

تحلیل پتانسیل پارامترهای میکروساختاری و مقاومت کششی غیر مستقیم در ارزیابی عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم

محمود رضا کی‌منش*، استادیار، دانشگاه پیام نور
حسن زیاری، استاد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
علی نصراله تبار، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشگاه پیام نور
نوشین شهریاری، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشگاه پیام نور

Email: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

دریافت: ۹۵/۱۰/۲۸ - پذیرش: ۹۶/۰۱/۲۲

چکیده

افزایش وسعت و شدت تغییر شکل‌های دائم در سال‌های اخیر، نگرانی‌هایی را در ارتباط با اثر این نوع خرابی بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی به وجود آورده است. برای بررسی مخلوط‌های آسفالتی از منظر شیارشدگی باید توجه نمود که این مخلوط‌ها ترکیب چندفازه شامل مصالح سنگی، قیر و فضاهای خالی می‌باشند. آرایش ذرات مصالح سنگی (اسکلت سنگدانه-ها) در ساختار داخلی مخلوط‌های آسفالتی گرم نقش مهمی در عملکرد مکانیکی مخلوط، از جمله مقاومت شیارشدگی، آن دارد. در دستورالعمل‌های فعلی طرح مخلوط‌های آسفالتی از پارامترهای ماکرو مانند خصوصیات حجمی، نظیر درصد فضای خالی و حجم قیر، به همراه خصوصیات مکانیکی، مانند مدول یا مقاومت شیارشدگی، به عنوان شاخص‌های اصلی کنترل کیفیت استفاده می‌شود. لیکن، تا کنون تحلیل بصری و خصوصیات میکرو مخلوط‌های آسفالتی (ساختار داخلی روسازی) کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مقاله، از نگاه میکرو، اثرگذاری خصوصیتی مانند تعداد نقاط تماس سنگ‌دانه‌ها، طول تماس سنگ‌دانه‌ها و زاویه تماس برای عملکرد شیارشدگی ۱۶ نوع مخلوط (دو نوع دانه‌بندی، دو نوع قیر، دو جنس سنگ‌دانه و دو نوع فیلر) مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، نتایج مقاومت شیارشدگی (عدد روانی) با تعداد نقاط تماس سنگ‌دانه‌ها، طول تماس سنگ‌دانه‌ها و زاویه تماس حاصل از پردازش تصویر (با استفاده از نرم‌افزار IPAS2) و مقاومت کششی غیر مستقیم مقایسه شده‌اند. تحلیل نتایج نشان داد که عملکرد شیارشدگی به میزان زیادی به خصوصیات میکرو مخلوط‌های آسفالتی وابسته می‌باشد و از این خصوصیات می‌توان به عنوان ابزار کنترلی در طرح مخلوط‌های آسفالتی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: مخلوط‌های آسفالتی گرم، شیارشدگی، تعداد نقاط تماس سنگ‌دانه‌ها، عدد روانی، پردازش تصویر

۱. مقدمه

تعداد نقاط تماس، طول تماس و جهت‌گیری تماس بستگی دارد (وانگ، ۲۰۱۱؛ کوک و همکاران، ۲۰۱۲). در این مقاله، پتانسیل پارامترهای میکروساختاری در ارزیابی شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی گرم مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲. اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

افزایش وسعت و شدت تغییرشکل‌های دائم در سال‌های اخیر، نگرانی‌هایی را در ارتباط با اثر این نوع خرابی بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی به وجود آورده است. این نوع خرابی قابلیت بهره‌برداری راه را کاهش داده و خطر تأثیرات رطوبت و یخ‌زدگی را به علت تجمع آب در شیار چرخ افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، در روش طرح اختلاط مارشال، که به عنوان اصلی‌ترین روش طرح اختلاط مخلوطهای آسفالتی در ایران شناخته می‌شود، فقدان یک روش ساده برای تعیین مقاومت نمونه‌ها در مقابل بروز تغییرشکل‌های دائم، که علت اصلی به وجود آمدن شیار در روسازی آسفالتی می‌باشد، کاملاً محسوس است (دیواندری و همکاران، ۱۳۹۴). هدف اصلی این مقاله، ارائه مدلی است که امکان ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی را فراهم می‌نماید. همچنین، با ابزارهای ارائه شده در این مقاله، بررسی دقیق‌تر نمونه‌های آسفالتی از نگاه میکرو فراهم شده است.

۳. مروری بر ادبیات

تحلیل هر یک از پارامترهای میکرو مخلوطهای آسفالتی به تنهایی و یا در ارتباط با سایر پارامترها می‌تواند اطلاعات مفیدی را در خصوص رفتار

مروری بر تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در اکثر مطالعات، روی رفتار ماکروسکوپیک مخلوطهای آسفالتی گرم تمرکز شده است. در واقع، در این مطالعات فرض شده که مخلوطهای آسفالتی همگن می‌باشند. دلیل اصلی این موضوع آن است که به خاطر طبیعت پراکنش تصادفی سنگ‌دانه‌ها و فضاهای خالی در مخلوطهای آسفالتی، کمی نمودن پارامترهای میکرو در ساختار داخلی روسازی کار دشواری می‌باشد (ماساد و همکاران، ۱۹۹۵). برای مثال، در روش‌های طرح اختلاط مخلوط که در سرتاسر جهان انجام می‌گردد، پارامترهای ماکرو مخلوطهای آسفالتی گرم مانند وزن مخصوص، استقامت مارشال و یا استقامت ویم مورد توجه قرار می‌گیرند. دو نمونه مخلوط ممکن است پارامترهای ماکرو یکسانی داشته باشند، اما رفتار مکانیکی آنها متفاوت باشد. این به این دلیل است که مخلوطهای آسفالتی گرم غیرهمگن هستند و خصوصیات اجزای تشکیل‌دهنده آنها مانند فضاهای خالی، سنگ‌دانه‌ها و قیر متفاوت است. در روش طرح اختلاط شارپ فاز اول نیز حجم اجزا شامل حجم فضای خالی، حجم فضای خالی در سنگ‌دانه‌ها، حجم قیر، حجم سنگ‌دانه‌ها و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند. هدف اصلی این طرح اختلاط، رسیدن به یک ترکیب حجمی معین میان اجزا می‌باشد. اما مخلوطها ممکن است دارای طرح یکسانی باشند. اما گاه رفتار مکانیکی آنها کاملاً متفاوت باشد. این بدان معنی است که رفتار مصالح علاوه بر مقدار فضای خالی (پارامتر ماکرو) به توزیع فضای خالی (پارامتر میکرو) نیز بستگی دارد و یا اینکه رفتار مخلوط علاوه بر دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها به پارامترهای میکرو مانند

(۲۰۱۱) و روحی و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از نرم‌افزار iPAS2 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که همبستگی زیادی بین پارامترهای میکروساختاری و عملکرد شیارشدگی مخلوط وجود دارد. همچنین، ماساد و کوتای در سال ۲۰۱۲ نشان دادند که پارامترهای میکروساختاری از جمله تعداد نقاط تماس، توزیع جهتی سنگ-دانه‌ها و توزیع فضایی سنگ‌دانه‌ها بر عملکرد شیارشدگی مخلوط موثرند. کای و وانگ (۲۰۱۳) نشان دادند که بین نوع قیر و تعداد نقاط تماس همبستگی مناسبی وجود ندارد. بنابراین، مدل پیش‌بینی برای شیارشدگی را بر اساس تعداد نقاط تماس و نوع قیر پیشنهاد نموده است. بر اساس این مدل، تعداد نقاط تماس اثر بیشتری بر عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم نسبت به نوع قیر داشته‌اند. بررسی‌های شاهین و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که همبستگی ضعیفی بین جهت‌داری سنگ‌دانه‌ها و عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد. احمد و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که رابطه بسیار خوبی بین طول کل تماس و عملکرد شیارشدگی مخلوط وجود دارد. مروری بر مطالعات نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات بر پارامترهای هندسی تماس تمرکز داشته‌اند. در حالی که علاوه بر هندسه تماس، کیفیت تماس نیز مهم می‌باشد.

۴. پیش‌بینی نظری شیارشدگی بر اساس

میکروپارامترها

مرور بر تحقیقات قبلی نشان داد که مهمترین پارامترهای میکرو که در ارزیابی شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی در نظر گرفته شده بودند عبارتند از تعداد نقاط تماس، طول تماس و جهت

مکانیکی مخلوط‌ها ارائه نماید. برای بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از پارامترهای میکروساختاری، محققین زیادی در سال‌های اخیر از روش سی تی اسکن سه‌بعدی با اشعه ایکس و پردازش تصویر استفاده نموده‌اند (هو و همکاران، ۲۰۱۵؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ شو و همکاران، ۲۰۱۶؛ شاهین و همکاران، ۲۰۱۶؛ حسن و همکاران، ۲۰۱۵). با این وجود، استفاده از سی تی اسکن سه‌بعدی با اشعه ایکس و پردازش تصویر دارای مشکلاتی مانند عدم تفکیک صحیح سنگ-دانه‌ها و نویزهای تصویری می‌باشد که استفاده از این روش را با چالش مواجه کرده است (کوتای و همکاران، ۲۰۱۰). هرچند برونو و همکاران (۲۰۱۱) و گو و همکاران (۲۰۱۵) روش‌هایی برای حل این مشکلات ارائه نموده و مدعی شده‌اند که نتایج آنها همبستگی مناسبی با داده‌های کنترل شده داشته است.

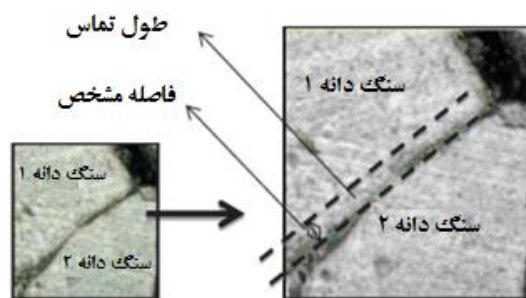
در سال‌های اخیر، پردازش تصاویر دوبعدی و تعیین پارامترهایی مانند تعداد نقاط تماس، طول تماس، زاویه تماس و جهت سنگ‌دانه‌ها به عنوان ساختار داخلی روسازی مورد توجه قرار گرفته است. ماساد و همکاران در سال ۱۹۹۹ از تکنیک‌های پردازش تصویر دیجیتال برای کمی‌سازی توزیع، جهت‌داری و شکل سنگ‌دانه‌های درشت استفاده نموده‌اند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با استفاده از تکنیک پردازش تصویر عکس‌های دوبعدی، می‌توان پارامترهای میکروساختاری مخلوط را تعیین نمود. بسا و همکاران (۲۰۱۲) نیز با تحقیق روی نرم‌افزارهای مختلف، نتایج مشابهی گرفته‌اند.

اثر پارامترهای میکروساختاری شامل تعداد نقاط تماس، طول تماس و جهت تماس بر عملکرد شیارشدگی مخلوط توسط روحی

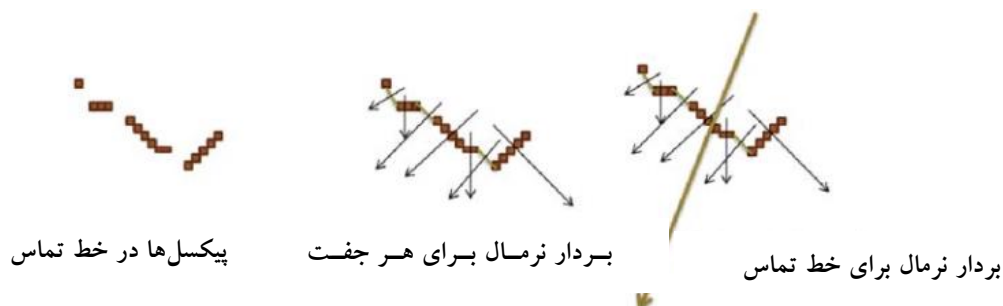
فاصله باشند مشخص می‌شود. برای هر پیکسل سنگ‌دانه شماره یک فقط و فقط یک پیکسل در پیرامون سنگ‌دانه شماره دو در نظر گرفته می‌شود که فاصله آنها کمتر از فاصله مشخص شده کاربر می‌باشد. اگر چند پیکسل وجود داشته باشند، نزدیکترین آنها انتخاب می‌گردد. پیکسل وسط هر جفت از پیکسل‌های بین دو سنگ‌دانه به عنوان نقطه تماس فرض می‌شود که مجموعه این نقاط خط تماس را در عکس‌های دوبعدی شکل می‌دهند. همچنین، پیکسل‌های تماس با استفاده از خطوط مستقیم به یکدیگر متصل شده و شیب عمود بر این خط محاسبه می‌گردد که بردار متناسب با این شیب همان بردار عمود بر جهت خط تماس می‌باشد. طول تماس و جهت آن هر دو پارامترهای مهمی هستند که ساختار داخلی مخلوط را توصیف می‌نمایند (کونن و همکاران، ۲۰۱۲).

تماس (شکل‌های ۱ و ۲).

یک تصویر دیجیتال به صورت یک تابع دوبعدی $f(x,y)$ تعریف می‌شود که x و y مختصات فضایی و مقدار f به ازای هر x و y شدت تصویر در آن نقطه تعریف می‌شود. در واقع، یک تصویر دوبعدی به صورت یک ماتریس $M \times N$ است که هر عضو این ماتریس دارای مکان و مقدار مشخصی می‌باشد که از این اعضا تحت عنوان پیکسل^۱ یاد می‌شود. پیکسل‌های تشکیل دهنده سطوح بیرونی هر سنگ‌دانه پیکسل‌های پیرامونی نامیده می‌شوند. در تئوری، زمانی که فاصله دو جفت پیکسل بیرونی صفر باشد، این دو سنگ‌دانه در تماسند. اما در پردازش تصویر، زمانی که فاصله دو جفت پیکسل بیرونی از یک مقدار کوچک (فاصله مشخص) کمتر باشد دو سنگ‌دانه در تماس فرض می‌شوند. این فاصله مشخص توسط کاربر معین می‌گردد. همچنین، همه پیکسل‌های پیرامونی دو سنگ‌دانه که در این



شکل ۱. پارامترهای میکروطول تماس و نقطه تماس (روحی و همکاران، ۲۰۱۲)



شکل ۲. روش تعیین بردار نرمال برای خط تماس (روحی و همکاران، ۲۰۱۲)

$$R = f(N, IDT) \quad (2)$$

که در این رابطه N تعداد نقاط تماس، IDT^2 مقاومت کششی غیر مستقیم و R مقدار شیارشدگی می‌باشد. در این پژوهش عدد شیارشدگی با استفاده از آزمایش خزش و تعیین عدد روانی سنجیده شده است.

۵. روش تحقیق

در این تحقیق سعی شد مواد مورد استفاده حتی‌الامکان طوری انتخاب شوند که بازه وسیعی از مواد و مصالح مورد استفاده در صنعت ساخت آسفالت در کشور را شامل شوند.

۵-۱. مصالح مصرفی و ساخت نمونه‌های

آزمایشگاهی

بدین منظور از دو نوع مصالح سنگی سیلیسی و آهکی، دو نوع قیر ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰، دو نوع فیلر آهک و پودر سنگ و دو نوع دانه‌بندی حد وسط دانه‌بندی‌های پیوسته شماره ۴ و ۵ مطابق با آیین‌نامه طرح روسازی‌های آسفالتی ایران (نشریه ۲۳۴) استفاده شود (جدول ۱ و ۲). پس از مشخص شدن انواع ترکیب‌های مورد نظر، میزان قیر بهینه هر ترکیب به روش مارشال (AASHTO-T245) تعیین گردید (جدول ۳). نمونه‌های آزمایشگاهی مورد نیاز، با استفاده از متراکم کننده دورانی ساخته شدند. با توجه به فرضیات تحقیق و به ازای یک میلیون محور معادل هم‌ارز، تعداد دوران اولیه، طرح و حداکثر به ترتیب ۸، ۹۵ و ۱۵۰ تعیین گردید.

روچی و همکاران (۲۰۱۲) از ترکیب پارامترهای ذکر شده شاخص جدیدی به نام شاخص ساختار داخلی (ISI)^۱ تعریف نمودند که عبارت است از:

$$ISI = \sum_{i=1}^N CL_i * \sin(AAC_i) \quad (1)$$

که در آن CL_i طول تماس و AAC_i زاویه عمود بر خط تماس در نقطه تماس نام می‌باشد.

برخی از محققین در پیش‌بینی شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم از یکی از پارامترهای میکرو و یا ترکیبی از آنها استفاده کرده‌اند. اما معین است که تنها هندسه تماس به تنهایی نمی‌تواند بیانگر رفتار مخلوط‌های آسفالتی در عملکرد مقابل برش و شیارشدگی باشد. انتقال بار در مخلوط‌های آسفالتی تحت تأثیر برهمکنش میان سنگ‌دانه‌ها و قیر در محل تماس مجاورت سنگ‌دانه‌ها می‌باشد. بنابراین، برهمکنش بین قیر و سنگ‌دانه‌ها و یا در واقع کیفیت تماس نیز بر عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم تأثیرگذار می‌باشد (ماساد و همکاران، ۲۰۱۲). به همین دلیل، برخی از محققین دیگر در پیش‌بینی شیارشدگی علاوه بر پارامترهای میکرو از خصوصیات قیر (مانند نرمی قیر) در مدل‌های ارائه شده استفاده کرده‌اند که البته باز هم معین است که خصوصیات قیر به‌تنهایی نشان‌دهنده برهمکنش بین قیر و سنگ‌دانه‌ها نمی‌باشد. در این پژوهش، جهت پیش‌بینی برهمکنش بین قیر و سنگ‌دانه‌ها از آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم استفاده شده است. حجم قیر، نوع قیر، میزان فیلر، فضای خالی پر شده با قیر و درگیری بین قیر و سنگ‌دانه‌ها از جمله فاکتورهای موثر بر چسبندگی و مقاومت کششی غیر مستقیم در مخلوط‌های آسفالتی می‌باشند (کریستنسن و بوناکوویست، ۲۰۰۲). بنابراین الگوی پیش‌بینی شیارشدگی براساس رابطه (۲) در نظر گرفته شد.

¹ - Internal Structure Index

² - Indirect Tensile Test

تحلیل پتانسیل پارامترهای میکروساختاری و مقاومت کششی غیر مستقیم در ارزیابی عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم

جدول ۱. نمودار حد وسط دانه‌بندی‌های پیوسته شماره ۴ و ۵ مطابق با نشریه ۲۳۴ و خصوصیات قیر

| اندازه الک (میلی‌متر) | | | | | |
|--------------------------|-----|------|------|------|----|
| ۰/۰۷۵ | ۰/۳ | ۲/۳۶ | ۴/۷۵ | ۱۲/۵ | ۱۹ |
| دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ | | | | | |
| درصد عبوری | ۱۰۰ | ۹۵ | ۵۹ | ۴۳ | ۱۳ |
| ۶ | | | | | |
| دانه‌بندی پیوسته شماره ۵ | | | | | |
| درصد عبوری | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۷۰ | ۴۹/۵ | ۱۵ |
| ۶ | | | | | |

جدول ۲. نمودار حد وسط دانه‌بندی‌های پیوسته شماره ۴ و ۵ مطابق با نشریه ۲۳۴ و خصوصیات قیر

| درجه نفوذ (دهم میلی‌متر) ASTM D5 | درجه نرمی (سلسیوس) ASTM D36 | ویسکوزیته (ثانیه) ASTM D88 |
|---|---------------------------------------|--------------------------------------|
| | قیر ۶۰-۷۰ | |
| ۶۲ | ۴۷/۵ | ۱۹۵ |
| | قیر ۸۵-۱۰۰ | |
| ۸۲ | ۴۹/۵ | ۱۵۵ |

جدول ۳. مشخصات نمونه‌ها و درصد قیر بهینه

| درصد قیر بهینه | نام نمونه | نوع قیر خالص | نوع فیلر | دانه‌بندی پیوسته | نوع مصالح سنگی |
|----------------|-----------|--------------|----------|------------------|----------------|
| ۵/۸۱ | LA۴P۶ | ۶۰-۷۰ | پودر سنگ | شماره چهار (۴) | آهکی |
| ۵/۷۰ | LA۴P۸ | ۸۵-۱۰۰ | | | |
| ۶/۱۶ | LA۴A۶ | ۶۰-۷۰ | پودر آهک | | |
| ۵/۹۰ | LA۴A۸ | ۸۵-۱۰۰ | | | |
| ۵/۹۲ | LA۵P۶ | ۶۰-۷۰ | پودر سنگ | شماره پنج (۵) | سیلیسی |
| ۵/۸۰ | LA۵P۸ | ۸۵-۱۰۰ | | | |
| ۶/۲۴ | LA۵A۶ | ۶۰-۷۰ | پودر آهک | | |
| ۶/۰۰ | LA۵A۸ | ۸۵-۱۰۰ | | | |
| ۵/۰۵ | LS۴P۶ | ۶۰-۷۰ | پودر سنگ | شماره چهار (۴) | سیلیسی |
| ۴/۹۶ | LS۴P۸ | ۸۵-۱۰۰ | | | |
| ۵/۴۰ | LS۴A۶ | ۶۰-۷۰ | پودر آهک | | |
| ۵/۱۵ | LS۴A۸ | ۸۵-۱۰۰ | | | |
| ۵/۲۴ | LS۵P۶ | ۶۰-۷۰ | پودر سنگ | شماره پنج (۵) | سیلیسی |
| ۵/۰۲ | LS۵P۸ | ۸۵-۱۰۰ | | | |
| ۵/۴۵ | LS۵A۶ | ۶۰-۷۰ | پودر آهک | | |
| ۵/۲۵ | LS۵A۸ | ۸۵-۱۰۰ | | | |

۲-۵. آزمایش‌های مکانیکی

قرارگرفتند. آزمایش خزش دینامیک براساس استاندارد Australian: AS 2891.12.1، با بار اعمال شده به صورت موج مربعی شامل ۵۰۰ میلی‌ثانیه بارگذاری و ۱۵۰۰ میلی‌ثانیه استراحت برای ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری

در نهایت، دو دسته نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش خزش دینامیک و کشش غیر مستقیم

ارتفاع کمتر از مقدار شدت منتخب می‌باشند، اصلاح می‌گردند. دسته دوم توابعی هستند که تحلیل میکروساختاری را انجام می‌دهند (شکل ۳). در این نرم‌افزار، با استفاده از این توابع که عمدتاً توابعی در نرم‌افزار متلب می‌باشند، عکس‌های رنگی RGB^۱ تبدیل به عکس‌های باینری (سیاه و سفید) می‌گردند. در واقع، این عمل و تعیین پارامترهای آرایش سنگ‌دانه‌ها با به-کارگیری ماتریسی از تصویر دیجیتال انجام می‌گردد. جهت تهیه عکس‌های دوبعدی نمونه‌ها از دو طرف برش داده (شکل ۴) و با دوربین دیجیتالی عکس دوبعدی تهیه گردید. حداقل کیفیت تصاویر ۲۷ پیکسل بر میلی‌متر (۰/۳۷ میلی‌متر بر پیکسل). از سطح ۶۳ میلی‌متر در ۹۵ میلی‌متر برای تحلیل استفاده شده است. برای تعیین فاصله مشخصی که نشان‌دهنده تماس دو سنگ‌دانه باشند محققین مختلفی از جمله کونن و همکاران (۲۰۱۲)، وانگ (۲۰۱۱) و کای و وانگ (۲۰۱۳) مقدار یک چهارم حداقل اندازه سنگ‌دانه مورد تحلیل را پیشنهاد نموده‌اند. حداقل اندازه سنگ توسط این محققین ۲/۳۶ یا ۴/۷۵ میلی‌متر انتخاب شده است. بخشی از سنگ‌دانه‌ها که در تحلیل پردازش تصویر برای تعیین پارامترهایی مانند تعداد نقاط تماس استفاده می‌شوند اصولاً به اندازه ماکزیمم سنگ‌دانه‌ها مربوط نمی‌شود. هدف از تعیین تعداد نقاط تماس، کنترل شیارشدگی و به نوعی نحوه انتقال و طول تماس سنگ-دانه‌ها برای انتقال تنش می‌باشد. حال اینکه چه بخشی از سنگ‌دانه‌ها نقش ماستیک را داشته و با قیر نقش چسبندگی را ایفا می‌کنند و چه بخشی با تماس با یکدیگر انتقال بار را انجام می‌دهند، بین محققین اختلاف نظر وجود دارد. در این مقاله، با توجه به نوع دانه‌بندی برای آسفالت‌های ماستیک که در جدول ۳-۱۳ نشریه ۲۳۴ آمده است، مقدار ۲/۳۶ میلی‌متر انتخاب شده است. تعداد نقاط تماس، طول تماس، جهت تماس

برای نمونه‌ای که به مدت شش ساعت در دمای ۵۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند، انجام گردید. مقدار تنش تماسی برابر ۲ کیلوپاسکال و تنش انحرافی معادل ۳۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. عدد روانی در منحنی کرنش تجمعی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری، تعداد بارگذاری معادل با شروع ناحیه سوم منحنی می‌باشد (پاپاجیاناکیس و ماساد، ۲۰۰۸). همچنین نمونه‌ها برای آزمایش کشش غیر مستقیم (ASTM D4321) به مدت شش ساعت در دمای ۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند و مقاومت کششی غیر مستقیم بر حسب کیلونیوتن تعیین گردید.

۳-۵. پردازش تصویر

دسته سوم نمونه‌ها جهت انجام پردازش تصویر مورد استفاده قرار گرفتند. تحلیل آماری توسط نرم‌افزار SPSS20 انجام گردید. در این تحقیق، پردازش تصویر عکس‌های دوبعدی با نرم‌افزار iPAS انجام گردیده است. کونن و همکاران (۲۰۱۲) روشی در قالب نرم-افزاری برای تعیین پارامترهای میکروساختاری مخلوط‌های آسفالتی ارائه نموده‌اند که این نرم‌افزار توسط روحی و همکاران (۲۰۱۲) تکمیل گردید. در واقع، با این نرم‌افزار، پردازش عکس‌های دوبعدی و کمی‌سازی خصوصیات ساختار داخلی مخلوط‌های آسفالتی انجام می‌گردد. توابع نرم‌افزار به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند. دسته اول توابعی هستند که پردازش تصویر را انجام می‌دهند. مهمترین فیلترهای مورد استفاده در این نرم‌افزار فیلترهای میانه و Hmax هستند. در فیلتر میانه که یک تکنیک خطی است، اغلب برای برداشتن نویز و یا سایر سیگنال‌ها استفاده می‌شود. پیکسل‌های همسایه یک نویز در یک آرایه مرتب شده و میانه مقدار شدت تصویر جایگزین مقدار شدت نویز می‌گردد. در فیلتر Hmax، که یک تکنیک غیر خطی است، همه حداکثرهای شدت یک عکس که دارای

^۱ - Red-Green-Blue

داخلی روسازی شامل تعداد نقاط تماس، طول تماس، زوایه تماس و ISI با استفاده از پردازش تصویر با نرم افزار iPAS تعیین گردیدند. همبستگی این پارامترها با مقاومت شیارشدگی (عدد روانی) در جدول ۴ آورده شده است. رابطه این پارامترها با عمق عدد روانی در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی دار می باشد.

و جهت سنگ دانه ها با استفاده از پردازش تصویر تعیین گردید.

۶. نتایج و تحلیل

۶-۱. ارتباط پارامترهای ساختار داخلی با

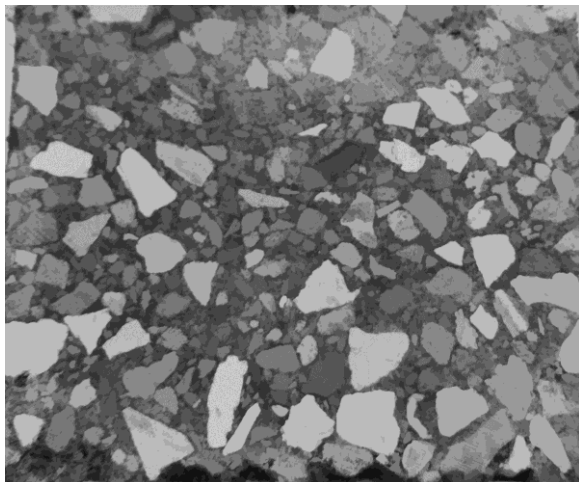
مقاومت شیارشدگی

برای کلیه نمونه های آزمایشگاهی، پارامترهای ساختار

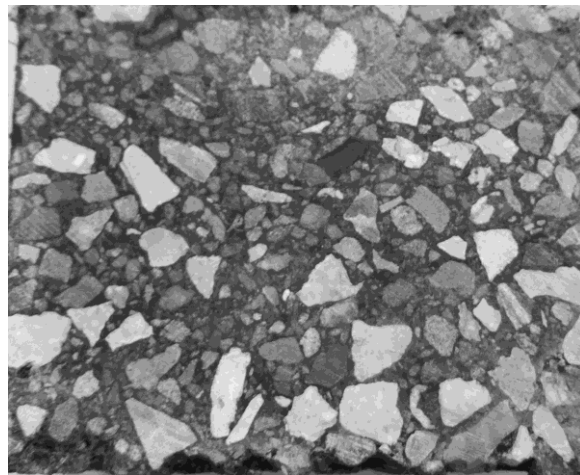
عکس اولیه



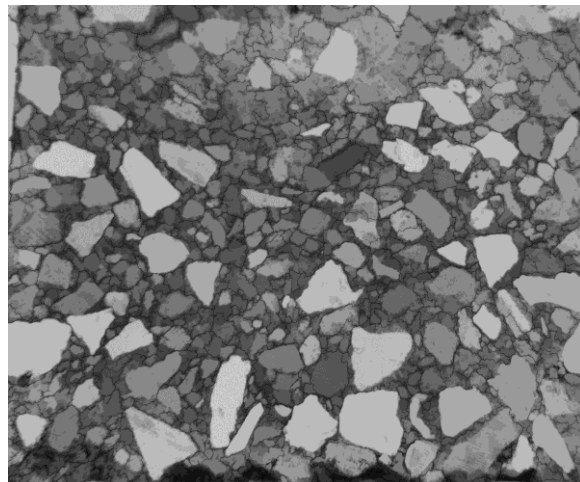
اعمال فیلتر Hmax



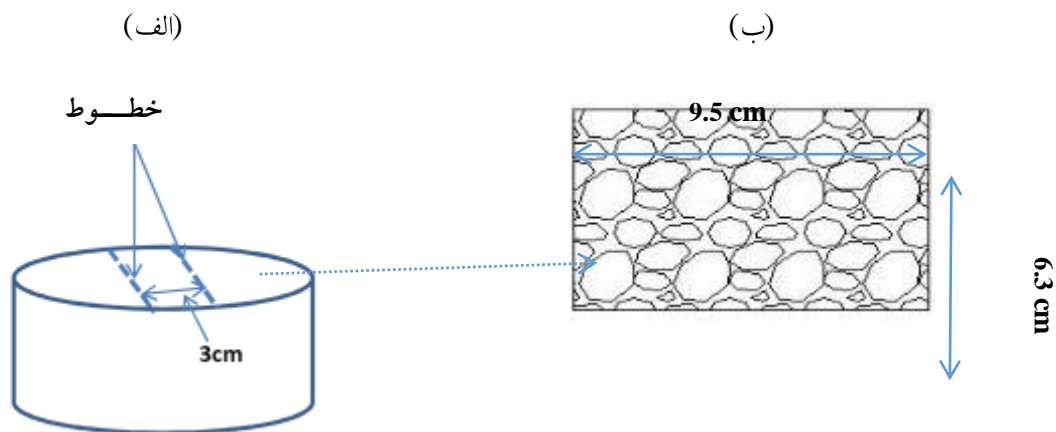
اعمال فیلتر میانه



مرزبندی سنگ دانه ها



شکل ۳. اعمال فیلتر عکس های دیجیتالی دوبعدی



شکل ۴. الف: روش برش نمونه و ب: سطح ۶۳×۹۵ میلی‌متر برای تحلیل

جدول ۴. همبستگی پارامترهای ساختار داخلی با مقاومت شیارشدگی (عدد روانی)

| شاخص‌های آماری | شاخص ساختار داخلی (ISI) | طول تماس (L) | تعداد نقاط تماس (N) |
|-----------------|-------------------------|--------------|---------------------|
| ضریب پیرسون | ۰/۶۱ | ۰/۶۴ | ۰/۷۹ |
| عدد روانی (Fn) | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۱۷ | ۰/۰۰۲ |
| تعداد نمونه (N) | ۱۶ | ۱۶ | ۱۶ |

مخلوط‌های آسفالتی و انتخاب روش تراکم مورد توجه قرار گیرند. تحلیل نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که تعداد نقاط تماس دارای همبستگی بیشتری با عملکرد شیارشدگی در قیاس با سایر پارامترها بوده است. به نظر می‌رسد مزیت شاخص تعداد نقاط تماس آن است که علاوه بر اینکه به نوعی نشان‌دهنده مقدار تماس می‌باشد، پراکندگی و عدم تمرکز نواحی تماس را نیز نشان می‌دهد. در شکل ۵، نتایج تحلیل آماری نوع رابطه تعداد نقاط تماس و عدد روانی نشان داده شده است. همه رابطه‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بوده است. ولی تابع توانی همبستگی بیشتری ($R^2 = 63\%$) بین تعداد نقاط تماس (N) و عدد روانی برقرار نموده است. با افزایش تعداد نقاط تماس، عدد روانی افزایش پیدا نموده است. ضریب همبستگی برای تابع خطی برابر با ۰/۵۱٪، برای تابع نمایی ۰/۵۲٪ و برای تابع لگاریتمی ۰/۵۶٪ بوده است.

سنگ‌دانه‌های دارای دانه‌بندی درشت‌تر دارای تعداد نقاط تماس بیشتری بوده‌اند. بنابراین، مخلوط‌هایی که سنگ‌دانه‌های درشت کمتری دارند فاقد ساختار برای مقاومت در مقابل تغییرشکل می‌باشند. این پدیده نشان می‌دهد که حجم زیاد سنگ‌دانه‌های درشت از فاکتورهای اصلی مطلوب ساختار مخلوط‌ها می‌باشد. مخلوط‌های با تعداد نقاط تماس بیشتر عملکرد بهتری در مقابل شیارشدگی داشته‌اند. رابطه مستقیمی میان تعداد نقاط تماس و عملکرد شیارشدگی وجود دارد. زیرا تعداد نقاط تماس بیشتر منجر به تعداد مسیرهای تنشی بیشتری می‌گردد. به‌طور مشابه، با افزایش طول تماس و شاخص ساختار داخلی روسازی، عملکرد شیارشدگی مخلوط بهبود می‌یابد. این نتایج نقش مهم تماس سنگ‌دانه‌ها را در انتقال بار تأیید می‌نمایند و همچنین تأکید می‌کند که این پارامترهای میکروساختاری باید در طرح اختلاط

طبق اصول مقاومت مصالح، تنش نرمال و تنش برشی در هر صفحه‌ای که با امتداد صفحه تنش اصلی زاویه θ می‌سازند برای مرکز نمونه به صورت روابط (۳) و (۴) می‌باشد:

$$\sigma_n = S_t + 2S_t \cos 2\theta \quad (3)$$

$$\tau_n = 2S_t \sin 2\theta \quad (4)$$

با ترکیب روابط (۳) و (۴) با رابطه موهر-کولمب خواهیم داشت:

$$S_t = \frac{C}{2 \sin 2\theta - \tan(\phi)(1 + 2 \cos 2\theta)} \quad (5)$$

با معلوم بودن C و ϕ ، شرایط گسیختگی با حداقل نمودن مقدار S_t به دست می‌آید. برای حداقل نمودن S_t کافی است عبارت زیر کسر ماکزیمم گردد:

$$\frac{d(2 \sin 2\theta - \tan \phi(1 + 2 \cos(2\theta)))}{d\theta} = 0 \Rightarrow$$

$$\theta = \frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4}$$

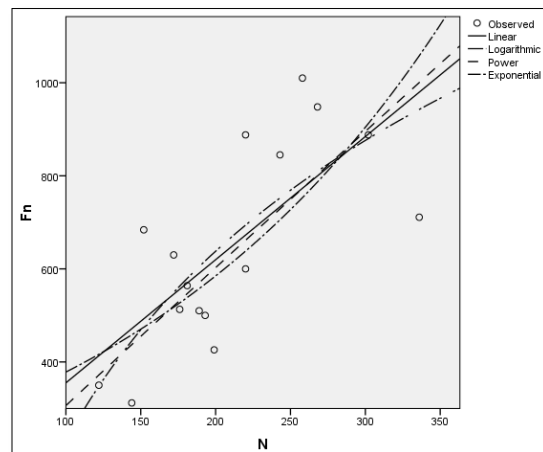
با قرار دادن مقدار θ در رابطه (۵) خواهیم داشت:

$$S_t = \frac{1}{2 \cos \phi - \tan \phi(1 - 2 \sin \phi)} C_t \quad (6)$$

که با بیان دیگر و در نظر گرفتن $\alpha = 2 \cos \phi - \tan \phi(1 - 2 \sin \phi)$ می‌توان نوشت:

$$S_t = \frac{1}{\alpha} C_t \quad (7)$$

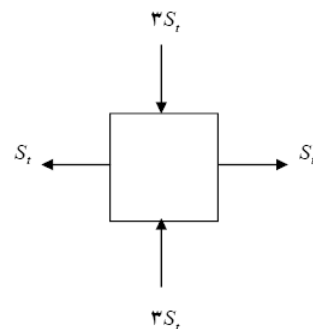
با توجه به اینکه مقدار α فقط به مقدار اصطکاک داخلی مخلوط بستگی دارد و از طرف دیگر با تغییرات مقدار اصطکاک داخلی در مخلوط‌های آسفالتی، ضریب α تغییرات اندکی می‌نماید، با درصد اطمینان بالایی می‌توان آن را ثابت فرض نمود. زاویه معمول اصطکاک داخلی برای مخلوط‌های آسفالتی ۲۰ تا ۵۰ درجه باشد و در این محدوده زاویه اصطکاک داخلی، مقدار ضریب α بین مقادیر $1/73$ تا $1/92$ قرار دارد. بنابراین، رابطه فوق مشخص می‌نماید که مقاومت کششی غیر مستقیم رابطه مستقیمی با پارامترهای برشی و در نتیجه مقاومت برشی و عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم



شکل ۵. تحلیل آماری نوع رابطه تعداد نقاط تماس و عدد روانی برای توابع مختلف

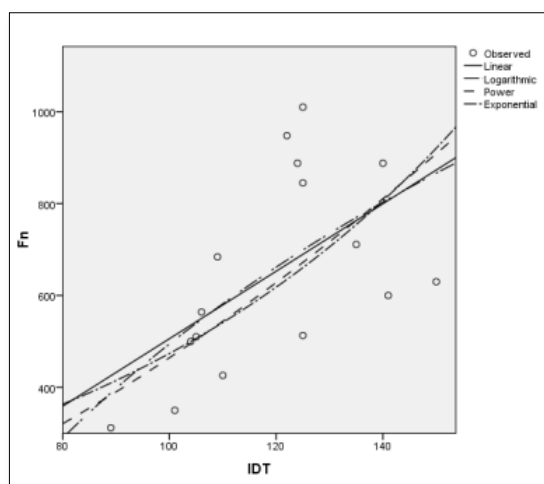
۲-۶. تحلیل اثر مقاومت کششی غیر مستقیم بر عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی

نتایج آزمایش کششی غیر مستقیم نشان می‌دهد که خط گسیختگی روی قطر قائم (محور y ها) اتفاق می‌افتد. توزیع تنش‌ها در این راستا نشان می‌دهد که تنش افقی در این راستا به صورت کششی و ثابت می‌باشد و تنش قائم به صورت فشاری بوده و در مرکز حداقل می‌باشد. بنابراین، انتظار می‌رود که نقطه مرکزی بحرانی‌ترین نقطه از لحاظ گسیختگی می‌باشد. بر اساس توزیع تئوریک تنش‌ها برای آزمایش کششی غیر مستقیم می‌توان نشان داد که تنش‌ها در مرکز نمونه ($x=0, y=0$) به صورت زیر می‌باشد:



که در آن $S_t = \frac{2p}{\pi t d}$ می‌باشد

متغیرهای مستقل و وابسته طبق جدول ۵ در نظر گرفته شده است.



شکل ۶. تحلیل آماری نوع رابطه مقاومت

کششی غیر مستقیم (کیلو پاسکال) و عدد روانی برای توابع مختلف

جدول ۵. متغیرهای مستقل و متغیر وابسته در

مدل پیش‌بینی شیارشدگی

| متغیرهای مستقل | | متغیر وابسته |
|-----------------|------------------------|-----------------------------|
| تعداد نقاط تماس | مقاومت کششی غیر مستقیم | مقاومت شیارشدگی (عدد روانی) |
| N | IDT | Fn |

در شکل ۷ و جدول ۶، نتایج تحلیل آماری نوع رابطه عملکرد شیارشدگی (عدد روانی)، تعداد نقاط تماس و مقاومت کششی غیر مستقیم نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، همه روابط در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بوده و تابع توانی همبستگی بیشتری بین مقاومت شیارشدگی، مقاومت کششی غیر مستقیم و تعداد نقاط تماس برقرار نموده است. رابطه بین عدد روانی، تعداد نقاط تماس و مقاومت کششی غیر مستقیم مطابق معادله (۸) بوده که دارای همبستگی ۷۶٪ می‌باشد:

$$Fn = .088 (IDT * N)^{.889} \quad (8)$$

دارند. این موضوع بیانگر آن است که با اندازه‌گیری مقاومت کششی غیر مستقیم می‌توان عملکرد برشی مخلوط‌های آسفالتی و در نتیجه عملکرد شیارشدگی آنها را ارزیابی نمود.

در شکل ۶، نتایج تحلیل آماری نوع رابطه مقاومت کششی غیر مستقیم و عملکرد شیارشدگی (عدد روانی) نشان داده شده است. همه روابط در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بوده است ولی تابع توانی همبستگی بیشتری ($R^2 = 51\%$) بین تعداد مقاومت کششی غیر مستقیم (IDT) و عدد روانی (Fn) برقرار نموده است. با افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم، عدد روانی افزایش پیدا نموده است. سطح همبستگی نشان می‌دهد که اگرچه رابطه معنی‌دار بوده ولی مقاومت کششی غیر مستقیم بخشی از مقاومت شیارشدگی را نشان می‌دهد. انتظار آن است که این وابستگی برای ترکیب دو پارامتر مقاومت کششی غیر مستقیم و تعداد نقاط تماس بیشتر باشد.

۷. پیش‌بینی شیارشدگی بر اساس تعداد نقاط

تماس و مقاومت کششی غیر مستقیم

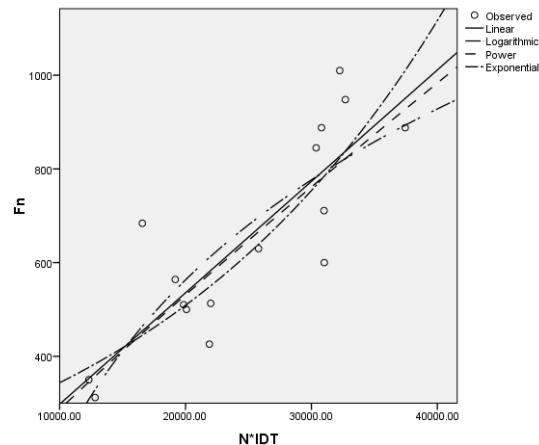
همانطور که بیان شد، تنها میزان تماس به تنهایی نمی‌تواند بیانگر رفتار مخلوط‌های آسفالتی در عملکرد مقابل برش و شیارشدگی باشد. بنابراین، میزان تماس و برهمکنش بین قیر و سنگ‌دانه‌ها و یا در واقع کیفیت تماس بر عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم تأثیرگذار می‌باشد. به همین دلیل، در این پژوهش، جهت پیش‌بینی برهمکنش بین قیر و سنگ‌دانه‌ها از آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم استفاده شده است. اگرچه مقاومت شیارشدگی به مقاومت کششی غیر مستقیم و تعداد نقاط تماس وابستگی داشته، اما انتظار آن است که این وابستگی به ترکیب این دو پارامتر بیشتر باشد. با توجه به موارد بیان شده در قسمت‌های پیشین،

شیارشدگی مخلوط می‌گردد. از طرف دیگر، تعداد نقاط تماس نشان دهنده میزان تماس سنگ‌دانه‌ها می‌باشد. افزایش تعداد نقاط تماس منجر به افزایش تعداد مسیرهای عبوری تنش می‌گردد و یا به عبارت دیگر سطح بیشتری از سنگ‌دانه‌ها برش را انتقال می‌دهند. بدین ترتیب می‌توان با این روش ساده، در حین طرح اختلاط، با ساختن نمونه‌های اضافی برای تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم و تعداد نقاط تماس با پردازش تصویر، مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را ارزیابی نمود.

۹. نتیجه‌گیری

به‌خاطر طبیعت ناهمگن مخلوط‌های آسفالتی، پارامترهای ماکرو، مانند وزن مخصوص، قابلیت لازم جهت تفسیر کامل رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی گرم را ندارند. لذا، در این تحقیق از شاخص‌های میکروساختاری ساختار داخلی روسازی جهت بررسی عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم استفاده شده است. مروری بر مطالعات گذشته و همچنین نتایج این تحقیق نشان داده است که تعداد نقاط تماس، طول تماس و شاخص ساختار داخلی روسازی پتانسیل مناسبی در نشان دادن عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم دارا می‌باشند. با افزایش تعداد نقاط تماس و طول تماس، عملکرد مخلوط‌ها در مقابل شیارشدگی بهبود یافته است. با این وجود، علاوه بر تعداد کل تماس و مقدار کل تماس، لازم است برهمکنش میان قیر و سنگ‌دانه‌ها با آزمایش‌هایی مانند مقاومت کششی غیر مستقیم ارزیابی گردد. نتایج این تحقیق نشان داد که ترکیب تعداد نقاط تماس و مقاومت کششی غیر مستقیم اطلاعات مفیدی را در خصوص عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی فراهم می‌کند.

که در این رابطه، N تعداد نقاط تماس، IDT مقاومت کششی غیر مستقیم (کیلوپاسکال) و F_n عدد روانی می‌باشد.



شکل ۷. تحلیل آماری نوع رابطه مقاومت

کششی غیر مستقیم و عدد روانی و تعداد نقاط تماس برای توابع مختلف

جدول ۶. خروجی‌های تحلیل آماری در مدل

پیش‌بینی شیارشدگی

| مدل | میانگین مربعات | جمع مربعات | F | Sig. |
|-----------|----------------|------------|------|--------------------|
| رگرسیون | ۲۰۰۹۶۴ | ۴۰۱۹۲۹ | ۸۷۶۰ | ۰/۰۰۴ ^b |
| باقیمانده | ۲۲۹۴۰ | ۲۹۸۲۲۲ | | |

۸. بحث

نتیجه اصلی این مقاله منجر به رابطه (۸) گردید که بر اساس آن می‌توان مقاومت شیارشدگی یک مخلوط آسفالتی را بر اساس مقاومت کششی غیرمستقیم و تعداد نقاط حاصل از پردازش تصویر تعیین نمود. همانگونه که از این رابطه معین است، با افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم و تعداد نقاط تماس، مقاومت شیارشدگی افزایش پیدا می‌نماید. در واقع، افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم مطابق رابطه (۷) منجر به افزایش چسبندگی و در نتیجه افزایش مقاومت برشی و مقاومت

۱۰. مراجع

- دیواندری، ح.، مدرس، ا.، حسینی، م. و رستمی، م. ۱۳۹۴. "ارائه مدل شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی با استفاده از نتایج آزمایش کششی غیر مستقیم و پارامترهای مارشال". مجله مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱(۲): ۴۱-۵۴.
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری. ۱۳۹۰. "آیین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران". وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل، مؤسسه قیر و آسفالت ایران، تجدید نظر اول.
- Ahmed, A. W., Arshadi, A., Erlingsson, S. and Bahia, H. 2016. "Evaluation of rutting performance of asphalt mixtures using extra-large wheel tracking and 2-D imaging technique". 6th Eurasphalt and Eurobitume Congress, 1-3 June, Prague, Czech Republic.
- Bessa, I. S., Castelo Branco, V. T. F. and Soares, J. B. 2012. "Evaluation of different digital image processing software for aggregates and hot mix asphalt characterizations". *Constr. Build. Mater.*, 37: 370-378.
- Bruno, L., Parla, G. and Celauro, C. 2011. "Image analysis for detecting aggregate gradation in asphalt mixture from planar images". *Constr. Build. Mater.*, 28: 21-30.
- Cai, X. and Wang, D. 2013. "Evaluation of rutting performance of asphalt mixture based on the granular media theory and aggregate contact characteristics". *Road Mater. Pavement Design*, 14(2): 325-340.
- Christensen, W. D. and Bonaquist, R. 2002. "Use of strength tests for evaluating the rut resistance of asphalt concrete". *Asphalt Paving Technology, Association of Asphalt Paving Technologists, Proceedings of the Technical Sessions*, 71: 692-711.
- Coenen, A., Kutay, E., Roohi Sefidmazgi, N. and Bahia, H. 2012. "Aggregate structure characterization of asphalt mixtures using two-dimensional image analysis". *Road Mater. Pavement Design*, 13(3): 433-454.
- Guo, Q., Bian, Y., Li, L., Jiao, Y., Tao, J. and Xiang, C. 2015. "Stereological estimation of aggregate gradation using digital image of asphalt mixture". *Constr. Build. Mater.* 94: 458-466.
- Hassan, N. A., Khan, R., Raaberg, J. and Lo Presti, D. 2015. "Effect of mixing time on reclaimed asphalt mixtures: An investigation by means of imaging techniques". *Constr. Build. Mater.*, 99: 54-61.
- Hu, J., Qian, Z., Liu, Y. and Zhang, M. 2015. "High-temperature failure in asphalt mixtures using microstructural investigation and image analysis". *Constr. Build. Mater.*, 84: 136-145.
- Kok, B. V., Yilmaz, M. and Turhan, I. 2012. "Comparison of the volumetric properties and stabilities of field and laboratory compacted asphalt concrete". 5th Eurasphalt and Eurobitume Congress, 13-15 June, Istanbul.
- Kutay, M. E., Arambula, E., Gibson, N. and Youtcheff, J. 2010. "Three-dimensional image processing methods to identify and characterize aggregates in compacted asphalt mixtures". *Int. J. Pavement Eng.*, 11(6): 511-528.
- Masad, E. and Kutay, M. E. 2012. "Characterization of the internal structure of asphalt mixtures". *Transport. Res. Circular, E-C161*, January, pp. 2-16.
- Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N. and Harman, T. 1995. "Application of digital image processing to quantitative study of asphalt concrete microstructure". *Transport. Res. Record*, 1492: 53-60.
- Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N. and Harman, T. 1999. "Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis". *J. Comp. Civ. Eng.*, 13(2): 88-95.
- Papagiannakis, A. T. and Masad, E. A. 2008. "Pavement Design and Materials". John Wiley and Sons, Inc., N. Y., 552 p.
- Roohi Sefidmazgi, N. 2011. "Defining effective aggregate skeleton in asphalt mixture using digital imaging". MSc. Thesis, Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin, Madison.
- Roohi Sefidmazgi, N., Tashman, L. and Bahia, H. 2012. "Internal structure characterization of asphalt mixtures for rutting performance using imaging analysis". *Road Mater. Pavement Design*, 24: 21-37.
- Shaheen, M., Al-Mayah, A. and Tighe, S. L. 2013. "Evaluating the potential for hot mix asphalt rutting performance using laboratory and digital imaging technique". *Characterization of Soils and Pavement Materials for Mechanistic Empirical Pavement Design*, 2013 Conference of the Transportation Association of Canada, Montreal.
- Shaheen, M., Al-Mayah, A. and Tighe, S. L. 2016. "A novel method for evaluating hot mix asphalt fatigue damage: X-ray computed tomography". *Constr. Build. Mater.*, 113: 121-133.
- Wang, H., Zhang, R., Chen, Y., You, Z. and Fang, J. 2016. "Study on microstructure of rubberized recycled hot mix asphalt based X-ray CT technology". *Constr. Build. Mater.*, 121: 177-184.
- Wang, L. 2011. "Mechanics of Asphalt Microstructure and Micromechanics". McGraw-Hill Co., Inc.

Xu, H., Tan, Y. and Yao, X. 2016. "X-ray computed tomography in hydraulics of asphalt mixtures: Procedure, accuracy, and application". *Constr. Build. Mater.*, 108: 10-21.