Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 58(1) (2026) 119-148
DOI: 10.22060/ceej.2026.24214.8278

Estimation of the Remaining Service Life of Reinforced Concrete Structures Exposed to Corrosion Using a System-Based Performance Approach: A Cooling Tower Case Study

Mohammad-Ali Jafari Sahnehsaraei, Maedeh Zakersalehi, Arash Yeganeh Fallah, Hamid Ebrahimi Araghi

Department of Power Industry Structures Research, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran.

ABSTRACT: Estimating the remaining service life of reinforced concrete structures exposed to corrosion requires an approach that captures global structural behavior while avoiding the computational burden of conventional reliability methods. This study proposes a system performance–based analytical–practical framework for service life prediction. First, the current condition of the structure is assessed through field tests, including determination of concrete and reinforcing steel strength, reinforcement corrosion rate, chloride ion penetration depth, and concrete cover thickness. A validated empirical model is then employed to predict corrosion progression and the time-dependent degradation of mechanical and geometric properties of structural members. An updated numerical model of the structure is developed, and a system performance index is defined based on the overstrength factor under gravity loading. Service life is estimated by tracking the degradation of this index and identifying the time at which it drops below the performance threshold. Application to an industrial cooling tower showed that the overstrength factor decreased from 1.08 at 40 years to 0.89 at 60 years, with functional end of life occurring at 47 years; thus, the remaining life at assessment was 7 years. A strengthening scenario demonstrated that targeted retrofit of critical members can significantly extend service life. The method is computationally efficient and supports rehabilitation decision-making.

Review History:
Received: Jun. 03, 2025
Revised: Feb. 26, 2026
Accepted: Apr. 28, 2026
Available Online: May, 24, 2026

Keywords:
Estimating Remaining Service Life
Corrosion
Cooling Tower
Condition Assessment
Reinforced Concrete Structure

1- Introduction

Following the construction of critical infrastructure, optimal maintenance management is essential to mitigate localized damage and gradual structural degradation throughout the life cycle, as improper oversight can lead to premature failure and excessive repair costs. Consequently, accurately estimating a structure's remaining service life is vital for determining effective maintenance strategies and end-of-life decisions, while simultaneously serving as a fundamental requirement for economic feasibility analysis, asset valuation, and the implementation of Physical Asset Management (PAM) systems in industry [1]. Two general approaches for estimating the service life of structures, data-driven and model-driven, are identified in technical literature. Data-driven methods are limited to structures with comprehensive historical data, such as bridges. Model-driven approaches, including element-based (potentially unrealistic for overall structure failure) and system-based (focused on overall performance), exist [2]. However, the use of complex analytical models for corrosion and reliability analyses in model-driven estimations is computationally intensive, time-consuming, and costly, thereby challenging their practical application. This study presents a practical analytical framework for estimating the remaining service life of reinforced concrete structures exposed to corrosion using a system performance-based approach. Unlike conventional element-based methods, the proposed methodology evaluates the overall structural performance and considers the interaction between structural members under progressive deterioration. The framework integrates condition assessment, corrosion modeling, nonlinear structural analysis, and performance evaluation to estimate the functional end of life of existing reinforced concrete structures. The efficiency of this method is evaluated through a case study on an industrial cooling tower, and its effectiveness in life estimation and optimal maintenance planning is confirmed.

2- Methodology

This paper defines the functional lifespan of a structure as the period until its performance reaches a threshold, regardless of physical failure. It employs a system-based performance approach for reinforced concrete structures, analytically assessing overall system performance

*Corresponding author's email: mzakersalehi@nri.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

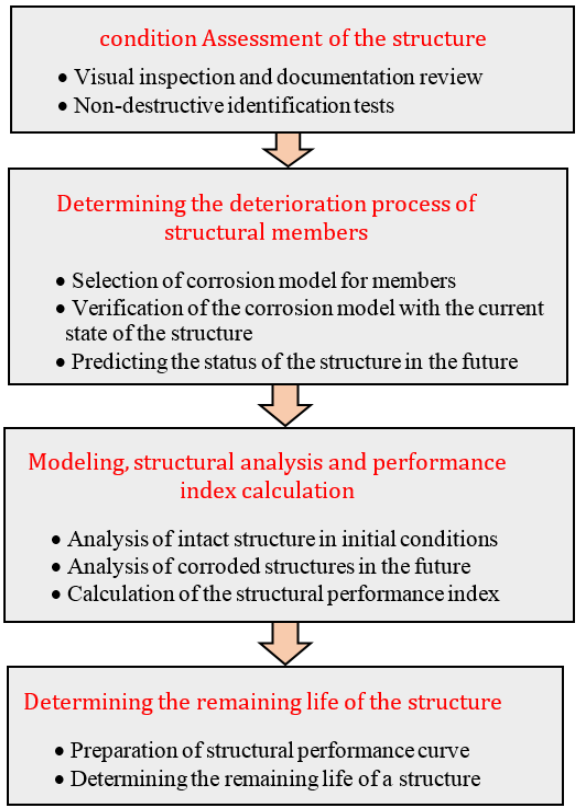


Fig. 1. Flowchart of the process of estimating the remaining life of structures with a system performance-based approach.

degradation to determine lifespan. The method involves four main stages, as shown in "Figure 1", and introduces a practical, computationally efficient index to represent system performance, making it suitable for engineering applications.

In the final stage, in order to estimate the lifetime of the structure, a structural performance curve is prepared, which is obtained by plotting the calculated values of the performance index over time, and the end of the structure's life is determined from the intersection of the performance loss curve with the acceptable threshold value of the performance index.

3- Results and Discussion

A reinforced concrete industrial cooling tower with approximately 40 years of service life was selected as a case study ("Figure 2"). The structure operates under aggressive environmental conditions, including cyclic wetting and drying, chloride exposure, and elevated humidity, which accelerate reinforcement corrosion and structural deterioration. The assessment process included visual inspections, review of technical documents, destructive and non-destructive testing, chloride penetration measurements, reinforcement sampling, concrete compressive strength testing, and temperature measurements at different elevations of the structure. The results of field investigations indicated that the most severe deterioration occurred at the upper levels of the cooling tower

Fig. 2. General view of the studied cooling tower.

beneath the steel diffusers. Significant chloride penetration, concrete cover deterioration, reinforcement corrosion, and cracking were observed in these regions.

Concrete compressive strengths ranged from approximately 25 to 42 MPa, depending on structural location, while measured reinforcement corrosion confirmed a substantial reduction in steel cross-sectional area in heavily exposed members. Chloride concentration tests revealed that in nearly 68% of the investigated sections, chloride content exceeded allowable limits, particularly in upper structural levels. To predict future deterioration, a corrosion model based on Fick's second law of chloride diffusion and empirical corrosion propagation equations was employed [3]. The model was calibrated with field data, and corrosion predictions showed acceptable agreement with observations, validating its use for deterioration modeling. Corrosion progression was then estimated for future structural ages of 45, 50, and 60 years. Structural performance was evaluated using nonlinear static analyses performed in SAP2000 [4]. A system-level performance index based on the structural overstrength factor was introduced as a practical indicator of structural safety. The index represents the ratio between the structural load capacity at the acceptable performance threshold and the code-prescribed design load level [5]. The intact structure at the time of construction exhibited an overstrength factor of 1.45, indicating adequate reserve capacity. However, progressive corrosion caused a gradual reduction in the strength and stiffness of structural members, particularly in roof beams where severe chloride exposure existed. Analyses of corroded structural models showed that the overstrength factor decreased gradually to 0.89 at age 60 years. Plastic hinge formation patterns demonstrated increasing concentration of flexural and shear failures in upper-level beams as corrosion intensified. Based on the developed structural performance curve ("Figure 3"), the functional end of life of the cooling tower was estimated at approximately 47 years after construction. Therefore, considering the current structural age of 40 years, the remaining service life of the structure was estimated to be nearly 7 years under normal

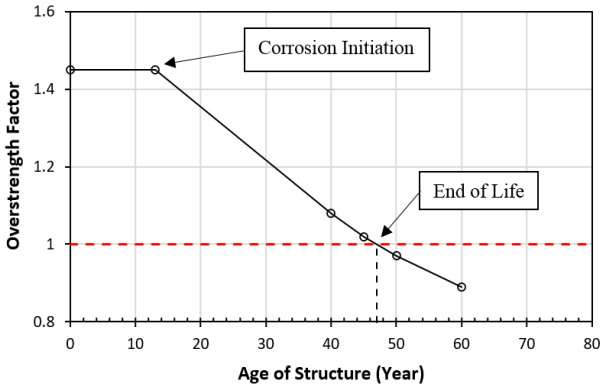


Fig. 3. Performance curve of the studied structure.

operational loading conditions. The study also demonstrated that targeted strengthening and rehabilitation strategies could effectively extend the remaining service life of the structure (from 7 years to over 20 years) by improving the structural performance curve.

4- Conclusions

This research presented a practical analytical framework for estimating the remaining service life of corrosion-affected reinforced concrete structures based on system-level structural performance evaluation. The proposed methodology was validated through a case study of an industrial cooling tower. The proposed framework provides a computationally efficient and practically applicable tool for remaining life assessment of deteriorating reinforced concrete structures. By combining field assessment with system-level structural analysis, the methodology offers a realistic basis for maintenance planning, rehabilitation prioritization, and lifecycle management of industrial infrastructure subjected to corrosion-induced deterioration.

References

[1] S. Labi, Introduction to civil engineering systems: A systems perspective to the development of civil engineering facilities, John Wiley & Sons, 2014.

[2] D.M. Frangopol, M. Soliman, Life-cycle of structural systems: recent achievements and future directions, in: Structures and infrastructure systems, Routledge, 2019, pp. 46-65.

[3] M.S. Darmawan, R. Bayuaji, N. Husin, R.J.A.i.C.E. Anugraha, Case study of remaining service life assessment of a cooling water intake concrete structure in indonesia, 2014(1) (2014) 970393.

[4] SAP2000 Ultimate 24.1.0, in, Computers and Structures, Inc., USA, 2022.

[5] A.C.I. Committee, i.b. American Concrete Institute, Building code for structural concrete (ACI 318-25) : code requirements and commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 2025.

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۸، شماره ۱، سال ۱۴۰۵، صفحات ۱۱۹ تا ۱۴۸
DOI: 10.22060/ceej.2026.24214.8278

تخمین عمر باقی‌مانده سازه‌های بتن مسلح در معرض خوردگی با رویکرد مبتنی بر عملکرد سیستم: مطالعه موردی یک برج خنک‌کننده

محمدعلی جعفری صحنه سرائی، مائده ذاکرصالحی*، آرش یگانه فلاح، حمید ابراهیمی عراقی

گروه سازه‌های صنعت برق، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.

خلاصه: برآورد عمر باقی‌مانده سازه‌های بتن مسلح در معرض خوردگی نیازمند رویکردی است که ضمن لحاظ رفتار کلان سازه، از پیچیدگی محاسباتی روش‌های متداول قابلیت اطمینان اجتناب نماید. در این پژوهش، یک چارچوب تحلیلی–کاربردی مبتنی بر عملکرد سیستم برای برآورد عمر بهره‌برداری ارائه شده است. در این چارچوب، ابتدا وضعیت موجود سازه از طریق آزمایش‌های میدانی شامل تعیین مقاومت بتن و میلگرد، نرخ خوردگی میلگرد، میزان نفوذ یون کلرید و ضخامت پوشش بتن ارزیابی می‌شود. سپس با استفاده از یک مدل تجربی صحت‌سنجی‌شده، روند پیشرفت خوردگی و کاهش مشخصات مکانیکی و هندسی اعضا در طول زمان پیش‌بینی می‌گردد. بر این اساس، مدل عددی به‌روزشده سازه تشکیل و شاخص عملکرد سیستم بر مبنای ضریب اضافه مقاومت تحت بارگذاری ثقلی تعریف می‌شود. عمر سازه از طریق تحلیل روند کاهش این شاخص و تعیین زمان عبور از حد آستانه عملکرد برآورد می‌شود. کاربرد روش در یک برج خنک‌کننده صنعتی نشان داد ضریب اضافه مقاومت از ۱/۰۸ در سن ۴۰ سالگی به ۰/۸۹ در ۶۰ سالگی کاهش یافته و پایان عمر کارکردی در ۴۷ سالگی رخ می‌دهد؛ بنابراین عمر باقی‌مانده در زمان ارزیابی ۷ سال است. تحلیل سناریوی مقاوم‌سازی نیز نشان داد تقویت هدفمند اعضای بحرانی می‌تواند عمر باقی‌مانده را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. نتایج بیانگر قابلیت اجرای روش با هزینه محاسباتی محدود و کارایی آن در پشتیبانی تصمیم‌گیری مقاوم‌سازی است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳
بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۰۳

کلمات کلیدی:
تخمین عمر باقیمانده
خوردگی میلگرد
برج خنک‌کننده
ارزیابی وضعیت
سازه بتن مسلح

۱- مقدمه

پس از اتمام فرآیند ساخت سازه‌ها و زیرساخت‌های حیاتی در صنایع مختلف، چالش اصلی بهره‌برداران و مدیران صنعتی، مدیریت بهینه نگهداری و تعمیرات برای حفظ عملکرد مطلوب این تجهیزات در طول چرخه عمر عملیاتی آن‌ها است. مطالعات نشان می‌دهد که سازه‌ها در طول عمر بهره‌برداری خود در معرض آسیب‌های موضعی (مانند ترک‌ها، خوردگی، یا تغییرشکل‌های پلاستیک) در سطوح مختلف شدت قرار می‌گیرند. از طرف دیگر، وقوع پدیده زوال تدریجی مقاومت و سختی سازه‌ها، باعث افت در عملکرد مورد انتظار آنها در طی گذر زمان شده و در نهایت، باعث اتمام عمر کارکردی آن‌ها (حتی در صورت عدم وقوع حوادث ناگهانی شدید) می‌شود. عدم مدیریت صحیح و بهینه درخصوص نگهداری و تعمیرات سازه‌ها در دوره عمر بهره‌برداری (بخصوص سازه‌های صنعتی که در معرض شرایط محیطی مهاجم هستند) می‌تواند منجر به خرابی زودهنگام و تحمیل هزینه‌های سنگین (حتی بیشتر از هزینه ساخت) به صاحبان آن‌ها شود. بر این اساس و با توجه به صرف سرمایه‌های کلان برای ساخت سازه‌ها و زیرساخت‌های کشور، لزوم پرداختن به حوزه مدیریت دوره عمر سازه‌ها به جهت حفظ عملکرد، بهره‌برداری بهینه و کمینه‌سازی هزینه‌های دوره عمر آن‌ها، بطور روزافزونی احساس می‌شود [۱].

یکی از مهمترین ملزومات مدیریت بهینه دوره عمر سازه‌ها، دانستن مدت زمانی است که انتظار می‌رود سیستم سازه دوام بیاورد. به عبارت دیگر، برنامه‌ریزی بهینه و تعیین بهترین استراتژی برای فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات سازه و همچنین انتخاب گزینه مناسب برای پایان عمر سازه (مانند تخریب برنامه‌ریزی شده و جایگزینی، تعمیرات اساسی و مقاوم‌سازی، تغییر کاربری و موارد مشابه) مستلزم داشتن برآوردی از زمان پایان عمر سازه و یا عمر باقیمانده آن است. تخمین عمر سیستم سازه همچنین در ارزیابی امکان‌سنجی اقتصادی و تعیین ارزش دارایی آن برای اهداف تحلیل سرمایه‌گذاری و پیاده‌سازی ساختار مدیریت دارایی‌های فیزیکی (PAM) در صنایع ضروری می‌باشد [۲].

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mzakersalehi@nri.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

در زمینه ارزیابی و تخمین عمر انواع سازه‌ها و زیرساخت‌های عمرانی، تحقیقات گسترده‌ای با رویکردهای مختلف انجام شده است. موری و الینوود یک روش احتمالاتی برای ارزیابی قابلیت اطمینان وابسته به زمان اجزا و سیستم‌ها ارائه کرده‌اند که برای تخمین عمر سازه‌ها قابل استفاده است. همچنین حساسیت قابلیت اطمینان به پارامترهای مختلف وقوع بار و زوال مقاومت را با استفاده از مثال‌های ساده ارزیابی کردند. آنها نشان دادند که برای استفاده از روش فوق برای پیش‌بینی‌های واقع‌بینانه عمر مفید، باید ویژگی‌های زوال و داده‌های آماری فرآیند بار برای یک تأسیسات خاص شناسایی شود [۳]. رویکرد فوق توسط لینگ جی و همکاران برای ارزیابی عمر سازه‌های بتنی دریایی استفاده گردید و حساسیت آن نسبت به پارامترهای مؤثر بر خوردگی بتن مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داده شد که تأثیرگذارترین پارامتر در پیش‌بینی عمر مفید سازه، مقدار پوشش بتن است [۴]. فرانگوپل و همکاران طی مقالات متعدد، مبانی نظری و چارچوب کلی ارزیابی عمر برای سازه‌ها و زیرساخت‌های حیاتی (با تاکید بر پل‌ها) را به منظور مدیریت بهینه نگهداری و تعمیرات در دوره عمر آنها ارائه کرده‌اند [۵–۸]. چارچوب ارائه شده شامل حوزه‌های وسیعی از تحلیل و طراحی تا بازرسی و نگهداری و برنامه‌ریزی بهینه تعمیرات سازه بوده و مبتنی بر تعیین عملکرد سازه در طی زمان با استفاده از مدل‌های رفتاری و با لحاظ انواع عدم قطعیت‌های موجود است. محرک و انگیزه اصلی برای توسعه چارچوب ارزیابی چرخه عمر، نیاز به یک مبنای منطقی برای تصمیم‌گیری آگاهانه در مورد طراحی، ساخت، بازرسی، نظارت، نگهداری، تعمیر، بهسازی، جایگزینی و مدیریت سازه‌ها در شرایط عدم قطعیت است که با استفاده از رویه‌های بهینه‌سازی چندهدفه که معیارهای متضاد مانند عملکرد و هزینه را متعادل می‌کنند، انجام می‌شود. مجموعه فعالیت‌های مورد نظر در این حوزه با نام کلی مهندسی چرخه عمر نیز شناخته می‌شوند. یانگ و همکاران یک مدل تحلیلی احتمالاتی برای تخمین عمر مفید پل‌ها، پیشنهاد کردند [۹]. مدل آن‌ها بر اساس ارزیابی احتمال بقای پل‌های موجود است که با استفاده از توابع احتمالاتی طول عمر کالیبره شده با داده‌های واقعی طول عمر پل‌ها تعیین شده و برای بهینه‌سازی اقدامات نگهداری پل‌ها بکار می‌روند. رویکردهای داده محور مشابهی نیز برای تخمین عمر مفید پل‌ها و بهینه‌سازی برنامه تعمیرات با استفاده از توابع احتمالاتی طول عمر، توسط اوکاشا و همکاران [۱۰] ارائه شده است. کوپیکا و همکاران یک چارچوب جامع دو روشی مبتنی بر قابلیت اطمینان را برای ارزیابی عمر باقیمانده اعضای بتنی مسلح معرفی کرده‌اند که از دو روش متمایز اما مکمل شامل مدل‌سازی احتمالاتی و یک روش مهندسی ساده‌شده استفاده می‌کند. رویکرد احتمالاتی، عدم قطعیت‌ها در خواص مواد و ابعاد هندسی را در بر می‌گیرد. به موازات آن، روش مهندسی ساده‌شده، ابزاری عملی برای ارزیابی سریع سازه ارائه می‌دهد و تصمیم‌گیری به موقع در مورد تعمیر و مرمت را تسهیل می‌کند. با ترکیب دقت و عملی بودن، چارچوب پیشنهادی به عنوان یک ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری قوی برای مهندسان و مدیران دارایی عمل می‌کند و از برنامه‌ریزی بلندمدت و مداخلات فوری در سطح میدانی پشتیبانی می‌کند [۱۱].

در خصوص سازه‌های بتن مسلح از آنجا که اصلی‌ترین عامل زوال و اتمام عمر مفید سازه خوردگی می‌باشد، تحقیقات وسیعی در زمینه شناخت و مدلسازی مکانیزم خوردگی و اثر آن بر اعضای سازه‌ای بصورت تحلیلی و آزمایشگاهی انجام شده است. چن و همکاران علاوه بر توسعه یک مدل عددی برای پیش بینی عمر مفید سازه های بتنی دارای خوردگی، یک مدل تجربی ساده رگرسیونی نیز ارائه داده‌اند که یک ابزار ارزیابی سریع برای مهندسان فراهم می‌کند [۱۲]. مدل‌های مختلف رایج برای تحلیل خوردگی اعضای بتن مسلح توسط رمضانیانپور و همکاران معرفی و محدودیت‌ها و معایب و مزایای هر یک از آن‌ها برای استفاده در شرایط جنوب کشور بررسی و بیان شده‌اند [۱۳]. میری و همکاران با استفاده از انجام تست‌های تسریع شده و تحلیل اجزای محدود، اثر پارامترهای مختلف بر شروع ترک بتن ناشی از خوردگی را مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. نتایج حاکی از آن است که پوشش آرماتور و مقاومت فشاری بتن از مهم‌ترین عوامل موثر در شروع ترک‌خوردگی می‌باشند. شایانفر و همکاران از رویکرد فراکاوشی برای محاسبه احتمال وقوع خوردگی ناشی از نفوذ یون‌های کلرید استفاده کرده‌اند. کارایی مدل با مقایسه مثال‌های موجود در ادبیات فنی و نتایج تحلیل مونت‌کارلو تأیید شده است [۱۵]. قانونی بقا و همکاران نیز رویکردی مبتنی بر محاسبه احتمال وقوع خوردگی را با استفاده از مدل‌های تحلیلی خوردگی برای ارزیابی عمر سازه‌های بتنی در شرایط جزر و مد دریا ارائه کرده و حساسیت آن را به پارامترهای مؤثر بر خوردگی بررسی کرده‌اند [۱۶]. حسینی و همکاران، اثر خوردگی میلگردها را بر مقاومت برشی و خمشی تیرهای بتنی مسلح، بصورت تحلیلی بررسی کرده و نشان دادند که لحاظ اثر پوسته شده بتن موجب تفاوت زیادی در مقادیر پیش بینی شده مقاومت می‌شود [۱۷, ۱۸]. جعفری و همکاران با یک تحلیل احتمالاتی، میزان تأثیر عدم قطعیت‌ها در احتمال زمان شروع خوردگی و همچنین میزان اثر فاصله از دریا و نسبت آب به سیمان‌های متفاوت را بررسی کرده‌اند [۱۹]. دارماوان و همکاران در یک مطالعه موردی به ارزیابی عمر مفید باقیمانده یک سازه

بتنی ورودی آب خنک‌کننده واقع در اندونزی که در معرض خوردگی ناشی از حملات کلریدی قرار دارد، پرداختند [۲۰]. آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی برای تعیین وضعیت فعلی سازه انجام شد و برای به دست آوردن پارامتر مورد نیاز برای ارزیابی، از آزمایش‌های مخرب و غیرمخرب استفاده شد. بر اساس شرایط موجود و نتایج آزمایش‌ها، تحلیل سازه انجام شده و ضریب ایمنی باقیمانده اعضای بحرانی آن در سال‌های مختلف تعیین گردید و بر این اساس، عمر باقیمانده اعضا برآورد شد. مروری جامع از تحقیقات انجام شده در مورد مکانیسم‌های تخریب، خوردگی فولاد، انتشار ترک و نفوذ یون کلرید و همچنین، مزایا و محدودیت‌های مدل‌های فیزیکی و تجربی و روش‌های داده محور (مدل‌های آماری و یادگیری ماشین) مورد استفاده برای پیش‌بینی عمر مفید، در [۲۱] ارائه شده است. مروری بر روش‌های نوین ارزیابی احتمالی عمر مفید باقیمانده سازه‌های بتنی خورده شده با لحاظ انواع عدم قطعیت‌های موجود نیز، در [۲۲] ارائه شده است.

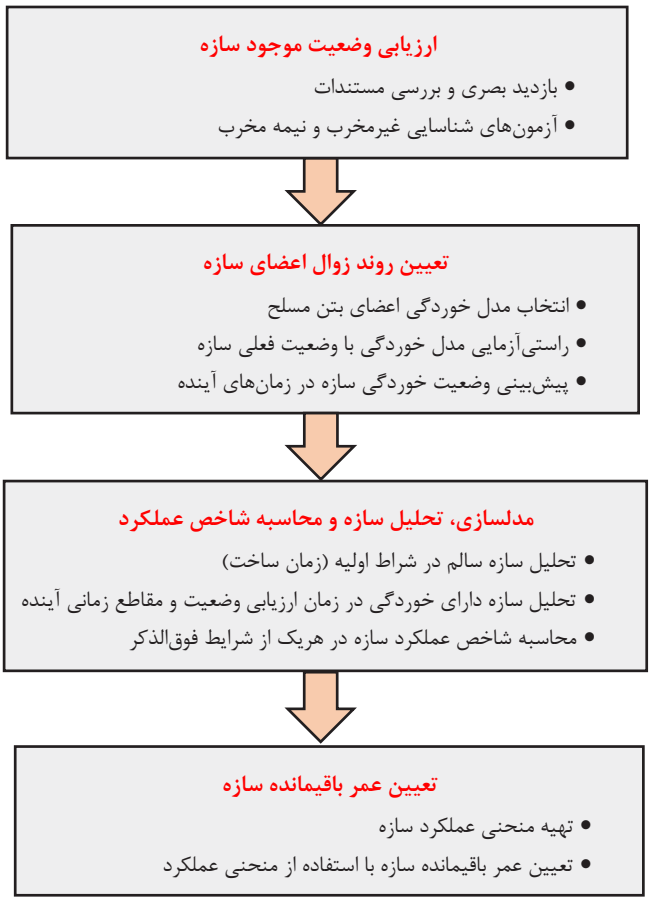
با بررسی ادبیات فنی مشخص می‌شود که دو رویکرد کلی برای تخمین عمر سازه‌ها وجود دارد که شامل رویکرد داده محور و رویکرد مدل محور هستند. کاربرد رویکرد داده محور با توجه به اینکه نیاز به داده‌های واقعی ثبت شده از چرخه کامل عمر سازه‌ها دارد، محدودیت داشته و فقط در مورد سازه‌های خاص نظیر پل‌ها که دارای این داده‌ها هستند؛ قابل استفاده می‌باشد. رویکرد مدل محور نیز به دو دسته کلی مبتنی بر المان و مبتنی بر سیستم تقسیم می‌شود. در رویکرد مبتنی بر المان، تخمین عمر بر اساس بررسی روند زوال در یک المان سازه‌ای (تیر، ستون و ...) انجام می‌شود. با توجه به اینکه شکست یک المان در سازه‌های واقعی الزاما به معنای شکست کلی سازه نیست، رویکرد مبتنی بر المان برای تخمین عمر سازه‌های واقعی می‌تواند منجر به نتایج غیرواقعی شود و ازاینرو، تخمین عمر در مقیاس سازه باید بر اساس بررسی عملکرد کلی سازه انجام شود که منجر به رویکرد مبتنی بر سیستم می‌شود. از طرف دیگر، استفاده از مدل‌های تحلیلی پیچیده برای خوردگی و انجام تحلیل‌های قابلیت اطمینان و ریسک و نظایر این‌ها برای تخمین عمر مدل محور سازه‌ها در شرایط واقعی، بسیار سنگین و زمانبر و با هزینه بالای محاسباتی بوده که کاربرد این روش‌ها را برای موارد عملی دچار محدودیت و چالش می‌سازد. بر این اساس در این مقاله، یک چارچوب جامع تحلیلی-کاربردی برای تخمین عمر سازه‌های بتنی مسلح که در معرض زوال ناشی از خوردگی قرار دارند ارائه شده است. چارچوب پیشنهادی مبتنی بر عملکرد سیستم سازه بوده و داده‌های ورودی آن با استفاده از ارزیابی وضعیت سازه و مدلسازی روند زوال خوردگی در اعضای آن حاصل می‌شوند. تخمین عمر با استفاده از تحلیل عملکرد کلی سیستم سازه انجام می‌شود. بدین منظور یک شاخص کاربردی برای تعیین عملکرد سیستم سازه در شرایط مشخص، معرفی شده که در عین این‌که نماینده مناسبی از عملکرد کلی سیستم سازه است، با سهولت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌های عملکردی ارائه شده در ادبیات فنی قابل تعیین می‌باشد. ازاینرو روش ارائه شده برای تخمین عمر سازه، با هزینه محاسباتی نسبتا کم قابل پیاده‌سازی بوده و برای استفاده در موارد عملی و مهندسی، قابل کاربرد می‌باشد. در نهایت، کارایی این روش از طریق مطالعه موردی بر روی یک برج خنک‌کننده صنعتی ارزیابی شده و اثربخشی آن در تخمین عمر و برنامه‌ریزی بهینه تعمیرات تایید می‌گردد.

۲- مواد و روش‌ها

تعاریف و معیارهای مختلفی از عمر سازه در ادبیات فنی ارائه شده‌اند. در این مقاله، عمر کارکردی[1] سازه مورد نظر است که بصورت مدت زمان سپری شده از لحظه ساخت تا زمان رسیدن کارکرد یا عملکرد[2] سازه به یک حد آستانه مورد نظر، تعریف می‌شود. در این تعریف، زمان انتهای عمر سازه الزاماً مقارن با وقوع شکست فیزیکی نبوده و از دست رفتن عملکرد مورد انتظار از سازه، فاکتور تعیین‌کننده آن است. عملکرد سازه می‌تواند در اثر عوامل مختلف بصورت ناگهانی (مثلا در اثر حوادث) یا تدریجی دچار زوال و افت شود. با توجه به اینکه زمان دقیق وقوع حوادث ناگهانی در طی عمر سازه قابل پیش‌بینی نیست، بطور معمول در تخمین عمر سازه‌ها با روش‌های تحلیلی فقط زوال تدریجی مورد نظر قرار می‌گیرد [۲]. زوال تدریجی عملکرد سازه در اثر عوامل مختلفی ایجاد می‌شود که در این مقاله، زوال ناشی از خوردگی میلگردها در سازه‌های بتنی مسلح به عنوان نمونه، مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارت دیگر، تخمین عمر باقیمانده سازه مورد نظر در این مقاله مربوط به زوال تدریجی مقاومت سازه ناشی از خوردگی و تحت بارهای نرمال وارد بر سازه در شرایط کارکرد روزمره آن (بارهای ثلقی) بوده و شامل شکست سازه ناشی از حوادث ناگهانی (مانند طوفان و زلزله) نمی‌شود. بدیهی است که رویکرد ارائه شده در این مقاله برای تخمین عمر سازه‌ها جنبه عمومی‌تر داشته و برای سایر انواع زوال عملکرد نیز قابل پیاده‌سازی و استفاده است.

رویکرد کلی مورد استفاده در این پژوهش برای تخمین عمر سازه بتنی مسلح، رویکرد مبتنی بر عملکرد سیستم است. در این رویکرد، افت عملکرد

1. Functional Life
2. Performance



شکل ۱. روندنمای فرآیند تخمین عمر باقیمانده سازه‌ها با رویکرد مبتنی بر عملکرد سیستم.

Fig. 1. Flowchart of the process of estimating the remaining life of structures with a system performance-based approach.

کلی سازه به عنوان یک سیستم، بصورت تحلیلی بررسی شده و زمان انتهای عمر سازه بر اساس رسیدن عملکرد کلی سیستم به حد آستانه مورد نظر، تعیین می‌شود. در مقابل رویکرد مبتنی بر سیستم، رویکرد مبتنی بر المان قرار دارد که در آن، زمان انتهای عمر بر اساس بررسی زوال مقاومت برای یک المان از سازه (تیر یا ستون) تعیین شده و اغلب تحقیقات گذشته در این حوزه، با این رویکرد انجام شده‌اند (مانند [۱۱, ۱۷, ۱۸, ۲۰]). مفاهیم اصلی تخمین عمر سازه‌ها با رویکرد مبتنی بر عملکرد سیستم در مراجع مختلفی نظیر [۲, ۵, ۸] ارائه شده‌اند. فرآیند تخمین عمر با این رویکرد دارای ۴ مرحله اصلی است که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. در این مقاله، یک شاخص کاربردی برای تعیین عملکرد سیستم سازه در شرایط مشخص، معرفی شده که در عین اینکه نماینده مناسبی از عملکرد کلی سیستم سازه است، با سهولت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌های عملکردی ارائه شده در ادبیات فنی قابل تعیین است. از اینرو روش ارائه شده برای تخمین عمر سازه، با هزینه محاسباتی نسبتا کم قابل پیاده‌سازی بوده و برای استفاده در موارد عملی و مهندسی، قابل کاربرد است. در ادامه این بخش، توضیحات لازم در خصوص مراحل چهارگانه تخمین عمر سازه‌های بتنی مسلح در معرض خوردگی با رویکرد مبتنی بر عملکرد سیستم بیان شده و در ادامه نیز جزئیات محاسباتی آن در قالب یک مطالعه موردی ارائه شده است.

۲- ۱- ارزیابی وضعیت موجود سازه

اولین مرحله از فرایند تخمین عمر سازه، شناخت کامل مشخصات فیزیکی، مکانیکی و هندسی سازه موجود و تعیین نوع، موقعیت و میزان آسیب‌های رخداده در اعضای مختلف آن است که بطور کلی در ادبیات فنی با عبارت ارزیابی وضعیت شناخته می‌شود. رویکردها و روش‌های مختلفی برای انجام ارزیابی وضعیت سازه‌ها در ادبیات فنی و مهندسی وجود دارد که بطور کلی شامل بررسی مستندات فنی سازه (نقشه‌های چون‌ساخت، دفترچه

محاسبات، مستندات زمان ساخت و بهره‌برداری و ...)، بررسی وضعیت عمومی سازه و مشخصات هندسی و ابعادی اعضا طی بازدیدهای بصری و انجام آزمون‌های شناسایی غیرمخرب و نیمه‌مخرب برای تعیین مشخصات مکانیکی مصالح و تعیین دقیق وضعیت زوال و آسیب‌ها در اعضای سازه، می‌باشند [۲۳]. همچنین از روش‌های مدرن پایش سلامت سازه نیز می‌توان برای شناسایی وضعیت سیستم سازه استفاده نمود. هدف اصلی و خروجی نهایی ارزیابی وضعیت، حصول اطلاعات لازم برای تهیه یک مدل تحلیلی قابل اعتماد از سازه موجود در زمان ساخت (T_0) و زمان انجام ارزیابی (T_e) است که بتواند تا حد امکان رفتار واقعی سازه موجود تحت شرایط بارگذاری مفروض را پیش‌بینی نماید.

۲- ۲- تعیین روند زوال اعضای سازه

یکی از مهمترین مراحل تخمین عمر سازه‌ها، تعیین روند زوال مقاومت و سختی اعضای سازه در طی زمان است که بدین منظور، از مدل‌های زوال استفاده می‌شود. در خصوص زوال ناشی از خوردگی در اعضای بتنی مسلح، مدل‌های تحلیلی مختلفی در ادبیات فنی ارائه شده که به عنوان نمونه می‌توان به [۱۲, ۱۳, ۱۶, ۱۷, ۲۰] اشاره نمود. این مدل‌های خوردگی بطور معمول، زمان شروع خوردگی و میزان کاهش سطح مقطع میلگردها در زمان‌های مختلف را پیش‌بینی می‌کنند. با توجه به وجود فرضیات ساده‌کننده و محدودیت‌های ناشی از کالیبراسیون مدل‌های خوردگی در شرایط محدود، میزان انطباق پیش‌بینی این مدل‌ها با شرایط واقعی سازه‌ها متفاوت بوده و ازاینرو، نیاز است تا با مقایسه پیش‌بینی مدل خوردگی مورد نظر با شرایط واقعی مشخص شده در مرحله ارزیابی وضعیت، مدل راستی‌آزمایی شود. پس از اطمینان نسبی از مناسب بودن مدل خوردگی مورد نظر، وضعیت خوردگی اعضای مختلف سازه بر حسب ویژگی‌ها و شرایط محیطی آنها در سایر زمان‌های گذشته و آینده قابل برآورد است.

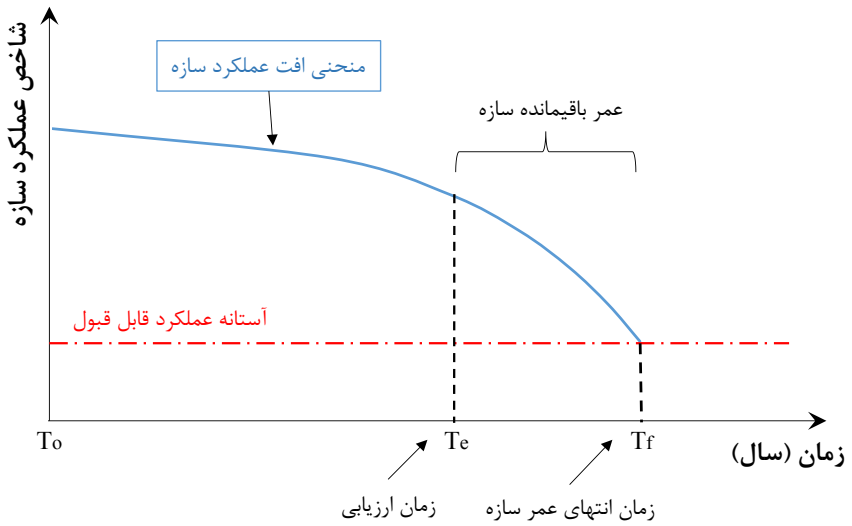
۲- ۳- مدلسازی، تحلیل سازه و محاسبه شاخص عملکرد

پس از مشخص شدن ویژگی‌ها و مشخصات فنی سازه در شرایط واقعی و در مقاطع زمانی مختلف پس از ساخت، باید سطح عملکرد تأمین شده توسط سازه در مقاطع زمانی مختلف برآورد گردد. بدین منظور نیاز به یک شاخص کمی است که بیانگر سطح عملکرد سازه در شرایط مفروض (به لحاظ وضعیت سازه و شرایط بارگذاری) باشد. شاخص عملکرد سیستم سازه دربردارنده اطلاعاتی در خصوص عملکرد کلی سازه به عنوان یک سیستم با لحاظ ارتباط و اندرکنش اعضای مختلف آن با یکدیگر است. شاخص‌های مختلفی در ادبیات فنی برای بیان عملکرد سیستمی سازه‌ها معرفی و ارائه شده‌اند که به عنوان نمونه‌هایی از آنها می‌توان به شاخص وضعیت[1]، شاخص قابلیت اعتماد[2]، شاخص ریسک[3]، شاخص تاب‌آوری[4]، شاخص استواری[5] و شاخص پایداری[6] اشاره نمود [۶, ۷, ۲۴]. استخراج پارامترهای ورودی مورد نیاز برای محاسبه اغلب شاخص‌های عملکرد فوق در سازه‌های واقعی دشوار بوده و از طرف دیگر، محاسبه آن‌ها نیز مستلزم انجام تحلیل‌های پیچیده و صرف هزینه محاسباتی زیادی است. از اینرو استفاده از شاخص‌های فوق در موارد عملی و کاربردی با چالش‌های زیادی همراه است. شاخص عملکرد مورد نظر در این مقاله، شاخص حاشیه ایمنی سازه در شرایط بارگذاری مفروض است که به لحاظ مفهومی بیانگر قابلیت اعتماد سازه و شاخص مناسبی از عملکرد سازه بصورت سیستمی بوده و در عین حال، محاسبه آن به سهولت و با هزینه محاسباتی پایین قابل انجام بوده و مناسب برای استفاده کاربردی و عملی است. برای محاسبه شاخص عملکرد باید مدل تحلیلی به روزشده سازه در شرایط واقعی (با لحاظ آثار ناشی از خوردگی در اعضای مختلف سازه) و در مقاطع زمانی مختلف شامل زمان ساخت، زمان انجام ارزیابی (که متناظر با زمان حال فرض می‌شود) و تعدادی از مقاطع زمانی در آینده، بر اساس خروجی‌های دو مرحله قبل تهیه شده و تحت اثر شرایط بارگذاری مورد نظر، تحلیل شود. شاخص عملکرد پیشنهادی در این مقاله برابر با ضریب اضافه مقاومت سیستم سازه بوده و بر اساس رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$PI=\frac{L_{Fail}}{L_{Code}} \qquad (۱)$$

که در رابطه فوق، PI شاخص عملکرد، L_{Fail} تراز بارگذاری وارد بر سازه متناظر با رسیدن به آستانه عملکرد قابل قبول و L_{code} تراز بارگذاری (بارهای ضریبدار) وارد بر سازه طبق آئین‌نامه طراحی [۲۵, ۲۶] می‌باشند. بدیهی است که PI یک شاخص بدون بعد بوده و مقادیر کوچکتر از یک آن، بیانگر عدم وجود حداقل حاشیه ایمنی (اضافه مقاومت) مورد نظر آئین‌نامه و به عبارت دیگر، معادل با عملکرد غیرقابل پذیرش سازه هستند. به بیان

1. Condition index
2. Reliability index
3. Risk index
4. Resilience index
5. Robustness index
6. Sustainability index



شکل ۲. شکل شماتیک تعیین عمر باقیمانده با استفاده از منحنی عملکرد سیستم سازه.

Fig. 2. Schematic diagram of determining remaining life using the performance curve of structure.

دیگر، شاخص عملکرد ارائه شده در رابطه (۱) به لحاظ مفهومی معادل با معکوس نسبت تقاضا به ظرفیت[1] (DCR) بوده، با این تفاوت که اولاً برای سیستم سازه بطور یکپارچه تعیین می‌شود و نه برای یک عضو و ثانیاً، با استفاده از تحلیل غیرخطی سازه محاسبه می‌شود.

جزئیات محاسباتی بیشتر در خصوص نحوه تعیین شاخص عملکرد سیستم سازه در بخش ۳-۴ از مطالعه موردی ارائه شده است.

۲- ۴- تعیین عمر باقیمانده سازه

در مرحله نهایی به منظور تخمین عمر سازه، منحنی عملکرد سازه که از ترسیم مقادیر محاسبه شده شاخص عملکرد در طی زمان حاصل می‌شود، تهیه شده و از تقاطع منحنی افت عملکرد با مقدار حد آستانه قابل قبول شاخص عملکرد، زمان انتهای عمر سازه (T_f) تعیین می‌شود. عمر باقیمانده سازه از تفاضل زمان انتهای عمر و زمان ارزیابی (زمان حال، T_e) حاصل می‌شود. مفاهیم روند فوق بصورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳- مطالعه موردی تخمین عمر باقیمانده سازه برج خنک‌کننده صنعتی

در این بخش، مراحل چهارگانه روش پیشنهادی برای تخمین عمر باقیمانده سازه‌های بتنی مسلح، به عنوان نمونه در یک سازه برج خنک‌کننده صنعتی انجام و ارائه شده‌اند.

۳- ۱- معرفی سازه مورد مطالعه

برج‌های خنک‌کننده نوعی مبدل حرارتی بزرگ بین آب و هوا بوده که وظیفه اصلی آن کاهش دمای آب برگشتی تجهیزاتی همانند چیلر، بویلر و کوره‌های ذوب فلزات است. برج‌های خنک‌کننده به طور گسترده در صنایع فولاد، پتروشیمی، پالایشگاه‌ها و نیروگاه‌های تولید برق به کار گرفته می‌شوند. یکی از انواع متداول آن‌ها، برج خنک‌کننده تر با سیستم سازه‌ای قاب خمشی بتن مسلح می‌باشد. در این برج‌ها، شرایط محیطی و بهره‌برداری نسبتا شدیدی مانند تر و خشک شدن‌های متوالی، وجود عوامل خورنده فولاد و بتن و نیز بارهای سنگین و ارتعاشی موجب ایجاد آسیب‌هایی در سازه شده و شرایطی شبیه شرایط ساحلی برای سازه ایجاد می‌نمایند.

برج خنک‌کننده مورد مطالعه در این تحقیق، جزو دسته سازه‌های آسیب‌پذیر در برابر عوامل خورنده می‌باشد. با گذشت حدود ۴۰ سال از زمان ساخت و بهره‌برداری، ترک‌های سازه‌ای و خوردگی در بعضی از مقاطع سازه بتنی موجود در این برج خنک‌کننده، نیاز به انجام ارزیابی‌های جامع و آزمون‌های شناسایی وضعیت سازه به منظور ارزیابی عملکرد این سازه و نیز تخمین عمر باقیمانده آن را روشن می‌نماید. سازه این برج خنک‌کننده از نوع قاب خمشی بتن مسلح معمولی به طول ۱۰۰ متر و عرض ۲۰ متر می‌باشد. این سازه از سه بخش و پنج سل به شرح زیر تشکیل شده است که بخش‌ها توسط درز انقطاعی به عرض ۲۰ سانتیمتر از روی فونداسیون تا آخرین تراز از یکدیگر جدا شده‌اند:

1. Demand to Capacity Ratio

شکل ۳. نمای کلی برج خنک‌کننده مورد مطالعه.

Fig. 3. General view of the studied cooling tower.

- بخش‌های ۱ و۲: هر یک به طول ۴۰ متر و عرض ۲۰ متر شامل دو سل خنک‌کننده با ابعاد ۲۰ در ۲۰ متر
- بخش ۳: طول ۲۰ متر و عرض ۲۰ متر شامل یک سل خنک‌کننده با ابعاد مشابه

نمای کلی برج خنک‌کننده مورد مطالعه که در آن چهار سل از سازه مشخص است، در شکل ۳ نشان داده شده است.

برج خنک‌کننده مورد بررسی از نوع تر با دفیوزرهای فلزی است. روی هر سل خنک‌کننده، دودکش فلزی با عنوان دیفیوزر از جنس ورق فولادی با سخت کننده به وزن تقریبی ۳۳ تن قرار گرفته است. در مرکز هر سل یک شفت بتنی قرار دارد که از پایین به فونداسیون سازه متصل است و در تراز فوقانی خود نگهدارنده الکتروپمپ است. ترازهای ارتفاعی سازه شامل موارد زیر است (شکل ۴):

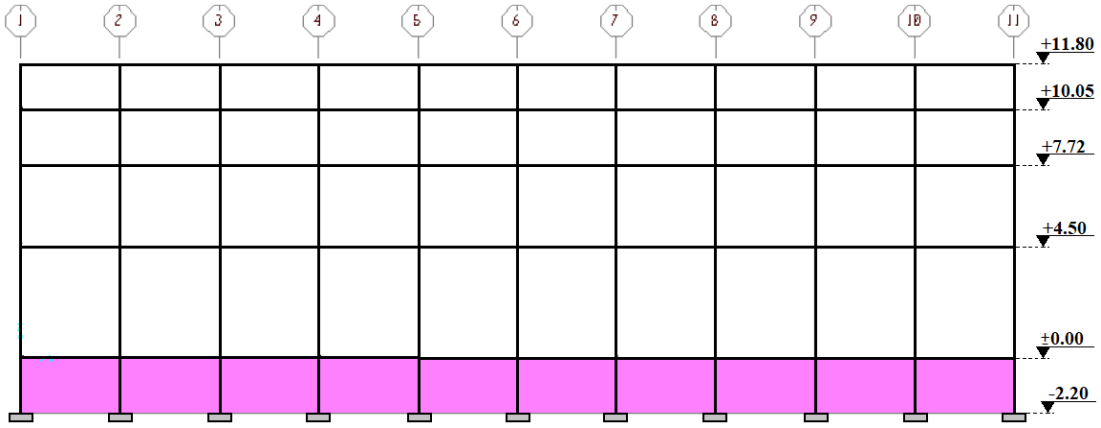
- ✓ تراز ۲٫۲۰- تا تراز ۰٫۰۰± (بخش حوضچه): این تراز دارای دیوار حائل بتنی پیرامون هر سل خنک‌کننده بوده و شامل حوضچه نگهدارنده آب ریزنده از رادیاتورها است.
- ✓ تراز ۰٫۰۰± تا تراز ۴٫۵۰+ (تراز پایین سازه): این تراز دارای سیستم قاب خمشی بتنی بوده و در بالای آن، یک شبکه از تیرهای فرعی بتنی قرار دارد که نگهدارنده رادیاتورها می‌باشد و ریزش آزاد آب بر روی آن ها انجام می‌شود (شکل ۵).
- ✓ تراز ۴٫۵۰+ تا تراز ۷٫۷۲+ : این تراز نیز دارای سیستم قاب خمشی بتنی بوده و در بالای آن لوله‌های آبرسان و لوله‌های ریزش آب قرار دارند.
- ✓ تراز ۷٫۷۲+ تا تراز ۱۰٫۰۵+ : این تراز دارای سیستم قاب خمشی بتنی بوده و در بالای این تراز لایه‌های نم‌گیر قرار دارند.
- ✓ تراز ۱۰٫۰۵+ تا تراز ۱۱٫۸۰+ : این تراز نیز دارای سیستم قاب خمشی بتنی است. سقف آن در قسمت‌های بیرون دایره نشیمن دیفیوزر، دال بتنی بوده و بقیه آن در هر سل شامل یک فضای بازشوی دایره‌ای به ابعاد بخش نشیمن دیفیوزر است.
- ✓ تراز ۱۱٫۸۰+ تا تراز ۲۵٫۵۵+ : بخش دیفیوزر فلزی که هندسه آن تقریبا سهموی مقعر با ضخامت‌های مختلف در ترازهای مختلف این ارتفاع است.

۳- ۲- ارزیابی وضعیت موجود سازه

در اولین مرحله از فرآیند تخمین عمر سازه، ارزیابی وضعیت موجود انجام شد که شامل گردآوری و بررسی نقشه‌ها و مستندات فنی و محاسباتی سازه، بازدید چشمی و انجام آزمایش‌های شناسایی به شرح زیر است:

۳- ۲- ۱- ارزیابی براساس بازرسی‌های چشمی

در اولین گام برای ارزیابی وضعیت سازه، بازدیدهای میدانی و بازرسی‌های چشمی به منظور شناخت خرابی‌ها و آسیب‌های وارده و بررسی وضعیت موجود سازه انجام گرفته است. هم‌چنین نتایج این بازدیدها به منظور تعیین برنامه آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. براساس بازدیدهای انجام شده مشاهده گردید که محل بیش‌ترین آسیب در برج خنک‌کننده مورد



شکل ۴. ترازهای مختلف برج خنک‌کننده مورد مطالعه.

Fig. 4. Different levels of the studied cooling tower.

شکل ۵. نمایی از تراز ۰/۰۰ ± تا ۴/۵۰+ (ریزش آزاد آب).

Fig. 5. View from level ±0.00 to +4.50 (free fall of water)

مطالعه، تراز زیر دفیوزرهای فولادی (بالاترین تراز سازه) است. به همین دلیل تعداد آزمایش‌های بیشتری به این تراز اختصاص داده شد. آسیب‌های مشاهده شده غالبا شامل خوردگی آرماتورها در اثر محیط کلریده، افزایش حجم آرماتورها و ریزش پوشش بتنی است. در شکل ۶ نمونه‌ای از آسیب‌های مشاهده شده در بالاترین تراز سازه (تراز ۱۱٫۸۰+) نشان داده شده است. آزمایش‌های انجام شده به منظور شناخت وضعیت سازه شامل تعیین مقاومت فشاری بتن، تعیین مقاومت کششی میلگرد و میزان خوردگی میلگرد، تعیین پروفیل نفوذ یون کلرید، و اندازه گیری دمای محیط است که در ادامه به آن ها پرداخته می‌شود.

۳- ۲- ۲- آزمون مقاومت فشاری بتن و تست چکش اشمیت

برای تعیین مقاومت فشاری بتن، از آزمون‌های مغزه‌گیری براساس ASTM C42 [۲۷] استفاده شده است. نمونه‌برداری با در نظر گرفتن عدم آسیب به سازه و پرهیز از تقاطع با میلگردها انتخاب شد. در شکل ۷

شکل ۶. نمایی از یکی از تیرهای سازه در تراز ۱۱/۸۰+ و ترکهای قابل رویت نسبتا عمیق.

Fig. 6. A view of one of the structural beams at level +11.80 with relatively deep visible cracks.

شکل ۷. مغزه‌گیری از تیر برج خنک‌کننده و آزمون تعیین مقاومت فشاری بتن در آزمایشگاه.

Fig. 7. Core taking from the cooling tower beam and testing to determine the concrete compressive strength in the laboratory.

تصاویری از مغزه‌گیری و نیز تصاویر مربوط به تعیین مقاومت فشاری بتن آورده شده است.

براساس سه مغزه‌گیری انجام شده از تیرهای تراز ۱۱٫۸۰+ سازه و انجام آزمون مقاومت فشاری بتن در آزمایشگاه، میانگین مقاومت فشاری حاصل از سه نمونه برابر با ۳۳٫۶ مگاپاسکال با انحراف معیار ۸٫۳ مگاپاسکال به دست آمده است که معادل با ضریب تغییراتی برابر با ۲۴/۷٪ می‌باشد. براین اساس، مقاومت کرانه پایین برابر با ۲۵٫۳ مگاپاسکال به دست می‌آید. در ادامه، با انجام ۳۲ تست چکش اشمیت بر روی تیرها و ستون‌های ترازهای مختلف سازه (شکل ۸) و برقراری تناسب بین نتایج آزمایش مقاومت فشاری تیرهای تراز ۱۱٫۸۰+ و تست چکش اشمیت و تعمیم آن به بقیه نقاط سازه، مقاومت فشاری نقاط مختلف سازه به شرح جدول ۱ به دست آمده است. لازم به ذکر است که نتایج به‌دست‌آمده از آزمون چکش اشمیت دارای عدم‌قطعیت ذاتی ناشی از خطای دستگاه و عوامل اجرایی است. بر اساس مشخصات فنی و مطالعات پیشین [۲۸]، عواملی نظیر زبری سطح، رطوبت بتن، سن بتن، نوع سنگدانه، جهت اعمال ضربه و کالیبراسیون دستگاه بر نتایج مؤثر بوده و می‌توانند باعث افزایش پراکندگی داده‌ها شوند. در این پژوهش، به‌منظور

شکل ۸. تست چکش اشمیت ستون تراز پایین سازه

Fig. 8. Schmidt hammer test of the lower-level column of the structure.

جدول ۱. مقادیر مقاومت فشاری بتن، انحراف معیار و ضریب تغییرات در نقاط مختلف سازه برج خنک کننده.

Table 1. Concrete compressive strength values, standard deviation, and coefficient of variation at different points of the cooling tower structure.

محل قرارگیری عضو سازه (نماد عضو)	مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)	انحراف معیار (مگاپاسکال)	ضریب تغییرات (٪)
تیرهای تراز ۱۱٫۸۰+ (B1)	۲۵٫۳	۸/۳	۲۴/۷
تیرهای تراز ۱۰٫۰۵+ (B2)	۳۳٫۵	۹/۱	۲۱/۴
ستون‌های بین تراز ۱۰٫۰۵+ و ۱۱٫۸۰+ (C1)	۳۳٫۵	۹/۱	۲۱/۴
تیرهای تراز ۷٫۷۲+ (B3) و ۴٫۵۰ (B3)	۳۵٫۸	۷/۹	۱۸/۱
تمام ستون‌های پایین تر از تراز ۱۰٫۰۵+ (C2)	۴۱٫۶	۱۰/۸	۲۰/۶

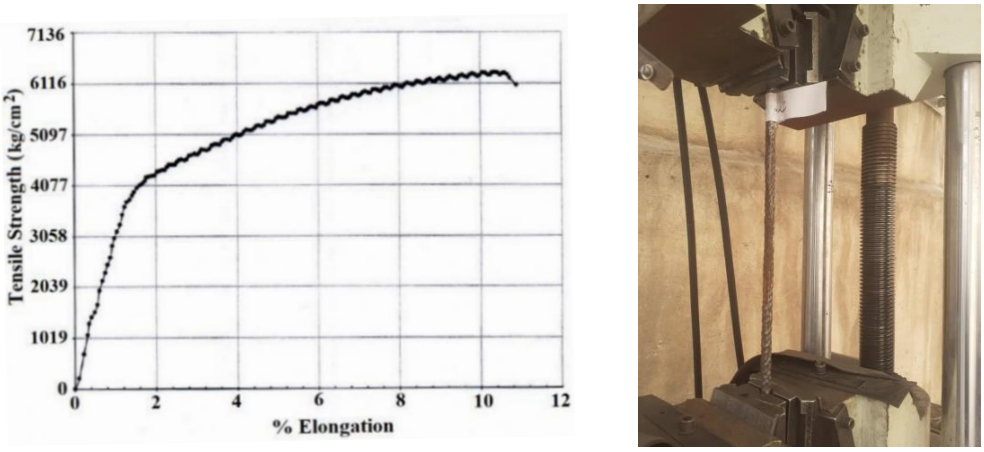
کاهش خطا، دستگاه پیش از آزمایش کالیبره شده و میانگین چند قرائت برای هر نقطه گزارش شده است. انحراف معیار و ضریب تغییرات برای هر دسته از اعضای سازه نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

۳- ۲- ۳- آزمون تعیین مقاومت کششی میلگرد و قطر میلگرد خورده شده

این آزمون طبق استاندارد ASTM A371 [۲۹]انجام شده است. برای این منظور، سه نمونه میلگرد از تیرهای تراز ۱۱٫۸۰+ مطابق شکل ۹ تحت آزمون قرار گرفته و نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در اثر خوردگی میلگردهای این تراز، قطر میلگرد از ۱۶ میلی متر به میانگین ۱۴٫۸۷ میلی متر (با ضریب تغییراتی برابر با ۲/۳۳٪) کاهش یافته است. این میزان خوردگی اندازه‌گیری شده، در بخش ۳-۳ مقاله برای راستی‌آزمایی مدل خوردگی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. نتایج هم‌چنین حاکی از استفاده از میلگرد S400 مطابق نقشه‌های اجرایی زمان ساخت است.

۳- ۲- ۴- آزمون تعیین مقدار سیمان در بتن سخت شده

جهت تعیین و کنترل مقدار مجاز یون کلرید در بتن نیاز به دانستن مقدار سیمان در بتن سخت شده است. با توجه به قدیمی بودن سازه و ناقص بودن اطلاعات زمان ساخت، برای این منظور یک نمونه از سازه اخذ گردید و براساس استاندارد ASTM C1084 [۳۰] مقدار سیمان در بتن تعیین گردید که مقدار آن برابر با ۵۶۴ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد. براساس



شکل ۹. آزمون تعیین مقاومت کششی میلگرد.

Fig. 9. Test to determine the tensile strength of rebar.

جدول ۲. نتایج آزمون مقاومت کششی میلگرد و میزان کاهش قطر میلگرد خورده شده.

Table 2. Results of the tensile strength test of rebar and the reduction in diameter of corroded rebar.

شماره نمونه	وزن واحد (kg/m)	قطر میلگرد (mm)		مقاومت تسلیم	مقاومت نهایی
		براساس نقشه ها	براساس وزن نمونه خورده شده	(مگاپاسکال)	
۱	۱٫۴۲۶	۱۶	۱۵٫۲	۴۲۳	۶۲۸
۲	۱٫۲۹۹	۱۶	۱۴٫۵	۳۹۸	۶۱۹
۳	۱٫۳۷۰	۱۶	۱۴٫۹	۳۸۲	۵۷۴

این مقدار سیمان و نیز ضوابط آیین نامه بتن ایران [۲۵]، حداکثر مجاز یون کلرید به وزن سیمان بر حسب درصد (قابل حل در آب) برابر با ۰٫۰۸ است که در بخش ۳-۲-۵ برای بررسی وضعیت سازه از نظر میزان نفوذ یون‌های کلرید مبنا قرار خواهد گرفت.

۳- ۲- ۵- آزمون تعیین پروفیل نفوذ یون کلرید در بتن

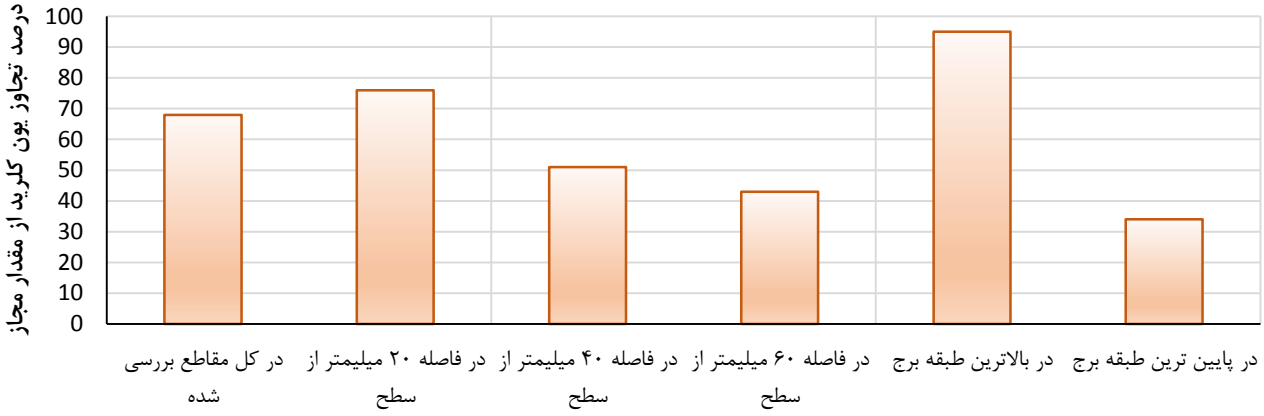
برای تعیین میزان یون کلرید در بتن سخت شده، از ضوابط استاندارد ASTM C1218 [۳۱] استفاده گردید (شکل ۱۰).

در این مطالعه، مقدار یون کلرید در ۴۸ مقطع از نقاط مختلف سازه (با فاصله‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متری از سطح خارجی نمونه) تعیین گردید. نتایج نشان داد که در ۶۸٪ موارد، مقدار یون کلرید موجود در بتن بیش از حد مجاز می‌باشد. همچنین مشاهده شد که به ترتیب در ۷۶٪، ۵۱٪ و ۴۳٪ موارد بررسی شده در عمق‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متری، مقدار یون کلرید بیش از حد مجاز بوده است که همان‌طور که انتظار می‌رفت نشان‌دهنده میزان حادتر بودن شرایط تجاوز از حد مجاز یون کلرید در سطوح خارجی بتن می‌باشد. نتیجه مهم دیگری که از این آزمون حاصل شد این است که میزان نفوذ یون کلرید در بالاترین تراز سازه از بقیه قسمت‌های سازه بسیار حادتر است؛ به طوری که ۹۵٪ موارد بررسی شده در طبقه بالای سازه دارای مشکل نفوذ یون کلر بودند، در حالی که در طبقه پایینی سازه در ۳۴٪ مقاطع این مشکل وجود داشت و اکثرا هم به آرماتور نرسیده بود (شکل ۱۱). این نتایج در بخش ۳-۳ مقاله یک تایید میدانی بر میزان خوردگی میلگرد در هر تراز است.

لازم به ذکر است که در این پژوهش میزان نفوذ یون سولفات نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آزمون‌ها نشان داد که پدیده حاکم بر خوردگی اعضای سازه برج خنک‌کن، خوردگی ناشی از یون کلر می‌باشد و نفوذ یون سولفات قابل ملاحظه نیست (شکل ۱۲ به عنوان نمونه).

شکل ۱۰. آزمون تعیین یون کلرید در بتن جهت ترسیم پروفیل.

Fig. 10. Test to determine chloride ions in concrete for profiling.



شکل ۱۱. نمودار وضعیت قسمتهای مختلف برج خنک‌کننده از نظر وضعیت تجاوز از حد مجاز یون کلرید.

Fig. 11. Diagram of the status of different parts of the cooling tower in terms of exceeding the permissible chloride ion limit.

۳- ۲- ۶- اندازه گیری دمای ترازهای مختلف برج خنک‌کننده

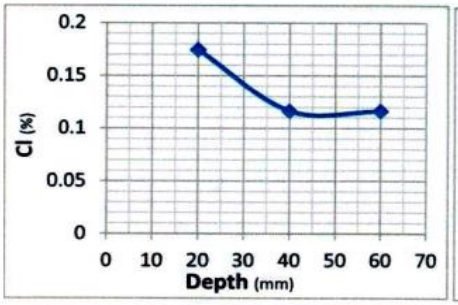
با توجه به تاثیر دما بر نرخ خوردگی و با توجه به عملکرد برج خنک‌کننده که اختلاف دما بین ترازهای سازه محسوس است، در این مطالعه دمای بالاترین و پایین‌ترین تراز سازه و نیز یک مکان دور از سازه در سایه (T_r) اندازه‌گیری گردید. سپس براساس میانگین دمای ساختگاه سازه که براساس گزارش‌های هواشناسی ۲۶ درجه سانتیگراد است، و با توجه به اختلاف دمای ترازهای مختلف سازه با T_r در روز اندازه‌گیری، میانگین دمای سازه در تراز بالای برج برابر با ۳۶ درجه و در ترازهای میانی و پایینی برابر با ۲۲ درجه سانتیگراد به دست آمد. این اعداد در بخش ۳-۳ به عنوان ورودی برای مدل برآورد میزان خوردگی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

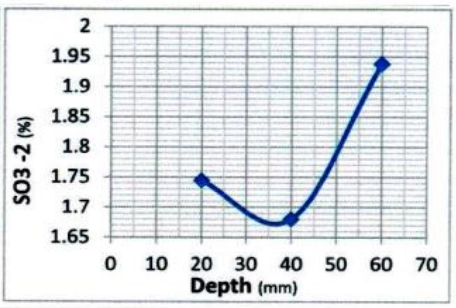
۳- ۲- ۷- اندازه‌گیری پوشش بتن

در نقشه‌های سازه‌ها میزان پوشش بتن برابر با ۳۵ میلی‌متر ذکر شده بود که بررسی‌های میدانی در چندین عضو سازه با استفاده از روش اسکن میلگرد (شکل ۱۳ به عنوان نمونه)، موید این میزان پوشش بتن بود. پوشش بتن یکی از پارامترهای مهم برای تعیین نرخ خوردگی به کار می رود که در بخش ۳-۳ به آن پرداخته می‌شود.

لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده در بخش "ارزیابی وضعیت موجود سازه" به شرایط آزمایش و دامنه داده‌های این مطالعه محدود است. کلیه آزمایش‌های انجام‌شده دارای عدم‌قطعیت‌ها و محدودیت‌های ذاتی ناشی از شرایط نمونه‌سازی، دقت و کالیبراسیون تجهیزات، خطاهای اجرایی

Depth (mm)	20±2	40±2	60±2	حداکثر مقدار مجاز	
Cl^- (%)	0.174	0.116	0.116	0.08	نسبت کلرید به مواد سیمانی برحسب درصد وزنی
$SO3^{-2}$ (%)	1.74	1.68	1.94	4	نسبت سولفات به مواد سیمانی برحسب درصد وزنی





شکل ۱۲. نمونه‌ای از نتایج آزمون تعیین میزان نفوذ یون کلرید و سولفات در یکی از تیرهای سازه (تراز ۱۰/۰۵+).

Fig. 12. An example of test results to determine the amount of chloride and sulfate ion penetration in one of the structural beams (level +10.05).

شکل ۱۳. نمونه‌ای از اندازه‌گیری پوشش بتن در ستون سازه.

Fig. 13. An example of measuring concrete cover in a column of the structure.

و فرضیات روش‌های آزمون هستند. نتایج تحت تأثیر ناهمگنی مصالح، شرایط محیطی و روش برداشت و آماده‌سازی نمونه قرار می‌گیرند و لزوماً بیانگر رفتار دقیق در مقیاس سازه نمی‌باشند. ازاین‌رو، تفسیر داده‌ها باید در چارچوب شرایط این پژوهش و با اتکا به تحلیل آماری پراکندگی نتایج صورت گیرد.

۳- ۳- تعیین روند خوردگی در سازه مورد مطالعه

نرخ زوال بتن یا نرخ خوردگی را می‌توان با یکی از دو روش زیر تعیین کرد:

۱) روش مستقیم

۲) روش غیرمستقیم

روش مستقیم تعیین نرخ خوردگی را می‌توان با اندازه‌گیری کاهش وزن یا کاهش ضخامت میلگرد انجام داد. البته این روش مستلزم استخراج نمونه فولادی از سازه موجود است، که این موضوع در بخش ۳-۲-۳ برای یک نمونه در سازه مورد مطالعه بررسی شد. گرچه به دلیل مخرب بودن روش مستقیم، روش غیرمستقیم مورد توجه بیشتری قرار می‌گیرد. در روش غیرمستقیم تخمین نرخ خوردگی با استفاده از فرمول‌های تجربی موجود در بسیاری از مقالات انجام می‌شود. این فرمول‌ها طی سه دهه تحقیق در مورد مکانیسم خوردگی توسعه یافته‌اند، که در ادامه بطور خلاصه مورد بررسی قرار خواهند گرفت. برای تخمین نرخ تخریب بتن با استفاده از روش غیرمستقیم، پوشش بتنی واقعی باید اندازه‌گیری شود. ضخامت پوشش بتن، مقاومت سازه بتنی در برابر عامل خورنده مانند کلرید را تعیین می‌کند. برای شروع خوردگی، کلرید باید به پوشش بتنی نفوذ کند، به سطح میلگرد برسد و تا سطح آستانه کلرید تجمع یابد. مرحله تخریب سازه بتن مسلح در معرض خوردگی را می توان به دو مرحله تقسیم کرد:

۱) شروع خوردگی

۲) انتشارخوردگی

زمان‌لازم برای رسیدن غلظت کلرید در سطح فولاد به غلظت آستانه کلرید مورد نیاز برای از بین بردن لایه غیرفعال فولاد، به عنوان شروع خوردگی تعریف می‌شود. مرحله دوم، انتشار خوردگی نامیده می‌شود که در آن میلگرد دچار خوردگی می‌شود و باعث از دست رفتن سطح (از دست دادن فلز) و کاهش مقاومت خمشی و برشی عضو بتنی می‌شود. مدل‌سازی شروع خوردگی در سازه‌های بتن مسلح عمدتاً بر پایه نفوذ یون کلرید انجام می‌شود و قانون دوم فیک چارچوب کلاسیک این تحلیل را فراهم می‌کند. در این رویکرد، ضریب نفوذ مؤثر ثابت فرض شده و توزیع غلظت کلرید به‌صورت تابعی از زمان و عمق محاسبه می‌شود. در ادبیات فنی، مدل‌های توسعه‌یافته‌تری نیز ارائه شده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از، [۲۱]:

- مدل‌های وابسته به زمان (در نظر گرفتن کاهش ضریب نفوذ با گذشت زمان)
- مدل‌های لحاظ‌کننده پیوند کلرید
- مدل‌های چندفیزیکی کوپل‌شده (انتقال همزمان کلرید، رطوبت و دما)
- مدل‌های احتمالاتی مبتنی بر قابلیت اطمینان
- و مدل‌های داده‌محور

با وجود این توسعه‌ها، مکانیزم غالب در مرحله آغاز خوردگی همچنان نفوذ کلرید است و بسیاری از مدل‌های پیشرفته، بسط‌یافته چارچوب فیک محسوب می‌شوند. زمان شروع‌خوردگی را می‌توان با استفاده از رابطه (۲) (قانون دوم فیک) تعیین کرد [۲۰]:

$$T_i(C_s, C_t h, D, d_c) = \frac{(d_c^2)}{4D[erf^{(-1)}/(1-C_t h/C_s)]^2} \qquad (۲)$$

که در آن C_s میزان کلرید در سطح بتن، C_{th} غلظت کلرید آستانه برای شروع خوردگی، D ضریب انتشار بتن، d_c ضخامت پوشش بتن و erf تابع خطا می‌باشد.

میزان کلرید در سطح بتن از آزمایش تعیین پروفیل نفوذ یون کلرید در بتن بصورتی که در بخش ۳-۲-۵ مورد بحث قرار گرفت، تعیین می‌گردد. مقدار کلرید آستانه برای شروع خوردگی (C_{th}) نیز در اکثر آیین‌نامه‌های بتن تجویز شده است که براساس [۲۵] برابر با ۸۰۰ ppm در نظر گرفته شده است. بطور معمول مقدار حداقل پوشش بتنی در محاسبه شروع خوردگی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در سناریوی زوال، یعنی بدترین حالت، بیان می‌گردد. در خصوص ضریب انتشار بتن، می‌توان آن را با استفاده از فرمول تجربی (۳) تخمین زد:

$$D = 10^{(-10+(4.66w/c))}$$
$$\frac{w}{c} = \frac{27}{f_{cyl}+13.5} \qquad (۳)$$

که w/c نسبت آب به سیمان بتن و f_{cyl} مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای مغزه‌گیری شده است.

انتشار خوردگی با استفاده از رابطه تجربی (۴) تعیین می‌گردد:

$$i_{corr} = \frac{27(1-w/c)^{(-1.64)}}{3.5} \qquad (۴)$$

i_{corr} نرخ خوردگی بر حسب $\mu A/cm^2$ است، که ۱ $\mu A/cm^2$ نرخ خوردگی برابر با کاهش مقطع میلگرد به میزان ۱۱/۶ $\mu m/year$ خواهد بود.

روابط فوق برای پیش‌بینی نرخ خوردگی در سازه‌های بتنی برای میانگین رطوبت نسبی ۸۰٪ و میانگین دمای ۲۰ درجه سانتیگراد استفاده می‌شوند. برای محاسبه نرخ خوردگی در دماهای مختلف، رابطه (۵) قابل استفاده است:

$$i_{corr}(t) = i_{corr\text{-}20}\left[1+0.073\times(t-20)\right] \qquad (۵)$$

که $i_{corr}(t)$ نرخ خوردگی برای دمای بیشتر از ۲۰ °C است، و $i_{corr\text{-}20}$ نرخ خوردگی در دمای ۲۰ °C است.

با فرض خوردگی یکنواخت عمومی، کاهش قطر آرماتور در اثر خوردگی را می‌توان به صورت رابطه (۶) تخمین زد:

$$\Delta D(T_0) = 0.0232\times i_{corr}\times T_0 \qquad (۶)$$

که بر همین اساس مساحت باقیمانده آرماتور از رابطه (۷) برآورد می‌گردد:

$$A_s(T_c) = \frac{\pi}{4}(D_0 - 0.0232\times i_{corr}\times T_c)^2 \qquad (۷)$$

جدول ۳. نتایج محاسبات کاهش میلگردها براساس مدل خوردگی منتخب.

Table 3. Results of rebar reduction calculations based on the selected corrosion model.

نوع المان	قطر اولیه آرماتور طولی (mm)	قطر آرماتور طولی محاسبه شده پس از ۴۰ سال (mm)	درصد خوردگی آرماتور طولی بر اساس مدل	درصد خوردگی آرماتور طولی براساس مشاهده	قطر اولیه آرماتور عرضی(mm)	قطر آرماتور عرضی محاسبه شده پس از ۴۰ سال (mm)	درصد خوردگی آرماتور عرضی بر اساس مدل
B1	۱۶	۱۴٫۸۱	۱۴٫۳۳	۱۳٫۵۱	۸	۶٫۷۷	۲۸٫۳۶
B2	۱۶	۱۵٫۴۳	۶٫۹۷	-	۸	۷٫۳۵	۱۵٫۵۳
B3	۱۶	۱۵٫۷۵	۳٫۰۴	-	۸	۷٫۷۰	۷٫۲۷
C1	۱۶	۱۵٫۴۳	۶٫۹۷	-	۸	۷٫۳۵	۱۵٫۵۳
C2	۱۶	۱۵٫۸۷	۱٫۵۹	-	۸	۷٫۸۰	۵٫۰۸

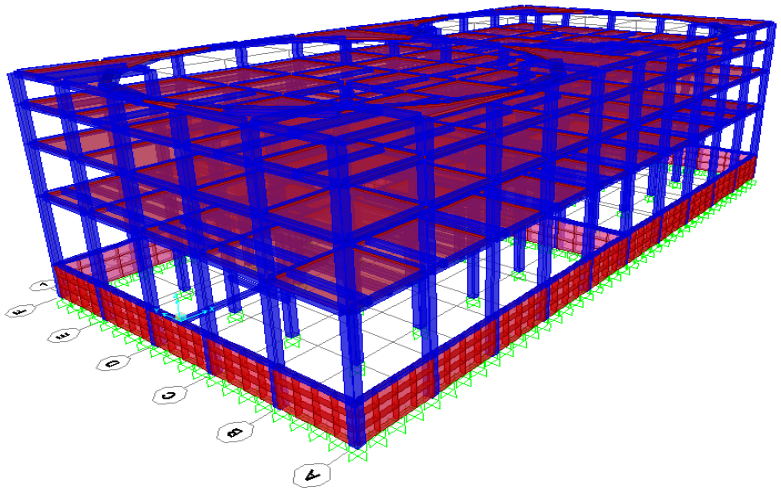
که T_c مدت زمان سپری شده پس از شروع خوردگی است. با استفاده از روابط (۱) تا (۶) زوال عضو بتنی می‌تواند برآورد گردد.

با توجه به توضیحات داده شده در خصوص محاسبه خوردگی با اکتساب اطلاعات مورد نیاز از مرحله ارزیابی وضعیت و سن سازه در زمان ارزیابی (۴۰ سال)، محاسبه درصد خوردگی در اعضای مورد مطالعه در این سازه انجام شده و نتایج محاسبات به همراه مشاهدات میدانی از وضعیت خوردگی میلگرد در محل، در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که پیش‌بینی مدل از درصد خوردگی مساحت میلگرد در حدود ۶٪ با مشاهدات میدانی اختلاف دارد که حاکی از مناسب بودن مدل خوردگی برای پیش‌بینی وضعیت زوال سازه در زمان‌های آینده است.

لازم به توضیح است که با توجه به ماهیت مطالعه میدانی و محدودیت داده‌های در دسترس، امکان تعیین پارامترهای متعدد مدل‌های پیچیده‌تر فراهم نبوده است. در مقابل، پارامترهای مدل مبتنی بر قانون فیک قابلیت برآورد و کالیبراسیون بر اساس داده‌های واقعی سازه را داشته‌اند و نتایج حاصل نیز با مشاهدات میدانی همخوانی قابل قبول نشان داده است. از این رو، سطح پیچیدگی مدل متناسب با هدف مطالعه انتخاب شده است. علاوه بر این، تحلیل حاضر بر چند فرض ساده‌ساز استوار است که لازم است دامنه اعتبار نتایج در چارچوب آن‌ها تفسیر گردد. نخست، انتقال کلرید به‌صورت یک‌بعدی و در محیطی با خواص مؤثر همگن مدل شده است و ناهمگنی‌های موضعی ریزساختاری بتن به‌طور صریح لحاظ نشده‌اند. دوم، آغاز خوردگی به‌صورت یکنواخت فرض شده و پدیده خوردگی موضعی در مدل وارد نشده است. سوم، اثر ترک‌های فعال با عرض قابل توجه که می‌توانند موجب افزایش موضعی نفوذپذیری و تغییر مکانیزم انتقال شوند، در معادله حاکم مدل‌سازی نشده است. همچنین کوپل‌شدگی صریح بین انتقال کلرید، تغییرات رطوبت نسبی و دما در قالب یک دستگاه معادلات چندفیزیکی لحاظ نگردیده است. با این حال، لازم به ذکر است که بسیاری از مدل‌های تحلیلی رایج در پیش‌بینی زمان شروع خوردگی، حتی در نسخه‌های توسعه‌یافته، همچنان بر فرض نفوذ کنترل‌شده و محیط مؤثر همگن استوار بوده و آغاز خوردگی را در مقیاس ماکروسکوپی به‌صورت یکنواخت در نظر می‌گیرند.

۳- ۴- مدلسازی، تحلیل و تعیین شاخص عملکرد سازه مورد مطالعه در شرایط اولیه زمان ساخت

پس از انجام ارزیابی وضعیت و شناسایی مشخصات سازه، ابتدا باید شاخص عملکرد سازه سالم در زمان ساخت (T_0) محاسبه شود. معیار مورد نظر در این مطالعه برای بیان عملکرد سازه با رویکرد مبتنی بر عملکرد سیستمی، میزان حاشیه ایمنی سازه نسبت به حداقل مورد قبول در آئین‌نامه طراحی سازه‌های بتنی مسلح [۲۵, ۲۶] است. این معیار از یک سو بصورت کیفی بیانگر میزان قابلیت اعتماد سیستم سازه بوده و بطور مستقیم با آن همبسته است (بدین معنا که با افزایش آن، قابلیت اعتماد سازه نیز افزایش می‌یابد) و از سوی دیگر، تعیین آن ساده‌تر از شاخص قابلیت اعتماد با رویکردهای احتمالاتی بوده و در نتیجه، قابل کاربرد برای اهداف مهندسی و مدیریتی در پروژه‌های واقعی است. شاخص محاسباتی برای معیار عملکرد مورد نظر، ضریب اضافه مقاومت سازه تحت شرایط بارگذاری مفروض است.



شکل ۱۴. نمای کلی از مدل تحلیلی سازه مورد مطالعه در نرم افزار SAP2000.

Fig. 14. Overview of the analytical model of the studied structure in the SAP2000 software.

با توجه به اینکه شرایط مورد نظر در تعیین عمر باقیمانده سازه مربوط به زوال تدریجی بوده و شامل حوادث ناگهانی نمی‌شود، شرایط بارگذاری مفروض سازه نیز منحصر به بارهای ثقلی (مرده و زنده) متناسب با کارکرد ساختمان خواهد بود. نحوه محاسبه ضریب اضافه مقاومت به این صورت است که ابتدا مدل تحلیلی سازه در نرم‌افزار تحت بارهای ثقلی نهایی (ضریبدار) آئین‌نامه [۲۵, ۲۶] تحلیل استاتیکی غیرخطی شده و پس از بررسی عملکرد سازه و مقایسه آن با عملکرد قابل قبول، مقادیر بارهای ثقلی با استفاده از یک ضریب مقیاس (S) به نحوی افزایش یا کاهش داده می‌شوند تا عملکرد سازه به آستانه قابل قبول برسد. مقدار ضریب مقیاس بارهای ثقلی در این حالت برابر با ضریب اضافه مقاومت سازه خواهد بود. مقدار ضریب اضافه مقاومت کوچکتر از یک به معنای عدم وجود حداقل حاشیه ایمنی قابل قبول در سازه بوده و به عبارت دیگر، زمان رسیدن این ضریب به یک، زمان انتهای عمر سازه (بر مبنای عملکرد) با این معیار خواهد بود. با توجه به اهمیت ساختمان مورد مطالعه در واحد صنعتی مربوطه، عملکرد قابل قبول سازه در تحلیل استاتیکی غیرخطی تحت بارهای ثقلی، بصورت تشکیل مفاصل پلاستیک خمشی تا حد استفاده بی‌وقفه (IO) و عدم تشکیل مفاصل پلاستیک برشی در نظر گرفته شده و در حالت نقض هریک از این دو شرط، عملکرد سازه قابل قبول نخواهد بود.

مدل تحلیلی غیرخطی سازه مورد مطالعه در نرم‌افزار SAP2000 [۳۲] تهیه شده و نمای کلی آن در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به وجود درز انبساط میان بلوک‌های مختلف، یک بلوک پیوسته از سازه در مدل تحلیلی لحاظ شده است. مشخصات مقاطع و ابعاد هندسی سازه در مدل تحلیلی بر اساس مستندات زمان ساخت و نقشه‌های چون ساخت سازه که در مرحله ارزیابی وضعیت گردآوری و با برداشت‌های میدانی بررسی شده‌اند، در نظر گرفته شده‌اند. مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح بتنی و میلگردها نیز بر اساس اطلاعات موجود در نقشه‌ها و تست‌های انجام شده، به شرح جدول ۴ منظور شده‌اند. مقادیر بارهای ثقلی مرده و زنده وارده بر سازه نیز بر اساس مستندات فنی، الزامات کارکرد و تجهیزات موجود در سازه تعیین و در مدل تحلیلی با لحاظ ضرایب بار آئین‌نامه ($1.0D_w+1.1D_s+1.6L$) لحاظ شده‌اند، که در آن D_w، D_s، و L به ترتیب متناظر با بار مرده ناشی از وزن اعضای سازه، بار مرده ناشی از کف سازی و دیوارها و سایر منابع غیرسازه ای، و بار زنده می‌باشند. بار دیفیوزرها نیز به صورت بار متمرکز در مدلسازی عددی در نظر گرفته شده است و به دلیل حاکم نبودن بار باد، از مدلسازی مستقیم آن‌ها صرف نظر شده است. با توجه به اینکه تحلیل غیرخطی استاتیکی سازه تحت اثر بارهای ثقلی انجام می‌شود، مفاصل پلاستیک خمشی در دو انتها و وسط تیرها، مفاصل خمشی– محوری در دو انتهای ستون‌ها و مفاصل برشی نیز در دو انتهای تیرها و ستون‌ها بصورت متمرکز در نظر گرفته شده‌اند که مشخصات آنها بر اساس ASCE-41 [۳۳]و با لحاظ ضرایب کاهش مقاومت ارائه شده در فصل ۲۵ آئین‌نامه بتن ایران [۲۵] در نرم افزار اعمال می‌شود. همچنین تحلیل غیرخطی سازه تحت

جدول ۴. مشخصات مکانیکی بتن و میلگردها در مدل تحلیلی سازه سالم.

Table 4. Mechanical properties of concrete and rebars in the analytical model of the intact structure.

تیپ عضو سازه (طبق جدول ۱)	f_{ys} (مگاپاسکال)	f_y (مگاپاسکال)	f_c (مگاپاسکال)
B1	۲۴۰	۴۰۰	۲۵٫۳
B2	۲۴۰	۴۰۰	۳۳٫۵
B3	۲۴۰	۴۰۰	۳۵٫۸
C1	۲۴۰	۴۰۰	۳۳٫۵
C2	۲۴۰	۴۰۰	۴۱٫۶

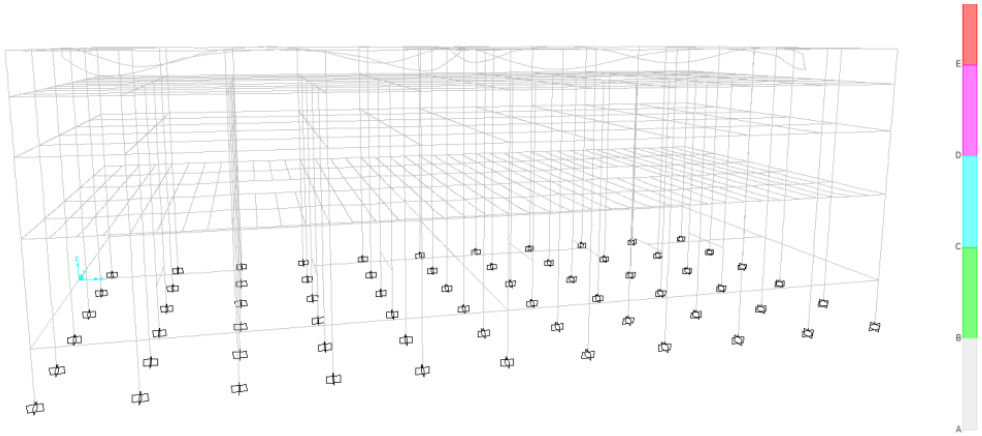
اثر بارهای ثقلی بصورت کنترل شونده با نیرو انجام می‌شود. با توجه به سن حدود ۴۰ ساله سازه و نتایج ارزیابی وضعیت، سیستم سازه در مدلسازی بصورت قاب خمشی بتنی معمولی در نظر گرفته شده است.

برای صحت‌سنجی دقت شبیه‌سازی‌های عددی در SAP2000، یک قاب میانی از سازه مورد نظر در OpenSEES نیز مدل‌سازی شده [۳۴]، و نتایج برای همان قاب دوبعدی مقایسه شدند. این مقایسه سطح بالایی از تطابق بین دو برنامه نرم‌افزاری را نشان داد. به عنوان مثال، دوره تناوب طبیعی و مقاومت جانبی (برش پایه) قاب دوبعدی در SAP2000 به ترتیب برابر با ۰٫۸۱۷ ثانیه و ۷۸۴٫۷ کیلونیوتن و در OpenSEES برابر با ۰٫۸۰۲ ثانیه و ۷۸۳٫۳ کیلونیوتن؛ با اختلاف به ترتیب حدود ۱٫۹٪ و ۰٫۲٪ بودند که صحت مدل‌سازی سازه را تأیید می‌کند.

پس از تهیه مدل تحلیلی، ابتدا سازه تحت بارهای ثقلی ضریبدار (با ضریب مقیاس S=1) تحلیل می‌شود. همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، در این سطح از بارگذاری هیچ مفصل پلاستیکی در اعضای سازه ایجاد نشده و عملکرد سازه قابل قبول است. بر این اساس، برای تعیین ضریب اضافه مقاومت سازه، باید ضریب مقیاس بارها به تدریج افزایش داده شده و با انجام سعی و خطا، کمترین مقدار ضریب مقیاس که منجر به عملکرد غیرقابل قبول سازه می‌شود، تعیین گردد. با انجام این روند، نهایتا با عبور ضریب مقیاس از ۱٫۴۵، و با تشکیل مفاصل برشی در تیرهای میانی بام سازه (علاوه بر ۱۶ و ۱۰ مفصل خمشی در سطح استفاده بی‌وقفه، به ترتیب در سقف‌های اول و بام سازه) عملکرد سازه به حد آستانه قابل قبول خود می‌رسد (شکل ۱۶). بر این اساس، ضریب اضافه مقاومت سازه سالم در برابر بارهای ثقلی ضریبدار برابر ۱٫۴۵ خواهد بود.

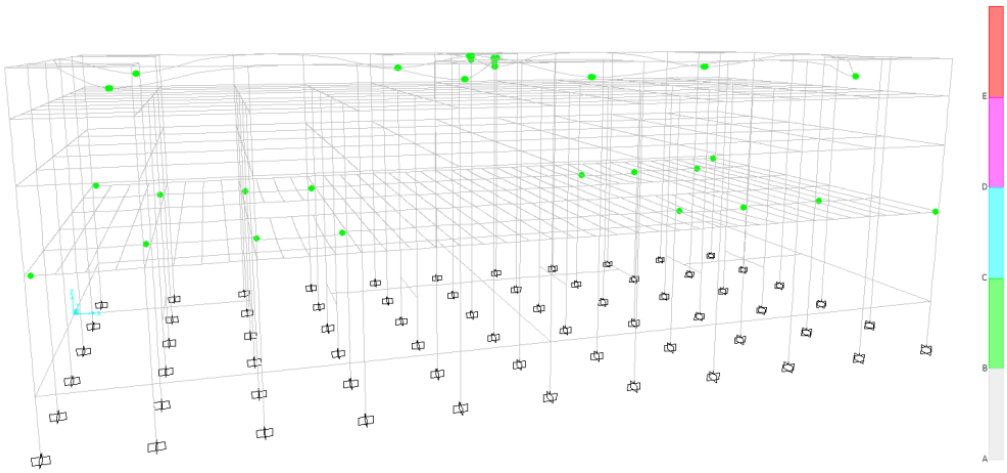
۳- ۵- مدلسازی، تحلیل و تعیین شاخص عملکرد سازه مورد مطالعه در شرایط دارای خوردگی در مقاطع زمانی مختلف

بر اساس اطلاعات حاصل از ارزیابی وضعیت و مدل خوردگی مورد استفاده در سازه مورد مطالعه، میزان درصد کاهش مقطع میلگردهای اعضای سازه در زمان‌های مختلف در اثر خوردگی، قابل برآورد است. برای مدلسازی و تحلیل سازه در حالت دارای خوردگی، بسته به درجه شدت خوردگی (بر اساس کاهش مقطع میلگردها) باید مشخصات مکانیکی مصالح و ابعاد میلگردها و مقطع بتنی اعضا متناسبا کاهش داده شوند. بدین منظور از روش ارائه شده در [۳۵, ۳۶] برای محاسبه پارامترهای لازم برای مدلسازی و تحلیل سازه در شرایط وجود خوردگی استفاده شده است. با توجه به اینکه سن سازه در زمان ارزیابی وضعیت حدود ۴۰ سال است، تحلیل و تعیین شاخص عملکرد سازه تا رسیدن به زمان انتهای عمر باید در سنین بالاتر بصورت سعی و خطا انجام شود که در این مطالعه، تحلیل سازه دارای خوردگی در سنین ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۶۰ سال انجام شده است. مقادیر پارامترهای محاسبه شده اعضای سازه دارای خوردگی در مدل تحلیلی در هریک از سنین فوق‌الذکر، در جدول ۵ ارائه شده‌اند. در این جدول f^*_{ys} مقاومت تسلیم (کران پایین) میلگردهای عرضی (خاموت) در سازه دارای خوردگی، f^*_y مقاومت تسلیم (کران پایین) میلگردهای طولی در سازه دارای خوردگی و f^*_c مقاومت مشخصه (کران پایین) فشاری بتن در سازه دارای خوردگی می‌باشند. مقاومت خمشی و برشی و محوری اعضای خورده شده سازه در سنین مختلف، با لحاظ کاهش در میلگردهای طولی و عرضی، کاهش ابعاد مقطع در شرایط خوردگی شدید و کاهش مقاومت مشخصه مصالح فولادی و بتن طبق جدول ۵ و با استفاده از روابط مربوطه در آئین نامه طراحی [۲۵, ۲۶] محاسبه شده‌اند. بر اساس



شکل ۱۵. نتایج تحلیل غیرخطی استاتیکی (مفاصل پلاستیک تشکیل شده) سازه سالم در حالت S=1.0.

Fig. 15. Results of static nonlinear analysis (plastic hinges) of intact structure in case of S=1.0



شکل ۱۶. نتایج تحلیل غیرخطی استاتیکی (مفاصل پلاستیک تشکیل شده) سازه سالم در حالت S=1.45.

Fig. 16. Results of static nonlinear analysis (plastic hinges) of intact structure in case of S=1.45.

بررسی‌های آزمایشگاهی ارائه شده در [۳۵]، محاسبه مقاومت مقاطع بتنی دارای خوردگی با این روش معتبر بوده و تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایش دارد.

پس از تهیه مدل سازه دارای خوردگی در سنین مختلف، تعیین ضریب اضافه مقاومت سازه با روالی مشابه سازه سالم که در بخش قبل توضیح داده شد، انجام می‌شود. نتایج تحلیل شامل وضعیت مفاصل پلاستیک تشکیل شده در اعضای مختلف سازه در سنین ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۶۰ سال به ترتیب در شکل‌های ۱۷ الی ۲۰ ارائه شده‌اند. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با توجه به اینکه میزان شدت خوردگی میلگردها در طبقه بالایی سازه به مراتب بیشتر از سایر ترازهای سازه بوده است، افت مقاومت خمشی و برشی بیشتری در تیرهای بام ایجاد شده و به تبع آن، مفاصل پلاستیک در سازه‌های خورده شده بر خلاف سازه سالم، غالباً در تیرهای طبقه بام تشکیل شده‌اند. در سازه ۶۰ ساله در اثر افزایش شدت خوردگی در طبقات پایینتر، تعداد قابل توجهی مفصل خمشی نیز در تیرهای سقف‌های دوم و سوم (علاوه بر تیرهای سقف بام) تشکیل شده‌اند. همچنین در تمامی حالات مورد بررسی، رسیدن سازه به آستانه عملکرد قابل قبول خود ناشی از تشکیل مفصل برشی در تیرهای میانی بام بوده است. پس از انجام روند تحلیل‌ها و تعیین ضرایب اضافه مقاومت، مقادیر این ضریب در سازه‌های با سنین ۴۰،

جدول ۵. مشخصات مکانیکی بتن و میلگردها در مدل تحلیلی سازه دارای خوردگی.

Table 5. Mechanical properties of concrete and rebar in the analytical model of corroded structure.

سن سازه (سال)	تیپ عضو سازه (طبق جدول ۱)	f_{ys}^* (مگاپاسکال)	f_y^* (مگاپاسکال)	f_c^* (مگاپاسکال)	شدت خوردگی میلگرد عرضی (%)	شدت خوردگی میلگرد طولی (%)
۴۰	B1	۲۰۶٫۰	۳۷۱٫۳	۱۵٫۸	۲۸٫۴	۱۴٫۳
	B2	۲۲۱٫۴	۳۸۶٫۱	۲۶٫۱	۱۵٫۵	۷٫۰
	B3	۲۳۱٫۳	۳۹۳٫۹	۳۱٫۹	۷٫۳	۳٫۰
	C1	۲۲۱٫۴	۳۸۶٫۱	۲۷٫۶	۱۵٫۵	۷٫۰
	C2	۲۳۳٫۹	۳۹۶٫۸	۳۹٫۷	۵٫۱	۱٫۶
۴۵	B1	۲۰۲٫۰	۳۶۷٫۷	۱۳٫۶	۳۱٫۷	۱۶٫۲
	B2	۲۱۸٫۹	۳۸۳٫۸	۲۲٫۹	۱۷٫۶	۸٫۱
	B3	۲۳۰٫۰	۳۹۲٫۸	۲۹٫۵	۸٫۳	۳٫۶
	C1	۲۱۸٫۹	۳۸۳٫۸	۲۴٫۹	۱۷٫۶	۸٫۱
	C2	۲۳۲٫۶	۳۹۵٫۹	۳۷٫۴	۵٫۹	۲٫۰
۵۰	B1	۱۹۸٫۱	۳۶۴٫۱	۲۱٫۹	۳۴٫۹	۱۸٫۰
	B2	۲۱۶٫۴	۳۸۱٫۷	۲۲٫۱	۱۹٫۷	۹٫۲
	B3	۲۲۸٫۸	۳۹۱٫۸	۲۸٫۹	۹٫۴	۴٫۱
	C1	۲۱۶٫۴	۳۸۱٫۷	۲۴٫۱	۱۹٫۷	۹٫۲
	C2	۲۳۱٫۸	۳۹۵٫۰	۳۶٫۸	۶٫۸	۲٫۵
۶۰	B1	۱۹۰٫۳	۳۵۷٫۰	۱۱٫۶	۴۱٫۴	۲۱٫۵
	B2	۲۱۱٫۵	۳۷۷٫۴	۲۰٫۵	۲۳٫۷	۱۱٫۳
	B3	۲۲۶٫۳	۳۸۹٫۶	۲۷٫۷	۱۱٫۴	۵٫۲
	C1	۲۱۱٫۵	۳۷۷٫۴	۲۲٫۷	۱۳٫۷	۱۱٫۳
	C2	۲۲۹٫۷	۳۹۳٫۳	۳۵٫۷	۸٫۶	۳٫۴

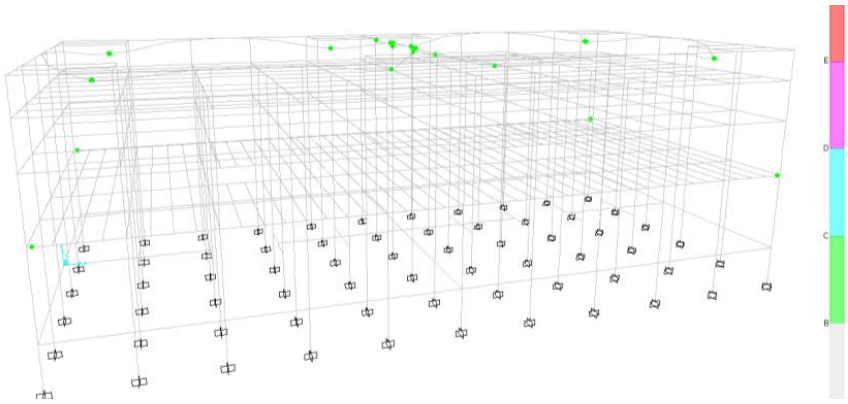
۴۵، ۵۰ و ۶۰ سال به ترتیب برابر ۱٫۰۸، ۱٫۰۲، ۰٫۹۷ و ۰٫۸۹ بدست آمد. با توجه به اینکه ضریب اضافه مقاومت سازه در سنین ۵۰ و ۶۰ سال از عدد یک کمتر شده، این حالات دارای حداقل حاشیه ایمنی مورد نظر آئین‌نامه نبوده و بنابراین، زمان انتهای عمر کارکردی سازه مورد مطالعه بر مبنای عملکرد سیستم، در بازه سنی ۴۵ تا ۵۰ سال قرار دارد.

۴- بحث و بررسی نتایج

۴- ۱- تهیه منحنی عملکرد و تخمین عمر باقیمانده سازه مورد مطالعه

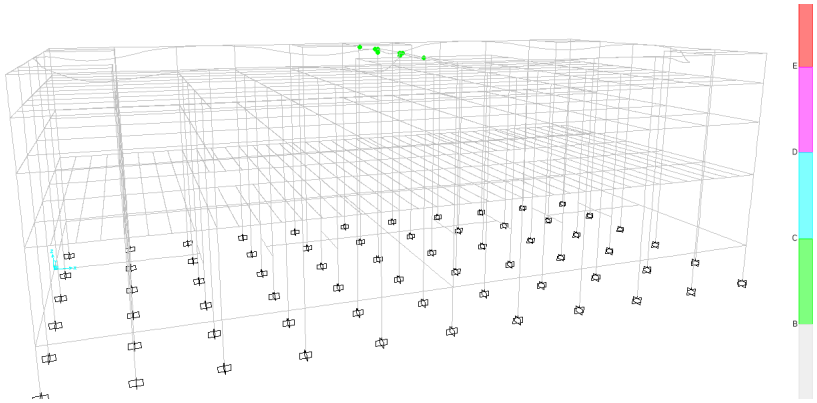
ابزار اصلی در تعیین عمر باقیمانده سازه، منحنی عملکرد است که با ترسیم مقادیر اضافه مقاومت حاصل از تحلیل سازه در شرایط مختلف، نسبت به زمان (یا سن سازه) حاصل می‌شود. با استفاده از منحنی عملکرد سازه علاوه بر تعیین عمر باقیمانده (یا زمان انتهای عمر) سازه، می‌توان یک دید و بینش کلی نسبت به روند افت عملکرد سازه در طی گذر زمان نیز بدست آورد.

با استفاده از مقادیر ضریب اضافه مقاومت سازه در سنین مختلف براساس تحلیل‌های انجام شده، منحنی عملکرد سازه مورد مطالعه در شکل ۲۱ نشان داده شده است. این شکل، ضریب اضافه مقاومت سازه (به عنوان شاخص عملکرد سیستم سازه) را در برابر زمان (بر حسب سال از زمان احداث سازه) نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل قابل مشاهده است، مقدار ضریب اضافه مقاومت در ابتدای ساخت سازه بزرگتر از ۱ بوده که نشان‌دهنده وجود



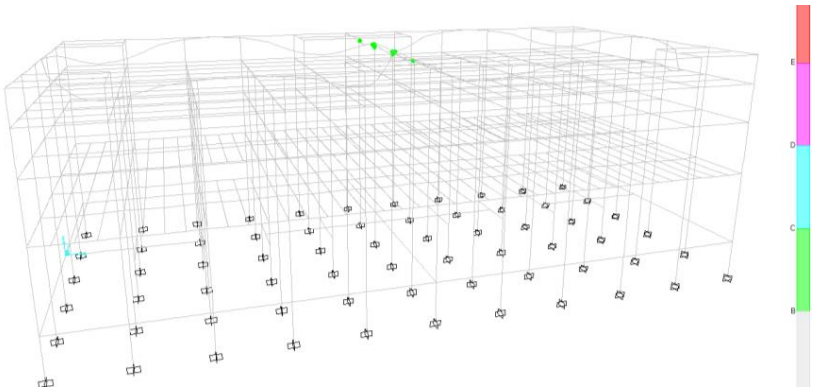
شکل ۱۷. نتایج تحلیل غیرخطی استاتیکی (مفاصل پلاستیک تشکیل شده) سازه ٤٠ ساله در حالت S=1.08.

Fig. 17. Results of static nonlinear analysis (plastic hinges) of a 40-year-old structure in the case of S=1.08.



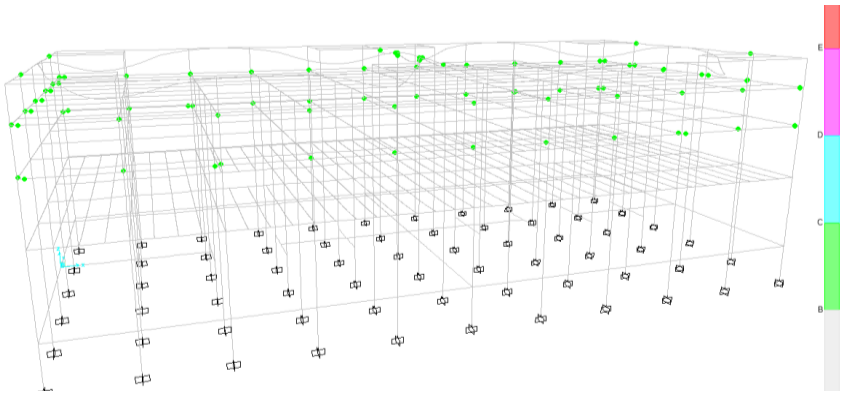
شکل ۱۸. نتایج تحلیل غیرخطی استاتیکی (مفاصل پلاستیک تشکیل شده) سازه ٤٥ ساله در حالت S=1.02.

Fig. 18. Results of static nonlinear analysis (plastic hinges) of a 45-year-old structure in the case of S=1.02.



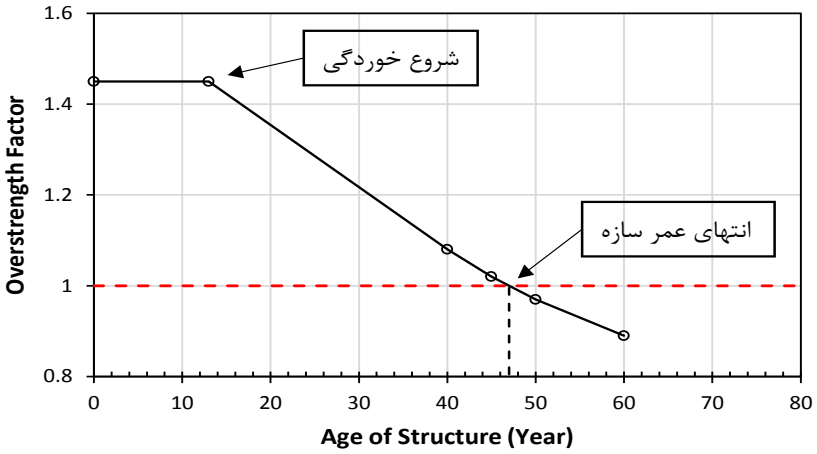
شکل ۱۹. نتایج تحلیل غیرخطی استاتیکی (مفاصل پلاستیک تشکیل شده) سازه ٥٠ ساله در حالت S=0.97.

Fig. 19. Results of static nonlinear analysis (plastic hinges) of a 50-year-old structure in the case of S=0.97.



شکل ۲۰. نتایج تحلیل غیرخطی استاتیکی (مفاصل پلاستیک تشکیل شده) سازه ۶۰ ساله در حالت S=0.89.

Fig. 20. Results of static nonlinear analysis (plastic hinges) of a 60-year-old structure in the case of S=0.89.



شکل ۲۱. منحنی عملکرد سازه مورد مطالعه.

Fig. 21. Performance curve of the studied structure.

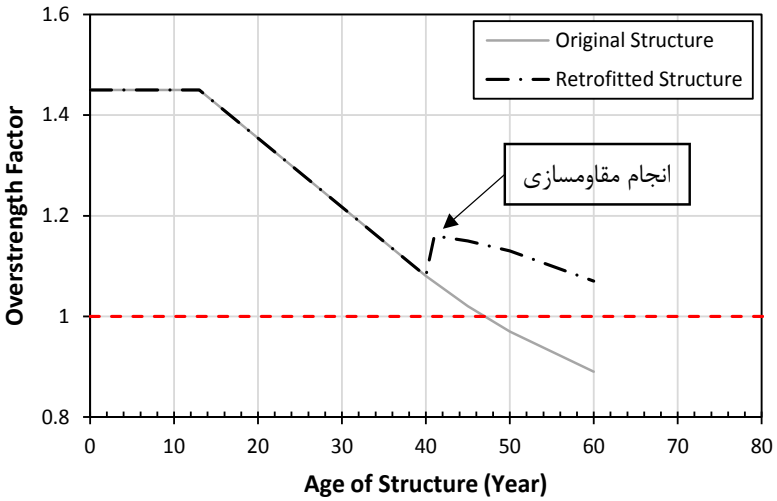
حاشیه ایمنی اضافی نسبت به حداقل مورد قبول آئین‌نامه است. با گذشت زمان و شروع زوال سازه در اثر خوردگی، مقدار این ضریب کاهش می یابد. طبق توضیحات ارائه شده در بخش ۲-۴، زمان رسیدن مقدار ضریب اضافه مقاومت به عدد ۱ متناظر با انتهای عمر کارکردی سازه است. بر اساس این منحنی عملکرد، زمان انتهای عمر کارکردی سازه در سن ۴۷ سالگی آن تخمین زده می‌شود و بنابراین، عمر کارکردی باقیمانده سازه نسبت به زمان انجام ارزیابی (در سن ۴۰ سال) برابر با ۷ سال خواهد بود. لازم به ذکر است که در فرآیند تحلیل برای تخمین عمر سازه مورد مطالعه، کلیه پارامترها به نحوی انتخاب شدند که کران پایینی از عمر سازه حاصل شود. به عبارت دیگر تمامی پارامترهای مورد استفاده در تحلیل، کران‌های پایین یا بالای مقادیر به‌دست‌آمده از ارزیابی وضعیت و آزمایش‌ها بودند تا سریع‌ترین میزان تخریب سازه ناشی از خوردگی برآورد شود. به عنوان مثال، مقدار کران پایین برای ضخامت پوشش بتنی و پارامترهای مقاومتی بتن و میلگرد استفاده شد، در حالی که مقدار کران بالا برای پارامتر محتوای کلرید به کار رفت. بر این اساس، تخمین کران پایین برای عمر باقیمانده سازه مورد مطالعه برابر ۷ سال است.

توجه به این نکته نیز لازم است که ارزیابی تحلیلی عمر باقیمانده سازه‌های بتنی در معرض خوردگی دارای محدودیت‌هایی است که باید در

نظر گرفته شود. اغلب مدل‌های مورد استفاده در تحلیل خوردگی اعضای بتنی مسلح بر اساس قانون دوم فیک و لحاظ فرضیات ساده‌کننده در شرایط ایده‌آل استخراج شده و از اینرو دارای عدم قطعیت بوده و ممکن است با شرایط واقعی سازه مطابقت کامل نداشته باشند [۲۰]. از طرفی، معیار تعیین عملکرد قابل قبول برای محاسبه شاخص عملکرد سیستمی سازه‌ها نیز در شرایط مختلف بسته به نوع، اهمیت و شرایط کارکرد و بهره‌برداری از سازه می‌تواند متفاوت بوده و در نتیجه منجر به تفاوت در تخمین عمر باقیمانده شود. بنابراین، ارزیابی عمر باقیمانده سازه بتنی مسلح باید با قضاوت مهندسی ترکیب شده و با شرایط واقعی میدانی اعتبارسنجی گردد. هم‌چنین باید توجه داشت که با توجه به این‌که سازه مورد مطالعه تا کنون زلزله‌ای را تجربه نکرده است، مدل مورد استفاده و نتایج این تحقیق، در چارچوب سناریوی بارگذاری بهره‌برداری و بدون وقع زلزله در دوره پیش بینی معتبر هستند. رویدادهای لرزه‌ای می‌توانند با ایجاد ترک‌های جدید یا بازگشایی ترک‌های موجود، شرایط انتقال یون‌های مهاجم را تغییر دهند که این اندرکنش خوردگی و آسیب لرزه‌ای می‌تواند به عنوان گام تکمیلی در مطالعات آتی مد نظر قرار گیرد.

۴- ۲- تاثیر مقاوم‌سازی بر بهبود عملکرد و افزایش عمر سازه مورد مطالعه

یکی از کاربردهای منحنی عملکرد و تخمین عمر سازه‌ها، انتخاب بهترین استراتژی و برنامه‌ریزی برای انجام عملیات تعمیر و مقاومسازی سازه است [۵]. بطور کلی استراتژی بهینه برای تعمیرات باید منجر به کاهش و کمینه‌سازی هزینه چرخه عمر سازه شود. در این راستا و با دانستن زمان انتهای عمر سازه، می‌توان با برنامه‌ریزی زمان انجام تعمیرات و برآورد اثر انجام تعمیرات بر منحنی عملکرد سازه در سناریوهای مختلف (مانند انجام تعمیرات جزئی زمانبندی شده، انجام تعمیرات اساسی در نزدیکی انتهای عمر سازه و یا تخریب سازه پس از رسیدن به زمان انتهای عمر کارکردی و جایگزینی آن در صورت نیاز)، بهترین سناریو را انتخاب نمود. در این مطالعه به عنوان نمونه یک سناریوی تعمیر و مقاومسازی برای سازه مورد مطالعه در نظر گرفته شده و اثر آن بر منحنی عملکرد، تعیین و بررسی شده است. سناریوی مقاومسازی پیشنهادی صرفاً به منظور افزایش عمر باقیمانده سازه تا میزان مورد نظر صاحبان آن (۶۰ سال) در شرایط کارکرد عادی آن در نظر گرفته شده و اهداف دیگر نظیر مقاومسازی و تعمیر کامل برای رفع تمامی نقاط دارای خوردگی در سازه و یا مقاومسازی در برابر حوادثی مانند زلزله مورد نظر نیستند. در این راستا، سناریوی مقاومسازی با توجه به مود شکست غالب مشاهده شده در سازه تعیین می‌گردد. همانطور که در بخش قبل نشان داده شد، رسیدن سازه به آستانه عملکرد خود در تمامی حالات دارای خوردگی، ناشی از شکست برشی تیرهای میانی در سقف بام بوده است. بر این اساس، سناریوی مورد نظر برای افزایش عمر سازه، مقاومسازی سه عدد تیر میانی با هدف افزایش مقاومت برشی آن‌ها است که این کار با روش‌های مختلف (مثلا با ترمیم بتن و تعویض میلگردهای آسیب دیده تا حد امکان و یا با استفاده از مصالح FRP) و با هزینه نسبتاً اندکی قابل انجام است. در این سناریو، سایر تیرهای آسیب دیده سازه که دچار شکست خمشی شده‌اند، به همان حال باقی مانده و مقاومسازی نمی‌شوند. همچنین طبق بررسی انجام شده در مدل تحلیلی سازه، چشمه‌های اتصالات تحت اثر بارهای وارده در لحظه رسیدن سازه به آستانه عملکرد خود، دچار شکست نشده و نیاز به تعمیر ندارند. با فرض اینکه مقاومسازی تیرهای مورد نظر بلافاصله پس از انجام ارزیابی (در ۴۰ سالگی سازه) آغاز شده و در اثر مقاومسازی، مقاومت برشی تیرهای بحرانی به مقدار حدود ۲۵ درصد افزایش یابد؛ منحنی عملکرد سازه با انجام روند تحلیلی مشابه با سازه اصلی تهیه و در شکل ۲۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، شاخص عملکرد سازه در اثر انجام سناریوی مقاومسازی مورد نظر به میزان حدود ۷٪ افزایش یافته است که به تبع آن، زمان انتهای عمر سازه به بیش از ۶۰ سال و عمر باقیمانده سازه از ۷ سال به بیش از ۲۰ سال رسیده است و به عبارت دیگر، بیش از حدود ۲٫۸۶ برابر شده است. همچنین ضریب اضافه مقاومت سازه مقاومسازی شده در سن ۶۰ سالگی به مقدار ۱٫۰۷ رسیده که نشان‌دهنده حاشیه ایمنی حدود ۷٪ بالاتر از حد مورد قبول آئین‌نامه است. لازم به ذکر است که سناریوی مقاومسازی سازه باید با توجه به مودهای خرابی در اعضای بحرانی که در شکست نهایی سازه و رسیدن شاخص عملکرد آن به مقدار آستانه قابل قبول، مؤثرتر بوده‌اند؛ تعیین شود. از طرف دیگر، با توجه به اینکه عمر کارکردی طراحی برای واحد صنعتی مورد نظر (به لحاظ کارکرد و فرسودگی سایر تجهیزات) در حدود ۶۰ سال است، افزایش عمر سازه تا این میزان از دیدگاه صاحبان صنعت کافی بوده و استراتژی تعمیر و مقاومسازی باید با لحاظ این موضوع تنظیم گردد. بر این اساس، سناریوی مقاومسازی پیشنهادی در این مورد مطالعاتی با توجه به تأمین اهداف مورد نظر صاحبان صنعت (افزایش عمر باقیمانده سازه تا ۶۰ سال) و هزینه و زمان نسبتا کم، مناسب و مطلوب بوده و نسبت به سایر گزینه‌ها (مانند مقاومسازی همه المان‌های آسیب‌پذیر سازه و یا تخریب برنامه‌ریزی شده سازه در انتهای عمر آن) ارجح است. توجه به این نکته ضروری است که سناریوی مقاومسازی



شکل ۲۲. منحنی عملکرد سازه مورد مطالعه در حالت مقاوم‌سازی شده.

Fig. 22. Performance curve of the studied structure in the retrofitted state.

پیشنهاد شده در این مطالعه، صرفاً به عنوان یک نمونه و مثال از کاربرد تخمین عمر باقیمانده در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی مناسب در خصوص نحوه مقاوم‌سازی سازه، ارائه شده است و همچنین میزان تأثیر آن بر منحنی عملکرد و افزایش عمر باقیمانده سازه، مختص به این مورد مطالعاتی خاص بوده و قابل تعمیم به سایر سازه‌ها و شرایط محیطی نیست.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک چارچوب تحلیلی-کاربردی برای تخمین عمر باقی‌مانده سازه‌های بتن مسلح در معرض خوردگی، با تکیه بر ارزیابی عملکرد سیستم سازه، ارائه شد و کارایی آن برای یک سازه برج خنک‌کننده صنعتی در قالب یک مطالعه موردی بررسی گردید. چارچوب پیشنهادی شامل چند مرحله کلیدی است: ارزیابی میدانی وضعیت اجزا، تخمین روند زوال عملکرد در طول زمان با استفاده از مدل‌های تجربی صحت‌سنجی شده، تعریف شاخص عملکرد کلی سازه تحت شرایط بارگذاری مشخص، و در نهایت تخمین زمان رسیدن به آستانه عملکرد. از مزایای این رویکرد می‌توان به سادگی اجرا، امکان صحت سنجی با داده‌های واقعی، و قابلیت به‌روزرسانی در طول زمان اشاره کرد. مهم‌ترین نتایج حاصل از این مطالعه در قالب برج خنک کننده مورد بررسی به شرح زیر می‌باشد:

- در گام اول تخمین عمر که ارزیابی وضعیت کنونی می‌باشد، نتایج نشان داد که در سازه مورد مطالعه خوردگی‌های متعددی خصوصاً در بالاترین تراز رخ داده است. ریشه این خوردگی‌ها نفوذ یون کلرید است. به منظور تعیین وضعیت خوردگی اعضای سازه در سال‌های آتی آزمایش‌هایی شامل تعیین مقاومت بتن و میلگرد، تعیین میزان خوردگی میلگرد، تعیین میزان نفوذ یون کلرید، اندازه‌گیری دمای ترازهای مختلف سازه و نیز تعیین پوشش بتن انجام شده و به عنوان ورودی مدلسازی عددی مورد استفاده قرار گرفت.
- یک مدل خوردگی برای پیش‌بینی وضعیت زوال سازه در سال‌های آینده انتخاب گردید. کارایی این مدل براساس اندازه‌گیری‌های میدانی راستی‌آزمایی گردید. براساس خروجی‌های مدل، مقادیر درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی برای سنین ۴۰ تا ۶۰ سالگی سازه در قسمت‌های مختلف آن تعیین گردید. هم چنین مشخصات بتن و میلگرد و نیز سطح مقطع اعضای بتنی براساس میزان خوردگی در سنین مختلف سازه محاسبه شد و مبنای تهیه مدل عددی سازه دارای خوردگی قرار گرفت.
- نتایج تحلیل برای سازه سالم نشان داد که تحت بارهای ثقلی، هیچ مفصلی در هیچ یک از اعضای سازه ایجاد نگردید. به این معنی که با وجود قدیمی بودن طراحی سازه، طراحی ثقلی آن به درستی انجام شده است؛ به گونه‌ای که ضریب اضافه مقاومت سازه سالم در برابر بارهای ثقلی ضریبدار برابر با ۱٫۴۵ می‌باشد.
- نتایج تحلیل برای سازه دارای خوردگی نشان داد که ضریب اضافه

مقاومت سازه برای سنین ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۶۰ سال به ترتیب برابر با ۱٫۰۸، ۱٫۰۲، ۰٫۹۷ و ۰٫۸۹ می‌باشد؛ این ضرایب مبنای ترسیم منحنی عملکرد سازه قرار گرفت. براین اساس، زمان انتهای عمر کارکردی سازه در سن ۴۷ سالگی آن تخمین زده شد و بنابراین، عمر کارکردی باقیمانده سازه نسبت به زمان انجام ارزیابی (در سن ۴۰ سال) برابر با ۷ سال خواهد بود. هم چنین تحلیل سناریوی مقاوم‌سازی نشان داد که با افزایش هدفمند ظرفیت برشی در اعضای بحرانی، می‌توان عمر باقی‌مانده سازه را تا بیش از سه برابر افزایش داد.

- نتایج این مطالعه نشان داد که رویکرد ارائه‌شده علاوه بر تخمین عمر، می‌تواند به عنوان ابزاری پشتیبان برای مدیریت دارایی‌های فیزیکی، بهبود تصمیم‌گیری در سطح کلان و کاهش ریسک بهره‌برداری از سازه‌های در حال زوال مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از پژوهشگاه نیرو جهت حمایت از انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

C_s	میزان کلرید در سطح بتن
C_{th}	غلظت کلرید آستانه برای شروع خوردگی
D	ضریب انتشار بتن
d_c	ضخامت پوشش بتن
D_w	بار مرده سازه ناشی از وزن اعضای سازه
D_s	بار مرده سازه ناشی از کفسازی‌ها، دیوارها و سایر منابع غیرسازه‌ای
erf	تابع خطا
f_c	مقاومت مشخصه (کران پایین) فشاری بتن در سازه سالم
f_{cyl}	مقاومت فشاری نمونه نمونه استوانه‌ای مغزه‌گیری شده (برای مدل خوردگی)
f_y	مقاومت تسلیم (کران پایین) میلگردهای طولی در سازه سالم
f_{ys}	مقاومت تسلیم (کران پایین) میلگردهای عرضی (خاموت) در سازه سالم
f_c^*	مقاومت مشخصه (کران پایین) فشاری بتن در سازه دارای خوردگی
f_y^*	مقاومت تسلیم (کران پایین) میلگردهای طولی در سازه دارای خوردگی
f_{ys}^*	مقاومت تسلیم (کران پایین) میلگردهای عرضی (خاموت) در سازه دارای خوردگی
L	بار زنده سازه
$i_{corr}(t)$	نرخ خوردگی برای دمای بیشتر از ۲۰ °C
$i_{corr-20}$	نرخ خوردگی در دمای ۲۰ °C
S	ضریب مقیاس بارهای ثقلی نهایی سازه
T_0	زمان ساخت سازه (سال)
T_e	زمان انجام ارزیابی وضعیت و تخمین عمر سازه موجود (سال)
T_c	مدت زمان سپری شده پس از شروع خوردگی
T_f	زمان انتهای عمر سازه (سال)
T_i	زمان شروع خوردگی
T_r	دمای محیط اطراف سازه در سایه
w/c	نسبت آب به سیمان بتن

منابع

[1] M.A. Jafari, Revising the strategic document and roadmap for structural health monitoring in electric power industry, methods for predicting the occurrence of defects and providing mitigation, Niroo Research Institute (NRI), 2022. (In Persian)

[2] S. Labi, Introduction to civil engineering systems: A systems perspective to the development of civil engineering facilities, John Wiley & Sons, 2014.

[3] Y. Mori, B.R.J.J.o.S.E. Ellingwood, Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures, 119(5) (1993) 1600-1621.

[4] L.-j. Wu, Y.-j. Zhou, X.-j. Kou, M.J.J.o.C.S.U. Jiang,

effect of Cover, Pressure Strength, and bars corrosion on Cracking of Reinforced Concrete Structures, 49(2) (2017) 251-262. (In Persian)

[15] M.-A. Shayanfar, M.-A. Barkhordari, M.J.J.o.C.S.U. Ghanooni-Bagha, Probability calculation of rebars corrosion in reinforced concrete using css algorithms, 22(8) (2015) 3141-3150.

[16] M. Ghanoonibagha, M.A. Shayanfar, S. Asgarani, M.J.J.O.M.E. Zabihi Samani, Service-life prediction of reinforced concrete structures in tidal zone, 12(24) (2017) 13-22. (In Persian)

[17] S.A. Hosseini, M.J.A.J.o.C.E. Bagheri, Concrete Beam Life Model Based on Shear Strength Degradation Under Different States of Chloride Ion Ingress, 54(8) (2022) 2995-3008. (In Persian)

[18] S.A. Hosseini, M. Bagheri, S.M.J.C.R. Ramezani, Effect of different states of chloride ion penetration in concrete on the life model due to flexural failure, 14(3) (2021) 37-47. (In Persian)

[19] A. Jafary, m.a. shayanfar, M. Ghanooni-Bagha, Investigation of the corrosion initiation time of reinforced concrete structures at different distances from the Sea %J Amirkabir Journal of Civil Engineering, 55(2) (2023) 389-406. (In Persian)

[20] M.S. Darmawan, R. Bayuaji, N. Husin, R.J.A.i.C.E. Anugraha, Case study of remaining service life assessment of a cooling water intake concrete structure in indonesia, 2014(1) (2014) 970393.

[21] L. Qi, X. Peng, Q. Yang, K. Xia, B.J.C. Xu, Review of Research on Prediction Models for Residual Life of Concrete Structures, 15(6) (2025) 693.

[22] M. Akiyama, D.M. Frangopol, Z.J.S. Xu, I. Engineering, Probabilistic service life assessment of corroded concrete structures: a state-of-the-art review, 21(7-8) (2025) 1081-1100.

[23] S.C.A.o.E.B. Subcommittee, Structural Condition Assessment of Existing Buildings: A Guideline, in, American Society of Civil Engineers Reston, VA, 2024.

[24] M. Ghosn, L. Dueñas-Osorio, D. Frangopol, T. Reliability-based service life prediction of existing concrete structures under marine environment, 22(9) (2015) 3608-3614.

[5] D.M. Frangopol, M. Soliman, Life-cycle of structural systems: recent achievements and future directions, in: Structures and infrastructure systems, Routledge, 2019, pp. 46-65.

[6] D.M. Frangopol, D. Saydam, S.J.S. Kim, i. engineering, Maintenance, management, life-cycle design and performance of structures and infrastructures: a brief review, 8(1) (2012) 1-25.

[7] D.M. Frangopol, M.J.S. Liu, i. systems, Maintenance and management of civil infrastructure based on condition, safety, optimization, and life-cycle cost, (2019) 96-108.

[8] D.M. Frangopol, Y. Dong, S. Sabatino, Bridge life-cycle performance and cost: analysis, prediction, optimisation and decision-making, in: Structures and infrastructure systems, Routledge, 2019, pp. 66-84.

[9] S.-I. Yang, D.M. Frangopol, L.C.J.R.E. Neves, S. Safety, Service life prediction of structural systems using lifetime functions with emphasis on bridges, 86(1) (2004) 39-51.

[10] N.M. Okasha, D.M.J.R.E. Frangopol, S. Safety, Redundancy of structural systems with and without maintenance: An approach based on lifetime functions, 95(5) (2010) 520-533.

[11] N. Kopiika, Y. Blikharskyy, J. Selejdak, R. Khmil, Z. Blikharskyy, Reliability-based analysis and residual life forecasting for corrosion-affected RC structures, in: Structures, Elsevier, 2025, pp. 108965.

[12] X. Chen, Y. Ming, F. Fu, P.J.I.J.o.C.S. Chen, Materials, Numerical and empirical models for service life assessment of RC structures in marine environment, 16(1) (2022) 11.

[13] A.A. Ramezanianpour, E. Jahangiri, F. Moodi, B.J.J.O.M.E. Ahmadi, Evaluation of Models for Service-Life Prediction of Reinforced Concrete Structures in Persian Gulf Marine Environment, 8(15) (2012) 13-27. (In Persian)

[14] M. Miri, M. Rakhshanimehr, F.J.A.J.o.C.E. Miri, The

McAllister, P. Bocchini, L. Manuel, B. Ellingwood, S. Arangio, F. Bontempi, M.J.J.o.S.E. Shah, Performance indicators for structural systems and infrastructure networks, 142(9) (2016) F4016003.

[25] P.a.B. Organization, Iranian Concrete Code (ABA), Volume I, Analysis and Design, in. (In Persian)

[26] A.C.I. Committee, i.b. American Concrete Institute, Building code for structural concrete (ACI 318-25) : code requirements and commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 2025.

[27] A. International, Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete, in, USA, 2020.

[28] M.A. Elrazek, Y.A. Shafy Gamal, The Reliable Concrete Compression Strength Assessment by SCHMIDT Hammer for Different Concrete Grades, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2021, pp. 012004.

[29] A. International, Tentative Specification for Corrosion-Resisting Chromium and Chromium-Nickel Steel Welding Rods and Bare, in, ASTM International, USA, 2000.

[30] A. International, Standard Test Method for Portland-Cement Content of Hardened Hydraulic-Cement Concrete, in, ASTM International, USA, 2019.

[31] A. International, Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete, in, ASTM International, USA, 2020.

[32] SAP2000 Ultimate 24.1.0, in, Computers and Structures, Inc., USA, 2022.

[33] A.S.o.C. Engineers, Seismic evaluation and retrofit of existing buildings, in, American Society of Civil Engineers, 2017.

[34] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L.J.P.e.e.r.c. Fenves, OpenSees command language manual, 264(1) (2006) 137-158.

[35] J. Rodriguez, L. Ortega, J.J.C. Casal, b. materials, Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement, 11(4) (1997) 239-248.

[36] M. TAGHIZADEH, M. GHALEHNOVI, Investigation of the behavior of reinforced concrete deep beams under the corrosion of longitudinal reinforcements, (2022). (In Persian)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. A. Jafari Sahnehsaraei, M. Zakersalehi , A. Yeganeh Fallah, H. Ebrahimi Araghi, Estimation of the Remaining Service Life of Reinforced Concrete Structures Exposed to Corrosion Using a System-Based Performance Approach: A Cooling Tower Case Study, Amirkabir J. Civil Eng., 58(1) (2026) 119-148.

DOI: 10.22060/ceej.2026.24214.8278

این صفحه عمداً خالی است