

بررسی تأثیر تهاجم یون کلراید بر ستون‌های سازه‌های بتن آرمه، تحت خرابی پیش‌رونده (کد 40D)

زهرا محمدی¹، حمیدرضا اشرفی²

1. دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش سازه دانشگاه رازی کرمانشاه
2. استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه رازی کرمانشاه

1. Email: za_mohammadi_ce@yahoo.com

چکیده

ساختمان‌ها در طول عمر خود ممکن است در برابر تهدیدات طبیعی و با انسان ساز قرار بگیرند، و به صورت ناگهانی المان‌های مختلف سازه به ویژه ستون‌ها، به صورت ناگهانی حذف و این ستون‌ها توانایی باربری خود را از دست دهند. در نتیجه می‌باید، مکانیسم خرابی پیش‌رونده ایجاد شده در سازه، پیشگیری گردد. خرابی‌های بتن آرمه را می‌توان از دیدگاه‌های مختلف، از جمله عوامل ایجاد کننده آنها مانند انفجار، ضربه، زلزله، آتش‌سوزی و خوردگی و غیره، تقسیم‌بندی کرد. علی‌رغم آنکه بتن و بتن آرمه، در مقایسه با فولاد، از دوام بسیار زیادتری برخوردار است، ولی در محیط‌های مهاجم، نظیر سواحل و بنادر، به ویژه سواحل و جزایر خلیج فارس و دریای عمان، به شدت در معرض آسیب قرار می‌گیرند و عمر مفید خدمت‌دهی آن‌ها بسیار کاهش می‌یابد. یکی از عمده‌ترین خوردگی‌ها در سازه‌های بتن آرمه، خوردگی آرماتور در بتن بر اثر نفوذ یون کلراید است. در این مقاله، به بررسی و تحلیل آزمایشگاهی خرابی پیش‌رونده سازه‌های بتن آرمه تحت تهاجم یون کلراید در محیط‌های شبیه سازی شده خلیج فارس و دریای عمان پرداخته شده است و در آزمایش‌های انجام شده اثر نسبت‌های مختلف آب به سیمان و همچنین اثر استفاده از دوده سیلیس مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: خرابی پیش‌رونده، سازه‌های بتن آرمه، عمر مفید خدمت‌دهی، یون‌های کلراید.

Investigation of Chloride Ions Attack on Progressive Collapse of Reinforced Concrete Structures' Columns (Code 40D)

Z. Mohammadi¹ , H. Ashrafi²

1. Master student of structural engineering, Razi University of Kermanshah
2. Assistant Professor, Faculty of Engineering, Razi University of Kermanshah

Abstract

Building in its lifetime may be human and natural threats and suddenly structural elements to the special column for this column suddenly removed your ability to lose load. Mechanism must be created as a result of the progressive collapse of the structure must be prevented. Reinforced Concrete failures of other causes such as injury, including explosion, strike, earthquake, fire and corrosion, Etc divided. Despite that in comparison with steel, reinforced concrete and concrete has more durability, but it subjects to damage in aggressive environment, such as beaches, ports, and marine environments, particularly Persian Gulf and Oman Sea islands, and decreases its service lifetime. One of the most usual corrosions in reinforced concrete structures is reinforcement corrosion because of chloride ions diffusion. In this paper, explores laboratory analysis of the progressive collapse of RC structures under simulated environments chloride ion invasion of the Persian Gulf, Oman Sea. The effect of different water- cement ratios and tests, as well as the use of silica fume is studied.

Keywords: Progressive collapse, Reinforced concrete structures, Service lifetime, Chloride ions.

1. مقدمه

در طول تاریخ مهندسی، مهندسان عمران هرگاه که خواسته‌اند سازه‌ی باربری را طراحی کنند، از یک مفهوم ایمنی استفاده کرده‌اند. کشف منابع عظیم نفت و گاز در مناطق ساحلی جنوب کشورمان، ضرورت ساخت و ساز و انجام پروژه‌های بزرگ عمرانی نظیر ساخت پالایشگاه‌ها، تأسیسات پتروشیمی، اسکله‌ها و نیز پیشروی در دریا را ایجاب می‌کند. خلیج بودن و وضعیت خاص جوی، شرایط را برای فعالیت‌های یون‌های خورنده و در نتیجه کاهش عمر مفید سازه‌های بتنی در این منطقه ایجاد کرده است. بتن همانند سایر مصالح ساختمانی دارای عمر مفید خدمت‌دهی معینی است. آسیب‌دیدگی ناشی از عوامل گوناگون مانند خوردگی، هوازدگی، سایش و فرسایش می‌تواند تأثیر بسیار زیادی بر عمر مفید خدمت‌دهی بتن داشته باشد. با شناخت این آسیب‌ها (شامل آسیب‌های داخلی و ساختاری، آسیب‌های خارجی و محیطی) می‌توان از بروز مشکلات جلوگیری کرد و یا باعث به تأخیر انداختن خسارات شد. عمر مفید خدمت‌دهی مترادف با دوام در نظر گرفته می‌شود، که در مهندسی دوام منظور از عمر مفید خدمت‌دهی، عمر مفید خدمت‌دهی فنی می‌باشد [1]. نفوذپذیری از جمله مهم‌ترین پارامترهای بتن از نظر دوام، و نهایتاً عامل مهم در خوردگی میلگردهای موجود در بتن آرمه است. در شرایطی که میزان نفوذپذیری کم باشد، آب نمی‌تواند به راحتی به داخل بتن نفوذ کند و چنین بتنی احتمالاً مقاومت الکتریکی بیشتری نیز دارد، که می‌تواند در مقابل جذب نمک‌ها و تأثیر آنها بر میلگردها مقاومت کند، و همچنین مانع نفوذ اکسیژن به داخل بتن شود. در گذشته علی‌رغم ناشناخته بودن مکانیزم انتقال یون کلراید به داخل بتن، مطالعات و آزمایش‌های متعددی در مورد سازه‌های در معرض یون کلراید انجام شده است، که از آن جمله می‌توان به گزارش‌های آتوود و جانسون در سال 1924 و فلد در سال 1968 اشاره کرد و این مطالعات تا امروزه نیز ادامه داشته است. [2]

به طور واقع بینانه، محیط تحت تهاجم یون کلراید، به صورت تصادفی می‌باشد و عوامل مختلفی، مانند: دما، رطوبت، درجه هیدراسیون، نسبت آب به سیمان، میزان اسیدی بودن بتن و . . . باعث جذب و نفوذ یون کلراید به داخل بتن می‌شود. یون کلراید در واقع اثر منفی و بدی بر روی بتن ساده ندارد و حتی به دلیل ترکیب کلراید با C_3A موجود در بتن، نمک نسبتاً پایدار فریدل (کلرو آمینات کلسیم) تشکیل می‌شود که باعث افزایش تراکم بتن و ریزتر شدن منافذ آن می‌شود. اثر منفی کلراید هنگامی ظاهر می‌شود که بتن با فولاد، مسلح شده باشد، با تهاجم یون کلراید به داخل بتن آرمه، میلگردهای فولادی موجود در آن دچار پدیده زنگ‌زدگی می‌شوند و در صورتی که زنگ‌زدگی افزایش حجم دهد، منجر به خوردگی میلگردها که نهایتاً با کاهش مقطع میلگردها، تضعیف مقطع سازه‌ای را خواهیم داشت. [3]

ورود کلراید به داخل بتن بر اثر مجاورت آن با آب دریا، نمک‌های یخ‌زدا و نظایر آن، تحت اثر دو مکانیسم جذب و انتشار، اتفاق می‌افتد. جذب آب، ناشی از واکنش هیدراسیون و خشک شدن بتن می‌باشد زیرا این امر باعث پایین آمدن فشار آب داخل بتن می‌شود و آب به داخل بتن نفوذ پیدا می‌کند. در قسمت‌هایی از سازه‌های دریایی که در معرض جزر و مد متوالی و یا ترشح آب دریا قرار دارند، روند متوالی جذب آب و خشک شدن آن، موجب رسوب املاح آب در بتن شده و افزایش غلظت یون کلراید را شامل می‌شود [3].

2. مکانیزم خرابی پیش‌رونده

مکانیزم خرابی پیش‌رونده، مستقیماً با حذف یک یا چند ستون صورت می‌گیرد. در خرابی ستون، تحت تهاجم یون کلراید، احتمال وقوع حذف چند ستون معمولاً بیشتر از حذف یک ستون می‌باشد [3]. اختلال اولیه همراه با از دست دادن عضو است و باعث ایجاد تعادل بین بارهای خارجی و نیروهای داخلی می‌شود و سازه به یک وضعیت تعادلی جدید می‌رسد و یا اینکه ساختمان دچار خرابی خواهد شد [4].

3. مراحل خرابی میلگردهای موجود در بتن، بر اثر نفوذ یون کلراید

برای انجام فعل و انفعالات خوردگی فولاد حتماً باید سه عامل آهن، اکسیژن، و الکترولیت آب حضور داشته باشند. خوردگی فولاد (میلگردها) در بتن، یک فرآیند الکتروشیمیایی است. پتانسیل الکتروشیمیایی ای که تشکیل پیل خوردگی می‌دهد، به علت تفاوت تمرکز یون‌های حل شده در نزدیکی فولاد، نظیر یون‌های کلیایی، کلرایدها و اکسیژن به وجود می‌آید. در نتیجه قسمتی از فلز، آند و قسمتی دیگر کاتد که منجر به زنگ زدن آهن و خوردگی آن خواهد شد [6]. تبدیل آهن به زنگ همراه با افزایش حجم می‌باشد، که این افزایش حجم علت اصلی انبساط است، که تنش‌های ایجاد شده در اثر انبساط، باعث ایجاد ترک‌هایی در بتن می‌شود. به مرور زمان با ورود یون کلراید به داخل بتن از طریق ترک‌های ایجاد شده و رسیدن یون کلراید به آرماتورهای فولادی، میزان غلظت کلراید جهت ایجاد خوردگی در فولاد افزایش می‌یابد. با ادامه فرآیند خوردگی، بتن پوشش میلگرد در اثر فشار انبساطی ناشی از این افزایش حجم، خراب شده و این خود عامل ورود هرچه بیشتر یون کلراید و افزایش سرعت خوردگی خواهد شد. و این افزایش ترک در بتن تا جایی ادامه پیدا می‌کند که منجر به فروپاشی و پکیدگی ستون و نهایتاً عامل خرابی سازه خواهد شد [5]. از جمله عوامل مختلفی مانند: نفوذپذیری، فساد مصالح به کار رفته در بتن، آب مصرفی، کیفیت و نوع سنگدانه‌ها بر خوردگی فولاد مؤثر می‌باشد و یکی از عواملی که نقش بسزایی در خوردگی فولاد موجود در بتن دارد، بحث نفوذپذیری است. که در این مقاله به آن پرداخته خواهد شد.

4. مصالح مصرفی و طرح اختلاط در آزمایش‌ها

سیمان و ماده مکمل جایگزین سیمان عبارتند از: الف) سیمان نوع 2 (سیمان تولیدی کارخانه سیمان تهران)، ب) دوده سیلیس (تولیدی شرکت فرو آلیاژ ازن)، ویژگی‌های سنگدانه‌ها، خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان و دوده سیلیس در آزمایشگاه تعیین و در جدول 1 و 2 و 3 و 4 آمده است. شن مصرفی از نوع شکسته و با حداکثر اندازه 19 میلی‌متر و ماسه مصرفی از نوع طبیعی می‌باشد. آب مصرفی در ساخت نمونه‌ها، آب شرب شهر تهران است [3].

جدول 1. مشخصات فیزیکی مصالح [3]

سنگدانه‌ها	نوع	وزن مخصوص (در حالت SSD) gr/cm^3	جذب آب (در حالت SSD) (%)	عبوری از الک 200
شن	شکسته	2.53	1.6	0.6
ماسه	طبیعی	2.56	2.46	1.2

جدول 2. میزان یون کلراید مصالح سنگی [3]

سنگدانه	یون کلراید (%)
شن	0.001
ماسه	0.001

جدول 3. مشخصات شیمیایی سیمان و دوده سیلیس مصرفی

ترکیب شیمیایی	دوده سیلیس (%)	سیمان نوع 2 (%)
SiO ₂	95.1	20.96
Al ₂ O ₃	0.1	4.2
Fe ₂ O ₃	1.1	4.6
MgO	0.6	3.4
CaO	1.02	61.88
SO ₃	1.2	1.79
Na ₂ O+0.658K ₂ O	-	1.47
C ₃ S	-	52.74
C ₂ S	-	20.31
C ₃ A	-	3.35

در طرح اختلاط‌های در نظر گرفته شده در این مقاله، نتایج یک سری از آزمایش‌های تسریع شده (در محیط‌های شبیه‌سازی شده با شرایط محیطی خلیج فارس و دریای عمان) ملاک قرار گرفته است. در این مقاله از 3 نوع طرح اختلاط استفاده شده است. چگونگی مصرف سیمان و ماده مکمل جایگزین سیمان به صورت زیر می‌باشد:

الف) سیمان نوع 2

ب) سیمان نوع 2 + دوده سیلیس (به میزان 7 درصد وزنی مواد سیمانی)

پ) سیمان نوع 2 + دوده سیلیس (به میزان 10 درصد وزنی مواد سیمانی)

به منظور بررسی نحوه تأثیر دوده سیلیس بر رفتار بتن‌ها، در کلیه طرح‌های اختلاط، مقادیر شن و ماسه، ثابت و به ترتیب برابر 1050 کیلوگرم بر مترمکعب و 760 کیلوگرم بر مترمکعب و همچنین مقدار سیمان (اعم از سیمان و سیمان به همراه جایگزین سیمان) برابر 400 کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. برای هر مخلوط دو نوع نسبت آب به سیمان برابر 0.35 و 0.45 را داریم. میزان اسلامپ برای کلیه طرح‌ها، 5 تا 8 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است تا کار با بتن تازه آسان شود، و با توجه به اینکه مخلوط‌های ساخته شده دارای اسلامپ بسیار پایینی بودند مجبور به استفاده از روان‌کننده یا فوق روان‌کننده شده‌ایم که بدین منظور از ماده افزودنی ملکریت (با پایه نفتالین) استفاده شده است. میزان فوق روان‌کننده مصرفی، بسته به طرح اختلاط، بین 1.2 تا 1.8 درصد وزنی مواد سیمانی، متغیر می‌باشد. درصد هوای کلیه مخلوط‌ها 3.2 تا 2.5 درصد بوده است [3]. پس از ساخت نمونه‌ها در آزمایشگاه و سپری شدن مدت زمان عمل‌آوری اولیه آنها، نمونه‌ها به محل آزمایشگاه شبیه‌سازی شده محیط خلیج فارس و دریای عمان منتقل گردیدند. شرایط نگهداری نمونه‌ها در آزمایشگاه به این صورت است که، کلیه نمونه‌ها پس از قرارگیری در قالب، در سه شرایط شبیه‌سازی شده خلیج فارس و دریای عمان، به صورت زیر نگهداری می‌شوند: الف) کاملاً مستغرق در آب دریا، ب) در سیکل‌تر و خشک (در وضعیت شبیه شرایط جزر و مدی)، ت) در شرایط خشک (جو دریایی).

جدول 4. مشخصات انواع طرح اختلاط و مصالح به کار رفته در آن‌ها [3]

دوده سیلیس (Kg)	ماسه (Kg)	شن (Kg)	سیمان (Kg)	آب (Kg)	W/C	نوع مکمل سیمان	نوع سیمان	کد طرح اختلاط
-	760	1050	400	180	0.45	-	2	A
-	760	1050	400	140	0.35	-	2	B
28	760	1050	372	180	0.45	SF	2	C
28	760	1050	372	140	0.35	SF	2	D
40	760	1050	360	180	0.45	SF	2	E
40	760	1050	360	140	0.35	SF	2	F

5. آزمایش تعیین نفوذپذیری بر روی بتن سخت شده، از طریق تعیین عمق نفوذ آب تحت فشار

این آزمایش مطابق با استاندارد BS EN 12390-8:2000 صورت می‌گیرد. استاندارد فوق، روشی برای تعیین عمق نفوذ آب تحت فشار، در بتن سخت شده می‌باشد که با آب عمل‌آوری شده است. در این آزمایش، نمونه (استونه ای، منشوری و یا مکعبی) بتن را در دستگاه مربوطه قرار می‌دهیم و دستگاه مزبور این امکان را فراهم می‌سازد که آب تحت فشار بر وجه نمونه اثر نماید و فشار آب، پیوسته قابل اندازه‌گیری و کنترل می‌باشد، که بعد از شکسته شدن نمونه، عمق نفوذ آب اندازه‌گیری می‌شود. این آزمایش بر روی نمونه با حداقل سن 28 روز صورت می‌پذیرد. آب با فشار (500 ± 50) کیلوپاسگال و به مدت (72 ± 2) ساعت بر نمونه‌ها اعمال شده است. که نتایج آن در جدول 5 آمده است. [3]

جدول 5. نتایج آزمایش نفوذپذیری بتن تحت فشار [3]

نتایج آزمایش (mm)				کد نمونه	ردیف
270 روزه	180 روزه	90 روزه	28 روزه		
17	18.5	22.5	27	A	1
14.5	14	18	24	B	2
15.5	16.5	21.5	29	C	3
12.5	12.5	15	26	D	4
12.5	14	20	28	E	5
8.5	9	12.5	25	F	6

6. تعیین دوره زمانی شروع خوردگی فولاد (میلگردها) به کمک پروفیل‌های کلراید

خوردگی فولاد و به تبع آن، ترک خوردگی و خوردشدگی بتن، موجب کاهش مشخصات سازه‌ای عضو خواهد شد. اگر این کاهش از حد قابل قبول بگذرد، پایان عمر مفید خدمت‌دهی عضو فرا می‌رسد. با پیش‌بینی عمر مفید، از روی مدل‌های مناسب، می‌توانیم ارزیابی مناسبی از رفتار سازه داشته باشیم و هم اینکه زمان مناسب برای انجام تعمیرات، و میزان و نوع این تعمیرات را پیش‌بینی کرده و انجام دهیم. [3]

منظور از پروفیل کلراید، تعیین قابلیت انتشار کلراید به داخل بتن می‌باشد. فرض می‌کنیم انتشار کلراید به داخل بتن از قانون "فیک" پیروی می‌کند [3]، مطابق این قانون داریم:

هنگامی که در عمق C، یعنی در انتهای ضخامت پوشش بتن روی آرماتور، میزان غلظت کلراید به حد آستانه‌ای آن می‌رسد، آنگاه خوردگی آرماتور شروع خواهد شد. بنابراین، دوره زمانی شروع خوردگی t_{cr} ، به صورت رابطه 1.6 تعریف می‌شود (B_1 و c_1 برای هر کدام از نمونه‌ها و در شرایط محیطی مختلف، به صورت مجزا بدست آمده است [3]):

$$t_{cr} = 0.75 \left(\frac{c}{B_1} \right) c_1 \quad (1.6)$$

با قرار دادن مقادیر B_1 و c_1 در رابطه فوق، نتایج بدست آمده از نمونه‌ها در دوره زمانی شروع خوردگی (t_{cr})، بر حسب ضخامت پوشش بتن روی آرماتور (C)، در محیط‌های شبیه‌سازی شده در جداول 6-8 آمده است. در واقع می‌توان گفت دوره زمانی شروع خوردگی همان عمر مفید خدمت‌دهی عضو می‌باشد، زیرا از این دوره به بعد، خوردگی آرماتور موجود در بتن شروع، که در صورت عدم تعمیرات لازم، منجر به انهدام ستون خواهد شد و به تبع آن با ایجاد خرابی پیش‌رونده در سازه، خرابی در کل سازه اتفاق خواهد افتاد. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که دوره زمانی شروع خوردگی در نمونه‌های مختلف، با یکدیگر متفاوت است. با کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش میزان دوده سیلیس، عمر مفید خدمت‌دهی نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند. و با مقایسه نمونه A و B با نمونه E و F دیده می‌شود که، کاهش نسبت آب به سیمان در صورت عدم وجود دوده سیلیس، تأثیر بیشتری در افزایش زمان دوره خوردگی، نسبت به همین کاهش نسبت آب به سیمان، در صورت حضور دوده سیلیس دارد.

جدول 6. دوره زمانی شروع خوردگی (در واحد سال) بر حسب ضخامت پوشش بتن (در واحد mm) در

شرایط محیطی جزر و مدی [3]

ضخامت پوشش بتن روی آرماتورها						c_1	B_1	کد نمونه‌ها	ردیف
دوره زمانی شروع خوردگی									
258	176	132	100	50	C	2.4	14.9	A	1
50	20	10	5.2	1	t_{cr}				
160	113	100	87	50	C	2.6	32.3	B	2
50	20	14.6	10	2.4	t_{cr}				
205	146	113	100	50	C	2.7	43.6	C	3
50	20	10	7.1	1.1	t_{cr}				
110	100	81	64	50	C	2.9	26.2	D	4
50	37.5	20	10	4.9	t_{cr}				
120	100	86	67	50	C	2.8	26.8	E	5
50	30.3	20	10	4.3	t_{cr}				
120	100	87	64	51	C	3.0	21.6	F	6
130.5	75.4	50	20	10	t_{cr}				

جدول 7. دوره زمانی شروع خوردگی (در واحد سال) برحسب ضخامت پوشش بتن (در واحد mm) در شرایط محیطی مستغرق در آب دریا [3]

ضخامت پوشش بتن روی آرماتورها						c_1	B_1	کد نمونه‌ها	ردیف
دوره زمانی شروع خوردگی									
260	180	140	100	50	C	2.5	48.3	A	1
50	20	10	4.6	0.8	t_{cr}				
135	100	95	75	50	C	2.8	29.7	B	2
50	22.4	20	10	3.2	t_{cr}				
120	100	95	80	50	C	4.0	42.2	C	3
50	24.4	20	10	1.5	t_{cr}				
100	90	70	55	50	C	3.2	24.1	D	4
73.3	50	20	10	7.9	t_{cr}				
100	95	80	60	50	C	3.5	23.7	E	5
120	100	50	20	10	t_{cr}				
100	95	80	60	50	C	3.3	22.2	F	6
116	100	50	20	10	t_{cr}				

جدول 8. دوره زمانی شروع خوردگی (در واحد سال) برحسب ضخامت پوشش بتن (در واحد mm) در شرایط محیطی جو دریا [3]

ضخامت پوشش بتن روی آرماتورها						c_1	B_1	کد نمونه‌ها	ردیف
دوره زمانی شروع خوردگی									
370	200	125	100	50	C	1.5	21.7	A	1
50	20	10	7.2	2.6	t_{cr}				
100	52	50	40	34	C	3.8	17.1	B	2
629	50	45	20	10	t_{cr}				
100	50	47	38	32	C	4.2	17.3	C	3
1617	66	50	20	10	t_{cr}				
100	50	29	24	21	C	5.4	13.1	D	4
46241	1080	50	20	10	t_{cr}				
100	50	47	38	33	C	4.8	19.1	E	5
1930	72	50	20	10	t_{cr}				
100	50	25	21	19	C	6.1	12.2	F	6
268050	3940	50	20	10	t_{cr}				

7. سرعت زنگ‌زدگی فولاد (میلگردها) موجود در بتن

سرعت زنگ‌زدگی، به عنوان میزان ضخامت خورده شده در واحد زمان، تعریف می‌شود. "برومفیلد و همکارانش" در سال‌های 1993 و 1994 [7] و [8]، سعی کرده‌اند میزان فعالیت خوردگی آرماتورها در بتن را به نحوی تعریف کنند، بدین منظور آنها با فرض اینکه آهنگ خوردگی ثابت است، آرماتورهای فولادی داخل بتن را از نظر فعالیت خوردگی به چهار دسته تقسیم کرده‌اند. در اینجا با توجه به شرایط محیطی خلیج فارس و دریای عمان که به شدت تحت خوردگی یون کلراید می‌باشند آهنگ خوردگی فولاد موجود در بتن در رده زیاد در نظر گرفته شده است و سرعت زنگ‌زدگی فولاد (r) را در رده مذکور، در بازه $r \geq 10$ با واحد ($\mu\text{m}/\text{yr}$) پیش‌بینی کرده‌اند، که در شرایط ویژه خلیج فارس و دریای عمان، $r=40$ در نظر گرفته شده است. بنابراین در

صورت رسیدن یون کلراید به فولاد موجود در بتن و عدم تعمیرات لازم و به موقع، می‌توان گفت که در هر سال حدود 0.04 میلی‌متر از قطر خاموت‌ها خورده می‌شود که بسته به نوع سازه، شرایط و ویژگی‌های مقاطع، در طول دوره‌های زمانی مختلف، با کاهش مقطع ستون روبرو خواهیم شد که با گذشت زمان ستون‌ها منهدم می‌شوند و به دنبال آن با ایجاد خرابی پیش‌رونده در کل سازه، ساختمان به طور کامل ویران خواهد شد.

8. نتیجه‌گیری

این مقاله به منظور بررسی خرابی پیش‌رونده سازه‌های بتن‌آرمه تحت تهاجم یون کلراید می‌باشد و در واقع هدف، افزایش و پیش‌بینی دوره زمانی شروع خوردگی آرماتورهای موجود در ستون‌های سازه مورد نظر است، که بتوان از انهدام ستون‌ها جلوگیری کرد و یا انهدام ستون‌ها را به تأخیر انداخت. به همین منظور در محیط‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده خلیج فارس و دریای عمان، نمونه‌های بتن‌آرمه با طرح اختلاط‌های مختلف، مورد ارزیابی و آنالیز قرار گرفته‌اند و نتایج زیر حاصل شده است:

- ا. تفاوت میزان استفاده از دوده سیلیس، (مثلاً تفاوت 7 تا 10 درصد) تأثیر زیادی بر رفتار بتن در سن 28 روزه ندارد. این ویژگی تا حدود 90 روز نیز، تا حد زیادی مشاهده می‌شود.
- ب. در دراز مدت، تأثیر نسبت آب به سیمان بر روی رفتار بتن‌های با دوده سیلیس، بیشتر از بتن‌های فاقد آن می‌باشد.
- ت. مصرف دوده سیلیس به میزان 7 تا 10 درصد، و همچنین کاهش نسبت آب به سیمان موجب افزایش عمر مفید خدمت‌دهی و افزایش دوره زمانی شروع خوردگی آرماتور موجود در بتن می‌شود.
- ث. استفاده از دوده سیلیس توأم با کاهش نسبت آب به سیمان نیز، در بهبود رفتار بتن و افزایش دوره زمانی شروع خوردگی آرماتور موجود در بتن، بسیار مؤثر و مطلوب می‌باشد، ضمناً تأثیر نسبت آب به سیمان، در مقایسه با درصد دوده سیلیس، در محدوده نسبت‌های آب به سیمان کمتر از 0.45، بیشتر است.
- ج. نقش کم بودن نسبت آب به سیمان، در بتن‌های فاقد دوده سیلیس، بیشتر از بتن‌های دارای دوده سیلیس است.
- ح. با پیش‌بینی‌های انجام شده توسط برومفیلد، در هنگام شروع خوردگی آرماتور موجود در بتن، در شرایط محیطی خلیج فارس و دریای عمان در هر سال حدود 0.04 میلی‌متر خوردگی را در آرماتور خواهیم داشت، که با ادامه خوردگی و کاهش مقطع عضو سازه‌ای در طی مدت مشخص، بعد از حذف ستون سازه مورد نظر، با ایجاد خرابی پیش‌رونده کل سازه ویران خواهد شد.

9. مراجع

- [1]. Meijers and Schlangen, "2D-Analysis of chloride Ingress in the Tidal Zone of Marine Concrete structures", 2005.
- [2]. Sang-Hun Han, "Influence of Diffusion Coefficient on Chloride Ion Penetration of Concrete Structures", Journal of Construction and Building Materials, 2007.
- [3]. علی‌اکبر رضانیانپور، حمیدرضا اشرفی، "مدل انتشار و پیش‌بینی عمر مفید بتن‌های معمولی و بتن‌های حاوی دوده سیلیس، در معرض کلراید در محیط خلیج فارس" مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، 1390.
- [4]. زهرا پرتوی، حمیدرضا اشرفی؛ "بررسی رفتار سازه فولادی مجهز به مهاربندهای کم‌انرژی ناپذیر در برابر خرابی پیش‌رونده" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی کرمانشاه، اسفند 1394.
- [5]. Fan Hong et.al, "Carbonation and Chloride Profiles of Reinforced Concrete after 26 years of Exposure", International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer Thailand, 2006.
- [6]. Bertolini et al, "Corrosion of steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair", 2004.

[7]. Broomfield, Rodriguez, Ortega and Garcia, "Corrosion Rate Measurement and Life Prediction for Reinforced Concrete Structures", in: Proceedings of Structural Faults and Repair, Vol. 2, University of Edinburgh, 1993.

[8]. Broomfield, Rodriguez, Ortega and Garcia, "Corrosion Rate Measurement in Reinforced Concrete Structures by Linear Polarization Device", in: Philip D. Cady Symposium in Corrosion of Steel in concrete, ACI, SP151, 1994.