

H. Mohammadi Anaie

Highway and
Transportation M.Sc.
Student, Engineering
Faculty, Yazd University.

e-mail:
hasanmohamadi@stu.yazd.ac.ir

M. M. Khabiri*

Associated Professor,
Engineering Faculty, Yazd
University.

e-mail:
mkhabiri@yazd.ac.ir

H. Khani Sanij

Assistance Professor,
Engineering Faculty, Yazd
University.

e-mail: Khani@yazd.ac.ir

F. Matin Ghahfarrokhi

Highway and
Transportation M.Sc.
Student, Engineering
Faculty, Yazd University.

e-mail:
Matin@stu.yazd.ac.ir

**Laboratory Evaluation and Numerical Analysis
Effect Use of Sillimanite Mineral Wastes as
Course- Aggregate on Surface Sliding and
Stiffness of Asphaltic Mixture**

Overburdens are stones that lack the required properties of minerals to be extracted and are piled adjacent to mine, while they may be used as aggregates in the asphalt mixture. Settlement is a cheap mineral composed of iron oxide, silicone and aluminum oxide, application of iron, silica and aluminum as aggregates in pavement industry has great effect on performance of asphalt mixtures. In this study, we investigated the effect of using Sillimanite aggregate material as an alternative for Limestone aggregates on resilient modulus, Marshall Strength and skid resistance parameters at various temperatures. The modeling was carried out by using finite element software based on the elastic behavior of the layers to determine the effect of elasticity modulus variations due to the change in aggregate type on the pavement response. The results indicated that the use of Sillimanite aggregates in the asphalt mixture led to a lower optimum bitumen percent than Limestone material; and also, in the asphalt mixture made of Sillimanite aggregates with optimum bitumen percent, Marshall Strength was increased by 15% and the resilient modulus by 25% compared to the mixture with Limestone material. Application of Sillimanite material in the asphalt mixture could enhance the friction resistance of the mixture against the abrasion resulting from traffic loading due to its higher hardness compared to Limestone material. The results of numerical analysis showed that the aggregate's type had the lowest effect on the critical tensile strain at the bottom of the asphalt layer, then came the percentage of bitumen in the mixture and, finally, the bonding of the layers had the highest effect.

Keywords: Sillimanite Mineral Waste, skid resistance, Hot Asphalt Mixture, Resilient Modulus, Aggregate Materials.

* Corresponding author

Received 09 May 2019, Revised 30 August 2019, Accepted 07 September 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.4355.1151

ارزیابی آزمایشگاهی و تحلیل عددی اثر استفاده از باطله‌های معدنی سیلیمانیت به عنوان درشت‌دانه بر مقاومت لغزشی و سختی مخلوط آسفالتی

سیلیمانیت یک ماده معدنی ارزان‌قیمت با ترکیباتی شامل اکسید آهن، سیلیسیم اکسید و آلومینیوم اکسید می‌باشد. استفاده از آهن، سیلیس و آلومینیوم در صنعت روسازی به‌عنوان مصالح سنگی درشت‌دانه تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی داشته است. در این تحقیق، اثر استفاده از مصالح سنگی سیلیمانیتی به‌عنوان جایگزین مصالح آهکی درشت‌دانه بر روی پارامترهای مدول برجهندگی، مقاومت مارشال و مقاومت لغزندگی در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، مدل‌سازی با تکیه بر رفتار ویسکوالاستیک لایه‌ها و با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انجام شد، تا تأثیر در تغییرات مدول الاستیسیته ناشی از تغییر جنس مصالح سنگی بر واکنش روسازی تعیین شود. نتایج نشان داد که استفاده از مصالح سنگی سیلیمانیتی در مخلوط آسفالتی، درصد قیر بهینه کمتری نسبت به مصالح آهکی دارد؛ و همچنین مقاومت مارشال مخلوط آسفالتی ساخته‌شده با مصالح سنگی سیلیمانیتی در درصد قیر بهینه ۱۵٪ و مدول برجهندگی ۲۵٪ نسبت به مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی افزایش داشته است. استفاده از مصالح سیلیمانیتی در مخلوط آسفالتی به‌دلیل سختی زیاد نسبت به مصالح آهکی می‌تواند باعث افزایش مقاومت اصطکاکی رویه آسفالتی در برابر سایش ناشی از عبور بارهای ترافیکی شود. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که استفاده از سنگدانه سیلیمانیتی به‌عنوان درشت‌دانه تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر کرنش کششی بحرانی زیر لایه رویه ندارد.

واژگان کلیدی: مخلوط آسفالت گرم، مقاومت لغزندگی، مدول برجهندگی، تحلیل عددی، سیلیمانیت.

حسن محمدی انائی

دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه یزد.

پست الکترونیک:

hasanmohamadi@stu.yazd.ac.ir

محمد مهدی خبیری*

دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد.

پست الکترونیک:

mkhhabiri@yazd.ac.ir

حامد خانی سانج

استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد.

پست الکترونیک:

khani@yazd.ac.ir

فاطمه متین قهفرخی

دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه یزد.

پست الکترونیک:

matin@stu.yazd.ac.ir

۱- مقدمه

راهسازی می‌باشد. انتخاب و نوع مصالح سنگی مصرفی بر عملکرد مخلوط آسفالتی و پاسخ روسازی در برابر بارهای ترافیکی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای دارد؛ و همچنین مقاومت در برابر لغزندگی یکی از مهم‌ترین خصوصیات روسازی آسفالتی در ارتباط با ایمنی می‌باشد. مصالح آهکی به خاطر جذب قیر و عدم حساسیت رطوبتی بیشترین کاربرد را در راه‌های ایران دارند. این مصالح دارای سختی در

افزایش عمر روسازی و اجرای رویه‌ای مقاوم در برابر آمدوشد زیاد، بار سنگین، تغییرات شرایط محیطی و ایجاد سطحی غیرلغزنده مورد توجه محققین مختلف در حوزه

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۹، بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۰۸، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۶.

(DOI): 10.22091/cer.2019.4355.1151 شناسه دیجیتال

از مدیران راه‌های ملی و طراحی روسازی استفاده از آن را در فرآیند طراحی توصیه می‌کنند [۹]. در این تحقیق از سیلیمانیت به‌دلیل مقاومت فشاری و پایداری حرارتی بالا و همچنین سختی نسبتاً زیاد برای بهبود خصوصیات مقاومتی مخلوط آسفالتی به‌عنوان جایگزین درشت‌دانه آهکی استفاده شد. اثر استفاده از مصالح سنگی سیلیمانیتی با استفاده از آزمایش‌های مارشال، مدول برجهندگی و مقاومت لغزندگی در ۴ دمای مختلف ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفت. برای سنجش عملکرد رویه آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیمانیتی، روسازی آسفالتی با استفاده از نرم‌افزار امان محدود مدل‌سازی شد و کرنش کششی زیر لایه رویه به‌عنوان معیار خرابی در طرح فاکتوریل^۲ به‌عنوان متغیر وابسته مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مروری بر مطالعات پیشین

چن^۳ و همکاران، در تحقیقی از سنگ معدن مگنتیت با عیار پایین به‌عنوان مواد جاذب ریزموج (میکرو و یو) برای ضدیخ کردن آسفالت استفاده کردند و دریافتند که خواص سنگ‌دانه‌های مگنتیت می‌تواند الزامات روسازی را برآورده سازد [۱۰]. لی^۴ و همکاران، ویژگی‌های مخلوط آسفالتی حاوی پسماند سنگ معدنی آزبست را در دماهای بالا و پایین و مقاومت در برابر نفوذ آب ارزیابی کردند که نتایج نشان داد مخلوط‌های آسفالتی حاوی پسماند سنگ معدنی آزبست با فراهم کردن الزامات مورد نیاز می‌تواند راهی برای بهره‌برداری وسیع از پسماند سنگ معدنی آزبست در مخلوط‌های آسفالتی باشد [۱۱]. پژوهشگران در تحقیقی دیگر به بررسی امکان استفاده هم‌زمان از سنگ‌دانه‌های درشت گنیس^۵ و سرباره فولادی ریزدانه^۶ در مخلوط آسفالت پرداختند و عملکرد مخلوط

حدود سه تا چهار در مقیاس موس^۱ هستند که عدد پایینی است و به‌مرور زمان بر اثر بار ترافیک، زبری خود را از دست می‌دهند [۱]. استفاده از مصالح با سختی نسبتاً بالا می‌تواند باعث بهبود مقاومت لغزندگی و افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر بارهای ناشی از ترافیک شود. کانی‌شناسی سنگ‌دانه‌ها بر دوام مخلوط‌های آسفالتی تأثیرگذار است؛ به‌عنوان نمونه وجود میکا مقاومت مکانیکی مخلوط را تحت تأثیر قرار می‌دهد یا میزان بالای کوارتز و فلدسپارهای قلیایی چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه‌ها را کاهش می‌دهد [۲ و ۳]. هوازدهی، ترافیک و شرایط اقلیمی از جمله عوامل متعددی هستند که باید در هنگام طراحی مخلوط‌های آسفالتی مدنظر قرار گیرند. اینکه روسازی بتواند چنین شرایطی را بدون خسارت قابل‌ملاحظه‌ای حفظ کند بستگی زیادی به مصالح انتخاب‌شده دارد. اگرچه تلاش زیادی جهت بهبود پیوند بین قیر و سنگ‌دانه‌ها شده است و یا مطالعه خواص بلندمدت قیر جهت کسب اطمینان از وجود سطحی همگن در طولانی‌مدت انجام شده است، اما انتخاب سنگ‌دانه جهت ساخت‌وساز راه در بسیاری از کشورها اساساً وابسته به تجربه، اعتبار و خواص مکانیکی است [۴]. سنگ‌دانه‌های طبیعی بیشترین مواد مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالت هستند و سهم قابل‌توجهی در صرفه‌جویی هزینه‌ها دارند [۵]. سنگ‌دانه‌های گرانیتی در بیشتر موارد در تولید مخلوط آسفالت مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا عملکرد بهتری نسبت به سنگ‌آهک، ماسه‌سنگ، شن و سایر مواد دارند [۶ و ۷]. با این حال، باید در نظر گرفت که پیچیدگی مصالح سنگی و مقدار زیادی از عوامل، مانند مقدار یا نوع مواد معدنی دگرگونی شده می‌تواند مانع از ارتباط مستقیم متغیرهای کانی‌شناسی با خواص مکانیکی بتن آسفالتی شود [۸]. در حالی که آنالیز کانی‌شناسی می‌تواند کمک بزرگی در ارزیابی دوام طولانی‌مدت سنگ‌دانه‌ها باشد، اما تعداد کمی

^۱- Mohs

^۲- Factorial Test Design Method

^۳- chen

^۴- Li

^۵- gneiss

^۶- steel slag fine aggregate

اکسید و ۰/۰۹ درصد اکسید آهن می‌باشد [۱۷]. سیلیمانیت به‌طور گسترده در صنایع آهن، فولاد، صنایع پتروشیمی، برق، سیمان، روی و شیشه استفاده می‌شود. استفاده از ترکیبات سیلیمانیت (سیلیس، آلومینیوم و آهن) در صنعت روسازی به‌عنوان مصالح سنگی و اصلاح‌کننده اصطکاک سطحی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی داشته است [۱۸ و ۱۹]. با توجه به تحقیقات انجام شده توسط محققان مختلف می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از سنگدانه‌های مختلف تأثیرات متفاوتی بر مخلوط‌های آسفالتی داشته است؛ بنابراین در این تحقیق اثر استفاده از باطله‌های معدنی سیلیمانیت به‌عنوان درشت‌دانه بر مقاومت لغزشی و سختی مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت.

۳- روش تحقیق و فرآیند آزمایشگاهی

مصالح به‌کار رفته در این تحقیق شامل مصالح سنگی سیلیمانیتی، مصالح سنگی آهکی و قیر خالص می‌باشد. آزمایش‌های انجام‌شده برای بررسی اثر مصالح سیلیمانیتی شامل آزمایش مارشال، مدول برجهنگی و اصطکاک می‌باشد. مشخصات مصالح و نحوه انجام آزمایش‌های مورد نظر در زیر آورده شده است.

۳-۱- مصالح سنگی

مصالح سنگی در آسفالت نقش سازه اصلی برای انتقال بار را ایفا کرده و سطحی برای چسبیدن قیر ایجاد می‌کند [۱۹]. سنگدانه‌های سیلیمانیتی مورد نظر از باطله‌های معدنی سنگ آهن میشدوان بافق یزد تهیه شدند. میزان ذخیره معدن میشدوان در سال ۱۳۸۵ شامل سه بخش شرقی، غربی و مرکزی، به میزان ۱۱۷۵۴۰۰۰ میلیون تن سنگ آهن کم‌عیار پرفسفر با عیار متوسط آهن ۴۹ درصد تخمین زده شده است. در این مجتمع، کارخانه خردایش و دانه‌بندی همراه با سیستم پرعیارسازی مگنت سپراتور و با ظرفیت تولید ۲۵۰ تن در ساعت نصب گردیده و از اواخر سال ۸۶ آغاز به‌کار نموده

آسفالت را با آزمایش‌های مقاومت مارشال، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، مقاومت در برابر رطوبت و مقاومت به تغییرشکل بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از ترکیب گنیس و سرباره فولاد در مخلوط آسفالتی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، رطوبت، تغییرشکل را بهبود می‌بخشد [۱۲]. آناستاسیو^۷ و همکاران، در تحقیقی به بررسی محدودیت روش طراحی بتن آسفالتی در مقایسه با مزایای ارائه‌شده توسط تحلیل عمیق خواص مصالح سنگی پرداختند. برای این کار، چهار مخلوط آسفالتی را تحت آزمایش دوام قرار دادند که یافته‌هایشان اهمیت ارزیابی پارامترهای کانی‌شناسی را تأیید می‌کند [۱۳]. محققان به ارزیابی استفاده از سنگدانه دولومیتی در لایه رویه پرداختند. نتایج نشان داد که چسبندگی خوبی بین قیر و سنگدانه وجود دارد و مخلوط آسفالتی طراحی‌شده با سنگدانه دولومیتی مقاومت بهتری در برابر تغییرشکل دائمی دارد [۱۴]. اولواسولا^۸ و همکاران، در پژوهشی از ضایعات معدن مس در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کردند و دریافتند که مخلوط‌های حاوی ۲۰ درصد پسماند معدن مس بیشترین عدد لغزش، عمق بافت متوسط و حداقل عمق شیارشدگی را دارند [۱۵]. سو^۹ و همکاران، در مطالعه‌ای به بررسی مخلوط‌های آسفالتی ساخته‌شده با ضایعات شیشه پرداختند و آزمایش‌هایی از جمله مقاومت مارشال، مقاومت لغزشی، انعکاس نور را انجام دادند. نتایج نشان داد که ضایعات شیشه می‌تواند به‌عنوان مصالحی بادوام جهت ساخت روسازی آسفالتی مورد استفاده قرار بگیرد و همچنین مخلوط ساخته‌شده با ضایعات شیشه ضریب اصطکاک بالاتر و انعکاس نور بهتری دارد که برای بزرگراه‌ها مناسب‌تر است [۱۶]. سیلیمانیت یک ماده معدنی طبیعی ارزان‌قیمت شامل ۳۷/۰۸ درصد سیلیسیم اکسید، ۶۳/۱۱ درصد آلومینیوم

^۷- Anastasio

^۸- Oluwasola

^۹- Su

قیر مصرفی از نوع AC 60-70 می‌باشد که از پالایشگاه اصفهان تهیه شده است. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی قیر مصرفی در جدول ۲ آورده شده است.

۳-۳- طرح اختلاط

طرح اختلاط نمونه‌ها براساس ASTM D1599 انجام گرفت. به‌منظور تعیین قیر بهینه، سنگ‌دانه‌ها به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۶۰-۱۵۰ درجه سلسیوس در گرمخانه حرارت دیده تا کاملاً خشک شوند. قیر نیز تا دمای ۱۳۵ درجه گرم شده و سپس سنگ‌دانه‌ها با درصد‌های مختلف قیر (نسبت به وزن مخلوط) شامل ۴/۵، ۵ و ۵/۵ ترکیب شد. پس از اختلاط کامل قیر با سنگ‌دانه‌ها مخلوط در استوانه مارشال ریخته شده و در هر طرف با ۷۵ ضربه (شبیه‌سازی ترافیک سنگین) کوبیده شد. مقدار قیر بهینه برای نمونه‌های حاوی مصالح آهکی و نمونه‌های سیلیمانیتی (استفاده از سیلیمانیت به‌عنوان درشت‌دانه) به ترتیب ۵/۴ و ۵ به دست آمد. برای معرفی نمونه‌ها از کدگذاری به‌ترتیب برای مصالح آهکی L و برای نمونه با درشت‌دانه از سیلیمانیت حرف S و نیز عدد بعد از حرف لاتین ده برابر درصد مختلف قیر استفاده شد. به‌عنوان مثال، S45 یعنی نمونه حاوی درشت‌دانه سیلیمانیت با میزان قیر ۴/۵٪ است.

۳-۴- بررسی عملکرد مقاومتی

پارامتر نسبت مارشال (نسبت مقاومت به روانی) می‌تواند به‌عنوان عاملی برای تخمین مقاومت و سختی مخلوط به‌کار آید. حتی می‌توان بالاتر بودن نسبت مارشال را متناسب با کمتر بودن احتمال وقوع پدیده شیارشدگی در مخلوط آسفالتی دانست. نمونه‌های مخلوط آسفالتی با درصد‌های قیر ۴/۵، ۵ و ۵/۵ ساخته شده و سپس به مدت ۳۰ دقیقه در آب ۶۰ درجه سلسیوس عمل‌آوری شد و تحت آزمایش مارشال قرار گرفتند.

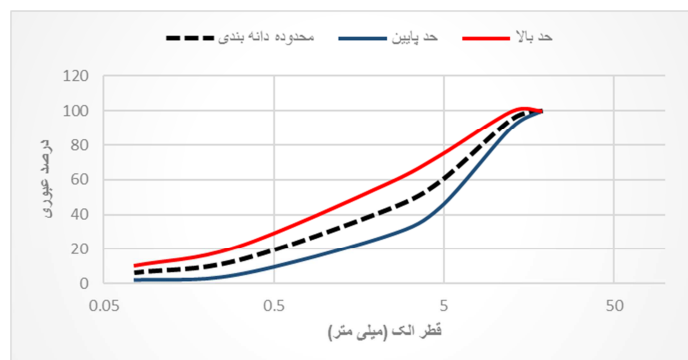
است [۲۰]. پس از نمونه‌برداری و انجام آزمایش XRF^{۱۰} از نمونه‌های سنگ مشاهده شد مقدار عنصر Al_2O_3 و SiO_2 بیش از ۸۰ درصد نمونه‌ها را تشکیل می‌دهد و مقدار اکسید آهن آن بیش از ۲ درصد بوده است، که حتی برای تولید فرآورده‌های نسوز که گزینه کاربردی صنعتی این سنگ‌دانه‌ها است، با تکنولوژی معمول فرآوری مناسب تشخیص داده نشده است [۲۰]. با توجه به ظرفیت معدن و تولید باطله‌های معدنی کاربرد سنگ‌دانه‌های حاصل از عملیات خردایش برای مصارف عمرانی مطرح بوده است، که در این مطالعه تنها بخش درشت‌دانه مصالح آسفالتی از این منابع سنگی باطله تأمین می‌شود. تأمین قسمت ریزدانه با توجه به سختی نسبتاً زیاد سنگ‌دانه در حال حاضر اقتصادی نیست. قسمت ریزدانه و فیلر مورد استفاده در این تحقیق، مصالح سنگی آهکی می‌باشد که از معدن کارخانه فرش راه یزد تهیه شده است. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. در این پژوهش از مصالح سیلیمانیتی و آهکی منطبق بر منحنی دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ برای آستر و رویه شکل ۱ برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. همچنین از سنگ‌دانه‌های سیلیمانیتی به‌عنوان درشت‌دانه (مانده روی الک شماره ۴ و ۱/۲ اینچ) برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی استفاده شده است (شکل ۲). دلیل انتخاب درشت‌دانه، بزرگ بودن ابعاد سنگ‌دانه‌های سیلیمانیت باطله در دسترس و هزینه زیاد برای خرد کردن سنگ‌دانه در مقیاس آزمایشگاهی و اجرایی می‌باشد. به‌علاوه، یکی از اهداف کاربردی این تحقیق، بررسی امکان استفاده از این نوع سنگ‌دانه جهت تأمین اصطکاک سطحی است که با انتخاب درشت‌دانه از این نوع مصالح سنگی، بافت درشت در سطح تماس رویه آسفالتی را نیز فراهم آورد.

۳-۲- قیر

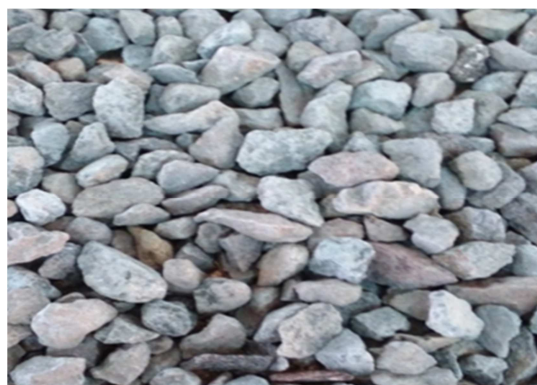
¹⁰- X-Ray Fluorescence

جدول ۱- مشخصات فیزیکی مصالح سنگی سلیمانیت مورد استفاده

مقدار	روش آزمایش	ویژگی	مصالح
≤۰/۵	ASTM C127	درصد جذب آب (%)	درشت‌دانه (سلیمانیت)
≤۱۵	ASTM C131	سایش به روش لس آنجلس (%)	
۱۰۰	ASTM D5821	درصد شکستگی در یک وجه (%)	
۱۰۰	ASTM D5821	درصد شکستگی در دو وجه (%)	
۴۸/۷۴	ASTM D2938	مقاومت فشاری (Mpa)	
۲/۷۶	ASTM C29	وزن مخصوص (T/m ³)	
۷/۰	ASTM D421	سختی (Mohs)	
۰/۲۱	ASTM D5607	چسبندگی (Mpa)	
۴/۵۱	ASTM D3967	زبری	
۲/۶۹	ASTM C128	وزن مخصوص (gr/cm ³)	
۱/۲۰	ASTM C128	درصد جذب آب (%)	فیلر
۲/۷۴	ASTM C188	وزن مخصوص (gr/cm ³)	
۲/۶۰	ASTM C128	درصد جذب آب	



شکل ۱- نمودار حدود دانه‌بندی شماره ۴ و محدوده دانه‌بندی درشت‌دانه جایگزین شده با سلیمانیت جایگزین شده



شکل ۲- تصویر نمونه سنگ‌دانه سلیمانیتی مورد استفاده

و جهت تعیین ضریب برجهندگی از دستگاه UTM-14P مطابق با استاندارد ASTM D 4123-82 استفاده شده است. به علت سنجش عملکرد مصالح در یک دمای معمول، نمونه‌ها در دمای ۲۰ درجه تحت بارگذاری نیمه

پس از تعیین درصد قیر بهینه و محاسبه نسبت مارشال برای درصدهای مختلف قیر نتایج حاصل با نمونه‌های ساخته‌شده با مصالح آهکی مقایسه شد. برای تعیین رفتار مصالح آسفالتی در برابر بارگذاری دینامیکی،

سینوسی ۳۸۰۰ نیوتن با دوره بارگذاری ۲۵۰ میلی‌ثانیه و تعداد بارگذاری ۵ پالس با دوره بارگذاری ۰/۱ ثانیه (۰/۹ ثانیه استراحت) قرار گرفتند. با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی و عدم وجود محفظه دمایی،

آزمایش مدول برجهندگی در دمای ۲۰ درجه انجام و از سایر دماها صرف‌نظر شد. در ضمن از سه نمونه برای انجام هر آزمایش در درصدهای مختلف قیر استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات قیر مصرفی در روند تحقیق

نوع آزمایش	استاندارد آزمایش	نتیجه	حدود استاندارد
وزن مخصوص در 25°C (gr/cm^3)	ASTM D-70	۱/۰۱۴	۱/۰۵-۰/۹۹۵
درجه نفوذ در 25°C (\square)	ASTM D-5	۶۳	۶۰-۷۰
نقطه نرمی (\square)	ASTM D-36	۴۹	۳۵-۵۷
کشش در 25°C (cm)	ASTM D-113	۱۴۶	۱۰۰ ⁺
کندروانی در 135°C (pa.s)	ASTM D-88	۴۱۲	۴۰۰ ⁺
نقطه اشتعال (\square)	ASTM D-92	۳۱۲	۲۳۲ ⁺

۳-۵- بررسی عملکرد سطحی

یکی از اهداف این مطالعه، کاربرد مصالح سنگی سیلیمانتی با سختی زیاد، برای تأمین مقاومت کافی در برابر سایش در دوره عمر رویه سطحی است. چنانچه سنگ‌دانه مقاومت اولیه لغزشی بالایی داشته باشد، با توجه به اثرگذاری آن در طول دوره عمر پایداری این مقاومت نیز انتظار می‌رود [۲۱]. بنابراین در ادامه این تحقیق از آزمایش آونگ انگلیسی مطابق دستورالعمل‌های استاندارد برای ارزیابی مقاومت لغزندگی نمونه‌های آسفالتی استفاده شد. مقاومت لغزندگی نمونه‌های ساخته‌شده با مصالح سنگی سیلیمانیتی اندازه‌گیری و با نمونه‌های ساخته‌شده با مصالح آهکی مقایسه گردید. این آزمایش در استانداردهای مختلفی تشریح شده است که کامل‌ترین آنها دستورالعمل موسسه تحقیقات راه و حمل و نقل انگلستان TRRL و استاندارد ASTM A303 است. در این تحقیق از استاندارد ASTM A303 استفاده شده است. همچنین مقاومت لغزندگی نمونه‌های آسفالتی تهیه شده با مصالح سنگی سیلیمانیتی مورد آزمایش لغزندگی قرار گرفته تا با آسفالت تولید شده با سنگ آهکی مقایسه گردد. آزمایش لغزندگی براساس استاندارد ASTM A303 بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و میانگین ۵

قرائت متوالی مشروط بر این که بیش از ۳ واحد با هم اختلاف نداشته باشند به‌عنوان BPN^{11} ثبت شد.

۳-۶- تحلیل عددی

یکی از مباحث اصلی در مهندسی روسازی ارزیابی عملکرد آن تحت بارهای ترافیکی و پیش‌بینی خرابی‌های اصلی می‌باشد. شناخت و محاسبه عکس‌العمل روسازی در طراحی به‌ویژه در طراحی به روش مکانیستیک- تجربی (MEPDG^{12}) الزامی است. در طراحی صحیح روسازی و ارزیابی درست عملکرد آن، پیش‌بینی دقیق پاسخ‌های الاستیک مخلوط آسفالتی نقش مهمی دارد. یکی از روش‌های پرکاربرد در پیش‌بینی پاسخ‌های روسازی‌های آسفالتی، روش المان محدود است که به‌طور گسترده توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲]. استفاده از نرم‌افزارهای خاص با کاربردهای ویژه جهت بررسی میزان خرابی‌های بارگذاری‌های مختلف، امری رایج در تحقیقات می‌باشد [۲۲]. نرم‌افزار انتخابی در این مطالعه مورد تأیید روش طراحی مکانیستیک- تجربی اداره راه‌و ترابری ایالت واشنگتن با عنوان

¹¹- British Pendulum

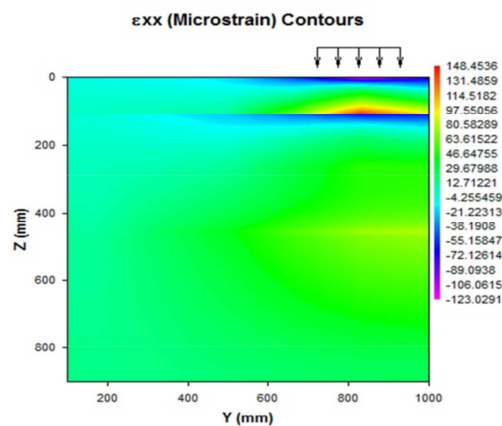
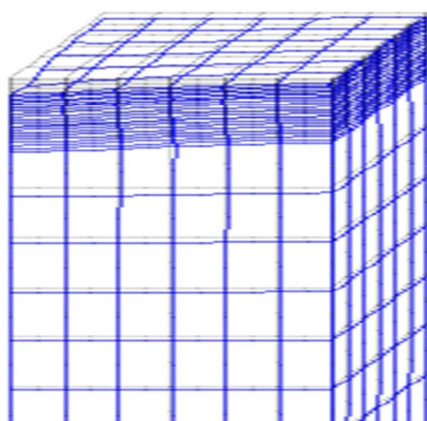
¹²- Mechanistic Empirical Pavement Design Guide

[۲۲] استفاده شد. مدل‌سازی با توجه به تغییر مشخصات لایه رویه آسفالتی با تغییر در نوع مصالح سنگی، به منظور بررسی تغییرات کرنش کششی انتهای لایه آسفالتی با تأکید بر اتصال کامل یا عدم اتصال کامل بین لایه آسفالتی و اساس از جنس مخلوط شنی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انجام شد. مدل سه‌بعدی با توجه به عملکرد بهتر پاسخ آنها که به واقعیت نزدیک‌تر هستند، انتخاب گردید. شرایط مرزی روسازی، شامل تکیه‌گاه گیردار در پایین و در طرفین مدل نیز کاملاً محدود شد. برای مش‌بندی از روش Infinite Elements و المان‌ها از نوع Local Refined Mesh انتخاب شد. نمونه‌ای از شکل هندسی مدل و تغییرشکل به‌وجود آمده در شکل ۳ نمایش داده شده است.

EverStressFE-3D Finite-Element با دسترسی آزاد، است. به‌منظور محاسبه عکس‌العمل‌های روسازی مدل شده، از بارگذاری به‌صورت یک محور ساده ۸/۲ تنی با چرخ زوج با فاصله ۳۴/۵ سانتیمتر با فشار سطح تماس ۶/۹ کیلوگرم بر سانتیمترمربع که در سطح دایره‌ای به شعاع ۱۰/۲ سانتیمتر به سطح روسازی اعمال شده است، استفاده گردید [۲۳]. روسازی‌های آسفالتی رایج در ایران از چهار لایه رویه آسفالتی، اساس، زیراساس و بستر تشکیل شده‌اند که هرکدام از این لایه‌ها خصوصیات رفتاری و مشخصات ابعادی مخصوص به خود را دارند. در این مطالعه مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح براساس جدول ۳ انتخاب شده است. مدول الاستیسیته لایه رویه از آزمایش مدول برجهندگی انتخاب و برای مابقی پارامترها از مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار و سایر مطالعات

جدول ۳- مشخصات هندسی و مکانیکی لایه‌های روسازی در مدل‌سازی عددی.

نام لایه	ضخامت (cm)	جنس مصالح	مدول الاستیسیته (kg/cm ²)	ضریب پواسون	وزن حجمی (kg/cm ³)
رویه	۱۰	مصالح آهکی	متغیر (۳۴۴۰-۳۴۵۰-۴۱۶۰)	۰/۳۵	متغیر (۲۲۰۵-۲۲۲۵-۲۲۵۵)
		درشت دانه سیلیمانیت	متغیر (۳۳۸۰-۳۵۳۰-۵۲۰۰)		متغیر (۲۲۳۵-۲۳۳۰-۲۳۸۵)
اساس	۱۵	مخلوط شنی	۲۰۰۰	۰/۳۵	۲۰۵۰
زیرساس	۲۰	مخلوط شنی	۱۴۰۰	۰/۴۰	۲۰۵۰
خاک بستر	۳۸۰	خاک نرم	۲۰۰	۰/۴۵	۱۹۷۰



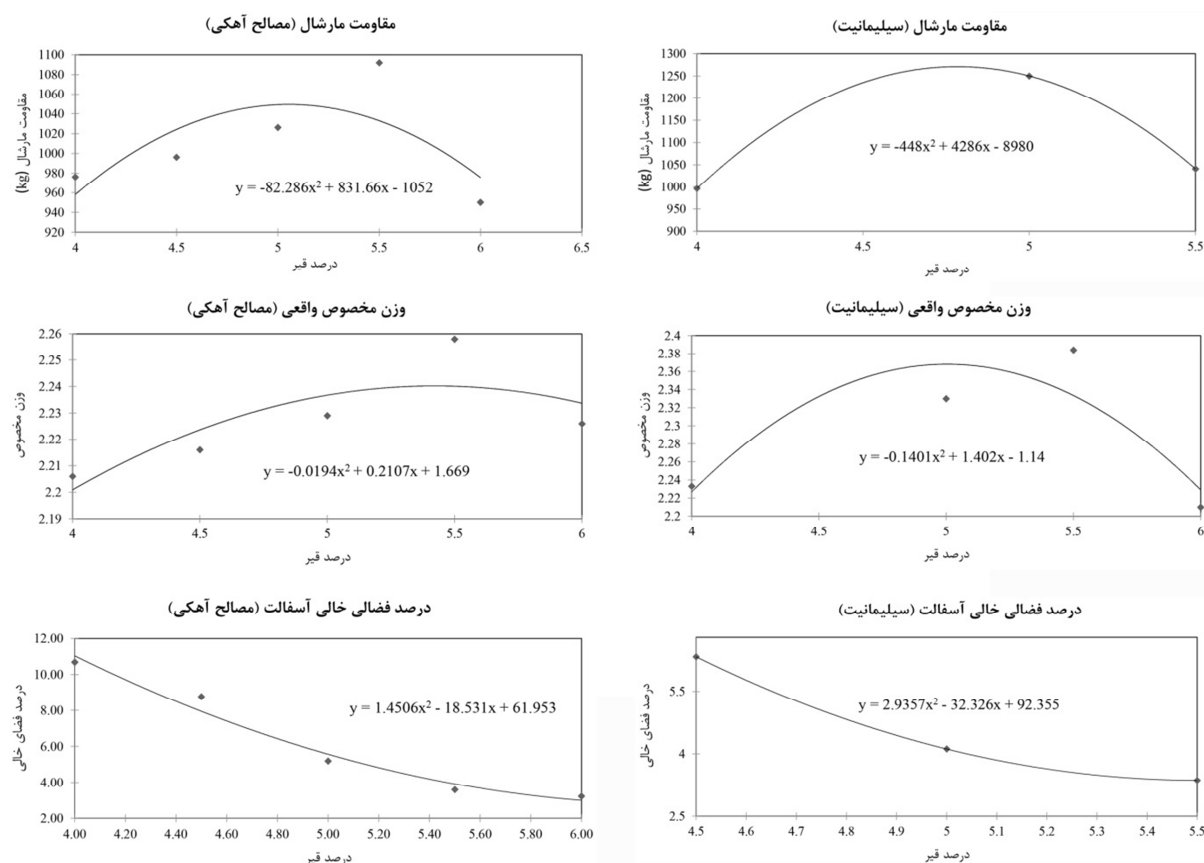
شکل ۳- نمایش مش‌بندی در لایه‌های روسازی و نتیجه کرنش کششی زیرلایه رویه در مدل‌سازی عددی

۴- داده‌ها و تحلیل آنها

در این بخش، ابتدا نتایج آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفته و سپس نتایج تحلیل‌های عددی ارائه می‌شود. در نهایت، نتایج دو روش مطالعاتی به‌صورت خلاصه در قسمت بحث و نتیجه‌گیری آورده می‌شود.

۴-۱- بررسی عملکرد مقاومتی

پس از ساخت نمونه‌های آسفالتی با مصالح آهکی و سیلیمانیتی و انجام آزمایش مارشال، نمودارهای مربوطه ترسیم شد. درصد قیر براساس میانگین سه پارامتر حداکثر وزن مخصوص، حداکثر مقاومت مارشال و درصد فضای خالی ۴٪ به‌دست آمد که نمودارهای مربوط در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴- نمودارهای مربوط به تعیین درصد قیر بهینه برای دانه سیلیمانیت نمونه‌های ساخته شده با درشت‌دانه

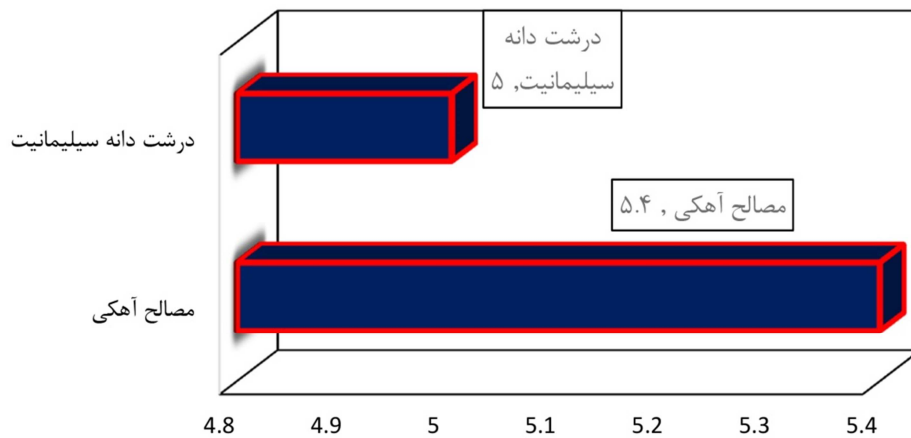
نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودار شکل ۶ مشخص است به ازای درصد‌های مختلف قیر، وزن مخصوص نمونه‌های آسفالتی حاوی مصالح سیلیمانیتی نسبت به حالت آهکی بیشتر بوده و این افزایش وزن مخصوص به دلیل وزن مخصوص بالای سنگ سیلیمانیت نسبت به سنگ آهک می‌باشد.

همان‌گونه که از نمودار شکل ۷ قابل‌مشاهده است، حداکثر مقاومت مارشال مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح سیلیمانیتی تقریباً ۱۵٪ درصد بیشتر از حداکثر

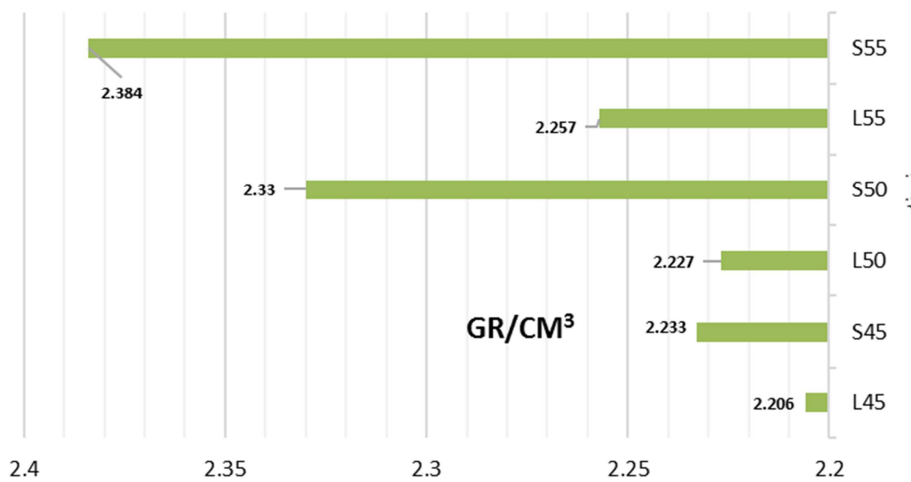
قیر بهینه برای نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی و سیلیمانیتی به ترتیب ۵/۴ و ۵ درصد به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که درصد قیر بهینه برای نمونه آسفالتی ساخته شده با مصالح سیلیمانیتی نسبت به آهکی حدود ۰.۸٪ کمتر است؛ که این تغییرات در شکل ۵ به‌صورت نمودار نشان داده شده است. علت آن را می‌توان در جذب قیر کمتر مصالح سیلیمانیتی بیان کرد. در شکل ۶ و ۷، نتایج وزن مخصوص واقعی، میانگین و نسبت مقاومت مارشال به روانی برای مصالح آهکی و سیلیمانیتی

سیلیمانیتی در درصد قیر ۵ درصد و برای مصالح آهکی در درصد قیر ۵/۵ درصد حاصل شده است.

مقاومت مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی می باشد. مطابق با نمودار، این مقاومت برای مصالح



شکل ۵- نمودار درصد قیر بهینه برای مصالح آهکی و درشت دانه سیلیمانیت



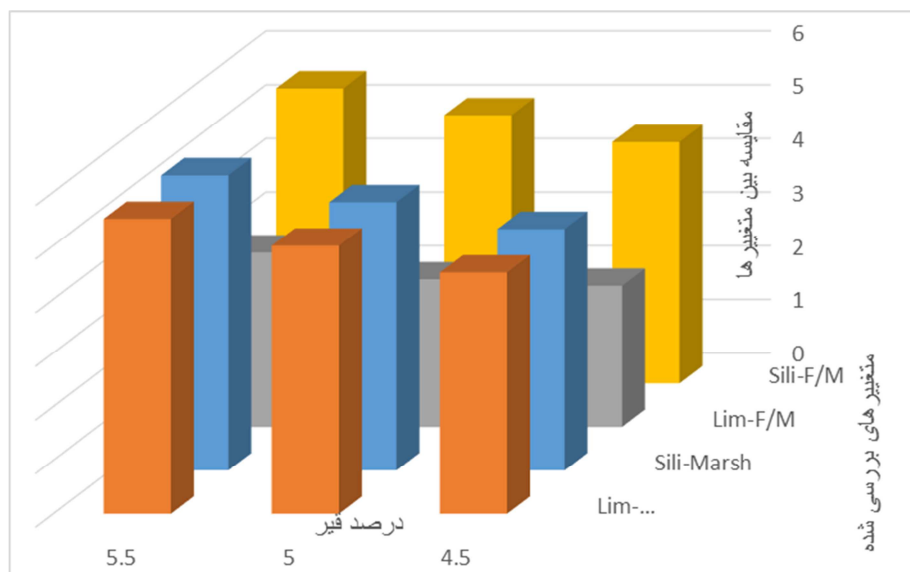
شکل ۶- نمودار تغییرات وزن مخصوص نمونه‌ها (gr/cm³) در درصد مختلف قیر

درصد قیر ۵ درصد حدود ۲۵٪ بیشتر از حداکثر مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی حاوی مصالح آهکی می باشد؛ و همچنین در درصد قیر ۵/۵٪ که تقریباً درصد قیر بهینه برای مخلوط آسفالتی ساخته شده مصالح آهکی می باشد، مدول برجهندگی در مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح سیلیمانیتی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است.

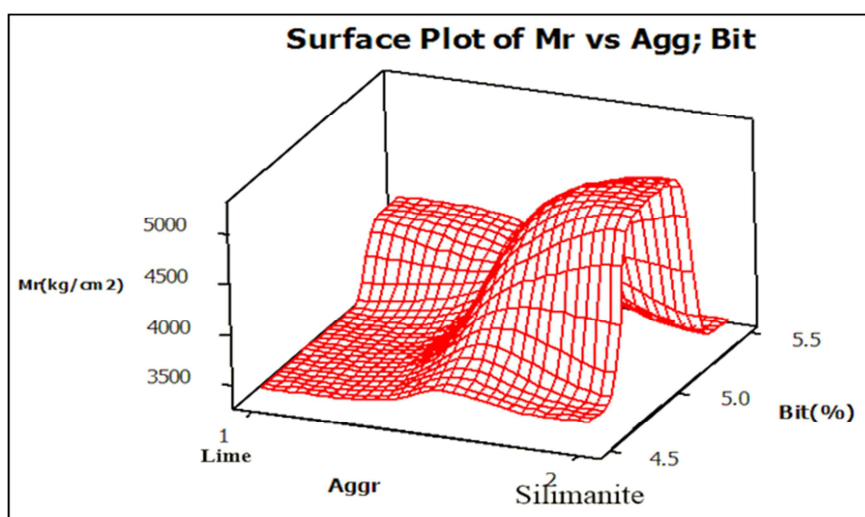
افزایش مدول برجهندگی می تواند باعث کاهش ترک های ناشی از بارگذاری شود. همچنین با توجه به اینکه مدول برجهندگی از پارامترهای مهم طراحی روسازی می باشد، افزایش مدول برجهندگی می تواند سبب کاهش ضخامت لایه آسفالتی و صرفه جویی اقتصادی شود.

نسبت مقاومت مارشال به روانی به عنوان پارامتری برای سنجش عملکرد شیارشدگی مخلوط های آسفالتی می باشد. ملاحظه می شود که این نسبت برای مصالح سیلیمانیتی بیشتر است که بیانگر مقاومت بالاتر این سنگدانه ها برای تحمل بارهای سنگین تر در خطوط کندرو ترافیکی می باشد.

مدول برجهندگی یکی از پارامترهای مهم در طراحی ضخامت رویه آسفالتی می باشد. آزمایش مدول برجهندگی بر روی نمونه های آسفالتی انجام و نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی ساخته شده با مصالح سیلیمانیتی در



شکل ۷- نمودار تغییرات مقاومت و نسبت مارشال در درصد‌های مختلف قیر و دو نوع سنگدانه



شکل ۸- نمودار تغییرات مدول برجهندگی در مقابل نوع سنگدانه و درصد قیر.

۲-۴- بررسی مقاومت لغزندگی

درشت‌دانه سیلیمانیت به‌علت شیب کمتر نمودار به میزان ۱۵٪، به تغییرات دما وابستگی کمتری دارند. به هر حال، استفاده از مصالح سیلیمانیتی در مخلوط بتن آسفالتی می‌تواند در برابر سایش ناشی از تکرار بارهای ترافیکی در درازمدت به دلیل سختی زیاد مناسب باشد.

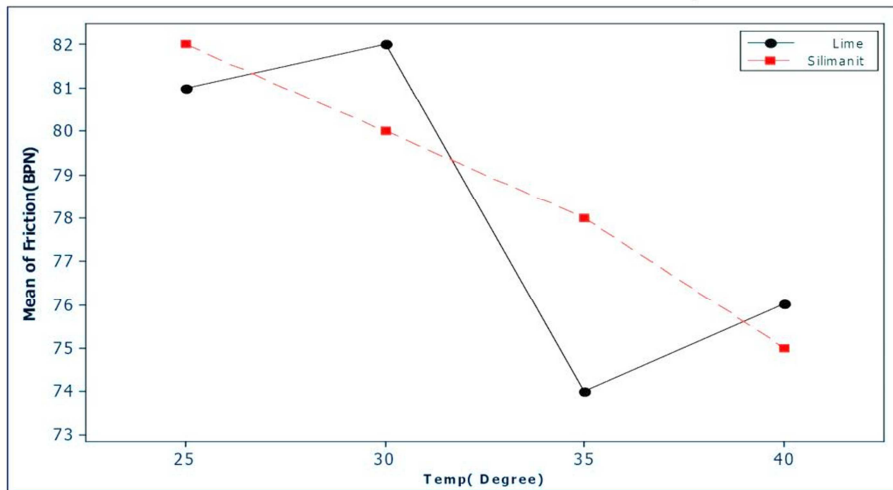
۳-۴- نتایج مدل‌سازی عددی

با توجه به مدل‌سازی انجام شده براساس مشخصات لایه‌های روسازی و اندرکنش لایه‌ها، کرنش بحرانی زیرلایه آسفالت محاسبه شد، که در نمودار شکل ۱۰ ارائه شده است. هنگامی که، دو لایه رویه و اساس کاملاً با

مقاومت لغزندگی اندازه‌گیری شده با دستگاه آونگ انگلیسی مطابق استاندارد برای مخلوط‌های بتن آسفالتی ساخته‌شده با مصالح آهکی و سیلیمانیتی در ۴ دمای رایج در اغلب فصل‌های سال در کشور در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت لغزندگی برای نمونه‌های ساخته‌شده با مصالح آهکی و سیلیمانیتی در دماهای بالاتر با تغییرات اندکی، عموماً کاهش داشته است؛ که منطبق بر نتایج تحقیقات لئو در مورد اثر عوامل حرارتی بر روی اصطکاک آسفالت است [۲۴]. در عین حال، میزان حساسیت دمایی مصالح سنگی حاوی

اندود پریمکت)، تغییرات قابل توجهی در میزان کرنش کششی در زیر لایه رویه اتفاق نمی‌افتد.

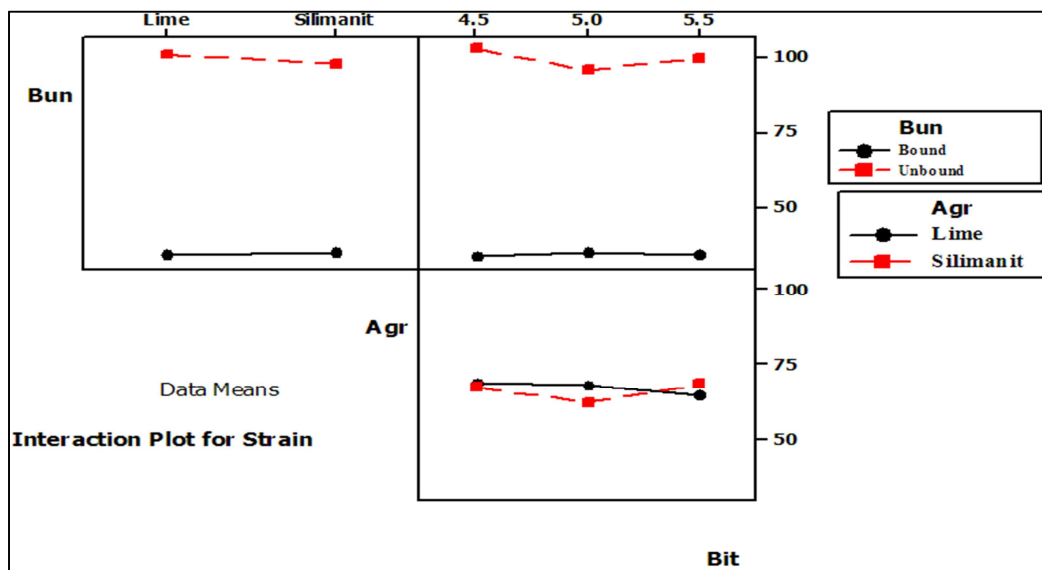
یکدیگر متصل شده باشند، کرنش بحرانی به میزان معنی‌داری کاهش می‌یابد، ولی هنگامی که لایه رویه به لایه اساس متصل نشده باشد (عدم اجرا یا اجرای نامناسب



شکل ۹- نمودار مقاومت لغزندگی دو نوع سنگدانه در دماهای مختلف

بدون قفل وبست با لایه زیرین، مشاهده می‌شود تفاوت معنی‌داری در اثر تغییر درصد قیر بر پاسخ رویه در برابر بارگذاری وجود ندارد. در بررسی جنس سنگدانه‌ها می‌توان مشاهده نمود در اکثر موارد، به‌ویژه در درصد قیر بهینه، در لایه رویه با مخلوط آسفالتی با درشت‌دانه‌ی آهکی، کرنش بحرانی بیشتری در زیر لایه رویه به‌وجود می‌آید.

همچنین در خصوص تغییرات درصد قیر نشان داده می‌شود در لایه‌های کاملاً قفل شده درصد قیر ۰/۵٪، کمترین خطر احتمالی ترک‌خوردگی خستگی به‌علت کاهش کرنش کششی وجود دارد. دلیل این امر، افزایش تماس و اصطکاک بین ذرات با توجه به افزایش تخلخل به علت قیر کمتر در مقایسه با درصد قیر بیشتر در سنگدانه‌های آهکی می‌باشد. در عین حال، در لایه رویه



شکل ۱۰- اثر مستقل جنس سنگدانه، درصد قیر و چسبندگی بین لایه‌های در کرنش کششی زیر لایه رویه در مدل‌سازی عددی

۵- بحث و تحلیل نتایج

معنادار بالایی وجود دارد، انطباق دارد. در عین حال، رابطه معناداری بین سختی سنگدانه‌ها و مدول برجهندگی سنگدانه‌ها گزارش نشده است [۲۶]. علت افزایش مقاومت مارشال در نمونه با سنگدانه‌های سخت را به اصطکاک داخلی بین سنگدانه‌ها در برابر گسیختگی ناشی از نیروی برشی بارگذاری مارشال می‌توان منتسب کرد. هرچند این مورد در بارگذاری دینامیکی به علت نیروی وارده کمتر و ادامه نیافتن بارگذاری تا لحظه گسیختگی به این اصطکاک وابستگی کمتری دارد، چراکه نمونه مارشال تا گسیختگی لازم است نیرو را تحمل نماید و مسلماً در حین این بارگذاری درگیری سنگدانه‌ها بیشتر می‌شود؛ درحالی که در رفتار دینامیکی رویه که در آزمایش مدول برجهندگی اندازه‌گیری می‌شود، نیرو محدودتر است و تا حد درگیری سنگدانه‌ها این نیرو ادامه نمی‌یابد.

۵-۲- نتایج طرح فاکتوریل متغیرها

این پژوهش، به‌منظور بررسی اثر جنس سنگدانه درشت‌دانه، بر عملکرد مخلوط آسفالت رویه انجام شده است. اثر همزمان چندین عامل را بر متغیر وابسته در مطالعه طرح فاکتوریل می‌توان در کوتاه‌ترین راه بررسی نمود. بدین منظور و برای همپوشانی اثرات سه متغیر جنس سنگدانه، درصد قیر و چسبندگی بین لایه‌ای به‌طور همزمان، طرح فاکتوریل مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج نرخ رشد کرنش کششی در حالت لایه‌های غیرمتصل رویه و اساس مخلوط شنی، در شکل ۱۱، می‌توان نتیجه گرفت نسبت خرابی در درصدهای قیر کم به زیاد در حالت عدم اتصال دو لایه، به حدود ۰/۷ می‌رسد. در این شکل، متغیرهای مطالعه یعنی درصد قیر (Bit)، اتصال کامل و یا غیرکامل (Bun) و نوع سنگدانه در محور افقی (Agr) و در محور قائم نیز میانگین تأثیرگذاری هریک از متغیرها بر روی کرنش بحرانی کششی (strain) نمایش داده شده است. با توجه به نمودارهای مقایسه شده در تحلیل فاکتوریل، ملاحظه

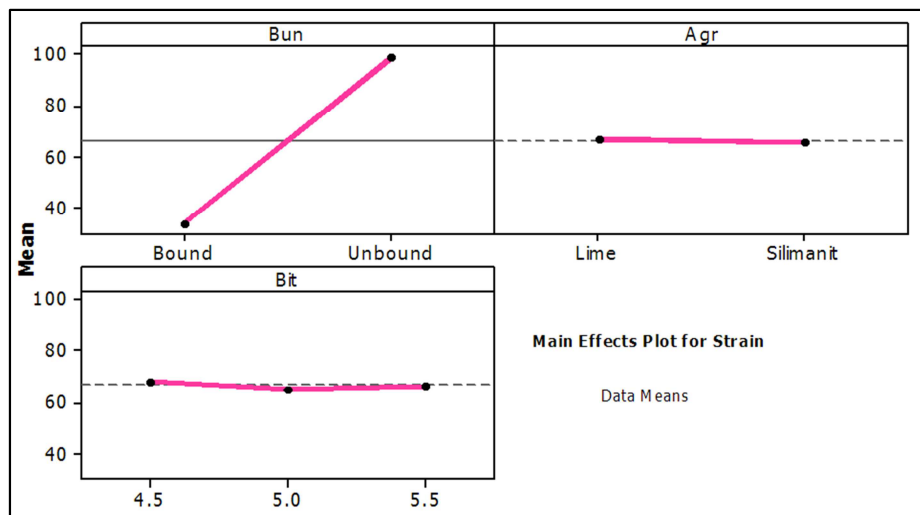
در این بخش، یافته‌های کلی پژوهش بیان شده، بحث در خصوص نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی صورت گرفته و به دلایل احتمالی رفتار مخلوط آسفالتی و مدل روسازی اشاره می‌شود. سعی شده است تا یافته‌های تحقیق حاضر با منابع پیشین و پژوهش‌های مطالعه شده در مورد کاربرد مصالح سنگدانه‌ای با سختی بالا مقایسه شده و در مورد نتایج کلی بحث شود.

۵-۱- تأثیر جنس سنگدانه درشت بر نتایج آزمایشگاهی

با توجه به نتایج مشاهده شد استفاده از سنگدانه‌های درشت‌دانه سخت سبب مقاومت مخلوط آسفالتی و بهبود اصطکاک سطحی رویه می‌شود. نتایج مطالعات آزمایشگاهی بر روی عدد اصطکاک در مطالعه حاضر نشان داد که استفاده از سنگدانه‌های با سختی بالاتر باعث افزایش عدد مقاومت لغزندگی می‌شود که با نتایج مطالعات انجام شده توسط بلوچیویس و همکاران که در نتایج به افزایش مقاومت لغزندگی سنگدانه‌های گرانیتی (با سختی بالا) برای تأمین اصطکاک مقاوم رویه سطحی مناسب‌تر از سنگدانه‌های آهکی دولومیتی است، که مقاومت آنها در طول زمان نیز کاهش می‌یابد، اشاره می‌کند، انطباق دارد [۲۵]. این رفتار رویه آسفالتی ساخته شده با سنگدانه‌های سخت را می‌توان به ایجاد بافت ریز بیشتر در هنگام خرد شدن سنگدانه‌های درشت نسبت داد، چراکه پاندول اصطکاکی نیز بیشتر در اندازه‌گیری اصطکاک، این نوع بافت را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. درخصوص مقاومت مارشال که در بسیاری از آئین‌نامه‌ها هم‌اکنون به‌عنوان مبنای طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود، نتایج مطالعات حاضر به افزایش مقاومت سنگدانه‌ها، مقاومت مخلوط آسفالتی نیز بهبود می‌یابد، که در مقایسه با نتایج عبدالرحمان و همکاران که نشان می‌دهد، بین سختی سنگدانه‌ها در آزمایش لس‌آنجلس، مقاومت مارشال وابستگی مستقیم در سطح

مخلوط حاوی سنگدانه سلیمانیت به طور معناداری در نتایج تحلیل عددی خرابی رویه آسفالتی مشاهده نشد. دلیل این امر می‌تواند نوع قفل‌شدگی انتخاب شده در مدل نرم‌افزاری و تفاوت آن با شرایط واقعی در آزمایشگاه باشد. در نتایج همچنین کرنش بحرانی در درصد قیر متوسط ۵/۲٪ کمترین مقدار را داراست، که این درصد قیر نزدیک به قیر بهینه در هر دو نوع سنگدانه است. بنابراین در مجموع می‌توان با اجرای مناسب اندودسطحی و استفاده از سنگدانه‌های درشت‌دانه سلیمانیت از اثر منفی این معیار خرابی مهم کاست.

می‌شود تأثیر نوع سنگدانه درشت‌دانه کمترین اثر و سپس درصد قیر در مخلوط آسفالتی و در نهایت اتصال لایه‌ها بیشترین تأثیر را بر کرنش کششی بحرانی دارد. همچنین مشاهده می‌شود، نوع سنگدانه‌ها بر عملکرد ترک‌خوردگی رویه آسفالت رویه به طور معنی‌داری تفاوت زیادی ندارند. هرچند سونگ و همکاران به نقش افزایش چگالی مخلوط آسفالتی و نقش آن در درگیری بین دو لایه و کاهش اثر خرابی به علت کاهش انتقال تنش برشی بین لایه‌ای در یک مطالعه آزمایشگاهی اشاره کرده‌اند [۲۷]، لیکن در این تحقیق اثرگذاری افزایش چگالی مخلوط آسفالتی در



شکل ۱۱- طرح فاکتوریل اثر سه متغیر همزمان جنس سنگدانه، درصد قیر و چسبندگی بین لایه‌ای بر کرنش بحرانی کششی

درصد قیر بهینه برای مصالح آهکی می‌باشد که می‌تواند باعث صرفه اقتصادی شود.

۲- وزن مخصوص مخلوط بتن آسفالتی ساخته شده با مصالح سلیمانیتی نسبت به نمونه‌های ساخته شده با مصالح آهکی در درصدهای مختلف قیر افزایش یافته و مقاومت مارشال مخلوط بتن آسفالتی ساخته شده با مصالح سلیمانیتی نسبت به مصالح آهکی در درصد قیر بهینه ۱۵٪ افزایش داشته است.

۳- مدول برجهندگی مخلوط بتن آسفالتی ساخته شده با مصالح سلیمانیتی ۲۵٪ نسبت به نمونه ساخته شده با مصالح آهکی افزایش یافته است.

۶- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مقاله، بررسی و تحلیل اثر استفاده از مصالح سنگی سلیمانیتی به جای مصالح آهکی برای رسیدن به مخلوط بتن آسفالتی با مقاومت بالاتر می‌باشد. پس از تعیین درصد قیر بهینه برای نمونه‌های بتن آسفالتی ساخته شده با مصالح سلیمانیتی و آهکی، نمونه‌ها تحت آزمایش مارشال، مدول برجهندگی و آونگ انگلیسی قرار گرفتند و در نهایت با مدل‌سازی عددی عملکرد انواع مخلوط‌های ساخته شده بررسی گردید. نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱- درصد قیر بهینه برای مخلوط بتن آسفالتی ساخته شده با مصالح سلیمانیتی ۸٪ کمتر از

عملکرد سطحی محدود گردید. استفاده از مصالح سیلیمانیتی برای مخلوط آسفالت درشت‌دانه و همچنین بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط بتن آسفالتی ساخته‌شده با مصالح سیلیمانیتی و همچنین اثر استفاده از این جنس سنگدانه به دلیل پایداری حرارتی بالا می‌تواند برای جلوگیری از ترک‌های حرارتی و برودتی مورد توجه محققان قرار گیرد.

۷- تقدیر و سپاسگزاری

نویسندگان مقاله لازم می‌دانند، از مسئولین معدن میشدوان بافق که با در اختیار قراردادن سنگدانه‌ها و نیز اطلاعات مرتبط با کانی‌شناسی و مشخصات نمونه‌های مصالح با این تحقیق همکاری نمودند سپاسگزاری شود. به ویژه از تلاش‌های جناب مهندس رحیمی که زمینه این همکاری را فراهم آوردند به‌طور ویژه تقدیر می‌گردد.

۴- استفاده از مصالح سیلیمانیتی در مخلوط بتن آسفالتی به دلیل سختی زیاد نسبت به مصالح آهکی می‌تواند باعث افزایش مقاومت رویه آسفالتی در برابر سایش ناشی از عبور بارهای ترافیکی شود.

۵- جنس سنگدانه درشت‌دانه کمترین تأثیر و سپس درصد قیر در مخلوط آسفالتی و در نهایت اتصال لایه‌ها بیشترین اثر را بر کرنش کششی بحرانی دارد.

۶- در تحلیل آماری مشخص شد، کرنش بحرانی در درصد قیر متوسط $0.5/2\%$ کمترین مقدار است، که این درصد قیر نزدیک به قیر بهینه در هر دو نوع سنگدانه است.

این مطالعه تنها به جایگزینی بخشی از درشت‌دانه از ضایعات معدنی سیلیمانتی و به بررسی مقاومت و

منابع

- [1] Bagampadde, U., Isacsson, U., & Kiggundu, B. M. (2006). "Impact of bitumen and aggregate composition on stripping in bituminous mixtures", *Materials and structures*, 39(3), 303-315..
- [2] Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., & Little, D. N. (2008). "Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms", *International Journal of Pavement Engineering*, 9(2), 81-98.
- [3] Vegvesen, S. (2014). Håndbok N200 Vegbygging. *Statens Vegvesen*.
- [4] Brattli, B. (1992). "The influence of geological factors on the mechanical properties of basic igneous rocks used as road surface aggregates", *Engineering Geology*, 33(1), 31-44.
- [5] Moghaddam, T. B., Soltani, M., & Karim, M. R. (2014). "Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test", *Materials & Design*, 53, 317-324.
- [6] Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A. R., Hamed, G. H., & Azarhoosh, M. J. (2012). "Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt", *Construction and Building Materials*, 31, 384-388.
- [7] Moghadas Nejad, F. M., Arabani, M., Hamed, G. H., & Azarhoosh, A. R. (2013). "Influence of using polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot mix asphalt", *Construction and Building Materials*, 47, 1523-1527.
- [8] Nålsund, R. & Jensen, V. (2013), "Influence of mineral grain size, grain size distribution and micro-cracks on rocks", mechanical strength, *14th Euro-seminar on Microscopy Applied to Building Materials, Helsingør, Denmark*, 1-10.
- [9] Anastasio, S. (2015), "Evaluation of the effect of aggregate mineralogy on the durability of asphalt pavements", Norwegian University of Science and Technology, dissertation, philosophies doctor, 1-124.
- [10] Chen, Y., Guo, D., & Sha, A. (2013). "Magnetic iron ore using as microwave-absorbing material for de-icing of asphalt pavement", *Min. Res. Dev.*, 33(1), 27-29.
- [11] Li, J., Xu, L. R., & Liu, X. M. (2011). "Research on character of asbestos tailing using as asphalt mixture aggregate", *J. Railway Sci. Eng.*, 5(8), 31-34.
- [12] Chen, Z., Wu, S., Wen, J., Zhao, M., Yi, M., & Wan, J. (2015). "Utilization of gneiss coarse aggregate and steel slag fine aggregate in asphalt mixture", *Construction and Building Materials*, 93, 911-918.
- [13] Anastasio, S., Fortes, A. P. P., & Hoff, I. (2017). "Effect of aggregate petrology on the durability of asphalt pavements", *Construction and Building Materials*, 146, 652-657.

- [14] Šernas, O., Vorobjovas, V., Šneideraitienė, L., & Vaitkus, A. (2016). "Evaluation of asphalt mix with dolomite aggregates for wearing layer", *Transportation Research Procedia*, 14, 732-737.
- [15] Oluwasola, E. A., Hainin, M. R., & Aziz, M. M. A. (2015). "Evaluation of rutting potential and skid resistance of hot mix asphalt incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailing r", *Indian J. Eng. Mater. Sci*, 22(5), 550-558.
- [16] Su, N., & Chen, J. S. (2002). "Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass", *Resources, Conservation and Recycling*, 35(4), 259-274.
- [17] Anthony, J.W. (2000). Handbook of mineralogy: Arsenates, phosphates, vanadate. Arsenates, phosphates, vanadates. Vol: 4, Mineral Data Pub.
- [18] Amer, R., & El-Desoky, H. (2017). "A remote sensing method for mapping sillimanite mineralization", *Journal of African Earth Sciences*, 134, 373-382.
- [19] Kohsari, A. H., & Mojtahedzadeh, D. A. Q. H. (2010). "Mineralogy and Formation of Refractory Deposits in Bafgh", *Central Iran, Journal of Mineralogy and Crystallography of Iran*, 2 (18), 255 - 266.
- [20] Shafabakhash. G.A., Naderpour, H., & Motamedi, M. (2018). "Optimal Pavement Response Modeling Using Finite Element Method", *Journal of Modeling Engineering*, 14(47), 33-40.
- [21] Masad, E., Rezaei, A., Chowdhury, A. & Harris, P. (2008). "Predicting Asphalt Mixture Skid Resistance Based On Aggregate Characteristics", *Department of Transportation and the Federal Highway*, FHWA/TX-09/0-5627-1, 266.
- [22] Shafabakhash.G. A., Kashi, A. (2009). "Numerical Study of the Impact of Passenger Aircraft Wheel Characteristics on Damage to Airport Pavement", *Transportation Engineering*, 1(1), 55-67.
- [23] Fakhri, M., Ghanizadeh, A. R. (2012). "Development of a Program for Nonlinear Analysis of Flexible Pavements", *Journal of Transportation Engineering*, 2(3), 245-257.
- [24] Yingjian, L. (2003), "Effect of Pavement Temperature on Frictional Properties of Hot-Mix-Asphalt Pavement Surfaces at the Virginia Smart Road", Master of Science Thesis, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, January, 1-184.
- [25] Bulevičius, M., Petkevičius, K., Žilionienė, K. & Drozdova, K. (2010), "Testing Of Physical-Mechanical Properties Of Coarse Aggregate, Used For Producing Asphalt Mixtures, And Analysis Of Test Results, Modern Building Materials", *Structures and Techniques 10th international conference*, Lative, 1094-1098.
- [26] Abdulrahman, S. & Al-Suhaibani, A. (2015), "Effect of Aggregate Properties on Asphalt Concrete Mixes", *JKAU: Eng. Sci*, 7, 93-110.
- [27] Song, W., Shu, X., Huang, B., & Woods, M. (2018). "Effects of asphalt mixture type on asphalt pavement interlayer shear properties", *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 144(2), 18-21.