



## بررسی خوردگی بتن در سواحل دریا

### (حاشیه خلیج همیشه فارس)

ناصر مهرداد۱-استاد دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران<sup>۱</sup>،

اکبر باغوند دانشیار دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران<sup>۲</sup>،

محمد جواد امیری استادیار دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران<sup>۳</sup>،

محمد رسولی منش کارشناسی ارشد دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران<sup>۴</sup>.



### چکیده:

تعداد وسیعی از باراندازها، حوضچه های تعمیراتی، تیرها و پایه های پل، موج شکن ها و تونل های زیردریایی از بتن مسلح ساخته شده اند. بتن به عنوان مصالح ساخت مناسب برای سازه هایی که در معرض محیط دریایی قرار دارند، مورد پذیرش کلی قرار گرفته است و در صورتیکه طبق اصول صحیح ساخته و نگهداری شود، می تواند بر مشکلات فائق آید. ولی در صورت انتخاب مصالح نامناسب، کیفیت ضعیف اجرا و عدم نگهداری کافی، دچار فساد و خرابی خواهد شد. مکانیزم های اصلی تخریب سازه های بتنی در محیط دریایی خوردگی میلگردهای کار گذاشته شده در بتن، تجزیه و تخریب بتن، سیکل های یخ زدن و آب شدن و تشکیل ترکیب اترینگایت و واکنش قلیایی - سیلیسی را شامل می شود. لذا در این مقاله سعی شده است ضمن شناسایی عناصر خورنده بتن و ذکر جزئیاتی در مورد این عناصر، راهکارهایی را جهت مدیریت و اجرا صحیح این سازه ها مطرح کند تا ضمن کاهش اثرات مخرب این عناصر، گامی در جهت بهینه و اقتصادی نمودن شرایط ساخت و ساز در این منطقه برداریم.

کلمات کلیدی: سازه بتنی، خوردگی بتن، عناصر خورنده، خوردگی آرماتور، عوامل بازدارنده خوردگی.

## مقدمه

پدیده خوردگی طبق تعریف، واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی بین یک ماده، معمولاً فلزات، و محیط اطراف آن می باشد که در نهایت به سبب این واکنش شیمیایی خواص ماده دست خوش تغییر قرار می گیرد که این واکنش شیمیایی در مجموع واکنشی مخرب است. [۱]

حال به ذکر مهمترین عواملی می پردازیم که وجودشان باعث تخریب سازه های بتنی قبل از عمر مفید آنها می شود که این عوامل عبارتند از: واکنش های قلیایی سنگ دانه ها، حمله سولفات ها، کلریدها و نیتراتها از یک سو و وجود گازهایی از جمله اکسیژن، دی اکسید گوگرد است. و با توجه به رطوبت و املاح بالا در مناطق ساحلی خلیج فارس تخریب سازه های بتن آرمه سریعتر از مناطق دیگر است. [۲]

بتن به عنوان یک ماده ساختمانی بسیار خوب، در ۱۰۰ سال گذشته مورد استفاده قرار گرفته است. مقاومت فشاری بسیار خوب بتن و ترکیب مناسب آن با فولاد، و نیز شکل پذیری مناسب آن توسط قالب، از عوامل مؤثر در کاربرد بهینه بتن محسوب می شود. با این وجود، دوام و پایداری بتن از مسائلی است که در کنار سایر مسائل مربوط به بتن، مورد توجه قرار می گیرد. پایداری بتن در محیط های خورنده و به خصوص محیط های ساحلی و دریایی (و بالاخص شرایط بسیار خورنده خلیج فارس)، از مسائلی است که کاربرد بتن را در آن شرایط، به صورت جدی مورد تردید قرار داده است. این مسئله تا آنجا جلو رفته است که بتن های ساخته شده در شرایط آب و هوایی خلیج فارس، تحت تأثیر عناصر مخربی چون یون های کلرید، سولفات و نیترات که بتن را مورد حمله قرار می دهند، از یک سو و وجود گازهایی از جمله اکسیژن، دی اکسید گوگرد و همچنین رطوبت و املاح بالا از سوی دیگر در این مناطق باعث شده است عمر سازه ها گاه کمتر از یک سال باشد. [4]

تاکنون تحقیقات مفصلی در دنیا در جهت بهبود پایداری بتن در محیط های خورنده صورت گرفته است. این تحقیقات شامل مسائل مختلفی از جمله افزودن مواد پوزولانی نظیر میکروسیلیس، سرباره و ... به بتن به عنوان جایگزین قسمتی از سیمان، و نیز افزودن مواد شیمیایی مضاف مناسب، و حتی انتخاب دانه بندی به خصوص می باشد. با این حال چنین تحقیقاتی هنوز کامل نشده و هنوز هم زمینه گسترده ای جهت تحقیقات مفصل تر وجود دارد. بدین ترتیب می توان در یک پروژه مستقل، افزایش پایداری و دوام بتن در شرایط محیطی خلیج فارس را مورد مطالعه قرار داده و با ساخت نمونه هایی در شرایط تشدید شده در آزمایشگاه، قابلیت اعتماد روش های پیشنهادی جهت بهبود پایداری بتن در شرایط نامساعد را سنجید. [3]

تحقیقات متعددی نشان می دهد استفاده از مواد افزودنی سیمانی نظیر میکروسیلیس در بتن بر کاهش یونهای مخرب تأثیر می گذارد. در مناطق ساحلی غلظت بالای یونهای ذکر شده، شرایط محیطی و آب و هوایی (تغییرات زیاد دما و رطوبت)، عدم وجود مصالح با کیفیت و یا استفاده از مصالح با کیفیت پایین به همراه اجرای نامناسب و حضور گازهای مختلف در هوا بهره رطوبت بالا از عواملی هستند که موجب کاهش عمر سازه های بتنی می شود. [6]

یکی دیگر از تحقیقات انجام شده نشان می دهد استفاده از روش پیشرفته روز، جهت کنترل خوردگی، روش MCI یا به عبارتی بازدارنده خوردگی با خاصیت نفوذ و حرکت به سمت آرما تور است. MCI مخفف (Migratory Corrosion Inhibitor) و بمعنی بازدارنده خوردگی آلی از نوع الکل آمینه و کربوکسیلات با خاصیت مهاجرتی نفوذگری است که در صورت افزودن به بتن یا اسپری روی قفسه آرما تور و یا اسپری روی سطح بتن به داخل آن نفوذ و دور آرما تور یک لایه مولکولی ایجاد می کند در این



# اولین کنفرانس بین المللی صنعت سیمان، انرژی و محیط زیست (۲۳ الی ۲۵ بهمن ۱۳۹۱)

1<sup>st</sup> International Conference on Cement Industry,  
Energy and Environment (CIEE), 11-13 Feb. 2013

تکنولوژی مواد نفوذگر باعث حفاظت آرماتور و بتن می شوند. امروزه تکنولوژی MCI برای جلوگیری از خوردگی میلگردهای فولادی مدفون در بتن رواج یافته است. این مواد نیز به صورت افزودنی تشکیل دهنده ملات بتن و یا اشباع سطح بتن بکار برده می شوند. [۱۰]. روش فوق تنها جایگزین حفاظت کاتدیک با مزایای تسهیل اجرا-پایین بودن هزینه می باشد. حال هدف از این مقاله مشاهده و بررسی تاثیرات عوامل ذکر شده روی سازه های بتنی و پیشنهاد راهکارهای مناسب جهت مقابله با پدیده خوردگی در این مناطق هستیم.

## تهاجم و تخریب بتن توسط آب دریا:

آب دریا یک سیستم بسیار پیچیده فیزیکی و شیمیایی و محیط خاص در تماس با بتن می باشد. در آب دریا فعل و انفعالاتی رخ می دهد که باعث تشکیل الکترولیت هایی است که نسبت به بتن مهاجمند. اما آنچه شایان ذکر است چگونگی ارتباط بتن با آب دریا و تاثیرات آن روی سازه بتنی می باشد. این بدین معنی است که قسمتی از بتن بطور کامل مستغرق در آب دریا است و قسمت های دیگر به واسطه جزر و مد یا امواج دریا در تماس با آب دریا هستند که باید تاثیرات آب دریا به طور جداگانه بر روی هر قسمت بررسی گردد تا مشخص گردد در کدام قسمت تخریب بیشتری صورت می گیرد. حال به شناسایی عناصر و تاثیرات آنها روی قسمت های مختلف بتن که در بالا اشاره گردید می پردازیم و در نهایت با ذکر راهکارهای به مقاله پایان داده می شود.

بطور کلی عناصر مهاجم بالقوه آب دریا نسبت به بتن عبارتند از یونهای سولفات، کلرور، کربنات، بی کربنات، فلزات قلیایی و منیزیم که هر چه هوا گرمتر باشد فعل و انفعال تشدید می شود. این عوامل را می توان به شرح زیر بطور اجمال مورد بحث قرار داد:

### الف- سولفاتها:

آب دریا حاوی سولفاتها بوده و می توان انتظار داشت که با حمله به فاز  $C_3A$  موجود در ترکیب سیمان مصرفی در بتن، تشکیل اترینگایت داده و موجب انبساط و ترک خوردگی در بتن شود. اما چون کلرورها هم در آب دریا وجود دارند، تهاجم آب دریا معمولا "باعث انبساط بتن نمی شود. توضیح مسئله در این واقعیت نهفته است که گچ و اترینگایت در محلول کلروری خیلی بیشتر حل می شوند و این بدان معنی است که به سادگی توسط آب دریا شسته می شوند. در نتیجه هیچگونه تجزیه یا ترک خوردگی به وجود نمی آید. ولی تخلخل، مقداری افزایش و متعاقبا "مقاومت کاهش می یابد.

از سوی دیگر، فشار ناشی از تبلور نمکها در حفره های بتن، می تواند باعث انبساط شود. تبلور در بالای سطح آب، در نقطه تبخیر آب، انجام می شود. چون محلولهای نمک در اثر فرآیند موئینگی به داخل بتن وارد می شوند، حمله فقط هنگامی انجام می شود که آب بتواند به داخل بتن نفوذ کند. بنابراین بازهم نفوذ پذیری بتن دارای اهمیت زیادی می باشد.

### ب- کلرورها:

وجود کلرید آزاد در بتن می تواند به لایه حفاظتی غیر فعالی که در اطراف آرماتورها قرار دارد، آسیب وارد نموده و آن را از بین ببرد.

خوردگی کلریدی آرماتورهایی که درون بتن قرار دارند، یک عمل الکتروشیمیایی است که بنا به خاصیتش، جهت انجام این فرآیند، غلظت مورد نیاز یون کلرید، نواحی آندی و کاتدی، وجود الکترولیت و رسیدن اکسیژن به مناطق کاتدی در سل (cell) خوردگی را فراهم می کند

که می توان اینگونه بیان کرد که یون کلرور ممکن است مشابه یون سولفات عمل نموده و فرآورده ای بنام کلرور آلومینات تولید نماید. همچنین ممکن است در واکنشهایی که خوردگی آرماتور یا سایر فلزات بتن دخالت دارند شرکت نماید. نقش کلرور در آب دریا در روابط متقابل با بتن دو جنبه دارد. اول عملکرد آن بطور مستقل و دیگر کند کردن یا مانع شدن از انبساط بتن بوسیله سولفات ها. [9]

از غوطه وری ناکامل سازه ها در محیط دریا یا عمل متناوب تر و خشک شدن شرایط ویژه ای بوجود می آید. در این شرایط تنش های حاصل از مکش موئینگی اضافه می شود که خود بر شدت عملکرد اضافه می نماید.

### ب- کربنات و بی کربنات:

یونهای کربنات و بی کربنات ممکن است در فعل و انفعال کربناسیون  $Ca^{++}$  با  $Ca(OH)_2$  که در حین هیدراتاسیون سیمان بوجود آمده اند، شرکت نمایند.  $CO_2$  محلول در آب بشکل اسید کربنیک موجب نرم شدن و تجزیه موضعی می گردد و موجب جمع شدگی ناشی از کربناسیون می شود. شدت کربناسیون به نفوذ پذیری، رطوبت نسبی داخلی، سطح مخصوص خمیر سیمان و غلظت  $CO_2$  بستگی دارد اما خود  $CO_2$  بنحوی قادر به انجام فعل و انفعال با بیشتر اجزا سیمان هیدراته، نسبتاً ناپایدار می باشد.

### ج- تاثیرات گازها در شرایط منطقه:

گاز هایی که از سوخت های فسیلی و پس مانده ی کارخانه ها متصاعد می شوند، ممکن است دارای اسید های آلی اکسید گوگرد  $SO_2$  و  $H_2S$  باشند. این نوع گاز ها به بتن تازه ساخته شده و نمناک آسیب می رسانند. اگر گاز کارخانه ها، پیوسته در بتن اثر کنند، در هوای نمناک و یا در محیط مرطوب شده توسط آب دریا با گذشت زمان به بتن آسیب می رسانند. بتن اگر نمناک باشند، گازهای ایجاد شده از سوخت خودروها در مرور زمان در پوشش بتنی تنخل ها اثر نامطلوب می گذارند. (کربناسیون ناشی از رسوب گاز کربنیک در داخل بتن).

### د- واکنش های قلیایی

واکنش شیمیایی بین هیدروکسید های قلیایی موجود در بتن که عمدتاً ناشی از سیمان می باشند با اجزای واکنش پذیر سنگدانه ها را واکنش های قلیایی سنگدانه ها می نامند. واکنش های قلیایی سنگدانه ها یکی از علل متداول آسیب دیدگی سازه های واقع در محیط های مرطوب مانند سدها، پایه های پل ها و دیوار دریایی می باشد.

بعضی مواد موجود در سنگدانه ها نظیر مواد واکنش دار قلیایی و ماده معدنی لمونتات بویژه در مجاورت آب دریا در طولانی مدت فرآورده های جدیدی خواهند داشت که باعث میگردند بتن دچار حجمی بزرگتر از حجم اولیه شده و فشار انبساط ناشی از آن بافت داخلی بتن را تحت تاثیر قرار دهد. بیشترین مواد واکنش دار قلیایی موجود در سنگدانه ها شامل مواد واکنش دار سیلیکای قلیایی و مواد واکنش دار کربنات قلیایی میباشند.

### تاثیرات آب دریا روی بتن مستغرق و بتن پاششی و یا بتن جزر و مدی:



## اولین کنفرانس بین المللی صنعت سیمان، انرژی و محیط زیست (۲۳ الی ۲۵ بهمن ۱۳۹۱)

1<sup>st</sup> International Conference on Cement Industry,  
Energy and Environment (CIEE), 11-13 Feb. 2013

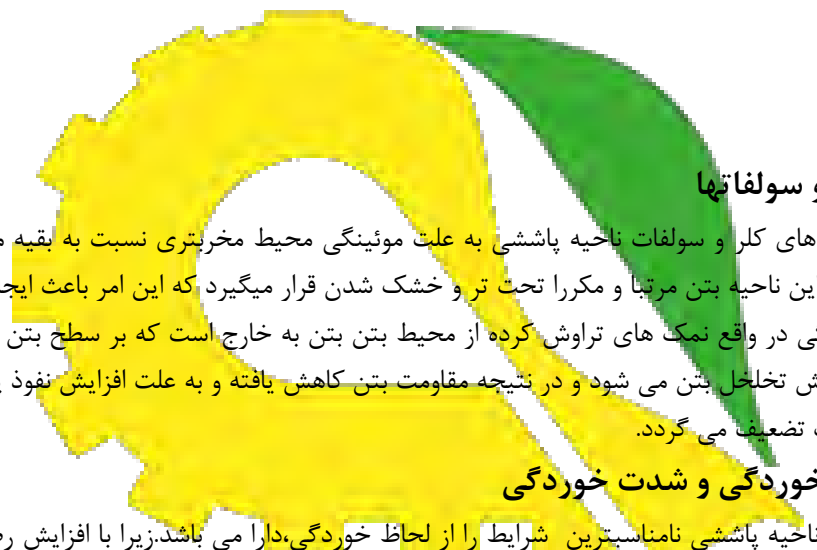
ذکر تاثیرات آب دریا تحت هر یک از شرایط مستلزم انجام آزمایشات پیچیده می باشد. که این آزمایشات در سطح جهان بارها به انجام رسیده است که در سال ۲۰۰۵ در دانشگاه صنعتی سهند تحقیقی صورت گرفت که در آن دوام بتن مسلح حاوی پوزولانهای مختلف که در معرض شرایط متفاوت محیطی شبیه سازی شده در آزمایشگاه: مغروق و جزر و مد قرار داده شده بودند، در مدت ۶ ماه بررسی شده است. [5]

در سال ۲۰۰۷ نتیجه یک کار تحقیقاتی در سواحل ۱۱ کشور در مقاله ای تحت عنوان "اثرات محیطی بتن مسلح در سواحل" منتشر شده است. [6]

در سال ۲۰۰۸ مقاله به عنوان "اثرات ناحیه جزر و مدی خلیج فارس بر روی بتن حاوی میکروسیلیس" توسط محققین دانشگاه کاونتری منتشر شده است. و آزمایشات بسیار دیگری که اکثرا به مخرب بودن ناحیه پاششی اشاره دارند. [8]

### الف- مقاومت فشاری

از نظر مقاومت فشاری کمترین مقاومت را به ترتیب در ناحیه پاششی و سپس در ناحیه جزر و مدی و در نهایت در ناحیه مستغرق داریم.



### ب- کلریدها و سولفاتها

از نظر نفوذ یون های کلر و سولفات ناحیه پاششی به علت موئینگی محیط مخربتری نسبت به بقیه محیط ها دارد و آن به این دلیل است که در این ناحیه بتن مرتبا و مکررا تحت تر و خشک شدن قرار میگیرد که این امر باعث ایجاد شوره یا شوره زدگی می شود. این شوره زدگی در واقع نمک های تراوش کرده از محیط بتن به خارج است که بر سطح بتن رسوب می کند، تراوش در حد زیاد باعث افزایش تخلخل بتن می شود و در نتیجه مقاومت بتن کاهش یافته و به علت افزایش نفوذ پذیری در برابر حملات عناصر شیمیایی مخرب تضعیف می گردد.

### ج- پتانسیل خوردگی و شدت خوردگی

گفته شده است ناحیه پاششی نامناسبترین شرایط را از لحاظ خوردگی، دارا می باشد. زیرا با افزایش رطوبت و مقدار کلر آزاد در بتن و وجود اکسیژن کافی شدت خوردگی افزایش می یابد. گرچه پتانسیل خوردگی آرماتور بسیار بالاست اما میزان خوردگی به علت وجود اکسیژن ناچیز است.

### پوششهای حفاظتی سازه های بتنی

پوششهای حفاظتی سازه های بتنی بر دو نوعند :  
پوششهای سطحی و پوششهای نفوذی یا دائمی

#### ۱- پوشش های سطحی:

این نوع پوششها ، سطحی پلاستیک و مقاوم بر روی سطح کار تشکیل می دهند و آن را از محیط خورنده جدا می کنند . اگر به هر دلیلی این پوششها آسیب ببینند و زخمی شوند یا از سطح کار کنده شوند ، بتنی که در زیر آنها قرار گرفته در اثر عوامل

خورنده تخریب میشود. ضمناً این نوع پوششها از میلگرد داخل بتن حفاظت نمیکند و اگر رطوبت از سطح دیگر بتن بداخل نفوذ کند میتواند میلگرد را مورد تهاجم قرار دهد. این نوع پوششها خود به دو دسته بزرگ تقسیم میشوند:

**الف:** پوششهاییکه از طریق پاشش یا قلم مو بر سطح کار اجراء می شوند و ماده اساسی حافظ سازه بتنی رزینهای ترموست می باشد. رزین هائیکه در اثر حرارت سخت می شوند، نظیر: پلی استر، اپوکسی و غیره.

**ب:** پوششهای سطحی که بصورت ورقه پلاستیکی آماده و از جنس ترموپلاست بصورت ساده یا گیره دار می باشند. نظیر پی و ر سی، پلی اتیلن و غیره.

## ۲- پوشش های نفوذی یا دائمی:

این دسته از پوششها بر خلاف دسته اول فعالیت خود را تنها به سطح محدود نکرده و می توانند از سطح شروع و با نفوذ در عمق بتن بعلت خاصیت اسمزی لوله های موئینه بتن و در اثر واکنشهای شیمیایی با اجزاء تشکیل دهنده آن، کریستالهای جامدی را تشکیل دهند و در نتیجه حفره های موبین داخل بتن را پر کرده و ضمن جلوگیری از نفوذ آب یا مواد خورنده شیمیایی به داخل بتن از میلگرد داخل آن نیز محافظت بعمل آورند. زیرا علاوه بر ضد آب کردن بتن به آن اجازه تنفس می دهند و با خروج رطوبت از آن میلگرد داخل بتن از تهاجم عوامل خورنده، که آب محیط مساعدی برای نفوذ این عوامل فراهم میکند، مصون می ماند و در واقع یک نوع حفاظت کاتودیک نیز انجام می دهند.

## خوردگی و راه کارهای آن:

خوردگی چیست؟ خوردگی در زبان فارسی ترجمه واژه ای انگلیسی (Corrosion) است که معنای آن جویده شده و گاز گرفته شده است. به نظر می رسد ظاهر قطعه خورده شده، این تداعی معنایی را سبب شده باشد. برای بیشتر مردم، خوردگی با مصادیقش شناخته می شود، از قبیل زنگ زدگی و سیاه شدن قاشقهای نقره ای. در واقع خوردگی همه اینها هست، اما به تنهایی هیچ یک نیست. بطور مثال، زنگ زدگی فقط به خوردگی آلیاژهای آهن اطلاق می شود. استاندارد ایزو ۸۰۴۴، خوردگی را بدین شکل تعریف می کند: « واکنش فیزیکی - شیمیایی متقابل بین فلز و محیط اطرافش که معمولاً دارای طبیعت الکتروشیمیایی است و نتیجه اش تغییر در خواص فلز می باشد. این تغییرات خواص ممکن است منجر به از دست رفتن عملکرد فلز، محیط یا دستگاهی شود که این دو، قسمتی از آن را تشکیل می دهند.» خوردگی، اثر تخریبی محیط بر فلزات و آلیاژها می باشد. خوردگی، پدیده ای خودبه خودی است و همه مردم در زندگی روزمره خود، از بدو پیدایش فلزات با آن روبرو هستند. در واقع واکنش اصلی در انهدام فلزات، عبارت از اکسیداسیون فلز است. فلزات در اثر اصطکاک، سایش و نیروهای وارده دچار تخریب می شوند که تحت عنوان خوردگی مورد نظر ما نیست. همان طور که گفته شد خوردگی یک فرایند خودبخودی است، یعنی به زبان ترمودینامیکی در جهتی پیش می رود که به حالت پایدار برسد. [۷] اگر آهن را در اتمسفر هوا قرار دهیم، زنگ می زند که یک نوع خوردگی و پدیده ای خودبه خودی است. انواع مواد هیدروکسیدی و اکسیدی نیز می توانند محصولات جامد خوردگی باشند که همگی گونه فلزی هستند. ترمودینامیک و خوردگی ترمودینامیک یکی از رشته های فیزیکی - شیمی، است. یکی از ویژگی های علم ترمودینامیک این است که می تواند پیش بینی کند که آیا واکنشهای خاصی رخ خواهند داد یا نه. تعیین زمانی واکنشی که



# اولین کنفرانس بین المللی صنعت سیمان، انرژی و محیط زیست (۲۳ الی ۲۵ بهمن ۱۳۹۱)

1<sup>st</sup> International Conference on Cement Industry,  
Energy and Environment (CIEE), 11-13 Feb. 2013

ترمودینامیک، انجام آن را پیش بینی می کند، موضوع علم سینتیک است. خوردگی را می توان میل ترمودینامیکی برای بازگشت به اصل خود فلز دانست و آن را چنین توضیح داد: فلزات اکثرا به شکل ترکیبات شیمیایی در سنگهای معدنی موجود هستند. فلز در این حالت به خاطر وضعیت ترمودینامیکی خود، حالت پایدار دارد، یعنی از نظر ترمودینامیکی اگر نیرویی از خارج بر سنگ معدن وارد نشود، فلز میل دارد که در سنگ بماند و حالت ترکیبی خود را حفظ نماید. وقتی سنگ معدن از معدن جدا می شود، طی فرآیندهای خاصی، فلز از سنگ استخراج می شود و به حالت فلز خالص در می آید. عمل استخراج فلز، از نظر شیمیایی یک فرآیند الکترون گیری یا احیا به حساب می آید. به این ترتیب فلز موجود در سنگ معدن، الکترون می گیرد و به حالت فلز خالص در می آید. اما در اینجا وضعیتی ناگوار وجود دارد: الکترونیایی که طی فرآیند استخراج گرفته شده اند، برای فلز به شکل مهمان ناخوانده در می آیند. فلز علاوه بر الکترونیایی که خود دارد، الکترونیهای زیادتری را نیز طی استخراج به سوی خود فرا خوانده، با مهمان کردن الکترونیهای اضافی از چنگ سنگ گریخته است. اما این مهمانان تبدیل به ناخواستگانی شده اند که فلز دائما در جستجوی راهی برای بیرون راندن آنهاست. به زبان ترمودینامیکی، بی قراری فلز را ناپایداری ترمودینامیکی می نامند. هنگامی که فلز موفق به از دست دادن الکترون می شود، واکنش اکسیداسیون رخ می دهد و می گویند خوردگی اتفاق افتاده است. وقتی فلز خورده شد، آنچه از واکنش باقی می ماند (اصطلاحا محصولات خوردگی) به لحاظ ترمودینامیکی پایدار خواهد بود و از این نظر مانند فلز در حالت معدنی (در حالتی که به شکل ترکیب در سنگ معدن وجود داشت) رفتار می کند. جالب آنکه از نظر شیمیایی نیز محصولات خوردگی مثل سولفات آهن، اکسید روی و غیره، همان ترکیباتی هستند که در سنگ معدن فلز یافت می شود. خوردگی، یک واکنش طبیعی از آنچه گفته شد، می توان نتیجه گرفت که خوردگی یک واکنش طبیعی است و انجام می شود. اما چنانکه خواهیم دید، خوردگی دارای زیانهای بسیاری است که ما را وادار می کند تا ترجیح دهیم این واکنش انجام نشود. انجام نشدن خوردگی مثل آن است که بخواهیم آبشاری به جای آنکه از بالای صخره به پایین بریزد، از پایین به بالا بریزد. اگر چه امکان ندارد که ریزش آبشار را وارونه کنیم، اما خواهیم دید که روشهایی وجود دارند که با استفاده از آنها می توان نه تنها خوردگی را مهار کرد، بلکه آن را برعکس نمود فرآیند خودبه خودی و فرآیند غیر خودبه خودی خوردگی یک فرآیند خودبخودی است، یعنی به زبان ترمودینامیکی در جهتی پیش می رود که به حالت پایدار برسد. البته  $M+n$  می تواند به حالتیهای مختلف گونه های فلزی با اجزای مختلف ظاهر شود. اگر آهن را در اتمسفر هوا قرار دهیم، زنگ می زند که یک نوع خوردگی و پدیده ای خودبه خودی است. انواع مواد هیدروکسیدی و اکسیدی نیز می توانند محصولات جامد خوردگی باشند که همگی گونه فلزی هستند. پس در اثر خوردگی فلزات در یک محیط که پدیده های خودبه خودی است، اشکال مختلف آن ظاهر می شود. بندرت می توان فلز را بصورت فلزی و عنصری در محیط پیدا کرد و اغلب بصورت ترکیب در کانی ها و بصورت کلریدها و سولفیدها و غیره یافت می شوند و ما آنها را بازیابی می کنیم. به عبارت دیگر، با استفاده از روشهای مختلف، فلزات را از آن ترکیبات خارج می کنند. یکی از این روشها، روش احیای فلزات است. بعنوان مثال، برای بازیابی مس از ترکیبات آن، فلز را بصورت سولفات مس از ترکیبات آن خارج می کنیم یا اینکه آلومینیوم موجود در طبیعت را با روشهای شیمیایی تبدیل به اکسید آلومینیوم می کنند و سپس با روشهای الکترولیز می توانند آن را احیا کنند. برای تمام این روشها، نیاز به صرف انرژی است که یک روش و فرآیند غیر خودبه خودی است و یک فرآیند غیر خودبه خودی هزینه و مواد ویژه ای نیاز دارد. از طرف دیگر، هر فرآیند غیر خودبه خودی درصدد است که به حالت اولیه خود بازگردد، چرا که بازگشت به حالت اولیه یک مسیر خودبه خودی است. پس فلزات استخراج شده میل دارند به ذات اصلی خود بازگردند. در جامعه منابع فلزات محدود است و مسیر برگشت طوری نیست که دوباره آنها را بازگرداند. وقتی فلزی را در اسید حل می کنیم و یا در و پنجره دچار خوردگی می شوند، دیگر قابل بازیابی نیستند. پس خوردگی یک پدیده مضر و ضربه زننده به اقتصاد است.

**خوردگی از ۸ روش می تواند به سطوح فلزی حمله کند. این ۸ روش عبارتند از:**

- ۱- **حمله یکنواخت : Uniform Attack** در این نوع خوردگی که متداول ترین نوع خوردگی محسوب می شود ، خوردگی به صورتی یکنواخت به سطح فلز حمله می کند و به این ترتیب نرخ آن از طریق آزمایش قابل پیش بینی است .
- ۲- **خوردگی گالوانیک : Galvanic Corrosion** این نوع خوردگی وقتی رخ می دهد که دو فلز یا آلیاژ متفاوت ( یا دو ماده متفاوت دیگر همانند الیاف کربن و فلز ) در حضور یک ذره خورنده با یکدیگر تماس پیدا کنند . در منطقه تماس ، فرایندی الکترو شیمیایی به وقوع می پیوندد که در آن ماده ای به عنوان کاتد عمل کرده و ماده دیگر آند می شود . در این فرآیند کاتد در برابر اکسیداسیون محافظت شده و آند اکسید می شود .
- ۳- **خوردگی شکافی : Crevice Corrosion** این ساز و کار وقتی رخ می دهد که یک ذره خورنده در فاصله ای باریک ، بین دو جزء گیر کند . با پیشرفت واکنش ، غلظت عامل خورنده افزایش می یابد . بنابراین واکنش با نرخ فزاینده ای پیشروی می کند.
- ۴- **آبشویی ترجیحی : Selective Leaching** این نوع خوردگی انتخابی وقتی رخ می دهد که عنصری از یک آلیاژ جامد از طریق یک فرآیند خوردگی ترجیحی و عموماً با قرار گرفتن آلیاژ در معرض اسیدهای آبی خورده می شود . متداول ترین مثال جدا شدن روی از آلیاژ برنج است . ولی آلومینیوم ، آهن ، کبالت و زیرکونیم نیز این قابلیت را دارند .
- ۵- **خوردگی درون دانه ای : Intergranular Corrosion** این نوع خوردگی وقتی رخ می دهد که مرز دانه ها در یک فلز پلی کریستال به صورت ترجیحی مورد حمله قرار می گیرد . چندین عامل می تواند آلیاژی مثل فولاد زنگ نزن آستنیتی را مستعد این نوع خوردگی سازد؛ از جمله حضور ناخالصی ها و غنی بودن یا تهی بودن مرزدانه از یکی از عناصر آلیاژی .
- ۶- **خوردگی حفره ای : Pitting Corrosion** این نوع خوردگی تقریباً همیشه به وسیله یون های کلر و کلرید ایجاد می شود و به ویژه برای فولاد ضد زنگ بسیار مخرب است ؛ چون در این خوردگی ، سازه با چند درصد کاهش وزن نسبت به وزن واقعی اش ، به راحتی دچار شکست می شود . معمولاً عمق این حفرات برابر یا بیشتر از قطر آنهاست و با رشد حفرات ، ماده سوراخ می شود .
- ۷- **خوردگی فرسایشی : Erosion Corrosion** این نوع خوردگی وقتی رخ می دهد که محیطی نسبت به یک محیط ثابت دیگر حرکت کند ( به عنوان نمونه مایعی که درون یک لوله جریان دارد ) یک پدیده مرتبط با این گونه خوردگی ، Fretting است که هنگام تماس دو ماده با یکدیگر و حرکت نسبی آنها از جمله ارتعاش به وجود می آید . این عمل می تواند پوشش های ضد خوردگی را از بین برده و باعث آغاز خوردگی شود .
- ۸- **خوردگی تنشی : Stress Corrosion** این نوع خوردگی وقتی رخ می دهد که ماده ای تحت تنش کششی در معرض یک محیط خورنده قرار گیرد . ترکیب این عوامل با هم ، ترک هایی را در قطعه تحت تنش آغاز می کند .

## مقابله با خوردگی

مقابله با خوردگی بتن مسأله خوردگی فولاد در بتن از معضلات عمده کشورهای مختلف جهان است. این مسأله حتی در کشورهای پیشرفته همچون آمریکا، کانادا، ژاپن و بعضی کشورهای اروپایی هزینه های زیادی را برای تعمیر آنها به دنبال داشته است. به عنوان مثال در گزارش های اخیر بررسی پل ها در امریکا حدود ۱۴۰،۰۰۰ پل مسأله داشته اند. این مسأله در کشورهای در حال توسعه و در کشورهای حاشیه خلیج فارس بسیار شدیدتر بوده و سازه های بتنی زیادی در زمانی نه چندان طولانی دچار خوردگی و خرابی گشته اند. بررسی ها در این مناطق نشان می دهد که اگر مصالح مناسب انتخاب گردد، بتن با مشخصات فنی ویژه این مناطق طرح گردد، در اجرای بتن از افراد کاردان استفاده شود و سرانجام اگر عمل آوری کافی و مناسب اعمال شود،





# اولین کنفرانس بین المللی صنعت سیمان، انرژی و محیط زیست (۲۳ الی ۲۵ بهمن ۱۳۹۱)

1<sup>st</sup> International Conference on Cement Industry,  
Energy and Environment (CIEE), 11-13 Feb. 2013

بسیاری از مسائل بتن بر طرف خواهد گشت. به هرحال برای پیشگیری در سال های اخیر روش ها و موادی توصیه و به کار گرفته شده است که تا حدی جوابگوی مسأله بوده است.

## ۱- استفاده از آرماتورهای ضدزنگ

۲- آرماتورهای با الیاف پلاستیکی FRP: یکی از این روش ها است که به علت گرانی آن هنوز کاملاً توسعه نیافته است. به علاوه عملکرد دراز مدت این مواد باید پس از تحقیقات روشن گردد.

۳- حفاظت کاتدیک در بتن: می باشد با استفاده از جریان معکوس با آند قربانی شونده می توان محافظت خوبی برای آرماتورها ایجاد نمود. این روش نیاز به مراقبت دائم دارد و نسبتاً پرخرج است ولی روش مطمئنی می باشد. برای محافظت آرماتور در مقابل خوردگی، چند سالی است که از

۴- آرماتور با پوشش اپوکسی که چند سالی است مورد استفاده قرار می گیرد.

## ۵- ارائه یک روش کار آمد جهت کنترل خوردگی:

یکی از پیشرفته تکنولوژی روز جهت کنترل خوردگی، روش MCI یا به عبارتی بازدارنده خوردگی با خاصیت نفوذ و حرکت به سمت آرماتور است. MCI مخفف (Migratory Corrosion Inhibitor) و بمعنی بازدارنده خوردگی آلی از نوع الکل آمینه و کربوکسیلات با خاصیت مهاجرتی نفوذگری است که در صورت افزودن به بتن یا اسپری روی قفسه آرماتور و یا اسپری روی سطح بتن به داخل آن نفوذ و دور آرماتور یک لایه مولکولی ایجاد می کند در این تکنولوژی مواد نفوذگر باعث حفاظت آرماتور و بتن می شوند. امروزه تکنولوژی MCI برای جلوگیری از خوردگی میلگردهای فولادی مدفون در بتن رواج یافته است. این مواد نیز به صورت افزودنی تشکیل دهنده ملات بتن و یا اشباع سطح بتن بکار برده می شوند.

روش فوق تنها جایگزین حفاظت کاتدیک با مزایای تسهیل د اجرا-پایین بودن هزینه می باشد

تاریخچه مصرف این آرماتورها بویژه در محیط های خورنده نشان می دهد که در بعضی موارد این روش موفق و در پاره ای نا موفق بوده است. به هرحال اگر پوشش سالم بکار گرفته شود با این روش می توان حدود ۱۰ تا ۱۵ سال خوردگی را عقب انداخت. استفاده از ممانعت کننده ها و بازدارنده های خوردگی بتن نیز به دو دهه اخیر برمی گردد. مصرف بعضی از این مواد همچون نیترات کلسیم و نیترات سدیم جنبه تجارتي یافته است. به هر حال عملکرد این مواد در تاخیر انداختن خوردگی در تحقیقات آزمایشگاهی و نیز در محیط های واقعی مناسب بوده است. بازدارنده های دیگری از نوع آندی و کاتدی مورد آزمایش قرار گرفته اند ولی دلیل گرانی زیاد هنوز کاربرد صنعتی پیدا نکرده اند. برای محافظت بیشتر آرماتور و کم کردن نفوذپذیری پوشش های مختلف سطحی نیز روی بتن آزمایش و به کار گرفته شده است. این پوشش ها که اغلب پایه سیمانی و یا رزینی دارند با دقت روی سطح بتن اعمال می گردند. عملکرد دوام این پوشش به شرایط محیطی وابسته بوده و در بعضی محیط ها عمر کوتاهی داشته و نیاز به تجدید پوشش بوده است. روی هم رفته پوشش های با پایه سیمانی هم ارزانتر بوده و هم به علت سازگاری با بتن پایه پیوستگی و دوام بهتری در محیط های خورنده و گرم نشان می دهند. با پیشرفت روزافزون انقلاب تکنولوژیک به ویژه در تولید بتن های خاص برای مناطق و شرایط خاص می تواند از این بتن ها در ساخت و سازهای آینده استفاده نمود. دانش استفاده صحیح از مصالح، اجرای مناسب و عمل آوری کافی می تواند به دوام بتن ها در مناطق خاص بیفزاید. تحقیقات گسترده و دامنه داری برای بررسی دوام بتن های خاص در شرایط ویژه و در دراز مدت بایستی برنامه ریزی و به صورت جهانی به اجرا گذاشته شود. جنبه های اقتصادی فرایند خوردگی برآوردی که در مورد ضررهای خوردگی انجام گرفته، نشان می دهد سالانه هزینه تحمیل شده از سوی خوردگی، بالغ بر ۵ میلیارد دلار است. بعنوان مثال هزینه های خوردگی در خودروها) سیستم سوخت، رادیاتور، آگزوز، و بدنه) در حدود میلیاردها دلار است. بیشترین ضررهای خوردگی، هزینه هایی است که برای جلوگیری از خوردگی تحمیل می شود. بهر ترتیب خوردگی زیان اقتصادی عظیمی است و برای کاهش آن کارهای زیادی می توان انجام داد. برخی خسارات ناشی از خوردگی عبارتند از: - ظاهر

نامطلوب مانند خوردگی رنگ خودرو - مخارج تعمیرات و نگهداری و بهره برداری - خواباندن کارخانه، آلوده شدن محصول - نشت یا از بین رفتن محصولات با ارزش مانند نشت مخازن حاوی اورانیوم - اثر بر امنیت و قابلیت اعتماد. به هر ترتیب، همکاری نزدیکتر بین مهندسان خوردگی و دیگر مهندسين مواد و مهندسان طراح یک اجبار است. مهندس خوردگی باید از شروع پروژه عضوی از تیم طراحی باشد.

### نتیجه گیری:

- ۱- در صورت استفاده صحیح به میزان مشخصی از نیتريت کلسیم تاثیرات سوئی بر روی خواص بتن تازه و سخت شده نمی گذارد.
  - ۲- در کل می توان گفت که استفاده از نیتريت کلسیم پاسخ قطعی برای جلوگیری از پدیده خوردگی برای بتن های معمولی و نامرغوب با نسبت آب به سیمان بالا نموده و باید دنبال راه حل دیگری برای جایگزین کردن باشیم
  - ۳- مواد MCI تاثیر بسیار ناچیز بر تخلخل، زمان گیرش، اسلامپ، مقاومت در برابر یخبندان و غیزه دارد و گاهی کاملاً بی تاثیر است.
  - ۴- به طور کلی MCI سازگار با مصالح تشکیل دهنده بتن و افزودنی های آن می باشد و تاثیری بر طرح اختلاط بتن ندارد. و روشی سازگار برای جلوگیری از خوردگی بتن می باشد.
  - ۵- یون سولفات در محیط های خورنده باعث کاهش مقاومت فشاری می شود که باید با بررسی یکی از راهکارهای مناسب بالا و انتخاب آن به عنوان روش بهینه و کارآمد در جهت جلوگیری از خوردگی بتن برای ارتقا سازه های بتنی گام برداریم.
  - ۶- به علت اینکه ناحیه پاششی دارای اثرات مخرب بیشتری است باید حفاظت های ویژه ای را برای این ناحیه نسبت به نواحی دیگر در نظر گرفت.
  - ۷- سازه های بتنی دارای میکروسیلیس و نسبت آب به سیمان کمتر، دارای عمر سازه ای بیشتری می باشند.
  - ۸- مواد الیاف پلیمری تاثیر بسیار خوب و به سزایی در جهت کاهش خوردگی دارند که به علت گران بودن و مقرون به صرفه نبودن به طور عموم مورد توجه قرار نگرفته است.
- در پایان باید به این نکته توجه داشت که شرایط اقلیمی منطقه مورد بحث (خلیج فارس) بسیار ویژه است و تصمیم گیری و ارایه یک راهکار ثابت به منظور یکسان سازی پروژها امکان پذیر نیست. لذا تحت شرایط منطقه ای و نوع و اهمیت پروژه می توان بررسی های تخصصی توسط افراد مجرب به عمل آید و پس از انجام تحقیقات و آزمایشات یک راهکار مناسب ارایه کرد.



### مراجع:

[۱] تکنولوژی بتن، پرفسور نویل و دکتر بروکس، ترجمه دکتر علی رمضانپور و مهندس محمد رضا شاه نظری انتشارات علم و صنعت ۱۱۰، تهران ۱۳۸۶

[۲] مهندسی خوردگی، دکتر احمد ساعتچی، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی اصفهان، چاپ اول ۱۳۸۷

[3]-Allen , R.T.L , "Concrete in coastal structures" , 8991 , Thomas Telford

[4]-M.N.Haque , H. Al-Khaiaf , B. John , " Climatic zones\_ A prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf " , Building and Environment journal PP.0482-0486 4 April 0226.

[5]- 85-H. Karbalayi Faraji, H. Afshin, " Durability of Reinforcement Concrete Containing Pozzolans In Oroomiyeh Lake Environment" , M.Sc. Thesis Sahand University of Technology, 0225. (In Persian)

[6]- ]-Ping Gu, .J.J. Beaudoin, Min-Hong Zhang, and V. M. Malhotra, " Performance of Reinforcing Steel in Concrete Containing silica fume and Blast- Furnace Slage Poned with Sodium Chloride Solution " , ACI Materials Journal / May-June , 0222.

[7]- A.Benture, S.Diamond and N.S.Berke, " Corrosion of steel in concrete" , 8911.

[1]- 41-E. Ganjian, H. Sadaghi Pouya, " The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag " , ELSEVIER, Construction and Building Materials, Available online, 0221.

[9] Maruya, T.Tangtermsirikui S. " Simulation of chloride penetration in to hardened concrete " , Third conment / aui International conference on Durability of

اولين كنفرانس بين المللي صنعت سيمان، انرژي و محيط زيست  
(۲۳ الي ۲۵ يهمن ۱۳۹۱)

1<sup>st</sup> International Conference on Cement Industry,  
Energy and Environment (CIEE), 11-13 Feb. 2013



concrete, france sp 845-07, 8994, PP.589.

[82]-Dubravka Bjegovic and Boris Miksic, FNACE- "MCI Protection of Concrete

