

## نقش اسپیسر بر خوردگی فولاد تیرهای بتن مسلح در شرایط جزر و مدی خلیج فارس

سامان طیبی خرمی<sup>۱\*</sup>، محمدرضا محمدی زاده<sup>۲</sup>، سید طاها طباطبایی عقدا<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

۳- عضو هیات علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی - رئیس واحد خلیج فارس، بندرعباس

tayebisaman@gmail.com    ۰۹۱۷۷۱۸۵۲۳۲

### چکیده

پایداری ودوام بتن از جمله مباحثی هستند که در اجرای هرچه بهتر سازه های بتنی همواره مطرح می باشندین موضوع در مناطق حاشیه ی خلیج فارس و همچنین در شرایط محیطی شدید بسیار حیاتی است. نفوذپذیری از مهمترین عوامل موثر بر کاهش دوام سازه های بتن مسلح است. کاهش راه های نفوذ املاح به داخل بتن، موجب افزایش دوام آن می گردد. رعایت پوشش بتن که به کمک اسپیسر امکان پذیر می باشد در کاهش خوردگی آرماتور نقش بسزایی دارد. ولی استفاده از اسپیسر به دلیل تشکیل اتصال ناقص با بتن منجر به افزایش نفوذپذیری موضعی شود. در این پژوهش به روش آزمایشگاهی اثر استفاده از انواع اسپیسری رایج پلاستیکی و بتنی با کیفیت های مختلف، بر پتانسیل خوردگی تیرهای بتن مسلح قرار گرفته در شرایط جزر و مدی خلیج فارس واقع در بندرعباس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از افزایش شدید پتانسی خوردگی در تیرهای دارای اسپیسر پلاستیکی نسبت به تیرهای با اسپیسر بتنی است.

کلید واژگان: اسپیسر بتنی، اسپیسر پلاستیکی، نفوذپذیری، خوردگی بتن مسلح، دوام بتن.

پایداری و دوام بتن از جمله مباحثی هستند که در اجرای هرچه بهتر سازه‌های بتنی همواره مطرح می‌باشند [۱]. خوردگی سازه‌های بتن مسلح در مناطق با شرایط محیطی فوق‌العاده شدید از جمله خلیج فارس و نواحی حاشیه آن منجر به کاهش چشم‌گیر عمر سازه در این مناطق شده است. عواقب ناشی از پدیده‌ی خوردگی منجر به صرف‌بخش قابل توجهی از بودجه کشور به ترمیم و یا بازسازی سازه‌های این مناطق می‌گردد. تحقیقات زیادی بر روی مشکلات ناشی از خرابی بتن و پیرو آن خوردگی فولاد در بتن انجام شده است [۲]. خوردگی آرماتور دارای رابطه‌ی مستقیم با نفوذپذیری بتن است.

در مورد تاثیر مولکول آب در سازه بتن از اولین روزهای ساخت و عمل‌آوری تا دیگر مراحل ساخت تحقیقات بسیاری انجام شده است. این موضوع در سالیان اولیه ساخته شدن بتن اهمیت بیشتری دارد. آب به دو گونه می‌تواند به بتن آسیب برساند: اولین قسمت مربوط به تاثیر مستقیم آب بر روی آرماتورهای فولادی بتن بوده که با خوردگی آنها باعث کاهش سطح مقطع موثر فولاد در بتن شده که ممکن است میلگردهای باقیمانده توان انجام وظایف مربوطه حتی با ضرایب اطمینان بالا را نداشته باشند. دومین آسیب مربوط به ماهیت این مولکول در حل کردن مواد مضر بتن مانند انواع کلریدها، سولفات‌ها، اسیدها و سایر مواد شیمیایی است که باعث سرعت در عمل زنگ زدن آرماتورها می‌شود. در نتیجه این پدیده منجر به کاهش دوام و طول عمر بتن در سازه‌های بتن مسلح می‌شود [۳]. همچنین تشکیل ترک عمیق در سازه‌های بتن مسلح به علت نقص در ساخت و یا بی‌توجهی به الزامات استاندارد، همچون استفاده از اسپیسری پلاستیکی، ممکن است منجر به افزایش نفوذ یون کلر و در نتیجه کاهش عمر پیش‌بینی شده‌ی سازه شود [۴].

تا مدت‌ها محققان قبل از پی بردن به اهمیت ساختار شیمیایی بتن، در برابر حمله مواد مهاجم خورنده، مهمترین پارامتر تعیین‌کننده انواع خرابی‌های بتن، مانند نفوذ سولفات‌ها، کلرورها، کربنات‌ها و سایر عوامل شیمیایی خورنده را میزان نفوذپذیری بتن می‌دانستند. در واقع معیار نفوذپذیری را عامل اصلی خسارت دیدن بتن، در برابر حمله مواد خورنده شیمیایی معرفی می‌کردند. گرچه هنوز محققان در مورد این که کدام یک از ساختارهای فیزیکی یا شیمیایی عامل مهمتری در بحث دوام بتن مسلح می‌باشد اختلاف نظر دارند ولی تقریباً این موضوع ثابت شده است، در صورتی که بتوان بتن ساخت که دارای نفوذپذیری کمتری باشد و املاح به راحتی در آن نفوذ نکنند، دوام بتن بالاتر خواهد بود [۵].

نفوذپذیری که مهمترین مشخصه برای دوام بتن است [۶] به مشخصات ریزساختار مانند اندازه، توزیع و ارتباط داخلی منافذ و ریزترک‌ها مربوط می‌شود [۷]. به عبارتی هر چه میزان نفوذپذیری بتن کمتر باشد می‌توان نفوذ عوامل تهاجمی به توده بتن و شروع واکنشهای تخریبی را کندتر عنوان نمود [۸]. مهمترین الزام در مقابله با عوامل مهاجم محیطی، رعایت پوشش بتنی آرماتور است که تنها به کمک استفاده از اسپیسر امکان پذیر است. علی‌رغم پژوهش‌های کثیری که جهت افزایش دوام بتن و عمر سازه‌های بتن مسلح انجام شده است، به اثر اسپیسر بر تشدید نفوذپذیری بتن در مکان قرارگیری اسپیسر کمتر توجه شده است. کیفیت اسپیسرهای پلاستیکی به جنس مصالح بکار رفته در ساخت آن، و کیفیت اسپیسرهای بتنی به مرغوبیت مصالح، طرح اختلاط و عمل‌آوری بتن مورد استفاده در ساخت اسپیسر وابسته است. هدف این پژوهش ثبت پتانسیل خوردگی تیرهای بتن مسلح قرار گرفته در شرایط جزر ومدی خلیج فارس واقع در بندرعباس می‌باشد. جهت انجام این تحقیق در مجموع ۳۶ تیر بتن مسلح با مقطع مربعی ۱۵ سانتیمتر و طول ۶۰ سانتیمتر ساخته شده و در ناحیه جزر و مدی از خلیج فارس قرار گرفت.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

## ۲-۱- مصالح مصرفی

## ۲-۱-۱- مصالح سنگی

مصالح سنگی، از معادن بندرعباس تامین شده است. مصالح سنگی به کار رفته در این پروژه شامل ماسه، شن ریز و شن درشت می‌باشد. جهت کنترل دانه بندی مصالح سنگی مصرفی از استاندارد ملی شماره ۳۰۲ استفاده شده است. آزمایش‌ها بیانگر تطبیق مصالح سنگی با این استاندارد می‌باشد.

## ۲-۱-۲- اسپیسر

## ۲-۱-۲-۱- اسپیسر بتنی

با توجه به اینکه اسپیسری بتنی عمدتاً به شکل استوانه‌ای ساخته می‌شوند، جهت ساخت اسپیسری بتنی بکار رفته در این پژوهش از قالب‌های استوانه‌ای (با جنس پی وی سی) استفاده گردید (شکل ۱). همچنین از طرح اختلاط اسپیسرهای مورد استفاده در پروژه‌ی طرح توسعه بندر شهید رجائی به عنوان طرح اختلاط مبنا بهره برده شد. این طرح اختلاط که در مقایسه با سایر طرح اختلاط‌های بکار رفته در پروژه‌های عمرانی از کیفیت بالاتری برخوردار است بر اساس طرح اختلاط بتن مصرفی در پروژه و ابعاد قالب اسپیسر تعیین شده است. در این پژوهش، در مجموع دو طرح اختلاط به شرح جدول ۱ ساخته شد. تفاوت این دو طرح اختلاط در نسبت آب به مواد سیمانی است. اسپیسرهای مرغوب (S) با  $\frac{W}{C} = 0.4$  و اسپیسرهای نامرغوب (C) با  $\frac{W}{C} = 0.5$  ساخته شدند.



شکل ۱- ساخت اسپیسرهای بتنی

جدول ۱- مشخصات طرح اختلاط بتن اسپیسرها

اسلامپ (cm)	فوق روان کننده (درصد وزنی مواد سیمانی)	مقدار شن درشت ( $kg/m^3$ )	مقدار شن ریز ( $kg/m^3$ )	مقدار ماسه ( $kg/m^3$ )	نسبت آب به مواد سیمانی	عیار مواد سیمانی ( $kg/m^3$ )	کد اسپیسر
۱۵	۰/۵	۰/۰	۶۷۶/۵	۱۰۶۷	۰/۴	۴۰۰	S
۱۷	۰/۰	۰/۰	۶۳۸	۱۰۰۶/۴	۰/۵	۴۰۰	C

## ۲-۲-۱-۲ اسپیسر پلاستیکی

اسپیسرهای پلاستیکی مورد استفاده در این پژوهش، تولید داخل می‌باشند که مطابق با استاندارد BS ۷۹۷۳-۱:۲۰۰۱ تولید شده‌اند. با توجه به اینکه اسپیسرهای پلاستیکی در مدل‌های متنوعی تولید می‌شوند، در این پژوهش از سه مدل کاربرد در سازه‌های بتنی به نام‌های ستاره ای<sup>۱</sup>، حرکت ۱<sup>۲</sup>، و حرکت ۲<sup>۳</sup> (شکل ۲) استفاده شد.



شکل ۲- اسپیسر، به ترتیب از راست به چپ، ستاره ای، حرکت ۱، حرکت ۲

## ۲-۱-۳ سایر مصالح

سیمان مورد استفاده در ساخت بتن مصرفی این پژوهش، سیمان پورتلند تیپ ۲، محصول شرکت سیمان داراب می‌باشد. آب مصرف شده در این پژوهش آب شرب شهر بندرعباس می‌باشد. فوق روان کننده مصرفی از نوع با پایه پلی کربوکسیلات و نام تجاری CP-WRM، محصول شرکت LG-chem می‌باشد.

## ۲-۲ طرح اختلاط

در این پژوهش، در مجموع دو طرح اختلاط به شرح جدول ۲ ساخته شد. طرح اختلاط منتخب بر اساس طرح اختلاط‌های کاربرد در بندرعباس گزینش شد. براساس تحقیقات میدانی که انجام شد، کاربردترین نسبت مصالح سنگی درشت دانه مورد استفاده در ساخت بتن سازه‌ای این شهر با نسبت مساوی شن ریز به شن درشت می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات طرح‌های اختلاط

کد طرح	عیار مواد سیمانی ( $kg/m^3$ )	نسبت آب به مواد سیمانی	مقدار ماسه ( $kg/m^3$ )	مقدار شن ریز ( $kg/m^3$ )	مقدار شن درشت ( $kg/m^3$ )	فوق روان کننده (درصد وزنی مواد سیمانی)	اسلامپ (cm)
۴	۴۰۰	۰/۴	۱۰۶۹	۳۳۸/۱	۳۵۵/۵	۰/۹	۱۵
۵	۴۰۰	۰/۵	۱۰۰۶/۶	۳۱۸/۳	۳۳۴/۷	۰/۰	۱۶

<sup>۱</sup>Wheelbar

<sup>۲</sup>Maxichair

<sup>۳</sup>Hardchair

## ۳-۲- مشخصات آزمون‌ها

تیرهای بتن مسلح در شرایط جزر ومدی خلیج فارس در بندرعباس قرار داده شده‌اند. این نمونه‌ها دارای دو مدل اسپیسر بتنی، سه مدل اسپیسر پلاستیکی و یک سری بدون اسپیسر می‌باشند. با توجه به اینکه دو طرح اختلاط و برای هر حالت سه بار تکرار در نظر گرفته شده، در مجموع ۳۶ تیر بتن مسلح با مقطع مربعی ۱۵ سانتیمتر و به طول ۶۰ سانتیمتر ساخته شد (تعداد ۱۸ تیر برای هر طرح اختلاط)، که جزئیات آن‌ها در جدول ۳ ذکر شده است. آرماتور موجود در این تیرها به صورت تک و در وسط مقطع و با پوشش ۵ سانتیمتر قرار گرفت. به جهت افزایش آثار اسپیسر بر روند خوردگی از چهار اسپیسر با فواصل ۱۰ سانتیمتر استفاده شد (شکل ۳). همچنین برای کنترل اختلاف پتانسیل الکتریکی، یک کابل مسی روکش دار به میلگرد متصل شد.

### جدول ۳- تعداد و جزئیات تیرها برای یک طرح اختلاط

تعداد	نوع آزمون		
۳	بتنی	بتنی مرغوب (S)	دارای اسپیسر
۳			
۳	پلاستیکی	ویلبار (W)	
۳		هاردچیر (H)	
۳		ماکسیچیر (M)	
۳	بدون اسپیسر		
۱۸	مجموع		



شکل ۳- آرماتور آماده شده برای نمونه‌های تیر بتن مسلح

## ۴-۲- ساخت آزمون‌ها

در هر مرحله از ساخت، ابتدا میزان رطوبت نسبی مصالح سنگی براساس استاندارد (ASTM C۵۶) تعیین و پس از اصلاح طرح اختلاط، مصالح توزین و مخلوط شد. دمای بتن تازه در محدوده ۲۵ الی ۲۸ درجه سلسیوس و اسلامپ در محدوده ۱۳ الی ۱۵ سانتیمتر قرار داشت. مراحل ساخت آزمون‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.





شکل ۴- مراحل ساخت آزمونها

## ۲-۵- عمل آوری

جهت بررسی تاثیر شرایط عمل آوری بر نفوذپذیری سطحی بتن، آزمونها بمدت سه روز با گونی مرطوب و نایلون اندود و نگه‌داری شدند. در شکل ۵ روش نگه‌داری نشان داده شده است. پس از این مرحله نمونه‌ها به محیط جزر و مدی دریا منتقل شدند که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵- نگه‌داری نمونه‌ها با گونی مرطوب و نایلون



شکل ۶- استقرار تیرهای ساخته شده در ناحیه جزر و مدی دریا

## ۲-۶- انجام آزمایش‌ها

### ۲-۶-۱- بتن تازه

بر روی بتن تازه آزمایش‌های اسلامپ (ASTM C143) و دما (ASTM C1064) انجام گرفت. با توجه به این که دمای بتن تازه، پارامتر تأثیر گذاری بر مقاومت فشاری و جذب آب بتن می‌باشد [۹]، در محدوده ۲۵ الی ۲۸ درجه سلسیوس نگه داشته شد.

### ۲-۶-۲- بتن سخت شده

#### ۲-۶-۲-۱- مقاومت فشاری

در ساخت سازه‌های بتنی مهمترین معیار مرغوبیت بتن مقاومت فشاری آن می‌باشد. در این پروژه مقاومت فشاری آزمونه‌ها براساس استاندارد ASTM C39 در سن حداقل ۲۸ روز نیز اندازه‌گیری شد که مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به سیمان ۰.۴ برابر ۵۰۰ مگاپاسکال و برای نسبت آب به سیمان ۰.۵، ۳۵۰ مگاپاسکال است.

### ۲-۶-۲-۲- پتانسیل خوردگی نیم پیل

وقتی که یون کلرید به سطح میلگردها می‌رسد یا پوشش بتنی روی میلگرد کربناته می‌شود، مرحله فرآیند خوردگی آغاز می‌گردد. برای آنکه خوردگی توسعه یابد، وجود رطوبت و اکسیژن در محیط بتن لازم است. در چینی مواردی میلگرد در حالت فعال است و در صورتی که میلگرد فعالیت خوردگی نداشته باشد، در حالت انفعالی یا خنثی قرار دارد. در حالت خنثی با وجود آنکه یون‌های کلرید به سطح میلگرد رسیده‌اند و نیز لایه محافظ میلگرد هم شکل نگرفته، ولی به علت کمبود اکسیژن در محیط بتن، شدت خوردگی ناچیز است. این روند در سازه‌های مغروق در آب پیش می‌آید. در حالت انفعالی نیز یون کلرید به سطح میلگرد رسیده است، ولی به علت تشکیل لایه محافظ، هنوز خوردگی دارای شدت چندانی نیست.

در حالت فعال نیز لایه بتن از بین رفته و فعالیت خوردگی آغاز گشته است. آزمایش پتانسیل خوردگی، فعال یا انفعالی بودن میلگرد را در بتن تعیین می‌کند. به عبارت دیگر، پتانسیل خوردگی نشان می‌دهد که میلگرد از نظر خوردگی در چه وضعیتی است. به این نکته باید توجه کرد که ممکن است آزمایش پتانسیل خوردگی فعالیت میلگرد در بتن را نشان دهد، ولی بعد از برداشتن پوشش بتنی روی میلگرد و بیرون کشیدن میلگرد هیچگونه آثار زنگ و یا خوردگی بر سطح میلگرد دیده نشود. لذا باید توجه کرد که پتانسیل خوردگی مبین فعال بودن یا نبودن میلگرد است، یعنی آلوده بودن پوشش بتن به یون کلرید و دی‌اکسید کربن و احاطه میلگرد توسط یون کلرید را نشان می‌دهد و شاید اثر زنگ زدگی روی میلگرد گاهی حتی بعد از چندین سال دیده نشود [۱۱].

در تعیین پتانسیل خوردگی میلگرد، اختلاف ولتاژ بین میلگرد و یک الکتروود مرجع در تماس با بتن اندازه‌گیری می‌شود. این آزمایش معمولاً توسط دستگاه نیم پیل<sup>۱</sup> که در استاندارد ASTM C876 نیز تعریف شده است انجام می‌گیرد. اگر یک سر سیم را به میلگرد وصل گردد و سر دیگر سیم را به کمک یک الکتروود به سطح بتن مرطوب چسبانده شود و در این فاصله ولت متری قرار گیرد، اختلاف پتانسیل را بر صفحه دستگاه مشاهده می‌گردد که در حدود چند ده تا چند صد

<sup>۱</sup> Half Cell

میلی ولت است. در شکل ۷ تصویر دستگاه مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است. به طور معمول الکترودهایی که در آزمایش پتانسیل خوردگی سازه های بتن مسلح استفاده می شود، الکتروده کلراید نقره - نقره، الکتروده کالومل اشباع و الکتروده سولفات مس - مس می باشد که نوع و محدوده هریک از آن ها در استاندارد ASTM آمده است. در این پروژه از الکتروده سولفات مس-مس جهت انجام آزمایش ها استفاده شد. طبق استاندارد ASTM C۸۷۶ محدوده مقادیر پتانسیل خوردگی برای انواع الکترولیت سولفات مس تعیین گردیده است که شروع فعالیت خوردگی را به صورت احتمالی و بشرح جدول ۵ مشخص کرده است [۱۲].

#### جدول ۵- محدوده پتانسیل خوردگی و احتمال خوردگی طبق ASTM C۸۷۶ برای نیم پیل NaSO<sub>3</sub>/Na

احتمال شروع فعالیت خوردگی	اختلاف پتانسیل ۷ با الکتروده مس - سولفات مس (mV)
بیش از ۹۰ درصد	$V > 350$
حدود ۵۰ درصد	$350 > V > 200$
کمتر از ۱۰ درصد	$200 > V$



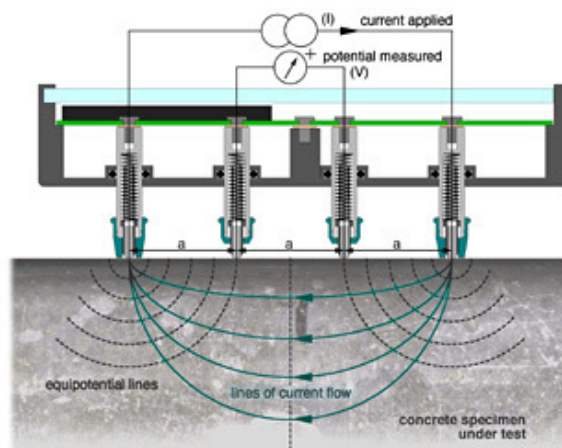
شکل ۷- دستگاه اندازه گیری پتانسیل نیم پیل

#### ۲-۶-۳- مقاومت الکتریکی ویژه

در مواد متخلخلی همچون بتن، مقاومت الکتریکی اساساً وابسته به نفوذ پذیری سیالات و انتشار پذیری یونها است. در نتیجه، مقاومت الکتریکی می تواند روشی غیر مستقیم برای ارزیابی مقاومت بتن در برابر نفوذ محلولهای حاوی نمکهای کلریدی که تشدید کننده خوردگی آرماتور است، باشد. مقاومت الکتریکی مواد متخلخل وابستگی بسیار زیادی به درجه اشباع آن ها دارد. به طور مثال بتن کاملاً اشباع و کاملاً خشک به طور تقریبی مقاومت الکتریکی ویژه ای به ترتیب برابر با ۱ و ۱۰۵ kΩ.cm دارند. مقاومت الکتریکی بتن با بهبود ریز ساختار ماتریس سیمان، مانند کاهش تخلخل و پیچاپیچی و اتصال حفرات و همچنین کاهش غلظت یونها و سهولت حرکت آن ها در محلول منفذی افزایش می یابد [۱۳].



دو روش احتمالی اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی وجود دارد: روش اندازه‌گیری یک الکترودی و روش اندازه‌گیری چهار الکترودی. به منظور بهبود تماس از پیش کمی خیس شده باشد از طرفی درجه حرارت عامل مهم دیگری در اندازه‌گیری این شاخص می‌باشد. بنابراین توصیه می‌شود از کار در هوای خیلی گرم و یا خیلی سرد اجتناب شود.



شکل ۸- روش آزمایش مقاومت الکتریکی بروش ونر

از آنجایی که ابعاد آزمونه در مقاومت الکتریکی آزمونه موثر است مقاومت الکتریکی ویژه که جزء خواص ذاتی مواد است با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\rho = \frac{AR}{L}$$

که در آن  $\rho$  مقاومت الکتریکی ویژه ( $K.\Omega.cm$ )،  $R$  مقاومت الکتریکی ( $K.\Omega$ )،  $A$  سطح مقطعی که جریان از آن می‌گذرد ( $cm^2$ )،  $L$  طول آزمونه در جهت جریان ( $cm$ ) است. مقاومت الکتریکی بتن جزء مهمی از پیل خوردگی آرماتور در بتن است. زیرا مقاومت زیاد الکترولیت (که در این مورد بتن می‌باشد) سرعت جریان خوردگی را کاهش می‌دهد. در تحقیقات انجام گرفته بر روی سازه‌های در معرض خوردگی مشخص گردیده است که رابطه مستقیمی بین سرعت خوردگی و مقاومت الکتریکی بتن وجود دارد. در بتنهایی که مقاومت‌های الکتریکی آن‌ها بیش از ۵۰ تا ۷۰  $k\Omega.cm$  بوده است خوردگی مهمی مشاهده نشده است [۱۳]. جدول ۶ راهنمایی برای تفسیر نتایج مقاومت الکتریکی ویژه بدست آمده به روش<sup>۱</sup> ونر برای بتنهای مسلحی که در معرض خوردگی هستند می‌باشد [۱۳].

جدول ۶۰- رابطه بین مقاومت الکتریکی و سرعت خوردگی آرماتور در بتن [۱۳]

مقاومت الکتریکی ویژه ( $k\Omega.cm$ )	سرعت خوردگی
> ۲۰	کم
۱۰ تا ۲۰	کم تا متوسط
۵ تا ۱۰	زیاد

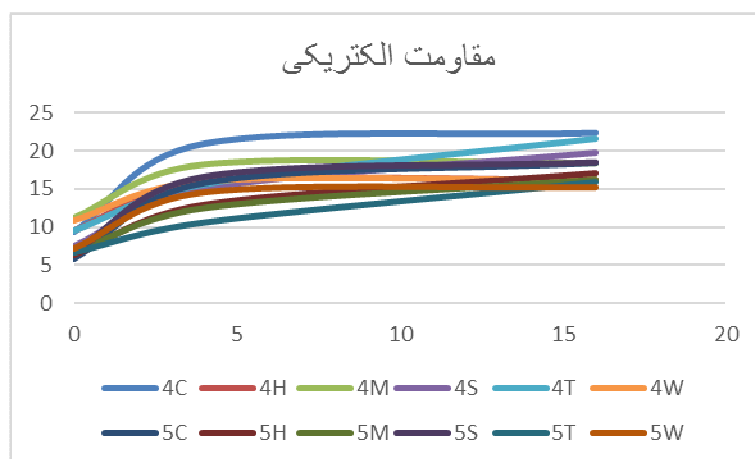
<sup>۱</sup> Wenner

خیلی زیاد	< ۵
-----------	-----

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- آزمون مقاومت الکتریکی ویژه

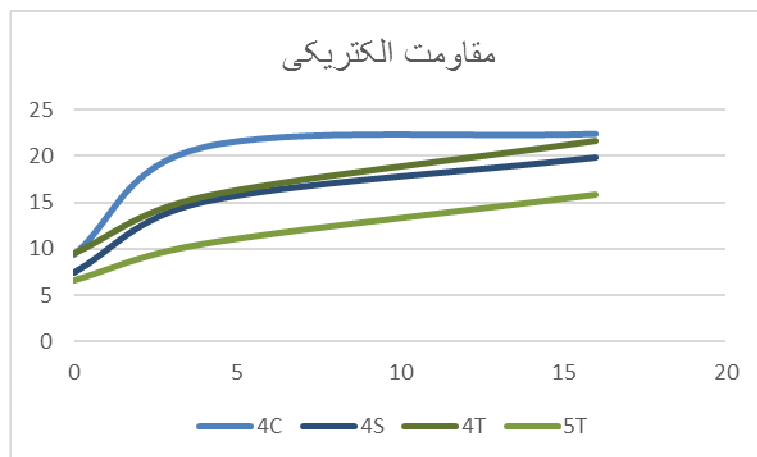
مقاومت الکتریکی بتن جزء مهمی از پیل خوردگی آرماتور در بتن است. زیرا مقاومت زیاد الکترولیت (که در این مورد بتن می باشد) سرعت جریان خوردگی را کاهش می دهد. در پروسه خوردگی آرماتور در بتن وقتی که لایه محافظ آرماتور از بین می رود، مقاومت الکتریکی بتن و دسترسی به اکسیژن است که سرعت خوردگی را کنترل می کند [۱۳]. در تحقیقات انجام گرفته بر روی سازه های در معرض خوردگی مشخص گردیده است که رابطه مستقیمی بین سرعت خوردگی و مقاومت الکتریکی بتن وجود دارد. در بتن هایی که مقاومت های الکتریکی آن ها بیش از ۵۰ تا ۷۰  $k\Omega.cm$  بوده است خوردگی مهمی مشاهده نشده است [۱۳]. در نمودارهای ۱ الی ۵ نتایج قرائت مقاومت الکتریکی ویژه تیرهای بتنی قرار گرفته در شرایط جزر و مدی خلیج فارس واقع در بندرعباس نشان داده شده است. این نتایج از عمر صفر الی ۱۸ ماه تیرها در این شرایط را در بر می گیرد. براساس این نتایج مشخص است که تیرها در ابتدای قرار گیری در دریا دارای مقاومت الکتریکی ۵ تا ۱۰ میکرو اهم بوده اند، اما با گذشت زمان و در عمر ۴ ماهگی که قرائت مجدد انجام شده است مقاومت الکتریکی تیرها افزایش چشمگیری داشته است. این موضوع به دلیل تجمع املاح روی سطح بتن و تقلیل حفرات موئین بتن می باشد. میزان مقاومت الکتریکی از ۴ ماهگی تا ۱۸ ماهگی با شیب ملایم کاهش داشته است. با توجه به حدود جدول ۵ مشخص است که احتمال شروع خوردگی در آزمون های همچنان کم است.



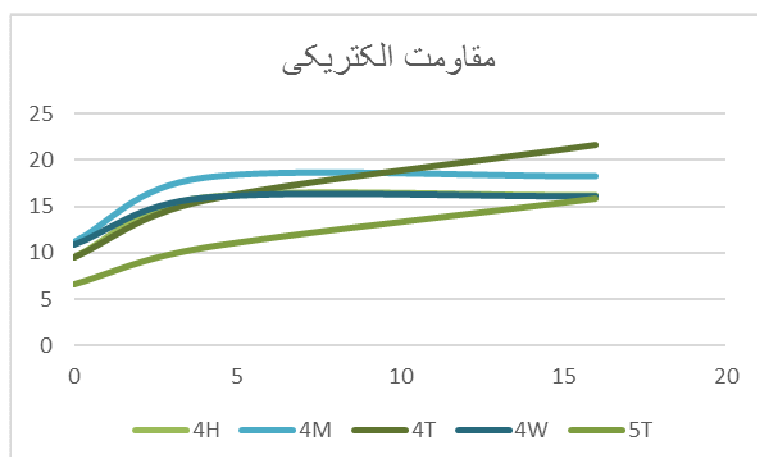
نمودار ۱ مقاومت الکتریکی ویژه در تیرها

نمودار ۲ و ۴ حاکی از آن است که احتمال خوردگی در تیر حاوی اسپیسر نامرغوب بیشتر از دو تیر دیگر است. تغییرات شیب منحنی در تیر بدون اسپیسر کمتر از تیر دارای اسپیسر می باشد، لذا می توان پیش بینی نمود فرایند خوردگی در این تیر پس از دو تیر حاوی اسپیسر شوع شود. کمتر بودن مقاومت الکتریکی تیرهای حاوی اسپیسرهای پلاستیکی نسبت به تیرهای حاوی اسپیسر بتنی از نمودار ۳ و ۵ برداشت می شود، واضح است که احتمال شروع فرایند خوردگی در تیرهای حاوی اسپیسرهای پلاستیکی بیشتر از تیرهای حاوی اسپیسر بتنی می باشد. از مقایسه نتایج مربوط به تیرهای با بتن کد ۴ و

کد ۵ مشخص است که مقاومت الکتریکی تیرهای کد ۴ بیشتر از تیرهای کد ۵ است. این اختلاف بیانگر احتمال شروع سریعتر خوردگی در تیرهای کد ۵ است.



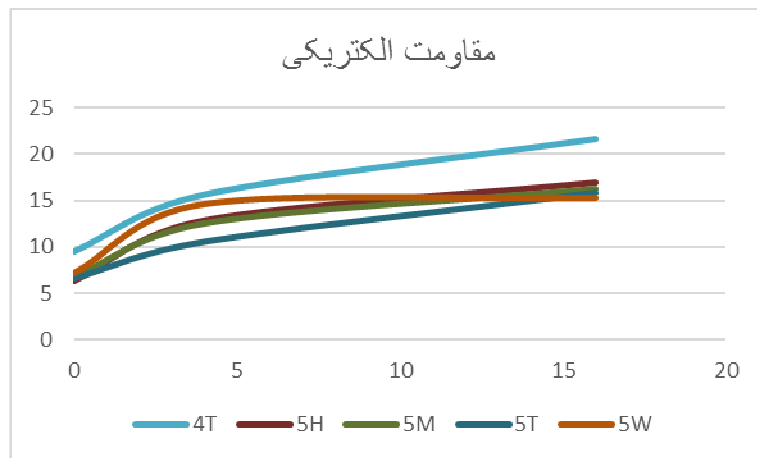
نمودار ۲۰ مقاومت الکتریکی ویژه در تیرهای حاوی اسپیرهای بتنی (نسبت آب به سیمان ۰.۴)



نمودار ۳ مقاومت الکتریکی ویژه در تیرهای حاوی اسپیرهای پلاستیکی (نسبت آب به سیمان ۰.۴)



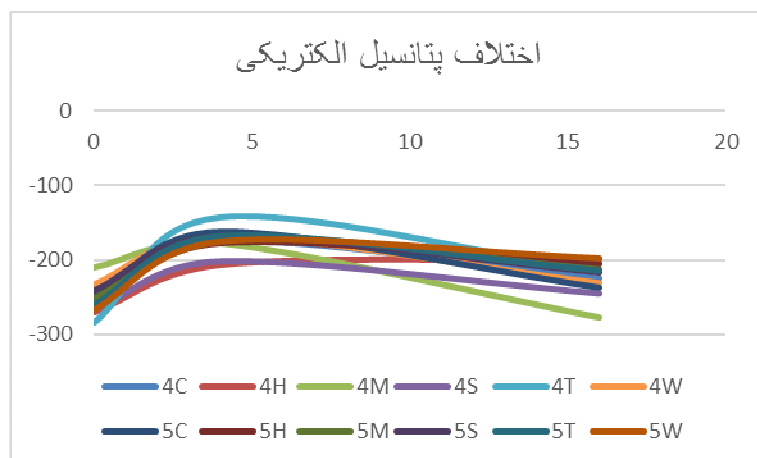
نمودار ۴ مقاومت الکتریکی ویژه در تیرهای حاوی اسپیسرهای بتنی (نسبت آب به سیمان ۰.۵)



نمودار ۵ مقاومت الکتریکی ویژه در تیرهای حاوی اسپیسرهای پلاستیکی (نسبت آب به سیمان ۰.۵)

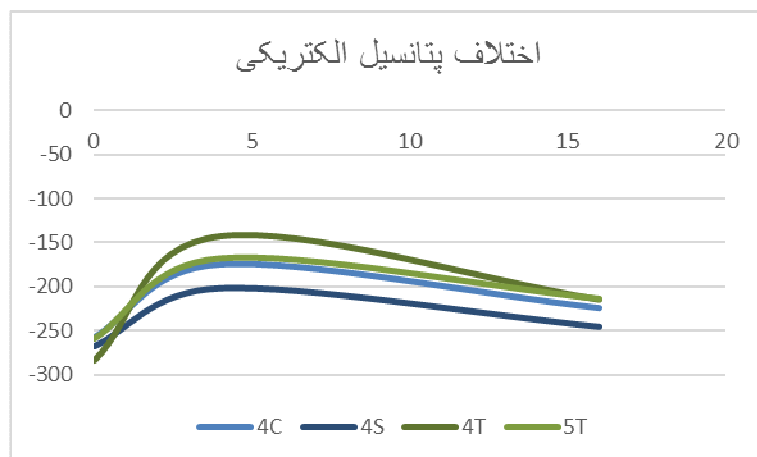
۳-۲-آزمون اختلاف پتانسیل الکتریکی

طبق استاندارد ASTM C876 محدوده مقادیر پتانسیل خوردگی برای انواع الکترولیت سولفات مس تعیین شده است که شروع فعالیت خوردگی را به صورت احتمالی و بشرح جدول ۵ مشخص گردیده است [۱۴]. در نمودارهای ۶ الی ۱۰ نتایج قرائت اختلاف پتانسیل الکتریکی تیرهای بتنی قرار گرفته در شرایط جزر و مدی خلیج فارس واقع در بندرعباس نشان داده شده است. این نتایج از عمر صفر الی ۱۸ ماه تیرها در این شرایط را در بر می گیرد. براساس این نتایج مشخص است که تیرها در ابتدای قرار گیری در دریا دارای اختلاف پتانسیل الکتریکی ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی ولت بوده اند، اما با گذشت زمان و در عمر ۴ ماهگی که قرائت مجدد انجام شده است اختلاف پتانسیل الکتریکی تیرها کاهش داشته است. این موضوع به دلیل تجمع املاح روی سطح بتن و تقلیل حفرات موئین بتن می باشد. میزان اختلاف پتانسیل الکتریکی از ۴ ماهگی تا ۱۸ ماهگی با شیب ملایم افزایش داشته است. با توجه به جدول ۶ مشخص است که احتمال شروع خوردگی در آزمونهای حدود ۵۰٪ است.



نمودار ۶ اختلاف پتانسیل الکتریکی در تیرها

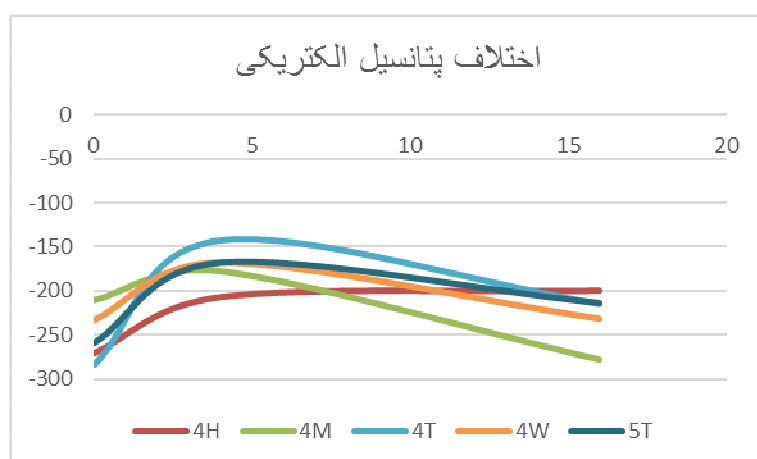
نمودار ۷ و ۹ حاکی از آن است که احتمال خوردگی در تیر حاوی اسپیسر نامرغوب بیشتر از دو تیر دیگر است. تغییرات شیب منحنی در تیر بدون اسپیسر کمتر از تیر دارای اسپیسر می‌باشد، لذا می‌توان پیش بینی نمود فرایند خوردگی در این تیر پس از دو تیر حاوی اسپیسر شوع شود.



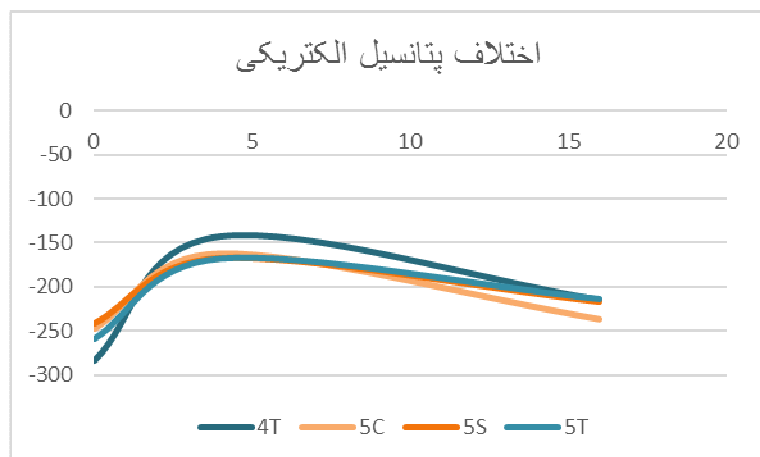
نمودار ۷ اختلاف پتانسیل الکتریکی در تیرهای حاوی اسپیسرهای بتنی (نسبت آب به سیمان ۰.۴)

کمتر بودن مقاومت الکتریکی تیرهای حاوی اسپیسرهای پلاستیکی نسبت به تیرهای حاوی اسپیسر بتنی از نمودار ۸ و ۱۰ برداشت می‌شود، واضح است که احتمال شروع فرایند خوردگی در تیرهای حاوی اسپیسرهای پلاستیکی بیشتر از تیرهای حاوی اسپیسر بتنی می‌باشد.

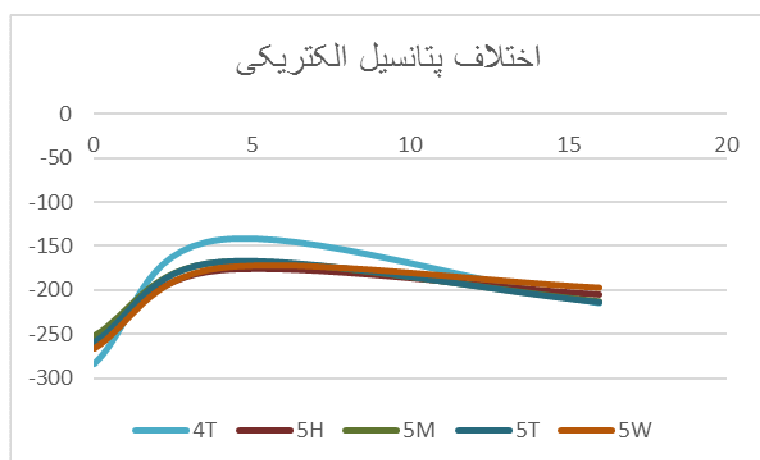
از مقایسه نتایج مربوط به تیرهای با بتن کد ۴ و کد ۵ مشخص است که مقاومت الکتریکی تیرهای کد ۴ بیشتر از تیرهای کد ۵ است. این اختلاف بیانگر احتمال شروع سریعتر خوردگی در تیرهای کد ۵ است.



نمودار ۸ اختلاف پتانسیل الکتریکی در تیرهای حاوی اسپیسرهای پلاستیکی (نسبت آب به سیمان ۰.۴)



نمودار ۹ اختلاف پتانسیل الکتریکی در تیرهای حاوی اسپسرهای بتنی (نسبت آب به سیمان ۰.۵)



نمودار ۱۰ اختلاف پتانسیل الکتریکی در تیرهای حاوی اسپسرهای پلاستیکی (نسبت آب به سیمان ۰.۵)

#### ۴- نتیجه‌گیری

استفاده از اسپسرها علی‌رغم تسهیل در رعایت پوشش بتنی آرماتور، به طور موضعی افزایش عمق نفوذ را در پی خواهد داشت. مطابق با نتایج آزمایشگاهی نفوذپذیری برای نمونه‌ی بدون اسپسر کمترین مقدار و برای نمونه‌های دارای اسپسر بتنی و پلاستیکی به ترتیب افزایش می‌یابد. بنابراین استفاده از اسپسرهای پلاستیکی در نواحی با شرایط محیطی مهاجم، برای نمونه حاشیه‌ی خلیج فارس، منجر به افزایش خطر نفوذ عوامل خوردنده می‌گردد. با توجه به اینکه عمق نفوذ در کنار اسپسرها دارای رابطه معکوس با شرایط عمل‌آوری نمونه‌ها می‌باشد، توصیه می‌گردد جهت ساخت سازه‌های در مجاورت عوامل محیطی مهاجم عمل‌آوری کارگاهی به دقت انجام شود. نفوذپذیری بتن مهمترین معیار در تعیین دوام بتن می‌باشد، افزایش نفوذپذیری در نواحی قرارگیری اسپسر، بطور موضعی منجر به کاهش دوام بتن شده و در نتیجه عناصر مهاجم به سهولت به آرماتور دست می‌یابند و فرایندهای شیمیایی مخرب بسیار سریعتر از زمان پیش‌بینی شده آغاز می‌شود. این پدیده به افزایش پتانسیل خوردگی و کاهش عمر سرویس‌دهی پیش‌بینی شده سازه کمک می‌کند. لذا پیشنهاد می‌گردد جهت اجرای سازه‌های بتنی در تماس با عوامل خوردنده ضمن ممانعت از بکار بردن اسپسرهای پلاستیکی، از اسپسرهای بتنی با همان طرح اختلاط بتن مصرفی پروژه و در اشکال غیرمنشوری (جهت افزایش طول درز نفوذ و ایجاد چسبندگی بیشتر) استفاده شود.



## ۵- منابع

- [۱] محمد شکرچی زاده، آزمایشهای بتن خودتراکم و تفسیر نتایج به دست آمده در برآورد پایداری بتن تازه، اولین کارگاه تخصصی بتن خودتراکم، ۱۳۸۵.
- [۲] Sobhani, J., "Durability model for estimating the corrosion of reinforced concrete structures", ۴<sup>th</sup> international conference on concrete and development, ۲۰۱۳
- [۳] نادری، محمود، طاهری، مهدی، پاک‌شکار، شهاب، بررسی آزمایشگاهی تعیین نفوذپذیری بتن به روش سیلندریکال چمبر، اولین کنفرانس بین‌المللی بتن‌های ناتراوا مخازن ذخیره آب شرب، گیلان، بهار ۱۳۹۰.
- [۴] Safedian M., Ramezani-pour A.A., "Assessment of the long term chloride penetration and prediction of RC structure service life in the Persian Gulf region", ۴<sup>th</sup> international conference on concrete and development, ۲۰۱۳
- [۵] رضانیانپور، علی‌اکبر، پرهیزکار، طیبه، پورخورشیدی، علیرضا، رئیس‌قاسمی، امیرمازیار، تاثیر شرایط محیطی سواحل جنوبی ایران بر روی دوام دراز مدت بتن با سیمان‌ها و پوزولان‌های مختلف، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، گزارش تحقیقاتی گک-۴۳۴، ۱۳۸۵.
- [۶] Baykal, M., Implementation of durability models for portland cement concrete into performance based specifications, The University of Texas at Austin, ۲۰۰۰.
- [۷] Savas, Bz., Effects of microstructure on durability of concrete, Raleigh, NC: North Carolina State University, ۱۹۹۹.
- [۸] Tabatabaei Aghda, S.T., Baniasadizade, M., "Comparison of test methods of evaluation of concrete durability in the Persian Gulf environment", ۴<sup>th</sup> international conference on concrete and development, ۲۰۱۳
- [۹] هرمز فامیلی، محسن تدین، محمدرضا خوش‌سیما، اثر دمای ریختن بتن بر مقاومت فشاری و جذب آب جداول بتنی پرسی خشک تهیه شده با سیمان پرتلند، دومین کنفرانس ملی بتن ایران، ۱۳۸۹.
- [۱۰] Levitt, M., Concrete Materials: Problems and Solutions, E & FN Spon, ۱۹۹۷.
- [۱۱] Feliu, S., Gonzalez, J.A. and Andrade, C., "Electrochemical Method for on-site Determinations of Corrosion Rates of Rebars", Techniques to Assess the Corrosion Activity of Steel Reinforced Concrete Structures, ASTM STP ۱۲۷۶, Berke / Escalante / Nmai / Whiting, Eds., West conshohoken, PA, PP. ۱۰۷-۱۱۸, ۱۹۹۶.
- [۱۲] ASTM (American Society for Testing and Materials), "Standard Test Method of Half Cell Potentials of Uncoated Reinforced Steel in Concrete", ASTM C۸۷۶, ASTM Publication, ۱۹۹۵.
- [۱۳] D. A. Whiting and M. A. Nagi, "Electrical resistivity of concrete – a literature review", report serial No. ۲۴۵۷, Portland Cement Association, ۲۰۰۳.
- [۱۴] ACI ۲۲۴, "Protection of metals in concrete against corrosion", ۲۰۰۱.