

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه گیلان

دانشکده مهندسی
گروه مهندسی عمران

پایان نامه

جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران
گرایش سازه

عنوان:

اثر دمای بتن ریزی بر تغییرات رژیم حرارتی ناشی از
هیدراسیون و خواص مقاومتی در بتن‌های حجیم

استاد راهنما:

دکتر محمود نیلی

۱۳۸۸/۵/۱۲

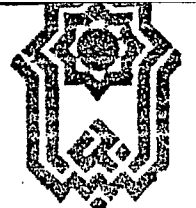
کتابخانه موزه سمناری
نسب مدرک

پژوهشگر:

سپیده نظری

بهمن ماه ۱۳۸۷

۱۱۵۸۶۷



دانشگاه گیلان
دانشکده مهندسی

بیتالی

تاریخ
شماره
پوست

گواهی تصویب پایان نامه

موضوع پایان نامه: اثر دما بر خواص مکانیکی بتن سازه‌ای در سازه‌های بتن آرمه در سازه‌های بتنی. دانشجو: *علی محمدی*، استاد راهنما: *دکتر سید علی حسینی*

بدینوسیله گواهی می‌شود جلسه دفاعیه پایان نامه خانم / آقای: *علی محمدی* ...

در روز: *پنجشنبه ۱۳۸۷/۰۵/۰۸* و ورودی: *۸۰۵۰۰* نیمسال انتخابی: *۸۰۸۰۰۰* / *۸۰۸۰۰۰* / *۱۳۸۷*

در روز: *پنجشنبه ۱۳۸۷/۰۵/۰۸* مورخ: *۱۳۸۷/۰۵/۰۸* ساعت: *۱۰:۳۰* تحت سرپرستی:

۱- استاد راهنما: جناب آقای / سرکار خانم: *دکتر سید علی حسینی*

۲- استاد مشاور: جناب آقای / سرکار خانم: *دکتر سید محمد رحمانی*

در محل *گروه مهندسی* برگزار گردید که پس از بررسی از طرف نامبردگان پایان نامه فوق با نمره *۴۰* و درجه *خوب* در تاریخ *۱۳۸۷/۰۵/۰۸* تصویب رسید.

تصویر
مهر

نام و نام خانوادگی و امضاء استاد راهنما: *سید علی حسینی*

نام و نام خانوادگی و امضاء استاد مشاور: *سید محمد رحمانی*

نام و نام خانوادگی و امضاء اساتید مدعو: ۱- *دکتر سید محمد رحمانی*

۲- *دکتر سید محمد رحمانی*

۳- *دکتر سید محمد رحمانی*

نام و نام خانوادگی و امضاء ناظر تحصیلات تکمیلی: *دکتر سید علی حسینی*

نام و نام خانوادگی مدیر گروه یا نماینده و امضاء: *دکتر سید علی حسینی*

مدیر گروه مهندسی: *دکتر سید علی حسینی*
نام و نام خانوادگی و امضاء: *دکتر سید علی حسینی*

همه امتیازهای این پایان‌نامه به دانشگاه بوعلی سینا تعلق دارد و در صورت استفاده تمام یا بخشی از مطالب پایان‌نامه در مجلات، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها، باید نام دانشگاه بوعلی سینا (یا استاد راهنمای پایان‌نامه) و نام دانشجو با ذکر مأخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه، ثبت شود؛ در غیر این صورت، مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

پیشکش بہ

خانوادہ عزیزم بہ ویژه پدر و مادر بزرگوارم

بہ پاس خوبی ما و مہربانی ما نشان

قدردانی و تشکر:

از خداوند بزرگ که بمواریه یاری دهنده من در تمام مراحل زندگی بوده است و از لطف و محبت بی کرانش سپاسگزارم.

خانواده عزیز و مهربانم پشتیبان من در بخت بخت نزدیکم و مشوقم در کسب علم و دانش بوده اند. یاریشان را سپاس می گویم.

از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر نیلی، که افتخار کسب علم از محضرشان را داشته ام و از تمامی راهنمایی های ارزنده اش آن که تشکرم را تعمیق می -

بخشد کمال تشکر را دارم.

از آقایان، دکتر رمضانپور و دکتر تیدین که زحمات مطالعه و داوری این پایان نامه را بر عهده داشته اند تشکر می -

کنم. در تدوین این پایان نامه به ویژه در طی مراحل آزمایشگاهی آن، آقایان مهندس، صاحبی، سازجینی، افروغ، دانش و خانم مهندس بابازاده یاریگر

بنده بوده اند، از لطفشان سپاسگزارم. همچنین از پرسنل آزمایشگاه بتن به جهت همکاری شان تشکر می -

کنم. از دوستان عزیزم که روزهای دوران تحصیل با وجود آنان برایم خاطره انگیز شده است، خانم مهندس، رفیعی، کریمی، آهوجندی،

احمدی، قاجاری، حق دوست، حسینی، میرفندرسکی، سیف و دیگر دوستان مهربانم، سپاسگزارم.

نام خانوادگی پژوهشگر: نظری		نام: سپیده	
عنوان پایان نامه: اثر دمای بتن ریزی بر تغییرات رژیم حرارتی ناشی از هیدراسیون و خواص مقاومتی در بتن های حجیم			
تعداد صفحه: ۱۸۰			
استاد راهنما: دکتر محمود نیلی			
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد		رشته: مهندسی عمران	
دانشگاه: بوعلی سینا		گرایش: سازه	
دانشکده: مهندسی			
کلید واژه ها: دمای بتن ریزی، بتن حجیم پرمقاومت، دوده سیلیسی، ریسک ترک خوردگی			
چکیده:			
<p>امروزه ساخت سازه های بتنی حجیم با مقاومت زیاد رو به گسترش است. در این نوع سازه ها بدلیل حجم سیمان مصرفی زیاد و ابعاد بزرگ، حرارت قابل توجهی در سنین اولیه در بدنه آنها تولید می گردد. اگرچه شمای تولید حرارت ناشی از هیدراسیون سیمان تا حدودی شناخته شده است، لیکن مقادیر کمی رژیم حرارتی از جمله میزان دمای حداکثر و زمان وقوع آن و همچنین نرخ گرمایش و سرمایش آن از جمله پارامترهایی می باشند که خصوصیات بتن را در سنین اولیه و طولانی مدت، تحت تأثیر قرار می دهند. در این پایان نامه با انتخاب سه محدوده دمای بتن ریزی $10^{\circ}C$، $20^{\circ}C$ و $40^{\circ}C$، سعی شده است که رفتار بتن های حجیم پرمقاومت از حیث حرارتی، مقاومتی و جذب آب، مورد بررسی قرار گیرد. نسبت آب به سیمان، $0/3$ و از دوده سیلیسی به میزان $0/5$، $0/8$ و $1/1$ به عنوان مواد مکمل سیمانی استفاده شده است. ریسک ترک خوردگی در ستون های حجیم شبیه سازی شده، به کمک نرم افزار <i>4C-Temp&Stress</i> محاسبه گردیده است. از سوی دیگر به کمک محفظه <i>TMCC</i>، نمونه های هسته و لایه های سطحی بتن حجیم شبیه سازی گردیده اند.</p> <p>نتایج نشان می دهند در دمای بتن ریزی زیاد ($40^{\circ}C$) نسبت به دمای کم ($10^{\circ}C$)، دمای حداکثر، افزایش یافته و زمان وقوع آن نیز کاهش یافته است. از سوی دیگر شیب گرمایش و سرمایش نیز در این حالت تند شده است. ریسک ترک خوردگی به طور کلی تابع گرادیان حرارتی می باشد و در شرایطی که گرادیان به $25^{\circ}C$ برسد، وقوع ترک حتمی است. بتن ریزی در دمای کم، حدود $10^{\circ}C$، باعث می گردد مقاومت کوتاه مدت و طولانی مدت بهتری نسبت به نمونه های استاندارد بدست آید در حالیکه در دمای زیاد بتن ریزی ($40^{\circ}C$)، اگرچه مقاومت اولیه بیشتر بوده است ولی در طولانی مدت افت مقاومتی نسبت به نمونه استاندارد مشاهده می شود. میزان مصرف بهینه دوده سیلیسی در دمای کم $0/8$ می باشد ولی در دمای زیاد با افزایش مصرف دوده سیلیسی مقاومت سیر صعودی دارد. درصد جذب آب بتن در هسته بیشتر از حالت استاندارد است و دوده سیلیسی باعث بهبود ساختار داخلی بتن گردیده است.</p>			

۱	مقدمه
فصل اول: کلیات و ویژگیهای بتن حجیم با مقاومت زیاد	
۵	۱-۱- مقدمه
۶	۲-۱- مسائل بتن حجیم
۶	۱-۲-۱- ترک خوردگیهای حرارتی (تغییر شکلهای حرارتی)
۷	۱-۱-۲-۱- قید خارجی
۹	۲-۱-۲-۱- قید داخلی
۹	۲-۲-۱- خزش
۱۰	۳-۱- برخی از راههای کنترل دما در بتن حجیم
۱۱	۱-۳-۱- کنترل حرارتزایی سیمان
۱۴	۲-۳-۱- سیستمهای پیشسرمایش بتن
۱۴	۳-۳-۱- پسسرمایش بتن
۱۵	۴-۳-۱- انتخاب سنگدانههای مناسب
۱۶	۵-۳-۱- عایقسازی سطح بتن
۱۷	۴-۱- بتن با مقاومت زیاد
۱۸	۱-۴-۱- طراحی بتن با مقاومت بالا
۱۹	۲-۴-۱- مصالح مصرفی در بتن حجیم با مقاومت زیاد
۱۹	۱-۲-۴-۱- سیمان
۲۱	۲-۲-۴-۱- پوزولانها
۲۴	۳-۲-۴-۱- افزودنیهای شیمیایی
۲۴	۴-۲-۴-۱- آب
۲۵	۵-۲-۴-۱- سنگدانهها
۲۶	۳-۴-۱- نسبتهای اختلاط

فصل دوم: اثر دمای بتن ریزی بر هیدراسیون، رژیم حرارتی، کاهش مقاومت و ترک خوردگیهای

۱۶	بتنهای حجیم
۲۹	۱-۲- مقدمه
۳۰	۲-۲- فرآیند هیدراسیون سیمان
۳۰	۱-۲-۲- واکنشهای هیدراسیون سیمان
۳۲	۲-۲-۲- حرارتزایی فرآیند هیدراسیون سیمان
۳۴	۳-۲- عوامل مؤثر بر حرارت هیدراسیون سیمان در بتن
۳۴	۱-۳-۲- نوع سیمان و مقدار آن

۳۶	..... نسبت آب به سیمان ۲-۳-۲
۳۶	..... ابعاد سازه بتنی ۳-۳-۲
۳۷	..... افزودنیهای شیمیایی ۴-۳-۲
۳۸	..... مواد مکمل سیمانی ۵-۳-۲
۴۱	..... دمای بتن ریزی و دمای عمل آوری بتن ۶-۳-۲
۴۴	..... روشهای تعیین حرارت هیدراسیون ۴-۲
۴۵	..... تنشهای حرارتی و ترک خوردگی حرارتی ۵-۲
۴۵	..... مکانیسم ترک خوردگی حرارتی ۱-۵-۲
۴۷	..... مدل‌های محاسباتی برای ارزیابی ریسک تشکیل ترک ۶-۲
۴۷	..... آنالیز حرارتی ۱-۶-۲
۴۹	..... تنشهای حرارتی ۲-۶-۲
۴۹	..... خواص بتن ۳-۶-۲
۵۲	..... کاهش مقاومت بتن‌های حجیم ۷-۲
۵۲	..... اثر دمای عمل آوری بر رشد مقاومت بتن ۱-۷-۲
۵۸	..... مروری بر تحقیقات انجام شده ۸-۲

فصل سوم: مصالح مصرفی و طراحی آزمایش‌ها

۷۱	..... مقدمه ۱-۳
۷۳	..... اعمال دمای بتن ریزی مختلف ۲-۳
۷۷	..... مشخصات مصالح ۳-۳
۷۷	..... مواد سیمانی ۱-۳-۳
۷۸	..... سنگدانه‌ها ۲-۳-۳
۸۱	..... فوق روان کننده ۳-۳-۳
۸۱	..... طرح اختلاط مواد و مصالح ۴-۳
۸۱	..... نسبت آب به سیمان ۱-۴-۳
۸۱	..... میزان سیمان مصرفی ۲-۴-۳
۸۲	..... نسبت سنگدانه‌ها ۳-۴-۳
۸۳	..... نسبتهای اختلاط و مقادیر هر پیماننه ۴-۴-۳
۸۵	..... نحوه اختلاط مصالح ۵-۴-۳
۸۶	..... نمونه‌گیری از بتن تازه و طراحی آزمایش‌ها ۵-۳
۸۶	..... نمونه‌گیری حرارتی ۱-۵-۳
۸۶	..... محفظه نیمه‌آدیباتیک (Hay Box)، دستگاه ثبات و نرم‌افزار مربوطه ۱-۱-۵-۳
۸۸	..... نرم افزار 4C-Heat ۲-۱-۵-۳
۸۹	..... نرم‌افزار 4C-Temp&Stress ۳-۱-۵-۳

۹۴	..... نمونه‌گیری مقاومتی	۲-۵-۳
۹۷	..... آماده‌سازی قالب‌ها، روش نمونه‌گیری و آزمایش مقاومت فشاری	۱-۲-۵-۳
۹۹	..... آزمایش جذب آب حجمی	۲-۲-۵-۳

فصل چهارم: نتایج و تحلیل آنها

۱۰۰	..... مقدمه	۱-۴
۱۰۲	..... نتایج اندازه‌گیری دمای نیمه‌آدیاباتیک و روند تولید حرارت هیدراسیون و محاسبه میزان آن	۲-۴
۱۰۷	..... مقایسه منحنی تاریخچه دما و تولید حرارت هیدراسیون	۱-۲-۴
۱۱۴	..... نتایج تحلیل‌های نرم‌افزاری	۳-۴
۱۳۲	..... نتایج کسب مقاومت فشاری نمونه‌های با دمای بتن‌ریزی و عمل‌آوری متفاوت	۴-۴
۱۶۲	..... نتایج جذب آب حجمی	۵-۴

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای مطالعات آتی

۱۶۹	..... نتیجه‌گیری	۱-۵
۱۷۵	..... پیشنهاد برای مطالعات آینده	۲-۵

فهرست مراجع

۱۷۶	.....
۱۷۷	.....

فصل دوم

۴۶	جدول ۱-۲- انواع ترکها در مرحله انبساط و انقباض
۵۸	جدول ۲-۲- مشخصات طرحها
۵۹	جدول ۳-۲- مشخصات خودحرارتزایی نمونهها در شرایط آدیاباتیک
۶۷	جدول ۴-۲- مقاومت فشاری نمونهها
۶۷	جدول ۵-۲- مشخصات طرحها
۶۹	جدول ۶-۲- مقاومت فشاری نمونههای مختلف

فصل سوم

۷۷	جدول ۱-۳- مشخصات سیمان مصرفی در طرح مخلوطها
۷۸	جدول ۲-۳- مشخصات دوده سیلیسی استفاده شده در طرح مخلوطها
۷۸	جدول ۳-۳- مشخصات فیزیکی سنگدانهها
۷۹	جدول ۴-۳- دانهبندی شن بادامی
۷۹	جدول ۵-۳- دانهبندی شن نخودی
۷۹	جدول ۶-۳- دانهبندی ریزدانه (ماسه)
۸۱	جدول ۷-۳- مقدار اسلامپ پیشنهاد شده در بتن با و بدون فوق روان کننده
۸۲	جدول ۸-۳- تخمین اولیه آب مورد نیاز مخلوط و مقدار هوای محبوس در بتن
۸۴	جدول ۹-۳- مقادیر اجزای اختلاط بتن

فصل چهارم

۱۰۸	جدول ۱-۴- مشخصات منحنی دمای نیمه آدیاباتیک و حرارت هیدراسیون بتنهای با دمای اولیه سرد و گرم
۱۰۹	جدول ۲-۴- مشخصات منحنی دمای نیمه آدیاباتیک و حرارت هیدراسیون بتنهای با دمای اولیه معمولی
۱۱۵	جدول ۳-۴- نمونه‌ای از مشخصات ستونهای مدل شده
۱۱۹	جدول ۴-۴- پارامترهای بدست آمده از آنالیز ستونهای با ابعاد ۶۰ سانتی‌متر و با طرح مخلوطها، دمای بتن‌ریزی، دمای محیط و زمان ماندگاری قالب متفاوت
۱۲۰	جدول ۵-۴- پارامترهای بدست آمده از آنالیز ستونهای با ابعاد ۱۰۰ سانتی‌متر و با طرح مخلوطها، دمای بتن‌ریزی، دمای محیط و زمان ماندگاری قالب متفاوت
۱۲۱	جدول ۶-۴- پارامترهای بدست آمده از آنالیز ستونهای با ابعاد ۱۴۰ سانتی‌متر و با طرح مخلوطها، دمای بتن‌ریزی، دمای محیط و زمان ماندگاری قالب متفاوت
۱۲۲	جدول ۷-۴- پارامترهای بدست آمده از آنالیز ستونهای با ابعاد ۱۸۰ سانتی‌متر و با طرح مخلوطها، دمای بتن‌ریزی، دمای محیط و زمان ماندگاری قالب متفاوت

۱۳۴	جدول ۴-۸- مقاومت فشاری نمونه‌های بدون دوده سیلیسی و بتن‌ریزی در دمای سرد و با شرایط مختلف عمل‌آوری
۱۳۴	جدول ۴-۹- مقاومت فشاری نمونه‌های بدون دوده سیلیسی و بتن‌ریزی در دمای گرم و با شرایط مختلف عمل‌آوری
۱۳۴	جدول ۴-۱۰- مقاومت فشاری نمونه‌های بدون دوده سیلیسی و بتن‌ریزی در دمای معمولی و با شرایط مختلف عمل‌آوری
۱۳۹	جدول ۴-۱۱- مقاومت فشاری نمونه‌های با ۵٪ دوده سیلیسی و بتن‌ریزی در دمای سرد و با شرایط مختلف عمل‌آوری
۱۳۹	جدول ۴-۱۲- مقاومت فشاری نمونه‌های با ۵٪ دوده سیلیسی و بتن‌ریزی در دمای گرم و با شرایط مختلف عمل‌آوری
۱۳۹	جدول ۴-۱۳- مقاومت فشاری نمونه‌های با ۵٪ دوده سیلیسی و بتن‌ریزی در دمای معمولی و با شرایط مختلف عمل‌آوری
۱۴۴	جدول ۴-۱۴- مقاومت فشاری نمونه‌های با ۸٪ دوده سیلیسی و بتن‌ریزی در دمای سرد و با شرایط مختلف عمل‌آوری
۱۴۴	جدول ۴-۱۵- مقاومت فشاری نمونه‌های با ۸٪ دوده سیلیسی و بتن‌ریزی در دمای گرم و با شرایط مختلف عمل‌آوری
۱۴۴	جدول ۴-۱۶- مقاومت فشاری نمونه‌های با ۸٪ دوده سیلیسی و بتن‌ریزی در دمای معمولی و با شرایط مختلف عمل‌آوری
۱۴۹	جدول ۴-۱۷- مقاومت فشاری نمونه‌های با ۱۱٪ دوده سیلیسی و بتن‌ریزی در دمای سرد و با شرایط مختلف عمل‌آوری
۱۴۹	جدول ۴-۱۸- مقاومت فشاری نمونه‌های با ۱۱٪ دوده سیلیسی و بتن‌ریزی در دمای گرم و با شرایط مختلف عمل‌آوری
۱۴۹	جدول ۴-۱۹- مقاومت فشاری نمونه‌های با ۱۱٪ دوده سیلیسی و بتن‌ریزی در دمای معمولی و با شرایط مختلف عمل‌آوری

فصل اول

- شکل ۱-۱- پروفیل‌های دما، تنش و مدول الاستیسیته در یک سازه بتنی با قید خارجی ۸
- شکل ۲-۱- رشد دمای آدیباتیک بتن حجیم با سیمانهای مختلف ۱۲
- شکل ۳-۱- تأثیر لوله‌های خنک‌کننده بر دمای متوسط بتن ۱۵

فصل دوم

- شکل ۱-۲- مراحل تولید حرارت هیدراسیون سیمان در بتن ۳۲
- شکل ۲-۲- اثر نرمی سیمان بر آهنگ حرارتزایی سیمان ۳۵
- شکل ۳-۲- اثر ضخامت عضو بتنی بر دمای آن ۳۷
- شکل ۴-۲- اثر درصد‌های مختلف استفاده از کلاس C خاکستر بادی بر افزایش دمای آدیباتیک و نرخ آن در سیمان تیپ I ۴۰
- شکل ۵-۲- اثر درصد‌های مختلف استفاده از کلاس F خاکستر بادی بر افزایش دمای آدیباتیک و نرخ آن در سیمان تیپ I ۴۰
- شکل ۶-۲- اثر دمای عمل‌آوری بر هیدراسیون ۴۲
- شکل ۷-۲- اثر دمای بتن‌ریزی بر رشد دمای آدیباتیک بتن حجیم ۴۳
- شکل ۸-۲- تصویری شماتیک از قانون بلوغ *Saul* ۵۰
- شکل ۹-۲- اثر دما بر مقاومت اولیه و درازمدت بتن ۵۳
- شکل ۱۰-۲- مقدار و سینتیک حرارت تولید شده و مقاومت فشاری بتن B80 عمل‌آوری شده در شرایط آدیباتیک ۶۰
- شکل ۱۱-۲- مقاومت فشاری بتن B80 عمل‌آوری شده در شرایط هم‌دما و با دمای اولیه متفاوت در زمان واقعی و زمان معادل برای عمل‌آوری در دمای ۲۰ درجه ۶۰
- شکل ۱۲-۲- حرارت هیدراسیون و مقاومت فشاری بتن B80 عمل‌آوری شده در دمای آدیباتیک با زمان معادل عمل‌آوری در ۲۰ درجه ۶۱
- شکل ۱۳-۲- گرافهایی از تابع $f_c = f(Q)$ برای بتنهای B20 و B80 ۶۱
- شکل ۱۴-۲- مقادیر میانگین تابع $f_c = f(Q)$ برای بتنهای B20، B40 و B80 ۶۲
- شکل ۱۵-۲- درجه هیدراسیون بتن B80 در زمان معادل عمل‌آوری ۶۲
- شکل ۱۶-۲- درجه هیدراسیون سیمان در بتنهای B20 و B80 ۶۳
- شکل ۱۷-۲- نتایج مقاومت فشاری برای نمونه‌های ملات با نسبت آب به سیمان ۰/۵ ۶۴
- شکل ۱۸-۲- نتایج درجه هیدراسیون برای نمونه‌های ملات با نسبت آب به سیمان ۰/۵ ۶۴
- شکل ۱۹-۲- تاریخچه عمل‌آوری نمونه‌ها ۶۸
- شکل ۲۰-۲- یک نمونه از تاریخچه دمایی برای نمونه NC-40(0,1) ۶۹
- شکل ۲۱-۲- مقاومت نسبی بتنهای با دوره‌ای از عمل‌آوری در $40^{\circ}C$ نسبت به عمل‌آوری هم‌دمای $20^{\circ}C$ ۷۰

۷۰	شکل ۲۲-۲- مقاومت نسبی بتنهای با دوره‌ای از عمل‌آوری در $5^{\circ}C$ نسبت به عمل‌آوری هم‌دمای $20^{\circ}C$
۷۰	شکل ۲۳-۲- مقاومت نسبی بتنهای با عمل‌آوری هم‌دمای $5^{\circ}C$ و $40^{\circ}C$ نسبت به عمل‌آوری هم‌دمای $20^{\circ}C$

فصل سوم

۷۳	تصویر ۳-۱- پیش‌گرمایش مصالح با قرار دادن آنها در آون
۷۵	تصویر ۳-۲- اندازه‌گیری دمای مصالح پیش از اختلاط و دمای بتن تازه
۷۶	شکل ۳-۱- نمودار جریان تحقیق و مسیر مطالعات و برنامه‌ریزی آزمایش‌ها
۸۰	شکل ۳-۲- منحنی دانه‌بندی شن بادامی
۸۰	شکل ۳-۳- منحنی دانه‌بندی شن نخودی
۸۰	شکل ۳-۴- منحنی دانه‌بندی ماسه
۸۷	تصویر ۳-۳- محفظه نیمه‌آدیباتیک (<i>Hay Box</i>)، نمونه بتنی و ترموکوپل‌های فرو رفته در بتن
۹۳	شکل ۳-۵- شرایط تکیه‌گاهی ستون‌های مدل شده
۹۵	شکل ۳-۶- محفظه طراحی شده جهت اعمال شرایط رژیم حرارتی به نمونه‌های بتنی
۹۶	شکل ۳-۷- نحوه مدل‌سازی هسته و سطوح بتن حجیم و سن انجام آزمایش‌ها
۹۷	تصویر ۳-۴- نمونه‌گیری مقاومتی در قالب‌های ۱۰ سانتی‌متری
۹۷	تصویر ۳-۵- قرار دادن نمونه‌ها در محفظه (<i>TMCC</i>)، جهت اعمال شرایط عمل‌آوری تحت رژیم حرارتی هیدراسیون
۹۸	تصویر ۳-۶- قرارگیری نمونه‌ها در شرایط عایق رطوبتی (پلاستیک) و در هوای آزاد، پس از بیرون آوردن از <i>TMCC</i>

فصل چهارم

۱۰۳	شکل ۴-۱- منحنی‌های تاریخچه دمای نیمه‌آدیباتیک و حرارت بتن <i>C-SF(0%)</i>
۱۰۳	شکل ۴-۲- منحنی‌های تاریخچه دمای نیمه‌آدیباتیک و حرارت بتن <i>C-SF(5%)</i>
۱۰۳	شکل ۴-۳- منحنی‌های تاریخچه دمای نیمه‌آدیباتیک و حرارت بتن <i>C-SF(8%)</i>
۱۰۴	شکل ۴-۴- منحنی‌های تاریخچه دمای نیمه‌آدیباتیک و حرارت بتن <i>C-SF(11%)</i>
۱۰۴	شکل ۴-۵- منحنی‌های تاریخچه دمای نیمه‌آدیباتیک و حرارت بتن <i>H-SF(0%)</i>
۱۰۴	شکل ۴-۶- منحنی‌های تاریخچه دمای نیمه‌آدیباتیک و حرارت بتن <i>H-SF(5%)</i>
۱۰۵	شکل ۴-۷- منحنی‌های تاریخچه دمای نیمه‌آدیباتیک و حرارت بتن <i>H-SF(8%)</i>
۱۰۵	شکل ۴-۸- منحنی‌های تاریخچه دمای نیمه‌آدیباتیک و حرارت بتن <i>H-SF(11%)</i>
۱۰۵	شکل ۴-۹- منحنی‌های تاریخچه دمای نیمه‌آدیباتیک و حرارت بتن <i>M-SF(0%)</i>
۱۰۶	شکل ۴-۱۰- منحنی‌های تاریخچه دمای نیمه‌آدیباتیک و حرارت بتن <i>M-SF(5%)</i>
۱۰۶	شکل ۴-۱۱- منحنی‌های تاریخچه دمای نیمه‌آدیباتیک و حرارت بتن <i>M-SF(8%)</i>
۱۰۶	شکل ۴-۱۲- منحنی‌های تاریخچه دمای نیمه‌آدیباتیک و حرارت بتن <i>M-SF(11%)</i>

- شکل ۴-۱۳- منحنی‌های تاریخچه دمای نیمه‌آدیباتیک برای بتن‌های با دمای بتن‌ریزی سرد و گرم ۱۱۰
- شکل ۴-۱۴- رژیم دمای هسته و سطح ستون S5-C-100-48 ۱۱۶
- شکل ۴-۱۵- منحنی‌های هم‌دما در مقطع ستون S5-C-100-48 در لحظه وقوع حداکثر دما ۱۱۶
- شکل ۴-۱۶- منحنی حداکثر تنش کششی و فشاری در ستون S5-C-100-48 ناشی از گرادیان حرارتی .. ۱۱۷
- شکل ۴-۱۷- منحنی حداکثر و حداقل ریسک ترک‌خوردگی در مقطع ستون S5-C-100-48 ناشی از گرادیان حرارتی ۱۱۸
- شکل ۴-۱۸- منحنی‌های هم‌تنش در مقطع ستون S5-C-100-48 در لحظه وقوع حداکثر ریسک ترک‌خوردگی ۱۱۸
- شکل ۴-۱۹- منحنی‌های هم‌ریسک در مقطع ستون S5-C-100-48 در لحظه وقوع حداکثر ریسک ترک‌خوردگی ۱۱۸
- شکل ۴-۲۰- ریسک ترک‌خوردگی و ماکزیمم دمای ستون‌های بتن‌ریزی شده بدون دوده سیلیسی در دمای سرد با ابعاد مختلف و زمان ماندگاری قالب متفاوت ۱۲۵
- شکل ۴-۲۱- ریسک ترک‌خوردگی و ماکزیمم دمای ستون‌های بتن‌ریزی شده بدون دوده سیلیسی در دمای معمولی با ابعاد مختلف و زمان ماندگاری قالب متفاوت ۱۲۵
- شکل ۴-۲۲- ریسک ترک‌خوردگی و ماکزیمم دمای ستون‌های بتن‌ریزی شده بدون دوده سیلیسی در دمای گرم با ابعاد مختلف و زمان ماندگاری قالب متفاوت ۱۲۵
- شکل ۴-۲۳- ریسک ترک‌خوردگی و ماکزیمم دمای ستون‌های بتن‌ریزی شده با ۵٪ دوده سیلیسی در دمای سرد با ابعاد مختلف و زمان ماندگاری قالب متفاوت ۱۲۶
- شکل ۴-۲۴- ریسک ترک‌خوردگی و ماکزیمم دمای ستون‌های بتن‌ریزی شده با ۵٪ دوده سیلیسی در دمای معمولی با ابعاد مختلف و زمان ماندگاری قالب متفاوت ۱۲۶
- شکل ۴-۲۵- ریسک ترک‌خوردگی و ماکزیمم دمای ستون‌های بتن‌ریزی شده با ۵٪ دوده سیلیسی در دمای گرم با ابعاد مختلف و زمان ماندگاری قالب متفاوت ۱۲۶
- شکل ۴-۲۶- ریسک ترک‌خوردگی و ماکزیمم دمای ستون‌های بتن‌ریزی شده با ۸٪ دوده سیلیسی در دمای سرد با ابعاد مختلف و زمان ماندگاری قالب متفاوت ۱۲۷
- شکل ۴-۲۷- ریسک ترک‌خوردگی و ماکزیمم دمای ستون‌های بتن‌ریزی شده با ۸٪ دوده سیلیسی در دمای معمولی با ابعاد مختلف و زمان ماندگاری قالب متفاوت ۱۲۷
- شکل ۴-۲۸- ریسک ترک‌خوردگی و ماکزیمم دمای ستون‌های بتن‌ریزی شده با ۸٪ دوده سیلیسی در دمای گرم با ابعاد مختلف و زمان ماندگاری قالب متفاوت ۱۲۷
- شکل ۴-۲۹- ریسک ترک‌خوردگی و ماکزیمم دمای ستون‌های بتن‌ریزی شده با ۱۱٪ دوده سیلیسی در دمای سرد با ابعاد مختلف و زمان ماندگاری قالب متفاوت ۱۲۸
- شکل ۴-۳۰- ریسک ترک‌خوردگی و ماکزیمم دمای ستون‌های بتن‌ریزی شده با ۱۱٪ دوده سیلیسی در دمای معمولی با ابعاد مختلف و زمان ماندگاری قالب متفاوت ۱۲۸
- شکل ۴-۳۱- ریسک ترک‌خوردگی و ماکزیمم دمای ستون‌های بتن‌ریزی شده با ۱۱٪ دوده سیلیسی در دمای گرم با ابعاد مختلف و زمان ماندگاری قالب متفاوت ۱۲۸
- شکل ۴-۳۲- محل نمونه‌های بتنی مدل شده از ستون حجیم ۱۳۳
- شکل ۴-۳۳- منحنی‌های مقاومت فشاری نمونه‌های بدون دوده سیلیسی بتن‌ریزی شده در دمای سرد و نمودار میله‌ای مقاومت فشاری نمونه‌ها در روز ۲۸ و ۹۱ با عمل‌آوری متفاوت ۱۳۵

- شکل ۴-۵۲- منحنی‌های مقاومت فشاری نمونه‌های با ۱۱٪ دوده سیلیسی بتن‌ریزی شده در دمای گرم و نمودار میله‌ای مقاومت فشاری نمونه‌ها در روز ۲۸ و ۹۱ با عمل‌آوری متفاوت ۱۵۰
- شکل ۴-۵۳- منحنی‌های مقاومت فشاری نمونه‌های با ۱۱٪ دوده سیلیسی بتن‌ریزی شده در دمای معمولی و نمودار میله‌ای مقاومت فشاری نمونه‌ها در روز ۲۸ و ۹۱ با عمل‌آوری متفاوت ۱۵۰
- شکل ۴-۵۴- نمودار میله‌ای مقاومت فشاری بتن‌های با ۱۱٪ دوده سیلیسی با عمل‌آوری در شرایط استاندارد و بتن‌ریزی در ۳ دمای متفاوت ۱۵۳
- شکل ۴-۵۵- نمودار میله‌ای مقاومت فشاری بتن‌های با ۱۱٪ دوده سیلیسی با عمل‌آوری در شرایط *TMCC* و بتن‌ریزی در ۳ دمای متفاوت ۱۵۳
- شکل ۴-۵۶- نمودار میله‌ای نسبت مقاومت فشاری در شرایط *TMCC* به استاندارد در بتن‌های با ۱۱٪ دوده سیلیسی و با ۳ دمای بتن‌ریزی متفاوت ۱۵۳
- شکل ۴-۵۷- مقاومت فشاری نمونه‌های با ۰، ۵، ۸ و ۱۱ درصد دوده سیلیسی بتن‌ریزی شده در دمای سرد و با عمل‌آوری در شرایط *TMCC* ۱۵۷
- شکل ۴-۵۸- مقاومت فشاری نمونه‌های با ۰، ۵، ۸ و ۱۱ درصد دوده سیلیسی بتن‌ریزی شده در دمای معمولی و با عمل‌آوری در شرایط *TMCC* ۱۵۷
- شکل ۴-۵۹- مقاومت فشاری نمونه‌های با ۰، ۵، ۸ و ۱۱ درصد دوده سیلیسی بتن‌ریزی شده در دمای گرم و با عمل‌آوری در شرایط *TMCC* ۱۵۷
- شکل ۴-۶۰- مقاومت فشاری نمونه‌های با ۰، ۵، ۸ و ۱۱ درصد دوده سیلیسی بتن‌ریزی شده در دمای سرد و با عمل‌آوری در شرایط استاندارد ۱۵۸
- شکل ۴-۶۱- مقاومت فشاری نمونه‌های با ۰، ۵، ۸ و ۱۱ درصد دوده سیلیسی بتن‌ریزی شده در دمای معمولی و با عمل‌آوری در شرایط استاندارد ۱۵۸
- شکل ۴-۶۲- مقاومت فشاری نمونه‌های با ۰، ۵، ۸ و ۱۱ درصد دوده سیلیسی بتن‌ریزی شده در دمای گرم و با عمل‌آوری در شرایط استاندارد ۱۵۸
- شکل ۴-۶۳- منحنی‌های مقاومت فشاری بر حسب بلوغ نمونه‌های بتن‌ریزی شده در دمای سرد ۱۶۰
- شکل ۴-۶۴- منحنی‌های مقاومت فشاری بر حسب بلوغ نمونه‌های بتن‌ریزی شده در دمای معمولی ۱۶۱
- شکل ۴-۶۵- منحنی‌های مقاومت فشاری بر حسب بلوغ نمونه‌های بتن‌ریزی شده در دمای گرم ۱۶۱
- شکل ۴-۶۶- آهنگ جذب آب نمونه‌های بتن‌ریزی شده در دمای سرد و با عمل‌آوری متفاوت ۱۶۳
- شکل ۴-۶۷- آهنگ جذب آب نمونه‌های بتن‌ریزی شده در دمای گرم و با عمل‌آوری متفاوت ۱۶۴
- شکل ۴-۶۸- آهنگ جذب آب نمونه‌های بتن‌ریزی شده در دمای معمولی و با عمل‌آوری متفاوت ۱۶۵
- شکل ۴-۶۹- نمودار میله‌ای جذب آب نمونه‌های با دمای بتن‌ریزی متفاوت و درصدهای مختلف دوده سیلیسی، نگهداری شده در شرایط استاندارد پس از ۰/۵ ساعت ۱۶۶
- شکل ۴-۷۰- نمودار میله‌ای جذب آب نمونه‌های با دمای بتن‌ریزی متفاوت و درصدهای مختلف دوده سیلیسی، نگهداری شده در شرایط استاندارد پس از ۷ روز ۱۶۷
- شکل ۴-۷۱- نمودار میله‌ای جذب آب نمونه‌های با دمای بتن‌ریزی متفاوت و درصدهای مختلف دوده سیلیسی، نگهداری شده در شرایط *TMCC* پس از ۰/۵ ساعت ۱۶۸
- شکل ۴-۷۲- نمودار میله‌ای جذب آب نمونه‌های با دمای بتن‌ریزی متفاوت و درصدهای مختلف دوده سیلیسی، نگهداری شده در شرایط *TMCC* پس از ۷ روز ۱۶۸

مقدمه

مطابق با تعریف کمیته *ACI 116* بتن حجیم^۱ هر حجمی از بتن با ابعادی است که به اندازه‌های بزرگ باشند که نیاز به اعمال تمهیداتی برای مقابله با تولید گرمای ناشی از هیدراسیون^۲ سیمان و تغییر حجم برای به حداقل رساندن ترک خوردگی داشته باشد [۸]. البته بایستی توجه داشت که در سازه‌های با ابعاد متوسط نیز در شرایط خاص نظیر زیاد بودن مقدار مواد سیمانی بتن و یا شرایط گیرداری شدید امکان وقوع ترکهای حرارتی وجود داشته و در تعریف بتن حجیم می‌گنجد [۳].

1. Mass Concrete

2: Hydration

در آئین‌نامه بتن ایران (آبا) نیز عنوان شده است که؛ در صورتیکه کوچکترین بعد بتنی که در یک نوبت ریخته می‌شود، از ۶۰۰ میلیمتر بیشتر باشد، بویژه هنگامی که عیار سیمان در بتن ۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب یا بیشتر باشد، باید تدابیری اتخاذ کرد تا گرمای آبگیری سیمان آهسته‌تر آزاد شود [۲].

ضرورت کنترل دما در بتن حجیم

همه بتن‌ها به علت فرآیند هیدراسیون مواد سیمانی، حرارت تولید می‌کنند. بیشتر این تولید حرارت در روزهای اول پس از بتن‌ریزی رخ می‌دهد. برای اعضای بتنی کم ضخامت نظیر روسازی راه‌ها اتلاف حرارت تقریباً بلافاصله پس از تولید شدن رخ می‌دهد. برای مقاطع بتنی ضخیم (بتن حجیم) اتلاف حرارت بسیار آهسته‌تر از تولید آن صورت می‌گیرد و در نتیجه بتن حجیم می‌تواند بسیار گرم شود. کنترل این دما جهت جلوگیری از آسیب ضروری می‌باشد [۳۳]. افزایش دمای داخلی بتن با افزایش پتانسیل ترک‌خوردگی حرارتی^۱ همراه است که می‌تواند سبب کاهش دوام و مقاومت نهایی بتن شود [۳۲].

به علت ضریب پخش حرارتی کم بتن، با افزایش دمای ناشی از فرآیند هیدراسیون مواد سیمانی، انبساط حرارتی یکسانی در سرتاسر بتن رخ نمی‌دهد و به دلیل وجود قیدهای داخلی و خارجی و ممانعت این قیود از تغییر حجم‌های حرارتی، در نهایت ترک‌خوردگی حرارتی رخ خواهد داد. در بتن حجیم با مقاومت زیاد^۲ با افزایش مقدار مصرف سیمان، دمای آدیباتیک^۳ بتن افزایش می‌یابد و در نتیجه ترک‌خوردگی حرارتی و کاهش مقاومت دراز مدت بتن افزایش می‌یابد [۶۰].

-
1. Thermal Cracking
 2. High Strength-Mass Concrete
 3. Adiabatic Temperature

تأثیر دمای عمل آوری بر هیدراسیون و مقاومت بتن

بطور کلی بتنهای حجیم تحت اثر رژیم حرارتی ناشی از هیدراسیون مواد سیمانی در داخل بتن و اتلاف کند آن عمل آوری می‌شوند و عموماً به علت آنکه دمای هسته داخلی بتن حجیم بسیار بالا می‌رود اثراتی که این افزایش دما بر خواص مقاومتی بتن حجیم می‌گذارد مشابه تأثیراتی است که عمل آوری در دمای بالا بر بتن‌ها می‌گذارد.

افزایش دمای عمل آوری باعث تسریع واکنشهای شیمیایی هیدراسیون می‌گردد و اثرات مفیدی بر مقاومت اولیه خواهد داشت. اگرچه دمای بالای بتن‌ریزی مقاومت اولیه را افزایش می‌دهد، امکان دارد به نحو نامطلوبی بر مقاومت از هفت روز به بعد تأثیر بگذارد و توجه این موضوع آن است که به نظر می‌رسد هیدراسیون سریع اولیه، محصولاتی با ساختمان فیزیکی ضعیف‌تر و احتمالاً تخلخل بیشتر تشکیل بدهد، به‌طوری‌که همیشه نسبتی از منافذ خالی باقی می‌مانند [۷].

عوامل بسیاری بر روند حرارت‌زائی مواد سیمانی در بتنهای حجیم مؤثر می‌باشند که از جمله آنها می‌توان به دمای اولیه یا دمای بتن‌ریزی اشاره نمود. بنابراین دمای بتن‌ریزی بر خواص مقاومتی بتن تأثیر گذار می‌باشد.

برخی از آزمایشهای کارگاهی تأثیر دمای بتن‌ریزی بر مقاومت را مور تأیید قرار داده‌اند؛ بطور نمونه به ازای افزایش ۵ درجه سلسیوس، مقاومت به میزان $1/9 \text{ MPa}$ کاهش می‌یابد [۲۷].

در تحقیق پیش‌رو با تغییر دمای بتن‌ریزی سعی شده است اثراتی که این تغییر بر روند رژیم حرارتی هیدراسیون مواد سیمانی و نیز خواص مقاومتی بتن حجیم می‌گذارد بررسی شود. بدین صورت که نمونه‌هایی با دمای بتن‌ریزی متفاوت ساخته شده و روند حرارت‌زایی آنها در شرایط مشابه بتن حجیم اندازه‌گیری شده و با مدل‌سازی حرارتی در آزمایشگاه نمونه‌های بتنی تحت همان رژیم حرارتی عمل آوری شده‌اند و در سنین مختلف مقاومت فشاری آنها و نیز مقاومت فشاری نمونه‌های با عمل آوری استاندارد مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر جهت ارزیابی تأثیر رژیم‌های حرارتی متفاوتی که دماهای بتن‌ریزی متفاوت بر ساختار منافذ داخلی بتن حجیم اعمال می‌کنند، آزمایش