بررسی شاخص کاهش پخش کلراید در بتن از روشهای تجربی و تحلیلی

علیرضا آذریون[۱*]، محسن تدین[۲]، غلامرضا قهرمانی[۳]

۱- عضو هیات علمی دانشکده فنی دانشگاه ملایر
۲- استادیار دانشکده فنی دانشگاه بوعلی سینا
۳- عضو هیات علمی دانشکده فنی دانشگاه ملایر

چکیده

از جمله پارامترهایی که میتواند میزان انتشار یون کلراید به درون بتن را توصیف کند، ضریب انتشار یون کلراید می باشد که میتوان آنرا با کمک پروفیل یون کلر بدست آورد. با معلوم بودن این عامل میتوان پیش بینی نمود که پس از چه زمانی غلظت یون کلراید در سطح آرماتور به آستانه بحرانی میرسد. همچنین میتوان مقدار پوشش بتنی مورد نیاز روی آرماتور را تعیین نمود، بطوری که آرماتور در طول عمر مفید سازه دچار خوردگی نگردد. وابستگی زمانی و مکانی ضریب انتشار یون کلراید امری است که توسط محققین به اثبات رسیده ولی معادله دقیق این وابستگی در هاله ای از ابهام قرار دارد. در این نوشتار سعی شده است نظرات گوناگون در مورد نحوه وابستگی زمانی ضریب انتشار یون کلراید به درون بتن را بیان کرده و در پایان به مقایسه برخی از روشهای تجربی با یک روش جدید تحلیلی محاسبه شاخص کاهش پخش بتن پرداخته شود.

کلمات کلیدی: شاخص کاهش پخش، قانون فیک، ضریب انتشار

Investigation of the Chloride Diffusion Decay Index in Concrete by Experimental and Analytical Methods

A. Azarioon[1], M. Tadayon[2], G. Ghahremani[3]

1- Assistant Professor of civil Eng, Bu-Ali Sina University
2- Lecturer of Civil Eng, Malayer University
3- Lecturer of Civil Eng, Malayer University

Abstract

Diffusion coefficient is one of the parameters which can describe the rate of chloride ion diffusion in concrete. This can be obtained by the chloride ion profile. By determining this factor,one can predict when the chloride ion concentration on the reinforcement surface reaches a critical value,and the cover tickness which is needed for preventing corrosion. Time and distance dependency of chloride ion diffusion coefficient has been proved by researchers,but the exact equation of dependency is ambiguous. In this paper,Researchers try to collect the various opinions about the quality of chloride ion diffusion time-dependency and then compare the experimental approaches with a new analytical approach to calculate diffusion decay index.

Keywords: Diffusion decay index ,Fick's law, Diffusion coefficient

* نویسنده مسوول مقاله azarioon@gmail.com

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.6.8]

۱- مقدمه

انتشار کلراید در بتن، یک انتقال جرم توسط حرکت تصادفی یونهای کلراید آزاد در محلول منفذی است که نتیجه آن جریانی از مناطق با تمرکز یون بیشتر به مناطق با غلظت یون کمتر است. با توجه به وضعیت فضاهای خالی داخل جسم، این پدیده دارای چند نوع مکانیزم می باشد. بطور کلی، دو روش برای مدلسازی نفوذ یون کلراید در بتن وجود دارد [۱،۲،۳]:

۱- مدلهای مبتنی بر خصوصیات ماکروسکوپیک

۲- مدلهای بر مبنای خصوصیات میکروسکوپیک (الکتروشیمیایی)

در هرکدام از این روشها، چند مکانیزم می توان در نظر گرفت که در جدول ۱ خلاصه شده اند.

جدول ۱- مدلسازی نفوذ یون کلراید در بتن[۳]

روش مدلسازی	مکانیزم	
ماکروسکوپیک	انتشار[۱]	
	همرفت[۲] (انتقال یون همراه رطوبت)	جذب مویینه[۳]
		گرادیان هیدرولیکی
میکروسکوپیک	انتشار	
	مهاجرت[۴] (انتقال یون براثر گرادیان پتانسیل الکتریکی)	
	همرفت	جذب مویینه
		گرادیان هیدرولیکی

در مدلهای بر مبنای ماکروسکوپیک، بجز لایه‌های سطحی(حداکثر عمق ۲۰ میلیمتر) که در معرض چرخه تر و خشک شدن قرار دارد و باعث اهمیت یافتن فرآیند جذب مویینه می گردد، در غالب موارد فرآیند انتشار حاکم است. گرادیان هیدرولیکی بندرت در جاده های بتنی بررسی شده و کمترین اثر را دارد [۳]. در مدلهای میکروسکوپیک، اخیرا یک فرآیند عمومی تر انتقال یون در بتن شامل تمام مکانیزمهای مورد اشاره مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. پیشنهاداتی که توسط نیلسن [۵] بمنظور پیش بینی صحیح میزان نفوذ یون کلراید در بتن ارائه گردیده اند عبارتند از:

۱- استفاده از شرایط مرزی مناسبتر

۲- استفاده از فاکتور سن[۵] مناسب برای محاسبه ضریب انتشار.

۳- در نظر گرفتن بیش از یک مکانیزم.

در مدلهای برپایه فرآیند انتشار نیز روشهای مختلفی استفاده شده است. در برخی از آنها، مواردی چون اثر پیوندی کلراید[۶] منظور می گردد [۶]. تفاوتهای اصلی روشهای مذکور در مرجع [۷] آورده شده است.

برپایه مکانیزم انتشار، مشتق غلظت یون کلراید نفوذی نسبت به زمان متناسب با گرادیان غلظت و ضریب انتشار بتن می باشد. قانون دوم فیک[۷] که برای محاسبه غلظت یون کلراید در جریان یک بعدی بکار می رود بصورت زیر نوشته می شود [۱]:

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

در این رابطه، D ضریب انتشار است که برحسب مترمربع بر ثانیه بوده و تابع غلظت می باشد. $C(x,t)$ نیز غلظت یون کلراید است که برحسب درصد وزنی سیمان یا بتن معرفی می گردد.

با فرض مقدار اولیه غلظت یون کلراید C_i و غلظت یون کلراید در سطح بتن در زمان نفوذ C_s، شرایط اولیه و مرزی بصورت زیر خواهند بود:

$$C=C_i : t=0, 0<x<\infty$$
$$C=C_s : 0\le t<\infty, x=0$$

حل کرانک[۸] معادله (۱) بصورت زیر خواهد بود:

$$\frac{C(x,t)-C_i}{C_s-C_i}=1-\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\frac{x}{2\sqrt{D_a t}}}\exp(-\lambda^2)\,d\lambda$$

یا بصورت بی بعد:

$$\frac{C_s-C(x,t)}{C_s-C_i}=erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}}\right) \qquad (۲)$$

در رابطه فوق، $C(x,t)$ غلظت یون کلراید(برحسب درصد وزنی سیمان) در عمق x بعد از گذشت زمان در معرض بودن t می باشد. D_a ضریب انتشار ظاهری[۹]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.6.8]

نامیده می شود. تغییر ضریب انتشار در هر زمان، اثر قابل ملاحظه ای بر میزان نفوذ یون کلراید در بتن دارد [۸].

erf تابع بدون بعد موسوم به تابع خطا[۱۰] است.

$$erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}}\right)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\frac{x}{2\sqrt{D_a t}}}\exp(-\lambda^2)\,d\lambda$$

یا بصورت ساده تر (با تغییر متغیر $u=\frac{x}{2\sqrt{D_a t}}$):

$$erf\left(u\right)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{u}\exp(-\lambda^2)\,d\lambda$$

انتگرال فوق در حالت کلی از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$erf\left(u\right)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}.\sum_{n=0}^{\infty}\left[\frac{(-1)^n}{(2n+1)\,n!}\right]u^{2n+1} \qquad (۳)$$

با در نظر گرفتن سه جمله نخست سری می توان به تقریب مناسبی دست یافت. در نتیجه رابطه ساده زیر برای تابع خطا بدست می آید:

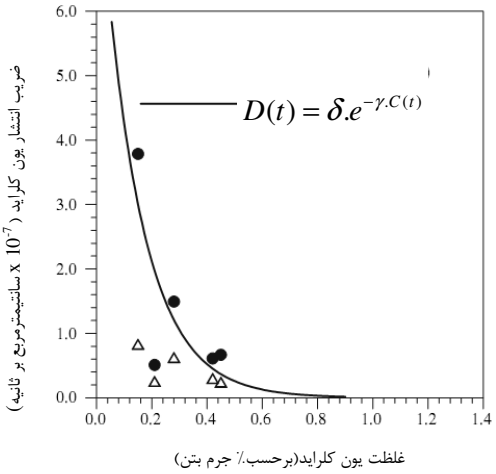
$$erf\left(u\right)\approx\frac{2}{\sqrt{\pi}}\left(u-\frac{u^3}{3}+\frac{u^5}{10}\right) \qquad (۴)$$

حال با معلوم بودن مقدار D_a غلظت یون کلراید در بتن قابل پیش بینی خواهد بود. وابستگی زمانی و مکانی ضریب انتشار یون کلراید امری است که توسط محققین به اثبات رسیده ولی معادله دقیق این وابستگی در هاله ای از ابهام قرار دارد. در این نوشتار ابتدا روابط گوناگون تجربی را در مورد نحوه وابستگی زمانی ضریب انتشار یون کلراید در بتن مورد بررسی و مقایسه قرار داده و سپس اقدام به استخراج یک رابطه تحلیلی برای محاسبه شاخص کاهش پخش بتن گردیده است. در انتها جوابهای حاصل از روشهای تجربی و جوابهای حاصل از حل رابطه تحلیلی با یکدیگر مقایسه شده اند.

۲- وابستگی زمانی ضریب انتشار

همزمان با پیشرفت فرایند هیدراسیون سیمان، ارتباط منافذ بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر شده و در نتیجه ضریب انتشار کاهش پیدا می‌کند [۹،۱۰]. رابطه مورد استفاده محققین اغلب بصورت توان منفی از t بوده است. در برخی از موارد از روابط دیگری، نظیر رابطه زیر استفاده شده است [۱۱،۱۲]:

$$D(t)=\delta.e^{-\gamma.C(t)} \qquad (۵)$$



شکل ۱- رابطه ضریب انتشار و غلظت یون کلراید[۱۱]

در رابطه اخیر، $C(t)$ غلظت یون کلراید و پارامترهای δ و γ مقادیر ثابتی می باشند که از برازش معادله با اطلاعات آزمایشگاهی بدست می آیند. نمونه ای از این منحنی ها در شکل ۱ ملاحظه می گردد.

رابطه تجربی وابستگی ضریب انتشار به زمان، معمولا بصورت زیر در نظر گرفته می شود [۱۴،۱۳]:

$$D(t)=D_{ref}\left(\frac{t}{t_{ref}}\right)^{-\alpha} \qquad (۶)$$

در رابطه اخیر، $D(t)$ ضریب انتشار تابع زمان، t زمان در معرض بودن و α شاخص کاهش پخش[۱۱] (فاکتور سن[۱۲] یا ضریب کاهش[۱۳]) است. D_{ref} ضریب انتشار در یک زمان مرجع t_{ref} (مثلا ۲۸ روزه در مرجع [۱۴،۱۳] یا ۳ ماه در مرجع[۱۵]) می‌باشد.

این رابطه بیانگر فرض تغییرات خطی ضریب انتشار برحسب زمان در مقیاس لگاریتمی است. شیب این خط مقدار α را بدست می‌دهد. α تابع عواملی چون نوع مصالح سیمانی و نسبتهای اختلاط می باشد. برخی از محققین آنرا تابع زمان نیز درنظرگرفته‌اند [۱۶،۱۷،۱۸]. مدل مذکور عمدتاً کاربرد مناسبی در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.6.8]

محیط های دریایی دارد [۲۰،۱۹]. هر چند باید توجه داشت که استفاده مستقیم از این مدل و جایگذاری $D(t)$ از معادله (۶) در معادله (۲) دارای این اشکال است که تغییرات زمانی ضریب انتشار طی مدت در معرض بودن لحاظ نمی گردد [۲۱،۲۲].

۲-۱-روابط تجربی

۱- رابطه زیر، برای محاسبه ضریب انتشار پس از یک سال در معرض بودن پیشنهاد شده است [۲۳]:

$$D_1 = 25000K_d.\exp\left(-\sqrt{\frac{10}{eqv\{\frac{w}{c_D}\}}}\right) \qquad (۷)$$

در رابطه فوق، D_1 برحسب mm^2/yr می‌باشد. نسبت آب به سیمان معادل از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$eqv\{\frac{w}{c_D}\} = \frac{W}{PC + FA + 7SF} \qquad (۸)$$

کمیتهای W، PC، FA و SF بترتیب مقادیر وزنی آب، سیمان پرتلند، خاکستر بادی و دوده سیلیسی در بتن می باشند. ضریب K_d وابسته به شرایط محیطی از جدول ۲ با توجه به شکل ۲ محاسبه می گردد.

۲- رابطه ضریب انتشار ۲۸ روزه و نسبت آب به سیمان با توجه به مراجع متعدد به فرم زیر پیشنهاد شده که در شکل ۳ ملاحظه می گردد [۲۴]:

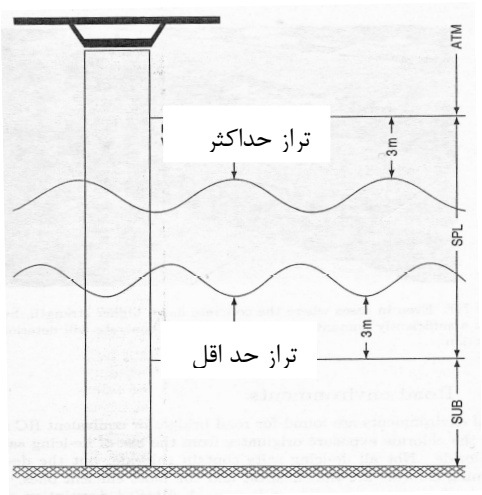
$$D_{28} = 10^{-12.06+2.4\left(\frac{w}{cm}\right)} \qquad (۹)$$

در رابطه فوق، D_{28} برحسب $m^2/\sec$ می باشد.

در صورت وجود دوده سیلیسی، تغییرضریب انتشار از رابطه زیر محاسبه می گردد [۱۷]:

$$D_{SF} = D_{PC}.e^{-m(\%SF)} \qquad (۱۰)$$

در این رابطه، D_{SF} ضریب انتشار ۲۸ روزه بتن حاوی دوده سیلیسی، D_{PC} ضریب انتشار ۲۸ روزه بتن معمولی، $\%SF$ درصد وزنی دوده سیلیسی (نسبت به وزن سیمان) و m ضریبی است که از جدول ۳ محاسبه می شود. اثر دوده سیلیسی و کاهش نسبت آب به سیمان در کاهش ضریب انتشار قبلا نیز توسط محققین مورد تایید قرار گرفته بود [۲۵،۲۴].



جدول ۲- شرایط محیطی مورد استفاده رابطه (۷)[۲۳]

شرایط محیطی	توصیف	ضریب K_d پیشنهادی
بتن در معرض آب و هوای دریایی(ATM)	با توجه به محل بتن	۰/۴
بتن در معرض تراوش آب دریا(SPL)	نسبت به سطح مواج	۰/۶
بتن غوطه ور در آب دریا(SUB)	آب دریا. به شکل ۲ مراجعه شود.	۱

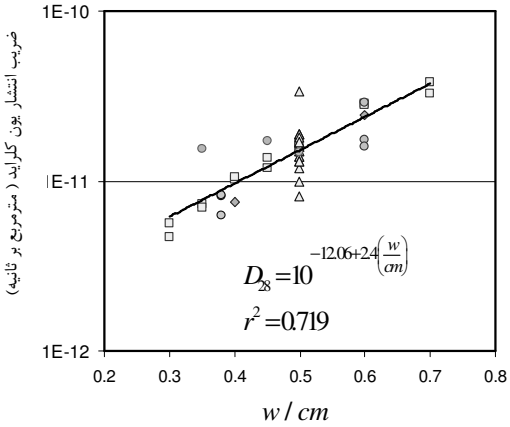
در برخی موارد، حداکثر مقدار $\%SF$ در رابطه فوق ۱۵ (با مقدار $m = 0.165$) منظور شده است [۲۶]. هر چند شکرچی و همکاران [۱۵] با استفاده از یافته‌های خود که نمونه آن در شکل ۴ آمده است، مقدار بهینه ۷/۵٪ را پیشنهاد می‌کنند. (خطوط از بالا به پایین بترتیب معرف ۳ ، ۹ و ۳۶ ماه)

در رابطه با تاثیر شرایط محیطی رابطه زیر پیشنهاد شده است:

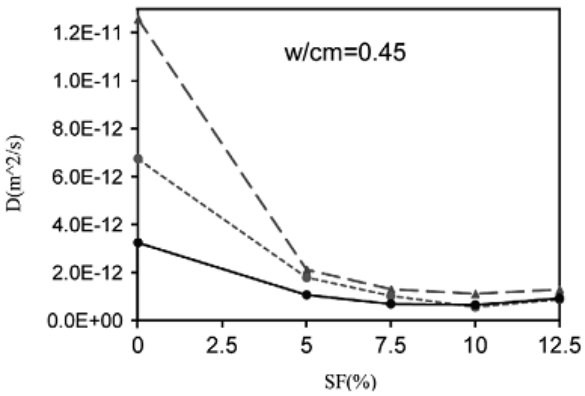
$$D_{curing} = k_{curing} D_0 \qquad (۱۱)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.6.8]

D_0 ضریب انتشار شرایط نگهداری استاندارد، D_{curing} ضریب انتشار نمونه در شرایط نگهداری و k_{curing} ضریبی برابر یا بزرگتر از واحد(حداکثر ۷) می باشد [۲۷].



شکل ۳- رابطه ضریب انتشار ۲۸ روزه و نسبت آب به سیمان[۲٤]



شکل ٤- نمونه تغییرات ضریب انتشار برای درصدهای مختلف دوده سیلیسی[۱۵]

۳- مانگات وملوی [۱۳] آزمایشات متعددی بر روی نمونه های بتن معمولی ، بتن حاوی خاکستر بادی و بتن حاوی دوده سیلیسی با مشخصات داده شده جدول ۴ انجام دادند که نتایج آن در جدول ۵ و شکل ۵ آمده است. آنها رابطه خطی بصورت زیر را پیشنهاد نمودندکه مقدار حاصله می تواند در رابطه کلی وابستگی ضریب انتشار به زمان(رابطه ۶) قرار گیرد:

$$D(t) = D_{ref}\left(\frac{t}{t_{ref}}\right)^{-\alpha} \qquad \text{(۶-تکراری)}$$

جدول ۳- ضرایب m [۱۷]

نسبت $\frac{w}{cm}$	زمان در معرض بودن (برحسب ماه)		
	۳۶	۹	۳
۰/۳۵	۰/۰۶۱	۰/۱۳۳	۰/۱۹۷
۰/۴	۰/۰۴۴	۰/۱۲۹	۰/۳۳۹
۰/۴۵	۰/۱۷۵	۰/۲۴۴	۰/۳۱
۰/۵	۰/۰۸۱	۰/۱۶۹	۰/۱۳۸

$$\alpha = 2.5\left(\frac{w}{c}\right) - 0.6 \qquad (۱۲)$$

۴- بامفورت [۱۹] با توجه به اطلاعات بدست آمده از بیش از ۳۰ منبع (عمدتا مطالعات دریایی) نمودارهای ضریب انتشار برحسب زمان را رسم نمود که نمونه‌ای از آنها در شکل ۶ آمده است. او با توجه به شیب خط‌ها، جدول ۶ را پیشنهاد کرده است. هر چند، ظاهراً عمده مطالعات وی در بتنهای حاوی افزودنی مشتمل بر مقادیر بالای خاکستر بادی (حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد) و سرباره (حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد) بوده است. بنابراین، استفاده از رابطه زیر مناسبتر می‌باشد که مقدار حاصله می‌تواند در رابطه کلی وابستگی ضریب انتشار به زمان (رابطه ۶) قرار گیرد [۲۶]:

$$\alpha = 0.2 + 0.4\left(\frac{\%FA}{50} + \frac{\%SG}{70}\right) \qquad (۱۳)$$

در رابطه فوق، $\%FA$ و $\%SG$ بترتیب درصدهای وزنی خاکستر بادی و سرباره (نسبت به وزن سیمان) در مخلوط بتن می‌باشند. توجه شود که اثر دوده سیلیسی بر مقدار α در نظر گرفته نمی‌شود. رابطه خطی α و میزان افزودنی معدنی توسط برخی محققین دیگر نیز پیشنهاد شده است [۲۸].

۵- فردریکسن و همکاران [۲۹] رابطه زیر را برای فاکتور سن بتن پیشنهاد نموده‌اند:

$$\alpha = K_\alpha\left(1 - 1.5\,eqv\{\frac{w}{c_D}\}\right) \qquad (۱۴)$$

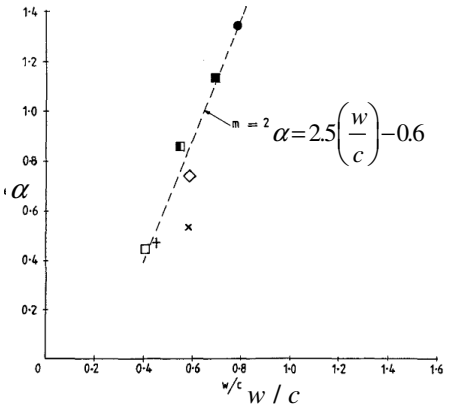
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.6.8]

جدول ٤- جزئیات مخلوطها[۱۳]

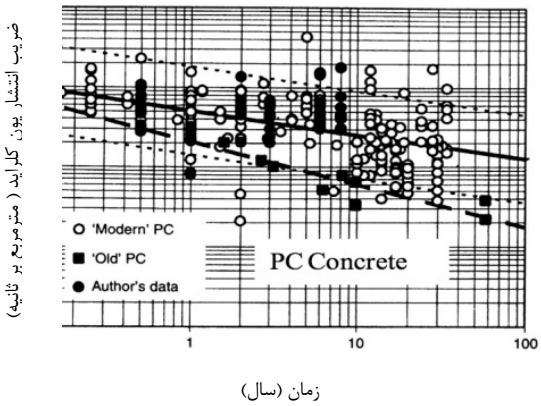
مخلوط	نسبت های وزنی				
	جایگزین سیمان	ریز دانه	درشت دانه	$\frac{w}{c}$	مقدار سیمان
A	--	۱/۵	۰/۸۶	۰/۴۰	۵۹۰
B	PFA ۰/۲۶	۱/۵۱	۰/۸۴	۰/۴۰	۵۹۰
D1	--	۲/۵	۱/۲	۰/۵۸	۴۳۰
D2	--	۲/۷۳	۱/۳۱	۰/۴۵	۴۳۰
D5	--	۱/۶۷	۰/۸۰	۰/۵۸	۵۳۰
D8	PFA ۰/۲۵	۲/۴۳	۱/۲۰	۰/۵۸	۴۳۰
D11	GBFS ۰/۶۰	۲/۴۶	۱/۲۰	۰/۵۸	۴۳۰
D14	MS ۰/۱۵	۲/۴۹	۱/۲۰	۰/۵۸	۴۳۰

جدول ٥- مقادیر D_1 و α برای مخلوطهای گوناگون [۱۳]

مخلوط	نسبت آب به سیمان	D_1 $(cm^2/\sec)$	α
A	۰/۴	۰/۰۰۰۰۷۰۸	۰/۴۴
B	۰/۵۴	۰/۰۷۹۶	۰/۸۶
D1	۰/۵۸	۰/۰۰۱۲۱	۰/۵۳
D2	۰/۴۵	۰/۰۰۰۱۹۶	۰/۴۷
D5	۰/۵۸	۰/۰۲۶۷	۰/۷۴
D8	۰/۷۷	۳۰۳/۷	۱/۳۴
D11	۰/۴۵	۸۵/۹	۱/۲۳
D14	۰/۶۸	۱۰/۱	۱/۱۳



شکل ٥- رابطه α و نسبت $\frac{w}{c}$ مخلوطهای مختلف [۱۳]



شکل ٦- نمودارهای ضریب انتشار برحسب زمان[۱۹]

جدول ٦- ضرایب پیشنهادی α [۱۹]

نوع بتن	ضریب α پیشنهادی
بتن با سیمان پرتلند معمولی	۰/۲۶۴
بتن حاوی خاکستر بادی	۰/۷
بتن حاوی سرباره	۰/۶۲

ضریب K_α وابسته به شرایط محیطی از جدول ۷ محاسبه می‌گردد. محاسبه $eqv\{w/c_D\}$ نیز از رابطه (۸) صورت می‌گیرد.

جدول ۷- ضرایب K_α پیشنهادی [۲۹]

شرایط محیطی	علامت اختصاری	ضریب K_α پیشنهادی
بتن در معرض آب و هوای دریایی	ATM	۱
بتن در معرض تراوش آب دریا	SPL	۰/۱
بتن غوطه ور در آب دریا	SUB	۰/۶

۲-۲- روش تحلیلی پیشنهادی

۱- اگر ضریب انتشار (لحظه ای) در یک زمان معین بازدید t_{in} دارای مقدار معین $D(t_{in})$ باشد، با توجه به رابطه (۶) و زمان مرجع $t_{ref}=t_1=1$ سال می توان نوشت:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.6.8]

(۱۵)

$$D(t) = D_1(\frac{t}{t_1})^{-\alpha} \Rightarrow D(t_{in}) = D_1(\frac{t_{in}}{t_1})^{-\alpha}$$

ضریب انتشار اندازه گیری شده در حقیقت متوسط ضرایب انتشار در طول مدت زمان گذشته (ضرایب انتشار ظاهری D_{ain}) است [۲۲]. اگر با تقریب این دو برابر گرفته شوند: ($D(t_{in}) = D_{ain}$)

$$D_{ain} = D_1(\frac{t_{in}}{t_1})^{-\alpha} \qquad (۱۶)$$

فاکتور سن بتن از حل این معادله برحسب α محاسبه می شود:

$$\alpha = Ln\left(\frac{D_1}{D_{ain}}\right) / Ln\left(\frac{t_{in}}{t_1}\right) \qquad (۱۷)$$

۲- درصورتی که سن بتن در آغاز در معرض بودن را با t_{ex} نمایش دهیم، ضریب انتشار ظاهری را می توان بصورت یک رابطه میانگین تعریف کرد [۲۱]. بنابراین:

$$D_{ain} = \frac{\int_{t_{ex}}^{t_{ex}+t_{in}} D(t)\,dt}{\int_{t_{ex}}^{t_{ex}+t_{in}} dt} = \frac{\int_{t_{ex}}^{t_{ex}+t_{in}} D(t)\,dt}{t_{in}} \qquad (۱۸)$$

با جایگذاری قسمت اول رابطه (۱۵) نتیجه می شود:

$$D_{ain} = \frac{1}{t_{in}}\int_{t_{ex}}^{t_{ex}+t_{in}} D_1(\frac{t}{t_1})^{-\alpha}\,dt$$

از حل انتگرال معین نتیجه خواهیم داشت:

$$\alpha = 1 \Rightarrow D_{ain} = \frac{D_1 t_1}{t_{in}} Ln\left(1+\frac{t_{in}}{t_{ex}}\right)$$

$$\alpha \neq 1 \Rightarrow D_{ain} = \frac{D_1 t_1^{\alpha}}{t_{in}}\left[\frac{t^{1-\alpha}}{1-\alpha}\right]_{t_{ex}}^{t_{ex}+t_{in}}$$

$$D_{ain} = \frac{D_1 t_1^{\alpha}}{t_{in}(1-\alpha)}\left[\left(t_{ex}+t_{in}\right)^{1-\alpha} - t_{ex}^{1-\alpha}\right] \qquad (۱۹)$$

یکی از نتایج رابطه اخیر، امکان پذیر بودن مقادیر $\alpha > 1$ است، زیرا در این صورت $\left(t_{ex}+t_{in}\right)^{1-\alpha} < t_{ex}^{1-\alpha}$ و با توجه به منفی بودن مخرج کسر، طرف چپ تساوی مثبت خواهد بود. محتمل بودن مقادیر $\alpha > 1$ توسط برخی محققین مورد اشاره قرار گرفته است [۱۸]. قبلا مقادیر بسیار کوچک(در حدود ۰/۰۶ در بتن معمولی) نیز بعضا توسط محققین گزارش شده است [۲۱].

پس از ضرب و تقسیم عبارت $t_{in}^{1-\alpha}$ خواهیم داشت:

$$D_{ain} = \frac{D_1 t_1^{\alpha}}{\cancel{t_{in}}(1-\alpha)}\cancel{t_{in}^{1-\alpha}}\left[\frac{\left(t_{ex}+t_{in}\right)^{1-\alpha} - t_{ex}^{1-\alpha}}{t_{in}^{1-\alpha}}\right]$$

$$\Rightarrow D_{ain} = \frac{D_1 t_1^{\alpha}}{t_{in}^{\alpha}(1-\alpha)}\left[\left(\frac{t_{ex}+t_{in}}{t_{in}}\right)^{1-\alpha} - \left(\frac{t_{ex}}{t_{in}}\right)^{1-\alpha}\right]$$

$$D_{ain} = \frac{D_1}{1-\alpha}\left(\frac{t_1}{t_{in}}\right)^{\alpha}\left[\left(1+\frac{t_{ex}}{t_{in}}\right)^{1-\alpha} - \left(\frac{t_{ex}}{t_{in}}\right)^{1-\alpha}\right]$$

با ضرب عبارت $\left(t_1 / t_{in}\right)^{\alpha}$ می توان تعداد جملات حاوی α را به سه جمله کاهش داد. نهایتا معادله زیر حاصل می شود:

$$\frac{D_{ain}}{D_1}(1-\alpha) - [\left(1+\frac{t_{ex}}{t_{in}}\right)\left(\frac{t_1}{t_{in}+t_{ex}}\right)^{\alpha} - \left(\frac{t_{ex}}{t_{in}}\right)\left(\frac{t_1}{t_{ex}}\right)^{\alpha}] = 0 \qquad (۲۰)$$

از حل معادله اخیر می توان α را محاسبه نمود. برای این منظور از نرم افزار EXCEL و افزونه[۱۴] ریاضی SOLVER استفاده گردیده است. نمودار شکلهای ۷ تا ۹ ، مقادیر محاسبه شده α به ازای سه مقدار نمونه ای کم(۰/۲)، متوسط(۰/۵)و زیاد(۰/۸) برای نسبت D_{ain} / D_1 را نشان می دهد. در هر یک از نمودارها دو منحنی و یک خط مستقیم وجود دارد: منحنی دقیق

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.6.8]

شامل مقادیر محاسبه شده از حل معادله (۱۸)، منحنی تقریبی شامل مقادیر محاسبه شده از معادله (۱۵) و خط مستقیم از مقادیر محاسبه شده رابطه تجربی (۱۲) به ازای نسبت آب به سیمان معادل $eqv\{w/c_D\}$ برابر ۰/۵ ، ۰/۲ و ۰/۶ وشرایط محیطی بتن غوطه ور در آب دریا. شکل ۱۰ ارتباط نمودارها را نشان می دهد.

در شکلهای ۱۱ تا ۱۴، پروفیل یون کلراید پس از ۵، ۱۰ و۵۰ سال در معرض بودن از روابط (۲)، (۴)، (۶) و (۷) رسم گردیده است. برای α چهار مقدار(۰/۱، ۰/۳ ، ۰/۴۵ و ۰/۶۵) در نظر گرفته شده است. غلظتهای سطحی و اولیه یون کلراید نیز بترتیب ۲٪ (نسبت به وزن سیمان) و صفر فرض می شوند.

۳- نتیجه گیری

۱- تابع کاهش ضریب انتشار بتن بصورت نزولی و عموماً به فرم ضریبی از $t^{-\alpha}$ منظور می‌گردد که در آن α یک فاکتور مهم بوده و شاخص کاهش پخش بتن خوانده می‌شود. از لحاظ تئوری می تواند هر مقدار مثبتی باشد. ($\alpha > 0$) در برخی از موارد، مقادیر نزدیک صفر(مثلا ۰/۰۶ مرجع [۲۱]) در بتن معمولی و مقادیر بزرگتر از واحد (مثلا ۱/۳۴ مرجع [۱۳]) در بتن حاوی ۲۵٪ خاکستر بادی مشاهده گردیده است. محققین [۱۳] روابط مجزایی برای بتن ساده و بتن با افزودنیهای معدنی در نظر نگرفتند. با این حال از مقادیر محاسبه شده چنین بر می‌آید که شاخص کاهش پخش در بتن ساده کمتر و در محدوده $0.44 \le \alpha \le 0.74$ است، درصورتی که برای بتن با افزودنیهای معدنی $0.86 \le \alpha \le 1.34$ می باشد.

۲-همانطور که در مرجع[۵] اشاره شده است، استفاده از شاخص کاهش پخش مناسب برای محاسبه ضریب انتشار عامل مهمی در پیش بینی صحیح میزان نفوذ یون کلراید در بتن خواهد بود که تابع عواملی چون نوع مصالح سیمانی و نسبتهای اختلاط می باشد.

۳-وجود افزودنیهای معدنی (مانند خاکستر بادی و سرباره) سبب افزایش α می شود. نحوه این افزایش در معادله (۱۳) ملاحظه می گردد. در مورد دوده سیلیسی، شکرچی و همکاران [۱۵]، مقدار بهینه ۷/۵٪ را پیشنهاد می کنند.

اثر دوده سیلیسی وکاهش نسبت آب به سیمان در کاهش ضریب انتشار، توسط رمضانیانپور و همکاران [۲۴] و قالیبافیان و همکاران [۲۵] نیز مورد تایید قرار گرفته است.

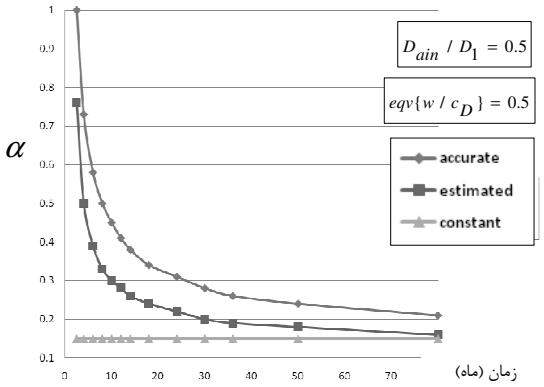
۴-افزایش نسبت آب به مواد سیمانی سبب افزایش α می گردد. (رابطه ۱۲)

۵- در صورتی که احتمال کاهش هیدراسیون بدلیل کاهش رطوبت موجود نباشد،مقادیر بالاتری برای α مورد انتظار می باشد.

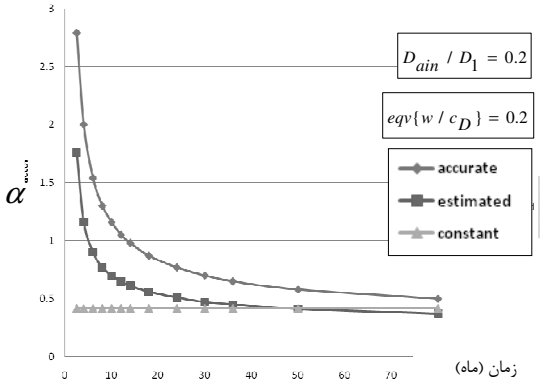
۶- مقادیر محاسبه شده α از روابط ریاضی در شکلهای ۷ تا ۹ آورده شده اند. دیده می شود که با افزایش زمان، عموما جوابها به جواب دقیق نزدیکتر می شوند. ضمنا برای نسبتهای بالای D_{ain} / D_1 ، برای استفاده از رابطه تجربی بایذ $eqv\{w/c_D\}$ مقدار بزرگتری باشد. طبق بررسی انجام شده که نتیجه آن در شکل۱۰ آمده است. رابطه $eqv\{w/c_D\}$ لازم برای استفاده از رابطه تجربی و نسبت D_{ain} / D_1 بصورت یک خط مستقیم است که با توجه به رابطه مستقیم ضریب انتشار و نسبت آب به سیمان منطقی می باشد.

۷- چند نمونه از پروفیلهای یون کلر در شکلهای ۱۱ تا ۱۴ آورده شده اند. ملاحظه می شود که با افزایش α، منحنی ها بطرف چپ حرکت می کنند و در نتیجه یون کلر تا عمق کمتری نفوذ می کند. ضمنا منحنی ها به یکدیگر نزدیک می شوند، در نتیجه پس از گذشت مدت نسبتا کمی از نفوذ یون کلر، غلظت آن در فواصل مختلف از سطح بتن به میزان تقریبا ثابتی می رسد و با افزایش زمان تغییر محسوسی نخواهد داشت.

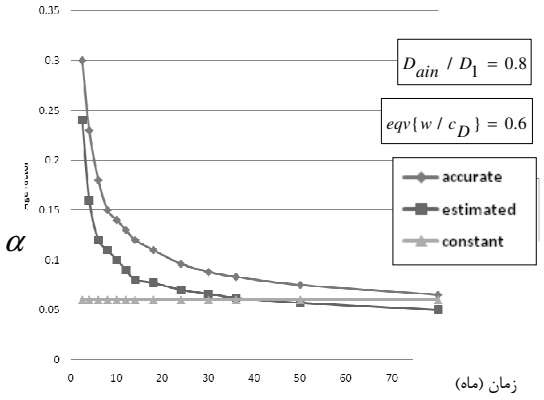
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.6.8]



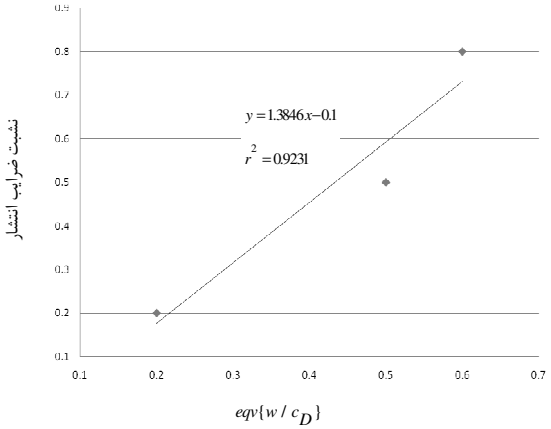
شکل ۷- مقایسه نمودارهای مقادیر محاسبه شده α



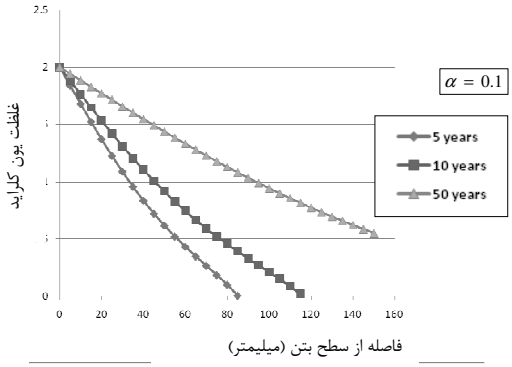
شکل ۸- مقایسه نمودارهای مقادیر محاسبه شده α



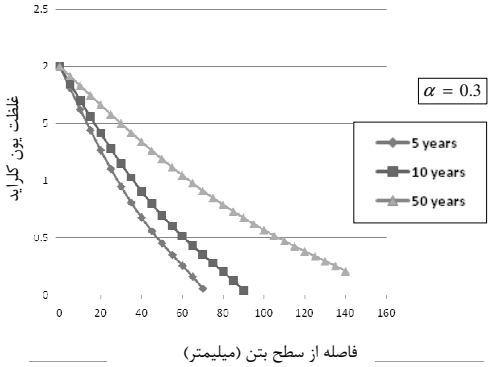
شکل ۹- مقایسه نمودارهای مقادیر محاسبه شده α



شکل ۱۰- رابطه $eqv\{w / c_D\}$ لازم برای استفاده از رابطه تجربی و نسبت D_{ain} / D_1

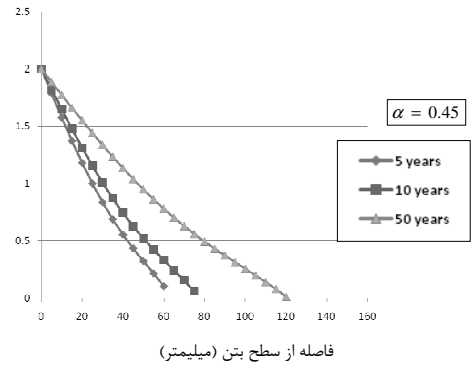


شکل ۱۱- پروفیل کلر پس از ۵ ، ۱۰ و ۵۰ سال در معرض بودن ($\alpha = 0.1$)

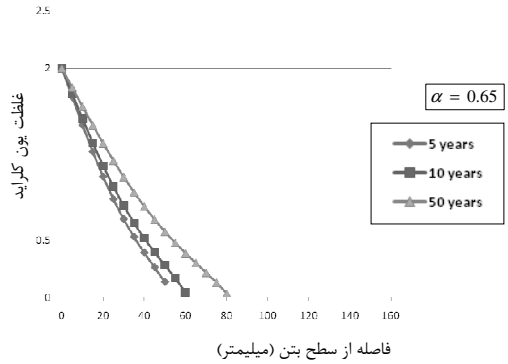


شکل ۱۲- پروفیل کلر پس از ۵ ، ۱۰ و ۵۰ سال در معرض بودن ($\alpha = 0.3$)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.6.8]



شکل ۱۳- پروفیل کلر پس از ۵ ، ۱۰ و۵۰ سال در معرض بودن(α = 0.45)



شکل ۱٤- پروفیل کلر پس از ۵ ، ۱۰ و۵۰ سال در معرض بودن(α = 0.65)

غلظت یون کلراید

کلید واژگان

1-Diffusion
2-Convection
3-Capillary absorption
4-Electrical migration
5-Age factor
6-Chloride binding
7-Fick's second law
8-Crank's Solution
9-Apparent (or Achieved) diffusion coefficient
10-Error function
11-Diffusion decay index
12-Age factor or parameter
13-Reduction coefficient
14-Add-in (Data menu > Analysis)

۴- مراجع

۱- آزادی، یوسف، بررسی و مقایسه روشهای تعیین ضریب انتشار یون کلرید در بتن، سمینار کارشناسی ارشد، با راهنمایی دکتر پرویز قدوسی، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۰.

2-Tamimi, A. K. et al. (2008), Prediction of long term chloride diffusion of concrete in harsh environment. Construction and Building Materials, Volume 22, p. 829-836.

3-Zhang, J. and Lounis, Z., (2009), Nonlinear relationships between parameters of simplified diffusion-based model for service life design of concrete structures exposed to chlorides. Cement and Concrete Composites, Volume 31, Issue 8, p. 591-600.

4-Samson, E. and Marchand, J. (2008), Modeling the transport of ions in unsaturated cement-based materials. Comput Struct;85:p. 1740–56.

5-Nilsson, L. O. (2006), Present limitations of models for predicting chloride ingress into reinforced concrete structures, J Phys IV France;136:p. 123–30.

6-Tang, L., (2008), Engineering expression of the ClinConc model for prediction of free and total chloride ingress in submerged marine concrete,Cement and Concrete Research, Volume 38, Issues 8-9,p. 1092-1097.

7-Andrade, C. et al. (2006), Comparison of chloride models: the importance of surface condition. Second international symposium on advances in concrete through science and engineering, Quebec City, Canada.

8-Diaz, B. and Novoa, X. R. and Perez, M. C., (2006), Study of the chloride diffusion in mortar: a new based on impedance measurements.Cement Concr Comp 28, p. 237–45.

9-Thomas, M. D. A. and Bentz, E. (2000), Life-365 manual,released with program by Master Builders.

10-Shim, H. S., (2002), Corner effect on chloride ion diffusion in rectangular concrete media. KSCE j. Civil Eng. 6 p. 19-24.

11-Sun, Y. et al. (2008), Kirchhoff transformation analysis for determining time/depth dependent chloride diffusion coefficient in concrete, Journal of Materials Science,Volume 43, Number 4, p. 1429-1437.

12-Tumidajski, P. J. et al. (1996), A Boltzmann-Matano analysis of chloride

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.6.8]

diffusion. Cement and Concrete Research, Volume 26, Issue 5, p. 813-816.
13-Mangat, P. S. and Molloy, B. T.. (1994), Prediction of long term chloride concentrations in concrete. Materials and Structures, Vol. 27, p. 338-346.
14-Mangat P. S. and Limbachiya, M. C. (1999), Effect of initial curing on chloride diffusion in concrete repair materials. Cement Concr Res;29:p. 1475–85.
15-Shekarchi, M. and Rafiee, A. and Layssi, H., (2009), Long -term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates. Cement and Concrete Composites , Vol. 31, Issue 10,p. 769-775.
16-Bentz, E. (2003), Probabilistic modeling of service life for structures subjected to chlorides. ACI Mater;100(5):p. 391-7
17-Nokken, M. and Boddy, A. and Hooton, R. D., (2006), Time dependent diffusion in concrete -three laboratory studies. Cement Concrete Research 36(1), p. 200–220.
18-Stanish, K. and Thomas, M. (2003), The use of bulk diffusion tests to establish time=dependent concrete chloride diffusion coefficients. Cement and Concrete Research,33. p. 55-62.
19-Bamforth, P. B. (1999), The derivation of input data for modelling chloride ingress from eight-year U. K. coastal exposure trials. Magazine of Concrete Research, Vol. 51, No. 2, p. 87-96.
20-Kassir, M. K. and Ghosn, M. (2002), Chloride-induced corrosion of reinforced concrete bridge decks,Cement Concrete Research 32,p. 139-143.
21-Seung-Woo Pack, et al. (2010), Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment, Cement and Concrete Research, Volume 40, Issue 2, p. 302-312.
22-Tang, l.. and Gulikers, J. (2007), On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete, Cement Concrete Research 37,pp. 589-595. .
23-Frederiksen et al. (2000), The HETEK model of Chloride Ingress into Concrete made simpler by approximations. International RILEM Workshop on . Testing and Modeling Chloride Imgress into Concrete,Paris,France.
24-Ghods, P. and Chini, R. and Alizadeh, R. and Hosseini, M. and Shekarchi, M. and Ramazanianpour, A. A., (2005), The effect of different exposure conditions on the chloride diffusion into concrete in the Persian Gulf region. 3th International Conference on Construction Material, ConMat"05, Vancouver, Canada.
25-Ghalibafian, M. and Zare, A. and Shekarchizadeh, M. and Tadayon, M., (2003), Chloride Penetration Testing of Silica Fume Concretes under Persian Gulf Conditions, 6th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Thessaloniki, Greece.
26-Life-365 Manual, (2009), Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides,Version 2. 0. 1, Produced by the Life-365 Consortium II.
27-Alizadeh, R. and Ghods, P. and Chini, M. and Hoseini, M. and Ghalibafian, M, and Shekarchi, M.. (2008), Effect of curing conditions on the service life design of RC structure in the Persian Gulf region. J. Mater. Civil. Eng;20(1):p. 2–8.
28-Chalee,W. and Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P., (2009), Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater,Marine Structures, Vol. 22, Issue 3, p. 341-353.
29-Frederiksen, J. M. and Sorensen, H. E. And Andersen, A. and Klinghoffer, O., (1997), HETEK, The Effect of the w/c ratio on Chloride Transport into Concrete Immersion, Migration and Resistivity Tests, Report No. 54.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.14.6.8]