دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده مهندسی عمران و محیطزیست

رساله برای دریافت درجه دکتری تخصصی (Ph.D)

رشته مهندسی عمران- گرایش راه و ترابری

ارزیابی مشخصات آسفالت گرم با تکنولوژی کف قیر

نگارنده

لیلا هاشمیان

استاد راهنما

دکتر امیر کاووسی

شهریور ماه ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

خانم لیلا هاشمیان رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان **ارزیابی مشخصات فیزیکی آسفالت های نیمه گرم با تکنولوژی کف قیر** در تاریخ ۱۳۹۰/۶/۱۳ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه دکتری راه و ترابری پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر امیر کاووسی	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر ابوالفضل حسنی	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمود صفارزاده	استاد	
استاد ناظر	دکتر امیر رضا ممدوحی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر علی خدایی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر منصور فخری	استادیار	
استاد ناظر	دکتر امیر رضا ممدوحی	استادیار	

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ٤- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ٥- این آیین‌نامه در ٥ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/٤/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/٤/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱٥ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب.....لیلا هاشمیان.....دانشجوی رشته.....عمران-راه و ترابری..... ورودی سال تحصیلی...۱۳۸٦..... مقطع .....دکتری..... دانشکده عمران و محیط زیست متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا:.....

تاریخ: ۹۰/٦/۱۳

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته **مهندسی عمران – راه و ترابری** است که در سال **۱۳۹۰** در دانشکده **عمران و محیط زیست** دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر **امیر کاووسی**، مشاوره جناب آقای دکتر **ابوالفضل حسنی** از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **لیلا هاشمیان** دانشجوی رشته **مهندسی عمران – راه و ترابری** مقطع **دکتری** تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: **لیلا هاشمیان**

تاریخ و امضا: ۹۰/۶/۱۳

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی عمران و محیطزیست

رساله برای دریافت درجه دکتری تخصصی (Ph.D)
رشته مهندسی عمران- گرایش راه و ترابری

ارزیابی مشخصات آسفالت گرم با تکنولوژی کف قیر

نگارنده
لیلا هاشمیان

استاد راهنما
دکتر امیر کاووسی

استاد مشاور
دکتر ابوالفضل حسنی

شهریور ماه ۱۳۹۰

تقدیم به:

مادر بزرگوارم،

همسر و دختر عزیزم.

تقدیر و تشکر

بر خود واجب می‌دانم از تمام عزیزانی که انجام این پایان‌نامه بدون همراهی ایشان میسر نبود، بویژه استاد راهنمای محترم جناب آقای دکتر کاووسی، استاد مشاور محترم جناب آقای دکتر حسنی و استاد بزرگوار جناب آقای دکتر ممدوحی، کمال تشکر را بعمل آورم.

همچنین از زحمات بسیار جناب آقای مهندس گودرزی مسئول محترم آزمایشگاه راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس، آقایان مهندس رضایی و مهندس عبادی مسئولین محترم آزمایشگاه قیر و آسفالت مرکز مطالعات ژئوتکنیک و مقاومت مصالح شهرداری تهران و نیز همکاران محترم شرکت راه و ابنیه نوین آقایان مهندس ابوالمعالی و مهیار کاظمی کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

مخلوط‌های آسفالت گرم (WMA) که در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند، در دمایی کمتر از مخلوط‌های آسفالتی داغ (HMA) ولیکن با کیفیتی مشابه تولید و بعنوان لایه‌های روسازی اجرا می‌شوند. تولید این نوع مخلوط‌ها بر اساس کاهش کندروانی قیر به منظور امکان اختلاط آن با مصالح دانه‌ای در دمایی کمتر از مخلوط‌های داغ میسر می‌شود. از میان انواع روش‌های کاهش کندروانی قیر، تبدیل قیر به صورت کف قیر روشی است که افزایش کارایی قیر را بدون نیاز به هیچگونه افزودنی میسر می‌سازد. در این تحقیق، با هدف ارزیابی مشخصات آسفالت گرم کف قیری، دو روش متفاوت تولید مخلوط آسفالت گرم کف قیری مورد بررسی قرار گرفت. این روش‌ها عبارتند از: الف- تبدیل کل قیر مخلوط آسفالتی به کف قیر و ب- ترکیب دو نوع قیر شل و سفت که قیر اول بصورت گرم به مصالح درشت‌دانه افزوده شده و قیر دوم بصورت کف قیر به کل مخلوط اضافه می‌شود. نمونه‌های آسفالت گرم کف قیری در دماهای متفاوت تولید و به دو روش ضربه‌ای (چکش مارشال) و دورانی متراکم شدند. ویژگی‌های ظاهری و مقاومتی نمونه‌ها با استفاده از آزمایش مارشال تعیین و با محدوده مشخصات آسفالت داغ مشابه مورد مقایسه قرار گرفتند. به منظور بررسی حساسیت رطوبتی نمونه‌ها، از آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم بر روی نمونه‌های خشک و نمونه‌های اشباع استفاده شد. به منظور افزایش مقاومت در برابر رطوبت نمونه‌ها، تاثیر دو نوع افزودنی ضدعریان شدگی (شامل پودر آهک شکفته و یک نوع افزودنی مایع) مورد بررسی قرار گرفت. برای کنترل مقاومت نمونه‌های آسفالت گرم در برابر تغییر شکل، آزمایش شیار افتادگی چرخ بر روی نمونه‌های مخلوط آسفالت گرم کف قیری و نمونه‌های آسفالت داغ مشابه انجام پذیرفت.

نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که روش تراکم آزمایشگاهی بر ویژگی‌های نمونه‌های آسفالت گرم موثر بوده و نمونه‌های متراکم شده با چکش مارشال از حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات درجه حرارت تراکم نسبت به نمونه-های متراکم شده با دستگاه تراکم دورانی برخوردار بودند. همچنین کاهش دماهای اختلاط و تراکم باعث کاهش مقاومت‌های فشاری و کششی، افزایش حساسیت رطوبتی و کاهش مقاومت در برابر تغییر شکل نمونه‌های آسفالت گرم شدند. به کارگیری افزودنی‌های ضدعریان شدگی تا حد زیادی منجر به افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالت گرم در برابر رطوبت شدند و در این راستا استفاده از پودر آهک شکفته در افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل مخلوط‌های آسفالت گرم نیز سهم بسزایی داشت. نتایج بدست آمده از ویژگی‌های مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری تولید شده با یک نوع قیر نشان داد که این روش تا اندازه‌ای بر روش ترکیب دو نوع قیر برتری دارد؛ ضمن اینکه با انتخاب دمای مناسب اختلاط و تراکم و تعیین میزان و نوع افزودنی مناسب، امکان دستیابی به آسفالت گرم کف قیری با هر دو روش تولید با مشخصاتی درحد آسفالت داغ مشابه وجود داشت. با استفاده از نتایج آزمایشات و تحلیل واریانس متغیرهای بررسی شده، توصیه‌هایی برای طرح اختلاط مخلوط آسفالت گرم کف قیری در هر روش تولید بر اساس دستیابی به مشخصات آسفالت داغ مشابه ارائه شد.

کلمات کلیدی: آسفالت گرم،کف قیر، افزودنی، دما، طرح اختلاط، حساسیت رطوبتی، تغییر شکل.

فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحه**

فصل اول: کلیات **۱**

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- تعریف واژه‌های عمومی تحقیق ۳

۱-۳- تعریف مسئله ۳

۱-۴- ضرورت تحقیق ۴

۱-۵- فرضیات تحقیق ۴

۱-۶- اهداف تحقیق ۵

۱-۷- مفروضات و متغیرهای اصلی تحقیق ۷

۱-۸- محدودیت‌های تحقیق ۸

۱-۹- ساختار پایان‌نامه ۹

فصل دوم: مخلوط‌های آسفالتی گرم کف قیری (Warm Mix Asphalt Foam) **۱۰**

۲-۱- انواع مخلوط‌های آسفالتی ۱۱

۲-۱-۱- مخلوط‌های آسفالتی داغ (HMA) ۱۱

۲-۱-۲- مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) ۱۱

۲-۱-۳- مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم (HWMA) ۱۲

۲-۱-۴- مخلوط‌های آسفالتی سرد (CMA) ۱۲

۲-۲- جایگاه مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) در صنعت تولید آسفالت ۱۳

۲-۳- پیشینه مخلوط‌های آسفالت گرم (WMA) ۱۵

۲-۴- مزایای استفاده از مخلوط‌های آسفالتی گرم ۱۷

۲-۴-۱- کاهش مصرف انرژی ۱۸

۲-۴-۲- کاهش تولید آلاینده‌ها ۱۹

۲-۴-۳- کاهش کندروانی ۲۲

۲-۴-۳-۱- تسهیل در تراکم مخلوط ۲۲

۲-۴-۳-۲- امکان اجرا در هوای سرد ۲۳

عنوان **شماره صفحه**

۲-۴-۳-۳- افزایش فواصل حمل آسفالت ۲۳
۲-۴-۳-۴- کاهش شدت اکسید شدن قیر ۲۳
۲-۴-۳-۵- امکان استفاده بیشتر از تراشه‌های آسفالتی در مخلوط ۲۴
۲-۵- سابقه کاربرد مخلوط‌های آسفالت گرم ۲۴
۲-۶- انتخاب مکانیزم تولید آسفالت گرم در این تحقیق ۲۶
۲-۷- مخلوط‌های آسفالتی گرم کف قیری ۲۶
۲-۷-۱- کف قیر ۲۶
۲-۷-۲- مخلوط‌های تولید شده با استفاده از دو نوع قیر ۲۹
۲-۷-۲-۱- قیر شل ۳۰
۲-۷-۲-۲- قیر سفت ۳۱
۲-۷-۳- مخلوط آسفالت گرم کف قیری تولید شده با استفاده از یک نوع قیر ۳۳
۲-۸- بررسی روش‌های طرح اختلاط و ویژگی‌های رفتاری مخلوط های کف قیری ۳۷
۲-۸-۱- اهم تحقیقات انجام شده در زمینه مخلوط‌های گرم کف قیری ۳۷
۲-۸-۲- بررسی تاثیر روش‌های تراکم آزمایشگاهی بر ویژگی‌های مخلوط‌های آسفالت گرم ۴۸
۲-۸-۳- جمع بندی و نتیجه‌گیری ۵۳

فصل سوم: آزمایشات مصالح و طرح اختلاط **۵۶**
۳-۱- مقدمه ۵۷
۳-۲- آزمایشات مصالح سنگی ۵۷
۳-۲-۱- دانه بندی ۵۷
۳-۲-۲- آزمایش‌های بررسی مرغوبیت مصالح سنگی ۶۰
۳-۲-۳- وزن مخصوص مصالح سنگی ۶۱
۳-۳- آزمایشات قیر ۶۲
۳-۳-۱- قیرهای خالص ۶۲
۳-۳-۲- قیر ترکیبی ۶۳
۳-۴- کف قیر ۶۴
۳-۴-۱- تنظیم میزان آب ۶۵

عنوان	شماره صفحه

۳-۴-۲- بررسی خصوصیات کف قیر ۶۶
۳-۵- طرح اختلاط آسفالت داغ (HMA) ۶۹
۳-۵-۱- تهیه نمونه‌های آسفالت داغ با استفاده از دستگاه تراکم دورانی ۷۱
۳-۶- تولید مخلوط‌های آسفالت گرم ۷۲
۳-۶-۱- آسفالت گرم کف قیری با استفاده از دو نوع قیر ۷۳
۳-۶-۲- آسفالت گرم کف قیری با استفاده از یک نوع قیر ۷۴
۳-۶-۳- نمونه‌های آسفالت گرم کنترلی ۷۵
۳-۷- نتایج آزمایشات طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالت گرم (WMA) ۷۵
۳-۷-۱- مخلوط‌های آسفالتی گرم کف قیری تولید شده با دو نوع قیر ۷۵
۳-۷-۲- مخلوط‌های آسفالتی گرم کف قیری تولید شده با یک نوع قیر ۷۷
۳-۷-۳- مخلوط‌های آسفالتی گرم تولید شده با قیر ۷۰-۶۰ ۸۱
۳-۸- تحلیل نتایج ۸۲
۳-۸-۱- مقایسه تراکم پذیری آسفالت گرم کف قیری در روش‌های تراکم مختلف ۸۲
۳-۸-۲- تحلیل آماری نتایج آزمایشات طرح اختلاط ۸۷
۳-۸-۲-۱- مخلوط‌های آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB ۸۹
۳-۸-۲-۲- مخلوط‌های آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۷۰-۶۰ ۹۱
۳-۹- انتخاب دمای اختلاط و تراکم برای ادامه آزمایشات ۹۴

فصل چهارم: نتایج آزمایشات مقاومتی **۹۵**
۴-۱- آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم (ITT) ۹۶
۴-۱-۱- نتایج آزمایش ITS بر روی مخلوط‌های آسفالت داغ (HMA) ۹۸
۴-۱-۲- تعیین مقدار افزودنی‌های ضدعریان شدگی مخلوط‌های آسفالت داغ (HMA) ۱۰۰
۴-۱-۳- انجام آزمایش ITS روی مخلوط‌های آسفالت گرم (WMA) ۱۰۰
۴-۱-۳-۱- مخلوط آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۷۰-۶۰ ۱۰۱
۴-۱-۳-۲- مخلوط آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB ۱۰۴
۴-۱-۴- تحلیل نتایج آزمایش ITS ۱۰۶
۴-۱-۴-۱- مخلوط آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۷۰-۶۰ ۱۰۶

عنوان **شماره صفحه**

۴-۱-۴-۲- مخلوط آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB ۱۰۹
۴-۱-۵- تحلیل آماری نتایج آزمایش ITS ۱۱۰
۴-۱-۵-۱- مخلوط‌های آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB ۱۱۱
۴-۱-۵-۲- مخلوط‌های آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۷۰-۶۰ ۱۱۳
۴-۱-۶- انتخاب دماهای مناسب اختلاط و تراکم بر اساس نتایج آزمایش مقاومت کششی ۱۱۵
۴-۲- آزمایش شیار افتادگی چرخ (Wheel Tracking Test-WTT) ۱۱۹
۴-۲-۱- نتایج آزمایش شیار افتادگی چرخ ۱۲۳
۴-۲-۲- تعیین دمای اختلاط و تراکم بر اساس نتایج آزمایش شیار افتادگی چرخ ۱۲۷
۴-۳- جمع بندی نتایج آزمایشات مکانیکی ۱۲۹

فصل پنجم: نتایج و تحلیل **۱۳۰**
۵-۱- مقدمه ۱۳۱
۵-۲- انتخاب دمای نهایی اختلاط و تراکم ۱۳۱
۵-۲-۱- مخلوط‌های گرم کف قیری تولید شده با کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB ۱۳۱
۵-۲-۲- مخلوط‌های گرم کف قیری تولید شده با کف قیر ۷۰-۶۰ ۱۳۴
۵-۳- انتخاب روش مناسب تراکم ۱۳۶
۵-۴- مقایسه روش‌های تولید ۱۳۹
۵-۴-۱- مقاومت مارشال و فضای خالی مخلوط‌ها ۱۳۹
۵-۴-۲- مقایسه مقاومت مخلوط‌ها در برابر عریان شدگی ۱۴۲
۵-۴-۳- مقاومت در برابر تغییر شکل ۱۴۴
۵-۴-۴- نتیجه گیری ۱۴۴
۵-۵- توصیه‌هایی برای طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری ۱۴۶
۵-۵-۱- مخلوط‌های گرم تولید شده با کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB ۱۴۶
۵-۵-۲- مخلوط‌های گرم تولید شده با کف قیر ۷۰-۶۰ ۱۵۰

عنوان **شماره صفحه**

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات **۱۵۳**
۶-۱- خلاصه کار ۱۵۴
۶-۲- نوآوری‌های تحقیق ۱۵۴
۶-۳- نتایج تحقیق ۱۵۵
۶-۳-۱- نتایج مستقیم ۱۵۶
۶-۳-۲- نتایج جنبی ۱۵۹
۶-۴- پیشنهاد ادامه تحقیقات ۱۶۰

فهرست منابع **۱۶۱**

فهرست اشکال

عنوان **شماره صفحه**

شکل ۲-۱ طبقه‌بندی انواع مخلوط‌های آسفالتی بر اساس درجه حرارت تولید ۱۳
شکل ۲-۲ مقایسه مصرف سوخت در فرآیند تولید انواع آسفالت‌ها ۱۸
شکل ۲-۳ مقایسه آلاینده‌ها در مرحله تولید مخلوط‌های آسفالت گرم و آسفالت داغ ۲۱
شکل ۲-۴ مقایسه آلاینده‌های متصاعدشده در حین پخش مخلوط‌های آسفالتی گرم و داغ ۲۱
شکل ۲-۵ مشخصات تولید کف قیر ۲۸
شکل ۲-۶ نمونه‌ای از یک دستگاه آزمایشگاهی تولید کف قیر (WLB10) ۲۹
شکل ۲-۷ نحوه تولید کف قیر در دستگاه آزمایشگاهی WLB10 ۲۹
شکل ۲-۸ مقایسه مراحل تولید آسفالت گرم کف قیری(WMA) با آسفالت داغ متداول (HMA) ۳۲
شکل ۲-۹ تولید مخلوط گرم کف قیری در یک کارخانه آسفالت منقطع ۳۳
شکل ۲-۱۰ مراحل زمانی متداول تولید مخلوط آسفالت گرم کف قیری (با استفاده از قیرهای شل و سفت) در یک کارخانه آسفالت منقطع ۳۳
شکل ۲-۱۱ تجهیزات آسفالت گرم کف قیری نصب شده بر روی خشک‌کن کارخانه آسفالت ۳۵
شکل ۲-۱۲ نمونه‌ای از مقطع نازل سیستم تولید کف قیر ۳۵
شکل ۲-۱۳ سیستم تولید کف قیر شرکت گنکور ۳۶
شکل ۲-۱۴ سیستم تولید کف قیر آکوآبلاک شرکت ماکسام ۳۶
شکل ۲-۱۵ میزان پوشش سنگدانه‌ها در دماهای مختلف در مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم ۳۶
شکل ۲-۱۶ مقایسه شیار افتادگی در مخلوط‌های مختلف ۴۶
شکل ۲-۱۷ نتایج تراکم نمونه های ساخته شده از یک نوع مخلوط در دماهای مختلف ۵۳
شکل ۳-۱ مراحل انجام تحقیق ۵۷
شکل ۳-۲ منحنی دانه‌بندی انتخابی ۶۰
شکل ۳-۳ پوشش مصالح سنگی درشت دانه (بزرگتر از ۴/۷۵ میلیمتر) با قیر .V.B ۶۳
شکل ۳-۴ کف قیر تولید شده در آزمایشگاه ۶۴
شکل ۳-۵ تعیین دبی قیر ۵۰-۴۰ توسط دستگاه تولید کف قیر ۶۵
شکل ۳-۶ تعیین دبی قیر ۷۰-۶۰ توسط دستگاه تولید کف قیر ۶۶
شکل ۳-۷ نسبت انبساط و نیمه عمر کف قیر ۵۰-۴۰ ۶۷
شکل ۳-۸ نسبت انبساط و نیمه عمر کف قیر ۷۰-۶۰ ۶۸
شکل ۳-۹ مقادیر FI برای کف قیرهای ۷۰-۶۰ و ۵۰-۴۰ ۶۸
شکل ۳-۱۰ دماهای اختلاط و تراکم مخلوط داغ ۶۹
شکل ۳-۱۱ نتایج حاصل از آزمایشات طرح اختلاط مخلوط داغ ۷۰

عنوان **شماره صفحه**

شکل ۳-۱۲ دستگاه تراکم دورانی مورد استفاده ۷۱
شکل ۳-۱۳ نتایج وزن مخصوص نمونه‌های متراکم شده با دستگاه تراکم دورانی ۷۲
شکل ۳-۱۴ مصالح درشت و ریزدانه جداسازی شده برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالت گرم کف قیری ۷۴
شکل ۳-۱۵ نمونه مخلوط آسفالت گرم (WMA) تولید شده در $۱۰۰^{o}C$ ۷۴
شکل ۳-۱۶ مقایسه مقاومت مارشال مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری تولید شده با دو نوع قیر ۸۳
شکل ۳-۱۷ مقایسه فضاهای خالی مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری تولید شده با دو نوع قیر ۸۳
شکل ۳-۱۸ مقایسه مقاومت مارشال مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری تولید شده با یک نوع قیر ۸۵
شکل ۳-۱۹ مقایسه فضاهای خالی مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری تولید شده با یک نوع قیر ۸۵
شکل ۴-۱ نمونه‌های آماده شده برای آزمایش ITS ۹۸
شکل ۴-۲ شکست قطری نمونه در دستگاه ITS ۹۸
شکل ۴-۳ نتیجه ترکیب پودر آهک شکفته و پودر فنل فتالین ۹۹
شکل ۴-۴ مقادیر مقاومت کششی خشک برای مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری ۷۰-۶۰ ۱۰۷
شکل ۴-۵ مقادیر مقاومت کششی اشباع برای مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیر ۷۰-۶۰ ۱۰۷
شکل ۴-۶ مقادیر نسبت مقاومت کششی برای مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیر ۷۰-۶۰ ۱۰۸
شکل ۴-۷ مقادیر مقاومت کششی خشک برای مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB ۱۰۹
شکل ۴-۸ مقادیر مقاومت کششی اشباع برای مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB ۱۱۰
شکل ۴-۹ مقادیر نسبت مقاومت کششی برای مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB ۱۱۰
شکل ۴-۱۰ مقایسه نتایج آزمایش ITS مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری ۵۰-۴۰ و قیر VBحاوی ۲٪ پودر آهک شکفته با HMA مشابه ۱۱۷
شکل ۴-۱۱ مقایسه نتایج آزمایش ITS مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری ۵۰-۴۰ و قیر VB حاوی ۰/۵٪ افزودنی مایع با HMA مشابه ۱۱۷
شکل ۴-۱۲ مقایسه نتایج آزمایش ITS مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری ۷۰-۶۰ حاوی ۲٪ پودر آهک شکفته با HMA مشابه ۱۱۸
شکل ۴-۱۳ مقایسه نتایج آزمایش ITS مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری۷۰-۶۰ حاوی ۰/۵٪ افزودنی مایع با HMA مشابه ۱۱۸
شکل ۴-۱۴ کروکی دستگاه شیار افتادگی چرخ ۱۲۱
شکل ۴-۱۵ چرخ دستگاه شیار افتادگی چرخ ۱۲۱
شکل ۴-۱۶ قالب مورد استفاده در دستگاه شیار افتادگی چرخ ۱۲۲
شکل ۴-۱۷ نمونه آسفالت داغ ساخته شده برای انجام آزمایش شیار افتادگی ۱۲۲
شکل ۴-۱۸ نمایی از نمونهء تحت آزمایش در دستگاه شیار افتادگی چرخ ۱۲۲
شکل ۴-۱۹ نمونه‌ای از خروجی نرم افزار دستگاه خط افتادگی چرخ اروپایی ۱۲۳

عنوان **شماره صفحه**

شکل ۴-۲۰ نتیجه آزمایش شیار افتادگی مخلوط HMA ۱۲۴
شکل ۴-۲۱ نمونه مخلوط آسفالتی HMA پس از انجام آزمایش شیارافتادگی ۱۲۴
شکل۴-۲۲ نتایج آزمایش شیار افتادگی مخلوط آسفالت گرم کف قیری ۵۰-۴۰ و قیر VB حاوی آهک ۱۲۸
شکل۴-۲۳ نتایج آزمایش شیار افتادگی مخلوط آسفالت گرم کف قیری ۷۰-۶۰ حاوی آهک ۱۲۸
شکل ۵-۱ تغییرات فضای خالی نمونه‌های مخلوط آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۵۰-۴۰ و قیرVB،تراکم ضربه‌ای مارشال ۱۳۲
شکل ۵-۲ تغییرات فضای خالی نمونه‌های مخلوط آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB، تراکم دورانی ۱۳۲
شکل ۵-۳ نتایج آزمایشات مقاومت کششی بر روی مخلوط‌های آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB حاوی مواد افزودنی ۱۳۳
شکل ۵-۴ نتایج آزمایشات شیار افتادگی چرخ بر روی مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری حاوی پودر آهک ۱۳۴
شکل ۵-۵ تغییرات فضای خالی نمونه‌های آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۷۰-۶۰، تراکم ضربه‌ای مارشال ۱۳۵
شکل ۵-۶ تغییرات فضای خالی نمونه‌های آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۷۰-۶۰، تراکم دورانی ۱۳۵
شکل ۵-۷ نتایج آزمایشات مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۷۰-۶۰ و افزودنی‌ها ۱۳۶
شکل ۵-۸ فضاهای خالی مخلوط آسفالت گرم کف قیری ۵۰-۴۰ و قیر VB در دو روش تراکم ۱۳۷
شکل ۵-۹ مقاومت مارشال مخلوط آسفالت گرم کف قیری ۵۰-۴۰ و قیر VB در دو روش تراکم ۱۳۸
شکل ۵-۱۰ فضاهای خالی مخلوط آسفالت گرم کف قیری ۷۰-۶۰ در دو روش تراکم ۱۳۸
شکل ۵-۱۱ مقاومت مارشال مخلوط آسفالت گرم کف قیری ۷۰-۶۰ در دو روش تراکم ۱۳۹
شکل ۵-۱۲ مقاومت مارشال مخلوط‌های آسفالت گرم تولید شده با روش‌های مختلف و تراکم به روش ضربه‌ای مارشال ۱۴۰
شکل ۵-۱۳ فضاهای خالی مخلوط‌های آسفالت گرم تولید شده با روش‌های مختلف و تراکم به روش ضربه‌ای مارشال ۱۴۰
شکل ۵-۱۴ مقاومت مارشال مخلوط‌های آسفالت گرم تولید شده با روش‌های مختلف و تراکم به روش دورانی ۱۴۱
شکل ۵-۱۵ فضاهای خالی مخلوط‌های آسفالت گرم تولید شده با روش‌های مختلف و تراکم به روش دورانی ۱۴۲
شکل ۵-۱۶ حساسیت رطوبتی نمونه‌های دو مخلوط آسفالت گرم کف قیری در حالت عدم استفاده از افزودنی ۱۴۳
شکل ۵-۱۷ حساسیت رطوبتی نمونه‌های دو مخلوط آسفالت گرم کف قیری در حالت استفاده از ۲٪ آهک ۱۴۳
شکل ۵-۱۸ حساسیت رطوبتی نمونه‌های دو مخلوط آسفالت گرم کف قیری در حالت استفاده از ۰/۵٪ افزودنی مایع ۱۴۳
شکل ۵-۱۹ مقایسه مقادیر شیار افتادگی نمونه‌های دو مخلوط آسفالت گرم کف قیری ۱۴۵
شکل ۵-۲۰ انتخاب حداقل دمای اختلاط بر اساس منحنی کندروانی- درجه حرارت قیر شل ۱۴۸
شکل ۵-۲۱ انتخاب دمای تراکم بر اساس منحنی تغییرات فضای خالی در مقابل دمای تراکم ۱۴۸
شکل ۵-۲۲ انتخاب نوع و میزان افزودنی ضدعریان شدگی مناسب ۱۴۸
شکل ۵-۲۳ انتخاب نوع و میزان افزودنی مناسب برای افزایش مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل ۱۴۹

عنوان **شماره صفحه**

شکل ۵-۲۴ کنترل مقاومت کششی خشک مخلوط تولید شده با استفاده از افزودنی مناسب ۱۴۹
شکل ۵-۲۵ انتخاب دمای تراکم بر اساس منحنی تغییرات فضای خالی در مقابل دمای تراکم ۱۵۱
شکل ۵-۲۶ انتخاب نوع و میزان افزودنی مناسب برای افزایش مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل ۱۵۱
شکل ۵-۲۷ کنترل مقاومت کششی خشک مخلوط تولید شده با استفاده از افزودنی مناسب ۱۵۱

فهرست جداول

عنوان **شماره صفحه**

جدول ۱-۱ متغیرهای اصلی تحقیق در تولید آسفالت گرم کف قیری ۸
جدول ۲-۱ صرفه‌جویی در مصرف سوخت با استفاده از آسفالت گرم امولسیونی در کانادا ۱۹
جدول ۲-۲ میزان آلاینده‌های متصاعدشده در کارخانه‌های آسفالت متداول و آسفالت گرم ۲۰
جدول ۲-۳ میزان کاهش گازهای تولیدشده در مخلوط آسفالت گرم در مقایسه با آسفالت داغ مشابه ۲۲
جدول ۲-۴ سابقه کاربرد آسفالت گرم در کشورهای مختلف ۲۵
جدول ۲-۵ طبقه بندی قیرهای شل بر اساس کندروانی ۳۱
جدول ۲-۶ مقایسه نتایج آزمایشات رفتاری آسفالت گرم و داغ مشابه ۳۸
جدول ۲-۷ مقایسه ویژگی‌های آسفالت گرم کف قیر و آسفالت داغ مشابه ۳۹
جدول ۲-۸ مقایسه نتایج آزمایش کشش مستقیم دو نمونه آسفالت گرم و داغ مشابه ۴۰
جدول ۲-۹ مقایسه نتایج آزمایش کشش مستقیم و شیارافتادگی نمونه‌ها ۴۲
جدول ۲-۱۰ مقایسه نتایج آزمایشات نمونه‌های آسفالت گرم و داغ مشابه ۴۳
جدول ۲-۱۱ نتایج آزمایشات مقاومت کششی غیر مستقیم ۴۴
جدول ۲-۱۲ مشخصات قیرهای بدست آمده از نمونه‌های مغزه‌گیری شده ۴۵
جدول ۲-۱۳ نتایج آزمایشات مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آسفالت داغ و آسفالت گرم کف قیری مشابه ۴۷
جدول ۲-۱۴ مقایسه روش های تراکم آزمایشگاهی با تراکم صحرایی ۵۰
جدول ۲-۱۵ مقایسه ویژگی‌های رفتاری مخلوط‌های گرم کف قیری با آسفالت داغ مشابه ۵۵
جدول ۳-۱ دانه بندی مصالح سنگدانه‌ای ۶۰
جدول ۳-۲ نتایج آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی ۶۱
جدول ۳-۳ نتایج آزمایش‌های وزن مخصوص و جذب آب مصالح سنگی ۶۱
جدول ۳-۴ مشخصات قیرهای ۷۰-۶۰ و ۵۰-۴۰ مورد استفاده ۶۲
جدول ۳-۵ مشخصات قیر .V.B مورد استفاده ۶۲
جدول ۳-۶ درجه نفوذ قیرهای ترکیبی ۶۳
جدول ۳-۷ نسبت‌های انبساط و نیمه‌عمر کف قیر ۵۰-۴۰ ۶۶
جدول ۳-۸ نسبت‌های انبساط و نیمه‌عمر کف قیر ۷۰-۶۰ ۶۷
جدول ۳-۹ نتایج آزمایشات مارشال مخلوط آسفالت داغ (HMA) در قیر بهینه ۵/۸٪ ۶۹
جدول ۳-۱۰ وزن مخصوص نمونه‌های متراکم شده با دستگاه تراکم دورانی در دوران‌های مختلف ۷۲
جدول ۳-۱۱ مشخصات مخلوط WMA تولید شده با کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر .V.B (متراکم شده بوسیله چکش مارشال) ۷۶

عنوان **شماره صفحه**

جدول ۳-۱۲ مشخصات مخلوط‌های WMA تولید شده با کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر .V.B (متراکم شده بوسیله دستگاه تراکم دورانی) ۷۷

جدول ۳-۱۳ مشخصات مخلوط های WMA کف قیری ۷۰-۶۰ (متراکم شده بوسیله چکش مارشال) ۷۸

جدول ۳-۱۴ مشخصات مخلوط های WMA کف قیری ۷۰-۶۰ (متراکم شده بوسیله دستگاه تراکم دورانی) ۸۰

جدول ۳-۱۵ مشخصات مخلوط های WMA تولید شده با قیر ۷۰-۶۰ مایع ۸۱

جدول ۳-۱۶ نمونه‌ای از جدول آنالیز واریانس ۸۷

جدول ۳-۱۷ نتایج تحلیل واریانس برای مخلوط‌های تولید شده با کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB (متغیرهای مستقل: دمای اختلاط و تراکم) ۹۰

جدول ۳-۱۸ نتایج تحلیل رگرسیون مخلوط‌های کف قیری ۵۰-۴۰+ قیر VB ۹۱

جدول ۳-۱۹ نتایج تحلیل واریانس برای مخلوط‌های تولید شده با کف قیر ۷۰-۶۰ (متغیرهای مستقل: دمای اختلاط و تراکم) ۹۲

جدول ۳-۲۰ نتایج تحلیل رگرسیون مخلوط‌های کف قیری ۷۰-۶۰ ۹۲

جدول ۳-۲۱ نتایج تحلیل واریانس برای بررس تاثیر روش تراکم مخلوط‌های آسفالتی گرم ۹۳

جدول ۳-۲۲ حداقل دماهای تراکم قابل قبول هر دو نوع مخلوط WMA کف قیری ۹۴

جدول ۴-۱ نتایج آزمایش ITS بر روی نمونه‌های آسفالت داغ ۹۸

جدول ۴-۲ نتایج آزمایش ITS مخلوط آسفالت داغ حاوی افزودنی ۱۰۰

جدول ۴-۳ نتایج آزمایش ITS مخلوط آسفالت گرم کف قیری ۷۰-۶۰ ۱۰۲

جدول ۴-۴ نتایج آزمایش ITS آسفالت گرم کف قیری ۷۰-۶۰ حاوی ۲٪ پودر آهک ۱۰۳

جدول ۴-۵ نتایج آزمایش ITS آسفالت گرم کف قیری ۷۰-۶۰ حاوی ۰/۵٪ افزودنی مایع ۱۰۳

جدول ۴-۶ نتایج آزمایش ITS آسفالت آسفالت گرم کف قیری (کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB) ۱۰۵

جدول ۴-۷ نتایج آزمایش ITS آسفالت کف قیری ۵۰-۴۰+ قیر VB، حاوی ۲٪ پودر آهک ۱۰۵

جدول ۴-۸ نتایج آزمایش ITS آسفالت کف قیری ۵۰-۴۰+ قیر VB حاوی ۰/۵٪ افزودنی مایع ۱۰۶

جدول ۴-۹ تحلیل تاثیر دمای اختلاط و تراکم بر نتایج آزمایش ITS مخلوط‌های آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB ۱۱۱

جدول ۴-۱۰ تاثیر پودر آهک شکفته بر نتایج آزمایش ITS مخلوط‌های آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB ۱۱۲

جدول ۴-۱۱ تاثیر افزودنی مایع بر نتایج آزمایش ITS مخلوط‌های آسفالت گرم تولید شده باکف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB ۱۱۲

جدول ۴-۱۲ مقایسه تاثیر افزودنی مایع و پودر آهک بر نتایج آزمایش ITS مخلوط‌های آسفالت گرم تولید شده با کف قیر ۵۰-۴۰ و قیر VB ۱۱۳