بسم الله الرحمن الرحيم
الحمد لله رب العالمين الرحمن الرحيم مالك يوم الدين
اهدنا الصراط المستقيم صراط الذين أنعمت عليهم غير المغضوب عليهم ولا الضالين

۱۱۲۴۲

دانشگاه بوعلی سینا

دانشکدهٔ مهندسی

گروه عمران

پایان نامه

جهت دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد در رشتهٔ مهندسی عمران

گرایش سازه

عنوان:

مطالعه آزمایشگاهی اثر گرادیان حرارتی بر ریسک ترک‌خوردگی بتن‌های حجیم توانمند

استاد راهنما:

دکتر محمود نیلی

پژوهشگر:

امیرمسعود صالحی

۱۳۸۸/۵/۱۲

مرکز اطلاعات و مدارک علمی

بهار ۱۳۸۷

۱۱۶۲۳۲

دانشگاه بوعلی سینا

دانشکده مهندسی

بسمه تعالی

تاریخ

شماره

پیوست

گواهی تصویب پایان نامه

موضوع پایان نامه: مطالعه آزمایشگاهی اثر بارهای جزری بر مدل یک خورگی بتن های حجیم توانمند

بدینوسیله گواهی می شود جلسه دفاعیه پایان نامه خانم / آقای: امیر مسعود صالحی

رشته: مهندسی عمران - سازه ورودی: ۸۴ نیمسال انتخابی: ۸۷۲

در روز: شنبه مورخ: ۸۷/۳/۱۱ ساعت: ۹/۵ تحت سرپرستی:

۱- استاد راهنما: جناب آقای / سرکار خانم: دکتر محمود ملی

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

در محل دانشکده مهندسی برگزار گردید که پس از بررسی از طرف نامبردگان پایان نامه فوق با نمره ۱۹/۱ و درجه عالی در تاریخ ۸۷/۳/۱۱ به تصویب رسید.

نام و نام خانوادگی و امضاء استاد راهنما: دکتر ملی

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

نام و نام خانوادگی و امضاء اساتید مدعو: ۱- دکتر طاهری

۲- .....

۳- دکتر تدین

نام و نام خانوادگی و امضاء ناظر تحصیلات تکمیلی: دکتر بهفن

نام و نام خانوادگی مدیر گروه یا نماینده و امضاء: دکتر بهفن

مدیر گروه مهندسی: عمران

نام و نام خانوادگی و امضاء: دکتر رضایی

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، کنفراس‌ها و یا سخنرانی‌ها، 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 پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

تقدیم به

پدر و مادر مهربان

و جانان عزیزم

تقدیر و تشکر

- خداوند متعال را شاکرم که مرا کمک کرد تا دوره کارشناسی ارشد را با موفقیت پشت سر بگذارم.
- از پدر، مادر و برادر عزیزم که در همه مراحل زندگی یار و یاور من بوده‌اند، کمال تشکر را دارم و امیدوارم با پیشرفت در زمینه‌های مختلف گوشه‌ای از زحمات بی‌پایان آنها را جبران کنم.
- از استاد مهربانم، جناب آقای دکتر محمود نیلی که در دوره کارشناسی ارشد و بویژه در انجام پایان نامه شرایط مناسبی برای من مهیا نمودند، سپاسگزارم.
- از اساتید محترم، آقایان دکتر فریدون رضایی و محسن تدین کمال تشکر را دارم.
- با تشکر از دوستان خوبم آقایان مهدی سلیمانی راد، احمد معظمی گودرزی، مجتبی جعفرزاده، پیمان خادمی، ایمان چوبچیان و سعید هادی پور.

نام خانوادگی پژوهشگر: صالحی **نام:** امیرمسعود

عنوان پایان‌نامه: مطالعه آزمایشگاهی اثر گرادیان حرارتی بر ریسک ترک‌خوردگی بتن‌های حجیم توانمند

تعداد صفحه: ۲۰۷

استاد راهنما: دکتر محمود نیلی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی عمران **گرایش:** سازه

دانشگاه: بوعلی سینا **دانشکده:** مهندسی

کلید واژه‌ها: بتن حجیم با مقاومت زیاد، ترک‌خوردگی حرارتی در سنین اولیه، کاهش مقاومت دراز مدت، مواد پوزولانی

چکیده:

ساخت سازه‌های بتن مسلح حجیم با مقاومت اولیه و نهایی زیاد رو به گسترش است. این نوع سازه‌ها معمولاً دارای سیمان مصرفی زیادی هستند، لذا افزایش دما ناشی از هیدراسیون باعث بروز تنش‌های حرارتی قابل‌توجهی می‌شود. طراحان این‌گونه سازه‌ها بدلیل پیچیدگی شرایط دمای نگهداری، اطلاعات کافی از روند کسب مقاومت هسته و سطوح این سازه‌ها ندارند، لذا قادر به پیش‌بینی رفتار واقعی سازه‌ها از حیث سرویس‌دهی و بروز ترک‌ها و حتی باربری آن نمی‌باشند. در این پایان‌نامه سعی گردیده است سازه‌های بتنی حجیم مقاومت زیاد با و یا بدون پوزولان از دو جنبه مورد ارزیابی قرار گیرد. در مرحله اول تاریخچه دمایی بتن‌های مختلف تعیین گردید و براساس آن و مقاومت فشاری استاندارد، مشخصه‌های دمایی و ریسک ترک‌خوردگی با استفاده از نرم‌افزار مبتنی بر المان محدود محاسبه گردید. از سوی دیگر رژیم حرارتی بعنوان یک مدل نگهداری به نمونه‌های بتنی در داخل محفظه‌ای اعمال گردیده است. نمونه‌ها پس از ۲۴، ۴۸ و ۱۲۰ ساعت از داخل محفظه خارج گردیده‌اند تا بدین طریق مقاومت بتن در سطوح و هسته سازه، شبیه‌سازی گردند.

نتایج حاصل، حاکی از آن است که پوزولان طبیعی و خاکستر بادی باعث کاهش دمای هسته می‌گردد و جایگزینی سیلیکافیوم تأثیر جدی بر این پارامتر ندارد. بطور کلی ریسک ترک‌خوردگی با جایگزینی خاکستر بادی، پوزولان طبیعی و سیلیکافیوم، بجای سیمان کاهش می‌یابد. مقاومت فشاری سطح بتن در همه نمونه‌ها به استثناء نمونه‌های حاوی سیلیکافیوم، نسبت به شرایط استاندارد کاهش نشان می‌دهد. این مسأله پتانسیل ترک‌خوردگی را در سطح افزایش می‌دهد. درصد جذب آب بتن در هسته به‌علت شرایط دمایی ویژه، بیشتر از حالت استاندارد می‌باشد. جایگزینی مواد پوزولانی به‌طور کلی باعث بهبود ساختار داخلی نمونه‌ها گردیده است.

عنوان | فهرست مطالب | صفحه

مقدمه ۱

فصل اول: کلیات و خصوصیات بتن حجیم با مقاومت زیاد

۱-۱- مقدمه ۶
۱-۲- انواع بتن از نقطه‌نظر مقاومت و کاربرد ۷
۱-۲-۱- دلایل ایجاد تمایز میان بتن معمولی و بتن با مقاومت زیاد ۸
۱-۲-۲- بتن با مقاومت زیاد یا بتن توانمند ۸
۱-۳- مصالح مصرفی در بتن حجیم با مقاومت زیاد ۱۰
۱-۳-۱- سیمان ۱۰
۱-۳-۲- سنگدانه‌ها ۱۰
۱-۳-۳- آب ۱۴
۱-۳-۴- افزودنی‌های شیمیایی و حبابزاها ۱۴
۱-۳-۵- کاربرد پوزولان‌ها در بتن حجیم با مقاومت زیاد ۱۶
۱-۴- نسبت‌های اختلاط ۱۹
۱-۴-۱- نسبت آب به سیمان (آب به مواد سیمانی) ۱۹
۱-۴-۲- مصالح سیمانی مصرفی (عیار سیمان) ۲۰
۱-۴-۳- نسبت سنگدانه‌های درشت به ریز ۲۲
۱-۵- خواص بتن ۲۲
۱-۵-۱- تغییر حجم ۲۲
۱-۵-۲- خزش ۲۴
۱-۶- درجه گیرداری (قید) ۲۴
۱-۷- انواع تغییر شکل‌های بتن و میزان اهمیت آنها ۲۸

فصل دوم:ترک خوردگی حرارتی مقاطع حجیم و کاهش مقاومت بتن در دراز مدت

۲-۱- مقدمه ۳۰
۲-۲- هیدراسیون سیمان ۳۱
۲-۲-۱- واکنشهای هیدراسیون سیمان ۳۱
۲-۳- حرارت هیدراسیون ۳۲
۲-۴- عوامل اثرگذار بر حرارت هیدراسیون ۳۴
۲-۴-۱- نوع سیمان ۳۴
۲-۴-۲- نسبت آب به سیمان ۳۷
۲-۴-۳- دمای بتن‌ریزی (دمای اولیه) و دمای عمل‌آوری (دمای محیط) ۳۷
۲-۴-۴- مواد سیمانی جایگزین ۳۸
۲-۴-۵- افزودنی شیمیایی ۴۱

۲-۵- حرارت هیدراسیون کل ۴۲
۲-۶- روش‌های معمول تعیین حرارت هیدراسیون ۴۳
۲-۶-۱- کالریمتر آدیاباتیک ۴۳
۲-۶-۲- کالریمتر نیمه آدیاباتیک ۴۴
۲-۶-۳- مقایسه روش‌های کالریمترآدیاباتیک و نیمه آدیاباتیک ۴۴
۲-۶-۴- کالرمیتر هم‌دما ۴۵
۲-۶-۵- کالرمیتر محلول ۴۵
۲-۷- مدلسازی مقاطع بتنی تحت تنش‌های حرارتی ۴۶
۲-۷-۱- خواص بتن ۴۷
۲-۷-۲- شرایط مرزی و تأثیر محیط ۵۲
۲-۷-۳- آنالیز حرارتی ۵۵
۲-۷-۴- تعیین پتانسیل ترک‌خوردگی ۵۶
۲-۸- روش‌های کنترل ترک خوردگی ۵۹
۲-۹- کاهش مقاومت دراز مدت بتن ۶۰
۲-۹-۱- عوامل کاهش مقاومت دراز مدت بتن تحت عمل‌آوری با دمای بالا ۶۰
۲-۹-۲- چند فاکتور مهم در عمل‌آوری بتن در دمای بالا ۶۵
۲-۱۰- مروری بر تحقیقات انجام شده ۷۱

فصل سوم: مصالح مصرفی و طراحی آزمایش‌ها

۳-۱- مقدمه ۸۱
۳-۲- مشخصات مصالح مصرفی ۸۴
۳-۲-۱- سنگدانه‌ها ۸۴
۳-۲-۲-مواد سیمانی ۸۷
۳-۲-۳- فوق روان کننده ۹۰
۳-۳- طراحی طرح اختلاط مواد و مصالح ۹۰
۳-۳-۱- نسبت آب به سیمان ۹۰
۳-۳-۲- میزان سیمان مصرفی ۹۰
۳-۳-۳- نسبت سنگدانه‌ها ۹۱
۳-۳-۴- نسبت‌های اختلاط و مقادیر هر پیمانه ۹۲
۳-۳-۵- نحوه اختلاط مواد و مصالح بکار رفته ۹۳
۳-۴- نمونه‌گیری از بتن تازه و طراحی آزمایشات ۹۵
۳-۴-۱- نمونه‌گیری حرارتی، اندازه‌گیری میزان حرارت تولید شده ناشی از هیدراسیون و تعیین تنش‌های حرارتی ۹۵
۳-۴-۱-۱- محفظه نیمه آدیاباتیک، دستگاه ثبات و نرم‌افزار مربوطه ۹۵
۳-۴-۱-۲- نرم افزار *4C-Heat* ۹۸

۳-۴-۱-۳- نرم افزار *4C-Temp&Stress* ۱۰۲

۳-۴-۲- نمونه‌گیری مقاومتی به‌منظور مطالعه تأثیر عمل‌آوری تحت رژیم حرارتی هیدراسیون *(Temperature Matched Curing)* بر خواص بتن سخت‌شده در مقایسه با نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد ۱۰۹

۳-۴-۲-۱- آماده‌سازی قالب‌ها، نحوه نمونه‌گیری و آزمایش مقاومت فشاری ۱۱۱

۳-۴-۲-۲- آزمایش جذب آب حجمی ۱۱۴

فصل چهارم: نتایج و تحلیل آنها

۴-۱- مقدمه ۱۱۶

۴-۲- نتایج اندازه‌گیری دمای نیمه‌آدیاباتیک و محاسبه میزان تولید حرارت هیدراسیون ۱۱۸

۴-۲-۱- مقایسه پارامترهای منحنی تاریخچه دما و تولید حرارت هیدراسیون ۱۲۳

۴-۳- نتایج تحلیل‌های نرم‌افزاری ۱۳۱

۴-۴- نتایج کسب مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط مختلف ۱۵۴

۴-۵- نتایج جذب آب حجمی ۱۸۹

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

۵-۱- نتایج کلی ۱۹۵

۵-۲- پیشنهاد برای مطالعات بعدی ۲۰۰

فهرست مراجع ۲۰۲

عنوان | **فهرست جداول** | صفحه

فصل اول: کلیات و خصوصیات بتن حجیم با مقاومت زیاد

جدول ۱-۱- طبقه بندی بتن از نظر مقاومت ۷

جدول ۱-۲- درصدهای جایگزینی فلای‌اش پیشنهاد شده *ACI 211.4R-93* ۱۷

جدول ۱-۳- مقاومت فشاری خمیر سیمان با و بدون سیلیکافیوم ۱۸

جدول ۱-۴- مقاومت فشاری خمیر سیمان با و بدون سیلیکافیوم ۱۸

۲۹

فصل دوم:ترک خوردگی حرارتی مقاطع حجیم و کاهش مقاومت بتن در دراز مدت

جدول ۲-۱-هدایت حرارتی موادی که در قالب‌بندی و یا تکیه‌گاه سازه بتنی بکار می‌روند ۵۳

جدول ۲-۲- ضریب هدایت حرارتی بعضی از پوشش‌های سطحی معمول و قالب‌ها ۵۵

جدول ۲-۳- مقایسه تنش‌های حرارتی محاسبه شده با مقاومت کششی (مدول گسیختگی) ۷۴

جدول ۲-۴- مقاومت فشاری مغزه‌ها در مقابل مقاومت استوانه‌ها ۷۵

جدول ۲-۵- مشخصات طرح‌ها و نحوه انجام آزمایش ۷۸

جدول ۲-۶- مقاومت فشاری بتن های عمل‌آوری شده در دماهای مختلف و ذخیره شده در اتاق رطوبت تا زمان آزمایش ۸۰

جدول ۲-۷- تغییر در مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت عمل‌آوری حرارتی بر حسب درصدی از مقاومت نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد ۸۰

فصل سوم: مصالح مصرفی و طراحی آزمایش‌ها

جدول ۳-۱- دانه‌بندی شن بادامی ۸۴

جدول ۳-۲- دانه‌بندی شن نخودی ۸۵

جدول ۳-۳- دانه بندی بخش ریزدانه (ماسه) ۸۶

جدول ۳-۴- مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های ریز و درشت ۸۷

جدول ۳-۵- مشخصات سیمان استفاده شده در طرح های اختلاط ۸۸

جدول ۳-۶- مشخصات پوزولان طبیعی استفاده شده در طرح اختلاط ۸۸

جدول ۳-۷- مشخصات سیلیکافیوم استفاده شده در طرح اختلاط ۸۹

جدول ۳-۸- مشخصات فلای‌اش استفاده شده در طرح اختلاط ۸۹

جدول ۳-۹- مقدار اسلامپ پیشنهاد شده در بتن بدون کاربرد فوق‌روان‌کننده و با کاربرد آن ۹۰

جدول ۳-۱۰- تخمین اولیه آب مورد نیاز مخلوط و مقدار هوای محبوس در بتن ۹۱

جدول ۳-۱۱- مقادیر اجزای اختلاط بتن ۹۴

فصل چهارم: نتایج و تحلیل آنها

جدول ۴-۱- مشخصات منحنی دمای نیمه آدیاباتیک و حرارت هیدراسیون بتن‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۶ ..... ۱۲۴

جدول ۴-۲- مشخصات منحنی دمای نیمه آدیاباتیک و حرارت هیدراسیون بتن‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۳ ..... ۱۲۵
جدول ۴-۳- مشخصات ستون‌های مدل‌شده ۱۳۲
جدول ۴-۴- پارامترهای بدست آمده از ستون‌های مدل شده با بتن ۵۰ جهت بررسی اثر پوزولان‌ها (فلای‌اش و پوزولان طبیعی) بر روی ریسک ترک‌خوردگی ۱۳۶
جدول ۴-۵- پارامترهای بدست آمده از ستون‌های مدل شده با بتن ۸۰ جهت بررسی اثر پوزولان‌ها (فلای‌اش، پوزولان طبیعی و سیلیکافیوم) بر روی ریسک ترک‌خوردگی ۱۳۶
جدول ۴-۶- پارامترهای بدست آمده از ستون‌های مدل شده با بتن ۵۰ جهت بررسی اثر ابعاد ستون روی ریسک ترک‌خوردگی ۱۳۶
جدول ۴-۷- پارامترهای بدست آمده از ستون‌های مدل شده با بتن ۸۰ جهت بررسی اثر ابعاد ستون روی ریسک ترک‌خوردگی ۱۳۷
جدول ۴-۸- پارامترهای بدست آمده از ستون‌های مدل‌شده با بتن ۵۰ جهت بررسی اثر زمان ماندگاری قالب روی ریسک ترک‌خوردگی ۱۳۷
جدول ۴-۹- پارامترهای بدست آمده از ستون‌های مدل شده با بتن ۸۰ جهت بررسی اثر زمان ماندگاری قالب روی ریسک ترک‌خوردگی ۱۳۷
جدول ۴-۱۰- پارامترهای بدست آمده از ستون‌های مدل شده با بتن ۵۰ جهت بررسی اثر تغییرات دمای محیط، روی ریسک ترک‌خوردگی ۱۳۷
جدول ۴-۱۱- پارامترهای بدست آمده از ستون‌های مدل شده با بتن ۸۰ جهت بررسی اثر تغییرات دمای محیط، روی ریسک ترک‌خوردگی ۱۳۷
جدول ۴-۱۲- پارامترهای بدست آمده از ستون‌های مدل شده با بتن ۵۰ جهت بررسی اثر شکل مقطع، روی ریسک ترک‌خوردگی ۱۳۸
جدول ۴-۱۳- پارامترهای بدست آمده از ستون‌های مدل شده با بتن ۸۰ جهت بررسی اثر شکل مقطع، روی ریسک ترک‌خوردگی ۱۳۸
جدول ۴-۱۴- مقاومت فشاری بتن *50* در شرایط مختلف عمل‌آوری ۱۵۶
جدول ۴-۱۵- مقاومت فشاری بتن *50P15* در شرایط مختلف عمل‌آوری ۱۵۸
جدول ۴-۱۶- مقاومت فشاری بتن *50P30* در شرایط مختلف عمل‌آوری ۱۵۹
جدول ۴-۱۷- مقاومت فشاری بتن *50FA15* در شرایط مختلف عمل‌آوری ۱۶۱
جدول ۴-۱۸- مقاومت فشاری بتن *50FA25* در شرایط مختلف عمل‌آوری ۱۶۲
جدول ۴-۱۹- مقاومت فشاری بتن *80* در شرایط مختلف عمل‌آوری ۱۷۱
جدول ۴-۲۰- مقاومت فشاری بتن *80P15* در شرایط مختلف عمل‌آوری ۱۷۳
جدول ۴-۲۱- مقاومت فشاری بتن *80P30* در شرایط مختلف عمل‌آوری ۱۷۴
جدول ۴-۲۲- مقاومت فشاری بتن *80FA15* در شرایط مختلف عمل‌آوری ۱۷۶
جدول ۴-۲۳- مقاومت فشاری بتن *80FA25* در شرایط مختلف عمل‌آوری ۱۷۷
جدول ۴-۲۴- مقاومت فشاری بتن *80SF5* در شرایط مختلف عمل‌آوری ۱۷۹
جدول ۴-۲۵- مقاومت فشاری بتن *80SF8* در شرایط مختلف عمل‌آوری ۱۸۰
جدول ۴-۲۶- مقاومت فشاری بتن *80SF11* در شرایط مختلف عمل‌آوری ۱۸۱

عنوان | **فهرست شکل‌ها و تصاویر** | صفحه

فصل اول: کلیات و خصوصیات بتن حجیم با مقاومت زیاد

شکل ۱-۱- تأثیر عیار سیمان بر مقاومت فشاری بتن با حداکثر بعد سنگدانه متفاوت در بتن‌های مختلف ۱۲
شکل ۱-۲- تأثیر اندازه درشت‌دانه‌ها بر مقاومت فشاری بتن‌های مختلف ۱۳
شکل ۱-۳- مقدار سیمان مؤثر در هر رده مقاومتی با حداکثر بعد سنگدانه مختلف ۲۱
شکل ۱-۴- درجه گیرداری بتنی که بی‌وقفه در ارتفاع ریخته می‌شود ۲۶
شکل ۱-۵- اثر جمع‌شدگی و خزش در ایجاد ترک در بتن ۲۹

فصل دوم:ترک خوردگی حرارتی مقاطع حجیم و کاهش مقاومت بتن در دراز مدت

شکل ۲-۱- مرحله‌بندی نرخ تولید حرارت بتن ناشی از هیدراسیون سیمان ۳۲
شکل ۲-۲- تأثیر نوع سیمان بر دمای آدیاباتیک و تولید حرارت بتن ۳۵
شکل ۲-۳- تأثیر ترکیبات شیمیایی (C_3S و C_3A) سیمان بر حرارت‌زایی آن ۳۵
شکل ۲-۴- تأثیر مقدار گچ و نرمی سیمان بر حرارت‌زایی آن ۳۶
شکل ۲-۵- تاثیر نسبت آب به سیمان بر حرارت‌زایی بتن ۳۷
شکل ۲-۶- تأثیر دمای محیط و دمای بتن‌ریزی برحرارت‌زایی بتن ۳۸
شکل ۲-۷- تأثیر جایگزینی خاکستربادی به‌جای بخشی از سیمان بر حرارت‌زایی C_3S و بتن..... ۳۹
شکل ۲-۸- تأثیر جایگزینی سیلیکافیوم به‌جای بخشی از سیمان بر حرارت‌زایی بتن حاوی فوق‌روان‌کننده و فاقد آن ۴۰
شکل ۲-۹- تأثیر درصدهای مختلف فوق روان‌کننده بر افزایش دمای اولیه بتن ۴۲
شکل ۲-۱۰- کالریمتر آدیاباتیک جهت اندازه‌گیری حرارت هیدراسیون بتن ۴۳
شکل ۲-۱۱- کالریمتر نیمه آدیاباتیک جهت اندازه‌گیری حرارت هیدراسیون ۴۴
شکل ۲-۱۲- تعریف شماتیک بلوغ بتن ۴۷
شکل ۲-۱۳- حرارت تولید شده در بتن (تجمعی) و منحنی برازش داده شده از آن ۴۹
شکل ۲-۱۴- کسب مدول الاستسیته بتن و منحنی برازش داده شده از آن ۵۰
شکل ۲-۱۵- اشکال مختلف تبادل حرارت میان بتن و محیط اطراف ۵۲
شکل ۲-۱۶- توسعه تنش‌های حرارتی اولیه و مقاومت بتن ۵۷
شکل ۲-۱۷- بررسی تنش و کرنش توسعه‌یافته ناشی از حرارت هیدراسیون و ایجاد ترک در مقاطع بتنی ۷۲
شکل ۲-۱۸- مقایسه تنش‌های کششی در راستای قطر سه ستون ۷۴
شکل ۲-۱۹- محل مغزه‌گیری از ستون ۷۵
شکل ۲-۲۰- مقاومت فشاری مغزه‌ها در مقابل مقاومت فشاری استوانه‌های عمل‌آوری شده در آب و هوای آزاد ۷۵
شکل ۲-۲۱- محفظه جهت اعمال شرایط *Temperature-Matched Curing* ۷۷
شکل ۲-۲۲- افزایش دمای بتن‌های مختلف در شرایط *Temperature-Matched Curing* ۷۷
شکل ۲-۲۳- کسب مقاومت فشاری در سنین اولیه در شرایط عمل‌آوری مختلف ۷۷
شکل ۲-۲۴- نحوه اعمال دمای عمل‌آوری بر نمونه‌های بتنی ۷۸

شکل ۲-۲۵- مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در دماهای مختلف ۷۹
شکل ۲-۲۶- کسب مقاومت فشاری بتن با سیمان معمولی در شرایط مختلف عمل‌آوری ۸۰

فصل سوم: مصالح مصرفی و طراحی آزمایش‌ها

شکل ۳-۱- نمودار جریان تحقیق و مسیر مطالعات و برنامه‌ریزی آزمایش‌ها ۸۳
شکل ۳-۲- منحنی دانه‌بندی شن بادامی ۸۵
شکل ۳-۳- منحنی دانه‌بندی شن نخودی ۸۵
شکل ۳-۴- منحنی دانه‌بندی ماسه ۸۶
شکل ۳-۵- بررسی انطباق بین دانه‌بندی انتخاب شده و محدوده‌های پیشنهاد شده بر اساس طرح مخلوط ملی ایران ۹۲
تصویر ۳-۱- محفظه نیمه‌آدیاباتیک *(Hay Box)*، نمونه استوانه‌ای داخل آن و ترموکوپل های فرو رفته در بتن ۹۶
تصویر ۳-۲- محفظه نیمه‌آدیاباتیک *(Hay Box)* و دستگاه ثبات *(Data Logger)* متصل به رایانه ۹۶
شکل ۳-۶- تغییرات دما طی شبانه روز بصورت تابع سینوسی ۱۰۴
شکل ۳-۷- جعبه محاوره‌ای پارامترهای محاسبات ۱۰۵
شکل ۳-۸- شرایط تکیه‌گاهی ستون های مدل شده ۱۰۸
شکل ۳-۹- محفظه طراحی شده جهت اعمال شرایط رژیم حرارتی به نمونه‌های بتنی ۱۱۰
تصویر ۳-۳- محفظه طراحی شده جهت اعمال شرایط رژیم حرارتی به نمونه‌های بتنی ۱۱۱
شکل ۳-۱۰- نحوه مدل‌سازی هسته و سطوح بتن حجیم و سن انجام آزمایشات ۱۱۲
تصویر ۳-۴- نمونه‌گیری مقاومت در قالب‌های مکعبی ۱۰ سانتیمتری ۱۱۳
تصویر ۳-۵- انتقال نمونه‌ها به محفظه جهت اعمال شرایط عمل‌آوری تحت رژیم حرارتی هیدراسیون ۱۱۳
تصویر۳-۶- دپوی نمونه‌های بتنی بعد از خارج شدن از محفظه ۱۱۴
تصویر ۳-۷- خشک کردن نمونه‌ها در آون و غوطه‌ور کردن آنها در آب جهت انجام آزمایش جذب آب ۱۱۵

فصل چهارم: نتایج و تحلیل آنها

شکل ۴-۱- منحنی‌های تاریخچه دما و حرارت بتن *50* ۱۱۸
شکل ۴-۲- منحنی‌های تاریخچه دما و حرارت بتن *50P15* ۱۱۹
شکل ۴-۳- منحنی‌های تاریخچه دما و حرارت بتن *50P30* ۱۱۹
شکل ۴-۴- منحنی‌های تاریخچه دما و حرارت بتن *50FA15* ۱۱۹
شکل ۴-۵- منحنی‌های تاریخچه دما و حرارت بتن *50FA25* ۱۲۰
شکل ۴-۶- منحنی‌های تاریخچه دما و حرارت بتن *80* ۱۲۰
شکل ۴-۷- منحنی‌های تاریخچه دما و حرارت بتن *80P15* ۱۲۰
شکل ۴-۸- منحنی‌های تاریخچه دما و حرارت بتن *80P30* ۱۲۱
شکل ۴-۹- منحنی‌های تاریخچه دما و حرارت بتن *80FA15* ۱۲۱
شکل ۴-۱۰- منحنی‌های تاریخچه دما و حرارت بتن *80FA25* ۱۲۱
شکل ۴-۱۱- منحنی‌های تاریخچه دما و حرارت بتن *80SF5* ۱۲۲

شکل ۴-۱۲- منحنی‌های تاریخچه دما و حرارت بتن *80SF8* ۱۲۲
شکل ۴-۱۳- منحنی‌های تاریخچه دما و حرارت بتن *80SF11* ۱۲۲
شکل ۴-۱۴- منحنی دمای نیمه‌آدیاباتیک بتن ۵۰ با درصدهای مختلف جایگزینی خاکستر بادی ۱۲۷
شکل ۴-۱۵- منحنی دمای نیمه‌آدیاباتیک بتن ۵۰ با درصدهای مختلف جایگزینی پوزولان طبیعی ۱۲۷
شکل ۴-۱۶- منحنی دمای نیمه‌آدیاباتیک بتن ۸۰ با درصدهای جایگزینی مختلف پوزولان طبیعی ۱۲۹
شکل ۴-۱۷- منحنی دمای نیمه‌آدیاباتیک بتن ۸۰ با درصدهای جایگزینی مختلف خاکستر بادی ۱۲۹
شکل ۴-۱۸- منحنی دمای نیمه‌آدیاباتیک بتن ۸۰ با ۱۵ درصد جایگزینی پوزولان طبیعی و فلای‌اش ... ۱۳۰
شکل ۴-۱۹- رژیم دمای هسته و سطح ستون *50Sq80-M-24* ۱۳۳
شکل ۴-۲۰- منحنی‌های هم‌دما در مقطع ستون *50Sq80-M-24* در لحظه وقوع حداکثر دمای مقطع ۱۳۳
شکل ۴-۲۱- منحنی حداکثر تنش کششی و فشاری در ستون *50Sq80-M-24* ناشی از گرادیان حرارتی ۱۳۴
شکل ۴-۲۲- منحنی حداکثر و حداقل ریسک ترک‌خوردگی در مقطع ستون ناشی از گرادیان حرارتی در ستون *50Sq80-M-24* ۱۳۵
شکل ۴-۲۳- منحنی‌های هم‌تنش در مقطع ستون *50Sq80-M-24* در لحظه وقوع حداکثر ریسک ۱۳۵
شکل ۴-۲۴- منحنی‌های هم‌ریسک در مقطع ستون *50Sq80-M-24* در لحظه وقوع حداکثر ریسک ۱۳۵
شکل ۴-۲۵- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *50Sq80-M-24* ۱۴۱
شکل ۴-۲۶- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *50FA15Sq80-M-24* ۱۴۲
شکل ۴-۲۷- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *50FA25Sq80-M-24* ۱۴۲
شکل ۴-۲۸- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *50P15Sq80-M-24* ۱۴۲
شکل ۴-۲۹- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *50P30Sq80-M-24* ۱۴۳
شکل ۴-۳۰- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *50Sq150-M-24* ۱۴۳
شکل ۴-۳۱- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *50Sq80-M-48* ۱۴۳
شکل ۴-۳۲- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *50C80-M-24* ۱۴۴
شکل ۴-۳۳- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *80Sq80-M-24* ۱۴۴
شکل ۴-۳۴- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *80FA15Sq80-M-24* ۱۴۴
شکل ۴-۳۵- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *80FA25Sq80-M-24* ۱۴۵
شکل ۴-۳۶- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *80P15Sq80-M-24* ۱۴۵
شکل ۴-۳۷- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *80P30Sq80-M-24* ۱۴۵
شکل ۴-۳۸- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *80Sq150-M-24* ۱۴۶
شکل ۴-۳۹- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *80Sq80-M-48* ۱۴۶
شکل ۴-۴۰- رژیم دمایی هسته و سطح ستون *80C80-M-24* ۱۴۶
شکل ۴-۴۱- ریسک ترک‌خوردگی و حداکثر تنش کششی ستون‌های مدل‌شده با بتن ۵۰، با درصدهای مختلف جایگزینی پوزولان طبیعی و فلای‌اش ۱۴۹
شکل ۴-۴۲- تنش کششی و دمای حداکثر ستون‌های مدل‌شده با بتن ۵۰ با درصدهای مختلف جایگزینی پوزولان طبیعی و فلای‌اش ۱۵۰
شکل ۴ ۴۳- ریسک ترک‌خوردگی، تنش کششی حداکثر ستون‌های مدل‌شده با بتن ۸۰ با درصدهای مختلف جایگزینی پوزولان طبیعی، فلای‌اش و سلیکافیوم ۱۵۰

شکل ۴-۴۴- تنش کششی و دمای حداکثر ستون‌های مدل‌شده با بتن ۸۰ با درصدهای مختلف جایگزینی پوزولان طبیعی، فلای‌اش و سلیکافیوم ۱۵۰
شکل ۴-۴۵- ریسک ترک‌خوردگی و تنش کششی حداکثر ستون‌های مدل‌شده با ابعاد مختلف ۱۵۱
شکل ۴-۴۶- تنش کششی و دمای حداکثر ستون‌های مدل شده با ابعاد مختلف ۱۵۱
شکل ۴-۴۷- ریسک ترک‌خوردگی تنش کششی حداکثر ستون‌های بتنی با زمان ماندگاری ۲۴ و ۴۸ ۱۵۱
شکل ۴-۴۸- تنش کششی و دمای حداکثر ستون‌های بتنی با زمان ماندگاری ۲۴ و ۴۸ ساعت ۱۵۲
شکل ۴-۴۹- ریسک ترک‌خوردگی و تنش کششی حداکثر ستون‌های بتنی در شرایط مختلف آب و هوایی ۱۵۲
شکل ۴-۵۰- تنش کششی و دمای حداکثر ستون‌های بتنی در شرایط مختلف آب و هوایی ۱۵۲
شکل ۴-۵۱- ریسک ترک‌خوردگی و تنش کششی حداکثر ستون‌های بتنی با مقطع مربع و دایره ۱۵۳
شکل ۴-۵۲- تنش کششی و دمای حداکثر ستون‌های بتنی با مقطع مربع و دایره ۱۵۳
شکل ۴-۵۳- محل نمونه‌های بتنی مدل شده از ستون حجیم ۱۵۴
شکل ۴-۵۴- منحنی‌های مقاومت فشاری بتن *50* ۱۵۶
شکل ۴-۵۵- نمودار مقاومت فشاری بتن *50* در شرایط مختلف عمل‌آوری در سنین ۲۸ و ۹۱ روز ۱۵۶
شکل ۴-۵۶- منحنی‌های مقاومت فشاری بتن *50P15* ۱۵۸
شکل ۴-۵۷- نمودار مقاومت فشاری بتن *50P15* در شرایط مختلف عمل‌آوری در سنین ۲۸ و ۹۱ روز ... ۱۵۸
شکل ۴-۵۸- منحنی‌های مقاومت فشاری بتن *50P30* ۱۵۹
شکل ۴-۵۹- نمودار مقاومت فشاری بتن *50P30* در شرایط مختلف عمل‌آوری در سنین ۲۸ و ۹۱ روز ... ۱۵۹
شکل ۴-۶۰- منحنی‌های مقاومت فشاری بتن *50FA15* ۱۶۱
شکل ۴-۶۱- نمودار مقاومت فشاری بتن *50FA15* در شرایط مختلف عمل‌آوری در سنین ۲۸ و ۹۱ روز . ۱۶۱
شکل ۴-۶۳- نمودار مقاومت فشاری بتن *50FA25* در شرایط مختلف عمل‌آوری در سنین ۲۸ و ۹۱ روز . ۱۶۲
شکل ۴-۶۴- نمودار میله‌ای نسبت مقاومت فشاری در شرایط *TMCC* به استاندارد *(C/R)* در بتن‌های ۵۰
شکل ۴-۶۵- نمودار میله‌ای نسبت مقاومت فشاری در شرایط قالب برداری ۲۴ ساعته *(S24)* به استاندارد *(S24/R)* در بتن‌های ۵۰ در سن ۲۸ و۹۱ روز ۱۶۴
شکل ۴-۶۶- نمودار میله‌ای نسبت مقاومت فشاری در شرایط قالب برداری ۴۸ ساعته *(S48)* به استاندارد *(S48/R)* در بتن‌های ۵۰ در سن ۲۸ و۹۱ روز ۱۶۴
شکل ۴-۶۷- نمودار میله‌ای کسب مقاومت فشاری بتن‌های ۵۰ در شرایط استاندارد ۱۶۶
شکل ۴-۶۸- نمودار میله‌ای کسب مقاومت فشاری بتن‌های ۵۰ در شرایط *TMCC* ۱۶۶
شکل ۴-۶۹- منحنی مقاومت فشاری بتن *50* برحسب بلوغ برای شرایط عمل‌آوری استاندارد *(R)* و *TMCC (C)* ۱۶۷
شکل ۴-۷۰- منحنی مقاومت فشاری بتن *50P15* برحسب بلوغ برای شرایط عمل‌آوری استاندارد *(R)* و *TMCC (C)* ۱۶۸
شکل ۴-۷۱- منحنی مقاومت فشاری بتن *50P30* برحسب بلوغ برای شرایط عمل‌آوری استاندارد *(R)* و *TMCC (C)* ۱۶۸
شکل ۴-۷۲- منحنی مقاومت فشاری بتن *50FA15* برحسب بلوغ برای شرایط عمل‌آوری استاندارد *(R)* و *TMCC (C)* ۱۶۸

شکل ۴-۷۳- منحنی مقاومت فشاری بتن *50FA25* برحسب بلوغ برای شرایط عمل‌آوری استاندارد *(R)* و *TMCC (C)* ۱۶۹
شکل ۴-۷۴- منحنی‌های مقاومت فشاری بتن *80* ۱۷۱
شکل ۴-۷۵- نمودار مقاومت فشاری بتن *80* در شرایط مختلف عمل‌آوری در سنین ۲۸ و ۹۱ روز ۱۷۱
شکل ۴-۷۶- منحنی‌های مقاومت فشاری بتن *80P15* ۱۷۳
شکل ۴-۷۷- نمودار مقاومت فشاری بتن *80P15* در شرایط مختلف عمل‌آوری در سنین ۲۸ و ۹۱ روز ... ۱۷۳
شکل ۴-۷۸- منحنی‌های مقاومت فشاری بتن *80P30* ۱۷۴
شکل ۴-۷۹- نمودار مقاومت فشاری بتن *80P30* در شرایط مختلف عمل‌آوری در سنین ۲۸ و ۹۱ روز ... ۱۷۴
شکل ۴-۸۰- منحنی‌های مقاومت فشاری بتن *80FA15* ۱۷۶
شکل ۴-۸۱- نمودار مقاومت فشاری بتن *80FA15* در شرایط مختلف عمل‌آوری در سنین ۲۸ و ۹۱ روز ۱۷۶
شکل ۴-۸۲- منحنی‌های مقاومت فشاری بتن *80FA25* ۱۷۷
شکل ۴-۸۳- نمودار مقاومت فشاری بتن *80FA25* در شرایط مختلف عمل‌آوری در سنین ۲۸ و ۹۱ روز ۱۷۷
شکل ۴-۸۴- منحنی‌های مقاومت فشاری بتن *80SF5* ۱۷۹
شکل ۴-۸۵- نمودار مقاومت فشاری بتن *80SF5* در شرایط مختلف عمل‌آوری در سنین ۲۸ و ۹۱ روز ۱۷۹
شکل ۴-۸۶- منحنی‌های مقاومت فشاری بتن *80SF8* ۱۸۰
شکل ۴-۸۷- نمودار مقاومت فشاری بتن *80SF8* در شرایط مختلف عمل‌آوری در سنین ۲۸ و ۹۱ روز ۱۸۰
شکل ۴-۸۸- منحنی‌های مقاومت فشاری بتن *80SF11* ۱۸۱
شکل ۴-۸۹- نمودار مقاومت فشاری بتن *80SF11* در شرایط مختلف عمل‌آوری در سنین ۲۸ و ۹۱ روز ۱۸۱
شکل ۴-۹۰- نمودار میله‌ای نسبت مقاومت فشاری در شرایط *TMCC* به استاندارد *(C/R)* در بتن‌های ۸۰ ۱۸۲
شکل ۴-۹۱- نمودار میله‌ای نسبت مقاومت فشاری در شرایط قالب برداری ۲۴ ساعته *(S24)* به استاندارد *(S24/R)* در بتن‌های ۸۰ در سن ۲۸ و۹۱ روز ۱۸۳
شکل ۴-۹۲- نمودار میله‌ای نسبت مقاومت فشاری در شرایط قالب برداری ۴۸ ساعته *(S48)* به استاندارد *(S48/R)* در بتن‌های ۸۰ در سن ۲۸ و۹۱ روز ۱۸۳
شکل ۴-۹۳- نمودار میله‌ای کسب مقاومت فشاری بتن‌های ۸۰ در شرایط استاندارد ۱۸۵
شکل ۴-۹۴- نمودار میله‌ای کسب مقاومت فشاری بتن‌های ۸۰ در شرایط *TMCC* ۱۸۵
شکل ۴-۹۵- منحنی مقاومت فشاری بتن *80* برحسب بلوغ برای شرایط عمل‌آوری استاندارد *(R)* و *TMCC (C)* ۱۸۶
شکل ۴-۹۶- منحنی مقاومت فشاری بتن *80P15* برحسب بلوغ برای شرایط عمل‌آوری استاندارد *(R)* و *TMCC (C)* ۱۸۶
شکل ۴-۹۷- منحنی مقاومت فشاری بتن *80P30* برحسب بلوغ برای شرایط عمل‌آوری استاندارد *(R)* و *TMCC (C)* ۱۸۷
شکل ۴-۹۸- منحنی مقاومت فشاری بتن *80FA15* برحسب بلوغ برای شرایط عمل‌آوری استاندارد *(R)* و *TMCC (C)* ۱۸۷
شکل ۴-۹۹- منحنی مقاومت فشاری بتن *80FA25* برحسب بلوغ برای شرایط عمل‌آوری استاندارد *(R)* و *TMCC (C)* ۱۸۷

شکل ۴-۱۰۰- منحنی مقاومت فشاری بتن *80SF5* برحسب بلوغ برای شرایط عمل‌آوری استاندارد *(R)* و *TMCC (C)* ۱۸۸
شکل ۴-۱۰۱- منحنی مقاومت فشاری بتن *80SF8* برحسب بلوغ برای شرایط عمل‌آوری استاندارد *(R)* و *TMCC (C)* ۱۸۸
شکل ۴-۱۰۲- منحنی مقاومت فشاری بتن *80SF11* برحسب بلوغ برای شرایط عمل‌آوری استاندارد *(R)* و *TMCC (C)* ۱۸۸
شکل ۴-۱۰۳- آهنگ جذب آب نمونه‌های بتن ۵۰ عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد *(R)* و تحت رژیم حرارت هیدراسیون *(C)* ۱۹۰
شکل ۴-۱۰۴- جذب آب در ۰/۵ ساعت اول برای بتن ۵۰ عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد *(R)* و تحت رژیم حرارت هیدراسیون *(C)* ۱۹۱
شکل ۴-۱۰۵- جذب آب پس از ۷ روز برای بتن ۵۰ عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد *(R)* و تحت رژیم حرارت هیدراسیون *(C)* ۱۹۱
شکل ۴-۱۰۶- آهنگ جذب آب نمونه‌های بتن ۸۰ عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد *(R)* و تحت رژیم حرارت هیدراسیون *(C)* ۱۹۳
شکل ۴-۱۰۷- جذب آب در ۰/۵ ساعت اول بتن ۸۰ عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد *(R)* و تحت رژیم حرارت هیدراسیون *(C)* ۱۹۴
شکل ۴-۱۰۸- جذب آب پس از ۷ روز بتن ۸۰ عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد *(R)* و تحت رژیم حرارت هیدراسیون *(C)* ۱۹۴

مقدمه

در گذشته، عبارت بتن حجیم[1] فقط در مورد بتن با ابعاد بزرگ، مانند سدهای وزنی بکار برده می‌شد، اما امروزه جنبه‌های تکنولوژی بتن حجیم، با هر قطعه بتنی که در آن، ابعاد به اندازه‌ای باشد که رفتار حرارتی ممکن است منتهی به ایجاد ترک شود (مگر آنکه روش‌های مناسبی اتخاذ گردد) متناسب می‌باشد. بنابراین مشخصه مهم برای بتن حجیم، رفتار حرارتی آن است که طراح سازه‌های بتنی حجیم باید معطوف به از بین بردن یا کم کردن و کنترل نمودن عرض و فاصله بین ترک‌ها باشد.

---

1. Mass concrete

تعریف بتن حجیم

کمیته *ACI 116*، بتن حجیم را به‌عنوان بتن در یک سازه بزرگ (مثلاً یک تیر، ستون، پایه، آب‌بند یا سد) تعریف کرده است به‌گونه‌ای که حجم این بتن به اندازه‌ای است که نیاز به ابزار خاصی برای مقابله با تولید حرارت و در نتیجه تغییر حجم دارد [۱].

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].

در آئین‌نامه بتن ژاپن *(JASS 5)*، بتن حجیم به قطعه بتنی اطلاق می‌شود که اختلاف دما میان سطح (لایه خارجی) و لایه‌های داخلی آن به بیش از ۲۵ درجه سانتیگراد برسد. این اختلاف دما معادل حداقل بعد ۸۰۰ میلیمتر یا بیشتر می‌باشد [۳].

بتن حجیم مسلح و غیر مسلح

بتن حجیم دارای دو وضعیت کاملاً متمایز است. حالت اول بتن‌ریزی توده بتنی غیرمسلح[1] مانند بتن‌ریزی یک سد وزنی و حالت دوم توده‌های عظیم بتن مسلح[2] مانند شالوده‌های بزرگ، پایه پل‌ها و امثال آنها می‌باشد. در حالت اول معمولاً مقاومت کم و عیار سیمان پایین می‌باشد ولی کنترل حرارت ایجاد شده و تغییرات حجمی مرتبط با آن به‌منظور کاهش ترک‌خوردگی لازم می‌باشد و باید از اختلاف زیاد دما بین هسته و قسمت خارجی بتن اجتناب شود.

اما بتن‌های حجیم مسلح به دو دسته تقسیم می‌شوند؛ دسته اول، مقاطع حجیم بتنی مسلح از جمله مخازن و یا شالوده‌های ماشین آلات و دیوارهای نیروگاه‌های هسته‌ای می‌باشند که ابعاد مقطع تحت معیاری غیر از مقاومت بتن طراحی می‌شود. این قبیل معیارها اغلب بر پایه الزامات پایایی یا سختی و حفاظتی می‌باشند.

---

1. Unreinforced mass concrete
2. Reinforced mass concrete