

بررسی عوامل مؤثر بر خرابی بتن مسلح در محیط دریا

امین محمودی، حسن افشین، حبیب حکیمزاده

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی

استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند

دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند

a_mahmoodi1363@yahoo.com

hafshin@sut.ac.ir

hakimzadeh@sut.ac.ir

خلاصه:

امروزه به دلیل گسترش و اهمیت فعالیت‌های نفتی و حمل و نقل دریایی و همچنین توجه به استخراج معادن در بستر دریاها، فعالیت‌های ساختمانی مانند ساخت اسکله‌ها، سکوها... در مناطق ساحلی و اقیانوسی افزایش چشمگیری داشته است. هر چند بتن به عنوان یک ماده با دوام محسوب می‌گردد، اما احتمال دارد که در طول مدت عمر خود به دلایل متعددی تحت نارسایی و آسیب قرار بگیرد. هنگام طراحی سازه‌ها و طراحی بتن در نظر گرفتن عواملی که بتن طی سالیان دراز باید در معرض آن قرار گیرد ضروری است. گاهی عدم پایایی بتن منجر به هزینه‌های تعمیراتی کلانی می‌شود که از هزینه لازم برای یک طراحی خوب و قابل قبول به مراتب بیشتر است و گاه این هزینه‌ها بقدری بالاست که تخریب سازه به تعمیرات آن ارجح است.

در این مقاله به بررسی عوامل مؤثر بر خوردگی میلگردها و خرابی بتن مسلح در محیط‌های دریایی پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: دوام بتن، خوردگی میلگرد، ناحیه جزر و مد، ناحیه پاششی، ناحیه اتمسفری

مقدمه:

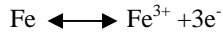
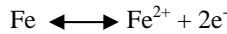
بطور کلی فرآیند تخریب بتن‌هایی که در مجاورت آب دریا هستند، ناشی از چندین عامل فیزیکی و شیمیایی است. پیش‌بینی عملکرد بتن در حضور آب دریا کار آسانی نیست، زیرا تعداد زیادی واکنش‌های شیمیایی در شرایط غیر تعادلی، در حال انجام است و اطلاعات حاصل از شرایط تعادل ترمودینامیکی در بهترین شرایط، تنها می‌تواند به عنوان یک راهنما مورد استفاده قرار گیرد. آب دریا دارای یونهای مخرب زیادی است که هر یک جداگانه اثر نامطلوبی بر روی بتن دارند، اما ممکن است اثر تخریبی ترکیب آنها، کمتر از اثر هر کدام بصورت جداگانه باشد. باید متذکر شد که اثر محیط خورنده یا مهاجم یک مفهوم نسبی است. چنانکه ممکن است محیطی برای بتن ساخته شده از سیمان پرتلند مضر ولی برای بتن با همان نسبت اختلاط ولی ساخته شده از سیمان ضد سولفات بی‌ضرر باشد.

تهاجم محیط نه تنها با شیمی آن، بلکه با مجموعه‌ای از عوامل فیزیکی و فیزیکوشیمیایی، تماس سازه با محیط اطراف و اشکال خاص روندهای مخرب نیز بستگی دارد. میتوان عوامل زیر را در آسیب بتن یا بتن مسلح در محیط دریایی مؤثر دانست:

- ۱- استفاده نادرست از سازه (بارگذاری بیش از حد، ضربه، خستگی)
- ۲- سایش و فرسایش (کف‌ها، زیرسازی‌ها، موج‌گیرها)
- ۳- اثرات محیطی (حرارت، رطوبت، کربناسیون)
- ۴- مواد اولیه ناسازگار (مصالح سنگی دارای سیلیس فعال، ساختار مرکب)
- ۵- شسته شدن (حل شدن با جاری خنثی یا قلیایی)
- ۶- حمله مواد شیمیایی (سولفات‌ها، اسیدها، اسیدهای آلی، ...)
- ۷- واکنش قلیایی سنگدانه‌ها
- ۸- خوردگی فولاد

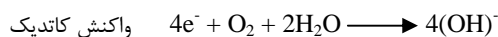
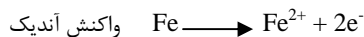
مکانیزم خوردگی فولاد

خوردگی در بتن یک فرآیند الکتروشیمیایی است. در این نوع خوردگی، اکسیداسیون فلز رخ می‌دهد. هنگامی که آهن در مجاور آب قرار دارد اکسید می‌شود و به صورت Fe^{2+} و Fe^{3+} در می‌آید.

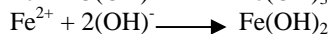
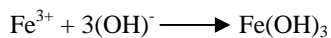


در نتیجه واکنش‌های بالا، یک پتانسیل الکتریکی به وجود می‌آید و به دنبال حلالیت بیشتر فلز، پتانسیل بیشتر شده و تمایل به خوردگی نیز افزایش می‌یابد. میزان حلالیت و سرعت آن به نوع فلز و ویژگی‌های آن و محلول الکترولیت و غلظت آن (کلرید) بستگی دارد.

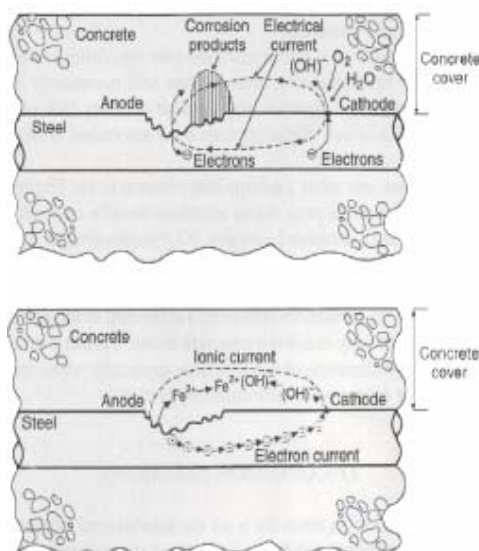
نکته بسیار مهم این است که حضور یون‌های کلرید در محلول باعث افزایش میزان حلالیت آهن شده و در نتیجه سرعت خوردگی را بیشتر می‌کند. همچنین باید توجه کرد که واکنش‌های بالا واکنش‌های برگشت‌پذیرند و پس از مدتی به تعادل می‌رسند، اما اگر در این واکنش‌ها الکترون‌های تولید شده از آهن به طریقی مهاجرت کنند، واکنش زنگ‌زدگی ادامه می‌یابد و از رسیدن به تعادل باز می‌ماند. در عمل، این اتفاق در محیط بتن به علت تفاوت غلظت یون‌های محلول نفوذی در اطراف میلگردها و نیز تفاوت خواص فولاد و همچنین رطوبت و اکسیژن متفاوت به علت نفوذپذیری متغیر در بتن می‌افتد و قسمتی از فلز به صورت آند عمل می‌کند و قسمت‌های دیگری از آن به صورت کاتد در می‌آید. بنابراین واکنش‌های الکتروشیمیایی در فرآیند خوردگی را می‌توان به دو بخش آندیک و کاتدیک تقسیم نمود. در آند اکسید شدن الکتروشیمیایی صورت می‌پذیرد و در کاتد احیاء الکتروشیمیایی رخ می‌دهد. فلز (Fe) در محل آندیک به یون‌های (Fe^{2+}) تجزیه می‌شود و الکترون‌ها ($2e^{-}$) آزاد می‌گردند. برای آنکه بین بارهای الکتریکی تعادل برقرار گردد، الکترون‌ها در محل کاتدیک مصرف شده و با ترکیب شدن با اکسیژن (O_2) و آب (H_2O) تشکیل یون‌های هیدروکسید را می‌دهند.



یون‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} که در آند به وجود آمده‌اند به سمت کاتد مهاجرت می‌کنند و با یون‌های هیدروکسید تولید شده ترکیب شده و زنگ آهن به وجود می‌آید:

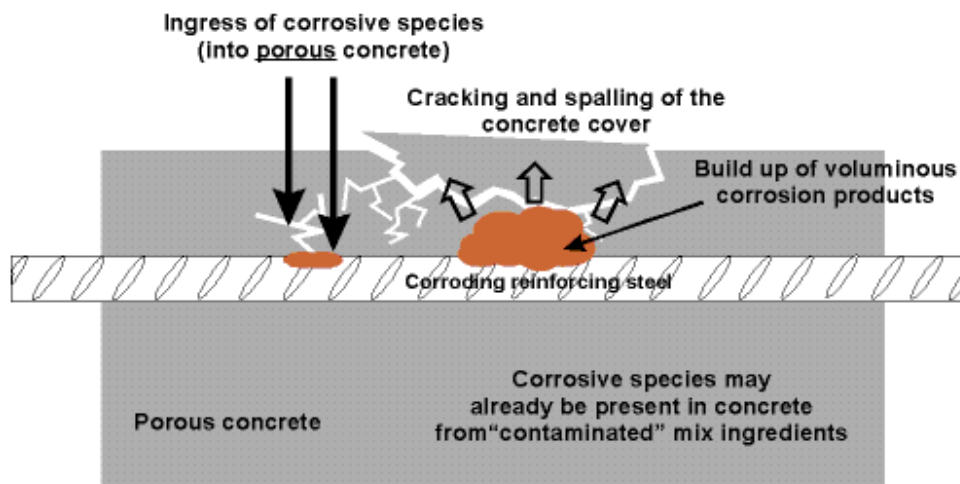


ترکیب Fe^{2+} و یون‌های $(OH)^{-}$ سبب تشکیل هیدروکسید فرو $Fe(OH)_2$ می‌گردد که یک نوع زنگ سفید رنگ می‌باشد. این محصول اکسیده می‌شود و به صورت هیدروکسید فریک $Fe(OH)_3$ تبدیل می‌گردد. هیدروکسید فریک به رنگ قرمز مایل به قهوه‌ای است، همان رنگی که معمولاً در خوردگی مشاهده می‌شود. شکل (۱)



شکل ۱- روند خوردگی فولاد در بتن

برای این فعل و انفعالات، خوردگی در آند اتفاق می‌افتد و زنگ‌زدگی آهن در کاتد تهنشین می‌گردد. زنگ آهن نسبت به یونهای فلز دارای حجم بسیاری بیشتری است، این افزایش حجم حتی تا ۶ برابر حجم فلز اولیه می‌رسد و باعث انبساط و ترک خوردن بتن اطراف آن می‌گردد. شکل (۲) در این فرآیند فقط اکسیژن مصرف می‌شود و آب تنها فراهم کننده محیط و لازمه انجام شدن فرآیند الکتروشیمیایی است. لذا اکسیژن باید در مجاورت سطح میلگردها موجود باشد (نفوذ کرده باشد) تا واکنش رخ دهد و رطوبت هم وجود داشته باشد. در صورتی که بتن کاملاً خشک باشد، به علت عدم وجود آب و نیز در صورتی که بتن کاملاً اشباع باشد، به علت اینکه اکسیژن در این حالت نمی‌تواند نفوذ کند واکنش صورت نمی‌گیرد، حتی اگر لایه غیرفعال محافظ روی میلگرد از بین رفته باشد.



شکل ۲- خرابی بتن در اثر افزایش حجم زنگ آهن

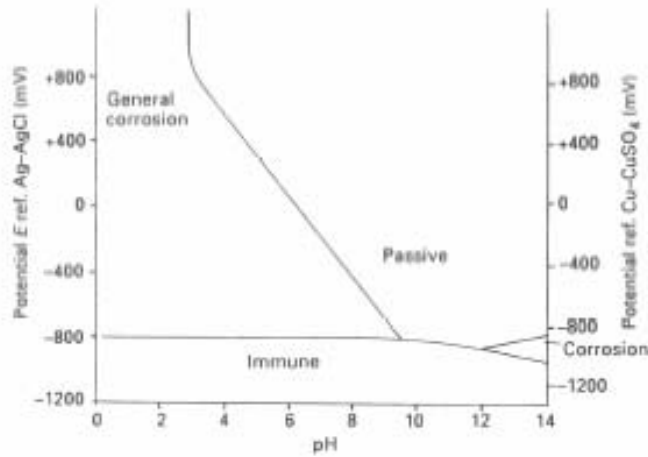
نقش بتن در خوردگی میلگرد

میلگردها در داخل بتن به وسیله دو عامل محافظت می‌گردند. عامل فیزیکی که همان پوشش بتنی روی میلگرد و ویژگی‌های آن است، و عامل شیمیایی، یعنی محافظت شیمیایی به این صورت است که محیط قلیایی بتن، با PH بالا (High Alkalinity) (حدود ۱۲-۱۳) باعث می‌شود که لایه اکسید نازک (Fe_2O_3) روی سطح میلگرد تشکیل شود و مانع از حل شدن آهن گردد و بدین صورت از خوردگی حتی در حضور رطوبت و اکسیژن جلوگیری می‌شود. این لایه حفاظتی به نام لایه غیرفعال (Protective Film) نامیده می‌شود. در صورتی که تحت عواملی میزان قلیائیت بتن از یک حدی کاهش یابد، این لایه تشکیل نمی‌شود و آسیب‌پذیری بتن مسلح در برابر خوردگی افزایش می‌یابد.

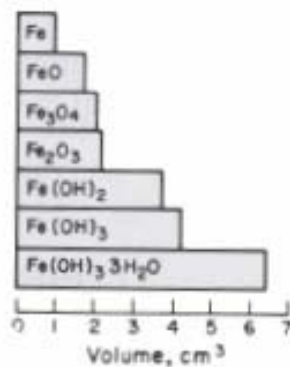
قلیائیت بتن به دلیل وجود هیدروکسید کلسیم $Ca(OH)_2$ است که در اثر هیدراتاسیون سیمان، تولید می‌گردد. هیدروکسیدهای دیگری نیز در منافذ خمیر سیمان وجود دارند که شامل هیدروکسید سدیم (NaOH) و هیدروکسید پتاسیم (KOH) هستند. ولی اثر این هیدروکسیدها در قلیائیت بتن نسبت به هیدروکسید کلسیم بسیار کمتر است. مؤثر بودن هیدروکسید کلسیم در قلیائیت بتن به دلیل حلالیت زیاد آن نسبت به دیگر هیدروکسیدها می‌باشد. پتانسیل الکتروشیمیایی فولاد نیز نقش عمده‌ای برای انفعالی کردن سطح فولاد به عهده دارد. برای نشان دادن رابطه پتانسیل و PH و اثر آنها در خوردگی از دیاگرام پوربیکس استفاده می‌شود. شکل (۳)

دیاگرام پوربیکس از سه منطقه تشکیل شده است. منطقه انفعالی، که لایه محافظ ایجاد می‌شود، منطقه‌ای که خوردگی واقع می‌گردد و منطقه خنثی که فلز از نقطه نظر ترمودینامیکی پایدار است. به عبارت دیگر لایه محافظ تشکیل نمی‌شود ولی شدت خوردگی به علت کمبود اکسیژن بسیار کم است. دیاگرام پوربیکس نشان می‌دهد که در محدوده وسیعی از پتانسیل فلز بصورت انفعالی باقی می‌ماند. بنابراین در مواردی که PH بتنی زیاد است و اکسیژن به اندازه کافی موجود می‌باشد یک لایه مگنتیت (Fe_3O_4) و یا هماتیت (Fe_2O_4) بر روی سطح آرماتور ایجاد می‌شود که بطور مؤثر از خوردگی جلوگیری می‌کند. همچنین نسبت حجم محصولات خوردگی در شکل (۴) نشان داده شده است.

عواملی که می‌توانند قلیائیت بتن را کاهش دهند وجود دی‌اکسید کربن (کربناتاسیون) و نفوذ و حضور یونهای کلراید در محیط بتن می‌باشند.



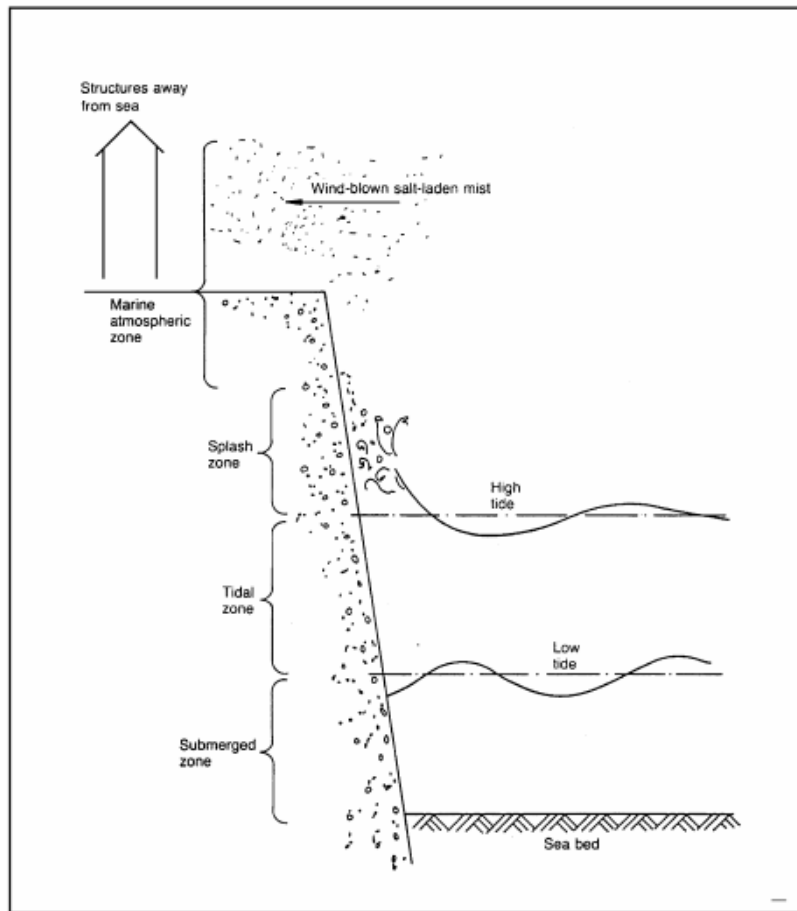
شکل ۳- دیاگرام PH - پتانسیل (پوربیکس) برای آهن



شکل ۴ - نسبت حجم محصولات خوردگی

انواع قرار گرفتن بتن در معرض عوامل مخرب و روشهای تخریب

دوام یک سازه بتنی وابستگی شدیدی به محل قرارگیری بتن نسبت به تراز آب دریا دارد. سازه قرار گرفته شده در کنار ساحل به سه ناحیه اصلی تقسیم بندی می گردد که عبارتند از ناحیه اتمسفری، ناحیه جزر و مدی و ناحیه غوطه‌وری در آب. ناحیه اتمسفری، ناحیه‌ای است که بتن تحت یک محیط مرطوب نمکین بوده ولی در تماس مستقیم با آب دریا نمی‌باشد. ناحیه غوطه‌ور در آب جایی است که سطح بتن در کنار اکسیژن یا هوای در دسترس محدودی، با آب اشباع شده است. ناحیه جزر و مدی، سطح مابین دو ناحیه حدی می‌باشد که بتن تحت تر و خشک شدن با مقادیر مختلف اکسیژن و هوا می‌باشد. ناحیه اخیر سطحی است که بر خلاف دو سطح دیگر که نسبتاً خشک یا کاملاً اشباع هستند، شرایط اقلیمی سطح بتن، دارای تغییرات ثابتی است. ناحیه پاششی بعضی مواقع از ناحیه جزر و مدی تفکیک می‌گردد که در آن صورت سازه قرار گرفته شده در کنار ساحل به چهار ناحیه اصلی تقسیم‌بندی می‌گردد. شکل (۵)



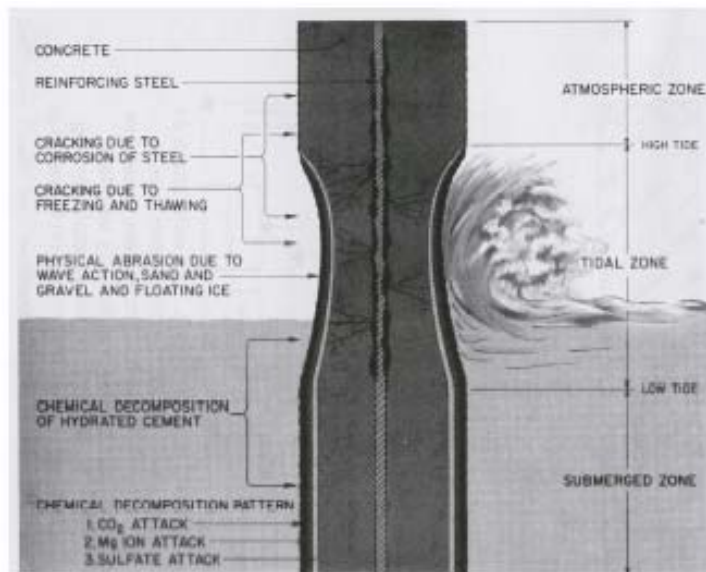
شکل ۵- وضعیت قرارگیری یک سازه بتنی کنار ساحل

بر حسب موقعیت قرارگیری سازه در آب دریا، می‌توان روشهای تخریب بتن را به سه صورت زیر دسته‌بندی کرد:
الف) بتن‌هایی که بالاتر از خط جزر و مد قرار گرفته و در معرض آب نیستند. اما این بتن‌ها در معرض جریان هوایی هستند که نمک‌های دریا در آن وجود دارد. حمله‌هایی که روی این قسمت بتن رخ می‌دهد، ممکن است به خوردگی آرماتور بتن منجر گردد.

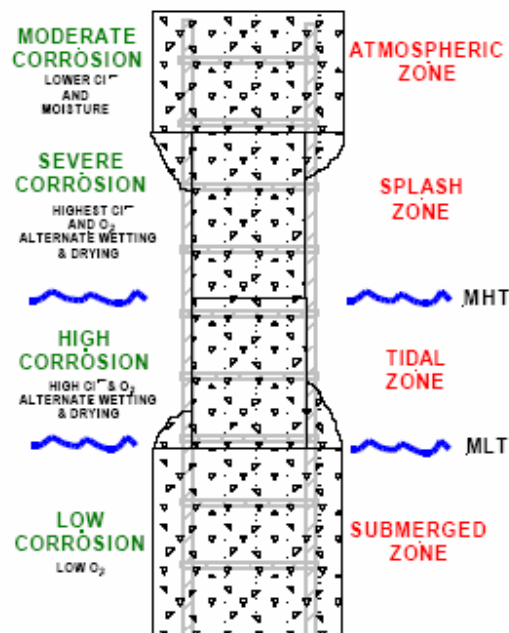
ب) بتن‌های قرار گرفته در ناحیه جزر و مد، می‌تواند تحت تأثیر تر و خشک شدن متناوب، خوردگی آرماتور، واکنش‌های شیمیایی که باعث از بین رفتن محصولات هیدراتاسیون می‌شوند و فرسایش ناشی از برخورد امواج و ماسه قرار گیرند.

ج) در ناحیه پاششی آب دریا عوامل متعددی همچون تر و خشک شدن متوالی، غلظت بالای اکسیژن و ضربات موج آب دریا باعث خوردگی شدید میلگردها و خرابی بتن مسلح می‌گردد.

د) قسمتی از سازه بتنی که زیر خط جزر و مد قرار دارد، برای انجام واکنش‌های شیمیایی آمادگی کامل دارد ولی نسبت به خوردگی فولاد کمتر آسیب می‌بیند. شکل (۶) و شکل (۷)



شکل ۶- نحوه خوردگی آرماتور و آسیب دیدگی بتن در نواحی مختلف دریایی



شکل ۷- شدت خوردگی میلگرد در نواحی مختلف یک سازه بتن مسلح دریایی

نتیجه گیری

- ۱- در مورد سازه‌های دریایی، نفوذپذیری مهمترین عامل در دوام دراز مدت بتن است.
- ۲- برای ساخت بتن با نفوذپذیری کم سه نکته مهم زیر باید رعایت گردد:
الف) طرح اختلاط و عمل‌آوری مناسب
ب) اجرای خوب
ج) تمهیدات لازم برای جلوگیری از ترک خوردگی بتن پس از اجرا
- ۳- مخلوط‌هایی که دارای مقاومت بالا می‌باشند، از خود نفوذپذیری کمی نشان می‌دهند. توصیه می‌شود نسبت آب به سیمان در زیر آب ۰/۴۵ و در نواحی پاشیدگی و در معرض شرایط جوی ۰/۴ باشد. همچنین برای ساخت مخلوط از سنگدانه‌های با کیفیت خوب و مواد افزودنی و مضاف (فوق روان‌کننده و پوزولان) استفاده می‌شود.
- ۴- در نواحی پاشیدگی و در معرض شرایط جوی، توصیه می‌شود سیمانهای مصرفی دارای C_3A کمتر از ۴ درصد نباشد. این مقدار برای محافظت از آرماتور لازم است. مقدار حداکثر C_3A ، ۱۰ درصد توصیه می‌شود.
- ۵- عامل اصلی خرابی ساختمانها و سازه‌های بتنی دریایی، نفوذ یون کلراید و خوردگی آرماتور و در نتیجه ترک خوردن و ریختن بتن می‌باشد.

مراجع:

1. A.Benture, S.Diamond and N.S.Berke, " Corrosion of steel in concrete" , 1988
2. Kumar Mehta, " Concrete in the marine environment" , 1991
3. P.M.Chess, " Cathodic Protection of steel in concrete" , 1998
4. ACI Corrosion of metals , ACI 222R
5. Unified facilities criteria, 4-150-07 , 19 June 2001
6. Allen , R.T.L , "Concrete in coastal structures" , 1998 , Thomas Telford
7. M.N.Haque , H. Al-Khaiat , B. John , " Climatic zones_ A prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf " 4 April 2006
8. Albert K.H. Kwan and Henry H.C Wong, " Durability of Reinforced Concrete Structures, Theory vs Practice", Department of civil Engineering, The University of Hong Kong
9. Steven F. Daily, "Using Cathodic Protection to Control Corrosion of Reinforced Concrete Structures in Marine Environments "
10. Troconis de Rincon , M. Sanchez , V . Millano, R. Fernandez,..." Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries ", Corrosion Science Journal, 16 March 2007