

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تربیت مدرس

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست

پایان‌نامه‌ی دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران - گرایش راه و ترابری

**عنوان:**

**ارائه‌ی مدل بهینه‌ی تأثیر آهک هیدراته در کاهش حساسیت رطوبتی و شیارشدگی  
مخلوط‌های آسفالتی**

نگارنده :

**جواد بختیاری**

استاد راهنما :

**دکتر امیر کاووسی**

استاد مشاور :

**دکتر سید احسان سید ابریشمی**

شهریور ۱۳۹۲



بسمه تعالی

## تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای جواد بختیاری پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان ارائه مدل بهینه تاثیر آهک هیدراته در کاهش حساسیت رطوبتی و شیارشدگی مخلوط های آسفالتی در تاریخ ۱۳۹۲/۶/۱۷ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - راه و ترابری پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر امیر کاوسی	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر سیداحسان سید ابریشمی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر ابوالفضل حسینی	استاد	
استاد ناظر	دکتر ساسان افلاکی	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر امین میرزا بروجردیان	استادیار	

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

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی 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 که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان‌نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

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 استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله 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 حاصل از نتایج پایان‌نامه / رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه 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 حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.

نام و نام خانوادگی  
امضاء

رئیس هیأت

### آیین‌نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)‌های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

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

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

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

«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده در رشته **مهندسی عمران-راه و ترابری** است که در سال **۱۳۹۲** در دانشکده **مهندسی عمران و محیط زیست** دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر **امیر کاووسی**، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر **سید احسان سیدابریشمی** از آن دفاع شده است.»

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

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

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می‌کند 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، تأمین نماید.

ماده ۶: اینجانب **جواد بختیاری** دانشجوی رشته **مهندسی عمران-راه و ترابری** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی: **جواد بختیاری**

تاریخ و امضا: **۱۳۹۲/۷/۷**

**بختیاری**



دانشگاه تربیت مدرس  
دانشگاه مهندسی عمران و محیط زیست

پایان نامه‌ی دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران - گرایش راه و ترابری

**عنوان:**

**ارائه‌ی مدل بهینه‌ی تأثیر آهک هیدراته در کاهش حساسیت رطوبتی و شیارشدگی  
مخلوط‌های آسفالتی**

نگارنده :

**جواد بختیاری**

استاد راهنما :

**دکتر امیر کاووسی**

استاد مشاور :

**دکتر سید احسان سید ابریشمی**

شهریور ۱۳۹۲

## تقدیم به

آنکه علم او محیط به آنچه در پیش رو و آنچه در پشت سر است؛

مادم، فرشته ای که خدا از آسمان برایم فرستاد؛ او که دعای خیرش را بدرقه راهم کرد؛

پدر بزرگوارم، که در حریم انش بی پروا ترینم؛ و در همه حال، همراهی ام نمود؛

و

برادر و خواهرانم، که شیرینی تمام خطاتم هستند.

## تشکر و قدردانی

اکنون که با لطف و عنایت خداوند متان، نگارش این پایان‌نامه به پایان رسید، بر خود لازم می‌دارم که از زحمات، حمایت‌ها و تشویق‌های افراد بزرگواری که در تحقق این امر مرا یاری نمودند تشکر نمایم.

در ابتدای امر، خداوند را شاکرم که لطف او شامل من شد تا دریچه‌ای از علم بر من گشوده شود. سپس از **دکتر امیر کاووسی و دکتر سید احسان سید ابریشمی** نهایت سپاس و قدردانی را دارم که بی‌وقفه بر راهنمایی و مشاوره‌ی من تلاش نمودند. ایشان بر تمام مزاحمت‌های من صبوری نمودند و بی‌دریغ پاسخ‌گوی پرسش‌های من در تمامی ایام سال و اوقات شبانه‌روز بودند. از خداوند برای ایشان بهترین جایگاه‌ها را خواستارم. از آقایان، **دکتر ابوالفضل حسنی و دکتر ساسان افلاکی** که با داوری و مطالعه‌ی این نگارش در بهبود محتوای آن به بنده کمک نمودند، سپاسگزارم. همچنین از سایر اساتید محترم گروه راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس، آقایان **دکتر بروجردیان، دکتر صفارزاده و دکتر ممدوحی** تشکر کرده و از آقایان مهندس برقبانی، مهندس رسولی، مهندس قربانی، مهندس کریمی، مهندس سلطانی و نیز پرسنل محترم آزمایشگاه‌های فنی و مکانیک خاک و ژئوتکنیک شهرداری تهران که در انجام این پایان‌نامه مرا یاری نمودند، سپاسگزارم.

جواد بختیاری

تابستان ۱۳۹۲



## چکیده

عریان‌شدگی و شیارشدگی از جمله خرابی‌های مهمی هستند که در روسازی‌های آسفالتی رخ می‌دهند. حساسیت رطوبتی تمایل مخلوط‌های آسفالتی به عریان‌شدگی است که می‌تواند مقدمه‌ای برای ایجاد خرابی‌هایی از قبیل ترک خوردگی، شن‌زدگی و به ویژه شیارشدگی باشد. افزودن آهک هیدراته به عنوان روشی برای کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی پذیرفته شده است؛ اما تأثیر آهک هیدراته به عنوان یک ماده‌ی افزودنی چندمنظوره (جهت بهبود همزمان حساسیت رطوبتی و شیارشدگی)، توسط محققین به طور کامل ارزیابی نشده است. در تحقیق حاضر مصالح سنگی عمدتاً سیلیسی بوده که از دو کارخانه‌ی آسفالت واقع در غرب و شرق شهر تهران تهیه شدند. قیر ۶۰-۷۰ مورد نیاز از پالایشگاه‌های اصفهان و تهران تهیه و آزمایش‌های مورد نیاز بر روی آن‌ها انجام شد. سه نوع مخلوط آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف آهک هیدراته (۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزن سنگدانه‌ها) تحت عنوان مخلوط آسفالتی اصلاح شده، و یک نوع مخلوط آسفالتی شاهد (بدون آهک هیدراته) در محدوده‌ی دمایی ۴۰ الی ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، جهت بررسی همزمان اثر دما و ماده‌ی افزودنی بر روی حساسیت رطوبتی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی آزمایش شدند. پس از تعیین درصد قیر بهینه به روش مارشال، به بررسی اثر افزودنی آهک هیدراته بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها با استفاده از آزمایش‌های آب جوشان (ASTM D-3625) و آزمایش‌های مقاومتی میزان اثر چرخ (AASHTO T-324)، مقاومت کششی غیرمستقیم (AASHTO T-283) و پارامتر نسبت مارشال (ASTM D-1559) و نیز شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش‌های میزان اثر چرخ (B.S. 598A) و پارامتر نسبت مارشال (ASTM D-1559) پرداخته شد. بررسی همزمان حساسیت رطوبتی و شیارشدگی نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی بدون آهک هیدراته که مستعد حساسیت رطوبتی بودند، در برابر پدیده‌ی شیارشدگی نیز عملکرد ضعیفی داشتند؛ لذا حساسیت رطوبتی مقدمه‌ای برای خرابی‌هایی از قبیل شیارشدگی است. در این پژوهش به لحاظ آماری و آزمایشگاهی نشان داده شد که افزودن آهک هیدراته به مخلوط آسفالتی باعث افزایش همزمان مقاومت در برابر پدیده‌های عریان‌شدگی و شیارشدگی به ترتیب به میزان حدود ۵۵ و ۳۵ درصد، نسبت به نمونه شاهد گردید؛ لذا این ماده می‌تواند به عنوان یک افزودنی چندمنظوره در کشور مورد استفاده قرار گیرد. همچنین مشخص شد که استفاده از آهک هیدراته در حالت اشباع شرایط بهتری را در مقایسه با حالت خشک نتیجه داده است.

**کلید واژه‌ها:** مخلوط آسفالتی گرم، حساسیت رطوبتی، شیارشدگی، آهک هیدراته، دما.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول - مقدمه و کلیات.....
۲	۱-۱- پیشگفتار.....
۳	۲-۱- تعریف مسئله و ضرورت انجام تحقیق.....
۳	۳-۱- نوآوری تحقیق.....
۴	۴-۱- اهداف تحقیق.....
۵	۵-۱- فرضیه‌ها.....
۵	۶-۱- فرض‌ها.....
۵	۷-۱- ساختار تحقیق.....
۶	فصل دوم - مبانی نظری و پیشینه‌ی تحقیق.....
۷	۱-۲- مقدمه.....
۷	۲-۲- قیر.....
۷	۱-۲-۲- ساختار شیمیایی قیر.....
۷	۲-۲-۲- خصوصیات فیزیکی قیر.....
۹	۱-۲-۲-۲- دوام.....
۹	۲-۲-۲-۲- سخت‌شدگی قیر.....
۱۰	۳-۲-۲-۲- حساسیت حرارتی قیر.....
۱۱	۳-۲-۲- رئولوژی قیر.....
۱۲	۴-۲-۲- مواد افزودنی به قیر و اثرات آن‌ها.....
۱۳	۳-۲-۲- فیلر.....
۱۴	۱-۳-۲- آهک هیدراته و مکانیزم‌های عملکرد آن.....
۱۶	۲-۳-۲- مزایای استفاده از آهک هیدراته.....

۱۶	۲-۳-۱-۱- مقدمه
۱۷	۲-۳-۲- مقاومت در برابر پدیده‌ی حساسیت رطوبتی
۱۸	۲-۳-۳- مقاومت در برابر شیارشدگی جای چرخ
۱۹	۲-۳-۳- مقایسه‌ی عملکرد آهک هیدراته با دیگر مواد افزودنی
۲۲	۲-۳-۴- روش‌های افزودن آهک هیدراته به مخلوط‌های آسفالتی
۲۶	۲-۴- تأثیر مخلوط قیر-فیلر آهک هیدراته بر عملکرد مخلوط آسفالتی
۲۸	۲-۵- حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی
۲۸	۲-۵-۱- مکانیزم‌های پدیده‌ی حساسیت رطوبتی
۲۹	۲-۵-۱-۱- انفصال
۳۰	۲-۵-۱-۲- جابجایی
۳۰	۲-۵-۱-۳- تعلیق خودبخودی (امولسیون شدن)
۳۱	۲-۵-۱-۴- فشار منفذی
۳۱	۲-۵-۱-۵- گسیختگی لایه‌ی نازک قیر
۳۱	۲-۵-۱-۶- آب شستگی (فرسایش هیدرولیکی)
۳۲	۲-۵-۲- تئوری‌های حساسیت رطوبتی (نظریه‌های حساسیت رطوبتی)
۳۲	۲-۵-۲-۱- تئوری مکانیکی
۳۲	۲-۵-۲-۲- تئوری ترمودینامیک و انرژی سطحی
۳۳	۲-۵-۲-۳- تئوری واکنش شیمیایی
۳۳	۲-۵-۲-۴- تئوری جهت‌گیری مولکولی
۳۳	۲-۵-۲-۵- خاصیت اسمزی
۳۳	۲-۵-۲-۶- تئوری حباب‌زدگی و گودافتادگی
۳۴	۲-۵-۳- عوامل موثر در بروز پدیده‌ی حساسیت رطوبتی
۳۴	۲-۵-۳-۱- سنگدانه‌ها
۳۵	۲-۵-۳-۲- قیر
۳۶	۲-۵-۳-۳- نوع و میزان فیلر

- ۳۶.....۲-۵-۳-۴- گرد و غبار.....
- ۳۷.....۲-۵-۳-۵- نوع آسفالت.....
- ۳۷.....۲-۵-۳-۶- ترک اجرایی.....
- ۳۷.....۲-۵-۳-۷- تراکم.....
- ۳۷.....۲-۵-۴- عوامل کاهش دهنده‌ی حساسیت رطوبتی.....
- ۳۸.....۲-۵-۴-۱- مواد ضدعریان‌شدگی مایع.....
- ۳۸.....۲-۵-۴-۲- مواد پلیمری و پودر لاستیک.....
- ۳۹.....۲-۵-۴-۳- آهک هیدراته.....
- ۳۹.....۲-۵-۵- آزمایش‌های ارزیابی حساسیت رطوبتی.....
- ۴۰.....۲-۵-۵-۱- آزمایش‌های کیفی.....
- ۴۰.....۲-۵-۵-۲- آزمایش‌های کمی و مقاومتی.....
- ۴۱.....۲-۶- شیارشدگی.....
- ۴۱.....۲-۶-۱- مکانیزم‌های پدیده‌ی شیارشدگی.....
- ۴۳.....۲-۶-۲- عوامل مؤثر در ایجاد پدیده‌ی شیارشدگی.....
- ۴۴.....۲-۶-۱- دانه‌بندی.....
- ۴۴.....۲-۶-۲- درصد فضای خالی سنگدانه‌ها.....
- ۴۵.....۲-۶-۳- شکل و بافت سطحی ذرات.....
- ۴۶.....۲-۶-۴- شکستگی و گوشه‌داری مصالح درشت‌دانه.....
- ۴۷.....۲-۶-۵- شکستگی و گوشه‌داری مصالح ریزدانه.....
- ۴۷.....۲-۶-۶- سنگدانه‌های دراز و پولکی.....
- ۴۷.....۲-۶-۷- سختی سنگدانه‌ها.....
- ۴۸.....۲-۶-۸- ماستیک فیلر-قییر.....
- ۴۸.....۲-۶-۹- قییر.....
- ۴۹.....۲-۶-۱۰- دما.....
- ۵۰.....۲-۷- روش‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری شیارشدگی.....

۵۰	۱-۷-۲- مقدمه
۵۱	۲-۷-۲- آزمایش های شیارشدگی (وبلتراک)
۵۱	۱-۲-۷-۲- آزمایش شیارشدگی چرخ هامبورگ
۵۲	۲-۲-۷-۲- آزمایش شیارشدگی چرخ اروپایی
۵۲	۳-۲-۷-۲- آزمایش شیارشدگی چرخ مؤسسه LCPC فرانسه
۵۳	۳-۷-۲- شاخص های اندازه گیری و بررسی پدیده ی شیارشدگی
۵۴	۴-۷-۲- مقایسه ی شرایط شیارشدگی آزمایشگاهی و جاده ای
۵۷	۸-۲- مروری بر مطالعات صورت گرفته در زمینه ی عملکرد مخلوط های آسفالتی حاوی آهک هیدراته
۶۳	فصل سوم- روش تحقیق
۶۴	۱-۳- چهار چوب تحقیق
۶۷	۲-۳- آزمایش های مصالح سنگی
۶۷	۱-۲-۳- دانه بندی
۶۸	۲-۲-۳- وزن مخصوص مصالح سنگی
۶۹	۳-۲-۳- آزمایش های مرغوبیت مصالح سنگی
۶۹	۴-۲-۳- آزمایش های ساختاری فیلر مصالح سنگی و آهک هیدراته
۷۰	۱-۴-۲-۳- آزمایش میکروسکوپ الکترونی SEM (Scanning Electron Microscope)
۷۳	۲-۴-۲-۳- آنالیز XRD و XRF
۷۵	۳-۳- آزمایش های قیر خالص
۷۵	۱-۳-۳- تعیین مشخصات قیر مصرفی
۷۷	۴-۳- آزمایش های مخلوط آسفالتی
۷۷	۱-۴-۳- آزمایش مارشال (تعیین درصد قیر بهینه و نسبت مارشال)
۷۸	۱-۱-۴-۳- ساخت نمونه های آزمایش مارشال
۷۸	۱-۱-۱-۴-۳- تعیین دمای اختلاط و تراکم
۷۹	۲-۱-۱-۴-۳- محاسبه ی حداکثر وزن مخصوص تئوریک
۸۰	۳-۱-۱-۴-۳- تعیین وزن مخصوص واقعی نمونه های مارشال

- ۳-۴-۱-۴- تعیین استقامت و روانی.....۸۰
- ۳-۴-۱-۵- تعیین درصد فضای خالی مخلوط کوبیده شده.....۸۱
- ۳-۴-۱-۶- تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی.....۸۱
- ۳-۴-۱-۲- تعیین میزان قیر بهینه.....۸۲
- ۳-۴-۱-۳- تعیین نسبت مارشال و مقاومت باقی مانده.....۸۲
- ۳-۴-۲- آزمایش های مخلوط فیلر-قیر.....۸۲
- ۳-۴-۳- آزمایش آب جوشان (ASTM D3625).....۸۲
- ۳-۴-۴- آزمایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر حساسیت رطوبتی (AASHTO T283).....۸۳
- ۳-۴-۵- آزمایش میزان اثر چرخ (ویلتراک).....۸۶
- ۳-۴-۵-۱- دستگاه آزمایش میزان اثر چرخ موجود در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان تهران.....۸۶
- ۳-۴-۵-۲- دستگاه آزمایش میزان اثر چرخ آزمایشگاه ژئوتکنیک شهرداری تهران.....۸۷
- ۳-۴-۵-۳- ساخت دال های آسفالتی برای انجام آزمایش میزان اثر چرخ.....۸۸
- ۳-۵-۵- تحلیل آماری داده های بدست آمده از آزمایش ها.....۹۰
- فصل چهارم- ارائه ی نتایج آزمایشگاهی.....۹۲
- ۴-۱- مقدمه.....۹۳
- ۴-۲- نتایج آزمایش های مخلوط فیلر-قیر.....۹۳
- ۴-۲-۱- نتایج آزمایش های مخلوط قیر و فیلر آهک هیدراته (برای مصالح شرق تهران).....۹۳
- ۴-۲-۲- نتایج آزمایش های مخلوط قیر و فیلر آهک هیدراته (برای مصالح غرب تهران).....۹۶
- ۴-۳- نتایج آزمایش مارشال.....۹۹
- ۴-۴- نتایج آزمایش های حساسیت رطوبتی.....۱۰۲
- ۴-۴-۱- آزمایش آب جوشان.....۱۰۲
- ۴-۴-۲- آزمایش نسبت مارشال و استقامت باقی مانده.....۱۰۲
- ۴-۴-۳- آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم.....۱۱۳
- ۴-۴-۴- آزمایش میزان اثر چرخ (ویلتراک).....۱۱۷
- ۴-۵- ارائه ی مدل های پیش بینی حساسیت رطوبتی.....۱۲۷

۱۳۵.....	۴-۵- نتایج آزمایش های شیارشدگی.....
۱۳۵.....	۴-۵-۱- آزمایش نسبت مارشال.....
۱۴۲.....	۴-۵-۲- آزمایش میزان اثر چرخ (ویلتراک).....
۱۴۹.....	۴-۵-۳- آرائه‌ی مدل‌های پیش‌بینی شیارشدگی.....
۱۵۳.....	فصل پنجم - جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۱۵۴.....	۵-۱- مقدمه.....
۱۵۵.....	۵-۲- خلاصه‌ی نتایج.....
۱۵۹.....	۵-۳- نتیجه‌گیری.....
۱۶۱.....	۵-۴- آرائه‌ی پیشنهادات.....
۱۶۲.....	فصل ششم - فهرست مراجع.....

## فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول (۱-۲) ساختار شیمیایی انواع مختلف نفت خام.....	۸
جدول (۲-۲) عناصر اصلی تشکیل دهنده‌ی قیر.....	۸
جدول (۳-۲) روش‌های مختلف افزودن آهک هیدراته به مخلوط آسفالتی در کشورهای مختلف.....	۲۴
جدول (۴-۲) تعیین منبع شیاردگی بر اساس شکل پروفیل عرضی سطح روسازی.....	۴۲
جدول (۵-۲) کاربرد آهک هیدراته در مخلوط‌های آسفالتی در اروپا.....	۶۲
جدول (۱-۳) دانه‌بندی منتخب مصالح سنگی مطابق نشریه‌ی ۲۳۴.....	۶۷
جدول (۲-۳) وزن مخصوص مصالح سنگی منتخب.....	۶۸
جدول (۳-۳) مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده.....	۶۹
جدول (۴-۳) مشخصات هندسی ذرات فیلر مورد استفاده در تحقیق.....	۷۱
جدول (۵-۳) نتایج تحلیل XRF آهک هیدراته و فیلر مصالح سنگی مورد استفاده.....	۷۴
جدول (۶-۳) نتایج آزمایش‌های قیر خالص ۶۰-۷۰ پالایشگاه تهران.....	۷۵
جدول (۷-۳) نتایج آزمایش‌های قیر خالص ۶۰-۷۰ پالایشگاه اصفهان.....	۷۶
جدول (۱-۴) نسبت‌های انتخابی فیلر به قیر مربوط به آهک هیدراته (شرق تهران).....	۹۳
جدول (۲-۴) نتایج آزمایش‌های فیزیکی مخلوط‌های قیر حاوی فیلر آهک هیدراته (شرق تهران).....	۹۴
جدول (۳-۴) نسبت‌های انتخابی فیلر به قیر مربوط به فیلر آهک هیدراته (غرب تهران).....	۹۶
جدول (۴-۴) نتایج آزمایش‌های مخلوط‌های قیر و فیلر آهک هیدراته (غرب تهران).....	۹۷
جدول (۵-۴) نتایج مربوط به آزمایش آب جوشان برای مصالح سنگی غرب و شرق تهران.....	۱۰۳
جدول (۶-۴) نتایج پارامتر نسبت مارشال در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای مصالح غرب تهران.....	۱۰۵
جدول (۷-۴) نتایج پارامتر نسبت مارشال در دمای ۴۵ درجه‌ی سانتی‌گراد برای مصالح غرب تهران.....	۱۰۵
جدول (۸-۴) استقامت و نسبت مارشال باقی‌مانده در دو دمای ۴۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد برای مصالح غرب تهران.....	۱۰۵
جدول (۹-۴) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص نسبت مارشال حالت اشباع در دمای ۴۵°C.....	۱۰۷



جدول (۴-۱۰) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص نسبت مارشال حالت خشک در دمای ۴۵°C.....۱۰۷

جدول (۴-۱۱) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص نسبت مارشال حالت اشباع در دمای ۶۰°C.....۱۰۸

جدول (۴-۱۲) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص نسبت مارشال حالت خشک در دمای ۶۰°C.....۱۰۸

جدول (۴-۱۳) نتایج پارامتر نسبت مارشال در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای مصالح شرق تهران.....۱۰۹

جدول (۴-۱۴) نتایج پارامتر نسبت مارشال در دمای ۴۵ درجه‌ی سانتی‌گراد برای مصالح شرق تهران.....۱۰۹

جدول (۴-۱۵) استقامت و نسبت مارشال باقی‌مانده در دو دمای ۴۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد برای مصالح شرق تهران.....۱۰۹

جدول (۴-۱۶) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص نسبت مارشال حالت اشباع در دمای ۴۵°C.....۱۱۱

جدول (۴-۱۷) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص نسبت مارشال حالت خشک در دمای ۴۵°C.....۱۱۱

جدول (۴-۱۸) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص نسبت مارشال حالت اشباع در دمای ۶۰°C.....۱۱۲

جدول (۴-۱۹) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص نسبت مارشال حالت خشک در دمای ۶۰°C.....۱۱۲

جدول (۴-۲۰) نتایج آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم برای مصالح غرب تهران.....۱۱۴

جدول (۴-۲۱) نتایج آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم برای مصالح شرق تهران.....۱۱۴

جدول (۴-۲۲) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص TSR با استفاده از توزیع t (مصالح غرب تهران).....۱۱۶

جدول (۴-۲۳) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص TSR با استفاده از توزیع t (مصالح شرق تهران).....۱۱۶

جدول (۴-۲۴) نتایج آزمایش میزان اثر چرخ در دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در دو حالت خشک و اشباع.....۱۱۸

جدول (۴-۲۵) نتایج آزمایش میزان اثر چرخ در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در دو حالت خشک و اشباع.....۱۱۸

جدول (۴-۲۶) نتایج آزمایش میزان اثر چرخ در دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در دو حالت خشک و اشباع.....۱۲۱

جدول (۴-۲۷) نتایج آزمایش میزان اثر چرخ در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در دو حالت خشک و اشباع.....۱۲۱

جدول (۴-۲۸) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص عمق شیارشدگی در حالت اشباع در دمای ۴۰°C.....۱۲۵

جدول (۴-۲۹) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص عمق شیارشدگی در حالت خشک در دمای ۴۰°C.....۱۲۵

جدول (۴-۳۰) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص عمق شیارشدگی در حالت اشباع در دمای ۶۰°C.....۱۲۶

جدول (۴-۳۱) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص عمق شیارشدگی در حالت خشک در دمای ۶۰°C.....۱۲۶

جدول (۴-۳۲) خروجی نرم‌افزار Mini Tab به‌منظور تحلیل آماری مدل‌های حساسیت رطوبتی مصالح غرب.....۱۲۷

جدول (۴-۳۳) خروجی نرم‌افزار Mini Tab به‌منظور تحلیل آماری مدل‌های حساسیت رطوبتی مصالح شرق.....۱۲۸

- جدول (۳۴-۴) تحلیل آماری رابطه‌ی بین نتایج آزمایش‌های حساسیت رطوبتی (مصالح غرب)..... ۱۳۳
- جدول (۳۵-۴) تحلیل آماری رابطه‌ی بین نتایج آزمایش‌های حساسیت رطوبتی (مصالح شرق)..... ۱۳۴
- جدول (۳۶-۴) نتایج آزمایش نسبت مارشال در دمای ۴۵ درجه‌ی سانتی‌گراد برای مصالح غرب تهران..... ۱۳۵
- جدول (۳۷-۴) نتایج آزمایش نسبت مارشال در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای مصالح غرب تهران..... ۱۳۵
- جدول (۳۸-۴) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص نسبت مارشال حالت خشک در دمای ۴۵°C..... ۱۳۸
- جدول (۳۹-۴) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص نسبت مارشال حالت خشک در دمای ۶۰°C..... ۱۳۸
- جدول (۴۰-۴) نتایج پارامتر نسبت مارشال در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای مصالح شرق تهران..... ۱۳۹
- جدول (۴۱-۴) نتایج پارامتر نسبت مارشال در دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای مصالح شرق تهران..... ۱۳۹
- جدول (۴۲-۴) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص نسبت مارشال حالت خشک در دمای ۴۵°C..... ۱۴۱
- جدول (۴۳-۴) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص نسبت مارشال حالت خشک در دمای ۶۰°C..... ۱۴۲
- جدول (۴۴-۴) نتایج آزمایش میزان اثر چرخ در دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای مصالح غرب تهران..... ۱۴۳
- جدول (۴۵-۴) نتایج آزمایش میزان اثر چرخ در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای مصالح غرب تهران..... ۱۴۳
- جدول (۴۶-۴) نتایج آزمایش میزان اثر چرخ در دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای مصالح شرق تهران..... ۱۴۶
- جدول (۴۷-۴) نتایج آزمایش میزان اثر چرخ در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای مصالح شرق تهران..... ۱۴۶
- جدول (۴۸-۴) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص عمق شیارشدگی در دمای ۴۰°C..... ۱۴۸
- جدول (۴۹-۴) بررسی آماری اثر آهک هیدراته بر روی شاخص عمق شیارشدگی در دمای ۶۰°C..... ۱۴۹
- جدول (۵۰-۴) خروجی نرم افزار Mini Tab به‌منظور تحلیل آماری مدل‌های شیارشدگی مصالح غرب تهران..... ۱۵۰
- جدول (۵۱-۴) خروجی نرم افزار Mini Tab به‌منظور تحلیل آماری مدل‌های شیارشدگی مصالح شرق تهران..... ۱۵۰
- جدول (۵۲-۴) تحلیل آماری رابطه‌ی بین نتایج آزمایش‌های شیارشدگی اشاره شده در شکل‌های (۴-۴۶) تا (۴-۴۹)..... ۱۵۲

## فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- 
- شکل (۱-۲) سخت‌شدگی قیر پس از قرار گرفتن در معرض دمای بالا..... ۱۰
- شکل (۲-۲) حساسیت حرارتی دو نوع قیر مصرفی در این تحقیق با درجه نفوذ مشابه..... ۱۰
- شکل (۳-۲) پاسخ مکانیکی مصالح الاستیک، ویسکوز و ویسکو الاستیک..... ۱۸
- شکل (۴-۲) مقایسه‌ی اثر افزودنی‌ها در کاهش شیارشدگی..... ۱۸
- شکل (۵-۲) تأثیر نسبی افزودنی‌ها در از بین بردن یا کاهش مشکلات رطوبتی..... ۱۹
- شکل (۶-۲) تأثیر افزودنی‌ها بر خرابی رطوبتی (آزمایش ذوب و انجماد پدستال)..... ۲۰
- شکل (۷-۲) اثر افزودنی‌های مختلف در بهبود مشکلات رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی..... ۲۰
- شکل (۸-۲) اثر افزودنی‌های EVA، SBS و آهک هیدراته بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی..... ۲۱
- شکل (۹-۲) مقایسه‌ی اثر افزودنی‌های سیمان و آهک هیدراته بر نسبت مارشال و مقاومت باقی‌مانده‌ی مخلوط-های آسفالتی..... ۲۲
- شکل (۱۰-۲) اثر افزودنی آهک هیدراته و نوع افزودن آن در شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی..... ۲۵
- شکل (۱۱-۲) روش‌های مختلف نفوذ آب به داخل سیستم روسازی..... ۲۹
- شکل (۱۲-۲) منبع شیارشدگی بر اساس شکل پروفیل عرضی سطح روسازی..... ۴۲
- شکل (۱۳-۲) نمودار جریان به‌منظور تعیین منبع خرابی شیارشدگی..... ۴۳
- شکل (۱۴-۲) مقاومت خزشی مخلوط آسفالتی با تغییرات درصد شکستگی..... ۴۶
- شکل (۱۵-۲) تأثیر پارامتر  $G^*$  بر پدیده‌ی شیارشدگی..... ۴۹
- شکل (۱۶-۲) اهمیت بحث دما در وقوع پدیده‌ی شیارشدگی..... ۴۹
- شکل (۱۷-۲) مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی با شیارشدگی در شرایط واقعی جاده..... ۵۵
- شکل (۱۸-۲) مقایسه‌ی نتایج شیارشدگی بدست آمده از آزمایشگاه و شرایط واقعی جاده..... ۵۵
- شکل (۱۹-۲) نتایج شیارشدگی بدست آمده از آزمایشگاه و شرایط واقعی جاده..... ۵۶

- شکل (۲-۲۰) پیش‌بینی اثر درصدهای مختلف آهک هیدراته بر میزان شیارشدگی در طول ۲۰ سال عمر روسازی، با استفاده از نرم‌افزار MEPDG..... ۵۸
- شکل (۲-۲۱) اثر آهک هیدراته بر بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی..... ۵۹
- شکل (۲-۲۲) اثر دانه‌بندی و ماده‌ی افزودنی در حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی..... ۶۱
- شکل (۳-۱) نمودار جریان طرح تحقیق برای بررسی پدیده‌ی حساسیت رطوبتی..... ۶۵
- شکل (۳-۲) نمودار جریان طرح تحقیق برای بررسی پدیده‌ی شیارشدگی..... ۶۶
- شکل (۳-۳) نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی منتخب در محدوده‌ی نشریه‌ی ۲۳۴..... ۶۸
- شکل (۳-۴) میکروسکوپ الکترونی مورد استفاده در تحقیق حاضر..... ۷۱
- شکل (۳-۵) دستگاه لایه‌نشانی طلای مورد استفاده در تحقیق حاضر..... ۷۱
- شکل (۳-۶) تصویر آهک هیدراته گرفته شده با دستگاه SEM..... ۷۲
- شکل (۳-۷) تصویر فیلر مصالح سنگی غرب تهران گرفته شده با دستگاه SEM..... ۷۲
- شکل (۳-۸) تصویر فیلر مصالح سنگی شرق تهران گرفته شده با دستگاه SEM..... ۷۲
- شکل (۳-۹) نتیجه‌ی تحلیل XRD برای فیلر آهک هیدراته..... ۷۳
- شکل (۳-۱۰) نتیجه‌ی تحلیل XRD برای فیلر مصالح سنگی شرق تهران..... ۷۳
- شکل (۳-۱۱) نتیجه‌ی تحلیل XRD برای فیلر مصالح سنگی غرب تهران..... ۷۳
- شکل (۳-۱۲) نمودار دما-ویسکوزیته برای قیر پالایشگاه اصفهان..... ۷۸
- شکل (۳-۱۳) نمودار دما-ویسکوزیته برای قیر پالایشگاه تهران..... ۷۸
- شکل (۳-۱۴) دستگاه آزمایش میزان اثر چرخ ماکروس (موجود در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک)..... ۸۷
- شکل (۳-۱۵) دستگاه آزمایش میزان اثر چرخ اروپایی (موجود در آزمایشگاه ژئوتکنیک شهرداری تهران)..... ۸۸
- شکل (۳-۱۶) مرحله‌ی آماده‌سازی مخلوط آسفالتی..... ۸۹
- شکل (۴-۱) نمودار تغییرات خصوصیات فیزیکی مخلوط‌های قیر و فیلر آهک هیدراته (مصالح شرق تهران)..... ۹۵
- شکل (۴-۲) نمودار تغییرات فیزیکی مخلوط‌های قیر حاصل از کارخانه آسفالت غرب تهران و فیلر آهک هیدراته..... ۹۸
- شکل (۴-۳) نمودارهای نتایج آزمایش مارشال مربوط به مصالح سنگی غرب تهران..... ۱۰۰