ابداع و ارزیابی روشی نوین برای تعیین سریع نفوذپذیری بتن در مقابل یون کلر

توسط

علی ربیعی

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی عمران - سازه های دریایی

دانشکده فنی دانشگاه تهران
تحصیلات تکمیلی

از این پایان نامه در تاریخ ۱۳۸۰/٤/۱۱ در مقابل

هیئت داوران دفاع به عمل آمد و مورد تصویب قرار گرفت

015929

- سرپرست کمیته تحصیلات تکمیلی
- مدیر گروه آموزشی
- نماینده تحصیلات تکمیلی گروه
- استاد راهنما

۲۹۰۲۳

چکیده

تعیین نفوذ پذیری بتن در مقابل یون کلر از مهمترین عوامل در ارزیابی پایایی بتن است.کلر از مهمترین عناصر آسیب رسان به سازه های بتن آرمه بخصوص در حاشیه خلیج فارس می باشد. بنابراین نفوذپذیری بتن در مقابل کلر ، نقش مهمی در ارزیابی عمر مفید سازه ها در محیط مهاجم خلیج فارس دارد .

یکی از روشهای مرسوم برای این کار، استفاده از روش نیمرخ کلر (روش شیمیایی با استفاده از اسید) می باشد. از مزایای روش پیشنهادی، سرعت زیاد در تعیین میزان نفوذ یون کلر و نیز مقدار کلر نفوذی، دقت زیاد و کم بودن هزینه آن است. در این کار پژوهشی کوشش به عمل آمده است که با استفاده از تغییرات مقاومت الکتریکی بتن در اثر تغییرات میزان آلودگی آن به یون کلر، بررسی روابط و یافتن قانونمندیهای مربوطه،روشی جدید برای تعیین مقدار کلر نفوذی وعمق نفوذ آن در بتن ارائه گردد.

در این روش بر اساس تغییرات مقاومت الکتریکی بتن بین دوالکترود، میزان نفوذ یون کلر بدست می آید. آزمونه هایی که در این آزمایشها مورد استفاده قرار گرفته اند مکعبهای ۱۵۰×۱۵۰ میلیمتر می باشند که در آنها حفره ای با سطح مقطع ۵۰×۵۰ میلیمتر و عمق ۱۰۰ میلیمتر تعبیه شده است. در هر طرف حفره چهار زوج الکترود در چهار ردیف به فواصل ۷ میلیمتر از هم قرار دارند و فاصله بین هر دو الکترود در یک ردیف ۱۰ میلیمتر می باشد. الکترودها فقط در ۵۰ میلیمتر وسط هادی جریان می باشند. برای این منظور دستگاهی ساخته شده است که مقاومت الکتریکی بین دو الکترود را مشخص می کند. عدد خوانده شده توسط یک مدارواسط(INTERFACE) به کامپیوتر فرستاده می شود و این عمل در فواصل زمانی مشخص تکرار می گردد. به وسیله نرم افزاری که به زبان VISUAL C++ نوشته شده است، اطلاعات فرستاده شده در فایلهای جداگانه ذخیره می گردد و به راحتی می توان بر روی اطلاعات بدست آمده عملیات آماری انجام داد. بعد از مدت زمان عمل آوری (۷ روز یا۲۱ روز) حوضچه وسط آزمونه یا ۱۲۵ سانتیمتر مکعب محلول کلر ۱۳ درصد پر می شود و عمل خواندن مقاومت الکتریکی به صورت منظم ادامه پیدا می کند. به محض نفوذ یون کلر به داخل بتن و وارد شدن به محدوده بین دو الکترود، مقاومت الکتریکی کاهش پیدا می نماید. با مقایسه مقاومت الکتریکی بین دو الکترود در زمانهای مختلف، میزان نفوذ و با مقایسه مقاومت الکتریکی بین زوج الکترودهای مختلف در یک زمان، عمق نفوذ یون کلر بدست می آید. نهایتا می توان با انجام آزمایش نیمرخ کلر به روش شیمیایی و مقایسه با نتایج بدست آمده از روش جدید، مدل ارائه شده را راستی آزمایی (کالیبره) نمود و ملاک سنجش نفوذ یون کلر قرار داد.

۳۹۰۲۳

سپاس فراوان نثار آقایان ***دکتر قالیبافیان*** و ***دکتر شکرچی زاده*** کـه انجـام ایـن امـر جـز بـا راهنمـایی ایشان امکان پذیر نبود.

و

درود بر آموزگارانی که در طول این دوره با زحمتهای بی دریغ خویش دنیای جدیدی در برابـر دیـدگانـم گشودند.امیدوارم تلاش این عزیزان را با تلاش در راه داشتن ایرانی آباد و آزاد به ثمر نشانم.
درود بی پایانم بر آقایان:
دکترامیر ابراهیمـی، دکتربدیعی، دکتربرگی، دکترحـاجی زاده، دکـتر رمضانیـانپور، دکـتر زاهـدی، دکترغیاثی، دکترفاخر، دکترفامیلی ، دکترقدوسی ، دکترگتمیری، دکترمحمودزاده و دکترمهرآذین.

بـر خـود لازم مـی دانـم از زحمتهای آقای *مهندس ایرج منصوری* کـه در سـاخت قـالب و تعـدادی از آزمونه ها، نهایت همکاری را داشته اند، تشکر و قدردانی نمایم
همچنین در ساخت سخت افزار و نرم افزار به کـار رفتـه در ایـن پـروژه، از کمکهای بسیار ارزنـده بـرادر عزیزم آقای *مهندس حسین ربیعی* برخوردار بوده ام که از ایشان صمیمانه سپاسگزاری می نمایم.

خدایا

به من توانایی عطاکن که بپذیرم آنچه را که نمی توانم تغییر دهم

و تغییر دهم آنچه را که می توانم

و بینشی که تشخیص دهم تفاوت این دو را.

حضرت علی (ع)

تقدیم به پدر و مادر عزیزم...

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: پایایی بتن و عوامل مؤثر در آن	
مقدمه	۱
شرایط جوی و نقش آن در پایایی بتن	٤
شرایط اقلیمی مناطق حاشیه خلیج فارس	٥
شرایط محیطی خلیج فارس	۸
- اثر هوای گرم	۹
- عناصر خورنده	۹
شرایط جوی خلیج فارس از دیدگاه آماری	۱۱
- دمای هوا	۱۱
- رطوبت نسبی	۱۱
- جهت و سرعت بادهای غالب	۱۳
- سرعت تبخیر	۱۳
وضعیت آب دریا	۱٤
- دمای آب دریا	۱٤
- املاح آب دریا	۱٥
فصل دوم: اصول خوردگی فولاد در بتن و حمله کلرایدها	
مقدمه	۱٦
نفوذ پذیری بتن	۱۷
عوامل مؤثر در نفوذ پذیری بتن	۱۸
- تخلخل	۱۸
- درجه هیدراتاسیون	۱۸
- نسبت آب به سیمان	۱۹
- خواص سیمان	۲۱
- سنگدانه ها	۲۱
- عمل آوری	۲۲

اصول خوردگی فولاد در بتن	۲٤
حالتهای مختلف فولاد در بتن	۲۷
حمله کلرورها	۳۰
راههای نفوذ کلراید	۳۲
پیوند کلراید	۳۲
عوامل مؤثر در رسیدن یون کلراید به عمق معینی از بتن	۳۳
- ترکیب سیمان	۳٤
- مقدار سیمان در متر مکعب بتن	۳٤
- ترکیب بتن	۳۵
- تراکم بتن	۳۵
- شرایط عمل آوری بتن	۳۵
- شرایط محیطی	۳٦
مدل سازی	۳۷
حد بحرانی کلراید	۳۸
فصل سوم: تعیین نفوذ پذیری بتن در مقابل یون کلر (روشهای موجود و استانداردها)	
مقدمه	٤۰
رفتار الکتریکی بتن	٤۰
مفهوم مقاومت ویژه الکتریکی	٤۱
تاثیر دما برروی مقاومت ویژه الکتریکی	٤۲
مسیر هدایت الکتریکی در داخل بتن	٤۳
مکانیزم هدایت الکتریکی در خمیر سیمان پرتلند	٤٤
روشهای نظری تعیین هدایت الکتریکی بتن به وسیله فاکتورهای شکل	٤٦
مقاومت ویژه الکتریکی و ارتباط آن با بعضی از ویژگیهای بتن	٤۸
تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی برحسب زمان	۵۱
تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی با تخلخل و آب موجود در منافذ	۵٦
مقاومت ویژه الکتریکی و نفوذ یون کلراید	۵۹
روشهای استاندارد موجود برای تعیین نفوذ پذیری بتن در مقابل یون کلر	٦۲
افقی جدید برای یافتن راه حلی ساده تر	٦۵

فصل چهارم: طرح روش جدید

مقدمه	٦٧
مسیر فکری برای یافتن روش جدید	٦٧
روش تعیین مقاومت ویژه الکتریکی بتن	٦٨
حذف سایر عوامل تاثیر گذار بر روی مقاومت ویژه الکتریکی بتن	٧٠
طراحی آزمونه	٧١
ساخت آزمونه	٧٤
طراحی و ساخت اسباب اندازه گیری	٧٦
- سیستم اولیه	٧٧
- سیستم مورد استفاده	٧٨

فصل پنجم: انجام آزمایشها و بررسی نتایج

مقدمه	٨١
انجام آزمایشهای اولیه	٨٢
آزمایشهای انجام شده بدون در نظر گرفتن اثر یون کلر	٨٢
آزمایشهای انجام شده به منظورتعیین اثرنفوذ یون کلر	٨٣
بررسی نتایج آزمایشهای انجام شده	٨٣
مرور مسیر فکری در یافتن روش جدید	٨٧
پیشنهادهایی برای ادامه پروژه	٨٨

پیوست یک: مبانی طراحی سخت افزار

دیاگرام کلی سیستم	٩٨
نحوه عملکرد	١٠١

پیوست دو: راهنمای استفاده از نرم افزار Interface

نصب نرم افزار	١٠٣
اجرای برنامه	١٠٥
نحوه راه اندازی سیستم	١٠٧

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول۱-۱ : املاح موجود در آب خلیج فارس در مقایسه با آب معمولی دریا	٦
جدول۱-۲ : دمای هوا در شهر بندر عباس	۱۱
جدول۱-۳ : رطوبت نسبی شهر بندر عباس	۱۲
جدول۲-۱ : کاهش نفوذ پذیری خمیر سیمان با پیشرفت هیدراتاسیون	۱۹
جدول۲-۲ : مقایسه بین نفوذ پذیری سنگها و خمیر سیمان	۲۲
جدول۳-۱ : مقاومت ویژه الکتریکی دانه های سنگی مصرفی متداول در بتن	٤٤
جدول۳-۲ : مقایسه فاکتور شکل محاسبه شده و به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی	٤۹
جدول۳-۳ : مقاومت ویژه الکتریکی آزمونه های بتنی	٦۲
جدول۵-۱ : مقادیرمقاومت الکتریکی در آزمایشهای سری اول برای سه آزمونه	۹۰
جدول۵-۲ : مشخصات آزمونه ها در آزمایشهای نوع دوم	۹۷

فهرست شکلها

عنوان | صفحه

شکل ۱-۱ : تغییرات دمای گرمترین و سردترین ماه سال طی یک شبانه روز در شهر بندرعباس ۱۲
شکل ۱-۲ : تغییرات درصد رطوبت شهر بندرعباس در خشک ترین و مرطوبترین ماههای سال ۱۳
شکل ۱-۳ : تبخیر باران روزانه در منطقه خلیج فارس ۱٤
شکل ۱-٤ : تغییرات دمای آب دریا در منطقه خلیج فارس طی گرمترین و سردترین ماه سال ۱٤
شکل ۲-۱ : رابطه بین نفوذ پذیری و منافذ موئین خمیر سیمان ۲۰
شکل ۲-۲ : رابطه بین نفوذ پذیری و نسبت آب به سیمان برای خمیر سیمان با درجه هیدراتاسیون ۹۳ درصد ۲۰
شکل ۲-۳ : نفوذ پذیری بتنی که با بخار عمل آمده است ۲۳
شکل ۲-٤ : پیل الکترو شیمیایی خوردگی ۲٦
شکل ۲-٥ : پیل خوردگی ایجاد شده در بتن ۲٦
شکل ۲-٦ : مدل خوردگی الکترو شیمیایی فولاد در اثر حمله کلرورها ۳۲
شکل ۳-۱ الف : مدل انتقال جریان الکتریسیته در داخل بتن ٤۳
شکل ۳-۱ : تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی خمیر سیمان ٥۳
شکل ۳-۲ : تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی بتن ٥۳
شکل ۳-۳ : تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی خمیر سیمان تا سن ٤ ماه ٥٤
شکل ۳-٤ : تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی بتن تا سن ٤ ماه ٥٥
شکل ۳-٥ : تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی بتن برای آزمونه های عمل آوری شده در شرایط محیطی ٥٥
شکل ۳-٦ : تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی بتن های ساخته شده از سیمانهای مختلف ٥٦
شکل ۳-۷ : تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی برحسب درصد رطوبت ٥۷
شکل ۳-۸ : تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی برحسب تخلخل ٥۸
شکل ۳-۹ : وضعیت یونهای کلر موجود در بتن ٦۰
شکل ۳-۱۰ : نفوذ یون کلر و پروفیل آن ٦۱
شکل ۳-۱۱ : نحوه نمونه برداری برای تعیین مقدار کلر موجود در بتن ٦۳

شکل ۳-۱۲ : تجهیزات مورد استفاده در استاندارد ASTM C1202 به صورت شماتیک ٦٥
شکل ٤-۱ : شکل شماتیک آزمونه ۷۲
شکل ٥-۱ : آزمایشهای نوع اول بر روی آزمونه شماره یک ۹۱
شکل ٥-۲ : آزمایشهای نوع اول بر روی آزمونه شماره دو ۹۲
شکل ٥-۳ : آزمایشهای نوع اول بر روی آزمونه شماره سه ۹۳
شکل ٥-٤ : آزمایشهای سری نوع اول بر روی آزمونه شماره یک،مقاومت الکتریکی الکترودها نسبت به هم ۹٥
شکل ٥-٥ : آزمایشهای نوع دوم بر روی آزمونه شماره دو ۹٦
شکل ٥-٦ : آزمایشهای نوع دوم بر روی آزمونه شماره یک ۹۷

فصل اول

پایایی بتن و عوامل موثر در آن

مقدمه

مسأله پایایی بتن به عنوان یک ماده اصلی که در صنعت ساختمان سالها مورد استفاده قرار گرفته، تا قبل از دهه‌های اخیر مورد توجه طراحان و سازندگان آن نبوده است. خرابیهای زودرس و کاهش قابل ملاحظه عمر مفید ساختمانهایی که در محیطهای خورنده ساخته می‌شوند مانند سازه‌های دریایی، باعث شده است که این مسأله از اهمیت به سزایی برخوردار گردد.

عمر مفید یک ماده و یا یک سیستم ساختمانی "مدت زمانی است که آن ماده یا ساختمان هنوز مشخصه های لازم برای بهره‌برداری را دارا می باشد ". این زمان تابع عوامل زیادی می‌باشد، به عنوان مثال آسیب‌دیدگی‌های ناشی از عوامل گوناگون، عمر مفید طراحی شده بتن را کاهش می‌دهند.

امروزه در کشورهای مختلف نمونه‌های بسیاری از کاهش عمر مفید سازه‌های مهم نظیر سدها، پلها، تونلها، موج‌شکنها، اسکله‌ها و غیره مشاهده می شود و همین امر موجب می گردد که مسأله کاهش عمر مفید سازه‌های بتنی در نواحی خورنده از اهمیت زیادی برخوردار شود و پایایی بتن در اغلب نقاط جهان به صورت یک مشکل اساسی خود را نشان دهد.

در کشور ما با گسترش فعالیتهای عمرانی در نوار ساحلی جنوب، ضرورت احداث سازه‌های سنگین احساس گردیده و به دلیل عمر کوتاه، نیاز به نگهداری مستمر و پایایی کم سازه‌های فولادی در این محیط، سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفته اند و در نتیجه، مسأله پایایی بتن در مناطق شمالی حاشیه خلیج فارس نیز به عنوان یک مسأله اساسی، مطرح شده است. شرایط آب و هوایی خاص این مناطق باعث تخریب سریع بتن می‌گردد به طوریکه آثار تخریب شدید به وضوح در غالب سازه‌های بتنی مشاهده می‌شود. می‌توان گفت عمر مفید سازه‌ها در این مناطق به طور متوسط بین ۱۰ تا ۱۵ سال می‌باشد که متأسفانه این زمان نیز در بسیاری موارد به علت کیفیت نامطلوب اجرا به صورت مضاعف کاهش پیدا می کند و به میزان متوسط ٤ تا ۷ سال می رسد.

برای جلوگیری از کاهش عمر مفید سازه‌های بتنی، طراحی اینگونه سازه‌ها باید به گونه‌ای باشد که برای شرایط جوی مختلف، مناسب و قابل استفاده باشند به طوریکه در آب و هوا و خاکهایی که دارای ترکیبات شیمیایی مهاجم می‌باشند و همچنین در انواع دیگر محیطهای شیمیایی،پایایی خود را حفظ نمایند. دانستنیها و اطلاعات لازم در مورد شرایط محیطی موجود، ما را در اتخاذ روشهای مناسب یاری می‌دهند تا بدین وسیله عمر سازه‌های بتنی را افزایش دهیم.

پیشرفت صنایع شیمیایی و دیگر تکنولوژیهای وابسته از یک طرف، گسترش عملیات ساختمانی با ابعاد بزرگ در نواحی دارای آب و هوای نامساعد، خاک شور و آبهای حاوی مواد معدنی زیاد از طرف دیگر و به ویژه بنا کردن سازه‌های بتن آرمه مهم و حیاتی که باید دارای پایداری و پایایی مناسبی باشند، انجام دادن تحقیقاتی جامع را در مورد پایایی بتن و بتن آرمه ضروری می سازد.

خواص آهک آبی و ملاتهای ساخته شده از مخلوط آهک و پوزولان، برای اولین بار در سال ۱۸٤۰ میلادی توسط ویکا[1] مهندس فرانسوی بررسی شد. وی به منظور بررسی اثر آب دریا بر خرابی اسکله بندر تولن فرانسه، یک نمونه سالم و یک نمونه متلاشی شده از ملات ساختمانهای سنگی اسکله را تجزیه کرد و نتیجه گرفت که نمکهای منیزیم (سولفات منیزیم) آب دریا با هیدروکسید کلسیم و سیلیکاتهای هیدراته شده، ترکیب شده و تشکیل سیلیکات منیزیم هیدراته و سولفات کلسیم داده است که می‌توانند مجدداً با دیگر اجزای سیمان سخت شده ترکیب و موجب تخریب بیشتری گردند. مطالعه ویکا اولین کوشش عملی برای تحلیل خرابی ناشی از آب دریا بر روی بتن ساخته شده با مواد سیمانی هیدرولیکی بود.

پس از ساخته شدن سیمان پرتلند، مطالعات و بررسی‌های مربوط به پایایی بر روی بتن ساخته شده از سیمان پرتلند و مخلوطهای آن متمرکز شد. پایایی بتن ساخته شده از سیمان پرتلند و سخت

1- Vicat

شدن این نوع سیمان، همواره مورد توجه بوده است. اولین مطالعات مربوط به پایایی بتن، از عملکرد ساختمانهای دریایی نظیر اسکله‌ها، موج شکنها و غیره شروع شده است. چرا که این سازه‌ها بیشتر از سازه‌های معمولی در معرض حملات فیزیکی و شیمیایی محیط اطرافشان، که موجب تخریب سریع آنها می‌شوند، قرار دارند.

بتن مسلح برای اولین بار بین سالهای ۱۸۸۰ تا ۱۸۹۰ به عنوان مصالح ساختمانی در موارد صنعتی نیز مورد استفاده قرار گرفت. از این رو، بررسی عملکرد و پایایی آن در شرایطی که در معرض مواد فعال شیمیایی و آتمسفر آلوده نواحی صنعتی قرار می‌گرفت، الزام‌آور شد. گازهای اسیدی آتمسفرهای آلوده به خصوص اکسیدهای گوگرد و گازکربنیک که بر اثر رطوبت هوا تبدیل به اسید شده‌اند، با آهک هیدراته خمیرسیمان وارد واکنش شده، تولید گچ و کربنات می‌کنند و بتدریج خاصیت قلیائی بتن را کم می نمایند. در نتیجه قشر محافظی که فولاد را از خوردگی محافظت می‌کند، با افت PH از بین رفته، باعث ایجاد زمینه‌ای مساعد برای خوردگی شده و در اثر زنگ زدگی فولاد و تورم زنگ، ترک خوردن بتن و متلاشی شدن آن آغاز می‌گردد.

در قرن گذشته پیشرفتهای مهمی در درک مکانیزمهای آسیب‌پذیری بتن، به ویژه مکانیزم خوردگی فولاد در بتن حاصل شده است. برای مثال می‌توان از مطالعات میلر[1] در سال ۱۹۲۵ در مورد مجاورت دراز مدت بتن با خاکهای سولفاته و یا آزمایشهای مقاومت بتن در آب دریا که بین سالهای ۱۹۳٤ تا ۱۹٦٤ توسط کمپوس[2] در بلژیک انجام شده است، نام برد.

به هر حال، امروزه خرابیهای بتن، نظر اکثر کارشناسان و دست‌اندرکاران ساخت بتن را به خود معطوف می کند و نکته قابل ذکر این است که هزینه مرمت پاره‌ای از این خرابیها حتی بالاتر از هزینه ساخت سازه برآورد می شود. متأسفانه زمینه آگاهی کامل از مکانیزم، روشهای آزمایش و پیشگیری از

۱- Miller
2- Campus

این خرابیها در کشور ما هنوز فراهم نیامده است در این در حالی است که داشتن وسعت زیاد خاک و انواع مختلف آب و هوا به همراه عوامل تخریب محیطی، سبب ایجاد انواع خرابیها در سازه‌های بتنی کشورمان می گردد و این امر توجه هر چه بیشتر به مسأله مطالعه و پژوهش در زمینه پایایی بتن را می‌طلبد.

شرایط جوی ومحیطی و نقش آنها در پایایی بتن

در توضیح مختصر شرایط مختلف جوی و تأثیر آنها بر روی عمر مفید سازه‌های بتنی می‌توان گفت که دمای زیاد تأثیری مضاعف بر واکنشهای شیمیایی انجام شده در بتن دارد که از آن جمله می‌توان واکنشهای خوردگی و واکنش دانه‌های سنگی با مواد قلیایی را نام برد.

آب اگرچه از ترکیبات مورد نیاز واکنشهای شیمیایی و برخی از واکنشهای فیزیکی بتن می‌باشد و برای ساختن بتن لازم است، اما نقشی مخرب نیز در تشدید خوردگی اجزاء سازه‌ها از جمله آرماتورها دارد. واکنشهای مهاجم شیمیایی بر روی بتن در حالت خشک به ندرت اتفاق می‌افتد. ترکیبات شیمیایی مهاجم باید به صورت محلول باشند و همچنین مقدارشان از یک حد مینیمم بیشتر باشد تا بتوانند در واکنشهای مخرب با بتن شرکت نمایند. عوامل محیطی مانند اتمسفر یا محیط شیمیایی در تماس با بتن، تحت فشار زیاد، باعث تشدید تأثیر ترکیبات شیمیایی و نفوذ آنها به داخل بتن می‌گردد.

یخ زدن و آب شدن یخ در اثرتغییرات دمایی محیط، که از تأثیر ترکیبی زمستانهای سرد و تابستانهای گرم حاصل می‌شود، از عوامل قابل توجه در تخریب سازه‌های بتنی می‌باشد. عوامل محیطی دیگری که می‌توانند تأثیری نامطلوب و مخرب بر پایایی بتن داشته باشند، یونهای سولفات و کلراید می‌باشند. یون سولفات که در آبهای جاری، آب دریا و در خاک بعضی مناطق یافت می‌شود، با نفوذ به داخل بتن می‌تواند بر کاهش استحکام سازه موثر افتد. یونهای کلراید نیز که در آب دریا و در