

M. R. Keymanesh*

Faculty Member, Payame
Noor University (PNU), PO
Box: 19395-4697, Tehran,
Iran.

e-mail:

mrkeymanesh@pnu.ac.ir

M. R. Mohammad Aliha

Associate Professor, School
of Industrial Engineering,
Iran University of Science
and Engineering (IUST),
Tehran, Iran.

e-mail: mrm_aliha@iust.ac.ir

G. R. Mehdizadeh

PhD Student, Payame Noor
University (PNU), PO Box:
19395-4697, Tehran, Iran.

e-mail:

mehdizadeh@student.pnu.ac.ir

Evaluation of the Effect of Nano-Organosilane Zycotherm and Deviation of Aggregate Gradation on Asphalt Film Thickness and Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt

The durability of asphalt mixtures depends to a large extent on the asphalt film thickness. Stripping is the separation of the asphalt binder film from the aggregate surface due to the action and penetration of water. In this study, a gradation was prepared from basalt crushed aggregates. Then, by applying upper and lower allowable deviation tolerances to the fine aggregates of it, two gradations were produced. Nano-Organosilane Zycotherm was used as a liquid antistripping additive. The guidelines of the MS-2 Journal of the Asphalt Institute, NCHRP 567 report, Austroads and VicRoads reports were used to calculate the asphalt film thickness. Scanning Electronic Microscopy (SEM) was also used to show the asphalt film thickness of the three asphalt mixtures. The Marshall Stability Ratio and Indirect Tensile Strength Ratio tests according to AASHTO T283 were used to evaluate the moisture durability of asphalt mixtures. The results showed that the gradation changes in the fine aggregates caused a 12.9% decrease in asphalt film thickness in asphalt mixtures with upper allowable deviation tolerances and a 17.7% increase in asphalt film thickness in asphalt mixtures with lower allowable deviation tolerances, and these changes necessitate durability tests. Also, in the evaluation of moisture durability, all three asphalt mixtures were able to strip according to MSR and TSR indexes. Although Zycotherm had a positive effect on the MSR index of all three asphalt mixtures, according to the TSR index, the asphalt mixture with the lower allowable deviation tolerances was still able to stripe. Therefore, the moisture damage due to the gradation changes in this asphalt mixture is not improved by the Zycotherm additive.

Keywords: Allowable deviation tolerances, Asphalt film thickness, Marshall Stability Ratio, Indirect Tensile Strength Ratio, Moisture sensitivity.

* Corresponding author

Received 19 January 2022, Revised 15 May 2022, Accepted 09 June 2022.
DOI: 10.22091/cer.2022.7812.1355

ارزیابی تاثیر نانو ارگانوسیلان زایکوترم و تغییرات دانه بندی بر ضخامت غشای قیر و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت گرم

دوم مخلوط‌های آسفالتی تا حد زیادی به ضخامت غشای قیر بستگی دارد. عریان شدگی، جدا شدن پوشش قیر از روی سنگدانه‌ها به دلیل عملکرد آب و نفوذ به پیوند قیر و سنگدانه است. در این مطالعه از سنگدانه‌های بازالتی، دانه‌بندی حد وسط تهیه گردید و سپس با اعمال حدود رواداری در بخش ریزدانه، دو دانه‌بندی دیگر نیز از دانه‌بندی اصلی تهیه شد. از نانو ارگانوسیلان زایکوترم به عنوان افزودنی مایع ضدعریان شدگی استفاده شد. از دستورالعمل‌های نشریه MS-2 استانیتو آسفالت، گزارش‌های NCHRP 567 و Austroads VicRoads جهت محاسبه ضخامت غشای قیر، از میکروسکوپ الکترونی روبشی جهت تصویر از ضخامت غشای قیر و از آزمایش نسبت مقاومت مارشال (MSR) و آزمایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) براساس AASHTO T283 جهت ارزیابی دوم رطوبتی در هر سه مخلوط آسفالتی استفاده شد. نتایج نشان داد که تغییرات دانه‌بندی در بخش ریزدانه، باعث کاهش ۱۲/۹ درصدی ضخامت غشای قیر در مخلوط‌های آسفالتی دارای دانه‌بندی حد بالای ریزدانه و افزایش ۱۷/۷ درصدی ضخامت غشای قیر در مخلوط‌های آسفالتی دارای دانه‌بندی حد پایین ریزدانه شده است که این تغییرات لزوم انجام آزمایش‌های دوم را ضروری می‌سازد. همچنین در ارزیابی دوم رطوبتی، هر سه مخلوط آسفالتی با توجه به معیارهای TSR و MSR مستعد عریان شدگی بودند و استفاده از زایکوترم، هرچند تاثیر مثبتی در معیار MSR در هر سه مخلوط آسفالتی داشته است، اما با توجه به معیار TSR، مخلوط آسفالتی دارای دانه‌بندی حد پایین ریزدانه همچنان مستعد عریان شدگی بوده و بنابراین، زیان رطوبتی که ناشی از تغییرات دانه‌بندی در این مخلوط آسفالتی است، توسط افزودنی زایکوترم هم رفع نمی‌گردد.

وازگان کلیدی: حدود رواداری دانه‌بندی، ضخامت غشای قیر، نسبت مقاومت مارشال، نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی.

آخر اهمیت این موضوع را دوچندان نموده و نیاز به بهبود عملکرد مصالح استفاده شده در روسازی آسفالتی فعلی را ضروری می‌سازد [۲].

محققان در مورد تحقیقات زیادی انجام داده‌اند تا عملکرد قیر را در شرایط آب و هوایی و بارگذاری افزایش دهند و در این راستا، محققان توجه زیادی به استفاده از بسیاری از انواع نانومواد داشته‌اند [۳].

رفتار مکانیکی ماکروسکوپیک مخلوط‌های آسفالتی به شدت تحت تأثیر ریزساختار و ویژگی‌های فیزیکی در مقیاس میکرو و نانو قرار دارد [۴]. زایکوترم یک افزودنی نانو ارگانوسیلانی مایع و بی بو است که در ترکیب با قیر،

محمود رضا کی منش*

عضو هیات علمی دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران.
پست الکترونیک: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

محمد رضا محمدعلیها

دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

پست الکترونیک: mrm_alihai@iust.ac.ir

غلامرضا مهدیزاده

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران.

پست الکترونیک: mehdizadeh@student.pnu.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از اهداف اصلی در طراحی و ساخت روسازی‌های انعطاف‌پذیر، ارائه بالاترین عملکرد از نظر پایداری و دوم در شرایط مختلف است [۱]. افزایش حجم ترافیک، وسایل نقلیه بزرگ‌تر و سنگین‌تر، طراحی‌های جدید راه‌ها، فشار بیشتر تایرها به سطح روسازی و نیازهای زیست‌محیطی بالا در سیستم راه‌ها، در سال‌های

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۲۹، بازنگری ۱۴۰۱/۰۲/۲۵، پذیرش ۱۴۰۱/۰۳/۱۹.
DOI: 10.22091/cer.2022.7812.1355

آسفالتی دارای غشای قیر ضخیم‌تر باشد، مخلوط انعطاف پذیرتر و بادوام‌تر خواهد بود. هرچه غشای قیر نازک‌تر باشد، مخلوط آسفالت شکننده‌تر و مستعد ترک‌خوردن و از هم پاشیدن می‌گردد^[۱۵].

اگرچه بسیار بعيد است که تمام ذرات موجود در مخلوط‌های آسفالتی با ضخامت غشای قیر یکسان پوشانده شوند، اما فرض بر این است که این مفهوم معتبر است، حتی اگر هیچ نتیجه آزمایشی که از اتخاذ این خصوصیت، در سیستم‌های مشخصاتی پشتیبانی کند، وجود نداشته باشد. فقدان داده‌های تجربی برای پشتیبانی از این مفهوم عمدتاً به دلیل مشکلات اندازه‌گیری کمی غشای قیر در مقیاس میکرومتر است. با این حال، پیشرفت‌های اخیر در تجزیه و تحلیل میکروسکوپی باعث می‌شود که اندازه‌گیری ضخامت غشای قیر امکان پذیر باشد^[۱۶]. همچنین، نیاز به مدل‌های ساده و معقول و منطقی برای تخمین ضخامت غشای قیر در مخلوط‌های آسفالتی ضروری است^[۱۷].

هیتزمان مدل‌های جدیدی براساس توزیع مکانی تصادفی ذرات^[۱۸]، رادوفسکی^[۱۹]، لی و همکاران^[۲۰]، و پاندا و همکاران^[۲۱]، مدل‌هایی براساس روش‌های محاسباتی ریاضی، و السیفی و همکاران^[۱۶]، با استفاده از تکنیک‌های تحلیل میکروسکوپی، ضخامت غشای قیر را اندازه‌گیری کردند.

در سال‌های اخیر بسیاری از طراحی مخلوط‌های بتن آسفالتی، بر اساس دستیابی به مناسب‌ترین نسبت مقدار قیر به سطح جانبی سنگدانه‌ها (ضخامت بهینه غشای قیری) انجام شده‌اند^[۱۴]. چنانکه در طرح روسازی ممتاز، برای مخلوط‌های درشت‌دانه، استفاده از معیار ضخامت غشای قیر توصیه شده است^[۲۲]. بنابراین، ضخامت غشای قیر تشکیل شده اطراف سنگدانه‌ها در مخلوط‌های آسفالتی، یک مورد بسیار مهم و قابل توجه می‌باشد و با توجه به اینکه به مساحت سطح سنگدانه‌های به کار رفته در مخلوط آسفالتی وابسته است،

گروههای سیلانول (Si-OH) را تشکیل می‌دهد^[۵]، و به عنوان یک عامل ضدعیانشدنی مبتنی بر سیلان، به طور قابل توجهی مقاومت در برابر آسیب رطوبتی مخلوط آسفالت‌گرم را با ایجاد یک لایه آبرگزیز بر روی سطح سنگدانه‌ها بهبود می‌بخشد^[۶]. این امر به دلیل پیوند شیمیابی قوی بین قیر و سنگدانه‌ها رخ می‌دهد. پیوند شیمیابی دائمی ایجاد شده بین قیر و سنگدانه‌ها از جدا شدن قیر از سطح سنگدانه‌های آسفالت جلوگیری کرده و منجر به عملکرد عالی آسفالت در برابر پدیده عریان‌شدگی می‌شود^{[۷] و [۸]}.

عریان‌شدگی و سایر خرابی‌های زودرس ناشی از این پدیده می‌توانند به تدریج یا به سرعت حادث شده و سبب افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی آسفالتی شوند^[۹]. پیوند چسبندگی سنگدانه‌قیر عاملی حیاتی است که بر مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر آسیب‌های رطوبتی تأثیر می‌گذارد^[۱۰]. به طور کلی، استحکام اتصال قیر به سطح سنگدانه‌ها با خواص فیزیکی و شیمیابی آنها ارتباط دارد و در صورت نفوذ رطوبت به این سیستم، عمر اتصال کاهش می‌یابد^[۱۱]. روسازی‌های ساخته شده با سنگدانه‌های آبدوست، به دلیل تمایل بیشتر این نوع سنگدانه‌ها به جذب آب به جای جذب قیر، به شدت در برابر رطوبت آسیب پذیر هستند^[۱۲].

ویژگی‌های طراحی مخلوط از قبیل درصد فضای خالی، میزان قیر و ضخامت غشای قیر تشکیل شده در اطراف سنگدانه‌ها نیز از جمله مواردی است که باید با دقت مورد بررسی قرار گیرد^[۱۳]. کارایی نامناسب برخی مخلوط‌های بتن آسفالتی که بر اساس معیارهای تجربی و حجمی طراحی می‌شوند، باعث شده تا پژوهشگران ضخامت غشای قیر را نیز در ارزیابی دوام و کارآیی مخلوط‌های آسفالتی مؤثر بدانند^[۱۴]. مخلوط‌هایی که دارای غشای قیر ضخیم در اطراف سنگدانه‌ها می‌باشند، نسبت به مخلوط‌های دارای غشای قیر نازک، کمتر مستعد ابتلا به آسیب رطوبتی و عریان‌شدگی هستند^[۱۳]. همچنین از لحاظ عملکردی، هرچه مخلوط

وانگ [۳۰]، رفتار اتصال سنگدانه‌ها را با توجه به تاثیر ضخامت غشای قیر ایجاد شده در اطراف آن‌ها، با مدلسازی رفتار میکرومکانیکی مخلوط آسفالتی و با استفاده از توموگرافی اشعه ایکس بررسی کرد و نشان داد که هماهنگی معقول و منطقی بین نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی شده از مدل بدست آمده است.

کندال و چاکرابورتی [۳۱]، اثر ضخامت غشای قیر اطراف سنگدانه‌ها را بر پیری کوتاه‌مدت و بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی مورد مطالعه قرار دادند و مشخص نمودند که در ضخامت غشای قیر کمتر از ۹ تا ۱۰ میکرومتر، پیری قابل توجه و سریعی رخ می‌دهد.

در تحقیقی دیگر، نتایج نشان داده که ضخامت متوسط غشای قیر در مخلوط‌های آسفالت در حدود ۹ تا ۱۱ میکرومتر برای همه سنگدانه‌ها است و توصیه شده تا با کاهش درصد ذرات بسیار ریز، سطح کل مخلوط را کاهش داده که این امر باعث می‌شود ضخامت غشای قیر بزرگ‌تر و مقاومت در برابر عریان‌شدگی بیشتر شود [۳۲].

کامپن و همکاران [۳۳]، نشان دادند که غشاها قیر ضخیم، مخلوط‌هایی را ایجاد می‌کنند که انعطاف‌پذیر و بادوام می‌باشند، در حالی که غشاها قیر نازک، مخلوط‌هایی ترد و شکننده، دارای تمایل به ترک‌خوردن و شکن‌شدن بیش از حد را تولید می‌کنند که باعث کاهش عملکرد و کاهش عمر مفید آن می‌گردد.

تحقیقاتی نیز، ارتباط سخت شدن قیر در مخلوط آسفالتی را ارزیابی نمودند و نشان دادند که برای پیش‌بینی مقاومت سخت‌شدن قیر در مخلوط‌های آسفالتی، محاسبه فاکتور ضخامت غشای قیر نسبت به نفوذپذیری، بهترین روش است [۳۴ و ۳۵].

کندال و همکاران [۳۶]، نشان دادند که رویکرد استفاده از حداقل ضخامت غشای قیر در طراحی مخلوط آسفالتی، یک روش مستقیم و مناسب‌تر برای اطمینان از دوام مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهد.

با توجه به موارد بیان شده، این پژوهش به منظور دستیابی به دو هدف انجام پذیرفت. نخست آنکه تاثیر

اهمیت و تاثیر نوع دانه‌بندی مخلوط آسفالتی و همچنین تغییرات در دانه‌بندی را دوچندان می‌کند.

دانه‌بندی مهمترین خاصیت سنگدانه‌ها می‌باشد که تقریباً تمام خصوصیات مهم مخلوط آسفالت‌گرم از جمله سفتی، استحکام، دوام، نفوذپذیری، کارایی، مقاومت در برابر خستگی، مقاومت در برابر شکست و مقاومت در برابر آسیب رطوبتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۳].

هر گونه تغییر در دانه‌بندی مخلوط آسفالتی، به هر دلیلی، می‌تواند تغییر در مشخصات فنی مخلوط آسفالت را ایجاد کند [۲۴]. آیین‌نامه‌های راهسازی و روسازی راه‌های ایران، میزان مجاز تغییرات و عدم انطباق با دانه‌بندی فرمول کارگاه را تعیین نموده‌اند که به عنوان حدود رواداری دانه‌بندی ذکر شده است [۲۵ و ۲۶]. بدیهی است که از دیدگاه آیین‌نامه‌ها، تغییرات دانه‌بندی در حد مجاز رواداری، مورد تایید می‌باشد، اما از دیدگاه پژوهشی، سایر مشخصات فنی چنین مخلوط آسفالتی نیاز به بررسی و ارزیابی دارد.

هایدر و همکاران با توجه به مشخصات فنی بخش حمل و نقل جاده‌ای و بزرگراه‌ها (MORTH) در هند، به این نتیجه رسیدند که تغییرات مجاز (در حد حدود رواداری) دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی بر تغییر شکل خرزشی مخلوط‌های آسفالتی موثر می‌باشد [۲۷].

سنگسفیدی و همکاران، در مطالعه‌ای با هدف اصلی تعیین تأثیر دانه‌بندی بر عملکرد مخلوط آسفالت‌گرم به این نتیجه رسیدند که برخلاف تصور عمومی، مخلوط آسفالتی تهیه شده با حد وسط دانه‌بندی دارای بهترین پارامترهای مقاومتی نمی‌باشد [۲۸].

آتیا و همکاران [۲۹]، با استفاده از محاسبه سطح سنگدانه‌ها، ضخامت غشای قیر را با استفاده از فرمول‌های مختلف محاسبه نمودند و نشان دادند که توانایی ضخامت غشای قیر برای توضیح خرایی‌های عملکردی خاص به روش محاسبه ضخامت غشای قیر بستگی دارد.

² Ministry Of Road Transport and Highways

ستون چهارم جدول ۱-۹ آینینامه روسازی راههای ایران [۲۵]، براساس استاندارد ASTM D3515 [۳۷]، منحنی دانه‌بندی فرمول کارگاه مورد استفاده در تهیه طرح اختلاط مخلوط آسفالتی، به شرح شکل شماره ۱-الف می‌باشد. منحنی دانه‌بندی مورد استفاده جهت تولید مخلوط آسفالت با حد بالای بخش ریزدانه در شکل شماره ۱-ب و منحنی دانه‌بندی مورد استفاده جهت تولید مخلوط آسفالت با حد پایین ریزدانه در شکل ۱-پ نشان داده شده است. قیر مورد استفاده در این تحقیق از نوع قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ بوده است.

شکل ۲، نمای دانه‌بندی‌های بیان شده را به تفکیک در محیط آزمایشگاه نشان می‌دهد. به عنوان مثال، مقدار مربوط به سنگدانه‌های $0/3$ -۰ میلیمتر در شکل‌ها قابل توجه است.

۲-۲- نانوارگانوسيلان زایکوترم

خواص فیزیکی افزودنی زایکوترم در جدول ۱ نشان داده شده است [۵]. جهت استفاده این نانوماده در تولید آسفالت گرم، باید زایکوترم را قبل از اختلاط با سنگدانه، به قیر اضافه کرد و مصرف آن بستگی به نوع قیر و نوع سنگدانه دارد که از $0/0.5$ تا $0/0.2$ درصد نسبت به وزن قیر، متغیر است [۷]. در این تحقیق از مقدار $0/15$ درصد نسبت به وزن قیر، استفاده شد

۳-۲- طرح اختلاط

در این تحقیق از روش طرح اختلاط مارشال براساس استاندارد ASTM D1559 [۳۸]، برای مخلوط آسفالتی استفاده شد. مقدار درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی، برابر $4/9$ درصد نسبت به وزن مخلوط آسفالتی بდست آمد. درصد جذب قیر به مصالح سنگی نیز برابر $0/41$ محاسبه گردید. بنابراین، بر اساس طرح اختلاط، کلیه مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده جهت این تحقیق، با همین درصد قیر، در دمای 155 تا 160 درجه

تغییرات مجاز در درصد عبوری بخش ریزدانه سنگدانه در الکهای شماره ۸، 16 و 50 (حد بالا و حد پایین رواداری راههای سنتگدانه‌ها، ذکر شده در آینینامه‌های مرتبط با روسازی راههای ایران) بر ضخامت غشای قیر اطراف سنتگدانه‌های مخلوط آسفالتی و بر مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی تعیین گردید و سپس، تاثیر استفاده از نانوماده ارگانوسيلان زایکوترم نیز در همان مخلوط‌های آسفالتی بررسی گردید تا مشخص گردد که اگر تغییرات دانه‌بندی باعث تغییر در ضخامت غشای قیر و کاهش مقاومت در برابر رطوبت می‌گردد، استفاده از نانوماده زایکوترم چه تاثیری می‌تواند بر آن داشته باشد.

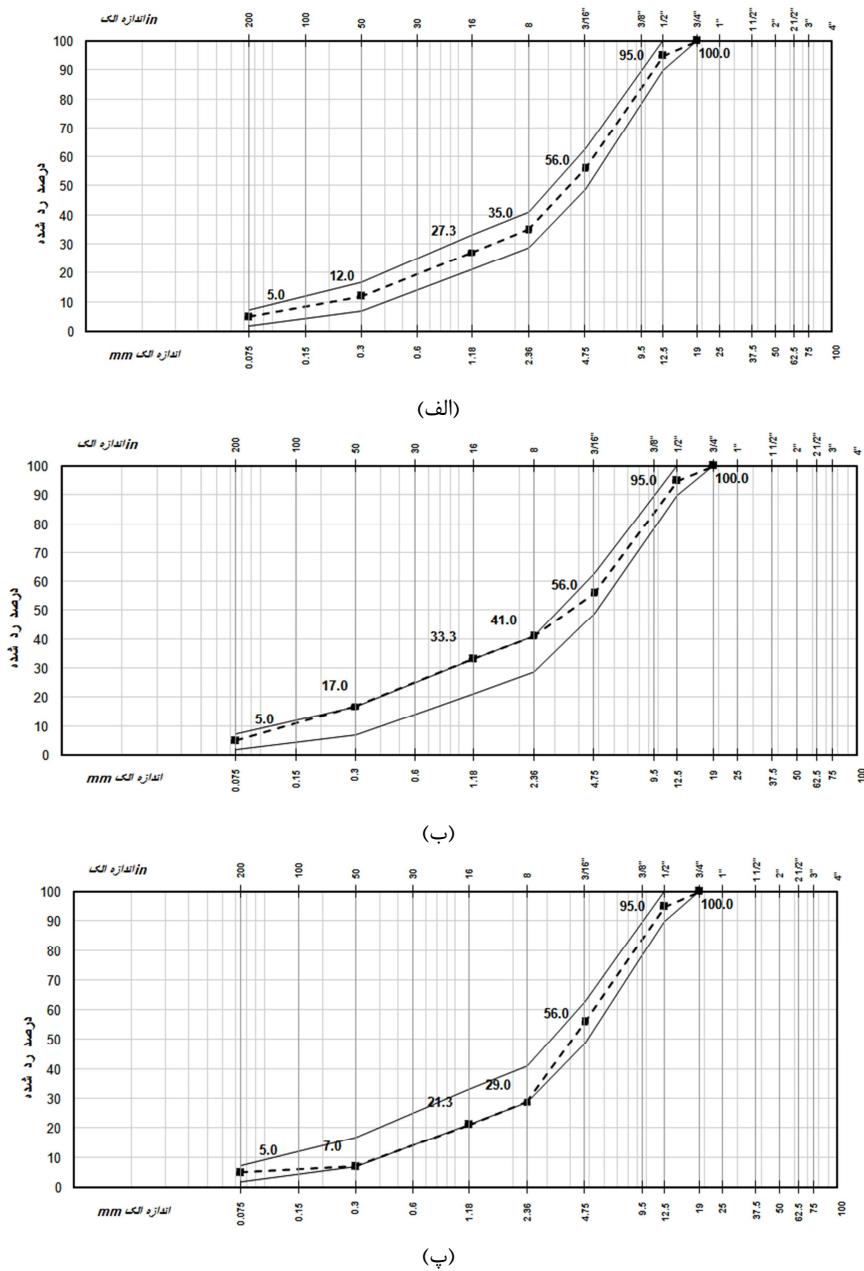
لازم به ذکر است که در این تحقیق، موضوعی که مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است، بسیار کاربردی بوده و یک ایراد اساسی که در آینینامه‌های مربوط به روسازی راههای کشور و در شرایط پژوهش‌های اجرایی کشورمان وجود دارد را به چالش کشیده است. چون عموماً در پژوهش‌های اجرایی روسازی‌های آسفالتی، یک طرح اختلاط مخلوط آسفالت‌گرم توسط ارکان فنی که مجری پژوهش می‌باشند، تهیه شده و بر مبنای آن روسازی راه و یا آزادراه انجام می‌پذیرد و در صورتیکه تغییرات دانه‌بندی‌ای که در حد مجاز آینینامه است، حین تولید و اجرای مخلوط آسفالتی ایجاد شده باشد، این تغییرات مورد تایید ارکان فنی پژوهش‌ها می‌باشد. چون در بازه حدود رواداری مورد تایید آینینامه‌های مربوطه می‌باشد. بنابراین، نتایج این پژوهش می‌تواند کمک شایانی به سازمان‌ها، نهادها، مشاورین و پیمانکاران حوزه راه و ترابری ارائه نماید.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق از نوع بازالت و متعلق به معدن صفرآباد قم بوده که با توجه به نتایج حاصل از دانه‌بندی مصالح سنگی و با استفاده از

سانتیگراد ساخته شده و در دمای ۱۴۵ درجه سانتیگراد متراکم شدند.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی (الف) حد وسط، (ب) حد بالا و (پ) حد پایین مخلوط مصالح سنگی.



شکل ۲- دانه‌بندی (الف) حد پایین، (ب) حد وسط، (ج) حد بالا در مخلوط سنگدانه‌ها

جدول ۱- خواص فیزیکی نانوگانوسیلان زایکوترم [۵].

نتیجه	مشخصه
۱/۰۱	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتیگراد (gr/mlit)
مایع	شكل
زرد کمرنگ	رنگ
> ۸۰	نقطه اشتغال °C
-۵	نقطه انجماد °C
۵۰۰۰-۱۰۰۰	ویسکوزیته mPa/sec
مقدار ۱۰ درصد محلول در آب خنثی یا کمی اسیدی است	PH
قابل اختلاط با آب	حالیت در آب

که در آن SST برابر مساحت سطح (m^2/kg), P_b برابر

درصد قیر و P_{be} برابر مقدار قیر موثر می‌باشد.

جدول ۲- فاکتور مساحت سطح [۳۹].

فاکتور مساحت سطح	اندازه الک (میلیمتر)
۰/۴۱	۱۹
۰/۴۱	۱۲/۵
۰/۴۱	۹/۵
۰/۴۱	۴/۷۵
۰/۸۲	۲/۳۶
۱/۶۴	۱/۱۸
۲/۸۷	۰/۶
۶/۱۴	۰/۳
۱۲/۲۹	۰/۱۵
۳۲/۷۷	۰/۰۷۵

۲-۱-۳- محاسبه مساحت سطح و تعیین ضخامت غشای

NCHRP 567

روش‌های ارائه شده در گزارش NCHRP^۳ 567 [۴۰]، برای تهیه مقادیر مطابق با مقادیر سطح ویژه مرسوم برای سنگدانه‌ها طراحی شده است. یک روش بسیار آسان و دقیق برای برآورد سطح ویژه سنگدانه‌ها، در رابطه (۲) نشان داده شده است [۴۰]:

$$S_s = \frac{P_{0.3} + P_{0.15} + P_{0.075}}{5} \quad (2)$$

یک محاسبه دقیق‌تر که نیاز به محاسبه سهم هر بخش از اندازه ذرات به کل سطح ویژه سنگدانه‌ها دارد، از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد [۴۰]:

۳- روش تحقیق

۳-۱- تعیین مساحت سطح و ضخامت غشای قیر

مساحت سطح سنگدانه‌ها یکی از خصوصیات دانه‌بندی بوده و با توجه به این که بر مقدار قیر مورد نیاز برای پوشاندن سنگدانه‌ها تاثیر می‌گذارد، دارای اهمیت بالایی است. افزایش سطح سنگدانه‌ها و کاهش مقدار قیر بهینه، ضخامت غشای قیر روی سطح سنگدانه‌ها را کاهش می‌دهد.

۱-۱-۳- محاسبه مساحت سطح و تعیین ضخامت غشای قیر براساس نشریه MS-2 انستیتو آسفالت

براساس نشریه MS-2 انستیتو آسفالت [۳۹]، دانه‌بندی سنگدانه‌ها برای محاسبه مساحت سطح کل سنگدانه‌ها استفاده می‌شود. این محاسبه شامل حاصل ضرب درصد کل عبوری از هر الک، در فاکتور مساحت سطح مربوط به آن الک، بدست می‌آید. فاکتورهای مساحت سطح در جدول (۲) ارایه شده است. حاصل جمع این حاصل ضرب ها، کل مساحت سطح معادل نمونه را بر حسب مترمربع بر کیلوگرم نمایندگی خواهد کرد. این فاکتورهای مساحت سطح، شکل خاص مصالح را در نظر نمی‌گیرند، بلکه فقط عنوان یک فاکتور ضمیمه هستند. براساس مقدار مساحت سطح محاسبه شده، ضخامت غشای قیری براساس نشریه MS-2 انستیتو آسفالت، از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد [۳۹]:

$$Fbe = \frac{981 * Pbe}{SST * (100 - Pb)} \quad (1)$$

^۳ National Cooperative Highway Research Program

۲/۹ تن در مترمکعب باشد. در این فرمول مساحت سطح سنگدانه‌ها از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد:

$$C = (2 + 0.02a + 0.04b + 0.08c + 0.14d + 0.30e + 0.60f + 1.60g) \times 0.2048 \quad (6)$$

که در آن a درصد عبوری از الک نمره ۴، b درصد عبوری از الک نمره ۸، c درصد عبوری از الک نمره ۱۶، d درصد عبوری از الک نمره ۳۰، e درصد عبوری از الک نمره ۵۰، f درصد عبوری از الک نمره ۱۰۰ و g درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ می‌باشد.

۴-۱-۳- محاسبه مساحت سطح و تعیین ضخامت غشای قیر براساس VicRoads

رابطه (۷) در سال ۱۹۷۶ توسط VicRoads برای محاسبه ضخامت غشای قیر استفاده شده و عبارت است از:

$$F = \frac{Q_{EB} \times 47.67}{B} \quad (7)$$

که در آن B به عنوان مساحت سطح از رابطه (۸) محاسبه می‌گردد:

$$B = (2 + 0.02a + 0.04b + 0.08c + 0.14d + 0.30e + 0.60f + 1.60g) \quad (8)$$

که پارامترهای a تا g مشابه پارامترهای رابطه (۶) می‌باشد.

۲-۳- نسبت متوسط مقاومت نمونه‌های اشباع و خشک مارشال MSR

با استفاده از روش مارشال^۴ و استاندارد ASTM D1559 نمونه‌های متراکم مارشال برای مخلوط‌های آسفالتی تهیه شده و سپس براساس مفad آبین‌نامه روسازی راه‌های ایران و نشریه شماره ۱۰۱ سازمان برنامه و بودجه، نسبت متوسط مقاومت سه نمونه آزمایشگاهی مارشال که ۲۴ ساعت در شرایط مستغرق در داخل آب 60 ± 1 درجه سانتیگراد قرار گرفته باشند (MS_{cond})، به

$$S_s = \left(\frac{1}{1000 G_{sb}} \right) [1.4(P_{50} - P_{37.5}) + 2.0(P_{37.5} - P_{25}) + 2.8(P_{25} - P_{19.5}) + 3.9(P_{19.5} - P_{12.5}) + 5.5(P_{12.5} - P_{9.5}) + 8.9(P_{9.5} - P_{4.75}) + 17.9(P_{4.75} - P_{2.36}) + 36(P_{2.36} - P_{1.18}) + 71.3(P_{1.18} - P_{0.60}) + 141(P_{0.6} - P_{0.3}) + 283(P_{0.3} - P_{0.15}) + 566(P_{0.15} - P_{0.075}) + 1600(P_{0.075})] \quad (3)$$

که در آن P_s ها نمایانگر درصد عبور از اندازه هر الک در میلی‌متر و G_{sb} برابر وزن مخصوص واقعی کل سنگدانه‌ها با واحد (kg/m^3) است.

براساس مفad NCHRP 567 ضخامت غشای قیر را می‌توان با استفاده از رابطه (۴) محاسبه کرد:[۴۰]

$$AFT = \frac{1000VBE}{S_s P_s G_{mb}} \quad (4)$$

که در آن AFT برابر ضخامت غشای قیر، VBE برابر درصد قیر موثر، S_s برابر سطح مخصوص سنگدانه‌ها با واحد (m^2/kg), P_s برابر درصد سنگدانه‌های مخلوط و G_{mb} برابر وزن مخصوص قیر با واحد (t/m^3) در ۲۵ درجه سانتیگراد می‌باشد.

۳-۱-۳- محاسبه مساحت سطح و تعیین ضخامت غشای قیر براساس Austroads

رابطه (۵) که در راهنمای Austroads برای محاسبه ضخامت غشای قیر استفاده شده است و در این راهنمای به نام شاخص غشای قیر ذکر شده عبارتست از:

$$FI = \frac{Q_{EB}}{100 - Q_{BIT}} \times \frac{1}{C} \times \frac{1000}{\rho_{BIT}} \quad (5)$$

که در آن FI برابر شاخص غشای قیر با واحد میکرومتر، Q_{BIT} برابر درصد قیر موثر، Q_{EB} برابر درصد قیر موجود در مخلوط آسفالت، C برابر مساحت سطح مخلوط سنگدانه‌ها با واحد (m^2/kg) و ρ_{BIT} برابر وزن مخصوص قیر با واحد (t/m^3) در ۲۵ درجه سانتیگراد می‌باشد.

این فرمول زمانی اعمال می‌شود که وزن مخصوص ظاهری ترکیب سنگدانه‌های معدنی در محدوده ۲/۴ تا

⁴ Marshall Stability Ratio

مدت ۱۶ ساعت در فریزر با دمای ۱۸- درجه سانتی گراد و در ادامه به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد نگهداری می شوند. بقیه نمونه ها در شرایط خشک نگهداری می شوند. همه نمونه ها به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار داده شده و سپس آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم بر روی نمونه ها انجام می شود. مقدار کشش غیر مستقیم از رابطه (۱۰) به دست می آید [۴۲]:

$$S = \frac{2P}{\pi D t} \quad (10)$$

که در آن، P حداکثر مقدار بار عمودی وارد، D قطر نمونه و t ضخامت نمونه می باشد. نسبت مقاومت کششی با استفاده از رابطه (۱۱) به دست می آید [۴۲]:

$$TSR = \frac{S_{cond}}{S_{uncond}} \times 100 \quad (11)$$

که در آن، S_{cond} میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه های تحت شرایط مرطوب قرار گرفته و S_{uncond} میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه های خشک می باشد [۴۲].

براساس آیین نامه روسازی راه های ایران و نشریه شماره ۱۰۱ سازمان برنامه و بودجه، این نسبت نباید از ۷۵ درصد کمتر باشد [۲۵ و ۲۶].

۴- تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM)

روش تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونیکی روبشی^۶، یکی از ابزارهای مفید برای تصویربرداری از سطوح با وضوح بالا است که مورد استفاده قرار می گیرد و تاکنون نیز برای مشخص نمودن نانومواد و نانوساختارها در اختلاط با قیر استفاده شده است [۴۳]. در این تحقیق، به منظور نشان دادن شرایط ضخامت غشای قیر تشکیل شده در اطراف سنگدانه های مخلوط های آسفالتی با

متوسط مقاومت سه نمونه دیگر که ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در داخل آب 60 ± 1 درجه سانتیگراد نگهداری شوند (MS_{uncond})، به عنوان یکی از پارامترهای دوام مخلوط های آسفالتی در برابر آب، براساس رابطه (۹) تعیین می گردد [۲۵ و ۲۶]:

$$MSR = \frac{MS_{cond}}{MS_{uncond}} \times 100 \quad (9)$$

براساس آیین نامه های مذکور، این نسبت نباید از ۷۵ درصد کمتر باشد [۲۵ و ۲۶].

۳-۳- آزمایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم TSR

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم^۵ براساس استاندارد AASHTO T283 [۴۲]. جهت تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط های گرم آسفالتی استفاده می شود. این آزمایش متداول ترین آزمایشی است که برای بررسی مقاومت مخلوط های آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی و نیز برای بررسی تاثیر مواد ضد عریان شدگی به کار می رود. در این آزمایش، مواد کافی برای تولید حداقل ۶ نمونه مخلوط آسفالت گرم، در درصد قیر بهینه مشخص شده، با استفاده از روش مارشال و استاندارد ASTM D1559، با هم مخلوط می شوند. سپس مخلوط آسفالتی تهیه شده درون ظرفهایی ریخته شده و به مدت 2 ± 0.5 ساعت در دمای محیط خنک می شوند. این نمونه های آسفالتی نامتراکم به مدت 1 ± 0.5 ساعت، درون آون در دمای 60°C قرار داده می شوند. قبل از متراکم کردن، نمونه های آسفالتی به مدت ۲ ساعت، درون آون در دمای تراکم قرار داده می شوند. پس از آن نمونه ها، با درصد حفرات هوای 7 ± 1 متراتکم می شوند. نمونه های متراتکم به دو گروه نمونه های خشک و نمونه های تحت شرایط عمل آوری تقسیم می شوند. سپس نمونه هایی که تعیین شده اند تا تحت شرایط عمل آوری قرار گیرند را، تحت شرایط خلا، در دستگاه دسیکاتور قرار داده تا به میزان ۵۵ تا ۸۰ درصد از آب اشباع شوند. نمونه های اشباع شده به

⁵ Tensile Strength Ratio

⁶ Scanning Electronic Microscopy

مخلوط آسفالتی دارای دانه‌بندی حد وسط، مخلوط نرمال و به عبارتی مخلوط آسفالتی اصلی این تحقیق است که طرح اختلاط نیز، براساس دانه‌بندی سنگدانه‌های آن تهیه شده است. مخلوط آسفالتی دارای دانه‌بندی حد بالای ریزدانه، با تغییردادن بخش ریزدانه سنگدانه‌های دانه‌بندی اصلی، به میزان حد بالای رواداری مجاز، طبق آیین‌نامه، بدست آمده است. همچنین، مخلوط آسفالتی دارای دانه‌بندی حد پایین ریزدانه، با تغییردادن بخش ریزدانه سنگدانه‌های دانه‌بندی اصلی، به حد پایین رواداری مجاز، طبق آیین‌نامه، بدست آمده است.

ذکر این نکته نیز ضروری است که، وزن سنگدانه‌ها در هر سه مخلوط آسفالتی یکسان است. وزن قیر مورد استفاده در هر سه مخلوط آسفالتی نیز یکسان است.

دانه‌بندی‌های متفاوت و نیز، در مخلوط‌های حاوی و فاقد زایکوترم، این روش تصویربرداری، مورد استفاده قرار گرفت. البته در استفاده از این روش جهت تصویربرداری از مخلوط‌های آسفالتی، شرایط دستگاه آزمایش، که می‌تواند حداکثر نمونه‌های با سطح مدور به قطر ۲ سانتیمتر و با ضخامت حداکثر ۱ سانتیمتر را بررسی کند، از محدودیت‌ها بود.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مساحت سطح و تعیین غشای قیر

جدول (۳)، نتایج مربوط به تعیین مساحت سطح و ضخامت غشای قیر را برای هر سه مخلوط آسفالتی و با هر چهار روش محاسبه ذکر شده، نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج مربوط به محاسبات سطح ویژه سنگدانه و غشای قیر.

میانگین ضخامت غشای قیر محاسبه شده (μm)	VicRoads روش	Austroads روش	NCHRP روش				روش انسٹیتو آسفالت				نوع دانه بندی مخلوط
			NCHRP دقیق	روش NCHRP ساده	روش NCHRP ساده	روش NCHRP ساده	روش NCHRP ساده	روش NCHRP ساده	روش NCHRP ساده	روش NCHRP ساده	
۶/۸۴۴	۷/۹۶۵	۲۶/۹۹۴	۸/۴۴۳	۵/۵۲۸	۹/۰۹۵	۵/۱۲۳	۸/۶۴۴	۵/۴	۷/۴۷۶	۶/۲۲۳	دانه بندی با حد بالای ریزدانه
۷/۸۴۹	۸/۹۴۶	۲۴/۰۳۴	۹/۴۸۳	۴/۹۲۲	۱۰/۱۲۶	۴/۶۱۰	۱۰/۶۰۹	۴/۴	۸/۲۸۳	۵/۶۱۷	دانه بندی نرمال حد وسط
۹/۲۴۱	۱۰/۱۸۳	۲۱/۱۱۴	۱۰/۷۹۵	۴/۳۲۴	۱۱/۴۰۶	۴/۰۹۲	۱۳/۷۲۹	۳/۴	۹/۲۷۰	۵/۰۱۹	دانه بندی با حد پایین ریزدانه

۱۲/۹ درصدی ضخامت غشای قیر را نشان می‌دهد. همچنین، مخلوط آسفالتی تهیه شده از دانه‌بندی با حد پایین ریزدانه، به سبب کاهش ذرات ریزدانه و افزایش ذرات درشت‌دانه در دانه‌بندی آن، مساحت سطح سنگدانه کمتری داشته که باعث افزایش ضخامت غشای قیر در اطراف سنگدانه‌ها می‌گردد. در این حالت، ضخامت غشای قیر از ۷/۸۵ میکرومتر به ۹/۲۴ میکرومتر افزایش یافته که

بنابراین، هنگامی که دانه‌بندی در بخش ریزدانه، به سمت حد بالای خود میل می‌کند، مجموع سنگدانه‌ها، دارای ذرات ریزتر بیشتری می‌شود که سبب افزایش مساحت سطح سنگدانه‌ها شده و در نتیجه ضخامت غشای قیر، یا میزان پوشش قیر در اطراف سنگدانه‌ها، کاهش می‌یابد. در این حالت، ضخامت غشای قیر از ۷/۸۵ میکرومتر به ۶/۸۴ میکرومتر کاهش یافته که کاهش

آسفالت‌گرم با مقادیر ضخامت غشای قیر بیشتر از ۹ میکرومتر تولید گردد، مستعد ابتلا به شیارشده‌گی بیش از حد است [۴۰].

به نظر می‌رسد مقادیر ضخامت غشای قیر در محدوده ۷ تا ۹ میکرومتر، بهترین سازش بین کارایی و دوام را فراهم می‌کنند و باید از مقادیر ضخامت غشای قیر پایین‌تر از ۶ میکرومتر یا بالاتر از ۱۰ میکرومتر اجتناب شود [۴۴].

بحث بالا نشان می‌دهد که ضخامت غشای قیر می‌تواند یک ابزار مفید برای طراحی و تجزیه و تحلیل مخلوط‌های بتن آسفالتی باشد. اگرچه ضخامت غشای قیر یک مفهوم بالقوه مفید است، اما روابط بین ضخامت غشای قیر و عملکرد مخلوط آسفالتی در بهترین حالت غیرمستقیم است.

۲-۴- نسبت مقاومت مارشال (MSR)

نتایج بدست آمده از آزمایش استحکام مارشال برای هر سه مخلوط آسفالتی در دو حالت خشک و اشباع، به همراه نسبت مقاومت مارشال محاسبه شده برای مخلوط‌های آسفالتی، به تغییک نمونه‌های حاوی نانوارگانوسیلان زایکوتروم و نمونه‌هایی که فقط حاوی قیر خالص هستند، در جدول (۴)، نشان داده شده است.

افزایش ۱۷/۷ درصدی ضخامت غشای قیر را نشان می‌دهد.

نتایج بدست آمده از روش‌های محاسباتی مختلف، مشخص می‌کند که مخلوط آسفالتی تهیه شده از دانه‌بندی با حد بالای ریزدانه، نسبت به مخلوط آسفالتی دارای دانه‌بندی حد وسط، دارای مساحت سطح سنگدانه بیشتر و ضخامت غشای قیر کمتری می‌باشد. به همین ترتیب، مخلوط آسفالتی تهیه شده از دانه‌بندی با حد پایین ریزدانه، دارای مساحت سطح سنگدانه کمتر و ضخامت غشای قیر بیشتری می‌باشد.

روابط بین ضخامت غشای قیر و عملکرد مخلوط آسفالت‌گرم به علت ارتباط غیرمستقیم آن‌ها، چندان ساده نیست. با افزایش مساحت سطح سنگدانه‌ها، نفوذپذیری مخلوط آسفالت‌گرم به علت کاهش درصد فضای خالی در مخلوط، کاهش می‌یابد. بنابراین، در یک مقدار ثابت از درصد فضای خالی نمونه آسفالت متراکم شده، هنگامی که ضخامت غشای قیر کاهش یابد (مخلوط آسفالت ریزدانه‌تر باشد)، نفوذپذیری کاهش می‌یابد [۴۰].

محدهدهای مختلفی برای حداقل ضخامت غشای قیر (از زمان ارائه این مفهوم برای اولین بار)، پیشنهاد شده است. مخلوط‌های آسفالتی با ضخامت غشای قیر کمتر از ۶ تا ۷ میکرومتر، برای اجرا و متراکم سازی مناسب، با مشکلاتی همراه می‌باشند [۴۴]. اگر مخلوط

جدول ۴: نتایج آزمایش استحکام مارشال و نسبت استحکام برای مخلوط‌های آسفالتی.

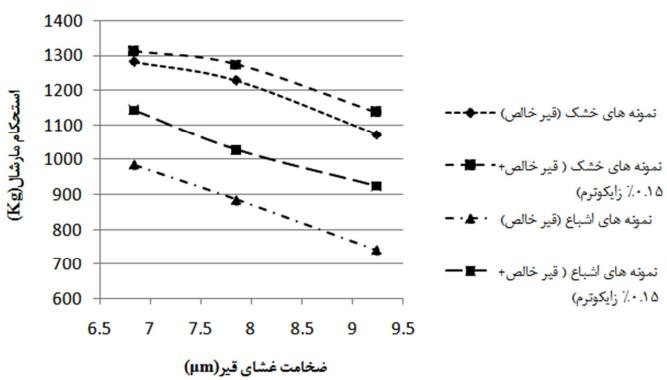
نسبت مقاومت مارشال	مخلوط تهیه شده با قیر خالص و ۰/۱۵ درصد زایکوتروم			مخلوط تهیه شده با قیر خالص			نوع دانه بندی مخلوط آسفالتی	
	استحکام مارشال (kg)		نسبت مقاومت مارشال	استحکام مارشال (kg)		نسبت مقاومت مارشال		
	نمونه های اشباع	نمونه های خشک		نمونه های اشباع	نمونه های خشک			
۸۷	۱۱۴۲	۱۳۱۱	۷۷	۹۷۰	۱۲۸۲	مخلوط با دانه بندی حد بالای ریزدانه		
۸۱	۱۰۲۷	۱۲۷۴	۷۲	۸۸۴	۱۲۲۸	مخلوط با دانه بندی نرمال حد وسط		
۸۱	۹۲۳	۱۱۳۶	۶۹	۷۴۱	۱۰۷۲	مخلوط با دانه بندی حد پایین ریزدانه		

خشک و اشباع دارد، در حالیکه این مخلوط کمترین ضخامت غشای قیر را دارا می‌باشد. این مهم به شرایط آزمایش استحکام مارشال مرتبط است. در حالت کلی در

در نمونه‌هایی که فقط حاوی قیر خالص می‌باشند، مخلوط آسفالتی که دارای دانه‌بندی حد بالای ریزدانه می‌باشد، بیشترین مقاومت و استحکام را در هر دو حالت

متراکم مارشال در این مخلوط آسفالتی بعلت کاهش ریزدانه‌ها، دارای خلل و فرج و نفوذپذیری بیشتری است، در نتیجه، تاثیر عمل آوری در آب با دمای 60 ± 1 درجه سانتیگراد، در نمونه‌های این مخلوط آسفالتی بیشتر بوده و نمونه‌های آن در هر دو حالت خشک و اشباع، استحکام کمتری را دارا می‌باشد.

هنگامی که نمونه‌های هر سه مخلوط آسفالتی، علاوه بر قیر، حاوی زایکوترم نیز می‌باشند، مقاومت و استحکام نمونه‌های مارشال آن‌ها در هردو حالت خشک و اشباع افزایش پیدا کرده است. در این حالت نیز، مخلوط آسفالتی که دارای دانه‌بندی حد بالای ریزدانه می‌باشد، بالاترین استحکام را در هر دو حالت خشک و اشباع دارد و مخلوط آسفالتی که دارای دانه‌بندی حد پایین ریزدانه می‌باشد، کمترین استحکام را در هر دو حالت خشک و اشباع دارد. موارد بیان شده، در شکل ۳ که نمودار رابطه بین ضخامت غشای قیر با استحکام مارشال را در نمونه‌های هر سه مخلوط آسفالتی این تحقیق نشان می‌دهد، مشخص می‌باشد.



شکل ۳- نمودار ضخامت غشای قیر- استحکام مارشال نمونه های مخلوط های آسفالتی.

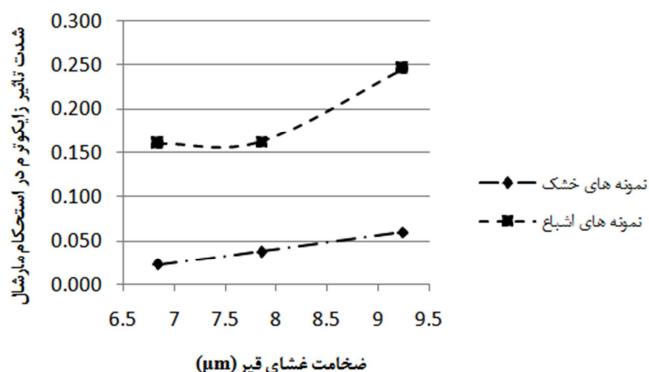
از آن زایکوترم شدت تاثیر بیشتری در مخلوط آسفالتی که دارای دانه‌بندی حد وسط می‌باشد، داشته است. شکل ۴، نمودار شدت تاثیر زایکوترم در استحکام مارشال را با توجه به ضخامت غشای قیر نشان می‌دهد. واضح است که مخلوط آسفالتی که دارای دانه‌بندی حد پایین ریزدانه است، بیشترین ضخامت غشای قیر را دارد و چون زایکوترم افزودنی مایع اضافه شونده به قیر است، در

این آزمایش، نمونه‌ها در دمایی که در آن دما، کندروانی قیر برابر 280 ± 30 سانتی استوکس می‌باشد (معمولاً دمایی بین ۱۳۵ تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد) با تعداد ۷۵ ضربه چکش مارشال که به هر طرف نمونه وارد می‌گردد، متراکم می‌گرددند. در نتیجه زمانی که مخلوط آسفالتی دارای ریزدانه بیشتری باشد، ماستیک (قیر و ریزدانه مخلوط در قیر) تولید شده بیشتری داشته که نمونه متراکم مارشال حاصل شده از آن توپرتر بوده و دارای وزن مخصوص بالاتر می‌باشد. در این حالت، کمترین خلل و فرج و نفوذپذیری را داشته و در فرآیند اشباع شدن که در این آزمایش وجود دارد، آب کمتری به داخل نمونه نفوذ کرده و در نتیجه، استحکام بالاتری دارد.

به همین ترتیب، مخلوط آسفالتی که دارای دانه‌بندی حد پایین ریزدانه می‌باشد، هرچند ضخامت غشای قیر بالاتری را دارد، اما به علت اینکه حجم ماستیک در این مخلوط آسفالتی کاهش یافته و قسمت عمده این ماستیک را قیر تشکیل می‌دهد (که شدیداً به افزایش دما حساس است)، و همچنین به علت اینکه نمونه

اما میزان افزایش استحکام مارشال در اثر استفاده از زایکوترم به تفکیک هر مخلوط آسفالتی بسیار مهم است. بررسی و ارزیابی افزایش مقاومت مارشال به واسطه استفاده از زایکوترم، مشخص می‌کند که شدت تاثیر استفاده از زایکوترم در مخلوط آسفالتی که دارای دانه‌بندی حد پایین ریزدانه می‌باشد، بیشترین است و پس

نتیجه در نتایج استحکام مارشال مرتبط با این مخلوط، شدت تاثیر بالاتری را نشان داده است.



شکل ۴- نمودار شدت تاثیر زایکوترم-غشای قیر در آزمایش استحکام مارشال.

از ۶۹ درصد به عدد ۸۱ درصد تغییر دهد که این مورد نیز بیانگر شدت تاثیر بالای این افزودنی در مخلوط آسفالتی با دانه بندی حد پایین می باشد.

۳-۴- نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR)

جدول (۵)، نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم را برای هر سه مخلوط آسفالتی، به تفکیک نمونه های حاوی زایکوترم و نمونه هایی که فقط حاوی قیر خالص هستند، در هر دو حالت خشک و عمل آوری شده نشان داده است. همچنین نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم مربوط به هر سه مخلوط آسفالتی نیز، در این جدول مشخص شده است.

بررسی نسبت مقاومت مارشال محاسبه شده برای هر سه مخلوط آسفالتی این تحقیق نشان می دهد که، در حالتی که نمونه ها فقط حاوی قیر خالص می باشند، تنها مخلوط آسفالتی که دارای دانه بندی حد بالای ریزدانه می باشد، توانسته معیار لازم جهت تایید نسبت مقاومت مارشال را کسب کند و عددی بالاتر از ۷۵ درصد را بدست آورد. در حالتی که در هر سه مخلوط آسفالتی از زایکوترم نیز استفاده شده است، تمام مخلوط های آسفالتی موفق به کسب این معیار لازم جهت تایید نسبت مقاومت مارشال شده اند. در این حالت، حتی زایکوترم توانسته تاثیر بسیار مثبتی را در مخلوط آسفالتی که دارای دانه بندی حد پایین ریزدانه است نشان دهد و نسبت مقاومت مارشال را

جدول ۵: نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و نسبت TSR برای مخلوط های آسفالتی.

TSR	مخلوط تهیه شده با قیر خالص و ۰/۱۵ درصد زایکوترم		مخلوط تهیه شده با قیر خالص		نوع دانه بندی مخلوط آسفالتی	
	مقاومت کششی غیرمستقیم (KPa)		مقاومت کششی غیرمستقیم (KPa)		نمونه های عمل آوری شده	نمونه های خشک
	نمونه های عمل آوری شده	نمونه های خشک	TSR	نمونه های عمل آوری شده	نمونه های خشک	
۸۵	۲۹۴	۳۴۷	۶۴	۲۰۴	۳۲۰	مخلوط با دانه بندی حد بالای ریزدانه
۸۱	۲۹۶	۳۶۴	۶۳	۲۰۲	۳۱۹	مخلوط با دانه بندی نرمال حد وسط
۶۷	۲۰۵	۳۰۴	۶۱	۱۵۳	۲۵۱	مخلوط با دانه بندی حد پایین ریزدانه

می باشند، یکسان است، بنابراین این آزمایش می تواند ارزیابی بهتری را جهت اهداف این تحقیق ارایه نماید. همچنین، نقش استحکام پیوند بین قیر و سنگدانه ها نیز، در این آزمایش بیشتر نمایان است و به

با توجه به اینکه در این آزمایش کلیه نمونه های مخلوط های آسفالتی با درصد فضای خالی 7 ± 1 ساخته می شوند و در نتیجه، درصد فضای خالی در نمونه های مخلوط های آسفالتی که دارای ضخامت غشای قیر مختلف

غیرمستقیم را دارد. این مورد ناشی از تاثیر همزمان ماستیک-زایکوترم می‌باشد، به این صورت که ذرات ریزدانه موجود در ماستیک این مخلوط آسفالتی، نسبت به ذرات ریزدانه موجود در ماستیک مخلوط آسفالتی‌ای که از دانه‌بندی حد بالای ریزدانه تهیه شده است، دارای غشای قیر بالاتری می‌باشد. به عبارتی، نسبت ریزدانه-قیر در ماستیک این مخلوط آسفالتی متعادل‌تر بوده و زایکوترم محلول در قیر، تاثیر بالاتری را از خود نشان داده است.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وجود ریزدانه‌ها در ماستیک مخلوط آسفالتی ضروری است و برای تاثیر بهتر مواد افزودنی مایع که به قیر اضافه می‌شوند، ماستیکی متشكل از قیر-ریزدانه متعادل‌تر، که غشای قیر مناسبی را تامین نماید، مورد نیاز است.

شکل ۵، نمودار رابطه بین ضخامت غشای قیر با مقاومت کششی غیرمستقیم را در کلیه نمونه‌های هر سه مخلوط آسفالتی این تحقیق نشان می‌دهد و موارد بیان شده قبل را بهتر نشان می‌دهد.

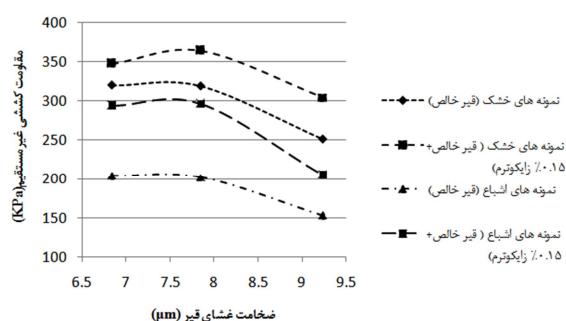
شکل ۶، نمودار شدت تاثیر زایکوترم را در مقاومت کششی غیرمستقیم، با توجه به ضخامت غشای قیر نشان می‌دهد. بررسی و ارزیابی نمودارهای این شکل مشخص می‌کند که در نمونه‌های خشک، شدت تاثیر استفاده از زایکوترم در مخلوط آسفالتی‌ای که دارای دانه‌بندی حد پایین ریزدانه است، بیشترین است و پس از آن زایکوترم شدت اثر بیشتری بر مخلوط آسفالتی‌ای که دارای دانه‌بندی حد وسط است، داشته است.

این دلیل، این آزمایش مهم‌ترین آزمایش در تعیین حساسیت و زیان رطوبتی و تعیین عربان‌شدنی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد.

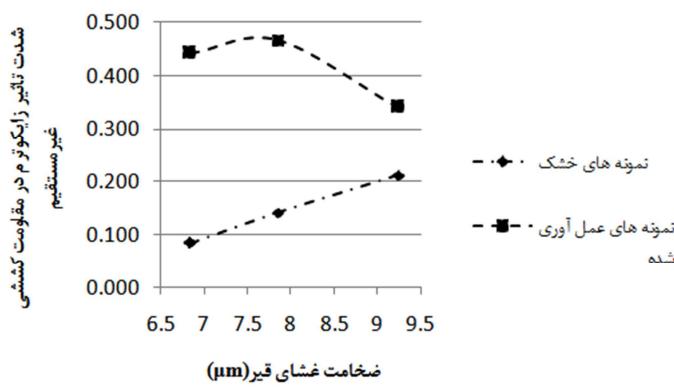
با توجه به نتایج مربوط به نمونه‌های خشک و عمل‌آوری شده مخلوط‌های آسفالتی تهیه شده از قیر خالص، مخلوط‌های آسفالتی که دارای دانه‌بندی حد وسط و حد بالای ریزدانه هستند، مقاومت کششی غیرمستقیم بالاتری دارند. ماستیک متعادل از قیر-سنگدانه در این مخلوط‌های آسفالتی سبب می‌گردد تا اطراف سنگدانه‌های درشت، ماستیک بیشتری قرار داشته باشد و با توجه به گوشه‌داری سنگدانه‌های کوهی صدرصد شکسته شده در این تحقیق، تنש‌های کششی ایجاد شده در حین انجام آزمایش، به واسطه شرایط ماستیک آن‌ها، با تاخیر بیشتری به تنش کششی-برشی تبدیل گردند.

در مخلوط آسفالتی که دارای دانه‌بندی حد پایین ریزدانه می‌باشد، به علت اینکه حجم ماستیک آن نسبت به دو مخلوط دیگر تحقیق کمتر می‌باشد، علی‌رغم ضخامت غشای قیر بیشتر که ناشی از کاهش ریزدانه‌ها می‌باشد، این مخلوط آسفالتی مقاومت کششی غیرمستقیم کمتری دارد. چراکه تنش‌های کششی و همچنین تنش‌های کششی-برشی ایجاد شده در حین انجام آزمایش را، ماستیکی باید تحمل کند که قسمت عمده آن را، قیر تشکیل داده که نسبت به تغییرات سیکل عمل‌آوری نمونه‌ها، حساس‌تر از سنگدانه‌ها می‌باشد.

در نمونه‌های خشک و عمل‌آوری شده مخلوط‌های آسفالتی حاوی زایکوترم، مخلوط آسفالتی که دارای دانه‌بندی حد وسط می‌باشد، بیشترین مقاومت کششی



شکل ۵- نمودار ضخامت غشای قیر- مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های مخلوط‌های آسفالتی



شکل ۶- نمودار شدت تاثیر زایکوترم-غشای قیر در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

آسفالتی ای که دارای دانه بندی حد پایین ریزدانه است، علی‌رغم ضخامت غشای قیر بالاتر و همچنین استفاده از زایکوترم، این نسبت از ۶۱ درصد به ۶۷ درصد رسیده که بیانگر عدم رفع مشکل عربان‌شدگی در این مخلوط آسفالتی می‌باشد. این نتایج نیز، تاثیر بخش ریزدانه در سنگدانه‌ها را که بر ماستیک آسفالت اثر می‌گذارد، به خوبی نشان می‌دهد.

۴-۴- تصاویر تهیه شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل ۷، تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، به تفکیک استفاده و عدم استفاده از زایکوترم را، از سطح نمونه‌های مربوط به هرسه مخلوط آسفالتی نشان می‌دهد.

با توجه به تصاویر (الف) و (ب) که مربوط به مخلوط آسفالتی دارای دانه بندی حد بالا می‌باشند، نقش ریزدانه‌ها در ماستیک اطراف سنگدانه‌های درشت، به خوبی مشخص است.

همچنین تصاویر (ج) و (د) که مربوط به مخلوط آسفالتی دارای دانه بندی حد وسط می‌باشند، دارای ماستیکی هستند که نسبت به مخلوط آسفالتی با دانه بندی حد بالا، دارای سنگدانه‌های ریز کمتری است و متعادل بودن نسبت قیر-سنگدانه در تصاویر این ماستیک مشهودتر است. تصاویر (ه) و (ز) که مربوط به مخلوط آسفالتی دارای دانه بندی حد پایین می‌باشند، ماستیکی را نشان داده‌اند که قسمت عمده آن را قیر تشکیل می‌دهد

در این مورد، نمونه خشک مخلوط آسفالتی که دارای دانه بندی حد پایین ریزدانه است، چون هیچ عمل آوری و شوک دمایی را متحمل نمی‌شود و نیز، بعلت اینکه بیشترین ضخامت غشای قیر را دارا می‌باشد و همچنین، چون زایکوترم یک افزودنی مایع اضافه شونده به قیر است، در نتیجه تمامی این عوامل، مقاومت کششی غیرمستقیم بالاتری را نشان داده است.

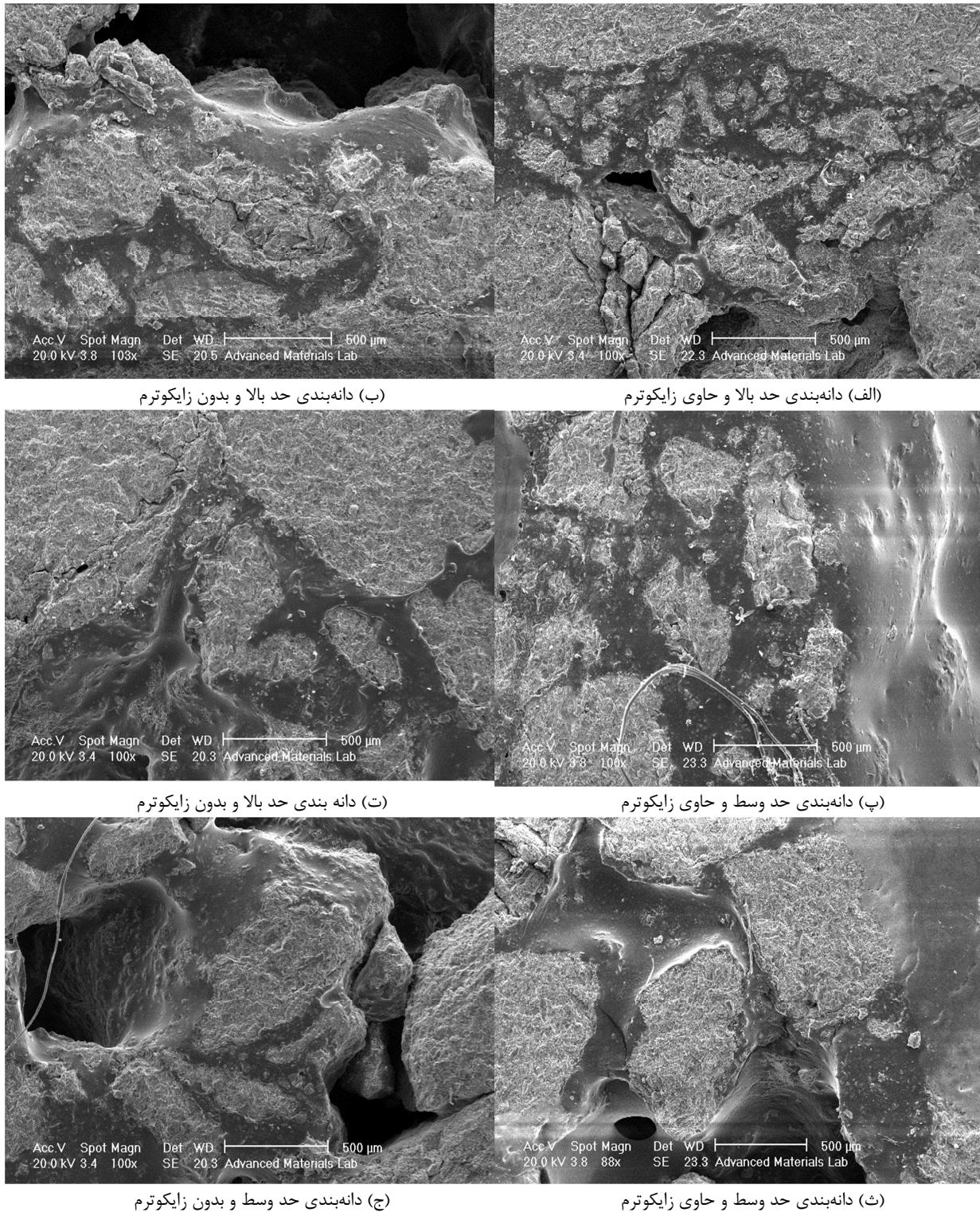
در نمونه‌های عمل آوری شده، که کلیه نمونه‌ها یک شوک دمایی را متحمل می‌شوند، نقش ریزدانه‌های موجود در ماستیک و تعادل قیر-ریزدانه، در ماستیک مخلوط آسفالتی به سبب عملکرد غشای قیر مشهود است. درنتیجه، بیشترین شدت تاثیر برای مخلوط آسفالتی ای می‌باشد که دارای دانه بندی حد وسط بوده و سپس مخلوط آسفالتی که دارای دانه بندی حد بالا می‌باشد، شدت تاثیر بالاتری را نشان داده است.

با توجه به نتایج بدست آمده برای نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم، نمونه‌های هر سه مخلوط آسفالتی که در ساخت آن‌ها، تنها از قیر خالص استفاده شده، مستعد عربان‌شدگی می‌باشند، زیرا این نسبت در هر سه مخلوط آسفالتی کمتر از ۷۵ درصد بدست آمده است.

در حالتی که در ساخت نمونه‌های مخلوط‌های آسفالتی از زایکوترم استفاده شود، مخلوط آسفالتی ای که دارای حد وسط دانه بندی می‌باشد و مخلوط آسفالتی ای که دارای دانه بندی حد بالای ریزدانه می‌باشد، نتایج شان بالاتر از ۷۵ درصد بوده که بیانگر رفع مشکل عربان‌شدگی در این دو مخلوط آسفالتی است. اما در مخلوط

مشهود است. علاوه بر این، خلل و فرج مربوط به این مخلوط آسفالتی نیز در این تصاویر به خوبی مشهود است.

که در تحلیل نتایج آزمایش‌ها در بخش‌های قبل نیز، این موضوع ذکر شده بود و این مهم در این تصاویر به خوبی



شکل ۹- تصویر مخلوط آسفالتی

تحلیلی بیان گردید را نشان می‌دهد. اما این تصاویر نیز حاوی یک مطلب مهم است و آن، تخمینی بودن محاسبات مربوط به تعیین ضخامت غشاء قیر می‌باشد.

مقایسه تصاویر مربوط به هر سه مخلوط آسفالتی، فارق از اینکه از زایکوترم استفاده شده و یا نشده است، به خوبی تغییرات ضخامت غشاء قیر که در بخش‌های

• مخلوط آسفالت مبنای طرح اختلاط در این تحقیق، مخلوط آسفالتی دارای دانه بندی حد وسط بود. هنگامیکه در تولید این مخلوط آسفالتی از قیر خالص استفاده شود، هر دو معیار TSR و MSR نامطلوب بوده و نشان می دهد که این مخلوط آسفالتی، دوامی در برابر رطوبت ندارد و مستعد عربان شدن می باشد. با استفاده از زایکوترم در این مخلوط آسفالتی هر دو معیار TSR و MSR مطلوب گردید.

در مخلوط آسفالتی که دارای دانه بندی حد بالای ریزدانه است و کمترین ضخامت غشای قیر را دارد، هنگامیکه در تولید آن از قیر خالص استفاده شده باشد، فقط معیار MSR برای این مخلوط آسفالتی، مطلوب و مورد تایید است و درنتیجه، این مخلوط آسفالتی هم به دلیل عدم حصول نتیجه مطلوب در معیار TSR، مستعد عربان شدن می باشد. ذکر شده در آیین نامه رو سازی راه های ایران، و همچنین تاثیر استفاده از نانوماده ارگانوسیلان زایکوترم، بر ضخامت غشای قیر و دوام رطوبتی مخلوط آسفالت گرم انجام گرفت و بر این اساس نتایج زیر بدست آمد:

- با استفاده از روش های مختلف استفاده شده در این تحقیق، میانگین ضخامت غشای قیر محاسبه شده برای مخلوط آسفالتی دارای دانه بندی حد وسط سنگدانه ها، ۷/۸۵ میکرومتر بود. با تغییرات در دانه بندی بخش ریزدانه سنگدانه ها، میانگین ضخامت غشای قیر محاسبه شده جهت مخلوط آسفالتی دارای دانه بندی حد پایین بخش ریزدانه، ۹/۲۴ میکرومتر (افزایش ۱۷/۷ درصدی نسبت به مخلوط آسفالتی دارای دانه بندی حد بالای بخش ریزدانه، ۶/۸۴ میکرومتر (کاهش ۱۲/۹ درصدی نسبت به مخلوط آسفالتی دارای دانه بندی حد وسط) محاسبه گردید.

نکته مهمی که در تصاویر شکل ۶ مشاهده می گردد، این است که هر چند این تصاویر با وضوح بالایی بافت مخلوط آسفالتی را نشان می دهند، اما این تصاویر نیز نمی توانند نقش و تاثیر استفاده از زایکوترم را بر روی ضخامت غشای قیر مشخص کنند.

تنها در مقایسه شکل های (۵) و (ز)، مربوط به استفاده و عدم استفاده از زایکوترم در مخلوط آسفالتی دارای دانه بندی حد پایین که قسمت عمده ماستیک آن را قیر تشکیل می دهد، همانند تحقیقات پیشین [۴۱]، بافت ماستیک در حالت استفاده از زایکوترم (شکل (۵)) نرم تر به نظر می رسد.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی تاثیر تغییرات دانه بندی بخش ریزدانه سنگدانه ها (الک های شماره ۸، ۱۶ و ۵۰) در حد مجاز رواداری سنگدانه ها (حدود بالا و پایین رواداری)، ذکر شده در آیین نامه رو سازی راه های ایران، و همچنین تاثیر استفاده از نانوماده ارگانوسیلان زایکوترم، بر ضخامت غشای قیر و دوام رطوبتی مخلوط آسفالت گرم انجام گرفت و بر این اساس نتایج زیر بدست آمد:

- با استفاده از روش های مختلف استفاده شده در این تحقیق، میانگین ضخامت غشای قیر محاسبه شده برای مخلوط آسفالتی دارای دانه بندی حد وسط سنگدانه ها، ۷/۸۵ میکرومتر بود. با تغییرات در دانه بندی بخش ریزدانه سنگدانه ها، میانگین ضخامت غشای قیر محاسبه شده جهت مخلوط آسفالتی دارای دانه بندی حد پایین بخش ریزدانه، ۹/۲۴ میکرومتر (افزایش ۱۷/۷ درصدی نسبت به مخلوط آسفالتی دارای دانه بندی حد بالای بخش ریزدانه، ۶/۸۴ میکرومتر (کاهش ۱۲/۹ درصدی نسبت به مخلوط آسفالتی دارای دانه بندی حد وسط) محاسبه گردید.

ضخامت غشای قیر، ناشی از تغییرات دانه‌بندی خواهد بود و در این مخلوط‌ها، ضخامت غشای قیر پایین‌تر، نمی‌تواند دلیل بر کاهش دوام رطوبتی مخلوط آسفالتی باشد، و همچنین افزایش ضخامت غشای قیر نیز، نمی‌تواند دوام رطوبتی مخلوط آسفالتی را تضمین نماید.

قدردانی

نویسنده‌گان، از مدیرعامل و مدیرفنی محترم شرکت محترم آبدکیفیت‌پارس، جهت ساخت و آزمایش نمونه‌های آزمایشگاهی مربوط به این تحقیق کمال تشكر و قدردانی را می‌نمایند. همچنین از آزمایشگاه مرکز ملی تحقیق و توسعه علوم و مهندسی مواد جهت تصاویر مربوط به بخش SEM کمال تشكر و قدردانی را می‌نمایند.

الکترونی روبشی به خوبی نمایان است. در نتیجه، تغییرات دانه‌بندی مخلوط آسفالتی در بخش ریزدانه، موجب تغییرات ضخامت غشای قیر و به تبع آن، موجب تغییر کیفیت ماستیک آسفالت می‌گردد که می‌تواند دوام رطوبتی مخلوط آسفالتی را تحت تاثیر قرار دهد.

- در ارزیابی تاثیر استفاده از نانو ارگانوسیلان زایکوترم در این تحقیق، علیرغم اینکه این افزودنی تاثیر مثبتی را بر استحکام مارشال مخلوط‌های آسفالتی ایجاد می‌نماید، اما با توجه به نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم، نمی‌توان از این افزودنی به عنوان یک درمان، جهت بهبود زیان ناشی از کاهش ریزدانه‌ها، استفاده نمود.
- در شرایطی که وزن قیر و سنگدانه‌ها در مخلوط‌های آسفالتی یکسان باشد، تغییرات

مراجع

- [1] Ameri. M, Vamegh. M, Naeni. S. F. C, Molayem. M, (2018), “Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixtures containing Evonik, Zycotherm and hydrated lime”, *Construction and Building Materials* 165 , 958–965.
- [2] N. I. M. Yusoff, A. A. S. Breem, H. N. M. Alattug, A. Hamim, J. Ahmad, (2014), “The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano silica/polymer-modified asphalt mixtures”, *Construction and Building Materials* 72 , 139–147.
- [3] P. K. Ashish, D. Singh, (2019), “Use of nanomaterial for asphalt binder and mixtures: a comprehensive review on development, prospect, and challenges”, *Road Materials and Pavement Design*, <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1634634>
- [4] J. Yang, S. Tighe, (2013), “A review of advances of Nanotechnology in asphalt mixtures”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 96, 1269 – 1276.
- [5] Zydex, (2014), Material safety data sheet for Zycotherm.
- [6] Mansourkhaki. A, Aghasi. A, (2019), “Performance of rubberized asphalt containing liquid nanomaterial anti-strip agent”, *Construction and Building Materials* 214, 468–474.
- [7] HasaniNasab. Sh, Arast. M, Zahedi. M, (2019), “Investigating the healing capability of asphalt modified with nano-zycotherm and Forta fibers”, *Case Studies in Construction Materials* 11 (2019) e00235.
- [8] Z. Corporation, (2017), Zydex industries retrieved from zydex industries, <http://www.zydexindustries.com>.
- [9] Hesami. S, Roshani. H, Hamedi. G. H, Azarhoosh. A, (2013), “Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt”, *Construction and Building Materials* 47, 935–941.
- [10] Shafabakhsh. G. H, Faramarzi. M, Sadeghnejad. M, (2015), “Use of Surface Free Energy method to evaluate the moisture susceptibility of sulfur extended asphalts modified with antistripping agents”, *Construction and Building Materials* 98, 456–464.
- [11] H. A. Omar, N. I. Md. Yusoff, M. Mubaraki, H. Ceylan, (2020), “Effects of moisture damage on asphalt mixtures”, *journal of traffic and transportation engineering (English edition)*, Article in press, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.07.001>.
- [12] Hesami. I, Mehdizadeh. G. H, (2017), “Study of the amine-based liquid anti-stripping agents by simulating hot mix asphalt plant production process”, *Construction and Building Materials* 157, 1011- 1017.
- [13] B. Sengoz, E. Agar, (2007), “Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt”, *Building and Environment* 42, 3621–3628.
- [14] Ghaffarpour Jahromi. S, Khodaii. A, (2011), “Effect of Filler on Volumetric Properties and Film Thickness of Asphalt Mixtures”, *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, 22(2), pp 77-88.

- [15] L. Debao, H. Xiaoming, G. Changlu, (2013), "Method to Determine Asphalt Film Thickness Based on Actual Measurement", *Advanced Materials Research*, Vols. 779-780, pp 140-143.
- [16] M. A. Elseifi, I. L. Al-Qadi, Sh. Yang, S. H. Carpenter, (2008), "Validity of Asphalt Binder Film Thickness Concept in Hot-Mix Asphalt", *Transportation Research Record* 2057. DOI: 10.3141/2057-05.
- [17] G. G. Al-Khateeb, A. Shenoy, (2017), "Mixture-property-independent asphalt film thickness model", *Materials Today Communications*, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2017.11.007>
- [18] M. Heitzman, (2007), "New film thickness models for iowa hot mix asphalt", Proceedings of the Mid Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, August, 2007.
- [19] B. Radovskiy, (2003), "Analytical Formulas for Film Thickness in Compacted Asphalt Mixture", Transportation Research Board (TRB), 82nd Annual Meeting.
- [20] X. Li, R.C. Williams, M.O. Marasteanu, T.R. Clyne, E. a d Johnson, (2009), "Investigation of In-Place asphalt film thickness and performance of hot-Mix asphalt mixtures", *ASCE J. Mater. Civil Eng.* 21(6), 262–270.
- [21] R.P. Panda, S.S. Das, P.K. Sahoo, (2016), "An empirical method for estimating surface area of aggregate in hot mix asphalt", *J. Traffic Transp. Eng. (Engl. Ed.)*, 3(2), 127–136.
- [22] G.G. Al-Khateeb, (2016), "Conceptualizing the asphalt film thickness to investigate the superpave VMA criteria", *Int. J. Pavement Eng.* <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2016.1224414>.
- [23] Ahmed Ebrahim Abu El-Maaty Behiry, (2016), "Optimisation of hot mix asphalt performance based on aggregate selection". *International Journal of Pavement Engineering*. 17(10), 924-940.
- [24] R. Hamidijoo, (2017), "Asphalt Plants", Sanjesh and Danesh Press.
- [25] Asphalt institute of Iran, (2011), "Iran highway asphalt paving code No. 234", 1st edition, the ministry of roads and urban development.
- [26] Management and Planning Organization, (2015), "Road General Technical Specification", Second Revision, code No. 101.
- [27] Haider. H, Yassir. N.A, Satish. C, (2012), "Effect of aggregate gradation on moisture susceptibility and creep in HMA". *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 72, 767–772.
- [28] Sangsefidi. E, Ziari. H, Sangsefidi. M, (2016), "The effect of aggregate gradation limits consideration on performance properties and mixture design parameters of hot mix asphalt". *KSCE Journal of Civil Engineering*. 20(1): 385-392.
- [29] M.I. Attia, M.A. Abdelrahman, U. Molakatalla, H.M. Salem, (2009), "Field evaluation of asphalt film thickness as a design parameter in superpave mix design", *Int. J. Pavement Res. Technol.* 2 (5), 205–210.
- [30] D. Wang, (2007), "Binder film thickness effect on aggregate contact behavior", Master of Science Dissertation in Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [31] Kandhal. P. S, Chakraborty. S, (1996), "Effect of Asphalt Film Thickness on Short and Long Term Aging of Asphalt Paving Mixtures", Auburn, AL : National Center for Asphalt Technology (NCAT), pp. 1–16 Report No . 96–01.
- [32] Nabil AlKofahi, Taisir Khedaywi, (2019), "Evaluation the Effect of Asphalt Film Thickness on Stripping Resistance", *International Journal of Applied Engineering Research*, Volume 14(2), 560-570.
- [33] Kandhal. P. S, Chakraborty. S, (1996), "Effect of Asphalt Film Thickness on Short- and Long-Term Aging of Asphalt Paving Mixtures", *Transportation Research Record*, Vol. 1535, 83-90.
- [34] Kumar, A., (1976), "Effect of Film Thickness, Voids and Permeability on Asphalt Hardening in Asphalt Mixtures", Joint Highway Research Project, JHPR-76-19, Project No: C-36-6CC.
- [35] S. Chaves-Pabon, J. G. Bastidas-Martinez, (2019), "Aging of Asphalt Binders and Asphalt Mixtures. Summary Part I: Effect on Physical-Chemical Properties", *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(12), 259-273.
- [36] Kandhal, P.S., Foo, K.Y., Mallick, R.B., (1998), "A critical review of VMA requirements in Superpave". Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology (NCAT), Report No. 98-01, 1–20.
- [37] ASTM D-3515-01, (2004), "Standard specification for hot-mixed, hot-laid bituminous paving mixtures", Annual book of ASTM Standards, Section four: Construction Road and paving materials, vehicle-pavement systems, Revision Issued Annually, vol. 04.03; p. 337–341.
- [38] ASTM D 1559, (2002), "Standard Test Method for Marshal Test", Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- [39] Asphalt institute, (2015), "Asphalt mix design methods, for asphalt concrete and other hot-mix types", 7th edition, Manual series No. 2 (MS-2).
- [40] NCHRP 567, "Volumetric Requirements for Superpave Mix Design", Advanced Asphalt Technologies, LLC, Transportation Research Board,2006, National Academy of Sciences.
- [41] J. W. Oliver, "The effect of binder film thickness on asphalt cracking and raveling", *Road & Transport Research*, (2011), Vol 20 No 3.
- [42] AASHTO T 283-14, (2014), "Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage", standard by American association of state and highway transportation officials.

- [43] Razavi. S. H, Kavussi. A, (2020), “The role of nanomaterials in reducing moisture damage of asphalt mixes”, *Constr. Build. Mater.*, 239, 117827.
- [44] NCHRP 673, “A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary”, Advanced Asphalt Technologies, LLC, Transportation Research Board, 2011, National Academy of Sciences.