

استفاده از بتن پایا حاوی بازدارنده ی خوردگی مهاجر (MCI) در محیط های خورنده حاشیه خلیج فارس

رضا آقانوری^۱، رضا امیری^۲، مهدی ابوالقاسمی^۳، صابر جاوید^۴

۱-کارشناس ساختمان نیروگاه های حرارتی شرکت فراب

۲-مدیر اجرایی کارگاه نیروگاه های حرارتی شرکت فراب

۳-مدیر مهندسی ساختمان شرکت فراب

۴-کارشناس مهندسی ساختمان شرکت فراب

چکیده :

یکی از نقاط ضعف بتن مسلح به ویژه در محیط های دریایی، خوردگی آرماتور می باشد که به علت نفوذ یون کلر موجود در آب و ترکیب با اکسیژن موجود در اتمسفر، لایه محافظ روی آرماتور از میان رفته و خوردگی آغاز می شود. پدیده خوردگی سبب کاهش انواع مقاومت در بتن مسلح شده و طول عمر مفید سازه را به شدت کاهش می دهد. هر ساله هزینه های بسیار گزافی جهت بازسازی، نگهداری و ساخت مجدد سازه هایی که دچار پدیده خوردگی شده اند می شود. از طرف دیگر همزمان با روند رو به رشد استفاده از سازه های بتن مسلح، لزوم کاهش مشکلات این نوع سازه ها در محیط های خورنده حس می شود. از اینرو یکی از جدید ترین راه های پیشنهادی محققین دنیا جهت رفع مشکل خوردگی آرماتور بتن مسلح، استفاده از بازدارنده های خوردگی یا همان (MCI Migrating Corrosion Inhibitor) بعنوان یک افزودنی در بتن می باشد. با توجه به مطالب فوق انتخاب روش های بهینه و موثر برای مقابله با پدیده خوردگی، با هدف بهبود خواص مهندسی بتن، افزایش طول عمر مفید سازه و کاهش هزینه های تعمیر و بازسازی آتی پروژه های صنعتی و ساختمانی مهم کشور به ویژه در محیط های دریایی حاشیه خلیج فارس اهمیت بسزایی داشته و مقرون به صرفه خواهد بود. هدف از ارائه این مقاله، معرفی بتن مسلحی پایا، حاوی افزودنی های MCI2005، استفاده شده در یکی از پروژه های صنعتی شهرستان عسلویه می باشد که در این راستا، نتایج آزمایش های کارگاهی و آزمایشگاهی انجام شده خود تایید کننده کمترین میزان پتانسیل ایجاد خوردگی و نفوذ پذیری در بتن های تولید شده می باشد.

واژه های کلیدی: خوردگی آرماتور – MCI – مقاومت الکتریکی بتن – نفوذ تسریع شده یون کلراید

در مناطق ساحلی خلیج فارس آلودگی آب، خاک و اتمسفر به عناصر شیمیایی مضر برای بتن، رطوبت بالا، دما و تشعشعات خورشیدی در حدی است که به روند تخریب سازه ها کمک می کند و سرعت آسیب دیدگی را افزایش می دهد. مطالعات و بررسی های آزمایشگاهی نشان داده است که املاح موجود در آب خلیج فارس و اغلب آبهای جهان بیشتر است [۱]. زیاد بودن مقدار یون کلرید در این آب باعث تخریب انواع سازه های ساحلی و دریایی در این منطقه شده است. علاوه بر این، آب های زیر زمینی این منطقه شدیداً به یون های خورنده آلوده می باشد. دمای هوای منطقه حاشیه خلیج فارس به علت نزدیکی به خط استوا، در گرمترین ماه های سال بین ۳۷ تا ۴۱ درجه سانتیگراد متغیر می باشد. بنابراین می توان به روشنی دریافت که از دیدگاه دوام سازه های بتنی، شرایط محیطی آن منطقه بخصوص سواحل مربوطه نسبت به دیگر نقاط آن بسیار مهاجم و خورنده بوده و سازه های بتنی زیادی در این منطقه در زمانی نه چندان طولانی دچار خرابی گشته اند، که همین امر اهمیت توجه به پدیده خوردگی و انتخاب روشهای بهینه مقابله با آن را مشخص می نماید. یادآور می شود در صورت استفاده از مصالح مناسب و نیز طرح بتن با مشخصات فنی ویژه این مناطق، اجرای بتن توسط افراد کاردان و سرانجام عمل آوری مناسب و کافی، بسیاری از مسائل بتن برطرف خواهد گشت. بر همین اساس آیین نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان در سال ۱۳۸۴ توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن برای ساخت و کنترل بتن در این مناطق تدوین و پیشنهاد شده است [۲]. دیگر تحقیقات انجام شده توسط محققینی همچون مایک سیک [۹]، دوبراواکا [۱۰] و همچنین تحقیقات گسترده شرکت Cortec نشان می دهد استفاده از کنترل خوردگی به روش MCI یا به عبارتی بازدارنده خوردگی با خاصیت نفوذ و حرکت به سمت آرماتور روشی پیشرفته می باشد. MCI ها (Migratory corrosion inhibitor) یا همان بازدارنده های لایه ساز از مواد آلی پایه آبی مانند آمینها، استرها، آلکیل سیلان ها و آلکانول آمین ها و نمک های آن ها تشکیل می شوند که پس از مخلوط شدن این افزودنی با بتن تازه مولکولهای آنها به تدریج جذب سطح میلگرد ها می شوند و یک پوشش محافظ بر روی میلگردها پدید می آورند که از دسترسی یون کلر و رطوبت به میلگرد جلوگیری می کند. افزون بر این، بازدارنده های لایه ساز (MCI) عملکرد دیگری هم دارند که با پوشاندن جداره درونی منافذ و کاهش بسیار زیاد روزه های بتن، نفوذ یون کلر و رطوبت به درون بتن را محدود می کنند.

۲- عوامل مهاجم موثر و عملکرد MCI

عوامل تهاجمی موثر بر بتن را به ۴ دسته کلی زیر می تون تقسیم نمود [۴].

۱- عوامل فیزیکی (آتش، یخبندان و آب شدگی پی در پی، تبلور نمک ها و ۰۰۰)

۲- عوامل شیمیایی (سولفاتها، کربناسیون، تاثیر واکنش های کلیایی با سنگدانه بر بتن و ۰۰۰)

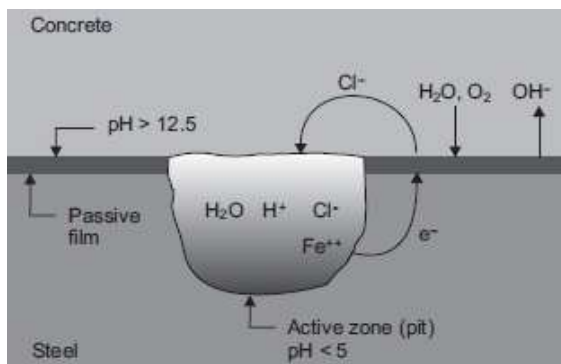
۳- عوامل مکانیکی (سایش، خلزایی، ضربه)

۴- خوردگی میلگرد

مهمترین عامل زنگ زدگی و خوردگی آرماتور در بتن وجود یون های کلراید میباشد. یونهای کلراید ممکن است از طریق مواد و مصالح اولیه آلوده (سنگدانه یا مواد افزودنی) و یا در اثر نفوذ از منابع خارجی مانند آب دریا وارد بتن گردند. جهت فعال شدن آرماتور برای خوردگی، غلظت کلراید در بتن باید از حد مشخصی بگذرد. البته شایان ذکر است که فقط یونهای کلراید آزاد باعث فعالیت آرماتور میشوند. زیرا بخشی از یونهای کلراید با فرآورده های هیدراسیون سیمان پیوندهای فیزیکی برقرار میکنند. بخش دیگری از این یونها نیز با ترکیباتی مانند C3A پیوند شیمیایی ایجاد کرده و نمک فریدل $C3A-CaCl$ تشکیل می دهند. یون های کلراید آزاد باقیمانده در محیط بتن در اثر نفوذ تا سطح آرماتورها شرایط آغاز خوردگی را فراهم می کنند. غلظت کلراید مورد نیاز در سطح آرماتورها برای آغاز خوردگی کاملاً بستگی به مقدار PH خمیر سیمان بتن دارد. در PH کمتر از ۱۱/۵۰، خوردگی ممکن است حتی بدون حضور کلراید آغاز شود، در حالی که PH بالاتر از ۱۱/۵۰ مقداری کلراید برای آغاز خوردگی لازم است. در جدول ۱، غلظت کلرایدی که PH های مختلف خمیر سیمان برای حتمی و قریب الوقوع بودن خوردگی لازم است آورده شده است [۵].

در صورتی که غلظت کلراید در سطح آرماتورها از مقادیر مشخص شده در جدول ۱ بیشتر شود، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده لایه محافظ آرماتورها از بین می رود. سپس با توجه به اینکه یون های آهن تمایل بیشتری به جذب یون های کلراید نسبت به یونهای مانند OH^- دارند، با سرعت بیشتری با یون های کلراید ترکیب شده و $FeCl_2$ تولید میکنند. $FeCl_2$ تولید می کنند. تولید $FeCl_2$ شده با آب وارد واکنش شده و به صورت اسید هیدروکلریک ناپایدار در می آید. سپس این اسید ناپایدار ضمن کاهش شدید PH محیط به یون های کلراید تجزیه می شود یون های کلراید بازتولید شده نیز دوباره با یون های آهن وارد واکنش شده و سیکل تولید اسید ناپایدار و خارج کردن بیشتر یون های آهن ادامه می یابد و خوردگی به علت عدم تعادل الکتروشیمیایی در سطح

فولاد توسعه بیشتری پیدا میکند. در این راستا تکنولوژی MCI جهت جلوگیری از خوردگی آرماتورهای مدفون در بتن رواج یافته است. عملکرد MCI در بتن به مراحل ذیل تقسیم بندی میگردد:



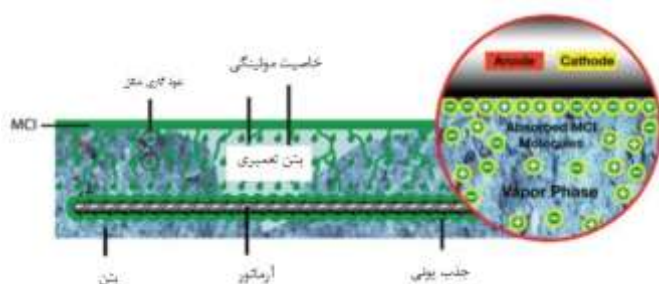
شکل ۱ - نمای شماتیک از پدیده خوردگی آرماتور در بتن

جدول ۱- میزان کلراید لازم برای آغاز خوردگی

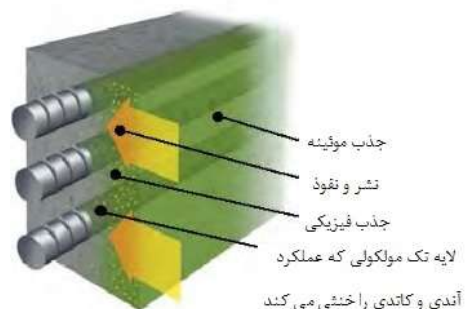
PH خمیر سیمان	مقدار کلراید لازم برای آغاز خوردگی	
	gr/lit	ppm
۱۳/۵۰	۶/۷۴	۶۷۴۰
۱۲/۵۰	۰/۶۷۲	۶۷۲
۱۲	۰/۲۱۳	۲۱۳
۱۱/۵۰	۰/۰۶۷	۶۷
۱۱	۰/۰۲۱۳	۲۱
۱۰	۰/۰۰۲۱	۲
۹/۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۲

- ۱- MCI یا به صورت ترکیب در مصالح اولیه بتن بوده که لابلای ذرات بتن قرار میگیرند یا اینکه به صورت سطحی مورد استفاده قرار میگیرد که طبق پدیده موینگی وارد ذرات بتن می شود و لایه محافظ مولکولی روی سطح میلگرد تشکیل می شود.
- ۲- MCI ممکن است به صورت گاز وارد خلل و فرج بتن شده و مطابق قانون Fick مولکولها از قسمتهای با تراکم بیشتر به سمت تراکم کمتر حرکت کنند.
- ۳- زمانی که MCI در تماس با میلگرد قرار میگیرد به صورت یونی به میلگرد حمله می کند و لایه محافظ فولاد را تشکیل می دهد. حمله یونی MCI بر حمله های یونی کلر، آب و سایر عوامل خورنده چیره می شود.
- ۴- MCI می تواند تا عمق ۷۵-۸۵ نانومتر از سطح فولاد نفوذ کند و لایه ای به ضخامت ۲۰ تا ۱۰۰ آنگستروم تشکیل دهد. در آزمایشی مشابه، یون کلر حداکثر تا عمق ۶۰ نانومتر در سطح فولاد نفوذ می کند. این مقایسه بیان می کند که MCI قابلیت حفاظت از خوردگی میلگرد را حتی در صورت وجود یون کلر دارد [۶].

در این نوشتار روش های کنترل و الزامات رعایت پایایی بتن پروژه براساس توصیه های استاندارد به قرار ذیل انجام شده است.



شکل ۳ - نمای شماتیک از عملکرد MCI



شکل ۲ - نمای شماتیک از عملکرد MCI

۳- مصالح مصرفی و نسبت مخلوط بتن در پروژه

براساس طراحی انجام گرفته مقاومت مشخصه استوانه ای استاندارد در پروژه به دو مقدار ۲۴۰ و ۲۸۰ کیلو گرم بر سانتیمتر مربع بوده و مشخصات مصالح مصرفی در بتن پروژه مورد نظر از جمله مصالح سنگی، سیمان، آب، نوع فوق روان کننده، MCI و میکروسیلیس به قرار ذیل می باشد.

۳-۱- مصالح سنگی

براساس آیین نامه بتن ایران و ضوابط مندرج در تهیه بتن برای مناطق حاشیه خلیج فارس، تهیه مصالح سنگی پس از بررسی های فراوان و در نظر گرفتن شرایط آیین نامه ای و محدودیت مصالح موجود در منطقه حداکثر جذب آب سنگدانه های درشت ۲/۵۰ درصد و برای سنگدانه های ریز ۳ درصد و بزرگترین اندازه سنگدانه های مصرفی ۲۵ میلیمتر از بهترین معدن منطقه اقدام گردید.

جدول ۲- مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده

وزن واحد حجم ASTM C29		وزن مخصوص و جذب آب ASTM C127 & 128				تطویل و تورق		تست لوس آنجلس ASTM C131 & ASTM C535			هم ارز ماسه ASTM D2419	ضریب نرمی ASTM C136	مشخصات نمونه
مخلوط درشت دانه متراکم Kg/m3	غیر متراکم Kg/m3	متراکم Kg/m3	جذب آب درصد	حقیقی	ظاهری	تورق درصد	تطویل درصد	سایش درصد	تعداد دور دستگاه در دقیقه	نوع دانه بندی			
۱۴۹۰	۱۳۴۰	۱۴۸۰	۲/۳	۲/۵۳	۲/۶۸	۱۹	۷	۳۲	۵۰۰	A	-	-	شن درشت دانه
	۱۳۵۰	۱۴۹۰	۲/۲	۲/۵۵	۲/۷۰	۱۴	۶	۳۴	۵۰۰	C	-	-	شن ریزدانه
-	۱۵۸۰	۱۷۹۰	۲/۷	۲/۵۰	۲/۷۶	-	-	-	-	-	۷۶ درصد	۰۳/۵۹	ماسه شسته

۳-۲- سیمان

براساس توصیه آیین نامه بتن ایران و ضوابط مندرج در تهیه بتن برای مناطق حاشیه خلیج فارس، سیمان مصرفی از سیمان تیپ ۲ کارخانه لامرد تهیه گردید.

جدول ۳- نتایج آزمایشات شیمیایی و فیزیکی سیمان

نتایج	آزمایشات فیزیکی	نتایج	آزمایشات شیمیایی ASTM C114
۲۳	درصد وزنی آب با غلظت طبیعی ASTM C114	۲۰/۰۶	درصد اکسید سیلیسیوم
-	درصد حجمی هوای موجود در ملات سیمان ASTM C185	۰۴/۹۰	درصد اکسید آلومینیوم
۰/۰۶	درصد انبساط با دستگاه اتوکلاو ASTM C151	۰۳/۵۰	درصد اکسید آهن
۲۲۰۰	فشاری بر حسب پوند بر اینچ مربع ASTM C109 ۳ روزه	۶۱/۱۰	درصد اکسید کلسیم
۳۱۸۸		۰۴/۸۰	درصد اکسید منیزیم
۳۲۳۵		۰/۳۲	درصد اکسید سدیم
۰۳/۱۷	وزن مخصوص بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب ASTM C188	۰/۵۱	درصد اکسید پتاسیم
۳۱۱	نرمی-سطح مخصوص بر حسب متر مربع بر کیلو گرم ASTM C204	۰۲/۱۰	درصد اکسید گوگرد
۱۶۵	گیرش ابتدایی ویکات(دقیقه) ASTM C191	۱/۸۰	درصد افت وزنی در اثر حرارت
۲۴۰		۰/۶۰	درصد باقیمانده نامحلول
		۰/۶۶	درصد کل قلیایی
		۴۸	C3S
		۲۳	C2S
		۷	C2A
		۱۱	C4AF

۳-۳- آب

براساس آیین نامه بتن ایران و ضوابط مندرج در تهیه بتن برای مناطق حاشیه خلیج فارس، تهیه آب پس از بررسی های فراوان و در نظر گرفتن شرایط آیین نامه ای و محدودیت آب شیرین کن های موجود در منطقه از بهترین آب شیرین کن منطقه اقدام گردید. مقدار CL موجود در آب (ppm) ۲۴ و مقدار SO4 (ppm) ۴۸ و مقدار PH ۷/۱۰ می باشد.

۳-۴- افزودنی ها

مواد افزودنی طرح شامل فوق روان کننده ی (بر پایه کربوکسیلات) ADVA FLOW501 محصول شرکت GRACE و میکروسیلیس ژل شده ADVA GEL حاوی MCI2005 می باشد.

۳-۵- نسبت مخلوط ها

براساس آیین نامه بتن ایران و ضوابط مندرج در تهیه بتن برای مناطق حاشیه خلیج فارس، تهیه فوق روان کننده ی (بر پایه کربوکسیلات) ADVA FLOW501 محصول شرکت GRACE و میکروسیلیس ژل شده ADVA GEL حاوی MCI2005 اقدام گردید.

جدول ۴- نسبت اختلاط برای مقاومت مشخصه ۲۴۰ کیلو گرم بر سانتیمتر مربع

نسبت آب به سیمان w/c	فوق روان کننده kg	ژل میکروسلیس kg	آب lit	سیمان تیپ ۲ kg	ماسه kg	شن ریزدانه kg	شن متوسط kg
۰/۴	۱/۸۰	۲۵	۱۹۶	۳۵۰	۱۰۶۳	۳۹۸	۳۲۴

جدول ۵- نسبت اختلاط برای مقاومت مشخصه ۲۸۰ کیلو گرم بر سانتیمتر مربع

نسبت آب به سیمان w/c	فوق روان کننده kg	ژل میکروسلیس kg	آب lit	سیمان تیپ ۲ kg	ماسه kg	شن ریزدانه kg	شن متوسط kg
۰/۴	-	۲۶	۲۰۴	۳۷۵	۱۰۱۵	۳۶۲	۳۶۰

۴- نمونه گیری کارگاهی

نمونه های کارگاهی مورد نیاز در این پروژه از کارگاه اخذ شده است و تا حد امکان سعی شده است در صورت امکان دمای بتن تازه و اسلامپ آن برای تعیین روانی بتن و همچنین تخمین کارگاهی نسبت آب به سیمان اندازه گیری و ثبت شود. طرح اختلاط مصوب بتن پروژه برای تمامی نمونه ها از مسئولین کارگاه اخذ شده و با اپراتور بچینگ هماهنگی لازم برای نمونه گیری در حین انجام کار صورت گرفته است. برای جابجایی و تراکم بتن در قالب های مکعب های استاندارد به ابعاد ۲۰ در ۲۰ سانتیمتری و در ۲ لایه بتن ریزی استفاده شده است. در هر لایه حد اقل از ۲۰ ضربه با میله استاندارد استفاده شده تا بتن به تراکم مورد نظر برسد. ضمن اینکه در هر لایه با استفاده از ضربه های چکش لاستیکی به سطح خارجی قالب ها هوای محبوس بین بتن و جداره قالب خارج شده است. در هنگام نمونه گیری به مناسب بودن مقدار روغن قالب مصرفی، تراکم مناسب گوشه ها و سطح خارجی نمونه ها و در هنگام خارج کردن نمونه ها از قالب به ضربه نخوردن آنها توجه شده است. لازم بذکر است حداقل و حداکثر مقاومت مشخصه فشاری اندازه گیری شده در کارگاه توسط آزمایشگاه مقیم ، ۳۵۰ و ۵۸۰ کیلو گرم بر سانتیمتر اعلام شده است.

۵- آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید - RCPT

آزمون های قابل استفاده در آزمایشگاه RCPT به صورت استوانه های ۵*۱۰ سانتیمتر می باشد. بنابراین نمونه ها در قالب های مکعبی استاندارد ۲۰*۲۰ سانتیمتری ساخته شده اند و نهایتا با برش هر نمونه در سن مورد نظر یک آزمون ۵*۱۰ سانتیمتری (خارج از ۲ انتهای نمونه) بدست آمد. با توجه به نحوه عمل آوری نمونه ها تمامی آنها در هنگام آزمایش اشباع کامل می باشد.

برای اطمینان و با توجه به فاصله ی زمانی مورد نیاز برای انجام آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی، آزمون ها طبق استاندارد ASTM C1202 در محفظه خلاء قرار داده شده و پس از گذراندن یک دوره خلاء ۳ ساعته بدون حضور آب و سپس یک دوره خلاء ۱ ساعته با حضور آب مقطر، آزمون ها به مدت ۱۸ ساعت جهت اطمینان از اشباع بودن کامل آنها در یک ظرف سرباز حاوی آب مقطر قرار داده شدند. آزمون های آماده شده درون سلول های دستگاه آزمایش RCPT قرار گرفتند. سپس یک ولتاژ ۶۰ ولتی برای ایجاد روند تسریع شده نفوذ یون کلراید بین دو سر سلول که حاوی محلول ۳ درصد کلرید سدیم NaCl (نمک طعام) و محلول ۰/۳ مول هیدروکسید سدیم NaOH (سود سوز آور) است به مدت ۶ ساعت برقرار می شود. نتایج نهایی (شامل میزان کل شار الکتریکی عبوری، دما و جریان در انتهای آزمایش) با استفاده از کامپیوتر متصل به دستگاه آزمایش RCPT ثبت میگردد [۷] و [۸].



شکل ۵ - نمای شماتیک از دستگاه ثبت شار الکتریکی RCPT



شکل ۴ - نمای شماتیک از پمپ خلاء آزمایش RCPT

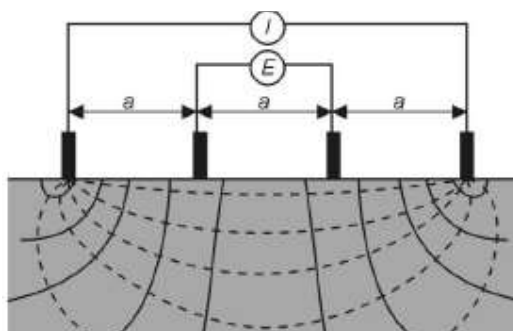
۶- آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی بتن با استفاده از دستگاه - WENNER

در این روش از دستگاه ونر با ۴ الکتروود که به صورت خطی و با فواصل برابر قرار گرفته اند استفاده می شود. تماس الکتروود های این دستگاه با سطح بتن از طریق اسفنج های مرطوب قرار گرفته بر روی الکتروود ها به راحتی برقرار می شود. در ۲ الکتروود خارجی، جریان الکتریسیته با فرکانس مشخص به وسیله یک منبع جریان برقرار می شود و در دو الکتروود داخلی، ولتاژ اندازه گیری می شود. در دستگاه ونر ولتاژ پیک تا حداکثر ۲۵ ولت و با فرکانس ۱۳HZ است. با استفاده از پارامترهای بدست آمده و رابطه زیر می توان مقاومت الکتریکی سطحی بتن را محاسبه کرد:

$$R = 2\pi a.V / I$$

در این رابطه a فاصله دو الکتروود، V ولتاژ اعمال شده و I شدت جریان عبوری می باشد.

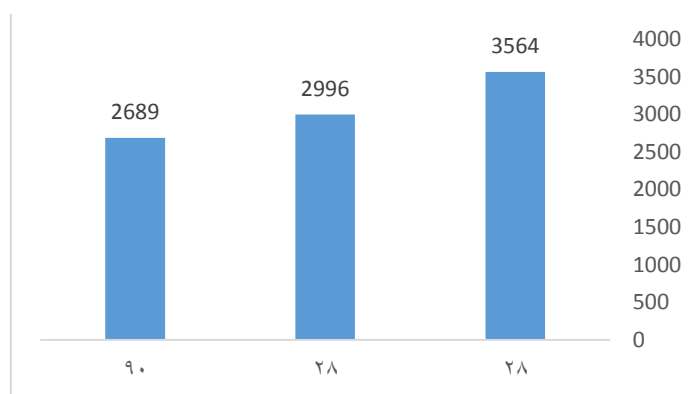
طبق استاندارد FM 5-578 مقاومت الکتریکی سطحی بتن باید بین ۰ تا ۱۰۰ کیلو اهم سانتیمتر و با دقت ۰/۱ کیلو اهم سانتیمتر اندازه گیری شود. همچنین فاصله بین الکتروودها باید ۱/۵ اینچ یا ۳۸/۱ میلی متر باشد و آزمون ها نیز به صورت مکعب های ۲۰*۲۰ سانتیمتری باشند. برای افزایش دقت نتایج بهتر است آزمون ها در زوایای ۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه علامت گذاری شوند و مقاومت الکتریکی سطحی بتن در هریک از این زوایا به ترتیب ۲ بار قرائت شود. در نهایت متوسط ۸ قرائت انجام گرفته به عنوان مقاومت الکتریکی سطحی آزمون اعلام می شود. [۷] و [۸].



شکل ۶ - نمای شماتیک از عملکرد دستگاه Werner

۷- کنترل دوام براساس آیین نامه ملی پایایی بتن

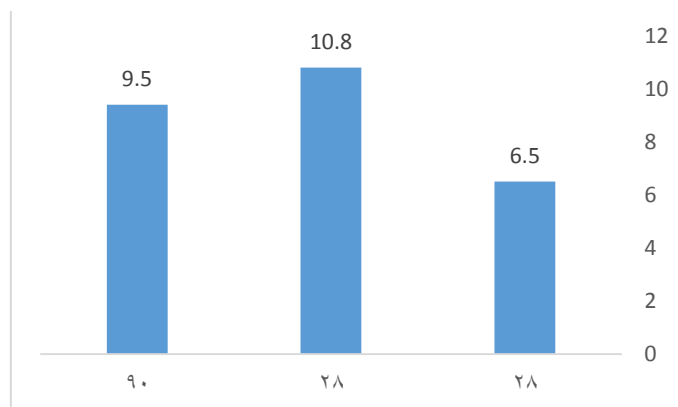
براساس آیین نامه ملی پایایی بتن ایران [۱] و [۲] و با توجه به شرایط مکانی کارگاه که حدوداً بیش از ۳۰۰۰ متر از دریا فاصله داشته، شرایط محیطی در وضعیت شدید و دسته بندی B آیین نامه (سازه های روزمینی در نواحی نزدیک به ساحل و در معرض بادهای دارای یونهای کلراید) قرار دارد و همچنین مقادیر مجاز برای نفوذ تسریع شده یون کلراید (ASTM C1202) برای شرایط محیطی B، مقدار حداکثر ۳۰۰۰ کولمب می باشد و برای مقاومت الکتریکی



شکل ۷ - میزان شار عبوری از نمونه بتنی در سنین ۹۰ و ۲۸ روزه

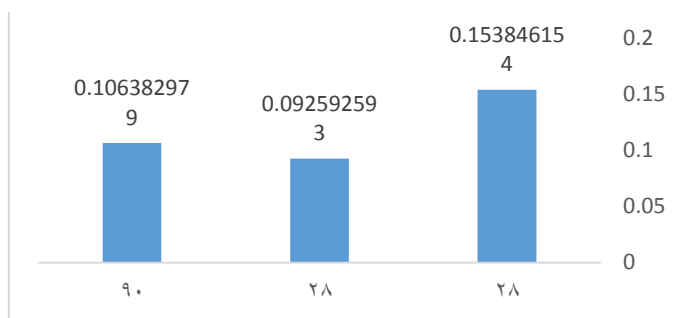
۸- نتایج و تفسیر

همانطور که از شکل ۷ میتوان مشاهده نمود نتایج آزمایش RCPT براساس میزان شار عبوری از نمونه های ۲۸ روزه بدون افزودنی و ۲۸ و ۹۰ روزه با افزودنی ADVA GEL نمایش داده شده است میزان شار عبوری از نمونه ۲۸ روزه بدون افزودنی ۳۵۶۴ کولمب بوده در مقایسه با همان سن در نمونه با افزودنی مقدار شار عبوری به ۲۹۹۶ کولمب رسیده و مقدار ۱۶ درصد کاهش را نشان می دهد و همچنین مقدار شار عبوری از نمونه ۹۰ روزه با افزودنی ۲۶۸۹ کولمب در مقایسه با ۲۸ روزه بدون افزودنی مقدار ۲۵ درصد کاهش را نشان می دهد که بسیار مطلوب می باشد.



شکل ۸ - مقاومت ویژه الکتریکی نمونه بتنی در سنین ۹۰ و ۲۸ روزه

همچنین در شکل ۸ نتایج آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی بر روی نمونه ها انجام شده، مقدار $6/50$ کیلو اهم-سانتیمتر برای نمونه های ۲۸ روزه بدون افزودنی و $10/80$ کیلو اهم-سانتیمتر برای نمونه های ۲۸ روزه با افزودنی و $9/50$ برای نمونه های ۹۰ روزه با افزودنی حاصل شده که افزایش ۶۶ درصدی و ۴۴ درصد برای نمونه های ۲۸ و ۹۰ روزه با افزودنی نمایش می دهد البته کاهش ۶۶ درصدی به ۴۴ درصد بدلیل کمبود جامعه آماری نمونه های آزمایشی بوده است.



شکل ۹ - هدایت الکتریکی نمونه بتنی در سنین ۹۰ و ۲۸ روزه

همچنین در شکل ۹ نتایج آزمایش هدایت الکتریکی بر روی نمونه ها انجام شده، مقدار $0/15$ برای نمونه های ۲۸ روزه بدون افزودنی و $0/09$ برای نمونه های ۲۸ روزه با افزودنی و $0/10$ برای نمونه های ۹۰ روزه با افزودنی حاصل شده که کاهش ۴۰ درصدی و ۳۳ درصد به ترتیب برای نمونه های ۲۸ و ۹۰ روزه با افزودنی نمایش می دهد البته کاهش ۴۰ درصدی به ۳۳ درصد بدلیل کمبود جامعه آماری نمونه های آزمایشی بوده است.

۹- نتایج و تفسیر

- ارتباط بین آزمایشهای مقاومت الکتریکی سطحی و RCPT حتی در نمونه های کارگاهی معمول که هیچ کنترل اضافه ای بر روند تولید آنها انجام نشده است نیز پا برجا بوده و بنابراین با توجه به پایه های تئوریک مشترک این دو آزمایش و همچنین نتایج تحقیقات آزمایشگاهی و کارگاهی موجود با اطمینان بیشتری می توان از نتایج ساده، سریع، ارزان و غیر مخرب مقاومت الکتریکی سطحی با استفاده از دستگاه ونر به عنوان جایگزین آزمایش RCPT استفاده کرد.
- همچنین می توان از نتایج هر دو آزمایش RCPT و مقاومت الکتریکی مشاهده نمود که اثر همزمان استفاده از میکروسیلیس و MCI به شدت مفید بوده بطوری که نتایج به دست آمده زیر حدود استاندارد مطرح شده در ایتیم ۷ فوق می باشد.

۱۰- مراجع

1-BHRC NO.S-428, (2005), national code of practice for concrete durability in the Persian Gulf and Oman Sea, "in Persian".

2-BHRC NO. R-434, (2006), assessing concrete durability with different cements and pozzolans in Persian Gulf and environment," in Persian".

3-Dubravka Bjegovic and Boris Miksic, FNACE-"MCI Protection of Concrete".

۴- تدین، م. و تدین، م.ح.، (۱۳۸۹)، "ارزیابی و معیارهای دوام"، مجموعه مقالات سخنرانی های تخصصی انجمن بتن ایران، تهران، ایران، ۹ تیر.

۵- صمدیان، م.، (۱۳۸۷)، "اثر پوزولانی در خواص مکانیکی و دوام در مقابل نفوذ یون کلراید بتن های خود تراز"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.

6- B. Miksic, "Use of vapor phase inhibitor for the protection of metal parts". Corrosion 83, paper no. 308, (Anaheim California, NACE International, April 18-22, 1983.

7-American Society of Testing and Materials, (1997), "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," ASTM C 1202, Philadelphia, USA.

۸- رضانیانپور، ع. (۱۳۹۰)، "بررسی ارتباط نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی بتن با آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید در نمونه های کارگاهی"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، ایران، ۶ اردیبهشت.

9-B. Miksic and J. Jackson Meyer and A. Furman and M.Hanson-" *NEW TRENDS IN MIGRATING CORROSION INHIBITOR TECHNOLOGY FOR CORROSION PROTECTION OF EMBEDDED STEEL REINFORCEMENT*"

10-Dubravka Bjegovic and Boris Miksic, FNACE-"*MCI Protection of Concrete*".