دانشکدهٔ مهندسی
گروه عمران

پایان نامه
جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران
گرایش سازه

عنوان:

تاثیر حباب زاها در جذب و نفوذ آب و یون کلرید در بتن و خوردگی میلگردها

اساتید راهنما:
دکتر فریدون رضایی- دکتر محسن تدین

استاد مشاور:
دکتر محمود نیلی

پژوهشگر:
محمد مهدی رستگار

خردادماه ۱۳۸۹

دانشگاه بوعلی سینا

مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی

عنوان: تاثیر حباب زاها در جذب و نفوذ آب و یون کلرید در بتن و خوردگی میلگردها

نام نویسنده: محمد مهدی رستگار

نام اساتید راهنما: دکتر فریدون رضایی – دکتر محسن تدین

نام استاد مشاور: دکتر محمود نیلی

دانشکده : فنی مهندسی	**گروه آموزشی: عمران**	
رشته تحصیلی: عمران	**گرایش تحصیلی: سازه**	**مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد**
تاریخ تصویب: ۱۳۸۷/۱۲/۵	**تاریخ دفاع: ۱۳۸۹/۳/۲۹**	**تعداد صفحات: ۱۳۵**

چکیده: پژوهش حاضر نتایج بررسی آزمایشگاهی تأثیر سطوح مختلف حبابزا بر خواص مکانیکی و دوام بتن‌ها، خصوصاً دوام آنها در برابر خوردگی میلگردها را نشان می‌دهد. مخلوط‌های مطالعه شده در این پژوهش در دو نسبت آب به سیمان (۰/۴۵و۰/۵) بودند که برای هر یک از آنها از چهار درصد هوای عمدی ۰، ۳، ۵، ۷ استفاده شد. در تهیه مخلوط‌ها، سیمان پرتلند تیپ۲، سنگدانه‌های ریز نیمه‌شکسته و درشت شکسته و نیمه شکسته و ماده حبابزای Micro Air 210 (BASF) به کار گرفته شد. آزمایش‌های انجام گرفته در این پژوهش شامل آزمایش مقاومت فشاری، جذب آب کوتاه مدت و بلندمدت، جذب آب مویینه، نفوذ آب تحت فشار، مقاومت ویژه الکتریکی، پتانسیل خوردگی به روش نیم‌پیل و آزمایش تعین ضریب انتشار یون کلرید بوده است.

پس از تهیه آزمونه‌ها، عمل‌آوری و انجام آزمایش‌ها در زمان‌های مشخص، مشاهده شد که در یک نسبت آب به سیمان ثابت، افزایش درصد هوا موجب کاهش مقاومت فشاری، افزایش جزئی عمق صعود مویینگی، افزایش ضریب جذب آب مویینه S (آهنگ صعود مویینگی)، افزایش نفوذ آب تحت فشار و افزایش ضریب انتشار یون کلرید بتن می‌گردد که افت خصوصیات مقاومتی و تا حدودی دوامی مخلوط‌ها را نشان می‌دهد. مقاومت ویژه الکتریکی نیز با افزایش درصد هوای عمدی، روند افزایشی را از خود نشان داد. تأثیر هوای عمدی در بتن در پتانسیل خوردگی میلگردهای مدفون نیز به علت وجود محدودیت زمانی در انجام آزمایش‌ها به وضوح مشخص نشد ولی واضح است که افزایش نسبت آب به سیمان در مخلوط موجب افزایش احتمال خوردگی میلگردهای مدفون می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: : حباب زا؛ مقاومت؛ دوام؛ جذب آب؛ جذب آب مویینه؛ نفوذ آب تحت فشار؛ مقاومت ویژه الکتریکی؛ پتانسیل خوردگی؛ ضریب انتشار.

همه امتیازهای این پایان نامه به دانشگاه بوعلی سینا 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 (یا استاد یا اساتید راهنمای پایان نامه) و نام دانشجو با ذکر ماخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱ کلیات ۱

۱-۲ دامنه و هدف پژوهش ۳

فصل دوم: نگرشی بر سوابق موضوع ۶

۲-۱ مقدمه ۶

۲-۲ دوام بتن ۷

۲-۲-۱ تعریف ۷

۲-۲-۲ عوامل آسیب‌رسان به بتن ۸

۲-۲-۳ طبقه‌بندی علل آسیب‌دیدگی بتن ۸

۲-۲-۴ فرایندهای انتقال در بتن ۹

۲-۲-۴-۱ ساز و کارهای انتقال ۱۰

۲-۲-۴-۲ اهمیت ریزساختار بتن ۱۲

۲-۲-۴-۳ تأثیر رطوبت نسبی ۱۲

۲-۳ خوردگی فولاد در بتن ۱۳

۲-۳-۱ تعریف ۱۳

۲-۳-۲ ساز و کار خوردگی ۱۳

۲-۳-۳ انواع خوردگی فولاد در بتن ۱۷

۲-۳-۴ ماهیت لایه انفعالی ۲۰

۲-۳-۵ پتانسیل خوردگی ۲۱

۲-۴ مدل فرسودگی بتن مسلح در اثر خوردگی ۲۲

۲-۵ تأثیر خوردگی آرماتور در رفتار سازه ۲۳

۲-۶ ارزیابی شرایط سازه‌های بتن مسلح ۲۴

۲-۶-۱ روش‌های ارزیابی خوردگی آرماتور فولادی ۲۵

۲-۶-۱-۱ پتانسیل نیم‌پیل (HCP) ۲۵

۲-۶-۱-۲ شدت جریان خوردگی (I_{corr}) ۲۷

۲-۶-۲ روش‌های آزمایش ارزیابی بتن ۲۸
۲-۶-۲-۱ آنالیز میزان یون کلرید ۲۸
۲-۶-۲-۲ محاسبه ضریب انتشار کلرید بتن ۳۰
۲-۶-۲-۳ آزمایش تعیین عمق کربناسیون ۳۲
۲-۶-۲-۴ آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی بتن (ρ) ۳۳
۲-۶-۲-۵ آزمایش تعیین نفوذ سریع کلرید ($RCPT$) ۳۴
۲-۶-۲-۶ آزمایش تعیین مقاومت فشاری ۳۵
۲-۶-۲-۷ آزمایش تعیین جذب آب ۳۶
۲-۶-۲-۸ آزمایش تعیین جذب سطحی بتن ۳۶
۲-۶-۲-۹ آزمایش تعیین جذب آب مویینه ۳۷
۲-۶-۲-۱۰ آزمایش تعیین ضریب نفوذ گاز در بتن ۳۸
۲-۶-۲-۱۱ آزمایش تعیین ضریب نفوذ آب در بتن ۳۸
۲-۷ علل آسیب دیدگی فیزیکی ۳۹
۲-۷-۱ آسیب دیدگی روسازی بتنی ناشی از فرسودگی سطحی ۳۹
۲-۷-۲ آسیب دیدگی روسازی های بتنی بر اثر یخ زدگی ۴۰
۲-۸ اثرات ایجاد حباب هوا ۴۴
۲-۸-۱ ایجاد حباب هوا ۴۴
۲-۸-۲ مشخصه های مجموعه حباب های هوا ۴۶
۲-۸-۳ الزامات حباب هوای ایجاد شده ۴۸
۲-۸-۴ عوامل موثر بر حباب هوا ۵۱
۲-۸-۵ ثبات حباب های هوای ایجاد شده ۵۶
۲-۸-۶ ایجاد حباب هوا بوسیله ریزکره ها ۵۸
۲-۸-۷ سنجش مقدار هوای بتن تازه ۵۹
۲-۸-۷-۱ روش وزنی ۵۹
۲-۸-۷-۲ روش حجمی ۶۰
۲-۸-۷-۳ روش فشاری ۶۰
۲-۸-۸ سایر اثرات ایجاد حباب هوا در بتن ۶۱
۲-۸-۸-۱ مقاومت فشاری ۶۱
۲-۸-۸-۲ روانی ۶۲
۲-۸-۸-۳ آب انداختگی بتن ۶۴

فصل سوم: مصالح مصرفی و برنامه آزمایشگاهی ۶۵
۳-۱ مقدمه ۶۵
۳-۲ مشخصات مصالح مصرفی ۶۶
۳-۲-۱ سیمان ۶۶
۳-۲-۲ آب ۶۶
۳-۲-۳ حباب ساز ۶۷
۳-۲-۴ ماسه ۶۷
۳-۲-۵ شن ۶۷
۳-۳ طرح اختلاط ۶۹
۳-۳-۱ فرضیات و داده‌های تعیین نسبت‌های اختلاط ۶۹
۳-۳-۲ روش محاسبه طرح اختلاط ۷۰
۳-۳-۳ مقادیر مصالح مصرفی در مخلوط‌ها ۷۳
۳-۴ روش ساخت مخلوط‌ها ۷۳
۳-۵ آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها ۷۵
۳-۵-۱ آزمایش تعیین مقاومت فشاری ۷۵
۳-۵-۲ آزمایش تعیین جذب آب ۷۶
۳-۵-۴ آزمایش تعیین جذب آب مویینه ۷۷
۳-۵-۴ آزمایش تعیین مقاومت ویژه الکتریکی ۸۰
۳-۵-۵ آزمایش تعیین پتانسیل خوردگی به روش نیم‌پیل ۸۲
۳-۵-۶ آزمایش تعیین ضریب انتشار یون کلرید ۸۵
۳-۵-۷ آزمایش نفوذ آب تحت فشار ۹۳

فصل چهارم: نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آنها ۹۵
۴-۱ مقدمه ۹۵
۴-۲ مقاومت فشاری ۹۶
۴-۳ جذب آب ۹۹
۴-۴ جذب آب مویینه ۱۰۵
۴-۵ مقاومت ویژه الکتریکی ۱۱۰
۴-۶ پتانسیل‌های نیم‌پیل ۱۱۶
۴-۷ نفوذ یون کلرید ۱۱۸

۴-۸ نفوذ آب تحت فشار ۱۲۲

فصل پنجم: نتیجه گیری نهایی و پیشنهادها ۱۲۴
۵-۱ نتایج کلی پژوهش ۱۲۴
۵-۲ پیشنهادها ۱۲۷

مراجع ۱۲۸

فهرست جداول

جدول ۲-۱ فرایندهای انتقال در بتن و پارامترهای مشخصه آنها ۱۰

جدول ۲-۲ محدوده پتانسیل خوردگی و احتمال وجود خوردگی طبق ASTM C876 برای الکترود مرجع $Cu/CuSO_4$، و معادل آنها برای الکترودهای SCE و Ag/AgCl بر طبق روابط تبدیلی بیان شده توسط کپلر ۲۶

جدول ۲-۳ خطر احتمالی خوردگی با توجه به مقاومت الکتریکی ۳۴

جدول ۲-۴ قابلیت نفوذ یون کلرید بر اساس جریان عبوری ۳۵

جدول ۲-۵ مقدار هوای توصیه شده برای بتن‌های حاوی سنگدانه‌های با حداکثر اندازه مختلف.. ..... ۵۰

جدول ۲-۶ اثر تغییرات در خصوصیات و مواد تشکیل دهنده بتن بر میزان هوا ۵۲

جدول ۳-۱ خصوصیات شیمیایی سیمان مصرفی ۶۶

جدول ۳-۲ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سیمان مصرفی ۶۶

جدول ۳-۳ نتایج آزمایش دانه‌بندی مصالح سنگی ۶۸

جدول ۳-۴ مشخصات فیزیکی مصالح سنگی ۶۸

جدول ۳-۵ سهم هر یک از سنگدانه‌هـا از کل مصالح سنگی موجود در یک متر مکعب بتن به همراه چگالی متوسط آنها ۷۱

جدول ۳-۶ مقادیر مصالح مصرفی (سیمان، آب، حبابزا و مصالح سنگی در حالت اشباع با سطح خشک) ۷۴

جدول ۳-۷ ترکیبات و مشخصات مخلوط‌های بتنی ۷۴

جدول ۳-۸ تعداد آزمونه‌ها و سنین مورد آزمایش جهت تعیین مقاومت فشاری هر مخلوط ۷۴

جدول ۴-۱ نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۹۶

جدول ۴-۲ نتایج آزمایش جذب آب مویینه ۱۰۵

جدول ۴-۳ ضرایب انتشار، C_s محاسباتی و ضرایب همبستگی خطوط برازش شده از داده‌های پروفیل کلرید ۱۲۰

فهرست شکل‌ها و نمودارها

شکل ۲-۱ 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 ۲-۳ نمایش شماتیک تأثیر رطوبت نسبی و میزان رطوبت موجود در بتن بر ضرایب انتشار گازها و یون‌ها ۱۳
شکل ۲-۴ پیل الکتروشیمیایی خوردگی ۱۴
شکل ۲-۵ پیل خوردگی در بتن مسلح ۱۷
شکل ۲-۶ تصویر شماتیکی خوردگی میکروپیل ۱۸
شکل ۲-۷ تصویر شماتیکی خوردگی ماکروپیل ۱۹
شکل ۲-۸ فولاد منفعل‌شده در بتن ۲۰
شکل ۲-۹ تصویر شماتیک گام‌های مختلف خرابی بتن مسلح در اثر خوردگی ناشی کلریدها ۲۲
شکل ۲-۱۰ تصویر شماتیک ترک‌خوردگی و قلوه‌کن‌شدگی پوشش بتن در اثر افزایش حجم محصولات ناشی از خوردگی و اعمال تنش‌های کششی به بتن ۲۳
شکل ۲-۱۱ کاهش سطح مقطع عرضی فولاد در اثر خوردگی ۲۴
شکل ۲-۱۲ نمایش شماتیکی اندازه‌گیری پتانسیل نیم‌پیل ۲۶
شکل ۲-۱۳ نمایش شماتیک نحوه انجام آزمایش جذب آب مویینه در آزمایشگاه ۳۷
شکل ۲-۱۴ نمایش شماتیک نحوه انجام آزمایش نفوذپذیری گاز در بتن در آزمایشگاه ۳۸
شکل ۲-۱۵ تأثیر درجه اشباع بتن بر روی مقاومت آن در برابر یخ زدن بر حسب یک ضریب دلخواه.... ۴۳
شکل ۲-۱۶ افزایش در حجم بتنی که در معرض یخ زدن و آب شدن قرار گرفته بصورت تابعی در عمری که در آن برای اولین بار یخ زدن شروع می‌شود ۴۴
شکل ۲-۱۷ کاهش وزن بتن با درصد هوای مختلف تحت تاثیر یخبندان پس از ۴۰ سیکل ۴۴
شکل ۲-۱۸ رابطه بین دوام و فاصله بین حباب‌های هوای ایجاد شده در بتن ۴۷
شکل ۲-۱۹ تاثیر نسبت آب به سیمان بر فاصله بین حباب‌های هوا در بتنی که بطور متوسط حاوی ۵ درصد حباب هوا باشد ۴۹
شکل ۲-۲۰ رابطه بین مقدار هوا و تعداد دورهای دستگاه مخلوط کن ۵۴
شکل ۲-۲۱ رابطه بین اسلامپ، مدت زمان ویبره کردن و هوای موجود در بتن ۵۵
شکل ۲-۲۲ رابطه بین ماکزیمم سایز سنگدانه، میزان سیمان و هوای موجود دربتن ۵۵
شکل ۲-۲۳ اثر کاهش در میزان آب و ماسه دربتن‌ها با عیار سیمان و هوای عمدی مختلف..... ۵۶
شکل ۲-۲۴ اثر حباب هوای ایجاد شده و هوای اتفاقی ۶۲

شکل ۳-۱ چگونگی تعیین مقاومت فشاری آزمونه‌های ساخته شده ۷۶

شکل ۳-۲ چگونگی غوطه‌ور شدن آزمونه‌ها برای تعیین جذب آب آنها ۷۷
شکل ۳-۳ چگونگی قرارگری آزمونه‌ها در جعبه انجام آزمایش جذب آب مویینه ۷۸
شکل ۳-۴ نمودار جذب آب مویینه ۷۹
شکل ۳-۵ چگونگی آماده‌سازی آزمونه برای تعیین مقاومت الکتریکی ۸۱
شکل ۳-۶ چگونگی برقراری مدار و اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ۸۱
شکل ۳-۷ نمایش شماتیک مقطع قالب ساخت آزمونه‌های تعیین پتانسیل خوردگی و تجهیزات به کار رفته در آن ۸۳
شکل ۳-۸ آزمونه‌های تعیین پتانسیل خوردگی و نحوه انجام آزمایش ۸۴
شکل ۳-۹ نمایش شماتیک آزمونه آزمایش پتانسیل خوردگی به روش نیم‌پیل و نحوه انجام آزمایش ۸۴
شکل ۳-۱۰ آزمونه‌های غوطه‌ور شده در آب‌نمک ۵ درصد جهت تعیین پروفیل یون کلرید و محاسبه ضریب انتشار ۸۶
شکل ۳-۱۱ چگونگی تهیه پودر از آزمونه‌های بتنی جهت تعیین مقدار یون کلرید ۸۶
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 ۸۷
شکل ۳-۱۳ دستگاه‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری غلظت یون کلرید محلول در آب ۸۹
شکل ۳-۱۴ نحوه قرارگیری آزمونه‌ها در دستگاه نفوذپذیری تحت فشار ۹۴

نمودار ۳-۱ محدوده‌های پیشنهادی طرح مخلوط ملی ایران برای حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹ میلی‌متر و منحنی دانه‌بندی ترکیب مصالح سنگی انتخاب شده ۷۱
نمودار ۴-۱ نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ ..... ۹۷
نمودار ۴-۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۵ ..... ۹۷
نمودار ۴-۳ رابطه بین مقاومت فشاری با درصد هوا در سنین؛ (الف) ۷ روز، (ب) ۲۸ روز، (پ) ۹۱ روز ۹۸
نمودار ۴-۴ تغییرات جذب آب با زمان برای مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ ..... ۱۰۰
نمودار ۴-۵ تغییرات جذب آب با زمان برای مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ ..... ۱۰۰
نمودار ۴-۶ جذب آب اولیه (درصد وزنی) ۱۰۱
نمودار ۴-۷ جذب آب نهایی (درصد وزنی) ۱۰۱
نمودار ۴-۸ رابطه بین درصد هوا با جذب آب اولیه ۱۰۲
نمودار ۴-۹ رابطه بین درصد هوا با جذب آب نهایی ۱۰۲
نمودار ۴-۱۰ رابطه بین درصد هوا با جذب آب اولیه ۱۰۳
نمودار ۴-۱۱ رابطه بین درصد هوا با جذب آب نهایی ۱۰۳
نمودار ۴-۱۲ رابطه بین جذب آب مویینه با درصد هوا در زمان‌های؛ (الف) ۳ ساعت، (ب) ۶ ساعت، (پ) ۲۴ ساعت، (ت) ۷۲ ساعت ۱۰۶

نمودار ۴-۱۳ رابطه بین جذب آب مویینه با نسبت آب به سیمان در زمان‌های؛ (الف) ۳ ساعت، (ب) ۶ ساعت، (پ) ۱۰۷

۲۴ ساعت، (ت) ۷۲ ساعت ....
نمودار ۴-۱۴ خطوط برازش شده از مقادیر جذب آب مویینه مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ ..... ۱۰۸
نمودار ۴-۱۵ خطوط برازش شده از مقادیر جذب آب مویینه مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۵ ..... ۱۰۸
نمودار ۴-۱۶ ضرایب جذب آب مویینه حاصله از برازش خطی داده‌های آزمایش جذب آب مویینه ۱۰۹
نمودار ۴-۱۷ تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی با زمان برای مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ ..... ۱۱۱
نمودار ۴-۱۸ تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی با زمان برای مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۵ ..... ۱۱۱
نمودار ۴-۱۹ رابطه بین مقاومت ویژه الکتریکی و درصد هوا در سنین؛ (الف) ۳ روز، (ب) ۷ روز، (پ) ۲۸ روز، (ت) ۹۱ روز ۱۱۳
نمودار ۴-۲۰ رابطه بین مقاومت ویژه الکتریکی و نسبت آب به سیمان در سنین؛ (الف) ۳ روز، (ب) ۷ روز، (پ) ۲۸ روز، (ت) ۹۱ روز ۱۱۴
نمودار ۴-۲۱ تغییرات پتانسیل‌های نیم‌پیل با زمان میلگردهای قرار گرفته در آزمونه‌های بتنی دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ نسبت به الکترود مرجع کالومل اشباع (SCE) ۱۱۷
نمودار ۴-۲۲ تغییرات پتانسیل‌های نیم‌پیل با زمان میلگردهای قرار گرفته در آزمونه‌های بتنی دارای نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ نسبت به الکترود مرجع کالومل اشباع (SCE) ۱۱۷
نمودار ۴-۲۳ پروفیل کلرید محلول در اسید نسبت به وزن بتن برای مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ ..... ۱۱۹
نمودار ۴-۲۴ پروفیل کلرید محلول در اسید نسبت به وزن بتن برای مخلوط‌های دارای نسبت آب به سیمان ۰/۵۰ ..... ۱۱۹
نمودار ۴-۲۵ ضریب انتشار میانگین یون کلرید بتن ۱۲۱
نمودار ۴-۲۶ رابطه بین ضریب انتشار یون کلرید بتن با درصد هوا ۱۲۱
نمودار ۴-۲۷ رابطه بین عمق نفوذ آب تحت فشار با درصد هوا ۱۲۳
نمودار ۴-۲۸ رابطه بین عمق نفوذ آب تحت فشار با نسبت آبه به سیمان ۱۲۳

فصل اول:

مقدمه

۱-۱ کلیات

بتن یکی از مصالح ساختمانی پرمصرف در ساخت پل‌ها، ساختمان‌ها و همینطور در سازه‌های زیرزمینی مثل تونل‌ها و خطوط لوله 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 میلگردهای فولادی، به عنوان عامل اصلی آسیب‌دیدگی زودرس سازه‌های بتن مسلح، خصوصاً سازه‌هایی که در معرض محیط‌های دریایی و نمک‌های یخ‌زدا قرارگرفته‌اند، به شمار می‌آید. عوامل عمده آغازکننده خوردگی میلگردهای فولادی، نفوذ یون‌های کلرید و دی‌اکسیدکربن تا سطح فولادها می‌باشد (Won Song et al, 2006). در اثر نفوذ این عوامل به داخل بتن، لایه انفعالی

تشکیل شده بر سطح میلگردهـــا که در اثر قلیائیت بالای محلول منفذی بتن به وجـــود می‌آید، از بین می‌رود. در این میان، هوای عمدی موجود در مخلوط نیز، یکی از عواملی است که می‌تواند بر دوام بتن در برابر صدمات ناشی از یخبندان و همچنین خواص فیزیکی و مکانیکی آن تأثیرگذار باشد.

آهنگ خوردگی میلگردهای 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 و خشک شدن قرار می‌گیرند، در برابر خوردگی ماکروپیل[1] بسیار آسیب‌پذیر هستند. این شرایط اغلب در پل‌های راه‌ها، پارکینگ‌های قرار گرفته در معرض نمک‌های یخزدا و سازه‌های واقع شده در شرایط محیطی دریایی اتفاق می‌افتد. همچنین pH آب منفذی بتن، کربناته شدن خمیر سیمان پرتلند، ترک‌های موجود در بتن، جریان‌های پراکنده[2] 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 و روش‌های ساخت[3] نیز، نقش بسیار مهمی در خوردگی میلگردها ایفا می‌کنند. نسبت‌های اختلاط بتن، ضخامت پوشش بتن روی میلگردهای فولادی، 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 فضـای بیشتر نسبت به فلز اولیه، تنش‌های کششی ناشی از انبسـاط قابل توجهی را به بتن اطراف وارد می‌سـازند و در نتیجـه آن بتن دچار آسیب‌دیدگی می‌گـردد. علائم بیرونی زنگ‌زدگی شـامل لک شدن سطح بتن، ترک‌خوردگی و قلوه‌کن‌شدن[4] آن می‌باشد. همچنین، در اثر خوردگی میلگردهای فولادی سطح مقطع آنها کاهش می‌یابد. با گذشت زمان، در اثر کاهش چسبندگی بین میلگردهای فولادی و بتن که ناشی از ترک‌خوردگی و قلوه‌کن‌شدن و یا کاهش سطح مقطع میلگرد

[1]. Macropill corrosion
[2]. Stray currents
[3]. Construction practices
[4]. Spalling

می‌باشد، آسیب‌هـای سازه‌ای به وجود می‌آید. این تأثیرات ثانویه[1] در سازه‌های شامل فولادهای پیش‌تنیده‌ی با مقاومت بالا، که در آنها کاهش جزئی در سطح مقطع فلز می‌تواند باعث خرابی گردد، بسیار با اهمیت است (ACI 222R-01).

خسارات اقتصادی ناشی از خوردگی بسیار زیاد است. به عنوان مثال، نصف ۵۷۵۰۰۰ پل موجود در ایالت متحده با مصرف نمک‌های یخزدا برای کنترل یخزدگی در فصل زمستان دچار خوردگی شده‌اند، و حداقل ۴۰ درصد آنها آسیب سازه‌ای پیدا کرده‌اند (Tourney et al. 1993). متشابهـاً پل‌های بزرگراه‌های موجود در انگلستان نیاز به توجه دارند زیرا که در آن‌هـا نیز خوردگی شدیداً در اثر بکارگیری نمک‌هـای یخزدا به چشـم می‌خورد (Wallbank 1989). هزینه‌هـای تعمیر بیش از ۶۲۰ میلیون پوند در ده سـال اخیر تخمین زده شـده اسـت (Troconis de Rincon et al. 2005). نتایج آمـاری مشـابهی در استرالیا، اروپا و خـاورمیانه وجود دارد (Bohni 2005). از طرف دیگر، عملیات تعمیر کاملاً پیچیده می‌باشد، روش‌هـا و مصالـح خاصی لازم است و در بیشتر موارد بهبود کامل سازه به کمـک تعمیر دور از انتظار اسـت. بنابراین از یک طرف تصور می‌شود که سازه‌هـای بتن مسلـح دارای دوام ذاتی هستند، در صورتی که در عمل خرابی‌هـای ناشی از خوردگی فولاد در آنهـا به چشم می‌خورد.

۱-۲ دامنه و هدف پژوهش

مواد بر پایه سیمان پرتلند، موادی با تخلخل ریز و ریزساختـار حساس می‌باشند. این مواد شـامل حفرات هوا، حفرات مویینه، و فضاهای بین لایه‌ای در ژل *C-S-H* می‌گردند. منافذ موجود در این مواد، در اندازه‌هـای مختلف می‌باشند که در کنار هم چیده شده، به هم متصل می‌گـردند. به علت محدوده وسیع اندازه منافذ از منافـذ نانومتری تا حفرات هوای میکـرومتری، ریزسـاختار خمـیر سیمان بسیار پیچیده است. ریزساختار بتن بسیار پیچیده‌تر از خمیر سیمان است. این

[1]. Latter

پیچیدگی به علت تشکیل ناحیه انتقالی (گذر) (*ITZ*) بین ماتریس[1] و سطح سنگدانه‌هـــا به وجود می‌آید (Yang et al. 2003).

خواص مهندسی بتن مثل مقاومت، دوام، جمع‌شدگی و نفوذپذیری مستقیماً متـأثر از تعـداد، نـوع، اندازه و توزیع منافذ موجود در خمیر سیمان، اجزای سنگدانه، و سطح مشـترک بـین خمیـر سـیمان و سنگدانه (*ITZ*) می‌باشد. به عنوان مثال، مقاومت و مدول الاستیسیته بـتن متـأثر از کـل حجـم منافـذ موجود در بتن است (Basheer et al. 2001). در حالی که نفوذپذیری وابسته به تخلخل و اتصال منافـذ موجود در خمیر سیمان و ریزترک‌های موجود در بتن، خصوصاً در سطح مشترک بین خمیـر سـیمان و سنگدانه می‌باشد (Banthia et al. 2005).

از این رو پی بردن به خواص بتن و پیش‌بینی مقاومت آن در برابر عوامل آسیب‌رسان خصوصاً عوامل ایجاد کننده خوردگی، با توجه به استفاده روزافزون آن در محیط‌های مهاجم، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. عوامل متعددی بر دوام بتن در این محیط‌ها تأثیر می‌گذارند که مهمترین آن‌هـا ، نسبت آب به مواد سیمانی است. در این میان، هوای عمدی موجود در مخلوط نیز، یکی از عواملی است که می‌تواند بر دوام بتن، و همچنین خواص فیزیکی و مکانیکی آن تأثیرگذار باشد که تا کنون پژوهش‌های نسبتاً کمی در رابطه با آن، خصوصاً در داخل کشور انجام گرفته است. لذا در پژوهش حاضر سعی شده است که با ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان، حداکثر اندازه سنگدانه، دانه‌بندی، نوع سیمان و سایر عوامل، از طریق مصرف ماده حبابزا، تأثیر آن بر مقاومت و دوام بتن، خصوصـاً دوام آن در برابر خوردگی میلگردهای مدفون، مورد مطالعه قرار گیرد. دستاوردهای این تحقیق از طریق انجام آزمایش‌های زیر میسر شده است:

- مقاومت فشاری بتن
- جذب آب بتن

[1]. Matrix

- جذب آب مویینه بتن
- نفوذ آب تحت فشار
- مقاومت ویژه الکتریکی بتن
- پتانسیل خوردگی میلگردهای مدفون در بتن
- پروفیل یون کلرید و ضریب انتشار کلرید بتن

پس از بیان مقدمه‌ای در زمینه خوردگی میلگرد در سازه‌های بتن مسلح، آسیب‌های ناشی از آن، و همچنین مشخص شدن اهداف پژوهش در فصل حاضر، فصول بعدی پایان‌نامه به شرح زیر ارائه شده است:

فصل دوم شامل جمع‌آوری اطلاعات از منابع مختلف در خصوص عوامل آسیب‌رسان به بتن، ساز و کار خوردگی فولاد در بتن، روش‌های کنترل خوردگی، روش‌های ارزیابی خوردگی و پژوهش‌های انجام گرفته در رابطه با تأثیر حبابزا بر خواص مکانیکی و دوام بتن می‌باشد.

فصل سوم به معرفی مشخصات مصالح مصرفی، روش طرح مخلوط، انواع طرح‌های اختلاط، روش ساخت مخلوط‌ها و تعیین درصد هوای آنها، آماده‌سازی نمونه‌ها و نحوه‌ی انجام آزمایش‌های در نظر گرفته شده خواهد پرداخت.

فصل چهارم نتایج آزمایش های انجام گرفته شامل مقاومت فشاری، جذب آب، جذب آب مویینه، نفوذ آب تحت فشار، مقاومت ویژه الکتریکی، پتانسیل های نیم پیل و ضریب انتشار یون کلرید را نشان می دهد. همچنین در این فصل به بحث و بررسی علل دستیابی به این نتایج پرداخته شده است.

فصل پنجم نتیجه‌گیری نهایی این پایان‌نامه را به صورت خلاصه ارائه می‌دهد. همچنین با توجه به نتایج حاصله از پژوهش جاری، پیشنهادهایی برای ادامه مطالعات جهت مشخص شدن زوایای بیشتری از تأثیر حبابزا بر خواص بتن ارائه شده است.

فصل دوم:

نگرشی بر سوابق موضوع

۲-۱ مقدمه

فرسودگی سازه‌های بتن مسلح یکی از مسائل بسیار مهم می‌باشد که هزینه تعمیر یا جایگزینی آنها باعث به وجود آمدن خسارات اقتصادی بسیار زیادی می‌شود. یکی از دلایل عمده این آسیب‌دیدگی‌ها، خوردگی میلگردهای فولادی مدفون در بتن است. شرایطی که باعث ایجاد خوردگی در سازه‌های بتن مسلح می‌گردد تا حد بسیار زیادی شناخته شده‌اند. با این وجود، بسیاری از این سازه‌ها، خصوصاً آنهایی که نوساز می‌باشند، خوردگی قابل توجهی را از خود نشان می‌دهند که نیازمند تدابیر تعمیری پر هزینه می‌باشند. در بسیاری از موارد، این سازه‌ها یا به شکل بادوام ساخته نمی‌شوند یا اینکه نگهداری مناسب از آنها به عمل نمی‌آید.

این فصل در ابتدا، اطلاعاتی پیرامون علل آسیب‌دیدگی سازه‌های بتن مسلح، فرآیند خوردگی فولاد در بتن و عوامل عمده تأثیرگذار در آهنگ خوردگی را ارائه می‌دهد. سپس، به بیان مطالبی در خصوص روش‌های ارزیابی سازه‌های بتن مسلح و آزمایش‌های موجود می‌پردازد. در نهایت نیز به تأثیر میزان هوای عمدی بر خواص بتن و محدودیت‌های پیشنهاد شده برای مصرف آن در نوشته‌های مختلف خواهد پرداخت.

۲-۲ دوام بتن

۲-۲-۱ تعریف

عمر خدمت‌دهی طولانی مترادف با دوام در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که دوام تحت یک مجموعه شرایط، لزوماً به معنای دوام تحت مجموعه شرایط دیگری نمی‌باشد، به همین دلیل متداول است که هنگام تعریف دوام اشاره‌ای کلی به محیط نیز بشود (کومار مهتا و همکاران ۱۳۸۳). تعاریف مختلفی برای دوام بتن ارائه شده است که برخی از آنها عبارتند از:

- بتن بادوام بتنی است با تخلخل کم، که در آن تک‌تک ذرات سیمان قبل از آغاز هیدراسیون در تنگاتنگ هم چیده شده باشند (Hover 1998).
- دوام بتن معمولاً به مقاومت آن در برابر عوامل خورنده فیزیکی و شیمیایی اطلاق می‌گردد (Aitcin 1998).
- بتن بادوام به بتنی گفته می‌شود که بتواند فرآیندهای از هم پاشیدگی را که انتظار می‌رود با آن مواجه شود، تحمل نماید (نویل: ترجمه فامیلی ۱۳۷۸).
- دوام بتن حاوی سیمان هیدرولیکی[1] به توانایی آن در برابر عوامل هوازدگی، حمله شیمیایی، سایش و یا هر فرآیندی که بتواند موجب آسیب‌دیدگی شود، گفته می‌شود. بتن بادوام در شرایط محیطی اطراف، شکل اولیه، کیفیت و قابلیت خدمت‌دهی خود را حفظ خواهد کرد (ACI 201.2R-01).

شایان ذکر است که دوام به معنای عمر بی‌نهایت نبوده و همچنین به این معنا نمی‌باشد که بتن می‌تواند هر گونه شرایط محیطی را تحمل نماید. به‌علاوه، امروزه روشن شده است که در بسیاری از شرایط، بتن به مراقبت منظم و مستمر احتیاج دارد.

[1]. Hydraulic-cement concrete

۲-۲-۲ عوامل آسیب‌رسان به بتن

عوامل آسیب‌رسان که به بتن حمله می‌کنند به دو دسته کلی عوامل خارجی و داخلی طبقه‌بندی می‌گردند (Aitcin 1998).

در میان عوامل خارجی می‌توان از یون‌های کلرید، دی‌اکسید کربن، آب‌های اسیدی، سولفات‌ها، دوره‌های یخزدن و آب شدن، باکتری‌ها[1]، عوامل ساینده، تری و خشکی مکرر و قلیایی‌ها نام برد. در میان عوامل داخلی نیز می‌توان به یون‌های کلرید موجود در زودگیرکننده‌ها، سولفات‌های سیمان، و قلیایی‌های سیمان که توانایی واکنش با سنگدانه‌های استفاده شده را دارند، اشاره کرد.

۲-۲-۳ طبقه‌بندی علل آسیب‌دیدگی بتن

مهتا و گرویک (Mehta & Gerwick. 1982) علل آسیب‌دیدگی بتن را به دو مقوله کلی تقسیم‌بندی کرده‌اند: علل فیزیکی و علل شیمیایی.

علل فیزیکی آسیب‌دیدگی بتن شامل دو گروه می‌گردد:

۱- فرسودگی سطحی یا کاهش جرم ناشی از سایش، فرسایش وخلأزایی
۲- ترک‌خوردگی ناشی از گرادیان معمولی دما و رطوبت، فشارهای ناشی از تبلور نمک‌ها در منافذ، بارگذاری سازه‌ای، و قرارگیری در معرض شرایط دمایی شدید، نظیر یخزدگی و آتش‌سوزی.

نگارندگان به طریق مشابه، علل شیمیایی آسیب دیدگی‌ها را به سه گروه طبقه‌بندی کرده‌اند:

۱- هیدرولیز اجزای خمیر سیمان، به وسیله آب شیرین
۲- واکنش‌های تبادل کاتیون بین مایعات مهاجم و خمیر سیمان
۳- واکنش‌هایی که منجر به تشکیل محصولات انبساط‌زا می‌شوند مانند:

[1]. Bacteria

- انبساط ناشی از حمله سولفات‌ها
- انبساط ناشی از واکنش قلیایی‌های موجود در سیمان با سنگدانه‌ها
- انبساط ناشی از خوردگی فولاد در بتن

باید متذکر شد که فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی آسیب‌دیدگی می‌توانند تواماً عمل نمایند و در اغلب اوقات آسیب دیدگیها به ندرت ناشی از یک عامل منفرد می‌باشند. اغلب، بتن می‌تواند علی‌رغم برخی از خصوصیات نامطلوب آن رضایت بخش باشد، اما با اضافه شدن یک عامل نامساعد، خسارت اتفاق خواهد افتاد. به این دلیل، به زحمت می‌توان فرسودگی بتن را به یک عامل ویژه ارتباط داد، اما در معنی کلمه، کیفیت بتن با توجه خاص به نفوذپذیری، همیشه در صحنه ظاهر می‌شود. درحقیقت، به استثنای خسارات ناشی از بارگذاری سازه‌ای، سایش، فرسایش و خلأزایی، کلیه اثرات نامطلوب بر دوام در بر گیرنده جابجایی مایعات در بتن است. بنابراین ملاحظات دوام نیاز به درک پدیده‌های مربوطه دارد.

۲-۲-۴ فرآیندهای انتقال در بتن[1]

حرکت گازها، مایعات، و یون‌ها در بتن به علت بر هم کنش[2] آنها با اجزای بتن و آب منفذی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که می‌تواند یکپارچگی بتن را در اثر ایجاد خرابی به شکل مستقیم یا غیر مستقیم به مخاطره اندازد (Basheer et al. 2001).

سه نوع سیال وجود دارند که اساساً بر دوام بتن اثر می‌گذارند و می‌توانند به داخل بتن وارد شوند: آب (خالص و یا حاوی یون‌های مهاجم)، دی‌اکسید کربن و اکسیژن. این مواد می‌توانند به روش‌های مختلفی در داخل بتن جابجا شوند، اما کلیه این جابجایی‌ها عمدتاً به ساختار خمیر سیمان سخت‌شده وابسته‌اند (نویل: ترجمه فامیلی ۱۳۷۸).

[1]. Transport processes in concrete
[2]. Interactions