

# ارزیابی نتایج آزمایشگاهی عمق شیارشدگی در مخلوط آسفالت لاستیکی با نتایج مدل‌سازی المان محدود

مهیار عربانی، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

بهزاد بخشی (مسئول مکاتبات)، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

بهرام شیرینی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین، قزوین، ایران

E-mail: [b.bakhshi.eng@gmail.com](mailto:b.bakhshi.eng@gmail.com)

دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۱۰ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۲۰

## چکیده

تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که خرده لاستیک قادر است خصوصیات دینامیکی و عملکردی مخلوط‌های آسفالتی گرم را بهبود بخشد. در سال‌های اخیر مهندسان و محققان در تلاش هستند تا روش‌هایی را برای ارزیابی و بررسی رفتار روسازی تحت تأثیر عوامل متعدد بدست آورند. با افزایش سرعت و میزان بار ترافیکی و بالا رفتن اثرات منفی خرابی روسازی روی نظام اقتصادی و اجتماعی، مهندسين روش‌های تحلیلی و عددی را بدست آوردند. یکی از مودهای شایع خرابی روسازی، شیارشدگی است که خرده لاستیک قادر است میزان آن را کاهش دهد. از طرف دیگر، روش‌های عددی توانایی‌های خود را در زمینه ارزیابی دقیق سیستم روسازی به اثبات رسانیده است. هدف از این تحقیق استفاده همزمان از روش المان محدود دوبعدی و سه‌بعدی بر مبنای نتایج آزمایشگاهی در شبیه‌سازی آزمایش ویل‌تراک به منظور ارزیابی پدیده شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالت لاستیکی است. به منظور دست‌یابی به این هدف، نرم‌افزار آباکوس مورد استفاده قرار گرفته و مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی به دست آمده با یکدیگر و نیز با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیدند. مقایسه نتایج شیارشدگی پیش‌بینی شده در نرم‌افزار با نتایج اندازه‌گیری شده در آزمایش ویل‌تراک نشان می‌دهد که اختلاف این دو مقدار برای حالت مدلسازی سه‌بعدی و دوبعدی به ترتیب ۱۱/۵ و ۱۳/۵ درصد است. این مقدار اختلاف، اعتبار مناسبی را برای مدلسازی ارائه‌شده در این تحقیق براساس مطالعات قبلی به همراه دارد.

واژه های کلیدی: مخلوط آسفالتی گرم، آسفالت لاستیکی، شیارشدگی، المان محدود، ویل

## ۱. مقدمه

تحقیقات در زمینه 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 به‌منظور ترمیم خرابی‌های روسازی به مرور زمان صرف گردد، جلوگیری شود. استفاده از مواد ضایعاتی، روشی اقتصادی برای بهبود خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی است [Liantong et al. 2012].

تحقیقات قبلی چندین محقق نشان می‌دهد که مخلوط‌های آسفالت لاستیکی می‌تواند ضخامت رویه و ترک‌های انعکاسی آن را کاهش دهد [Cano and Charania, 1989]. تحقیق دیگری نشان می‌دهد که این مخلوط‌ها مقاومت بالایی در برابر شیارشدگی، ترک‌های خستگی و ترک‌های حرارتی دارند [Way, 2003]. افزودن خرده لاستیک به مخلوط آسفالتی منجر به افزایش ویسکوزیته قیر شده و باعث بهبود خصوصیات شیارافتادگی می‌گردد. نتایج آزمایش DSR در دمای  $76^{\circ}\text{C}$  نشان می‌دهد که با افزایش مقدار خرده لاستیک  $G^*/\text{Sin}\delta$  افزایش می‌یابد و هرچه  $G^*/\text{Sin}\delta$  قیر بیشتر باشد، نشان‌دهنده مقاومت بیشتر مخلوط آسفالتی در برابر شیارافتادگی است [Lee, Akisetty and Amirhanian, 2008]. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از قیر نرم و نامناسب و با حساسیت حرارتی زیاد یکی از عوامل ایجاد پدیده شیارافتادگی است. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از قیرهای اصلاح شده با خرده لاستیک یا سایر مواد افزودنی در این گونه موارد می‌تواند سودمند باشد و باعث افزایش مقاومت شیارشدگی گردد [پژوهشکده حمل‌ونقل، ۱۳۸۴]. تحقیقات صورت گرفته در برزیل و هند نشان می‌دهد که مخلوط‌های آسفالت لاستیکی دارای پتانسیل شیارافتادگی کمتری هستند [Huang, Bird and Heidrich, 2007]. 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 به‌عنوان نگرانی اصلی سازمان‌های حمل‌ونقل در

زمینه روسازی تلقی می‌شود [Liantong et al. 2012]. سالانه میلیون‌ها دلار صرف جبران خرابی شیارشدگی در روسازی‌ها می‌گردد. اصلاح شیارشدگی هزینه‌بر بوده و سبب ایجاد اختلال در جریان ترافیک می‌شود. چهار نوع شیارشدگی اصلی شناسایی شده است [Perl, Uzan and Sides, 1983]: شیارشدگی ناشی از تراکم مخلوط آسفالتی، فرسایش و ساییده شدن آسفالت در اثر عبور وسایل نقلیه در محل چرخ‌ها، تغییر شکل‌های دائم در سطح لایه آسفالتی و تغییر شکل دائم بستر.

شیارشدگی مخلوط آسفالتی گرم در راهنمای طرح روسازی به روش تجربی- مکانیستیک در دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند [Perl, Uzan and Sides, 1983]: تراکم تک‌بعدی یا تغییر شکل قائم. عمق شیار ناشی از تراکم مواد در نزدیکی مرکز مسیر عبور چرخ بدون برآمدگی‌های جانبی.

۱- تغییر شکل پلاستیک جانبی. عمق شیار ناشی از تغییر شکل جانبی مصالح در نزدیکی مرکز مسیر عبور چرخ با تحولاتی در هر دو طرف.

توانایی تخمین میزان تغییر شکل و یا شیارشدگی و رشد آن در روسازی‌های انعطاف‌پذیر از مفاهیم مهم در طرح روسازی‌ها به شمار می‌رود. ارزیابی مخلوط‌های بتن آسفالتی جهت محافظت از آن‌ها در برابر پدیده شیارشدگی مسیر چرخ‌ها به زمینه تحقیقاتی مهمی در سال‌های اخیر تبدیل شده است. به همین خاطر در این تحقیق به تحلیل عددی پدیده شیارشدگی براساس روش المان محدود پرداخته شده است. در مدل‌سازی با روش المان محدود برای تعیین پارامترهای خزشی، مخلوط آسفالتی تحت تست‌های آزمایشگاهی قرار می‌گیرد. تحلیل سازه‌ای روسازی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، که یک نرم‌افزار المان محدود است، انجام شد. از آنجایی که پدیده شیارشدگی براساس رفتار ویسکوالاستیک و ویسکوالاستوپلاستیک روسازی‌ها صورت می‌گیرد، تئوری مورد استفاده در این تحقیق براساس این رفتار مخلوط‌های آسفالتی بنا شده است. پس از مدل‌سازی مخلوط آسفالت لاستیکی با آباکوس به‌منظور ارزیابی میزان کارایی مدل ارائه‌شده در این تحقیق از تست ویل تراک (Wheel track) استفاده گردیده است [Kandhal and Cooley, 2002].

تواند رفتار مصالح روسازی را از طریق تقریب منطقی بارگذاری و دیگر فاکتورها مشخص کند و عملکرد روسازی را پیش‌بینی کند [Hua, 2000]. هووانگ، تأثیر ترکیبات مختلفی از فاکتورهای مؤثر مخلوط آسفالتی را بر روی شیارشدگی روسازی بررسی کرد. در این تحقیق از نرم‌افزار آباکوس برای مدل‌سازی سازه روسازی و تغییرشکل دائم استفاده شد. یک روش تقریبی برای شبیه‌سازی شرایط بارگذاری APT صورت گرفت و یک مدل خزش برای نشان دادن شیارشدگی واقعی روسازی استفاده گردید [Huang, 1995]. اخیراً "اوزاروسکی" و همکارانش مخلوط‌های آسفالتی را با استفاده از مدل ویسکوپلاستیک (خزش) موجود در آباکوس (ABAQUS) مدل‌سازی کرده و یک مدل دوبعدی برای تحلیل روسازی تحت سرویس توسعه دادند با این‌حال بارگذاری به‌صورت استاتیکی اعمال شد [Uzarowski et al. 2006].

چون در عمل مواد می‌توانند غیرخطی، الاستیک، غیرایزوتروپیک، غیرهمگن و ریزدانه باشند و علاوه بر تغییرشکل الاستیک تغییرشکل ویسکوز و پلاستیک داشته باشند و نیز بارگذاری‌ها دایره‌ای و توزیع یکنواخت ندارند [NCHRP/TRB, 2004]، بنابراین، برای مدل‌سازی صحیح روسازی‌ها، استفاده از روش‌های عددی مانند روش تفاضل محدود و المان محدود ضروری است. روش المان محدود تطابق خوبی با سیستم روسازی دارد که در زیر به این روش پرداخته شده است.

هدف اصلی این تحقیق استفاده از خصوصیات آزمایشگاهی مواد ویسکوپلاستیک تشکیل دهنده آسفالت لاستیکی در مدل‌سازی اجزای محدود تست ویل‌تراک است تا با استفاده از آنها بتوان به درستی رفتار سازه‌ای روسازی‌های انعطاف‌پذیر حاوی مخلوط آسفالت لاستیکی تحت بار وسایل نقلیه، تعداد تکرار آن و دمای روسازی را تخمین زد تا میزان تغییر شکل لایه مخلوط آسفالتی بوسیله مدل‌های ارائه شده مورد ارزیابی قرار گیرد. پارامترهای موردنیاز برای مدل‌سازی از تست خزش بدست آمده و کار کالیبراسیون مدل‌ها نیز با نتایج آزمایشگاهی تست ویل‌تراک انجام شده است نهایتاً نتایج پیش‌بینی آباکوس با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است تا قابلیت مدل‌سازی اجزای محدود سنجیده شود. با توجه به مشکلات انجام آزمایش ویل‌تراک به دلیل محدودیت تعداد دستگاه‌های آن و

مدل‌های پیشین روسازی آسفالتی از تحلیل‌های چندلایه‌ای الاستیک، که بارگذاری را به‌صورت استاتیکی فرض می‌کرد، استفاده می‌کردند درحالی‌که در واقعیت روسازی‌ها تحت هر دو بار استاتیکی و عبوری قرار می‌گیرند [Pirabarrooban et al., 2003]. برنامه‌های کامپیوتری ELSYM5 و GAMES در این چارچوب (تحلیل چندلایه‌ای الاستیک) توسعه یافته است [Duskov and Scarpas, 1997]. متأسفانه تحلیل الاستیک به دلیل ساده بودن آن بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد.

درحالی‌که معمولاً در واقعیت مخلوط آسفالتی ماده ویسکوپلاستیک، خاک ماده الاستوپلاستیک و رس‌ها خاصیت خمیری از خود نشان می‌دهند. در تحقیقی که در این زمینه انجام شد یک مدل الاستوپلاستیک برای لایه اساس، زیراساس و بستر و یک مدل ویسکوپلاستیک برای لایه آسفالتی در نظر گرفته شد [Zaghloul and White, 1993]. در ایران هم مطالعاتی در زمینه مدل‌سازی شیارشدگی صورت گرفته است که از جمله آن می‌توان به مقاله فخری و توفیق اشاره کرد که با استفاده از روش ارائه شده برای مدل‌سازی روسازی آسفالتی، پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را با دو نوع دانه‌بندی بررسی و با هم مقایسه نموده‌اند و نیز تن‌زاده و خیری در پژوهش خود به بررسی تأثیرات سرعت عملکردی معابر و نیز ارائه روشی جهت تعیین پارامترهای بارگذاری آزمایش شیارشدگی به منظور حصول پیش‌بینی مناسب تری از عملکرد روسازی‌های انعطاف‌پذیر پرداخته‌اند. بر این اساس با مطالعه مشخصات جریان ترافیکی عبوری اعم از سرعت و حجم در برخی از معابر شهر تهران پارامترهای بارگذاری آزمایشگاهی جهت مدل‌سازی منطبق بر واقعیت پدیده شیارشدگی ارائه شده است.

تحقیقی که هووا در سال ۲۰۰۰ انجام داد در مورد مدل‌سازی المان محدود و تحلیل آزمایش APA و پدیده شیارشدگی بود. در این تحقیق مدل‌های المان محدود برای نتایج تست‌های APA و PURWheel و پیش‌بینی عملکرد روسازی توسعه یافت و فاکتورهای مؤثر در مقدار شیارشدگی شناسایی شد. این فاکتورها شامل هندسه روسازی، شرایط مرزی، مصالح، بارگذاری، شرایط آزمایش و متغیرهای ساخت است. در تحقیق هووا از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شد. نتایج مطالعات مدل‌سازی المان محدود نشان داد که مدل خزش می-

عمودی و افقی بکار برد. آباکوس همچنین شامل مدل‌های مختلف مواد اعم از مدل‌های الاستیک خطی، ویسکوالاستیک، هیپوالاستیک و الاستوپلاستیک است [Pirabarooan, Zaman and Tarefder, 2003]. همچنین روش المان محدود دوبعدی برای به تصویر کشاندن پاسخ دقیق و جزئی کافی ناست. برای مثال مدل دوبعدی کرنش صفحه‌ای به استفاده از بارهای خطی و مدل‌سازی بارهای چرخ به صورت دایره‌ای و متقارن محوری محدود شده است. روش المان محدود سه‌بعدی به‌طور فزاینده‌ای، برای غلبه بر مشکلات و محدودیت‌های روش الاستیک لایه‌ای و المان محدود دوبعدی، به‌منظور مدل کردن روسازی‌های انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود. روش المان محدود سه‌بعدی به‌عنوان بهترین روش برای درک و فهم عملکرد روسازی شناخته شده است. المان‌های داخلی و فنرها می‌تواند برای انتقال برش بین لایه‌ها و کنترل مناسب شرایط مرزی، که برای تحلیل رفتار کل سیستم روسازی مهم است، استفاده شود. به طور کلی، روش مدل‌سازی سه‌بعدی برای تولید نتایج واقعی‌تر نسبت به مدل دوبعدی روندهای پیش‌پردازش بسیار سختی نیاز دارد. به‌نحوی که تعداد المان‌ها، کل زمان محاسبات و مقدار ظرفیت حافظه به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت.

## ۲. مدل خزش

بر اساس تحقیقات صورت گرفته، پاسخ مخلوط‌های بتن آسفالتی کاملاً وابسته به درجه حرارت و مدت زمان بارگذاری است. پرل<sup>۵</sup> در تحقیقات خود نشان داد که مخلوط آسفالتی دارای کلیه رفتارهای ویسکوز، الاستیک خطی و الاستیک غیرخطی است، به عبارت دیگر دارای رفتار ویسکو الاستو پلاستیک است. بسته به دمای مخلوط و سرعت بارگذاری، سهم هر یک از آنها در عملکرد مخلوط متفاوت است. در دماهای پایین، رفتار مخلوط آسفالتی را می‌توان الاستیک خطی فرض کرد. با افزایش دما ویژگی‌های رفتار الاستیک خطی کاهش و خصوصیات رفتار الاستیک غیر خطی افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر دما، رفتار الاستیک غیر خطی شروع به کاهش نموده و رفتار ویسکوز مخلوط آغاز می‌گردد [Arabani and Mirabdolazimi, 2009]. مدل توانی خزشی<sup>۶</sup> موجود در برنامه المان محدود [ABAQUS[version 6-13-1]]، که در این پژوهش از آن

هزینه انجام این آزمایش در ایران، تحقیق حاضر می‌تواند گام مهمی در بدست آوردن رفتار شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گوناگون با میزان و تکرار بار مختلف و در دماهای متفاوت باشد.

## ۱. مدل‌سازی المان محدود

برای تعیین تغییر شکل روسازی انعطاف‌پذیر روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان به روش‌های تحلیلی، تئوری الاستیک چندلایه‌ای (MLET)<sup>۷</sup>، روش المان محدود (FEM)<sup>۸</sup>، روش المان مرزی (BEASY)<sup>۹</sup> و روش‌های هیبریدی اشاره کرد. از بین این روش‌ها، روش المان محدود به‌طور قابل ملاحظه‌ای برای تحلیل عملکرد روسازی و مصالح آسفالت استفاده می‌شود. با روش المان محدود، در نظر گرفتن رابطه غیرخطی بین تنش و کرنش‌های الاستیک، پلاستیک، ویسکوز و ویسکوالاستیک امکان‌پذیر است. این روش جسم را به المان‌هایی تقسیم کرده و تغییرات پیوسته تنش و کرنش در جسم را با استفاده از تابع تغییر شکل پیوسته هر المان بررسی می‌کند. ماتریس سختی برای هر المان، با هندسه و معادله مشخصه منحصر به فرد، تشکیل می‌شود، سپس ماتریس سختی کل سازه را می‌توان با انتگرال‌گیری از ماتریس‌های سختی تک تک المان‌ها فرموله کرد. نتیجه این کار تشکیل مجموعه‌ای از معادلات مستقل از زمان بوده که تغییر مکان گره‌ها و نیروی بارگذاری را بدست می‌دهد. با حل این معادلات تغییر مکان کل گره‌ها و نیز تنش‌ها و کرنش‌های هر المان محاسبه می‌شود. روش المان محدود به طراح روسازی اجازه می‌دهد که روابط غیر خطی بین تنش‌ها و کرنش‌های الاستیک، پلاستیک، ویسکوز و ویسکوالاستیک در نظر بگیرد. در سال‌های اخیر روش المان محدود به خوبی استفاده شده است [Button et al. 1999]. نرم‌افزارهای المان محدود استفاده شده برای تحلیل روسازی آسفالتی عبارتند از:

DSC-SST20, LS-DINA, ANSYS, ILLI-PAVE, MICH-PAVE, ABAQUS و CAPA-3D.

نرم‌افزار آباکوس از جمله نرم‌افزارهای قدرتمند اجزای محدود در بازار است. آباکوس قادر به حل مسائل ساده با استفاده از تحلیل‌های خطی و مسائل پیچیده‌تر که نیازمند به تحلیل‌های غیرخطی بوده است. مدل المان نامحدود را می‌توان برای مدل کردن شرایط مرزی بی‌کران در سیستم روسازی در جهت‌های

مقداری بین ۰ و ۱- دارد. این پارامترها برای شبیه‌سازی تست ویل تراک در آباکوس استفاده شده است.

### ۳. فعالیت آزمایشگاهی

#### ۳-۱ مواد و مصالح مصرفی

قیر مصرفی در ساخت نمونه‌ها، قیر ۷۰-۶۰ پالایشگاه اصفهان است که مشخصات آن در جدول (۱) آمده است.

دانه‌بندی مصالح سنگی به کار رفته در این پژوهش، دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور است که برای ساخت قشر رویه استفاده می‌گردد. مشخصات دانه‌بندی مصالح سنگی در جدول (۲) نشان داده شده است.

دانه‌بندی خرده لاستیک (ADOT(Type2) به عنوان دانه-بندی متوسط انتخاب شده است [Putman and

Amirkhanian, 2006]

استفاده شده است، مدل مناسبی برای تعیین تغییر شکل‌های وابسته به زمان مخلوط‌ها است. این مدل بسیار ساده ولی کاملاً مناسب برای حل مسائل مربوط به شیارشدگی است [Huang, 1995]. حالت سخت شدگی با زمان<sup>۲</sup> مدل خزشی که در معادله (۱) نشان داده شده است به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\epsilon_{vp} = A\sigma^n t^m \quad (1)$$

$\epsilon_{vp}$ : نرخ کرنش خزشی تک محوری  $\sigma$ : تنش تک محوری  $t$ : زمان کل بارگذاری  $m, n, A$ : پارامترهای وابسته به مصالح

بسیاری از تحقیق‌های قبلی نشان می‌دهند که برای مصالح با رفتار منطقی، دو پارامتر  $A$  و  $n$  مقداری مثبت داشته و  $m$  نیز

جدول ۱. مشخصات قیر به کار رفته در ساخت نمونه‌ها

| چگالی در ۲۵°C | درجه نفوذ | نقطه نرمی °C | شکل پذیری cm | درجه اشتعال °C | افت وزنی % | درجه خلوص % |
|---------------|-----------|--------------|--------------|----------------|------------|-------------|
| ۱/۰۲          | ۶۶        | ۵۱           | ۱۱۲          | ۲۶۲            | ۰/۷۵       | ۹۹          |

جدول ۲. دانه بندی پیوسته مخلوط آسفالت گرم مربوط به قشر توپکا

| اندازه الک       | ۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ) | ۱۹ میلی‌متر (۳/۴ اینچ) | ۱۲/۵ میلی‌متر (۱/۲ اینچ) | ۹/۵ میلی‌متر (۳/۸ اینچ) | ۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴) | ۲/۳۶ میلی‌متر (شماره ۸) | ۰/۳ میلی‌متر (شماره ۵۰) | ۰/۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰) |
|------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| درصد وزنی رد شده | -                    | ۱۰۰                    | ۹۵                       | -                       | ۵۹                      | ۴۳                      | ۱۳                      | ۶                          |

جدول ۳. دانه بندی خرده لاستیک

| اندازه الک       | ۲ میلی‌متر (شماره ۸) | ۲ میلی‌متر (شماره ۱۰) | ۱/۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶) | ۰/۶ میلی‌متر (شماره ۳۰) | ۰/۴۲۵ میلی‌متر (شماره ۴۰) | ۰/۳ میلی‌متر (شماره ۵۰) | ۰/۱۵۸ میلی‌متر (شماره ۱۰۰) | ۰/۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰) |
|------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
| درصد وزنی رد شده | -                    | ۱۰۰                   | ۸۲/۵                     | ۶۰                      | -                         | ۲۲/۵                    | -                          | -                          |

### ۲-۳ ساخت نمونه

مطابق روش ASTM D1559 نمونه‌های آزمایشی مارشال ساخته شدند. خرده لاستیک به دو روش تر و خشک در مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در این تحقیق از روش تر که در آن خرده لاستیک به‌عنوان اصلاح‌کننده به قیر اضافه می‌شود استفاده شد. برای امتزاج قیر و خرده لاستیک از یک همزن مجهز به ترموکوپل و ترموستات استفاده شده است تا امتزاج در دمای مورد نظر صورت پذیرد. عمل امتزاج با سرعت ۱۲۰۰ دور در دقیقه انجام شده است. دمای امتزاج در محدوده  $T \pm 5^\circ C$  انتخاب شد که T دمای امتزاج در نظر گرفته شده برای ساخت هر نمونه است. طرح اختلاط بهینه به صورت زیر است: دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت برنامه‌ریزی کشور، ۷٪ قیر اصلاح‌شده به روش تر، دانه‌بندی نوع ۲ برای خرده لاستیک (دانه‌بندی ADOT (Type II) ۱۰٪ خرده لاستیک، ۳٪ روغن آروماتیک، دمای امتزاج  $175^\circ C$ ، دمای تراکم  $150^\circ C$  و  $45$  دقیقه زمان امتزاج.

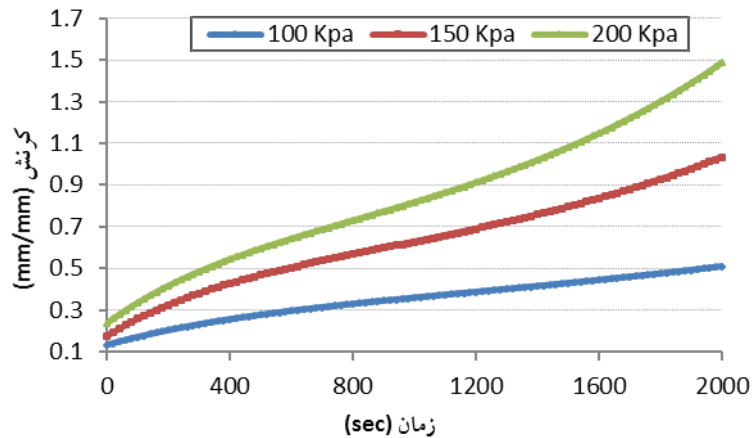
### ۴. آزمایش‌های انجام شده و نتایج آن‌ها

#### ۴-۱ آزمایش خزش

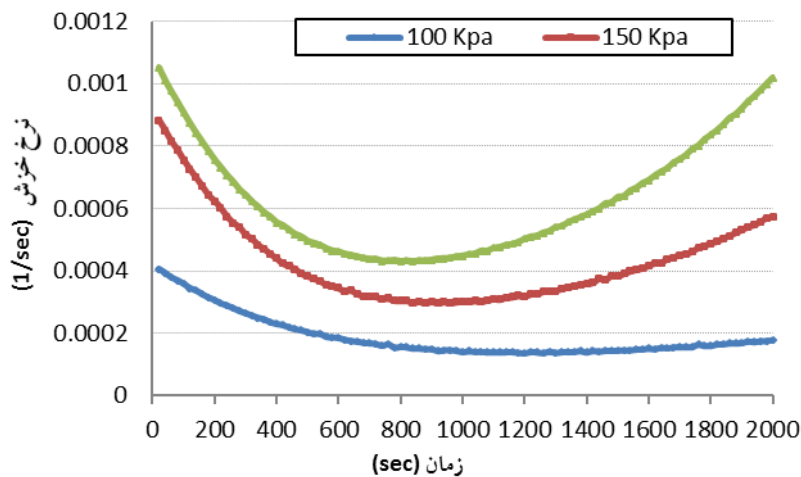
آزمایش خزش، سال‌ها در تعیین میزان استعداد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. علت آن، آسانی نسبی آزمایش و ارتباط منطقی آن با تغییر شکل دائم در مخلوط‌های آسفالتی است. هدف اصلی این روش به طبقه‌بندی مصالح و مقایسه آن‌ها از لحاظ پتانسیل شیارشدگی محدود می‌شود. یکی از دستگاه‌هایی که بر اساس آزمایش خزش دینامیکی ابداع شد، دستگاه UTM 5 (دستگاه مورد استفاده قرار گرفته در این تحقیق) بود. این دستگاه را می‌توان نسل اول دستگاه‌های UTM دانست؛ به نحوی که سری‌های جدید UTM 14 و UTM 25 نیز به بازار عرضه شده‌اند. این دستگاه که توانایی تعیین پارامترهای مکانیکی مهم مخلوط‌های آسفالتی را تحت شرایط مشابه میدانی (از لحاظ بارگذاری و دمایی) دارد، دارای سیستم بارگذاری با هوای فشرده بوده و قادر به اعمال هر نوع بار مانند سینوسی، مستطیلی و... است. در این آزمایش و در هر سیکل بارگذاری، مدت اعمال بار و مدت زمان استراحت برابر یک ثانیه است. همچنین قبل از

اعمال سیکل‌های آزمایش، تنش پیش بارگذاری به میزان ۱۲ کیلوپاسکال به مدت ۱۲۰ ثانیه اعمال شد. نرم‌افزار این آزمایش براساس آیین‌نامه استرالیا تدوین شده و با آیین‌نامه‌های اروپا، انگلستان و امریکا نیز مطابقت دارد. مهم‌ترین خروجی نرم‌افزار آزمایش خزش، نمودار کرنش تجمعی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری بوده که به نوعی به مقاومت شیارشدگی مخلوط وابسته است. شکل (۱) نمونه‌ای از این نمودار را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، نمودار از سه قسمت مجزا تشکیل شده است: ناحیه ابتدایی که در آن تغییر مکان‌های دائم سریعاً بر روی هم انباشته می‌شود، ناحیه دوم که افزایش کرنش‌های تجمعی با شیبی ملایم و تقریباً ثابت صورت می‌پذیرد و ناحیه سوم که روند افزایش کرنش تجمعی مجدداً به سرعت افزایش می‌یابد. براساس نظریه آقای ویتزاک، تعداد سیکل‌هایی که در آن ناحیه سوم نمودار آغاز می‌شود، عدد روانی نام دارد. آزمایش خزش، برای تخمین پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم استفاده شده است. در این تحقیق جهت برآورد پارامترهای مورد نیاز در ارزیابی رفتار ویسکوالاستیک و ویسکوالاستوپلاستیک مخلوط‌های آسفالت لاستیکی از این آزمایش استفاده شد. برای تخمین پارامترهای مورد نیاز نرم‌افزار آباکوس برای ایجاد مدل‌های رفتاری مناسب به منظور پیش‌بینی پدیده شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش خزش با تنش‌های ثابت ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال در دمای ثابت  $40^\circ C$  با ۲۰۰۰ سیکل در مدت یک ساعت انجام شده است. در این آزمایش بار به صورت محوری بر نمونه‌ها وارد شده و تغییر شکل دائمی به صورت مداوم به وسیله دو حسگر اندازه‌گیری گردیده است. این آزمایش بر طبق دستورالعمل استاندارد بریتانیا (BS) انجام شده است [British Standard Institution, 1995].

شکل (۱) و (۲) نمودار خزشی و نرخ خزشی آسفالت لاستیکی را در دمای  $40^\circ C$  نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل (۲) نشان می‌دهد، مرحله نخست آزمایش خزش که مرحله خزش کند شونده<sup>۹</sup> نامیده می‌شود، نرخ کرنش نزولی بوده و در مرحله دوم که ناحیه خزش پایدار<sup>۹</sup> است این نرخ خطی بوده و نهایتاً در ناحیه خزش تند شونده<sup>۱۰</sup> این نرخ به شدت شروع به افزایش می‌کند



شکل ۱. نمودار خزش آسفالت لاستیکی در دمای ۴۰°C



شکل ۲. نمودار نرخ خزشی آسفالت لاستیکی در دمای ۴۰°C

#### ۴-۲ آزمایش ویل تراک

وسیله مسیر چرخ هامبورگ در ایران تحت عنوان دستگاه ویل-تراک شناخته می‌شود. آزمایش ویل تراک برای ارزیابی تغییرات خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی در دماهای بالا، از جمله مقاومت شیارشدگی تحت شرایط رطوبتی و بارگذاری شبیه به آنچه در جاده‌ها به سطح روسازی وارد می‌شود، بکار می‌رود. در یک تست ویل تراک متداول نمونه مخلوط آسفالتی گرم در آب داغ غرقاب شده و چرخ فلزی از روی سطح آن عبور می‌کند. آزمایش شیارشدگی ویل تراک با حرکت رفت و برگشت چرخ بارگذاری شده روی نمونه آسفالتی به تعیین پتانسیل شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی می‌پردازد. این کار به وسیله شیارسنج‌هایی در فواصل زمانی مشخص با اندازه‌گیری عمق شیار ایجاد شده در نمونه در امتداد حرکت چرخ دستگاه صورت می‌پذیرد. دستگاه شامل یک چرخ بارگذاری ثابت

است که بر روی نمونه‌ای بر روی میز متحرک، حرکت می‌کند. این میز دارای یک حرکت رفت و برگشتی منظم در طولی معادل  $230 \pm 3$  میلی‌متر است. فرکانس این حرکت در حدود  $26/5$  بار عبور در دقیقه است که در حدود ۴۵ دقیقه برای هر آزمایش به طول می‌انجامد. این دستگاه متشکل از یک چرخ لاستیکی صلب به قطر خارجی ۲۰۰ میلی‌متر است؛ سطح تماس چرخ با نمونه یک مستطیل به پهنای  $50 \pm 1$  میلی‌متر است. نمونه‌های مورد آزمایش در این دستگاه مغزه‌های آسفالتی به قطر ۲۰۰ میلی‌متر و یا دال‌های مکعبی آسفالتی به طول ۳۰۰ و به ضخامت ۴۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر است. نمونه‌های ساخته شده به مدت ۵ ساعت درون محفظه‌ی کنترل دما در دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار داده شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفت. در تحقیق حاضر، این آزمایش روی مخلوط‌های آسفالت لاستیکی توسط دستگاه شیارافتادگی ویل-

## ارزیابی نتایج آزمایشگاهی عمق شیارشدگی در مخلوط آسفالت لاستیکی با نتایج مدل سازی المان محدود

اول، تغییرشکل‌ها الاستیک بوده و به صورت ماندگار نیستند. به این ترتیب در نمودار (۲) سیکل بارگذاری که ابتدای مرحله دوم آزمایش خزش دینامیکی بود، مورد تحقیق قرار گرفت.

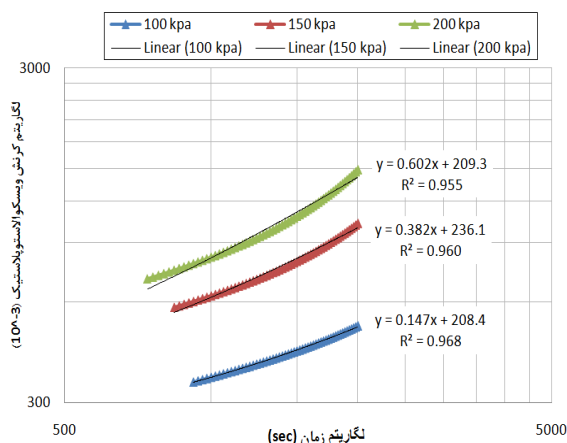
رابطه (۱) را می‌توان به صورت رابطه (۲) نیز بیان داشت [Perl et al. 1983]

$$\varepsilon_{vp}(\sigma, t, N) = B(\sigma) \times t^{\beta} \quad (2)$$

نتیجه اعمال تابع لگاریتم بر طرفین معادله بالا به صورت معادله (۳) است:

$$\text{Log}(\varepsilon) = C + \beta \text{Log}(t) \quad (3)$$

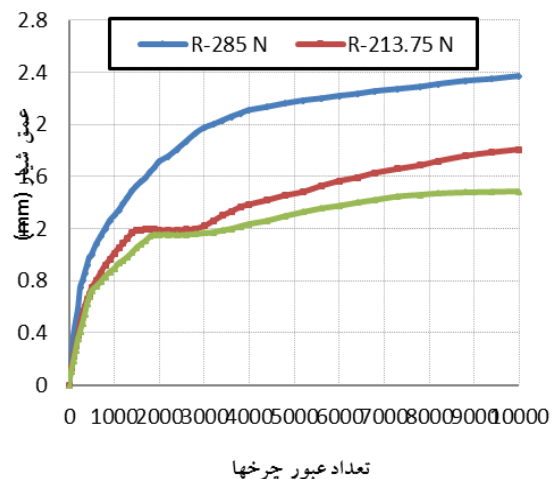
از معادله (۳) مشخص است که اگر کرنش‌ها و زمان‌ها در مراحل ۲ و ۳ منحنی خزشی به صورت لگاریتمی در مقابل یکدیگر ترسیم گردند نتیجه به صورت خطی است. در نتیجه به منظور محاسبه پارامتر  $\beta$  کرنش‌ها و زمان‌های مراحل ۲ و ۳ از شکل (۱) شناسایی و به صورت لگاریتمی در مقابل یکدیگر به ازای تنش‌های ۱۵۰، ۱۰۰، و ۲۰۰ کیلوپاسکال و در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد ترسیم گردید. شکل (۴) نشان‌دهنده این نمودار است.



شکل ۴. نمودار کرنش ویسکو پلاستیک- زمان برای آسفالت

لاستیکی

تراک هامبورگ مطابق استاندارد AASHTO T324 و در آزمایشگاه مکانیک خاک تهران انجام پذیرفت. بارهای اعمال شده در این تحقیق از طرف چرخ ۲۸۵، ۲۱۳/۷۵ و ۱۴۲/۵ نیوتن است. که با توجه به عرض چرخ بارگذاری ۵۰ میلی‌متر و سرعت حرکت چرخ نیز تقریباً ۱،۱ km/h، این بارها به ترتیب تنش‌های ۲۰۰، ۱۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال را تولید می‌کنند. در این پژوهش از نمونه‌هایی با ابعاد ۳۰۰\*۳۰۰\*۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. اداره حمل و نقل کولرادو، به عنوان مثال، ماکزیمم عمق شیار مجاز در ۱۰۰۰۰ عبور چرخ را ۴ میلی‌متر [FHWA, 2002] و در ۲۰۰۰۰ عبور چرخ ۱۰ میلی‌متر پیشنهاد می‌کند. نتایج این آزمایش برای مخلوط آسفالت لاستیکی در شکل (۱) آمده است.



شکل ۳. نمودار عمق شیارشدگی در مقابل تعداد عبور چرخ در مخلوط آسفالت لاستیکی

## ۵. برآورد پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی

به منظور ارزیابی رفتار ویسکو الاستوپلاستیک و پیش‌بینی پدیده شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی از کرنش‌های رخ داده در مرحله دوم و سوم استفاده گردیده است زیرا در مرحله

جدول ۴. مقادیر  $\beta$  و  $m$

| پارامتر $m$ | پارامتر $\beta$ | دما ( $^{\circ}\text{C}$ ) | نوع مخلوط آسفالتی |
|-------------|-----------------|----------------------------|-------------------|
| -۰/۶۲۳      | ۰/۳۷۷           | ۴۰                         | آسفالت لاستیکی    |



مقادیر  $b_1$  و  $b_2$  مربوط به شکل (۵) در جدول (۵) خلاصه شده است. برای به دست آوردن مقادیر پارامتر  $A$  و  $n$  لازم است تا معادلات (۱) و (۸) با یکدیگر معادل در نظر گرفته شوند تا مقادیر مجهول به دست آیند. برای این منظور از نرم افزار MATLAB استفاده گردیده است بدین صورت که معادلات پیش‌بینی شده در نمودار (۵) و معادله (۱) به همراه ورودی‌های اولیه به نرم‌افزار ارائه گردیده و با انتخاب بازه‌های اولیه، نرم‌افزار MATLAB دو پارامتر  $A$  و  $n$  را به گونه‌ای تخمین می‌زند که دو معادله بیشترین مطابقت را با یکدیگر داشته و مقادیر دو معادله کمترین اختلاف رو با یکدیگر داشته باشند. مقادیر پارامترهای معادله توانی خزش، قبل از مرحله کالیبراسیون به طور خلاصه در جدول (۵) آورده شده است. به منظور کالیبراسیون و اعتبارسنجی نتایج مدل، لازم است آن‌ها را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود. برای کالیبره کردن نتایج مدل‌ها در این مطالعه از نتایج آزمایشگاهی ویل‌تراک استفاده گردیده است. این نتایج در بخش (۵) نشان داده شده است.

برای عمل کالیبراسیون، لازم است با انجام تغییراتی در پارامترهای خزشی محاسبه گردیده، هرچه بیشتر نتایج مدل موردنظر و نتایج واقعی شیارشدگی به یکدیگر نزدیک گردند. نحوه کالیبره کردن بدین صورت است که مقادیر پارامترهای خزشی قبل از مرحله کالیبراسیون آن‌قدر تغییر داده شوند تا آنکه مقادیر عمق شیار پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده به هم نزدیک گردند.

به منظور برآورد پارامتر  $\beta$ ، تمامی نتایج در هر تنش، با یک خط تقریب زده شدند. همان‌طور که مقادیر  $R^2$  نشان می‌دهد تقریب‌ها در محدوده مناسبی قرار دارند. به علت اینکه به ازای تنش‌های مختلف شیب نمودارها متفاوت است بنابراین به منظور محاسبه پارامتر  $\beta$ ، برای یک دمای مشخص از میانگین‌گیری وزنی استفاده گردیده است.

برای پارامتر  $m$  موجود در معادله خزشی، که در بخش ۳ به تفصیل تشریح گردید، داریم:

$$m = \beta - 1, \quad 0 < m < 1 \quad (4)$$

جدول (۴) نشان‌دهنده مقادیر پارامتر  $\beta$  و  $m$  برای مخلوط آسفالتی لاستیکی است.

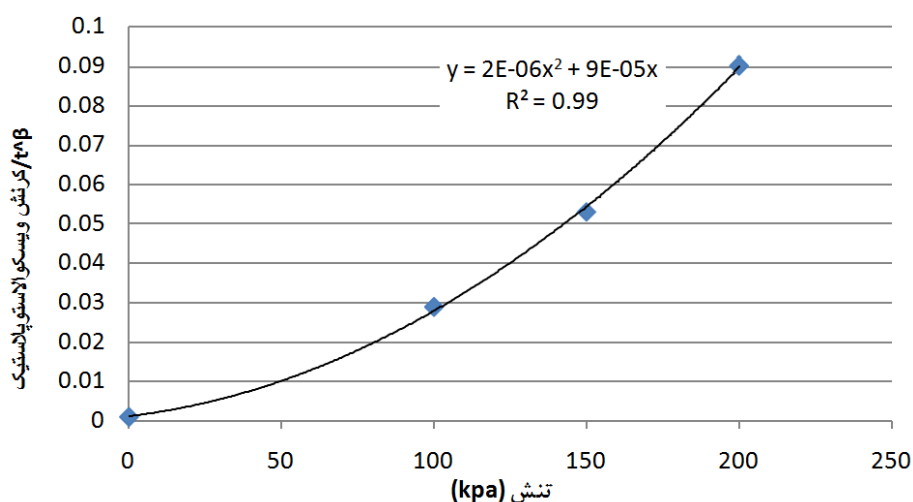
در ادامه روند محاسبه پارامترهای موردنیاز، به منظور محاسبه دو پارامتر  $A$  و  $n$  لازم است تا تغییراتی در معادله (۱) صورت گیرد. پس از انجام این تغییرات، معادله (۵) با توجه به معادله (۲) حاصل گردیده است: شکل (۵) نموداری را نشان می‌دهد که در آن مقادیر  $\beta \varepsilon / t^\beta$  به ازای تنش‌های اعمالی در دمای  $40^\circ\text{C}$  برای آسفالت لاستیکی ترسیم گردیده است. همان‌طور که روند نتایج نشان می‌دهد می‌توان این نمودار را با یک معادله درجه ۲ به صورت معادله (۶) تخمین زد. (۶)

$$B(\sigma) = b_1 \sigma + \sigma^2$$

بنابراین کرنش نهایی را می‌توان به صورت معادله (۷) نشان داد:

$$\varepsilon = (b_1 \sigma + b_2 \sigma^2) \times t^\beta \quad (7)$$

با توجه به توضیحات و معادلات فوق، معادله تخمینی برای نمودار (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵. مقادیر  $\beta \varepsilon / t^\beta$  آسفالت لاستیکی به ازای تنش‌های اعمالی

## ۶. نتایج و بحث‌های مدل‌سازی آزمایش ویل-

### تراک

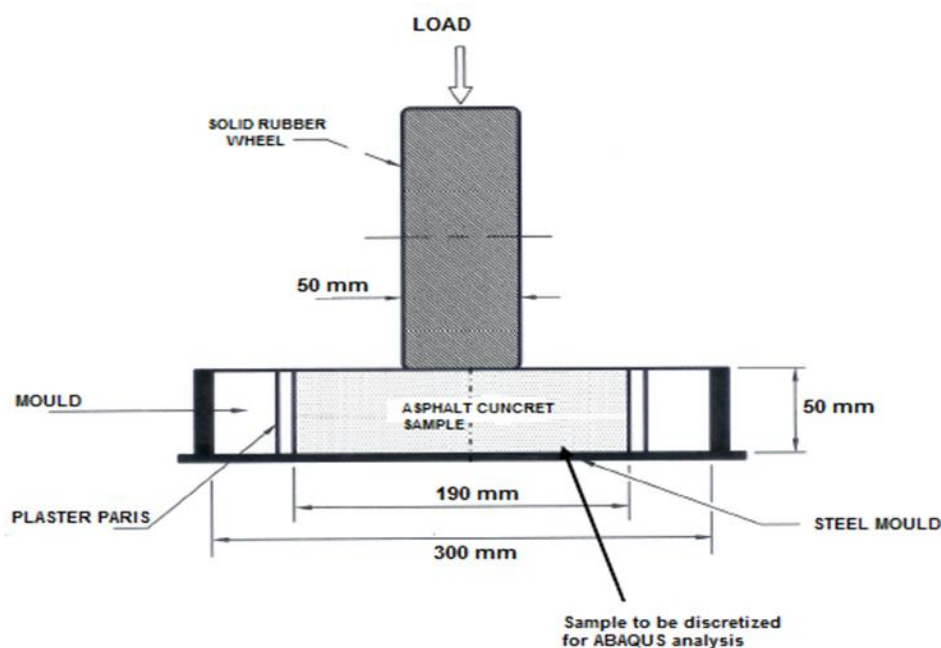
هدف از مدل‌سازی اولیه تشریح تأثیر تست ویل‌تراک بر روی مخلوط‌های آسفالتی مختلف است. همان‌طوری که در شکل (۶) نشان داده شده است هدف اصلی مدل بیان عکس‌العمل نمونه آسفالتی در طول آزمایش ویل تراک است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده و نحوه اعمال بارگذاری برای مدل مورد نظر کاملاً مطابق با شرایط موجود در آزمایش ویل-تراک است. به‌منظور مدل‌سازی دو بعدی از رفتار کرنش صفحه‌ای استفاده گردیده است زیرا طول نمونه در مقابل ضخامت آن بسیار زیاد بوده و می‌توان از کرنش در آن راستا صرف‌نظر نمود بنابراین نوع المان انتخاب شده برای مش‌بندی مدل دوبعدی **C2D3R** است.

پارامتر  $n$  همان‌طور که قبلاً نیز تشریح گردید پارامتری وابسته به مقدار تنش است. برای هر دما و تنش ثابت، با توجه به ثابت بودن تنش مقدار پارامتر  $n$  نیز ثابت مانده و در این مرحله قادر به تغییر آن نیستیم. اما می‌توان با تغییر پارامترهای  $A$  و  $m$  در این مرحله به نتایج مطلوب‌تری از مدل دست یافت. با توجه به نوع نمونه و با توجه به میزان مقادیر عمق شیار پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده گاهی لازم است تنها  $A$ ، یا  $m$  و یا هر دو را تغییر داد تا نتایج مدل به نتایج آزمایشگاهی نزدیک گردند. در نهایت پس از چندین مرحله سعی و خطا پارامترهای خزشی کالیبره شده مطابق جدول (۵) است.

برای مشخص شدن هویت الاستیک خطی مخلوط آسفالتی، تنها داشتن دو خاصیت مدول الاستیسیته ( $E$ ) و ضریب پواسون ( $\nu$ ) کافی است. این مقادیر می‌تواند به‌صورت آزمایشگاهی یا از مقادیر موجود در تحقیقات محققین استخراج شود در این تحقیق، مقدار  $E$  و  $\nu$  مخلوط آسفالتی به ترتیب ۱۸۰۰ مگاپاسکال و ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است.

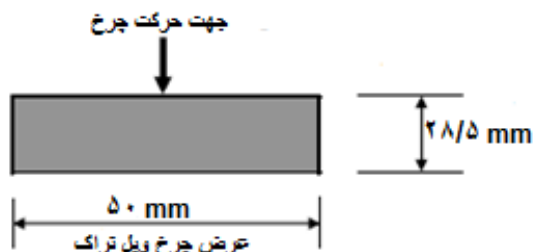
جدول ۵. مقادیر پارامترهای خزشی کالیبره شده

| بعد از کالیبره کردن |             |                      | قبل از کالیبره کردن |             |                      | پارامتر            | پارامتر            | دما             |
|---------------------|-------------|----------------------|---------------------|-------------|----------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| پارامتر $m$         | پارامتر $n$ | پارامتر $A$          | پارامتر $m$         | پارامتر $n$ | پارامتر $A$          | $b_2$              | $b_1$              | ( $^{\circ}C$ ) |
| -۰/۶۰۹              | ۱/۵         | $۴/۲ \times ۱۰^{-۵}$ | -۰/۶۲۳              | ۱/۵         | $۲/۹ \times ۱۰^{-۵}$ | $۲ \times ۱۰^{-۶}$ | $۹ \times ۱۰^{-۵}$ | ۴۰              |



شکل ۶. نمودار آزمایش مقاومت شیارشدگی در ویل تراک

آزمایش ویل تراک با رابطه (۸) نشان می‌دهد. با توجه به طول مسیر عبوری چرخ در هر بار عبور و با توجه به سرعت چرخ قادریم مقدار کل زمان بارگذاری مورد نیاز را به ازای  $n$  بار عبور چرخ محاسبه نماییم.



شکل ۷. رد اثر چرخ بر روی نمونه آسفالتی

بینید جابه‌جایی افقی و عمودی لبه‌های AB, BC, CD به‌وسیله تکیه‌گاه‌های مفصلی محدود شده است.

در مدل سه‌بعدی، اکثر شرایط مورد نیاز برای مدل‌سازی شبیه به مدل دوبعدی است. در این مدل نیز، عرض چرخ بارگذاری ۵۰ میلی‌متر و سرعت حرکت چرخ ۱,۱ km/h است. ابعاد در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی همانند بخش قبل ۳۰۰\*۳۰۰\*۵۰ میلی‌متر است. مش‌بندی مدل‌سازی به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده است که بهترین و دقیق‌ترین نتایج تولید شود. نوع المان مش استفاده شده، انتگرال کاهش‌یافته ۸ بلوکه خطی (C3D8R) برای بهبود سرعت دستیابی به جواب است. المان‌های C3D8R از نوع quadratic بوده که نتایج بهتری نسبت به المان‌های درونیابی خطی دارد.

بارهای اعمال شده از طرف چرخ بر روی نمونه آسفالتی برای تولید تنش مورد نظر در یک سطح ۳۰\*۵۰ میلی‌متر وارد شده و به‌وسیله کدنویسی این بار به صورت رفت و برگشت بر روی نمونه آسفالتی حرکت داده می‌شود. شرایط مرزی اعمالی برای مدل المان محدود سه‌بعدی در شکل (۹) آورده شده است. شرایط مرزی طوری اعمال شده است که تنها تغییرشکل‌های در جهت قائم (جهت Z) اتفاق بیفتد. بار اعمالی به‌صورت فایل ورودی<sup>۱۱</sup> به نرم‌افزار آباکوس وارد شده است. این فایل با کدنویسی DLOAD نوشته شده است. اشکال (۱۰) و (۱۱) به ترتیب نشان‌دهنده تغییرشکل‌های پیش‌بینی شده به‌وسیله نرم‌افزار آباکوس برای مدل دوبعدی و سه‌بعدی (نصف مدل) برای نمونه آسفالت لاستیکی در دمای ۴۰°C و ۱۰۰۰۰ بار عبور

رد اثر چرخ لاستیکی صلب تست ویل تراک روی سطح نمونه مخلوط آسفالتی در شکل (۷) به تصویر کشیده شده است. عرض چرخ بارگذاری ۵۰ میلی‌متر و سرعت حرکت چرخ نیز تقریباً ۱/۱ km/h است. در این پژوهش از نمونه‌هایی با ابعاد ۳۰۰\*۳۰۰\*۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. با توجه به سطح تماس چرخ-نمونه، نیروهای ۲۸۵، ۲۱۳/۷۵ و ۱۴۲/۵ نیوتن به منظور تولید تنش ۲۰۰، ۱۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال از طرف چرخ بر روی نمونه آسفالتی اعمال شد.

طول مسیر رفت و طول مسیر برگشت چرخ ۲۶۰ میلی‌متر و فرکانس این حرکت نیز در حدود ۵۳ بار در دقیقه است. برای مدل دوبعدی، زمان بارگذاری بر روی نمونه آسفالتی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار به ازای یک بار عبور چرخ در

$$t = L_{eff} / (17.6v_s) \quad (۸)$$

$t$ : زمان بارگذاری بر حسب ثانیه.

$L_{eff}$ : طول مؤثر بارگذاری (inch) که با توجه به شکل (۸) برابر ۲۸/۵ میلی‌متر است.

$v_s$ : سرعت چرخ در آزمایش ویل تراک (مایل بر ساعت). ذکر این نکته لازم است که با توجه به مشاهدات عملی از انجام آزمایش ویل تراک برای عرض مؤثر ۲۸/۵ میلی‌متر، مدت زمان یک‌بار عبور برابر ۰/۱۴ ثانیه اندازه‌گیری گردیده است.

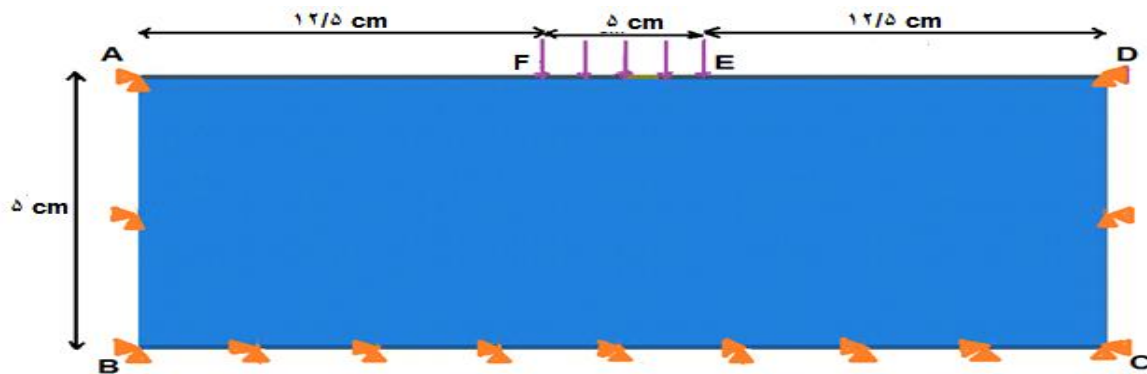
با توجه به اینکه اعمال بارگذاری در آزمایش ویل تراک به‌صورت رفت و برگشتی بوده و در هر انتهای مسیر مدت زمانی به عنوان تأخیر وجود دارد، بنابراین در این بخش از روش پیشنهادی هووا و همکاران استفاده گردیده است. هووا و همکاران پیشنهاد کردند که ۰/۱۴ ثانیه به منظور طی مسیر ۲۶ سانتیمتری نمونه آزمایشگاهی لازم است و برای تاخیر انتهای مسیر زمان ۰/۰۷ ثانیه پیشنهاد دادند که با برهم‌نهی آن‌ها کل مدت زمان یک‌بار عبور برابر ۰/۲۱ ثانیه محاسبه گردید. با ضرب کردن مقدار فوق در تعداد تکرارهای عبور، مدت زمان مورد نیاز برای بارگذاری بار چرخ در نرم‌افزار محاسبه می‌گردد [Hua, 2000].

شرایط مرزی در نظر گرفته شده و نحوه اعمال بارگذاری برای مدل دو بعدی مورد نظر کاملاً مطابق با شرایط موجود در آزمایش ویل تراک در نظر گرفته شده است که این شرایط در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل می-

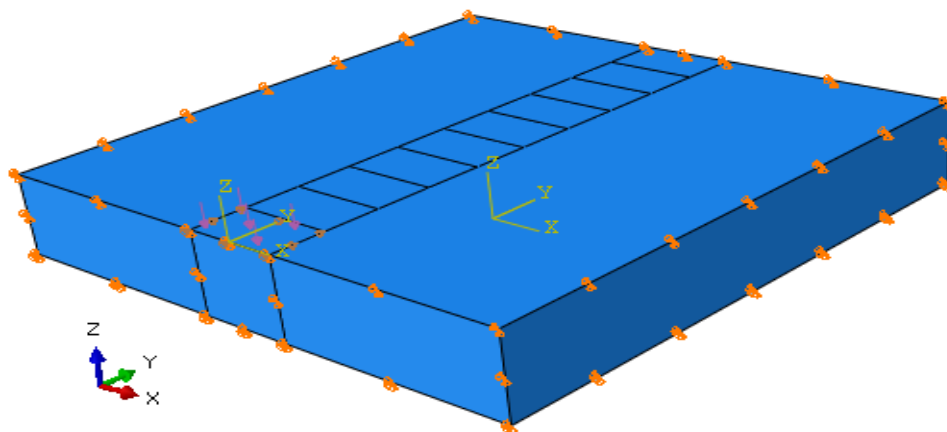
## ارزیابی نتایج آزمایشگاهی عمق شیارشدگی در مخلوط آسفالت لاستیکی با نتایج مدل سازی المان محدود

محدود بعضی برآمدگی‌ها نیز به وجود می‌آید ولی در تست ویل تراک فقط شیارشدگی به سمت پایین ثبت و در نظر گرفته شده است

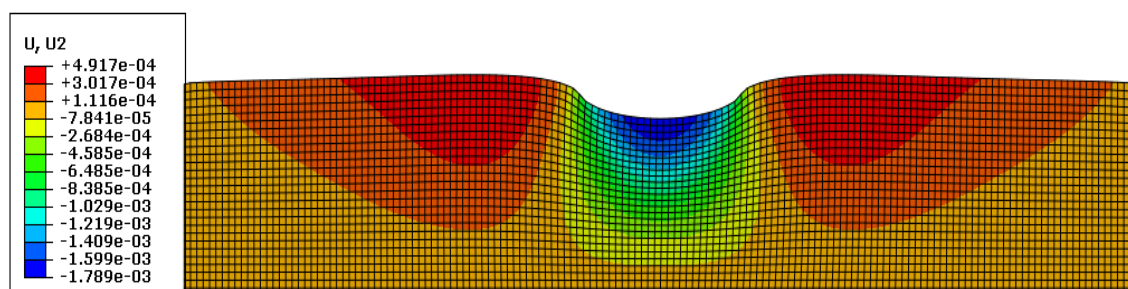
با استفاده از پارامترهای خزشی کالیبره شده است. همان‌گونه که قابل پیش‌بینی بود مقادیر تغییر شکل‌ها در نزدیکی بار وارده بسیار بیشتر از سایر نواحی است که دلیل این امر را می‌توان دوری این نقاط از قیدهای اعمال شده برای مدل دانست. در مدل‌سازی المان



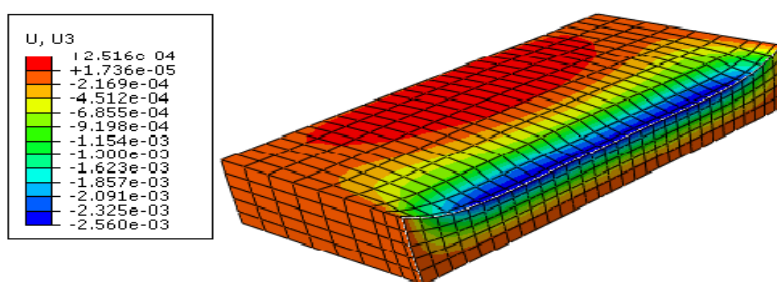
شکل ۸. شرایط مرزی و بارگذاری اعمالی بر روی مدل دو بعدی در حالت کرنش صفحه‌ای



شکل ۹. شرایط مرزی اعمال شده و بارگذاری اعمالی



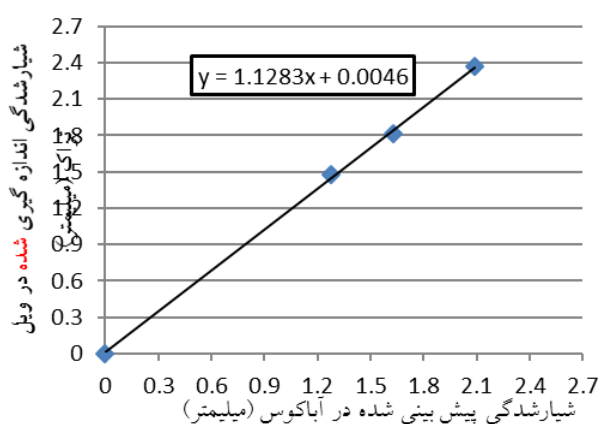
شکل ۱۰. عمق شیارشدگی در مدل دوبعدی کالیبره شده برای فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال



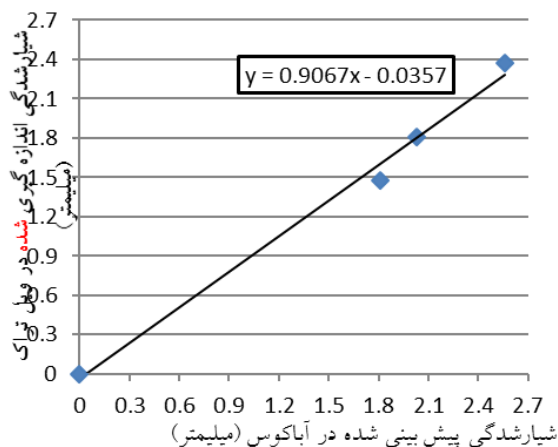
شکل ۱۱. عمق شیاردگی در مدل سه بعدی کالیبره شده برای فشار ۲۰۰ کیلو پاسکال

جدول ۶. مقادیر عمق شیاردگی اندازه گیری شده در آزمایش و پیش بینی شده

| تنش اعمالی (Kpa) | شیاردگی اندازه گیری شده در ویل تراک (mm) | شیاردگی پیش بینی شده در مدل دوبعدی با آباکوس (mm) | شیاردگی پیش بینی شده در مدل سه بعدی با آباکوس (mm) |
|------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| ۱۰۰              | ۱/۴۸                                     | ۱/۲۸                                              | ۱/۸۱                                               |
| ۱۵۰              | ۱/۸۱                                     | ۱/۶۳                                              | ۲/۰۳                                               |
| ۲۰۰              | ۲/۳۷                                     | ۲/۰۹                                              | ۲/۵۶                                               |



شکل ۱۲. مقایسه شیاردگی کالیبره شده حاصله از مدل دوبعدی با نتایج آزمایش ویل تراک



شکل ۱۳. مقایسه شیاردگی کالیبره شده حاصله از مدل سه بعدی با نتایج آزمایش ویل تراک

آسفالت لاستیکی را در شرایط بارگذاری مختلف بدون نیاز به آزمایش ویل‌تراک پیش‌بینی کند.

#### ۸. پی نوشت

1. Rutting
2. Multi layer elastic theory
3. Finite element method
4. Boundary Element Analysis System
5. Perl
6. The Creep Power Law Model
7. Time Hardening
8. Decelerated Creep
9. Equi Velocity Creep
10. Accelerated Creep
11. Input file

#### ۹. مراجع

- Antunes, M. L., Domingos, P., Eusebio, M. and Sa da Costa, M. (2003) "Studies concerning the use of asphalt rubber in Portugal", Proceedings of the Asphalt Rubber Conference, Brasilia, Brazil, pp. 195–210.
- Arabani, M. and Mirabdolazimi, S. M. (2009) "Evaluation of creep compliance of rubberized asphalt in compare with conventional hot mix asphalt", Advanced Testing and characterization of Bituminous Materials, Taylor and Francis Group.
- British Standard Institution (1995) "Test method for determining the creep compliance of asphalt material using the indirect tensile test device", No. DD185.
- Button, J. W., Perdomo, D. and Lytton, R. L. (1999) "Influence of aggregate on rutting in asphalt concrete pavements", Transportation Research Record, 1259, pp.141–152.
- Cano, J. O. and Charania, E. (1989) "The Phoenix experiences using asphalt-rubber proceedings. national seminar on asphalt-rubber", Kansas City Missouri.
- Duskov, M. and Scarpas, A. (1997) "Three dimensional finite element analysis of flexible pavements with an EPS sub-base", Geotextiles and Geomechanics, Vol. 15, 1997, pp. 29 - 38.
- Hua, J. (2000) "Finite element modeling and analysis of accelerated pavement testing

شیارشدگی پیش‌بینی شده توسط آباکوس و شیارشدگی اندازه-گیری شده در آزمایش ویل‌تراک در جدول (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مقایسه نتایج شیارشدگی پیش‌بینی شده در نرم‌افزار با نتایج اندازه‌گیری شده در آزمایش ویل‌تراک نشان می‌دهد، اختلاف این مقادیر برای حالت سه‌بعدی ۱۱/۵٪ و برای حالت دوبعدی ۱۳/۵٪ است که این مقدار اختلاف، اعتبار مناسبی را برای مدل‌سازی ارائه‌شده در این تحقیق براساس مطالعات قبلی به همراه دارد [Kandhal and Cooley, 2002]. اشکال (۱۲) و (۱۳) به ترتیب مقایسه مقادیر عمق شیار پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را برای مدل دوبعدی و سه-بعدی نشان می‌دهد.

همان‌طور که نمودارهای ۱۲ و ۱۳ نشان می‌دهند، با انجام عمل کالیبراسیون اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی کاهش یافته و شیب نمودار برازش به سمت عدد یک نزدیک شده است.

#### ۷. نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق استفاده همزمان از روش المان محدود دوبعدی و سه‌بعدی بر مبنای نتایج آزمایشگاهی برای پیش‌بینی شیارشدگی آسفالت لاستیکی در آزمایش ویل‌تراک بود. به‌منظور دستیابی به این هدف از نرم‌افزار المان محدود آباکوس و مدل قدرتمند خزشی موجود در کتابخانه این نرم‌افزار استفاده گردید. برای مدل‌سازی مرحله خزش تند شونده (تغییر شکل پلاستیک) مخلوط آسفالتی استفاده شد. در این مدل‌سازی با استفاده از المان C3D8R و C2D3R، آزمایش ویل‌تراک در فضای دوبعدی و سه‌بعدی تحلیل شد و با نتایج آزمایشگاهی کالیبره گردید. مقایسه بین نتایج مدل‌ها و نتایج آزمایشگاهی در جدول (۵) مبین این موضوع است که نتایج پیش‌بینی شده در مدل سه‌بعدی ۷/۴ تا ۱۸ و میانگین اختلاف ۱۱/۸ درصد با نتایج آزمایشگاهی اختلاف دارند که مقادیر اختلاف قابل قبول است.

همان‌طور که نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد به دلیل اعمال شرایط نزدیک به واقعیت آزمایش ویل‌تراک در مدل‌سازی سه-بعدی رابطه نزدیکی بین شیارشدگی پیش‌بینی شده در این مدل‌سازی و شیارشدگی اندازه‌گیری شده در آزمایش ویل‌تراک برقرار است، بنابراین مدل‌های حاضر می‌تواند شیارشدگی

- Dissertation, Purdue University, Indiana
- Kandhal, S. P. and Cooley, A. (2002) "Evaluation of permanent deformation of asphalt mixtures using loaded wheel tester", National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 02-08, Auburn, Alabama.
- Lee, S.-J., Akisetty, C. K. and Amir Khanian, S. N. (2008) "The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements", Construction and Building Materials, 22, pp. 1368-1376.
  - Liantong, M., Donglin, S., Xun, L., Huurman, M. and Shaopeng, W. (2012) "Experimental investigation of bituminous plug expansion joint materials containing high content of crumb rubber powder and granules", Materials and Design, 37, pp.137-143.
  - Perl, M., Uzan, J. and Sides, A. (1983) "Visco-elasto-plastic constitutive law for a bituminous mixture under repeated loading", Transportation Research Record, 911, National Research Council, Washington, D.C. pp. 21-27.
  - Pirabarooban, S., Zaman, M. and Tarefder, R. A. (2003) "Evaluation of rutting potential in asphalt mixes using finite element modeling", The Transportation Factor 2003. Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada.
  - devices and rutting phenomenon", Ph.D. (Congres et Exposition Annuels de l'Association des transport du Canada), Transportation Association of Canada.
  - Putman, B. J., and Amir Khanian, S. N. (2006) "Crumb rubber modification of binders: interaction and particle effects", Road Materials and Pavement Design, Article in press.
  - Uzarowski, L., Maher, M. and Prilesky, H. (2006) "The use of simple performance tests in the development of rutting resistant criteria for asphalt mixes in Canada stage", 1<sup>st</sup>. Annual Conference of the Transportation Association of Canada. Charlottetown, Prince Edward Island.
  - Way, G. B. (2003) "The rubber pavements association, technical advisory board leading the way in asphalt rubber research", Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia, Brazil, pp. 17-33.
  - Zaghoul, S. M., and White, T.D. (1993) "Use of a three-dimensional, dynamic finite element program for analysis of flexible pavement", In Transportation Research Record 1388, TRB, National Research Council, Washington, D. C. pp. 60-69.

مهیار عربانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۶۴ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری را در سال ۱۳۶۶ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۷۹ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری، از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان تمامی موضوعات مرتبط با رشته راه و ترابری بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد در دانشگاه گیلان است.



بهزاد بخشی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه محقق اردبیلی و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری در سال ۱۳۹۳ را از دانشگاه گیلان اخذ نمود. در سال ۱۳۹۳ موفق به قبولی در آزمون دکتری در رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری از دانشگاه زنجان گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی روسازی، مدلسازی روسازی و



## ارزیابی نتایج آزمایشگاهی عمق شیارشدگی در مخلوط آسفالت لاستیکی با نتایج مدل‌سازی المان محدود

آزمایشات عملکردی روسازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه مربی در دانشگاه غیرانتفاعی صائب ابهر است.

بهرام شیرینی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۹ از دانشگاه محقق اردبیلی و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۴ موفق به قبولی در آزمون دکتری در رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری از دانشگاه امام خمینی قزوین گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی روسازی، مدلسازی روسازی و آزمایشهای عملکردی روسازی بوده و در حال حاضر استاد مدعو در دانشگاه غیرانتفاعی رجا قزوین است.

