

## ارائه شاخص عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی مبتنی بر پردازش دیجیتال تصاویر

معین بیگلری، کارشناس ارشد مهندسی عمران- راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
ارسطو کریمی، دانشجوی دکتری مهندسی عمران- راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
صالح شریف طهرانی\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران

Email: Shariftehrani@khu.ac.ir

دریافت: ۹۶/۰۸/۲۷ - پذیرش: ۹۶/۱۲/۰۳

### چکیده

روسازی‌های ساخته شده توسط مخلوط آسفالتی داغ با فرار گرفتن در برابر رطوبت و نزولات جوی دچار خرابی و مشکلات جدی می‌گردند. به منظور بررسی پتانسیل خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش‌های مختلفی ارائه شده که روی مخلوط متراکم یا سست انجام می‌گیرند. معمولاً، آزمایش‌های انجام شده روی مخلوط متراکم، مانند آزمایش کشش غیر مستقیم ITS، نیاز به هزینه و وقت بیشتری نسبت به آزمایش‌های انجام گرفته روی مخلوط سست، مانند آزمایش آب جوشان، دارند که یکی از دلایل آن، وابستگی نتایج این آزمایش‌ها به قضاوت انسانی است. در این مقاله، سعی شده با ارائه یک شاخص جدید عریان‌شدگی، نتایج کیفی و مبتنی بر قضاوت انسانی حاصل از آزمایش آب جوشان به نتایج کمی تبدیل شوند. به همین منظور، با استفاده از روش قطعه‌بندی تصویر به صورت k-means، نواحی عریان شده تعیین و شاخصی مبتنی بر نتایج حاصل از این روش ارائه شد. به منظور ارزیابی دقت نتایج استخراج شده توسط این شاخص، مدل آماری که ارتباط بین این شاخص و نتایج حاصل از آزمایش ITS را بیان می‌کند برآزش داده شد. با توجه به معنی‌داری ضرایب مدل آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ و همچنین بالا بودن مقدار  $R^2$  (۰/۹۱) می‌توان نتیجه گرفت که این شاخص برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مناسب می‌باشد. علاوه بر این، اثر خرده تراشه آسفالتی و ماده ضد عریان‌شدگی بر حساسیت رطوبتی نیز مورد سنجش قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش خرده تراشه آسفالتی و مقدار ماده ضد عریان‌شدگی، عملکرد مخلوط آسفالتی در مقابل حساسیت رطوبتی بهبود می‌یابد. به طوری که با افزودن خرده تراشه آسفالتی و ماده‌ی ضد عریان‌شدگی به ترتیب به میزان ۶۰ و ۱/۵ درصد، شاخص TSR افزایش پیدا کرده و از ۷۱٪ به ۹۵٪ رسید.

واژه‌های کلیدی: خرده تراشه آسفالتی، آزمایش آب جوشان، آزمایش ITS، افزودنی ضد عریان‌شدگی

### ۱. مقدمه

های جدید بازیافت آسفالت از سال ۱۹۷۳ و در زمان افزایش ناگهانی قیمت نفت گسترش پیدا کرد (عبدو، ۲۰۱۶). در آن زمان، اطلاعات اندکی در مورد روش

بازیافت آسفالت برای اولین بار در اوایل قرن بیستم صورت گرفت (نیوکامب و همکاران، ۲۰۰۷). شیوه-

آسفالت داغ و همچنین آسفالت سرد) به کار گرفته می شوند (نیوکامب و همکاران، ۲۰۰۷؛ عبدو، ۲۰۱۶). با توجه به گزارش اداره بزرگراه‌های فدرال<sup>۱</sup>، این مقدار در سال ۱۹۹۳ به ۸۰ میلیون تن آسفالت می‌رسید (نیوکامب و همکاران، ۲۰۰۷). تنها در سال ۲۰۱۲، کارخانه‌های تولید آسفالت در آمریکا برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی از ۶۸/۳ میلیون تن خرده آسفالت بازیافتی استفاده نمودند (وست و همکاران، ۲۰۱۳).

از سوی دیگر، روسازی‌هایی که در شرایط آب و هوایی مرطوب و شرجی قرار دارند با مشکلاتی مانند شیارشدگی، ترک‌خوردگی و عریان‌شدگی روبرو هستند (کره و همکاران، ۲۰۰۵). این خرابی‌ها می‌توانند در اثر بارگذاری ترافیکی، تغییرات شرایط آب و هوایی و قرار گرفتن در معرض آب رخ دهند (فورد و همکاران، ۱۹۷۳؛ اندرسون و دوکاتز، ۱۹۸۲). نفوذ آب از سطح روسازی می‌تواند موجب گسیختگی در محل چسبندگی قیر و سنگدانه گردد که در نهایت باعث ایجاد عریان‌شدگی در روسازی می‌گردد (لاتمن، ۱۹۸۳؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۲). عریان‌شدگی یکی از مشکلات عمده-ی روسازی‌های آسفالتی می‌باشد که به عدم چسبندگی قیر و سنگدانه و جداشدگی قیر از سطح سنگدانه اطلاق می‌گردد (حسین و اولا، ۲۰۱۱؛ شیائو و همکاران، ۲۰۰۷). در مناطقی که شرایط آب و هوایی مناسب می‌باشد، علت اصلی پدیده عریان‌شدگی، عبور ترافیک از سطح روسازی است. در حالی که در مناطقی با شرایط نامناسب آب و هوایی، این پدیده می‌تواند به علت حضور آب، کیفیت نامناسب سنگدانه‌ها و شرایط نگهداری نامناسب رخ دهد (اسکندر و همکاران، ۲۰۱۲). به دلیل عدم وجود مصالح سنگی مرغوب به میزان کافی، در بسیاری از مناطق از سنگدانه‌هایی با کیفیت پایین استفاده می‌گردد. بر همین اساس، استفاده از خرده آسفالت بازیافتی یکی از راهکارهایی است که

طراحی، طرح اختلاط، اجرا و عملکرد این نوع روسازی‌ها وجود داشت. استفاده از این مصالح به سرعت گسترش پیدا کرد و برنامه‌ی تحقیقات ملی در مورد بزرگراه‌ها<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۰ گزارشی با عنوان راهنمای استفاده از خرده آسفالت بازیافتی در روسازی ارائه نمود که در آن تجربیات بسیاری از ادارت راه-سازی و سازمان‌های مختلف انعکاس پیدا کرده بود (نیوکامب و همکاران، ۲۰۰۷).

صنعت آسفالت در سال ۲۰۰۶ با مشکلات ناشی از افزایش ناگهانی قیمت انرژی مواجه شد که در نتیجه آن هزینه جابجایی، حمل و تولید آسفالت افزایش پیدا نمود. از سوی دیگر، جامعه‌ی بشری از اواخر قرن بیستم میلادی متوجه شد که برداشت بی‌رویه مصالح از طبیعت می‌تواند موجب تخریب محیط‌زیست گردد. به همین دلیل، محدودیت‌هایی را برای استفاده از مصالح و سنگدانه‌های موجود در طبیعت اعمال نمود. با توجه به مسائل عنوان شده می‌توان گفت که استفاده از مصالح بازیافتی می‌تواند مزایای بسیاری از لحاظ زیست‌محیطی و اقتصادی داشته باشد (عبدو، ۲۰۱۶).

اخیراً در کشورهای پیشرفته از تمامی مصالح خرده آسفالت بازیافتی برای ساخت لایه‌های آسفالتی جدید استفاده می‌گردد (اوکافور، ۲۰۱۰). بازیافت آسفالت می‌تواند باعث کاهش مصالح دورریز آسفالتی گردد (کولی، ۲۰۰۵). به عنوان مثال، می‌توان گفت که به ازای هر ۳۰۰۰۰ تن مخلوط آسفالتی ساخته شده با ۶٪ قیر می‌توان ۲۸۲۰۰ تن مصالح سنگدانه‌ای و ۱۰۰۰۰ بشکه قیر استخراج نمود (کولی، ۲۰۰۵).

در کشور آمریکا، خرده آسفالت بازیافتی به عنوان پُر استفاده‌ترین ماده بازیافتی محسوب می‌شود. می‌توان گفت که در این کشور بیش از ۸۰٪ مصالح آسفالتی بازیافت شده دوباره در ساخت روسازی (به روش‌های مختلف مثل استفاده از آن در اساس و زیراساس،

<sup>۱</sup> FHWA<sup>۱</sup> NCHRP

قیر تازه داشته باشد. افزودن خرده آسفالت بازیافتی بین ۱۵ الی ۲۵٪ می‌تواند باعث گردد درجه عملکردی قیر جدید یک درجه کاهش یابد (کاندهال و فو، ۲۰۰۷).

بررسی‌های طولانی مدت (طی ۷ سال) روی روسازی‌های دارای تراشه‌های آسفالت بازیافتی بیانگر این موضوع بود که این روسازی‌ها می‌توانند عملکردی به خوبی روسازی‌های ساخته شده با مصالح جدید داشته باشند و یا حتی بهتر از آن‌ها عمل کنند (اپس و همکاران، ۱۹۸۰). تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از ۳۰٪ مصالح بازیافتی به عنوان جایگزین آسفالت می‌تواند باعث بهبود عملکرد روسازی به کار رفته در لایه روکش گردد. استفاده از لایه روکش دارای تراشه آسفالتی می‌تواند باعث شود که این لایه مقاومت بهتری در برابر ترک‌های انعکاسی از خود نشان دهد (وست و همکاران، ۲۰۱۳؛ چن و دالیدن، ۲۰۰۵). نمونه‌های دارای مقادیر بالای خرده آسفالت بازیافتی (بین ۵۰-۱۰۰٪) در صورتی که به درستی و با طرح اختلاط مناسبی ساخته شوند، می‌توانند به مراتب عملکردی بهتر از نمونه‌های ساخته شده با مصالح جدید داشته باشند (الهمروی و همکاران، ۲۰۱۵).

میزان استقامت مارشال نمونه‌های دارای خرده آسفالت بازیافتی نشان داد که با افزودن خرده آسفالت بازیافتی، مقاومت مارشال نمونه‌ی آسفالتی به صورت خطی افزایش می‌یابد. به طوری که نمونه‌هایی که کاملاً با مصالح بازیافتی ساخته شده بودند دارای استقامت مارشال بیش از دو برابر نمونه‌های ساخته شده با مصالح جدید می‌باشند (حسین و یانجون، ۲۰۱۲).

همانطور که اشاره گردید، به دلیل وجود قیر قدیمی در خرده تراشه آسفالتی، مخلوط‌های ساخته شده با این مصالح دارای سختی بالایی می‌باشند که می‌تواند به کاهش شیارشدگی در دمای زیاد کمک نماید (پرادیومنا و همکاران، ۲۰۱۳). سختی بالای قیر موجود در خرده آسفالت بازیافتی می‌تواند موجب مقاومت بیشتر در برابر

می‌تواند مورد توجه قرار گیرد (ابوقدیس و ملکی، ۲۰۰۵). هرچند در سال‌های اخیر تحقیقات متنوعی در زمینه‌ی خصوصیات روسازی‌های حاوی خرده آسفالت بازیافتی انجام شده، اما تحقیقات کمی در زمینه‌ی حساسیت رطوبتی و عریانشدگی این نوع روسازی‌ها صورت گرفته است.

در تحقیقاتی که شیائو و امیرخانیان (۲۰۰۹) انجام دادند، مشخص گردید که افزودن خرده آسفالت بازیافتی می‌تواند میزان حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی را بهبود بخشد. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که افزودن خرده تراشه‌ی آسفالتی می‌تواند موجب کاهش ٪ قیر مخلوط آسفالتی گردد. علت این امر، میزان چسبندگی بالای قیر و سنگدانه در خرده تراشه‌ی آسفالتی می‌باشد (شیائو و همکاران، ۲۰۰۷).

در ابتدا، شرکت‌ها و ادارات راهداری تنها مجاز بودند تا تنها ۳۰٪ از مصالح جدید را به وسیله‌ی خرده آسفالت بازیافتی جایگزین نمایند. اما رفته رفته، با افزایش قیمت قیر، آیین‌نامه‌ها استفاده بیشتر از این مصالح تا ۵۰٪ را مجاز دانسته‌اند (هانسن و کوپلند، ۲۰۱۳). با توجه به اینکه برخی از آیین‌نامه‌های برای استفاده از خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط آسفالتی جدید محدودیت‌هایی قائل شده‌اند. استفاده از این مصالح در ساخت لایه‌های اساس و زیراساس و تثبیت مصالح کم استقامت گسترش یافته است (لوکاندر، ۲۰۰۹؛ عبدو، ۲۰۱۶، مک‌گراه، ۲۰۰۷).

بیشترین استفاده خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط آسفالتی می‌باشد. میزان استفاده از خرده تراشه آسفالتی در مخلوط آسفالتی داغ توسط برخی از ادارت راه و ترابری محدود گردیده است. آنها علت این امر را وجود قیر سخت شده در سطح این مصالح می‌دانند که می‌تواند میزان ترک‌خوردگی را در روسازی آسفالتی افزایش دهد (سمپاث، ۲۰۱۰). افزودن خرده آسفالت بازیافتی تا ۱۵٪ نمی‌تواند تأثیر مشخصی بر خصوصیات

و موشول، ۱۹۹۱). اما از سوی مقابل، سانیل و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر افزودن ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد خرده آسفالت بازیافتی را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که با افزودن این مصالح، مقاومت خستگی نمونه‌های آسفالتی کاهش می‌یابد. در حالی که برخی دیگر نشان دادند که خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی مورد نظر بسته به اینکه که این خرده آسفالت‌ها از چه منبعی تهیه شده باشد و یا اینکه به چه میزانی استفاده گردد، می‌تواند متفاوت باشد (حاج و همکاران، ۲۰۰۹). بر اساس مشاهدات، قیری که روی خرده آسفالت بازیافتی شکل گرفته نمی‌تواند به طور کامل با قیر جدید و یا ماده‌ی جوان کننده مخلوط گردد و به صورت یک لایه محافظ اطراف مصالح بازیافتی را می‌پوشاند. با توجه به پیرتر بودن قیر موجود در آسفالت بازیافتی، این قیر نسبت به قیر جدید دارای سختی بیشتری می‌باشد. به همین دلیل، پس از مخلوط کردن مصالح خرده آسفالت بازیافتی با مصالح جدید، لایه‌های دوگانه‌ای روی آن شکل می‌گیرد (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۵). قیر چندلایه‌ای که اطراف خرده آسفالت بازیافتی را احاطه نموده می‌تواند باعث کاهش تمرکز تنش موجود در روسازی گردد. همچنین، وجود قیر پیر شده در اطراف خرده آسفالت بازیافتی می‌تواند اتصال قوی‌تری را بین خود و مصالح خرده آسفالت بازیافتی ایجاد نماید (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۵).

تست‌های آزمایشگاهی بسیار زیادی برای بررسی پتانسیل حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی توسعه داده شده است که شامل دو دسته اصلی آزمایش‌های مبتنی بر مخلوط‌های متراکم و آزمایش‌های مبتنی بر مخلوط سست<sup>۱</sup> است. از جمله آزمایش‌های مخلوط آسفالتی متراکم که توسط آن می‌توان حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی را اندازه‌گیری نمود، آزمایش لاتمن اصلاح شده (ITS) می‌باشد. در این آزمایش، مقدار

شیارشده‌گی گردد. اما احتمال وقوع ترک‌های انقباضی در مناطق سردسیر (به‌خصوص زمانی که در لایه‌ی سطحی روسازی استفاده شوند) را افزایش می‌دهد (کاندهال و فو، ۲۰۰۷). کلبرت و یو (۲۰۱۲) تأثیر استفاده از این مصالح را بر مخلوط آسفالتی بیان کردند. بر این اساس، آنها نشان دادند که نمونه‌های دارای خرده آسفالت بازیافتی می‌تواند باعث کاهش میزان شیارشده‌گی تا ۲۴٪ گردد. همچنین، مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی می‌تواند تا ۵۲٪ افزایش پیدا کند. نتایج آزمایش خزش دینامیک در دمای ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس نشان داد که نمونه‌های دارای خرده آسفالتی مقدار تغییرشکل دائم کمتری را ثبت نمودند. به طوری که با افزایش پیوسته مقدار خرده آسفالت بازیافتی، مقدار تغییرشکل دائم کاهش می‌یابد (مقدس نژاد و همکاران، ۲۰۱۴).

نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم نشان داد که در صورتی که خرده آسفالت بازیافتی به میزان ۵۰٪ به مخلوط آسفالتی اضافه گردد می‌تواند مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه را تا ۱۰۶٪ افزایش دهد (اله‌مروی و همکاران، ۲۰۱۵). نتایج تحقیق ریس اورتیز و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد که بیشترین مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) و مدول برجهندگی زمانی به دست آمد که درصد جایگزینی مصالح با خرده آسفالت ۱۰۰٪ باشد.

یکی دیگر از خصوصیات مهم مخلوط‌های آسفالتی، عمر خستگی این نمونه‌ها می‌باشد که با توجه به افزایش سختی نمونه‌های دارای خرده آسفالت بازیافتی می‌توان گفت عمر خستگی این نمونه‌ها شدیداً تحت تأثیر میزان خرده‌تراشی آسفالتی می‌باشد. در برخی از تحقیقات نشان داده شده که افزودن خرده آسفالت بازیافتی می‌تواند عمر خستگی نمونه‌ها را افزایش دهد (پرادیومنا و همکاران، ۲۰۱۳؛ موگاور و همکاران، ۲۰۱۲؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۰۴؛ سارجیوس

<sup>۱</sup> Loose mixture

یک روش کیفی است که به قضاوت اپراتور بستگی دارد. به منظور کمی‌سازی این روش، مطالعاتی انجام گرفته است. مروسو و همکاران (۲۰۱۰). برای بررسی حساسیت رطوبتی نمونه‌های اصلاح شده با واکس، از یک الگوریتم پردازش تصویر بهره بردند. در مطالعاتی مشابه، کیم و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی عریان‌شدگی مخلوط HMA<sup>۱</sup> و عاملیان و همکاران (۲۰۱۴) نیز به بررسی عریان‌شدگی مخلوط HMA با سنگدانه‌های متفاوت و مواد ضد عریان‌شدگی پرداختند. در تمامی این مطالعات، برای تبدیل تصویر به دو ناحیه (عریان شده و عریان نشده) از روش حد آستانه استفاده گردیده است. شکل‌های موجود در این مطالعات، استفاده از یک حد آستانه ثابت برای تمامی تصاویر است. در روش جداسازی تصویر با حد آستانه<sup>۲</sup> (استو، ۱۹۷۹)، هر تصویر دارای یک حد آستانه متفاوت برای خود می‌باشد که با توجه به ویژگی‌های تصویر تعیین می‌شود و استفاده از یک حد آستانه ثابت برای تمامی تصاویر صحیح نمی‌باشد. از طرفی، در صورت عدم استفاده از یک حد آستانه، محققان قادر به مقایسه تصاویر با این روش نبودند.

نظیری زاد و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر استفاده از آهک هیدراته و مواد ضد عریان‌شدگی را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها برای این منظور از آزمایش لاتمن اصلاح شده و همچنین آزمایش آب جوشان استفاده نمودند. نتایج آزمایش آب جوشان که توسط پردازش تصویر تحلیل شده بود نشان داد که هرچند استفاده از هر دو ماده می‌تواند باعث بهبود عملکرد آسفالت در برابر عریان‌شدگی گردد، اما استفاد از پودر آهک عملکرد نسبتاً بهتری را از خود نشان داد.

نسبت مقاومت کششی (TSR) به عنوان معیاری برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌باشد. خرده آسفالت بازیافتی به دلیل دارا بودن قیرهای سخت تر می‌تواند از حرکت‌های کوچکی که بین قیر و سنگدانه اتفاق می‌افتد جلوگیری نماید و در نتیجه مقاومت بیشتری در برابر عریان‌شدگی از خود نشان دهد (موگاور و همکاران، ۲۰۱۲؛ حاج و همکاران، ۲۰۰۹).

بر اساس تحقیقات شیائو و امیرخانیان (۲۰۱۴)، نتایج آزمایش ITS روی نمونه‌های دارای خرده آسفالت بازیافتی نشان داد که برای برخی از نمونه‌های دارای دانه‌بندی خاص ماده‌ی ضد عریان‌شدگی نسبت به آهک هیدراته برتری نسبی دارد و برای برخی دیگر از دانه بندی‌ها، آهک هیدراته مقاومت بهتری در مقابل رطوبت از خود نشان داد. در تمامی نمونه‌ها، نسبت TSR بیش از ۸۰٪ بود. مقدس نژاد و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر افزودن ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درصد خرده آسفالت بازیافتی را بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نشان دادند که با افزایش میزان خرده تراشه آسفالتی، مقدار نسبت مقاوم کششی (TSR) کاهش پیدا می‌کند.

ضعف مخلوط آسفالتی در مقابل رطوبت می‌تواند به دو دلیل اتفاق بیفتد: ۱) از بین رفتن چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه که می‌تواند به دلیل قرار گرفتن آب بین لایه‌ی قیر و سنگ‌دانه باشد و ۲) وقوع گسیختگی در مخلوط قیر-فیلر (تارفدر و زمان، ۲۰۰۹). عامل اول را می‌توان با آزمایش آب جوش تگزاس مورد ارزیابی قرار داد و عامل دوم را می‌توان تا حدودی با آزمایش لاتمن اصلاح شده بررسی نمود. آزمایش‌های مبتنی بر مخلوط سست دارای سرعت و تجهیزات و هزینه کمتری نسبت به حالت متراکم است. اما بسیاری از این آزمایش‌ها، مانند آزمایش آب جوشان، وابسته به قضاوت انسانی است (عاملیان و همکاران، ۲۰۱۴). آزمایش آب جوشان

<sup>۱</sup> Wax

<sup>۲</sup> Hot Mix Asphalt

<sup>۳</sup> Image thresholding segmentation

آزمایش‌های مربوطه تأثیر خرده تراشه‌ی آسفالتی و ماده ضد عریان‌شدگی بر حساسیت رطوبتی این مخلوط‌ها بررسی گردد. در این راستا، با بهره‌گیری از روش پردازش تصویر، برای اولین بار از یک شاخص جدید به منظور ارزیابی میزان عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده گردید.

## ۲. مصالح

برای ساخت مخلوط آسفالتی از قیر ۷۰-۶۰ تهیه شده از پالایشگاه تهران استفاده گردید. مشخصات این قیر که شامل تست درجه نفوذ، تست نقطه نرمی، تست مقدار کشش و تست وزن مخصوص می‌باشد مطابق جدول ۱ می‌باشد.

خرده تراشه از معادن دپوی شهرداری تهران تهیه گردید. این مصالح حاصل از تراشیدن سطح رویه‌ی آسفالتی به منظور اجرای یک لایه روکش بود. با استفاده از دستگاه استخراج قیر، مقدار قیر موجود در این خرده تراشه‌ی آسفالتی برابر ۵/۱ درصد تعیین شد.

سنگ‌دانه‌های مورد استفاده برای ساخت مخلوط آسفالتی از معادن واقع در غرب استان تهران تهیه گردید. خصوصیات مصالح و نتایج آزمایش XRF<sup>۲</sup> به ترتیب در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است. نتایج آزمایش XRF نشان می‌دهد مقدار سیلیس موجود در این مصالح بسیار زیاد می‌باشد (در حدود ۵۳٪) و می‌توان این مصالح را از نوع مصالح سیلیسی به شمار آورد. در این پژوهش، برای ساخت آسفالت از دانه‌بندی شماره ۵ جدول ۱-۹ نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استفاده گردید. در جدول ۴، دانه‌بندی و محدوده‌ی مربوط به دانه‌بندی شماره ۵ نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی نشان داده شده است.

یکی از راه‌کارهای رایج که همواره مورد توجه محققان بوده است استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی به منظور افزایش دوام مخلوط آسفالتی می‌باشد. دلایل بسیاری، از جمله قیمت کم و استفاده‌ی آسان، باعث گردیده تا استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی مایع در کشور آمریکا رواج پیدا کند (پوتمن و امیرخانیان، ۲۰۰۶؛ گاندی و همکاران، ۲۰۰۹؛ مائوپین، ۱۹۷۰). این مواد ضد عریان‌شدگی مایع باعث کم شدن کشش سطحی موجود بین قیر و مصالح سنگی می‌شوند. با کاهش تنش‌های کششی بین قیر و مصالح سنگی، میزان چسبندگی بین آنها افزایش می‌یابد. بر اساس تحقیقات سبالی و همکاران (۲۰۰۷) می‌توان گفت که مواد ضد عریان‌شدگی مایع یک نوع ماده‌ی فعال سطحی می‌باشد که با کم کردن کشش سطحی سنگدانه‌ها موجب پوشش بهتر آنها می‌گردد. معمولاً از قیر به عنوان ماده‌ای که مواد ضد عریان‌شدگی به آن اضافه می‌شود استفاده می‌کنند. اما عیب این روش این است که بیشترین مقدار مواد ضد عریان‌شدگی در قیر پخش شده و با سطح سنگدانه در تماس نمی‌باشند. در بسیاری از موارد، مهندسان به دلیل ارزان بودن قیمت این مواد و استفاده‌ی آسان آنها سعی می‌کنند از این مواد به جای آهک هیدراته استفاده نمایند (کیم و امیرخانیان، ۱۹۹۱).

در بخش مقدمه، سعی گردید تا مروری کوتاه بر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی تاریخچه و عملکرد روسازی‌های حاوی خرده تراشه‌ی آسفالتی و اهمیت حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی انجام شود. با توجه به مطالب مطرح شده در این بخش می‌توان گفت که هرچند پژوهش‌های زیادی در زمینه خصوصیات فیزیکی و رفتاری این نوع مخلوط‌های آسفالتی صورت گرفته اما کمتر به حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی خرده تراشه‌ی آسفالتی پرداخته شده است. بر این اساس، در این مقاله سعی گردید تا با بهره‌گیری از

<sup>۲</sup> - Extraction

<sup>۳</sup> - X-Ray Fluorescence

<sup>۱</sup> - Surfactant

جدول ۱. مشخصات قیر ۶۰-۷۰

نتیجه	حدود مشخصات		روش آزمایش	نوع آزمایش
	حداکثر	حداقل		
۶۳/۵	۷۰	۶۰	ASTM D5	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس (۱۰۰ گرم - ۵ ثانیه)
۴۹/۳	۵۶	۴۹	ASTM D36	نقطه نرمی (گلوله - حلقه) بر حسب سلسیوس
۱۰۷	-	۱۰۰	ASTM D113	مقدار کشش در ۲۵ درجه سلسیوس بر حسب سانتی‌متر
۱/۰۱۴	۱/۰۱۷	۱/۰۱۳	ASTM D3289	وزن مخصوص قیر (گرم بر سانتی‌متر مربع)

جدول ۲. خصوصیات مصالح مورد استفاده

نتیجه	محدوده مجاز آیین‌نامه		استاندارد آزمایش	آزمایش
	حداکثر	حداقل		
۹۱	-	۶۰	ASTM D 5821	میزان شکستگی (%)
۱/۴	۸	-	ASTM C 88	افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (%)
۱۳	۲۵	-	ASTM C 131	سایش لس‌آنجلس (%)
۱۵	۱۵	-	ASTM D 4791	مقدار سنگ‌دانه‌های سوزنی و پولکی (%)

جدول ۳. ترکیب شیمیایی مصالح مورد استفاده

عنصر (ماده)	فرمول	%
Zirconium	Zr	۰/۰۱۸
Strontium	Sr	۰/۰۲
Ferrous oxide	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۰۳
Titanium dioxide	TiO <sub>2</sub>	۲/۹
Calcium oxide	CaO	۰/۳۷
Potassium oxide	K <sub>2</sub> O	۱۲/۲
Sulfur trioxide	SO <sub>3</sub>	۲/۴
Phosphorus pentoxide	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۱
Siliceous dioxide	SiO <sub>2</sub>	۵۳/۹
Aluminum oxide	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۱/۸
Magnesium oxide	MgO	۱/۹
Sodium oxide	Na <sub>2</sub> O	۲/۴

جدول ۴: دانه‌بندی و محدوده‌ی مربوط به دانه‌بندی شماره ۵ نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی

اندازه الک	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۰/۳	۰/۰۷۵
محدوده درصد عبوری مجاز	۱۰۰-۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۵۵-۸۵	۳۲-۶۷	۷-۲۳	۲-۱۰
درصد وزنی عبوری از هر الک	۱۰۰	۹۵	۷۰	۴۹/۵	۱۵	۶

$$TSR = \frac{ITS_{\text{مرطوب}}}{ITS_{\text{خشک}}} \times 100 \quad (1)$$

۳-۲. آزمایش آب جوشان و کمی‌سازی نتایج آن  
در آزمایش آب جوشان تگزاس، حساسیت رطوبتی و میزان عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی به‌صورت کیفی و بصری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این آزمایش، پس از اختلاط کامل سنگ‌دانه‌ها با قیر تا حدی که تمامی سطح سنگ‌دانه‌ها به‌طور کامل به قیر آغشته گردد، مخلوط آسفالتی در فضای باز قرار می‌گیرد تا کاملاً سرد گردد. پس از اینکه سنگ‌دانه‌ها کاملاً سرد و به‌صورت ذرات جدای از هم درآمدند، مخلوط آسفالتی به مدت ۱۰ دقیقه در آب جوش قرار داده می‌شود و سپس از آن خارج می‌گردد و اجازه داده می‌شود تا مخلوط آسفالتی خشک شود. هرچند بر اساس روش کلی آزمایش، در این مرحله میزان عریان‌شدگی به‌وسیله‌ی ارزیابی بصری صورت می‌گیرد، اما به دلیل عدم دقت ارزیابی بصری در این تحقیق از روش پردازش تصویر به منظور تعیین میزان عریان‌شدگی نمونه‌ها استفاده شد. بدین ترتیب، پس از انجام آزمایش آب جوشان، مخلوط را روی یک کاغذ پهن کرده و پس از خشک شدن سطح مخلوط، از آن تصویربرداری انجام گرفت. باید توجه گردد تا هنگام تصویر برداری میزان نور، موقعیت و فضای تصویر برداری برای تمامی نمونه‌ها یکسان باشد. همچنین، تنظیمات دوربین عکاسی مورد استفاده باید در تمام مدت تصویر برداری ثابت باشد تا تصاویر برداشت شده با یکدیگر قابل مقایسه باشند. پس از تصویر برداری،

### ۳. روش انجام آزمایش

در این تحقیق، دو آزمایش لاتمن اصلاح شده (ASTM T283) و آزمایش آب جوشان (ASTM D3625) به منظور ارزیابی خصوصیات تعیین حساسیت رطوبتی آسفالت استفاده گردید.

#### ۳-۱. آزمایش لاتمن اصلاح شده

آزمایش لاتمن اصلاح شده یکی از انواع آزمایش‌های کمی ارزیابی حساسیت رطوبتی می‌باشد. برای انجام این آزمایش، ۶ نمونه با درصد قیر بهینه‌ی آزمایش مارشال ساخته شد. در این آزمایش، مقاومت کششی غیرمستقیم برای ۳ نمونه در حالت خشک و برای ۳ نمونه در حالت مرطوب طبق استاندارد AASHTO T-283 تعیین می‌گردد. بر اساس این استاندارد، نمونه‌های مرطوب ابتدا توسط پمپ خلأ به صورت نسبی (۵۰-۸۰ درصد) اشباع می‌شوند و پس از آن به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب گرم با دمای ۶۰ درجه‌ی سلسیوس قرار می‌گیرند. پس از خروج از حمام آب، درون آب با دمای ۲۵ درجه‌ی سلسیوس قرار گرفته و پس از آنکه دمای نمونه به دمای ۲۵ درجه‌ی سلسیوس رسید از درون آب خارج شده و درون دستگاه بارگذاری قرار می‌گیرند. با تقسیم مقادیر به‌دست آمده در حالت مرطوب به مقادیر به‌دست آمده در حالت خشک، نسبت TSR به دست می‌آید که شاخص مؤثری برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد (رابطه-۱):



این شاخص همواره عددی بین صفر تا ۱ است. هر اندازه این عدد به یک نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده پتانسیل عریان‌شدگی بیشتری برای مخلوط است. در صورتی که مقدار این شاخص صفر باشد، بدین معنی است که هیچگونه عریان‌شدگی وجود ندارد.

#### ۴. طرح اختلاط

طرح اختلاط مخلوط آسفالتی به وسیله‌ی روش مارشال تعیین شد. نمونه‌های ساخته شده به وسیله‌ی ۷۵ ضربه‌ی چکش مارشال که به هر طرف نمونه وارد می‌شد متراکم گردیدند. نمونه‌های متراکم شده به وسیله‌ی دستگاه بارگذاری مارشال مورد آزمایش قرار گرفتند و مقدار قیر بهینه بر اساس میانگین سه مقدار زیر و برابر ۵/۲ درصد تعیین گردید. از سوی دیگر، میزان روانی و درصد هوای پر شده با قیر نیز با مقادیر ذکر شده در آیین‌نامه کنترل گردیدند که آنها نیز با مقادیر موجود در آیین‌نامه همخوانی داشتند.

- میزان استقامت متناظر با حداکثر استقامت مخلوط آسفالتی
  - میزان استقامت متناظر با حداکثر وزن مخصوص واقعی مخلوط آسفالتی
  - میانگین قیر متناظر با حد وسط مقدار مجاز هوای موجود در مخلوط آسفالتی
- از سوی دیگر، با استفاده از فرایند استخراج مقدار قیر موجود در خرده آسفالتی برابر ۵/۲ درصد تعیین گردید. برای بررسی تأثیر ماده‌ی ضد عریان‌شدگی در حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی از مقادیر صفر، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد ماده‌ی ضد عریان‌شدگی استفاده گردید. ماده‌ی ضد عریان‌شدگی مورد استفاده ساخت شرکت EVONIK آلمان بود که قابلیت انحلال در قیر را داشت. همچنین از مقادیر صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد خرده تراشه‌ی آسفالتی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی

تصاویر به اندازه یکسان برش داده شدند. سپس، تمامی تصاویر از مقیاس RGB<sup>۱</sup> به مقیاس خاکستری<sup>۲</sup> تبدیل شدند. سپس، با استفاده از روش خوشه‌بندی K-means، تصویر به دو قسمت با ویژگی‌های مشابه (عریان شده و عریان نشده) تقسیم شد.

روش خوشه‌بندی K-means برای دسته‌بندی داده بر اساس صفات<sup>۳</sup> یا ویژگی آن‌ها به K دسته مختلف است. دسته‌بندی بر اساس حداقل کردن فاصله بین داده‌ها و مرکز خوشه مربوطه است. فرض کنید  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  شدت هر پیکسل، عددی بین صفر (مشکی) تا ۲۵۵ (سفید)، باشد، این روش خوشه‌بندی را به گونه‌ای انجام می‌دهد که مجموع مربعات فاصله هر پیکسل با مرکز مربوط به آن دسته (اختلاف شدت هر پیکسل با شدت مرکز دسته) حداقل شود. به عبارت دیگر، تابع هدف زیر حداقل شود:

$$J = \sum_{j=1}^2 \sum_{n \in S_j} \|x_n - c_j\|^2 \quad (2)$$

که در آن  $c_j$  مرکز هندسی<sup>۴</sup> داده‌های متعلق به دسته  $S_j$  است. با تعیین دسته‌ها، دسته با مرکز بزرگتر به عنوان دسته عریان شده (Ss) در نظر گرفته می‌شود. پس از تبدیل تصویر به دو ناحیه (عریان شده و عریان نشده)، شاخص عریان‌شدگی<sup>۵</sup> که در واقع بیانگر میزان عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی است مطابق معادله (۳) ارائه می‌گردد:

$$S_{index} = \frac{P_s}{p_t} \times \frac{c_s}{255} \quad (3)$$

که در آن  $P_s$ : تعداد پیکسل‌های دسته Ss،  $P_t$ : تعداد کل پیکسل‌های تصویر و  $c_s$ : مرکز مربوط به دسته Ss است.

<sup>۱</sup> Crop

<sup>۲</sup> Red- Green-Blue

<sup>۳</sup> Gray scale

<sup>۴</sup> Attributes

<sup>۵</sup> Geometric centroid

<sup>۶</sup> S-index

نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی تأثیری بر مقاومت ITS خشک نمونه‌ها نداشته است. در حالی که با افزایش میزان خرده تراشه آسفالتی، مقدار ITS خشک افزایش پیدا کرده است. در حالی که نتایج آزمایش ITS نمونه‌های مرطوب نشان می‌داد که با افزایش مقدار ماده‌ی ضد عریان‌شدگی مقدار ITS افزایش پیدا می‌کند. هرچند میزان مقاومت نمونه‌های مرطوب کمتر از نمونه‌های خشک بود، اما افزودن مقدار ماده‌ی ضد عریان‌شدگی، به‌خصوص به میزان ۱/۵ درصد، می‌تواند باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت گردد. در نمونه‌های مرطوب، همانند نمونه‌های خشک، افزودن خرده تراشه آسفالتی به طور پیوسته باعث افزایش میزان مقاومت ITS می‌گردد. در واقع به دلیل چسبندگی بالای بین سنگدانه‌ها و قیر در خرده تراشه آسفالتی، افزایش این مصالح می‌تواند باعث بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی در حضور آب گردد.

استفاده گردید. مقدار قیر جدیدی که به مخلوط آسفالتی اضافه گردید با استفاده از رابطه‌ی زیر تعیین گردید.

$$P_{nb} = \frac{(100^2 - rP_{sb})P_b}{100(100 - P_{sb}) - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100 - P_{sb}}} \quad (4)$$

که  $P_{nb}$  درصد قیر آسفالت جدید در کل مخلوط آسفالتی  $r$  درصد سنگدانه‌های جدید در مجموع سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی،  $P_b$  درصد مقدار قیر بهینه آسفالت،  $P_{sb}$  نیز درصد قیر موجود در خرده تراشه‌ی آسفالتی بود. تمامی مخلوط‌های آسفالتی در دمای ۱۳۵ درجه‌ی سلسیوس با یکدیگر مخلوط شدند و در دمای ۱۲۵ درجه‌ی سلسیوس متراکم گردیدند.

## ۵. نتایج و تحلیل

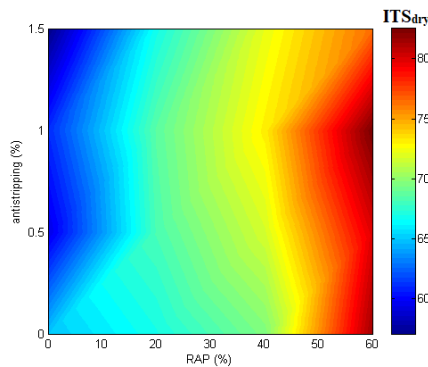
### ۵-۱. آزمایش لاتمن اصلاح شده (ITS)

خلاصه‌ای از مشخصات نمونه‌های ساخته شده به همراه نتایج آزمایش لاتمن اصلاح شده برای نمونه‌های خشک و نمونه‌های مرطوب در جدول ۵ و شکل ۱

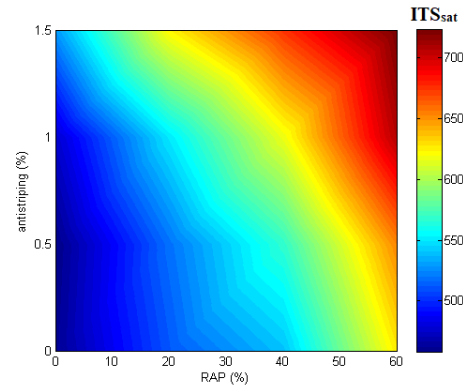
جدول ۵. مشخصات نمونه‌های ساخته شده به همراه نتایج آزمایش لاتمن اصلاح شده

TSR (%)	مقاومت کششی غیر مستقیم		ماده‌ی ضد عریان‌شدگی	قیر (%)	مصالح		مخلوط
	اشباع	خشک			مخالص جدید	خرده تراشه	
۷۱	۴۶۱	۶۴۹	۰	۵/۲	۱۰۰	۰	۱
۷۶	۵۱۱	۶۶۹	۰	۴/۲	۸۰	۲۰	۲
۷۸	۵۴۰	۶۹۵	۰	۳/۱	۶۰	۴۰	۳
۷۷	۶۲۶	۸۱۵	۰	۲/۱	۴۰	۶۰	۴
۷۷	۴۵۸	۵۹۴	۰/۵	۵/۲	۱۰۰	۰	۵
۷۶	۵۱۹	۶۸۲	۰/۵	۴/۲	۸۰	۲۰	۶
۷۹	۵۶۸	۷۱۷	۰/۵	۳/۱	۶۰	۴۰	۷
۸۲	۶۵۳	۸۰۰	۰/۵	۲/۱	۴۰	۶۰	۸
۷۸	۴۷۷	۶۱۰	۱	۵/۲	۱۰۰	۰	۹
۸۰	۵۵۰	۶۸۶	۱	۴/۲	۸۰	۲۰	۱۰

۸۴	۶۱۷	۷۳۱	۱	۳/۱	۶۰	۴۰	۱۱
۸۶	۷۰۷	۸۲۵	۱	۲/۱	۴۰	۶۰	۱۲
۹۳	۵۲۹	۵۷۰	۱/۵	۵/۲	۱۰۰	۰	۱۳
۹۳	۶۲۳	۶۶۸	۱/۵	۴/۲	۸۰	۲۰	۱۴
۹۳	۶۷۵	۷۲۲	۱/۵	۳/۱	۶۰	۴۰	۱۵
۹۵	۷۲۲	۷۶۴	۱/۵	۲/۱	۴۰	۶۰	۱۶



ب- نمونه‌ی خشک

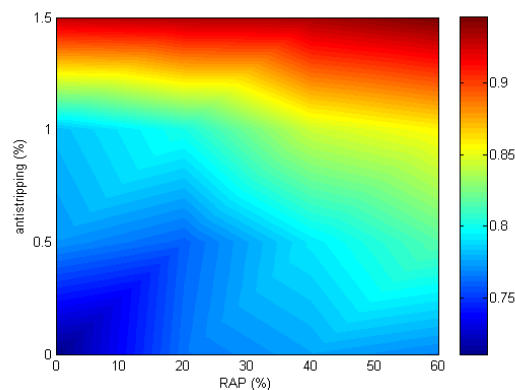


الف- نمونه‌ی اشباع شده

شکل ۱. مقادیر ITS در حالت اشباع و خشک بر حسب مقادیر خرده تراشه آسفالتی و ماده ضد عریان‌شدگی

تأثیر خاصی بر نسبت TSR نداشته است. علت این امر را می‌توان به تأثیر چشمگیر مقدار ۱/۵ درصد ماده‌ی ضد عریان‌شدگی نسبت داد. به طوری که می‌تواند با ایجاد چسبندگی زیاد بین قیر و سنگدانه های جدید، میزان چسبندگی بین آنها را به اندازه ی چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ی قدیمی افزایش دهد. این در شرایطی است که با افزایش میزان ماده‌ی ضد عریان‌شدگی مقدار نسبت TSR به طور پیوسته افزایش پیدا کرده است.

با تقسیم مقدار به‌دست آمده برای ITS مرطوب به مقادیر به دست آمده برای ITS خشک، نسبت TSR نیز تعیین شد. بر این اساس و مطابق با شکل ۲ می‌توان گفت که با افزایش مقدار خرده تراشه‌ی آسفالتی نسبت TSR افزایش یافته است. این افزایش برای نمونه‌های حاوی ۰/۵ درصد ماده‌ی ضد عریان‌شدگی در مقادیر کمتر خرده تراشه‌ی آسفالتی نرخ افزایشی بیشتری داشته است. هنگامی که از ۱/۵ درصد ماده‌ی ضد عریان‌شدگی استفاده گردید، افزایش مقدار خرده تراشه‌ی آسفالتی



شکل ۲. تغییرات مقادیر TSR با توجه به درصد تراشه آسفالتی و ماده ضد عریان‌شدگی

## ۲-۵. آزمایش آب جوشان و شاخص

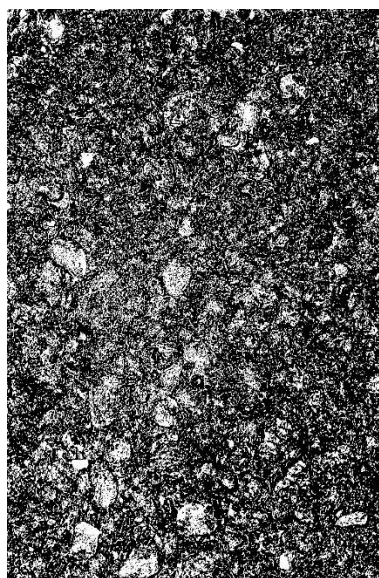
### عریان‌شدگی

در ابتدا، تصاویر آزمایش آب جوشان مطابق با الگوریتم ارائه شده، با کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB مورد پردازش قرار گرفت. شکل ۳، نمونه‌ای از این تصاویر پس از پردازش را نشان می‌دهد. تصویر پردازش شده به دو خوشه تقسیم شده است که قسمت سفید بیانگر سطح عریان شده است.

با در نظر گرفتن مقدار مجاز  $0/8$  برای نسبت TSR که توسط آیین‌نامه‌های مختلف پیشنهاد شده، می‌توان گفت که بسیاری از نمونه‌هایی که دارای مقادیر کم ماده‌ی ضد عریان‌شدگی و خرده تراشه‌ی آسفالتی بودند شرایط آیین‌نامه را ارضا نمی‌کنند. در حالی که با افزایش مقدار ماده‌ی ضد عریان‌شدگی (به بیش از  $1/1$ ) و افزایش میزان خرده تراشه‌ی آسفالتی به بیش از  $40\%$  (به غیر از ۲ مورد) نسبت TSR بیش از  $0/8$  به دست آمد.



Original



Treated

شکل ۳. تحلیل دیجیتالی تصاویر آزمایش آب جوشان با روش *K-means*

ضریب متغیر TSR در سطح اطمینان  $95\%$  معنی‌دار می‌باشد ( $p\text{-value} < 0.05$ ) و مقدار منفی آن نشان‌دهنده رابطه مورد انتظار بین شاخص عریان‌شدگی و مقادیر TSR است. از سوی دیگر مقدار  $R^2$  برابر با  $0/91$  نشان‌دهنده قابلیت بالای مدل ارائه شده در پیش‌بینی می‌باشد. بنابراین، شاخص عریان‌شدگی پیشنهاد شده می‌تواند معیار جایگزین مناسبی برای پیش‌بینی پتانسیل خرابی ناشی از رطوبت باشد. در شکل ۳ مقادیر به دست آمده برای TSR و  $S_{index}$  به همراه مقادیر برازش شده نشان داده شده است.

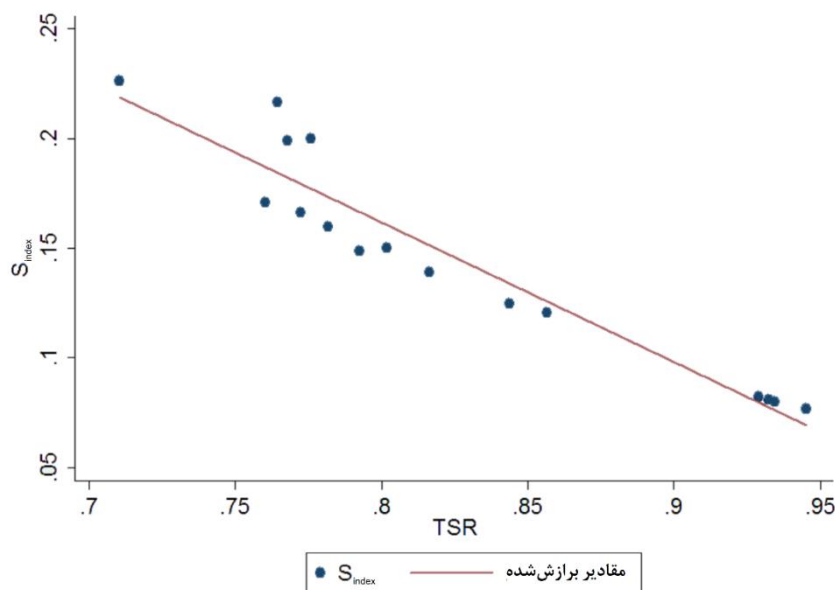
پس از پردازش تصاویر، شاخص عریان‌شدگی ( $S_{index}$ ) مطابق معادله (۳) استخراج گردید. به منظور اعتبارسنجی شاخص پیشنهاد شده در تشخیص میزان عریان‌شدگی، با استفاده از رگرسیون خطی رابطه بین شاخص عریان‌شدگی و نتایج حاصل از آزمایش لاتمن اصلاح شده (ITS) مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مقدار  $P\text{-value}$  برای مدل در سطح اطمینان  $95\%$  کمتر از  $0/05$  است که بیانگر معنی‌دار بودن مدل می‌باشد. مطابق با جدول ۶،

جدول ۵. جدول ANOVA برای مدل شاخص عریان‌شدگی

	DF	SS	MS	F-value	P-value
Total	۱۵	۰/۰۳۷۰۱	۰/۰۰۲۴۷	-	-
Model	۱	۰/۰۳۳۷۰	۰/۰۳۳۷۰	۱۴۲/۲۴	۰/۰۰۰۰
Residual error	۱۴	۰/۰۰۳۳۱	۰/۰۰۰۲۴	-	-
R <sup>2</sup>	۰/۹۱	-	-	-	-

جدول ۶. مقادیر ضرایب رگرسیون شاخص عریان‌شدگی

متغیر مستقل	ضرایب رگرسیون	P-value	t-value	خطای استاندارد
ثابت	۰/۶۷۱۰	۰/۰۰۰۰	۱۵/۲۰	۰/۰۴۴۱۶
TSR	-۰/۶۳۶۶	۰/۰۰۰۰	-۱۱/۹۳	۰/۰۵۳۳۸



شکل ۴. رابطه بین شاخص عریان‌شدگی و مقادیر TSR

## ۶. نتیجه‌گیری

بازیافتی به مخلوط آسفالتی باعث می‌گردد تا مقدار ITS برای نمونه‌های خشک و مرطوب و همچنین نسبت TSR افزایش یابد. - نتایج آزمایش ITS نشان داد که افزودن ماده ضد عریان‌شدگی تأثیر چندانی در بهبود ITS نمونه‌های خشک نداشت. ولی توانست باعث افزایش ITS نمونه‌های مرطوب و نسبت TSR گردد. این افزایش برای نمونه‌های دارای ۱/۵ درصد ماده‌ی ضد عریان‌شدگی بسیار چشم‌گیر بود.

در این مقاله، با استفاده از آزمایش لاتمن اصلاح شده و آزمایش آب جوشان سعی گردید تا میزان حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده تراشه‌ی آسفالتی و یک نوع ماده‌ی ضد عریان‌شدگی مایع بررسی گردد: - نتایج به‌دست آمده از آزمایش ITS برای نمونه‌های خشک و مرطوب و همچنین نسبت TSR نشان داد که افزودن صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد خرده آسفالت

ها است. نتایج مدل ساخته شده جهت اعتبارسنجی این شاخص عریان‌شدگی بر حسب نتایج آزمایش ITS نشان داد که استفاده از شاخص عریان‌شدگی پیشنهادی می‌تواند به درستی میزان عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی را تعیین کند ( $R^2 = 0.91$ ).

- نتایج آزمایش آب جوشان با استفاده از شاخص S-index به دست آمده بر مبنای روش K-Means تحلیل گردید. شاخص عریان‌شدگی جدیدی (S-index) بر مبنای روش K-Means در تحلیل تصاویر دیجیتال ارائه شد. مزیت اصلی این شاخص نسبت به روش‌های قبلی استفاده شده، ثابت نبودن حد آستانه، برای تمامی نمونه-

## ۷. مراجع

- Abdo, A. M. A. (2016). "Utilizing reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in new pavements-A review". *Int. J. Thermal Environ. Eng.*, 12: 61-66.
- Abo-Qudais, S and Mulqi, M. W. (2005). "New chemical anti-stripping additives for bituminous mixtures". *J. ASTM Int.*, 2(8): 87-97.
- Amelian, S., Abtahi, S. M. and Hejazi, S. M. (2014). "Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixes based on image analysis". *Constr. Build. Mater.*, 63: 294-302.
- Anerson D. and Dukatz, E. (1982). "The effect of anti-strip additives on the properties of asphalt cement". *Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 51: 298-317.
- Chen, D. H. and Daleiden, J. (2005). "Lessons learned from the long-term pavement performance program and several recycled sections in Texas". *Proceedings of the 1<sup>st</sup> National Conference on Pavement Preservation, Kansas City, Mo*, pp. 70-84.
- Colbert, B. and You, Z. (2012). "The determination of mechanical performance of laboratory produced hot mix asphalt mixtures using controlled rap and virgin aggregate size fractions". *Constr. Build. Mater.*, 26: 655-662.
- Cooley, D. A. (2005). "Effects of reclaimed asphalt pavement on mechanical properties of base materials". MSc. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Brigham Young University.
- El-Hmrawey, S., El-Maaty, A. E. A. and ElMohr, A. I. (2015). "Durability of hot asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavements". *Open Access Library J.*, 2: 1-18.
- Epps, J., Little, D., Holmgreen, R. and Terrel, R. L. (1980). "Guidelines for Recycling Pavement Materials". NCHRP Report.
- Ford, M. C., Manke, P. G. and O'Bannon, C. E. (1973). "Quantitative evaluation of stripping by surface reaction test". *TRR*, 515: 40-54.
- Gandhi, T., Xiao, F. P. and Amirkhanian, S. N. (2009). "Estimating indirect tensile strength of mixtures containing nti-stripping agents using an artificial neural network approach". *Int. J. Pave. Res. Technol.*, 2: 1-12.
- Hajj, E. Y., Sebaaly, P. E. and Shrestha, R. (2009). "Laboratory evaluation of mixes containing recycled asphalt pavement (RAP)". *Road Mater. Pave. Design*, 10: 495-517.
- Hansen, K. R. and Copeland, A. (2014). "Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage". *Information Series 138, NAPA*.
- Iskender, E., Aksoy, A., Ozen, H. (2012). "Indirect performance comparison for styrene-butadiene-styrene polymer and fatty amine anti-strip modified asphalt mixture". *Constr. Build. Mater.*, 30: 117-24.
- Hossain, M.D. K. and Ullah, F. (2011). "Laboratory evaluation of lime modified asphalt concrete mixes with respective to moisture susceptibility". *Int. J. Civ. Eng.*, 11(4): 45-52.

- Huang, B., Li, G., Vukosavljevic, D., Shu, X. and Egan, B. (2005). "Laboratory investigation of mixing hot-mix asphalt with reclaimed asphalt pavement". *Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board*, DOI: 10.3141/1929-05.
- Huang, B., Zhang, Z., Kingery, W. and Zuo, G. (2004). "Fatigue crack characteristics of HMA mixtures containing RAP". *Proceeding of the 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Cracking in Pavements, RILEM*, pp. 631-638.
- Hussain, A. and Yanjun, Q. (2012). "Laboratory evaluation of asphalt mixtures containing various percentages of reclaimed asphalt pavement". *Asian J. Nat. Appl. Sci.*, 1: 156-163.
- Kandhal, P. S. and Foo, K. Y. (1997). "Designing Recycled Hot Mix Asphalt Mixtures Using Superpave Technology". *ASTM International, NCAT Report No. 96-5*.
- Kerh, T., Wang, Y. M. and Lin, Y. (2005). "Experimental evaluation of anti-stripping additives mixing in road surface pavement materials". *Am. J. Appl. Sci.*, 2(10): 1427-1433.
- Kim, Y. R., Pinto, I. and Park, S. W. (2012). "Experimental evaluation of anti-stripping additives in bituminous mixtures through multiple scale laboratory test results". *Constr. Build. Mater.*, 29: 386-393.
- Kim, K. W. and Amirkhanian, S. (1991). "Evaluation of effectiveness of antistrip additives using fuzzy set procedures". *Transportat. Res. Record*, 1323: 112-122.
- Lottman, R. P. (1983). "Laboratory test method for predicting moisture induced damage to asphalt concrete". *TRR*, 843: 88-95.
- Locander, R. (2009). "Analysis of Using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) as a Base Course Material". *Colorado Department of Transportation, DTD Applied Research and Innovation Branch*.
- Maupin, Jr., G. W. (1970). "Effect of particle shape and surface texture on the fatigue behavior of asphaltic concrete". *Highway Res. Record*, 313: 55-62.
- McGarrah, E. J. (2007). "Evaluation of Current Practices Of Reclaimed Asphalt Pavement/Virgin Aggregate as Base Course Material". *WSDOT Research Report, WA-RD 713.1*.
- Merusi, F., Caruso, A., Roncella, R. and Giuliani, F. (2010). "Moisture susceptibility and stripping resistance of asphalt mixtures modified with different synthetic waxes". *Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board*, 2180: 110-120.
- Mogawer, W., Bennert, T., Daniel, J. S., Bonaquist, R., Austerman, A. and Booshehrian, A. (2012). "Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures". *Road Mater. Pave. Design*, 13: 208-83.
- Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A., Hamed, G. H. and Roshani, H. (2014). "Rutting performance prediction of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavements". *Road Mater. Pave. Design*, 15: 207-219.
- Nazirizad, M., Kavussi, A. and Abdi, A. (2015). "Evaluation of the effects of anti-stripping agents on the performance of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 84: 348-353.
- Newcomb, D. E., Brown, E. R. and Epps, J. A. (2007). "Designing HMA Mixtures With High Rap Content: A Practical Guide". *National Asphalt Pavement Association*.
- Okafor, F. O. (2010). "Performance of recycled asphalt pavement as coarse aggregate in concrete". *Leonardo Elec. J. Pract. Technol.*, 17: 47-58.
- Otsu, N. (1979). "A threshold selection method from gray-level histograms". *IEEE Trans. Sys., Man, Cyber.*, 9: 62-66.
- Pradyumna, T. A., Mittal, A. and Jain, P. (2013). "Characterization of reclaimed asphalt pavement (RAP) for use in bituminous road construction". *Proc.-Soc. Behav. Sci.*, 104: 1149-1157.
- Putman, B. J. and Amirkhanian, S. N. 2006. "Crumb rubber modification of binders: Interaction and particle effects". *Proceedings of the Asphalt Rubber 2006 Conference*, pp. 655-677.
- Reyes-ortiz, O., Berardinelli, E., Alvarez, A., Carvajal-Muñoz, J. and Fuentes, L. (2012). "Evaluation of hot mix asphalt mixtures with replacement of aggregates by reclaimed asphalt pavement (RAP) material". *Proc.-Soc. Behav. Sci.*, 53: 379-388.

- Sampath, A. (2010). "Comprehensive evaluation of four warm asphalt mixture regarding viscosity, tensile strength, moisture sensitivity, dynamic modulus and flow number". The University of Iowa.
- Sargious, M. and Mushule, N. (1991). "Behaviour of recycled asphalt pavements at low temperatures". Can. J. Civ. Eng., 18: 428-435.
- Sebaaly, P. E. (2007). "Comparison of Lime and Liquid Additives on The Moisture Damage of Hot Mix Asphalt Mixtures". National Lime Association, Arlington, Virginia, USA.
- Sunil, S., Mallesh, K. and Chandrasekaraiah, T. (2014). "Experimental investigations on the performance of bituminous mixes with reclaimed asphalt pavement (RAP) materials (Case study: Tumkur to Chitradurga-NH4)". Int. J. Res. Eng Technol., 3: 297-303.
- Tarefder, R. A. and Zaman, A. M. (2009). "Nanoscale evaluation of moisture damage in polymer modified asphalts". J. Mater. Civ. Eng., 22: 714-725.
- West, R. C., Rada, G. R., Willis, J. R. and Marasteanu, M. O. (2013). "Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt With High Reclaimed Asphalt Pavement Content". Transportation Research Board, NCHRP Report 752.
- Xiao, F. and Amirhanian, S. N. (2014). "Moisture susceptibility and rut resistance of RAP asphalt mixtures with high percentage of natural sand". J. Mater. Civ. Eng., 27: 04014217.
- Xiao, F., Amirhanian, S. N. and Juang, H. S. (2007). "Rutting resistance of rubberized asphalt concrete pavements containing reclaimed asphalt pavement mixtures". J. Mater. Civ. Eng., 19(6): 475-483.
- Xiao, F. and Amirhanian, S. N. 2009. "Laboratory investigation of moisture damage in rubberised asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement". Int. J. Pavement Eng., 10(5): 319-328.