پردیس بین الملل

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

بررسی خواص مهندسی بتن‌های توانمند حاوی پوزولان‌های زئولیت و متاکائولن

از

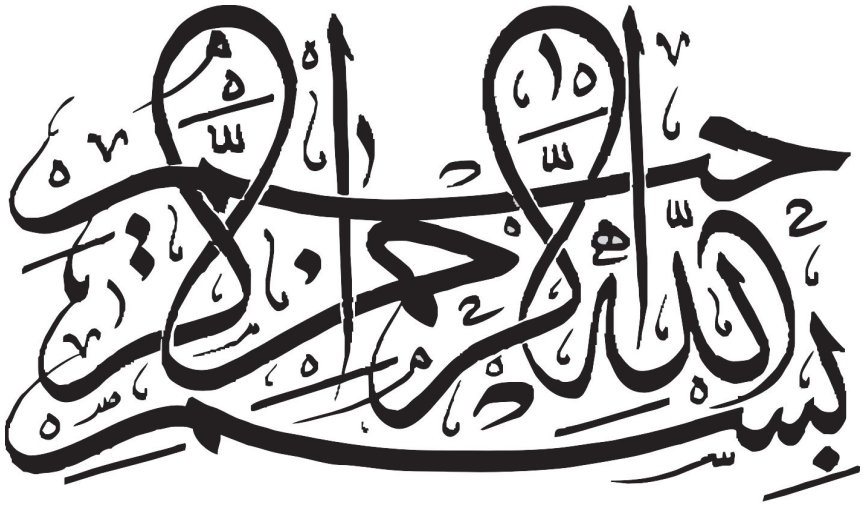
پوریا عاشوری

اساتید راهنما

دکتر رحمت مدندوست

دکتر جعفر سبحانی

اسفند ۱۳۹۱


بسم الله الرحمن الرحيم

پردیس بین الملل دانشگاه گیلان

کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه

بررسی خواص مهندسی بتن‌های توانمند حاوی پوزولان‌های زئولیت و متاکائولن

از

پوریا عاشوری

اساتید راهنما

دکتر رحمت مدندوست

دانشگاه گیلان

دکتر جعفر سبحانی

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

استاد مشاور

دکتر سید حسین قاسم زاده موسوی

زمستان ۱۳۹۱

تقدیم به

پدر و مادر عزیزتر از جانم

آن دو شمعی که سوختند

تا من برافروزم

تشکر و قدردانی:

اکنون که به لطف خداوند منان و همکاری ارزشمند استادان ارجمند جناب آقای **دکتر مدندوست** و جناب آقای **دکتر سبحانی** این پایان نامه را به اتمام رساندم، بر خود لازم می دانم از زحمات و محبت های پدرانه و بی دریغشان کمال تشکر و قدردانی را نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر موسی نژاد استاد مشاور محترم نیز سپاسگزارم.

کمال تشکر و قدردانی خود را از ریاست محترم مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی جناب آقای دکتر فاطمی عقدا و جناب آقای قدیری معاونت محترم منابع انسانی و همچنین جناب آقای دکتر حاتم زاده ریاست محترم دانشگاه گیلان اعلام می دارم که با تسهیل در تشریفات اداری زمینه همکاری فی ما بین مرکز و دانشگاه که ماحصل آن این پایان نامه است را فراهم نمودند.

و خالصانه سپاسگزاری می نمایم از:

از اساتید محترم جناب آقایان دکتر ملک محمد رنجبر و دکتر حجت الله مدارایی که قبول زحمت فرموده و با مطالعه پایان نامه اینجانب بر بنده منت نهادند و با اعلام نظرات خود بر غنی تر شدن محتوای این پایان نامه افزودند.

همچنین از کلیه همکاران و پرسنل محترم بخش بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به ویژه سرکار خانم دکتر طیبه پرهیزکار مدیر بخش و تکنسین های بخش بتن جناب آقایان میرباقری، مهرگان و ابراهیمی کمال تشکر و قدردانی را دارم

در انتها بر من واجب است که از تمامی زحماتی که پدر و مادر عزیزم در طول تدوین این پایان نامه متحمل شده اند خالصانه تقدیر و تشکر نمایم، بعلاوه از کلیه کسانی که به هر نحو مرا یاری نمودند تا این کار را به اتمام برسانم صمیمانه تشکر می کنم.

فهرست مطالب

عنوان----------صفحه

چکیده

فهرست مطالب ..... ج

فهرست جداول .....ز

فهرست اشکال .....ی

فصل اول: کلیات ۱

مقدمه..... ۱

۱-۱- اهداف و روش کار ۳

۱-۲- شرح فصول..... ۳

فصل دوم: مروری بر مطالعات انجام شده ۴

مقدمه..... ۴

۲-۱-پوزولان..... ۴

۲-۱-۱-واکنش پوزولانی ۵

۲-۱-۲-اثر پوزولان بر هیدراسیون..... ۶

۲-۱-۳-عوامل موثر بر فعالیت پوزولانی ۶

۲-۱-۴-طبقه بندی پوزولان‌ها..... ۷

۲-۱-۴-۱-پوزولان‌های مصنوعی..... ۸

۲-۱-۴-۲-پوزولان‌های طبیعی..... ۸

۲-۲-کائولن..... ۹

۲-۲-۱- فعال سازی حرارتی کائولن ۹

۲-۲-۲- خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و معدنی متاکائولن ۱۲

۲-۲-۲-۱- خصوصیات فیزیکی متاکائولن..... ۱۲

۲-۲-۲-۲- خصوصیات شیمیایی و معدنی متاکائولن..... ۱۳

۲-۲-۳- واکنش پوزولانی متاکائولن و تاثیرات آن بر ریز ساختار ۱۳

۲-۲-۴- واکنش پوزولانی..... ۱۴

۲-۲-۵-آثار فیلری، رقیق‌کنندگی و پخش‌کنندگی..... ۱۵

۲-۲-۶-اثرات متاکائولن در خصوصیات بتن تازه ۱۶
۲-۲-۷-اثرات متاکائولن در خصوصیات بتن سخت شده ۱۸
۲-۲-۷-۱-مقاومت فشاری ۱۸
۲-۲-۷- خزش و جمع شدگی ۲۴
۲-۲-۸-اثر متاکائولن در دوام بتن ۲۵
۲-۲-۸-۱-نفوذ یون کلراید ۲۵
۲-۲-۸-۱-۱- نفوذ تسریع شده یون کلراید ۲۵
۲-۲-۸-۱-۱-نفوذ یون کلراید (غیر تسریع شده) ۳۱
۲-۲-۸-۲- نفوذ آب و جذب مویینگی ۳۳
۲-۲-۸-۳- حمله سولفاتی ۳۸
۲-۲-۸-۴- کربناسیون ۴۰
۲-۲-۸-۵- واکنش‌های قلیایی سیلیسی (ASR) ۴۰
۲-۳-زئولیت ۴۲
۲-۳-۱-تاریخچه شناخت زئولیت ۴۲
۲-۳-۲-خواص زئولیت ۴۳
۲-۳-۲-۱-خواص جذب سطحی ۴۴
۲-۳-۲-۲-خاصیت تبادل کاتیونی ۴۴
۲-۳-۳-کاربردهای زئولیت در بتن ۴۴
۲-۳-۳-۱- تولید بتن پرمقاومت ۴۵
۲-۳-۳-۲- تولید سیمان زئولیتی با قلیایی کم ۴۶
۲-۳-۳-۳- جلوگیری از انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها ۴۶
۲-۳-۴- خاصیت پوزولانی زئولیت ۴۶
۲-۳-۵- تاثیر زئولیت بر خواص بتن تازه و خواص مکانیکی بتن سخت شده ۴۸
۲-۳-۵-۱- بتن تازه ۴۸
۲-۳-۵-۲- بتن سخت شده ۵۰
۲-۳-۵-۳- خواص مکانیکی ۵۰
۲-۳-۷-تأثیر زئولیت در کنترل واکنش های سیلیکاتی قلیایی سنگدانه ها در بتن ۵۶

۲-۳-۷-جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدگی ۵۸

فصل سوم مواد ، مصالح و برنامه آزمایشگاهی ۵۹

مقدمه: ۵۹

۳-۱- مصالح مصرفی ۵۹

۳-۱-۱- سنگدانه‌ها ۶۰

۳-۱-۲- سیمان ۶۱

۳-۱-۳- زئولیت و متاکائولن ۶۳

۳-۱-۳-۱-آنالیز شیمیایی ۶۳

۳-۱-۳-۲-دانه بندی ۶۴

۳-۱-۳-۳-واکنش‌پذیری پوزولانی به روش ترموگراویمتری ((TG ۶۶

۳-۱-۴- فوق روان کننده ۶۹

۳-۱-۵- آب مصرفی ۶۹

۳-۲- طرح مخلوط بتن ۷۰

۳-۳- ساخت نمونه‌ها ۷۰

۳-۴- روش انجام آزمایش‌ها و عمل‌آوری نمونه‌ها ۷۲

۳-۴-۱-آزمایش بر روی بتن تازه ۷۲

۳-۴-۲- آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی ۷۳

۳-۴-۳- آزمایش جذب آب در ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت ۷۴

۳-۴-۴- آزمایش نفوذ آب ۷۴

۳-۴-۵- آزمایش مقاومت الکتریکی ویژه بتن ۷۶

۳-۴-۶-آزمایش پتانسیل نیم‌پیل ۷۷

۳-۴-۷- آزمایش جمع شدگی ۷۹

فصل چهارم : نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آن‌ها ۸۰

۴-۱-آزمایش بر روی بتن تازه ۸۰

۴-۱-۱- درصد هوای بتن تازه ۸۱

۴-۱-۲- بررسی نیاز آبی ۸۱

۴-۲-آزمایش بر روی بتن سخت شده ۸۳

۴-۲-۱-بررسی رفتار مقاومتی ۸۳
۴-۲-۱-۱-مقاومت فشاری..... ۸۳
۴-۲-۲-بررسی رفتار دوام و خواص انتقال ۸۷
۴-۲-۲-۱- آزمایش عمق نفوذ آب ۸۷
۴-۲-۲-۲- آزمایش درصد جذب آب در ۳۰ دقیقه..... ۹۱
۴-۲-۲-۳-آزمایش درصد جذب آب در ۲۴ ساعت ۹۴
۴-۲-۲-۴-مقاومت الکتریکی ویژه..... ۹۷
۴-۲-۲-۴- آزمون پتانسیل آزاد (نیم پیل)..... ۱۰۱
۴-۲-۳- بررسی خواص فیزیکی..... ۱۰۲
۴-۲-۳-۱- جمع شدگی ناشی از خشک شدن..... ۱۰۲
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات..... ۱۰۶
۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۰۶
۵-۲-پیشنهادات..... ۱۰۸
مراجع ۱۰۹

فهرست جداول

جدول ۲-۱-دطبقه بندی پوزولان‌های طبیعی..... ۸

جدول ۲-۲- آنالیز شیمیایی سه نوع کائولن استفاده شده در تحقیق آریکان [۳۲]..... ۱۰

جدول ۲-۳- خصوصیات فیزیکی متاکائولن، سیمان پرتلند، خاکستر بادی و دوده‌سیلیس [۲۴]..... ۱۲

جدول ۲-۴- نمونه‌ای از ترکیبات شیمیایی متاکائولن [۳۲]..... ۱۳

جدول ۲-۵- کارپذیری بتن حاوی متاکائولن [۶۴]..... ۱۶

جدول ۲-۶- افزایش مقاومت‌های مشاهده شده در نمونه‌های حاوی متاکائولن در تحقیقات مختلف [۳۳]..... ۱۹

جدول ۲-۷- نتایج آزمایش مقاومت فشاری [۷۷]..... ۲۱

جدول ۲-۸- ضریب انتشار و غلظت سطحی یون کلراید [۵۱]..... ۲۶

جدول ۲-۹- نتایج آزمایش RCPT انجام شده توسط Poon [۷۷]..... ۲۹

جدول ۲-۱۰- بار عبوری در آزمایش نفوذ سریع یون کلراید [۸۸]..... ۲۹

جدول ۲-۱۱- نتایج RCPT و مقاومت الکتریکی ۲۸ روزه [۸۹]..... ۳۱

جدول ۲-۱۲- نتایج نفوذ حجمی یون کلراید وRCPT [۸۹]..... ۳۲

جدول ۲-۱۳- نرخ پخش کلراید برای ملات با متاکائولن وکائولن [۶۵]..... ۳۳

جدول ۲-۱۴- حجم حفرات خمیرهای حاوی متاکائولن (mm3/g) [۴۱]..... ۳۵

جدول ۲-۱۵- درصد حفرات کوچک (شعاع<۰/۰۲mμ) خمیرهای حاوی متاکائولن [۴۱]..... ۳۵

جدول ۲-۱۶- شعاع آستانه (mμ) در خمیرهای حاوی متاکائولن [۴۱]..... ۳۵

جدول ۲-۱۷- نتایج آزمایش مرکوری، ابعاد حفرات در سن ۱۲۰ روز [۴۵]..... ۳۶

جدول ۲-۱۸- pH اندازگیری شده از نمونه های بتنی پس از ۶۰ روز در محیط های مختلف [۹۶]..... ۴۰

جدول ۲-۱۹- نسبت واکنش زئولیت در خمیر سیمان آمیخته [۱۰۴]..... ۴۸

جدول ۲-۲۰- نتایج آزمون ترموگراویمتری [۱۴]..... ۴۸

جدول ۲-۲۱- اسلامپ، مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه بتن های آزمایش سری اول [۱۰۳]..... ۵۲

جدول ۲-۲۲- اسلامپ و مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن های آزمایش سری دوم [۱۰۳]..... ۵۲

جدول ۲-۲۳- حجم تجمعی حفرات خمیر سیمان (10^{-2} cc/g) [۱۱۶]..... ۵۵

جدول ۲-۲۴- نفوذ آب و نفوذ یون کلر تسریع شدهدر بتن حاوی زئولیت [۱۱۰]..... ۵۵

جدول ۲-۲۵- میزان جمع شدگی ملات حاوی پوزولان زئولیت طبیعی [۱۳۳]..... ۵۸

جدول ۳-۱- مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی جهت ساخت بتن..... ۶۰

جدول ۳-۲- مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند نوع دو کارخانه سیمان تهران..... ۶۲
جدول ۳-۳- مقایسه مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند نوع دو کارخانه سیمان تهران با محدودیت های استاندارد ملی ایران به شماره ۳۸۹ ..... ۶۲
جدول ۳-۴- مقایسه مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند نوع دو کارخانه سیمان تهران با محدودیت های استاندارد ملی ایران ۶۲
جدول ۳-۵- اکسیدهای تشکیل دهنده زئولیت و متاکائولن مصرفی..... ۶۳
جدول ۳-۶- مقایسه وضعیت متاکائولن و زئولیت مصرفی در پروژه با الزامات موجود در استاندارد ASTM C618..... ۶۴
جدول ۳-۷- ویژگی فوق روان کننده [۱۴۱]..... ۶۹
جدول ۳-۸- طرح های اختلاط نمونه های بتنی جهت ساخت ۱ متر مکعب بتن ۷۰
جدول ۳-۹- احتمال خوردگی میلگرد براساس اندازه‌گیری پتانسیل نیم‌پیل [۱۵۷]..... ۷۸
جدول ۴-۱- نتایج آزمایش‌ها بر روی بتن تازه..... ۸۰
جدول ۴-۲- عملکرد مقاومت فشاری در مخلوطهای حاوی ۲۰ درصد پوزولان جایگزین در مقایسه با نمونه مرجع..... ۸۵
جدول ۴-۳- عملکرد مقاومت فشاری در مخلوطهای حاوی ۴۰ درصد پوزولان جایگزین در مقایسه با نمونه مرجع..... ۸۵
جدول ۴-۴- عملکرد مقاومت فشاری در مخلوطهای دو جزئی در مقایسه با نمونه مرجع ۸۵
جدول ۴-۵- عملکرد مقاومت فشاری در مخلوطهای سه جزئی در مقایسه با نمونه مرجع..... ۸۶
جدول ۴-۶- محدوده شاخص نفوذپذیری تحت فشار آب طبق استاندارد BS EN 12390-8 : 2000 [۱۵۶] و محدودهٔ مقرر شده آیین نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان [۱۵۲]..... ۸۸
جدول ۴-۷- عمق نفوذپذیری در مخلوطهای حاوی ۲۰ درصد پوزولان در مقایسه با نمونه مرجع ۹۰
جدول ۴-۸- عمق نفوذپذیری در مخلوطهای حاوی ۴۰ درصد پوزولان در مقایسه با نمونه مرجع ۹۰
جدول ۴-۱۱- حدود جذب آب نیم ساعته طبق آزمون BS 1881,part122,1983 [۱۵۶] و بر اساس حدود تعیین شده آیین نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان [۱۵۲]..... ۹۲
جدول ۴-۱۲- مقدار درصد جذب آب در۳۰ دقیقه برای مخلوطهای حاوی ۲۰ درصد پوزولان در مقایسه با نمونه مرجع..... ۹۳
جدول ۴-۱۳- درصد جذب آب در۳۰ دقیقه برای مخلوطهای حاوی ۴۰ درصد پوزولان در مقایسه با نمونه مرجع..... ۹۳
جدول ۴-۱۴- درصد جذب آب در۳۰ دقیقه برای مخلوطهای دوجزئی در مقایسه با نمونه مرجع..... ۹۴
جدول ۴-۱۵- درصد جذب آب در۳۰ دقیقه برای مخلوطهای سه جزئی در مقایسه با نمونه مرجع ۹۴
جدول ۴-۱۶- مقدار درصد جذب آب در۲۴ ساعت برای مخلوطهای حاوی ۲۰ درصد پوزولان در مقایسه با نمونه مرجع..... ۹۵
جدول ۴-۱۷- درصد جذب آب در۲۴ ساعت برای مخلوطهای حاوی ۴۰ درصد پوزولان در مقایسه با نمونه مرجع..... ۹۶
جدول ۴-۱۸- درصد جذب آب در۲۴ ساعت برای مخلوطهای دوجزئی در مقایسه با نمونه مرجع ۹۶

جدول ۴-۱۹- درصد جذب آب در۲۴ ساعت برای مخلوطهای سه جزئی در مقایسه با نمونه مرجع..... ۹۶
جدول ۴-۲۰- مقدار مقاومت الکتریکی در مخلوطهای حاوی ۲۰ درصد پوزولان در مقایسه با نمونه مرجع ۹۹
جدول ۴-۲۱- مقدار مقاومت الکتریکی در مخلوطهای حاوی ۴۰ درصد پوزولان در مقایسه با نمونه مرجع ۹۹
جدول ۴-۲۲- مقدار مقاومت الکتریکی در مخلوطهای دوجزئی در مقایسه با نمونه مرجع..... ۱۰۰
جدول ۴-۲۳- مقدار مقاومت الکتریکی در مخلوطهای سه جزئی در مقایسه با نمونه مرجع ۱۰۰
جدول ۴-۲۴- مقدار جمع شدگی در مخلوطهای حاوی ۲۰ درصد پوزولان در مقایسه با مخلوط مرجع..... ۱۰۴
جدول ۴-۲۵- مقدار جمع شدگی در مخلوطهای حاوی ۴۰ درصد پوزولان در مقایسه با مخلوط مرجع..... ۱۰۴
جدول ۴-۲۶- مقدار جمع شدگی در مخلوطهای دوجزئی در مقایسه با مخلوط مرجع ۱۰۴
جدول ۴-۲۷- مقدار جمع شدگی در مخلوطهای سه جزئی در مقایسه با مخلوط مرجع..... ۱۰۴

فهرست اشکال

شکل۲-۱- اثر جایگزینی خاکستر بادی و میکروسیلیس بر دمای هیدراسیون [۱۱] ۶

شکل ۲-۲- آنالیز تفاضلی حرارتی(DTA) رس کائولن [۲۴] ۱۰

شکل ۲-۳- منحنی های سنجش وزن حرارتی(TG) در سمت راست و آنالیز تفاضلی حرارتی(DTA) در سمت چپ [۳۲] ۱۱

شکل ۲-۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) گرفته شده از متاکائولن [۲۴] ۱۲

شکل ۲-۵- سازگاری ملات با سیمان CEM I 42.5 و متاکائولن و کائولن [۶۵] ۱۷

شکل ۲-۶- زمان گیرش اولیه و نهایی [۶۹] ۱۷

شکل ۲-۷- مقاومت فشاری در مقابل درصد جایگزینی و سن نمونه ها [۲۹] ۱۸

شکل ۲-۸- اثر متاکائولن در افزایش مقاومت [۷۵] ۲۰

شکل ۲-۹- مقاومت فشاری بتن‌های حاوی متاکائولن [۷۶] ۲۰

شکل ۲-۱۰- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی متاکائولن در سنین مختلف [۸۰] ۲۲

شکل ۲-۱۱- نتایج آزمایش مقاومت کششی به روش دو نیم کردن [۴۰] ۲۳

شکل ۲-۱۲- نتایج آزمایش مقاومت خمشی [۴۰] ۲۳

شکل ۲-۱۳- ارتباط بین جمع شدگی بعد از ۶۰ روز و سطوح جایگزینی متاکائولن [۸۲] ۲۴

شکل ۲-۱۴- بار عبوری در مقابل سطح جایگزینی سیمان با متاکائولن و دوده‌سیلیس [۴۰] ۲۷

شکل ۲-۱۵- نتایج آزمایش نفوذ یون کلراید تسریع شده در سن ۲۸ روز [۸۵] ۲۸

شکل ۲-۱۶- نتایج RCPT نمونه‌های حاوی متاکائولن [۸۰] ۳۰

شکل ۲-۱۷- میزان آب جذبی در واحد سطح بعد از یک روز عمل‌آوری [۹۲] ۳۴

شکل ۲-۱۸- میزان آب جذبی در واحد سطح بعد از ۱۴ روز عمل‌آوری [۹۲] ۳۴

شکل ۲-۱۹- میزان آب جذبی در واحد سطح بعد از ۹۰ روز عمل‌آوری [۹۲] ۳۵

شکل ۲-۲۰- شیب قسمت خطی نمودارهای جذب موئینه در بتن‌های حاوی متاکائولن [۸۰] ۳۶

شکل ۲-۲۱- توزیع اندازه حفرات در سن ۱۲۰ روز با نسب آب به سیمان ۰/۳۵ [۴۵] ۳۷

شکل ۲-۲۲- توزیع اندازه حفرات در سن ۱۲۰ روز با نسب آب به سیمان ۰/۵۵ [۴۵] ۳۷

شکل ۲-۲۳- میزان نفوذ آب در نمونه های حاوی MK1 و MK3 [۸۰] ۳۸

شکل ۲-۲۴- اثر آب به سیمان و درصد جایگزینی در کاهش مقاومت فشاری [۸۴] ۳۹

شکل ۲-۲۵- اثر نسبت آب به سیمان و درصد جایگزینی در نرخ ارزیابی چشمی [۸۴] ۳۹

شکل ۲-۲۶- کنترل انبساط مرتبط با واکنش قلیایی سیلیسی با استفاده از متاکائولن فعالیت بالا [۸۹] ۴۱

شکل ۲-۲۷-کنترل انبساط درازمدت توسط متاکائولن فعالیت بالا [۸۹]..... ۴۲
شکل ۲-۲۸- مقدار $Ca(OH)_2$ در رابطه با مقدار زئولیت و مدت هیدراسیون [۱۰۱]..... ۴۷
شکل ۲-۲۹- مقایسه نسبت واکنش زئولیت با خاکستر بادی و دوده سیلیسی [۱۰۴]..... ۴۷
شکل ۲-۳۰- مقدار فوق روان‌کننده مورد نیاز در بتن حاوی زئولیت (NZ5، NZ10، NZ15 و NZ20 :بتن حاوی زئولیت با درصدهای به ترتیب ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰). [۱۱۷]..... ۴۹
شکل۲-۳۱- مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی حاوی زئولیت [۱۱۰]..... ۵۰
شکل ۲-۳۲- نفوذ گاز اکسیژن در مخلوط‌های حاوی زئولیت و دوده‌سیلیس در سن ۲۸ روزه [۱۱۷]..... ۵۶
شکل ۳-۱- منحنی دانه‌بندی ریزدانه مصرفی جهت ساخت بتن..... ۶۰
شکل ۳-۲- منحنی دانه‌بندی درشت‌دانه مصرفی جهت ساخت بتن..... ۶۱
شکل ۳-۳- مقایسه منحنی دانه‌بندی لیزری متاکائولن و زئولیت با سیمان پرتلند نوع دو تهران..... ۶۵
شکل ۳-۴- دستگاه STA برای آزمون اندازه‌گیری فعالیت پوزولانی (ترموگراویمتری)..... ۶۶
شکل ۳-۵- منحنی TG مربوط به میکروسیلیس..... ۶۷
شکل ۳-۶- منحنی TG مربوط به متاکائولن مصرفی..... ۶۷
شکل ۳-۷- منحنی های TG مربوط به زئولیت مصرفی..... ۶۸
شکل ۳-۸- مخلوط‌کن موجود در آزمایشگاه برای ساخت بتن..... ۷۱
شکل ۳-۹- میز ویبره موجود در آزمایشگاه برای ایجاد تراکم در بتن..... ۷۱
شکل ۳-۱۰- محفظه نگهداری نمونه‌های ساخته شده..... ۷۲
شکل ۳-۱۱- آزمایش اندازه گیری میزان اسلامپ بتن..... ۷۲
شکل ۳-۱۲- دستگاه آزمایش اندازه‌گیری میزان هوای بتن تازه طبق استاندارد ASTM C-231..... ۷۳
شکل ۳- ۱۳-ظرف اندازه‌گیری میزان چگالی بتن تازه مطابق با استاندارد ASTM C-138..... ۷۳
شکل ۳-۱۴- دستگاه آزمایش نفوذپذیری آب..... ۷۵
شکل ۳-۱۵- شکستن و قرائت نفوذ آب در نمونه‌های بتنی..... ۷۵
شکل ۳-۱۶- دستگاه مقاومت الکتریکی ویژه بتن و نحوه انجام آزمایش..... ۷۷
شکل ۳-۱۷-اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی..... ۷۷
شکل۳-۱۸-قالب نمونه برای آزمون نیم پیل..... ۷۸
شکل ۳-۱۹- دستگاه اندازه گیری میزان جمع شدگی بتن..... ۷۹
شکل ۴-۱- نمودار مقدار هوای موجود در مخلوط‌های بتن تازه..... ۸۱

شکل ۴-۲- بررسی مقدار نیاز آبی مخلوط‌های بتنی ۸۲
شکل ۴-۳- مقایسه مقدار مصرف فوق روان‌کننده در مقایسه با مخلوط شاهد ۸۲
شکل ۴-۴- مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط بتنی در سنین آزمایش ۸۳
شکل ۴-۵- درصد تغییرات مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط بتنی نسبت به نمونه شاهد ۸۴
شکل ۴-۶- درصد مقاومت فشاری کسب شده در مخلوط های بتنی ۸۷
شکل ۴-۷- عمق نفوذ آب در نمونه‌های بتنی ۸۸
شکل ۴-۸- محدوده عمق نفوذپذیری بر اساس آیین نامه ملی پایایی بتن ۸۹
شکل ۴-۹- تغییرات مقدار عمق نفوذ آب در نمونه‌های بتنی در مقایسه با مخلوط شاهد ۹۰
شکل ۴- ۱۰ مقایسه نتایج تحقیق Bahrami و Ramazanianpour با نتایج این پایان‌نامه ۹۱
شکل ۴-۱۱- درصد جذب آب در ۳۰ دقیقه برای کلیه مخلوط ها ۹۲
شکل ۴-۱۲- درصد جذب آب در ۳۰ دقیقه برای کلیه مخلوط ها در مقایسه با نمونه مرجع ۹۲
شکل ۴-۱۳- محدوده مجاز آیین نامه پایایی بتن برای درصد جذب آب در ۳۰ دقیقه برای کلیه مخلوط ها ۹۳
شکل ۴-۱۴- درصد جذب آب در ۲۴ ساعت برای کلیه مخلوط ها ۹۵
شکل ۴-۱۵- درصد جذب آب در ۲۴ ساعت برای کلیه مخلوط ها در مقایسه با نمونه مرجع ۹۵
شکل ۴-۱۶- مقایسه مقدار جذب آب در سایر تحقیقات و نتایج بدست آمده در این پایان‌نامه ۹۷
شکل ۴-۱۷- مقدار مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی ۹۸
شکل ۴-۱۸- درصد تغییرات مقدار مقاومت الکتریکی در نمونه‌های بتنی در مقایسه با مخلوط شاهد ۹۸
شکل ۴-۱۹- مقایسه نتایج مقاومت الکتریکی پایان‌نامه با تحقیقات انجام شده ۱۰۱
شکل ۴-۲۰- نتایج آزمون نیم پیل بعد از ۹۰ روز قرارگیری در محلول ۳٪ NaCl ۱۰۱
شکل ۴-۲۱- نتایج آزمون نیم پیل بعد از ۹۰ روز قرارگیری در محلول ۳٪ NaCl در مقایسه با نمونه مرجع ۱۰۲
شکل ۴-۲۲- درصد مقدار جمع شدگی در حالت خشک مخلوط‌های بتنی ۱۰۳
شکل ۴-۲۳- درصد مقدار تغییرات جمع شدگی در حالت خشک مخلوط‌های بتنی به در سن ۹۰ روز با مخلوط مرجع ۱۰۳

چکیده

بررسی خواص مهندسی بتن‌های توانمند حاوی پوزولان‌های زئولیت و متاکائولن

پوریا عاشوری

سالهاست که بتن یکی از مهمترین مصالح ساختمانی در مهندسی عمران می‌باشد. در این سال‌ها، عوامل تاثیر گذار بر بتن مورد بررسی قرار گرفته است. دوام بتن یکی از مهمترین عوامل تاثیر گذار بر روی عمر سرویس دهی سازه می باشد. درسال های اخیر متاکائولن و زئولیت به عنوان مواد جایگزین سیمان مورد توجه قرار گرفته و مقادیر مصرفی این مواد در صنعت بتن و سیمان رو به افزایش است.

در این پایان نامه بررسی اثر متاکائولن و زئولیت بعنوان پوزولان‌های جایگزین بخشی از سیمان بر روی مقاومت فشاری و برخی از خواص دوام نمونه‌های بتنی، بویژه در خواص انتقال (Transport properties) در بتن‌ها می‌باشد. نمونه‌های مورد بررسی در نسبت آب به مواد سیمانی (سیمان + متاکائولن + زئولیت) ثابت ۰/۴۰ و حاوی مقادیر ۰، ۲۰ و ۴۰ درصد متاکائولن یا زئولیت و یا ترکیبی از هر دو پوزولان به عنوان جایگزین سیمان ساخته شد و آزمایش‌های مقاومت فشاری، نفوذپذیری تحت فشار آب، جذب آب در ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت، مقاومت الکتریکی و جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن بر روی نمونه ها انجام شده است.

نتایج آزمایشات انجام گرفته نشان دهنده برتری نمونه‌های حاوی متاکائولن و زئولیت نسبت به نمونه‌های شاهد در زمینهٔ مقاومت فشاری و دوام بتن می‌باشد.

کلید واژه : متاکائولن، زئولیت، مقاومت فشاری، دوام، خواص انتقال، جمع‌شدگی

Abstract

Evaluation of Engineering properties of High Performance Concrete (HPC) incorporating Metakaolin and Zeiolite.

Poorya Ashoori

There are several years that concrete is one of the most important materials for civil engineers. Through these years, several factors in concrete have been studied. Durability of concrete is one of these factors that affect the service life of concrete structures. Recently, the properties of metakaolin and zeolite as supplementary cementitious materials (SCM)s are important issues that specialists are concerned with. Thay are not widely produced and used due to lack of adequate experiments on this material in the Middle East. There are Local kaolin and zeolite mine in Iran. The percentages of metakaolin and zeolite that replace PC in this research are 0%, 20% and 40% by mass. The water/ binder (w/b) ratios is 0.4 and having a constant total binder content of 400 kg/m3. This thesis provided an investigation to the performance of concrete mixtures containing local metakaolin and zeolite (for the first time in my country and Middle East). For this reason mechanical tests such as compressive strength, durability tests like water penetration, water absorption in 30min and 24h, electrical resistivity and dry shrinkage. Results show that concrete incorporating metakaolin and zeolite had higher compressive strength and these SCMs enhanced the durability of concretes, and positive effect on water transport properties.

Key words*: concrete, metakaolin, zeolite , compressive strength, durability, water transport.*

فصل اول

کلیات

مقدمه

بتن در حال حاضر جزو پرمصرف ترین مصالح ساختمانی دنیا می‌باشد [۱]. امروزه بتن به دلایلی از جمله وجود برخی ویژگی‌ها نظیر قابلیت شکل‌پذیری، مقاومت فشاری بالا، دوام در شرایط محیطی مختلف، در دسترس بودن مصالح مورد نیاز برای ساخت آن و قیمت مناسب مورد توجه ویژه بوده و به عنوان ماده ساختمانی قرن بیستم و یکم مطرح گردیده است.

در ایران نیز با توجه به حجم بالای پروژه‌های عمرانی و در دسترس بودن نسبی مصالح مورد نیاز برای تولید سیمان، استفاده از بتن بسیار رواج دارد. در چند دهه گذشته، دوام بتن به عنوان عاملی مهم و اساسی در طول عمر مفید سازه‌های بتنی در نظر مهندسین قرار داشته است. در عین حال با توجه به گستردگی ساخت و ساز و فعالیت‌های عمرانی در دنیا دسترسی به سیمان با کیفیت و قیمت مناسب مورد توجه بوده است. از طرف دیگر مطالعات نشان داده است که تولید سیمان علاوه بر آن که مقادیر متناهی از منابع طبیعی مانند سنگ آهک، سوخت‌های فسیلی و غیره را از بین می‌برد، به ازای هر تن سیمان تولید شده حدود یک تن گاز دی‌اکسید کربن که یکی از گازهای گلخانه‌ای آلاینده محیط زیست می‌باشد نیز ایجاد می‌شود [۲]. حدوداً ۷ درصد از گازهای CO_2 تولید شده در جهان تخمین زده می‌شود که توسط صنعت سیمان می‌باشد و این میزان تولید گازهای گاخانه‌ای می‌تواند اثرات زیادی بر گرم شدن زمین و عوارض آن داشته باشد [۲]. چالش‌های زیست‌محیطی پیش آمده در دهه‌های اخیر در مورد افزایش دمای اتمسفر زمین و لزوم کاهش انتشار گازهای CO_2 در جهان، کاهش مصرف انرژی و استفاده از مواد خام طبیعی، در کنار اعمال پروتکل کیوتو در سال ۱۹۹۷ (در مورد دگرگونی جو زمین)، باعث افزایش دامنهٔ تحقیقات در خصوص یافتن جایگزین‌های مناسب برای کاهش آثار زیست محیطی فرآیندهای اصلی تولید سیمان شده است [۳].

نیاز روزافزون به سیمان برای اجرای پروژه های مختلف عمرانی و دستیابی به سازه‌های بتنی با کیفیت و دارای دوام بالا اهمیت بسیاری دارد. علاوه بر این، برنامه‌ریزی‌های گسترده در راستای توسعه پایدار، ضرورت استفادهٔ بهینهٔ سیمان و جایگزینی بخشی از آن با موادی که علی‌رغم داشتن خصوصیات سیمانی، عملکرد خمیر سیمان را چه از لحاظ مقاومتی و چه از لحاظ دوام به مخاطره نمی‌اندازد، احساس می‌شود. که در این جایگزینی مسائل اقتصادی طرح و دوام بتن عوامل تعیین کننده‌ای هستند. گروهی از این مواد جایگزین تحت

عنوان پوزولان‌ها شناخته می‌شوند. با توجه به خواص مواد پوزولانی امروزه بیشتر این گونه تحقیقات بر روی تاثیرات این مواد متمرکز شده است. به طورکلی پوزولان‌ها مواد سیلیسی یا سیلیسی–آلومیناتی هستند که به خودی خود ارزش سیمانی نداشته و یا فعالیت سیمانی کمی دارند. ولی در صورتی که ذرات آنها به خوبی تفکیک شده و ریز باشند، می‌تواند در حضور رطوبت با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش شیمیایی داده و ترکیباتی با خواص محصولات سیمانی تولید نمایند. پوزولان‌ها از نظر منشاء وجودی و نوع شکل گیری، به پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. پوزولان‌های طبیعی شامل خاک‌های دیاتمه، چرت‌های اپالینی، شیل‌ها، توف‌ها و خاکستر آتشفشانی است. منابع اصلی تولید پوزولان‌های مصنوعی،کورهٔ استخراج فلزات تولید کنندهٔ آهن خام، فولاد و نیروگاه‌هایی که از زغال‌سنگ به‌عنوان سوخت استفاده می‌کنند می‌باشند. استفاده از این مواد و جایگزین کردن درصدهای مختلف آن نه تنها هزینهٔ تمام شده تولید بتن را تقلیل می‌دهد بلکه دوام بتن را نیز در محیط‌های مخرب بهبود می‌بخشد.

همان‌طور که گفته شد، گروهی از پوزولان‌های طبیعی، رس‌های تکلیس شده یا شیل‌ها هستند. این مواد واکنش زایی محسوسی با آهک از خود نشان نمی‌دهند مگر آنکه ساختمان‌های بلوری موجود در کانی‌های رسی به وسیله فرآوری (فعال‌سازی) حرارتی از بین برده شود. دماهای در حدود ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره‌های دوار با سوخت نفتی، گازی یا زغال سنگی برای این مقصود کافی است. فعالیت پوزولانی این محصول اساساً به علت تشکیل یک ساختمان آلومینوسیلیکاتی آمورف یا نامنظم در نتیجه فرآوری حرارتی است [۴].

درسال‌های اخیر متاکائولن که حاصل فعال سازی حرارتی رس کائولن است به عنوان یک ماده جایگزین سیمان مورد توجه قرار گرفته و مقادیر مصرفی این ماده در صنعت سیمان رو به افزایش است. اولین استفاده مستند از این ماده در بتن در سال ۱۹۶۲ میلادی و در سد جوپیای برزیل بوده است. استفاده از متاکائولن در صنعت بتن عمر کوتاهی دارد حدود ۲۰ سال دارد، ولی به سرعت به عنوان یک مادهٔ پوزولانی موثر پذیرفته شده است، به‌طوری که از سال ۱۹۹۴ میلادی متاکائولن به‌صورت تجاری وارد بازار شده است [۵].

یکی دیگر از پوزولان‌های مورد استفاده در این پایان‌نامه زئولیت است که با یک مثال به اهمیت استفاده از آن می‌پردازیم؛ کشور چین سالیانه بیش از ۲۹۰۰ میلیون تن(در سال ۲۰۱۲) سیمان تولید می‌کند[۸] و بیش از ۲۰ درصد وزن این سیمان تولیدی با زئولیت مخلوط می‌شود [۶ و۷] در حال حاضر بیشترین مصرف زئولیت در کشور چین در صنعت تولید سیمان آمیخته می‌باشد

در ایران در سال‌های اخیر تحقیقاتی بر روی کاربرد این پوزولان‌ها صورت گرفته است. در این تحقیقات مقدار پوزولان جایگزین با سیمان را در حد ۵، ۱۰، ۱۵،۲۰ و ۳۰ درصد بهینه نموده‌اند [۶۴ و ۹]. همچنین نتایج در مورد تاثیر مطلوب استفاده از متاکائولن و زئولیت به صورت جداگانه بر روی خواص مکانیکی و دوام بتن گزارش شده است. به‌علاوه این نتایج تصریح می‌کنند که استفاده از متاکائولن به تنهایی به عنوان جایگزین تا سطح ۱۲/۵ درصد از سیمان در بتن علاوه بر اینکه باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود منجر به افزایش مقاومت الکتریکی و به تبع آن افزایش مقاومت در برابر خوردگی آرماتور مدفون در بتن و همچنین منجر به کاهش میزان استفاده از فوق روان‌کننده‌ها نیز می‌شود [۹]. به‌علاوه تحقیقات نشان داده است که متاکائولن باعث کاهش میزان نفوذپذیری در برابر آب و کاهش درصد جذب آب نیز می‌شود. این در حالی‌است که زئولیت در بعضی ازخواص ذکر شده نسبت به متاکائولن عملکردی بهتر و در بعضی موارد

عملکردی ضعیف‌تر را دارا بوده است به عنوان مثال؛ میزان مصرف فوق روان‌کننده در بتن حاوی ۱۵ درصد زئولیت بیش از سه برابر بتن شاهد می‌باشد [۱۰].

با توجه به وفور معادن کائولن و زئولیت در ایران و از طرف دیگر با آگاهی از تاثیرات مثبت استفاده از این دو پوزولان؛ با بهره‌گیری از نظرات اساتید ارجمند تصمیم گرفته شد ، تا به بررسی تاثیر استفاده همزمان از زئولیت و متاکائولن تا سطح ۴۰ درصد وزنی جایگزین سیمان در بتن شود. هدف از انجام این پایان‌نامه پاسخ به چند سوال اساسی زیر است:

۱- با توجه به اینکه امروز در دنیا تولید محصولاتی که کمترین میزان تولید گازهای گلخانه‌ای را داشته باشند به عنوان یک اولویت اساسی مطرح است آیا می‌توان با جایگزینی ۴۰ درصد پوزولان به جای سیمان باز هم بتن با کیفیتی تولید نمود؟

۲- آیا استفادهٔ همزمان از این دو پوزولان به صورت سه جزئی در بتن (زئولیت + متاکائولن+ سیمان) نسبت به مخلوط دوجزئی (زئولیت یا متاکائولن + سیمان) عملکرد بهتری دارد؟

۳- آیا استفاده همزمان از این دو پوزولان تاثیر هم‌افزایی دارد؟

در راستای یافتن پاسخ برای این سوالات یعنی اثر متاکائولن و زئولیت به عنوان پوزولان‌های جایگزین بخشی از سیمان (تا ۴۰ درصد وزنی سیمان) بر مقاومت فشاری، میزان جمع شدگی ناشی از خشک شدگی و برخی از خواص دوام مخلوط‌های بتنی شامل میزان مقاومت الکتریکی، عمق نفوذ آب و درصد جذب آب مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۱- اهداف و روش کار

نمونه‌های مورد بررسی در نسبت آب به مواد سیمانی ثابت (سیمان + متاکائولن + زئولیت) ۰/۴۰ و حاوی مجموعاً مقادیر ۰، ۲۰ و ۴۰ درصد متاکائولن و زئولیت به عنوان جایگزین سیمان ساخته خواهند شد. در راستای بررسی کیفیت مواد اولیه شامل سیمان، زئولیت و متاکائولن؛ آزمون TG به منظور اندازه گیری میزان شدت فعالیت پوزولانی و آزمون دانه‌بندی لیزری برای تعیین حداکثر قطر ذرات مواد سیمانی انجام می‌شود. آزمایش‌های مقاومت فشاری، نفوذپذیری تحت فشار آب، جذب آب در ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت، مقاومت الکتریکی، آزمون اندازه گیری پتانسیل باز (نیم پیل) و جمع شدگی نیز برای بررسی خواص مهندسی این نوع بتن‌ها در نظر گرفته شده است.

۱-۲- شرح فصول

این پایان‌نامه مشتمل بر پنج فصل است. در فصل اول ضمن ارائه مقدمه‌ای بر کار به معرفی اجمالی پایان‌نامه و اهداف آن پرداخته شده است. در فصل دوم، به بررسی دقیق‌تر ویژگی‌های متاکائولن و زئولیت طبق مطالعات صورت گرفته در تحقیقات گذشته با توجه به عنوان پایان نامه پرداخته می‌شود. در فصل سوم مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها، جزئیات ساخت و شرح آزمایش‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌های بتن توضیح داده شده است. فصل چهارم نتایج، تحلیل و تفسیر آزمایش‌ها را در بر می‌گیرد و در فصل پنجم با توجه به نتایج بدست آمده به جمع‌بندی و ارائه پیشنهادها پرداخته می‌شود.