

ارزیابی تاثیر خرابی روسازی بر احتمال وقوع تصادفات به روش درخت تصمیم، (مطالعه موردی: ناهمواری‌های روسازی)

مهناز الهی‌زاده، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران
محمد مهدی خیبری (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

E-mail: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۱۹ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۰۸

چکیده

تصادفات ترافیکی پیشامد نامطلوب و اجتناب ناپذیر جریان ترافیک هستند که سبب اتلاف سرمایه و در نهایت عمر انسان‌ها می‌شوند. تحقیقات نشان داده‌اند بین شرایط روسازی و تصادفات رابطه وجود دارد. همچنین مشخصه‌های خرابی روسازی مانند عمق خرابی و مساحت آن یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر رفتار رانندگان است. در این مطالعه به بررسی تاثیر خرابی روسازی راه‌های درون‌شهری و شرایط ترافیکی موثر بر تصادفات پرداخته شده است. از آنجایی که ناهمواری روسازی، تاثیر بسزایی بر تصادفات جاده‌ای داشته و لازم است در برنامه‌ریزی ایمنی جاده‌ها و بهبود وضعیت روسازی‌ها در نظر گرفته شود، به صورت موردی از بین خرابی‌های روسازی، فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌های سطح روسازی مورد مطالعه قرار گرفتند. اطلاعات ۱۸ نقطه از روسازی دارای خرابی و برای هر نقطه واکنش و سرعت ۳۰ راننده در حین روبرویی با آن ثبت گردید. جهت تعیین عوامل موثر بر میزان انحراف رانندگان از روش درخت تصمیم استفاده شده است. درخت تصمیم به دلیل نمایش گرافیکی از نتایج، به سادگی قابل فهم و تفسیر است. درخت تصمیم داده‌ها در این تحقیق، بر اساس الگوریتم درخت دسته‌بندی و رگرسیون (CRT) ساخته شده است. درخت حاصل نشان می‌دهد متغیرهای مساحت خرابی، طول و عرض آن در مقایسه با متغیرهای حجم ترافیک، سرعت و سیله‌نقلیه، فاصله مرکز خرابی تا گوشه سمت راست خط عبوری و نوع ناهمواری (فرورفتگی یا برآمدگی) تاثیر بیشتری بر انحراف رانندگان از مسیر را داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: برآمدگی و فرورفتگی روسازی، درخت دسته‌بندی و رگرسیون (TRC)، انحراف رانندگان، ایمنی

۱. مقدمه

هزینه بسیار زیاد تصادف‌های ترافیکی، باعث شده که بهبود وضع ایمنی راه‌ها، به یکی از مهم‌ترین اهداف مهندسی حمل‌ونقل در اکثر کشورها تبدیل شود. تعداد تصادفات ترافیکی به طور چشم‌گیری در کشور رو به افزایش است که خسارات جانی و مالی ناشی از آن، هزینه سنگینی را به کشور وارد می‌کند [Kho-shbakht et al. 2011]. طبق آمار سازمان پزشکی قانونی کشور درصد رشد مصدومین و متوفیان ناشی از تصادفات رانندگی بین سال‌های ۹۰ و ۹۱ برابر با ۶/۵ است [LMO, 2011].

به طور کلی عوامل اصلی موثر بر تصادفات را می‌توان به چهار گروه شامل جاده (ویژگی هندسی راه، خصوصیات جریان ترافیک)، وسیله‌نقلیه (وضعیت فیزیکی و مکانیکی وسیله‌نقلیه، نقص فنی قطعات)، عوامل انسانی (خصوصیات راننده، رفتار راننده و توانایی فیزیولوژیکی و روحی راننده) و محیط (شرایط جوی) تقسیم‌بندی کرد که این عوامل به صورت زنجیره‌وار به یکدیگر متصل هستند [Bagheri khalili and Sheykh al-eleslami, 2011].

شرایط روسازی یکی از فاکتورهای کلیدی تاثیرگذار بر کیفیت رانندگی است، ولی عوامل تاثیرگذار آن بر حوادث رانندگی به طور دقیق مشخص ناست، به طوری که در تحقیقی از لی و همکارانش که به بررسی شرایط روسازی بر حوادث رانندگی پرداخته شد، روسازی با شرایط ضعیف را یکی از عوامل موثر بر حوادث رانندگی یافت ولی در طی این تحقیق به دست آمد، تحت شرایط روسازی بسیار ضعیف، شدت حوادث رانندگی کاهش می‌یابد و همچنین تحت شرایط بسیار خوب روسازی، شدت حوادث افزایش می‌یابد [Li et al. 2013]. به دلیل گسترده بودن شرایط جاده‌ای و مطالعات کم در ارتباط با موضوع تاثیر شرایط روسازی بر وضعیت رانندگی وسایل نقلیه، نیاز به مطالعه بیشتر در این زمینه دیده شده است.

در مطالعه‌ای تاثیر بافت درشت روسازی و تاثیر آن بر لغزندگی و تصادفات جاده‌ای مورد بررسی قرار گرفت و دانه‌بندی مناسب برای شرایط مختلف ترافیکی و جوی پیشنهاد گردید [Ahadi

[et al. 2010]. در تحقیقی دیگر تاثیر عمق شیارشدگی (RD) بر ایمنی ترافیک مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان داد صرفاً با افزایش عمق شیارشدگی، احتمال وقوع تصادفات افزایش نمی‌یابد، همچنین در یک سرعت ثابت و متوسط سالیانه حجم ترافیک روزانه (AADT) متفاوت، شیارشدگی تاثیر یکسانی بر احتمال تصادفات دارد. همچنین در این تحقیق شیارهای با عمق بیش از ۱۵ میلیمتر بر واکنش رانندگان با سرعت بالا (۹۰-۱۱۰ km/hr) موثر شناخته شدند [His et al. 2011]. آقای چان و همکارانش نیز به بررسی تاثیر شرایط روسازی بر ایمنی ترافیک پرداخته‌اند، در این تحقیق تاثیر عمق شیارشدگی، شاخص ناهمواری بین‌المللی^۱ (IRI) و نشانه خدمت‌دهی روسازی^۲ (PSI) بر تعداد تصادفات مورد مطالعه قرار گرفت، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد عمق شیارشدگی تنها در شب و در شرایط بارانی بر تعداد وقوع تصادفات موثر است [Chan et al. 2008]. مطالعه‌ای توسط صفارزاده و زاهدی با موضوع تاثیر ناهمواری و روشنایی بر سرعت جریان آزاد در آزادراه‌ها، انجام شده است، این مطالعه نشان می‌دهد حساسیت سرعت جریان آزاد نسبت به تاریکی در ناهمواری‌های کوچک‌تر بیشتر است و همچنین حساسیت سرعت جریان آزاد به ناهمواری در تاریکی شب کمتر از حساسیت سرعت جریان آزاد به ناهمواری در روشنایی روز است [Saffarzade and Zahedi, 2010].

با توجه به بررسی تحقیقات سایر محققین، یکی از مشخصه‌های روسازی که بر رفتار رانندگان تاثیر می‌گذارد، ناهمواری‌های روسازی است، برآمدگی و فرورفتگی‌های ناگهانی روسازی موجب واکنش‌های ناگهانی از طرف رانندگان می‌گردد و این امر عامل بسیاری از تصادفات است. ناهمواری‌های روسازی انواع متعددی دارند: برآمدگی و فرورفتگی^۳، تورم، چاله، خرابی ناشی از کندن دوباره روسازی مانند تخریب روسازی برای فاضلاب و قرار دادن دریچه‌های آدم‌رو^۴ در سطح روسازی. برآمدگی عبارت است از جابجایی کوچک و محدود سطح روسازی به سمت بالا که می‌تواند به دلیل تورم در اثر یخبندان و یا نفوذ و تجمع مواد در یک ترک همراه با بارگذاری ترافیکی باشد. تغییرشکل‌ها

ارزیابی تاثیر خرابی روسازی بر احتمال وقوع تصادفات به روش درخت تصمیم

درخت تصمیم به دلیل نمایش گرافیکی از نتایج، به سادگی قابل فهم و تفسیر است. ساختار درختی آن این امکان را می‌دهد که به سادگی به سوالات پاسخ داده شود. از طرف دیگر برای تحلیل حجم زیادی از داده‌ها با متغیرهای مستقل زیاد، درخت تصمیم بسیار کارآمد بوده و به راحتی می‌تواند هم متغیرهای مهم و هم متغیرهای کم اهمیت را شناسایی کرده و عملاً متغیرهای کم اهمیت را حذف کند [Shariat and Tavakoli, 2010]. این روش در زمینه حمل‌ونقل، در ارتباط با موضوعات مختلف به کار گرفته می‌شود به عنوان مثال برای مدل کردن تقاضای سفر از روش درخت تصمیم استفاده شده است [Washington and Wolf, 2007]، همچنین جهت مدلسازی رفتار رانندگان در هنگام رویارویی با تغییر فاز چراغ راهنمایی از سبز به زرد که با استفاده از روش CRT و اطلاعات جمع‌آوری شده توسط دوربین‌های کنترل ترافیک در تقاطعات، پارامترهای موثر بر رفتار رانندگان در هنگام رویارویی با این مسئله تعیین شده است [Elmitiny et al. 2010]. در مطالعه‌ای دیگر جهت تحلیل عوامل موثر بر تصادفات با استفاده از روش CRT متغیرهایی که بیشتر در وقوع تصادفات موثر هستند از بین متغیرهای برداشت شده تعیین شده‌اند [Beshah et al. 2013 و Chung, 2013].

با توجه به آنچه ذکر گردید، تاثیر عمق ناهمواری‌ها توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه خرابی‌های با ارتفاع تقریباً ثابت ولی مساحت متغیر مورد بررسی قرار گرفتند و همچنین به بررسی تاثیر برآمدگی و فرورفتگی سطح روسازی با ارتفاع در حدود ۷/۵ سانتی‌متر، بر واکنش و انحراف رانندگان از مسیر پرداخته شده است. نتایج این تحقیق اهمیت خرابی‌های روسازی را بیان می‌نماید و به مدیران برای تخصیص هدفمند بودجه به تعمیر و نگهداری روسازی‌ها کمک می‌نماید.

۲. روش تحقیق

مطالعه حاضر به بررسی شرایط روسازی و ترافیکی بر واکنش رانندگان در هنگام رویارویی با برآمدگی یا فرورفتگی در سطح جاده‌های درون‌شهری می‌پردازد. داده‌های آن در سال ۱۳۹۱ از

و جابجائی‌هایی که در نواحی بزرگی از سطح روسازی بوقوع می‌پیوندد و باعث برآمدگی‌های بزرگ یا طولی در روسازی می‌گردد، تورم نامیده می‌شود. تورم به تغییر شکل سطحی روسازی به سمت بالا اطلاق می‌شود که عبارت است از یک موج بلند تدریجی با بیش از ۳ متر طول و چاله‌ها عبارتند از یک تورفتگی کاسه‌ای شکل و کوچک در سطح روسازی که قطر آن معمولاً کمتر از ۰/۹ متر است.

فرورفتگی عبارت است از جابجایی کوچک و محدود روسازی به سمت پایین. چاله‌ها بطور کلی دارای لبه‌های تیز و دیواره‌های عمودی در قسمت بالای سوراخ هستند. روند رشد چاله در اثر جمع شدن آب تسریع می‌گردد. چاله‌ها زمانی بوجود می‌آیند که تکه‌های کوچکی از سطح روسازی به علت خرابی (به عنوان مثال ترک پوست سوسماری با شدت زیاد) در اثر جریان ترافیک از آن جدا می‌شوند. چاله‌ها معمولاً در اواخر فصل زمستان و اوایل فصل بهار که رطوبت خاک بالا و مقاومت آن پایین است، بوجود می‌آیند [Shahin, 2002].

روسازی‌های ساخته شده به دلایل مختلف تخریب و بازسازی می‌شوند، برای قرار دادن دریچه‌های آدمرو بایستی روسازی تخریب و چون بازسازی آن با دقت انجام نمی‌گردد سطح روسازی دچار برآمدگی می‌گردد. چنانگ در سال ۲۰۱۳ تاثیر تفاوت ارتفاع سطح دریچه‌های آدمرو با سطح روسازی بر حرکت موتورسیکلت سواران مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه دست یافت که شرایط روسازی روی دریچه آدمرو و اندازه دریچه بر حرکت موتورسیکلت سواران تاثیر دارد، همچنین فاکتورهای دیگر مانند شرایط ترافیکی، عرض خط و سرعت موتورسیکلت سوار بر حرکت آن موثر است. در این تحقیق بیان گردید در صورتی که تفاوت ارتفاع سطح دریچه و روسازی برابر یا کمتر از ۰/۳۵ سانتی‌متر باشد، تاثیری بر واکنش موتورسیکلت سواران ندارد [Chang, 2013].

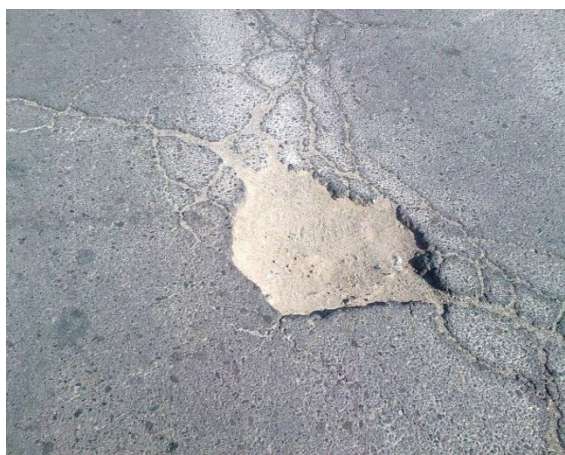
درخت تصمیم یک روش تحلیل داده‌ای غیرپارامتری است که به طور گسترده در زمینه‌های مختلف مانند پزشکی، مدیریت، صنعت و مهندسی استفاده می‌شود [Chang and Chien, 2013]

در این پژوهش جهت تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS، درخت تصمیم داده‌ها رسم شده است. درخت تصمیم را با استفاده از الگوریتم‌های متفاوت می‌توان رسم نمود. با توجه به مجموعه داده‌ی تحت بررسی، انتخاب الگوریتم مناسب برای اعمال روی داده‌ها ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین ابتدا به بررسی الگوریتم‌های موجود برای انتخاب الگوریتم مناسب پرداخته می‌شود. چهار الگوریتم موجود در نرم‌افزار SPSS شامل CHAID^۱، Exhaustive CHAID^۲، QUEST^۳، و CRT^۴ است. الگوریتم QUEST برای این مطالعه مناسب ناست زیرا برای متغیرهای وابسته اسمی^۵ بکار می‌رود، دو الگوریتم CRT و CHAID برای متغیرهای رتبه‌ای یا ترتیبی^۶ مناسب هستند. الگوریتم CRT برای درخت‌های دوتایی (یعنی درخت‌هایی که هر گره به دو گره دیگر تقسیم می‌شود) استفاده می‌شود. اما در الگوریتم CHAID این

۱۸ نقطه دارای خرابی و از ۶ منطقه به نام‌های بلوار امیرکبیر، بلوار جهاد، بلوار شهید پاکنژاد، بلوار شهیدان اشرف، خیابان امام و حد فاصل میدان توحید و کمربندی، در ساعات ۹ صبح الی ۱۴، برداشت شده است. در شکل‌های (۱) و (۲) نمونه‌ای از خرابی‌های برداشت شده آورده شده است. اطلاعات برداشت شده از هر نقطه، نوع خرابی (فرورفتگی یا برآمدگی)، طول و عرض خرابی، فاصله مرکز خرابی تا گوشه سمت راست خط عبوری و حجم ترافیک ساعتی است، همچنین در هر نقطه واکنش ۳۰ راننده در هنگام رویارویی با خرابی و سرعت اولیه و واکنش راننده در نزدیکی خرابی توسط آمارگیر ثبت شده است. واکنش رانندگان در هنگام رویارویی با خرابی به ۵ دسته تقسیم‌بندی شده است (جدول ۱). شکل ۳ نمودار تعداد واکنش رانندگان را نشان می‌دهد، واکنش ۱ بیشترین تعداد را دارا است.



شکل ۱. خرابی روسازی (برآمدگی)، بلوار جهاد، ۲/۳ × ۳/۱ متر

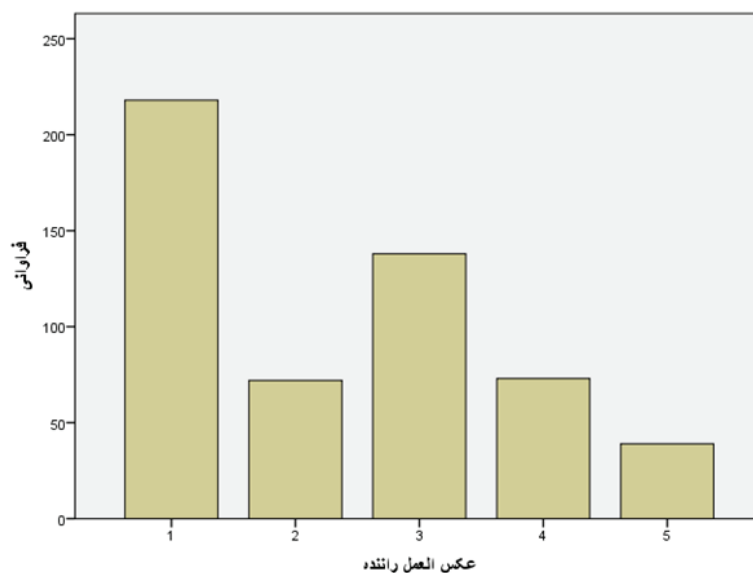


شکل ۲. خرابی روسازی (فرورفتگی)، بلوار شهیدان اشرف، به ابعاد ۵۰ × ۶۰ سانتی‌متر

ارزیابی تاثیر خرابی روسازی بر احتمال وقوع تصادفات به روش درخت تصمیم

جدول ۱. دسته‌بندی واکنش رانندگان در هنگام رویارویی با خرابی روسازی

شماره واکنش (کد)	شرح واکنش
۱	راننده بدون هیچ عکس العملی از خرابی گذشته و مسیر خود را ادامه می‌دهد.
۲	راننده سرعت خود را ناگهانی کاهش می‌دهد.
۳	راننده خودرو را به طور ناگهانی تا میزان حداکثر ۵۰ سانتی‌متر منحرف می‌کند.
۴	راننده خودرو را به طور ناگهانی و بیش از ۵۰ سانتی‌متر منحرف می‌کند ولی از خط عبور خود خارج نمی‌شود.
۵	راننده خودرو خود را ناگهانی منحرف می‌کند به طوری که از خط عبوری خود خارج می‌شود.



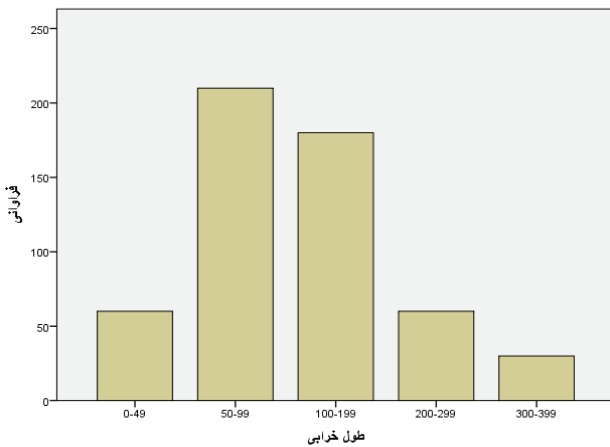
شکل ۳. نمودار تعداد هر دسته از واکنش رانندگان در هنگام رویارویی با خرابی روسازی

داده‌ها بر اساس متغیر جدا کننده‌ای^{۱۱} که همگنی بیشتری نسبت به متغیر وابسته ایجاد کند، می‌پردازد. شاخص‌های مختلفی جهت تعیین متغیر جداکننده وجود دارد، در روش کارت از شاخص جینی^{۱۲} جهت تعیین متغیرهای جداکننده استفاده می‌شود [SPSS Classification Trees]. تقسیم داده‌ها تا جایی ادامه می‌یابد که گره ایجاد شده به اندازه کافی یکدست و خالص باشد، آنگاه انشعاب آنها متوقف شده و به آن گره نهایی یا برگ گفته می‌شود [Shariat and Tavakoli, 2010]. در این مطالعه از الگوریتم CRT برای ساخت درخت تصمیم داده‌ها استفاده شده است. در جدول (۲) نام متغیر به همراه واحدهای استفاده شده برای هر متغیر و کد حالت‌های مختلف متغیرها آورده شده است و در شکل‌های (۴) تا (۷) نمودار فراوانی متغیرهای مستقل آورده شده است.

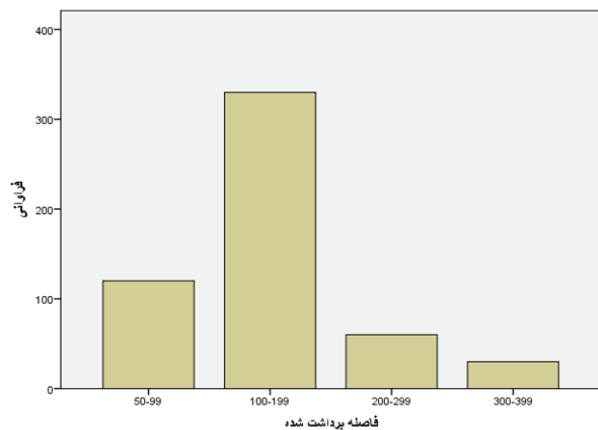
امکان وجود دارد که یک گره به بیش از دو گره تقسیم شود، این الگوریتم برای اطلاعات وسیع مناسب است [Yan et al, 2010]. در الگوریتم Exhaustive CHAID، تمام تقسیم‌بندی‌های ممکن را برای هر متغیر هدف مورد بررسی قرار می‌دهد [SPSS Classification Trees]. مدل کارت یک مدل ناپارامتری و بدون هرگونه پیش فرض در خصوص رابطه بین متغیرهای مستقل و متغیر هدف است و از روش‌های مهم داده‌کاوی است و ابزاری قدرتمند در تعیین مهم‌ترین متغیرهای مستقل و حل مسایل دسته‌بندی و پیش‌بینی است [Chang and Chien, 2013]. ساختار این مدل به صورت "اگر- آنگاه" است، این ساختار تعاملات پیچیده بین متغیرها را به سادگی نشان می‌دهد و به محقق در تفسیر ساده و موثر نتایج کمک می‌کند [Elahizadeh, 2014]. مدل کارت به دسته‌بندی

جدول ۲. نام و کد حالت‌های مختلف هر متغیر

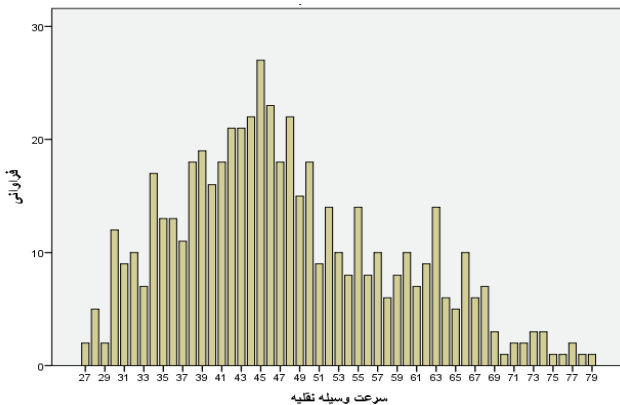
نام متغیر	کد حالت‌های مختلف
مساحت خرابی	کمی (برحسب cm^2)
عرض خرابی (برحسب سانتی‌متر)	۱-۴۹(۱) ۵۰-۹۹(۲) ۱۰۰-۱۹۹(۳) ۲۰۰-۲۹۹(۴) ۳۰۰-۳۹۹(۵)
طول خرابی (برحسب سانتی‌متر)	۱-۴۹(۱) ۵۰-۹۹(۲) ۱۰۰-۱۹۹(۳) ۲۰۰-۲۹۹(۴) ۳۰۰-۳۹۹(۵)
حجم ترافیک	کمی (برحسب veh/hr)
سرعت	کمی (برحسب km/hr)
فاصله مرکز خرابی تا گوشه سمت راست خط عبوری	۱-۴۹(۱) ۵۰-۹۹(۲) ۱۰۰-۱۹۹(۳) ۲۰۰-۲۹۹(۴) ۳۰۰-۳۹۹(۵)
کد خرابی (فرورفتگی - برآمدگی)	(۱) فرورفتگی (۲) برآمدگی



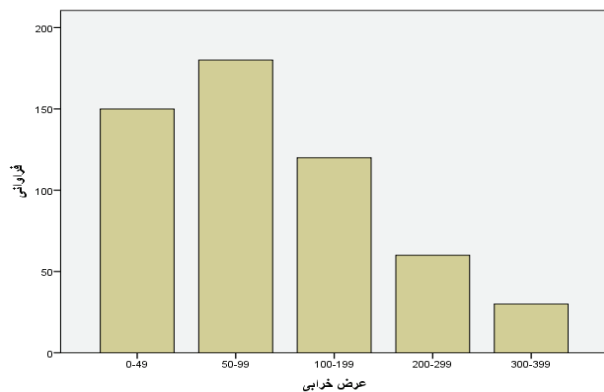
شکل ۵. نمودار تعداد متغیر مستقل طول خرابی برداشت شده



شکل ۴. نمودار تعداد متغیر مستقل فاصله برداشت شده



شکل ۷. نمودار تعداد متغیر مستقل سرعت وسیله نقلیه برداشت شده



شکل ۶. نمودار تعداد متغیر مستقل عرض خرابی برداشت شده

۳. تعریف درخت تصمیم ترسیم شده

در شکل (۸) درخت تصمیم حاصل از اطلاعات موجود آورده شده است، تفسیر درخت به دست آمده در زیر می‌آید:
در نرم‌افزار SPSS، بر اساس شاخص جینی متغیرهای جداکننده

تعیین می‌شود و تقسیم‌بندی داده‌ها بر اساس این شاخص انجام می‌گیرد. گره صفر که همان ریشه و اولین گره است، توسط متغیر مساحت خرابی به دو شاخه تقسیم شده است. این نشان می‌دهد که مهمترین متغیر تاثیرگذار بر واکنش رانندگان وسایل نقلیه،

ارزیابی تاثیر خرابی روسازی بر احتمال وقوع تصادفات به روش درخت تصمیم

گره ۵ بر اساس طول خرابی به گره ۹ و گره پایانی ۱۰ تقسیم شده است، گره ۱۰ نشان می‌دهد در صورتی که طول خرابی بین ۱۹۹ cm - ۱۰۰ باشد و سرعت وسیله نقلیه، حجم ترافیک و مساحت خرابی به ترتیب کمتر از ۵۱/۵ km/hr، ۵۲۹ veh/hr و $7/2 m^2$ باشد، رانندگان با احتمال $37/8\%$ واکنش نوع ۲ را از خود نشان خواهند داد. گره ۹ نشان می‌دهد، در صورتی که طول خرابی ۹۹ cm - ۵۰ باشد و سرعت وسیله نقلیه، حجم ترافیک و مساحت خرابی به ترتیب کمتر از ۵۱/۵ km/hr، ۵۲۹ veh/hr و $7/2 m^2$ باشد، رانندگان با احتمال $37/4\%$ واکنشی از خود نشان نمی‌دهند. این دو گره نیز به تاکید اهمیت طول خرابی می‌پردازد. گره ۹ بر اساس سرعت وسیله نقلیه به دو گره پایانی ۱۳ و ۱۴ تقسیم شده است. گره ۱۳ نشان می‌دهد که رانندگان با سرعت کمتر از ۳۸/۵ km/hr واکنش بیشتری نسبت به رانندگان با سرعت بین ۳۸/۵ km/hr و ۵۱/۵ km/hr از خود نشان می‌دهند. گره ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهد در خرابی‌های با طول کم (۹۹ - ۵۰ cm) رانندگان با سرعت کمتر، واکنش بیشتری دارند.

۴. دقت پیش‌بینی مدل

در روش کارت، رشد درخت تا جایی ادامه می‌یابد که در هر گره نهایی، فقط مشاهدات یکسان وجود داشته باشد. در چنین حالتی، بزرگ‌ترین درخت ایجاد شده است. در این مرحله برای این که از پیچیدگی درخت نهایی کاسته شده و درخت‌های ساده‌تری ایجاد شوند، عملیات هرس کردن^{۱۳} آن بر اساس الگوریتم هزینه-پیچیدگی^{۱۴}، انجام می‌شود. اگر با قطع یک زیر درخت، افزایش هزینه دسته‌بندی اشتباه، به اندازه کافی کمتر از کاهش هزینه پیچیدگی آن باشد، شاخه مربوطه هرس شده و درخت جدیدی به وجود می‌آید [Shariat and Tavakoli, 2010].

در روش کارت بایستی بخش از داده‌ها به آموزش^{۱۵} و برخی به آزمایش^{۱۶} اختصاص داده شود [Chang and Wang, 2006]. در این مطالعه ۷۰٪ داده‌ها به صورت تصادفی انتخاب و به آموزش مدل اختصاص یافته است و ۳۰٪ دیگر برای آزمایش مدل انتخاب شد. مدل بر اساس داده‌های آموزش ساخته شده و سپس داده‌های

مساحت خرابی است. گره ۲ واقع در شاخه سمت راست، گره پایانی است و بیانگر این موضوع است که اگر مساحت خرابی از $7/2 m^2$ بیشتر باشد، با احتمال $48/8\%$ واکنش رانندگان از نوع ۵ است (نوار توسی رنگ که بر روی عدد ۵ قرار دارد نشان دهنده این موضوع است). گره ۱ نشان می‌دهد که رانندگان در حین رویارویی با خرابی با مساحت کمتر از $7/2 m^2$ با احتمال $42/1\%$ واکنشی از خود نشان نمی‌دهند. گره شماره ۱ بر اساس حجم ترافیک به دو زیر گره ۳ و ۴ تقسیم می‌شود، گره ۴ نشان می‌دهد در صورتی که حجم ترافیک از ۵۲۹ veh/hr بیشتر باشد، در رویارویی با خرابی‌هایی با مساحت کمتر از $7/2 m^2$ ، با احتمال 48% رانندگان واکنشی از خود نشان نمی‌دهند، این موضوع نشان می‌دهد در مسیر با حجم بالای ترافیک، رانندگان کمتر منحرف می‌شوند. گره ۴ بر اساس مساحت خرابی به دو گره پایانی ۷ و ۸ تقسیم شده است و گره ۸ نشان می‌دهد در صورتی که مساحت خرابی بین $7/2 m^2$ و $5/1 m^2$ و حجم ترافیک بیشتر از ۵۲۹ veh/hr باشد عمده واکنش رانندگان از نوع ۴ است، این گره نیز اهمیت مساحت خرابی بر انحراف رانندگان از مسیر را بیان می‌نماید. گره ۷ نشان می‌دهد در صورتی که مساحت خرابی از $5/1 m^2$ کمتر باشد و حجم ترافیک بیشتر از ۵۲۹ veh/hr باشد، رانندگان عمدتاً هیچ گونه واکنشی از خود نشان نمی‌دهند. گره ۳، بر اساس سرعت وسیله نقلیه به دو زیر گره ۵ و ۶ تقسیم شده است، دو گره ۵ و ۶ نشان می‌دهند، در صورتی که حجم ترافیک کمتر از ۵۲۹ veh/hr و مساحت خرابی کمتر از $7/2 m^2$ باشد، رانندگان با سرعت بیشتر، واکنش شدیدتری را از خود نشان می‌دهند. گره ۶ نیز به دو گره پایانی ۱۱ و ۱۲ بر اساس سرعت وسیله نقلیه تقسیم شده است ولی همانطور که دیده می‌شود در گره ۱۲ رانندگان با سرعت بیش از ۵۲/۵ km/hr واکنش کمتری نسبت به رانندگان با سرعت بین ۵۲/۵ km/hr و ۵۱/۵ km/hr نشان داده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد متغیر سرعت وسیله نقلیه به تنهایی بر واکنش رانندگان تاثیر نمی‌گذارد و در ارتباط با متغیرهای دیگر مانند طول خرابی معنی پیدا می‌کند (به گره‌های ۱۳ و ۱۴ نیز دقت شود).

در مدل "واکنش یا عدم واکنش"، واکنش ۱ که بیانگر عبور بدون واکنش و ایمن راننده از روی خرابی است با برچسب صفر و سایر واکنش‌ها که با تغییر سرعت یا تغییر خط راننده همراه بوده است با برچسب یک مشخص شده است و هدف از این مدل تعیین عوامل موثر بر واکنش رانندگان در هنگام رویارویی به خرابی روسازی است. در مدل "خروج از خط"، تنها واکنش ۵ که حرکت راننده با تغییر خط همراه بوده است و احتمال تصادف بالا است با برچسب یک و سایر واکنش‌ها با برچسب صفر مشخص شده‌اند، این مدل جهت تعیین عوامل تاثیرگذار بر خروج از خط راننده است. در مدل "حفظ خط"^{۱۷}، دو عکس العمل ۱ و ۲ که بدون هیچ‌گونه انحرافی هستند، با برچسب یک و سایر واکنش‌ها با برچسب صفر مشخص شده‌اند، حفظ خط توسط راننده از اهمیت بالایی برخوردار است به طوری که بیش از ۲۵ درصد از

آزمایش به آن اعمال می‌گردد تا دقت پیش‌بینی مدل ارزیابی گردد [Chang and Wang, 2006]. در جدول (۳) دقت پیش‌بینی مدل درخت تصمیم بر اساس داده‌های آموزش و آزمایش آورده شده است. در جدول (۴) اهمیت نسبی متغیرهای وابسته آورده شده است، می‌توان دریافت ابعاد خرابی بیشترین تاثیر را بر واکنش رانندگان می‌گذارند. همان‌طور که اشاره شد متغیر هدف در ۵ دسته طبقه‌بندی شده است، در روش کارت برای افزایش دقت مدل می‌توان متغیرهای هدف را در دسته‌های دوتایی طبقه‌بندی نمود، با این روش همچنین می‌توان خطاهای ناشی از نزدیک بودن واکنش رانندگان، برداشت و ثبت اشتباه توسط آمارگیر کاهش یابد. برای این منظور سه مدل با دسته‌های دوتایی مطابق جدول (۵) تعریف شده است.

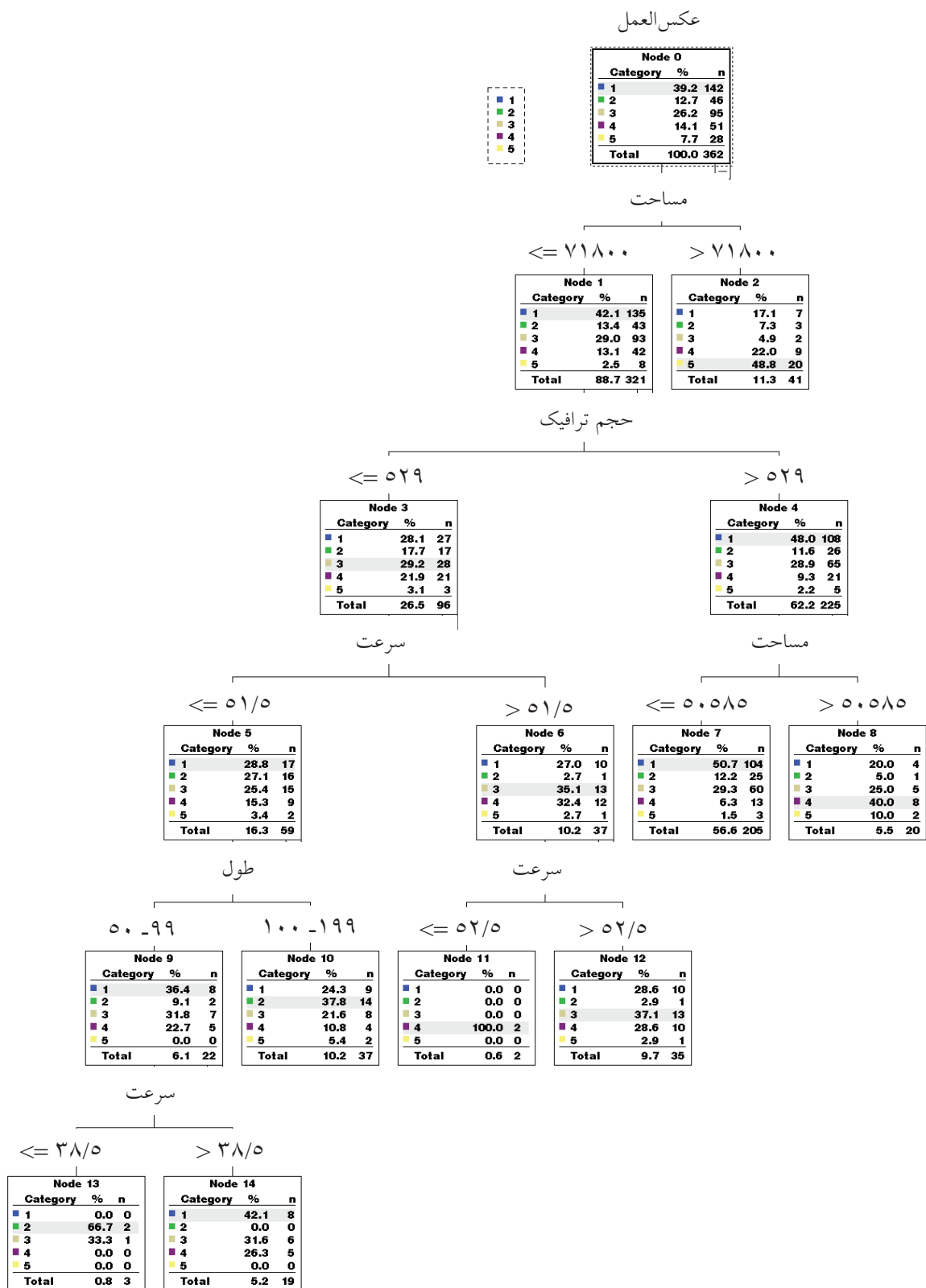
جدول ۳. دقت پیش‌بینی مدل با متغیرهای هدف پنج تایی

واکنش	داده‌های آموزشی		داده‌های آزمایشی	
	داده‌های مشاهده شده	داده‌های درست پیش‌بینی شده	داده‌های مشاهده شده	داده‌های درست پیش‌بینی شده
۱	۱۴۲	۱۱۲ (۷۸/۹٪)	۷۶	۴۶ (۶۱/۸٪)
۲	۴۶	۱۶ (۳۴/۸٪)	۲۶	۵ (۱۹/۲٪)
۳	۹۵	۱۳ (۱۳/۷٪)	۴۳	۷ (۱۶/۳٪)
۴	۵۱	۱۰ (۱۹/۶٪)	۲۲	۱ (۴/۵٪)
۵	۲۸	۲۰ (۷۱/۴٪)	۱۱	۸ (۷۲/۷٪)
کل مدل	۳۶۲	۱۷۱ (۴۷/۲٪)	۱۷۸	۶۷ (۳۸/۲٪)

جدول ۴. اهمیت نسبی متغیرهای مستقل (مدلسازی با متغیرهای هدف پنج تایی)

اهمیت نسبی متغیر	متغیر مستقل
۰/۵۷	مساحت خرابی
۰/۵۳	عرض خرابی
۰/۵۱	طول خرابی
۰/۳۸	حجم ترافیک
۰/۳۲	سرعت
۰/۰۸	فاصله مرکز خرابی تا گوشه سمت راست خط عبوری
۰/۰۳	کد خرابی (فرورفتگی - برآمدگی)

ارزیابی تاثیر خرابی روسازی بر احتمال وقوع تصادفات به روش درخت تصمیم



شکل ۸. نمونه‌ای از درخت دسته‌بندی ایجاد شده از روش کارت برای تعیین عوامل موثر بر انحراف رانندگان (درخت آموزشی)

انحراف رانندگان از مسیر را ابعاد خرابی روسازی می‌گذارد و کمترین تاثیر را نوع ناهمواری (فرورفتگی یا برآمدگی ناهمواری) دارا است. با توجه به درخت ساخته شده و با مقایسه واکنش رانندگان در حجم‌های ترافیک مختلف می‌توان دریافت در حجم ترافیک زیاد (بیشتر از ۵۲۹ veh/hr) با احتمال ۰.۴۸ رانندگان از خود واکنشی نشان نمی‌دهند، این موضوع نشان می‌دهد که رانندگان در مسیرهای با حجم ترافیک بیشتر واکنش کمتری در حین رویارویی با ناهمواری روسازی از خود نشان می‌دهند، همچنین در صورتی که حجم ترافیک و سرعت راننده و ابعاد خرابی کم باشد (حجم ترافیک کمتر از ۵۲۹ veh/hr و سرعت کمتر از ۳۸/۵ veh/hr و طول خرابی بین ۵۰-۹۹ cm) انتظار می‌رود واکنشی از سوی رانندگان دیده نشود، ولی با توجه به مدل دیده می‌شود با احتمال ۰.۳۶/۶ رانندگان سرعت خود را به صورت ناگهانی کاهش می‌دهند. این امر نشان می‌دهد در صورتی که رانندگان حس کنند فرصت کافی برای واکنش وجود دارد، اقدام می‌نمایند حتی اگر خرابی کوچک باشد و این خود ممکن است باعث بوجود آمدن تصادف گردد. همانطور که در مطالعه صفارزاده و زاهدی به اهمیت ناهمواری‌های کوچک اشاره شده

تصادفات در ایالت متحده آمریکا به دلیل حواس‌پرتی رانندگان و خارج شدن آنها از خط است، خارج شدن خودرو از خط به دلایل متعددی است مانند خوردن و آشامیدن راننده در هنگام رانندگی و یا صحبت کردن با تلفن همراه و همچنین برخورد با یک مانع نیز باعث تغییر خط راننده می‌شود [Peng et al, 2013]، در این مدل به تاثیر ناهمواری روسازی بر حفظ خط توسط راننده پرداخته شده است و متغیرهای مستقل با تاثیر بیشتر بر انحراف راننده به‌دست آمده است. دقت مدل‌ها و اهمیت نسبی متغیرها در جدول (۶) آورده شده است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

امروزه تصادفات اثرات ناگوار بسیار چشمگیری بر جوامع انسانی دارد و مطالعه برای تعیین عوامل تاثیرگذار بر تصادفات از اهمیت بالایی برخوردار است. داده‌های به‌دست آمده از سطح جاده به روش‌های متعددی تحلیل می‌شوند، ولی مدل کارت به دلیل نمایش گرافیکی از نتایجش، به سادگی قابل فهم و تفسیر است و ابزاری مناسب برای تحلیل داده‌ها است. با توجه به مدل ساخته شده و اطلاعات به‌دست آمده می‌توان دریافت بیشترین تاثیر بر

جدول ۵. تبدیل متغیر هدف پنج‌تایی به متغیر هدف دوتایی

واکنش	۱	۲	۳	۴	۵
مدل	(۴۰/۴٪) ۲۱۸	(۱۳/۳٪) ۷۲	(۲۵/۵٪) ۱۳۸	(۱۳/۵٪) ۷۳	(۷/۳٪) ۳۹
واکنش یا عدم واکنش	۰			۱	
خروج از خط			۰		۱
حفظ خط		۰		۱	

جدول ۶. دقت مدل و متغیرهای مستقل با اهمیت نسبی با در مدلسازی با متغیر هدف دوتایی

عنوان مدل	دقت پیش‌بینی کل مدل (داده آموزشی)	دقت پیش‌بینی کل مدل (داده آزمایشی)	متغیرهای با اهمیت نسبی بالا
واکنش یا عدم واکنش	۶۳/۹٪	۶۷/۱٪	عرض، مساحت، طول خرابی و حجم ترافیک
خروج از خط	۹۴/۴٪	۹۴/۴٪	مساحت و طول خرابی
حفظ خط	۶۷/۲٪	۶۱/۸٪	سرعت، حجم ترافیک و مساحت

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد در مدلسازی با متغیر هدف دوتایی دقت مدل افزایش یافته است.

- 7- Classification and Regression Trees
- 8- Quick, Unbiased, Efficient, Statistical Tree
- 9- Nominal
- 10- Ordinal
- 11- Splitter
- 12- Gini index
- 13- Pruning
- 14-Cost-complexity
- 15- Train data
- 16- Test data
- 17-Lane keeping

است [Saffarzade and Zahedi, 2010].

نتایج مطالعه بر روی جاده‌های درون‌شهری نشان می‌دهد اولویت تعمیر و نگهداری جاده در مسیرهای دارای خرابی با مساحت بیشتر (بالای $7/2 \text{ m}^2$) و سرعت بالاتر (بالای 52 km/hr) است، ولی نباید از مسیرهای دارای خرابی کوچک و حجم ترافیک کم غافل ماند.

نتایج حاصل از مدلسازی با متغیرهای هدف دوتایی، افزایش دقت مدل را نشان می‌دهد همچنین نتایج مدل "حفظ خط" نشان می‌دهد، برای حفظ خط توسط راننده، سرعت و حجم ترافیک از اهمیت بیشتری نسبت به ابعاد خرابی برخوردار است.

در این مطالعه تنها به تاثیر ۷ متغیر مستقل بر انحراف رانندگان در هنگام عبور از برآمدگی یا فرورفتگی روسازی پرداخته شده است که به محققین پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات بعدی تاثیر متغیرهای مختلف از جمله عمق ناهمواری‌ها در شرایط دیگر مانند سایر خرابی‌های تاثیرگذار روسازی مورد بررسی قرار دهند. همچنین پیشنهاد می‌شود این مطالعه برای حالت شب نیز انجام گردد تا تاثیر ناهمواری‌ها بر انحراف رانندگان در شب به دست آید و با نتایج به دست آمده در روز مقایسه گردد.

۸. منابع

- احدی، م، منصور خاکی، ع و نصیراحمدی، ک (۱۳۸۹) "تأثیر بافت درخت روسازی در کنترل لغزندگی و کاهش تصادفات جاده‌ای" مهندسی حمل و نقل، سال اول، شماره چهارم، ص. ۱-۱۱.

- الهی‌زاده، م. (۱۳۹۳) "بررسی روشهای مدلسازی پیشبینی فراوانی، شدت و ریسک حوادث حمل و نقل جاده‌ای"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه یزد.

- باقری خلیلی، ف. و شیخ الاسلامی، ع. (۱۳۹۰) "تحلیلی بر تحقیقات انجام شده در زمینه عوامل مؤثر بر وقوع تصادفات در راه‌های برون شهری"، فصلنامه علمی- ترویجی راهور، سال هشتم، شماره ۱۵، ص. ۹۳ - ۱۱۵

- خوشبخت، م، احمدی، س.ع.ا، نجف، پ. و نظامیان پورچهرمی، ح. (۱۳۹۰) "پیش‌بینی شدت تصادفات جلو به جلو به کمک مدل رگرسیون لوجستیک و ارزیابی پارامترهای مؤثر"، فصلنامه علمی- ترویجی راهور، سال هشتم، شماره ۱۴، ص. ۷-۲۲

- سازمان پزشکی قانونی کشور (۱۳۹۲) "آمار مقایسه‌ای متوفیات و مصدومین ناشی از تصادف‌های ارجاعی به مراکز پزشکی قانونی سال ۹۰ و ۹۱"

۶. سپاسگزاری

بخشهایی از این مقاله برگرفته از گزارش پایانی تحصیلات نویسنده اول مقاله تحت عنوان "بررسی روش‌های مدلسازی پیش‌بینی فراوانی، شدت و ریسک حوادث حمل و نقل جاده‌ای" است، همچنین لازم است از همکاری شهرداری منطقه سه شهر یزد بابت موافقت با برداشت میدانی داده‌ها و از افرادی که در برداشت داده‌ها کمک نمودند، قدردانی شود.

۷. پی‌نوشتها

- 1- International Roughness Index
- 2- Present Serviceability Index
- 3- Bump and Sag
- 4- Potholes
- 5- Manhole covers
- 6- Chi-squared Automatic Interaction Detection

stop/go decision and red-light running violation”, Accident Analysis Prevention., vol. 42, pp. 101-111, DOI:10.1016/j.aap.2009.07.007

- His, A., Gustafsson, M., Eriksson, O., Wiklund, M. and Sjögren, L. (2011) “Road user effect models – the influence of rut depth on traffic safety”, Publication: VTI rapport 731A

- Li, Y., Liu, C. and Ding, L. (2013) “Impact of pavement conditions on crash severity”, Accident Analysis and Prevention, Vol. 59, p.p. 399– 406, DOI: 10.1016/j.aap.2013.06.028

- Peng, Y., Boyle, L. N. and Hallmark S. L. (2013) “Driver’s lane keeping ability with eyes off road: Insights from a naturalistic study”, Accident Analysis and Prevention, Vol. 50, p.p. 628– 634, DOI:10.1016/j.aap.2012.06.013

- Shahin, M.Y. (2002) “pavement management for airports, roads and parking lots”, United States of America: New York, p. 572

- SPSS Classification Trees™ 13.0. source:http://www.hsc.edu.kw/student/app_manuals/SPSS/SPSS%20Classification%20Trees%2013.0.pdf, [Access at 2014/10/04]

- Washington, S. and Wolf, J. (2007) “Hierarchical Tree-based versus ordinary least squares linear regression models: theory and example applied to trip generation”, Transportation Research Record, Vol. 1581, p.p. 82-88, DOI:10.3141/1581-11

- Yan, X., Richards, S. and Su, X. (2010) “Using hierarchical tree-based regression model to predict train-vehicle crashes at passive highway-rail grade crossings”, Accident Analysis and Prevention, Vol. 42, p.p. 64–74, DOI: 10.1016/j.aap.2009.07.003

- شریعت مهیمنی، الف و توکلی کاشانی، ع. (۱۳۸۹) “تحلیل شدت مصدومیت ناشی از تصادف‌ها در راه‌های دوخطه برون‌شهری با استفاده از مدل‌های داده‌کاوی”، پژوهشنامه حمل‌ونقل، سال هفتم، شماره دوم، ص. ۱۶۵–۱۵۳

- صفارزاده، م. و زاهدی، م. (۱۳۸۹) “تأثیر ناهمواری روسازی و روشنایی بر سرعت جریان آزاد در آزادراه‌ها”، پژوهشنامه حمل و نقل، سال هفتم، شماره اول، ص. ۳۸–۲۷

- Beshah, T., Ejigu, D., Abraham, A., Snasel, V. and Kromer, P. (2013) “Mining pattern from road accident data: Role of road user's behaviour and implications for improving road safety”, International Journal of tomography and simulation, vol. 22, No. 1

- Chang, L.Y., (2013) “Analysis of effects of manhole covers on motorcycle driver maneuvers: a non-parametric classification tree approach”, Traffic Injury Prevention, DOI:10.1080/15389588.2013.792110

- Chang, L.Y. and Chien, J. T., (2013) “Analysis of driver injury severity in truck involved accidents using a non-parametric classification tree model”, Safety Science, Vol. 51, p.17–22. DOI:10.1016/j.ssci.2012.06.017

- Chang, L. Y. and Wang, H. W. (2006) "Analysis of traffic injury severity: An application of nonparametric classification tree techniques", Accident Analysis and Prevention, Vol. 38, No.5, pp. 1019-1027

- Chung, Y. S. (2013) “Factor complexity of crash occurrence: An empirical demonstration using boosted regression trees”, Accident Analysis and Prevention, vol. 61, p.p.107– 118, DOI:10.1016/j.aap.2012.08.015

- Chan, C.Y., Huang, B., Yan, X. and Richards, S. (2008) “Effects of Asphalt Pavement Conditions on Traffic Accidents in Tennessee Utilizing Pavement Management System (PMS)”, Southeastern Transportation Center University of Tennessee, Knoxville

- Elmitiny, N., Yan, X., Radwan, E., Russo, C. and Nasgar, D. (2010) “Classification analysis of driver’s

بررسی تأثیر گذاری ترموپلاستیک پلی یورتان بر عملکرد قیر در دمای متوسط و بالا

سعید حسامی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

امین عزیزی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

علی اکبر یوسفی، استاد، پژوهشکده فرآیند، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران

E-mail: hesami@nit.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۴ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۱۶

چکیده

خرابی‌های آسفالتی از جمله معضلاتی است که امروزه دغدغه مهندسين راه و حمل و نقل بوده و هر سال هزینه‌های کلانی صرف تعمیر و نگهداری راه‌های آسفالتی می‌شود. کاهش خرابی‌هایی نظیر شیارشدگی، ترک‌های خستگی و کاهش حساسیت حرارتی قیر از جمله اهداف اصلی تحقیق انجام شده است. تلاش‌های زیادی برای افزایش مقاومت و عمر آسفالت صورت گرفته که از جمله این تلاش‌ها بهبود خواص و عملکرد قیر در مخلوط آسفالتی است. استفاده از پلیمرها در اصلاح خواص قیر بسیار رایج بوده و روز به روز در حال گسترش است. الاستومرهای ترموپلاستیک از جمله خانواده‌ای از پلیمرها هستند که تأثیرات چشمگیری بر خواص قیر داشته‌اند. در این پژوهش، ترموپلاستیک پلی‌یورتان (TPU) به عنوان یک افزودنی اصلاح کننده در قیر بکار رفته است. دمای اختلاط حدود ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. این پلیمر بر پایه پلی‌استر است و خاصیت الاستومری بالایی دارد. آزمایش‌های طیف سنجی مادون قرمز و رئومتر برشی دینامیکی جهت بررسی ساختار TPU و آزمایش‌ها درجه نفوذ، نقطه نرمی و رئومتر برشی دینامیکی جهت بررسی خواص قیر در دمای متوسط و بالا انجام شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که TPU در دمای بالا تأثیر زیادی بر درجه عملکردی بالای قیر داشته به طوری که رده عملکردی دمای بالای قیر شاهد اضافه شده است؛ یعنی قیر اصلاح شده مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل ماندگار نسبت به قیر شاهد داشته است. افزودن ۵ درصد TPU، به دمای عملکردی بالای قیر یک رده اضافه کرده و آن را از 58°C به 64°C رسانده است. همچنین افزایش نقطه نرمی و کاهش درجه نفوذ در قیر اصلاح شده بیان کننده افزایش قوام قیر در دماهای بالا و کاهش حساسیت حرارتی قیر بوده است. افزودنی TPU در دمای متوسط با کاهش زاویه فاز (δ) آمیخته‌ها که نمادی از خاصیت الاستیسیته قیر است؛ افزایش مقاومت در برابر خرابی‌های خستگی را در پی داشته است.

واژه‌های کلیدی: قیر، ترموپلاستیک، پلی‌یورتان، تغییر شکل ماندگار، خستگی

۱. مقدمه

and Müller and Rodríguez, 2003; Amin et al. 2006; [Polacco et al. 2004

SBS، SEBS، SBR، EVA، PP، PE، EBA، SIS^۱ و خرده لاستیک^۲ تایلر خودرو و... نمونه پلیمرهای مورد استفاده در قیر هستند [Airey, 2004; Fawcett and McNally, 2001]; [Zhu and Birgisson and Kringos, 2014]. پلیمرهایی نظیر SBS، SIS، SBES و SBR جزء دسته الاستومرها هستند که معمولاً تاثیر بسیار خوبی بر دمای متوسط عملکردی قیر دارند؛ همچنین EVA و PE جزء دسته پلاستومرها هستند که بر دمای بالای عملکرد قیر تاثیر مثبت از خود نشان می‌دهند [Bahia et al. 2001]. شایان ذکر است که پلیمری چون SBS به عنوان یک ترموپلاستیک الاستومری عمل می‌کند که علاوه بر دمای بالا و متوسط، بر دمای پایین قیر نیز تاثیرگذار بوده و باعث بهبود عملکرد آن می‌شود [Lu and Isacson, 1997; Lu and Isacsson and Ekblad, 1998].

از جمله پلیمرهای واکنش‌پذیری که در قیر به عنوان یک اصلاح‌کننده جهت مصارف آب‌بندی در سقف‌های ساختمانی استفاده شده است، پلیمر پلی‌یورتان است که از واکنش دادن گروه‌های عاملی مثل هیدروکسیل^۳ (OH) موجود در پلی‌ال‌ها با ایزوسیانات‌های آزاد^۴ (NCO) به دست می‌آید [Carrera et al. 2014; Izquierdo et al. 2012; Cuadri et al. 2010]. طی آمیخته شدن این پلیمر سنتز شده ترموپلاستیکی با قیر که خاصیت الاستومری بالایی دارد، مدول برشی و سفتی قیر افزایش پیدا کرده به طوری که باعث افزایش رفتار ویسکوز قیر در دمای بالا می‌شود [Carrera et al. 2010; Izquierdo et al. 2012]. همچنین پلیمر پلی‌یورتان در دماهای عملکردی متوسط و بالا در کنار افزایش مدول برشی مختلط قیر، باعث کاهش زاویه فاز آن نیز می‌شود که در حقیقت نشان دهنده افزایش خاصیت الاستیک قیر در این دماها است [Gallegos et al. 2013; Izquierdo et al. 2014]. ایزوسیانات‌های مصرفی در تولید پلی‌یورتان در وزن‌های مولکولی متفاوتی وجود دارند که هرچه وزن مولکولی آنها کمتر باشد، افزایش مدول مختلط برشی قیر و کاهش زاویه

قیر یک ترکیب کلئیدی است که از نفت خام به دست می‌آید. ترکیب شیمیایی و طبیعت کلئیدی قیر و در نهایت خواص مکانیکی و رئولوژیک قیر اساساً وابسته به منابع نفت خام و فرآیند تهیه آن است. به طور کلی در ترکیب قیرها چهار خانواده اشباع‌ها، آسفالتن‌ها، رزین‌ها و آروماتیک‌ها دیده می‌شوند [Lesueur, 2009]. در واقع قیرها با توجه به مقادیر مختلف چهار مورد مزبور در ترکیبشان رفتار فیزیکی - شیمیایی متفاوتی دارند [Becker and Müller and Rodríguez, 2003; Amin et al. 2006]. مصالح قیری متداول به دلیل چسبندگی، الاستیسیته، نفوذناپذیری و چکش‌خواری قیر، عملکرد قابل قبولی در راهسازی و باند فرودگاه از خود نشان داده‌اند [Airey, 2002].

امروزه به دلیل افزایش بار وارد شده ناشی از کامیون‌های سنگین، افزایش تعداد محورهای بارگذاری وسایط نقلیه و شرایط نامناسب دمایی نیاز به بهبود خواص و افزایش کارایی قیر بیشتر از قبل مورد توجه است [Airey, 2004; Fawcett and McNally, 2001]. چرا که این عوامل باعث خرابی‌های آسفالتی از جمله ترک‌های ناشی از خستگی، ترک‌های حرارتی و شیارشدگی در قیر می‌شوند. در راستای این امر، تلاش‌های بسیار زیادی برای افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر این خرابی‌ها با اصلاح خواص قیر بوسیله پلیمرها صورت گرفته است [Newman, 2003; Yousefi, 1998]. پلیمرهای مصرفی جهت اصلاح قیر معمولاً به سه دسته ترموپلاستیک الاستومرها، پلاستومرها و پلیمرهای واکنش‌پذیر تقسیم می‌شوند [Biondi et al. 2004; C. Gallegos, 2007].

ترموپلاستیک‌های الاستومری معمولاً در دماهای پایین انعطاف‌پذیری بیشتری به روسازی آسفالتی نشان می‌دهند، در حالی که پلاستومرها و پلیمرهای واکنش‌پذیر باعث افزایش سفتی و مقاومت در برابر تغییر شکل‌های ماندگار می‌شوند. باید در نظر داشت که پلیمرهای واکنش‌پذیر به دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی، با گروه‌های قطبی قیر واکنش داده و سازگاری بیشتری نسبت به دو دسته دیگر پلیمرها از خود نشان می‌دهند [Becker

بررسی تأثیرگذاری ترموپلاستیک پلی‌یورتان بر عملکرد قیر در دمای متوسط و بالا

رده سختی A65 که محصول کشور ایتالیا است، بکار گرفته شده که مشخصات این محصول در جدول (۲) ذکر شده است [Coim, 2014]. این مواد به شکل گرانول‌های شیشه‌ای رنگ تولید می‌شوند که در شکل (۱) تصویر آن آمده است.

۲-۲ دستگاه‌ها

برای آمیختن پلیمر TPU با قیر از دستگاه برش بالا LART که برای اهداف اختلاط و همگن‌کردن مخلوط قیری بکار می‌رود، استفاده شد. آزمایشها رویش فرکانسی و دمایی نیز توسط دستگاه رثومتر برشی دینامیکی^{۱۳} (DSR) مدل MCR 300 محصول کشور اتریش و طیف سنجی مادون قرمز فوریه با استفاده از دستگاه 55Equinox محصول کشور آلمان انجام شده است.

۲-۳ فرآیند تهیه نمونه‌ها

برای اختلاط قیر و پلیمر آنها را در یک محفظه استوانه‌ای کنترل دما قرار داده و با دستگاه برش بالا با دور 4000 rpm در دمای $175 \pm 5^\circ\text{C}$ به مدت 40 دقیقه مخلوط شدند. برای تهیه نمونه‌ها، پلیمر TPU در درصدهای وزنی 3، 5 و 7 به قیر اضافه شد.

۲-۴ آزمایش درجه نفوذ

آزمایش درجه نفوذ طبق استاندارد ASTM D5 برای تعیین سفتی نسبی قیر و مقاومت و پایداری آن در برابر فشار بار ترافیک

جدول ۱. مشخصات قیر خالص

پارامترها	واحد	استاندارد	نتایج
درجه نفوذ (دمای 25°C)	0/1mm	ASTM D5	92
نقطه نرمی	$^\circ\text{C}$	ASTM D36	46/4
خاصیت انگمی	cm	ASTM D113	>100
نقطه اشتعال	$^\circ\text{C}$	ASTM D70	232
وزن مخصوص	gr/cm ³	ASTM D2024	1/02

فاز آن بیشتر خواهد بود. دلیل آن چنین است که هرچه وزن مولکولی ایزوسیانات کمتر باشد، در وزن معینی از آن، تعداد مولکول‌های بیشتری از ایزوسیانات وجود دارند که می‌توانند با گروه‌های قطبی قیر واکنش دهند و باعث افزایش ویسکوزیته و سفتی قیر شوند [Carrera et al. 2014].

با توجه به آنکه پلیمرهای ترموپلاستیک الاستومری نظیر SBS، SEBS و SIS به عنوان افزودنی‌های شناخته شده قیر، تأثیر مطلوبی بر بهبود عملکرد قیر در دماهای بالا و متوسط دارند [Ba-hia et al. 2001] و همچنین بهبود پارامترهای مربوط به رئولوژی قیر در دماهای عملکردی متوسط و بالا توسط پلی‌یورتان [Gal-legos et al. 2013; Izquierdo et al. 2014]؛ در این پژوهش، ترموپلاستیک پلی‌یورتان^{۱۲} (TPU) که ایزوسیانات آن از نوع استری است و همانند پلیمرهای مزبور جزء دسته ترموپلاستیک الاستومری است به عنوان یک افزودنی اصلاح کننده قیر مورد بررسی قرار گرفته است.

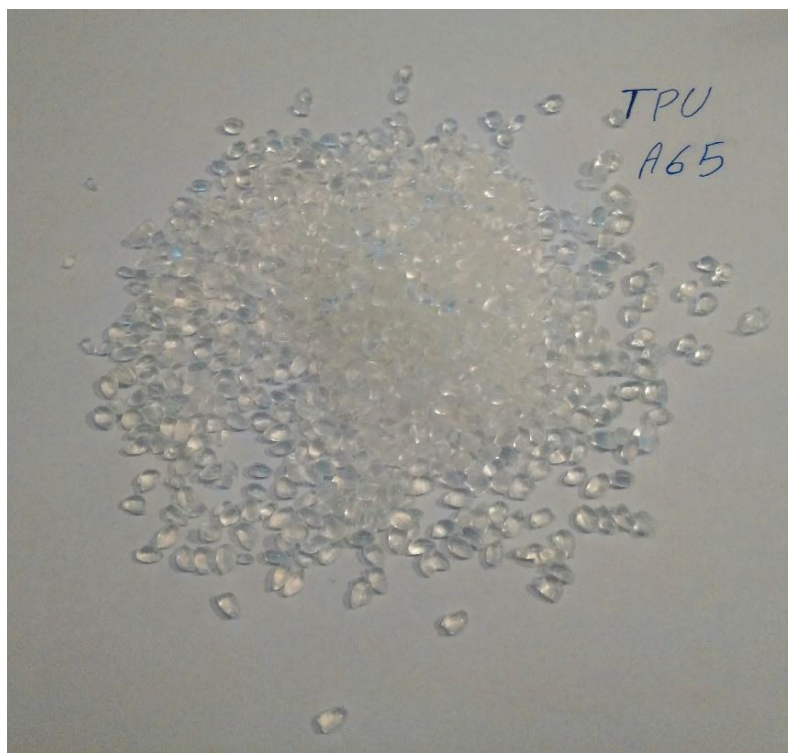
۲. روش تحقیق

۲-۱ مصالح مصرفی

قیر 85/100 با رده عملکردی PG58-16 که فرآورده شرکت نفت پاسارگاد بوده، در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. که اطلاعات مربوط به آن در جدول (۱) آمده است. برای اصلاح قیر از ترموپلاستیک پلی‌یورتان الاستومری بر پایه پلی استر با

جدول ۲. مشخصات TPU [Coim, 2014]

پارامترها	نتایج / واحد	استاندارد
وزن مخصوص	$1/19 \text{ g/cm}^3$	DIN ۵۳۴۷۹
رده سختی	۶۶ A	DIN ۵۳۵۰۵
مدول کششی: ۵۰٪	$1/8 \text{ N/mm}^2$	
۱۰۰٪	$2/7 \text{ N/mm}^2$	DIN ۵۳۵۰۴
۳۰۰٪	5 N/mm^2	
استحکام کششی	$30/7 \text{ N/mm}^2$	DIN ۵۳۵۰۴
کرنش شکست	۸۸۰٪	DIN ۵۳۵۰۴
استحکام پارگی	45 N/mm	DIN ۵۳۵۱۵
نقطه نرم شدگی	$63 \text{ }^\circ\text{C}$	ISO ۳۰۶



شکل ۱. گرانول‌های TPU

بررسی تأثیرگذاری ترموپلاستیک پلی‌یورتان بر عملکرد قیر در دمای متوسط و بالا

۲-۷ آزمایش طیف سنجی مادون قرمز فوریه

آزمایش طیف سنجی مادون قرمز فوریه^{۱۵} (FTIR) برای تجزیه و شناسایی پلیمرها استفاده می‌شود. در این پژوهش جهت شناسایی و تعیین ساختار شیمیایی TPU، پلیمر مزبور به شکل فیلم‌های بسیار نازک به ضخامت میکرون درآورده شده و مورد طیف سنجی قرار گرفته است.

۲-۸ آزمایش رویش فرکانسی

آزمایش رویش فرکانسی توسط دستگاه رثومتر برشی دینامیکی جهت بررسی رثولوژی پلیمر TPU در دمای ۱۸۰°C و در بازه‌ی فرکانسی ۰/۱ تا ۶۰۰ رادیان بر ثانیه و در در سطح کرنش ۱٪ انجام شد. طی این آزمایش تغییرات ویسکوزیته پلیمر TPU در دمای بالا مورد بررسی قرار گرفت تا رفتار ویسکوز این پلیمر در دمای اختلاط با قیر قابل پیش‌بینی و مطلوب باشد.

۲-۹ آزمایش رویش دما

آزمایش رویش دما توسط دستگاه DSR برای بررسی عملکرد قیر اصلاح شده در دمای بالا (۸۳°C-۴۶°C) و در دمای متوسط (۱۳°C-۳۱) در فرکانس ۱۰ rad/s (۱/۶ Hz) طبق برنامه پژوهش‌های گذشته صورت گرفت [Ameri et al. 2011]. هدف از انجام این آزمایش بررسی رثولوژی و عملکرد قیرهای حاوی پلیمر TPU در دماهای متوسط و بالای عملکردی است تا میزان مقاومت نمونه‌ها در برابر خستگی و تغییر شکل ماندگار بررسی شود. دو پارامتر G^* و δ نتایج اصلی آزمایش رویش هستند. قبل از انجام آزمایش رویش دما توسط دستگاه DSR جهت بررسی تغییر شکل ماندگار، نمونه‌های آزمایشی قشر نازک چرخشی^{۱۶} (RTFO) دچار پیرشدگی کوتاه مدت شدند؛ همچنین برای بررسی خستگی، نمونه‌های آزمایشی RTFO و محفظه تسریع پیری^{۱۷} (PAV) دچار پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت شدند. در دمای بالا برای کنترل تغییر شکل ماندگار، مقدار $G^*/\sin\delta$ بعد از RTFO باید بزرگتر از ۲/۲ KPa و در دمای متوسط برای کنترل خستگی، مقدار $G^* \cdot \sin\delta$ بعد از RTFO و PAV باید کوچکتر از KPa ۵۰۰۰ باشد [ASTM D 2872, 1997; ASTM D 6521, 2003].

استفاده می‌گردد؛ جهت بررسی تأثیر پلیمر TPU بر سفتی و درجه نفوذ قیر؛ طبق دستورالعمل آزمایش درجه نفوذ، میزان نفوذ سوزن فولادی استاندارد توسط یک وزنه ۱۰۰ گرمی به مدت ۵ ثانیه در دمای ۲۵°C به داخل قیر اندازه‌گیری شده است.

۲-۵ آزمایش نقطه نرمی

آزمایش نقطه نرمی طبق استاندارد ASTM D36 برای بررسی مقاومت قیر در مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های ماندگار است که به روش حلقه و گلوله انجام می‌شود. در این آزمایش قیر خالص و نمونه‌های آمیخته به پلیمر TPU در حلقه ریخته شده و سطح آن با تیغه‌ی گرم صاف گردیده و گلوله‌ها بر روی سطح قیر قرار داده شده است. مجموعه‌ی محتوی حلقه‌ها در ظرف آب مقطر با دمای ۴°C قرار تعبیه شده و با سرعت یکنواخت ۵°C/min گرم شده است. دمایی که گلوله در اثر وزن خود از لایه قیر عبور کرده و به سطح زیرین رسیده به عنوان نقطه نرمی قیر محسوب گشته است.

۲-۶ تعیین شاخص نفوذ

حساسیت حرارتی قیر بوسیله شاخص نفوذ^{۱۸} (PI) بررسی می‌گردد که با افزایش مقدار این شاخص حساسیت حرارتی قیر کمتر می‌شود. هر چقدر مقدار شاخص PI قیر به عدد +۱ نزدیکتر باشد آن قیر برای مصارف راهسازی مناسب‌تر است. در واقع شاخص PI ضریب زاویه نمودار تغییرات قوام قیر با دماست که در PI برابر +۱ کاهش قوام قیر با دما کمتر بوده و کارایی مخلوط آسفالتی حاصل از آن بیشتر خواهد بود [Barzegari and Yousefi and Zeynali, 2003].

شاخص PI از رابطه زیر که برگرفته از هندبوک شل [D Read JM and Whiteoak, 2003] است، محاسبه می‌شود:

$$PI = \frac{1952 - 500 \cdot \log A - 20 \cdot T}{50 \cdot \log A - T - 120} \quad (1)$$

در رابطه بالا پارامتر A، درجه نفوذ در دمای ۲۵°C و پارامتر T، نقطه نرمی است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱ طیف سنجی مادون قرمز فوریه

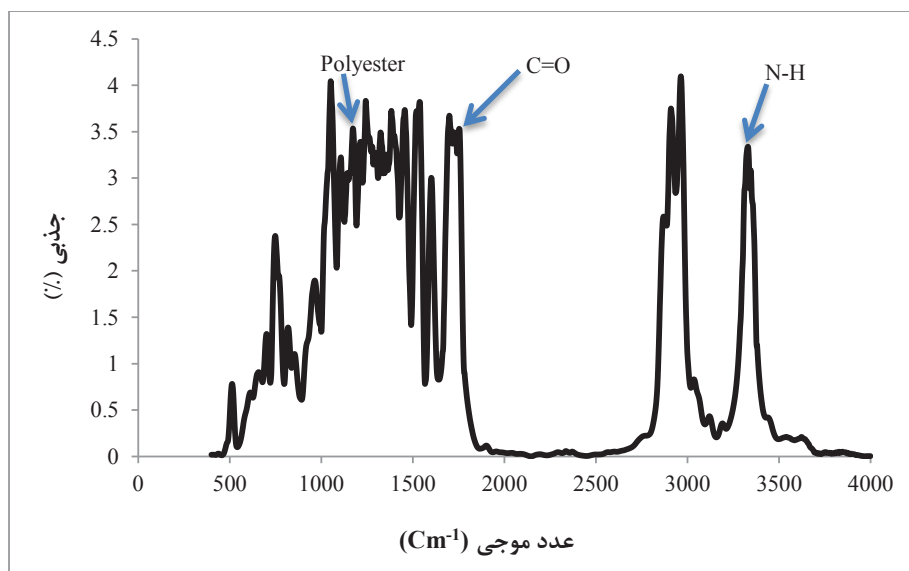
با توجه به شکل (۲) که نتیجه آزمون FTIR جذبی بر روی نمونه فیلم شده TPU است، نقاط بیشینه $3337/85 \text{ Cm}^{-1}$ و $1734/48 \text{ Cm}^{-1}$ به ترتیب مربوط به پیوندهای N-H و C=O هستند. نقطه بیشینه $1170/47 \text{ Cm}^{-1}$ نیز در واقع مربوط به پلی استر موجود در TPU است. NCO که در دامنه نقاط بیشینه عدد موجی 2250 Cm^{-1} تا 2275 Cm^{-1} قرار دارد، در اینجا دیده نشده است که نشان می دهد هنگام فرآیند تولید پلی یورتان با گروه های عاملی واکنش داده و ترکیب C=O که پیوند موجود در یورتان است، تشکیل شده است؛ نقطه بیشینه با عدد موجی $1734/84 \text{ Cm}^{-1}$ بیانگر همین امر است. استناد بر این نتایج به دست آمده، تاییدی بر ماهیت TPU استفاده شده است.

۳-۲ بررسی ویسکوزیته پلیمر TPU

با انجام آزمایش روبش فرکانسی بر روی پلیمر TPU، رئولوژی آن بررسی شد تا اطلاعاتی از رفتار پلیمر در دمای اختلاط به دست آید و ویسکوزیته این ماده در دمای اختلاط مشخص شود. با توجه به شکل (۳)، ویسکوزیته مرکب^{۱۷} پلیمر مزبور (η^*) به نمایش در آمده که نشان می دهد ویسکوزیته این ماده در دمای

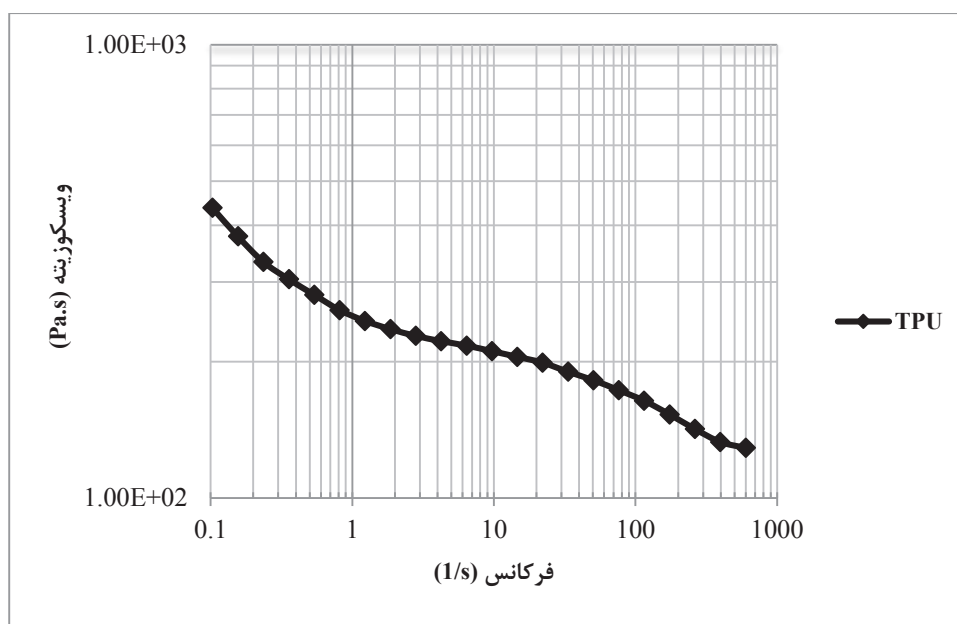
180°C و در فرکانس بارگذاری پایین دارای ویسکوزیته 1230 Pa.s و در فرکانس بارگذاری بالا حدود 129 Pa.s است در حالی که طی نتیجه حاصل از آزمایش روبش دما که بر روی نمونه شاهد انجام شد، طبق شکل (۳) در دمای 82°C ویسکوزیته قیر شاهد $45/11 \text{ Pa.s}$ بوده که انتظار بر این بود با افزودن TPU، ویسکوزیته قیر شاهد افزایش یابد. از آنجایی که قیر در دمای بالا از خود رفتار ویسکوز نشان می دهد، افزایش ویسکوزیته باعث افزایش سفتی قیر و در نتیجه افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل ماندگار می شود. پس این پیش بینی وجود دارد که آمیختن پلیمر TPU با قیر موجب افزایش ویسکوزیته و سفتی آن شود. در ادامه با انجام آزمایشها روبش دما و به دست آمدن تغییرات ویسکوزیته آمیخته قیر و پلیمر، پیش بینی تاثیر مثبت پلیمر در ویسکوزیته قیر طی دماهای سرویس دهی مشخص شده است.

با توجه به شکل (۴) که ویسکوزیته آمیخته های ۱، ۲ و ۳ حاصل از آزمایش روبش دما به نمایش گذاشته شده است در دمای 82°C ویسکوزیته قیر شاهد از $45/11 \text{ Pa.s}$ به مقادیر $101/03 \text{ Pa.s}$ و $68/3 \text{ Pa.s}$ و $979/68 \text{ Pa.s}$ افزایش یافته که تاثیر مثبت TPU بر افزایش ویسکوزیته قیر را بیان می کند. در واقع این نمودار نشان می دهد که پیش بینی انجام شده در تاثیر پلیمر TPU بر افزایش ویسکوزیته قیر درست بوده است.

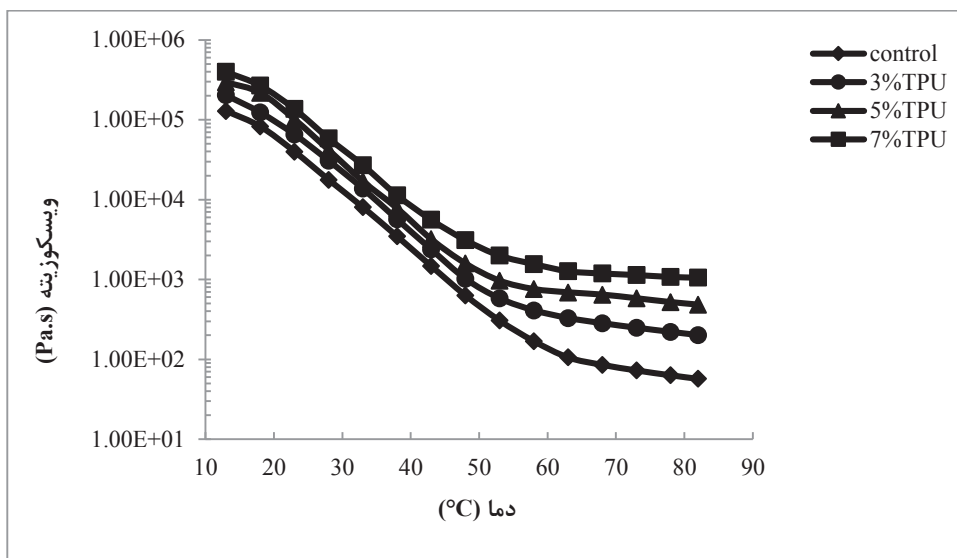


شکل ۲. نقاط بیشینه مربوط به گروه های NH، CO و پلی استر

بررسی تأثیرگذاری ترموپلاستیک پلی‌یورتان بر عملکرد قیر در دمای متوسط و بالا



شکل ۳. تغییرات ویسکوزیته TPU تحت روبش فرکانسی



شکل ۴. تغییرات ویسکوزیته قیر شاهد و آمیخته‌های حاوی TPU

۳-۳ درجه نفوذ و نقطه نرمی

جدول (۳) ترکیب درصد‌های پلیمری آمیخته شده و نتایج حاصل از آزمایش‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی را نشان می‌دهد. درجه نفوذ که نمادی از قوام و پایداری در برابر بار و فشار ترافیک است، در آمیخته ۱ به میزان قابل توجهی از ۹۲ برای نمونه شاهد به ۷۰ رسیده است. طی افزایش درصد افزودنی به قیر روند کاهش درجه نفوذ ادامه داشته تا جایی که برای آمیخته

۲ و ۳ به ۵۷ و ۴۵ رسیده است؛ این نتایج نشان می‌دهد که پلیمر TPU باعث افزایش سفتی قیر شده است. همچنین نقطه نرمی نمونه شاهد از $46/4^{\circ}\text{C}$ به $49/8^{\circ}\text{C}$ برای آمیخته ۱ و به $54/2^{\circ}\text{C}$ و $57/7^{\circ}\text{C}$ برای آمیخته‌های ۲ و ۳ افزایش یافته است که به گونه‌ای می‌تواند نشان دهنده افزایش مقاومت قیر طی اصلاح با پلیمر و مخلوط آسفالتی حاصل از آن در برابر تغییر شکل‌های دائمی باشد.

جدول ۳. درجه نفوذ و نقطه نرمی مربوط به نمونه‌ها

نمونه	درصد پلیمر (%)	درجه نفوذ (°/mm)	نقطه نرمی (°C)
قیر شاهد	—	۹۲	۴۶/۴
آمیخته ۱	۳	۷۰	۴۹/۸
آمیخته ۲	۵	۵۷	۵۴/۲
آمیخته ۳	۷	۴۵	۵۷/۷

و به دست آوردن مقادیر G^* و δ ، پارامتر $G^*/\sin\delta$ در دماهای بالا محاسبه گردید. با توجه به رابطه (۲) که مربوط به انرژی مستهلک شده (کار انجام شده) طی هر سیکل بارگذاری برای کنترل تغییر شکل ماندگار است [Yao, 2012]، افزایش $G^*/\sin\delta$ به معنای کاهش انرژی مستهلک شده یا همان کار انجام شده هنگام بارگذاری است. هر چقدر مقدار آن افزایش یابد نشانگر افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل یا خزش آنی است.

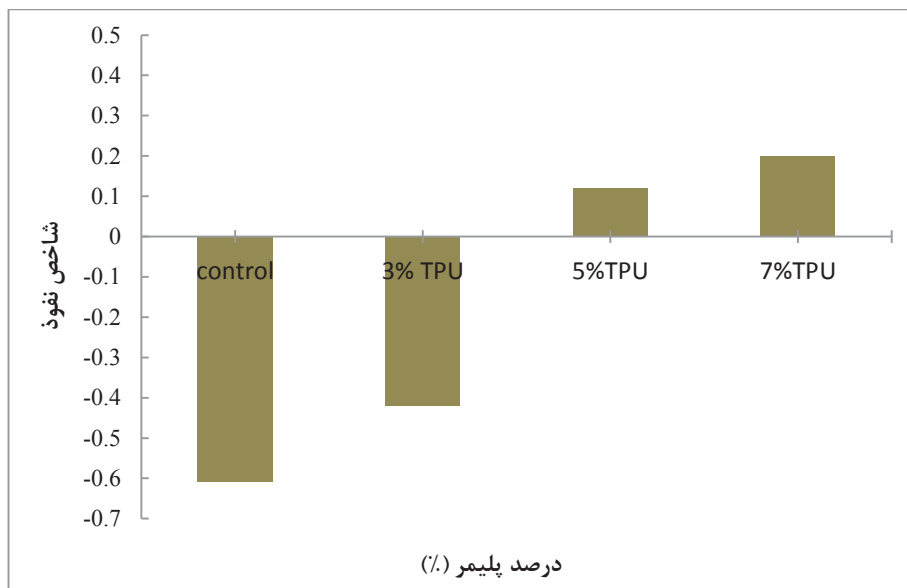
$$Wc = \pi\sigma^2 \left[\frac{1}{G^*/\sin\delta} \right] \quad (2)$$

طبق شکل (۶) اضافه کردن ۳٪ پلیمر TPU به قیر خالص با رده عملکرد ۱۶-۵۸ PG باعث افزایش عملکرد قیر تا دمای $60/25^\circ\text{C}$ شده است. همچنین افزایش ۵٪ و ۷٪ پلیمر TPU به قیر خالص

با استفاده از مقادیر مربوط به درجه نفوذ و نقطه نرمی، شاخص PI مربوط به هر نمونه محاسبه شده که مقدار آن از $0/61$ برای قیر شاهد به $0/42$ برای آمیخته ۱ و به ترتیب $0/12$ و $0/2$ برای آمیخته‌های ۲ و ۳ افزایش یافته است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود با افزایش میزان افزودنی در قیر، مقدار شاخص نفوذ روند افزایشی داشته که نشان دهنده تاثیر بسزای پلیمر TPU در کاهش حساسیت حرارتی قیر شاهد است یعنی با افزایش پلیمر TPU در قیر خالص، گرانروی قیر با افزایش دما کمتر دستخوش تغییر می‌شود.

۳-۴ تاثیر TPU بر عملکرد قیر در دمای بالا

با انجام آزمایش روبش دما بر روی نمونه‌های پیر شده در RTFO



شکل ۵. شاخص نفوذ پذیری قیر شاهد و آمیخته‌های حاوی TPU

بررسی تأثیرگذاری ترموپلاستیک پلی‌یورتان بر عملکرد قیر در دمای متوسط و بالا

مورد استفاده در این پژوهش بوده، با پلیمر EVA در درصدهای وزنی ۲، ۴ و ۶ مورد اصلاح و بررسی قرار گرفته است؛ نتایج حاصل از آزمایش رویش دما در دمای بالا نشان داده است که قیرهای اصلاح شده نسبت به قیر خالص به ترتیب ۰/۶۳، ۶/۳۲ و ۱۵/۴۹ درجه سانتی‌گراد افزایش دمای بالای عملکردی داشته‌اند [Ameri, Mansourian and Sheikhmotevali, 2012].

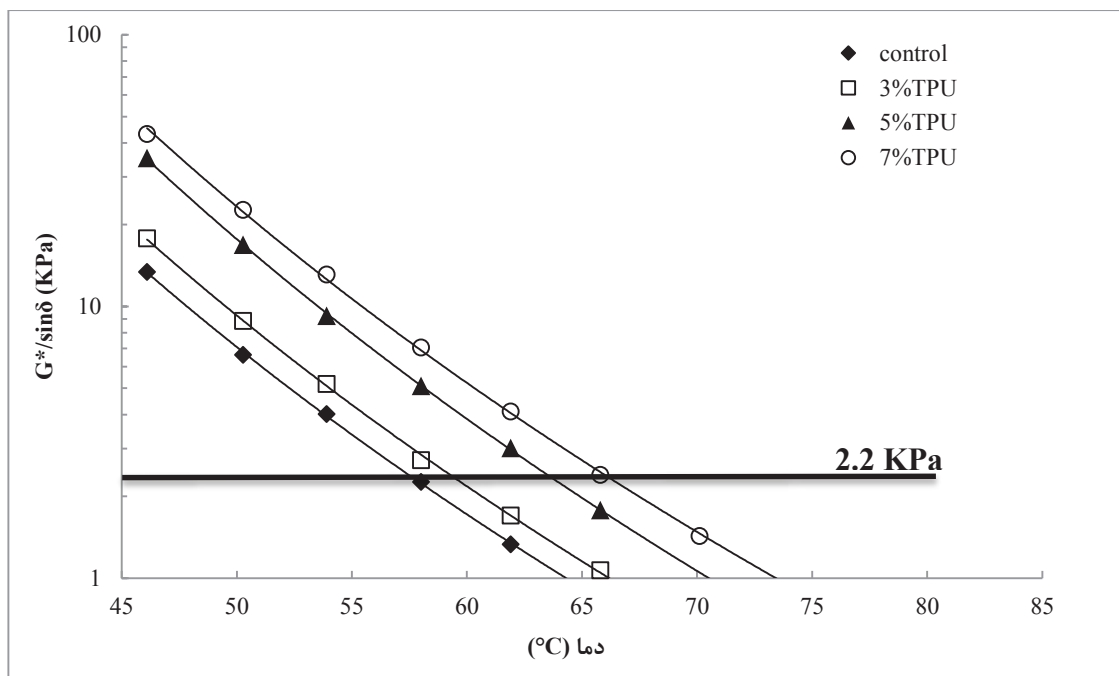
مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که پلیمر TPU در درصدهای وزنی پایین تأثیرگذاری بهتری نسبت به پلیمر EVA داشته است ولی در درصدهای وزنی بالاتر کمتر از EVA توانسته عملکرد مطلوب از خود به جای بگذارد. البته باید در نظر داشت که قیرهای مصرفی در دو پژوهش متفاوت بوده و چون قیر خالص پژوهش گذشته مزبور دارای رئولوژی و خصوصیات مکانیکی بهتری بوده، عملکرد بهتری را نیز بعد اصلاح از خود نشان داده است.

۳-۵ تأثیر TPU بر عملکرد قیر در دمای متوسط

طبق شکل (۷) پارامتر $G^* \cdot \sin \delta$ برای نمونه‌ها بررسی شد. در دماهای متوسط مقدار مطلوب $G^* / \sin \delta < 5000 \text{ KPa}$ است. کاهش $G^* \cdot \sin \delta$ به معنای افزایش خاصیت الاستیک قیر است و

دمای بالای قیر را به $64/7^\circ\text{C}$ و $66/85^\circ\text{C}$ رسانده است. افزودن ۵٪ پلیمر TPU به اندازه یک رده، دمای بالای عملکرد قیر خالص را افزایش داده است. در حقیقت دلیل افزایش دمای عملکرد قیر اصلاح شده، افزایش G^* و کاهش δ است. به عبارت دیگر رفتار قیر به خصوصیات ویسکوالاستیک آن برمی‌گردد که با افزایش G^* و کاهش δ ، قیر در دماهای بیشتری، خاصیت ویسکوز و الاستیسیته خود را حفظ می‌کند. همچنین باید در نظر داشت که دلیل افزایش مقاومت نمونه‌های اصلاح شده همان کاهش انرژی مستهلک شده یا کاهش تغییر شکل ناشی از بارگذاری است. با افزایش درصد TPU در قیر، G^* افزایش بیشتر و δ کاهش بیشتری داشته که در نتیجه پارامتر $G^* / \sin \delta$ بزرگ‌تر شده و انرژی مستهلک شده و تغییر شکل طی بارگذاری کاهش یافته است. نتایج به دست آمده از آزمایش نقطه نرمی که در جدول (۳) آمده است نیز گواه بر این مشاهدات است.

افزایش دمای بالای عملکرد قیر ۱۶-۵۸ PG که قیر بسیار نرمی است، با افزودن ۳، ۵ و ۷ درصد پلیمر TPU به اندازه ۲/۲۵، ۶/۷ و ۸/۸۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. در پژوهش‌های گذشته، قیر ۲۲-۶۴ PG که قیر سفت‌تر با عملکرد دمایی بالاتری نسبت به قیر



شکل ۶. تأثیر TPU بر پارامتر تغییر شکل ماندگار قیر در دماهای بالا

$G^* \cdot \sin \delta$ بیشترین کاهش را داشته که مقاومت بیشتری را در برابر خستگی از خود نشان داده است.

در محدوده دمایی متوسط سرویس‌دهی، در مقایسه با EVA که در پژوهش‌های گذشته بررسی شده است، پلیمر TPU تاثیر بسزایی در اصلاح قیر خالص داشته است و عملکرد قیر در دمای متوسط بهبود یافته است با این حال نسبت به پلیمر EVA کمتر توانسته بهبود دمای متوسط عملکردی قیر را حاصل کند [Ameri Mansourian and Sheikhmotevali, 2012].

با افزایش دما اختلاف $G^* \cdot \sin \delta$ بین آمیخته‌ها یا همان قیرهای اصلاح شده زیاد بوده که نشان می‌دهد آمیخته ۳ خاصیت الاستیسیته خود را نسبت به نمونه‌های دیگر بهتر حفظ کرده و حساسیت کمتری نسبت به افزایش دما از خود نشان داده است.

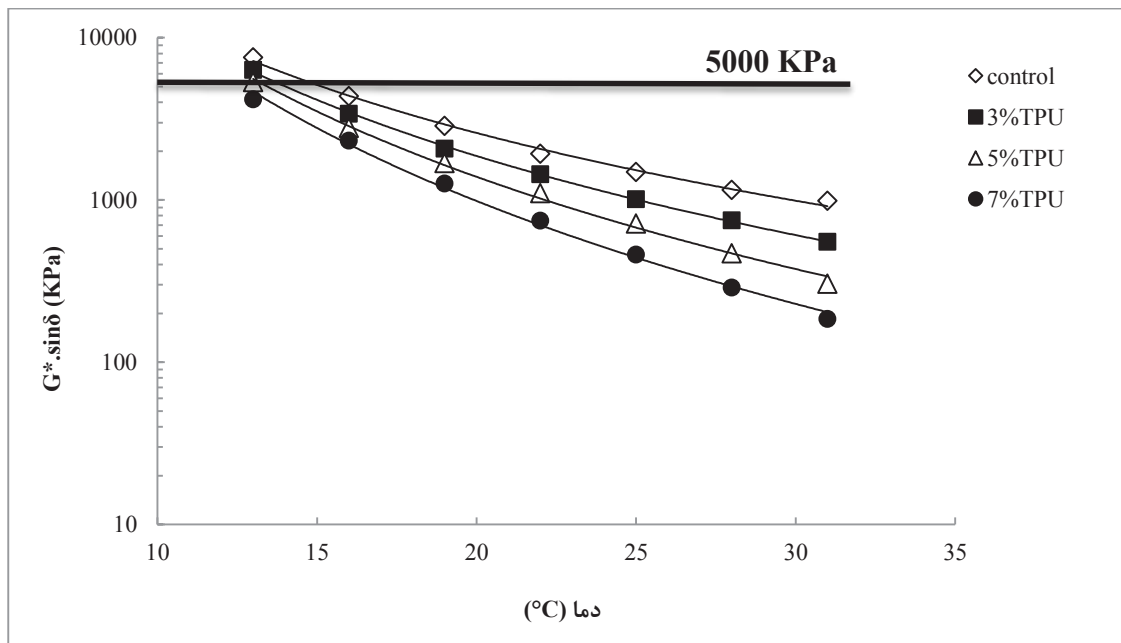
۴. نتیجه گیری

افزودن ترموپلاستیک الاستومر پلی یورتان به قیر خالص باعث کاهش درجه نفوذ و در پی آن بالا رفتن قوام و پایداری قیر در برابر فشار بار ترافیک شده است. همچنین نقطه نرمی

برگشت پذیری مخلوط آسفالتی هنگام بارگذاری بیشتر خواهد بود. با توجه به رابطه (۳) که مربوط به انرژی مستهلک شده برای کنترل خستگی است [Yao, 2012]؛ هر قدر مقدار پارامتر $G^* \cdot \sin \delta$ کمتر شود، انرژی استهلاکی طی بارگذاری سیکلی کمتر و مقاومت در برابر خستگی افزایش می‌یابد.

$$Wc = \pi \varepsilon^2 (G^* \cdot \sin \delta) \quad (3)$$

با اضافه کردن ۳٪ پلیمر TPU به مقدار $G^* \cdot \sin \delta$ مربوط به قیر اصلاح شده نسبت به قیر اصلاح نشده مقدار کمتری داشته که دلیل آن افزایش مقدار G^* و کاهش مقدار δ بوده و این روند کاهشی برای ۵٪ و ۷٪ افزودنی ادامه یافته است. سیر نزولی پارامتر $G^* \cdot \sin \delta$ با بالا رفتن دما تحت افزایش درصد افزودنی در قیر بیشتر شده است که دلیل آن کاهش چشمگیر زاویه فاز در دماهای بالاتر بوده است. در واقع با افزایش مقدار افزودنی به قیر خالص، قیر خاصیت الاستیک بیشتری از خود نشان داده است. با افزایش خاصیت الاستیک قیر که نتیجه کاهش زیاد δ است و افزایش سفتی آن، پارامتر $G^* \cdot \sin \delta$ کاهش بیشتری داشته که در نتیجه آن طبق رابطه ۳ انرژی مستهلک شده کاهش یافته و مقاومت در برابر خستگی بیشتر شده است. با افزایش درصد افزودنی به ۷٪ پارامتر



شکل ۷. تاثیر TPU بر پارامتر خستگی قیر در دماهای متوسط

۶. پیشنهادات

پیشنهاد می‌شود که عملکرد آسفالت حاوی قیر اصلاح شده با پلیمر TPU نیز بررسی شود.
از لحاظ اقتصادی نیز، استفاده از این پلیمر در اصلاح قیر مورد بررسی قرار گیرد.

۷. مراجع

- Airey, G. D. (2002) "Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens", Constr. Build. Mater. No. 16, pp. 473–487.
- Airey, G. D. (2004) "Styrene-butadiene-styrene polymer modification of road bitumens", J. Mater. Sci. No. 39, pp. 951–959.
- Amin, H. B. Hussein, I. A. , Iqbal, M. H. and Al-Abdul Wahhab, H. I. (2006) "Rheological investigation of the influence of acrylate polymers on the modification of asphalt", J. Appl. Polym. Sci. No. 102, pp. 3446–3456.
- Barzegari, Mohammad Reza, Yousefi, Ali Akbar and Zeynali, Mohammad Ebrahim (2003) "Bitumen modification via PS/PB Blend", Iranian Journal of Polymer Science and Technology. No. 16, pp. 303-311.
- Becker, Y. Müller, A.J. and Rodríguez, Y. (2003) "Use of rheological compatibility criteria to study SBS modified asphalts" J. Appl. Polym. Sci. No. 90, pp. 1772–1782.
- Biondi, D. Polacco, G. Stastna, J. Vlachovicova, Z. and Zanzotto, L. (2004) "Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers", J. Polym. Eng. Sci, No. 44, pp. 2185–2193.
- Birgisson, Bjorn. Kringos, Niki. and Zhu, Jiqing. (2014) "Polymer modification of bitumen: Advances and challenges". European Polymer Journal. No. 54, pp. 18–38.
- Carrera, V. Cuadri, A.A. García-Morales, M. and Partal, P. (2014) "Influence of the prepolymer molec-

با افزایش افزودنی در قیر خالص کاهش پیدا کرده که خود نمایانگر افزایش مقاومت قیر نسبت به تغییر شکل ماندگار است.
شاخص PI در پی کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی، افزایش یافته که در واقع نشان دهنده کاهش حساسیت حرارتی قیر اصلاح شده با پلیمر TPU نسبت به قیر خالص بوده است.
افزودن ۷٪ پلیمر TPU به قیر اصلاح نشده باعث افزایش دمای عملکرد آن از ۵۸°C به ۶۶/۸۵°C شده است. این افزایش عملکرد در دمای بالا و در واقع افزایش پارامتر $G^*/\sin\delta$ نشان دهنده افزایش مقاومت قیر در برابر تغییر شکل ماندگار است. با در نظر گرفتن اینکه رده عملکردی به ازای هر ۶ درجه سانتی گراد تغییر می‌کند و با توجه به افزایش دمای بالای نمونه‌های اصلاح شده، افزودن ۵٪ درصد TPU یک رده عملکرد به قیر خالص اضافه کرده است.
با کاهش پارامتر $G^*.\sin\delta$ در طی افزودن TPU به قیر خالص که در واقع پارامتر مقاومت در برابر خستگی است و در پی آن بالارفتن خاصیت الاستیک، افزایش مقاومت قیر در برابر خستگی را در پی داشته است.

۵. پی نوشتها

- 1- Styrene Butadiene Styrene
- 2- Styrene Ethyl Butylene Styrene
- 3- Styrene Butadiene Rubber
- 4- Ethylene Vinyl Acetate
- 5- Polypropylene
- 6- Polyethylene
- 7- Ethylene butyl acrylate
- 8- Styrene Isoprene Styrene
- 9- Crumb Rubber
- 10- Hydroxyl
- 11- Free Isocyanates
- 12- Thermoplastic Polyurethane
- 13- Dynamic Shear Rheometer
- 14- Penetration Index
- 15- Fourier Transform Infrared Spectroscopy
- 16- Rolling Thin Film Oven
- 17- Pressure Age Vessel
- 18- Complex Viscosity

- Izquierdo, M. A. García-Morales, M., Martínez-Boza, F. J. and Navarro, F. J. (2014) "Thermo-mechanical properties and microstructural considerations of MDI isocyanate-based bituminous foams", *Materials Chemistry and Physics*. No. 146. pp. 261–268.
- Lesueur, D. (2009) "The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification", *advanced colloid interface science*. Sci., No. 145, pp. 42–82.
- Newman, J. K. (1998) "Dynamic shear rheological properties of polymer modified asphalts binder", *J. Elastom. Plast.* No. 30, pp. 245–263.
- Standard test method for penetration of bituminous materials. *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, D 5.
- Standard test method for softening point of bitumen (ring and ball apparatus). *Annual Book of ASTM Standard*. American Society for Testing and Materials, D 36.
- Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test), *Annual Book of ASTM Standard*. (1997) "American Society for Testing and Materials", D 2872.
- Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV), *Annual Book of ASTM Standard*. (2003) "American Society for Testing and Materials", D 6521.
- Whiteoak, D. and Read, J. M. (2003) "The Shell bitumen handbook", London: Thomas Telford Services Ltd.
- Yousefi, A. A. (2003) "Polyethylene dispersions in bitumen: the effects of the polymer structural parameters". *J. Appl. Polym. Sci.* No. 90, pp. 3183–3190.
- Bahia, H.U., Hanson, D. H, Zeng, M., Zhai, H., Katri, M. A and Anderson, R. M. (2001) "Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design", "NCHRP Report 459, National Academy Press, Washington, D.C.
- Lu, X. and Isacson, U. (1997) "Rheological characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer ular weight and free isocyanate content on the rheology of polyurethane modified bitumens". *European Polymer Journal*. No. 57, pp. 151–159.
- Carrera, V., Gallegos, C., García-Morales, M., Partal, P. and Pérez-Lepe, A. (2010) "Effect of processing on the rheological properties of poly-urethane/urea bituminous products", *Fuel Processing Technology*. No. 91, pp. 1139–1145.
- Cuadri, A. A. García-Morales, M. Navarro, F.J. and Partal, P. (2014) "Processing of bitumens modified by a bio-oil-derived polyurethane", *Fuel*. No. 118. pp. 83–90.
- Fawcett, A. H. and McNally, T. (2001) "Blends of bitumen with polymers having a styrene component", *Polym. Eng. Sci.* No. 41, pp. 1251–1264.
- Gallegos, C. García-Morales, M. Navarro, F. J. and Partal, P. (2006) "Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen", *Fuel*. No. 85, pp. 936–43.
- Izquierdo, M. A. Navarro, F. J. Martínez-Boza, F.J. and Gallegos, C. (2012) "Bituminous polyurethane foams for building applications: Influence of bitumen hardness", *Construction and Building Materials*, No. 30, pp. 706–713.
- Gallegos, C. Navarro, F. J. García-Morales, M. Martínez-Boza, F. J. and Partal, P. (2007) "Bitumen modification with a low-molecular-weight reactive isocyanate-terminated polymer", *Fuel*, No. 86, pp. 2291–2299.
- Gallegos, C., Izquierdo, M.A., Navarro, F.J. and Martínez-Boza, F. (2013) "Effects of MDI–PPG molecular weight on the thermorheological behaviour of MDI–isocyanate based bituminous foams", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. No. 19, pp. 704–711.
- García-Morales, M. Partal, P. Navarro, F. J. Martínez-Boza, F. J. Gallegos, C. González, N. González, O. and Muñozb, M. E. (2004) "Viscous properties and microstructure of recycled EVA modified bitumen", *Fuel*. No. 83, pp. 31–38.

modified bitumens", Construction Building and Materials. Vol.11, No. 1, pp. 23-32.

- Lu, X., Isacsson, U. and Ekblad, J. (1998) "Low-temperature properties of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumens". Construction Building and Materials. Vol. 12, pp. 405-414.

- Ameri, M. Mansourian, M. Salehi Ashnai, S. and Yadollahi, G. (2011) "Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction", Construction Building and Materials. Vol.25, pp. 1379-1387.

- Yao, H., You, Zh., Li, L., Shi, X., Goh, Sh., Mills Beale, J. and Wingard, D. (2012) "Performance of asphalt binder blended with non-modified and polymer-modified nanoclay". Construction Building and Materials. Vol.35, pp. 159-170.

- Ameri, M. Mansourian, A. and Sheikhmotevali, A. H. (2012) "Investigating effects of ethylene vinyl acetate and gilsonite modifiers upon performance of base bitumen using Superpave tests methodology", Construction Building and Materials. Vol.36, pp. 1001-1007.

- WWW.Coimgroup.Com (2014) "Technical Data Sheet of Coim Company, LRP6518".