



Investigation of the corrosion initiation time of reinforced concrete structures at different distances from the Sea

A. H. Jafary¹, M. A. Shayanfar² *, M. Ghanoonibagha³

¹ School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

² The Centre of Excellence for Fundamental Studies in Structural Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

³ Department of Civil Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Review History:

Received: May, 05, 2021

Revised: Nov. 15, 2021

Accepted: Dec. 10, 2022

Available Online: Dec. 28, 2022

Keywords:

Concrete structures

Corrosion

Corrosion initiation

Monte-Carlo Simulation

Uncertainties

ABSTRACT: Corrosion is one of the crucial damages that may occur to reinforced concrete structures. It also may affect the expected performance of the structure during possible earthquakes. Onshore reinforced structures, bridges exposed to deicing salts in winter and also the pillars of marine structures under tidal waves, all of which are examples of corrosion damages. Corrosion mostly occurs due to two main reasons: chloride and carbonation which cause pitting corrosion and uniform corrosion, respectively. Corrosion starts with the reaching of those two ions to the bar surface, passing by the physical and chemical passive covers. Corrosion also affects the mechanical properties of the steel and the concrete and reduces the seismic performance of the structure. One of the most important parameters in studying corrosion and its effects on the seismic performance and life cycle of the structure is the corrosion initiation time. According to Fick's law, the initiation time is a function of surface and critical chloride, chloride diffusion coefficient and concrete cover on armatures. In the present study, the chloride-based corrosion is considered. Besides, corrosion initiation time is determined by deterministic and probabilistic Monte-Carlo methods considering the uncertainties in the effective parameters. In the end, by comparing these two methods, the effect of uncertainties in the possibility of corrosion initiation time is presented. Furthermore, parameters like the distance from the sea and the water-to-cement ratio are discussed in a parametric study.

1- Introduction

Buildings and bridges have been damaged prematurely by reinforcement corrosion in recent decades, and reinforcement corrosion occurs due to chloride ions in reinforced concrete structures [1, 2]. Rebar in concrete is protected by two physical and chemical factors. One of the factors is the coating on the reinforcement, while the other is the highly alkaline environment in concrete ($\text{pH} > 13.5$). In order to optimize the cost of repairing damaged concrete, designing new structures, and evaluating the stability of new cement materials, it is necessary to be able to predict the start time of corrosion [3]. The penetration of chloride ions and the onset of corrosion of reinforced concrete structures have been examined in several studies. In a study conducted by Shayanfar et al., ultra-exploratory methods were used to calculate the likelihood of corrosion of rebars under conditions of chloride penetration and carbonation of reinforced concrete members [4]. Ghanooni-Bagha studied the variations of reinforcement tensile strength due to the stress concentration of pitting corrosion analyzed. The stress concentration consequence of corrosion on the reinforcement tensile capacity was studied by utilizing tension tests and creating different ABAQUS software models. According to

the modeling in various corrosion depths, strength reduction was less than 5% in corrosion with pit radius to reinforcement diameter ratio up to 0.3, and for corrosion higher than 0.4, the measure of capacity reduction was increased to 30% [5]. In order to predict corrosion initiation time, Chateaufeuf et al. considered uncertainties in the parameters affecting corrosion onset. Based on the results, the proposed method can be very useful for determining the corrosion initiation time of reinforced concrete structures, especially those that have just been built [6].

This research predicts the corrosion start time by using probabilistic and non-probabilistic methods. The corrosion initiation time has been investigated using Monte Carlo simulations in a probabilistic manner. Also, the effect of surface chloride concentration and the effect of water-cement ratio have been investigated. Calculations and results have been compared for corrosion start times based on different distances from the coast, water-cement ratios, and failure probabilities. In addition, uncertainties in corrosion initiation have also been examined.

2- Chloride release in concrete and corrosion time

In order to calculate the rate at which chlorides penetrate

*Corresponding author's email: shayanfar@iust.ac.ir



concrete and to reach the critical chloride concentration for corrosion, Fick's second law must be applied. The second rule of Fick is as follows:

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$$

Which C represents the concentration of chloride in moles per cubic meter, D represents the diffusion coefficient in square meters per second, and x represents the desired depth from the surface of the reinforced concrete member in meters (m), as well as surface chloride levels at corrosion. Following relation (1), corrosion start time is calculated as follows:

$$t_{Corr} = \frac{Cover^2}{4D} \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_r}{C_s} \right) \right]^2 \quad (1)$$

In the same way as with structures, the following relationship can be used to estimate when corrosion will start by determining how high the chloride concentration is on the surface of the rebar (D) and the amount of critical chloride (R).

$$\begin{aligned} g(X, t) &= R(X, t) - D(X, t) \\ &= C_r - C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2D_c t} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

3- Results and discussion

Extended For the determined case, the corrosion start time has nearly quadrupled with a 25% reduction in the water/cement ratio for critical chloride concentrations of 0.6, 0.9 and 1.2 kg/m³ at 100 meters from the coast. For a critical chloride concentration of 9 kg/m³ at 350 meters from the coast, corrosion time has doubled. In the case of a distance of fewer than 100 meters from the coast, where corrosion initiation takes less time than at other distances, by reducing the water-cement ratio to less than 0.4, corrosion initiation times become longer than the useful life of the structure. Moreover, when the critical chloride concentration changes, significant changes in the results are observed, which makes it impossible to make accurate decisions about preventing future damage and reducing financial and life damage. Hence, it is recommended that low water-to-cement ratios are considered in coastal areas, such as the Persian Gulf, and environmental conditions that contribute to corrosion initiation. The probability of corrosion onset in 50 years with a critical chloride concentration of 0.9 kg/m³ and a distance of 100 meters from the coast, as well as a 25% reduction of water to cement with COV [1], is 13%, and COV [2] is 34%. At 350 meters of distance from the coast, COV [1] has a 57% probability of corrosion start time, while COV [2] has a 37% probability. The probability of corrosion occurring at a

distance of 1000 meters from the coast is very low. With COV [1] at 100 m from the coast, a critical chloride concentration of 1.2 kg/m³ is 46% reduced, COV [2] 36% reduced, and COV [1] with a critical chloride concentration of 0.6 kg/m³ is 36% reduced. COV [2] has a reduction of 4% while COV [1] has a reduction of 32% while COV [2] has a reduction of 37%. With increasing water-cement ratios (increasing concrete permeability) and decreasing distance from the coast, as in the non-probability case, corrosion initiation times decrease. In addition, if the corrosion initiation is investigated in a probabilistic manner with the probability of different failures, the corrosion initiation time is reduced as compared to a non-probabilistic condition. This issue illustrates the importance of considering uncertainties on the effective parameters at the time of corrosion initiation in order to make the best prediction and prevent corrosion damage. There were many differences in the results of the ratio of water to different cements due to different coefficients of change and failure probabilities. Considering the existing conditions of a project under review, it is necessary to select the coefficients of changes and effective parameters at the time of corrosion. Moreover, in order to determine which of these parameters has a greater influence on the probability of structural failure, different uncertainties have been considered for each parameter. By considering a 10% probability of corrosion initiation, a shorter corrosion initiation time is obtained. It is also important to consider different uncertainties for concrete coatings when predicting corrosion up to 50%, as these uncertainties have a significant impact on the results and lead to uneconomic designs being presented during the design process. In addition, corrosion start times will probably be estimated longer in high probability situations, which results in a lower degree of safety during design and implementation. This issue also illustrates the importance of choosing the coefficients of change carefully in order to provide a design that is both economical and safe, especially for the concrete cover.

4- Conclusion

First, the results from the non-probabilistic state are presented in this paper, then the results from the probabilistic state for three distances less than 100 meters, 350 meters, and 1000 meters from the coast are presented, as well as corrosion start times for structures situated less than 100 meters from the coast. In order to analyze the quality of construction and the effect of concrete permeability, different probabilities of failures are presented for different surface chloride concentrations, critical chloride concentrations, and water-to-cement ratios. A comparison of two sets of coefficients of variation for the influencing parameters on corrosion initiation was conducted in order to evaluate the importance of accuracy in determining the uncertainties appropriate for the existing conditions of the project. The corrosion start time for a non-probability case with 0.6, 0.9, and 1.2 kg/m³ critical chloride concentrations and a distance of 100 meters from the coast has increased almost four times. For a critical chloride concentration of 9 kg/m³ at a distance of 350 meters from

the coast, the corrosion time has doubled. As for probability mode, with a 10% probability of corrosion initiation, as was observed, with a 25% decrease in the water/cement ratio, corrosion initiation time increases three to four times. Also, in the 10% probability for the start of corrosion, taking into account more uncertainties for the effective parameters, especially for the concrete coating, this will result in a lower corrosion start time than in the previous cases, and finally, an uneconomic plan will be presented. A comparison of the results shows how surface chloride concentration, critical chloride concentration, and water-cement ratio play an important role. As we approach the coast, surface chloride concentration increases and the water-cement ratio becomes more important. The longer the distance from the coast, the longer it will take for corrosion to start because water-to-cement ratios are reduced. The ratio of cement to water in structures near the coast should be low during design and especially during implementation to reduce damage during the structure's useful life and to improve earthquake resistance.

References

- [1] E.A. Dizaj, R. Madandoust, M.M. Kashani, Probabilistic seismic vulnerability analysis of corroded reinforced concrete frames including spatial variability of pitting corrosion, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114 (2018) 97-112.
- [2] S. Ahmad, Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review, *Cement and concrete composites*, 25(4-5) (2003) 459-471.
- [3] J. Wu, P.N. Faye, W. Zhang, B. Diao, Chloride diffusivity and service life prediction of RC columns with sustained load under chloride environment, *Construction and Building Materials*, 158 (2018) 97-107.
- [4] M.A. Shayanfar, M.A. Barkhordari, M. Ghanooni-Bagha, Estimation of corrosion occurrence in RC structure using reliability based PSO optimization, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 59(4) (2015) 531-542.
- [5] M. Ghanooni-Bagha, Influence of chloride corrosion on tension capacity of rebars, *Journal of Central South University*, 28(10) (2021) 3018-3028.
- [6] A. Chateauneuf, A. Messabhia, A. Ababneh, Reliability analysis of corrosion initiation in reinforced concrete structures subjected to chlorides in presence of epistemic uncertainties, *Structural Safety*, 86 (2020) 101976.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. H. Jafary, M. A. Shayanfar, M. Ghanoonibagha, *Investigation of the corrosion initiation time of reinforced concrete structures at different distances from the Sea*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(2) (2023) 81-84.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20005.7312





بررسی زمان شروع خوردگی سازه‌های بتن آرمه در فواصل مختلف از دریا

امیرحسین جعفری^۱، محسنعلی شایانفر^{۱*}، محمد قانونی بقا^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
۲- گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

کلمات کلیدی:

سازه‌های بتن آرمه
خوردگی
زمان شروع خوردگی
شبیه‌سازی مونت کارلو
عدم قطعیت

خلاصه: یکی از آسیب‌هایی که در سازه‌های بتن آرمه به وجود می‌آید و باعث می‌شود که سازه مورد نظر عملکرد مورد انتظار را در هنگام وقوع زلزله محتمل نداشته باشد، خوردگی آرماتور می‌باشد. سازه‌های بتن آرمه نزدیک به ساحل، پل‌هایی که در معرض نمک یخ زدایی در فصل زمستان هستند، پایه‌های سازه‌های دریایی که تحت اثر جزر و مد هستند، از جمله مواردی است که خوردگی باعث آسیب در عملکرد مورد انتظار می‌شود. خوردگی بیشتر تحت دو عامل کلر (خوردگی حفره‌ای) و کربناسیون (خوردگی یکنواخت) رخ می‌دهد. بعد از عبور این یون‌ها از پوشش فیزیکی (کاور بتنی) و پوشش شیمیایی (لایه محافظ غیرفعال دور میلگرد) به سطح میلگرد رسیده و خوردگی آغاز می‌شود. در اثر خوردگی خصوصیات مکانیکی فولاد و بتن کاهش یافته و عملکرد لرزه‌ای سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی از پارامترهای مهم در بررسی آثار خوردگی بر عملکرد لرزه‌ای در طول عمر مفید سازه، زمان شروع خوردگی می‌باشد. بر اساس قانون فیک زمان شروع خوردگی تابعی از کلرید سطحی، ضریب انتشار کلرید در بتن، پوشش بتنی روی آرماتورها و کلرید بحرانی می‌باشد. در این تحقیق خوردگی ناشی از کلر در نظر گرفته شده است. زمان شروع خوردگی در دو حالت غیراحتمالاتی و احتمالاتی مونت کارلو (با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در پارامترهای تأثیرگذار بر پیش‌بینی زمان شروع خوردگی) تعیین می‌شود. در پایان با مقایسه این دو حالت با یکدیگر میزان تأثیر عدم قطعیت‌ها در احتمال زمان شروع خوردگی نشان داده شده است. همچنین میزان اثر فاصله از دریا و نسبت آب به سیمان‌های متفاوت نیز در نظر گرفته شده است.

۱- مقدمه

و کربناسیون باعث می‌شود محیط قلیایی بتن کاهش یابد و به تدریج لایه محافظ از بین رفته و آرماتورها در مقابل رطوبت و اکسیژن آسیب‌پذیر می‌شوند [۳]. پیش‌بینی عملکرد و مقاومت سازه‌های بتنی که تحت حمله کربن دی‌اکسید و کلر هستند، نیاز به درک کاملی از ورود فاکتورهای تخریب بتن، شروع خوردگی در آرماتورهای بتن و آسیب در برابر خوردگی دارد [۴]. عواملی همچون کیفیت بتن اجرا شده، فاصله از دریا، شرایط محیطی (شدید یا ملایم)، میزان کاور بتنی، نسبت آب به سیمان و بارگذاری [۵] در میزان و زمان خوردگی مؤثر هستند. در نسبت آب به سیمان‌های بالا نفوذپذیری بتن بیشتر بوده و کربن دی‌اکسید عامل مهمی در خوردگی سازه‌های بتن آرمه می‌باشد. خوردگی آرماتور در اعضای بتنی سازه ممکن است به دو صورت رخ دهد: (۱) به صورت یکنواخت در سراسر آرماتور (خوردگی ناشی از کربناسیون معمولاً به صورت یکنواخت است) (۲) به صورت ناحیه‌ای و ایجاد حفره در آرماتور (خوردگی ناشی از حملات کلریدی

در دهه‌های اخیر خوردگی آرماتور عامل اصلی آسیب‌های زودرس به ساختمان‌ها و پل‌های بتنی می‌باشد [۱]. خوردگی آرماتورها در سازه‌های بتن مسلح معمولاً تحت عامل یون کلرید رخ می‌دهد. همچنین می‌توان از کربن دی‌اکسید به عنوان عامل دیگر که باعث وجود آسیب و خوردگی در سازه‌های بتنی می‌شود نام برد [۲]. میلگرد در بتن توسط دو عامل فیزیکی و شیمیایی محافظت می‌شود. عامل فیزیکی همان پوشش^۱ روی آرماتور می‌باشد و عامل دیگر به دلیل محیط قلیایی بالا در بتن ($pH > 13/5$) به وجود می‌آید. این محیط قلیایی باعث به وجود آمدن یک لایه محافظ که به آن ناحیه غیرفعال می‌گویند، می‌گردد. این لایه از میلگرد در مقابل کلر و کربناسیون در حضور آب و اکسیژن محافظت می‌کند. یون‌های کلر

1 Cover

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shayanfar@iust.ac.ir



در نظر گرفتند. آن‌ها نتیجه گرفتند روش پیشنهادی در ارزیابی زمان شروع خوردگی سازه‌های بتن آرمه به خصوص سازه‌های نوساز بسیار مفید است [۱۹]. رضانیان پور و همکاران چهار مدل تخمین عمر مفید خدمت رسانی بتن مسلح به کمک آزمایش‌های صورت گرفته بر روی سازه بتنی را بررسی کردند. که دو مدل توسط مراکز تحقیقاتی خارجی و دو مدل دیگر توسط مراکز تحقیقاتی داخلی ارائه شده است. نتایج گویای عدم قطعیت‌های فراوان در تخمین‌های مدل‌ها و عدم تطابق مدل‌های خارجی با شرایط محیطی خلیج فارس می‌باشد [۲۰]. همچنین می‌توان به تحقیقات انجام شده در مورد تعیین احتمال وقوع خوردگی آرماتورها که در سال‌های اخیر مورد توجه بیشتری قرار گرفته اشاره کرد. فرانگوپول^۳ و همکاران اثر تغییرات پارامترهای مختلف روی زمان آغاز خوردگی و ظرفیت خمشی تیرهای پل بررسی نموده‌اند. همچنین متغیرها لگ نرمال در نظر گرفته شده است [۲۱]. لئونل^۴ و همکاران مدلی برای تعیین احتمال وقوع خوردگی به منظور ارزیابی دوام سازه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان متفاوت با پارامترهای مختلف مؤثر در خوردگی به روش قابلیت اعتماد مرتبه اول^۵ (FORM) با مقایسه با شبیه‌سازی مونت کارلو ارائه نمودند [۲۲]. لونیس^۶ و همکاران احتمال وقوع خوردگی عرشه پل تحت نفوذ یون‌های کلرید را به روش قابلیت اعتماد مرتبه اول و مرتبه دوم^۷ (SORM) و با شبیه‌سازی مونت کارلو محاسبه نموده‌اند [۲۳]. در این تحقیق زمان شروع خوردگی ناشی از نفوذ یون کلرید به دو طریق احتمالاتی و غیراحتمالاتی، پیش‌بینی شده است. برای بررسی زمان شروع خوردگی در حالت احتمالاتی از شبیه‌سازی مونت کارلو^۸ استفاده شده است. همچنین برای بررسی تأثیر غلظت کلرید سطحی و تأثیر نسبت آب به سیمان، زمان شروع خوردگی برای فواصل متفاوت از ساحل، نسبت آب به سیمان‌های متفاوت و احتمال‌های شکست متفاوت، محاسبه و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین تأثیر عدم قطعیت‌ها بر پارامترهای مؤثر در شروع خوردگی نیز بررسی شده است.

معمولاً به صورت ایجاد حفره است) [۷ و ۶]. زمانی که میزان خوردگی افزایش می‌یابد، خرابی‌هایی نظیر ایجاد ترک‌های طولی و از بین رفتن کاور بتنی در اعضای بتن مسلح دیده می‌شوند. مطالعات تجربی قبلی نشان می‌دهند که خوردگی باعث کاهش تنش تسلیم و شکل‌پذیری میلگردها [۸]، کاهش پیوستگی بین میلگرد و بتن می‌شود [۹ و ۱۰]. همچنین خوردگی باعث ورقه شدن زودرس کاور بتنی می‌گردد [۱۱]. خوردگی بر روی کمانش غیرارتجاعی و کاهش چرخه خستگی آرماتورها نیز تأثیرگذار است [۱۲].

توانایی پیش‌بینی زمان شروع خوردگی به دلیل برنامه‌ریزی برای نگهداری مناسب از سازه موجود و بهینه‌سازی هزینه‌های ترمیم بتن آسیب دیده، طراحی سازه‌های جدید و ارزیابی پایداری مواد جدید سیمانی ضروری است [۱۳]. مطالعات متعددی نحوه نفوذ یون‌های کلرید را بررسی کرده و شروع خوردگی سازه‌های بتن آرمه را با روش غیراحتمالاتی ارزیابی کرده‌اند؛ همچنین یک تحلیل حساسیت برای بررسی اثرات عوامل تأثیرگذار قابل توجه بر نفوذ کلرید و عمر مفید آن‌ها انجام شده است [۱۴ و ۱۵]. لیانگ^۱ و همکاران با در نظر گرفتن سن بتن، بارگذاری، دمای محیط و رطوبت نسبی، زمان شروع خوردگی شمع تو خالی بتنی را با ترکیب دو روش احتمالاتی و غیراحتمالاتی به دست آوردند. در این مطالعه تحلیل مقایسه‌ای از سه روش برای پیش‌بینی زمان شروع خوردگی شمع‌های تو خالی استفاده شده است. زمان شروع خوردگی شمع‌های تو خالی بتنی که با روش ترکیبی محاسبه می‌شود با افزایش درجه حرارت محیط، رطوبت نسبی، نسبت آب به سیمان و غلظت اولیه کلرید سطحی کاهش می‌یابد. در حالی که با افزایش پوشش روی آرماتور و سطح آستانه کلرید این مقدار افزایش می‌یابد [۱۶]. شایانفر و همکاران برای محاسبه احتمال خوردگی میلگردها در شرایط نفوذ کلرید و کربناته شدن در اعضای سازه‌های بتن آرمه از روش‌های فراکاووشی استفاده کرده‌اند [۱۷ و ۶]. همچنین شایانفر و قانونی بقا با بررسی شروع خوردگی ناشی از کربناسیون و اثرات تغییرات اقلیمی به این نتیجه رسیدند که اثر تغییر دما تأثیری بر روی شروع خوردگی ندارد ولی بعد از شروع خوردگی موجب افزایش سرعت خوردگی می‌شود [۱۸]. شاتونوف^۲ و همکاران برای پیش‌بینی زمان شروع خوردگی، عدم قطعیت‌ها در پارامترهای تأثیرگذار بر روی شروع خوردگی را

3 Frangopol

4 Leonel

5 The first-order reliability method

6 Lounis

7 The second-order reliability method

8 Monte carlo

1 Liang

2 Chateauneuf

۲- فرآیند خوردگی آرماتورها ناشی از نفوذ کلرید در بتن

۲-۱ انتشار کلرید در بتن

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (۳)$$

که در این رابطه t زمان برحسب ثانیه (s) و erf تابع خطای ریاضی^۱ است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-x}^x e^{-t^2} dt \quad (۴)$$

تجمع یون‌های کلرید در سطوح اعضای بتنی قرار گرفته در محیط اتمسفر تا حدود زیادی به شرایط محیطی، توپوگرافی منطقه، جهت قرارگیری سطوح و فاصله از خط ساحل بستگی دارد [۲۶]. برخی از محققین فرض می‌کنند که میزان تجمع کلرید در سطوح با گذشت زمان افزایش پیدا می‌کند [۲۷]. در مقابل برخی از محققین نیز میزان تجمع کلرید را با گذشت زمان ثابت فرض می‌کنند [۲۹] و [۲۸]. مگ‌گی^۲ رابطه‌ی زیر را برای میزان تجمع کلرید برحسب تابعی از فاصله از دریا پیشنهاد نمود (d فاصله از دریا) [۲۹]:

$$C_s = 2.95 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad d \leq 0.1km$$

$$1.15 - 1.81 \log_{10}(d) \quad 0.1km < d \leq 2.84km \quad (۵)$$

$$C_s = 0.03 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad d > 2.84km$$

همچنین نتایج کاربردی در برخی تحقیقات بر کلرید سطحی برای منطقه خلیج فارس به همراه توزیع حاکم بر کلرید سطحی در جدول ۱ ارائه شده است. در این مقاله فرض شده است که سازه‌ی مورد بررسی در فاصله‌ای در حدود ۱۰۰ متر، ۳۵۰ متر و ۱۰۰۰ متری ساحل قرار دارد و سه نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ در نظر گرفته شده است. علاوه بر موارد ذکر شده، ناحیه اتمسفری ارائه شده در جدول ۱ نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است. ضریب انتشار کلرید در بتن (D) بیانگر میزان نفوذپذیری بتن بوده و به ویژگی‌های طرح اختلاط بتن

کلرید به طریق مختلف وارد بتن شده و موجب آسیب می‌شود. سازه‌هایی که مصالح ساخته شده آن مانند آب و سنگدانه‌ها حاوی کلرید باشند، سازه‌های بتن آرمه نزدیک به ساحل، پل‌هایی که در معرض نمک یخ‌زدایی و یا پایه‌های سازه‌های دریایی که تحت اثر جزر و مد هستند دچار آسیب خوردگی می‌شوند. با توجه به اینکه امروزه ساخت بتن با مصالح حاوی کلرید محدود شده است، مهم‌ترین عامل در آسیب به سازه‌ها، نفوذ کلرید در بتن و شروع خوردگی می‌باشد. برای به دست آوردن میزان نفوذ کلرید در بتن و رسیدن میزان غلظت کلرید به غلظت بحرانی برای شروع خوردگی از قانون دوم فیک استفاده می‌شود. قانون دوم فیک به شرح زیر می‌باشد [۲۴ و ۲۵]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (۱)$$

در این رابطه C میزان تجمع کلرید برحسب مول بر متر مکعب ($\frac{mol}{m^3}$)، D ضریب انتشار برحسب متر مربع بر ثانیه $\frac{m^2}{s}$ و x عمق مورد نظر از سطح عضو بتن آرمه برحسب متر (m) می‌باشند. اگر ضریب D ثابت و مستقل از زمان در نظر گرفته شود قانون دوم فیک به صورت زیر نوشته می‌شود:

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

این معادله دیفرانسیل با شرایط مرزی زیر حل می‌شود:

$$C = 0 \quad \text{در زمان } t = 0 \quad \text{در } x > 0 \quad \text{داریم:}$$

در زمان $t > 0$ و در $x = 0$ میزان تجمع کلرید برابر با $C = C_s$ در نظر گرفته می‌شود. C_s میزان کلرید سطحی در زمان شروع خوردگی می‌باشد. با حل معادله (۲) داریم:

1 Error function

2 McGee

جدول ۱. مقادیر میزان کلرید سطحی و نوع توزیع برای منطقه خلیج فارس [۳۱ و ۳۲]

Table 1. Surface chloride values and distribution type in the Persian Gulf [30,31]

توزیع	انحراف استاندارد (wt%cem)	COV (%)	مقدار میانگین (wt%cem)	شرایط محیطی
Normal	0.82	0.75	1.0876	اتمسفری
Normal	2.047	0.75	2.729	جزر و مدی
Normal	2.03	60	3.383	جزر و مدی سن سازه ۴ سال
	2.54	75		
	3.045	90		
Normal	6.33	75	8.439	جزر و مدی

بحرانی (C_r) گفته می‌شود. هافمن و وایرز^۲ این میزان را بین ۰/۶ تا ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب پیشنهاد دادند [۳۳]. استوارت^۳ و همکاران این مقدار را در تحقیق خود، به صورت متوسط ۰/۹ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفتند [۳۴]. همچنین استاندارد BS ۸۱۱۰ (موسسه استاندارد بریتانیا ۱۹۹۷) مقدار کلرید را ۰/۴ درصد وزنی سیمان که معادل ۰/۰۷ درصد وزنی بتن است، به عنوان مقدار آستانه در شرایط محیطی خلیج فارس پیشنهاد می‌کند [۳۵]. با توجه به رابطه (۳) زمان شروع خوردگی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$t_{Corr} = \frac{Cover^2}{4D} \left[erf^{-1} \left(1 - \frac{C_r}{C_s} \right) \right]^2 \quad (7)$$

۲-۳- زمان شروع خوردگی حالت احتمالاتی

ماهیت تولید بتن تصادفی است و ابهامات زیادی در بسیاری از پارامترهای مؤثر شناخته شده بر خرابی لایه منفعل وجود دارد. مدلی که در قسمت قبل توضیح داده شد، عدم قطعیت‌های مربوط به پارامترهای مدل‌سازی مانند غلظت کلرید سطحی، مقدار غلظت کلرید بحرانی، پوشش بتن روی آرماتور و ضریب نفوذپذیری را در نظر

(مانند نسبت آب به سیمان و نوع سیمان استفاده شده)، پرداخت و مراقبت از بتن، متراکم کردن بتن، عوامل محیطی (مانند دما و رطوبت) و زمان بستگی دارد. مدل پاپاداکیس^۱ [۳۰] در بین مدل‌های ارائه شده یکی از پر استنادترین روابط ارائه شده است. همچنین تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. رابطه ضریب انتشار کلرید پاپاداکیس و همکاران به صورت زیر است:

$$D = D_{H_2O} \times 0.15 \frac{1 + \rho_c \frac{w}{c}}{1 + \rho_c \frac{w}{c} + \frac{\rho_a}{\rho_a} \frac{a}{c}} \left(\frac{\rho_c \frac{w}{c} - 0.85}{1 + \rho_c \frac{w}{c}} \right)^3 \left(\frac{cm^2}{s} \right) \quad (6)$$

در این رابطه a/c نسبت سنگ‌دانه به سیمان، ρ_a و ρ_c به ترتیب چگالی سنگ‌دانه‌ها و سیمان و D_{H_2O} ضریب انتشار اولیه کلرید (برابر با $1.6 \times 10^{-5} cm^2/s$ برای NaCl) می‌باشند.

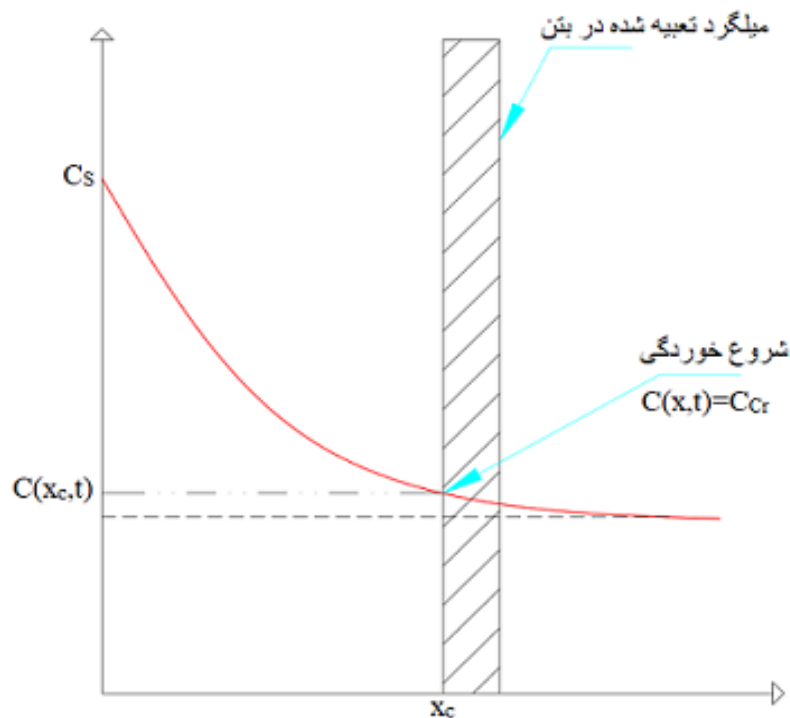
۲-۲- زمان شروع خوردگی حالت غیراحتمالاتی

فرآیند خوردگی در بتن را می‌توان به دو قسمت کلی زمان شروع خوردگی و انتشار محصولات خوردگی در بتن، تقسیم‌بندی کرد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود زمانی میلگرد درون بتن شروع به خوردگی می‌کند که میزان غلظت کلرید در سطح میلگرد از یک مقدار خاص بیشتر شود (فاز اول)، به این میزان غلظت، غلظت

2 Haffman & Weyers

3 Stewart

1 Papadakis



شکل ۱. زمان شروع خوردگی به صورت شماتیک

Fig. 1. Schematic diagram of corrosion initiation time

مانند نسبت آب به سیمان، نفوذپذیری، مشخصات مکانیکی مصالح و... می‌باشد. سومین نوع عدم قطعیت مربوط به متغیرهای طبیعی و محیطی مانند تغییرات اقلیمی، رطوبت و دما می‌باشد. در این زمینه می‌توان به مطالعات شایانفر و قانونی بقا، فرانگوپول^۳ و همکاران، استاندارد طراحی و ساخت ۱۹۹۹ اشاره نمود [۳۷، ۳۶ و ۱۷].

در این تحقیق برای تخمین زمان شروع خوردگی از رابطه (۸) و در نظر گرفتن ۱۰۰۰۰۰۰ بار مونت کارلو (برای سطح اطمینان ۹۹٪) برای محاسبه غلظت کلرید در سطح میلگرد استفاده شده است. در این شبیه‌سازی ضرایب تغییرات (COV^۴) و پارامترهای مؤثر در زمان شروع خوردگی مطابق جدول ۲ می‌باشد (COV (۱) بر طبق منبع [۳۸] و COV (۲) بر طبق منبع [۳۹] است). همچنین به منظور تأثیر عدم قطعیت‌های پارامترهای مؤثر، بر روی زمان شروع خوردگی ضریب تغییرات متفاوت برای یک پارامتر و ثابت برای پارامترهای دیگر مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شده است.

نگرفته است. مشابه طراحی در سازه‌ها با در نظر گرفتن میزان غلظت کلرید در سطح آرماتور به عنوان تقاضا^۱ (D) و کلرید بحرانی به عنوان ظرفیت^۲ (R) می‌توان از رابطه زیر برای تخمین زمان شروع خوردگی استفاده کرد:

$$R(X,t) - D(X,t) = C_{Cr} - C_s \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2D\sqrt{ct}}\right) \right] \quad (8)$$

در این معادله، X متغیرهای تصادفی مؤثر است. اگر تابع g مثبت باشد خوردگی شروع نشده است و اگر منفی باشد خوردگی شروع شده است. به طور کلی سه نوع عدم قطعیت وجود دارد. اولین عدم قطعیت‌ها مربوط به پارامترهای مدل‌سازی سازه‌ای مانند ابعاد تیرها و ستون‌ها می‌باشد. دومین عدم قطعیت‌ها مربوط به مصالح ساخت سازه

3 Frangopol
4 Coefficient of varition

1 Demand
2 Resistance

جدول ۲. مقادیر پارامترهای مؤثر در زمان شروع خوردگی و ضرایب تغییرات

Table 2. Effective parameters and coefficients of variation and effective parameters at the time of corrosion initiation

متغیرها	توزیع	میانگین	COV (1)	COV (2)
Cover	Normal	50 (mm)	0.2	0.12
Dc	Lognormal	38.3 mm ² /year (W/C=0.4)	0.1	0.75
		73.8 mm ² /year (W/C=0.45)		
		144 mm ² /year (W/C=0.5)		
Ccr	Lognormal	0.6 kg/m ³	0.1	0.2
		0.9 kg/m ³		
		1.2 kg/m ³		
		1.6 kg/m ³ (Persian Golf)		
Cs	Lognormal	4.35kg/m ³ (Persian Golf)	0.1	0.5
		1.15 kg/m ³ (d=1000m)		
		2.05kg/m ³ (d=350m)		
		2.95 kg/m ³ (d<100m)		

جدول ۳. مقادیر پارامترهای مؤثر در زمان شروع خوردگی و ضرایب تغییرات متفاوت پارامترهای مؤثر بر روی شروع خوردگی

Table 3. The values of effective parameters at the time of corrosion initiation and their coefficients of variation on corrosion initiation

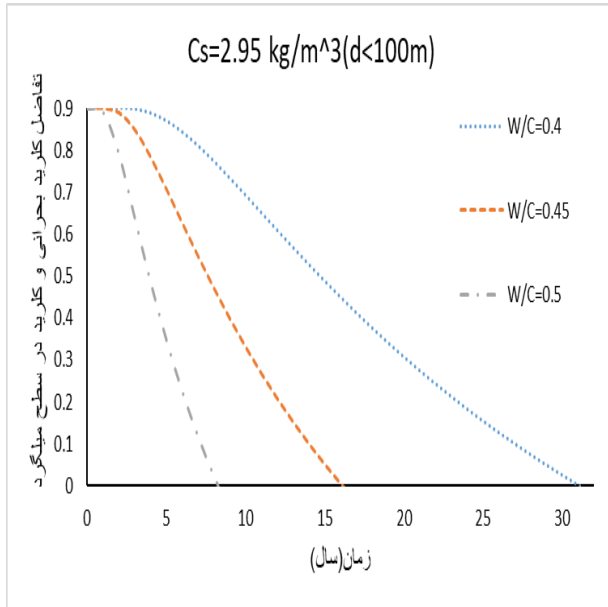
متغیرها	توزیع	میانگین	COV			
Cover	Normal	50(mm)	0.2	0.4	0.6	0.8
Dc	Lognormal	144 mm ² /year (W/C=0.5)	0.1	0.2	0.4	0.6
Ccr	Lognormal	0.9 kg/m ³	0.1	0.2	0.4	0.6
Cs	Lognormal	2.95 kg/m ³ (d=100m)	0.1	0.2	0.4	0.6

۳- نتایج و بحث

کلر در بتن افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است روش‌های مذکور برای یک بازه‌ی ۵۰ ساله (عمر مفید سازه) است.

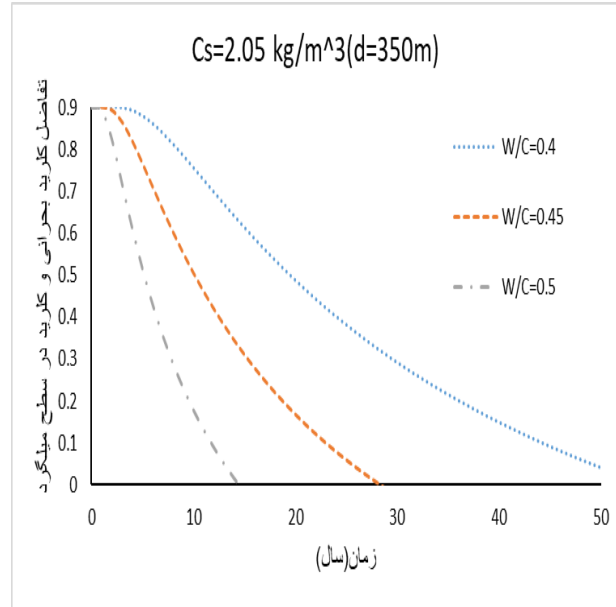
۳-۱- پیش‌بینی زمان شروع خوردگی به صورت غیراحتمالاتی در حالت غیراحتمالاتی پارامترهای مؤثر در زمان شروع خوردگی به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از رابطه (۷) زمانی که میزان غلظت کلرید در سطح آرماتور برابر میزان کلرید بحرانی شود، خوردگی آغاز می‌گردد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود زمان شروع خوردگی با در نظر گرفتن میزان کلرید بحرانی برابر

در این قسمت ابتدا زمان شروع خوردگی به صورت غیراحتمالاتی برای فاصله‌های متفاوت از دریا، نسبت آب به سیمان‌های متفاوت و احتمال‌های شکست متفاوت بررسی شده است. سپس زمان شروع خوردگی به صورت احتمالی برای ضرایب تغییرات متفاوت و فواصل متفاوت از ساحل مطابق با جدول ۲ محاسبه و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین بررسی مقادیر پارامترهای تأثیرگذار بر زمان شروع خوردگی نشان می‌دهد با فاصله گرفتن از ساحل میزان غلظت کلرید سطحی کاهش و با افزایش نسبت آب به سیمان ضریب انتشار



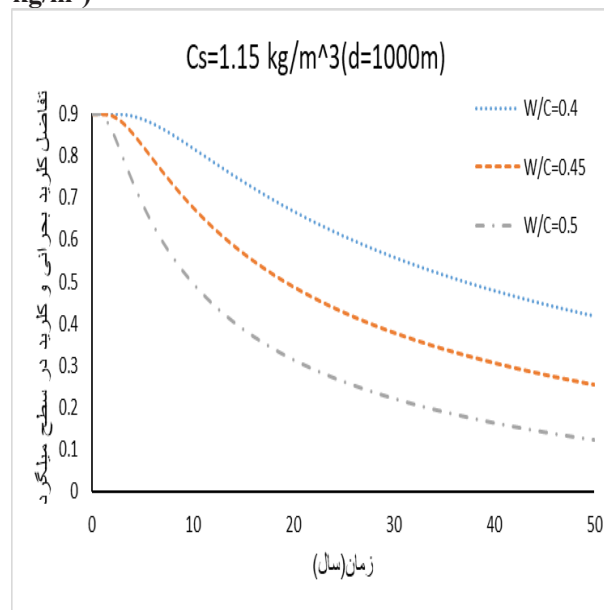
الف- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان‌های $C_{th}=0.9$ و 0.45 ، 0.4 در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل ($C_{th}=0.9$ kg/m^3)

a- A comparison of corrosion start times for water/cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at a distance of less than 100 meters from the coast ($C_{th}=0.9$ kg/m^3)



ب- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان‌های 0.5 ، 0.45 و 0.4 در فاصله ۳۵۰ متری ساحل ($C_{th}=0.9$ kg/m^3)

b- A comparison of corrosion start times for water to cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at 350 meters from the coast ($C_{th}=0.9$ kg/m^3)



ج- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان‌های 0.5 ، 0.45 و 0.4 در فاصله ۱۰۰۰ متری ساحل ($C_{th}=0.9$ kg/m^3)

c- A comparison of corrosion start times for water to cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at 1000 meters from the coast ($C_{th}=0.9$ kg/m^3)

شکل ۲. زمان شروع خوردگی به صورت غیراحتمالاتی برای فواصل متفاوت از ساحل و نسبت آب به سیمان‌های متفاوت

Fig. 2. A non-probabilistic Corrosion initiation time at different distances from the coast and at different water-cement ratios

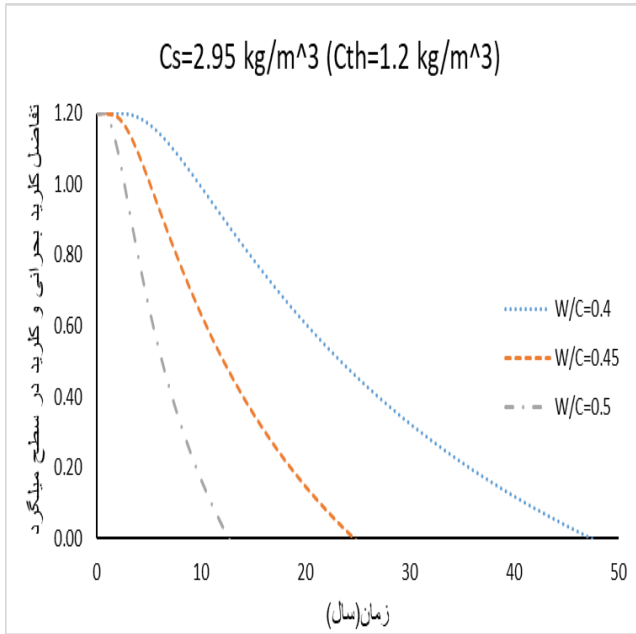
و پارامترهای مؤثر در شروع خوردگی با توجه به شرایط محیطی در نظر گرفته شود.

۳-۲- پیش‌بینی زمان شروع خوردگی به صورت احتمالاتی

در حالت احتمالاتی پارامترهای مؤثر در زمان شروع خوردگی به صورت متغیر در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از رابطه (۸) و شبیه‌سازی مونت کارلو و در نظر گرفتن مقادیر میانگین و ضریب تغییرات مطابق جدول ۲ میزان غلظت کلرید در سطح میلگرد به دست می‌آید. با تکرار این روش در سال‌های متفاوت در طول عمر مفید سازه برای فواصل متفاوت از ساحل و نسبت آب به سیمان‌های متفاوت، احتمال آغاز خوردگی برای زمان‌های مختلف طی دوره ۵۰ ساله مطابق شکل ۴ و ۵ به دست آمده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن میزان کلرید بحرانی برابر ۰/۹ کیلوگرم بر متر مکعب برای (1) COV در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل احتمال آغاز خوردگی در ۵۰ سال برای سه نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ به ترتیب برابر ۰/۸۷٪، ۰/۱۰۰٪ و ۰/۱۰۰٪ و برای (2) COV این احتمال به ترتیب برابر ۰/۵۲٪، ۰/۷۳٪ و ۰/۸۶٪ می‌باشد. برای فاصله ۳۵۰ متری ساحل و (1) COV این احتمال به ترتیب برابر ۰/۴۲٪، ۰/۸۶٪ و ۰/۹۹٪ و برای (2) COV به ترتیب برابر ۰/۳۱٪، ۰/۵۱٪ و ۰/۶۸٪ می‌باشد. همچنین برای فاصله ۱۰۰۰ متری از ساحل و (1) COV این احتمال برابر ۰/۱٪، ۰/۴٪ و ۰/۱۹٪ و برای (2) COV ۰/۸٪، ۰/۱۷٪ و ۰/۲۸٪ می‌باشد. با توجه به شکل ۳ اگر میزان غلظت کلرید بحرانی را ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب برای فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل در نظر گرفته شود، احتمال آغاز خوردگی در ۵۰ سال برای سه نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ با (1) COV به ترتیب برابر ۰/۵۴٪، ۰/۹۴٪ و ۰/۱۰۰٪ و برای (2) COV این احتمال به ترتیب برابر ۰/۳۶٪، ۰/۵۶٪ و ۰/۷۲٪ می‌باشد.

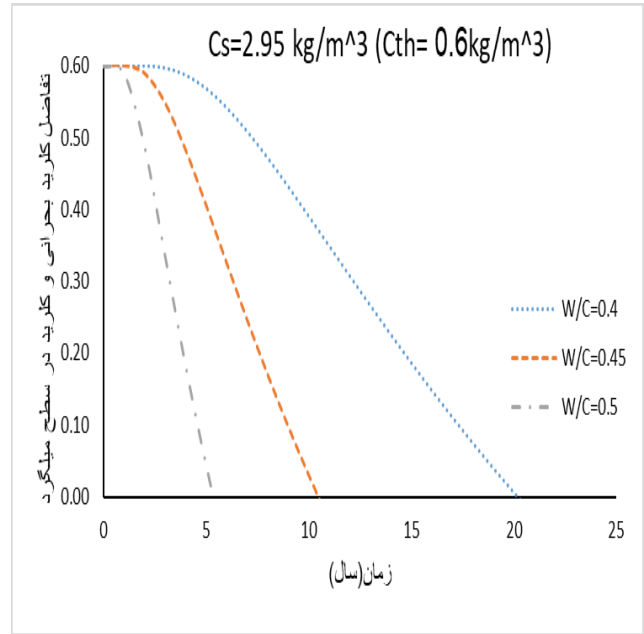
احتمال آغاز خوردگی در ۵۰ سال برای سه نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ با در نظر گرفتن غلظت کلرید بحرانی برابر ۰/۶ کیلوگرم بر متر مکعب برای سازه در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل با (1) COV به ترتیب برابر ۰/۹۹٪، ۰/۱۰۰٪ و ۰/۱۰۰٪ و برای (2) COV این احتمال به ترتیب برابر ۰/۷۲٪، ۰/۸۹٪ و ۰/۹۶٪ می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج زمان شروع خوردگی برای سازه‌ای که در شرایط محیطی خلیج فارس و در فاصله کمتر از ۱۰۰ متر از ساحل قرار دارد، احتمال آغاز خوردگی در ۵۰ سال برای سه نسبت آب به سیمان ۰/۴

۰/۹ کیلوگرم بر متر مکعب برای فاصله کمتر از ۱۰۰ متر از ساحل و نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۳۱ سال، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، ۱۶ سال و نسبت آب به سیمان ۰/۵، ۸ سال، برای فاصله ۳۵۰ متری ساحل و برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۵ به ترتیب برابر ۲۸ سال و ۱۴ سال پیش‌بینی شده است. همچنین برای نسبت آب به سیمان ۰/۴ در فاصله ۳۵۰ متری ساحل و تمامی نسبت آب به سیمان‌ها در فاصله ۱۰۰۰ متری از ساحل، زمان شروع خوردگی بیشتر از عمر مفید سازه (۵۰ سال) به دست می‌آید. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود اگر میزان غلظت کلرید بحرانی را ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب برای فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل در نظر گرفته شود زمان شروع خوردگی برای سازه با نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۴۷ سال، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، ۲۴ سال، نسبت آب به سیمان ۰/۵، ۱۲ سال می‌باشد. زمان شروع خوردگی با در نظر گرفتن غلظت کلرید بحرانی برابر ۰/۶ کیلوگرم بر متر مکعب برای سازه در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل و نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۲۰ سال، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، ۱۰ سال، نسبت آب به سیمان ۰/۵، ۵ سال می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج زمان شروع خوردگی برای سازه‌ای که در شرایط محیطی خلیج فارس و در فاصله کمتر از ۱۰۰ متر از ساحل قرار دارد برای نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۴۰ سال، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، ۲۰ سال و نسبت آب به سیمان ۰/۵، ۱۰ سال می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود با فاصله گرفتن از ساحل و کاهش نسبت آب به سیمان زمان شروع خوردگی افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش ۲۵ درصدی نسبت آب به سیمان برای غلظت کلرید بحرانی ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب و فاصله ۱۰۰ متری ساحل زمان شروع خوردگی تقریباً ۴ برابر شده است. و برای غلظت کلرید بحرانی ۰/۹ کیلوگرم بر متر مکعب و فاصله ۳۵۰ متری ساحل زمان شروع خوردگی ۲ برابر شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل که زمان شروع خوردگی کمتر از فواصل دیگر بود، با کاهش نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۴، زمان شروع خوردگی بیشتر از عمر مفید سازه می‌گردد. همچنین با تغییر در میزان غلظت کلرید بحرانی در نتایج تغییرات قابل توجه مشاهده می‌شود، که باعث می‌شوند تصمیم‌گیری جهت جلوگیری از آسیب و کاهش خسارت مالی و جانی در آینده به درستی گرفته نشود. بنابراین توصیه می‌گردد در مناطق نزدیک ساحل نظیر شرایط محیطی خلیج فارس نسبت آب به سیمان کم



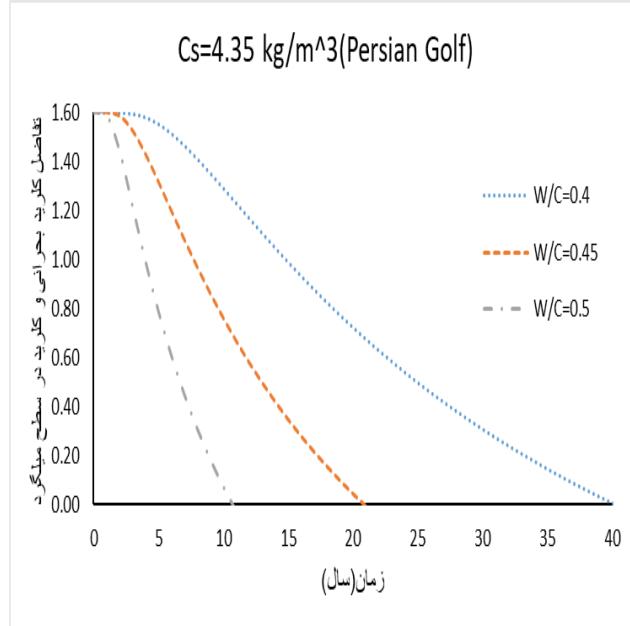
الف- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان‌های $C_{th}=1.2$ ($0/5$ ، $0/45$ و $0/4$ در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل ($C_{th}=1.2$) kg/m^3)

a- A comparison of corrosion start times for water/cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at a distance of less than 100 meters from the coast ($C_{th}=1.2 kg/m^3$)



ب- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان‌های $0/5$ ، $0/45$ و $0/4$ در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل ($C_{th}=0.6 kg/m^3$)

b- A comparison of corrosion start times for water/cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at a distance of less than 100 meters from the coast ($C_{th}=0.6 kg/m^3$)

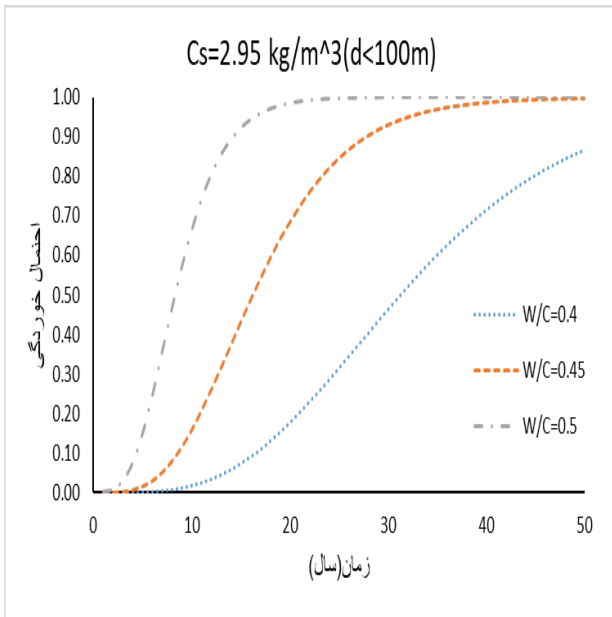


ج- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان‌های $0/5$ ، $0/45$ و $0/4$ در خلیج فارس

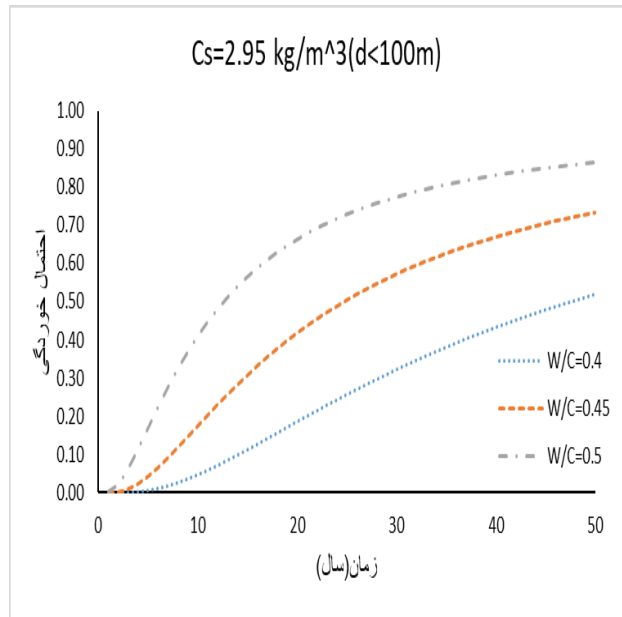
c- A comparison of corrosion start times for water to cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at Persian-Gulf

شکل ۳. زمان شروع خوردگی به صورت غیراحتمالاتی برای غلظت‌های بحرانی و نسبت آب به سیمان‌های متفاوت

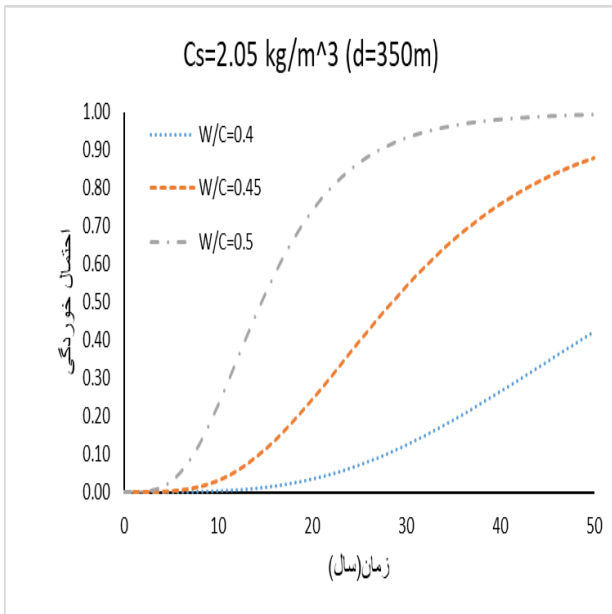
Fig. 3. A non-probabilistic corrosion initiation time in relation to critical concentrations and water-to-cement ratios



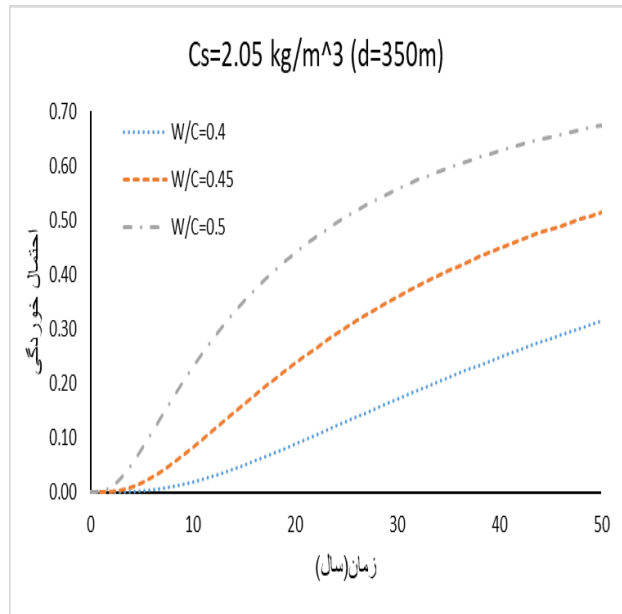
الف- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان‌های ۰/۵، ۰/۴۵ و ۰/۴ در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل (COV(1))
a- A comparison of corrosion start times for water/cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at a distance of less than 100 meters from the coast (COV(1))



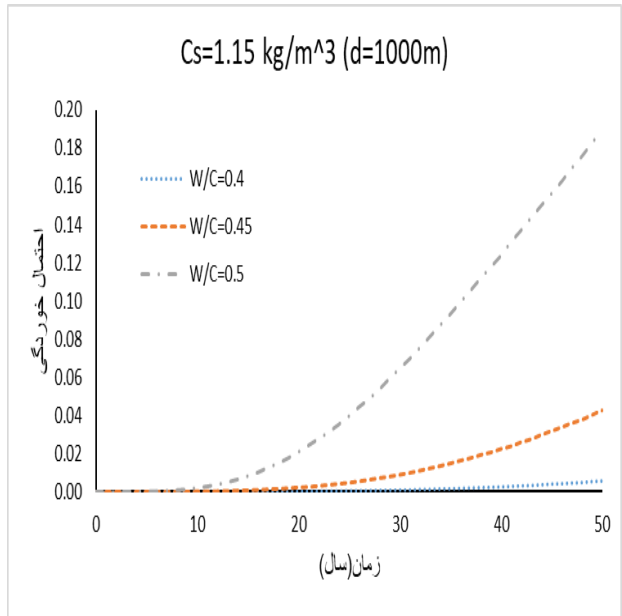
ب- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان‌های ۰/۵، ۰/۴۵ و ۰/۴ در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل (COV(2))
b- A comparison of corrosion start times for water/cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at a distance of less than 100 meters from the coast (COV(2))



پ- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان‌های ۰/۵، ۰/۴۵ و ۰/۴ در فاصله ۳۵۰ متری ساحل (COV(1))
c- A comparison of corrosion start times for water to cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at 350 meters from the coast (COV(1))

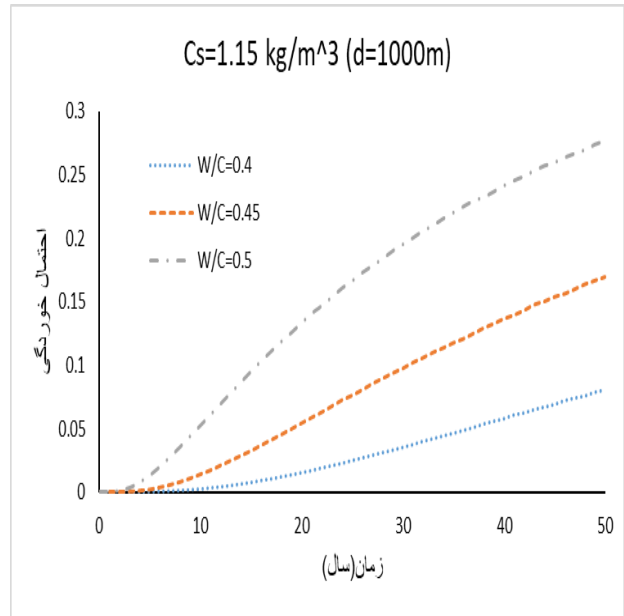


ت- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان‌های ۰/۵، ۰/۴۵ و ۰/۴ در فاصله ۳۵۰ متری ساحل (COV(2))
d- A comparison of corrosion start times for water to cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at 350 meters from the coast (COV(2))



د- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان‌های ۰/۵، ۰/۴۵ و ۰/۴ در فاصله ۱۰۰۰ متری ساحل (COV(1))

d- A comparison of corrosion start times for water to cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at 1000 meters from the coast (COV(1))

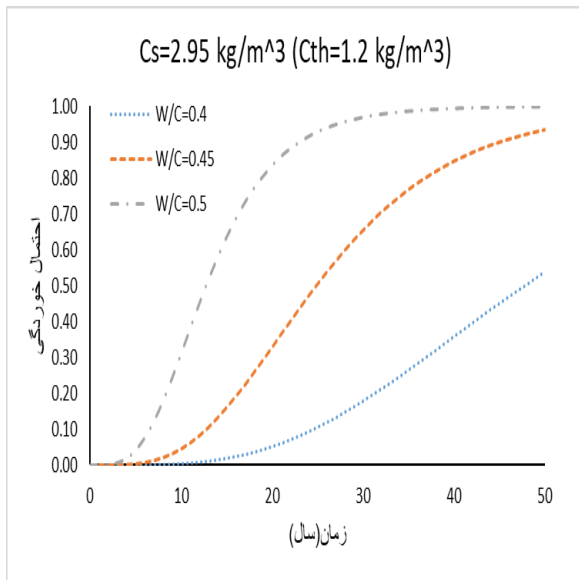


ه- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان‌های ۰/۵، ۰/۴۵ و ۰/۴ در فاصله ۱۰۰۰ متری ساحل (COV(2))

e- A comparison of corrosion start times for water to cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at 1000 meters from the coast (COV(2))

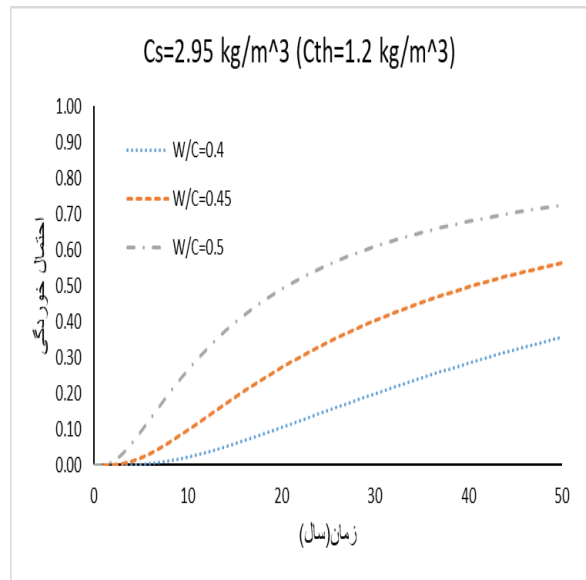
شکل ۴. زمان شروع خوردگی به صورت احتمالی برای فواصل متفاوت از ساحل و نسبت آب به سیمان‌های متفاوت

Fig. 4. A potential corrosion initiation time for different distances from the shore and different water-cement ratios



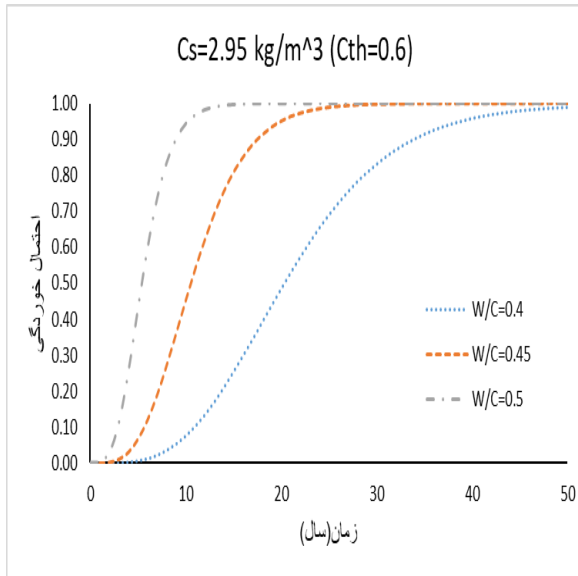
الف- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان‌های ۰/۵، ۰/۴۵ و ۰/۴ در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل (COV(1), $C_{th}=1.2 \text{ kg/m}^3$)

a- A comparison of corrosion start times for water/cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at a distance of less than 100 meters from the coast ($C_{th}=1.2 \text{ kg/m}^3$, COV(1))



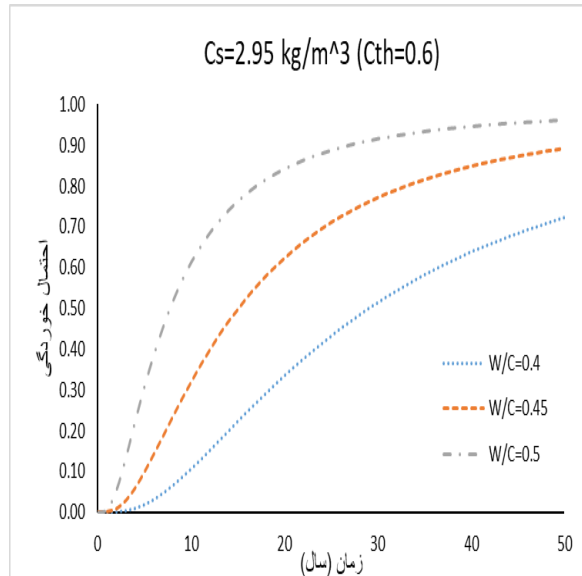
ب- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان‌های ۰/۵، ۰/۴۵ و ۰/۴ در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل (COV(2), $C_{th}=1.2 \text{ kg/m}^3$)

a- A comparison of corrosion start times for water/cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at a distance of less than 100 meters from the coast ($C_{th}=1.2 \text{ kg/m}^3$, COV(2))



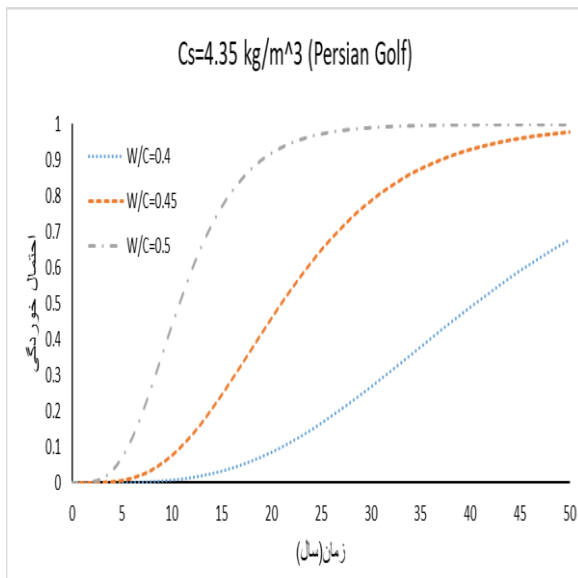
پ- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان های ۰/۵، ۰/۴۵ و ۰/۴ در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل (COV(1), $C_{th}=0.6 \text{ kg/m}^3$)

b- A comparison of corrosion start times for water/cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at a distance of less than 100 meters from the coast ($C_{th}=0.6 \text{ kg/m}^3$, COV(1))



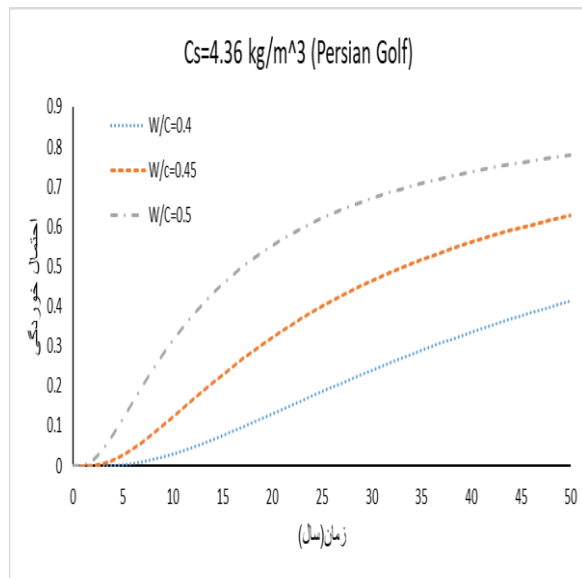
ت- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان های ۰/۵، ۰/۴۵ و ۰/۴ در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل (COV(2), $C_{th}=0.6 \text{ kg/m}^3$)

b- A comparison of corrosion start times for water/cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at a distance of less than 100 meters from the coast ($C_{th}=0.6 \text{ kg/m}^3$, COV(2))



ث- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان های ۰/۵، ۰/۴۵ و ۰/۴ در خلیج فارس (COV(1))

c- A comparison of corrosion start times for water to cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at Persian-Gulf (COV(1))

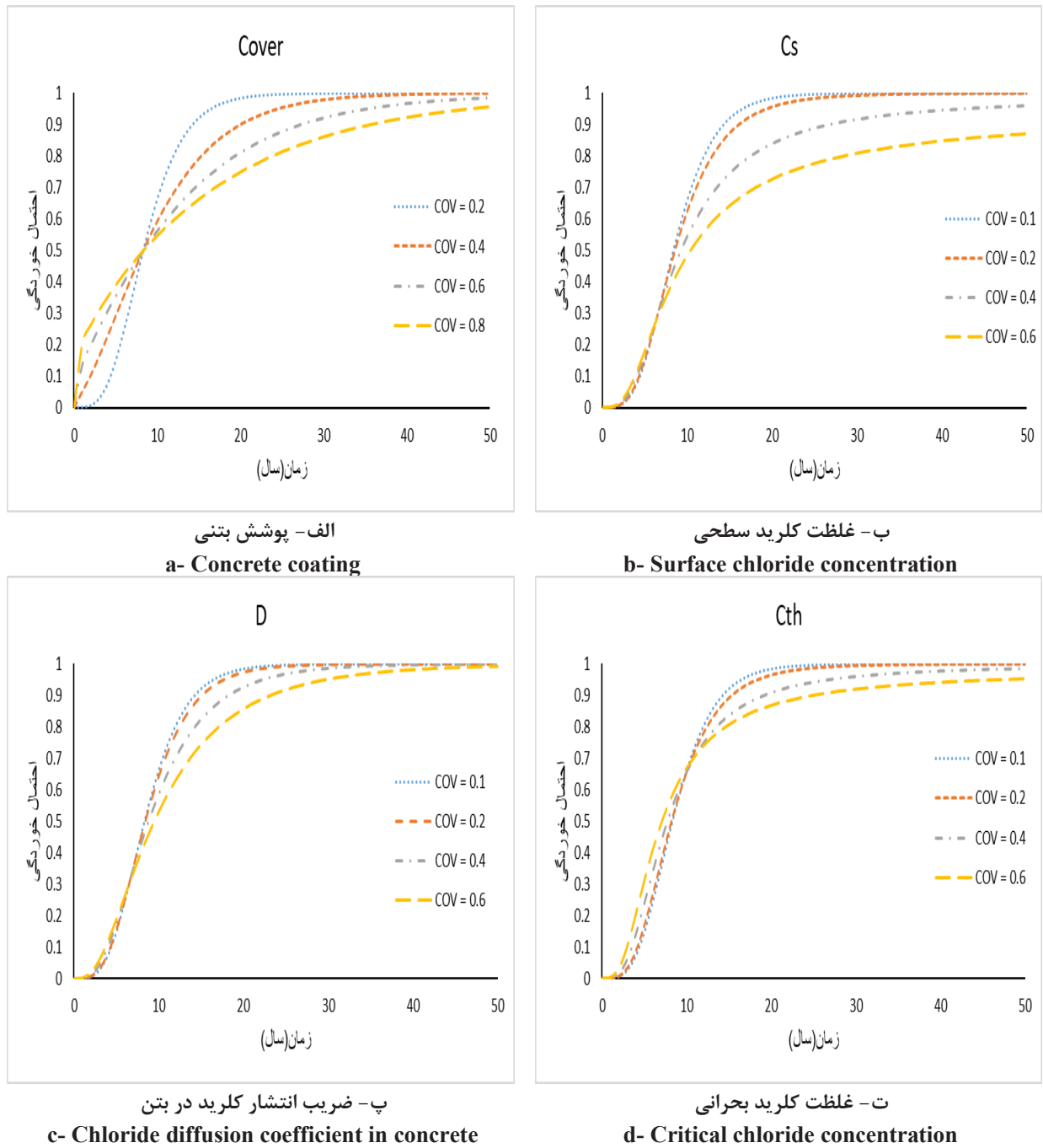


ج- مقایسه زمان شروع خوردگی نسبت آب به سیمان های ۰/۵، ۰/۴۵ و ۰/۴ در خلیج فارس (COV(2))

c- A comparison of corrosion start times for water to cement ratios of 0.5, 0.45, and 0.4 at Persian-Gulf (COV(2))

شکل ۵. زمان شروع خوردگی به صورت احتمالاتی برای غلظت‌های بحرانی و نسبت آب به سیمان های متفاوت

Fig. 5. A potential corrosion initiation time in relation to critical concentrations and water-to-cement ratios



شکل ۶. بررسی تأثیر ضرایب تغییرات متفاوت پارامترهای مؤثر بر شروع خوردگی

Fig. 6. The effect of different change coefficients of effective parameters on corrosion initiation

شروع خوردگی برای فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل و نسبت آب به سیمان ۰/۴ با در نظر گرفتن (1) COV، ۲۵ سال و (2) COV ۱۹ سال، برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ با در نظر گرفتن (1) COV، ۱۱ سال و (2) COV ۱۰ سال، برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ با در نظر گرفتن (1) COV، ۷ سال و (2) COV ۶ سال می‌باشد. با در نظر گرفتن میزان کلرید بحرانی برابر ۰/۶ کیلوگرم بر متر مکعب زمان شروع خوردگی برای فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل و نسبت آب به سیمان ۰/۴ با در نظر گرفتن (1) COV، ۱۱ سال و (2) COV ۱۰ سال، برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ با در نظر گرفتن (1) COV، ۶ سال و (2) COV ۵ سال، برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ با در نظر گرفتن (1) COV و (2) COV ۳ سال می‌باشد. همچنین زمان شروع خوردگی برای سازه‌ای که در شرایط محیطی خلیج فارس و کمتر از ۱۰۰ متری ساحل قرار دارد، برای نسبت آب به سیمان ۰/۴ با در نظر گرفتن (1) COV ۲۱ سال و (2) COV ۱۷ سال، برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ با در نظر گرفتن (1) COV ۱۱ سال و (2) COV ۹ سال و برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ با در نظر گرفتن (1) COV ۶ سال و (2) COV ۵ سال می‌باشد.

با بررسی زمان شروع خوردگی حالت‌های مختلف، مشاهده می‌شود با افزایش نسبت آب به سیمان (افزایش نفوذپذیری بتن) و کاهش فاصله از ساحل همانند حالت غیراحتمالاتی زمان شروع خوردگی کاهش می‌یابد. همچنین با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و بررسی شروع خوردگی به صورت احتمالاتی با احتمال شکست‌های متفاوت زمان شروع نسبت به حالت غیراحتمالاتی، کاهش می‌یابد. این موضوع اهمیت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها بر روی پارامترهای مؤثر در زمان شروع خوردگی برای یک پیش‌بینی با خطای کمتر و تصمیم‌گیری صحیح برای جلوگیری از به وجود آمدن این آسیب در سازه‌هایی که در محیط کلریدی قرار دارند را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن ضرایب تغییرات مختلف و احتمال شکست‌های متفاوت نتایج برای نسبت آب به سیمان‌های مختلف، تفاوت‌های زیادی داشت. این موضوع لزوم دقت در انتخاب ضرایب تغییرات و پارامترهای مؤثر در زمان شروع خوردگی متناسب با شرایط موجود پروژه مورد بررسی را نشان می‌دهد.

۰/۴۵ و ۰/۵ با (1) COV به ترتیب برابر ۰/۶۸٪، ۰/۹۸٪، ۱۰۰٪ و برای (2) COV این احتمال به ترتیب برابر ۰/۴۱٪، ۰/۶۳٪ و ۰/۷۸٪ می‌باشد. در این حالت برای غلظت کلرید بحرانی ۰/۹ کیلوگرم بر متر مکعب و فاصله ۱۰۰ متری ساحل در ۵۰ سال با کاهش ۲۵ درصدی نسبت آب به سیمان با [1] COV احتمال زمان شروع خوردگی ۱۳ درصد و [2] COV ۳۴ درصد کاهش می‌یابد. برای فاصله ۳۵۰ متری از ساحل احتمال زمان شروع خوردگی برای [1] COV ۵۷ درصد و [2] COV ۳۷ درصد کاهش مشاهده می‌شود. در فاصله ۱۰۰۰ متری از ساحل احتمال زمان شروع خوردگی بسیار پایین می‌باشد. برای غلظت کلرید بحرانی ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب با [1] COV در فاصله ۱۰۰ متری ساحل ۴۶ درصد کاهش، [2] COV ۳۶ درصد کاهش، برای غلظت کلرید بحرانی ۰/۶ کیلوگرم بر متر مکعب با [1] COV ۱ درصد کاهش، [2] COV ۴ درصد کاهش و برای منطقه خلیج فارس با [1] COV ۳۲ درصد کاهش، [2] COV ۳۷ درصد کاهش مشاهده می‌کنیم.

اگر احتمال آغاز شروع خوردگی را ۱۰٪ [۳۹] در نظر بگیریم، با در نظر گرفتن میزان کلرید بحرانی برابر ۰/۹ کیلوگرم بر متر مکعب زمان شروع خوردگی برای فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل و نسبت آب به سیمان ۰/۴ با در نظر گرفتن (1) COV، ۱۷ سال و (2) COV ۱۴ سال، برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ با در نظر گرفتن (1) COV، ۹ سال و (2) COV ۸ سال، برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ با در نظر گرفتن (1) COV و (2) COV ۴ سال می‌باشد. این زمان برای فاصله ۳۵۰ متری از ساحل و نسبت آب به سیمان ۰/۴ با در نظر گرفتن (1) COV، ۲۸ سال و (2) COV ۲۱ سال، برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ با در نظر گرفتن (1) COV، ۱۵ سال و (2) COV ۱۱ سال، برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ با در نظر گرفتن (1) COV ۸ سال و (2) COV ۶ سال می‌باشد. زمان شروع خوردگی برای فاصله ۱۰۰۰ متری از ساحل و نسبت آب به سیمان ۰/۴ با در نظر گرفتن (1) COV و (2) COV بیشتر از بازه ۵۰ ساله در نظر گرفته شده می‌باشد. همچنین برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ با در نظر گرفتن (1) COV بیشتر از بازه در نظر گرفته شده و برای (2) COV ۳۰ سال، برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ با در نظر گرفتن (1) COV ۳۶ سال و (2) COV ۱۵ سال می‌باشد. با در نظر گرفتن میزان کلرید بحرانی برابر ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب زمان

در نظر گرفته شده است و نتایج با یکدیگر مقایسه شد.

در حالت غیراحتمالاتی با کاهش ۲۵ درصدی نسبت آب به سیمان برای غلظت کلرید بحرانی ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب و فاصله ۱۰۰ متری ساحل زمان شروع خوردگی تقریباً ۴ برابر شده است. برای غلظت کلرید بحرانی ۰/۹ کیلوگرم بر متر مکعب و فاصله ۳۵۰ متری ساحل زمان شروع خوردگی ۲ برابر شده است. در حالت احتمالاتی با در نظر گرفتن زمان شروع خوردگی با احتمال ۱۰ درصد همانطور که مشاهده شد با کاهش ۲۵ درصدی نسبت آب به سیمان زمان شروع خوردگی بین ۳ الی ۴ برابر افزایش پیدا می‌کند. همچنین در احتمال ۱۰ درصد برای شروع خوردگی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بیشتر برای پارامترهای مؤثر به خصوص برای پوشش بتنی موجب به دست آوردن زمان شروع خوردگی کمتر نسبت به حالت‌های قبل می‌شود و در نهایت طرحی غیراقتصادی ارائه خواهد شد. با مقایسه نتایج اهمیت تأثیر غلظت کلرید سطحی، غلظت کلرید بحرانی و نسبت آب به سیمان مشاهده می‌شود. هر چه به ساحل نزدیک‌تر می‌شویم غلظت کلرید سطحی افزایش و اهمیت نسبت آب به سیمان نمایان‌تر می‌شود. با فاصله گرفتن از ساحل و کاهش نسبت آب به سیمان زمان شروع خوردگی افزایش می‌یابد. در سازه‌های نزدیک به ساحل توصیه می‌شود نسبت آب به سیمان‌های پایین هنگام طراحی در نظر گرفته شود و در اجرا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد، تا سازه در طول عمر مفید خود کمتر آسیب دیده و عملکرد مورد نظر را هنگام وقوع زلزله داشته باشد.

منابع

- [1] E.A. Dizaj, R. Madandoust, M.M. Kashani, Probabilistic seismic vulnerability analysis of corroded reinforced concrete frames including spatial variability of pitting corrosion, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114 (2018) 97-112.
- [2] S. Ahmad, Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review, *Cement and concrete composites*, 25(4-5) (2003) 459-471.
- [3] A. Neville, Chloride attack of reinforced concrete: an overview, *Materials and Structures*, 28(2) (1995) 63-70.
- [4] T. Saad, C.C. Fu, Determining remaining strength capacity of deteriorating RC bridge substructures, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(5)

۳-۳- بررسی تأثیر عدم قطعیت‌های پارامترهای مؤثر بر شروع خوردگی

به منظور بررسی تأثیر عدم قطعیت‌ها بر روی زمان شروع خوردگی و مشخص شدن اینکه کدام یک از این پارامترها تأثیر بیشتری بر روی احتمال خرابی سازه دارد، برای هر یک از پارامترها عدم قطعیت‌های متفاوت مطابق با جدول ۳ در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن احتمال ۱۰٪ برای شروع خوردگی، زمان شروع خوردگی کمتری نسبت به عدم قطعیت‌های کمتر حاصل می‌شود. همچنین در احتمال خوردگی تقریباً تا ۵۰٪ در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های متفاوت برای پوشش بتنی بیشترین تأثیر را در نتایج دارد و باعث می‌شود طرح‌های غیراقتصادی هنگام طراحی ارائه شود. همچنین در احتمالات بالا زمان شروع خوردگی بیشتری تخمین زده خواهد شد و ایمنی کمتر را در هنگام طراحی و اجرا نتیجه می‌دهد. این موضوع نیز لزوم دقت در انتخاب ضرایب تغییرات بخصوص برای پوشش بتنی (کاور) را به منظور ارائه طرحی اقتصادی و ایمن را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

به طور کلی می‌توان عوامل مؤثر در زمان شروع خوردگی را در مصالح ساخت بتن، فاصله از ساحل و کیفیت ساخت بتن دید. این عوامل به صورت مستقیم بر روی پارامترهای مؤثر در شروع خوردگی مانند ضریب انتشار کلرید در بتن، غلظت کلرید سطحی، پوشش روی آرماتورها و غلظت کلرید بحرانی اثرگذار هستند.

از آنجا که پارامترهای مؤثر در شروع خوردگی را نمی‌توان به قطعیت تعیین کرد و همواره خطاهایی در تعیین آن‌ها وجود دارد، استفاده از روش‌های آماری و احتمالاتی مناسب‌تر به نظر می‌رسد.

در این مقاله ابتدا نتایج مربوط به حالت غیراحتمالاتی و سپس نتایج مربوط به حالت احتمالاتی برای سه فاصله کمتر از ۱۰۰ متر، ۳۵۰ متر و ۱۰۰۰ متری ساحل و همچنین زمان شروع خوردگی برای سازه‌ای که در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری ساحل قرار دارد با احتمال شکست‌های متفاوت به منظور در نظر گرفتن غلظت کلرید سطحی متفاوت، غلظت کلرید بحرانی متفاوت و نسبت آب به سیمان‌های متفاوت برای در نظر گرفتن کیفیت ساخت و تأثیر نفوذپذیری بتن، ارائه شده است. همچنین به منظور در نظر گرفتن اهمیت دقت در انتخاب عدم قطعیت‌ها مناسب با شرایط موجود پروژه، دو مجموعه ضریب تغییرات برای پارامترهای اثرگذار بر روی شروع خوردگی

- ion diffusion in concrete under fatigue loading, KSCE Journal of Civil Engineering, 23(1) (2019) 287-294.
- [16] W. Shao, Y. Nie, F. Liang, D. Shi, A novel comprehensive evaluation method for the corrosion initiation life of RC hollow piles in chloride environments, Construction and Building Materials, 249 (2020) 118801.
- [17] M.-A. Shayanfar, M.-A. Barkhordari, M. Ghanoooni-Bagha, Probability calculation of rebars corrosion in reinforced concrete using css algorithms, Journal of Central South University, 22(8) (2015) 3141-3150.
- [18] M. Ghanoooni-Bagha, M.A. Shayanfar, M.R. Yekefallah, The Effect of Changes in Carbon-dioxide Concentrations on Corrosion Initiation of Reinforced Concrete Structures, Amirkabir J. Civil Eng, 9(4) (2018) 697-706.
- [19] A. Chateaufneuf, A. Messabhia, A. Ababneh, Reliability analysis of corrosion initiation in reinforced concrete structures subjected to chlorides in presence of epistemic uncertainties, Structural Safety, 86 (2020) 101976.
- [20] A.A. Ramezaniapour, E. Jahangiri, F. Moodi, B. Ahmadi, Evaluation of Models for Service-Life Prediction of Reinforced Concrete Structures in Persian Gulf Marine Environment, (2012).
- [21] S.-K. Choi, R.A. Canfield, R.V. Grandhi, Estimation of structural reliability for Gaussian random fields, Structures and Infrastructure Engineering, 2(3-4) (2006) 161-173.
- [22] V. Novokshchenov, Deterioration of reinforced concrete in the marine industrial environment of the Arabian Gulf—A case study, Materials and Structures, 28(7) (1995) 392-400.
- [23] B. Saassouh, Z. Lounis, Probabilistic modeling of chloride-induced corrosion in concrete structures using first-and second-order reliability methods, Cement and Concrete Composites, 34(9) (2012) 1082-1093.
- [24] J. Crank, The mathematics of diffusion, Oxford university press, 1979.
- [25] A. Khitab, W. Anwar, M.T. Arshad, Predictive Models of Chloride Penetration in concrete: An Overview, MUST J. (2015) 04014122.
- [5] H. Li, B. Li, R. Jin, S. Li, J.-G. Yu, Effects of sustained loading and corrosion on the performance of reinforced concrete beams, Construction and Building Materials, 169 (2018) 179-187.
- [6] M.A. Shayanfar, M.A. Barkhordari, M. Ghanoooni-Bagha, Estimation of corrosion occurrence in RC structure using reliability based PSO optimization, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 59(4) (2015) 531-542.
- [7] K. Tuutti, Corrosion of steel in concrete, Cement-och betonginst., 1982.
- [8] Y. Du, L. Clark, A. Chan, Effect of corrosion on ductility of reinforcing bars, Magazine of Concrete Research, 57(7) (2005) 407-419.
- [9] H.-S. Lee, T. Noguchi, F. Tomosawa, Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion, Cement and Concrete research, 32(8) (2002) 1313-1318.
- [10] C. Fang, K. Lundgren, M. Plos, K. Gylltoft, Bond behaviour of corroded reinforcing steel bars in concrete, Cement and concrete research, 36(10) (2006) 1931-1938.
- [11] S. Williamson, L. Clark, Pressure required to cause cover cracking of concrete due to reinforcement corrosion, Magazine of Concrete research, 52(6) (2000) 455-467.
- [12] M.M. Kashani, P. Alagheband, R. Khan, S. Davis, Impact of corrosion on low-cycle fatigue degradation of reinforcing bars with the effect of inelastic buckling, International Journal of Fatigue, 77 (2015) 174-185.
- [13] J. Wu, P.N. Faye, W. Zhang, B. Diao, Chloride diffusivity and service life prediction of RC columns with sustained load under chloride environment, Construction and Building Materials, 158 (2018) 97-107.
- [14] J. Zhang, Z. Lounis, Sensitivity analysis of simplified diffusion-based corrosion initiation model of concrete structures exposed to chlorides, Cement and concrete research, 36(7) (2006) 1312-1323.
- [15] T. Yang, B. Guan, G. Liu, Y. Jia, Modeling of chloride

- [33] P.C. Hoffman, R.E. Weyers, Probabilistic durability analysis of reinforced concrete bridge decks, in: Probabilistic Mechanics & Structural Reliability, ASCE, 1996, pp. 290-293.
- [34] K.A.T. Vu, M.G. Stewart, Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models, Structural safety, 22(4) (2000) 313-333.
- [35] M. Shekarchi, P. Ghods, R. Alizadeh, M. Chini, M. Hoseini, DURAPGULF, A LOCAL SERVICE LIFE MODEL FOR THE DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES IN THE SOUTH OF IRAN, Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV), 33 (2008).
- [36] M.P. Enright, D.M. Frangopol, Probabilistic analysis of resistance degradation of reinforced concrete bridge beams under corrosion, Engineering structures, 20(11) (1998) 960-971.
- [37] S. B, Structural use of concrete–part 1, in: code of practice for design and construction, 1999.
- [38] R. Yu, L. Chen, D. Zhang, Z. Wang, Life cycle embodied energy analysis of RC structures considering chloride-induced corrosion in seismic regions, in: Structures, Elsevier, 2020, pp. 839-848.
- [39] M. GhAnooni-BAGhA, M.A. ShAyAnfAr, O. Reza-Zadeh, M. Zabihi-Samani, The effect of materials on the reliability of reinforced concrete beams in normal and intense corrosions, Eksploatacja i Niezawodność, 19(3) (2017). Eng. Appl. Sci, 1 (2017) 1-14.
- [26] N.S. Berke, M.C. Hicks, Estimating the life cycle of reinforced concrete decks and marine piles using laboratory diffusion and corrosion data, in: Corrosion forms and control for infrastructure, ASTM International, 1992.
- [27] K. Takewaka, S. Mastumoto, Quality and cover thickness of concrete based on the estimation of chloride penetration in marine environments, Special Publication, 109 (1988) 381-400.
- [28] P. Bamforth, W.F. Price, M. Emerson, International Review of Chloride Ingress Into Structural Concrete: A Trl Report (Trl 359), (1997).
- [29] R. McGee, Modelling of durability performance of Tasmanian bridges, ICASP8 applications of statistics and probability in civil engineering, 1 (1999) 297-306.
- [30] V. Papadakis, A. Roumeliotis, M. Fardis, C. Vagenas, Mathematical modelling of chloride effect on concrete durability and protection measures, Concrete repair, rehabilitation and protection, (1996) 165-174.
- [31] M. Ghanoonibagha, M.A. Shayanfar, S. Asgarani, M. Zabihi Samani, Service-Life Prediction of Reinforced Concrete Structures In Tidal Zone, Journal Of Marine Engineering, 12(24) (2017) 13-22.
- [32] A.A. Ramezaniapou, E. Jahangiri, F. Moodi, B. Ahmadi, Assessment of the Service Life Design Model Proposed by fib for the Persian Gulf Region, Journal of Oceanography, 5(17) (2014) 101-112.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Z. Etemadi Naeini, M. Habibian, Role of personal barriers on willingness to walk in daily work trips across Rasht citizens, Amirkabir J. Civil Eng., 55(2) (2023) 389-406.

DOI: [10.22060/ceej.2022.20005.7312](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20005.7312)



