Archive OF SID

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.

سازمان بنادر و دریانوردی

مرکز بررسی اطلاعات علمی

ICOPMAS

www.SID.ir

Archive of SID

بسمه تعالی

"روشهای حفاظت بتن و آرماتورها در مقابل املاح مضر در سازه های دریایی"

دکتر علی اکبر رمضانیانپور

مهندس منصور پیدایش

دانشکدهٔ عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده :

سازه های ساحلی در خاورمیانه تحت اثر فشارهای هیدرواستاتیکی ، بارگذاری ضربه ای ، افت ناشی از فرسایش و سیکلهای متعددی از تغییرات حدود نهایی دماهای مختلف قرار می گیرند . نتیجتاً این سازه ها غالباً از بتن با مقاومت بالا و دارای فولادهای تقویتی یا پیش تنیدگی سنگین خواهند بود . لذا محافظت فولاد مدفون در بتن از نقطه نظر دوام دارای اهمیت زیادی است . عملکرد بتن در محیط های دریایی و چگونگی مکانیزم خرابیهای بتن مبین این حقیقت است که نفوذپذیری بتن مهمترین عامل تعیین کنندهٔ دوام طولانی مدت آن می باشد . جهت حصول به این هدف یعنی ساخت بتن با مقاومت بالا و نفوذپذیری کم ، مصالح جدید زیادی برای استفاده در بتن طی دهه های اخیر بوجود آمده اند که در این رابطه خصوصاً انواع خاص سیمانها، مواد افزودنی و پوزولانها از اهمیت ویژه ای برخوردار هستند . همچنین تکنولوژی ساخت بتن با ویژگیهای فوق مدتهاست مطرح بوده و در روشهای اجرایی و آئین نامه های فنی بیان شده اند . در این ارتباط تامین پوشش بتن کافی بر روی فولادهای تقویتی و کابلهای پیش تنیدگی از عوامل مهم است . این واقعیت را نباید از نظر دور داشت که پوشش زیاد باعث افزایش عرض ترک در پوشش بتنی می شود ، در حالی که مقدار خیلی کم آن هم نفوذ راحت تر آب نمک دار و خورنده را موجب می گردد . لذا با فرض ترک خوردن بتن مسلح در شرایط بهره برداری طی تغییرات حجمی معمول ، طراحان به محدود ساختن عرض ترکها تمایل هستند . همچنین شواهد تاریخی از خرابی بتن در سازه های قدیمی نشان می دهد که مسائل بسیاری از نفوذ آب از طریق درزهای اجرایی و درزهای سرد بوجود آمده اند . بعنوان یک عامل مهم دیگر تنشهای حرارتی در بتن به علت حرارت هیدراتاسیون نیز باید بوسیلهٔ جلوگیری از ایجاد گرادیانهای حرارتی بالا که معمولاً پس از ۲۴ تا ۴۸ ساعت از بتن ریزی بوجود می آیند ، کاهش داده شوند . بنابراین برای احداث هر سازهٔ جدید نه تنها انتخاب مصالح و نسبتهای آنها برای مخلوط بتنی که باعث تولید محصولی با نفوذپذیری کم شود حائز اهمیت است ، بلکه بایستی آب بندی سازه در طول عمر مفید آن در حد لازم تامین گردد . این مقاله به ملزومات ساخت بتن با دوام در محیط های دریایی پرداخته و توصیه های لازم را در زمینهٔ مصالح تشکیل دهنده، روشهای اجرایی و مقابله با ترک خوردگی های بعدی ارائه می نماید . ضمناً چون در شرایط محیطی بسیار حاد علاوه بر تمهیدات اتخاذ شده برای کاهش نفوذپذیری بتن نیاز به حفاظت بیشتر آرماتور در مقابل خوردگی نیز هست ، لذا مقالهٔ حاضر به بحث پیرامون روشهای حفاظت آرماتور از جمله حفاظت کاتدی، استفاده از ممانعت کننده‌های شیمیایی، بکارگیری پوشش های آلی و غیر آلی و استفاده از آلیاژهای مقاوم به خوردگی برای آرماتورها نیز می پردازد .

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه :

از میان سه نوع مصالح اصلی سازه ای یعنی فولاد ، بتن و چوب ، بتن مسلح رایج ترین مصالح مورد استفاده در سازه های دریایی است . بتن مسلح با سیمان پرتلند حدود یکصد سال پیش ابداع شده و یکی از وسیع ترین مصالح صنعتی مورد استفاده در جهان گردیده است . دلایل متعددی برای این امر وجود دارد ، از جمله مقاومت عالی بتن در مقابل آب ، سهولت فرم پذیری بتن در اشکال و اندازه های مختلف اعضای بتنی سازه ای ، ارزانتر بودن و سهولت دسترسی به مصالح تشکیل دهندهٔ آن تقریباً در هر نقطه از جهان . تعداد وسیعی از بارانداز‌ها ، حوضچه های تعمیراتی ، تیرها و پایه های پل ، موج شکن ها و تونل های زیردریایی گواه روشنی از پذیرش عمومی بتن به عنوان مصالح ساخت مناسب برای سازه هایی است که در معرض محیط دریایی قرار دارند . در حقیقت در طول چند دههٔ گذشته ، کاربرد بتن به عنوان مصالح سازه ای اصلی در بسیاری از پروژه های دریایی بصورت قابل ملاحظه گسترش یافته است . درصورتیکه این ماده طبق اصول صحیح ساخته و نگهداری شود ، پایایی و دوام بالا خواهد داشت . اما در اثر انتخاب مصالح نامناسب ، کیفیت ضعیف اجرا و عدم نگهداری کافی ، خرابیهایی بویژه در مناطق سخت و خورنده برای بتن اتفاق می افتد . در کشور ما با گسترش فعالیتهای عمرانی در نواحی ساحلی جنوب کشور و سرمایه گذاریهای بسیاری که در این زمینه صورت گرفته است ، ضرورت احداث سازه های سنگین به منظور هدفهای مختلف احساس گردیده و از آنجا که سازه های فولادی در شرایط محیطی جنوب دارای عمر و دوام کافی نیستند ، سازه های بتنی مورد استفاده قرار گرفته اند و با درنظر گرفتن این پیش فرض که دوام بتن بالا بوده و عوامل مخرب در آن تاثیر اندکی دارد ، به طور وسیعی کاربرد پیدا کرده است . لیکن متاسفانه شرایط خاص منطقه به خصوص ضعف اجرا و کیفیت پایین بتن ، بعضاً باعث تخریب بتن گردیده و لذا امروزه خرابیهای حادث شده نظر اکثر دست اندرکاران و کارشناسان بتن را بخود معطوف داشته است . حتی در پاره ای از موارد هزینهٔ مرمت خرابیها بالاتر از هزینه ساخت سازه برآورد شده است . قابل ذکر است که سواحل و جزایر خلیج فارس از نظر آب و هوا یکی از ویژه ترین مناطق جهان است . دما در این منطقه به علت نزدیکی به خط استوا نسبت به مناطق دیگر جهان بالاست . تغییرات دما در شبانه روز و در طو ل سال نیز بسیار متغیر است . همچنین بعلت آنکه آب خلیج فارس با وسعتی در حدود ۲۰۰۰۰۰ کیلومترمربع فقط از تنگهٔ باریک هرمز به عرض ۳۵ کیلومتر با آبهای آزاد در ارتباط است و دورترین نقطهٔ خلیج فارس تا این تنگه حدود ۱۹۰۰ کیلومتر فاصله دارد ، املاح موجود در این آب از دیگر آبهای جهان بیشتر است . رطوبت و شرجی هوا و تغییرات روزانه ، فصلی و سالانهٔ آن نیز نتیجه منطقی آب و هوای منطقه است . هوای شرجی منطقه که در خود ، یونهای فعال کلر را حمل می کند ، ضمن آنکه بر روی سازه های بتنی تاثیر مخربی می گذارد ، به عنوان کاتالیزوری برای تشدید خوردگی با دیگر عوامل مضر همکاری می نماید . لذا در این شرایط با

www.SID.ir

Archive of SID

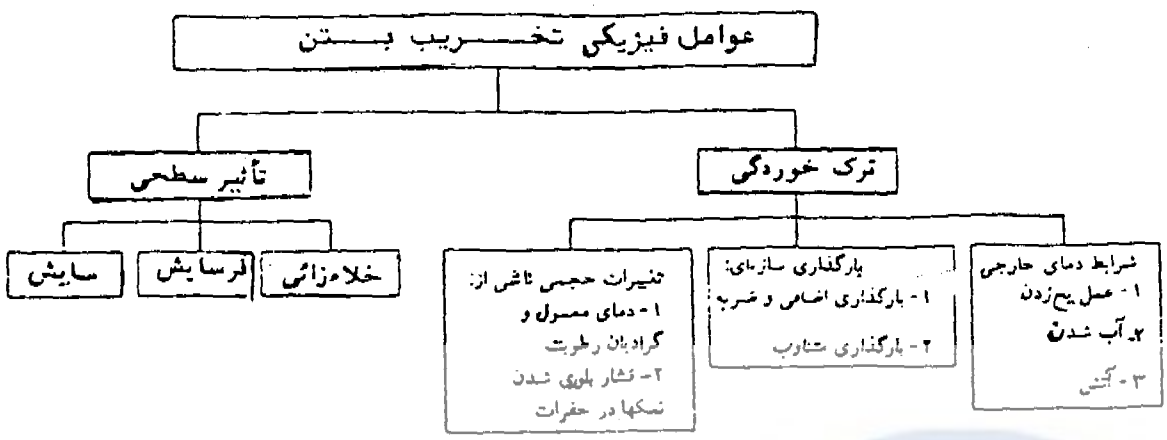
ملاحظه آلودگیهای موجود در مصالح سنگی منطقه و ضعف اجرا نمی توان کاربرد بتن مسلح را مانند مناطق دیگر که دارای شرایط عادی هستند ، بدون بررسی همه جانبه و دقتهای ویژه بر روی کلیه عوامل موثر بر دوام بتن مسلح پذیرفت .

مکانیزم خرابی سازه های بتنی مسلح در محیط دریایی

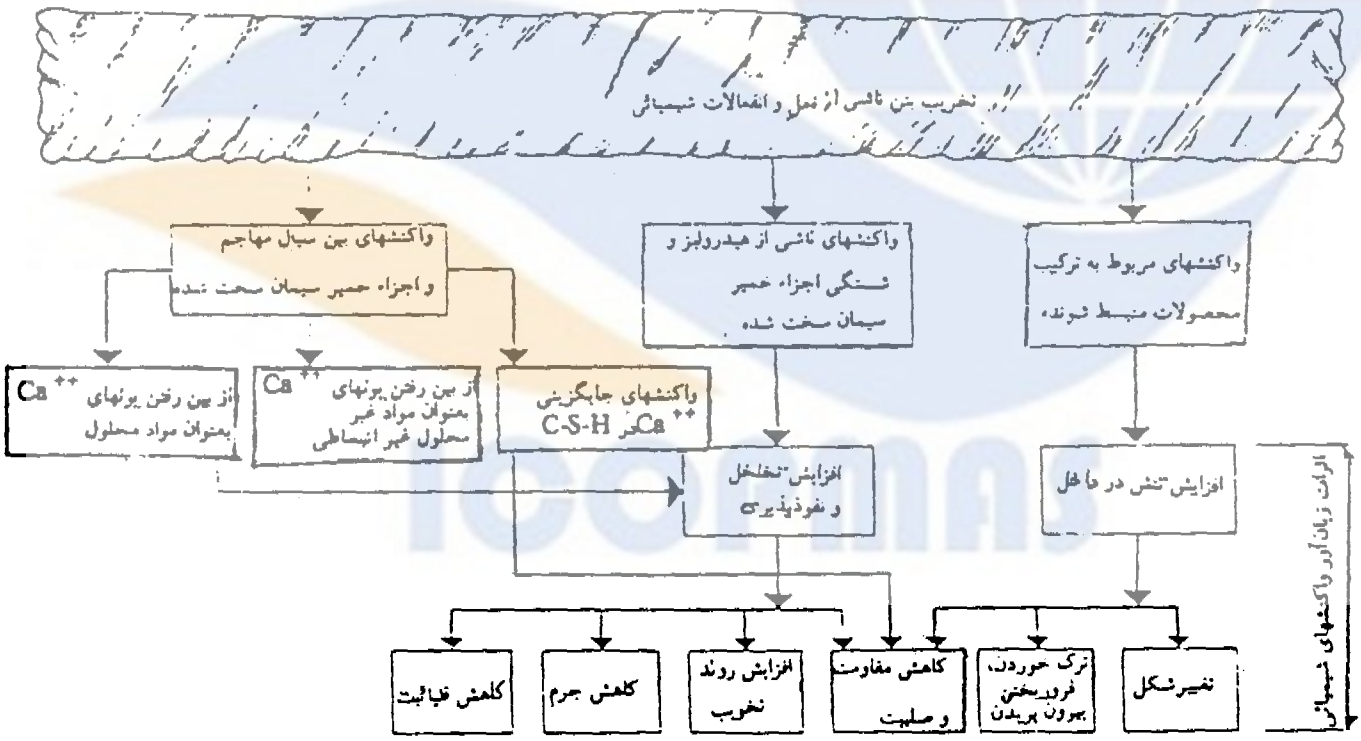
محیط های دریایی عموماً محیط های خشن برای مصالح معمولی از جمله بتن مسلح می باشند . آب دریا عموماً دارای یونها و گازهای خورنده بوده و جایگاه موجودات دریایی که برای مصالح ساختمانی مضر می باشند . فشارهای هیدرواستاتیکی و تغییرات بالای دما که اغلب در نواحی ساحلی و سازه های دریایی وجود دارند ، قادر به سرعت بخشیدن به خرابی و فشار مصالح ساختمانی می باشند . طوفانها و بادهای شدید که موجهای بزرگ را ایجاد کرده اند ، گاه سازه های بسیار محکم را دچار شکست کرده اند . بطور کلی بررسی تاریخچهٔ اجرای بتن در آب دریا مبین حضور بسیاری از عوامل فیزیکی و شیمیایی تخریب بتن د محیط دریایی است . این عوامل در شکلهای (۱) و (۲) دسته بندی شده اند . این امر بصورت نموداری در شکل (۳) نشان داده شده است و از آن میتوان نتیجه گرفت که سازه های بتنی در محیط اقیانوسی در معرض یکی از مخرب ترین محیط های طبیعی در جهان قرار گرفته اند . البته باید توجه داشت که دسته بندی عوامل تخریب بتن در گروههای کاملاً مجزا از هم دارای محدودیتهایی می باشد . آنالیز شکست بتنی که حالت تخریب پیشرفته ای را داراست ، عموماً نمایانگر رفتار تداخلی و پیچیدهٔعوامل فیزیکی و شیمیایی توام در بروز و پیشرفت خرابی است . علت آنست که معمولاً بسیاری از پدیده های فیزیکی و شیمیایی وابسته بهم بوده و متقابلاً یکدیگر را تشدید می نمایند . به عنوان مثال انبساط و ترکهای ریز میکرونی ناشی از تاثیر فیزیکی فشار ایجاد شده در اثر کریستاله شدن نمک در یک بتن نفوذپذیر باعث افزایش نفوذپذیری شده و زمینه را برای اندرکنش شیمیایی زیان آور بین آب دریا و محصولات هیدراسیون سیمان فراهم می کند . همچنین تجزیه شیمیایی و شستشوی اجزاء تشکیل دهندهٔ خمیر سیمان هیدراته شده مر ب اثرات فیزیکی زیان آور مانند افزایش تخلخل و نتیجتاً افت مقاومت می شود . بهرحال تقسیم بندی ارائه شده هدف خاصی را تعقیب می نماید . این نوع دسته بندی ، بررسی پدیده های متفاوت موجود به منظور درک علل و عوامل و نتیجتاً کنترل آنها را ساده تر می نماید . ولی برای بررسیهای کارگاهی نادیده گرفتن تاثیرات متقابل عوامل فیزیکی و شیمیایی کار اشتباهی است ، خصوصاً وقتی مسئله پیش بینی عمر مفید سازهٔ بتنی در شرایط محیطی مخرب مدنظر باشد . به نظر می رسد که مراحل تخریب فیزیکی - شیمیایی ناشی از آب دریا به صورت ترک خوردگی یا افت جرم آن خود را ظاهر می سازند . گرچه چندین پدیدهٔ مختلف وجود دارند که قادر به ایجاد ترک در بتن هستند ولی همگی آنها دارای اهمیت یکسان

www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۱) : عوامل فیزیکی خرابیهای بتن .



شکل (۲) : انواع فعل و انفعالات شیمیایی موثر در تخریب بتن .

www.SID.ir

Archive of SID

نیستند . در شرایط واقعی کارگاهی مشاهده شده که سازه های بتنی در اثر ترکیب تنشهای ناشی از سیکلهای گرم و سرد شدن ،تر و خشک شدن ، یخ زدن و آب شدن و خوردگی میلگردهای فولادی تخریب می شوند . در سازه های بتن مسلح ، پدیدهٔ الکترو شیمیایی خوردگی میلگردها تقریباً همیشه با ترک خوردگی و فرو ریختن پوشش بتن همراه می باشد .

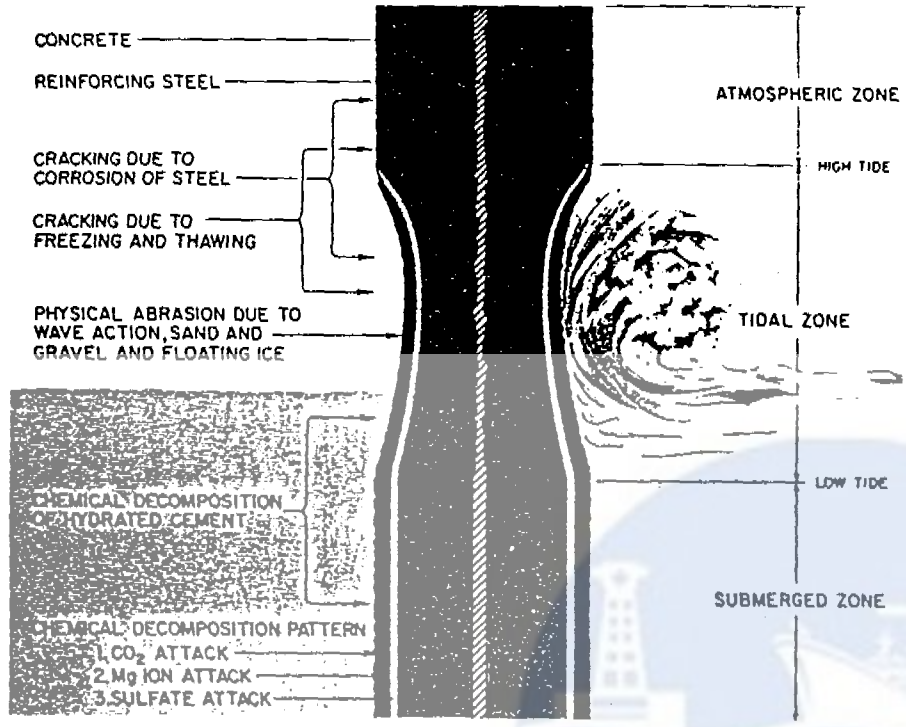
سازه های موجود در آب و هوای سرد ممکن است در هر زمستان در معرض سیکلهای متعدد یخ زدن و آب شدن واقع شوند و بتن های دارای میزان هوای ناکافی معمولاً دچار انبساط و ترک می شوند . در مناطق گرم و خشک ، بتن واقع در ناحیهٔ تر و خشک شدن به واسطهٔ سیکلهای تر و خشک شدن به علاوه گرم و سرد شدن ممکن است ترک بخورد . ضمناً تجزیه شیمیایی خمیر سیمان هیدراته شده در اثر حمله سولفات منیزیم و دی اکسید کربن باعث کاهش مقاومت شده و منجر به کاهش جرم در اثر سایش بتن توسط عمل امواج دریا خواهد گردید . مکانیزم های اساسی برخی از پدیده های مضر که در ارتباط با دوام بتن در سازه های دریایی اهمیت بیشتری دارند ، ذیلاً بطور مختصر اشاره می گردد . درک علتهای خرابی ، زمینهٔ منطقی برای کنترل آنها را فراهم آورده ، مبنای توصیه های رایج برای بتن بادوام در محیط دریایی می شود .

الف) خوردگی میلگردهای فولادی :

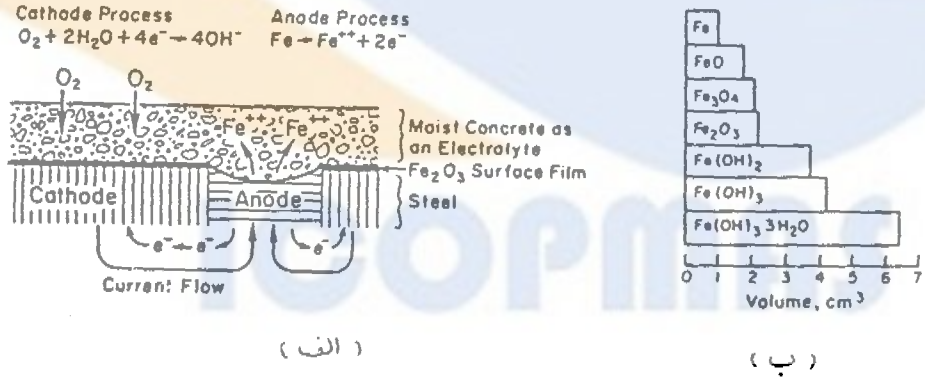
خوردگی فولاد در بتن یک روند الکترو شیمیایی است که در آن پیلهای خوردگی عموماً به علت اختلاف بین غلظت یونها و گازهای موجود در مجاورت فلز تشکیل می گردد .معمولاً میلگرد فولادی دارای یک فیلم نازک Feo.oH روی سطح خود می باشد که فولاد را در مقابل خوردگی مقاوم می سازد . این فیلم محافظ در محیط قلیایی سیمان پرتلند هیدراته شده که عموماً دارای PH > ۱۳ می باشد ، پایدار است . ولی هم با افت میزان قلیائیت محیط پیرامونی به PH کمتر از ۱۱ و هم با حضور یونهای کلرور آسیب می بینند . در بتن نفوذپذیر پدیدهٔ کربناتاسیون نیز غالباً عاملی جهت کاهش PH می باشد . ولی از آنجا که آب دریا دارای غلظت بالایی از یونهای کلرور است ، بنابراین یک علت عمومی از بین رفتن محافظ موضعی میلگردهای فولادی نفوذ یونهای کلرور به سطح فولاد است . نتایج حاصله از برخی تحقیقات نشان می دهد که غلظت های کلرور به میزان ۰/۶ تا ۰/۹ کیلوگرم بر مترمکعب در بتن یا ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ گرم در لیتر در آب منفذی جهت متلاشی کردن لایهٔ محافظ کفایت می کند . وقتی محافظت فولاد در بخشهایی از آن یا بطور کامل شکسته شد ، پتانسیل الکترو شیمیایی بطور موضعی بیشترین بار منفی را می یابد . به تعبیر دیگر ، سطح نسبت به سایر نقاط فولاد که هنوز محافظت شده هستند و بنابراین به عنوان کاتد عمل می

www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۳) : مراحل فیزیکی و شیمیایی موثر در تخریب عضو بتنی مسلح در معرض آب دریا



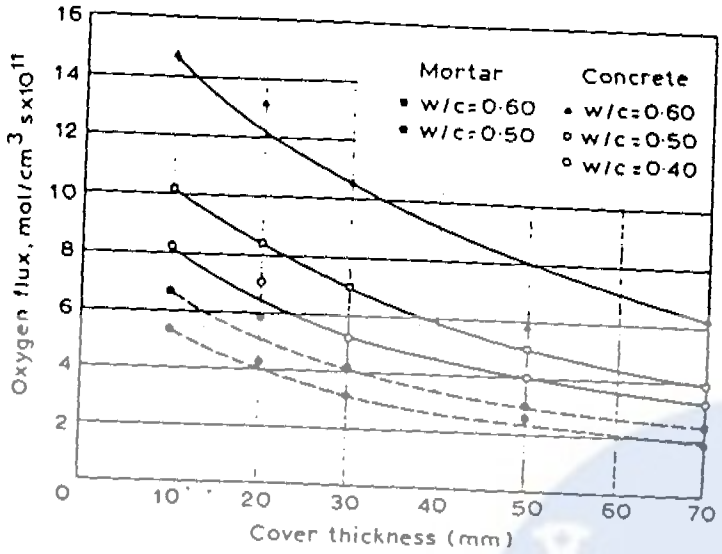
(الف) (ب)

شکل (۴) : الف ـ فعل و انفعالات آندی و کاتدی مربوط به خوردگی فولاد در بتن .

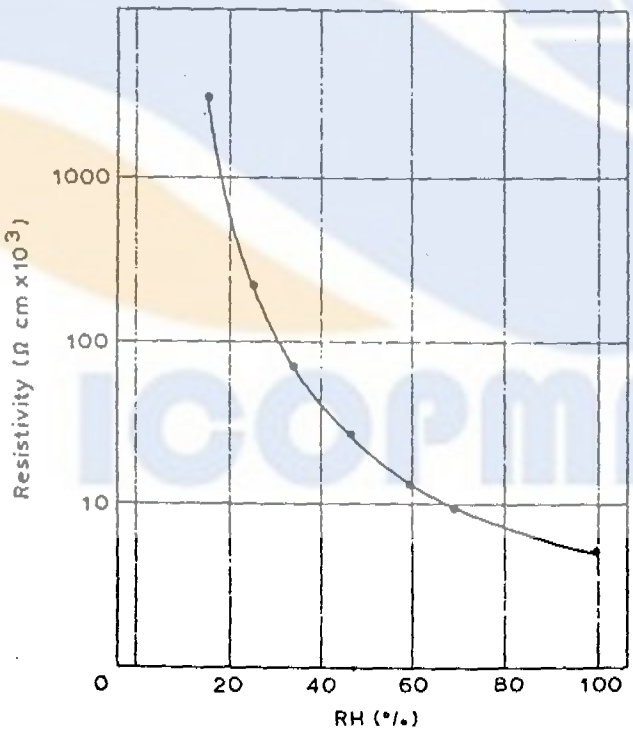
ب ـ انبساط حجمی منتجه از اکسیداسیون آهن فلزی .

www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۵) : تاثیر ضخامت پوشش و نسبت آب به سیمان برروی میزان انتشار اکسیژن .



شکل (۶) : تاثیر درجهٔ اشباع آب برروی مقاومت الکتریکی بتن .

www.SID.ir

Archive of SID

نمایند ، آند می شود . تغییرات شیمیایی ایجاد شده در نواحی آندی و کاتدی در شکل (۴-الف) نشـان داده شده است . علاوه بر انهدام لایهٔ محافظ ، دو شرط دیگر نیز باید بطور همزمان تحقق یابند تـا خوردگـی بـه میزان قابل ملاحظه ای اتفاق بیفتد . شرط اول دسترسی مداوم به اکسیژن و آب درکاتد و شرط دوم هدایت الکتریکی بتن می باشد (باید متذکر شد که بتن اشباع می تواند به عنوان یک الکـترولیت عمـل نمـاید) . تـا مادامی که مقاومت الکتریکی بتن بیش از ۷۰×۱۰^{۳} اهم سانتی مـتر باشـد ، خوردگـی قـابل ملاحظـه ای در فولاد داخل بتن اتفاق نمی افتد . به دنبال عمل اکسیداسیون آهن ، تبدیل آهن فلزی به زنگ ممکن است با افزایش قابل توجه در حجم (به بزرگی ۶۰۰ درصد) همراه شود و این افزایش حجم می توانـد عـامل اساسـی انبساط و ترک خوردگی بتن باشد . (شکل ۴-ب) .

لازم به ذکر است که حضور اکسیژن در سطح میلگرد فولادی به عوامل چندی بستگی دارد . اساساً غلظـت اکسیژن گازی درهوا تقریباً ۲۱۰ میلی لیتر در لیتر است ، در حالی که حداکثر غلظت اکسـیژن محلـول در آب دریا فقط ۵ تا ۱۰ میلی لیتر در لیتر است . اکسیژنی که در مراحل الکترو شیمیایی در کاتد شرکت مـی کند ، باید به صورت محلول باشد . بهرحال میزان انتشار اکسیژن در آب خیلی کند مـی باشـد . گرچـه هـم نفوذپذیری بتن و هم ضخامت پوشش بتنی برروی میزان حضور اکسیژن در سطح فولاد تـاثیر مـی گـذارد ، ولی برخی محققین معتقدند که درجهٔ اشباع آب یک فاکتور مهمـتر اسـت . تـاثیر نسـبت آب بـه سـیمان و ضخامت پوشش برروی میزان انتشار اکسیژن در بتن اشباع شده از آب در شکل (۵) نشان داده شده اسـت . براساس این شکل با یک ضخامت پوشش معین ، کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۶ تا ۰/۴ جریان اکسـیژن را با یک ضریب حدود ۲ کاهش می دهد و با یک نسبت آب به سیمان معین ، افزایـش ضخـامت پوشـش از ۱۰ تا ۷۰ میلی متر جریان اکسیژن با یک ضریب حدود ۲/۵ کاهش می یابد . همچنین با یک نسبت آب بـه سیمان معین و ضخامت پوشش مشخص ، جریان اکسیژن در ملاتها کمتر از بتن های مشابه با یـک ضریـب حدود ۲/۵ می باشد . این امر را می توان به اختلاف نفوذپذیری ناحیهٔ انتقـالی خمـیر سـیمان ـ فـولاد بیـن ملاتها و مخلوطهای بتن مشابه مربوط دانست . از نقطه نظر خوردگی میلگردهـای فـولادی ، افزایـش درجـهٔ اشباع آب بتن از طرفی دارای یک اثر مفید در کاهش میزان نفوذ اکسیژن است و از طـرف دیگـر مـی توانـد مضر باشد ، زیرا هدایت الکتریکی بتن یعنی عامل دیگری که باید موجـود باشـد تـا پدیـدهٔ الکتروشـیمیایی اتفاق افتد ، بطور جدی با افزایش درجهٔ اشباع افزایش می یـابد . تـاثیر درجـهٔ اشـباع آب بـر روی مقـاومت الکتریکی بتن در شکل (۶) نشان داده شده است . اطلاعات این شکل نشان می دهـد کـه بـا کـاهش درجـهٔ اشباع آب از ۱۰۰% به ۲۰% مقاومت الکتریکی بتن از حدود ۷×۱۰^{۳} اهم سانتی متر به ۶×۱۰^{۵} اهم سـانتی متر افزایش می یابد . می توان نتیجه گرفت که حتی وقتی قشر محافظ میلگردهای فولادی توسط کلرورها ، CO_2 یا سایر عوامل مخرب آسیب ببینند ، در صورتی که عضو بتنی در یک محیط خشـک باشـد ، خوردگـی

www.SID.ir

Archive of SID

اتفاق نمی افتد . علت آنست که جهت ایجاد خوردگی مقاومت الکتریکی باید کمتر از یک مقدار مرزی معین باشد که در یک بتن غیراشباع نمی تواند به این مقدار برسد . با افزایش درجهٔ اشباع تا ۱۰۰% مقاومت الکتریکی بتن یک عامل محدود کنندهٔ خوردگی نخواهد بود و در این حال خوردگی توسط اکسیژن قابل دسترس در روی فولاد کنترل خواهد شد . از آنجا که میزان انتشار اکسیژن محلول در بتن کاملاً اشباع به شدت کند است ، تعجب آور نیست که حداکثر خوردگی یک عضو بتن مسلح در جایی اتفاق بیفتد که شرایط تر و خشک شدن وجود داشته باشد .

ب) حملات مواد شیمیایی :

سطح بتن اولین خط دفاعی در برابر آب دریا می باشد . با دستیابی به پوستهٔ بتنی با کیفیت بالا و یا غیرقابل نفوذ می توان حملهٔ شیمیایی آب دریا را به سطح محدود نمود . اگر بتنی نفوذپذیر گردد و نفوذ آب دریا در آن موثر شود ، زمینهٔ لازم برای انجام گرفتن واکنشهای آسیب رسان بین آب دریا و مواد تشکیل دهندهٔ خمیر سیمان پرتلند هیدراته شده آماده می گردد . لازم به ذکر است که مقدمات تجزیهٔ مواد شیمیائی تشکیل دهندهٔ بتن فراهم می باشد ، زیرا خمیر سیمان پرتلند هیدراته قلیائی است (از ترکیبات کلسیم تشکیل شده که در تماس با محلول منفذی PH آن بزرگتر از ۱۳ می باشد) ، در حالی که آب دریا حاوی یونهای اسیدی بوده ، دارای PH نزدیک به خنثی می باشد (۸/۲ تا ۸/۴) . آراگونیت ($caco_3$) پایدارترین ترکیب محیط آب دریاست و بدین دلیل در خارجی ترین ناحیهٔ بتن در نزدیکی سطح این ماده . . . دارد . محصولات جامد هیدراتاسیون در خمیر سیمان کاملاً هیدراته شده که از سیمان پرتلند معمولی تیپ I ساخته شده معمولاً هیدروکسیدکلسیم ، هیدرات مونوسولفوآلومینات کلسیم و هیدراتهای سیلیکات کلسیم می باشند . تمامی این مواد نسبت به تجزیه در اثر حملهٔ co_2 حساس می باشند (جدول ۱) . به دلیل پائین بودن غلظت co_2 در آب دریا ، عواقب حملهٔ co_2 جدی نخواهد بود . زیرا تشکیل شدن آراگونیت غیرمحلول نفوذپذیری بتن را کاهش می دهد . اما این نوع حفاظت در برابر حملات بعدی مواد شیمیایی در ناحیهٔ پاشیده شدن آب دریا موثر نخواهد بود ، زیرا برخورد امواج می تواند محصولات واکنش شیمیایی بوجود آمده در سطح را به محض تشکیل شدن از بین ببرد . همچنین در دهانه های رودخانه ها و خلیج های کوچک که میزان co_2 محلول زیاد می باشد ، آراگونیت به بیکربنات کلسیم تبدیل می شود و این ماده به دلیل محلول بودن ، از محیط شسته و خارج می گردد . این پدیده تخلخل بتن را افزایش داده ، در نتیجه مقاومت آن کاهش می یابد .

همانگونه که جدول فوق نشان می دهد ، نمکهای منیزیم موجود در آب دریا نیز ممکن است وارد واکنشهای شیمیایی مخرب با خمیر سیمان شده ، تشکیل بروسیت (هیدروکسیدمنیزیم) و محصولات جانبی محلول مانند کلریدکلسیم و سولفات کلسیم دهند . در بتن های قدیمی ، در نتیجهٔ تبادل یونی بین آب دریا و هیدراتهای سیلیکات کلسیم موجود در خمیر سیمان پرتلند هیدراته شده ، یک ترکیب سیلیکات منیزیم

www.SID.ir

اثرات فیزیکی توأم با واکنشهای شیمیائی	واکنشهای شیمیائی محتمل	ترکیبات آب دریا که قادر به واکنشهای شیمیایی زیان‌آور با سیمان پرتلند هیدراته شده هستند.
هم پیکرنات کلسیم و هم گچ در آب دریا محلول هستند. سنتی مصالح و ضعف حمیر سیمان هیدراته شده می‌توانند با تشکیل جنین ترکیباتی مرتبط باشند از آنجا که همهٔ محصولات هیدراسیون سیمان پرتلند از جمله هیدروسیلیکات کلسیم توسط واکنشهای کربناتاسیون قابل تجزیه هستند، سنتی نفوذپذیر در آب دریا با غلظتهای Co_2 بیشتر از حد نرمال احتمالاً دچار خرابی می‌شود.	$CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow \underset{\text{aragonite}}{CaCO_3} + H_2O \xrightarrow{CO_2} \underset{\text{bicarbonate of calcium}}{Ca(HCO_3)_2}$ $CO_2 + [Ca(OH)_2 + 3CaO\,Al_2O_3\,CaSO_4\,19H_2O] \rightarrow 3CaO\,Al_2O_3\,CaCO_3\,xH_2O + \underset{\text{gypsum}}{CaSO_4}\,2H_2O$ $3CO_2 + 3CaO\,2SiO_2\,3H_2O \rightarrow \underset{\text{aragonite}}{3CaCO_3} + 2SiO_2\,H_2O$	دی‌اکسید کربن مقادیر جزئی از Co_2 غیر محلول ناشی از جذب Co_2 موجود در هوا همیشه در آب دریا وجود دارد اما مواد نباتی پوسیده می‌توانند غلظتهای بیشتر و مضر Co_2 غیر محلول ایجاد کنند که عموماً باعث کاهش PH آب دریا به مقدار کمتر از A می‌شود.
$Cacl_2$ و گچ محلول در آب دریا باعث ضعف و سستی مصالح می‌شوند. تشکیل انبساط با انبساط و ترک خوردگی همراه است. همچنین گزارش شده است که تبدیل $3Cao.2sio_2.3H_2$ به	$MgCl_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow \underset{\text{brucite}}{Mg(OH)_2} + CaCl_2$ $MgSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow Mg(OH)_2 + \underset{\text{gypsum}}{CaSO_4\,2H_2O}$ $MgSO_4 + [Ca(OH)_2 + 3CaO\,Al_2O_3\,CaSO_4\,18H_2O] \rightarrow Mg(OH)_2 + 3CaO\,Al_2O_3\,3CaSO_4\,32H_2O$ $MgSO_4 + [Ca(OH)_2 + 3CaO\,2SiO_2\,3H_2O] \rightarrow \underset{\text{amorphous}}{4MgO\,SiO_2\,8H_2O} + CaSO_4\,2H_2O$	نمکهای منیزیم بطور نمونه آب دریا شامل ۳۲۰۰PPM ترکیب Mgl_2^- و ۲۲۰۰PPM ترکیب $Mgso_4$ می‌باشد. در رابطه با ترکیبات هیدراته شدهٔ سیمان، نمکهای منیزیم مذکور حتی با غلظتهای کم، زیان‌آور به شمار می‌آیند.

جدول (۱) : عمل تجزیهٔ اجزاء سیمان پرتلند هیدراته شده توسط آب دریا .

www.SID.ir
Archive of SID

Archive of SID

($4Mgo.Sio_{2}.8H_{2}O$) شناسایی گردیده است . بنا بر نظر برخی محققین ، جایگزینی هیدراتهای سیلیکات منیزیم به جای هیدراتهای سیلیکات کلسیم موجب ضعیف و شکننده شدن بتن می گردد .
قابل ذکر است که غلظت سولفات منیزیم در آب دریا (تقریباً ۲۲۰۰ میلی گرم در لیتر) به حدی است که باعث ایجاد حملهٔ سولفاتی گردد . این پدیده بطور معمول با انبساط و از دست رفتن جرم در اثر تشکیل اترینگایت و گچ مرتبط می باشد . اما با وجود آنکه محققان زیادی وجود اترینگایت و گچ را در بتن تخریب شده در اثر بررخورد با آب دریا شناسایی نموده اند ، انبساط و ترک خوردگی که بطور متداول مربوط به تشکیل اترینگایت است ، در موارد حملهٔ آب دریا صورت نمی گیرد . این پدیده در اثر تشکیل شدن اترینگایت در محیط حاوی یون کلر (ونه محیط قلیایی) صورت می گیرد که در نتیجهٔآن اترینگایت در اثر جذب آب متورم می شود .
یونهای کلر موجود در آب دریا نیز به درون بتن نفوذ می کنند . با وجود آنکه کلر می تواند با خمیرهای سیمان حاوی مقادیر زیاد $C_{3}A$ وارد واکنش شده ، تشکیل هیدرات کلروآلومینات کلسیم دهد ،ولی محصول فوق در حضور یونهای سولفات و co_{2} ناپایدار است . بهمین علت است که ترکیبات پایدار واکنش بین خمیر سیمان پرتلند و co_{2} ، Mg^{2+} و $SO4^{2-}$ در محدودهٔ خارجی بتن یافت می شود ولی هیدرات کلروآلومینیات کلسیم حضور ندارد . ضمناً تشکیل شدن این ترکیب در نتیجهٔحملهٔ آب دریا به سیمان پرتلند بر مقاومت بتن اثری ندارد ولی ،در صورتی که خمیر در محیط حاوی یون کلر به جای محیط حاوی یون هیدروکسیل اشباع شود ، افت قابل توجهی در مقاومت و خواص الاستیک بتن رخ خواهد داد .
حملهٔ شیمیایی آب دریا عمدتاً به خمیر سیمان محدود می گردد ، اما در برخی موارد زمانی که سنگدانه های حاوی سیلیس فعال در ساخت بتن بکار برده شود ، این حملات ممکن است شامل ذرات سنگدانه ها نیز بشود . یونهای Na^{+} و کلر موجود در آب دریا واکنش قلیایی ـ سیلیسی را تسریع نموده ، در شرایط خاص ممکن است منجر به انبساط و ترک خوردن بتن گردد .

ج ـ فشار حاصل از تبلور نمکها :

در مواد متخلخل فشار حاصل از تبلور نمکها در محلولهای فوق اشباع ایجاد تنش هایی می نماید که ممکن است باعث ترک خوردگی و پوک شدن گردند . چنین حالاتی در پوشش دیوارهٔ تونل ها ، قطعات یا دیواره های بتن نفوذپذیر رخ می دهد ، خصوصاً زمانی که یک وجه عنصر سازه ای در معرض آب حاوی نمک (آب دریا) و وجوه دیگر درمعرض هوای گرم (بعنوان مثال پدیدهٔ تبخیر) قرار می گیرد . بطور کلی هر چه درجهٔ فوق اشباع بالاتر باشد ، فشار کریستالیزاسیون نیز بیشتر خواهد بود . حتی برای درجهٔ فوق اشباع پایین مانند ۲ ، بلوری شدن Nacl می تواند فشاری معادل ۶۰۰ اتمسفر اعمال نماید . در این حالت تنش حاصل به حدی خواهد بود که اغلب سنگها را می شکنند .

www.SID.ir

Archive of SID

بطور کلی آب حاوی نمک قادر است از طریق خاصیت موئینه به داخل بتن نفـوذ نمـاید و بدیـن ترتیـب در محدودهٔ تبخیر (معمولاً ۰/۳ تا ۰/۵ متر بالای سطح آب) کریستالیزاسیون نمک باعث تخریب بتن می گردد که این تخریب مشابه خرابی ناشی از عمل یخبندان است . در نتیجه در محـدودهٔ پاشـش آب دریـا تخریـب بتن تا حدی در اثر فشار حاصل از تبلور نمک است . در بخشهایی از قطعات افقی بتنی که آب بصورت چالـه راکد بماند ، امکان بروز آسیب دیدگی ناشی از تبلور نمک وجود دارد . در مواردی که سیکلهای متعدد تبلور نمک رخ دهد ، تخریب و کنده شدن بتن از نوع پوستهٔ پیاز صورت می گیرد . این پدیده به نـام حلقـه هـای Liesegang نیز معروف است .

البته کیفیت سطحی بتن نقش مهمی در تعیین سرعت رسوب گذاری نمـک بـر سـطح سـازهٔ بتـن واقـع در محیط دریایی ایفا می نماید . بنابراین در بتن ریزی مناسب ، دستیابی به سـطح صـاف و غیرقـابل نفـوذ در درجهٔ اول اهمیت می باشد . این مسئله خصوصاً درمورد مخلوطهای بتن حاوی میکروسیلیس حـائز اهمیـت است ، زیرا این مخلوط ها چسبنده اند و پرداخت سطح آنها مشکل می باشد .

د ـ حمله توسط میکرو ارگانیسم ها :

حضور هر نوع گوگرد در محیط هوازی باعث رشد میکروارگانیسم هایی به نام تیو باسیلها (Thiobacilli) می گردد . تیو باسیلها که شامل گروه متنوعی از باکتریها می شوند ، قادرند سولفور را به سولفات تبدیل نموده ، ضمناً تشکیل اسیدسولفوریک دهند که این ماده برای فـولاد و بتـن بسـیار خورنـده اسـت . انـواع مختلـف تیوباسیل ها وجود دارند که در تخریب میکروبی بتن موثر هستند . البته محـدوده هـای PH مناسـب بـرای رشد و منابع تغذیه ای متداول (انرژی) برای هرنوع متفاوت است . بخصوص لولـه هـای بتنـی و سـازه هـای بتنی دیگر که حاوی نفت باشند ، در معرض حملهٔ تیوباسیلها قرار دارنـد . بنـا بـه نظـر محققـان بـه غـیر از گوگرد ، برای رشد این باکتریها تنها به اکسیژن و کربن نیاز می باشد . خوشبختانه بتن های با دانسیتهٔ بـالا و فاقد نفوذپذیری ، به علت بالا بودن PH سیمان پرتلند هیدراته شده نسـبت بـه چنیـن حمـلات باکتریهـا ایمن هستند . تنها در مواقعی که قلیائیت خمیر سیمان کاهش می یابد ، بتن مورد حملهٔ میکروارگانیسم ها قرار خواهد گرفت .

ملزومات ساخت بتن بادوام در محیط های دریایی

با توجه به بررسی علل متداول تخریب بتن در آب دریا ، بنظر می رسد که مکـانیزم یکسـانی در بسـیاری از پدیده های مخرب دخیل می باشد . به عنوان مثال برخی از محققین بر این باورند کـه در عمـل یخبنـدان ، حملهٔ سولفات ها ، واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه ها و خوردگی میلگردهـای فـولادی ، انبسـاط بتـن هـا مربوط به ایجاد فشارهای هیدرولیکی است . درحقیقت در تمامی این موارد ، درجهٔ اشباع آب در بتن ، که به نفوذپذیری وابسته است ، نقش مهمی را ایفا می نماید . به تجربه مشخص گردیده که حتی مخلوط هـای بـا

www.SID.ir

Archive of SID

نفوذپذیری کم بتدریج در حین کار نفوذپذیر می شوند و بدین ترتیب در معرض حملهٔآب دریا قرار می گیرند . تحقیقات انجام شده نشان می دهد که تنشهای حرارتی ایجاد شده در اثر سرد شدن نامناسب محصولات عمل آوری شده در بخار ، یکی از عوامل ایجاد ترکهای میکروسکوپی است و این پدیده عامل اصلی تشدید نفوذپذیری بتن در سازه می باشد .

بنابراین لازم است انتخاب مصالح تشکیل دهنده ، نسبتهای اختلاط و عملیات اجرایی بتن بادقت فراوانی انجام شود تا زمانی که سازه در معرض درجه حرارتهای شدید قرار می گیرد (در سیکلهای متعدد یخ زدن و آب شدن و گرم و سرد شدن) ، ترکهای میکروسکوپی کاهش یابند . تمهیدات خاص در این موارد ذیلاً مورد بحث قرار می گیرد .

الف ـ ملاحظات خاص جهت مصالح تشکیل دهندهٔ بتن بادوام در محیط دریایی :

تا اواسط قرن حاضر ، مخلوطهای بتنی عموماً از چهار جزء تشکیل می شدند : سیمان ، آب ، سنگدانه های ریز و سنگدانه های درشت . ولی اغلب بتن های تولید شدهٔ امروزی ، محصولی چند جزئی شامل یک یا چند مادهٔ افزودنی علاوه بر چهار جزء اصلی می باشند . از سوی دیگر برای هرجزء معمولاً تولید کننده انتخابهای متعددی دارد که بر روی هزینهٔ محصول نهایی و رفتار آن در حالت بهره برداری موثر می باشد . بنابراین قبل از بررسی نسبتهای اختلاط ، آگاهی از انتخابهای قابل دسترس در مورد سیمانها ، مصالح سنگی و مواد افزودنی سودمند خواهد بود . معمولاً انتخاب مصالح یک هنر است ، زیرا همیشه احتمال اثرات نامطلوبی بواسطهٔ استفاده از یک مادهٔ مشخص وجود دارد . در یک مخلوط چند جزئی ، اثرات اندرکنش مواد به سهولت قابل پیش بینی نیست . لذا اولاً ارزیابی آئین نامه های فنی و روشهای پیشنهادی فعلی گام نخست به سوی شناخت و آگاهی از این هنر می باشد ، ثانیاً استفاده از نتایج مخلوطهای آزمایشی در آزمایشگاه و محیط کارگاه برای دستیابی به راه حلهای بهینه ضروری به نظر می رسد . توصیه های ACI و FIP و تجربیات مربوط به محدودهٔ دریای شمال برای مصالح تشکیل دهندهٔ بتن در جدول (۲) ارائه گردیده است . در حاشیهٔتوصیه های مندرج در این جدول ، ذیلاً نکاتی چند مورد اشاره قرار می گیرد :

۱- برای آبهای محتوی املاح سولفات به میزان بیش از ۱/۵ گرم در لیتر و یون سولفات بالاتر از ۱۰ گرم در لیتر ، سیمانهای پرتلند با C_3A کمتر از ۵ درصد برای دستیابی به مقاومت درمقابل سولفاتها توصیه شده است . ولی جهت طراحی بتن سازه های دریایی استفاده از سیمان پرتلند معمولی با مقدار C_3A بین ۴ تا ۱۰ درصد پیشنهاد شده است . حد نهایی مقدار C_3A را می توان براساس شدت حملهٔ سولفاتی تعیین نمود ولی با مقادیر بسیار کم C_3A ترکهای ناشی از خوردگی کمتری نسبت به مقادیر بیشتر C_3A مشاهده شده است . این امر ممکن است به علت غیرقابل حل شدن یونهای کلرید به شکل هیدرات کلروآلومینات کلسیم $C_3A.CaCl_2.11H_2O$ باشد . با در نظر گرفتن بعضی از خواص بتن مانند کارآیی ، واکنش در مقابل

www.SID.ir

Archive of SID

جدول (۲) : مصالح تشکیل دهندهٔ بتن برای سازه های دریایی .

مصالح	توصیه‌های ACI۳۶۷R -۸۴	توصیه‌های FIP - ۱۹۸۵	مشاهدات حاصل در ناحیه دریال شمال
ترکیبات سیمان	مقدار C۳A سیمان پرتلند نباید از ۴% کمتر شود تا محافظت کافی برای فولادهای تقویتی فراهم گردد. حداکثر C۳A به ۱۰% محدود می‌شود تا مقاومت در مقابل حمله سولفاتی تأمین گردد.	در قسمتهای مجاور آب و هوا، سیمانهای پرتلند با C۳A متوسط توصیه می‌شوند. از سیمانهای زود سخت شونده تنها باید برای تعمیرات استفاده گردد. سیمانهای با حرارت هیدراتاسیون کم برای سازه‌های با ابعاد حجیم‌تر ترجیح داده می‌شود.	برای Gullfaksc (۸۷-۱۹۸۶)، سیمان پرتلند با ریزی بیشتر (۴۰۰m۲/kg بلین)، مطابق با نوع ASTM II با ترکیب (۴۹% C۳S و ۵/۵% C۳A) بکار رفته است. بتن Beryl A (۱۹۷۴)، با سیمان نوع ASTM I (۵۵% C۳S ، ۸% C۳A و نرمی ۳۰۰m۲/Kg بلین ساخته شده است.
افزودنیها کلریدها	هیچ کلریدی نباید به صورت آگاهانه اضافه شود. کل یون کلرید محلول در آب مخلوط بتنی از کل اجزاء سازنده باید از ۰/۱ درصد، وزنی سیمان برای بتن با فولادهای معمول و ۰/۰۶ درصد برای بتن پیش‌تنیده، تجاوز نماید.	$CaCl_2$ یا افزودنیهای محتوی بیش از ۰/۱ درصد کلرید به صورت وزنی سیمان نباید مورد استفاده قرار گیرند.	هیچ نوع افزودنی کلریدی نباید مورد استفاده واقع شود.
مواد شیمیایی و هوازا	در جایی که دوام در برابر یخ‌زدگی و ذوب شدن لازم باشد، بتن می‌باید محتوی هوای محبوس به میزان توصیه شده توسط ACI ۲۰۱/۲R باشد.	عوامل حباب هوازا، مواد افزایش دهنده، کارآیی، و کندگیر کننده‌ها، اغلب برای دستیابی به طرح مخلوط بهینه لازم هستند، ولی هشدارهایی برای ارزیابی اثرات جانبی هر نوع ماده افزودنی قبل از استفاده درنظر گرفته می‌شود.	برای Gullfaksc ، از مواد حباب هوازا برای بتن مجاور آب استفاده شده است. فاکتور فاصله به میزان ۰/۲۵ میلیمتر با ۳ تا ۵ درصد حباب هوا نتیجه شده است. همچنین بتن شامل ۶ لیتر در مترمکعب روان‌کننده از نوع نفتالین سولفونیت بوده است.

www.SID.ir

Archive of SID

مصالح تشکیل‌دهنده بتن برای سازه‌های دریایی (ادامه)

مصالح	توصیه‌های ACI۳۶۷R -۸۴	توصیه‌های FIP -۱۹۸۵	مشاهدات حاصل در ناحیه دریال شمال
پوزولانها	پوزولانهای مطابق ASTMC۶۱۸ (تنها شامل پوزولانهای طبیعی و خاکستر بادی می‌شود) را می‌توان پس از انجام آزمایشهایی برای تعیین مزایای نسبی و معایب موجود به ویژه در رابطه با مقاومت سولفاتی، کارآیی و خوردگی فولادها مورد استفاده قرار داد.	مصالح پوزولانی باکیفیت بالا، مانند میکروسیلیس مخصوص برای تولید و دستیابی به مقاوم اصلاح شده و زیاد، دوام و کارآیی اضافه می‌شوند.	بتن Gullfaksc برای قسمتهای مجاور آب تقریباً محتوی ۵ درصد میکروسیلیس به نسبت وزنی سیمانی بوده است.
سنگدانه‌ها	ماسه و شن طبیعی، با سنگدانه‌های شکسته مطابق ASTMC۳۳ و سنگدانه‌های سبک وزن مطابق با ASTMC۳۳۰.	از سنگدانه‌ها، مشابل به تغییرات فیزیکی با شیمیایی در بتن نباید استفاده نمود. از سنگدانه‌های دریایی نباید استفاده کرد، مگر اینکه مقدار کلرید در حد قابل قبول باشد، و همچنین سنگدانه‌ها محتوی مقدار کمی صدف دریایی باشند.	از ماسه و شن طبیعی باکیفیت بالا استفاده شده است. در بتن سازه‌های قدیمی‌تر حداکثر اندازه سنگدانه‌های درشت ۳۲ میلیمتر می‌باشد، ولی در سازه‌های دریایی ساخته شده، اخیر (۸۷-۱۹۸۱) این مقدار به ۲۰ میلیمتر محدود شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

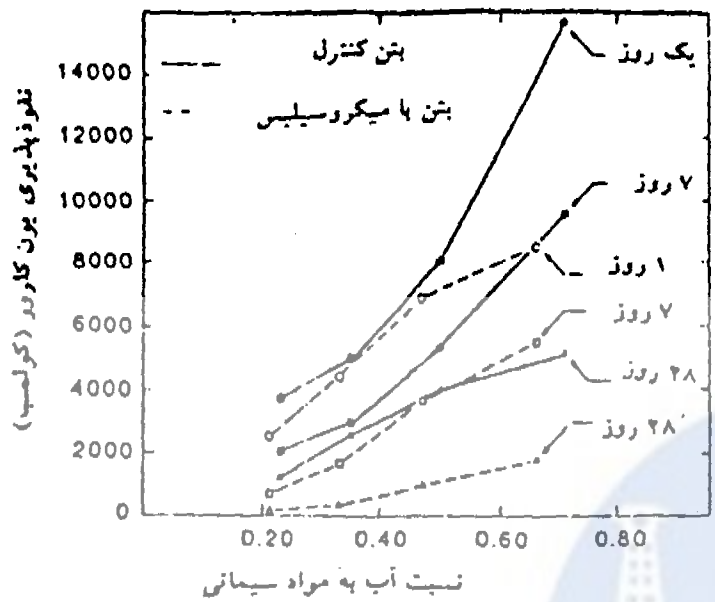
ترکهای ریز ناشی از تنشهای حرارتی و نرخ انتشار یونهای کلرید تجربه نشان داده است که اغلب سیمانهای پرتلند انواع I و II (با مقادیر متوسط C_3A و C_3S) در ترکیب با مواد مضاف معدنی برای ساخت مخلوطهای بتنی لازم در محیطهای دریایی مناسب می باشند . گزینهٔ دیگر استفاده از سیمانها ی پرتلند مخلوط مانند نوع IP محتوی حداکثر ۳۰% خاکستر بادی با کلسیم کم یا نوع IS محتوی حداکثر ۷۰% ... باره کوره آهنگدازی می باشد .

۲- مواد مضاف معدنی پوزولانی به وسیلهٔریزی اندازهٔذرات (سطح مخصوص زیاد) و عدم حضور کلی کریستالها (ساختار شیشه ای) یا کریستال بودن ضعیف مشخص می شوند . در حالی که اندازهٔ ذرات نقش مهمی در مشخصات رئولوژیکی بتن تازه (چسبندگی ، آب انداختگی ، کارآیی و ....) دارد ، درجهٔ کریستالی بودن در فعالیت شیمیایی موثر می باشد . با اصلاح کارایی و همگنی بتن ، کاهش حرارت هیدراتاسیون و افزایش مقاومت ناحیهٔ انتقال و جلوگیری از بروز ترکهای ریز در این ناحیه ، مواد پوزولانی قادر به افزایش مقاومت بتن در مقابل ترک خوردگی در برابر عوامل مختلف می باشند . لذا از آنجا که هم مقاومت و هم نفوذپذیری بتن در شرایط بهره برداری توسط میزان ترکهای موئین داخلی مشخص می شوند ، واضح است که استفاده از یک مادهٔپوزولانی مناسب وقتی که دوام طولانی مدت بتن در محیط دریایی از ملاحظات طراحی اولیه است ، اهمیت زیادی دارد .

یکی از پوزولانهای بسیار فعال ، میکروسیلیس است . میکروسیلیس یک محصول مصنوعی حاصل از کوره های قوسی الکتریکی در جریان تولید فلز سیلیسم یا آلیاژهای سیلیسم بخصوص آلیاژهای فروسیلیس است ، که با داشتن بیش از ۸۰ درصد سیلیس با حالت غیرکریستالی و به شکل ذرات بینهایت ریز با قطر متوسط ۰/۱ میکرون شدیداً یک مادهٔ پوزولانی قوی است . اثر میکروسیلیس بر روی بتن ، ایجاد ساختاری با حفره های ریزتر و تغییرات روی فصل مشترک سیمان و سنگدانه است که در کل کاهش نفوذپذیری را بدنبال دارد . به همین سبب باعث کاهش قابل ملاحظهٔ میزان نفوذ یون کلرید به داخل بتن که عامل خوردگی فولاد است ، می گردد (شکل ۷) . با افزایش مقدار میکروسیلیس و کاهش نسبت آب به مواد سیمانی می توان نفوذپذیری را به حداقل ممکن رساند . میکروسیلیس همچنین به علت واکنش های پوزولانی با هیدروکسید کلسیم سبب کاهش این ترکیب در مخلوط بتن شده و خطر حمله و خرابی سولفاتی را کاهش می دهد . به علاوه با کاهش نفوذ پذیری بتن میزان نفوذ یون سولفات به درون بتن و امکان بروز حمله را تقلیل می دهد . در بررسیهای انجام شده عملکرد میکروسیلیس در کنترل انبساط ناشی از پدیدهٔ واکنش قلیایی سنگدانه های بتن نیز قابل توجه بوده است . نتایج حاصله خاطر نشان می سازد که میزان جایگزینی بین ۱۰ تا ۱۵ درصد وزنی میکروسیلیس به جای سیمان در کنترل این پدیده موثر بوده است . البته درصد میکروسیلیس لازم به عوامل زیادی از جمله نوع سنگدانهٔ فعال ، شرایط نگهداری و

www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۷) : تاثیر میکروسیلیس برروی نفوذ یون کلرید در بتن .

www.SID.ir

Archive of SID

محیطی ، میزان قلیائیها و سیلیس موجود ، نوع میکروسیلیس مصرفی ، نوع سیمان و نسبت آب به مواد سیمانی بستگی دارد .

سربارهٔ کورهٔ ذوب آهن نیز یک محصول فرعی است که پس از عمل احیاء آهن خام به صورت مذاب درقسمت تحتانی کوره جمع می شود . عمدتاً چنین ناخالصی هایی که خاصیت رسی نیز دارند ، از جنس سیلیس و آلومین اند . نتایج تحقیقات نشان داده است که بتن های حاوی سربارهٔ کورهٔ ذوب آهن که سریعاً سرد شده باشد و بصورت آسیاب شده در بتن مصرف گردیده ، دارای مقاومت بیشتری در مقابل حملهٔ سولفاتها و آب دریا نسبت به بتن ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی است . برخی پژوهشگران معتقدند که مقاومت در مقابل سولفاتها زمانی ایجاد می شود که نسبت سرباره بیش از ۶۵ درصد باشد . آنها سعی کرده اند علت مقاومت در مقابل سولفاتها بر اثر مصرف درصد زیاد سرباره را تشریح نمایند . علت عمده است که جذب و ایجاد فعل و انفعال با هیدروکسید کلسیم ناشی از هیدراتاسیون سیمان باعث تراکم بسیار زیاد خمیر سیمان می گردد ، بطوری که نفوذپذیری به شدت کاهش یافته و فعل و انفعالات شیمیایی خطرناک از سوی عوامل مهاجم نمی تواند صورت گیرد . مزیت عمدهٔ این نوع سیمان پوزولانی بر سیمان نوع V آن است که سیمان نوع V به دلیل پائین بودن مقدار C_3A در مقابل سولفاتها مقاوم است ولی در مقابل کلرورها مقاومتی ندارد . ضمناً با افزایش درصد سرباره سرعت انتشار یونهای مخرب از جمله یون کلرید در درون خمیر سیمان سخت شده به میزان زیادی کاهش می یابد .

۳- از آنجا که خواص بتن تازه و سخت شده با استفاده از مواد افزودنی اصلاح می گردد ، می توان از یک یا چند نوع از آنها در ساخت مخلوط بتنی استفاده نمود . کلیهٔ استانداردها استفاده از کلرید کلسیم یا هر مادهٔ افزودنی شامل کلرید را در بتن مسلح ممنوع می دانند . این امر بویژه در سازه های بتن مسلح در محیط د..ائی اهمیت ویژه ای دارد .

بتن هایی با میزان آب کم به ویژه آنهایی که شامل ذرات ریز پوزولانی هستند ، نیاز به استفاده از روان کننده یا کاهش دهندهٔآب به عنوان مادهٔ افزودنی جهت تولید مخلوطی یکنواخت ، همگن و کاراً دارند . علت آن است که در محلهایی که بتن دارای ساختار میکروسکوپی غیرهمگن است ، تمایل به تشکیل ترکها وجود خواهد داشت . قبل از دستیابی به فوق روان کننده ها ، روان کننده هایی از نوع لیگنوسولفونات بطور وسیعی به این منظور مورد استفاده قرار می گرفتند . این نوع مواد دارای مقادیر زیادی شکر و ناخالصیهای دیگر هستند که موجب کندگیر شدن و ایجاد حباب هوا می شوند . ولی فوق روان کننده های با خلوص بالا مانند نفتالین یا ملامین سولفوتاتها نسبتاً از چنین اثرات جانبی مضری عاری می باشند . ضمناً در مقایسه با لیگنوسولفوناتها ، نفتالین یا ملامین سولفوناتها پراکندگی بهتری را در سیستم آب ـ سیمان بوجود می آورند . مسئله دیگری که باید مدنظر قرار گیرد ، این است که عدم سازگاری مادهٔ افزودنی فوق روان کننده با یک محصول ویژهٔ سیمان پرتلند و یا مواد افزودنی دیگر موجود در یک مخلوط بتنی یک

www.SID.ir

Archive of SID

پدیدهٔعمومی است . لذا ضروری است که آزمایشهایی با مصالح قابل دسترس محلی صورت گیرد تا مسائل پیش بینی نشده قبل از احداث سازه برطرف شوند .

۴- همانگونه که قبلاً اشاره شد ، ترکهای موئین در ناحیهٔانتقال بین ذرات سنگدانه های درشت و خمیر سیمان ، دلیل مهمی برای نفوذپذیری بتن در حالت بهره برداری می باشند . از آنجا که اندازه ، شکل و کانیهای تشکیل دهندهٔ سنگدانه ها اثر قابل توجهی برروی مقاومت ناحیهٔ انتقال دارند ، لذا تاثیر سنگدانه ها برروی مقاومت و دوام بتن باید مورد ملاحظه جدی قرار گیرد . عموماً سنگدانه بزرگتر از ۲۰ میلی متر و با طول و یا سطح خیلی زیاد ، تمایل به افزایش آب ناشی از آب انداختن در نزدیکی سطح بواسطهٔ ایجاد مانع دارند . این وضع به ایجاد ناحیهٔ انتقال متخلخل و ضعیف منجر شده ، ترکهای ریز به راحتی در تنشهای کم ایجاد شده و عاملی جهت کاهش مقاومت و افزایش نفوذپذیری بتن می گردند .

بطور کلی از نقطه نظر دوام طولانی مدت بتن در محیط دریایی ، سنگدانه های لازم برای ساخت مخلوط بتن می بایستی از لحاظ کانی شناسی همگن ، قوی ، سخت و تمیز باشند . این امر بویژه برای بتن قسمتهای مجاور آب که تحت اثر سایش و فرسایش شدید قرار دارند ، ضروری است . با توجه به تجارب اجرائی حاصله مربوط به مخلوطهای بتنی با کیفیت خوب (دارای مقاومت ۳۰ تا ۴۰ مگا پاسکال) ، به نظر می رسد که تحت شرایط شدید فرسایش و سایش ، معمولاً پیوستگی بین سنگدانه ها و خمیر سیمان از بین رفته و سنگدانه ها تمایل به بیرون کشیده شدن از خمیر سیمان داشته باشند . مخلوطهای بتن ساخته شده با فوق روان کننده ها ، نسبت آب به سیمان کم و پوزولانهای بسیار فعال مانند میکروسیلیس ، نواحی انتقال قوی داشته و لذا در پدیدهٔ بیرون کشیدن سنگدانه ها مقاوم هستند . وقتی از نسبت بالای سنگدانهٔ درشت به ریز در مخلوط بتن و نوعی سنگ سخت به عنوان سنگدانهٔ درشت استفاده شود ، سنگدانها قادر به مقاومت در مقابل حملهٔ فرسایشی و سایشی محیط بدون بیرون کشیده شدن از خمیر سیمان خواهند بود .

ضمناً سنگدانه های مصرفی در بتن باید از مواد شیمیایی جذب شده ، پوششهای رس و مصالح ریز دیگر در مقادیری که بر روی هیدراته شدن و چسبندگی خمیر سیمان تاثیر می گذارند ، عاری باشند و مواد زیان آور موجود در آنها به ویژه میزان کلروسولفات نباید از حداکثر مقادیر مجاز مذکور در استانداردها تجاوز نماید .

ب ـ ملاحظات خاص اجرائی جهت ساخت بتن بادوام در محیط دریایی :

برای احداث سازه های بتنی بادوام ، انتخاب مصالح و نسبتهای اختلاط تنها گام اول است و ضرورت دارد توجه کافی به تولید بتن و روشهای اجرائی نیز مبذول گردد . تکنولوژی ساخت بتن با ویژگیهای مورد نظر

www.SID.ir

Archive of SID

بخصوص نفوذپذیری کم مدتهاست مطرح بوده و در آئین نامه های فنی به تفصیل بیان شده است . از نقطه نظر دوام بتن در محیط دریایی به طرح چند مورد ویژه می پردازیم :

۱- از آنجا که لایهٔ سطحی به عنوان اولین خط دفاعی در برابر مایعات و املاح خورنده از اهمیت ویژه ای برخورداراست ، لذا ضرورت دارد پرداخت مناسبی بر روی بتن جهت ایجاد سطحی صاف و بدون حفرات و اشکالات سطحی انجام شود . بررسیها نشان داده است که مقاومت سایشی بتن شدیداً تحت تاثیر ساختار حفره ای سیمان در ۲ تا ۳ میلی متر از خارجی ترین ناحیهٔ سطحی بتن می باشد . این ساختار حفره ای متاثر از نسبت آب به سیمان و روشهای پرداخت سطحی است . ماله کشی مجدد بعد از بیرون آمدن رطوبت به سطح به وسیلهٔ قدرت اولیهٔ ماله کشی ، برای تبخیر مجاز بوده و ساختار حفره ای متراکم تر و مقاومت سایشی بهتری را ایجاد می کند . مخلوطهای بتنی با سیمان زیاد به ویژه آنهایی که محتوی میکروسیلیس باشند ، چسبنده و غلیظ بوده و پرداخت آنها دشوار می باشد . در چنین حالاتی از دستگاههای ارتعاشی ویژه برای دستیابی به سطحی صاف و غیرقابل نفوذ استفاده می شود . قابل ذکر است که رسوب کردن آراگونیت ($caco_3$) و بروسیت [$Mg(oH)_2$] بر روی سطح بتن به علت مجاورت با آب دریا نیز موجب تشکیل پوسته ای غیرقابل نفوذ می گردد . برخی بررسیها نشان داده که محدودهٔ فشارهای وارده به سازه های دریایی اثر اندکی بر روی این پوسته دارند ولی اثر عمده ناشی از تغییرات دما و حضور ترکیبات آلی می باشد .

حفاظت لایهٔ سطحی بتن در زمان باز کردن قالبها نیز مطرح است . بمنظور جلوگیری از هرگونه خرابی سطحی بتن در زمان باز کردن قالبها ، بتن باید به قدر کافی سخت شده باشد . این امر بویژه در طی زمانی که ترکهای حرارتی امکان تشکیل برروی سطوح نمایان نسبتاً گرم بتن در مجاورت نسیم سرد با آب عمل آوری خیلی سرد داشته باشد ، حائز اهمیت است . تحت چنین شرایطی ، عایق کردن سطح بتن بلافاصله پس از برداشتن قالبها مناسب خواهد بود .

۲- پوشش بتن کافی بر روی فولاد تقویتی و کابلهای پیش تنیدگی برای دوام ، به ویژه در محیطهای دریایی مهم می باشد . برای پیدا کردن مقدار بهینه ضخامت پوشش ، باید بخاطر داشت که پوشش زیاد باعث افزایش عرض ترک در پوشش بتنی می شود ، در حالی که مقدار خیلی کم آن هم نفوذ راحت تر آب نمکدار و خورنده را موجب می گردد . فرض می شود که در تغییرات حجمی معمول ، بتن مسلح در شرایط بهره برداری ترک می خورد ، با این حال ، طراحان به محدود ساختن عرض ترکها متمایلند چرا که بر وجود رابطه ای بین عرض ترک و خوردگی اعتقاد دارند . عموماً مشاهده می شود که از نقطه نظر خوردگی فولاد ترکهای طولی در امتداد فولادهای تقویتی از ترکهای عرضی خطرناکتر هستند . برای سازه های دریایی و ساحلی با ضخامت ۰/۵ متر و یا بیشتر ، ضخامت اسمی پوشش برای محافظت در برابر فولاد تقویتی و

www.SID.ir

Archive of SID

کابلهای پیش تنیدگی به ناحیه مجاور سازه بستگی دارد . با نوع بتن غیرقابل نفوذ جدید مورد استفاده برای سکوهای دریایی ، ضخامت پوشش بیشتر از ^{mm}۵۰ برای فولادهای تقویتی و یا پیش تنیدگی لازم نمی باشد .

۳- شواهد تاریخی از خرابی بتن در سازه های قدیمی نشان می دهد که مسائل بسیاری از نفوذ آب از طریق درزهای اجرایی و درزهای سرد بوجود آمده اند . برای دستیابی به درزهای اجرایی آب بندی شده ، باید سطح را با دقت سندبلاست و یا با جت آب با فشار زیاد آماده کرد تا تمامی مواد مضر ، کثیف و زاید پاک شده و سنگدانه های درشت تا عمقی حدود ^{mm}۶ نمایان شوند . ضمناً درزهای سرد بین بتن ریزیهای متوالی بوسیله استفاده از مواد افزودنی کندگیر کننده در بتن و ارتعاش مناسب قابل پیش گیری هستند .

۴- تنشهای حرارتی در بتن به علت حرارت هیدراتاسیون سیمان باید به وسیله جلوگیری از ایجاد گرادیانهای حرارتی بالا ، که معمولاً پس از ۲۴ تا ۴۸ ساعت از بتن ریزی بوجود می آیند ، کاهش داده شوند . تنشهای کششی زمانی بوجود می آیند که قطعه شروع به سرد شدن می کند ولی در مقابل انقباض مقید شده است . چون مقاومت کششی بتن کم بوده ، گرادیان حرارتی خیلی زیاد ، باعث ایجاد تنشهای کششی بزرگی شده و در نتیجه موجب ترک خوردن قطعه می گردد . ترک خوردگی حرارتی احتمالاً مهمترین عامل موثر در افزایش نفوذپذیری و کاهش دوام کلی مخلوطهای بتنی با کیفیت خوب می باشد ، مگر اینکه اندازه گیریهای دقیق برای محافظت بتن از گرادیانهای شدید تنشهای حرارتی صورت پذیرد . با مراجعه به توصیه های FIP ، وقتی که بعد حداقل بتن ریخته شده در یک زمان از ^{mm}۶۰۰ بزرگتر باشد ، و مقدار سیمان مخلوط از ^{3}۴۰۰Kg/m بیشتر انتخاب گردد ، هشدارهایی برای کنترل ترک خوردگی حرارتی باید ملحوظ شوند .

کاهش بالا رفتن دما در بتن یک مسئله اصلی و مهم است ، خصوصاً در مورد مخلوطهایی که مقادیر زیادی سیمان داشته و یا در اعضایی که ابعاد بزرگی دارند که برای بسیاری از سازه های دریایی این حالت وجود دارد . حرارت هیدراتاسیون ممکن است با محدود ساختن مقدار سیمان ، و کنترل ترکیب سیمان و ریزی آن کاهش داده شود . مقدار سیمان را با کم کردن نسبت آب به سیمان تا حد امکان و با در نظر گرفتن دانه بندی سنگدانه ها و همچنین نوع و مقدار ماده افزودنی کاهش دهنده آب با حفظ کارایی لازم ، مقاومت و نفوذپذیری بتن ، می توان کاهش داد . سیمان پرتلند سرباره کوره آهن گدازی ، و سیمان پرتلند پوزولانی عموماً حرارت هیدراتاسیون کمتری از سیمان پرتلند معمولی دارند .

ج ـ روشهای حفاظت آرماتورها :

با آنکه ساخت بتن های با کیفیت بالا و نفوذپذیری کم می تواند مساله دوام بتن در محیط های بسیار خورنده را تا حدبالایی حل نماید لیکن گاه برای اطمینان بیشتر ، از روشهای مختلف حفاظتی نظیر اعمال

www.SID.ir

Archive of SID

پوششهایی به سطح بتن و آرماتور ، انتخاب آرماتور از مواد و مصالح دیگر ، کاربرد موادی در داخل بتن برای جلوگیری از خوردگی و ترک و بالاخره حفاظت کاتد یک استفاده می شود . ذیلاً به اختصار پیرامون هر یک از این روشها توضیحاتی ارائه می شود :

۱- در روش حفاظت کاتد یک با القاء جریان به کمک یک منبع جریان الکتریکی و استفاده از آند می توان آرماتورهای فولادی را در مقابل خوردگی حفاظت نمود . این روش به عنوان یک سیستم کارآمد برای بسیاری از سازه های بتنی مسلح از جمله سازه های ساحلی و همچنین در پلها در کشورهای پیشرفته دنیا مورد استفاده قرار گرفته است . در کشورهای حاشیه خلیج فارس نیز در پاره ای سازه های ساحلی و نیز سازه های کنار آب به صورت محدود این روش بکار گرفته شده است . به هرحال در صورت کنترل برقراری جریان سیستم و نگهداری منظم می تواند روش مناسبی در کنترل خوردگی باشد .

۲- استفاده از پوششهایی بر روی آرماتور نظیر پوشش روی برای گالوانیزه کردن و پوششهای اپوکسی تا حدودی رایج بوده و گاه استفاده می شود . در حال حاضر این روشها را نمی توان کاملاً کنار گذاشت با آنکه در درازمدت در پاره ای سازه ها به دلایل اجرائی که غیرقابل اجتناب است این پوششها آسیب دیده و خوردگی از همان مناطق آسیب دیده آغاز گشته است . بنابراین لازم است در انتخاب این روشها به عنوان حفاظت در برابر خوردگی دقت لازم به عمل آمده و شرایط بتن و آرماتورو محیط دقیقاً در نظر گرفته شود .

۳- استفاده از فولادهای آلیاژی نیز در بتن به عنوان آرماتور چند سالی است که مورد تحقیق و گاه کاربرد قرار گرفته است و به علت مقاومت بسیار بالای فولادهای ضد زنگ نسبت به خوردگی راه حل مناسبی تشخیص داده شده است ، لیکن به لحاظ قیمت بسیار بالای این فولادها در مقایسه با آرماتورهای معمولی ، استفاده از آنها محدود به سازه های بسیار خاص می باشد .

۴- آرماتورهای ساخته شده از مواد پلیمری (FRP) به صورت مجموعه الیاف و چسب نیز چند سالی است که مورد تحقیق و آزمایش بوده و در مواردی نیز در محیط های خورنده بکار گرفته شده است . عملکرد خوب این نوع آرماتورها در محیط های خورنده و شرایط جنوب کشور می تواند امکان جایگزین شدن آن را با آرماتور فولادی فراهم نماید . اما باید توجه داشت که خواص دیگر این نوع آرماتور تحت بررسی است و بخصوص رفتار تنش ـ تغییر شکل آن حائز اهمیت می باشد . مساله هزینه و قیمت این محصول هم در مقایسه با آرماتور معمولی باید در محاسبات ملحوظ شود .

۵- استفاده از الیاف پلیمری در بتن (FRC) در کنترل و محدودیت ترک در بتن نیز در مواردی توصیه شده است که در سازه های با اعمال بارهای سیکلی و دینامیکی وجهت افزایش نرمی و بخصوص در اتصالات عملکردخوبی نشان داده اند . به هر حال با حل مساله اقتصادی این الیاف و احتمالاً تولید مناسب داخلی می تواند در مواردی در بتن بکار گرفته شود .

www.SID.ir

Archive of SID

۶- ممانعت کننده های خوردگی (Inhibitors) که کاربرد وسیعی در صنعت خوردگی دارند در بتن نیز به صورت محدود مورد آزمایش و گاه استفاده قرار گرفته اند . بازدارنده ها با جلوگیری از انجام واکنشهای شیمیایی و الکتروشیمیایی و یا کند نمودن آنها در بتن (عمل الکتروشیمیایی یونهای کلرید) تا حدی خوردگی را به تاخیر انداخته اند . در حال حاضر پاره ای از نیتریتها و بنزواتها به تولید رسیده و در مواردی مصرف شده اند . نیتریت کلسیم معایب نیتریت سدیم یا بنزوات سدیم را نداشته و با قیمتی پایین تر کاربرد بیشتری یافته است . به هر حال نتایج درازمدت و عملکرد واقعی در سازه های ساخته شده در محیط های بسیار خورنده به صورت قاطع بیان نشده است .

نتیجه گیری :

۱- محیط های دریایی عموماً محیط های خشن برای مصالح معمولی از جمله بتن مسلح می باشد . این امر به لحاظ یونها و گازهای خونده ، وجود موجودات دریایی مضر برای مصالح ، فشارهای هیدرواستاتیکی ، تغییرات بالای دما ، طوفانها و بادهای شدید و امواج سنگین می باشد .

۲- نفوذپذیری بتن مهمترین عامل تعیین کننده دوام طولانی مدت آن است . لذا برای احداث هر سازهٔ دریایی نه تنها انتخاب مصالح و نسبتهای آنها جهت تولید محصولی با نفوذپذیری کم حائز اهمیت است بلکه باید آب بندی سازه درطول عمر مفید آن رعایت گردد . جلوگیری از عریض شدن ترکهای ریز موجود در بتن به هنگام بهره برداری مسئله مهمی در این رابطه است .

۳- برای افزایش دوام سازه های بتنی در محیط دریایی باید مقاومت میلگردهای فلزی در برابر خوردگی افزایش یابد . این کار به دو صورت امکان پذیر است :

الف ــ جلوگیری از نفوذ ترکیبات موثر برخوردگی مانند یون کلرید و رطوبت و اکسیژن به درون بتن از طریق افزایش کیفیت پوشش بتنی .

ب ــ بالا بردن مقاومت میلگرد به صورت استفاده از فولادهای ضدزنگ و آلیاژی ، پوشش دادن میلگرد ، حفاظت کاتدی و استفاده از ممانعت کننده های خوردگی .

www.SID.ir

Archive of SID

منابع :

1) P. Kumar Mehta ." concrete in the marine enviroment"
Elsevier science publisher (1991)

2) Gerwick .B.C." pressing needs and futur opportunities in durability of concrete in marine enviroment" . proceedings Gerwick Symposium on durability of concrete in marine environment , ed . P.K.Mehta of cent , Civil Engineering University of California at Berkeley , 1989 ,P.P 1-5 .

3) Hoff . G.C. "The service record of concrete offshore structures in the North sea" Proceeding , International Conference on Concrete in the Marine Environment The concrete society , London , 1986 , PP. 131-142

۴- " بررسی علل کاهش عمر مفید سازه های بتنی " تالیف : علی اکبر رمضانیانپور ـ منصور صارمی . انتشارات مرکز تحقیقات وزارت راه و ترابری . آذر ۱۳۷۵

www.SID.ir

Archive of SID

Conservation Method of Maritime Armed Concrete Structures against Harmful Pollutants

A. A. Ramezanianpur, Ph.D.

M. Peydayesh, Eng.

Civil Engineering School of Amirkabir University of Technology

Abstract

Coastal structures in Middle East are under the impact of hydrostatic pressures, shock uploading, downfalls from erosion and various cycles of final temperature rage changes. Consequently, these structures are built from strong concrete and reinforced or pre-stressed steels. Thus, maintaining resistance of the steel within the concrete is highly significant. The performance of concrete in maritime conditions and mechanical processes of concrete destruction indicate the fact that concrete permeability is the crucial factor in determining its durability. The fact should also be considered that excessive coverage increases the width of the cracks on the concrete cover should be considered, while not enough coverage causes the ease of penetration of salty and corroding water in the construction. In this article, the essentials of making a durable concrete in maritime environments are described and the necessary recommendations about the constructing materials, the implementation methods and preventing the future cracks from happening are proposed. Also, in addition to the established provisions, since in critical environmental conditions, more conservation against erosion is needed in order to lower the concrete permeability, the armature conservation methods such as Cathodic preservation, implementation of the chemical preventers, using organic and non-organic covers and implementing anti-erosion alloys for the armatures are discussed are discussed and the results are presented.

Keywords: armed concrete; conservation methods; maritime structures

www.SID.ir