگی به گونه‌ای است که احتمال اتفاق خوردگی بیشتر از آن قابل

خود این امکان را ایجاد می‌کند که تغییرپذیری‌های زمانی در تحلیل در طول زمان در حالی که فرآیند رو به جلو حرکت می‌کند در نظر گرفته شوند. روشن است که این فرآیند همچنین باید منطبق بر خواص فیزیکی خوردگی، مطابق آنچه که در فاز ۴ مدل Melchers (شکل ۱) توضیح داده شد، باشد.

همان‌گونه که پیش‌تر نشان داده شد این قسمت از مدل، خطی بوده و بدین ترتیب مدل استوکستیک پیشنهادی بایستی به گونه‌ای باشد که این خاصیت خطی را انعکاس دهد. برای اقیان این شرط، پیشنهاد می‌شود که تابع چگالی احتمال مشروط گاما (مشروط به حالت جاری $C(v-1) = c$) برای توصیف زنجیره مارکوف استفاده شود:

$$f_{\Delta C(v) \mid C(v-1)}(x \mid c) = \frac{x^{[\frac{\alpha \Delta t}{\beta g(c)} - 1]}}{\Gamma[\frac{\alpha \Delta t}{\beta g(c)}] [\beta g(c)]^{\frac{\alpha \Delta t}{\beta g(c)}}} \cdot \exp\left(-\frac{x}{\beta g(c)}\right) \quad (V)$$

که در آن $\Gamma[\]$ تابع گاما، $g(c)$ تابع حالت جاری و α و β دو مقدار ثابت است. به علاوه، استفاده از پارامتر شکل (یعنی $\frac{\alpha \Delta t}{g[C(v-1)]}$) و پارامتر مقیاس (یعنی $\beta \cdot g[C(v-1)]$) پیشنهادی برای توزیع گاما، مقادیر امید ریاضی و واریانس $\Delta C(v)$ را به شکل زیر ارائه می‌دهند:

$$E[\Delta C(v)] = \alpha \cdot \beta \cdot \Delta t \quad (8)$$

$$Var[\Delta C(v)] = \alpha \cdot \Delta t \cdot \beta^2 g[C(v-1)] \quad (9)$$

روشن است که امید ریاضی نموها برای نیل به رفتار خطی مقدار میانگین فرآیند خوردگی مستقل از حالت جاری $C(v-1)$ است. این استقلال از حالت جاری $C(v-1)$ ، ضرورت داشتن میانگین‌های ثابت نموها $C(v)$ است. برعکس، واریانس نموها که براساس پردازش داده‌ها لزوماً خطی نیست باید چنان انعطاف پذیر باشد که بتواند شکلی افزایشی، کاهشی و یا حتی ثابت به خود گیرد. در فرمول‌بندی حاضر، عبارت $g[\]$ در تابع (V) برای رسیدن به ترکیب مطلوب $Var[\]$ در طول زمان استفاده می‌شود. در اینجا این تابع به شکل $g[C(v-1)] = \exp[\gamma \cdot C(v-1)]$ با احتساب γ به‌عنوان یک ثابت در نظر گرفته می‌شود. کاملاً واضح است که بسته به مقدار و علامت γ ، واریانس نموهای خوردگی می‌توانند گرایش مطلوب را داشته باشند. همچنین حالت خاص $\gamma=0$ واریانس ثابت نموها و در نتیجه واریانس ثابت خوردگی

چشم‌پوشی کردن است ($\Pr[C(v) > C_{\max}] \approx 0$). در عبارات (۱۲ و ۱۳)، مقدار ابتدائی جمع $l_0 = c_0/\Delta s$ است. دلیل این امر بالا مثلی بودن ماتریس تک‌گام انتقال $P^{(0,1)}$ و متعاقب آن ماتریس v گام انتقال $P^{(0,v)}$ است. علت این امر هم آنست که فرآیند $C(v)$ فرآیندی افزایشی بوده و مقادیر بعدی خوردگی در هر گام زمانی نمی‌توانند کوچکتر از مقدار فعلی باشند.

همچنین تذکر داده می‌شود که اگر بردار توزیع احتمال اولیه p_0 (که عناصر آن هر یک احتمال وقوع مقادیر مختلف C_0 را تعریف می‌نمایند) در اختیار باشد آنگاه $E[C(v)]$ و $\text{Var}[C(v)]$ متناظر غیر مشروط را می‌توان محاسبه کرد. از آنجا که در اینجا C_0 یک کمیت تعیینی (ثابت) اختیار شده است این مقادیر همان خواهند شد که مطابق روابط (۱۲ و ۱۳) محاسبه می‌شود.

۳-۵- تخمین پارامترها با استفاده از داده‌های موجود

برای استفاده از رابطه (۷) برای مقاصد عملی، پارامترهای α ، β و γ به شکل مناسبی با استفاده از داده‌های موجود باید تخمین زده شوند. برای شمای مرتبه دوم انتخابی در اینجا، روش ساده کمینه‌سازی تابع حداقل مربعات به کار گرفته می‌شود. براساس این روش تابع یادشده خواهد شد:

$$F = \sum_{i=1}^{N_s} [(\mu_{C(i)|C_0} - \hat{\mu}_i)^2 + (\sigma_{C(i)|C_0}^2 - \hat{\sigma}_i^2)^2] \quad (14)$$

که در آن N_s تعداد نمونه‌ها، $\hat{\mu}_i$ و $\hat{\sigma}_i^2$ به ترتیب میانگین‌ها و واریانس داده‌های موجود در نقاط مختلف زمانی i ($i=1,2,\dots,N_s$) و $\mu_{C(i)|C_0}$ و $\sigma_{C(i)|C_0}^2$ میانگین‌ها و واریانس‌های مدل زنجیره مارکوف در گام زمانی i با فرض معلوم بودن خوردگی در زمان صفر یعنی $C_0 = c_0$ است. عبارات (۱۲ و ۱۳) برای تخمین مقادیر گفته شده استفاده خواهند شد.

۴-۵- تحلیل قابلیت اعتماد

به منظور ارزیابی قابلیت اعتماد یک سیستم تحت اثر خوردگی، گام اول تعریف خرابی است. در اینجا فرض نمایم خرابی زمانی اتفاق می‌افتد که خوردگی ضخامت عضو سازه‌ای به یک مقدار از پیش تعیین شده «ضخامت مجاز» $C_{\text{Allowable}}$ کاهش یابد. بدین ترتیب حالت حدی متناظر به شکل

$$p_{f|C_0}(v) = \Pr[C_{\text{Allowable}} - C(v) \leq 0 | C_0 = c_0] \\ = 1 - F_{C(v)|C_0}(C_{\text{Allowable}}|C_0) \quad (15)$$

که در آن $F_{C(v)|C_0}(\cdot)$ تابع توزیع تجمعی مشروط (CDF) مقدار $C(v)$ با مقدار خوردگی معلوم در زمان صفر است. در این تحلیل مقدار خوردگی اولیه C_0 با استفاده از یک تحلیل اولیه رگرسیون خطی تخمین زده می‌شود.

حال این امکان وجود دارد که مسئله قابلیت اعتماد وابسته به زمان (۱۵) را به شکل یک تحلیل مستقل از زمان با استفاده از CDF مقدار ماگزیم $C(v)$ به جای خود $C(v)$ تعریف نمود. در این حالت:

$$p_{f|C_0}(v) = \Pr[C_{\text{Allowable}} - C_{\max}(v) \leq 0 | C_0 = c_0] \\ = 1 - F_{C_{\max}(v)|C_0}(C_{\text{Allowable}}|C_0) \\ = 1 - \sum_{l=l_0}^{l_{\text{Allowable}}} [P^{(0,v)}]_{l_0,l} \quad (16)$$

که در آن $C_{\max}(v)$ مقدار ماگزیم $C(v)$ در بازه زمانی $[0, v]$ ، $l_{\text{Allowable}} = C_{\text{Allowable}}/\Delta s$ ، $l_0 = c_0/\Delta s$ عنصر $[P^{(0,v)}]_{l_0,l}$ و l ام ماتریس v گام انتقال است. در استخراج رابطه بالا از این واقعیت که $C(v)$ غیرکاهشی بوده و بنابراین مقدار ماگزیم آن در آخرین بازه زمانی یعنی v اتفاق می‌افتد استفاده شده است. از آنجا که C_0 یک کمیت تعیینی فرض می‌شود، $p_{f|C_0}(v)$ بدین ترتیب برابر $p_{f|C_0}(v)$ خواهد بود.

۶- تحلیل داده‌ها و یک نمونه

۶-۱- ترکیب کردن داده‌ها

برای دستیابی به مجموعه‌ای کافی از داده‌ها برای تخمین پارامترهای مدل پیشنهادی، آنچه که در نمونه زیر انجام می‌شود ترکیب داده‌های بخش ۳ با تبدیل آنان به دمای مشترک 12.5°C به روش پیشنهادی بخش ۴ است.

شکل ۳- مقادیر میانگین خوردگی برای فولادهای کم کربن (LCS) و فولادهای با کربن بالا (HCS) برای مناطق کانال پاناما، کلمبو و آکلند در 12.5°C

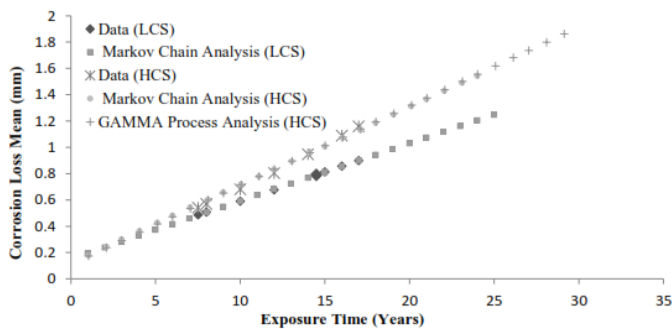


Fig. 3. Mean Corrosion Values of Low Carbon Steels (LCS) and High Carbon Steels (HCS) for Sites Panama Canal, Colombo and Auckland at 12.5°C

شکل ۴- مقادیر انحراف معیار خوردگی برای فولادهای کم کربن (LCS) و فولادهای با کربن بالا (HCS) برای مناطق کانال پاناما، کلمبو و آکلند در 12.5°C

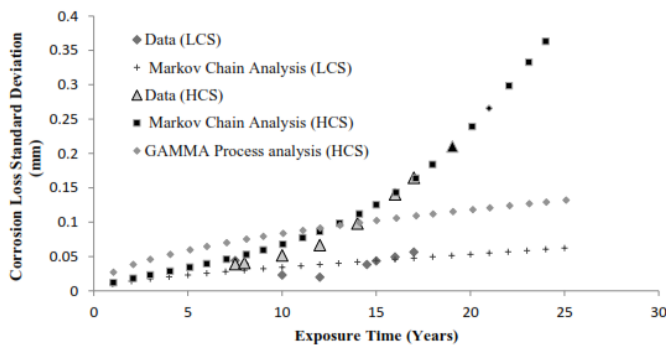


Fig. 4. Standard Deviation of Corrosion values of Low Carbon Steels (LCS) and High Carbon Steels (HCS) for Sites Panama Canal, Colombo and Auckland at 12.5°C

شکل‌های (۳ و ۴)، همچنین نتایج مربوط به کاربرد فرآیند گاما را نشان می‌دهند. اگرچه توافق خوبی با میانگین‌ها ملاحظه می‌شود با این وجود تخمین‌های انحراف معیارهای مدل گاما هماهنگ با مجموعه داده‌ها نبوده و گرایش بسیار متفاوتی دارند.

۳-۶- نمونه‌هایی از تحلیل قابلیت اعتماد

یک خط لوله کشیده شده روی کف دریا در آب‌های با دمای میانگین سالانه 12.5°C را در نظر بگیرید. ضخامت طراحی اولیه دیواره لوله (شامل ذخیره ضخامت خوردگی) به اندازه‌ای است که برای این خط لوله خرابی زمانی اتفاق می‌افتد که ضخامت خورده شده دیواره لوله به $2/5$ میلی‌متر رسیده باشد (بدین ترتیب $C_{\text{Allowable}} = 2.5 \text{ mm}$). با لحاظ عمر مفید خط

برای استفاده در محاسبه قابلیت اعتماد سازه‌ای، بازه زمانی سال‌های 7.5-17.0 برای پوشش تمامی داده‌های مناطق "کانال پاناما، آکلند و کلمبو" انتخاب می‌شود.

۲-۶- تخمین پارامترهای مدل

داده‌های مناطق «کانال پاناما، آکلند و کلمبو» را برای تخمین پارامترهای α ، β و γ در نظر بگیرید. برای داده‌های فولادهای کم کربن، کمیته‌سازی تابع حداقل مربعات (معادله ۱۴)، به مقادیر بهینه $\alpha = 26.068$ ، $\beta = 1.663 \times 10^{-3}$ و $\gamma = 0.789$ منتهی می‌شود.

پیش‌تر توضیح داده شد که مقدار اولیه خوردگی C_0 ، با استفاده از یک تحلیل رگرسیون خطی با شمول تمامی داده‌ها تخمین زده می‌شود. در این تحلیل، تمامی داده‌های خوردگی در مناطق کانال پاناما، آکلند و کلمبو استفاده می‌شود که $C_0 = 0.1579$ را نتیجه می‌دهد.

در یک تحلیل مشابه برای داده‌های مربوط به فولادهای با کربن بالا، نتایج $\alpha = 66.423$ ، $\beta = 9.25 \times 10^{-4}$ و $\gamma = 4.030$ به دست می‌آیند. همچنین $C_0 = 0.1168$ حاصل می‌شود.

با استفاده از پارامترهای بالا در زنجیره مارکوف برای فولادهای کم کربن و فولادهای با کربن بالا، میانگین‌ها و انحراف معیارها در نقاط مختلف زمانی محاسبه می‌شوند. این نتایج در شکل‌های (۳ و ۴) به همراه مقادیر متناظر داده‌ها نشان داده شده‌اند. شکل اول نشان می‌دهد که گرایش منحنی میانگین در مدل پیشنهادی مشابهت زیادی به میانگین داده‌ها دارد. شکل دوم نشان می‌دهد که در مورد انحراف معیارها هر چند در فولادهای کم کربن، این مقادیر بسیار کوچک بوده و کمی بالا و پایین می‌روند، مقادیر متناظر فولادهای با کربن بالا در عین پایداری بیشتر، منحنی‌ای با گرایش افزایشی در طول محور زمان دارند.

به منظور مقایسه نتایج تحلیل، به کار گرفتن فرآیند گاما با همان مجموعه داده‌ها (با فرض $\gamma = 0.0$)، مقادیر $\alpha = 6.684$ و $\beta = 9.417 \times 10^{-2}$ را نتیجه می‌دهد.

مدل‌های استوکستیک پرشی معمولاً خوردگی را در هر نقطه زمانی به‌عنوان جمع نموهای خوردگی در نظر می‌گیرند (معادله ۶)، اگر این نموها مستقل از یکدیگر فرض شود واریانس متوجه $Var[C(t)]$ به طور خطی متناسب با مقدار زمان t و در نتیجه انحراف معیار متناسب با \sqrt{t} خواهد شد. این حالت، موقعی که از فرآیند گاما به‌عنوان مدل استوکستیک فرآیند استهلاك استفاده می‌شود اتفاق می‌افتد. تئوری بالا و مثال ارائه‌شده نشان می‌دهند که این مدل متأسفانه احتمال خرابی را در نقاط زمانی t بالا بعلت یاد شده دست پایین تخمین می‌زند.

۲- در یک حالت کلی، موضوع ترکیب داده‌ها از منابع یا برنامه‌های آزمایشی مختلف، یک موضوع چالشی است. این موضوع ضروری می‌نماید که داده‌ها به گونه‌ای پردازش شود که خروجی‌های این پردازش را بتوان متعلق به یک جمعیت آماری دانست. اصولاً، روش‌هایی مثل آنچه در اینجا انجام گرفت نباید استفاده می‌شدند. با این وجود حقیقت آن است که برنامه‌های آزمایشی خوردگی گذشته، چنان طراحی نشده بوده‌اند که بتوان از آنان اطلاعات نااطمینانی‌ها و تغییرپذیری‌ها برای یک تحلیل مناسب آماری را استخراج نمود.

۳- همان‌گونه که گفته شد شواهدی وجود دارد که آلودگی آب می‌تواند اثر عمده‌ای روی فرآیند خوردگی داشته باشد در این مطالعه داده‌هایی که مظنون به ارتباط آنان با مناطق آلوده می‌رفته است مانند داده‌های منطقه هالیفکس، حذف شده‌اند. اما این احتمال وجود دارد که آلودگی شامل منطقه پلايموث نیز بشود. روشن است که اثر آلودگی روی خوردگی باید در یک مطالعه جداگانه صورت گیرد.

۴- در این مقاله مدل پیشنهادی Melchers استفاده شده است و چون خوردگی سازه‌ها در دراز مدت مد نظر است فاز ۴ آن که رفتاری خطی را برای خوردگی پیشنهاد می‌کند به‌عنوان مدل پذیرفته شده در نظر گرفته شده است. اصولاً این گزینش می‌تواند محل چالش باشد زیرا همان‌گونه که در بخش ۲ گفته شد مدل‌های رقیب دیگری نیز وجود دارند (مانند مدل Soares et al ۱۶) که اصولاً خوردگی در دراز مدت را صفر می‌دانند. به نظر می‌رسد منابع داده‌ها و نیز سازه‌های خاص مورد نظر در آزمایش‌ها می‌تواند، در پیشنهاد این مدل‌ها نقش تعیین کننده‌ای

لوله به اندازه ۲۵ سال، مطلوب تخمین احتمال خرابی در پایان عمرسازه است. به منظور اهداف تعمیراتی، تخمین قابلیت اعتماد سازه برای حالتی که ضخامت خورده شده دیواره خط لوله در سن ۱۵ سالگی به 1.5mm رسیده باشد در نظر است (این به آن معناست که برای سن ۱۵ سالگی سازه $C_{Allowable} = 1.5 \text{ mm}$ است).

با استفاده از داده‌های مناطق «کانال پاناما، آکلند و کلمبو» (لحاظ شده در دوره زمانی سال‌های 7.5-17.0) نتایج زیر به‌دست می‌آیند:

الف) فولادهای کم کربن:

$$P_{f|C_0}(15) = \Pr[C(t = 15 \text{ years}) \geq 1.5 \text{ mm} | C_0 = 0.1579] \\ = \text{ناچیز}$$

$$P_{f|C_0}(25) = \Pr[C(t = 25 \text{ years}) \geq 2.5 \text{ mm} | C_0 = 0.1579] \\ = \text{ناچیز}$$

ب) فولادهای با کربن بالا:

$$P_{f|C_0}(15) = \Pr[C(t = 15 \text{ years}) \geq 1.5 \text{ mm} | C_0 = 0.1168] \\ = 0.4581 \times 10^{-2}$$

$$P_{f|C_0}(25) = \Pr[C(t = 25 \text{ years}) \geq 2.5 \text{ mm} | C_0 = 0.1168] \\ = 0.2941 \times 10^{-1}$$

همچنین برای فولادهای با کربن بالا، به کارگیری فرآیند گاما مقادیر $P_{f|C_0}(25) = 0.2259 \times 10^{-4}$ و $P_{f|C_0}(15) = 0.1104 \times 10^{-4}$ را به‌ترتیب برای $C_{Allowable} = 1.5 \text{ mm}$ و $C_{Allowable} = 2.5 \text{ mm}$ به دست می‌دهد. این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که برای مجموعه داده‌ها احتمال خرابی برای فولادهای کم کربن ناچیز است. برعکس احتمال خرابی برای فولادهای با کربن بالا مقداری کاملاً قابل توجه دارد (همان‌گونه که انتظار هم می‌رفت). همان‌گونه که انتظار می‌رود، برای فولادهای با کربن بالا، که برای آنان تغییرات انحراف معیار با شیب فزاینده در طول زمان، گرایش به به مقادیر بزرگ دارد (و بنابراین γ گرایش به مقادیر بسیار بیشتر از صفر دارد)، مدل فرآیند گاما قادر به هماهنگی با داده‌های موجود نیست و در نتیجه این مدل احتمال خرابی را به شکل قابل توجهی دست پایین نسبت به مدل زنجیره مارکوف به‌دست می‌دهد.

۷- بحث در خصوص نتایج

۱- همان‌گونه که ملاحظه شد انحراف معیارهای خوردگی فولادهای با کربن بالا گرایش افزایشی دارند. از آنجا که

میدانی در درازمدت به دست می آید ندارد.

References

۹- مراجع

- [1] Evans, U.R., "The corrosion and oxidation of metals: scientific principles and practical applications", London: Edward Arnold (Publishers), 1960.
- [2] Frangopol D.M., Kallen M-J and Noortwijk J.M.V., "Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: review and future direction", *prog. StructEngng Mater*, 2004; 6:197-212.
- [3] Pandey MD, Yuan XX, Noortwijk J.M.V., "The influence of temporal uncertainty of deterioration on life-cycle management of structures", *Structure & Infrastructure Eng.*, 2009; 5(2): 145-156.
- [4] Melchers R.E., "Corrosion uncertainty modeling for steel structures", *J Constructional Steel Res.*, 1999; 52:3-19.
- [5] Melchers R.E., "Modeling of marine immersion corrosion for mild and low-alloy steels-Part 1: Phenomenological model", *Corrosion*, 2003, 59: 319-334.
- [6] Melchers R.E., "Modeling of marine immersion corrosion for mild and low-alloy steels-Part 2: Uncertainty estimation", *Corrosion*, 2003, 59: 335-344.
- [7] Melchers R.E and Wells, T., "Models for anaerobic phases of marine immersion corrosion", *Corrosion Science*, 2006, 48: 1791-1811.
- [8] Melchers R.E., "The effect of water pollution on the immersion corrosion of mild and low alloy steels", *Corrosion Science*, 2007, 49: 3149-3167.
- [9] Melchers R.E. and Jeffrey R.J., "Probabilistic models for steel corrosion loss and pitting of marine infrastructure", *Reliability Engineering and System Safety*, 2008; 93:423-432,
- [10] Melchers RE and Jeffrey R., "The critical involvement of anaerobic bacterial activity in modeling the corrosion behavior of mild steel in marine environments, *ElectrochimicaActa*, 2008, 54: 80-85.
- [11] Noortwijk J.M.V., "A survey of the application of Gamma processes in maintenance", *Reliability Engineering and System Safety*, 2009; 94:2-21.
- [12] Kallen M.J. & Noortwijk J.M.V., "Optimal maintenance decisions under imperfect inspections", *Reliability Engineering and System Safety*, 2005, 90:177-185.
- [13] Hardfield, R.A. and Main S.A., "Corrosion of iron and steel", *Journal of Institute of Civil Engineers*, 1936, 3: 3-126.
- [14] Newton Friend, J., *Deterioration of structures of timber, metal, and concrete exposed to the action of sea-water*, eighteen report of the committee of the institution of civil engineers, ICE, 1940.
- [15] Southwell, C.R. and Alexander, A.L., "Corrosion of Metals in tropical waters; Structural ferrous metals", 1970, *materials protection*, 9(1): 14-23.
- [16] Qin Sh. & Cui W., "Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements" 2003; *Marrine Structures*, 16: 15-34.

بازی نمایندند. از آنجا که منابع استفاده در این مقاله رفتار نزدیک تری را با آنچه مدل Melchers پیشنهاد می نماید نشان می دهند، در اینجا از این مدل استفاده شده است.

۵- در اینجا زنجیره مارکوف برای مدل کردن احتمالاتی فرآیند خوردگی پیشنهاد شده است. این زنجیره اصولاً مدلی احتمالاتی را ارائه می دهد که در آن هر نمو در مقدار خوردگی به "حالت جاری" آن وابستگی پیدا می کند. در این مدل از وابستگی مقدار نموها به "زمان جاری" به علت لحاظ زنجیره مارکوف همگن چشم پوشی شده است و وابستگی به حالت جاری با تابع $g(c)$ (رابطه ۷ ملاحظه شود) به شکل نمایی پیشنهاد شده است. اگر چه در این مقاله، خوشبختانه فرض های انجام گرفته به خوبی توانسته اند رفتار داده های میدانی را توصیف نمایند، اما باید در یک حالت کلی فرض های انجام شده را مطابق شرایط موجود تعدیل نمود.

۸- نتیجه گیری

مدلی که در مطالعه حاضر پیشنهاد شد از یک زنجیره مارکوف برای نشان دادن فرآیند اتلاف خوردگی فولادهای غرقاب دریایی در طول زمان به همراه نااطمینانی های مربوطه استفاده می کند. برخلاف پژوهش های قبلی که مبتنی بر مدل های تجربی خوردگی است، این مطالعه مبتنی بر قسمت درازمدت مدل خوردگی است که پیش تر به وسیله Melchers پیشنهاد شده و با استفاده از داده های واقعی میدانی کالیبره شده است.

داده های طولانی مدت خوردگی فولادهای غرقاب، که از یک محیط واقعی دریایی اخذ شده باشند نادر است. در اینجا داده های مربوط به مشاهده میدانی خوردگی دریایی فولادهای کم کربن و فولادهای با کربن بالا، دریافت شده از سوابق پژوهشی، استفاده شده، و در یک دمای مشترک کالیبره شدند، نشان داده شد که این مدل جدید قادر است با داده های واقعی هماهنگی مناسبی را به ویژه در مورد میانگین ها و انحراف معیارها داشته باشد.

برعکس، نشان داده شد که مدل فرآیند گاما به علت فرض استقلال نمو های خوردگی در طول زمان، همیشه هماهنگی مناسبی را در خصوص انحراف معیار با آنچه که از داده های

Reliability of Marine Steel Structures Against Corrosion

M. R. Moarefzadeh¹

1. Assistant Professor. The University of Imam Hossein

mmrfzd@ihu.ac.ir

Abstract

Reliability analysis of steel structures subject to seawater corrosion is of considerable interest for coastal and offshore marine steel structures. These are often very expensive and have high consequential costs and implications should failure occur. Since corrosion of steel structures causes deterioration of structural strength, usually gradually with time, safety assessment is of considerable importance for new structures (those in the design stage) and also for those which are already in operation.

Marine corrosion is a complex phenomenon and subject to various influencing factors each of which has its own inherent uncertainty. In any safety assessment, in principle, the uncertainty of each factor should be studied and taken into account. Since such an action is too difficult, in practice some test programs are normally conducted and all uncertainties caused by different factors are assumed to be included in the relevant corrosion measurements.

In addition, in any corrosion reliability analysis for steel structures exposed to seawater, two different models must be taken into consideration: (1) A physical model indicating general corrosion behaviour as a function of exposure time and (2) A stochastic model describing probabilistic treatment of uncertainties observed in real corrosion data. The first has been traditionally treated by invoking a simple power law and in particular a linear relationship. However, using realistic long-term data, validity of such a model has recently been challenged. The second model (i.e. probabilistic modelling of corrosion process) has been dealt with in literature in different approaches, including either taking the corrosion annual rate as a random variable or proposing a stochastic process such as Gamma process. This is usually proposed as a general structural deterioration process. The second approach provides, doubtlessly, better treatment of corrosion uncertainties; however it can be shown unfortunately that the Gamma process is unable to reflect the corrosion uncertainties in some circumstances.

In this paper, two sets of corrosion data collected in different seawaters around the world with different temperatures are used. This requires processing of data in such a way that the data sets remain consistent with each other and that outcome is data that can be considered as belonging to one statistical population. Herein, first, a simple algorithm is proposed to transform the whole data to one common temperature. Second, a novel Markov-chain based model is developed which meets long term second-order corrosion statistics (i.e. means and standard deviations of corrosion losses). It is based on a corrosion model that previously has been calibrated extensively to field observations of corrosion and to literature-reported realistic data. Although actual long-term field observations of marine corrosion of steel are scarce, it is shown that particularly for the standard deviation the new model is well capable to be consistent with the long-term data.

It is noted that herein, only the corrosion data collected in marine immersion zones are considered (i.e. those taken in splash zones and atmospheric zones are not considered). Further, only general corrosion (i.e. not pitting corrosion) is accounted for herein. These two issues, obviously, have to be addressed separately.

Keywords: corrosion, seawater, probabilistic model, stochastic process, Markov Chain.