

## خوردگی بتن در آب دریا

سودابه براهویی-دانشجوی کارشناسی عمران دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان (1)  
بهاره وکیلی دستجرد-دانشجوی کارشناسی عمران دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه س و ب (2)  
افسانه براهویی - کارشناس عمران-فارغ التحصیل دانشگاه سیستان و بلوچستان

### چکیده:

آسیب دیدگی و تجزیه ساختارهای بتنی تحت تاثیر سیالات خورنده، گازهای مرطوب و غیره به عنوان خوردگی بتن شناخته شده است. خوردگی بتن یک فرایند شیمیایی و گاهی فیزیکی-شیمیایی است. در حالی که فرایند خوردگی بتن مسلح، صرفاً الکترو شیمیایی است. بسیاری از اسکله های دریایی، تسهیلات بارانداز و سکوهای نفتی در خلیج فارس که با بتن ساخته شده اند در معرض محیط دریایی قرار گرفته و در نتیجه خورده می شوند. در این مقاله سعی بر این است که با استفاده از آب دریای مصنوعی جایگزین محیط خلیج فارس، زمان مورد نیاز برای نفوذ یون های خورنده همانند کلر و اکسیژن به درون بتن اندازه گیری شود. همچنین تأثیر ضخامت پوشش بتنی بر سرعت خوردگی آرماتور نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. (M. Pakshir\_1999)

کلمات کلیدی: خوردگی بتن، آب دریا، سازه های دریایی

### مقدمه:

به دلیل فعالیتهای ساحلی در سالهای اخیر عملکرد بتن در محیطهای دریایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است و محققان بسیاری به این موضوع پرداخته اند. (P.K. Mehta\_1993 – P. Rodriguez \_ 1994 – O.A. Kayyali- 1995). فعل و انفعال بین بتن و محیط سرویس بتن می تواند منجر به تخریب سازه های بتن مسلح شده و در بسیاری موارد سازه را برای عمل بر اساس مقاصد طراحی آن نامناسب سازد. این فعل و انفعال اغلب از نوع شیمیایی محیطی است. (D. Bawega\_1993)

برای بتن در محیط های دریایی به نظر می رسد رابطه مستقیمی بین تراوایی پایین قدرت بالا و دوام خوب وجود دارد. بنابراین سازه های دریایی مانند ساختمان های بندر و سکوهای ساحلی با استفاده از بتن با کیفیت بالا ساخته می شوند. (H. H. Haynes\_1982)

به طور کلی بتن دارای خلل و فرج با اندازه های متفاوت از چند آنگستروم تا چندین میلیمتر است. این سیستم خلل و فرج کم و بیش از محلول هایی شامل مقادیر متفاوت نمک های مختلف انباشته می شود. مشکلات مربوط به کاربرد بتن مسلح در محیط های دریایی کاملاً شناخته شده اند. این مشکلات سبب شده اند تحقیقات گسترده ای در رابطه با خوردگی فلزات در سازه های بتنی صورت گیرد.

آرمانور بندی بتن معمولاً توسط محیط قلیایی شدید بتن محاط کننده ( $PH = 11/5$ ) در برابر خوردگی محافظت می شود. که بنابر این فرایند تجزیه را محدود می کند. - (C. Androde \_ 1988 – P. Lambert \_ 1991) در برابر خوردگی محافظت می دهد یا حضور مقادیر کمی از یون کلراید در بتن اطراف فلز ، نیز اتفاق می افتد . عمق نفوذ کلراید تابعی از قابلیت تراوایی رطوبت و میزان اکسیژن نزدیک سطح فلز است . در غیاب هر کدام از این عوامل خوردگی اتفاق می افتد . (J. A. Gonzalez \_ 1998 – C. L. Page \_ 1987) خوردگی فولاد باعث می شود فلز در مراحل مختلف به اکسید ها و هیدروکسید های ترکیبی آهن تبدیل شود. (C. A. Lawrence \_ 1994)

این فرایند باعث افزایش حجم می شود . آسیب های ناشی از خوردگی همچنین می تواند به صورت ترک های موازی با جهت قرار گیری میلگرد در بتن دیده شود ، که در نهایت باعث ترک خوردگی و خورد شدن بتن می شود که در نتیجه آن سرعت خوردگی افزایش می یابد. خوردگی فولاد مسلح کننده بتن از فرایند الکتروشیمیایی همراه با واکنش های آندی و کاتدی نتیجه می شود (K. Olkado \_ 1992) ر اثر فرایند های ناشی از خوردگی ، آهن تبدیل به یون های هیدراته با دو الکترون می شود . این دو الکترون جهت تطبیق با واکنش های کاتدی به ناحیه مثبت انتقال می یابد .

## آزمایش

### آزمایشات برای دو هدف طراحی شدند :

۱. محاسبه مدت زمان نفوذ عوامل خوردگی در عمق پوشش بتنی برای رسیدن به فولاد مسلح کننده
  ۲. بررسی اثر عمق کاور بتنی برای حالت جایگذاری فولاد به صورت متقارن
- میله های فولادی به عمق  $50 \text{ cmg/l}$  درون ملات فرو برده شده و برای اجتناب از به وجود آمدن سل های واکنشی ، انتهای خارجی میله های فرو رفته در ملات توسط نوارهای چسبناکی عایق بندی شد. آزمایشها در ملاتی که تا حدودی در آب دریا با ترکیبات ارائه شده در جدول 1 غوطه ور شده بود، انجام شد.

NaCl	MgCl <sub>2</sub> . 6H <sub>2</sub> O	MgSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> . 2H <sub>2</sub> O	KHC O <sub>3</sub>
g/l ۳۲	۶ g/l	۵ g/l	۱/۵ g/l	g/l ۰/۲

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آب دریای مورد استفاده در آزمایش

نمونه ملات از سیمان پرتلند معمولی و نسبت آب به سیمان  $0/4$ ،  $0/5$ ،  $0/6$ ،  $0/7$  و نسبت سیمان به ماسه  $1:3$  ساخته شده بود. مصالح ریزدانه مورد استفاده از سنگ خرد شده در شرایط SSD (مصالح اشباع شده با سطح خشک) با بتن مخلوط شدند و ماسه از نوع ماسه معمولی رودخانه ای بود. نمونه ها در اندازه های  $80 \times 55 \times 20$  با دو میله گرد از فولاد کربن دار با قطر  $7 \text{ mm}$  ساخته شدند .

نمونه ها به مدت ۲۸ روز در دمای  $20$  درجه خیسانده شدند . جهت انجام آزمایش به جریانی با شدت ثابت ( $\text{ma/mm}^2$ ) در فولاد مسلح کننده نیاز بود. نمونه به مدت چندین روز در تانک آب مقطر- جهت یکنواخت شدن رطوبت بتن قبل از اعمال جریان ثابت- قرار گرفت. جریان مستقیم از طریق یک یکسوساز DC با ولتاژ ثابت به نمونه اعمال شد و از یک پتانسیل متر برای کنترل جریان موثر بر هر نمونه استفاده شد . جریان مستقیم طوری تنظیم شده بود که میله های فولاد مسلح کننده به عنوان قطب - و یک میله فولاد ضد زنگ که به عنوان الکتروود شاهد استفاده می شد به صورت قطب + مورد استفاده قرار می گرفت. پتانسیل هر یک از نمونه ها به صورت روزانه توسط یک الکتروود

جیوه سفید اشباع شده با یک ولت‌متر، در دو نوبت اندازه‌گیری می‌شد و هر جریانی توسط پتانسیل متر تعدیل و تطبیق می‌گردید.

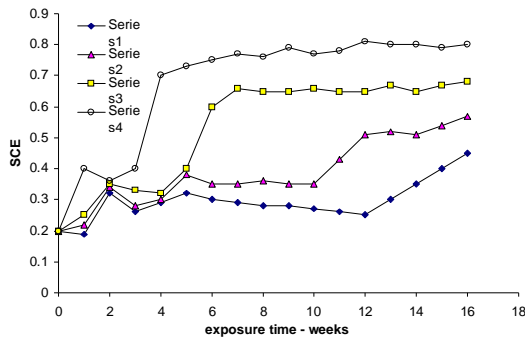
قرائت‌های پتانسیل بر روی نموداری نمایش داده می‌شدند که بیانگر قطبش پتانسیل فولاد مسلح‌کننده به علاوه افت ولتاژ سیمان محاط‌کننده در طی فرایند خوردگی بود. جهت مطالعه تأثیر ضخامت‌های مختلف بر سرعت خوردگی فولاد مسلح‌کننده نمونه‌های دال با ابعاد  $125 \times 300 \times 200$  mm ساخته شده از سیمان پرتلند با نسبت آب ۰/۵ ساخته شدند.

هر نمونه شامل دو الکتروود فولاد کربنه با قطر  $0/3$  mm بود که در اعماق چهار گانه  $40$ ،  $30$ ،  $20$ ،  $10$  mm نشانده شدند. اندازه‌گیری‌های خوردگی الکتروشیمیایی میله‌های فولادی کار گذاشته شده، توسط اندازه‌گیری مقاومت قطبشی و پتانسیل باقی مانده انجام می‌گرفت. سرعت خوردگی با استفاده از مقدار مقاومت قطبشی و استفاده از فرمول Stern-Geary محاسبه می‌شد.  $I_{corr}$  با این فرض اندازه‌گیری می‌شود که هر دو ثابت نهایی  $Ba$  و  $Bc$  دارای مقدار  $120$  mV/10 باشند.

$$I_{corr} = I_{appl} / 2.3 dE ( BcBa/(Bc+Ba)) \quad (1)$$

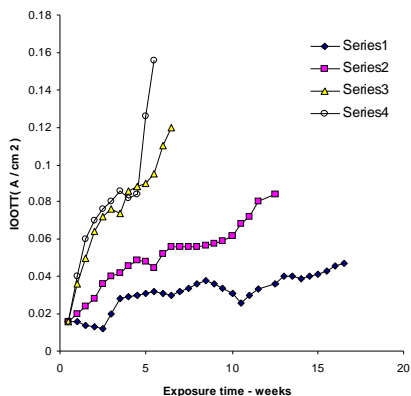
### نتایج و بررسی:

خوردگی آرماتور بتن در آب دریا با دو مشخصه پتانسیل و جریان میله‌ها به عنوان تابعی از اثر زمان بیان می‌شود. دما و میزان اکسیژن آب به طور مرتب چک می‌شدند. میزان دما بسته به تغییرات زمانی در طول سال بین  $25$ – $20$  درجه متغیر بود. اما میزان اکسیژن در تمام زمان‌ها در حد  $7$  PPL ثابت نگهداشته می‌شد. پتانسیل الکتروشیمیایی توسط یک میلی ولت‌متر با مقاومت بالا در مقابل یک الکتروود جیوه سفید اندازه‌گیری می‌شد. شکل ۲ نمودار میزان پتانسیل نیمه پیل را در برابر رفتار زمانی فولاد مورد تهاجم قرار گرفته، نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمودار پتانسیل خوردگی در برابر زمان

مطابق آزمایشات، زمان مورد نیاز فولاد مسلح‌کننده برای عملکرد در پتانسیل فعال در حدود  $3/5$  هفته برای نسبت آب به سیمان  $0/7$  است. این میزان برای نسبت  $0/4$  به  $13$  هفته افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر مدت زمان لازم برای عوامل خورنده جهت رسیدن به میله‌های فولادی برابر است با زمانی که فولاد مسلح‌کننده از پتانسیل انفعالی به پتانسیل فعال تغییر حالت می‌دهد. که این زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار کافی یون کلراید و اکسیژن برای خورده شدن میله موجود باشد. بنا بر این می‌توان فرض کرد که نسبت آب به سیمان بالا بتن را به آن اندازه کافی جهت نفوذ عوامل خورنده تراوا می‌کند. به طور کلی کاهش روند خوردگی با کاهش نسبت آب به سیمان مشاهده می‌شود.

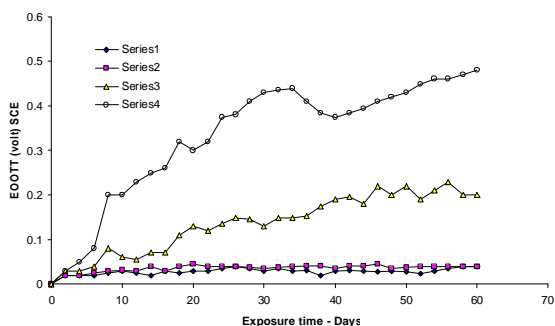


شکل ۳- نمودار دانسیته جاری خوردگی در برابر زمان

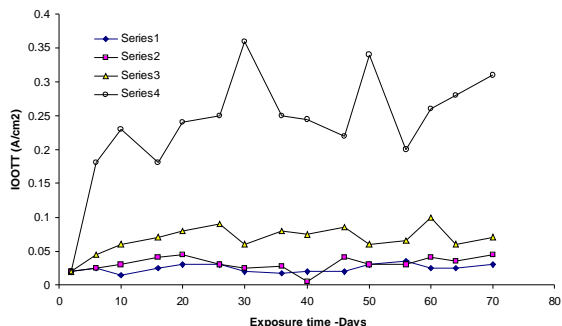
جهت تسریع روند خوردگی یک پتانسل الکتریکی ثابت با مقدار  $3/5$  ولت به میله های فولادی موثر است. ترک های ناشی از خوردگی بعد از  $14$  هفته برای نسبت آب به سیمان  $0/4$  ،  $10/5$  هفته برای  $0/5$  ،  $4/5$  هفته برای  $0/6$  و  $4$  هفته برای  $0/7$  مشاهده شدند.

بنابر این شیب تند جریان در شکل ۳ مربوط به زمانی است که ظهور ترک ها مشاهده شده . به هرحال شکست نمونه های بتنی در اثر خوردگی فولاد مسلح کننده با جریان اولیه میله های فولادی مربوط است و همان طور که دیده می شود جریان داخلی میله های فولادی به نسبت آب به سیمان بتن بستگی دارد. بنا براین برای فولاد مسلح کننده کار گذاشته شده در بتن با نسبت  $W/C$  پایین تر ، جریان واقعی کمتر بوده و مدت زمان رسیدن عوامل خوردگی به میله های فولادی و شکست در اثر خوردگی بیشتر است .

نتایج اندازه گیری پتانسیل خوردگی و جریان خوردگی میله های مسلح کننده بعد از گذشت  $70$  روز از انجام آزمایش در اشکال ۴ و ۵ نشان داده شده است .



شکل ۴- نمودار پتانسیل خوردگی در برابر زمان



شکل ۵- نمودار دانسیته جاری خوردگی در برابر زمان

برای مورد ضخامت کاور برابر ۱۰ mm درجه خوردگی بیشتر بوده و در نمونه خوردگی میله های فولادی ترکی به اندازه ۵/۱۰ mm ایجاد کرده . با افزایش ضخامت کاور به ۴۰ mm خوردگی بسیار کمی در فولاد مسلح کننده مشاهده شد .

آزمایش بصری میله های مسلح کننده بعد از ۷۰ روز نشان داد که رسوب سفید رنگی بر سطح ته نشین شد و مقدار این رسوب به عمق کاور بستگی دارد . در آزمایشات میکروسکوپی مشخص شد که این رسوب دارای ساختار بلورین بسیار چگال است . آنالیز شیمیایی نشان داد که رسوب شامل کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم است .

### نتیجه :

از آنجایی که آب دریا حاوی مقادیر زیادی کلراید در شکل های مختلف و نمک سولفات است دوره نخست حمله زمانی است که یون های کلراید و سولفات در پوشش بتنی نفوذ کرده و به میله های فولادی مسلح کننده می رسند . در این دوره فولاد در حالت انفعالی است . یکی از شکل های معمول حمله عوامل خوردنده در مرحله آغازین خوردگی سوراخ کنندگی است .

۱. تا زمانی که مقدار موجود جریان کاتدیک ثابت است علیرغم وجود شمار زیادی سوراخ ، متوسط جریان آندیک پایین است . اثر مهم سوراخ شدن این است که اکسیژن مصرف می شود ، پتانسیل فولاد به سمت مقدار منفی گرایش می یابد و خوردگی اتفاق می افتد . بنابراین اکسیژن یکی از مهمترین عوامل کنترل خوردگی فولاد در بتن است . نسبت آب به سیمان بالاتر را به اندازه کافی برای نفوذ کردن یون ها به میله فولادی ، تراوا می کند . و در نتیجه اثر فولاد مسلح کننده را از بین می برد . در نتیجه زمانی که نسبت W/C افزایش می یابد پتانسیل میله های فولادی کاهش یافته و مقاومت الکتریکی بتن مرطوب کم می شود که منجر به تسریع فرایند خوردگی می گردد .

### منابع :

- c. androde , “ corrosion of steel in concrete” monitoring techniques, report of the technical committee 60-csc (1998)
- d. bawega, h. roper & v. sirivivatnanon , “cement & concrete”, res. 23 , (1993)

- j. a. gonzales , a. molina , e. otteero0 & w. lopez , “mag. Concr.” res., 42 ,no. 150 ,(1998)
- h. h. haynes , “american concrete institue , ditroit”, sp ,65 (1982)
- o. a. kayyali & m.n. haque, “mag. Concr. res.”, 47 ,no. 172 ,(1995)
- p. lambert , c. l. page & p. r. w. wassie , “mateerials & structures ‘ ,(1991)
- p. lambert , c. l. page & j. mater , “sci .,22(1987)
- c. a. lawrence , “ british ceramic proceedings , cement & concrete association” , uk , no 35 (1994)
- p. k. mehta & p. j. monterio , “concrete: structure , properties & materials” 2<sup>nd</sup> ed., prentice hall englewood cliffis, (1993)
- k. olkado & t. miyagava , “american concrete institue , ditroit”, sp ,65 (1992)
- m. pakshir & s. esmaili, “internasional jornal of engineering” vol. 12 , no. 3, (1999)
- p. rodriguez &e. ramirez & a. gonzalez , “mag. Concr.” res., 46 ,no. 167 ,(1994)