

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

11714 ✓



دانشگاه بوعلی سینا

دانشکده مهندسی

گروه عمران

پایان نامه

جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران

گرایش سازه

عنوان:

تأثیر عیار سیمان (نسبت سنگدانه به سیمان) بر پارامترهای

دوام بتن (خوردگی میلگردها)

اساتید راهنما:

دکتر فریدون رضایی - دکتر محسن تدین

استاد مشاور:

دکتر محمود نیلی

پژوهشگر:

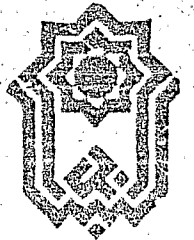
مهدی سلیمانی راد

خرداد ۱۳۸۷

۱۱۶۱۴۷

آشنایی با اطلاعات در کتاب علمی پروژه
تهیه شده در کلاس

۱۳۸۸/۵/۱۲



دانشگاه شاهرود علی سینا
دانشکده مهندسی

بیتالی

تاریخ
شماره
پوست

گواهی تصویب پایان نامه

موضوع پایان نامه: *تأثیر تغییر در ... (جهت سبب ...)* (موضوع در ...)

بدینوسیله گواهی می شود جلسه دفاعیه پایان نامه محترم / آقای: *محمد ...*

رشته: *مهندسی ...* ورودی: *۸۰۴۰۰* نیمسال انتخابی: *۱۰۲۸۷۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰*

در روز: *پنجم ...* مورخ: *۱۳۸۷/۰۲/۰۸* ساعت: *۹:۰۰* تحت سرپرستی:

۱- استاد راهنما: جناب آقای / سرکار خانم: *دکتر ...*

۲- استاد مشاور: جناب آقای / سرکار خانم: *دکتر ...*

در محل *دانشگاه شاهرود* پس از بررسی از طرف نامبردگان پایان نامه فوق با

نمره *۱۷* و درجه *۱۷* در تاریخ *۱۳۸۷/۰۲/۰۸* به تصویب رسید.

نام و نام خانوادگی و امضاء استاد راهنما: *دکتر ...*

نام و نام خانوادگی و امضاء استاد مشاور: *دکتر ...*

نام و نام خانوادگی و امضاء اساتید مدعو: ۱- *دکتر ...*

۲- *دکتر ...*

۳- *دکتر ...*

نام و نام خانوادگی و امضاء ناظر تحصیلات تکمیلی: *دکتر ...*

نام و نام خانوادگی مدیر گروه یا نماینده و امضاء: *دکتر ...*

مدیر گروه مهندسی: *دکتر ...*

نام و نام خانوادگی و امضاء: *دکتر ...*

همه امتیازهای این پایان نامه به دانشگاه بوعلی سینا همدان تعلق دارد. در صورت استفاده از تمام یا بخشی از مطالب پایان نامه در مجلات، کنفرانس ها و یا سخنرانی ها، باید نام دانشگاه بوعلی سینا (یا استاد یا استادان راهنمای پایان نامه) و نام دانشجو با ذکر مأخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد تحت پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

سپاس و قدردانی

عزیزان زیادی در به ثمر رسیدن این پژوهش مرا یاری نمودند که لازم است از آنها سپاس و

قدردانی نمایم:

- از خانواده عزیزم، خصوصاً پدر و مادر دلسوزم که پشتوانه محکمی برای من بودند و محیطی آرام را برای من مهیا ساختند.
- از اساتید راهنمای عزیزم آقایان دکتر محسن تدین و دکتر فریدون رضایی که به حق از راهنمایی و همکاری دریغ نوزیدند و مرا مورد لطف قرار دادند.
- از استاد مشاور گرامی آقای دکتر محمود نیلی که مشمول راهنمایی و حمایت ایشان بودم.
- از جناب آقای دکتر محسن تدین که امکان استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی شخصی خود را برای من فراهم ساختند.
- از دوستان عزیزم آقایان امیر مسعود صالحی و احمد معظمی گودرزی که در طول ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها از کمک‌های آنها برخوردار بودم.
- از آقایان مجتبی جعفرزاده، سعید هادی‌پور، پیمان خادمی، محمد ظاهری، وحید افروغ ثابت، ایمان چوبچیان، مسعود صفری، محمد امیری، اکبر جمشیدی و سایر عزیزانی که در طول انجام این پایان‌نامه یار و یاور من بودند.

چکیده

پژوهش حاضر نتایج بررسی آزمایشگاهی تأثیر سطوح مختلف عیار سیمان بر خواص مکانیکی و دوام بتن‌ها، خصوصاً دوام آنها در برابر خوردگی میلگردها را نشان می‌دهد. مخلوط‌های مطالعه شده در این پژوهش در سه نسبت آب به سیمان (۰/۴، ۰/۴۵، ۰/۵) بودند که برای هر یک از آنها از چهار عیار سیمان ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و 450 kg/m^3 استفاده شد. در تهیه مخلوط‌ها، سیمان پرتلند نوع ۲، سنگدانه‌های ریز و درشت نیمه‌شکسته و افزودنی فوق‌روان‌کننده به کار گرفته شد. آزمایش‌های انجام گرفته در این پژوهش شامل آزمایش مقاومت فشاری، جذب آب کوتاه مدت و بلندمدت، جذب آب موئینه، مقاومت ویژه الکتریکی، پتانسیل خوردگی به روش نیم‌پیل و آزمایش تعیین ضریب انتشار یون کلرید بود.

پس از تهیه آزمون‌ها، عمل‌آوری و انجام آزمایش‌ها در زمان‌های مشخص، مشاهده شد که در یک نسبت آب به سیمان ثابت، کاهش عیار سیمان از 450 kg/m^3 تا 350 kg/m^3 موجب بهبود خصوصیات مکانیکی و دوامی مخلوط‌ها می‌گردد. کاهش بیشتر عیار سیمان از 350 kg/m^3 تا 300 kg/m^3 نیز موجب کاهش مقاومت فشاری، افزایش جزئی عمق صعود موئینی، افزایش ضریب جذب آب موئینه K (آهنگ صعود موئینی) و افزایش ضریب انتشار یون کلرید بتن می‌گردد که افت خصوصیات مقاومتی و تا حدودی دوامی مخلوط‌ها را نشان می‌دهد. در خصوص تأثیر کاهش عیار سیمان از 350 kg/m^3 تا 300 kg/m^3 بر جذب آب کوتاه مدت و بلندمدت، نتیجه مشخصی به عنوان یک قاعده مشاهده نشد. مقاومت ویژه الکتریکی نیز در کاهش عیار سیمان از 350 تا 300 kg/m^3 همانند کاهش عیار سیمان از 450 تا 350 kg/m^3 ، روند افزایشی را از خود نشان داد که علاوه بر تأثیر کاهش عیار سیمان، تأثیر مثبت سنگدانه‌ها در افزایش مقاومت ویژه الکتریکی مخلوط‌ها را نشان می‌دهد. تأثیر عیار سیمان در پتانسیل خوردگی میلگردهای مدفون نیز به علت وجود محدودیت زمانی در انجام آزمایش‌ها تنها در مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ (که دارای تخلخل بیشتری می‌باشند) مشخص گردید. در این مخلوط‌ها مشاهده شد که افزایش عیار سیمان در مخلوط موجب افزایش احتمال خوردگی میلگردهای مدفون می‌گردد.

کلید واژه‌ها: عیار سیمان؛ مقاومت؛ دوام؛ جذب آب؛ جذب آب موئینه؛ مقاومت ویژه الکتریکی، پتانسیل

خوردگی؛ ضریب انتشار.

فهرست مطالب

۱	..... فصل اول: مقدمه
۱	..... ۱-۱ کلیات
۲	..... ۲-۱ دامنه و هدف پژوهش
۶	..... فصل دوم: نگرشی بر نوشته‌ها
۶	..... ۱-۲ مقدمه
۷	..... ۲-۲ دوام بتن
۷	..... ۱-۲-۲ تعریف
۸	..... ۲-۲-۲ عوامل آسیب‌رسان به بتن
۸	..... ۳-۲-۲ طبقه‌بندی علل آسیب‌دیدگی بتن
۹	..... ۴-۲-۲ فرایندهای انتقال در بتن
۱۰	..... ۱-۴-۲-۲ ساز و کارهای انتقال
۱۲	..... ۲-۴-۲-۲ اهمیت ریزساختار بتن
۱۲	..... ۳-۴-۲-۲ تأثیر رطوبت نسبی
۱۳	..... ۳-۲ خوردگی فولاد در بتن
۱۳	..... ۱-۳-۲ تعریف
۱۳	..... ۲-۳-۲ ساز و کار خوردگی
۱۷	..... ۳-۳-۲ انواع خوردگی فولاد در بتن
۲۰	..... ۴-۳-۲ ماهیت لایه انفعالی
۲۰	..... ۵-۳-۲ پتانسیل خوردگی
۲۳	..... ۴-۲ عوامل تأثیرگذار در خوردگی
۲۳	..... ۱-۴-۲ عوامل خارجی تأثیرگذار در خوردگی فولاد در بتن
۲۳	..... ۱-۱-۴-۲ موجود بودن اکسیژن و رطوبت در سطح آرماتور
۲۳	..... ۲-۱-۴-۲ رطوبت نسبی و دما
۲۴	..... ۳-۱-۴-۲ کربناسیون و نفوذ گازهای اسیدی تا سطح آرماتور
۲۷	..... ۴-۱-۴-۲ آنیون‌های مهاجم، عمدتاً یون‌های کلرید

۳۳	..... ۵-۱-۴-۲ جریان‌های پراکنده
۳۳	..... ۶-۱-۴-۲ فعالیت باکتری‌ها
۳۳	..... ۲-۴-۲ عوامل داخلی تأثیرگذار در خوردگی فولاد در بتن
۳۳	..... ۱-۲-۴-۲ ترکیبات سیمان
۳۴	..... ۲-۲-۴-۲ ناخالصی‌های موجود در سنگدانه‌ها
۳۴	..... ۳-۲-۴-۲ ناخالصی‌های موجود در آب اختلاط و عمل‌آوری
۳۴	..... ۴-۲-۴-۲ افزودنی‌ها
۳۵	..... ۵-۲-۴-۲ نسبت آب به سیمان
۳۶	..... ۶-۲-۴-۲ عیار سیمان
۳۷	..... ۷-۲-۴-۲ اندازه و دانه‌بندی سنگدانه
۳۸	..... ۸-۲-۴-۲ عملیات ساخت
۳۹	..... ۹-۲-۴-۲ پوشش بتنی آرماتور فولادی
۳۹	..... ۱۰-۲-۴-۲ ساختار و ترکیب شیمیایی آرماتور فولادی
۴۰	..... ۵-۲ مدل فرسودگی بتن مسلح در اثر خوردگی
۴۱	..... ۶-۲ تأثیر خوردگی آرماتور در رفتار سازه
۴۲	..... ۷-۲ ارزیابی شرایط سازه‌های بتن مسلح
۴۳	..... ۱-۷-۲ روش‌های ارزیابی خوردگی آرماتور فولادی
۴۳	..... ۱-۱-۷-۲ پتانسیل نیم‌پیل (E_{corr})
۴۵	..... ۲-۱-۷-۲ شدت جریان خوردگی (I_{corr})
۴۶	..... ۲-۷-۲ روش‌های آزمایش ارزیابی بتن
۴۶	..... ۱-۲-۸-۲ آنالیز میزان یون کلرید
۴۸	..... ۲-۲-۷-۲ محاسبه ضریب انتشار کلرید بتن
۵۰	..... ۳-۲-۷-۲ آزمایش تعیین عمق کربناسیون
۵۱	..... ۴-۲-۷-۲ آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی بتن (ρ)
۵۲	..... ۵-۲-۷-۲ آزمایش تعیین نفوذ سریع کلرید ($RCPT$)
۵۳	..... ۶-۲-۷-۲ آزمایش تعیین مقاومت فشاری
۵۳	..... ۷-۲-۷-۲ آزمایش تعیین جذب آب
۵۴	..... ۸-۲-۷-۲ آزمایش تعیین جذب سطحی بتن
۵۵	..... ۹-۲-۷-۲ آزمایش تعیین جذب آب مویینه

۵۵	..... آزمایش تعیین نفوذپذیری گاز در بتن ۱۰-۷-۲
۵۶	..... آزمایش تعیین نفوذپذیری آب در بتن ۱۱-۷-۲
۵۷	..... ۸-۲ تأثیر عیار سیمان بر خواص بتن و محدودیت‌های مصرف آن
۵۷	..... ۱-۸-۲ تأثیر عیار سیمان بر مقاومت بتن
۶۴	..... ۲-۸-۲ تأثیر عیار سیمان بر جمع‌شدگی بتن
۷۱	..... ۳-۸-۲ تأثیر عیار سیمان بر خزش
۷۲	..... ۴-۸-۲ تأثیر عیار سیمان در نقل و انتقال سیالات به درون بتن
۸۳	..... ۵-۸-۲ تأثیر عیار سیمان بر رسانایی و مقاومت الکتریکی بتن
۸۸	..... ۶-۸-۲ تأثیر عیار سیمان بر میزان قلیائیت محلول منفذی
۸۸	..... ۷-۸-۲ محدودیت‌های پیشنهاد شده برای عیار سیمان در نوشته‌های مختلف
۹۱	..... فصل سوم: مصالح مصرفی و برنامه آزمایشگاهی
۹۱	..... ۱-۳ مقدمه
۹۲	..... ۲-۳ مشخصات مصالح مصرفی
۹۲	..... ۱-۲-۳ سیمان
۹۲	..... ۲-۲-۳ آب
۹۳	..... ۳-۲-۳ فوق روان کننده
۹۳	..... ۴-۲-۳ ماسه
۹۳	..... ۵-۲-۳ شن
۹۵	..... ۳-۳ انواع طرح اختلاط
۹۵	..... ۱-۳-۳ فرضیات و داده‌های تعیین نسبت‌های اختلاط
۹۶	..... ۲-۳-۳ روش محاسبه طرح اختلاط
۹۹	..... ۳-۳-۳ مقادیر مصالح مصرفی در مخلوط‌ها
۹۹	..... ۴-۳ روش ساخت مخلوط‌ها و تعیین روانی آنها
۱۰۱	..... ۵-۳ آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها
۱۰۲	..... ۱-۵-۳ آزمایش تعیین مقاومت فشاری
۱۰۳	..... ۲-۵-۳ آزمایش تعیین جذب آب
۱۰۳	..... ۴-۵-۳ آزمایش تعیین جذب آب موینه
۱۰۶	..... ۴-۵-۳ آزمایش تعیین مقاومت ویژه الکتریکی

۱۰۸	.....	۵-۵-۳	آزمایش تعیین پتانسیل خوردگی به روش نیم‌پیل
۱۱۱	.....	۶-۵-۳	آزمایش تعیین ضریب انتشار یون کلرید
۱۲۰	.....		فصل چهارم: نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آنها
۱۲۰	.....	۱-۴	مقدمه
۱۲۱	.....	۲-۴	مقاومت فشاری
۱۲۹	.....	۳-۴	جذب آب
۱۳۵	.....	۴-۴	جذب آب موینه
۱۴۲	.....	۵-۴	مقاومت ویژه الکتریکی
۱۴۸	.....	۶-۴	پتانسیل‌های نیم‌پیل
۱۵۳	.....	۷-۴	نفوذ یون کلرید
۱۶۲	.....		فصل پنجم: نتیجه‌گیری نهایی و پیشنهادات
۱۶۲	.....	۱-۵	نتایج کلی پژوهش
۱۶۶	.....	۱-۵	توصیه نهایی پژوهش
۱۶۶	.....	۲-۵	پیشنهادات
۱۶۸	.....		مراجع

فهرست شکل‌ها و نمودارها

- شکل ۱-۲ فرایندهای انتقال در بتن ۱۱
- شکل ۲-۲ تأثیر رطوبت نسبی طی نگهداری و نسبت آب به سیمان در ضریب جذب آب بتن ۱۲
- شکل ۳-۲ نمایش شماتیک تأثیر رطوبت نسبی و میزان رطوبت موجود در بتن بر ضرایب انتشار گازها و یونها ۱۳
- شکل ۴-۲ پیل الکتروشیمیایی خوردگی ۱۴
- شکل ۵-۲ پیل خوردگی در بتن مسلح ۱۷
- شکل ۶-۲ تصویر شماتیکی خوردگی میکروپیل ۱۸
- شکل ۷-۲ تصویر شماتیکی خوردگی ماکروپیل ۱۹
- شکل ۸-۲ فولاد منفعل شده در بتن ۲۰
- شکل ۹-۲ منحنی‌های پولاریزاسیون فولاد در بتن ۲۱
- شکل ۱۰-۲ ضریب انتشار نسبی CO_2 و آهنگ نسبی کربناسیون به عنوان تابعی از رطوبت نسبی (شماتیک) ۲۷
- شکل ۱۱-۲ منحنی‌های پولاریزاسیون فولاد در بتن در حضور کلریدها ۲۹
- شکل ۱۲-۲ مقدار بحرانی کلرید بر طبق پیشنهاد های CEB ۳۲
- شکل ۱۳-۲ تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری و دوام ۳۵
- شکل ۱۴-۲ رابطه بین آهنگ افت وزن و زنگ زدگی آرماتور با نسبت آب به سیمان ۳۶
- شکل ۱۵-۲ رابطه بین ضخامت پوشش بتن و مقدار کلرید سدیم در بتن ۳۹
- شکل ۱۶-۲ تصویر شماتیک گام‌های مختلف خرابی بتن مسلح در اثر خوردگی ناشی کلریدها ۴۰
- شکل ۱۷-۲ تصویر شماتیک ترک خوردگی و قله‌کن شدگی پوشش بتن در اثر افزایش حجم محصولات ناشی از خوردگی و اعمال تنش‌های کششی به بتن ۴۱
- شکل ۱۸-۲ کاهش سطح مقطع عرضی فولاد در اثر خوردگی ۴۲
- شکل ۱۹-۲ نمایش شماتیکی اندازه‌گیری پتانسیل نیم‌پیل ۴۳
- شکل ۲۰-۲ نمایش شماتیک نحوه انجام آزمایش جذب آب مویینه در آزمایشگاه ۵۵
- شکل ۲۱-۲ نمایش شماتیک نحوه انجام آزمایش نفوذپذیری گاز در بتن در آزمایشگاه ۵۶
- شکل ۲۲-۲ تأثیر نسبت سنگدانه به سیمان بر مقاومت بتن ۵۸
- شکل ۲۳-۲ رابطه بین مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای (با قطر ۱۰۰ mm و طول ۳۰۰ mm) و حجم سنگدانه در نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۵۰ ۵۹
- شکل ۲۴-۲ رابطه بین تنش کششی مستقیم و حجم سنگدانه‌ها در نسبت آب به سیمان

- ۶۰ ثابت ۰/۵۰
- ۶۱ شکل ۲۵-۲ رابطه بین مقاومت فشاری و مقدار خمیر در سنین ۱، ۲، ۷ و ۲۸ روز
- شکل ۲۶-۲ رابطه بین عیار سیمان با مقاومت‌های فشاری و کششی ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی و
- ۶۳ استوانه‌ای
- شکل ۲۷-۲ تأثیر مقدار سنگدانه در بتن (بر حسب حجم) بر نسبت جمع‌شدگی بتن به
- ۶۵ جمع‌شدگی خمیر خالص سیمان
- ۶۵ شکل ۲۸-۲ تأثیر بخش حجمی سنگدانه بر جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن
- شکل ۲۹-۲ تأثیر نسبت آب به سیمان، عیار سیمان، و مقدار آب بر جمع‌شدگی دراز مدت
- ۶۶ شکل ۳۰-۲ جمع‌شدگی آزاد، سنگدانه ٪ ۶۰، نسبت آب به سیمان ۰/۴۰، سیمان نوع I/II
- ۶۸ خشک‌شدگی از روز سوم شروع می‌شود
- شکل ۳۱-۲ جمع‌شدگی آزاد، سنگدانه ٪ ۷۰، نسبت آب به سیمان ۰/۴۰، سیمان نوع I/II
- ۶۸ خشک‌شدگی از روز سوم شروع می‌شود
- شکل ۳۲-۲ جمع‌شدگی آزاد، سنگدانه ٪ ۸۰، نسبت آب به سیمان ۰/۴۰، سیمان نوع I/II
- ۶۸ خشک‌شدگی از روز سوم شروع می‌شود
- شکل ۳۳-۲ جمع‌شدگی آزاد، سنگدانه ٪ ۶۰، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، سیمان نوع II/I
- ۶۹ خشک‌شدگی از روز سوم شروع می‌شود
- شکل ۳۴-۲ جمع‌شدگی آزاد، سنگدانه ٪ ۷۰، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، سیمان نوع I/II
- ۶۹ خشک‌شدگی از روز سوم شروع می‌شود
- شکل ۳۵-۲ جمع‌شدگی آزاد، سنگدانه ٪ ۸۰، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، سیمان نوع I/II
- ۶۹ خشک‌شدگی از روز سوم شروع می‌شود
- شکل ۳۶-۲ جمع‌شدگی آزاد، سنگدانه ٪ ۶۰، نسبت آب به سیمان ۰/۵۰، سیمان نوع I/II
- ۷۰ خشک‌شدگی از روز سوم شروع می‌شود
- شکل ۳۷-۲ جمع‌شدگی آزاد، سنگدانه ٪ ۷۰، نسبت آب به سیمان ۰/۵۰، سیمان نوع I/II
- ۷۰ خشک‌شدگی از روز سوم شروع می‌شود
- شکل ۳۸-۲ جمع‌شدگی آزاد، سنگدانه ٪ ۸۰، نسبت آب به سیمان ۰/۵۰، سیمان نوع I/II
- ۷۰ خشک‌شدگی از روز سوم شروع می‌شود
- شکل ۳۹-۲ رابطه بین خزش پایه و مقدار سنگدانه، که در آن g بیانگر مقدار سنگدانه می باشد ..
- ۷۵ شکل ۴۰-۲ رابطه بین جذب آب مویینه و مقدار خمیر
- شکل ۴۱-۲ عمق نفوذ یون کلرید
- ۷۶ شکل ۴۲-۲ ضریب انتشار اکسیژن به عنوان تابعی از $AF (W/C = 0/45)$
- ۷۷ شکل ۴۳-۲ ضریب نفوذپذیری اکسیژن به عنوان تابعی از $AF (W/C = 0/45)$
- ۷۷ شکل ۴۴-۲ نفوذ آب به عنوان تابعی از $AF (W/C = 0/45)$

- شکل ۲-۴۵ جذب آب به عنوان تابعی از AF در ملات‌های حاوی ماسه دانه‌بندی شده
 ۷۸ (W/C = ۰/۴۵)
- شکل ۲-۴۶ پروفیل مقدار کلرید به عنوان تابعی از AF در ملات‌های حاوی ماسه دانه‌بندی شده
 ۷۹ (W/C = ۰/۴۵)
- شکل ۲-۴۷ ضریب انتشار کلرید به عنوان تابعی از AF در ملات‌های حاوی ماسه دانه‌بندی شده
 ۷۹ (W/C = ۰/۴۵)
- شکل ۲-۴۸ کربناسیون به عنوان تابعی از AF در ملات‌های حاوی ماسه دانه‌بندی شده
 ۷۹ (W/C = ۰/۴۵)
- شکل ۲-۴۹ رابطه بین عیار سیمان و جذب آب حجمی اولیه و نهایی (W/C = ۰/۴۵) ۸۰
- شکل ۲-۵۰ رابطه بین عیار سیمان و ضریب جذب آب موئینه (W/C = ۰/۴۵) ۸۱
- شکل ۲-۵۱ پروفیل یون کلرید نسبت به وزن بتن (W/C = ۰/۴۵) ۸۱
- شکل ۲-۵۲ پروفیل یون کلرید نسبت به وزن سیمان (W/C = ۰/۴۵) ۸۱
- شکل ۲-۵۳ ضریب انتشار کلرید بتن (W/C = ۰/۴۵) ۸۲
- شکل ۲-۵۴ رابطه بین عیار سیمان و جذب آب حجمی اولیه و نهایی (W/C = ۰/۳۲) ۸۲
- شکل ۲-۵۵ رابطه بین عیار سیمان و ضریب جذب آب موئینه بتن (W/C = ۰/۳۲) ۸۳
- شکل ۲-۵۶ رابطه بین مقاومت ویژه الکتریکی و نسبت آب به سیمان با حداکثر اندازه ۴۰ mm، ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی (نوع I) و آزمایش شده در عمر ۲۸ روزه ۸۴
- شکل ۲-۵۷ رسانایی الکتریکی به عنوان تابعی از AF و سن بتن (W/C = ۰/۴۵) ۸۵
- شکل ۲-۵۸ رسانایی الکتریکی به عنوان تابعی از AF در ملات‌های حاوی ماسه دانه‌بندی شده
 ۸۶ (W/C = ۰/۴۵)
- شکل ۲-۵۹ مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های بتنی مغروق در آب ۸۶
- شکل ۲-۶۰ مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های بتنی مغروق در محلول نمک طعام ۵٪ ۸۷
- شکل ۲-۶۱ مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های بتنی مغروق در محلول نمک طعام ۳٪ ۸۷
- شکل ۳-۱ چگونگی تعیین مقاومت فشاری آزمون‌های ساخته شده ۱۰۲
- شکل ۳-۲ چگونگی غوطه‌ور شدن آزمون‌ها برای تعیین جذب آب آنها ۱۰۴
- شکل ۳-۳ چگونگی قرارگیری آزمون‌ها در جعبه انجام آزمایش جذب آب موئینه ۱۰۴
- شکل ۳-۴ نمودار جذب آب موئینه ۱۰۶
- شکل ۳-۵ چگونگی آماده‌سازی آزمون برای تعیین مقاومت الکتریکی ۱۰۷
- شکل ۳-۶ چگونگی برقراری مدار و اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ۱۰۸
- شکل ۳-۷ نمایش شماتیک مقطع قالب ساخت آزمون‌های تعیین پتانسیل خوردگی و تجهیزات
 به کار رفته در آن ۱۰۹

- شکل ۳-۸ آزمونه‌های تعیین پتانسیل خوردگی و نحوه انجام آزمایش ۱۱۰
- شکل ۳-۹ نمایش شماتیک آزمونه آزمایش پتانسیل خوردگی به روش نیم‌پیل و نحوه انجام
آزمایش ۱۱۱
- شکل ۳-۱۰ آزمونه‌های غوطه‌ور شده در آب‌نمک ۵ درصد جهت تعیین پروفیل یون کلرید و
محاسبه ضریب انتشار ۱۱۲
- شکل ۳-۱۱ چگونگی تهیه پودر از آزمونه‌های بتنی جهت تعیین مقدار یون کلرید ۱۱۳
- شکل ۳-۱۲ (الف) جوشاندن آب مقطر حاوی پودر بتن جهت حل شدن یون‌های کلرید در
آن، (ب) گذراندن مخلوط آماده شده از کاغذ صافی جهت گرفتن مواد نامحلول ۱۱۴
- شکل ۳-۱۳ دستگاه‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری غلظت یون کلرید محلول در آب ۱۱۶
- شکل ۴-۱ واکنش‌ها باعث جمع‌شدگی شیمیایی و خود به خودی می‌گردد ۱۲۷
- نمودار ۳-۱ منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی ۹۴
- نمودار ۳-۲ محدوده‌های پیشنهادی طرح مخلوط ملی ایران برای حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹
میلی‌متر و منحنی دانه‌بندی ترکیب مصالح سنگی انتخاب شده ۹۷
- نمودار ۴-۱ نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ ۱۲۲
- نمودار ۴-۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ ۱۲۲
- نمودار ۴-۳ نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ ۱۲۳
- نمودار ۴-۴ رابطه بین مقاومت فشاری با عیار سیمان دز سنین؛ (الف) ۷ روز، (ب) ۲۸ روز، (پ)
۹۱ روز ۱۲۴
- نمودار ۴-۵ رابطه بین مقاومت فشاری با نسبت آب به سیمان در سنین؛ (الف) هفت روز،
(ب) ۲۸ روز، (پ) ۹۱ روز ۱۲۵
- نمودار ۴-۶ تغییرات جذب آب با زمان برای مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ ۱۲۹
- نمودار ۴-۷ تغییرات جذب آب با زمان برای مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ ۱۳۰
- نمودار ۴-۸ تغییرات جذب آب با زمان برای مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ ۱۳۰
- نمودار ۴-۹ جذب آب اولیه (درصد وزنی) ۱۳۱
- نمودار ۴-۱۰ جذب آب نهایی (درصد وزنی) ۱۳۱
- نمودار ۴-۱۱ رابطه بین عیار سیمان با؛ (الف) جذب آب اولیه، (ب) جذب آب نهایی ۱۳۲
- نمودار ۴-۱۲ رابطه بین نسبت آب به سیمان با؛ (الف) جذب آب اولیه، (ب) جذب آب نهایی ۱۳۳
- نمودار ۴-۱۳ رابطه بین جذب آب مویینه با عیار سیمان در زمان‌های؛ (الف) ۳ ساعت، (ب)

- ۶ ساعت، (پ) ۲۴ ساعت، (ت) ۷۲ ساعت ۱۳۶
 نمودار ۴-۱۴ رابطه بین جذب آب مویینه با نسبت آب به سیمان در زمان‌های؛ (الف) ۳ ساعت،
 (ب) ۶ ساعت، (پ) ۲۴ ساعت، (ت) ۷۲ ساعت ۱۳۷
 نمودار ۴-۱۵ خطوط برازش شده از مقادیر جذب آب مویینه مخلوط‌های دارای نسبت آب به
 سیمان ۰/۵ ۱۳۸
 نمودار ۴-۱۶ خطوط برازش شده از مقادیر جذب آب مویینه مخلوط‌های دارای نسبت آب به
 سیمان ۰/۴۵ ۱۳۸
 نمودار ۴-۱۷ خطوط برازش شده از مقادیر جذب آب مویینه مخلوط‌های دارای نسبت آب به
 سیمان ۰/۴۰ ۱۳۹
 نمودار ۴-۱۸ ضرایب جذب آب مویینه حاصله از برازش خطی داده‌های آزمایش جذب آب مویینه ۱۳۹
 نمودار ۴-۱۹ رابطه بین ضریب جذب آب مویینه با عیار سیمان ۱۴۰
 نمودار ۴-۲۰ تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی با زمان برای مخلوط‌های دارای نسبت آب به
 سیمان ۰/۵۰ ۱۴۲
 نمودار ۴-۲۱ تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی با زمان برای مخلوط‌های دارای نسبت آب به
 سیمان ۰/۴۵ ۱۴۳
 نمودار ۴-۲۲ تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی با زمان برای مخلوط‌های دارای نسبت آب به
 سیمان ۰/۴۰ ۱۴۳
 نمودار ۴-۲۳ رابطه بین مقاومت ویژه الکتریکی و عیار سیمان در سنین؛ (الف) ۳ روز، (ب) ۷ روز،
 (پ) ۲۸ روز، (ت) ۹۱ روز ۱۴۴
 نمودار ۴-۲۴ رابطه بین مقاومت ویژه الکتریکی و نسبت آب به سیمان در سنین؛ (الف) ۳ روز،
 (ب) ۷ روز، (پ) ۲۸ روز، (ت) ۹۱ روز ۱۴۵
 نمودار ۴-۲۵ تغییرات پتانسیل‌های نیم‌پیل با زمان میلگردهای قرار گرفته در آزمون‌های بتنی
 دارای نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ نسبت به الکتروود مرجع کالومل اشباع (SCE) ۱۴۹
 نمودار ۴-۲۶ تغییرات پتانسیل‌های نیم‌پیل با زمان میلگردهای قرار گرفته در آزمون‌های بتنی
 دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ نسبت به الکتروود مرجع کالومل اشباع (SCE) ۱۴۹
 نمودار ۴-۲۷ تغییرات پتانسیل‌های نیم‌پیل با زمان میلگردهای قرار گرفته در آزمون‌های بتنی
 دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ نسبت به الکتروود مرجع کالومل اشباع (SCE) ۱۵۰
 نمودار ۴-۲۸ تغییرات پتانسیل‌های نیم‌پیل با زمان میلگردهای قرار گرفته در آزمون‌های بتنی
 دارای نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ نسبت به الکتروود مرجع نقره-کلرید نقره (Ag/AgCl) ۱۵۰
 نمودار ۴-۲۹ تغییرات پتانسیل‌های نیم‌پیل با زمان میلگردهای قرار گرفته در آزمون‌های بتنی
 دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ نسبت به الکتروود مرجع نقره-کلرید نقره (Ag/AgCl) ۱۵۱
 نمودار ۴-۳۰ تغییرات پتانسیل‌های نیم‌پیل با زمان میلگردهای قرار گرفته در آزمون‌های بتنی

- دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ نسبت به الکتروود مرجع نقره-کلرید نقره (Ag/AgCl) ۱۵۱
 نمودار ۳۱-۴ پروفیل کلرید محلول در آب نسبت به وزن بتن برای مخلوط‌های دارای نسبت آب
 به سیمان ۰/۵۰ ۱۵۳
 نمودار ۳۲-۴ پروفیل کلرید محلول در آب نسبت به وزن بتن برای مخلوط‌های دارای نسبت آب
 به سیمان ۰/۴۵ ۱۵۴
 نمودار ۳۳-۴ پروفیل کلرید محلول در آب نسبت به وزن بتن برای مخلوط‌های دارای نسبت آب
 به سیمان ۰/۴۰ ۱۵۴
 نمودار ۳۴-۴ پروفیل کلرید محلول در آب نسبت به وزن سیمان برای مخلوط‌های دارای نسبت
 آب به سیمان ۰/۵۰ ۱۵۵
 نمودار ۳۵-۴ پروفیل کلرید محلول در آب نسبت به وزن سیمان برای مخلوط‌های دارای نسبت
 آب به سیمان ۰/۴۵ ۱۵۵
 نمودار ۳۶-۴ پروفیل کلرید محلول در آب نسبت به وزن سیمان برای مخلوط‌های دارای نسبت
 آب به سیمان ۰/۴۰ ۱۵۶
 نمودار ۳۷-۴ ضریب انتشار میانگین یون کلرید بتن ۱۵۸
 نمودار ۳۸-۴ رابطه بین ضریب انتشار یون کلرید بتن با عیار سیمان ۱۵۸

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ فرایندهای انتقال در بتن و پارامترهای مشخصه آنها ۱۰
- جدول ۲-۲ حالت خوردگی آرماتور در سطوح مختلف pH ۲۷
- جدول ۳-۲ عوامل تأثیرگذار در مقدار بحرانی کلرید ۳۲
- جدول ۴-۲ محدوده پتانسیل خوردگی و احتمال وجود خوردگی طبق ASTM C876 برای الکتروود مرجع $Cu/CuSO_4$ ، و معادل آنها برای الکترودهای SCE و $Ag/AgCl$ بر طبق روابط تبدیلی بیان شده توسط کپلر ۴۴
- جدول ۵-۲ خطر احتمالی خوردگی با توجه به مقاومت الکتریکی ۵۲
- جدول ۶-۲ قابلیت نفوذ یون کلرید بر اساس جریان عبوری ۵۳
- جدول ۱-۳ خصوصیات شیمیایی سیمان مصرفی ۹۲
- جدول ۲-۳ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سیمان مصرفی ۹۲
- جدول ۳-۳ نتایج آزمایش دانه‌بندی مصالح سنگی ۹۴
- جدول ۴-۳ مشخصات فیزیکی مصالح سنگی ۹۵
- جدول ۵-۳ سهم هر یک از سنگدانه‌ها از کل مصالح سنگی موجود در یک متر مکعب بتن به همراه چگالی متوسط آنها ۹۸
- جدول ۶-۳ مقادیر مصالح مصرفی (سیمان، آب، فوق روان‌کننده و مصالح سنگی در حالت اشباع با سطح خشک) و نتایج آزمایش اسلامپ ۱۰۰
- جدول ۷-۳ ترکیبات و مشخصات مخلوط‌های بتنی ۱۰۱
- جدول ۸-۳ تعداد آزمون‌ها و سنین مورد آزمایش جهت تعیین مقاومت فشاری هر مخلوط ۱۰۲
- جدول ۱-۴ نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۱۲۱
- جدول ۲-۴ نتایج آزمایش جذب آب مویینه ۱۳۵
- جدول ۳-۴ ضرایب انتشار، C_s محاسباتی و ضرایب همبستگی خطوط برازش شده از داده‌های پروفیل کلرید ۱۵۷

مقدمه

۱-۱ کلیات

بتن یکی از مصالح ساختمانی پرمصرف در ساخت پل‌ها، ساختمان‌ها، سکوها و همینطور در سازه‌های زیرزمینی مثل تونل‌ها و خطوط لوله‌های بتنی می‌باشد. در حالت کلی، بتن یکی از مصالح بسیار بادوام به شمار می‌آید که می‌تواند در شرایط محیطی بسیار سخت مثل شرایط محیطی دریایی، صنعتی و غیره، مقاومت خوبی را از خود به نمایش بگذارد. با وجود اینکه اکثر این سازه‌ها از دوام مناسب و عملکرد دراز مدت خوبی برخوردار می‌باشند، اما همچنان، خرابی‌های زیادی در آنها به دلایل مختلف به چشم می‌خورد.

خوردگی آرماتورهای فولادی، به عنوان عامل اصلی آسیب‌دیدگی زودرس سازه‌های بتن مسلح، خصوصاً سازه‌هایی که در معرض محیط‌های دریایی و نمک‌های یخ‌زدا قرار گرفته‌اند، به شمار می‌آید. عوامل عمده آغازکننده خوردگی آرماتورهای فولادی، نفوذ یون‌های کلرید و دی‌اکسیدکربن تا سطح فولادها می‌باشد (Won Song et al, 2006). در اثر نفوذ این عوامل به داخل بتن، لایه انفعال

تشکیل شده بر سطح آرماتورها که در اثر قلیائیت بالای محلول منفذی بتن به وجود می‌آید، از بین می‌رود.

آهنگ خوردگی آرماتورهای فولادی مدفون در بتن وابسته به عوامل محیطی است. بتن‌های مسلح حاوی مقادیر قابل توجهی از یون‌های کلرید، خصوصاً آنهایی که در معرض دوره‌های تر شدن و خشک شدن قرار می‌گیرند، در برابر خوردگی ماکروپیل^۱ بسیار آسیب‌پذیر هستند. این شرایط اغلب در پل‌های بزرگراه‌ها، پارکینگ‌های قرار گرفته در معرض نمک‌های یخ‌زدا و سازه‌های واقع شده در شرایط محیطی دریایی اتفاق می‌افتد. همچنین pH آب منفذی بتن، کربناسیون خمیر سیمان پرتلند، ترک‌های موجود در بتن، جریان‌های پراکنده^۲ و اثرات گالوانیکی ناشی از تماس با فلزات غیر مشابه نیز از دیگر عواملی هستند که در آهنگ و سطح خوردگی تأثیرگذار می‌باشند. مشخصه‌های طراحی^۳ و روش‌های ساخت^۴ نیز، نقش بسیار مهمی را در خوردگی آرماتورها ایفا می‌کنند. نسبت‌های اختلاط بتن، ضخامت پوشش بتن روی آرماتورهای فولادی، اقدامات کنترل ترک و اجرای^۵ طراحی‌ها خصوصاً برای کنترل خوردگی، از جمله عواملی هستند که می‌توانند در کنترل هجوم و آهنگ خوردگی یاری‌دهنده باشند (ACI 222R-01).

در اثر خوردگی فولاد در بتن، محصولات جامد شکلی موسوم به زنگ به وجود می‌آیند که در اثر اشغال فضای بیشتر نسبت به فلز اولیه، تنش‌های کششی ناشی از انبساط قابل توجهی را به بتن اطراف وارد می‌سازند که در نتیجه آن بتن دچار آسیب‌دیدگی می‌گردد. علائم بیرونی زنگ‌زدگی شامل لک شدن سطح بتن، ترک‌خوردگی و قلوه‌کن‌شدگی^۶ آن می‌باشد. همچنین، در اثر خوردگی آرماتورهای فولادی سطح مقطع آنها کاهش می‌یابد. با گذشت زمان، در اثر کاهش چسبندگی بین آرماتورهای فولادی و بتن که ناشی از ترک‌خوردگی و قلوه‌کن‌شدگی و یا کاهش سطح مقطع آرماتور

1. Macropill corrosion
2. Stray currents
3. Design features
4. Construction practices
5. Implementation
6. Spalling