



Semnan University



Research Article

Investigating the Rutting Behavior of Asphalt Binders Modified with Dense Polyethylene and Gilsonite at High Temperatures

Yaran, S.^a, Akbari, M.^{b*}

^a M.Sc. in Raod and Transportation Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran.

^b Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-02-20

Revised: 2024-04-11

Accepted: 2024-04-12

Keywords:

Rutting;

Dynamic shear rheometer;

Gilsonite;

High dnse polyethylene;

Rolling thin film oven.

ABSTRACT

In recent years, in order to improve the functional properties of asphalt binder, researchers have turned to modify asphalt binder using various materials such as chemicals, polymers, and nanomaterials. Rutting is one of the most important and common failures that occur in asphalt pavement. In order to investigate the effect of additives on rutting failure, two types of modifiers including gilsonite (natural mineral bitumen) and high dense polyethylene (HDPE) have been used in this study. For this purpose, pure bitumen 85/100, with three amounts of 4, 8, and 12 percent by weight of bitumen with gilsonite and three amounts of 2, 4, and 6 percent by weight of bitumen with HDPE, has been mixed by a high shear mixer. By conducting a dynamic shear rheometer (DSR) test at 4 temperatures of 58, 64, 70 and 76 degrees Celsius, the effect of additives on asphalt rutting behavior has been investigated. Based on the DSR test results, it can be said that the short-term aging of modified asphalt binder has a significant effect on the amount of rutting based on the $G^*/\sin\delta$ parameter. Results show that the lowest amount of rutting parameter ($G^*/\sin\delta$) at temperatures of 58, 64, 70 and 76 degrees Celsius in pre-aging conditions is related to asphalt binder modified with 4% HDPE. But, among the aged samples, the asphalt binder sample containing 6% HDPE had better rutting behavior. The rutting behavior of asphalt binder modified with gilsonite also shows that with the increase of gilsonite percentage up to 12%, the rutting resistance rate of bitumen has also increased and its effectiveness is more significant in aged samples.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.29985.1636>

*** Corresponding author**E-mail address: akbari@semnan.ac.ir

How to cite this article: Yaran, S., & Akbari, M. (2023). Investigating the rutting behavior of asphalt binders modified with high-dense polyethylene and gilsonite at high temperatures. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(4), 37-57. doi: [10.22075/jtie.2024.29985.1636](https://doi.org/10.22075/jtie.2024.29985.1636).

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Semnan University

مجله مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

بررسی رفتار شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده با پلی‌اتیلن سنگین و گیلسونایت

در دماهای زیاد

سبحان یاران^۱، مهدی اکبری^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

^{۲*} استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر، به منظور بهبود خواص عملکردی قیرهای خالص، پژوهشگران به سوی اصلاح قیر با استفاده از مواد مختلفی از جمله مواد شیمیایی، پلیمری و نانومواد روی آورده‌اند. شیارشدگی یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین خرابی‌هایی است که در روسازی آسفالتی ایجاد می‌شود. برای بررسی آزمایشگاهی تأثیر مواد افزودنی بر خرابی شیارشدگی، در پژوهش حاضر از دو نوع اصلاح‌کننده شامل گیلسونایت (قیر طبیعی معدنی) و پلی‌اتیلن سنگین استفاده شده است. به همین منظور، قیر خالص ۸۵/۱۰۰ مصرفی، با سه مقدار ۴، ۸ و ۱۲ درصد وزنی قیر با گیلسونایت و سه مقدار ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی قیر با پلی‌اتیلن سنگین، و با مخلوط کن برش بالا اختلاط پیدا کرده است. با انجام آزمایش برش دینامیک در ۴ دمای ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سلسیوس، اثر مواد افزودنی روی شیارشدگی بررسی شده است. بر اساس نتایج آزمایش رنومتر برش دینامیک، می‌توان گفت که پیرشدگی کوتاه‌مدت قیر اصلاح‌شده، اثر معنی‌داری بر میزان شیارشدگی براساس پارامتر $G^*/\sin\delta$ دارد. نتایج نشان می‌دهد که کمترین مقدار شیارشدگی قیر در دماهای ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سلسیوس در شرایط قبل از پیرشدگی مربوط به قیر اصلاح‌شده با ۴ درصد پلی‌اتیلن است. اما در میان نمونه‌های پیرشده، نمونه قیر حاوی ۶ درصد پلی‌اتیلن سنگین، رفتار شیارشدگی بهتری از خود نشان داده است. رفتار شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده با گیلسونایت نیز نشانگر آن است که با افزایش درصد گیلسونایت تا ۱۲ درصد، نرخ مقاومت شیارشدگی قیر نیز روندی افزایشی داشته است و اثربخشی آن در نمونه‌های پیرشده قابل توجه‌تر است.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.29985.1636>

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: akbari@semnan.ac.ir

استناد به این مقاله: یاران، سبحان & اکبری، مهدی. (۱۴۰۲). بررسی رفتار شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده با پلی‌اتیلن سنگین و گیلسونایت در دماهای بالا. مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۹(۴)، ۳۷-۵۷. doi: [10.22075/jtie.2024.29985.1636](https://doi.org/10.22075/jtie.2024.29985.1636)

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

تحقیقات نشان می دهد که مقاومت مخلوط های آسفالتی و حتی اندودهای سطحی قیری در برابر تغییر شکل های دائمی، تا حدود زیادی به رفتار رئولوژیک قیر بستگی دارد (رادهاکریشنن و همکاران، ۲۰۱۸؛ روحانی و همکاران، ۲۰۲۲؛ شفابخش و همکاران، ۲۰۲۰).

بنابراین، ارزیابی خصوصیات شیارشدگی قیر و بهبود آن با استفاده از افزودنی های مختلف مورد توجه پژوهشگران زیادی بوده است (اکبری و همکاران، ۲۰۲۳؛ کاردونه و همکاران، ۲۰۱۴؛ کومار و همکاران، ۲۰۱۷؛ سبو و کومار، ۲۰۱۶؛ سانتاگاتا و همکاران، ۲۰۱۳؛ صبحی و همکاران، ۲۰۱۵؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

اصلاح قیر با استفاده از مواد مختلفی انجام می شود که از مهم ترین این مواد می توان به اصلاح قیر با پلیمرها، نانومواد، مواد شیمیایی، مواد مرکب و با هیدروکربن ها تقسیم بندی کرد. قیرهای طبیعی (گیلسونایت) نیز می تواند به عنوان یک ماده اصلاح کننده قیر استفاده شود (حسامی و همکاران، ۲۰۱۷؛ اکبری و همکاران، ۲۰۲۳؛ روحانی و همکاران، ۲۰۲۲).

شیارشدگی، به تغییر شکل های دائمی اطلاق می شود که به صورت شیار در مسیر چرخ و به موازات محور طولی راه ایجاد می شود. چنانچه بارهای ترافیکی به میزان قابل توجهی افزایش یابد و دمای محیط زیاد باشد، خطر ایجاد پدیده شیارشدگی بیشتر می شود (وایت، ۲۰۰۲). شیارشدگی بر اثر سه سازوکار به وجود می آید (ستنتو و همکاران، ۲۰۰۸):

۱- ضعف لایه های بستر، زیراساس و اساس،

۲- وجود لایه (های) آسفالتی ناپایدار و

۳- تراکم نامناسب آسفالت در مسیر چرخ خودروها.

داده های به دست آمده از آزمایش های آشتو نشان می دهد که ۳۴ درصد شیارشدگی مخلوط های آسفالتی گرم به علت ضعف لایه روسازی آسفالتی است (پولیتز، ۱۹۸۷). شیارشدگی به طور معمول در سال های اولیه عمر روسازی (کمتر از پنج سال) که هنوز قیر موجود در

راه ها به عنوان مهم ترین زیرساخت حمل و نقل جاده ای هر کشور، نقش قابل ملاحظه ای در جابجایی کالا و مسافر دارند. در این میان، روسازی راه ها، اساسی ترین جزء این سیستم بوده و سالانه بخش قابل توجهی از بودجه ملی هر کشور صرف توسعه، نگهداری و تعمیر روسازی شبکه راه ها می شود (هاس و هادسون، ۲۰۱۵). روسازی آسفالتی پس از ساخت و آغاز دوره بهره برداری تحت تأثیر عوامل بارگذاری (بارهای ترافیکی) و وضعیت جوی (آب و هوا و زهکشی) دچار خرابی شده و قابلیت خدمت دهی آن با گذشت زمان کاهش می یابد (کاماهان و همکاران، ۱۹۸۷). شیارشدگی یکی از مهمترین خرابی هایی است که در طول عمر مفید یک روسازی آسفالتی رخ می دهد و تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آن دارد. این خرابی تا حدود زیادی وابسته به شرایط ترافیکی (بارهای محوری سنگین، سرعت کم جریان ترافیک و حجم بالای ترافیک عبوری) و آب و هوایی (دمای زیاد سطح روسازی) می باشد. علاوه بر این، مخلوط های آسفالتی بی کیفیت و معایب ایجاد شده در زمان ساخت نیز در ایجاد این نوع خرابی تأثیرگذار می باشند (دو و همکاران، ۲۰۱۸). بروز شیارشدگی علاوه بر این که منجر به کاهش عمر خدمت دهی و افزایش هزینه های تعمیر و نگهداری روسازی آسفالتی می گردد، با کاهش سطح ایمنی راه، خطرات جدی و جانی را برای استفاده کنندگان از جاده ایجاد می کند (اکبری و همکاران، ۲۰۱۵؛ اکبری و همکاران، ۲۰۲۰a؛ اکبری و همکاران، ۲۰۲۰b؛ باستوس و همکاران، ۲۰۱۷).

از بین اجزای تشکیل دهنده مخلوط های آسفالتی، قیر نقش بسیار مهمی در رفتار ویسکوالاستیک ایفا می کند. همچنین این ماده می تواند با بهبود عملکرد خود از بروز خرابی های مختلف جلوگیری و یا روند تسریع آن را کاهش دهد. به همین دلیل، تحقیقات قابل توجهی روی توسعه آزمایش های قیر صورت پذیرفته است. نتایج

رفتار میزان شیارشدگی آن‌ها در دمای زیاد و درصد‌های مختلف افزودنی‌ها پرداخته شود. به همین منظور، از پلی‌اتیلن در مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد و گیلسونایت در درصد‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ در دماهای ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سلسیوس آزمایش رنومتر برش دینامیک انجام شده که اثر رفتار پیرشدگی با استفاده از آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFO)^۲ روی رفتار شیارشدگی تحت آزمایش DSR نیز ارزیابی شده است.

۲. مطالعات پیشین

در تحقیقی که توسط پورحیدری و همکاران (۲۰۲۰) انجام شده، از پودر لاستیک و گیلسونایت به عنوان اصلاح‌کننده قیر استفاده شده است. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که با افزودن گیلسونایت، درجه نفوذ قیر اصلاح‌شده کاهش یافته اما نقطه نرمی قیر افزایش پیدا می‌کند. بنابراین، می‌توان گفت که افزودن گیلسونایت باعث افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی شده و مخلوط‌های آسفالتی را نسبت به شیارشدگی بهبود می‌بخشد. همچنین، آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که شکل‌پذیری قیر اصلاح‌شده با گیلسونایت کمتر از قیر خالص است. افزودن گیلسونایت سبب افزایش سختی قیر می‌شود، اما با افزودن پودر لاستیک به قیر حاوی گیلسونایت میزان شکل‌پذیری قیر و کشش‌پذیری قیر افزایش می‌یابد، که نشان از افزایش انعطاف‌پذیری قیر است. افزودن همزمان گیلسونایت و پودر لاستیک باعث افزایش ویسکوزیته قیر شده و با افزایش درصد‌های زیاد این مواد به قیر، ویسکوزیته همچنان افزایش پیدا می‌کند. در حالت پیرنشده، با افزودن گیلسونایت، پارامتر $G^*/\sin\delta$ افزایش پیدا می‌کند، به طوری که مقدار آن برای قیر حاوی ۴۰ درصد گیلسونایت از دو به چهار می‌رسد. همچنین، با افزودن گیلسونایت به قیر خالص، مقدار $G^* \cdot \sin\delta$

آسفالت سخت نشده است، به وجود آمده و مقدار شیارشدگی بر حسب متر مربع سطح رویه و شدت آن به وسیله میانگین عمق شیار بر حسب میلی‌متر تعیین می‌شود (آرچیلا و مدنات، ۲۰۰۰).

این نوع خرابی به طور آشکار موجب افت شدید کیفیت سواری، جاری شدن آب از مسیر شیار و خطر تصادف ناشی از بی‌تعادلی وسیله نقلیه و نیز ایجاد پدیده پاشش آب می‌شود (سنتنو و همکاران، ۲۰۰۸؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۲).

بارگذاری سنگین و دمای زیاد محیط از جمله مهم‌ترین عواملی هستند که باعث ایجاد پدیده شیارشدگی می‌شوند (کاوسی و همکاران، ۲۰۱۸). با افزایش بیش از حد مجاز بار ترافیکی، شیارشدگی به صورت خطی افزایش می‌یابد (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۸).

تأثیرات اقلیمی و دمای محیط راه‌ها تأثیر به‌سزایی روی بروز انواع خرابی‌ها دارد. با توجه به تنوع زیاد خرابی‌های موجود در راه‌ها و وابستگی آنها به دمای پیرامونی، شیارشدگی یکی از بیشترین خرابی‌هایی است که در سطح جاده‌های آسفالتی در مناطق گرمسیری با دماهای زیاد مشاهده می‌شود. بروز خرابی‌های ناشی از تغییرشکل دائمی آسفالت روی عملکرد ایمنی، هزینه‌ای و تعمیر و نگهداری راه‌ها در زمان خدمت‌دهی آنها اثر می‌گذارد. از همین رو، به دلیل محدودیت‌ها، صرفاً بر عملکرد شیارشدگی و تأثیر دماهای زیاد روی عملکرد قیر تمرکز شده است. در مطالعات مختلف، نشان داده شده است که جهت بررسی رفتار تغییرشکل دائمی قیر، از آزمایش‌های مختلف استفاده شده که از جمله معتبرترین آن‌ها، آزمایش رنومتر برش دینامیک (DSR)^۱ است. در این پژوهش، سعی شده تا با اصلاح قیر با دو ماده پلی‌اتیلن و گیلسونایت (قیر طبیعی)، به مقایسه نتایج

2- Rolling Thin Film Oven (RTFO)

1- Dynamic Shear Rheometer (DSR)

مقاومت برشی غیرمستقیم و مقادیر نرخ مقاومت کششی بیشتری هستند که منجر به حساسیت کمتر به رطوبت می شود. بنابراین، استفاده از مخلوط های اصلاح شده با گیلسونایت در مناطق مرطوب توصیه می شود. از طرفی، برای هر دو نوع سنگدانه، افزایش مقدار گیلسونایت در مخلوط های آسفالتی، مقادیر مقاومت برشی غیرمستقیم را افزایش داده اما بر مقادیر نرخ مقاومت کششی اثر نمی گذارد.

باباگلی (۲۰۱۶) با استفاده از آزمایش های رئولوژیک قیر، پژوهشی روی اثر گیلسونایت بر مشخصات مخلوط با استخوان بندی سنگدانه ای انجام داده است. نتایج نشان داد که افزودن گیلسونایت سبب کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی، کندروانی کینماتیک و شاخص نفوذ می شود.

احمدزاده و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیق خود روی خصوصیات عملکردی قیر اصلاح شده با ۶، ۸ و ۱۰ درصد گیلسونایت به این نتیجه رسیدند که گیلسونایت باعث بهبود خواص رئولوژیک و فیزیکی قیر شده و سازگاری خوبی با قیر پایه دارند. گیلسونایت به طور قابل توجهی سفتی و ویسکوزیته قیر را افزایش داده و مقاومت در برابر ترک خوردگی ناشی از خستگی و شیارشدگی قیر را بدون کاهش مقاومت حرارتی ترک خوردگی قیر بهبود بخشیده است.

النمل و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از پلی اتیلن سنگین حاصل از مواد پلاستیکی بازیافتی، مطالعاتی را انجام دادند که نتایج آن نشان داد مخلوط اصلاح شده می تواند با آستانه ترک مشخص شده توسط سازمان حمل و نقل و توسعه لوئیزیانا برای جاده های پرتراфик مطابقت داشته باشد. علاوه بر این، مخلوط اصلاح شده با پلی اتیلن سنگین عملکردی مشابه با مخلوط آسفالتی اصلاح شده با SBS داشته است.

احمدزاده و همکاران (۲۰۱۷) روی اصلاح قیر خالص با پلی اتیلن کار کرده اند. نتایج آزمایش های متداول

افزایش پیدا می کند. آن ها همچنین نتیجه گرفته اند که اضافه کردن گیلسونایت و پودر لاستیک سبب افزایش درصد بازگشت کرنش در قیر خالص می شود که مقدار این پارامتر با افزایش گیلسونایت، کمتر از قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت و پودر لاستیک به صورت توأمان است (پورحیدری و همکاران، ۲۰۲۰).

طی تحقیقی که کوک و همکاران (۲۰۱۱) انجام داده اند، ترکیب قیر و مواد افزودنی گیلسونایت و SBS مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن گیلسونایت به قیر خالص باعث افزایش پارامتر $G^*/\sin\delta$ شده، اما این مقدار نسبت به قیر اصلاح شده با SBS کمتر است. از نظر عملکرد قیر در دمای زیاد بین ۵۸ الی ۶۴ درجه سلسیوس، هر دو افزودنی باعث بهبود پارامتر $G^*/\sin\delta$ می شوند. برای دماهای بیشتر از این محدوده، بهبود چشم گیری حاصل نمی شود. نتایج نشان می دهد که استفاده همزمان گیلسونایت با SBS، ویسکوزیته قیر را در نسبت های Gilsonite/SBS در بازه ۱ تا ۵ درصد کاهش می دهد. کاهش ویسکوزیته قیر اصلاح شده، باعث افزایش کارایی مخلوط های آسفالتی در طول ساخت و کاهش انرژی جهت تراکم می شود که در یک نگاه کلی، هزینه ساخت و سازی را کاهش می دهد.

نصرکانی و همکاران (۲۰۱۷)، پژوهشی روی بهبود حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی با استفاده از گیلسونایت انجام دادند. طبق نتایج تحقیق آن ها، می توان چنین بیان کرد که با افزودن ۵ و ۱۰ درصد گیلسونایت، مقاومت کشش غیرمستقیم به ترتیب ۳۹ و ۶۶ درصد افزایش پیدا می کند. اثر افزودن گیلسونایت بر بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط های حاوی سنگدانه های سیلیسی در مقایسه با مخلوط های سنگدانه های آهکی معنی دارتر می باشد. نتایج نشان می دهد که می توان گیلسونایت را به عنوان یک عامل ضد لایه برداری (جدا شدن قیر از سنگدانه تحت سیکل دمایی) خوب برای سنگدانه های سیلیسی در نظر گرفت. مخلوط های اصلاح شده گیلسونایت دارای مقادیر

قیرهای اصلاح شده می‌توانند دارای عملکرد بسیار خوبی برای استفاده در جاده‌ها با مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی بوده و به توسعه پایدار صنعت روسازی راه کمک کنند.

صدرالدینی و همکاران (۲۰۰۲) نیز تحقیقی با هدف بهبود مشخصات قیر با استفاده از مواد پلیمری انجام دادند که با توجه به نتایج گزارش شده می‌توان چنین نتیجه گرفت که در اثر عمل اختلاط در دمای زیاد، برخی از مواد فرار و سبک قیر تبخیر می‌شوند و برخی دیگر نیز تغییر ساختار می‌دهند. در نتیجه، نقطه نرمی، نقطه شکست فراس و شاخص نفوذپذیری افزایش می‌یابد؛ اما به دلیل سخت‌تر شدن قیر، درجه نفوذ آن کاهش پیدا می‌کند. همچنین، با توجه به مقادیر درجه عملکردی قیر، قابلیت تحمل دمای زیاد قیر در اثر این اختلاط افزایش می‌یابد؛ اما تحمل دمای کم آن به دلیل افزایش سختی قیر، کاهش پیدا می‌کند. افزودن پلی‌اتیلن به قیر به دلیل افزایش سختی قیر موجب افزایش نقطه نرمی، نقطه شکست فراس و شاخص نفوذپذیری قیر می‌شود؛ اما درجه نفوذ قیر را کاهش می‌دهد که معنای آن افزایش کارایی قیر اصلاح شده در جلوگیری از شیارشدگی رویه‌های آسفالتی در جاده‌ها و خیابان‌ها است.

شیرکوند و همکاران (۲۰۱۱)، پژوهشی روی قیر اصلاح شده با پلی‌سولفید پلیمر انجام دادند. پلی‌سولفید پلیمر بکر (تازه) و بازیافتی حاصل از ضایعات، درجه نرمی قیر را افزایش داده و باعث کاهش درجه نفوذ آن می‌شود. افزایش درجه نرمی قیر باعث افزایش خاصیت کشسانی و کندروانی قیر در دماهای زیاد شده که این امر موجب بهبود مشخصات قیر و در نتیجه مخلوط آسفالتی در مناطق گرمسیر می‌شود. همچنین، نتایج حاصل از آزمایش خزش دینامیک حاکی از مقاومت زیاد مخلوط آسفالت پلیمری نسبت به آسفالت معمولی در برابر شیارشدگی است. با توجه به فرضیات اولیه، این پلیمر باعث بهبود مشخصات قیر و مخلوط آسفالتی در دماهای

قیر مانند درجه نفوذ، نقطه نرمی و شاخص الاستیک نشان می‌دهد که قیرهای اصلاح شده با پلی‌اتیلن سنگین سخت‌تر از قیر پایه هستند. نتایج مربوط به آزمایش پیرشدگی کوتاه مدت نشان می‌دهد که تأثیر مثبتی بر محدود کردن کاهش وزن در اثر پیرشدگی دارد. آزمایش ویسکوزیته چرخشی نشان داد که ویسکوزیته قیرهای اصلاح شده با بیش از ۳ درصد پلی‌اتیلن سنگین به طور قابل توجهی بیشتر از قیر پایه در دماهای آزمایش بوده است. نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیک نشان می‌دهد که اصلاح قیر با پلی‌اتیلن سنگین به طور قابل توجهی باعث افزایش G^* و کاهش مقدار $\sin\delta$ می‌شود. بنابراین، قیر اصلاح شده حساسیت دمایی کمتر و بازگشت الاستیک بیشتری نسبت به تنش برشی نشان می‌دهد. با افزایش مقدار اصلاح کننده، بهبود پارامترهای شیارشدگی افزایش می‌یابد. استفاده از این نوع قیر اصلاح شده برای مناطق با دمای زیاد، جهت بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی و سایر خرابی‌های روسازی انعطاف‌پذیر، امیدوارکننده است. با این حال، به دلیل کاهش جزئی عملکرد قیر پایه در دمای کم، در صورت استفاده از مقادیر زیاد اصلاح کننده، استفاده از پلی‌اتیلن سنگین در مناطق سردسیر باید حدود ۳ درصد محدود شود تا از ترک خوردگی حرارتی جلوگیری به عمل آید. فرناندز و همکاران (۲۰۱۷) پژوهشی را انجام داده‌اند که در آن از سه نوع افزودنی پلی‌اتیلن سنگین، پودر لاستیک و SBS استفاده شده است. در این مطالعه، به این نتیجه رسیده‌اند که استفاده از ۱۵ درصد از مواد افزودنی به طور قابل توجهی مشخصات قیر مانند نقطه نرمی، انعطاف‌پذیری و ویسکوزیته را بهبود می‌بخشد. قیرهای اصلاح شده با پلی‌اتیلن سنگین و SBS دارای فاز کم و مقادیر مدول سختی زیاد در دماهای متوسط و همچنین مقادیر خزش غیرقابل بازگشت کم است که ممکن است نشان‌دهنده مقاومت زیاد در برابر ترک خوردگی خستگی و شیارشدگی باشد. بنابراین،

۳. برنامه آزمایشگاهی

در این بخش، به شرحی از ویژگی‌های مصالح و روش آزمایش‌های صورت گرفته در تحقیق حاضر پرداخته شده است.

۳-۱. قیر و مواد افزودنی

مواد و مصالح مصرفی در تحقیق حاضر را می‌توان به دو دسته قیر پایه و مواد افزودنی تقسیم‌بندی کرد. قیر پایه، قیر ۸۵/۱۰۰ بوده که مشخصات آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

مواد افزودنی نیز شامل پلی اتیلن سنگین (HDPE)، به عنوان یک ماده خام پایه نفتی با فرآیند تولید نسبتاً پرهزینه و البته پیچیده و همچنین گیلسونایت، به عنوان یک ماده معدنی نسبتاً ارزان و دارای فرآیند تولید ساده پس از استخراج می‌شوند.

گیلسونایت یک هیدروکربن طبیعی است که مانند قیرهای نفتی در حلال‌های آروماتیک یونیتایت یا آلفاتیک حل شده و به علت داشتن مشخصات مشابه، به عنوان قیر با نقطه نرمی زیاد، از آن نام برده می‌شود که شکل ظاهری آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

زیاد می‌شود و با افزایش دما، مقاومت در برابر شیارشدگی در نمونه‌های پلیمری افزایش می‌یابد. با مقایسه نتایج نمونه‌های حاوی پلی سولفید پلیمر بکر (تازه) و بازیافتی در رویه‌های آسفالتی، مشخص می‌شود که نمونه حاوی پلی سولفید پلیمر بازیافتی، عملکرد بهتری داشته و این امر علاوه بر صرفه اقتصادی، با ایجاد کاربرد مناسبی برای آن، باعث جلوگیری از آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از سوزاندن احتمالی ضایعات صنایع پتروشیمی نیز می‌شود.

یکی از اهداف استفاده از افزودنی‌های گیلسونایت و پلی اتیلن سنگین در تحقیق حاضر، تفاوت در خواستگاه تهیه آنها است. گیلسونایت ماده‌ای طبیعی است که با اندکی پردازش، می‌توان آن را به عنوان افزودنی قیر مورد استفاده قرار داد. اما پلی اتیلن سنگین یک محصول پالایشگاهی با فرآیند تولید نسبتاً پیچیده و پرهزینه است. مقایسه این دو افزودنی با لحاظ مقادیر پیش فرض در تحقیقات گذشته و برای شرایط دمای زیاد و تحت شرایط پیرشدگی، می‌تواند امکان مقایسه توانایی آنها در کنترل شیارشدگی‌ها در دماهای زیاد در حالت‌های پیرنشده و پیرشده را فراهم کند.

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های قیر ۸۵/۱۰۰ مصرفی در پژوهش حاضر

ویژگی (واحد)	استاندارد روش آزمایش	محدوده مجاز	مقدار
وزن مخصوص قیر (gr/cm^3)	ASTM D70	۱/۰۱-۱/۰۵	۱/۰۲
درجه نفوذ قیر	ASTM D5	۸۵/۱۰۰	۹۱
نقطه نرمی ($^{\circ}\text{C}$)	ASTM D36	۴۵-۵۲	۴۶
انگمی قیر (cm)	ASTM D113	حداقل ۱۰۰	۱۰۷
درجه اشتعال قیر ($^{\circ}\text{C}$)	ASTM D92	حداقل ۲۲۵	۲۳۱
افت وزنی قیر در اثر حرارت (درصد)	ASTM D6	حداکثر ۰/۵	۰/۴
حلالیت در تری کلرواتیلن	ASTM D4	حداقل ۹۹/۵	۹۹/۶



شکل ۱. گیلسونایت مصرفی در پژوهش حاضر

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی گیلسونایت (قیر طبیعی) مصرفی در پژوهش حاضر

مشخصات فیزیکی		
عنصر موجود	مقدار ماده	روش آزمایش
کربن (درصد)	۷۴	ASTM D5291
هیدروژن (درصد)	۷/۱	ASTM D5291
نیتروژن (درصد)	۰/۶۷	ASTM D5291
اکسیژن (درصد)	۳/۱	ASTM D5291
سولفور (درصد)	۴	LEEO Analyzer
مشخصات شیمیایی		
ویژگی (واحد)	حدود مقادیر	روش آزمایش
میزان خاکستر (درصد)	۱۵-۱۲	ASTM D3174
میزان رطوبت (درصد)	۵>	ASTM D3173
میزان کربن (درصد)	۲۹	ASTM D3172
حلالیت در سولفور کربن (درصد)	۸۱	ASTM D4
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سلسیوس (gr/cm^3)	۱/۱۱	ASTM D3289
رنگ در حالت کلونخه (-)	سیاه	-
رنگ در حالت پودر (-)	قهوه‌ای تیره	-
نقطه نرمی ($^{\circ}\text{C}$)	۲۲۱	ASTM D36

۴، ۸ و ۱۲ درصد، این مقادیر مناسب تر دانسته شدند (عامری و همکاران، ۲۰۱۱؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۸).

پلی اتیلن سنگین مصرفی در این پژوهش از نوع گرید HB0035 تولیدی در پتروشیمی بندر امام است که نمونه-ای از آن در شکل ۲ نشان داده شده است. دلیل استفاده از این نوع پلی اتیلن، مقاومت خوب در برابر ترکزایی ناشی از تنش های محیطی، سفتی خوب، وزن مولکولی زیاد، مقاومت شیمیایی خوب و مقاومت زیاد در برابر ضربه است که در این صورت، انتظار می رود عملکرد خوبی در برابر تغییر شکل های دائمی مانند شیارشدگی برای قیر پایه را فراهم نماید.

مشخصات فیزیکی، مکانیکی، حرارتی و نوری این پلی اتیلن در جدول ۳ بیان شده است. در تحقیق حاضر، با توجه به نتایج تحقیقات پیشین، مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد برای تهیه نمونه های اصلاح شده انتخاب گردیدند (عامری و همکاران، ۲۰۲۱؛ حامدی و همکاران، ۲۰۲۱).

این نوع قیر در ایران و به خصوص در غرب و جنوب غرب به وفور یافت می شود که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوتی با یکدیگر دارند. مشخصات فیزیکی و شیمیایی گیلسونایت مصرفی در تحقیق حاضر در جدول ۲ بیان شده است. این نوع قیر طبیعی از دریاچه قیر ایلام تهیه شده است.

یک عامل مهم در انتخاب گیلسونایت، میزان حلالیت آن در کرین دی سولفید و یا بنزین است. به طوری که هرچه میزان حلالیت کمتر باشد، اختلاط این ماده با قیر بهتر انجام می شود (قطب و همکاران، ۲۰۱۷).

با توجه به نتایج تحقیقات پیشین که در آنها مقادیر انتخابی برای اصلاح قیر پایه به ترتیب ۴، ۸ و ۱۲ درصد بودند، در تحقیق حاضر نیز این مقادیر ملاک قرار گرفتند. هرچند در دیگر پژوهش ها، به مقادیر دیگری هم اشاره شده است اما با توجه به تحلیل های ارائه شده برای مقادیر



شکل ۲. پلی اتیلن سنگین مصرفی در پژوهش حاضر

جدول ۳. مشخصات پلی اتیلن سنگین (HDPE) مصرفی در پژوهش حاضر

مشخصات فیزیکی		
ویژگی (واحد)	حدود مقادیر	روش آزمایش
مقدار خاکستر (درصد)	۰/۰۶	ASTM D1063
وزن مخصوص (g/cm ³)	۰/۹۵۹	ASTM D1505
MFI (g/10min)	۰/۳۵	ASTM D1238
مواد فرار (درصد)	۰/۰۵	ASTM D1960
مشخصات مکانیکی		
ESCR (h)	۱۵	ASTM D1693
مقاومت در برابر ضربه (J/m)	۲۴۵	ASTM D256
میزان کشش تا زمان شکست (درصد)	۹۰۰	ASTM D638
مقاومت کششی تا زمان شکست (MPa)	۲۸/۴۳	ASTM D638
مشخصات حرارتی و نوری		
نقطه ذوب (°C)	۱۳۰	ASTM 2117
نقطه نرمی (°C)	۱۲۶	ASTM 1525
شاخص زرد	-۵	ASTM D1925

۲-۳. آزمایش رئومتر برشی دینامیک

آزمایش رئومتر برشی دینامیک جهت اندازه‌گیری مشخصات تغییرشکل و جریان سیالات غیرنیوتنی و جریان پلاستیکی جامدات (نظیر مدول برشی مرکب G^*) و زاویه فاز (δ) در دماهای متوسط تا زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

این دو پارامتر در تعیین خصوصیات و رفتار الاستیک و ویسکوز قیرها کاربرد دارند و مدول برشی مرکب G^* عبارت است از مقاومت یک ماده در برابر تغییرشکل ناشی از اعمال یک تنش برشی سینوسی. این پارامتر شامل دو بخش تغییرشکل الاستیک قابل بازگشت و تغییرشکل ویسکوز (غیرقابل بازگشت) می‌باشد.

زاویه فاز (δ) نیز نشان‌دهنده مقادیر نسبی اجزای الاستیک و ویسکوز است. مقادیر G^* و δ قیر شدیداً وابسته به دمای آزمایش و فرکانس بارگذاری می‌باشند. در دماهای زیاد، قیر همانند سیالات ویسکوز رفتار نموده و قابلیت بازگشت به حالت اولیه را ندارد.

۴. نتایج و بحث

در این بخش، به بررسی پارامترهای مؤثر بر رفتار شیارشدگی قشر قیری اصلاح‌شده با افزودنی‌های تحقیق حاضر پرداخته شده است.

۴-۱. نتایج اثر دما و مقدار افزودنی روی پارامتر

شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$)

در این بخش، به منظور بررسی عملکرد قیر پایه و مقایسه آن با نمونه‌های قیر اصلاح‌شده در دماهای زیاد در شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت و پیرنشده، نتایج آزمایش DSR بررسی شده است. دو پارامتر مدول برشی G^* که نشان‌دهنده مقاومت نمونه در برابر تغییرشکل ناشی از اعمال یک تنش برشی سینوسی در دو بخش تغییرشکل الاستیک و تغییرشکل ویسکوز است و پارامتر اختلاف

می ماند، اما نسبت به دماهای کمتر، مقدار کمتری نتیجه داده است.

به منظور بررسی اثر دمای بیشتر روی رفتار شیارشدگی قیر خالص و اصلاح شده، آزمایش رثومتر برشی دینامیک در دمای ۷۶ درجه سلسیوس نیز انجام گرفت. با توجه به نتایج حاصل که در شکل ۴ نشان داده شده است، قیر شاهد دارای کمترین مقدار پارامتر $G^*/\sin\delta$ است که به نسبت دماهای دیگر نیز کمترین مقدار را دارا می باشد.

با افزودن ۴ درصد گیلسونایت، پارامتر شیارشدگی افزایش پیدا کرده و همانند دماهای کمتر، این روند افزایشی با افزودن ۸ و ۱۲ درصد گیلسونایت ادامه پیدا می کند، به طوری که در تمام درصدهای استفاده شده، مقدار پارامتر شیارشدگی کمتری نتیجه را داده است.

پس از اجرای روسازی، مخلوط آسفالتی و مخصوصاً قیر، توانایی باربری خود را از دست می دهد؛ به عبارتی، تحت بارگذاری مکرر دچار پیرشدگی می شود. بنابراین، در بررسی های پژوهشی در رابطه با قیر، محققان از آزمایش پیرشدگی کوتاه مدت و بلندمدت استفاده می کنند تا پیرشدگی واقعی را در تحقیقات خود بکنجانند. در این پژوهش نیز جهت بررسی تأثیر پیرشدگی روی پارامتر شیارشدگی، نمونه های بررسی شده، با استفاده از آزمایش RTFO، پیر شده و سپس آزمایش DSR انجام شد.

با توجه به شکل ۴ که حاصل نتایج آزمایش DSR نمونه های شاهد و اصلاح شده بعد از پیرشدگی است، می توان چنین بیان کرد که در دمای ۵۸ درجه سلسیوس، قیر شاهد نسبت به دیگر نمونه ها، حداقل مقدار را به خود اختصاص داده و با افزودن ۴ درصد گیلسونایت، پارامتر $G^*/\sin\delta$ از ۶/۱۵ به ۱۳/۳ رسیده است.

پارامتر $G^*/\sin\delta$ با افزودن ۸ و ۱۲ درصد گیلسونایت به قیر خالص (نمونه شاهد) همچنان روند افزایشی خود را حفظ کرده است. اما با تغییر نوع افزودنی، و افزودن ۲ درصد HDPE، پارامتر شیارشدگی

فاز (δ) که معرف مقادیر نسبی اجزای الاستیک و ویسکوز است، مورد بررسی قرار گرفتند.

کاهش زاویه فاز اختلاف (δ) نشان دهنده افزایش بخش الاستیسیته قیر است و افزایش مدول مرکب برشی (G^*) نشان از مقاومت بیشتر قیر در برابر تغییر شکل های برشی دارد (دامیار و همکاران، ۲۰۲۱).

در رابطه با نتایج پژوهش حاضر نیز می توان چنین بیان کرد که افزودنی های مصرفی در پژوهش حاضر نیز شرایط بهتری برای استفاده از آنها در دماهای زیاد ایجاد می کنند و دمای عملکرد قیر را افزایش می دهند.

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش رثومتر برش دینامیک، قیر شاهد و اصلاح شده قبل از پیرشدگی در دماهای مختلف که در شکل ۳ نشان داده شده است، می توان بیان کرد که در دمای ۵۸ درجه سلسیوس، کمترین مقدار پارامتر $G^*/\sin\delta$ مربوط به قیر شاهد است. با افزودن ۴ درصد گیلسونایت، این پارامتر افزایش پیدا کرده که این روند افزایش با افزودن گیلسونایت ادامه پیدا کرده است.

با تغییر ماده افزودنی و افزودن پلی اتیلن سنگین به قیر خالص، پارامتر $G^*/\sin\delta$ افزایش پیدا کرده که از بیشترین مقدار قیر اصلاح شده با گیلسونایت هم بیشتر می باشد. با افزودن ۴ درصد پلی اتیلن سنگین، این پارامتر به بیشترین مقدار خود رسیده است. اما با افزودن ۶ درصد از این ماده، پارامتر $G^*/\sin\delta$ کاهش پیدا کرده است.

با انجام آزمایش در دمای ۶۴ درجه سلسیوس، روند تغییرات پارامتر $G^*/\sin\delta$ همانند روند تغییرات در دمای ۵۸ درجه سلسیوس است، اما مقدار پارامتر $G^*/\sin\delta$ در تمام درصدها و نوع افزودنی ها، از مقادیر در دمای ۵۸ درجه سلسیوس کمتر است. با افزایش مجدد دما و رسیدن به دمای ۷۰ درجه سلسیوس، مقدار پارامتر $G^*/\sin\delta$ قیر شاهد، کمترین مقدار را داشته و با افزودن گیلسونایت به قیر شاهد، این پارامتر افزایش پیدا کرده که این روند افزایشی، با افزایش مقدار گیلسونایت ثابت

برای بررسی تأثیر پیرشدگی روی پارامتر شیارشدگی، نمونه‌های بررسی‌شده در بالا، با استفاده از آزمایش RTFO، قیر پیرشده تحت آزمایش DSR نیز قرار گرفت. افزودن ۲ درصد پلی‌اتیلن سنگین، کمترین مقدار شیارشدگی را به خود اختصاص داده و با افزودن ۴ درصد از این ماده، این پارامتر از ۳/۳۴ به ۸/۹۷ رسیده است. همچنین، با افزودن ۶ درصد پلی‌اتیلن سنگین، شیارشدگی بهبود پیدا کرده و در برابر تغییر شکل‌های برشی مقاومت بیشتری از خود نشان داده است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، افزایش پلی‌اتیلن از ۴ درصد به ۶ درصد، موجب تأثیرگذاری بیشتر بخش روغنی مخلوط روی رفتار شیارشدگی قیر اصلاح‌شده گردیده و در نتیجه، پارامتر شیارشدگی $G^*/\sin\delta$ در حالت قیر پیرنشده، کاهش محسوسی نسبت به نمونه‌های دیگر داشته است.

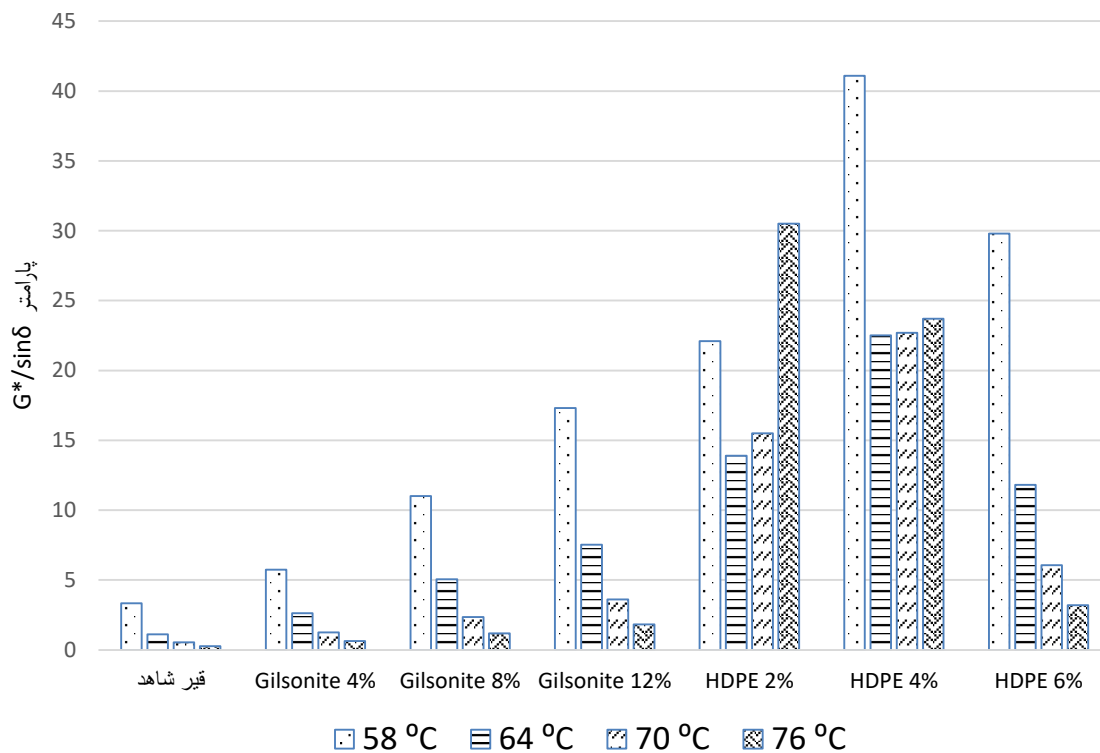
اما شکل ۴ نشان می‌دهد که با انجام فرآیند پیرشدگی و کاهش سهم بخش روغنی مخلوط، اثرگذاری آن نیز کاهش یافته و بخش رزینی یا آسفالتیک باقی‌مانده در مخلوط اصلاح‌شده، تأثیر بسیار قابل توجهی روی رفتار شیارشدگی آن گذاشته است و توانسته آن را بسیار ارتقا دهد. بنابراین، طبق شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که گیلسونایت و پلی‌اتیلن سنگین رفتار شیارشدگی قیرهای پیرشده را ارتقا داده‌اند.

بعد از پیرشدگی، نسبت به قیر شاهد از ۶/۱۵ به ۲۱/۱ رسیده است. اما با افزودن ۴ درصد پلی‌اتیلن سنگین، پارامتر $G^*/\sin\delta$ به ۳۷/۶ رسیده و با افزودن ۶ درصد از این ماده به قیر خالص، پارامتر شیارشدگی افزایش بسیار چشم‌گیری داشته و به مقدار ۱۷۹ واحد رسیده است که بیشترین مقدار بین تمام مقادیر پارامتر شیارشدگی بعد از پیرشدگی نمونه‌ها است.

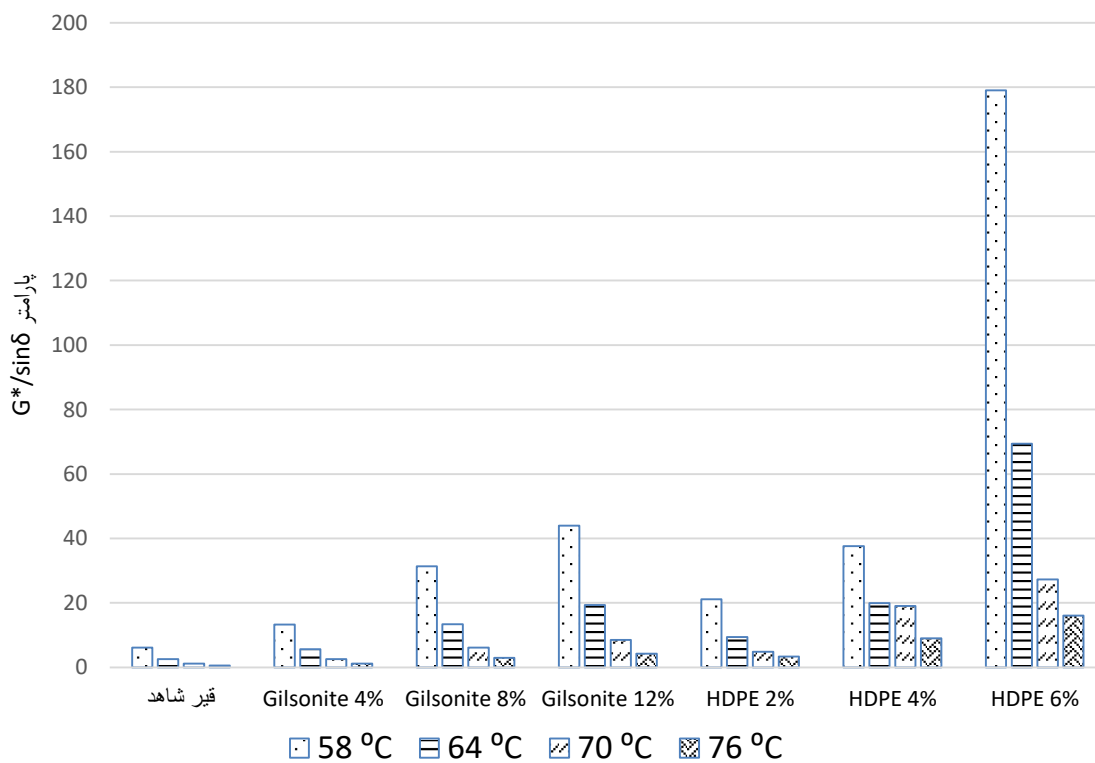
با افزایش دما و انجام آزمایش در دماهای ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس، روند تغییرات پارامتر شیارشدگی مشابه تغییرات در دمای ۵۸ درجه سلسیوس است. با این تفاوت که مقدار پارامتر شیارشدگی در هر دما نسبت به دمای کمتر، کمتر می‌باشد. اما با افزایش دما و رسیدن به ۷۶ درجه سلسیوس، روند تغییرات پارامتر $G^*/\sin\delta$ با افزودن گیلسونایت همانند دماهای کمتر است.

با تغییر نوع افزودنی، تغییرات پارامتر شیارشدگی با شرایط قبل متفاوت می‌باشد. بدین معنی که با افزودن ۲ درصد پلی‌اتیلن سنگین، با مقدار ۳۰/۵ بیشترین مقدار را نتیجه داده و با افزودن ۴ درصد از این ماده، پارامتر شیارشدگی کاهش پیدا کرده و به مقدار ۲۳/۷ رسیده است. همچنین، با افزودن ۶ درصد پلی‌اتیلن سنگین، پارامتر $G^*/\sin\delta$ با مقدار ۳/۱۹ کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. اما با این وصف، از مقادیر پارامتر شیارشدگی افزودنی گیلسونایت، بیشتر نتیجه داده است.

بررسی رفتار شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده با پلی‌اتیلن سنگین و گیلسونایت در دماهای زیاد



شکل ۳. نتایج آزمایش رثومتر برش دینامیک قیرهای شاهد و اصلاح‌شده قبل از پیرشدگی در دماهای مختلف



شکل ۴. نتایج آزمایش رثومتر برش دینامیک قیرهای شاهد و اصلاح‌شده بعد از پیرشدگی در دماهای مختلف

داده شده است. برازش داده‌ها روی توابع مختلف نشان داد که فرم تابع توانی ($\alpha \cdot x^\beta$)، نسبت به فرم تابع نمایی ($\alpha \cdot e^{\beta \cdot x}$) توانسته برازش بهتری داشته و نیکویی برازش (R^2) بهتری را نتیجه دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده در شکل ۵، بین پارامتر شیارشده‌گی و دما بعد از پیرشدگی کوتاه‌مدت، قیر خالص همبستگی بیشتری نسبت به قبل از پیرشدگی داشته و در حدود ۱/۳ درصد بوده، اما در هر دو حالت میزان همبستگی بسیار زیاد است.

در شکل ۶، با افزودن ۴ درصد گیلسونایت، میزان همبستگی دما با پارامتر شیارشده‌گی قبل و بعد از پیرشدگی بسیار زیاد بوده و نزدیک به یک می‌باشد که حاکی از نیکویی برازش بسیار زیاد می‌باشد. این نتیجه برای نمونه حاوی ۸ درصد گیلسونایت نیز در شکل ۷ قابل مشاهده است.

طبق نمودار نشان داده شده در شکل ۸، می‌توان چنین بیان کرد که میزان همبستگی بین دما و $G^*/\sin\delta$ قیر اصلاح شده با ۱۲ درصد گیلسونایت نیز بسیار زیاد است. اما تفاوت عمده این نمونه با دو نمونه اصلاح شده با گیلسونایت قبلی در آن است که همبستگی نمونه قیر اولیه بیشتر از همبستگی نمونه قیر پیر شده است، هرچند این اختلاف در حد ۰/۰۳ درصد است. نتایج همبستگی بین شیارشده‌گی و دما نیز بسیار قوی است.

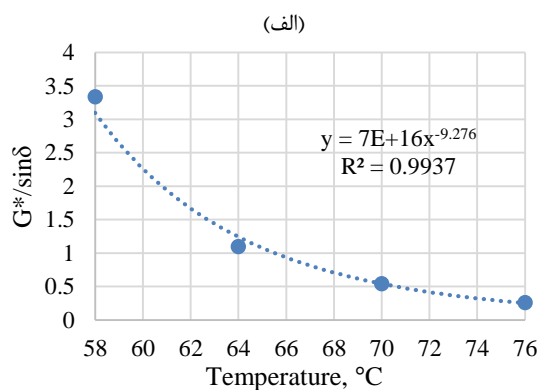
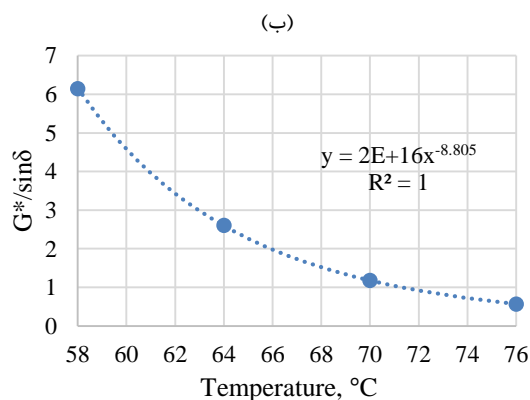
قطعاً یکی از مؤلفه‌های انتخاب افزودنی‌های اصلاح کننده به منظور ارتقای رفتار عملکردی قیر و آسفالت، هزینه‌ها و مباحث اقتصادی آنها است. اما با توجه به تغییرات قیمتی این مصالح (خصوصاً مصالح پلیمری اولیه حاصل از پالایشگاه‌ها و پتروپالایشگاه‌ها)، شاید نتوان مقایسه قابل استنادی در سطح تحقیقات پژوهشی با دیدگاه فنی ارائه نمود.

هرچند به طور کلی می‌توان این گونه استدلال کرد که گیلسونایت به دلایلی از جمله فرآیند پردازش کمتر و تا حدودی ارزان تر بودن، مزیت نسبی در مقابل مواد پلیمری مانند HDPE (خصوصاً از نوع تازه و اولیه) دارد.

از نظر عملکردی نیز طبق مقادیر پارامتر شیارشده‌گی ارائه شده در شکل ۴، قیر اصلاح شده با ۱۲ درصد گیلسونایت، عملکرد بهتری حتی نسبت به نمونه حاوی ۴ درصد پلی اتیلن در حالت پیر شده داشته است؛ هرچند برای نمونه‌های پیر نشده (طبق شکل ۳)، نمونه‌های حاوی پلی اتیلن سنگین (حتی با ۲ درصد افزودن) عملکرد شیارشده‌گی بهتری نسبت به نمونه‌های حاوی گیلسونایت از خود نشان داده‌اند.

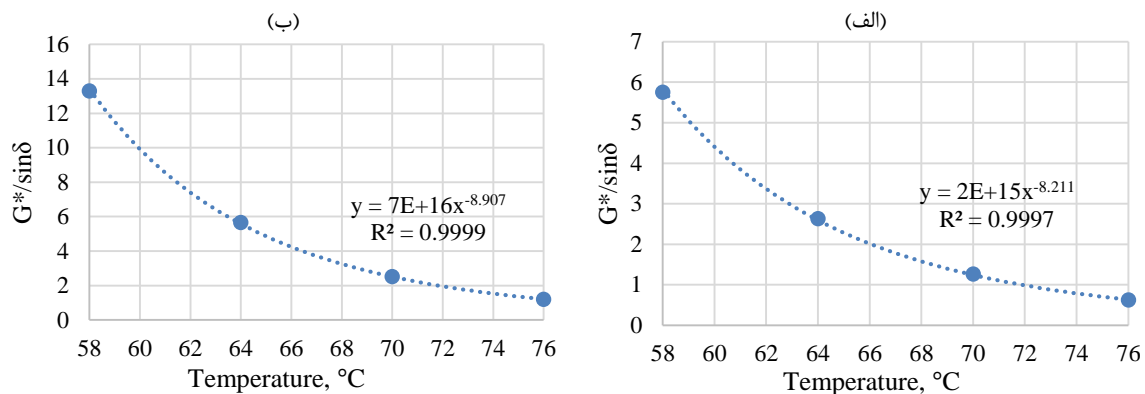
۴-۲. نتایج همبستگی پارامتر شیارشده‌گی با دما

در شکل‌های ۵ تا ۱۱ به ترتیب میزان همبستگی پارامتر شیارشده‌گی $G^*/\sin\delta$ و دمای نمونه‌های مختلف نشان

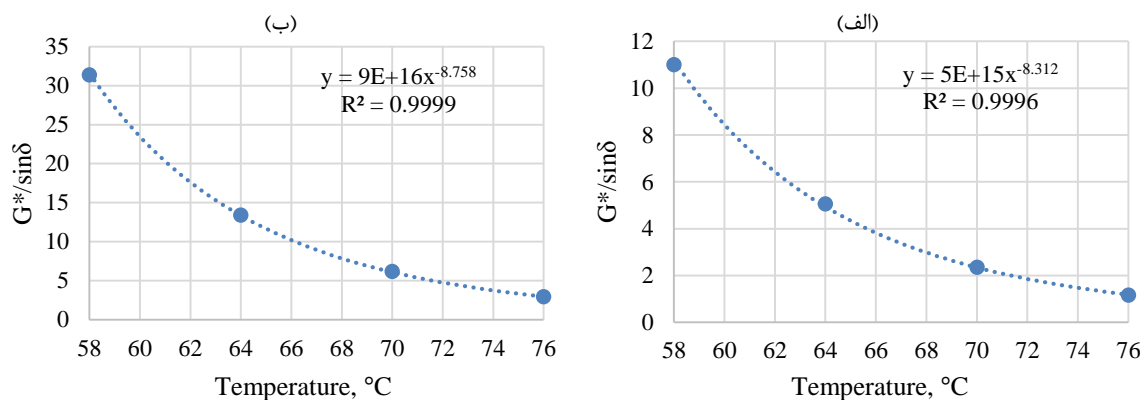


شکل ۵. همبستگی پارامتر $G^*/\sin\delta$ با دما برای قیر شاهد: الف) قیر اولیه و ب) قیر پیر شده

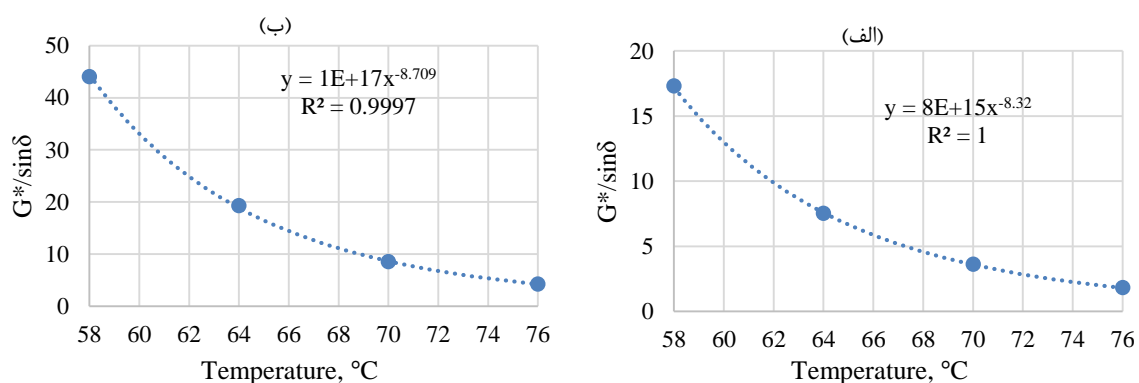
بررسی رفتار شیارشدگی قیرهای اصلاح شده با پلی اتیلن سنگین و گیلسونایت در دماهای زیاد



شکل ۶. همبستگی پارامتر $G^*/\sin\delta$ با دما برای قیر اصلاح شده با ۴ درصد گیلسونایت: الف) قیر اولیه و ب) قیر پیر شده



شکل ۷. همبستگی پارامتر $G^*/\sin\delta$ با دما برای قیر اصلاح شده با ۸ درصد گیلسونایت: الف) قیر اولیه و ب) قیر پیر شده

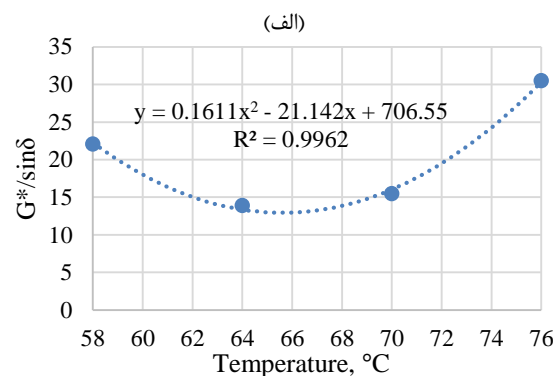
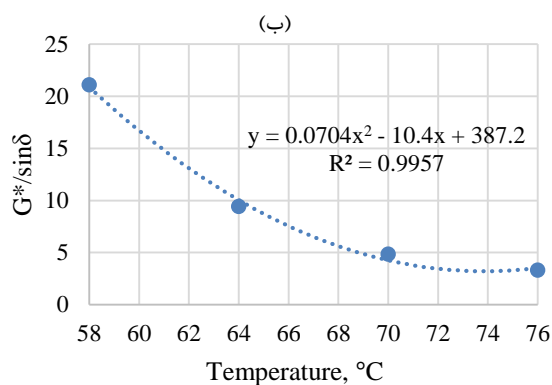


شکل ۸. همبستگی پارامتر $G^*/\sin\delta$ با دما برای قیر اصلاح شده با ۱۲ درصد گیلسونایت: الف) قیر اولیه و ب) قیر پیر شده

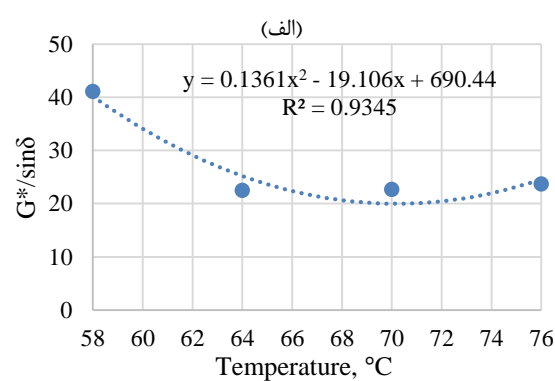
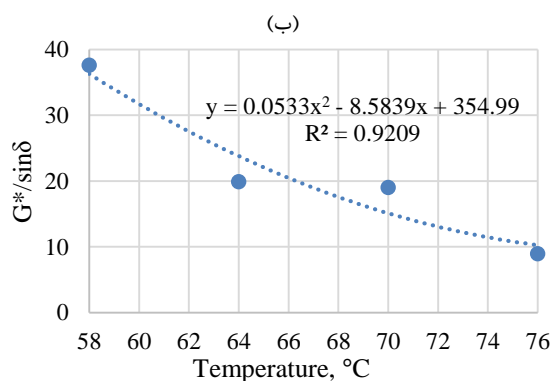
حاوی ۴ درصد پلی اتیلن دارای اختلاف قابل توجهی نسبت به دیگر نمونه‌ها است، اما در مقابل، همبستگی بین دما و پارامتر شیارشدگی بسیار کمتر است؛ به طوری که مقدار همبستگی تابع رگرسیون چندجمله‌ای درجه دو برای نمونه پیرشده به حدود ۹۲ درصد کاهش یافته است. در نمودار شکل ۱۱ نیز هرچند همبستگی بین دما و پارامتر شیارشدگی برای نمونه حاوی ۶ درصد نسبت به نمونه ۴ درصد پلی اتیلن سنگین افزایش یافته (حدود ۵ درصد) اما نسبت به نمونه ۲ درصد، اختلاف همبستگی برای نمونه‌های پیرنشده و پیرشده بسیار ناچیز است.

با تغییر نوع افزودنی و افزودن پلی اتیلن سنگین، همبستگی بین پارامتر شیارشدگی $G^*/\sin\delta$ و دما با استفاده از فرم‌های تابع نمایی و توانی نسبتاً کم بود؛ اما با تغییر فرم تابع به رگرسیون چندجمله‌ای درجه دو، نیکویی برازش بسیار بالایی حاصل شد.

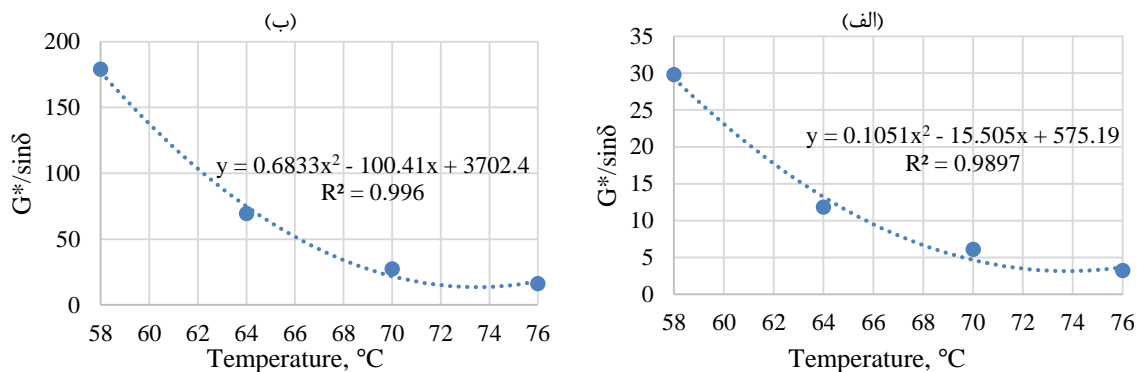
برای قیر اصلاح شده حاوی ۲ درصد پلی اتیلن، طبق شکل ۹، میزان همبستگی بین دما و پارامتر شیارشدگی قبل و بعد از پیرشدگی بسیار زیاد است و در رده بالای همگرایی قرار می‌گیرد. نتیجه همبستگی برای نمونه حاوی ۴ درصد پلی اتیلن سنگین در شکل ۱۰ ارائه شده است. هرچند طبق شکل ۳، پارامتر شیارشدگی نمونه



شکل ۹. همبستگی پارامتر $G^*/\sin\delta$ با دما برای قیر اصلاح شده با ۲ درصد پلی اتیلن: الف) قیر اولیه و ب) قیر پیرشده



شکل ۱۰. همبستگی پارامتر $G^*/\sin\delta$ با دما برای قیر اصلاح شده با ۴ درصد پلی اتیلن: الف) قیر اولیه و ب) قیر پیرشده



شکل ۱۱. همبستگی پارامتر $G^*/\sin\delta$ با دما برای قیر اصلاح شده با ۶ درصد پلی اتیلن: الف) قیر اولیه و ب) قیر پیر شده

۴-۳. ارزیابی اقتصادی

برای برآورد هزینه ساخت نمونه‌های اصلاح شده، قیمت مصالح افزودنی و قیر از کارخانه‌ها و مراجع ذی-ربط استعلام شد که برای هر کیلو پلی اتیلن سنگین، ۴۷ هزار تومان و برای هر کیلو گیلسونایت مناسب مخلوط آسفالتی، ۱۲ هزار تومان تعیین گردید. با توجه به این که درصد وزنی افزودنی‌ها بر مبنای جایگزینی با قیر خالص تعیین می‌شود. ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که هزینه قیر جایگزین شده باید از هزینه نهایی برای هر نمونه به صورت جداگانه کسر گردد؛ به عبارتی، برای نمونه حاوی ۲ درصد پلی اتیلن، هزینه ۲ درصد پلی اتیلن (بر حسب وزن قیر) افزوده و هزینه قیر خالص جایگزین-شده معادل، کسر می‌گردد.

قیمت هر کیلو قیر خالص (فلّه در بورس) نیز ۱۳ هزار تومان لحاظ شده است و قیمت هر تن آسفالت توپکا (۱۹-۰) درب کارخانه، یک میلیون و سیصد هزار تومان تعیین گردید. مقایسه انواع مخلوط‌های اصلاح شده از نظر درصد تغییر در شاخص شیارشدگی (برای حالت‌های قبل و بعد از شیارشدگی) و همچنین درصد تغییر در قیمت تمام شده مخلوط‌های آسفالتی در شکل ۱۲ ارائه شده است.

یکی از راهکارهای مقایسه مطلوبیت استفاده از انواع افزودنی‌ها (با درصد‌های مختلف) در نمونه آسفالت‌های اصلاح شده گوناگون، ارزیابی اقتصادی می‌باشد. برای این مقایسه لازم است تا معیارهایی مانند میزان تغییرات ضخامت و یا عدد سازه‌ای (SN)^۱ لایه‌های روسازی اصلاح شده را مبنای قرار داد. با این حال، در برخی طرح‌ها لازم است تا مقادیر معینی از مقاومت، دوام یا عملکرد توسط لایه‌های روسازی تأمین شود که در این صورت، با فرض یک ضخامت ثابت برای همه نمونه‌ها، ارزیابی-های هزینه‌ای را می‌توان بر مبنای آن معیار عملکردی انجام داد.

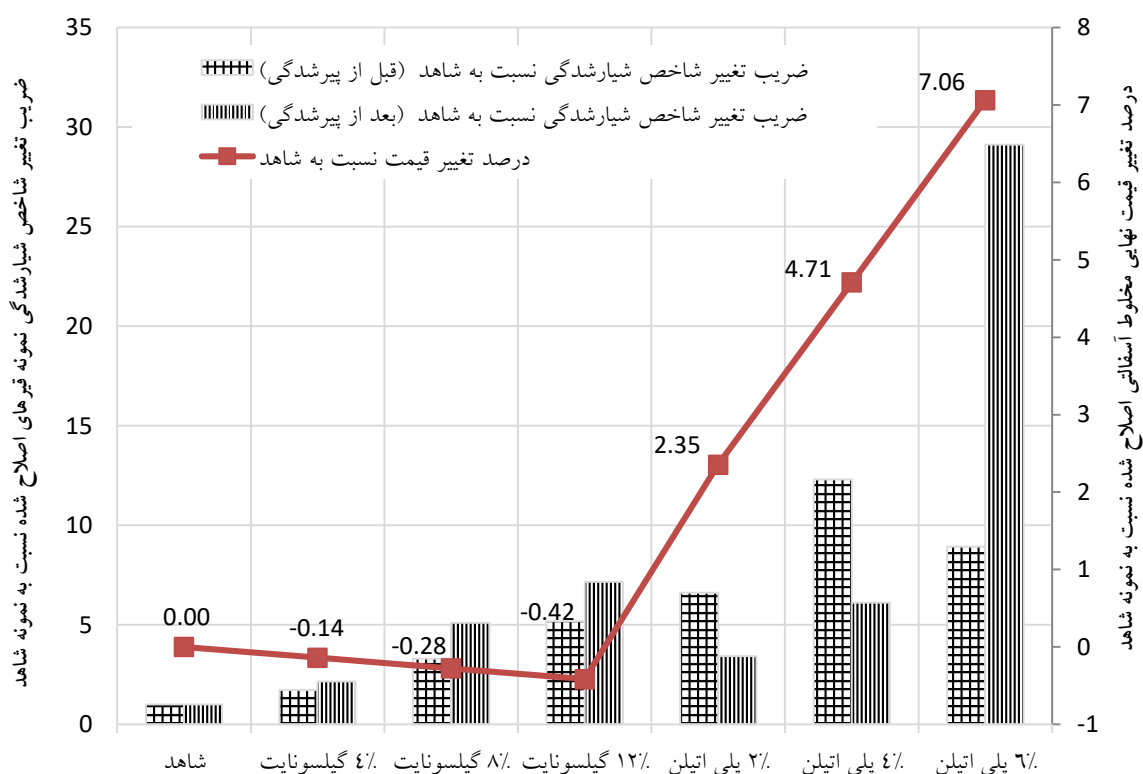
در تحقیق حاضر، به دلیل اهمیت نقش ارتقای عملکرد، مقایسه هزینه‌ای بر مبنای تغییرات شاخص شیارشدگی قیر صورت پذیرفته است. به عبارتی، بهترین گزینه، آن مخلوطی است که در ضمن دارا بودن کمترین هزینه، بالاترین کارایی شیارشدگی قیر را نیز تأمین کند و در صورتی که برای یک پروژه معین، کارایی شیارشدگی نمونه‌های قیر ملاک تصمیم قرار گیرد، می-توان ترتیب گزینه‌ها را بر اساس هزینه‌های ساخت آنها مشخص کرد.

^۱ Structural Number (SN)

شیارشدهگی قیر برای نمونه‌های بعد از پیرشدهگی را از ۲/۱۶ تا ۷/۱۵ برابر افزایش داده است.

در مقابل، برخلاف گیلسونایت، قیمت زیاد پلی‌اتیلن سنگین موجب افزایش هزینه‌های تولید آسفالت اصلاح‌شده گردیده است. به طوری که با افزایش میزان پلی‌اتیلن از ۲ تا ۶ درصد وزنی قیر، هزینه‌های تولید از ۲/۳۵ تا ۷/۰۶ درصد افزایش یافته است. اما ضریب تغییرات شاخص شیارشدهگی نمونه‌ها قبل از پیرشدهگی روند یکنواختی نداشته و این ضریب برای ۲ درصد پلی‌اتیلن معادل ۶/۶۲ برابر، برای ۴ درصد پلی‌اتیلن معادل ۱۲/۳۱ برابر و برای ۶ درصد پلی‌اتیلن معادل ۸/۹۲ برابر نمونه‌های شاهد بوده است. بنابراین، هرچند هزینه‌ها برای نمونه حاوی ۴ درصد پلی‌اتیلن ۴/۷۱ درصد افزایش داشته است اما بهبود عملکرد شیارشدهگی قیر تا ۱۲/۳۱ برابر افزایش یافته است.

همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، افزودن گیلسونایت به دلیل قیمت پایین‌تر نسبت به قیر نفتی خالص، موجب کاهش هزینه‌های تولید مخلوط آسفالتی شده است و از طرفی نیز، با افزایش درصد گیلسونایت از ۴ تا ۱۲ درصد وزنی قیر، شاخص شیارشدهگی قیر برای نمونه‌های قبل از پیرشدهگی از ۱/۷۲ تا ۵/۱۸ برابر بهبود یافته است. بنابراین می‌توان اینگونه تفسیر کرد که با افزایش درصد گیلسونایت جایگزین‌شده، نه تنها هزینه تولید کاهش یافته است بلکه برای مقادیر تا ۱۲ درصد جایگزینی، عملکرد شیارشدهگی قیر نیز بهبود یافته است. بررسی مقادیر نمونه‌های اصلاح‌شده پس از پیرشدهگی، نشان می‌دهد که این ماده توانسته تأثیر بسزایی در ارتقای عملکرد شیارشدهگی داشته باشد. به عبارتی، افزایش درصد گیلسونایت طبق مقادیر فرض‌شده، شاخص



شکل ۱۲. مقایسه درصد تغییر قیمت نهایی و ضریب تغییر شاخص شیارشدهگی قیرهای اصلاح‌شده نسبت به نمونه شاهد

۵. نتیجه گیری

افزودنی پلی اتیلن سنگین، حتی در درصدهای کم نیز از عملکرد شیارشدگی بهتری نسبت به افزودنی گیلسونایت داشته است.

۴- با اعمال پیرشدگی روی تمام نمونه‌ها و انجام آزمایش رئومتر برش دینامیک، بیشترین مقدار $G^*/\sin\delta$ در تمام دماها مربوط به قیر اصلاح شده با ۶ درصد پلی اتیلن سنگین و کمترین مقدار در تمام دماها، به قیر شاهد مربوط می‌شود که کمترین مقدار آن برابر ۰/۵۷ در دمای ۷۶ درجه سلسیوس می‌باشد.

۵- با انجام فرآیند پیرشدگی و کاهش سهم بخش روغنی مخلوط، اثرگذاری آن نیز کاهش یافته و بخش رزینی یا آسفالتیک باقی مانده در مخلوط اصلاح شده، تأثیر بسیار قابل توجهی روی رفتار شیارشدگی آن گذاشته است و توانسته آن را بسیار ارتقا دهد.

۶- کمترین مقدار شیارشدگی قیر در دماهای ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سلسیوس در شرایط قبل از پیرشدگی، مربوط به قیر اصلاح شده با ۴ درصد پلی اتیلن است اما در میان نمونه‌های پیر شده، نمونه قیر حاوی ۶ درصد پلی اتیلن سنگین، رفتار شیارشدگی بهتری از خود نشان داده است.

۷- رفتار شیارشدگی قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت نیز نشانگر آن است که با افزایش میزان گیلسونایت تا ۱۲ درصد، نرخ مقاومت شیارشدگی قیر نیز روندی افزایشی داشته و اثربخشی آن در نمونه‌های پیر شده قابل توجه تر است. به عبارتی، در نمونه‌های پیر شده، هرچند نمونه حاوی ۶ درصد پلی اتیلن، عملکرد شیارشدگی بهتری را نشان می‌دهد اما در صورت اعمال ملاحظات اقتصادی، شاید نمونه حاوی ۱۲ درصد گیلسونایت (که طبق شکل ۴ در رده دوم بهترین عملکرد قرار دارد)، انتخاب مناسب تری باشد.

۸- ارزیابی اقتصادی نشان می‌دهد که به دلیل قیمت نسبتاً کمتر گیلسونایت، با افزایش درصد جایگزینی،

شیارشدگی از جمله خرابی‌های شدید روسازی آسفالتی است و تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آن دارد. این خرابی تا حدود زیادی به شرایط ترافیک و آب‌وهوایی وابسته است. اصلاح قیر با استفاده از مواد مختلفی انجام می‌شود مانند پلیمرها، نانومواد، مواد شیمیایی، مواد مرکب و با هیدروکربن‌ها.

پژوهش حاضر به دنبال مقایسه نتایج رفتار شیارشدگی قیرهای اصلاح شده با دو ماده پلی اتیلن و گیلسونایت (قیر طبیعی)، در دماهای زیاد و درصدهای مختلف می‌باشد. به همین منظور از پلی اتیلن در مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد و ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد گیلسونایت برای آزمایش رئومتر برش دینامیک در دماهای ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سلسیوس روی قیرهای اصلاح شده در شرایط پیر شده و پیر نشده استفاده شده است.

پس از انجام آزمایش رئومتر برش دینامیک (DSR) روی قیر اصلاح شده با پلی اتیلن سنگین و گیلسونایت در درصدهای مختلف، نتایج حاصل به صورت کلی به این صورت بیان می‌شود:

۱- به طور کلی، گیلسونایت و پلی اتیلن سنگین تأثیر مثبتی روی رفتار شیارشدگی قیرهای اصلاح شده در قبل و بعد از پیرشدگی دارند.

۲- پیرشدگی قیرهای اصلاح شده رابطه معنی داری با رفتار شیارشدگی (پارامتر $G^*/\sin\delta$) آن دارد. به عبارتی دیگر، تقریباً در تمام نمونه‌های پیر نشده و پیر شده، میزان نیکویی برآزش بیشتر از ۹۹ درصد (بجز نمونه حاوی ۴ درصد پلی اتیلن) شده است.

۳- با انجام آزمایش رئومتر برش دینامیک قبل از پیرشدگی نمونه‌ها، بیشترین مقدار پارامتر شیارشدگی در دماهای ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس مربوط به قیر اصلاح شده با ۴ درصد پلی اتیلن سنگین و در دمای ۷۶ درجه سلسیوس، مربوط به قیر اصلاح شده با ۲ درصد پلی اتیلن سنگین است. به عبارتی، در نمونه‌های پیر نشده،

حائز اهمیت است، این اقدام می‌تواند مقرون به صرفه باشد زیرا به عنوان مثال، افزودن ۴ درصد پلی‌اتیلن، هرچند هزینه تولید را حدود ۴/۷ درصد افزایش می‌دهد اما ضریب افزایشی بهبود عملکرد شیارشدگی را بالغ بر ۱۲ برابر افزایش می‌دهد.

هزینه کلی تولید کاهش می‌یابد و در عین حال، مزیت‌های بهبود عملکرد شیارشدگی قیر برای نمونه‌های بعد از پیرشدگی تا بیش از ۵ برابر ارتقا می‌یابد. این بهبود برای نمونه‌های قبل از پیرشدگی حدود ۳ برابر نسبت به نمونه شاهد می‌باشد.

۹- افزودن پلی‌اتیلن سنگین در مجموع موجب افزایش هزینه‌های تولید مخلوط آسفالتی اصلاح شده می‌گردد. اما در موقعیت‌هایی که ارتقای عملکرد شیارشدگی

۶. مراجع

- Ahmedzade, P., Günay, T., Grigoryeva, O. and Starostenko, O. 2017. "Irradiated recycled high density polyethylene usage as a modifier for bitumen". *J. Mater. Civ. Eng.*, 29(3): 04016233.
- Ahmedzade, P. , Alqudah, O. , Günay, T. and Geçkil, T. 2022. "Effects of gilsonite on performance properties of bitumen". *Teknik Dergi*, 33(2): 11779-11798.
- Akbari, M., Shafabakhsh, G. and Ahadi, M. 2015. "Evaluating the safety effects of pavement condition index (PCI) on frequency of run-off-road accidents". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 1(3): 47-61. [In Persian]
- Akbari, M., Shafabakhsh, G. and Ahadi, M. 2020a. "The impact of segmentation method on the aggregate goodness-of-fit measurements of non-linear crash prediction models". *SN Appl. Sci.*, 2: 1-13.
- Akbari, M., Shafabakhsh, G. and Ahadi, M. 2020b. "Single-vehicle run-off-road crash prediction model associated with pavement characteristics". *Int. J. Eng.*, 33(7): 1375-1386.
- Akbari, M., Shahyari, E., Hamedipour, A. and Shafabakhsh, G. 2023. "Laboratory investigation on the rutting and fracture resistance of hot-mix asphalt containing nanographene oxide". *J. Mater. Civ. Eng.*, 35(3): 04022483.
- Ameri, M., Mansourian, A., Ashani, S. and Yadollahi, G. 2011. "Technical study on the Iranian gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction". *Constr. Build. Mater.*, 25(3): 1379-1387.
- Ameri, M., Mirzaiyan, D. and Amini, A. 2018. "Rutting resistance and fatigue behavior of gilsonite-modified asphalt binders" *J. Mater. Civ. Eng.*, 30(11).
- Ameri, M., Afshin, A. Ebrahimzadeh, M. and Rahimi, A. 2021. "Evaluation of the effect of slack wax and polypropylene wax on the rutting properties of crumb rubber modified binder". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, 53(5): 1835-1852. [In Persian]
- Archilla, A. and Madanat, S. 2000. "Development of a pavement rutting model from experimental data". *J. Transport. Eng.*, 126(4): 291-299.
- Babagoli, R. 2016. "Laboratory evaluation of the effect of natural bitumen powder (Gilsonite) on performance of stone matrix asphalt mixtures". *Sci. J. Transport. Eng.*, 8(1): 1-12. [In Persian]
- Bastos, J., Babadopulos, L. and Soares, J. 2017. "Relationship between multiple stress creep recovery (MSCR) binder test results and asphalt concrete rutting resistance in Brazilian roadways". *Constr. Build. Mater.*, 145: 20-27.
- Camahan, J., Davis, W., Shahin, M., Keane, P. and Wu, M. 1987. "Optimal maintenance decisions for pavement management". *J. Transport. Eng.*, 113(5): 554-572.
- Cardone, F., Ferrotti, G., Frigio, F. and Canestrari, F. 2014. "Influence of polymer modification on asphalt binder dynamic and steady flow viscosities". *Constr. Build. Mater.*, 71: 435-443.
- Centeno, M., Sandoval, I., Cremades, I. and Alarcon, J. 2008. "Assessing rutting susceptibility of five different modified asphalts in bituminous mixtures using rheology and wheel tracking test". *Proceeding: 87th Annual Meeting of TRB, Washington, DC.*
- Damyar, B., Dehnad, M. and Zanjirani Farahani, H. 2021. "Performance investigation of modified bitumen with ethylene-vinyl acetate polymer and rubber powder by performing classical and superpave tests". *Civ. Infrastruct. Res.*, 6(2): 39-48.
- Du, Y., Chen, J., Han, Z. and Liu, W. 2018. "A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods". *Constr. Build. Mater.*, 168: 893-905.

- Elnaml, I., Liu, J., Mohammad, L., Wasiuddin, N., Cooper III, S. and Cooper Jr., S. 2023. "Developing sustainable asphalt mixtures using high-density polyethylene plastic waste material". *Sustain.*, 15(13): 9897.
- Fernandes, S., Costa, L., Silva, H. and Oliveira, J. 2017. "Effect of incorporating different waste materials in bitumen". *Ciência & Tecnologia Dos Materiais*, 29(1): 204-209.
- Ghotb, F., Zahedi, M., Hasani Nasab, Sh. and Karimi, M. 2017. "Investigation of rheological properties of pure bitumen modified with gilsonite". *Road*, 25(91): 101-108. [In Persian]
- Haas, R. and Hudson, W. 2015. "Pavement asset management". John Wiley & Sons.
- Hamed, G., Alipour, A. and Karimian Khosroshahi, F. 2021. "Investigating the effect of acrylon acrylonitrile acrylate on the fatigue life of asphalt mixtures". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, 53(9): 3785-3802. [In Persian]
- Hesami, S. and Sobhi, S. 2017. "A review of the natural bitumen and its effects on the properties of bitumen and asphalt mixture". *Road*, 25(92): 19-32. [In Persian]
- Huang, X. M., Li, H. and Zhang, J. 2008. "Simulation of rutting behavior of asphalt pavement based on real temperature field". *Proceeding: 87th Annual Meeting of TRB, Washington, DC.*
- Kavussi, A., Taghavi zavareh, H., Ebrahimzadeh, M. and Ahmadi, M. 2018. "Performance of hot mixed asphalt containing googas". *Road*, 26(95): 105-113. [In Persian]
- Kök, B., Yilmaz, M. and Guler, M. 2011. "Evaluation of high temperature performance of SBS+Gilsonite modified binder". *Fuel*, 90(10): 3093-3099.
- Kumar, R., Saboo, N., Kumar, P. and Chandra, S. 2017. "Effect of warm mix additives on creep and recovery response of conventional and polymer modified asphalt binders". *Constr. Build. Mater.*, 138: 352-362.
- Nasrekani, A., Nakhaei, M., Naderi, K., Fini, E. and Aflaki, S. 2017. "Improving moisture sensitivity of asphalt concrete using natural bitumen (Gilsonite)". *Proceeding: 96th Annual Meeting of TRB, Washington, DC.*
- Poorheydari Mamaghani, F., Ameli, A. and Moafimadani, S. 2020. "Evaluation of rheological behaviour asphalt binders containing gilsonite and crumb rubber". *J. Transport. Res.*, 17(4): 13-30.
- Radhakrishnan, V., Sri, M. and Reddy, K. 2018. "Evaluation of asphalt binder rutting parameters". *Constr. Build. Mater.*, 173: 298-307.
- Rohani, B., Akbari, M. and Hosseini, A. 2022. "Evaluation of fatigue behavior of asphalt layers containing nanosilica modified tack coat". *Adv. Mater. Sci. Eng.*, ID: 2365457.
- Saboo, N. and Kumar, P. 2016. "Analysis of different test methods for quantifying rutting susceptibility of asphalt binders". *J. Mater. Civ. Eng.*, 28(7): 04016024.
- Sadradini, M., Yousefi, A. and Kavussi, A. 2002. "Improving bitumen properties by polymeric materials". *Iran. J. Polym. Sci. Tech.*, 15(2): 103-120. [In Persian]
- Santagata, E., Baglieri, O., Dalmazzo, D. and Tsantilis, L. 2013. "Evaluation of the anti-rutting potential of polymer-modified binders by means of creep-recovery shear tests". *Mater. Struct.*, 46(10): 1673-1682.
- Shafabakhsh, G., Akbari, M. and Bahrami, H. 2020. "Evaluating the fatigue resistance of the innovative modified-reinforced composite asphalt mixture". *Adv. Civ. Eng.*, ID: 8845647.
- Shirkavand, B., Fakhri, M. and Yazdi, H. 2011. "Modification of asphalt pavement with polysulfide polymer". *Iran. J. Polym. Sci. Tech.*, 24(3): 241-249. [In Persian]
- Subhy, A., Lo Presti, D. and Airey, G. 2015. "An investigation on using pre-treated tyre rubber as a replacement of synthetic polymers for bitumen modification". *Road Mater. Pavement Design*, 16: 245-264.
- Ullidtz, P. 1987. "Pavement Analysis. Developments in Civil Engineering". Elsevier Press, The Netherlands.
- White, T. 2002. "Contributions of pavement structural layers to rutting of hot mix asphalt pavements". NCHRP Report No. 468.
- Zhang, R., Wang, H., Gao, J., You, Z. and Yang, X. 2017. "High temperature performance of SBS modified bio-asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 144: 99-105.
- Zhao, W., Xiao, F., Amirkhanian, S. and Putman, B. 2012. "Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 31: 265-272.