

Structural Life-Cycle Cost Analysis for Variations of Flexural Capacity in RC Beams with Corroded Rebars

Fatemeh Aslani¹, Mehdi Dehestani^{2*}

1- Graduate Student, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

This paper presents an approach for evaluating structural resistance degenerate due to reinforcement corrosion and for predicting future structural performance during the service life of the deteriorating reinforced concrete beams due to corrosive environments. A finite element method is adopted for envisioning the nonlinear flexural behavior of intact and corroded RC beams based on Ultimate strength design method and Load and resistance factor design method approaching this aim, the impact of corrosion of embedded reinforcing element on the flexural capacity of corroded reinforced concrete structures is estimated. A stochastic degeneration model based on gamma process is utilized to assess the probability of failure of structural flexural capacity over the lifetime. Optimal repair planning and maintenance strategies throughout the service life are circumscribed by evaluating the cost for maintenance and the risk of structural failure. Based on the conclusions from the numerical model including two RC beams subjected to reinforcement corrosion the following results are drawn: The permissible deterioration limits that describe the thresholds of the deterioration for the safety and repair requirement, held major effects on the probability of failure. The results from the worked example show that the proposed method can afford reliable predictions for structural strength deterioration and efficiently implement a risk-cost-benefit optimized repair procedure through the service life of the structure affected by bar corrosion. The lifetime distribution increases 5 years for LRF method and 3.5 years for USTD method while allowable limits enlargement 10%. The lifetime distribution extends 5 years for LRF method and 3.5 years for USTD method while allowable limits increase 10%.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 July 2019

Revise Date: 16 August 2019

Accept Date: 02 October 2019

Keywords:

Rebar corrosion;
Life cycle cost;
Reinforced concrete;
Reliability analysis;
Finite element.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.195618.1908

*Corresponding author: Mehdi Dehestani

Email address: dehestani@gmail.com

تحلیل هزینه سازه ای در چرخه عمر برای تغییرات ظرفیت خمشی تیرهای بتن آرمه در

معرض خوردگی میلگرد

فاطمه اصلانی^۱، مهدی دهستانی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

۲- دانشیار گروه سازه و زلزله دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

چکیده

شرایط مهاجم محیط های خورنده به علت حمله یون های مخرب سبب خوردگی بیش از حد میلگردهای فولادی مدفون در بتن مسلح می شوند که موجب کاهش سطح مقطع فولاد و زوال مقاومت سازه می گردد. تیرهای بتنی در شرایط خوردگی انواع مختلفی از عدم قطعیت در فازهای خوردگی در طول عمر خدمت پذیری دارند، که بایستی مطابق با یک مدل احتمالاتی مناسب در تحلیل قابلیت اعتماد لحاظ گردند. هرچند که بروز پدیده خوردگی غیر قابل اجتناب می باشد، اما می توان با انتخاب روش های مناسب و نیز بهره گیری از نتایج آنالیز های هزینه چرخه عمر، ضمن به تاخیر انداختن خوردگی، هزینه های تعمیر و نگهداری را نیز به حداقل رساند. در این نوشتار در ابتدا مطالب مرتبط با نحوه مدلسازی خوردگی اعمالی در روش اجزا محدود و نتایج حاصل از تغییرات ظرفیت در میزان درصد خوردگی های متفاوت برای تیرهای طراحی شده از دو روش طراحی حالت حدی و طراحی مقاومت، بررسی می شوند. در ادامه ضمن در نظر گرفتن ظرفیت خمشی به عنوان متغییر تصادفی در محاسبه احتمال کاهش ظرفیت مقاطع خورده شده که از طریق تعریف فرایند گاما صورت می پذیرد، به بررسی و بهینه یابی هزینه های ناشی از خرابی در چرخه عمر خدمت پذیری تیرهای بتن مسلح از طریق فرایند تجدید، پرداخته می شود. نتایج حاکی از آن هستند که حدود مجاز خرابی که تعیین کننده آستانه انجام تعمیرات در تیرهای مدلسازی شده می باشند تاثیر بسزایی در احتمال خرابی دارند به طوری که با افزایش ۱۰٪ حدود ۵ سال برای طراحی حالت حدی و ۳/۵ سال برای روش طراحی مقاومت، احتمال وقوع خرابی افزایش می یابد. مقدار بهینه زمان تعمیرات نیز در حدود مجاز خرابی در تیر طراحی شده از روش طراحی مقاومت کمتر از زمان متناظر در روش طراحی حالت حدی می باشد.

کلمات کلیدی: خوردگی آرماتور، هزینه چرخه عمر، بتن مسلح، تحلیل قابلیت اعتماد، اجزا محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2019.195618.1908	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.195618.1908	۱۴۰۰/۰۶/۳۰	۱۳۹۸/۰۷/۱۰	۱۳۹۸/۰۷/۱۰	۱۳۹۸/۰۵/۲۵	۱۳۹۸/۰۵/۰۲
مهدی دهستانی dehestani@nit.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

امروزه بتن به عنوان یکی از پر مصرف‌ترین و رایج‌ترین مصالح ساختمانی جایگاه ویژه‌ای را در ساخت و سازه‌ها دارا می‌باشد. علارقم عملکرد مطلوب بتن در بسیاری از سازه‌ها، خوردگی آرماتور^۱ در سه دهه گذشته مهم‌ترین مساله دوام بتن در محیط‌های خورنده شدید و حتی متوسط بوده است [۱]. از انواع خوردگی می‌توان خوردگی ناشی از اکسیداسیون، خوردگی ناشی از یون کلر و حمله سولفاتی را نام برد. خوردگی آرماتورهای فولادی مدفون در بتن یکی از عواملی است که دوام سازه‌های بتنی را تهدید می‌کند [۲]. این آسیب‌ها را می‌توان به دو گروه سازه‌ای و غیر سازه‌ای تقسیم بندی کرد؛ در این بین آسیب‌های سازه‌ای به علت کاهش ضریب اطمینان سازه در برابر بارهای وارده از اهمیت بیش‌تری نسبت به آسیب‌های غیرسازه‌ای، برخوردار است [۳]. این آسیب‌ها به‌طور عمده شامل ترک خوردگی و پوسته پوسته شدن پوشش سطحی بتن و زایل شدن لایه محافظ میلگردها که منجر به کاهش سطح مقطع و همچنین تغییر در مشخصات مکانیکی فولاد می‌شود، می‌باشد [۴]. خوردگی آرماتور بر بسیاری از سازه‌های بتنی، حتی آنهایی که به تازگی احداث شده‌اند صدمات جدی وارد ساخته و آنها را متحمل هزینه‌های گزافی جهت مرمت و مسائل مرتبط با آن ساخته است [۵].

در طراحی و مقاوم‌سازی سازه‌های بتن آرمه، تخمین قابلیت اطمینان تغییرات و زوال در رفتار سازه حائز اهمیت است. تغییرات در مشخصات مکانیکی مصالح در طول زمان، می‌تواند به دلیل حملات شیمیایی، فیزیکی و محیطی در طول مدت خدمت‌رسانی سازه باشد [۶]. این امر به نوبه خود موجب آن می‌شود که سازه‌ها عمر مفید خود را اغلب خیلی زودتر از آنچه برایشان طراحی شده از دست بدهند و همچنین منابع مورد نیاز برای نگهداری و بازسازی در طول زمان را افزایش می‌دهد [۷]. بدین ترتیب، نگهداری و مدیریت خوردگی سازه‌های بتن مسلح باعث تبدیل شدن به یک موضوع جهانی و همه‌گیر برای مهندسان و کارفرمایان شده است. امروزه مسأله خوردگی و هزینه‌های مرتبط با آن بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است به عنوان نمونه انجمن ملی مهندسی خوردگی هزینه خوردگی بتن‌های مسلح در امریکا را سالانه ۱۲۱ بیلیون دلار اعلام کرده است [۸]. این رقم تنها در اروپای غربی در حدود ۱ بیلیون دلار تخمین زده شده است [۹]. در ایران نیز هر ساله میزان قابل توجهی از سرمایه ملی صرف مسائل مربوط به خوردگی می‌شود که طبق نظر کارشناسان در حدود ۱٪ از تولید ناخالص ملی را به خود اختصاص می‌دهد که سهم قابل توجهی از این هزینه‌ها مربوط به استفاده از بتن مسلح در محیط‌های مهاجم است [۱۰]. تحقیقات و بازبینی سازه‌ها خصوصاً در باب سازه‌هایی که در مناطق ساحلی و گرمسیری ساخته شده‌اند، نشان می‌دهد خوردگی آرماتورها یکی از خطرناک‌ترین عوامل آسیب است که تأثیرات زیانباری بر مقاومت، سختی، شکل‌پذیری، ظرفیت خمشی و تغییر شکل اعضا در سازه بتنی دارند [۱۱]. السیمانی و همکاران آزمایش کشش مستقیم را روی نمونه‌های بتن با مقادیر درصد خوردگی‌های متفاوت انجام دادند و اثرات منفی درصد‌های بالای خوردگی را بروی تنش پیوستگی فولاد و بتن مشاهده کردند [۱۲]. مانگات و الجارف با مقایسه بین نمونه‌های با مقادیر درصد خوردگی‌های متفاوت، رابطه‌ای بین کاهش مقاومت خمشی تیر و درصد خوردگی و زمان پس از شروع خوردگی آرماتور طولی بیان کردند [۱۳]. اینکی و همکاران اثرات خوردگی حفره‌های آرماتورهای طولی ستون بر رفتار سازه بتن مسلح را مورد مطالعه قرار دادند. آنها تأثیر خوردگی حفره‌ای بر کاهش سطح مقطع آرماتور و هم چنین کاهش طول مفصل پلاستیک را در این مطالعه مورد واکاوی قرار دادند. آنالیز لنگر-انحنای تحت روش‌های مختلف خوردگی حفره‌ای نمایانگر کاهش لنگر نهایی مقطع و عدم تغییر در انحنای نهایی مقطع بود [۱۴]. معالج و همکاران با مطالعه بر روی نمودارهای نیرو-تغییر مکان سه تیر بتن مسلح تحت بارگذاری مشخص، تأثیرات خوردگی و برخی ترکیبات خاص بتن در کاهش اثرات نامطلوب خوردگی آرماتور را مورد تحقیق قرار دادند [۱۵]. ا و همکاران تأثیر خوردگی روی عملکرد لرزه‌ای ۹ نمونه تیر بتنی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد با افزایش درصد خوردگی، شکل‌پذیری، ظرفیت چرخش مفصل پلاستیک و ظرفیت جذب انرژی تیرها ابتدا اندکی افزایش و سپس کاهش می‌یابند [۱۶].

برای ارزیابی اثرات تخریبی ناشی از خوردگی سازه‌ها بررسی پارامترهای متفاوت پیشنهاد شده است. توجه به ظرفیت مقاطع در حین خوردگی و در طول زمان، نیاز به روشی قابل اطمینان برای تعیین عمر مفید خدمت‌پذیری دارد و امکان محاسبه تعمیرات و بهسازی

¹ Corrosion of steel reinforcement

احتمالی در آن را مشخص می‌نماید. متغییر بودن پارامتر ظرفیت خمشی با زمان موجب این امر می‌شود که بتوان سطح هزینه‌های مطلوب را مشخص نمود و مقدار بهینه آن را تعیین کرد [۱۷].

نیاز به استراتژی‌های نظارتی سیستماتیک و تکنیک‌های ارزیابی شرایط مبتنی بر ریسک برای پیش‌بینی بهتر اینکه سازه تا چه حد می‌تواند در برابر خرابی‌های ایجاد شده ناشی از خوردگی، از ظرفیت خود استفاده کند، وجود دارد. ادغام روش‌های ارزیابی عملکرد سازه‌ای و تکنیک‌های تحلیل قابلیت اطمینان وابسته به زمان دارای پتانسیل فوق‌العاده‌ای در ارائه استراتژی‌های نگهداری مقرون به صرفه، در سازه‌های مورد بهره‌برداری می‌باشد [۱۸]. ساخت بنادر عظیم در حاشیه خلیج فارس و هزینه‌های کلان اختصاص داده شده در این بخش و همچنین شرایط محیطی بسیار مخرب این منطقه برای سازه‌های بتنی به علت دما و رطوبت زیاد و یون‌های محلول در آب آن، این الزام را بوجود می‌آورد که در راستای طراحی سازه‌های بادوام و همچنین مدیریت و نگهداری پس از ساخت، ابزاری برای بررسی کمی دوام سازه‌های بتن مسلح در این مناطق در دست باشد. مدل‌هایی بر اساس برآورد عمر بهره‌برداری یکی از این قبیل ابزارها بوده و در صورت برخورداری از صحت و دقت مناسب می‌توانند، نقش بسیار مهمی در کاهش هزینه‌های طراحی، تعمیرات و نگهداری ایفا کنند [۱۹].

بنابراین هدف این نوشتار، بررسی کاهش ظرفیت خمشی مقاطع بتن مسلح تحت خوردگی در طول زمان و درصدهای متفاوتی از خوردگی در طول عمر خدمت‌پذیری می‌باشد؛ همچنین به بررسی روشی برای بهینه‌سازی استراتژی نگهداری با استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان وابسته به زمان و تکنیک‌های تجزیه و تحلیل هزینه‌های چرخه عمر پرداخته می‌شود. به منظور بهینه‌سازی استراتژی تعمیر و نگهداری که در اینجا به عنوان زمان تعمیر ارائه شده است، مدل تعمیر و نگهداری براساس معیارهای متوازن هزینه خطر استفاده شده است. جهت بررسی تیرها تحت خمش، از نرم‌افزار اجزا محدود^۲ استفاده شده است خوردگی وارد بر میلگردها به صورت المان مدفون و با کاهش خواص مکانیکی میلگردها در نرم‌افزار شبیه‌سازی گردید. رفتار خمشی تیرها این بار براساس عملکرد مورد ارزیابی قرار گرفته شده و کاهش ظرفیت خمشی به عنوان متغییر تصادفی در محاسبه احتمال وقوع خرابی در نظر گرفته شده است. از فرایند گاما به منظور مدل‌سازی روند کاهش ظرفیت خمشی در طول چرخه عمر سازه استفاده گردید و همچنین هزینه‌های مربوط به وقوع خرابی با مدل فرایند تجدید به منظور بهینه‌سازی استراتژی‌های نگهداری، محاسبه گردید.

۲- اضمحلال ناشی از خوردگی آرما تورها

۲-۱- فرایند زوال^۳

یکی از متداول‌ترین آسیب‌های وارد بر بتن مسلح، خوردگی است که بر هندسه و رفتار میلگرد تاثیر می‌گذارد. فولادهای مدفون در بتن مسلح در طول عمر مفید سازه توسط پوشش بتن روی میلگرد محافظت می‌شوند، در صورتی که عوامل مهاجم مانند یون‌های کلراید و یا کربن‌دی‌اکسید به درون بتن انتشار یابند، پس از مدتی عملکرد محافظتی این لایه کاهش یافته و شرایط خوردگی میلگرد فراهم می‌شود [۲۰]. خوردگی فلز به دو صورت در فولاد شکل می‌گیرد، خوردگی یکنواخت که در کل سطح فلز با ضخامت تقریباً یکسان پخش می‌شود و یا خوردگی حفره‌ای که در نواحی جداگانه در سطح فلز شکل می‌گیرد [۲۱]. فرایند خوردگی در بتن بوسیله روابط الکتروشیمی مدل می‌شود و میزان خوردگی به صورت درصد کاهش جرم فولاد نسبت به جرم اولیه و یا کاهش سطح مقطع میلگرد نسبت به سطح مقطع اولیه آن بیان می‌شود.

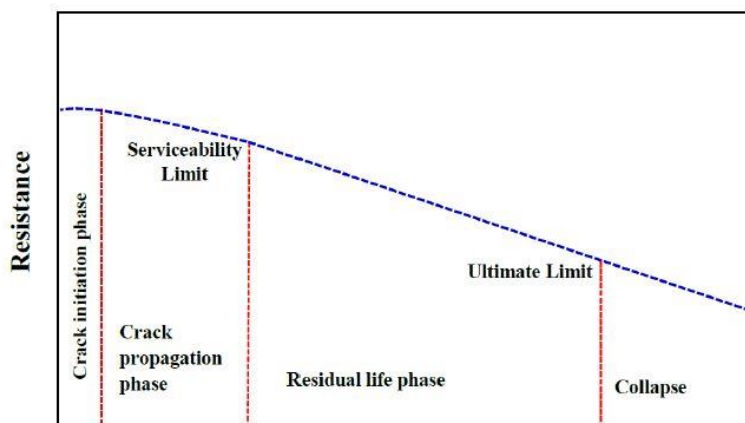
روند کاهش مقاومت در سازه‌های بتن مسلح که تحت خوردگی قرار گرفته‌اند در شکل ۱ بیان شده است. در طی فرایند خوردگی سه فاز دوره شروع خوردگی، دوره شروع ترک خوردگی و انتشار ترک و دوره عمر باقیمانده در نظر گرفته می‌شود. در مرحله اول با تجمع ذرات یون‌های خورنده بر سطح فولاد، لایه محافظ روی میلگرد تخریب شده و میلگرد در آستانه خوردگی قرار می‌گیرد. در فاز دوم واکنش خوردگی آغاز می‌گردد و محصولات خوردگی در فضای خالی حفرات بین میلگرد و بتن جای می‌گیرند به عبارتی واکنش خوردگی آغاز شده

^۲ Abaqus

^۳ Deterioration

و با کاهش سطح مقطع میلگرد، محصولات خوردگی گسترش می‌یابند. همچنین در ادامه محصولات خوردگی تنش رو به رشدی را به بتن اطراف وارد می‌کنند که در نهایت منجر به ترک خوردن کاور بتن می‌گردد.

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در فاز اولیه مقاومت سازه‌ای تقریباً برابر با ظرفیت خالص اولیه می‌باشد. در فاز دوم مقاومت سازه‌ای به تدریج کاهش می‌یابد تا در فاز سوم میزان نرخ کاهش مقاومت شتاب یافته و منجر به فروپاشی سازه می‌شود [۲۲].



Corrosion process

شکل ۱: زوال ظرفیت سازه‌ای در سازه‌های بتن مسلح تحت خوردگی آرماتورها [۲۲]

۲-۲- مدل خوردگی آرماتور

کاهش قطر میلگرد در اثر خوردگی، کاهش سطح مقطع آنرا به دنبال خواهد داشت و نتیجتاً نقطه‌ای که کمترین سطح مقطع را دارد، زودتر به نقطه تسلیم می‌رسد. مطابق با رابطه (۱) هم‌زمان با به تسلیم رسیدن میلگرد، تنش اعمالی در سطح مقطعی معادل سطح مقطع اولیه میلگرد، کاهش می‌یابد.

$$f_y^* \cdot A_{sn} = f_{sy}' \cdot A_s \quad (1)$$

بنابراین مطابق رابطه (۲) تنش تسلیم میلگرد که در ظرفیت خمشی ثابت، کاهش می‌یابد، قابل محاسبه می‌باشد [۲۳].

$$f_{sy}' = \frac{A_{sn}}{A_s} f_y^* \quad (2)$$

که در آن f_{sy}' تنش تسلیم میلگرد خورده شده، A_s سطح مقطع اولیه، A_{sn} سطح مقطع باقیمانده میلگرد و f_y^* تنش تسلیم میلگرد مدفون در بتن است. با داشتن درصد خوردگی مقطع، سطح مقطع باقیمانده میلگرد مطابق روابط (۳) تا (۵) محاسبه می‌گردد [۲۴].

$$\phi_r(\eta) = \phi_0 - \alpha x(\eta) \quad (3)$$

$$x(\eta) = \frac{\phi_0}{\alpha} (1 - \sqrt{\eta}) \quad (4)$$

$$A_{sn} = \frac{\pi \cdot (\phi_r(\eta))^2}{4} \quad (5)$$

که در آن η بیانگر مقادیر درصد خوردگی، ϕ_0 قطر آرماتور در حالت قبل از خوردگی، $\phi_r(\eta)$ قطر آرماتور خورده شده، α ضریب نفوذ و برای خوردگی یکنواخت مقدار ثابت ۲ می باشد [۲۵]. کرنش تسلیم میلگرد خورده شده مطابق رابطه (۶) محاسبه می شود.

$$\varepsilon'_{sy} = \frac{f'_{sy}}{E_s} \quad (6)$$

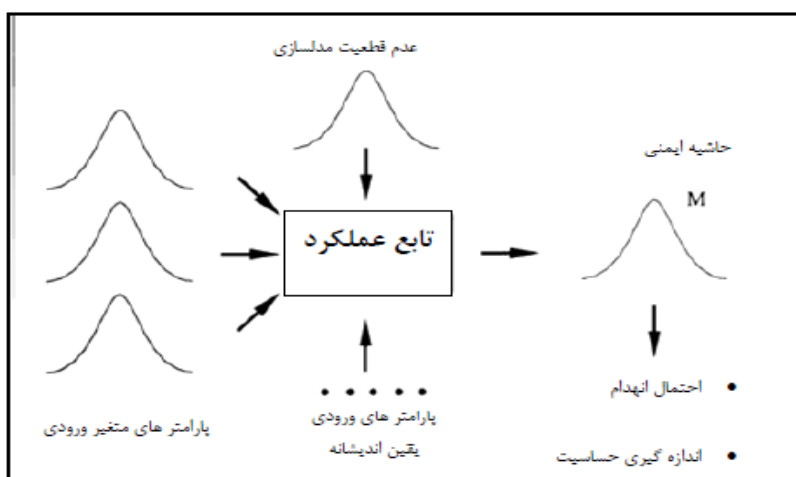
که در آن E_s مدول الاستیسیته می باشد. مقدار کرنش نهایی میلگرد طبق رابطه (۷) بیان می گردد.

$$\varepsilon'_{su} = (1 - 0.05 \eta) \varepsilon_{su} \quad (7)$$

که در آن که در آن ε_{su} کرنش نهایی میلگرد سالم و η درصد خوردگی میلگرد است.

۳- آنالیز قابلیت اعتماد سازه

به دلیل ماهیت تصادفی بار، ماده و متغیرهای اضمحلال، عملکرد سیستم‌های سازه‌ای (که به این متغیرها وابسته است) نیز یک متغیر تصادفی است. عملکرد این سیستم‌ها برحسب قابلیت اعتماد یا شاخص ایمنی آن بیان می شود. به طور کلی، قابلیت اعتماد سیستم یا یک المان سیستم به معنی احتمال ارضا اهداف خاص عملیاتی یا طراحی می باشد [۲۶]. شرح شماتیکی از آنالیز قابلیت اعتماد به عنوان یک مسئله دارای ورودی و خروجی در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲: طرح شماتیک روند آنالیز قابل اعتماد [۲۶]

تابع حالت حدی یا حاشیه ایمنی، M با استفاده از رابطه (۸) بیان می شود.

$$M(t) = R(t) - S(t) \quad (8)$$

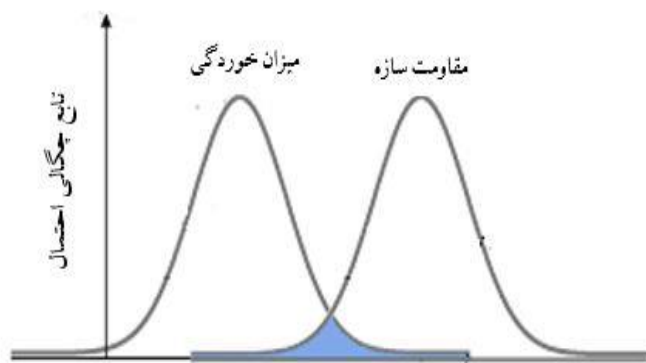
وقتی $M(t) > 0$ است حالتی را بیان می کند که سیستم در زمان t داده شده ایمن است و $M(t) < 0$ انهدام را بیان می کند و $M(t) = 0$ حالت حدی بین ایمنی و انهدام است. $R(t)$ و $S(t)$ به ترتیب تابع وابسته به زمان مقاومت و پاسخ سازه را بیان می کند. لازم به ذکر است که انهدام در یک حالت حدی به معنای انهدام سازه ای نیست. انهدام به موقعیتی اطلاق می شود که عملکرد سازه از یک حالت حدی از پیش تعیین شده تجاوز می کند. به طور مثال اگر غلظت کلر در سطح آرماتور از غلظت بحرانی کلر تجاوز کند آغاز خوردگی آرماتور ها به عنوان "انهدام"^۴ تعبیر می شود.

^۴ Failure

۳-۱- روش تحلیل آماری خرابی ناشی از خوردگی

احتمال خرابی یک عضو سازه‌ای را می‌توان بر اساس مقدار همپوشانی تابع توزیع احتمال دو متغیر تصادفی (R) و (S) و با استفاده از تابع شرایط حدی معادله $g(R, S) = R - S$ مطابق رابطه (۹) به دست آورد. مطابق با شکل ۳ می‌توان بیان داشت که خرابی یک سازه در معرض شرایط خوردنده هنگامی اتفاق می‌افتد که میزان خوردگی از مقاومت سازه تجاوز کند [۲۷].

$$P_f [S > R] = \iint_{s-r>0} f_{S,R}(s, r) ds dr \quad (9)$$



شکل ۳: مقدار همپوشانی میزان خوردگی و مقاومت سازه [۲۷]

که در آن، P_f احتمال خرابی^۵ سازه و $f_{S,R}(s, r)$ تابع چگالی احتمال توام متغیرهای میزان خوردگی و مقاومت و $s - r > 0$ ناحیه خرابی می‌باشد.

تعیین احتمال خرابی با استفاده از رابطه (۹) در مسائل پیچیده مهندسی با چندین متغیر تصادفی کار بسیار مشکلی می‌باشد. از این رو، از روش‌های قابلیت اعتماد از جمله، اولین مرتبه دومین ممان^۶، روش اولین مرتبه قابلیت اعتماد^۷ و روش‌های شبیه‌سازی جهت برآورد احتمال خرابی می‌توان استفاده نمود [۲۸].

۳-۲- مدل‌سازی احتمالاتی کاهش ظرفیت و وقوع خرابی

برای مدل‌سازی میزان خرابی‌های ناشی از خوردگی در طی زمان، استفاده از روش‌های احتمالاتی به واسطه در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های سازه‌ای، کاربردی و مناسب هستند. با افزایش خوردگی میلگردهای فولادی، ترک خوردگی در کاور بتن گسترش می‌یابد و در نهایت ظرفیت باربری ساختمان‌های بتنی خورده شده به سطح غیر قابل قبولی نزول پیدا می‌کند. بدین ترتیب می‌توان ظرفیت خمشی را مطابق رابطه (۱۰) به عنوان متغیر تصادفی (S) برای مدل‌سازی احتمالاتی خرابی ناشی از خوردگی در نظر گرفت [۲۲].

$$S = (M_{u0} - M_{ux}(t)) / M_{u0} \quad (10)$$

که در آن M_{u0} ظرفیت خمشی اولیه تیر بتنی قبل از خوردگی (سالم) و $M_{ux}(t)$ ظرفیت خمشی تیر بتنی در درصد خوردگی‌ها متناظر با زمان‌های متفاوت است.

فرایند گاما به طور فزاینده‌ای برای مدل‌سازی روند احتمالاتی خرابی‌های ناشی از خوردگی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۹]. این روند یک فرایند تصادفی فزاینده غیر منفی مستقل است که به صورت تابعی با توزیع گاما و میانگین معین از میزان خرابی‌ها می‌باشد و

⁵ Failure probability

⁶ First-order second moment

⁷ First order reliability method

افزایش متغیر تصادفی S در هر فاصله زمانی توزیع گاما را دنبال می‌کند به دلیل ماهیت تصادفی کاهش ظرفیت خمشی مقطع بتن مسلح در طول دوره بهره‌برداری چرخه عمر از این فرایند در این تحقیق استفاده شده است.

طبق تعریف فرایند گاما، تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی S انتخاب شده در زمان t ($t \geq 0$) به صورت رابطه (۱۱) بیان می‌گردد [۲۹].

$$f_{S(t)}(S) = Ga(S|\eta(t), \lambda) = \frac{\lambda^{\eta(t)}}{\Gamma(\eta(t))} S^{\eta(t)-1} e^{-\lambda S} \quad (11)$$

که در آن پارامتر مقیاس از روش حداکثر احتمال با به حداکثر رساندن لگاریتم تابع احتمال بدست می‌آید و $\Gamma(\eta(t))$ تابع گاما می‌باشد که از رابطه (۱۲) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\Gamma(\eta(t)) = \int_0^{\infty} v^{\eta(t)-1} e^{-v} dv \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) $\eta(t)$ تابع شکل می‌باشد و از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$\eta(t) = \lambda S(t) \quad (13)$$

احتمال خرابی ناشی از کاهش ظرفیت خمشی در تیرهای بتن مسلح در طول زمان مطابق رابطه حدی (۱۴) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} Pr\{t \geq T_l\} &= pr\{S(t) \geq S_l\} \\ &= \int_{S=S_l}^{\infty} f_{S(t)}(S) dS = \frac{\Gamma^u(\eta(t), S_l \lambda)}{\Gamma(\eta(t))} \end{aligned} \quad (14)$$

که در آن $\Gamma^u(\eta(t), x)$ حد بالای تابع گامای ناقص^۸ برای مقادیر $x \geq 0$ و $\eta(t) > 0$ است که مطابق رابطه (۱۵) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\Gamma^u(\eta(t)) = \int_{v=x}^{\infty} v^{\eta(t)-1} e^{-v} dv \quad (15)$$

در رابطه (۱۲) S_l نشان دهنده بیشترین حدود مجاز کاهش ظرفیت خمشی است که آستانه‌ای برای الزامات ایمنی و نگهداری در سازه‌های بتن مسلح می‌باشد. با توجه به تعریف فوق الذکر برای محاسبه احتمالاتی خرابی‌های ناشی از خوردگی در سازه‌های بتن مسلح احتمال خرابی در i امین بازه زمانی طبق رابطه (۱۶) محاسبه می‌گردد.

$$p_i = P_f(t_i) - P_f(t_i - 1) \quad (16)$$

۵- برآورد احتمالاتی هزینه‌های خرابی و نگهداری بهینه

مدل پیش‌بینی عمر سرویس در سازه‌های بتن‌آرمه می‌تواند احتمال وقوع آسیب در دوره‌های خاص زمانی را نشان دهد اما قابلیت پیش‌بینی اینکه چگونه چنین آسیب‌هایی بر راهبردهای مدیریت سازه تاثیر می‌گذارد و چه اقداماتی در یک زمان پیش‌بینی شده باید انجام گیرد تا سازه‌ای خدمت‌پذیر و قابل بهره‌برداری مطابق استانداردها و با حداقل هزینه داشته باشیم، را ندارد. در این تحقیق از یک مدل هزینه چرخه عمر احتمالاتی وابسته به زمان استفاده شده است. هزینه چرخه عمر ترکیبی از هزینه‌های اولیه ساخت و ساز، بازرسی‌ها،

⁸ upper incomplete gamma function

نگهداری، جایگزینی و بهسازی، و وقوع شکست در طی عمر بهره‌برداری و سرویس پذیری است. استراتژی‌های تعمیر بسته به خط مشی که کارفرمایان در نظر می‌گیرند متفاوت است. بازرسی‌های منظم و برنامه ریزی شده اطلاعات بروز شده‌ای را برای برنامه‌های تعمیر و نگهداری آینده ارائه می‌دهد. عملیات نگهداری می‌تواند عمدتاً به دو دسته، پیشگیرانه و اصلاح کننده طبقه بندی شود.

هزینه‌های ناشی از تعمیر و نگهداری را می‌توان با مدل‌سازی فرایند تجدید گسسته عملیات تعمیر و نگهداری با زمان بدست آورد که در هر روند تجدید و تکرار اقدامات تعمیر و نگهداری سازه آسیب دیده را، به شرایط اولیه مطلوبی باز می‌گرداند [۳۰]. از نظر ریاضی فرایند تجدید گسسته یک فرایند تصادفی با ارزش عددی غیر منفی است که تجدید متوالی در بازه زمانی داده شده را ثبت می‌کند. زمان‌ها و دفعات تجدید به عنوان متغیرهای تصادفی مثبت، مستقل، یکسان و توزیع شده دارای تابع احتمالی گسسته محسوب می‌شوند.

در این تحقیق مطابق با تئوری فرایند تجدید و عملیات بهسازی و تعمیر در طی عمر خدمت‌پذیری، هزینه مورد انتظار ناشی از تعمیر خرابی‌ها در طول یک افق زمانی محدود وابسته به هزینه‌های نگهداری پیشگیرانه و هزینه‌های نگهداری اصلاحی بدست می‌آید که مطابق رابطه (۱۷) محاسبه می‌گردد [۲۹].

$$C(k) = \frac{\left(\sum_{i=1}^k \alpha^i p_i \right) C_F + \alpha^k \left(1 - \sum_{i=1}^k p_i \right) C_P}{1 - \left[\left(\sum_{i=1}^k \alpha^i P_i \right) + \alpha^k \left(1 - \sum_{i=1}^k P_i \right) \right]} \quad (17)$$

که در آن $k = 1, 2, 3, \dots$ بیانگر تعداد فواصل تعمیرات می‌باشد. C_P هزینه نگهداری پیشگیرانه و C_F هزینه نگهداری اصلاحی مرتبط با استراتژی‌های نگهداری‌های پیشگیرانه و اصلاحی است. p_i احتمال خرابی ناشی از خوردگی در i امین بازه زمانی مربوط به حدود مجاز آسیب می‌باشد که پیشتر بیان گردید. فاکتور تنزل با α که از رابطه (۱۸) محاسبه می‌گردد، بدست می‌آید.

$$\alpha = \left(1 + d_r / 100 \right)^{-1} \quad (18)$$

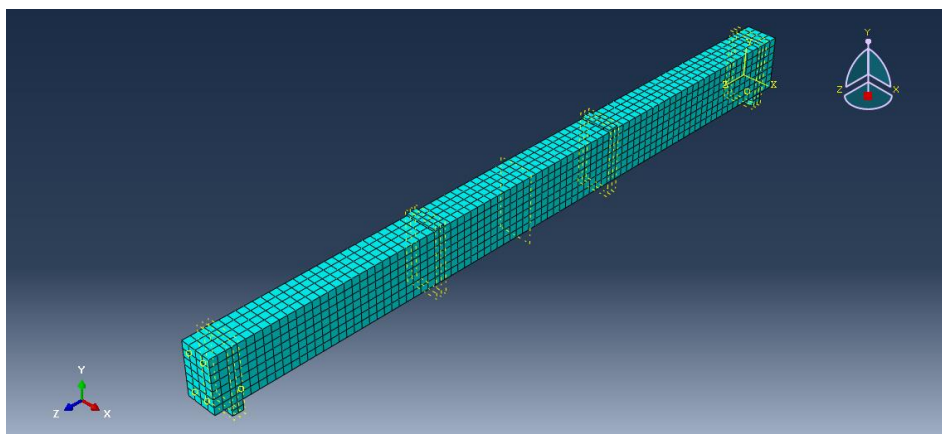
که در آن d_r نرخ تنزیل در واحد زمان برحسب درصد است که به منظور تبدیل هزینه‌های آینده به ارزش‌های فعلی با توجه به تورم ارزش گذاری می‌شود.

۶- مثال عددی

۶-۱- مدل خوردگی تیرهای A و B

در این بحث به بررسی مثال عددی مطابق با روش ارائه شده در بخش‌های پیشین پرداخته می‌شود. با استفاده از دو روش طراحی به روش مقاومت و طراحی به روش حالت حدی تیرهای دو سرساده با طول دهانه‌ها و بارگذاری یکسان طراحی گردید [۳۱]. برای ارزیابی عمر سازه در حالت حدی ظرفیت به منظور تعیین ظرفیت خمشی تیرها در نرم افزار اجزا محدود با تغییر خواص مکانیکی تحت خوردگی قرار گرفتند. خوردگی‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد به صورت کاهش سطح مقطع نسبت به سطح اولیه و استفاده از خواص مکانیکی اصلاح شده به تیرهای مورد طراحی، اعمال گردید. شکل ۴ هندسه بارگذاری در صفحات و شرایط تکیه‌گاهی تیرها در نرم افزار اجزا محدود آباکوس را نشان می‌دهد. بارگذاری به صورت کنترل تغییر مکان وسط دهانه تیر می‌باشد. از این رو با تعبیه دو صفحه به فاصله ۲۵۰ میلی‌متر در بالای تیر، بارگذاری به تیر اعمال شده و جابجایی در وسط دهانه مد نظر قرار گرفته شد.

مشخصات تیرهای طراحی شده با دو روش در جدول ۱، همچنین مشخصات مکانیکی اصلاح شده در حالت پس از خوردگی در جدول ۲ آورده شده است. تیرهای A و B به ترتیب تیرهای طراحی شده به روش حالت حدی و روش طراحی مقاومت می‌باشد.



شکل ۴: نحوه بارگذاری تیرهای طراحی شده در نرم افزار آباکوس

جدول ۱: مشخصات تیرهای طراحی شده با روش طراحی مقاومت و طراحی حالت حدی

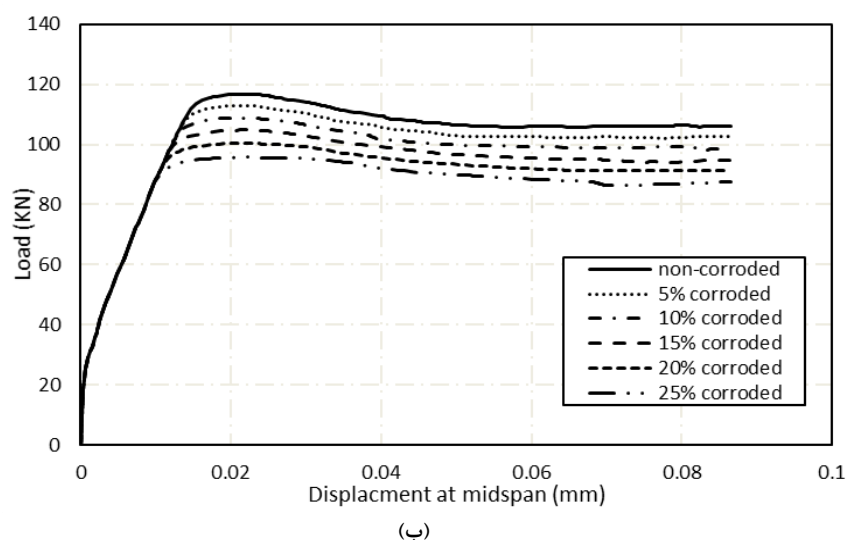
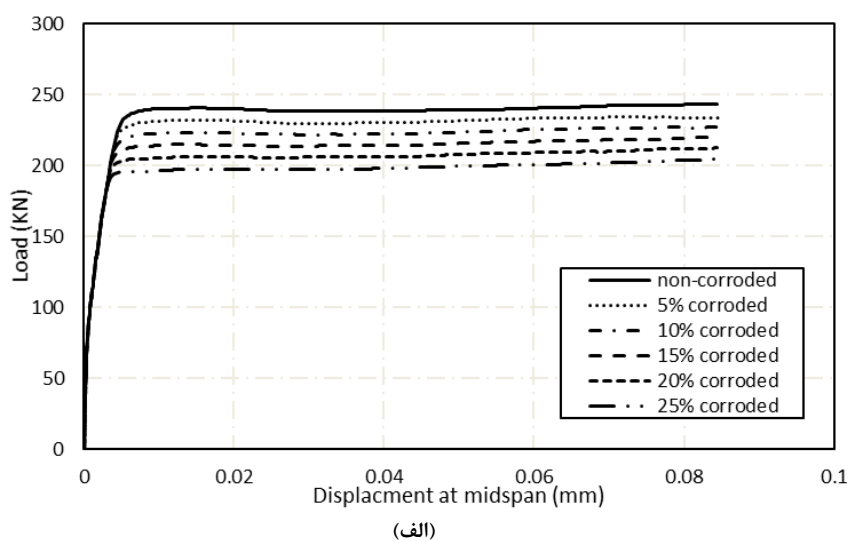
تیر	مقاومت فشاری $f_c (Mpa)$	تنش تسلیم $f_y (Mpa)$	عرض تیر $b(mm)$	ارتفاع خالص $d(mm)$	قطر آرماتور کششی $\phi (mm)$	طول تیر $L(mm)$
A	۳۸	۵۲۰	۲۰۰	۲۸۰	۱۷/۳۶	۳۰۰
B	۳۸	۵۲۰	۲۳۰	۳۸۰	۱۶/۷۶	۳۰۰

جدول ۲: مشخصات تیرهای خورده شده با روش طراحی مقاومت و طراحی حالت حدی

تیر	زمان خوردگی $t (year)$	درصد خوردگی %۱۱	مقاومت تسلیم $f'_{sy} (Mpa)$	سطح باقیمانده $A_{sn} (cm^2)$ میلگرد
A	۴/۷۹	۵	۴۳۴/۹۰	۱۲۲/۸۴
	۹/۷۲	۱۰	۴۱۲/۰۱	۱۱۶/۳۸
	۱۴/۷۸	۱۵	۳۸۹/۱۲	۱۰۹/۹۱
	۲۰/۰۰	۲۰	۲۳/۳۳۶	۱۰۳/۴۴
	۲۵/۲۱	۲۵	۳۴۳/۳۴	۹۶/۹۸
B	۵/۳۸	۵	۴۴۳/۹	۲۳۴/۹۵
	۱۴/۹۶	۱۰	۲۴۰/۵۶	۲۲۲/۵۹
	۲۲/۷۶	۱۵	۳۹۷/۲۰	۲۱۰/۲۵
	۲۵/۲۱	۲۰	۳۷۳/۸۳	۱۹۷/۸۵
	۲۹/۱۳	۲۵	۳۵۰/۴۷	۱۸۵/۴۹

شکل ۵ نمودارهای بار-تغییر مکان تیرهای خورده شده را نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود که با افزایش درصد خوردگی مقدار لنگر تسلیم در تیرهای مورد بررسی کاهش می‌یابد و سختی بعد از ترک خوردگی در درصد های خوردگی مختلف بروی هم منطبق گشته است. با توجه به کاهش سطح مقطع در خوردگی حفره‌ای، رفتار تیر نسبت به تیر سالم کاهش می‌یابد، کاهش تنش تسلیم میلگرد، موجب می‌گردد.

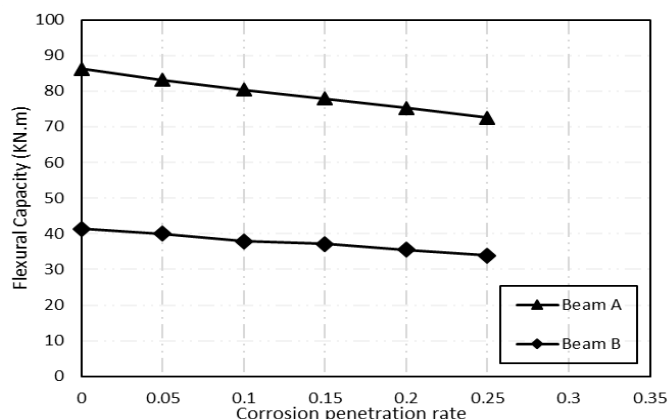
بررسی نتایج نشان می‌دهد که در تیر A سختی اولیه و سختی میلگرد متفاوت بوده و همچنین در تغییر مکان بیشتری به نقطه پیک و تسلیم میلگردها می‌رسد. مقدار لنگر تسلیم در نمودار B در هر درصد خوردگی با نسبت میانگین ۲/۱ بیشتر از تیر طراحی شده به روش طراحی حالت حدی می‌باشد.



شکل ۵: نمودار بار تغییر مکان تیرهای طراحی حالت حدی A (الف) و طراحی مقاومت B (ب)

۶-۲- نتایج کاهش ظرفیت ناشی از خوردگی تیرهای A و B

در هر سطح مشخصی از خوردگی، میزان محاسبه ظرفیت خمشی باقیمانده با توجه به تشخیص وقوع تسلیم شدگی که از نتایج تحلیلی بار- تغییر مکان در نرم افزار اجزا محدود حاصل شده است، امکان پذیر می‌باشد. هر سطح از خوردگی در هر سازه متناسب با شرایط محیطی مخصوص به خود، دارای تناظر یک به یک با زمانی از عمر خدمت‌رسانی سازه می‌باشد. به عبارت دیگر هر سطح از خوردگی را میتوان به صورت یک مقطع زمانی از عمر سازه بیان داشت. بنابراین توضیحات می‌توان اظهار داشت که برای هر زمان از عمر سرویس سازه تحلیل وابسته به زمان انجام داد که کاملاً با شرایط اولیه مرتبط با ساخت و تحلیل عضو متفاوت می‌باشد. با توجه به کاهش مقاومت تسلیم تیر در پی افزایش درصد خوردگی در تیرهای A تا B شیب خط ترسیم شده در شکل نمودار ۶ نزولی می‌باشد. افزایش روند خوردگی در طول زمان همراه با افزایش درصد خوردگی موجب کاهش مقاومت نهایی تیرها گشته است. خوردگی میلگرد در بتن سبب تغییر در مشخصات مکانیکی فولاد و در نتیجه کاهش ظرفیت خمشی تیرها شده است. مشاهده می‌شود که شیب خط روند کاهش ظرفیت در مقابل درصد خوردگی های متفاوت، در تیر A بیشتر از تیر B بدست آمده است که بیانگر کاهش شدیدتر ظرفیت خمشی در این نوع طراحی می‌باشد.

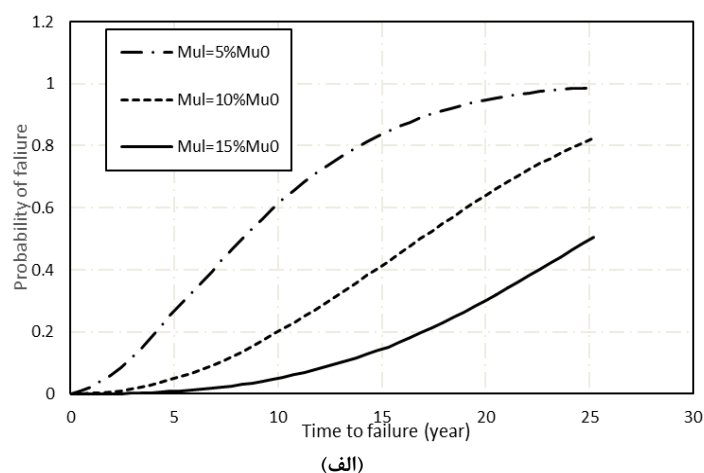


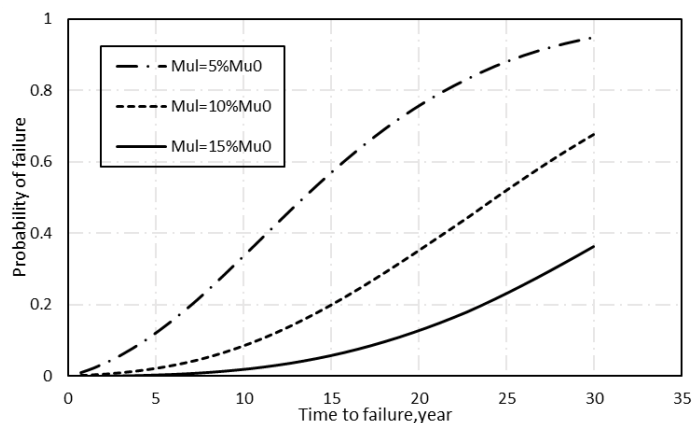
شکل ۶: نمودار ظرفیت خمشی تیرهای A و B طراحی شده به روش حالت حدی و طراحی مقاومت

۳-۶- نتایج احتمالاتی کاهش ظرفیت تا ایجاد خرابی در تیرهای تحت خوردگی

حدود مجاز خرابی نشان دهنده آستانه خرابی‌های ایجاد شده برای انجام الزامات ایمنی و تعمیر می‌باشد و در این تحقیق سه حالت پیشنهاد داده شده به ترتیب $M_{ul} = 5\% M_{u0}$ ، $M_{ul} = 10\% M_{u0}$ و $M_{ul} = 15\% M_{u0}$ میباشد. نتایج تابع توزیع تجمعی زمان ایجاد خرابی مرتبط با نزول ظرفیت خمشی که با استفاده از فرایند گاما محاسبه گردید است، در شکل ۷ برای تیرهای طراحی شده آورده شده است. احتمال شکست با افزایش درصد خوردگی در طول زمان افزایش می‌یابد و این پیشروی زمانی که به ۵۰٪ می‌رسد، میزان کاهش ظرفیت خمشی به آستانه حد مجاز تعیین شده رسیده است. احتمالاً خرابی به طور قابل توجهی بستگی به حدود مجاز تعیین شده دارد. در حدود مجاز کمتر احتمال خرابی در طول عمر خدمت‌پذیری تیرهای طراحی شده، بیشتر شده است زیرا از ظرفیت بیشتری در مقطع استفاده شده است.

میانگین زمان تا ایجاد خرابی ناشی از کاهش ظرفیت در تیر A در حدود مجاز تعیین شده و میانگین احتمال خرابی یکسان، از ۱۵/۳ سال به ۱۰/۲۳ سال کاهش می‌یابد که این مقدار در تیر B از ۲۰/۴۲ سال به ۱۴/۲۱ سال کاهش یافته است. همچنین مشخص گردید که با افزایش حدود مجاز تعیین شده برای آستانه خرابی در تیر A میانگین زمان تا ایجاد خرابی در حدود ۵ سال و برای تیر B در حدود ۳/۸ سال افزایش، داشته است. بنابراین با استفاده از طراحی حالت حدی و تعیین حدود مجاز خرابی بیشتر می‌توان احتمال خرابی و شکست را به تعویق انداخته و هزینه های متعاقب را کاهش داد. همچنین با بررسی دقیق‌تر میزان آستانه الزامات ایمنی و نگهداری در سازه‌های بتن مسلح احتمال وقوع خرابی را کاهش داد، اگرچه با افزایش حدود مجاز ظرفیت بیشتری از مقطع مورد استفاده قرار می‌گیرد اما ریسک خرابی و شکست در پایان عمر خدمت‌پذیری همانطور که مشاهده می‌گردد، کاهش یافته است.





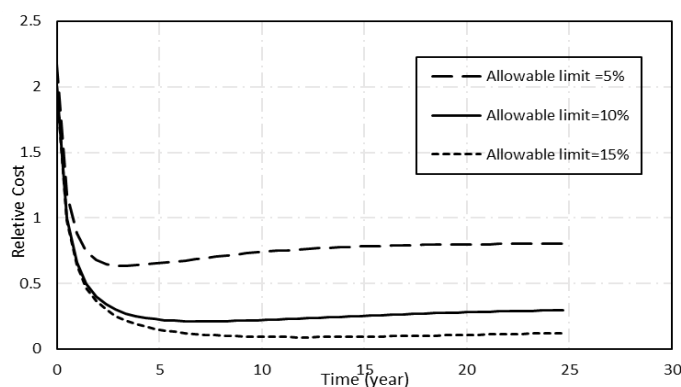
(ب)

شکل ۷: نمودار احتمال خرابی تیرهای A و B به ترتیب (الف) و (ب) در طول زمان برای حدود معین شده زوال ظرفیت خمشی

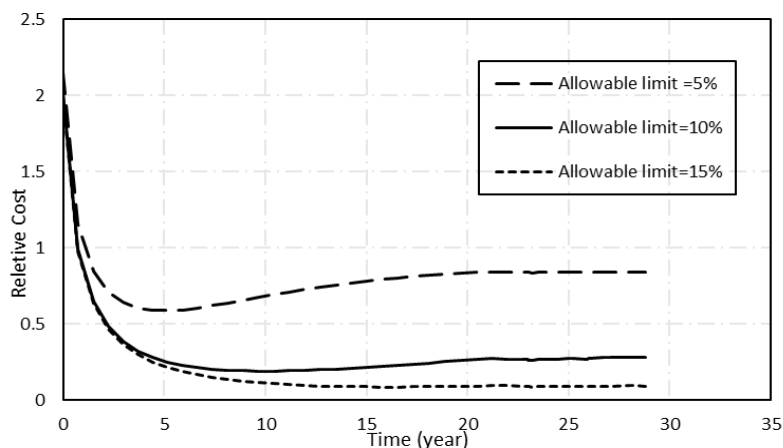
۴-۶- نتایج برآورد هزینه های چرخه عمر و نگهداری بهینه تیرهای A و B

با استفاده از انجام فرایند تجدید نتایج حاصل از محاسبه هزینه نسبی چرخه عمر تیرهای طراحی شده با استفاده از روش طراحی مقاومت و طراحی حالت حدی در نمودار شکل ۸ آورده شده است. از دو نوع استراتژی تعمیر و نگهداری که عبارتند از تعمیر و نگهداری پیشگیرانه که مربوط به قبل از وقوع خرابی و تعمیر و نگهداری اصلاحی که مرتبط با بعد از ایجاد خرابی می باشد، استفاده شده است. در انجام آنالیز هزینه های مربوط به تعمیر و نگهداری اصلاحی ۱ (واحد) و هزینه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ۰/۱ هزینه تعمیر اصلاحی در نظر گرفته شده است. همچنین نرخ تنزل در این فرایند ۵٪ در نظر گرفته شده است.

مقدار بهینه زمان تعمیرات که مرتبط با وقوع خرابی ناشی از کاهش ظرفیت خمشی طی فرایند خوردگی است و با توجه به تعداد بازه زمانی k به حداقل می رسد، و محاسبه می گردد. از تحلیل نتایج برآورد هزینه های نسبی مشاهده می شود که میزان هزینه نسبی در حد مجاز ۵٪ بیشترین مقدار را پس از شروع خوردگی و کاهش ظرفیت در طی زمان دارد و این امر به دلیل احتمال بیشتر ایجاد خرابی در حد مجاز ۵٪ نسبت به دیگر حدود تعیین شده، می باشد. زمان بهینه تعمیرات در چرخه عمر تیر A برای حد مجاز ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به ترتیب برابر مقادیر ۴/۱۲، ۷/۲۶ و ۱۲/۲۵ سال و برای تیر B مقادیر ۳/۳۵، ۵/۶۴ و ۸/۴۲ بدست آمده است. مشاهده می شود که زمان بهینه برای انجام تعمیرات در تیر طراحی شده از روش طراحی مقاومت کمتر از زمان بهینه متناظر در روش طراحی حالت حدی می باشد. با استفاده از نتایج می توان تخمین زد که در حدود مجاز بیشتر با توجه به احتمال خرابی کمتر زمان بهینه تعمیرات بازه دوره ای طولانی تری را شامل می گردد و می توان با انجام عملیات تعمیر و نگهداری و استفاده از روش های تعمیراتی که دوره خوردگی را به تعویق می اندازند، عمر مفید خدمت پذیری را افزایش داد.



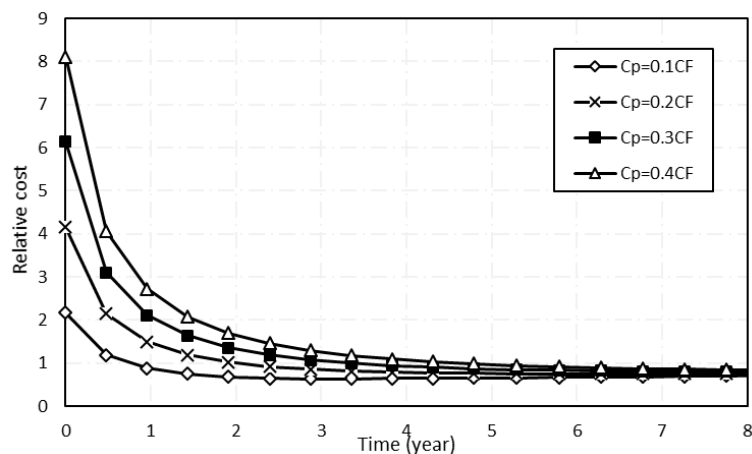
(الف)



(ب)

شکل ۸: هزینه های نسبی پیش بینی شده در طول چرخه عمر تیرهای A و B به ترتیب (الف) و (ب) برای حدود مجاز کاهش ظرفیت تعیین شده

شکل ۹ نتایج حاصل از بررسی میزان تاثیرگذاری نسبت هزینه های پیشگیرانه و هزینه های اصلاحی را در تیر شماره A به عنوان نمونه ای با حدود مجاز ۵٪ در چرخه عمر، نشان می دهد. نتایج نشان داد که زمان بهینه تعمیرات مادامی که هزینه تعمیرات پیشگیرانه بیشتر می شود، افزایش می یابد، به طوریکه زمان بهینه تعمیرات خرابی های ناشی از کاهش ظرفیت خمشی از ۴/۱۲ سال برای $CP=0.1CF$ به ۱۴/۷۸ سال برای $CP=0.4CF$ افزایش می یابد. بنابراین می توان با اتخاذ روش های تعمیرات و بهسازی پیشگیرانه حتی با هزینه اولیه بیشتر، هزینه های نهایی را در طول عمر خدمت رسانی سازه های در معرض خوردگی، کاهش داد. همچنین مشخص شد که لازم است تعمیرات زودرس در حالتی که مقدار هزینه نگهداری پیشگیرانه نسبتاً کم تر است، انجام شود تا خطر انهدام کاهش یابد.



شکل ۹: هزینه های نسبی پیش بینی شده در طول چرخه عمر تیر B برای نسبت های مختلف هزینه های اصلاحی و پیشگیرانه

۷- نتیجه گیری

به دلیل پیچیدگی های بالای پدیده خوردگی در نظر گرفتن اثر خوردگی بر رفتار سازه ها در طول چرخه عمر کار ساده ای نیست. هدف این مقاله ارائه منفعت استفاده از روش احتمالاتی و قابلیت اعتماد در مسائل خوردگی سازه ها و تعیین ظرفیت باربری آنها بوده است. محاسبه احتمال خرابی با استفاده از روش اجزا محدود که تنها روش قابل استفاده در تحلیل غیرخطی قابلیت اعتماد می باشد، استفاده شد. در سازه های در معرض خوردگی بایستی اثرات آن در تحلیل و طراحی سازه لحاظ گردند به همین منظور از دو روش طراحی استفاده شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفته نشان داد که با افزایش درصد خوردگی شاهد کاهش ظرفیت باربری در تیرها بودیم. همچنین در برآورد

چرخه عمر مشاهده شد که تیر طراحی شده با روش طراحی حالت حدی حدود ۴ سال قابلیت بهره برداری بیشتری نسبت به تیر طراحی شده با روش طراحی مقاومت دارد.

حدود مجاز خرابی آستانه اثر خوردگی بر سازه و تعیین ایمنی باقی مانده آن که این امر میزان تعمیر و نگهداری سازه را تخمین می زند، مشخص می نماید. از طرف دیگر بر اساس میزان ایمنی ثابت مقدار ظرفیت باقیمانده سازه، تخمین زده می شود. این امر موجب می گردد که تمهیدات ویژه ای برای سازه از جمله: تغییر کاربری و نیز سبک سازی بارهای وارده، خصوصاً بار قائم بر تیرها، در نظر گرفته شود. همانطور که از نتایج برآورد گردید در حدود مجاز ۰.۵٪ بیشترین احتمال خرابی در چرخه عمر تیرهای طراحی شده به چشم می خورد.

مقدار بهینه زمان تعمیرات که مرتبط با هزینه وقوع خرابی ناشی از کاهش ظرفیت خمشی طی فرایند خوردگی می باشد، با تخمین دقیق زمان نگهداری و تعمیرات می توان با به تاخیر انداختن وقوع خرابی بهره برداری و دوام سازه را افزایش داد. در تیرهای طراحی شده با روش طراحی مقاومت زمان بهینه برای دوره های تعمیر و نگهداری کوتاه تر از مقادیر متناظر در تیر طراحی شده به روش حالت حدی می باشد. با افزایش حدود مجاز تعیین شده این کاهش چیزی در حدود ۱ تا ۴ سال را به خود اختصاص می دهد. میزان تاثیرگذاری نسبت هزینه استراتژی های تعمیر و نگهداری نیز مورد سنجش واقع شد و مشخص گردید که می توان با اتخاذ روش های اصلاحی و پیشگیرانه که دارای نسبت هزینه متناسب با خرابی ایجاد شده در سازه می باشند زمان بهینه تعمیرات و نگهداری را مشخص نمود. همانطور که در نمونه ذکر شده با افزایش نسبت هزینه پیشگیرانه شاهد افزایش زمان بهینه تعمیرات در تیرهای خورده شده هستیم، که این امر موجب صرفه جویی در منابع و صرفه جویی در هزینه های متعاقب خواهد بود.

مراجع

- [1] Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E. and Polder, R., 2013. Corrosion of steel in concrete (Vol. 392). Weinheim, Germany: Wiley-Vch.
- [2] Shayanfar, M.A, Ghanoooni-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
- [3] Ahmad, S., 2003. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review. Cement and concrete composites, 25(4-5), pp.459-471.
- [4] Shi, X., Xie, N., Fortune, K. and Gong, J., 2012. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. Construction and Building Materials, 30, pp.125-138.
- [5] Pape, T.M. and Melchers, R.E., 2011. The effects of corrosion on 45-year-old pre-stressed concrete bridge beams. Structure and Infrastructure Engineering, 7(1-2), pp.101-108.
- [6] Shayanfar, M.A., Barkhordari, M.A. and Ghanoooni-Bagha, M., 2015. Estimation of corrosion occurrence in RC structure using reliability based PSO optimization. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 59(4), pp.531-542.
- [7] Bertolini, L., 2008. Steel corrosion and service life of reinforced concrete structures. Structure and Infrastructure Engineering, 4(2), pp.123-137.
- [8] Tabatabai, H., Pritzl, M.D. and Ghorbanpoor, A., 2009. Evaluation of select methods of corrosion prevention, corrosion control, and repair in reinforced concrete bridges. Wisconsin Highway Research Program.
- [9] Knudsen, A., Jensen, F.M., Klinghoffer, O. and Skovsgaard, T., 1998, December. Cost-effective enhancement of durability of concrete structures by intelligent use of stainless steel reinforcement. In Conference on Corrosion and rehabilitation of reinforced concrete structures, Florida.
- [10] Hoseinzadeh, E., Yusefzadeh, A., Rahimi, N. and Khorsandi, H., 2013. Evaluation of corrosion and scaling potential of a water treatment plant. Archives of Hygiene Sciences, 2(2), pp.41-47.
- [11] Simioni, P., 2009. Seismic response of reinforced concrete structures affected by reinforcement corrosion (Doctoral dissertation, Technische Universität Braunschweig).
- [12] Al-Sulaimani, G.J., Kaleemullah, M. and Basunbul, I.A., 1990. Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members. Structural Journal, 87(2), pp.220-231.

- [13] Mangat, P.S. and Elgarf, M.S., 1999. Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement. *Structural Journal*, 96(1), pp.149-158.
- [14] Inci, P., Goksu, C., Ilki, A. and Kumbasar, N., 2012. Effects of reinforcement corrosion on the performance of RC frame buildings subjected to seismic actions. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27(6), pp.683-696.
- [15] Maalej, M., Ahmed, S.F. and Paramasivam, P., 2003. Corrosion durability and structural response of functionally-graded concrete beams. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), pp.307-316.
- [16] Ou, Y.C., Tsai, L.L. and Chen, H.H., 2012. Cyclic performance of large-scale corroded reinforced concrete beams. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(4), pp.593-604.
- [17] Chen, H.P. and Alani, A.M., 2012. Optimised repair strategy for cracking concrete structures caused by reinforcement corrosion. *ACI Struct. J*, 110(2), pp.229-238.
- [18] Chen, H.P. and Xiao, N., 2015. Symptom-based reliability analyses and performance assessment of corroded reinforced concrete structures. *Struct. Mech. Eng*, 53(6), pp.1183-1200.
- [19] Ramezaniapour, A.A. and Pourkhorshidi, A.R., 2004. Iranian code for durable concrete in Persian Gulf and Omman Sea. *Building Engineering and Housing Science Journals*, 2(4), p.3.
- [20] Val, D.V. and Melchers, R.E., 1997. Reliability of deteriorating RC slab bridges. *Journal of structural engineering*, 123(12), pp.1638-1644.
- [21] Kamde, D.R., Kondraivendhan, B. and Desai, S.N., 2015. Service Life Prediction Model for Reinforced Concrete Structures Due to Chloride Ingress. In *Advances in Structural Engineering* (pp. 1883-1894). Springer, New Delhi.
- [22] Chen, H.P. and Nepal, J., 2015. Stochastic modelling and lifecycle performance assessment of bond strength of corroded reinforcement in concrete. *Structural Engineering and Mechanics*, 54(2), pp.319-336.
- [23] BaniAsad, E. and Dehestani, M., 2019, August. Incorporation of corrosion and bond-slip effects in properties of reinforcing element embedded in concrete beams. In *Structures* (Vol. 20, pp. 105-115). Elsevier.
- [24] Chen, H.P., 2018. Residual Flexural Capacity and Performance Assessment of Corroded Reinforced Concrete Beams. *Journal of Structural Engineering*, 144(12), p.04018213.
- [25] Zhang, R., Castel, A. and François, R., 2010. Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process. *Cement and Concrete Research*, 40(3), pp.415-425.
- [26] Brownjohn, J.M.W., Moyo, P., Omenzetter, P. and Chakraborty, S., 2005. Lessons from monitoring the performance of highway bridges. *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 12(3-4), pp.227-244.
- [27] Dhillon, B.S., 2005. Reliability evaluation methods. *Reliability, Quality, and Safety for Engineers*, pp.87-105.
- [28] Mohammadi Farsani, A. and Keshtegar, B., 2015. Reliability analysis of corroded reinforced concrete beams using enhanced HL-RF method. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 48(2), pp.297-304.
- [29] van Noortwijk, J.M., 2009. A survey of the application of gamma processes in maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(1), pp.2-21.
- [30] van Noortwijk, J.M. and Frangopol, D.M., 2004. Two probabilistic life-cycle maintenance models for deteriorating civil infrastructures. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 19(4), pp.345-359.
- [31] Mostofinejad, Davood. (2009). *Reinforced Concrete Structures*. 13th Ed. (Only include the edition if it is not the first edition) Esfahan: Esfahan University of Technology, Page (178).