

حمید اسکندری¹، الهام سادات حسینی²

1 استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، ایران

آدرس پست الکترونیک (Hamidiisc@yahoo.com)

2 دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، ایران

آدرس پست الکترونیک (Hosseinielhamsadat@gmail.com)

چکیده

از عوامل ایجاد کننده خوردگی، می توان کربناسیون، سولفات شده و کلریداسیون را نام برد که در این میان بیشترین خوردگی پروژه ها مربوط به ورود کلریدها به بتن بوده و میتواند موجب خرابی اعضای بتنی گردد. در این تحقیق روش های بهینه سازی که می تواند در خوردگی به عنوان تابع هدف، در جهت ساخت سازه های بتن آرمه ایمن مورد استفاده قرار گرفت اشاره می شود. همچنین به بررسی برخی عوامل موثر نظیر نسبت آب به سیمان و ضخامت پوشش بتنی به عنوان پارامترهای تاثیر گذار بر تابع هدف، بررسی شده و محدودیت های هر یک از این عوامل در بهینه سازی ارائه گردیده است.

واژه های کلیدی: بتن مسلح، بهینه سازی، خوردگی، تابع هدف، محدودیت ها

Optimization of Reinforced Concrete Corrosion

Hamid, Eskandari¹; Elham Sadat, Hosseini²

¹ Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

² Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Abstract

Carbonation, sulfate and chloride can be induced corrosion. among the most corrosion chlorides into concrete projects related to entry and cause damage to concrete members. In this study, optimization techniques that can be applicable for corrosive which is the objective function, in order to this aim is useful to the construction of reinforced concrete structures. It also examines some factors, such as water/cement ratio and cover thickness of concrete as parameters affecting the objective function and constraints can be referred to any of these factors will be considered in the optimization.

Keywords: reinforced concrete, optimization, corrosion, objective function, constraints

امروزه به دلیل گسترش فعالیت های استخراج معادن در بستر دریاها، فعالیت های ساختمانی مانند ساخت اسکله ها، سکوها و سازه های مانند آنها در مناطق ساحلی و اقیانوسی افزایش چشمگیری داشته است بطوریکه بتن به عنوان یک ماده با دوام در محیط دریا محسوب می گردد اما خرابیهای زیادی از سازه های بتنی کنار ساحل گزارش شده است همچنین هنگام طراحی سازه های بتنی در محیط دریا در نظر گرفتن عوامل مخربی که بتن طی سالیان دراز باید در معرض آن قرار گیرد ضروری است (محمودی و همکاران، 1388). خوردگی فولاد یکی از عوامل مهم خرابی بتن است، یک فرایند الکتروشیمیایی است که در آن آرماتورهای فولادی به تدریج شروع به از بین رفتن می کنند. از عوامل ایجاد کننده خوردگی، می توان کربناسیون، سولفاته شدن و کلریداسیون را نام برد که در این میان باید به کلریداسیون از نظر اثر تخریبی زیاد آن توجه نمود (پوربهبی، بهفرنیا، 1385). مقاومت خوردگی بالای فولادهای ضدزنگ مرسوم، در محیط قلیایی و در حضور یون کلرید تاثیر فراوانی دارد (Gastaldi, Bertolini, 52-60, 2014). مؤثرترین شیوه مقابله با مکانیزم خوردگی (که یکی از مهمترین و رایج ترین عوامل تخریب سازه های بتنی در محیط های دریایی می باشد) استفاده از روشهای حفاظت کاتدی است، که روشهای مختلف حفاظت کاتدی؛ در دو گروه کلی سیستمهای مبتنی بر جریان دهی و سیستمهای مبتنی بر قربانی شدن آند طبقه بندی می شوند (حسن پور، شاه نظری، 1384). بهینه سازی مقاطع بتن مسلح که در معرض عوامل تهاجمی محیط زیست هستند، تاثیر زیادی بر طول عمر سازه های ایمن دارد که می تواند تحت یک تابع و محدودیت تعریف شود. لازم بذکر است بهینه سازی متشکل از حداقل رساندن مقادیر مختلف زمانی روی ساختمان های ایمن بدون در نظر گرفتن تعمیر و نگه داری می باشد (Biondini, Frangopol, 483-489, 2009). از روشهای بهینه سازی که می توان اشاره کرد پتانسیل خوردگی در بتن می باشد که توسط معادله لاپلاس می توان بررسی نمود. که با آنالیز معکوس، و حداقل سازی خوردگی به عنوان تابع هدف انجام می شود و مقدار تابع هدف برابر است با تخمینی بین مقدار محاسبه شده توسط معادله لاپلاس و مقدار اندازه گیری شده روی سطوح خوردگی (Fonna et al, 585-593, 2013). از روشهای دیگر بهینه سازی که می توان اشاره نمود، مطالعات مقایسه ای روی آزمایشات و داده های عددی خوردگی و زمان شروع خوردگی آرماتورها در محیط دریایی می باشد، که شروع خوردگی معمولا در زمانی که اندازه گیری از یک حد مشخص آستانه فراتر رود مشخص می شود. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که این روش، روش دقیقی برای تعیین زمان شروع خوردگی نمی باشد در عوض تغییر در روند داده های اندازه گیری شده باید استفاده شود و یک روش قابل اطمینان ارائه گردد. همچنین نرخ خوردگی در بتن در مناطق آتمسفری سریعتر از مناطق جزرو مدی است اما ارتباط مشخصی بین زمان شروع خوردگی در مناطق آتمسفری و جزر و مدی نمی باشد (Valipour et al, 2013). ترک خوردگی داخلی پوشش بتنی تاثیر زیادی بر روی نرخ خوردگی آرماتورها دارد و نتایج نشان می دهد نرخ خوردگی آرماتورها در بتن با ترک خوردگی داخلی بیشتر از بتن بدون ترک است (Ujike et al, 22-25, 2013). همچنین نرخ خوردگی سولفوریک اسید بتن به طور جدی به وسیله پدیده ای که در لایه های خوردگی اتفاق می افتد، تحت تاثیر قرار می گیرد. مشاهدات بصری لایه های خوردگی این واقعیت را تایید کرد که مواجه با شروع خوردگی مرزی، یک الگوی مناسب برای مدلسازی خوردگی سولفوریک اسید بتن است (Jahani et al, 572-579, 2001). از عوامل موثر دیگر نسبت w/c است که بر اساس اصول الکتروشیمیایی و خوردگی می توان مدل عملی برای پیش بینی نرخ خوردگی آرماتورهای فولادی در محیط های کلریدی، ضخامت پوشش بتن و رطوبت نسبی پیشنهاد داد (Yu et al, 385-401, 2014). همچنین افزایش میزان آب به سیمان سبب افزایش سطوح خوردگی بر روی میلگرد و کاهش پیوستگی بین بتن و فولاد و سبب افزایش میزان نفوذ یون کلرید می گردد (Aldulaymi, 2007). از آخرین تحقیقات به نظر می رسد که برای بهینه سازی و تعمیر سازه های بتن مسلح که تحت نفوذ یون کلریدی باشد، می توان با جایگزینی مواد جدید آنها را تعمیر نموده که سبب کاهش هزینه های تعمیر و نگه داری می شود (Bastidas-Arteaga et al, 1915-1924, 2011). تحقیقات به نحوی است که سعی در ارائه تکنیک های جدید از جمله بهینه سازی چندمنظوره می باشد که برای بهینه کردن طراحی نرخ خوردگی سیستم سنسور

The first International conference on sustainable urban structure

برای یک عرشه پل بتن مسلح کاربرد فراوانی خواهد داشت (Marsh, Frangopol, 777-787, 2007). در این تحقیق اشاره به تعدادی روشهای بهینه سازی در خوردگی و روابط بین پارامترهای موثر نموده و آنها را مقایسه می نماید.

2- روشهای بهینه سازی در خوردگی

الف) بهینه سازی چندمنظوره :

بهینه سازی چندمنظوره یک تکنیک برای مینیمم کردن هم زمان چند تابع هدف $F(x)$ می باشد، هر تابع هدف F_1, \dots, F_k خود تابعی از پارامترهای طراحی می باشند که دارای یک سری محدودیت ها $G(x)$ و $H(x)$ هستند.

$$\begin{aligned} \min & \rightarrow F(X) \quad \text{subject to} \\ G_i(X) & \leq 0 \quad \text{for } i = 1, \dots, m \\ H_i(X) & \leq 0 \quad \text{for } i = 1, \dots, n \\ X_l & \leq X \leq X_u \end{aligned}$$

مسائل برداری چندمنظوره می تواند به وسیله بهینه سازی مجموع وزن های عددی ایجاد شود.

$$\text{Min} \rightarrow F(X) = \sum_{i=1}^m w_i F_i(X), \quad m = \text{تعداد توابع}$$

برای $F(x)$ تابع هدف های متفاوتی می توان در نظر گرفت که در ادامه به بیان آن ها پرداخته می شود.

ب) نرخ نفوذ و نرخ خوردگی :

چگالی جریان خوردگی i_{corr} ، براساس نرخ خوردگی j_r و نرخ نفوذ P_r ، به طور مستقیم از قانون Faraday پیروی می کند.

$$j_r = \left(\frac{W}{F_c}\right) i_{corr}, \quad p_r = \left(\frac{W}{F_c p_{st}}\right) i_{corr}$$

که در آن : ثابت Faraday F_c ، چگالی فولاد p_{st} ، تراکم خوردگی i_{corr} ، نرخ خوردگی j_r ، نرخ نفوذ P_r

ج) تاثیر خوردگی بر روی پیوستگی بین بتن و فولاد :

رابطه بین پیوستگی بتن، قطر میلگرد و طول مهارى به صورت مقابل می باشد:

$$U = \frac{d_b f_s}{4L_d}$$

برای نسبت $\frac{L_d}{d_b}$ تئوری های مختلفی ارائه شده است که به شرح ذیل می باشد:

• **Orangan و Jirsa ، Breen (OBJ)** در سال 1977 و 1975 از تکنیک آنالیز استاتیکی برای توسعه معادلات استفاده کردند، OBJ معادلات را در دو حالت بتن با میلگردگذاری عرضی و بدون میلگردگذاری عرضی در نظر گرفتند. برای حالت عدم وجود میلگردهای عرضی، نیروی پیوستگی را به شکل زیر تعریف کردند:

$$\frac{L_d}{d_b} = \frac{\left(\frac{f_y}{(f'_c)^2}\right) - 200}{12[(c'_{min} + 0.4d_p)]}$$

و برای حالت میلگردگذاری عرضی نیز تابع زیر را تعریف نمودند:

The first International conference on sustainable urban structure

$$\frac{L_d}{d_b} = \frac{\left(\frac{f_y}{(f'_c)^2}\right) - 200}{12[(c'_{min} + 0.4d_p) + (A_{tr}f_{yt}/1500 sn)]}$$

d_b = قطر میلگرد ، L_d = طول مهاری ، n = تعدادمیلگردهای به هم تابیده شده ، s = فاصله ی خاموت ها ، A_{tr} = مساحت هر قلاب ، مینیمم پوشش بتن یا نصف فاصله بین میلگردها ، c'_{min} = تنش تسلیم میلگرد ، f_y = تنش تسلیم خاموت ، f_{yt} = محدودیتی که در دو معادله بالا وجود دارد :

$$1/d_p [(c'_{min} + 0.4d_p) + (A_{tr}f_{yt}/1500 sn)] < 2.5$$

• **Darwin et al(1996)** ، تئوری ای در این زمینه ارائه داد که در صورت عدم وجود خاموت گذاری عرضی معادله به شکل زیر می باشد:

$$\frac{L_d}{d_b} = \frac{\left(\frac{f_y}{(f'_c)^{1/4}}\right) - 2130[0.1(c'_{max}/c'_{min}) + 0.9]}{80.21(c'_{min} + 0.5d_p)[0.1(c'_{max}/c'_{min}) + 0.92]} d_p$$

و برای حالتی که خاموت داشته باشیم :

$$\frac{L_d}{d_b} = \frac{\left(\frac{f_y}{(f'_c)^{1/4}}\right) - 2130[0.1(c'_{max}/c'_{min}) + 0.9] - (66/A_b)}{80.21(c'_{min} + 0.5d_p)[0.1(c'_{max}/c'_{min}) + 0.92] + (35.33t_y t_d A_{tr})/sn} d_p$$

$C_s = \{C_{so}, C_{si} + 0.25\}$ ، C_{si} = نصف فاصله بین میلگردها ، C_{so} = پوشش جانبی بتن ، C_b = پوشش زیرین بتن ، $C_{min} = \{C_b, C_s\}$

محدودیتی نیز برای آن وجود دارد:

$$1/d_p [(c'_{min} + 0.5d_p)[0.1(c'_{max}/c'_{min}) + 0.9] + (35.33t_y t_d A_{tr})/sn < 0.4$$

• **Zuo and Darwin (1998,2000)** ، تئوری Darwin et al (1996b) را با افزایش داده ها وساخت نمونه های مختلف بتن با مقاومت بالاتر ($f'_c > 8000$) گسترش دادند ونهایتا تئوری را به شکل زیر برای حالت عدم خاموت گذاری ارائه دادند:

$$\frac{L_d}{d_b} = \frac{\left(\frac{f_y}{(f'_c)^{1/4}}\right) - 2350[0.1(c'_{max}/c'_{min}) + 0.9]}{76.3(c'_{min} + 0.5d_p)[0.1(c'_{max}/c'_{min}) + 0.92]} d_p$$

برای حالت خاموت گذاری عرضی نیز معادله زیر حاصل شد:

$$\frac{L_d}{d_b} = \frac{\left(\frac{f_y}{(f'_c)^{1/4}}\right) - 2350[0.1(c'_{max}/c'_{min}) + 0.9]}{76.3(c'_{min} + 0.5d_p)[0.1(c'_{max}/c'_{min}) + 0.92] + (0.52t_y t_d A_{tr}/sn)(f'_c)^{1/2}} d_p$$

و همچنین محدودیت نیز برای آن به شکل زیر تعریف گردید:

$$1/d_p [(c'_{min} + 0.5d_p)[0.1(c'_{max}/c'_{min}) + 0.9] + (0.52t_y t_d A_{tr})/sn (f'_c)^{1/2}] < 0.4$$

• کمیته ACI 408 معادله را با در نظر گرفتن محدودیت آن به شکل زیر تعریف کرد :

$$\frac{L_d}{d_b} = \frac{\left(\frac{f_y}{(f'_c)^{1/4}}\right) - 2400[0.1(c'_{max}/c'_{min}) + 0.9]}{76.3(c'_{min} + 0.5d_p)[0.1(c'_{max}/c'_{min}) + 0.92] + (0.52t_y t_d A_{tr}/sn)(f'_c)^{1/2}} d_p$$

محدودیتی نیز که ACI معرفی کرد به صورت زیر است :

$$1/d_p[(c'_{min} + 0.5d_p)[0.1(c'_{max}/c'_{min}) + 0.9] + (0.52t_y t_d A_{tr})/sn(f'_c)^{1/2}] < 0.4$$

و نهایتاً با مقایسه این تئوری ها، جداول زیر حاصل شد.

جدول 1: نسبت $\frac{L_d}{d_b}$ برای بتن مسلح بدون خاموت گذاری عرضی

	OBJ(1975,1977) *	Darwin et al(1996)	Zuo and Darwin(2000)	ACI 408
Maximum	1.555	1.342	1.304	1.288
Minimum	0.505	0.719	0.729	0.724
Average	1.030	1.020	1.010	1.000
Standard Deviation	0.208	0.118	0.113	0.111
COV**	0.202	0.116	0.111	0.111

*Orangun, Jersa and Breen (1975,1977)

**Coefficient of Variation

جدول 2: نسبت $\frac{L_d}{d_b}$ برای بتن مسلح با خاموت گذاری عرضی

	OBJ(1975,1977) *	Darwin et al(1996)	Zuo and Darwin(2000)	ACI 408
Maximum	1.902	1.479	1.309	1.333
Minimum	0.595	0.776	0.739	0.755
Average	1.074	1.052	0.989	1.002
Standard Deviation	0.255	0.132	0.119	0.121
COV**	0.238	0.125	0.121	0.120

*Orangun, Jersa and Breen (1975,1977)

**Coefficient of Variation

• **Zahir Aldulaymi** در سال 2007 رابطه را برای مقاومت چسبندگی فولاد به صورت زیر ارائه نموده

است همچنین رفتار ترک در پوشش بتنی را الاستیک فرض کرد. نتایجی که از تئوری ایشان حاصل شده این است که هر چه نسبت آب به سیمان بیشتر باشد خوردگی بیشتر و مقاومت چسبندگی کمتر خواهد بود. هم چنین افزایش ضخامت پوشش بتن، باعث طولانی تر شدن زمان نفوذ یون کلرید به سطح میلگردها و کاهش نرخ خوردگی خواهد شد. خلاصه ای از این تئوری به صورت زیر است :

$$u = 0.6(0.5 + c/d_p)f_t \quad MPa$$

مقاومت چسبندگی = U ، ضخامت پوشش بتن = C ، قطر میلگردها = d_p ، مقاومت کششی میلگرد = f_t

The first International conference on sustainable urban structure

که در آن مقاومت کششی میلگرد را می توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$f_t = 0.56(f_c)^{1/2} \quad MPa$$

و با جایگذاری رابطه زیر به دست می آید :

$$u = \left(0.17 + 0.336 \frac{c}{d_b}\right) (f_c)^{1/2}$$

دو پارامتر موثر بر خوردگی و مقاومت چسبندگی در بتن $\frac{w}{c}$ و کلرید می باشد، طبق آزمایشات انجام شده نتایج جدول زیر به دست آمده و می توان تاثیر این دو پارامتر را به این صورت تعریف کرد:

$$u = \left[0.35 + 0.3 \frac{c}{db}\right] (f'c)^{1/2} - f(w/c) \times cl$$

$f\left(\frac{w}{c}\right)$ یک تابع براساس $\frac{w}{c}$ و cl درصد یون کلرید در بتن مسلح می باشد.

که تابع آن نهایتاً به شکل زیر حاصل می شود:

$$u = \left[0.35 + 0.3 \frac{c}{db}\right] (f'c)^{1/2} - \left[1.667 \left(\left(\frac{w}{c}\right)^{-2.3588}\right)\right] cl$$

جدول 3: روابط بهینه شده بر حسب پارامترهای w/c و پوشش بتن

پوشش بتن (mm)	نسبت آب به سیمان (w/c)	روابط بهینه شده	R ²
50	0.32	$u = \left[0.35 + 0.3 \frac{c}{db}\right] (f'c)^{1/2} - 24.5 \times cl^*$	0.94
75			
50	0.42	$u = \left[0.35 + 0.3 \frac{c}{db}\right] (f'c)^{1/2} - 12.9 \times cl^*$	0.80
75			

طبق آزمایشات انجام شده، تاثیر افزایش سطوح خوردگی بر روی کاهش پیوستگی بین بتن و فولاد و در نسبت های مختلف $\frac{w}{c}$ و نفوذ یون کلرید نشان داده شد.

(د) بهینه سازی طراحی طول عمر :

هدف بهینه سازی طراحی طول عمر، پیدا کردن مقادیر پارامترهای طراحی x که تابع $f(x)$ را بهینه می کند:

$$Min f(x) \quad x \in D \quad D = \{x | x^- \leq x \leq x^+, g(x, t) \leq 0, t \leq T\}$$

هم چنین محدودیت هایی نیز برای این تابع وجود دارد :

$$p_F(x, t) = p[g(x, t) \leq 0], t \leq T$$

$$\beta(x, t) = -\phi^{-1}[p_F(x, t)], t \leq T$$

$$Min f(x) \quad x \in D \quad D = \{x | x^- \leq x \leq x^+, \beta(x, t) \geq \beta^-(t), t \leq T\}$$

چندین تابع هدف برای بهینه سازی طراحی مقاطع بتن مسلح ممکن است به کار گرفته شود :

$$f(x) = A_c(X) + xA_s(X)$$

$$(X = C_s / C_c)$$

اگر $M_R(x, t)$ لنگر خمشی مقاوم مقطع و $M_A(x, t)$ لنگر خمشی محرک باشد آنگاه :

The first International conference on sustainable urban structure

$$\theta(x, t) = \frac{M_R^{(x,t)}}{M_A^{(x,t)}} \geq 1, t \leq T$$

$$f(x) = A_c(X) + xA_s(X)\mu_\theta = \frac{\mu_R}{\mu_A} (1 + \delta_A^2) \quad , \quad \delta_\theta = \sqrt{\delta_R^2 + \delta_A^2 + \delta_R^2\delta_A^2}$$

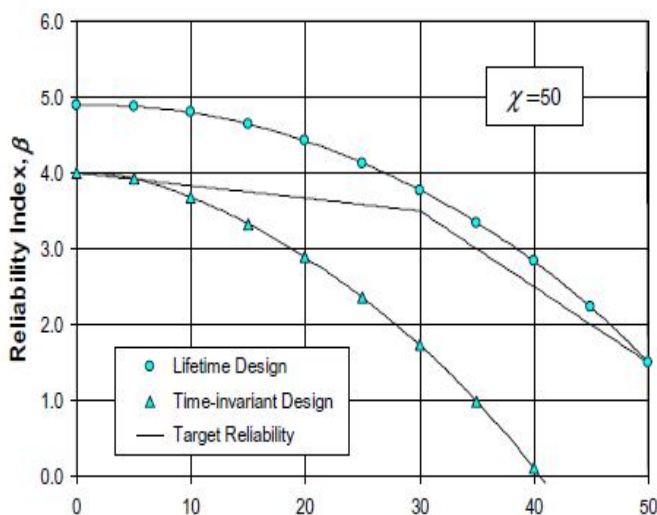
بر اساس دو رابطه بالا ، شاخص اطمینان β را به شکل زیر تعریف می کنیم:

$$\beta(x, t) = \frac{\lambda_\theta(X, t)}{\xi_\theta(X, t)}$$

که در آن λ_θ و ξ_θ^2 از روابط زیر حاصل می شود:

$$\lambda_\theta = \ln \mu_\theta - \frac{1}{2} \xi_\theta^2 \quad \xi_\theta^2 = \ln(1 + \delta_\theta^2)$$

که نهایتاً با بهینه سازی طول عمر و تابع هدف نمودار زیر حاصل شد :



شکل 1: نمودار ضریب اطمینان β

3- نتیجه گیری

از تکنیک های ارائه شده برای بهینه سازی، استفاده از بهینه سازی چند منظوره است که در آن چند تابع هدف به طور هم زمان با توجه به توابع محدودیت آنها بهینه می گردد به همین دلیل روش مناسبی برای بهینه کردن پارامترهای مختلف خوردگی به حساب می آید. همچنین به علت تاثیر خوردگی بر روی پیوستگی بین بتن و فولاد ، از چهار تئوری ارائه شده در تحقیق برای محاسبه $\frac{L_d}{d_b}$ در دو حالت بتن با خاموت گذاری عرضی و بدون خاموت گذاری عرضی استفاده شد و سپس پیوستگی بین بتن و فولاد مورد ارزیابی قرار گرفت که هرچه خوردگی بیشتر باشد باعث کاهش پیوستگی بین بتن و فولاد می شود. در روشی دیگر به بهینه سازی طراحی طول عمر پرداخته شد که برای آن تابعی ارائه و ضریب اطمینان برای آن در نظر گرفته شد.

نتایجی که از این تئوری ها حاصل می شود این است که هر چه نسبت آب به سیمان بیشتر باشد خوردگی بیشتر و مقاومت چسبندگی کمتر خواهد بود و همچنین افزایش ضخامت پوشش بتن، باعث طولانی تر شدن زمان نفوذ یون کلرید به

The first International conference on sustainable urban structure

سطح میلگردها و ماهش نرخ خوردگی خواهد شد. برای تحقیقات آینده بهتر است که برای کار آزمایشگاهی نکات فوق را در نظر گرفت.

4- مراجع :

- [1] پوربهی، پیمان. بهفرنیا، کیاچهر. (1385) «ارزیابی درازمدت اثر خوردگی آرماتورها بر ظرفیت باربری اعضای بتنی در محیط های دریایی»، هفتمین کنفرانس مهندسی عمران.
- [2] حسن پور، میرشریف. شاه نظری، حبیب. (1384) «استفاده از حفاظت کاتدی برای کنترل خوردگی سازه های بتن آرمه در محیطهای دریایی»، دومین کنفرانس مهندسی عمران.
- [3] محمودی، امین. افشین، حسن . حکیم زاده ، حبیب. جلالی وحید، داود. (1388) «بررسی دوام بتن مسلح در محیط دریایی خورنده شدید بر حسب موقعیت قرارگیری بتن نسبت به تراز آب دریا»، نشریه مهندسی دریا، سال پنجم، شماره 10 .
- [4] Aldulaymi, Z. (2007). **Optimization of the effect of corrosion on bond behaviour between steel and concrete.**
- [5] Bastidas-Arteaga, E., Schoefs, F., & Sanchez-Silva, M. (2011). **Probabilistic optimization of the management of corroding RC structures.** In Structures Congress 2011 (pp. 1915-1924). ASCE
- [6] Biondini, F., & Frangopol, D. M. (2009). **Lifetime reliability-based optimization of reinforced concrete cross-sections under corrosion.** Structural safety, 31(6), 483-489
- [7] Fonna, S., Huzni, S., Ridha, M., & Ariffin, A. K. (2013). **Inverse analysis using particle swarm optimization for detecting corrosion profile of rebar in concrete structure.** Engineering Analysis with Boundary Elements, 37(3), 585-593.
- [8] Gastaldi, M., Bertolini, L. (2014). **Effect of temperature on the corrosion behaviour of low-nickel duplex stainless steel bars in concrete.** Cement and Concrete Research, 56, 52-60.
- [9] Jahani, F., Devlinny, J., Mansfeld, F., Rosen, I. G., Sun, Z., & Wang, C. (2001). **Investigations of sulfuric acid corrosion of concrete. I: modeling and chemical observations.** Journal of environmental engineering, 127(7), 572-579.
- [10] Marsh, P. S., & Frangopol, D. M. (2007). **Lifetime multiobjective optimization of cost and spacing of corrosion rate sensors embedded in a deteriorating reinforced concrete bridge deck.** Journal of structural engineering, 133(6), 777-787.
- [11] Ujike, I., Okazaki, S., & Sato, R. (2013). **Experimental Study on Effect of Internal Cracking on Corrosion Rate of Reinforcement in Concrete.** In Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete: A Tribute to Zdenek P. Bažant: Proceedings of the Ninth International Conference on Creep, Shrinkage, and Durability Mechanics (CONCREEP-9), September 22-25, 2013 Cambridge, Massachusetts (p. 277). ASCE Publications.
- [12] Valipour, M., Shekarchi, M., & Ghods, P. (2013). **Comparative studies of experimental and numerical techniques in measurement of corrosion rate and time-to-corrosion-initiation of rebar in concrete in marine environments.** Cement and Concrete Composites
- [13] Yu, B., Yang, L., Wu, M., & Li, B. (2014). **Practical model for predicting corrosion rate of steel reinforcement in concrete structures.** Construction and Building Materials, 54, 385-401.