بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی عمران

پایان‌نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران
گرایش سازه

طراحی، ساخت و مقایسه فنی، اجرایی و اقتصادی بتن خود تراکم و معمولی در سگمنت‌های تونل خط ۲ قطار شهری مشهد

مؤلف:
وحید قلی زاده

استاد راهنما:
دکتر علی‌اکبر مقصودی

استاد مشاور:
دکتر محسن تدین

دی‌ماه ۱۳۹۲

این پایان‌نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

گروه مهندسی عمران

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی‌شود.

دانشجو: وحید قلی زاده

استاد راهنما: دکتر علی‌اکبر مقصودی

استاد مشاور: دکتر محسن تدین

داور۱: دکتر حسین ابراهیمی

داور۲: دکتر سعید شجاعی

نماینده تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع: دکتر حامد صفاری

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر مریم احتشام زاده

حق چاپ محفوظ و مربوط به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

این پـایـان‌نـامه تحت حمایت قرارگاه ســـازندگی خاتم‌الأنبیاء (قرب قائم) در پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد انجام شده است.

به پاس تعبیر عظیمشان از کلمه ایثار و از خودگذشتن

به پاس عاطفه و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین

پشتیبان است، و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این پایان نامه را به **پدر و مادر عزیزم** تقدیم می کنم.

وحید قلی زاده

دی ۱۳۹۲

تقدیر و تشکر

سپاس خدای مهربان را که به من توانایی کسب علم و به انسانهای بزرگی همچون مهندس افضلی-پور و همسر نیکوکارشان (مؤسسین دانشگاه شهید باهنر کرمان) نیکی و سخاوت عطا فرمود، امیدوارم قادر به درک زیبایی‌های وجودشان باشم.

بدین وسیله تشکر و قدردانی خود را از اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر علی‌اکبر مقصودی و جناب آقای دکتر محسن تدین که در طول انجام این پژوهش با همفکری خویش همواره حامی من بوده‌اند، بیان می‌نمایم.

بر خود لازم می‌دانم کمال تشکر و قدردانی ویژه‌ای از جناب آقای مهندس سید محمد سجادی عطار، مدرس دانشکده فنی مشهد (شهید محمد منتظری) و مدیر آزمایشگاه کنترل کیفیت خط ۲ قطار شهری مشهد، به دلیل یاریها و راهنماییهای بی‌چشمداشت ایشان، که بسیاری از سختیها را برایم آسانتر نمودند، داشته باشم.

همچنین از مجموعه خط ۲ قطار شهری مشهد، قرارگاه سازندگی خاتم‌الأنبیاء (قُرب قائم)، گروه مهندسین مشاور ایمن‌سازان، مؤسسه مهندسی رهاب، کارشناسان محترم کنترل کیفیت جناب آقایان مهندس باقری، بابایی، کفاش و پرسنل زحمتکش آزمایشگاه خط ۲ قطار شهری مشهد (آقایان نادری، خواهانی، حمیدی، ابوترابی، تصدیقی) به پاس همکاری‌هایشان سپاسگزارم.

در انتها از زحمات سرکار خانم مهندس نینا صدیقی در ویرایش متن حاضر متشکرم.

و از تمامی کسانی که معنای واقعی دوست را برایم زنده کرده‌اند....

چکیده

در بسیاری از پروژه‌های تونلی نظیر مترو، حفاری تونل‌ها توسط دستگاه حفاری مکانیزه TBM[1] انجام می‌گیرد و دیواره‌های تونل از قطعات بتنی پیش‌ساخته‌ای به نام سگمنت[2] ساخته می‌شوند. سگمنت‌ها پس از رسیدن به مقاومت لازم به محل حفاری منتقل شده و به مانند تکه‌های پازل در کنار یکدیگر قرار گرفته و یک رینگ را تشکیل می‌دهند. این قطعات سازه‌ای بتنی سنگین و نیمه‌سنگین که اغلب دارای تراکم زیاد میلگرد هستند، در قالب‌های فولادی گران قیمت با اشکال هندسی ویژه، در شرایط خاص بتن‌ریزی می‌شوند. بمنظور تولید چنین قطعاتی در کشور از جمله، تونل پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد، تا کنون از بتن معمولی[3] (بتن با نیاز به ویبره) که همزمان با بتن‌ریزی ویبراتور-های[4] متصل به قالب، ایجاد تراکم در بتن می‌کند، استفاده می‌شد. ویبره کردن باعث، i) ایجاد آلودگی صوتی مضر شدید در فضای سرپوشیده کارخانه، ii) کاهش تولید روزانه قطعات بتنی و غیراقتصادی شدن پروژه‌ها، iii) سر و صدای زیاد ویبراتورها، که برای مهندسین و نیروهای کارگاهی که به طور دائم در محل تولید حضور دارند، زیان‌آور است. همچنین، دقت مورد نیاز در ابعاد سگمنت (±۵mm) است که با تکرار ویبره، آثار قابل توجه منفی بر، i) تغییرشکل و انحناء قالب‌های فولادی وارداتی (ارز بَر) و ii) هزینه قابل توجه قالب‌ها را دارد.

هدف اصلی از انجام پایان‌نامه حاضر، i) جایگزینی بتن خودتراکم[5] (بتن بدون نیاز به ویبره، SCC) با بتن معمولی (بتن با نیاز به ویبره، NC) در تولید قطعات پیش ساخته تونل پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد، ii) افزایش مقاومت بتن معمولی پروژه مزبور، iii) مقایسه جنبه های فنی، اجرایی و اقتصادی SCC با NC و iv) تهیه نرم‌افزار طرح اختلاط بتن می‌باشد.

با تلاش‌های صورت گرفته بسیار زیاد، هم‌اکنون تولید و اجرای سگمنت‌های مزبور با بتن خودتراکم با موفقیت کاربردی شده است، بنحویکه روزانه دو رینگ از ۱۲ رینگ تولید قطعات با بتن خودتراکم و ۱۰ رینگ با بتن معمولی (با مقاومت فشاری بیش از ۶۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع برای هر دو نوع بتن) صورت می‌گیرد و تولید سگمنت‌های پروژه مزبور با SCC رو به گسترش است.

کلمات کلیدی: پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد، سگمنت، بتن معمولی (NC)، ویبره، بتن خودتراکم (SCC)، جنبه های فنی، اجرایی و اقتصادی.

[1] Tunnel Boring Machine
[2] Segment
[3] Normal Concrete (NC, Vibrating Concrete)
[4] Vibratings
[5] Self-Compacting Concrete (SCC, Non Vibrating Concrete)

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول: مقدمه

۱-۱ کلیات..... ۲

۱-۲هدف تحقیق..... ۳

۱-۳روش تحقیق و برنامهٔ مطالعات..... ٤

۱-٤ تقسیم بندی پایان نامه و تعریف فصول..... ٤

فصل دوم: مروری بر بتن خودتراکم و مراحل تولید سگمنت‌های تونل خط ۲ قطار شهری مشهد

۲-۱ تاریخچهٔ بتن خودتراکم(SCC) ٦

۲-۱-۱ مقدمه ٦

۲-۱-۲ سرعت گسترش شناخت بتن خودتراکم..... ۷

۲-۲ مثالهایی از استفاده بتن خودتـــراکم در پروژه‌ها..... ۱۰

۲-۲-۱ بعضی پروژه‌های خارج از ایران ۱۰

۲-۲-۲ بعضی از پروژه‌های انجام شده با SCC در داخل کشور..... ۱۷

۲-۳فوائد و امتیازات بکارگیری بتن خودتراکم..... ۲۵

۲-٤ آشنایی با برخی از مفاهیم مرتبط با بتن خودتراکم..... ۲۷

۲-٤-۱ رئولوژی..... ۲۷

۲-٤-۲کارائی..... ۲۷

۲-٤-۳ قابلیت پرکردن (قابلیت روانی محدود نشده)..... ۲۷

۲-٤-٤ قابلیت عبور (قابلیت روانی محدود شده)..... ۲۷

۲-٤-۵ پایداری ۲۷

۲-۵ عوامل موثر بر قابلیت پُر کردن، قابلیت عبور و پایداری ۲۸

۲-٦ آزمایش‌های رئولوژی بتن خودتراکم..... ۳۰

۲-٦-۱ آزمایش جریان اسلامپ (اسلامپ فلو)..... ۳۱

۲-٦-۲ آزمایش حلقهJ..... ۳۱

۲-٦-۳ آزمایش قیف V- شکل (مرحلهٔ اول و دوم)..... ۳۲

۲-٦-٤ آزمایش جعبه U- شکل ۳۳

۲-٦-٥ آزمایش جعبه L - شکل ۳٤
۲-۷استانداردها و پیشنهادات ۳۵
۲-۸انتخاب اهداف کارائی مناسب برای بتن خودتراکم ۳۷
۲-۹ معیارهای قبول بتن خودتراکم از نظر کارائی..... ۳۸
۲-۱۰ رابطهٔ بین برخی از عملیات اصلاحی و عیوب ایجاد شده بر روی بتن ۳۹
۲-۱۱ کلیات پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد..... ٤۱
۲-۱۱-۱ تشکیلات و نحوه انجام پروژه ٤۲
۲-۱۱-۲ ویژگی‌های سگمنت‌های خط ۲ قطار شهری مشهد ٤۲
۲-۱۲ روند تولید قطعات بتنی (سگمنت) ٤٤
۲-۱۲-۱ آزمایشگاه کنترل کیفیت خط ۲ قطار شهری مشهد ٤٦
۲-۱۲-۲ مختصری از کنترل کیفیت بتن سگمنت‌ها..... ٤۷
۲-۱۲-۳ مختصری از عمل‌آوری تسریع شده ٤۸

فصل سوم: مصالح مصرفی، تشریح برنامه آزمایشگاهی، روش‌های گوناگون طرح اختلاط بتن خودتراکم و نرم‌افزار طرح مخلوط تهیه شده

۳-۱ مقدمه..... ۵۱
۳-۲ مصالح مصرفی..... ۵۱
۳-۲-۱ مصالح سنگی..... ۵۱
۳-۲-۲ نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح سنگی..... ۵٤
۳-۲-۳ سیمان..... ۵۸
۳-۲-٤ مواد افزودنی..... ٦۰
۳-۲-۵ آب..... ٦۰
۳-۳ برنامه آزمایشگاهی و ساخت طرح‌ها..... ٦۱
۳-٤ اصول اولیه طرح اختلاط..... ٦۲
۳-۵ روش‌های گوناگون طرح اختلاط بتن خودتراکم ٦۳
۳-۵-۱ تعدیل مخلوط..... ٦۵
۳-٦ نرم‌افزار طرح مخلوط تهیه شده ٦٦
۳-٦-۱ تعیین مشخصات کلی طرح مخلوط..... ٦٦
۳-٦-۲ تعیین مقادیر حداقل آزمایش‌های لازم برای طرح مخلوط ٦۸

۳-٦-۳ دانه‌بندی مصالح ۷۰
۳-٦-٤ مشخصات سیمان، مواد سیمانی و افرودنی‌ها ۷۳
۳-٦-٥ طراحی مخلوط ۷٤
۳-٦-٦ اصلاح طرح ۷۸
۳-٦-۷ کنترل مجدد دانه‌بندی و نسبت‌ها ۸۱
۳-٦-۸ برآورد هزینه ۸۲
۳-۷ روش اختلاط مصالح ۸۲
۳-۸ نامگذاری مخلوط‌های بتن ۸۳
۳-۹ مقادیر و نسبت‌های مخلوط بتن ۸۳
۳-۱۰ روش نمونه‌گیری و نگهداری آزمونه‌ها در آزمایشگاه ۸٥
۳-۱۱ شرح آزمایش‌های انجام‌شده ۸۷
۳-۱۲ آزمایش‌های انجام شده در فاز خمیری ۸۸
۳-۱۲-۱ آزمایش اسلامپ بتن معمولی ۸۸
۳-۱۲-۲ آزمایش جریان اسلامپ بتن خودتراکم ۸۸
۳-۱۲-۳ آزمایش حلقهٔ J ۸۹
۳-۱۲-٤ آزمایش جعبهٔ L - شکل ۸۹
۳-۱۲-٥ آزمایش جعبهٔU- شکل ۹۰
۳-۱۲-٦ آزمایش قیفV- شکل ۹۰
۳-۱۳ آزمایش‌های انجام شده در فاز سخت شده ۹۱
۳-۱۳-۱ تعیین مقاومت فشاری آزمونه‌ها ۹۱
۳-۱۳-۲ تعیین مقاومت کششی شکافتی (دو نیم شدن) ۹۲
۳-۱۳-۳ تعیین مدول ارتجاعی استاتیکی ۹۳
۳-۱۳-٤ آزمایش تعیین جذب آب حجمی اولیه و نهایی بتن ۹٥
۳-۱۳-٥ آزمایش تعیین جذب آب موئینه بتن ۹٦
۳-۱۳-٦ آزمایش پتانسیل خوردگی میکروپیل (نیم پیل) ۹۷

فصل چهارم: نتایج آزمایش‌های رئولوژی و فاز سخت شده و تحلیل نتایج

٤-۱ نتایج آزمایش‌های فاز خمیری ۱۰۰
٤-۲ تحلیل نتایج فاز خمیری بتن خودتراکم ۱۰۱

٤-٢-١ آزمایش جریان اسلامپ ١٠٢
٤-٢-٢ آزمایش حلقه J ١٠٣
٤-٢-٣ آزمایش قیف V-شکل در ١ و ٥ دقیقه ١٠٤
٤-٢-٤ آزمایش جعبه U-شکل ١٠٥
٤-٢-٥ آزمایش جعبه L-شکل ١٠٦
٤-٣ مشخصات نسبی و تصاویر فاز خمیری طرح‌های اختلاط SCC و NC ١٠٧
٤-٤ نتایج آزمایش‌های فاز سخت شده ١١٢
٤-٤-١ نتایج مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته ١١٢
٤-٤-٢ نتایج مقاومت کششی ١١٧
٤-٥ نتایج جذب آب حجمی اولیه و نهایی ١١٩
٤-٦ نتایج جذب آب موئینه ١٢١

فصل پنجم: ملاحظات فنی، اجرایی و اقتصادی

٥-١ تقسیم‌بندی بتن از نظر کارائی و ارتباط آن با هزینه‌های خُرد و کلان ١٢٣
٥-١-١ مختصری از بتن غلتکی RCC ١٢٣
٥-١-٢ رابطه مقاومت فشاری و کارائی بتن با اقتصاد خرد و کلان ١٢٤
٥-٢ طرح‌های اختلاط اجرایی بتن خودتراکم و بتن معمولی در تولید سگمنت‌های خط ٢ قطار شهری مشهد ١٢٦
٥-٣ مقایسه فنی و اجرایی دو نوع بتن خودتراکم و معمولی در تولید و اجرای سگمنت‌های خط ٢ قطار شهری مشهد ١٢٨
٥-٣-١ تأمین مصالح، نمونه برداری و انبار کردن ١٢٨
٥-٣-٢ توزین مصالح، نسبت‌ها و ساخت بتن ١٣٠
٥-٣-٣ قالب‌بندی، بتن‌ریزی، تراکم، پرداخت ١٣٢
٥-٣-٤ قالب‌برداری سگمنت‌ها ١٣٤
٥-٣-٥ قالب جدید ارائه شده برای تولید سگمنتهای تونل با SCC ١٣٥
٥-٤ مقایسه اقتصادی دو نوع بتن خودتراکم و معمولی در تولید و اجرای سگمنت‌های خط ٢ قطار شهری مشهد ١٣٦
٥-٤-١ اقتصاد خُرد ١٣٦
٥-٤-٢ اقتصاد کلان ١٤٠

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

٦-١ نتیجه‌گیری کلی ١٤٨
٦-٢ پیشنهادات ١٥١

پیوست الف: مشخصات و نقشه‌های اجرایی سگمنت‌ها ١٥٦٢
پیوست ب: جزئیات برآورد هزینه ١٥٧٥
مراجع ١٥٧٦٠

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل ۲-۱: مراحل ضرورت ایجاد بتن خود تراکم ٦
شکل ۲-۲: بتن‌ریزی با بتن خودتراکم برای سگمنت‌های تونل ۸
شکل ۲-۳: افزایش کاربرد بتن خودتراکم برای قطعات بتنی در ژاپن ۸
شکل ۲-٤: دست یافتن به سیستم‌های ساختمانی جدید با استفاده از SCC ۸
شکل ۲-۵: بتن‌ریزی با بتن خودتراکم برای سازه‌های ساندویچی تونل غوطه‌ور در Kobe ژاپن ۹
شکل ۲-٦: برج Land Mark و پل معلق Akashi-Kaikyo ۱۰
شکل ۲-۷: منبع گاز LNG ۱۱
شکل ۲-۸: استفاده از SCC در فونداسیون آسمان خراش PORTA NUOVA ۱۱
شکل ۲-۹: آسمان خراش PORTA NUOVA ۱۲
شکل ۲-۱۰: پل Wu-Ze در تایوان ۱۳
شکل ۲-۱۱: استفاده از SCC در پل‌های مسیر بزرگراه No.٦ تایوان ۱٤
شکل ۲-۱۲: تصاویر مقاوم‌سازی فونداسیون پل با SCC در تایوان ۱٤
شکل ۲-۱۳: دتایل سگمنت‌های پیش‌ساخته SCC و نصب سگمنت‌ها در تایچونگ تایوان ۱۵
شکل ۲-۱٤: نمایی از پل Da-Pan Bridge که با SCC اجرا شده است ۱۵
شکل ۲-۱۵: نمایی از ستون‌های SCC بزرگراه BaLi-WuGu ۱۵
شکل ۲-۱٦: تصویر شماتیک مقاطع بزرگراه Wu-Yang در تایوان ۱٦
شکل ۲-۱۷: نمایی از ستون‌های اجرا شده با SCC در بزرگراه Wu-Yang ۱٦
شکل ۲-۱۸: تصویری از کاربرد معماری و سازهای بتن خودتراکم در حرم حضرت معصومه (س) ۱۸
شکل ۲-۱۹: قطعات سگمنتال سرستون نصب شده در محور پروژه ۱۹
شکل ۲-۲۰: قطعات سگمنت تولید شده با بتن خودتراکم برای عرشه اصلی ۲۰
شکل ۲-۲۱: تونل نیایش تهران ۲۱
شکل ۲-۲۲: ریب در اطراف مقطع ۲۱
شکل ۲-۲۳: تونل رسالت تهران ۲۲
شکل ۲-۲٤: مقطع نهایی تونل رسالت ۲۲
شکل ۲-۲۵: قطعات بتنی پیش‌ساخته Cradle ایستگاه‌های روباز متروی شیراز ۲۳

شـکل ۲-۲۶: کاربرد بتن خودتراکم مقاومت بالا در تیرهای T- شـکل پیش تنیده و عرشـه‌های یکسره پل پس تنیده..... ۲۳
شـکل ۲-۲۷: کاربرد بتن خودتراکم مقاومت بالا در اسـتخر (در یک مرحله) و سـاختمان تجاری ۲۳
شکل ۲-۲۸: تصویر مقاوم‌سازی فونداسیون آسیاب گلوله‌ای کارخانه سیمان کرمان..... ۲٤
شکل ۲-۲۹: ستون پُر آرماتور اجرا شده با بتن NC ۲٤
شکل ۲-۳۰: مغزه دیوار پروژه‌ای که با NC اجرا شده..... ۲٤
شکل ۲-۳۱: تصویری از آرم خط۲ قطار شهری مشهد، ساخته شده توسط نگارنده باSCC ۲٦
شکل ۲-۳۲: شاخص چشمی پایداری استاتیکی بتن سخت شده از مقطع نمونه استوانه‌ای ۲۸
شکل ۲-۳۳: شکل شماتیک آزمایش جریان اسلامپ..... ۳۱
شکل ۲-۳٤: مشخصات ابعادی و شکل شماتیک حلقهٔ J..... ۳۲
شکل ۲-۳۵: مشخصات ابعادی و تصویر شماتیک قیف V- شکل..... ۳۳
شکل ۲-۳٦: مشخصات ابعادی جعبه U..... ۳٤
شکل ۲-۳۷: دستگاه جعبه U ژاپنی..... ۳٤
شکل ۲-۳۸: تصویر شماتیک و مشخصات ابعادی جعبهٔ L – شکل..... ۳٤
شکل ۲-۳۹: آزمایش اصلاح شده جریان لرزان M.VF ۳٦
شکل ۲-٤۰: آزمایش نفوذ ۳٦
شکل ۲-٤۱: آزمایش رئولوژی ۳٦
شکل ۲-٤۲:آزمایش Orimet ۳٦
شکل ۲-٤۳: آزمایش جعبه پُر کردن (Filling Vessel Test) ۳٦
شکل ۲-٤٤: آزمایش جداشدگی الک ۳٦
شکل ۲-٤۵: آزمایش جداشدگی استاتیکی پایداری ستون ۳٦
شکل ۲-٤٦: مسیرخط۲ قطار شهری مشهد..... ٤۱
شکل ۲-٤۷: پلان شماتیک خط۲ قطار شهری مشهد ٤۱
شکل ۲-٤۸: قطعات پیش ساخته (سگمنت) تونل خط ۲ قطار شهری مشهد ٤۳
شکل ۲-٤۹: دستگاه حفاری مکانیزه تونل خط۲ قطار شهری مشهد(TBM) ٤۳
شکل ۲-۵۰: قطعات نصب شده توسط دستگاه TBM - تونل خط ۲ قطار شهری مشهد..... ٤٤
شکل ۲-۵۱: سالن تولید سگمنت..... ٤۵
شکل۲-۵۲: سالن تولید سبد میلگرد..... ٤۵

شکل ۲-۵۳: استقرار سبد میلگرد ٤٦
شکل ۲-٥٤: بتن‌ریزی سگمنت ٤٦
شکل ۲-٥٥: عمل‌آوری بتن با بخار ٤٦
شکل ۲-٥٦: جابجایی سگمنت ٤٦
شکل ۲-٥٧: تصویری از آزمایشگاه پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد ٤٧
شکل ۲-٥٨: نمونه‌ای از چرخه بخاردهی ٦ ساعته سگمنت‌های بتنی NC و SCC ٤٩
شکل ۳-۱: تعیین چگالی و جذب آب درشت‌دانه ٥٣
شکل ۳-۲: آزمایش مقاومت در برابر فشار سنگدانه (کراشینگ ولیو) ٥٣
شکل ۳-۳: دستگاه درصد سایش ٥٣
شکل ۳-٤: آزمایش تطویل و تورق ٥٣
شکل ۳-٥: سلامت سنگدانه ٥٣
شکل ۳-٦: تعیین چگالی و جذب آب ریزدانه ٥٣
شکل ۳-۷: آزمایش حدخمیری ٥٣
شکل ۳-۸: آزمایش دانه‌بندی ٥٣
شکل ۳-۹: آزمایش هیدرومتری ٥٣
شکل ۳-۱۰: آزمایش پتروگرافی مصالح سنگی درشت‌دانه (شن) ٥٤
شکل ۳-۱۱: آزمایش پتروگرافی مصالح سنگی ریزدانه (ماسه) ٥٤
شکل ۳-۱۲: منحنی دانه‌بندی، الف- شن بادامی، ب- شن نخودی، ج- ماسه طبیعی، د- ماسه بادی(بخش الک) ٥٦
شکل ۳-۱۳: منحنی دانه‌بندی ماسه بادی و پودر سنگ آهک (دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری) ٥٦
شکل ۳-۱٤:منحنی دانه‌بندی ترکیب ۷٥٪ ماسه طبیعی و ۲٥٪ ماسه بادی ٥٧
شکل ۳-۱٥: نمودار خمیری براساس حدود اتربرگ و طبقه‌بندی ماسه بادی ٥٨
شکل ۳-۱٦: دستگاه تعیین غلظت نرمال سیمان ٥٩
شکل ۳-۱۷: مقاومت فشاری و خمشی ملات سیمان ٥٩
شکل ۳-۱۸: اطلاعات کلی طرح مخلوط ٦٨
شکل ۳-۱۹: حداقل آزمایش‌های لازم ٦٨
شکل ۳-۲۰: دانه‌بندی مصالح ۷۰
شکل ۳-۲۱: نتایج دانه‌بندی ۷۱

شکل ۳-۲۲: محدوده مجاز دانه‌بندی ۷۲
شکل ۳-۲۳: ترسیم منحنی‌های دانه‌بندی مجزای مصالح ۷۲
شکل ۳-۲٤: تعیین مشخصات سیمان و افزودنی‌های معدنی و شیمیایی ۷۳
شکل ۳-۲۵: طراحی مخلوط در برنامه ۷٤
شکل ۳-۲٦: تعیین حجم مورد نیاز و اصلاح مخلوط ۷۹
شکل ۳-۲۷: کنترل‌های لازمه مخلوط نهایی ۸۱
شکل ۳-۲۸: برآورد هزینه در نرم‌افزار ۸۲
شکل ۳-۲۹: نحوهٔ اختلاط مصالح در مخلوط‌کن جهت تولید SCC ۸۳
شکل ۳-۳۰: لحظهٔ بالا کشیدن مخروط ۸۸
شکل ۳-۳۱: نحوهٔ قرار گرفتن مخروط ناقص اسلامپ در داخل حلقه J، بتن پخش شده حلقه J ۸۹
شکل ۳-۳۲:تصویری از جعبهٔ L در حال پُر شدن از بتن و جعبهٔ L بعد از اتمام آزمایش ۹۰
شکل ۳-۳۳: تصویری از جعبهٔ U در حال پُر شدن از بتن و جعبهٔ U بعد از اتمام آزمایش ۹۰
شکل ۳-۳٤: تصویری از قیف V با جنس ورق فولادی ۲ میل و قیف V در حال تخلیه ۹۱
شکل ۳-۳۵: تعیین مقاومت فشاری و بررسی نوع شکست آزمونه‌ها ۹۲
شکل ۳-۳٦: مقاومت کششی برزیلی ۹۳
شکل ۳-۳۷: مقاومت کششی اروپایی ۹۳
شکل ۳-۳۸: آزمونه‌های مقاومت کششی طرح‌ها پس از آزمایش ۹۳
شکل ۳-۳۹: مدول منحنی تنش-کرنش در منحنی‌های غیر خطی ۹٤
شکل ۳-٤۰: تصاویر آزمایش مدول الاستیسیته، آزمونه و دستگاه آزمایش ۹۵
شکل ۳-٤۱: مراحل انجام آزمایش جذب آب حجمی اولیه و نهایی ۹٦
شکل ۳-٤۲: مراحل انجام آزمایش جذب آب موئینه ۹۷
شکل ۳-٤۳: تصویرشماتیک آزمونه‌های استوانه‌ای آزمایش پتانسیل‌خوردگی ۹۸
شکل ۳-٤٤: تصویر آزمونه‌های استوانه‌ای پتانسیل خوردگی و قرائت با ولت متر ۹۸
شکل ٤-۱: مقایسه نموداری جریان اسلامپ طرح‌های SCC و مقایسه با آیین‌نامه ۱۰۲
شکل ٤-۲: مقایسه نموداری جریان اسلامپ با زمان تخلیه قیف V در ۵ دقیقه در دو حالت .. ۱۰۳
شکل ٤-۳: مقایسه نموداری قطر جریان اسلامپ با قطر جریان حلقه J ۱۰٤
شکل ٤-٤: اختلاف قطر جریان اسلامپ با جریان حلقه J بر حسب میلیمتر و مقایسه با ISIRI ۱۰٤

شکل ٤-٥: اختلاف ارتفاع داخل و خارج جریان حلقه J و مقایسه با EFNARC..... ١٠٤
شکل ٤-٦: مقایسه نموداری قیف V–شکل در ١ و ٥ دقیقه..... ١٠٥
شکل ٤-٧: مقایسه نموداری جعبه L–شکل و جعبه U–شکل..... ١٠٦
شکل ٤-٨: مقایسه نموداری نتایج جعبه L–شکل با آیین‌نامه..... ١٠٦
شکل ٤-٩: تصاویر آزمایش‌های فاز خمیری طرح مخلوط‌های بتن خود تراکم بترتیب از ١ الی ١٦..... ١١٠
شکل ٤-١٠: طرح‌های بتن معمولی با اسلامپ ١٢ و ١٨ سانتیمتر و مقاومت هدف ٥٠ و ٦٠ مگاپاسگال..... ١١٢
شکل ٤-١١: منحنی مقاومت فشاری طرح‌های SCC در سنین انتقال، ٧ و ٢٨ روز..... ١١٥
شکل ٤-١٢: منحنی تنش کرنش بتن‌های خودتراکم در ناحیه الاستیک..... ١١٥
شکل ٤-١٣: منحنی تنش کرنش بتن‌های معمولی در ناحیه الاستیک..... ١١٧
شکل ٤-١٤: نمودار مقایسه مقاومت کششی طرحهای SCC به دو روش برزیلی و اروپایی.... ١١٩
شکل ٤-١٥: منحنی جذب آب حجمی اولیه و نهایی طرحهای SCC..... ١٢٠
شکل ٤-١٦: منحنی جذب آب حجمی اولیه و نهایی طرحهای NC..... ١٢٠
شکل ٥-١: افزایش کارائی، افزایش هزینه، کاهش کارایی..... ١٢٥
شکل ٥-٢: نمودار شماتیک کارپذیری و انرژی تراکم طرح‌های شکل ٥-١ در مقاومت فشاری ثابت..... ١٢٦
شکل ٥-٣: تصحیح سطح پس از بتن ریزی و ویبره کردن بتن‌های معمولی..... ١٣٤
شکل ٥-٤: جزئیات تزریق ملات پشت سگمنت‌ها و لزوم تصحیح سطح..... ١٣٤
شکل ٥-٥: کالیبراسیون قالب‌ها..... ١٣٥
شکل ٥-٦: قالب‌برداری سگمنت‌های NC خط ٢ قطار شهری مشهد..... ١٣٥
شکل ٥-٧: ثبت اختراع قالب پیشنهادی برای SCC در سگمنت‌های تونل توسط کمپانی cbe ١٣٦
شکل ٥-٨: نمودار هزینه‌ی یک متر مکعب طرح‌های SCC و NC به تفکیک اجزاء بتن..... ١٣٩
شکل ٥-٩: نمودار هزینه‌ی $1m^3$ مکعب طرح‌های اجرایی SCC و NC در خط ٢ قطار شهری مشهد در دو دوره..... ١٤٠
شکل ٥-١٠: نمودار هزینه کارخانه سگمنت برای تولید٤٢٢ رینگ طی تولید سه ماهه چهارم سال ١٣٩١..... ١٤١
شکل ٥-١١: نمودار سهم هزینه مواد و مصالح هر جزء از کل هزینه مواد و مصالح مستقیم وغیر

مستقیم ۱۴۲
شکل ۵-۱۲: تصویر بتن‌ریزی قطعات پیش‌ساخته بتنی تونل خط ۲ قطار شهری مشهد با SCC ۱۴۶
شکل ۵-۱۳: تصویری از سگمنت‌های اجرا شده با SCC در دپوی کارخانه سگمنت خط ۲ قطار شهری مشهد ۱۴۶

فهرست جداول

عنوان صفحه

جدول ۲-۱: طرح‌های اختلاط بتن خودتراکم اجرا شـده در پروژه آسـمان خراش PORTA NUOVA ۱۲

جدول ۲-۲: نسبت‌های طرح اختلاط SCC اجرا شده در بعضی از پروژه‌های تایوان..... ۱۷

جدول ۲-۳: طرح اختلاط بتن خودتراکم اجرا شـده در پروژه توسعه حرم حضرت معصومه (س) ۱۷

جدول ۲-٤: نتایج بعضـی آزمایش‌های فاز خمیری SCC پروژه توسـعه حرم حضـرت معصـومه (س) ۱۸

جدول ۲-۵: طرح‌های اختلاط بتن خودتراکم اجرا شده در پروژه بزرگراه طبقاتی صدر ۱۹

جدول ۲-٦: عوامل مؤثر بر قابلیت پرکردن بتن خودتراکم..... ۲۹

جدول ۲-۷: عوامل موثر بر قابلیت عبور بتن خودتراکم..... ۲۹

جدول ۲-۸: عوامل موثر بر پایداری بتن خودتراکم ۳۰

جدول ۲-۹: اسامی و ویژگی آزمایش‌های رئولوژی بتن خودتراکم تحقیق حاضر ۳۰

جدول ۲-۱۰: برخی شماره استانداردها و پیشنهادات آزمایش‌های فاز خمیری بتن خودتراکم . ۳۷

جدول ۲-۱۱: انتخاب اهداف کارائی مناسب برای بتن خود تراکم..... ۳۸

جدول ۲-۱۲: معیارهای قبول بتن خودتراکم از نظر کارائی و عوامل پدید آورنده اختلال در نتایج ۳۹

جدول ۲-۱۳: معنی علائم استفاده شده در جدول ۲-۱٤..... ۳۹

جدول ۲-۱٤: رابطهٔ بین برخی از عملیات اصلاحی و عیوب ایجاد شده بر روی بتن..... ٤۰

جدول ۲-۱۵: مشخصات تونل و سگمنت‌های خط ۲ قطار شهری مشهد ٤۲

جدول ۲-۱٦: رواداری کارایی بتن (معمولی) تازه براساس مقدار متوسط کارایی..... ٤۷

جدول ۳-۱: نتایج دانه‌بندی شـن بادامی، شن نخودی، ماسه شسته، ماسه بادی و پودر سنگ‌آهک ۵۵

جدول ۳-۲: سایر مشخصات مصالح سنگی..... ۵۸

جدول ۳-۳: مشخصات فیزیکی سیمان نوع ٤۲۵-۱ مشهد ۵۹

جدول ۳-٤: مشخصات شیمیایی سیمان نوع ٤۲۵-۱ مشهد ۵۹

جدول ۳-۵: مشخصات آب مصرفی در بتن قطعات بتنی خط۲ قطار شهری مشهد ٦١
جدول ۳-٦: مشخصات بتن خود تراکم ارائه شده توسط جامعه مهندسین عمران ژاپن ٦٤
جدول ۳-۷: انحراف معیار بر اساس رتبه بندی کارگاه و مقاومت مشخصه بتن ٦٧
جدول ۳-۸: حاشیه امنیت طرح مخلوط بتن بدون امکان تعیین انحراف معیار ٦٧
جدول ۳-۹: مشخصات طرح اختلاط‌های بتن خودتراکم ($1m^3$) ٨٤
جدول ۳-۱۰: مشخصات طرح اختلاط‌های بتن معمولی ($1m^3$) ٨٥
جدول ۳-۱۱: آزمونه‌ها و آزمایش‌های انجام شده در فاز سخت شده بتن‌های SCC و NC ٨٥
جدول ۳-۱۲: آزمایش‌های انجام شده در فاز خمیری بتن‌های SCC و NC ٨٧
جدول ۳-۱۳: آزمایش‌های مرتبط با آزمایش‌های فاز سخت شده و خمیری ٨٧
جدول ٤-۱: مقایسه نتایج آزمایش‌های فاز خمیری طرح اختلاط‌های بتن خودتراکم با مقادیر مجاز ١٠٠
جدول ٤-۲: نتایج آزمایش اسلامپ طرحهای اختلاط بتن معمولی ١٠١
جدول ٤-۳: محدوده قابل قبول برای رفتار بتن خودتراکم در فاز خمیری ١٠١
جدول ٤-٤: طرح‌های منتخب و خلاصه نتایج آزمایش‌های فاز خمیری ١٠٧
جدول ٤-٥: بعضی مشخصات نسبی طرح‌های اختلاط بتن خودتراکم SCC ١٠٨
جدول ٤-٦: بعضی مشخصات نسبی طرح‌های اختلاط بتن معمولی ١١١
جدول ٤-۷: نتایج مقاومت فشاری و مدول الاستیسته طرح‌های SCC ١١٤
جدول ٤-۸: نتایج مقاومت فشاری و مدول الاستیسته طرح‌های NC ١١٦
جدول ٤-۹: مقاومت کششی و جذب آب حجمی طرح‌های اختلاط بتن معمولی ١١٨
جدول ٤-۱۰: مقاومت کششی و جذب آب حجمی طرح‌های اختلاط بتن خودتراکم ١١٨
جدول ٤-۱۱: مقادیر مجاز درصد جذب آب کوتاه مدت در شرایط مختلف محیطی ١١٩
جدول ٤-۱۲: محدوده پذیرش جذب آب موئینه بتن با دوام ١٢١
جدول ٥-۱: مشخصات طرح‌های اختلاط اجرایی بتن معمولی و خودتراکم در خط ۲ قطار شهری مشهد ١٢٧
جدول ٥-۲: قیمت اجزاء بتن در کارخانه قطعات پیش ساخته تونل خط ۲ مشهد ١٣٧
جدول ٥-۳: هزینه طرح اختلاطهای آزمایشگاهی بتن خودتراکم و بتن معمولی سه ماهه آخر ۱۳۹۱ ..... ١٣٩
جدول ٥-٤: هزینه فقط ساخت طرح‌های اختلاط اجرایی بتن خودتراکم و بتن معمولی در دو دوره ١٤٠