

ارزیابی عددی تأثیر خرده شیشه ضایعاتی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی

رضا جمشیدی چناری، استادیار، گروه خاک و پی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان
مصطفی صادق نژاد*، کارشناس ارشد، گروه راه و ترابری، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

E-mail: mostafa.sadeghnejad@yahoo.com

دریافت: ۹۲/۰۵/۱۴ - پذیرش: ۹۲/۱۱/۰۷

چکیده

همه ساله بخش عظیمی از بودجه کشورهای مختلف صرف مرمت و بازسازی روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها می‌گردد. مقاومت کم روسازی‌ها در برابر بارهای دینامیک و عمر کوتاه سرویس‌دهی آنها از عمده‌ترین مشکلات موجود در حفاظت و نگهداری راه‌ها به شمار می‌آید. پدیده شیارشدگی یکی از عمده‌ترین این خرابی‌ها است که به علت رفتار ویسکو الاستیک و ویسکو الاستو پلاستیک مخلوط‌های آسفالتی در دماهای زیاد به وقوع می‌پیوندد. تا کنون تحقیقات آزمایشگاهی زیادی به منظور ارزیابی اثر افزودن خرده شیشه ضایعاتی بر رفتار مخلوط‌های آسفالتی در برابر بارهای دینامیک وسایل نقلیه و همچنین شرایط محیطی صورت گرفته است. هدف از این پژوهش، ارزیابی عددی تأثیر خرده شیشه ضایعاتی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و پیش‌بینی پدیده شیارشدگی در آنها می‌باشد. بدین منظور از نرم‌افزار آباکوس استفاده گردیده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل ارائه شده، از نتایج آزمایش ویل تراک استفاده گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل ارائه شده در این تحقیق به خوبی قادر است شیارشدگی مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای و معمولی را پیش‌بینی نماید. همچنین، ارزیابی نتایج مدل ارائه شده بیانگر تأثیر بالای شیشه در بهبود عملکرد ویسکو الاستیک و ویسکو الاستو پلاستیک مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آسفالت شیشه‌ای، شیارشدگی، ویسکو الاستو پلاستیک، ارزیابی عددی.

۱. مقدمه

روسازی تلقی می‌شود. 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. زمانی که بارگذاری ترافیکی و دمای هوا افزایش یابد، احتمال وقوع خرابی شیارشدگی بیشتر می‌گردد. تحقیقات زیادی در زمینه بهبود مصالح تشکیل دهنده مخلوط آسفالتی گرم، روش‌های طرح اختلاط، تحلیل و طراحی روسازی‌ها لازم است تا سبب فراهم آوردن عمر سرویس‌دهی بیشتری برای روسازی‌ها گردد و در نتیجه از

بتن آسفالتی از جمله مصالحی است که به وفور برای روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها استفاده می‌شود. حدود ۹۵٪ روسازی‌های دنیا از نوع روسازی آسفالتی می‌باشند (هوانگ، ۱۹۹۳). این روسازی‌ها با گذشت زمان به دلیل عبور بارهای ترافیکی و قرار گرفتن در معرض شرایط زیست محیطی مختلف دچار خرابی می‌شوند. از جمله مهمترین این خرابی‌ها می‌توان به شیارشدگی اشاره نمود که به عنوان نگرانی اصلی آژانس‌های حمل و نقل در زمینه

در مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای به منظور پیش‌بینی پدیده شیارشدگی در آن می‌پردازد.

۲. بررسی منابع

آسفالت شیشه‌ای از سال ۱۹۶۰ به عنوان راهکاری جهت کاربرد مواد شیشه‌ای ضایعاتی مورد توجه قرار گرفته است. آسفالت شیشه‌ای اساساً مشابه مخلوط آسفالتی معمول است. با این تفاوت که ۵ تا ۴۰ درصد مصالح سنگی ریز و یا درشت آن به وسیله خرده شیشه جایگزین شده است. در پژوهشی که توسط عربانی و همکاران (۱۳۸۸) صورت گرفت، به منظور افزایش عمر مفید روسازی‌ها و همچنین افزایش مقاومت آنها در برابر عوامل مخرب، از مواد شیشه‌ای در مخلوط‌های آسفالتی استفاده گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از ۱۰٪ خرده شیشه به جای سنگدانه همراه با عامل ضد عریان‌شدگی سبب افزایش عمر مفید مخلوط‌های آسفالتی گردیده است (عربانی، ۲۰۱۱).

پژوهشی دیگر که توسط آیری و همکاران (۲۰۰۴) صورت گرفت، نشان داد که عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده شیشه زمانی رضایت‌بخش خواهد بود که شامل ۱۰ تا ۱۵ درصد شیشه خرد شده باشند. همچنین، با در نظر گرفتن موضوع ایمنی (برندگی سطحی و پنچر شدن تایر اتومبیل‌ها) اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر به عنوان حداکثر اندازه قابل کاربرد شیشه در روسازی‌های آسفالتی پیشنهاد گردید. در این تحقیق، ۲٪ از نوعی آهک به عنوان عامل ضد عریان‌شدگی استفاده شد تا مقاومت در برابر عریان‌شدگی را افزایش دهد.

در سال‌های اخیر، محققین تئوری‌های ویسکو الاستیک و ویسکو الاستو پلاستیک را با موفقیت با تئوری المان محدود ترکیب نموده تا قادر به ارائه توصیفات دقیق‌تری از رفتار مصالح آسفالتی در کنار نتایج آزمایشگاهی باشند.

الخطیب و همکاران (۲۰۱۱) به توسعه یک مدل دو بعدی المان محدود در نرم‌افزار ABAQUS پرداختند. به‌گونه‌ای که قابلیت توصیف نحوه شیارشدگی روسازی‌ها و واکنش آنها تحت بار استاتیک تکراری چرخ خودروها را داشته

هدر رفتن سرمایه‌هایی که قرار است به منظور ترمیم خرابی‌های روسازی صرف گردد جلوگیری شود (هوانگ، ۱۹۹۳). طراحان روسازی در تلاشند تا با طراحی مناسب‌تر روسازی‌ها و ارائه طرح اختلاط‌های صحیح، شیارشدگی را به حداقل برسانند (تجان و آدریان، ۲۰۰۳). در سالیان اخیر، روند صعودی هزینه‌های مرمت و بازسازی روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها، که در اثر افزایش مقدار و تکرار بارهای ترافیکی وارده به روسازی‌ها ایجاد می‌شود، موجب شده است که تحقیقات جامعی در زمینه استفاده از مواد افزودنی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی به منظور افزایش قابلیت آنها در برابر بارهای دینامیک صورت پذیرد (عربانی، ۲۰۱۱).

آسفالت شیشه‌ای^۱ یکی از انواع آسفالت‌هایی است که محققین در آن از ماده ضایعاتی شیشه به منظور بهبود رفتار مخلوط‌های آسفالتی استفاده نموده‌اند. تا کنون تحقیقات آزمایشگاهی زیادی در زمینه استفاده از خرده شیشه ضایعاتی در مخلوط‌های آسفالتی صورت گرفته است. با توجه به اینکه مخلوط‌های آسفالتی به طور ذاتی و به سبب قیر محتمل، نسبت به تغییرات دما بسیار حساس هستند، لذا شناسایی و بررسی رفتار ویسکو الاستیک و ویسکو الاستو پلاستیک مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای و تعیین پارامترهای مؤثر در این رفتار، که بسیار وابسته به تغییرات دماست، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. توانایی تخمین میزان شیارشدگی و رشد آن در روسازی‌های انعطاف‌پذیر از مفاهیم مهم در طرح روسازی‌ها به شمار می‌رود (هوگزلز و چارلز، ۲۰۰۴).

با توجه به گستره وسیع کاربرد مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای در دنیا و کاربرد موردی آن در ایران، تا کنون تحقیقی به منظور پیش‌بینی پدیده شیارشدگی در این مخلوط‌ها صورت نگرفته است. از آنجایی که یکی از دلایل وقوع پدیده شیارشدگی در سطح روسازی، خصوصیات ویسکو الاستیک و ویسکو الاستو پلاستیک آسفالت می‌باشد، لذا، این مطالعه به ارزیابی عددی رفتارهای فوق

شیارشدهی در آنها از نرم‌افزار آباکوس استفاده گردیده است.

از آنجایی که مدل خزشی^۲ موجود در این نرم‌افزار قادر به توصیف هر چهار بخش کرنشی معادلات (۱) و (۲) می‌باشد، به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل بسیار ساده، ولی کاملاً مناسب، برای حل مسائل مربوط به شیارشدهی می‌باشد (هوا، ۲۰۰۰). حالت سخت‌شدهی با زمان^۳ این مدل که در معادله (۲) نشان داده شده در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\varepsilon = A\sigma^n t^m \quad (2)$$

که ε ، σ و t به ترتیب نرخ کرنش، تنش و زمان بارگذاری بوده و A ، n و m پارامترهای وابسته به مشخصات مصالح می‌باشند.

بسیاری از تحقیقات قبلی نشان می‌دهند که برای مصالح با رفتار منطقی، دو پارامتر A و n مقداری مثبت داشته و m نیز مقداری بین صفر و -۱ دارد (پرل و همکاران، ۲۰۰۴).

۴. هدف مطالعه

از آنجایی که در سالیان اخیر تحقیقات آزمایشگاهی فراوانی در زمینه استفاده از خرده شیشه ضایعاتی در مخلوط‌های آسفالتی صورت گرفته است، هدف این پژوهش ارزیابی عددی تأثیر آن بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و پیش‌بینی پدیده شیارشدهی در آنها می‌باشد. اساساً پدیده شیارشدهی بر مبنای رفتار ویسکو الاستیک و ویسکو الاستیک مخلوط‌های آسفالتی استوار است. لذا، در این تحقیق، به منظور دستیابی به اهداف تعیین گشته نیاز به تحلیل بر اساس رفتارهای فوق می‌باشد. مراحل دستیابی به اهداف این پژوهش عبارتند از:

- توصیف خصوصیات ویسکو الاستیک و ویسکو الاستیک پلیاستیک مخلوط‌های آسفالتی

باشد. نتایج کلی بررسی‌های آنها نشان داد که عمق شیارشدهی و وابسته به دما، فشار تیر و مقاومت خاک بستر است. به طوری که با افزایش دما و فشار تیر و با کاهش مقاومت خاک بستر مقدار عمق شیارشدهی افزایش خواهد یافت.

در مطالعه دیگر، سو و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی نحوه تماس لاستیک وسایل نقلیه و مقدار فشار وارده به وسیله آنها بر روسازی و تأثیر آن بر پدیده شیارشدهی پرداختند. برای دستیابی به اهداف ذکر شده، آنها تأیر مورد نظر را به وسیله یک مدل سه بعدی المان محدود در نرم‌افزار ANSYS شبیه‌سازی کردند. نتایج مطالعه آنها بیانگر آن بود که بیشترین میزان تنش برشی در زیر لاستیک و همچنین در عمق ۶۰ میلی‌متری از سطح روسازی اتفاق می‌افتد.

فنگا و همکاران (۲۰۰۴) به منظور ارزیابی پدیده شیارشدهی روسازی انعطاف‌پذیر از شیوه تحلیلی المان محدود استفاده کردند. آنها در این مطالعه از رفتار ویسکو پلیاستیک غیر خطی استفاده کردند. آنها به منظور ارزیابی نتایج مدل خود از نتایج نرم‌افزار PAAP^۱ استفاده کردند. مقایسه نتایج مدل آنها و نتایج نرم‌افزار PAAP بیانگر توان بالای مدل ارائه شده در پیش‌بینی پدیده شیارشدهی روسازی‌های انعطاف‌پذیر بود.

۳. رفتار ویسکو الاستیک پلیاستیک مخلوط‌های آسفالتی

بخش عظیمی از شیارشدهی روسازی‌های آسفالتی در لایه آسفالت گرم اتفاق می‌افتد. کرنش کلی رخ داده در لایه آسفالتی را می‌توان به شکل معادله (۱) بیان داشت (پرل، ۲۰۰۴):

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{vp} \quad (1)$$

که ε_t ، ε_e ، ε_p ، ε_{ve} و ε_{vp} به ترتیب کرنش کل، کرنش الاستیک، کرنش پلیاستیک، کرنش ویسکو الاستیک و کرنش ویسکو پلیاستیک می‌باشند.

در این تحقیق، به منظور ارزیابی عددی تأثیر خرده شیشه ضایعاتی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و پیش‌بینی پدیده

2- Power law creep model
3- Time - hardening

1- Pavement analysis assistant program

سنگی، خرده شیشه ضایعاتی و قیر خالص می‌باشد. دانه‌بندی مصالح سنگی حد وسط دانه‌بندی پیوسته مخلوط آسفالت گرم مربوط به قشر توپکا (تیپ ۴) مطابق با نشریه شماره ۱۰۱ مشخصات فنی و عمومی راه‌هاست (AASHTO, ۱۹۹۳).

حدود این دانه بندی در جدول ۱ ارائه شده است. قیر مصرفی، قیر ۷۰-۶۰ پالایشگاه اصفهان بوده که مشخصات آن در جدول ۲ درج گردیده است.

- ایجاد و توسعه مدل‌ها بر پایه تئوری اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار (آباکوس، ۲۰۰۶).
- اعتبارسنجی مدل‌ها
- مطالعات پارامتریک بر مدل‌های ارائه شده

۵. مطالعات آزمایشگاهی

۵-۱. مصالح مصرفی

مصالح مصرفی مورد استفاده در آزمایش‌ها شامل مصالح

جدول ۱. دانه‌بندی پیوسته مخلوط آسفالت گرم مربوط به قشر توپکا

اندازه الک	۱۲/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۰/۳ میلی	۰/۰۷۵
میلی‌متر	۹۰-۱۰۰	۴۴-۷۴	۲۸-۵۸	۵-۲۱	۲-۱۰
درصد وزنی	۹۵	۵۹	۴۳	۱۳	۶

جدول ۲. مشخصات قیر به کار رفته در ساخت نمونه‌ها

چگالی در $25^{\circ}C$	درجه نفوذ $0/10mm$	نقطه نرمی $^{\circ}C$	شکل پذیری Cm	درجه اشتعال $^{\circ}C$
۱/۰۲	۶۶	۵۱	۱۱۲	۲۶۲

آنجایی که خرابی شیارشدگی در دماهای بالا رخ می‌دهد. لذا، در این مطالعه دمای فوق برای بررسی و ارزیابی انتخاب گردید.

۶. نتایج آزمایشگاهی

۶-۱. نتایج آزمایش RLA

شکل ۱ نمودار خزش نمونه‌های آسفالتی را در تنش‌های مختلف و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. در این آزمایش، در هر ثانیه ۲ سیکل بارگذاری انجام می‌پذیرد. با توجه به شکل‌های تأثیر مثبت ذرات شیشه در کاهش تغییر شکل نمونه‌های آسفالتی مشخص است که از دلایل اصلی آن می‌توان به بهبود ویسکوزیته به سبب کاهش حساسیت حرارتی نمونه‌های آسفالتی شیشه‌ای اشاره نمود.

وزن مخصوص شیشه مصرفی در این تحقیق ۲/۵۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده و درصد جذب آب آن برابر صفر است. بنابر مطالعات قبلی که عربانی و همکاران (۱۳۸۸) انجام داده‌اند، درصد بهینه استفاده از خرده شیشه ضایعاتی به جای سنگدانه‌های بتن آسفالتی ۱۰٪ تعیین گردیده است (عربانی، ۲۰۱۱). لذا، در این مطالعه، خرده شیشه ضایعاتی جایگزین ۱۰٪ از مصالح سنگی عبوری از الک شماره ۴ و مانده روی ته الک شده است.

۵-۲. آزمون‌های آزمایشگاهی

به منظور دستیابی به اهداف این مقاله، مطالعات آزمایشگاهی بر نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده و عادی مطابق با جدول ۳ در دمای $50^{\circ}C$ صورت گرفته است. از

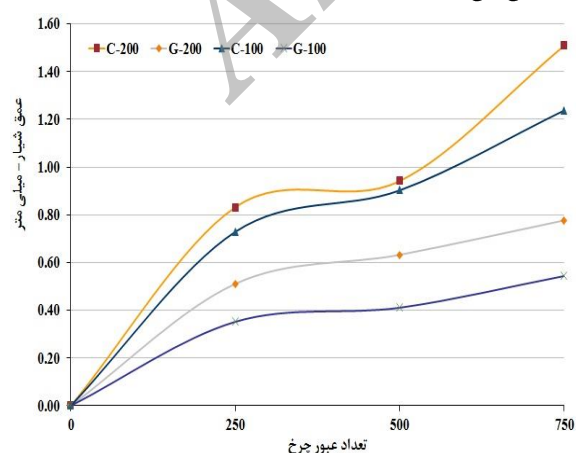
جدول ۳. خلاصه مطالعات آزمایشگاهی

هدف انجام	سطوح تنش اعمالی	نوع آزمایش
برآورد پارامترهای مورد نیاز	۱۰۰ KPa ۲۰۰ KPa	بار محوری تکرار شونده (RLA)
اعتبارسنجی مدل‌ها	۱۰۰ KPa ۲۰۰ KPa	ویل تراک

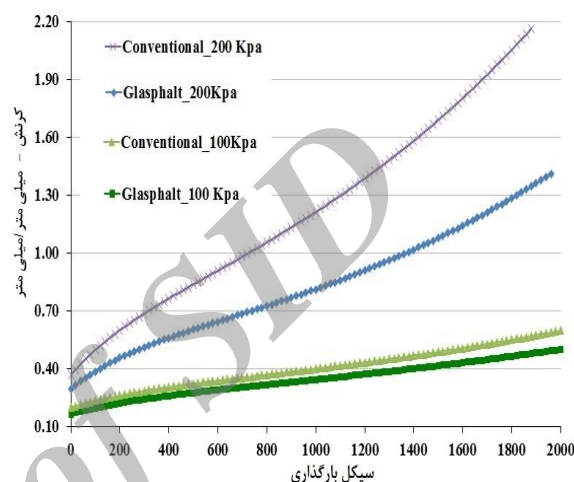
گردیده‌اند. در نتیجه، تحلیل ویسکو الاستیک قادر به ارضای هر سه ناحیه خزش نبوده و در برخی تنش‌ها، تحلیل‌ها وارد رفتار ویسکو الاستو پلاستیک می‌گردد. نتایج به‌خوبی بیانگر آن است که شیشه توانسته با اثر مثبت بر مخلوط‌های آسفالتی آنها را در سیکل‌های بارگذاری بالاتری وارد فازهای ۲ و ۳ نماید. بدین ترتیب این انتظار می‌رود که نمونه‌های اصلاح شده با شیشه دارای مقدار عمق شیار خیلی کمتری نسبت به نمونه‌های متداول باشند.

۶-۲. نتایج آزمایش ویل تراک

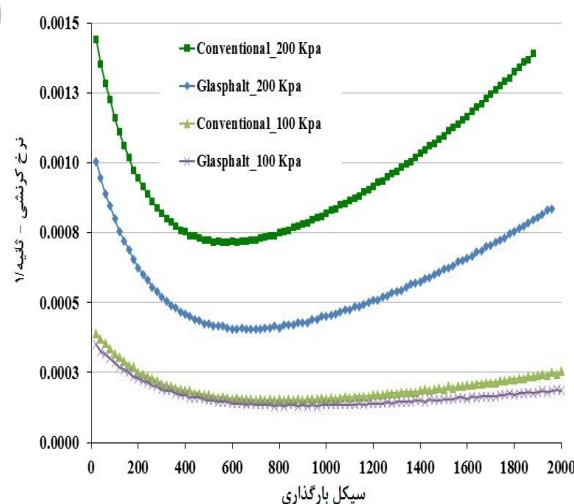
نتایج آزمایش ویل تراک در شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که از نتایج مشاهده می‌شود عمق شیار اندازه‌گیری شده در نمونه‌های اصلاح شده با شیشه تا حد زیادی کمتر از مقادیر عمق شیار در نمونه‌های آسفالتی معمولی می‌باشد. این قضیه اثباتی بر ادعای توان بالای شیشه در کاهش تغییر شکل‌های ماندگار مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد.



شکل ۳. عمق شیار اندازه‌گیری شده در آزمایش ویل تراک در $50^{\circ}C$



شکل ۴. نمودار خزشی نمونه‌های آسفالتی در دمای $50^{\circ}C$



شکل ۵. نرخ خزشی مخلوط‌های آسفالتی در دمای $50^{\circ}C$

همچنین، به منظور تفکیک مراحل سه‌گانه کرنشی صورت گرفته در نمونه‌ها، نرخ کرنش‌های موجود در شکل ۲ ترسیم شده است. همانگونه که این شکل نشان می‌دهد نمونه‌ها پس از سپری کردن چندین سیکل، از مرحله نخست وارد مراحل دوم و سوم شده و مستعد شیارشدگی

۷. مدل سازی

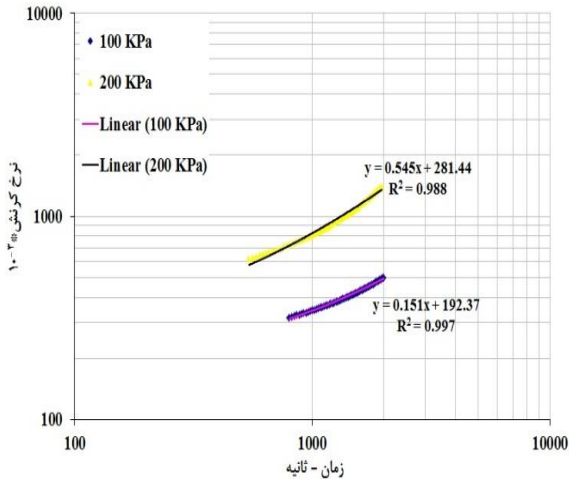
۷-۱. برآورد پارامترهای خزشی

به منظور مدل سازی پدیده شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی، پارامترهای مورد نیاز از نتایج آزمایش بار محوری تکرار شونده محاسبه می‌گردد. از آنجایی که شیارشدگی معادل تغییر شکل‌های ماندگار در مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد، لذا به منظور پیش‌بینی آن باید از تغییر شکل‌های رخ داده در فازهای دوم و سوم شکل ۱ استفاده نمود. زیرا در مرحله اول، تغییر شکل‌ها به صورت ماندگار نیستند. بدین منظور از شکل ۲ استفاده گردیده که فازهای سه‌گانه را مجزا نموده است. رابطه (۲) را می‌توان به صورت معادله (۳) نیز بیان داشت. همچنین، با اعمال تابع لگاریتم بر طرفین معادله (۳) می‌توان آن را به معادله (۴) تبدیل نمود.

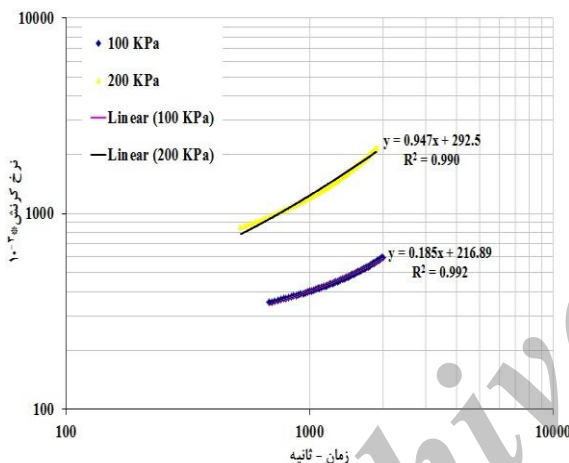
$$\varepsilon = B(\sigma) \times t^{\beta} \quad (3)$$

$$\text{Log}(\varepsilon) = C + \beta \text{Log}(t) \quad (4)$$

از معادله (۴) مشخص است که اگر کرنش‌های مراحل ۲ و ۳ از منحنی‌های خزشی شکل‌های ۱ و ۲ در مقابل زمان به صورت لگاریتمی ترسیم گردد نتیجه به صورت خطی خواهد بود. در نتیجه، به منظور محاسبه پارامتر β شکل‌های ۴ و ۵ ترسیم گردیده‌اند. همانطور که نتایج نشان می‌دهند با زیاد شدن دما شیب نمودارها زیاد گردیده و نمونه‌ها تمایل به داشتن کرنش‌های بیشتری با سرعت بیشتری دارند. گواه این مطلب می‌تواند ذکر این نکته باشد که با زیاد شدن دما، کرنش‌های بزرگتر در زمان‌های کمتری اتفاق افتادند. این قضیه نشان دهنده حساسیت بالای مخلوط‌های آسفالتی در مقابل تغییرات دما می‌باشد.



شکل ۴. نمودار لگاریتمی کرنش نمونه‌های آسفالت شیشه‌ای در مقابل زمان بارگذاری



شکل ۵. نمودار لگاریتمی کرنش نمونه‌های آسفالت متداول در مقابل زمان بارگذاری

به منظور برآورد پارامتر β ، تمامی نتایج در هر تنش، با یک خط تقریب زده شدند. به علت اینکه به ازای تنش‌های مختلف شیب نمودارها متفاوت بود، لذا به منظور محاسبه پارامتر β ، از میانگین‌گیری وزنی استفاده گردیده است. همانطور که نتایج مطالعات قبلی نشان می‌دهد پارامتر m در معادله (۲) مقداری بین صفر و ۱- داشته و از معادله (۵) به دست می‌آید (پرل و همکاران، ۲۰۰۴). جدول ۴ نشان دهنده مقادیر m به ازای دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

$$m = \beta - 1 \quad (5)$$

برازش کردند. برای این کار از نرم افزار MATLAB استفاده شده است. بدین صورت که معادلات پیش‌بینی شده در شکل ۶ و معادله (۲) به همراه مقادیر پیشنهادی اولیه به نرم‌افزار ارائه گردیده و در نتیجه MATLAB دو پارامتر A و n را به گونه‌ای تخمین می‌زند که دو معادله بیشترین مطابقت را با یکدیگر داشته باشند. در نهایت، در جدول ۵ به سه پارامتر اصلی معادله خزشی مورد استفاده در این تحقیق برای نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با شیشه و متداول در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد اشاره شده است.

جدول ۵. مقادیر پارامترهای خزشی مورد استفاده در

مدل‌سازی

نوع مخلوط آسفالتی	پارامتر m	پارامتر n	پارامتر A (10 ⁻⁵)
آسفالت شیشه‌ای	-۰/۶۵۲	۱/۵۵۵	۲/۱۵
آسفالت معمولی	-۰/۴۳۴	۲/۰۰۷	۴/۷۰

۷-۲. مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس

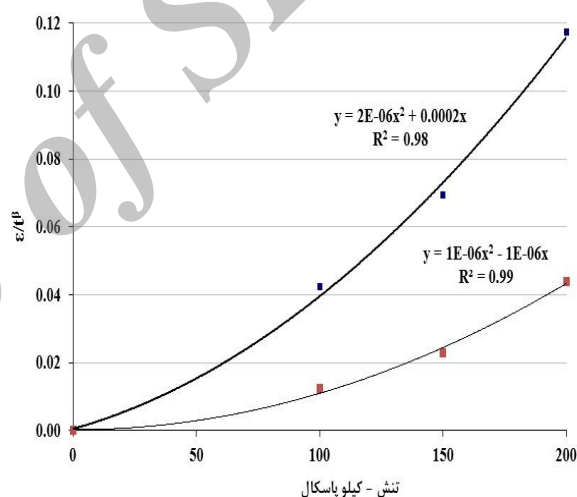
مدل دو بعدی ایجاد شده در نرم‌افزار آباکوس به منظور ارزیابی عددی تأثیر خرده شیشه ضایعاتی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و پیش‌بینی پدیده شیارشدگی مطابق شکل ۷ می‌باشد. ابعاد این مدل مطابق ابعاد نمونه آسفالتی در آزمایش ویل تراک می‌باشد. اما به منظور بهتر نشان دادن نتایج با توجه به مقارن بودن تمامی شرایط، تنها نیمی از عرض نمونه مدل شده است. به منظور مدل‌سازی دو بعدی از رفتار کرنش صفحه‌ای استفاده گردیده زیرا طول نمونه در مقابل ضخامت آن زیاد بوده و می‌توان از کرنش در آن راستا صرف نظر نمود.

شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل مورد نظر کاملاً مطابق با شرایط موجود نمونه در آزمایش ویل تراک می‌باشد. این شرایط نیز در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده، لبه‌های عمودی به وسیله تکیه‌های غلتکی در راستای افقی محدود شده و

جدول ۴. مقادیر پارامتر m به ازای دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد

نوع مخلوط آسفالتی	پارامتر B	پارامتر m
آسفالت شیشه‌ای	۰/۳۴۸	-۰/۶۵۲
آسفالت معمولی	۰/۵۶۶	-۰/۴۳۴

به منظور محاسبه سایر پارامترهای معادله (۲) لازم است آن را با تغییراتی به معادله (۶) تبدیل نمود. شکل ۶ نمودارهایی را نشان می‌دهد که در آنها مقادیر ϵ/t^B به ازای تنش‌های اعمالی در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد ترسیم گردیده است.



شکل ۶. ϵ/t^B به ازای تنش‌های اعمالی در دمای ۵۰ °C

همانطور که روند نتایج نشان می‌دهد آنها را می‌توان با یک معادله درجه ۲ به صورت معادله (۷) تخمین زد (پرل و همکاران، ۲۰۰۴). بنابراین، کرنش نهایی را می‌توان به صورت معادله (۸) نشان داد:

$$B(\sigma) = \frac{\epsilon}{t^B} \quad (6)$$

$$B(\sigma) = b_1(\sigma) + b_2\sigma^2 \quad (7)$$

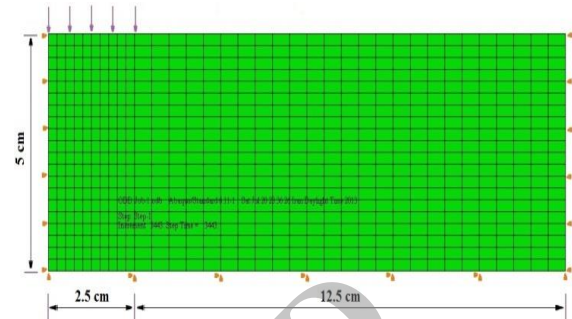
$$\epsilon = (b_1(\sigma) + b_2\sigma^2) \times t^B \quad (8)$$

از آنجایی که معادله اصلی خزشی موجود در ABAQUS، معادله (۲) می‌باشد، لذا لازم است به منظور برآورد دو پارامتر دیگر مورد نیاز، معادلات (۲) و (۸) روی هم

مورد استفاده قرار گیرد، استفاده از بارگذاری چرخه‌ای^۱ و پیوسته^۲ اثرات یکسانی بر کرنش خزشی پیش‌بینی شده دارند؛ زیرا کل زمان بارگذاری یکسان می‌باشد. در نتیجه در این تحقیق، بار به صورت آنی و استاتیک به نمونه اعمال می‌گردد. مدت زمان نهایی تجمعی نیز با استفاده از تعداد و زمان مورد نیاز عبور چرخ که بر اساس طول تماس چرخ با نمونه و سرعت چرخ محاسبه می‌گردد به نرم‌افزار داده می‌شود. این روش، زمان محاسبه را به شدت کاهش می‌دهد. در آزمایش ویل تراک، برای عرض چرخ مؤثر ۲۸/۵ میلی‌متر، مدت زمان یکبار عبور برابر ۰/۱۴ ثانیه اندازه‌گیری گردیده است. با توجه به اینکه اعمال بارگذاری در آزمایش ویل تراک به صورت رفت و برگشتی بوده و در هر انتهای مسیر مدت زمانی به عنوان تأخیر وجود دارد، لذا در این بخش از روش پیشنهادی هوا (۲۰۰۰) استفاده گردیده است. وی پیشنهاد کرد که ۰/۱۴ ثانیه به منظور طی طول نمونه می‌باشد. پس از آن تأخیر در دو انتهای مسیر را معادل ۰/۰۷ ثانیه پیشنهاد نموده که با برهم نهد آنها کل مدت زمان یکبار عبور برابر ۰/۲۱ ثانیه محاسبه می‌گردد. با ضرب کردن مقدار فوق در تعداد تکرارهای عبور، مدت زمان تجمعی مورد نیاز برای بارگذاری بار چرخ در نرم‌افزار محاسبه می‌گردد.

شکل‌های ۸ تا ۱۱ نشان دهنده تغییر شکل پیش‌بینی شده به وسیله مدل دو بعدی ارائه شده در این تحقیق برای نمونه‌های آسفالت شیشه‌ای و معمولی در تنش‌های مختلف و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. تغییر شکل‌ها وضعیت نهایی روسازی را پس از ۷۵۰ بار عبور چرخ نشان می‌دهند. همانگونه که قابل پیش‌بینی بود مقادیر تغییر شکل‌ها در نزدیکی بار وارده بسیار بیشتر از سایر نواحی می‌باشد. مقایسه مقادیر تغییر شکل‌ها در مدل آسفالت شیشه‌ای و آسفالت معمولی نشان دهنده توان بالای افزودنی شیشه در کاهش پدیده شیارشدگی در روسازی‌ها می‌باشد.

جابجایی آنها در راستای قائم آزاد می‌باشد. ضمن آنکه کف نمونه نیز در هر دو راستای افقی و قائم بدون حرکت می‌باشد.



شکل ۷. مدل دو بعدی کرنش صفحه‌ای نمونه آسفالتی

در شکل ۷، شمای کلی مش‌بندی در نظر گرفته شده برای مدل مورد نظر نیز نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، برای ۲/۵ سانتی‌متر از عرض مدل که محل اعمال بار می‌باشد، مش‌بندی ریزتر انتخاب گردیده است. در مدل مورد نظر، مجموعاً ۷۰۰ المان و ۷۵۶ گره مشاهده می‌گردد.

شکل ۷ همچنین اعمال بارگذاری بر مدل دو بعدی المان محدود ایجاد شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. با توجه به دو بعدی بودن و ناچیز بودن بعد سوم در این مدل، بار به صورت خطی و در طول ۲۵ میلی‌متر (نصف عرض چرخ) دقیقاً در وسط نمونه به صورت فشاری اعمال می‌گردد. میزان این بار برابر ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد.

شبیه‌سازی روند بارگذاری واقعی آزمایش ویل تراک در مدل‌سازی المان محدود، دارای پیچیده‌ای است. اعمال این بارگذاری پیچیده باعث می‌گردد که زمان محاسبه و آنالیز بسیار طولانی گردد. برای مدل نمودن این بارگذاری، روش ساده دیگری وجود دارد که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است (فنگا و همکاران، ۲۰۰۴). بنابر تحقیقات هوا (۲۰۰۰)، اگر مدل خزشی معادله (۲) به منظور توصیف خصوصیات مواد با رفتار وابسته به زمان

- 1- Repeated loading
- 2- Continuous loading

جدول ۶. عمق شیار پیش‌بینی شده در مدل در نمونه‌های

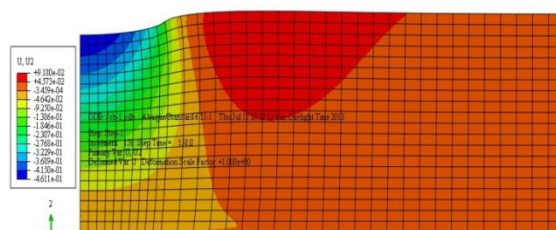
نوع نمونه	آسفالتی			
	فشار اعمالی (KPa)	عمق شیار (mm)		
		تعداد عبور چرخ		
آسفالت شیشه‌ای	۱۰۰	۰/۳۶۴	۰/۴۲۱	۰/۴۸۱
	۲۰۰	۰/۴۸۲	۰/۵۵۹	۰/۶۱۳
آسفالت معمولی	۱۰۰	۰/۶۱۴	۰/۸۳۵	۱/۰۰۱
	۲۰۰	۰/۴۸۲	۰/۵۵۹	۰/۶۱۳

۳-۷. واسنجی مدل شیارشدگی در مخلوط‌های

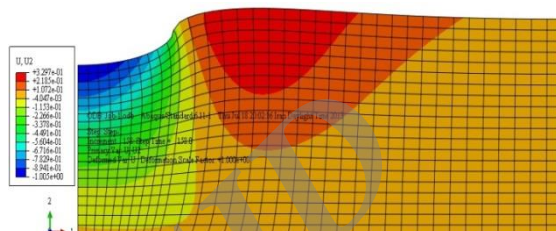
آسفالتی

به منظور اعتبار سنجی به نتایج مدل ارائه شده در این مطالعه از نتایج آزمایشگاهی ویل تراک استفاده گردیده است. مقایسه نتایج پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل و نتایج اندازه‌گیری شده به‌وسیله آزمایش ویل تراک در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که مقایسه نتایج شیارشدگی پیش‌بینی شده در نرم‌افزار آباکوس و اندازه‌گیری شده در آزمایش ویل تراک نشان می‌دهد اختلاف این دو مقادیر در بدترین حالت ۳۷٪ می‌باشد. به منظور کمتر کردن مقدار فوق عملیات واسنجی صورت می‌گیرد.

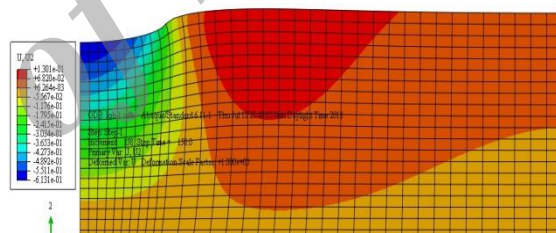
نحوه واسنجی بدین صورت بوده که مقادیر پارامترهای خزشی جدول ۵ به‌صورت سعی و خطا آنقدر تغییر داده شوند تا آنکه نتایج عمق شیار پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده تا حد مناسب بر هم منطبق گردند. پس از چندین مرحله سعی و خطا و با در نظر گرفتن پارامترهای خزشی مطابق جدول ۷ نتایج عمق شیار پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده مطابق شکل ۱۳ می‌باشد. مقایسه آنها در این مرحله نشان می‌دهد که نتایج مدل حدود ۱۳٪ با نتایج عمق شیار اندازه‌گیری شده در آزمایش ویل تراک اختلاف دارد. این مقدار اختلاف، اعتبار مناسبی را برای مدل دو بعدی ارائه شده در این تحقیق بر اساس مطالعات قبلی به همراه دارد (هوا، ۲۰۰۰).



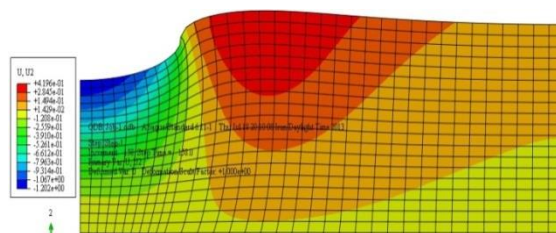
شکل ۸. شیارشدگی پیش‌بینی شده در مدل دو بعدی آسفالت شیشه‌ای تحت فشار ۱۰۰ Kpa



شکل ۹. شیارشدگی پیش‌بینی شده در مدل دو بعدی آسفالت معمولی تحت فشار ۱۰۰ Kpa



شکل ۱۰. شیارشدگی پیش‌بینی شده در مدل دو بعدی آسفالت شیشه‌ای تحت فشار ۲۰۰ Kpa

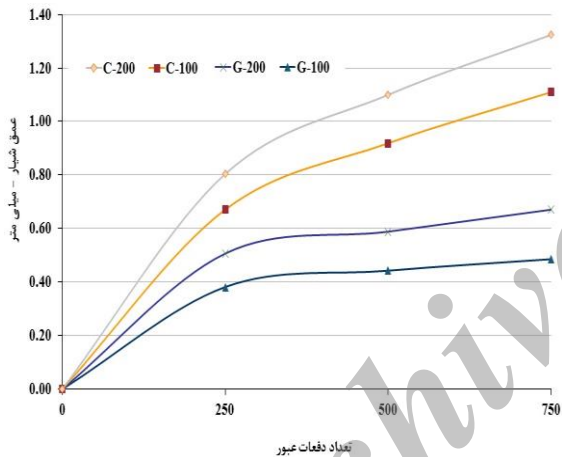


شکل ۱۱. شیارشدگی پیش‌بینی شده در مدل دو بعدی آسفالت معمولی تحت فشار ۲۰۰ Kpa

بیشترین مقدار شیارشدگی در نمونه‌های آسفالتی در لبه بیرونی سمت چپ نمونه‌ها رخ داده است. مقادیر این تغییر شکل‌ها برای نمونه‌های مختلف در تنش‌های مختلف در جدول ۶ نشان داده شده است.

می‌دهد، میزان شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالت معمولی در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد ۲/۲ برابر آسفالت شیشه‌ای می‌باشد.

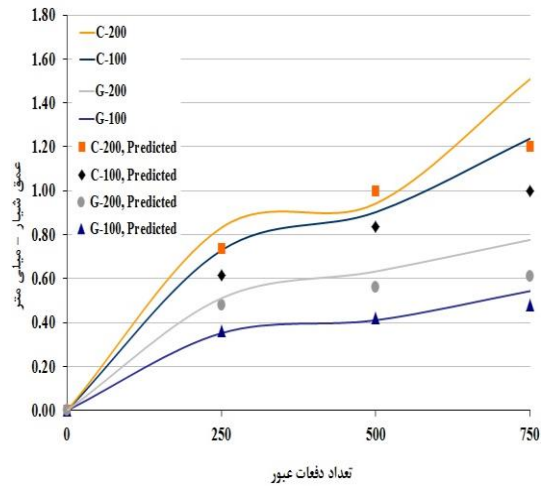
نکته مهم دیگری که می‌توان از شکل ۱۴ برداشت نمود تفاوت نرخ افزایش کرنش در مخلوط‌های آسفالت معمولی و شیشه‌ای می‌باشد. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که شیب افزایش کرنش به ازای تعداد دفعات عبور چرخ در مخلوط‌های آسفالت معمولی بسیار بیشتر از آسفالت شیشه‌ای می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش تعداد دفعات عبور، مقدار کرنش در مخلوط‌های آسفالت معمولی با توجه به شیب زیادتر بسیار بزرگتر از مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای خواهد بود.



شکل ۱۴. مقایسه عمق شیار پیش‌بینی شده در دمای ۵۰ °C در مخلوط‌های آسفالتی

۸. نتیجه‌گیری

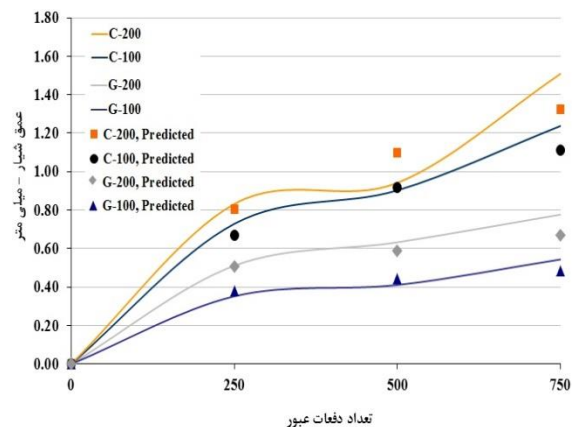
در این مقاله، به ارزیابی عددی تأثیر خرده شیشه ضایعاتی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی منحصراً پدیده شیارشدگی پرداخته شده، تا با استفاده از مدل ارائه شده در این تحقیق بتوان روشی مناسب جهت پیش‌بینی رفتار و میزان خرابی شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی در برابر بارهای وارده ارائه نمود. از آنجایی که پدیده شیارشدگی بر اساس رفتار ویسکو الاستیک و ویسکو الاستو پلاستیک روسازی‌ها صورت می‌گیرد، تئوری مورد استفاده در این مقاله بر



شکل ۱۲. مقایسه عمق شیار پیش‌بینی و اندازه‌گیری

جدول ۷. مقادیر اصلاح شده پارامترهای خزشی پس از واسنجی

نوع مخلوط آسفالتی	پارامتر $A(10^{-5})$	پارامتر n	پارامتر m
آسفالت شیشه‌ای	۲/۳۲	۱/۵۵۵	-۰/۶۷۳
آسفالت معمولی	۵/۱۰	۲/۰۰۷	-۰/۴۷۲



شکل ۱۳. مقایسه عمق شیار پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده پس از واسنجی

۴-۷. بررسی تأثیر شیشه بر عمق شیار مخلوط‌های آسفالتی

شکل ۱۴ به مقایسه مقادیر عمق شیار پیش‌بینی شده به ازای تعداد عبور چرخ در تنش‌های مختلف و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌پردازد. همانطور که این شکل نشان

آزمایشگاهی و خروجی‌های مدل دو بعدی ارائه شده در این تحقیق در هر دو نوع مخلوط آسفالت شیشه‌ای و متداول وجود دارد.

• همانطور که نتایج این تحقیق نشان می‌دهند آسفالت شیشه‌ای به خوبی در بهبود رفتار روسازی آسفالتی موفق بوده، آنجایی که میزان شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد ۱۲۰٪ کمتر از آسفالت معمولی می‌باشد.

• با توجه به ارزیابی رفتار ویسکو الاستو پلاستیک مدل‌های آسفالتی مشاهده می‌شود که خصوصیات ویسکو الاستو پلاستیک این مخلوط‌ها در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی متداول به سبب حساسیت حرارتی کمتر به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد.

اساس رفتارهای فوق بنا شده است. به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، مدل خزشی موجود در نرم‌افزار ABAQUS جهت مدل سازی مخلوط‌های آسفالتی معمولی و اصلاح شده با شیشه استفاده گردیده است. پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی از آزمایش بار محوری تکرار شونده برداشت گردیده و به منظور ارزیابی میزان کارایی مدل ارائه شده در این تحقیق نیز از نتایج آزمایش ویل تراک استفاده گردیده است. عمده نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

- بر اساس نتایج پژوهش، افزودن خرده شیشه ضایعاتی به نمونه‌های آسفالتی، تأثیر زیادی بر عملکرد این نمونه‌ها در برابر تغییر شکل‌های وابسته به زمان داشته است.
- بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که هماهنگی بسیار بالایی بین مقادیر مشاهده شده

۹. مراجع

- AASHTO guide for design of pavement structures, 1993.
- Airey, G. D., Collop, A. C. and Thom, N. H. 2004. "Mechanical Performance of Asphalt Mixtures Incorporating Slag and Glass Secondary Aggregates". Proc. of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, South Africa.
- Al-Khateeb, A., Saoud, A. and Al-Msouiti, M. 2011. "Rutting prediction of flexible pavements using finite element modelling". Jordan J. Civil Eng. 5(2): 112-119.
- Arabani, M. 2011. "Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete". Constr. Build. Mater. 25: 1181-1185.
- Fanga, H., John, E., Haddock, B., Thomas, D. and Adam, J. 2004. "On the characterization of flexible pavement rutting using creep model-based finite element analysis". Finite Elements in Analysis and Design 41: 49-73.
- Hua, J. 2000. "Finite Element Modeling and Analysis of Accelerated Pavement Testing Devices and Rutting Phenomenon". Ph.D. Thesis, Purdue University.
- Huang, Y. 1993. "Pavement Analysis and Design". Prentice Hall Univ. of Kentucky, USA.
- Hughes, A. and Charles, S. 2004. "Experimental Mixes to Minimize Rutting". ASCE, Boston Soc. Civil Eng. Section J., pp. 931-942.
- Perl, M., Uzan, J. and Sides, A. 2004. "Visco-Elasto-Plastic Constitutive Law for a Bituminous Mixture Under Repeated Loading". Transportation Res. Record 911, National Res. Council, Washington, D.C., pp. 21-27.
- Su, K., Lijun, S., Yoshitaka, H. and Ryota, M. 2008. "Analysis of Shear Stress in Asphalt Pavements under Actual Measured Tire-Pavement Contact Pressure". 6th ICPT, Sapporo, Japan.
- Tjan, A. and Adrian, Y. 2003. Analysis of Creep Properties of Bituminous Mixture with Constant Rate of Load Increment Method". Proc. Eastern Asia Soc. for Transport. Studies, 4: 322-331.