دانشکده فنی

پایان نامه کارشناسی ارشد

ارزیابی عددی خصوصیات ویسکو-الاستوپلاستیک مخلوط‌های آسفالت لاستیکی

از:
بهزاد بخشی

استاد راهنما:
دکتر مهیار عربانی

شهریور ۱۳۹۳

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی

گروه مهندسی عمران

گرایش راه و ترابری

ارزیابی عددی خصوصیات ویسکو-الاستوپلاستیک مخلوط‌های آسفالت لاستیکی

از:

بهزاد بخشی

استاد راهنما:

دکتر مهیار عربانی

شهریور ۹۳

تقدیم به

روح والای مادرم

که با تمام وجودش مرا پرورد

روح مقدس پدرم

به پاس سال های بی گذشت از خود گذشتگیش

و برادرانم

که یادآور لحظه های خوش زندگیم هستند

تشکر وقدردانی

از دست و زبان که برآید کز عهده شکرش به درآید

ستایش خدایی را سزاست که مرا سزاوار انجام این تحقیق نمود و یاری کرد در جهت ارتقاء اندیشه جرعه ای ناچیز از دریای حقیقت موجود در ظرف وجود جای گیرد و گام ناچیزی در اعتلای دانش این مرزبوم برداشته شود. اما "من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق".

پیشبرد این پایان نامه را مدیون الطاف عزیزانی هستم که شایسته و بایسته است از زحمات ایشان تشکر و قدردانی کنم. در ابتدا لازم می دانم از جناب آقای دکتر مهیار عربانی که نقش اصلی را در هدایت این پایان نامه داشته اند و با مساعدت ها و راهنمایی هایشان مرا یاری نمودند سپاسگذاری نمایم.

از اساتید محترم جناب آقای دکتر برگ‌گل و جناب آقای دکتر بهار که داوری این پایان نامه را برعهده گرفتند سپاس فراوان دارم.

از برادر عزیزم جناب آقای مهندس اصغر بخشی، بابت کمک فراوان در پیشبرد پایانامه حاضر، تشکر ویژه‌ای دارم.

در انتها از تمام دوستانی که در انجام این تحقیق مرا همراهی و مساعدت نمودند ازجمله آقایان مهندس اعلایی و مهندس شمسی قدردانی می نمایم و از خداوند متعال توفیق و سعادت ایشان را مسألت دارم.

فهرست مطالب:

- چکیده فارسی ش
- چکیده انگلیسی ص
- پیش گفتار ۱
- **فصل اول: کلیات** ۳

۱-۱- مقدمه ۴
۱-۲- بیان مسئله ۴
۱-۳- اهمیت مسئله ۵
۱-۴- فرضیات پژوهش ۵
۱-۵- اهداف پژوهش ۶

- **فصل دوم: ادبیات فنی** ۷

۲-۱- مقدمه ۸
۲-۲- روسازی‌های آسفالتی ۸
۲-۳- خرابی‌ها و مکانیزم آن‌ها در روسازی ۹
۲-۳-۱- خرابی‌های ناشی از رطوبت ۹
۲-۳-۲- پدیده تغییرشکل ماندگار در روسازی‌های آسفالتی ۹
۲-۳-۲-۱- تعریف شیارشدگی ۱۱
۲-۳-۲-۲- مکانیزم‌های شیار شدگی ۱۲
۲-۳-۲-۳- انواع شیارشدگی ۱۳
۲-۳-۲-۴- پارامترهای مؤثر بر شیار شدگی ۱۵
۲-۳-۳- پدیده خستگی در روسازی‌های آسفالتی ۲۳
۲-۳-۳-۱- تعریف مسئله و اهمیت موضوع ۲۴
۲-۳-۳-۲- تعریف ترک‌های خستگی ۲۴
۲-۳-۴- خرابی‌های ناشی از ترک‌های حرارتی ۲۶
۲-۳-۴-۱- انواع ترک‌های حرارتی ۲۷
۲-۴- تحقیقات انجام‌شده قبلی درزمینهٔ اصلاح مخلوط‌های آسفالتی ۲۸
۲-۴-۱- تحقیقات انجام‌شده درزمینهٔ افزودن مواد ضایعاتی به آسفالت ۲۸
۲-۴-۲- تحقیقات انجام‌شده قبلی درزمینهٔ افزودن خرده لاستیک به مخلوط آسفالتی ۲۹
۲-۵- روش‌های تحلیل و طراحی روسازی‌ها ۳۲
۲-۵-۱- روش‌های تجربی ۳۳
۲-۵-۲- روش‌های گسیختگی برشی محدود ۳۳

۲-۵-۳- روش‌های تغییر مکان محدود ۳۴
۲-۵-۴- روش‌های برگشتی بر اساس تست‌های راه یا اجرای آسفالت ۳۴
۲-۵-۵- روش‌های مکانیکی- تجربی ۳۴
۲-۵-۶- برنامه‌های کامپیوتری تحلیل روسازی ۳۵
۲-۵-۷- تحلیل و طراحی به روش مکانیکی – تجربی ویسکو الاستیک ۳۶
۲-۶- تحقیقات انجام شده قبلی درزمینهٔ ارزیابی‌های عددی و مدل‌سازی مخلوط‌های آسفالتی ۳۸

- **فصل سوم: تحلیل عددی روسازی و خصوصیات ویسکوالاستوپلاستیک مخلوط‌های آسفالتی** ۴۶

۳-۱- مقدمه ۴۹
۳-۲- روش‌های عددی تحلیل روسازی‌ها ۴۹
۳-۲-۱- روش المان محدود ۴۹
۳-۲-۱-۱- روش المان محدود دوبعدی ۴۹
۳-۲-۱-۲- روش المان محدود سه‌بعدی ۵۳
۳-۲-۲- روش المان مرزی ۵۵
۳-۳- انواع رفتار مواد ۵۸
۳-۳-۱- رفتار الاستیک ۵۸
۳-۳-۲- رفتار ویسکوز ۶۰
۳-۳-۳- رفتار پلاستیک ۶۰
۳-۳-۴- رفتار الاستو پلاستیک ۶۱
۳-۳-۵- رفتار ویسکو الاستیک ۶۲
۳-۳-۶- رفتار ویسکو پلاستیک ۶۴
۳-۳-۷- رفتار ویسکو الاستو پلاستیک ۶۵
۳-۴- مدل‌های ویسکو الاستیک ۶۶
۳-۴-۱- مدل‌های مکانیک ۶۶

- **فصل چهارم: تجهیزات و مطالعات آزمایشگاهی** ۷۳

۴-۱- مقدمه ۷۴
۴-۲- تجهیزات آزمایشگاهی ۷۴
۴-۲-۱- تجهیزات آزمایش مارشال ۷۴
۴-۲-۲- دستگاه آزمایش آسفالت ناتینگهام ۷۵
۴-۲-۳- دستگاه آزمایش ویل تراک ۷۷
۴-۳- مروری بر روند انجام مطالعات آزمایشگاهی ۷۷
۴-۳-۱- مصالح مصرفی ۷۸
۴-۴- روش انجام آزمون‌های آزمایشگاهی ۷۹
۴-۴-۱- آزمایش مارشال ۷۹

۴-۴-۲- آزمایش خزش دینامیکی ۸۱
۴-۴-۳- آزمایش ویل تراک ۸۱
۴-۵- نتایج آزمایشات ۸۳
۴-۵-۱- نتایج آزمایش مارشال ۸۳
۴-۵-۲- نتایج آزمایش خزش دینامیکی ۸۳
۴-۵-۳- نتایج آزمایش ویل تراک ۸۶

- **فصل پنجم: مطالعات تحلیلی و مدل‌سازی المان محدود** ۸۸

۵-۱- مقدمه ۸۹
۵-۲- خصوصیات ویسکو الاستو پلاستیک مخلوط‌های آسفالتی ۸۹
۵-۳- مدل توانی خزش ۹۱
۵-۴- فرآیند پیش مدل‌سازی ۹۲
۵-۴-۱- تعیین ویژگی‌های غیرخطی مخلوط‌های آسفالتی ۹۲
۵-۴-۲- تعیین ویژگی‌های الاستیک لایه‌های روسازی ۹۸
۵-۵- فرآیند مدل‌سازی المان محدود ۹۹
۵-۵-۱- مدل‌سازی المان محدود دوبعدی پدیده شیارشدگی در مخلوط آسفالتی ۹۹
۵-۵-۱-۱- اعتبارسنجی نتایج مدل‌های دوبعدی ۱۰۵
۵-۵-۲- مدل‌سازی المان محدود سه‌بعدی پدیده شیارشدگی در مخلوط آسفالتی ۱۱۱
۵-۵-۳- مدل‌سازی لایه‌های روسازی در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS ۱۱۶
۵-۵-۳-۱- ابعاد و هندسه مورد استفاده ۱۱۶
۵-۵-۳-۲- شرایط مرزی بین لایه‌ها و بارگذاری ۱۱۷
۵-۵-۳-۳- نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی لایه‌های روسازی و خاک بستر ۱۲۰

- **فصل ششم : جمع‌بندی و نتیجه‌گیری** ۱۲۲

۶-۱- نتیجه‌گیری ۱۲۳
۶-۲- پیشنهادهایی جهت ادامه تحقیق ۱۲۴

- **منابع و مآخذ** ۱۲۶

- **پیوست‌ها**

پ ۱- کد بارگذاری DLOAD برای بارگذاری سه‌بعدی ۱۳۲

فهرست جداول :

- **جداول فصل چهارم**

جدول (۴-۱) آزمایشات انجام‌شده در این پایان‌نامه و مورد استفاده از پایان‌نامه دیگر ۷۷
جدول (۴-۲) دانه‌بندی پیوسته مصالح سنگی مخلوط آسفالتی گرم مربوط به قشر توپکا ۷۸
جدول (۴-۳) مشخصات قیر به‌کاررفته در ساخت نمونه‌ها ۷۹
جدول (۴-۴) مشخصات دانه‌بندی خرده لاستیک مصرفی ۷۹
جدول (۴-۵) مشخصات دستگاه شیار افتادگی مورداستفاده در آزمایش شیار افتادگی ۸۲
جدول (۴-۶) نتیجه‌ی آزمایش شیار افتادگی چرخ بر روی نمونه‌ها ۸۶

- **جداول فصل پنجم**

جدول (۵-۱) مقادیر ß و m ۹۶
جدول (۵-۲) مقادیر ضرایب b_1 و b_2 ۹۷
جدول (۵-۳) مقادیر پارامترهای معادله خزش مورداستفاده در مدل‌سازی مخلوط آسفالتی ۹۸
جدول (۵-۴) خواص مکانیکی در نظر گرفته‌شده برای مدل‌سازی لایه‌های مختلف روسازی و خاک بستر ۹۸
جدول (۵-۵) مقایسه شیارشدگی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای ۱۰۰۰۰ عبور ۱۰۴
جدول (۵-۶) مقادیر پارامترهای خزشی کالیبره شده در مدل‌سازی مخلوط آسفالتی ۱۰۶
جدول (۵-۷) مقایسه شیارشدگی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده بعد از کالیبراسیون ۱۰۷
جدول (۵-۸) مقایسه شیارشدگی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مدل‌های سه‌بعدی ۱۱۶

فهرست اشکال :

- **شکل‌های فصل دوم**

شکل (۲-۱) شیار شدگی با شدت زیاد به همراه ترک‌های پوست سوسماری ۱۱
شکل (۲-۲) گود شدگی مسیر عبور چرخ ناشی از ضعف لایه‌های زیر آسفالت ۱۳
شکل(۲-۳) گود شدگی مسیر عبور چرخ ناشی از مقاومت کم آسفالت ۱۴
شکل (۲-۴) نمودار درصد فضای خالی-درصد عبوری از الک ۴/۷۵ میلی‌متر برای مصالح سنگی با حداکثر اندازه اسمی ۹/۵ میلی‌متر ۱۶
شکل (۲-۵) تغییرات درصد فضای خالی در برابر درصد عبوری از الک ۴/۷۵ میلی‌متر برای مصالح سنگی با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر ۱۶
شکل (۲-۶) تأثیر گوشه‌داری مصالح سنگی بر میزان سختی خزشی ۱۹
شکل (۲-۷) شروع و گسترش ترک در اثر عبور بار ۲۵
شکل (۲-۸) مراحل فرایند خستگی ۲۶
شکل (۲-۹) نتایج تغییر شکل ماندگار محاسبه‌شده در مطالعه چان و همکاران به ازای درصد تخلخل ۷/۳۱٪ ۳۹
شکل (۲-۱۰) نتایج تغییر شکل ماندگار محاسبه شده در مطالعه چان و همکاران به ازای درصد تخلخل ۱۰/۵۷٪ ۳۹
شکل (۲-۱۱) آزمایش صورت گرفته در مطالعه سو و همکاران به منظور شبیه‌سازی سطح تماس واقعی لاستیک- روسازی ۴۰
شکل (۲-۱۲) نحوه مدل کردن سطح تماس لاستیک- روسازی در مطالعه سو و همکاران ۴۱
شکل (۲-۱۳) مدل سه‌بعدی ایجادشده در مطالعه سو و همکاران ۴۱
شکل (۲-۱۴) نتایج مدل المان محدود مطالعه سو و همکاران ۴۱
شکل (۲-۱۵) مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و تئوریکی در تست تراکم شکل۲-۱۶- نحوه شبیه‌سازی سطح تماس لاستیک- روسازی
شکل (۲-۱۶) شرایط هندسی و المان‌های مرزی در نظر گرفته‌شده در مطالعه فنگ و همکاران ۴۲
شکل (۲-۱۷) تنش‌های تماسی و شبیه‌سازی شده در نظر گرفته‌شده در مطالعه فنگ و همکاران ۴۴
شکل (۲-۱۸) نتایج مدل ارائه‌شده در مطالعه سو و همکاران به منظور پیش‌بینی پدیده شیارشدگی ۴۴ ۴۵
شکل (۲-۱۹) تصویر مدل ایجادشده در نرم‌افزار VEROAD در مطالعه سو و همکاران به منظور پیش‌بینی پدیده شیارشدگی ۴۶
شکل (۲-۲۰) مدل ارزیابی شده در پژوهش ژائو و همکاران در سال ۲۰۱۱ ۴۶
شکل (۲-۲۱) برازش مدل اصلاح شده برگر بر نتایج آزمایشات تعیین خزش ماسه سنگ ۴۷

- **شکل‌های فصل سوم**

شکل (۳-۱) انواع رفتار مواد جامد، نیمه جامد، خمیری و مایع ۵۸
شکل (۳-۲) تغییرات تنش - کرنش و همچنین مستقل از زمان بودن کرنش در مواد جامد الاستیک ۵۹
شکل (۳-۳) تغییرات تنش - کرنش و نیز وابسته به زمان بودن کرنش در مواد سیال ویسکوز ۶۰
شکل (۳-۴) تغییرات تنش- کرنش در رفتار پلاستیک ۶۱
شکل (۳-۵) تغییرات میزان کرنش برحسب تنش در رفتار الاستو پلاستیک ۶۱
شکل (۳-۶) مراحل چندگانه نمودار خزش ۶۳
شکل (۳-۷) برگشت‌پذیری کرنش در یک مدت زمان کوتاه (خزش میرا) و طولانی (خزش پایدار) پس از بارگذاری در رفتار ویسکوالاستیک ۶۳
شکل (۳-۸) استهلاک یا استراحت تنش ۶۴
شکل (۳-۹) رفتار خزش تسلیم شونده ۶۴
شکل (۳-۱۰) نمودار میزان نرخ کرنش بر حسب تنش در رفتار ویسکو پلاستیک ۶۵
شکل (۳-۱۱) تغییرات کرنش نسبت به زمان در رفتار ویسکوالاستوپلاستیک ۶۵
شکل (۳-۱۲) تفکیک انواع کرنش در بارگذاری و باربرداری در رفتار ویسکوالاستوپلاستیک ۶۶
شکل (۳-۱۳) مدل‌های مکانیکی برای مواد ویسکوالاستیک ۶۷
شکل (۳-۱۴) سه مؤلفه کرنش در مدل برگر ۷۰
شکل (۳-۱۵) مدل مکانیکی برگر و پارامترهای تابع خزش در مدل برگر ۷۱

- **شکل‌های فصل چهارم**

شکل (۴-۱)- دستگاه آزمایش مارشال مورداستفاده در این پژوهش ۷۵
شکل (۴-۲) دستگاه آزمایش آسفالت ناتینگهام (NAT) مورد استفاده در این پژوهش ۷۵
شکل (۴-۳) نحوه بارگذاری در آزمایش خزش دینامیکی ۷۶
شکل (۴-۴) نمای دستگاه Wheel Track ۷۷
شکل (۴-۵) نمایی از تجهیزات موردنیاز برای ساخت نمونه‌های آسفالتی در این پژوهش ۸۰
شکل (۴-۶) **نحوه بارگذاری در آزمایش** خزش دینامیکی ۸۱
شکل (۴-۷) ساخت نمونه Wheel Track ۸۲
شکل (۴-۸) نواحی سه‌گانه منحنی خزش ۸۴
شکل (۴-۹) نمودار خزش آسفالت متداول در دمای ۴۰°C ۸۵
شکل (۴-۱۰) نمودار خزش آسفالت لاستیکی در دمای ۴۰°C ۸۵
شکل (۴-۱۱) نمودار عمق شیارشدگی – تعداد عبور چرخ برای آسفالت لاستیکی ۸۶
شکل (۴-۱۲) نمودار عمق شیارشدگی – تعداد عبور چرخ برای آسفالت متداول ۸۶

- **شکل‌های فصل پنجم**

شکل (۵-۱) تنش انحرافی در ۲۰ سیکل اول برای تنش ۱۰۰kpa ۸۹
شکل (۵-۲) کرنش محوری در ۲۰ سیکل اول برای تنش ۱۰۰kpa ۹۰

شکل (۵-۳) نمودار خزش آسفالت متداول در دمای ۴۰°C ۹۳
شکل (۵-۴) نمودار خزش آسفالت لاستیکی در دمای ۴۰°C ۹۳
شکل (۵-۵) نمودار نرخ خزشی آسفالت متداول در دمای ۴۰°C ۹۳
شکل (۵-۶) نمودار نرخ خزشی آسفالت لاستیکی در دمای ۴۰°C ۹۴
شکل (۵-۷) نمودار کرنش ویسکو پلاستیک- زمان برای آسفالت متداول ۹۵
شکل (۵-۸) نمودار کرنش ویسکو پلاستیک- زمان برای آسفالت لاستیکی ۹۵
شکل (۵-۹) مقادیر $\varepsilon /t^{\wedge} \beta$ آسفالت متداول به ازای تنش‌های اعمالی ۹۷
شکل (۵-۱۰) مقادیر $\varepsilon /t^{\wedge} \beta$ آسفالت لاستیکی به ازای تنش‌های اعمالی ۹۷
شکل (۵-۱۱) نموگرام آزمایش مقاومت شیارشدگی در ویل تراک ۹۹
شکل (۵-۱۲) مش‌بندی المان محدود استفاده‌شده در مدل‌سازی دوبعدی تست ویل‌تراک ۱۰۰
شکل (۵-۱۳) رد اثر چرخ بر روی نمونه آسفالتی ۱۰۰
شکل (۵-۱۴) تعیین مدت زمان بارگذاری ۱۰۱
شکل (۵-۱۵) شرایط مرزی و بارگذاری اعمالی بر روی مدل در حالت کرنش صفحه ۱۰۱
شکل (۵-۱۶) شیارشدگی پیش‌بینی‌شده در آسفالت لاستیکی تحت فشار ۳۰۰ کیلو پاسکال ۱۰۲
شکل (۵-۱۷) شیارشدگی پیش‌بینی‌شده در آسفالت لاستیکی تحت فشار ۴۰۰ کیلو پاسکال ۱۰۲
شکل (۵-۱۸) شیارشدگی پیش‌بینی‌شده در آسفالت لاستیکی تحت فشار ۵۰۰ کیلو پاسکال ۱۰۳
شکل (۵-۱۹) شیارشدگی پیش‌بینی‌شده در آسفالت متداول تحت فشار ۳۰۰ کیلو پاسکال ۱۰۳
شکل (۵-۲۰) شیارشدگی پیش‌بینی‌شده در آسفالت متداول تحت فشار ۴۰۰ کیلو پاسکال ۱۰۳
شکل (۵-۲۱) شیارشدگی پیش‌بینی‌شده در آسفالت متداول تحت فشار ۵۰۰ کیلو پاسکال ۱۰۳
شکل (۵-۲۲) رابطه بین شیارشدگی به‌دست آمده از ویل تراک و آباکوس برای آسفالت لاستیکی ۱۰۴
شکل (۵-۲۳)رابطه بین شیارشدگی به‌دست آمده از ویل تراک و آباکوس برای آسفالت متداول ۱۰۵
شکل (۵-۲۴) شیارشدگی کالیبره شده در آسفالت لاستیکی تحت فشار ۳۰۰ کیلو پاسکال ۱۰۶
شکل (۵-۲۵) شیارشدگی کالیبره شده در آسفالت لاستیکی تحت فشار ۴۰۰ کیلو پاسکال ۱۰۶
شکل (۵-۲۶) شیارشدگی کالیبره شده در آسفالت لاستیکی تحت فشار ۵۰۰ کیلو پاسکال ۱۰۶
شکل (۵-۲۷) شیارشدگی کالیبره شده در آسفالت متداول تحت فشار ۳۰۰ کیلو پاسکال ۱۰۷
شکل (۵-۲۸) شیارشدگی کالیبره شده در آسفالت متداول تحت فشار ۴۰۰ کیلو پاسکال ۱۰۷
شکل (۵-۲۹) شیارشدگی کالیبره شده در آسفالت متداول تحت فشار ۵۰۰ کیلو پاسکال ۱۰۷
شکل (۵-۳۰) شیارشدگی کالیبره شده حاصله از آباکوس- نتایج ویل تراک برای آسفالت لاستیکی ۱۰۸
شکل (۵-۳۱) شیارشدگی کالیبره شده حاصله از آباکوس- نتایج ویل تراک برای آسفالت متداول ۱۰۸
شکل (۵-۳۲) نمودار تغییرشکل سطح آسفالت لاستیکی در تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال ۱۰۹
شکل (۵-۳۳) نمودار تغییرشکل سطح آسفالت لاستیکی در تنش ۴۰۰ کیلوپاسکال ۱۰۹
شکل (۵-۳۴) نمودار تغییرشکل سطح آسفالت لاستیکی در تنش ۵۰۰ کیلوپاسکال ۱۱۰
شکل (۵-۳۵) نمودار تغییرشکل سطح آسفالت متداول در تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال ۱۱۰
شکل (۵-۳۶) نمودار تغییرشکل سطح آسفالت متداول در تنش ۴۰۰ کیلوپاسکال ۱۱۱
شکل (۵-۳۷) نمودار تغییرشکل سطح آسفالت متداول در تنش ۵۰۰ کیلوپاسکال ۱۱۱

شکل (۵-۳۸) مش‌بندی المان محدود مدل سه‌بعدی در ABAQUS ۱۱۳
شکل (۵-۳۹) شرایط مرزی اعمال‌شده و بارگذاری اعمالی ۱۱۳
شکل (۵-۴۰) تغییرشکل پیش‌بینی شده در آباکوس برای نمونه آسفالت لاستیکی تحت فشار ۱۱۴

۳۰۰ کیلو پاسکال
شکل (۵-۴۱) تغییرشکل پیش‌بینی شده در آباکوس برای نمونه آسفالت لاستیکی تحت فشار ۴۰۰ کیلو پاسکال ۱۱۴
شکل (۵-۴۲) تغییرشکل پیش‌بینی شده در آباکوس برای نمونه آسفالت لاستیکی تحت فشار ۵۰۰ کیلو پاسکال ۱۱۴
شکل (۵-۴۳) تغییرشکل پیش‌بینی شده در آباکوس برای نمونه آسفالت متداول تحت فشار ۳۰۰ کیلو پاسکال ۱۱۵
شکل (۵-۴۴) تغییرشکل پیش‌بینی شده در آباکوس برای نمونه آسفالت متداول تحت فشار ۴۰۰کیلو پاسکال ۱۱۵
شکل (۵-۴۵) تغییرشکل پیش‌بینی شده در آباکوس برای نمونه آسفالت متداول تحت فشار ۵۰۰ کیلو پاسکال ۱۱۵
شکل (۵-۴۶) شکل مقطع راه در نظر گرفته شده در این پژوهش ۱۱۷
شکل (۵-۴۷) تصویر سطح تماس چرخ با فرض مربع مستطیل و نیم‌دایره‌ها ۱۱۸
شکل (۵-۴۸) سطح تماس معادل ۱۱۹
شکل (۵-۴۹) شرایط مرزی و بارگذاری اعمالی در ABAQUS ۱۱۹
شکل (۵-۵۰) مش‌بندی المان محدود مدل در ABAQUS ۱۲۰
شکل (۵-۵۱) شیارشدگی پیش‌بینی شده در بارگذاری استاتیکی ۱۲۱
شکل (۵-۵۲) شیارشدگی پیش‌بینی شده در بارگذاری چرخه‌ای ۱۲۱

چکیده

ارزیابی عددی خصوصیات ویسکوالاستوپلاستیک مخلوط آسفالت لاستیکی
بهزاد بخشی

استفاده از خرده لاستیک در بهبود مواد چسباننده آسفالت در ۳۰ سال اخیر توسعه یافته است. چون مواد زائد خواص مخلوط آسفالتی را بهبود می‌بخشد به همین خاطر بر روی خواص مهندسی آن اعم از مقاومت و دوام تأثیر می‌گذارد. بنابراین مخلوط آسفالتی گرم حاوی مواد زائد باید به‌طور کامل و دقیق، به صورت آزمایشگاهی و میدانی ارزیابی شود . تحقیقات قبلی چندین محقق نشان می‌دهد که مخلوط‌های آسفالت لاستیکی می‌تواند ضخامت رویه و ترک‌های انعکاسی آن را کاهش دهد. همچنین تحقیق دیگری نشان می‌دهد که این مخلوط‌ها مقاومت بالایی در برابر شیارشدگی، ترک‌های خستگی و ترک‌های حرارتی دارند.

روسازی‌ها با گذشت زمان به دلیل عبور بارهای ترافیکی و قرار گرفتن در معرض شرایط محیطی مختلف دچار خرابی می‌گردند. از جمله مهم‌ترین این خرابی‌ها می‌توان به شیارشدگی اشاره نمود که به عنوان نگرانی اصلی سازمان‌های حمل‌ونقل در زمینه روسازی تلقی می‌شود. سالانه میلیون‌ها دلار صرف جبران خرابی شیارشدگی در روسازی‌ها می‌گردد. اصلاح شیارشدگی هزینه‌بر بوده و سبب ایجاد اختلال در جریان ترافیک می‌شود. شیارشدگی لایه‌های آسفالتی یک مشکل اصلی برای ایمنی در حین رانندگی بوده زیرا به شدت بر کنترل وسایل نقلیه اثرگذار است. طراحان روسازی تلاش می‌کنند تا با طراحی روسازی‌های صحیح و طرح اختلاط‌های صحیح آسفالتی، شیارشدگی را به حداقل برسانند.

این پژوهش روش‌های پیش‌بینی رفتار مخلوط آسفالت لاستیکی و آسفالت متداول و ارتباط بین این رفتارها با نتایج آزمایشگاهی را بیان می‌کند. دستگاه ویل تراک به منظور ارزیابی آزمایشگاهی پدیده شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی و اعتبارسنجی پارامترهای به دست آمده از آزمایش خزش دینامیکی به کار گرفته شده است. هدف از این تحقیق استفاده از روش المان محدود دو بعدی و سه بعدی در شبیه‌سازی آزمایش ویل تراک و نیز مدل‌سازی لایه‌های روسازی به منظور ارزیابی پدیده شیارشدگی می‌باشد. به منظور دست‌یابی به این هدف، نرم افزار آباکوس مورد استفاده قرار گرفته و خروجی‌های آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیدند. ارتباط مناسبی بین نتایج به دست آمده از آزمایشگاه و عملکرد پیش‌بینی شده مخلوط آسفالتی مشاهده شد.

کلیدواژه‌ها: شیارشدگی ،آسفالت لاستیکی، ویل تراک، مخلوط آسفالتی گرم، روش المان محدود، آباکوس.

Abstract

Numerical evaluation of visco - elastoplastic specifications of rubberized asphalt mixtures

BEHZAD BAKHSHI

The use of crumb rubber to modify asphalt cement has been developed over the past 30 years. Since the waste material will replace and/or modify the properties of HMA, it will affect the engineering properties (such as strength and durability). Therefore, the HMA containing the waste material must be reevaluated thoroughly and carefully both in the laboratory and the field. In recent years, several researchers have shown that the rubberized asphalt mixes can be helpful in reducing the overlay thickness and its reflective cracking. Way's research indicated that these mixtures have a high resistance to rutting, fatigue and thermal cracking, in addition to protecting the environment and saving resources.

Pavements deteriorate with time due to traffic loading and environmental exposure. Rutting is one of the most commonly observed pavement distresses and is a major safety concern to transportation agencies. Millions of dollars are reportedly spent annually to repair rutted asphalt pavements. Rutting repairs can be very costly and disruptive to traffic operations. Asphalt rutting is a major safety concern because it affects the handling of vehicles. Pavement designers attempt to mitigate rutting through proper pavement and asphalt mix design.

This research describes a method of predicting the behavior of rubberized asphalt and conventional asphalt mixes and linking these behaviors to an accelerated performance testing tool. The Wheel Track Tester (WTT) is used in this research for asphalt laboratory accelerated rutting resistance testing, and for calibration of material parameters developed in dynamic creep test. The scope of this research is using of 2D and 3D finite element method in simulation of wheel track test and modeling of pavement layers to investigate rutting phenomenon . To achieve this goal, ABAQUS software is used to simulate wheel track test and outputs of model are compared with the experimental observations. A good relationship is observed between laboratory measured and analytically predicted performance of asphalt mixes.

Keywords: Rutting, Rubberized asphalt, wheel trace, Hot Mix Asphalt, Finite element method, ABAQUS.

پیشگفتار:

تحقیقات درزمینهٔ بهبود مصالح تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی گرم، طرح‌های اختلاط و روش‌های تحلیل و طراحی روسازی‌ها شامل تست‌های آزمایشگاهی و میدانی لازم است تا سبب فراهم آوردن عمر سرویس‌دهی بیشتری برای روسازی‌ها گردد و در نتیجه از هدر رفتن سرمایه‌هایی که قرار است به منظور ترمیم خرابی‌های روسازی به مرور زمان صرف گردد، جلوگیری شود. استفاده از مواد ضایعاتی مانند خرده لاستیک روشی اقتصادی برای بهبود خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی است[۱].

رفتار مخلوط آسفالتی گرم به دلیل حضور قیر در مصالح تشکیل‌دهنده‌ی آن شدیداً وابسته به دما و تعداد و دفعات بارگذاری می‌باشد که این خصوصیات بیانگر رفتار ویسکوالاستیک و حتی ویسکوالاستوپلاستیک آن است. درحالی‌که معمولاً مخلوط آسفالتی گرم در تحلیل‌های دینامیکی روسازی‌های انعطاف‌پذیر به‌صورت الاستیک در نظر گرفته می‌شود. بسیاری از خرابی‌های صورت گرفته در روسازی‌ها مانند پدیده شیارشدگی(Rutting) را نمی‌توان با توجه به رفتار الاستیک بررسی کرد و بایستی این نوع از خرابی‌ها با تئوری ویسکوالاستوپلاستیک ارزیابی گردند.

به دلیل اینکه پژوهش‌های آزمایشگاهی متعدد صورت گرفته درزمینهٔ افزودن خرده لاستیک به مخلوط آسفالتی، حاکی از بهبود خصوصیات دینامیکی و مکانیکی روسازی‌های آسفالتی از جمله افزایش مقاومت شیارشدگی روسازی نسبت به روسازی-های آسفالتی ممول دارد لازم است تا با انجام دادن تحلیل عددی، ارزیابی دقیق‌تری از تأثیر خرده لاستیک بر روی پدیده شیارشدگی و تغییر شکل ماندگار بر اساس تئوری ویسکوالاستیک و ویسکوالاستوپلاستیک پرداخته شود.

این پایان‌نامه مشتمل بر ۶ فصل می‌باشد که در فصل اول با عنوان **کلیات** به بیان مسئله مورد تحقیق، اهمیت آن و تبیین فرضیات تحقیق جهت حل این مسئله پرداخته شده است. در ادامه این فصل نیز هدف پایان‌نامه حاضر تبیین گردیده است.

در فصل دوم با عنوان **ادبیات فنی،** به مباحث کلی روسازی و بررسی تحقیقات انجام‌شده قبلی درزمینهٔ اصلاح مخلوط‌های آسفالتی با مواد افزودنی ضایعاتی از جمله لاستیک و همچنین ارزیابی‌های انجام‌شده درزمینهٔ مدل‌سازی بر مبنای رفتار ویسکوالاستو پلاستیک این مخلوط‌ها به منظور تحلیل آن‌ها پرداخته شده است.

در فصل سوم که با عنوان **تحلیل عددی روسازی و خصوصیات ویسکوالاستوپلاستیک مخلوط‌های آسفالتی** تهیه شده است، به روش‌های پرکاربرد تحلیل روسازی و کلیه تئوری‌ها و مدل‌های رفتاری مورداستفاده در بیان رفتار مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شده است.

در فصل چهارم که با عنوان **تجهیزات و مطالعات آزمایشگاهی** ارائه شده است، تمامی امور مرتبط با مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در این تحقیق به تفصیل بیان شده است.

فصل پنجم با عنوان **مطالعات تحلیلی و مدل‌سازی المان محدود**، دربرگیرنده نتایج مدل‌های رفتاری ویسکوالاستوپلاستیک مخلوط‌های آسفالتی معمول و اصلاح‌شده با خرده لاستیک به وسیله نرم‌افزار المان محدود می‌باشد. در ادامه این فصل به ارزیابی تغییر پارامترهایی نظیر میزان بار محوری و تعداد تکرار آن بر میزان تغییر شکل لایه‌های دو نوع روسازی پرداخته می‌شود. همچنین در این فصل مدل‌های موردنظر با استفاده از نتایج آزمایشات فصل ۴ کالیبره و اعتبار سنجی شده است.

فصل ششم با عنوان **جمع‌بندی و نتیجه‌گیری** به جمع‌بندی مطالب، نتایج و مباحث ارائه‌شده اختصاص یافته و در انتها نیز پیشنهاداتی جهت ادامه تحقیقات انجام‌شده ارائه شده است.

فصل اول:

کلیات

۱-۱- مقدمه

در این فصل به صورت اجمالی به بیان مسئله مورد تحقیق، اهمیت آن و تبیین فرضیات تحقیق پرداخته شده است. در ادامه این فصل نیز هدف پایان‌نامه حاضر تبیین گردیده است.

۱-۲- بیان مسئله

یکی از رایج‌ترین و مخرب‌ترین نوع خرابی‌های مشاهده‌شده در روسازی آسفالتی شیارشدگی[۱] است. شیارشدگی مصالح روسازی با افزایش تعداد اعمال بار، به صورت تدریجی ایجاد شده و معمولاً به صورت تورفتگی‌های طولی در مسیر چرخ‌ها، همراه با برآمدگی‌های کوچک در کناره آن نمایان می‌شود[۲]. شیارشدگی می‌تواند به دلیل حمایت‌های ناکافی لایه‌های سازه‌ای روسازی که سبب توزیع ناصحیح تنش در انتقال آن به خاک بستر می‌شوند در لایه‌های غیر آسفالتی رخ دهد. با این وجود رایج‌ترین نوع شیارشدگی در لایه‌های آسفالتی رخ داده که به دلیل حرکات پلاستیک مخلوط‌های آسفالتی تحت بارهای سنگین و اغلب آهسته رخ می‌دهند . این پدیده می‌تواند ظرفیت زهکشی روسازی را کاهش داده و به تجمع آب، پدیده هیدروپلانینگ[۲] تصادفات ترافیکی منتج شود. تجمع آب همچنین می‌تواند باعث تسریع خرابی روسازی بر اثر رطوبت شود. همچنین، شیارشدگی سبب ایجاد قیرزدگی نیز می‌شود؛ که طی آن قیر به سطح روسازی آمده و باعث کاهش اصطکاک گشته و به حادث شدن تصادفات منجر می‌شود. تأثیر دیگر شیارشدگی، کاهش ضخامت روسازی است که باعث افزایش شکست روسازی بر اثر ترک‌های خستگی[۳] می‌گردد [۳]. این عوامل، شیارشدگی را به عنوان مضرترین مکانیزم خرابی در روسازی معرفی می‌کند [۴]. بنابراین بررسی مکانیزم‌های شیارشدگی و روش‌های پیش‌بینی شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی که یکی از پیچیده‌ترین مسائل در مهندسی روسازی می‌باشد دارای اهمیت می‌باشد.

در این پژوهش به ارزیابی عددی رفتار شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی حاوی خرده لاستیک پرداخته شده ، تا با استفاده از آن بتوان روشی مناسب جهت پیش‌بینی رفتار و میزان خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی در برابر بارهای دینامیکی ارائه نمود. با توجه به این‌که پدیده شیارشدگی براساس رفتار ویسکو الاستیک و ویسکو الاستوپلاستیک روسازی‌ها صورت می‌گیرد، تئوری مورد استفاده در این پایان‌نامه بر اساس این رفتار مخلوط‌های آسفالتی بنا شده است. به منظور دست‌یابی به اهداف این پایان‌نامه از نرم‌افزار آباکوس جهت مدل‌سازی مخلوط‌های آسفالتی معمولی و اصلاح‌شده با خرده لاستیک استفاده گردیده است. پارامترهای موردنیاز برای مدل‌سازی از آزمایشات صورت گرفته در تحقیقات قبلی بر مخلوط‌های آسفالتی به دست آمده و به منظور ارزیابی میزان کارایی مدل ارائه شده در این تحقیق از تست ویل‌تراک

---

[۱] Rutting
[۲] Hydroplaning
[۳] Fatigue Cracking

استفاده گردیده است. در انتها نیز با اســـــــــتفاده از مدل‌های ارائه شده در این تحقیق به بررسی پارامترهای مختلفی همچون بارگذاری بـــا مقـــادیر و تعـــدد مختلـــف و شرایط گوناگون محیطی بر میزان شیار شدگی مخلـوطهـای آسفالتی معمولی و اصلاح‌شده با خرده لاستیک و لایه‌های روسازی پرداختـه شـده است.

۱- ۳- اهمیت مسئله

تحلیل روسازی راه‌ها و مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها همواره به دلیل شناخت بهتر رفتار آنان تحت شرایط متفاوت از اهمیت بـالایی برخوردار بوده و باعث درک بهتر و در نتیجه طرح روابط دقیق‌تر می‌گردد. روسازی بتن آسفالتی به عنوان یکی از بـزرگ‌تـرین مؤلفه‌های زیربنایی در کشورهای مختلف دنیا، سیستمی پیچیده بـوده کـه بـا چنـدین لایـه از مصـالح متفـاوت، بـا ترکیبـات گوناگونی از بارگذاری‌های ترافیکی نامنظم و شرایط محیطی متغیر مواجه می‌باشد. بنابراین انجام یک پیش‌بینی واقع‌بینانه از عمر خدمت‌دهی بلندمدت روسازی‌های آسفالتی، یکی از وظایف چالش‌انگیز مهندسین روسازی است. عملکرد روسازی‌های بتن آسفالتی به طور نزدیکی با عملکرد مخلوط آسفالتی مرتبط می‌باشد. لذا این مدل‌های عملکردی مخلوط آسفالتی هسـتند کـه می‌توانند پیوند بین فرایندهای گوناگون طرح مخلوط آسفالتی، طراحی روسازی، سـاخت و بهسـازی را فـراهم نماینـد. بسـتن چرخه مواد یا استفاده صددرصدی از مواد قابل بازیافت در ساخت روسازی راه‌ها، یکی از موارد مهم است که صـنایع مـرتبط بـا آن تجارب زیادی در مورد استفاده از محصولات فرعی در آسفالت به دست آورده‌اند [۲]. بـا توجـه بـه گسـتره وسـیع کـاربرد مخلوط‌های آسفالت لاستیکی در دنیا و کاربرد موردی آن در کشور، ارزیابی رفتارهـای مختلـف ایـن نـوع مخلـوط آسـفالتی از جنبه‌های مختلف عملکردی و ایمنی از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. فاکتورهای گوناگونی شامل زمان (سرعت بارگـذاری، زمان بارگذاری و دورهٔ استراحت)، دما، وضعیت تنش، حالت بارگذاری، پیرشدگی و رطوبت بر روی رفتار و عملکرد تغییرشـکل بتن آسفالتی اثرگذارند [۳]. با توجه به اینکه مخلوط‌های آسفالتی به طور ذاتی و به سبب قیر محتوی، نسبت به تغییـرات دمـا بسیار حساس هستند، لذا شناسایی و بررسی رفتار ویسکو الاستیک و ویسکو الاستو پلاستیک مخلوطهای آسفالت لاسـتیکی و تعیین پارامترهای مؤثر در این رفتار که بسیار وابسته به تغییرات دماست، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

با توجه به اینکه تحقیقات فراوانی پیرامون استفاده از خرده لاستیک در مخلوط‌های آسفالتی به منظور بهبود عملکرد استاتیکی و دینامیکی آن‌ها، کاهش خرابی در روسازی‌ها، کاهش هزینه‌های ترمیم و نگهداری روسازی‌ها و بهبود خصوصیات شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی صورت گرفته است ادامه این پژوهش را به ارزیابی عـددی گـام‌بـه‌گـام پدیـده شیارشـدگی مخلـوطهـای آسفالتی اصلاح‌شده با خرده لاستیک ضایعاتی و اصلاح‌نشده که بر مبنای رفتار ویسکو- الاستو پلاستیک مخلوطهـای آسـفالتی استوار است و نیز مدل‌سازی لایه‌های روسازی اختصاص داده‌ایم.