

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



جمهوری اسلامی ایران
وزارت راه و شهرسازی

ارزیابی الکتروشیمیایی خوردگی کلرایدی فولاد در بتن معمولی و حاوی میکروسلیس

دکتر جعفر سبحانی

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مهندس میثم نجیمی

مهندس علیرضا پورخورشیدی

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

دکتر طیبه پرهیزکار

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مشاور: دکتر علی اکبر رمضانپور (استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

گزارش تحقیقاتی

شماره نشر: گ - ۶۵۰

چاپ اول: ۱۳۹۱

عنوان و نام پدیدآور	ارزیابی الکتروشیمیایی خوردگی کلرایدی فولاد در بتن معمولی و حاوی میکروسیلیس/جعفر سبحانی - [و دیگران]؛ مشاور: علی اکبر رمضانینپور
مشخصات نشر	تهران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۱.
مشخصات ظاهری	۱۲۲ص: مصور، جدول، نمودار.
فروخت	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، گزارش تحقیقاتی؛ شماره نشر گ-۶۵۰-۳
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۵۳۹۲-۴۶-۳
وضعیت فهرست نویسی	فیفا
یادداشت	مولفین: جعفر سبحانی، میثم نجیمی، علیرضا پورخورشیدی، طیه پرهیزکار.
یادداشت	کتابنامه: ص. ۱۲۳.
موضوع	بتن مسلح - خوردگی
موضوع	سازه های بتنی - خوردگی
موضوع	فولاد ساختمانی - خوردگی
شناسه افزوده	سبحانی، جعفر، ۱۳۵۶-
شناسه افزوده	رمضانینپور، علی اکبر، ۱۳۳۰-
شناسه افزوده	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
ردیفی کنگره	۳۹۱: الف ۵/۵۷۸۳۳۵
ردیفی دیویی	۶۲۰/۱۱۷۷
شماره کتابشناسی ملی	۳۰۸۴۸۸۵

مصوبه شماره ۹۱/۷۳۳ چاپ کتاب، شورای علمی انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

ارزیابی الکتروشیمیایی خوردگی کلرایدی فولاد در بتن معمولی و حاوی میکروسیلیس

دکتر جعفر سبحانی، مهندس میثم نجیمی، مهندس علیرضا پورخورشیدی،

دکتر طیه پرهیزکار مشاور: دکتر علی اکبر رمضانینپور

شماره نشر: گ - ۶۵۰ چاپ اول: ۱۳۹۱

ناشر: انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

تنظیم برای چاپ: نسرين مقدس

شمارگان: ۵۰ نسخه

بها: ۲۵۰۰۰ ریال

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مسئولیت صحت دیدگاه های علمی بر عهده نگارندگان محترم می باشد.

کلیه حقوق چاپ و انتشار اثر به ناشر تعلق دارد.

نشانی: تهران، بزرگراه شیخ فضل الله نوری، روبروی فاز ۲ شهرک فرهنگیان، خیابان نارگل، خیابان شهید علی مروی،

خیابان حکمت صندوق پستی: ۱۳۴۵-۱۶۹۶

تلفن: ۸۸۲۵۵۹۴۲-۶ دورنگار: ۸۸۲۵۵۹۴۱

پست الکترونیکی: president@bhrc.ac.ir صفحه الکترونیکی: <http://www.bhrc.ac.ir>

ISBN: 978-600-5392-46-3

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۵۳۹۲-۴۶-۳

پیشگفتار

بتن به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد و ارزانی نسبی آن، در سراسر دنیا به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین انواع مصالح ساختمانی ساخته دست بشر تبدیل شده و به عنوان یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها در ساخت سازه‌های در معرض شرایط محیطی شدید مطرح است. از سویی خوردگی آرماتورها، یکی از مهم‌ترین دلایل خرابی سازه‌های بتن مسلح در شرایط محیطی آلوده به یون‌های کلراید می‌باشد که معمولاً به کاهش ظرفیت باربری و کاهش عمر مفید این نوع سازه‌ها منجر می‌شود. اهمیت خوردگی در سازه‌های بتن مسلح به ویژه در سواحل خلیج فارس و دریای عمان به قدری است که همه‌ساله بودجه‌های کلانی صرف تعمیر و بهسازی سازه‌های آسیب دیده از این پدیده می‌شود. شناخت رفتار خوردگی فولاد در بتن می‌تواند به پیش‌بینی نرخ خوردگی و عمر مفید سازه‌های در معرض خرابی کمک شایانی کرده و هزینه‌های تعمیر ناشی از این نوع خرابی‌ها را کاهش دهد. به علاوه در سال‌های اخیر، استفاده از مواد پوزولانی همانند دوده سیلیس به دلایل بسیاری منجمله کاهش مصرف سیمان و بهبود خواص مقاومتی و دوام بتن گسترش فراوانی داشته است. استفاده از این ماده علاوه بر همخوانی با سیاست‌های توسعه پایدار، می‌تواند با بهبود ریزساختار بتن موجب کاهش نفوذپذیری شده و ضمن بهبود شاخص‌های دوام بتن نرخ خوردگی را در سازه‌های بتن مسلح کاهش دهد. در همین راستا، تحقیق پیش‌رو زوایای نوینی را از رفتار الکتروشیمیایی و الکتریکی فولادهای مدفون در بتن معمولی و حاوی دوده سیلیس با توجه ویژه به فصل مشترک بتن و فولاد آشکار نموده و داده‌های ذیقیمتی در اختیار جامعه مهندسی کشور قرار می‌دهد که می‌تواند ضمن بسط و گسترش مرزهای دانش، در اصلاح آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های اجرایی نقش به سزایی ایفا نماید. امید است نتایج این تحقیق و به‌ویژه مدل‌های دوام ارائه شده در آن بتواند نقش بسزایی در افزایش عمر مفید سازه‌های بتن مسلح و به تبع آن کاهش هزینه‌ها در صنعت ساختمانی کشور داشته باشد.

سید محمود فاطمی عقدا

رئیس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

فهرست مطالب

عنوان.....	صفحه.....
فصل اول: مقدمه و کلیات.....	۱.....
۲-۱ اهداف مطالعه.....	۲.....
۳-۱ نگاهی بر اصول گزارش.....	۳.....
فصل دوم: اصول خوردگی الکتروشیمیایی و روش‌های اندازه‌گیری.....	۵.....
۱-۲ مفاهیم اساسی در مطالعات الکتروشیمیایی.....	۵.....
۱-۲-۱ رفتار فلز در داخل آب.....	۵.....
۱-۲-۲ فرآیند یونیزه شدن (یونیزاسیون).....	۵.....
۱-۲-۳ فرآیند شکل‌گیری جریان الکتریکی.....	۸.....
۱-۲-۴ یون‌های جذب شده (از طریق سطح).....	۸.....
۱-۲-۵ نقش آب در یونیزاسیون.....	۹.....
۱-۲-۶ پدیده واژذبی.....	۱۱.....
۱-۲-۷ رفتار فلزات مختلف.....	۱۱.....
۱-۲-۸ مفهوم یک پیل الکتروشیمیایی.....	۱۲.....
۱-۲-۹ نقش یک منبع تغذیه.....	۱۵.....
۱-۲-۱۰ جهت شار جریان.....	۱۶.....
۱-۲-۱۱ جریان فارادی و خوردگی.....	۱۸.....
۱-۲-۱۲ خوردگی فلزات در تماس.....	۲۰.....
۱-۲-۱۳ لایه دوگانه.....	۲۲.....
۱-۲-۱۴ جریان متناوب (AC) و لایه دوگانه.....	۲۳.....
۱-۲-۱۵ جریان مستقیم (DC) و لایه دوگانه.....	۲۵.....
۱-۲-۱۶ رفتار لایه دوگانه.....	۲۶.....
۱-۲-۱۷ مقاومت ظاهری معادل.....	۲۸.....
۱-۲-۱۸ اندازه‌گیری‌های جریان مستقیم (DC).....	۲۸.....
۱-۲-۱۹ الکتروود مرجع.....	۲۹.....
۱-۲-۲۰ چیدمان اندازه‌گیری DC.....	۳۰.....
۱-۲-۲۱ تجهیزات اندازه‌گیری الکتروشیمیایی ۱۲۸۷.....	۳۱.....

۲۲-۱-۲	مقاومت پارازیتی الکترولیت	۳۳
۲۳-۱-۲	اندازه‌گیری نرخ خوردگی	۳۴
۲۴-۱-۲	مجموعه اندازه‌گیری AC: سیستم الکتروشیمیایی ۱۲۵۰FRA + ۱۲۸۷	۳۵
۲-۲	خوردگی فولاد در بتن	۳۷
۳-۲	طبیعت الکتروشیمیایی خوردگی	۳۸
۴-۲	پتانسیل‌های الکتروود	۳۹
۵-۲	تمایل به خوردگی	۴۱
۶-۲	پلاریزاسیون واکنش‌های الکتروشیمیایی	۴۳
۷-۲	پتانسیل‌های خوردگی و سرعت‌های خوردگی	۴۵
۸-۲	طیف امپدانس در ارزیابی خوردگی فولاد در بتن	۴۶
۱-۸-۲	تحلیل مدارهای AC	۴۷
۲-۸-۲	تابع تحریک مختلط	۴۷
۳-۸-۲	امپدانس	۴۷
۴-۸-۲	قالب نمایش داده‌های امپدانس	۴۹
فصل سوم:	مروری بر ادبیات خوردگی الکتروشیمیایی	۵۳
۱-۳	مقدمه	۵۳
۲-۳	کاربرد روش الکتروشیمیایی در مطالعات بنیادی سیمان و بتن	۵۳
۳-۳	کاربرد در بررسی رفتار خوردگی فولاد در بتن: اثر مواد جایگزین سیمان	۵۸
۴-۳	خلاصه‌ای از مدار معادل‌های الکتریکی برای شبیه‌سازی فرآیند خوردگی	۷۱
فصل چهارم:	انجام آزمایشات، تحلیل نتایج و ارائه مدل	۷۷
۱-۴	مصالح	۷۷
۱-۱-۴	مصالح سنگی	۷۷
۲-۱-۴	سیمان	۷۹
۳-۱-۴	فولاد	۸۰
۴-۱-۴	فوق روان کننده	۸۰
۵-۱-۴	آب	۸۱
۲-۴	طرح مخلوط	۸۱
۳-۴	برنامه آزمایشگاهی	۸۲
۱-۳-۴	آزمایشات بتن تازه	۸۲
۲-۳-۴	مقاومت فشاری	۸۴
۳-۳-۴	نفوذ پذیری تحت فشار آب	۸۶



۸۷	۴-۳-۴ نفوذپذیری تسریع شده یون کلراید
۸۹	۴-۳-۴ جذب آب ۳۰ دقیقه
۹۰	۴-۳-۴ جذب آب ۲۴ ساعت
۹۱	۴-۴ مقایسه نتایج آزمون‌های مکانیکی و دوام
۹۲	۴-۵ آزمون‌های خوردگی الکتروشیمیایی
۹۴	۴-۵-۱ پتانسیل آزاد (مدار باز)
۹۴	۴-۵-۲ طیف امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)
۱۰۲	۴-۵-۳ شبیه‌سازی طیف امپدانس توسط مدار الکتریکی معادل
۱۰۲	۴-۵-۴ بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی طیف امپدانس
۱۰۲	۴-۵-۴-۱ بررسی رفتار مقاومت الکترولیتی
۱۰۳	۴-۵-۴-۲ بررسی رفتار مقاومت انتقال بار
۱۰۴	۴-۵-۴-۳ بررسی رفتار مقاومت پلاریزاسیون
۱۰۴	۴-۵-۴-۴ بررسی رفتار خازنی انتقال بار و لایه دوگانه
۱۰۶	۴-۶ تعیین شدت خوردگی به روش پتانسیودینامیک (منحنی پلاریزاسیون)
۱۱۰	۴-۷ بررسی ارتباط بین پارامترهای اندازه‌گیری شده
۱۱۱	۴-۸ ارائه مدل برای تخمین نرخ خوردگی با توجه به نتایج ۲۸ روزه و ۹۰ روزه
۱۱۳	فصل پنجم: خلاصه و نتیجه‌گیری
۱۱۴	۵-۱ نتایج آزمون‌های مقاومت و دوام
۱۱۴	۵-۱-۱ تاثیر عیار سیمان در مقاومت بتن
۱۱۴	۵-۱-۲ اثر نسبت آب به سیمان در مقاومت بتن
۱۱۵	۵-۱-۳ تاثیر دوده سیلیس بر مقاومت بتن
۱۱۵	۵-۱-۴ نفوذ پذیری تحت فشار آب
۱۱۵	۵-۱-۵ نفوذپذیری تسریع شده یون کلراید
۱۱۶	۵-۱-۶ جذب آب نیم ساعته
۱۱۶	۵-۱-۷ جذب آب ۲۴ ساعته
۱۱۶	۵-۱-۸ مقایسه نتایج آزمون‌های مکانیکی و دوام
۱۱۷	۵-۲ نتایج آزمون‌های الکتروشیمیایی
۱۱۷	۵-۲-۱ تبیین مدل رفتاری
۱۱۷	۵-۲-۲ مقاومت الکترولیتی
۱۱۸	۵-۲-۳ مقاومت انتقال بار
۱۱۸	۵-۲-۴ مقاومت پلاریزاسیون
۱۱۹	۵-۲-۵ رفتار خازنی انتقال بار و لایه دوگانه

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۶	شکل ۱-۲ رفتار فلز در داخل آب الف، فلز در آب ب، تاثیر آب بر اتم‌های سطحی فلز
۶	شکل ۲-۲ تعادل الکتریکی در یک اتم خنثی
۷	شکل ۳-۲ فرآیند یونیزاسیون الف- یون مثبت ب- یونیزاسیون
۸	شکل ۴-۲ جریان الکتریکی
۹	شکل ۵-۲ پدیده جذب سطحی
۹	شکل ۶-۲ ملکول آب
۱۰	شکل ۷-۲ نیروهای یونیزاسیون
۱۱	شکل ۸-۲ پدیده واجذبی و امکان کاهش جرم
۱۲	شکل ۹-۲ تفاوت یونیزاسیون مس و طلا
۱۳	شکل ۱۰-۲ یونیزاسیون فلز سدیم
۱۳	شکل ۱۱-۲ وضعیت یونیزاسیون آهن و مس در داخل آب
۱۴	شکل ۱۲-۲ اختلاف پتانسیل بین مس و آهن مغروق در آب
۱۴	شکل ۱۳-۲ پیل الکتروشیمیایی مس/آهن
۱۵	شکل ۱۴-۲ فرآیند شکل گیری جریان الکتریکی
۱۵	شکل ۱۵-۲ یک یون هیدروژن الکترون را به مصرف می‌رساند
۱۶	شکل ۱۶-۲ یک منبع تغذیه (پیل)
۱۷	شکل ۱۷-۲ شباهت مسابقه طناب کشی و یک پیل
۱۷	شکل ۱۸-۲ در سیم، جریان توسط الکترون‌ها حمل می‌شود و در داخل آب جریان توسط یون‌های...
۱۸	شکل ۱۹-۲ نرخ خوردگی به جریان فارادی وابسته است
۱۹	شکل ۲۰-۲ پیل الکتروشیمیایی و نماد یک پیل
۱۹	شکل ۲۱-۲ مقاومت‌های ظاهری معادل پیل
۲۱	شکل ۲۲-۲ خوردگی آهن در تماس با مس
۲۱	شکل ۲۳-۲ خوردگی روی در تماس با آهن: "آند فدا شونده"

- شکل ۲-۲۴ لایه جذب شده ۲۲
- شکل ۲-۲۵ لایه دوگانه ۲۳
- شکل ۲-۲۶ لایه دوگانه: الف- شاز لایه دوگانه در یک نیم سیکل صعودی، ب- تخلیه خازن ۲۴
- شکل ۲-۲۷ شکل موج ولتاژ و جریان در لایه دوگانه ۲۴
- شکل ۲-۲۸ رفتار DC، لایه دوگانه (خازن) تراوش می‌کند ۲۶
- شکل ۲-۲۹ رفتار در حالت AC ۲۶
- شکل ۲-۳۰ رفتار در حالت جریان مستقیم DC ۲۷
- شکل ۲-۳۱ رفتار ترکیبی AC و DC ۲۷
- شکل ۲-۳۲ مقاومت ظاهر معادل پیل ۲۸
- شکل ۲-۳۳ اندازه‌گیری DC ۲۹
- شکل ۲-۳۴ ترکیب یک الکتروود مرجع ۳۰
- شکل ۲-۳۵ الکتروود مرجع با موینگی لوگیک هابر ۳۰
- شکل ۲-۳۶ چیدمان اندازه‌گیری DC ۳۱
- شکل ۲-۳۷ نمایی از دستگاه ۱۲۸۷ و آزمایشگاه مربوطه ۳۲
- شکل ۲-۳۸ طرز کار با سیستم ۱۲۸۷ ۳۳
- شکل ۲-۳۹ مشکل در مجموعه آزمایشی سه ترمینال ۳۳
- شکل ۲-۴۰ حذف اثر مقاومت پارازیتی ۳۴
- شکل ۲-۴۱ روش اندازه‌گیری نرخ خوردگی توسط افت وزنی ۳۵
- شکل ۲-۴۲ نحوه کار AC: I260FRA+I287ECI ۳۶
- شکل ۲-۴۳ منحنی مقاومت ظاهری AC ۳۷
- شکل ۲-۴۴ خوردگی آهن در الف) محلول اسید کلریدریک، ب) در آب اکسیژنه ۳۹
- شکل ۲-۴۵ ارتباط بین پتانسیل‌ها و جریان‌های تولید شده در پیل خوردگی ۳۹
- شکل ۲-۴۶ منحنی پوریه برای سیستم Fe-H₂O در ۲۵ درجه سانتی‌گراد ۴۲
- شکل ۲-۴۷ نمونه‌ای از منحنی پلاریزاسیون ۴۴
- شکل ۲-۴۸ منحنی Evans برای یک پیل خوردگی ۴۶
- شکل ۲-۴۹ مدار معادل رندلز (Re=850 Ω, Rp=1000 Ω, و Cd=1 μF) ۵۰
- شکل ۲-۵۰ پاسخ نایکونیست مدار معادل رندلز ۵۰
- شکل ۲-۵۱ منحنی بود مدار معادل رندلز ۵۱
- شکل ۲-۵۲ منحنی بود-فاز مدار معادل رندلز ۵۱



- شکل ۱-۳ مقاومت ظاهری نمونه‌های خمیر سیمان در فواصل زمانی ۱، ۱۰ و ۱۰۰ روزه ۵۵
- شکل ۲-۳ مدار الکتریکی معادل برای مطالعه رفتار هیدراسیون خمیر سیمان ۵۵
- شکل ۳-۳ پاسخ الکتریکی مدار معادل شکل (۲-۳) ۵۶
- شکل ۴-۳ پاسخ فرکانس برای فولاد کربنی مغروق در هیدرواکسید کلسیم اشباع برای ۵۶
- شکل ۵-۳ پاسخ فرکانس برای فولاد کربنی مغروق در هیدرواکسید کلسیم اشباع برای ۵۷
- شکل ۶-۳ نمایش شماتیک طیف امپدانس AC در مختصات موهومی برای خمیر سیمان ۵۸
- شکل ۷-۳ مدار معادل برای خمیر سیمان سخت شده ۵۸
- شکل ۸-۳ نمایی از نمونه مورد آزمایش برای اندازه‌گیری فعالیت خوردگی به روش‌های ۵۹
- شکل ۹-۳ رابطه بین میزان کلراید بر حسب درصد وزنی سیمان و پتانسیل نیم پیل ۵۹
- شکل ۱۰-۳ مدار معادل برای تعیین خواص الکتروشیمیایی بتن حاوی خاکستر بادی ۶۰
- شکل ۱۱-۳ طیف امپدانس بدست آمده برای مطالعه رفتار خوردگی در حضور بازدارنده ۶۱
- شکل ۱۲-۳ مدار معادل طراحی شده برای تعیین رفتار خوردگی در حضور بازدارنده خوردگی ۶۱
- شکل ۱۳-۳ نمایش مفهومی فرآیند خوردگی فولاد در بتن مورد استفاده توسط ۶۲
- شکل ۱۴-۳ آماده‌سازی نمونه برای تعیین غلظت کلراید به روش طیف امپدانس ۶۲
- شکل ۱۵-۳ مدار معادل برای تعیین رفتار خوردگی ۶۲
- شکل ۱۶-۳ طیف امپدانس (منحنی نایکونیست) مورد استفاده در ۶۳
- شکل ۱۷-۳ مدار الکتریکی مورد استفاده در کار تحقیقاتی ۶۴
- شکل ۱۸-۳ نمونه مسلح مورد استفاده در تحقیق ۶۵
- شکل ۱۹-۳ پتانسیل خوردگی برای نمونه‌های مورد آزمون در تحقیق مرجع ۶۵
- شکل ۲۰-۳ نرخ خوردگی برای نمونه‌های مورد آزمون در تحقیق مرجع ۶۶
- شکل ۲۱-۳ رابطه میان مقاومت الکتریکی و نرخ خوردگی برای نمونه‌های مورد آزمون در مرجع ۶۶
- شکل ۲۲-۳ داده‌های آزمایشگاهی برای رابطه ۶۸
- شکل ۲۳-۳ نمونه بتن مسلح در تحقیق ۶۹
- شکل ۲۴-۳ مدار معادل مورد استفاده در تحقیق Gu و همکاران ۷۰
- شکل ۲۵-۳ مدار معادل مورد استفاده در تحقیق Ping و همکاران ۷۱
- شکل ۱-۴ دانه‌بندی ماسه و محدوده استاندارد ۷۷
- شکل ۲-۴ دانه‌بندی شن و محدوده استاندارد ۷۸
- شکل ۳-۴ نمونه‌های ساخته شده و نگهداری شده در آزمایشگاه ۸۳
- شکل ۴-۴ مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه ۸۴
- شکل ۵-۴ نفوذپذیری تحت فشار آب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز ۸۶
- شکل ۶-۴ نفوذپذیری تسریع شده یون کلر در سنین ۲۸ و ۹۰ روز ۸۸

- شکل ۷-۴ جذب آب نیم ساعته در سنین ۲۸ و ۹۰ روز ۸۹
- شکل ۸-۴ جذب آب ۲۴ ساعته در سنین ۲۸ و ۹۰ روز ۹۰
- شکل ۹-۴ طرح شماتیک نمونه مسلح مورد استفاده در آزمون‌های الکتروشیمیایی ۹۳
- شکل ۱۰-۴ نمونه مسلح در حین آزمایش ۹۴
- شکل ۱۱-۴ (الف) منحنی نایکونیست برای طرح مخلوط SEC1 و طیف شبیه‌سازی شده ۹۵
- شکل ۱۱-۴ (ب) منحنی نایکونیست برای طرح مخلوط SEC2 و طیف شبیه‌سازی شده ۹۵
- شکل ۱۱-۴ (ج) منحنی نایکونیست برای طرح مخلوط SEC3 و طیف شبیه‌سازی شده ۹۶
- شکل ۱۱-۴ (د) منحنی نایکونیست برای طرح مخلوط SEC4 و طیف شبیه‌سازی شده ۹۶
- شکل ۱۱-۴ (ه) منحنی نایکونیست برای طرح مخلوط SEC5 و طیف شبیه‌سازی شده ۹۶
- شکل ۱۱-۴ (و) منحنی نایکونیست برای طرح مخلوط SEC6 و طیف شبیه‌سازی شده ۹۷
- شکل ۱۱-۴ (ز) منحنی نایکونیست برای طرح مخلوط SEC7 و طیف شبیه‌سازی شده ۹۷
- شکل ۱۱-۴ (ح) منحنی نایکونیست برای طرح مخلوط SEC8 و طیف شبیه‌سازی شده ۹۷
- شکل ۱۲-۴ (الف) منحنی‌های بود برای طرح مخلوط SEC1 ۹۸
- شکل ۱۲-۴ (ب) منحنی‌های بود برای طرح مخلوط SEC2 ۹۸
- شکل ۱۲-۴ (ج) منحنی‌های بود برای طرح مخلوط SEC3 ۹۹
- شکل ۱۲-۴ (د) منحنی‌های بود برای طرح مخلوط SEC4 ۹۹
- شکل ۱۲-۴ (ه) منحنی‌های بود برای طرح مخلوط SEC5 ۱۰۰
- شکل ۱۲-۴ (و) منحنی‌های بود برای طرح مخلوط SEC6 ۱۰۰
- شکل ۱۲-۴ (ز) منحنی‌های بود برای طرح مخلوط SEC7 ۱۰۱
- شکل ۱۲-۴ (ح) منحنی‌های بود برای طرح مخلوط SEC8 ۱۰۱
- شکل ۱۳-۴ شبیه‌سازی طیف امپدانس با مدار معادل Pupard ۱۰۲
- شکل ۱۴-۴ منحنی پلاریزاسیون برای یکی از طرح مخلوط‌ها ۱۰۷
- شکل ۱۵-۴ منحنی پلاریزاسیون انطباق داده شده بر روی نتیجه نمونه‌ای از آزمایش پتانسیودینامیک
بر اساس قانون تافل ۱۰۷
- شکل ۱۶-۴ منحنی‌های پلاریزاسیون طرح‌های مورد مطالعه در سن ۳۶۵ روز ۱۰۸
- شکل ۱۷-۴ مقایسه نرخ خوردگی طرح مخلوط‌های مختلف در سنین ۱۰، ۲۷۰ و ۳۶۵ روز ۱۰۹
- شکل ۱۸-۴ مقایسه مدل نرخ خوردگی محاسبه شده بر اساس نتایج ۲۸ و ۹۰ روز دوام و مقاومت ۱۱۲

فهرست جدول‌ها

عنوان.....	صفحه.....
جدول ۱-۲ امکان یونیزاسیون چند فلز.....	۷
جدول ۲-۲ نمونه‌هایی از پتانسیل الکترودهای مرجع.....	۴۰
جدول ۱-۳ مدارمعادل برای مدل‌سازی فرآیند خوردگی.....	۷۲
جدول ۱-۳ مدارمعادل برای مدل‌سازی فرآیند خوردگی (ادامه).....	۷۳
جدول ۱-۳ مدارمعادل برای مدل‌سازی فرآیند خوردگی (ادامه).....	۷۴
جدول ۱-۳ مدارمعادل برای مدل‌سازی فرآیند خوردگی (ادامه).....	۷۵
جدول ۱-۴ نسبت ترکیب مصالح سنگی در ساخت نمونه‌های بتنی.....	۷۸
جدول ۲-۴ مشخصات مصالح سنگی در ساخت نمونه‌های بتنی.....	۷۹
جدول ۳-۴ ترکیبات شیمیایی سیمان مورد استفاده.....	۷۹
جدول ۴-۴ مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان مورد استفاده.....	۸۰
جدول ۵-۴ ترکیبات شیمیایی فولاد.....	۸۱
جدول ۶-۴ مشخصات طرح مخلوط بتن.....	۸۲
جدول ۷-۴ مشخصات بتن تازه.....	۸۳
جدول ۸-۴ بیشترین و کمترین مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۰ روز.....	۸۶
جدول ۹-۴ بیشترین و کمترین مقدار نفوذپذیری یون کلر (کولمب) در سنین ۲۸ و ۹۰ روز.....	۸۸
جدول ۱۰-۴ بیشترین و کمترین مقدار جذب آب نیم ساعته در سنین ۲۸ و ۹۰ روز.....	۸۹
جدول ۱۱-۴ بیشترین و کمترین مقدار جذب آب ۲۴ ساعته در سنین ۲۸ و ۹۰ روز.....	۹۰
جدول ۱۲-۴ رده‌بندی مخلوط‌ها بر اساس بدترین عملکرد.....	۹۱
جدول ۱۳-۴ رده‌بندی مخلوط‌ها بر اساس بهترین عملکرد.....	۹۲
جدول ۱۴-۴ نتایج حاصل از شبیه‌سازی طیف امپدانس و محاسبه مقادیر المان‌های مربوطه.....	۱۰۲
جدول ۱۵-۴ نرخ خوردگی در سنین مختلف.....	۱۰۸
جدول ۱۶-۴ نتایج همبستگی بین نتایج پارامترهای اندازه‌گیری شده پروژه.....	۱۱۱
جدول ۱۷-۴ نتایج ارزیابی مدل‌های تجربی.....	۱۱۲

چکیده

طرح مطالعاتی ارزیابی الکتروشیمیایی خوردگی کلرایدی فولاد در بتن معمولی و حاوی میکروسیلیس، با انگیزه بررسی دوام و رفتار بتن‌های معمولی و حاوی میکروسیلیس (دوده سیلیس) در برابر فرآیند خوردگی تسریع شده فولادهای مدفون در داخل آنها پیشنهاد و مورد تحقیق قرار گرفته است. در این مطالعه مشخصات مکانیکی و دوام ۸ طرح مختلف بتنی شامل بتن‌های معمولی و بتن‌های حاوی دوده سیلیس ساخته شده با دو نسبت آب به سیمان و دو عیار مختلف سیمان مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی رفتار خوردگی فولادهای مدفون در این نوع بتن‌ها، با ساخت نمونه‌های استوانه‌ای مسلح، پارامترهای خوردگی الکتروشیمیایی آنها با استفاده از دستگاه پتانسیواستات مدل Solartron SI 1278+1260 اندازه‌گیری شد. در این مطالعه، با تعیین مشخصات مکانیکی، دوام و اندازه‌گیری پارامترهای مربوط به خوردگی الکتروشیمیایی، رابطه بین این پارامترها تبیین گردید. بدین ترتیب با در دست داشتن مدل طراحی شده و انجام چند آزمایش ساده مکانیکی و دوام کوتاه مدت، امکان تخمین مناسبی از میزان خوردگی فولاد در این نوع بتن‌ها فراهم شد.