

تخمین بصری میزان عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی با استفاده از روش پردازش تصویر

محمود عامری*، استاد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

آرمین جراحی، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

منصور صادقی آواز، کارشناس ارشد راه و ترابری

E-mail: ameri@iust.ac.ir

دریافت: ۹۲/۰۵/۱۰ - پذیرش: ۹۲/۰۹/۰۷

چکیده

یکی از عوامل خرابی مخلوط‌های آسفالتی در مناطق مرطوب، پدیده عریان‌شدگی (جدا شدن قیر از سنگدانه) است. نفوذ رطوبت به درون مخلوط‌های آسفالتی به دلیل ضعف پیوند سنگدانه-قیر می‌تواند باعث ایجاد عریان‌شدگی در مخلوط آسفالتی و به تبع آن ایجاد خرابی در سطح روسازی شود. برای ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر عریان‌شدگی، روش‌های آزمایشگاهی متعددی به صورت استاندارد معرفی شده است. آزمون کشش غیر مستقیم لاتمن اصلاح شده و تعیین پارامتر TSR یکی از روش‌های رایج در ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر عریان‌شدگی است. در این پژوهش، برای تعیین مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر عریان‌شدگی روشی بر مبنای پردازش تصویر ارائه شده و پارامتر عریان‌شدگی به عنوان شاخصی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی معرفی شده است. نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق از مصالح آهکی، سرباره فولادی و فیلر آهک هیدراته تهیه شده‌اند. مقایسه مقادیر پارامتر شاخص عریان‌شدگی با مقادیر TSR نشان داد که روش پیشنهاد شده از قابلیت اطمینان مناسبی برای تعیین مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر عریان‌شدگی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی، عریان‌شدگی، پردازش تصویر.

۱. مقدمه

عملکرد روسازی‌ها ارائه شده که در مرحله تحقیق و توسعه قرار دارد (شوکلا و یین، ۲۰۰۲). «عریان‌شدگی» در مخلوط‌های آسفالتی به جدا شدن قیر از سنگدانه در حضور رطوبت گفته می‌شود. در متون فنی، عریان‌شدگی و «آسیب رطوبتی» معمولاً به یک معنی به کار می‌روند. چنانچه در شرایط خاص، چسبندگی قیر و مصالح سنگدانه از بین برود، دوام آسفالت کاهش می‌یابد و در نهایت موجب اضمحلال روسازی راه می‌گردد (هامونز و همکاران، ۲۰۰۶). این خرابی نه تنها خود به عنوان یک خرابی مستقل محسوب می‌شود، بلکه می‌تواند مقدمه و رویکردی برای ایجاد خرابی‌های زود هنگام دیگر

استفاده حداکثر از راه‌های موجود و سرمایه‌گذاری در راستای بهسازی و تعمیر آنها گزینه‌ای است که از سوی بیشتر کشورها در جهت صرفه‌جویی اقتصادی و بازدهی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. کشورهای پیشرفته دائماً به دنبال روش‌های جدید برای ساخت، نگهداری و تعمیرات راه‌ها بوده و تلاش‌های زیادی در زمینه استفاده از فناوری جدید جهت ارتقاء روسازی‌های قدیم انجام داده‌اند. این امر، خود نشان‌دهنده اهمیت حفظ وضعیت راه‌ها در حد مطلوب است. در سال‌های اخیر روش‌های ارزیابی آزمایشگاهی و میدانی نوین نیز برای بررسی

آب، شرایط جوی نامساعد و آلاینده‌های سطحی اتفاق می‌افتد. همچنین، عارضه تخریب چسبندگی می‌تواند به دلیل شرایط نامناسب بارگذاری و تمرکز تنش ناشی از ترک‌خورده‌گی‌ها یا ناهمواری‌های سطحی باشد (صمیمی و همکاران، ۱۳۸۵).

منابع علمی نشان می‌دهند که مکانیسم‌های مختلفی برای ایجاد عریان‌شدگی و جدایش قیر از سطح سنگدانه وجود دارد. این مکانیسم‌ها شامل جدایی قیر از سنگدانه^۱، جایگزینی آب و قیر^۲، امولسیون‌شدگی خود بخودی^۳، فشار آب حفره‌ای^۴، آب‌شستگی^۵ و تخریب لایه نازک قیری^۶ هستند (مجیدزاده و براولد، ۱۹۶۸). همچنین، مکانیسم‌های ناپایداری pH^۷ و اثرهای محیطی یا اقلیمی نیز علاوه بر موارد یاد شده پیشنهاد شده و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (کیگاندا و رابرتس، ۱۹۸۸).

مطالعات بسیار زیادی برای توسعه آزمایش‌های نشانگر عریان‌شدگی صورت گرفته است. در اثر این کوشش‌ها، آزمایش‌هایی ابداع گردید که از ارزیابی‌های غیربصری و نیمه بصری برای تعیین پتانسیل عریان‌شدگی استفاده می‌کنند. از آزمایش‌هایی که برای پیش‌بینی پدیده عریان‌شدگی توسعه یافته‌اند می‌توان به آزمون‌های فشاری غرقاب، کشش غیر مستقیم، غوطه‌وری غرقاب و مدول برجهندگی اشاره نمود. علاوه بر آزمون‌های یاد شده، آزمون‌های مورد استفاده دیگری برای اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر افت وزنی از طریق عملیات سایشی وجود دارند که از نتایج آنها به عنوان شاخصی برای پتانسیل عریان‌شدگی استفاده می‌شود. این آزمون‌ها شامل: آزمایش عریان‌شدگی دینامیک^۸، سایش آب سرد، حساسیت رطوبتی بخار و سایش سطحی می‌باشند (کیگاندا و رابرتس، ۱۹۸۸).

از جمله ترک خوردگی، شیار شدگی مسیر چرخ‌ها و جدا شدن مصالح سنگی، چاله‌ها و ترک‌های پوست سوسماری باشد (عبدی و کاوسی، ۱۳۸۳).

در مورد دلایل عریان‌شدگی نمی‌توان تنها به اثر رطوبت و آب اکتفا نمود، زیرا گاهی حتی بدون حضور آب نیز پدیده عریان‌شدگی در اثر عواملی چون مصالح سنگی نامرغوب، نوع قیر، وجود گرد و غبار روی سنگدانه‌ها، اثر تراکم نامناسب، درصد فضای خالی، نوع ترافیک و شرایط اقلیمی مشاهده شده است. لذا می‌توان از اثر آب به عنوان یک دلیل عمده عریان‌شدگی یاد نمود (کندال، ۱۹۹۴ و ساندوچی، ۲۰۰۳). علی‌رغم وجود پارامترهای متعدد مؤثر بر عریان‌شدگی، آب تنها عاملی است که می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر عریان‌شدگی داشته باشد (رایس، ۱۹۵۸ و فرم، ۱۹۷۴).

با توجه به اهمیت پدیده عریان‌شدگی و وجود این مشکل در مناطق مرطوب، و از آنجا که هر ساله درصد زیادی از هزینه‌های عمرانی صرف تولید و نگهداری شبکه راه‌ها می‌گردد، تأمل و تحقیق در مورد روش‌های ارزیابی مقاومت در برابر عریان‌شدگی و روش‌های افزایش آن ضرورت می‌یابد.

۲. بررسی منابع

در یک تقسیم‌بندی کلی، مدهای خرابی^۱ در مخلوط‌های آسفالتی به دو دسته تفکیک می‌شوند: تخریب پیوستگی^۲ و تخریب چسبندگی^۳. در عارضه تخریب پیوستگی، صفحه شکست کاملاً درون ماده چسباننده (قیر) قرار می‌گیرد. اما در عارضه تخریب چسبندگی، اتصال سنگدانه‌ها با قیر از بین رفته و صفحه شکست در فصل مشترک قیر و سنگدانه قرار می‌گیرد (لیتل و کیم، ۲۰۰۲). تخریب پیوستگی در مخلوط‌های آسفالتی که با مصالح سنگی خشک و تمیز تهیه می‌شوند، بیشتر قابل مشاهده است. از سوی دیگر، تخریب چسبندگی بیشتر در حضور

- 4- Detachment
- 5- Displacement
- 6- Spontaneous emulsification
- 1- Pore pressure
- 2- Hydraulic scour
- 3- Film rupture
- 4- pH instability
- 5- Dynamic strip

- 1- Failure modes
- 2- Cohesion failure
- 3- Adhesion failure

مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که آزمون‌های متعددی که
برای ارزیابی و پیش‌بینی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های
آسفالتی ارائه شده‌اند به طور کلی در دو دسته: آزمون
مخلوط‌های متراکم نشده و آزمون مخلوط‌های متراکم
شده طبقه‌بندی می‌شوند. خلاصه ای از آزمون‌های فوق
در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. خلاصه آزمون‌های موجود جهت ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی

خلاصه روش پیشنهادی	مرجع تحقیقات
غوطه‌وری مخلوط‌های آسفالتی متراکم نشده برای مدت زمانی معین.	AASHTO T182 (1997)
مجاورت سنگدانه‌ها با محلول املاح کلسیم رادیواکتیو دار، خشک کردن آنها، سپس پوشش سطح سنگدانه‌ها با قیر، غوطه‌وری در آب و اندازه‌گیری خواص رادیواکتیو آب.	سرایبی پور (۱۳۷۷)
مخلوط متراکم نشده در آب غوطه‌ور شده، سپس درون دستگاه قرار گرفته و برای مدت زمان مشخصی دوران داده می‌شود.	California Test 302 LC 25-009 Quebec DOT (1999)
با استفاده از یک ماده واکنش‌گر شیمیایی مانند اسید، کانی‌های سیلیکونی یا آهنی فعال شده در اثر واکنش شیمیایی گازی به وجود می‌آید. سپس فشار ناشی از واکنش اندازه‌گیری می‌شود.	Ford et al. (1974)
بررسی چسبندگی قیر به سنگدانه‌های شکسته در آب حاوی مواد فعال کننده سطحی.	سرایبی پور (۱۳۷۷)
غوطه‌وری مخلوط‌های متراکم نشده در آب جوش برای مدت زمانی مشخص.	Kennedy et al. (1982) & ASTM D3625 (2005)
غوطه‌وری سنگدانه‌های پوشانیده شده با قیر در آب درون یک بطری شیشه‌ای و دوران دادن آن.	Isacsson & Jorgensen (1987)
تعیین میزان قیر جذب شده توسط سنگدانه‌ها از تولوئن و تعیین مقدار قیری که از سطح سنگدانه‌ها توسط آب زدوده می‌شود.	Curtis et al. (1993)
انتقال انرژی مافوق صوت به سنگدانه‌های متراکم شده و غوطه‌وری در آب برای مدت زمان مشخص.	McCann & Sebaaly (2001)
چسبندگی و پیوستگی مربوط به انرژی سطحی آزاد سنگدانه‌ها و قیر.	Cheng et al. (2001)
تعیین میزان جذب متیلن‌بلو توسط ذرات رس، درصد جذب بیشتر نشان دهنده مقدار بیشتر ذرات مضر رس است.	Kandhal et al. (1998)
اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی و کشش قیر چسبیده شده به سطح سنگدانه‌ها به عنوان تابع زمان در مجاورت رطوبت.	Kanitpong and Bahia (2003)
اندازه‌گیری تغییرات مقاومت فشاری مخلوط‌های قیری در معرض آب.	AASHTO T165-55 (1997) & ASTM D1075 (2004)
اندازه‌گیری تغییرات مقاومت فشاری مخلوط‌های قیری در معرض آب.	Stuart (1986)
فراهم کردن سنگدانه‌هایی با دانه‌بندی یکنواخت و بیش از ۲٪ قیر برای مخلوط کردن با سنگدانه‌ها، غوطه‌وری مخلوط در آب یک قوطی سربسته، اعمال بار حرارتی.	Stuar (1986) & Hicks (1991)
اندازه‌گیری تغییرات مدول برجهندگی کششی و مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده در روسازی واقعی اجرا شده که در معرض رطوبت قرار گرفته‌اند.	Lottman (1982)
شبیه آزمون لاتمن است، اما نمونه مورد آزمایش تا ۸۰-۷۰ درصد اشباع شده، دمای آزمون و نرخ بارگذاری آن نیز متفاوت است.	AASHTO-T283 (1993)
تنش‌های وارده به نمونه‌های مستغرق در حمام آب ۵۰ درجه سانتیگراد، استفاده از HWTD ^۱ برای مدل کردن آثار ترافیکی.	Aschenbrener (1995)
مدل‌سازی بارهای ترافیکی و تأثیر فشار آب میان حفره‌ای بر مخلوط‌های آسفالتی، اندازه‌گیری تغییرات مدول بر جهندگی قبل و بعد از شرایط.	AL-Swailmi and Terrel (1992)
اندازه‌گیری عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی.	Shatnawi et al. (1995)

1- Hamburg wheel track device (HWTD)

۲۱ نمونه خشک و ۲۱ نمونه که تحت شرایط اشباع و چرخه ذوب-انجماد قرار گرفته‌اند، تحت آزمایش کشش غیر مستقیم قرار گرفته‌اند.

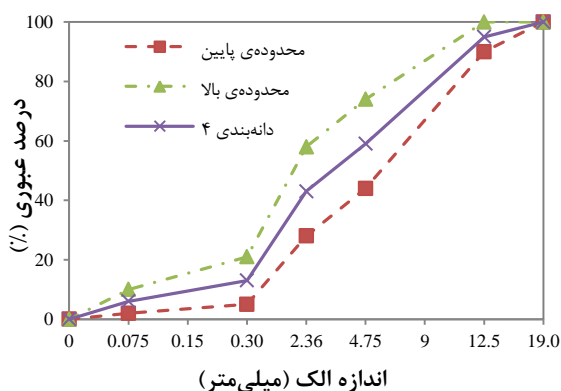
- پردازش تصویر و معرفی پارامتر شاخص عریان‌شدگی: این بخش شامل پردازش تصویر است که روی ۴۲ نمونه تر و خشک انجام شده و به معرفی و تعیین پارامتر شاخص عریان‌شدگی منجر شده است.

۳-۱. تهیه و ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی

در این پژوهش، از هفت نوع مصالح سنگی استفاده شده است که از ترکیب مصالح آهکی و سرباره‌ای حاصل شده‌اند. دانه‌بندی انتخاب شده برای مصالح، بر اساس حد وسط دانه‌بندی شماره ۴ آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران انجام شده که نمودار آن در شکل ۱ به نمایش درآمده است. میزان سرباره استفاده شده برای هر یک از هفت نوع مصالح در جدول ۲ نشان داده شده است.

قیر مورد استفاده در تهیه نمونه‌ها، قیر ۶۰-۷۰ با مشخصات مندرج در جدول ۳ بوده است.

در این پژوهش، از روش طرح اختلاط مارشال، مطابق با استاندارد ASTM-D1559 برای تعیین میزان بهینه قیر استفاده شده است. درصد بهینه قیر برای نمونه‌های آسفالتی به شرح جدول ۴ به دست آمده است.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی مصالح

بر اساس بررسی‌های میدانی انجام شده در سال ۲۰۰۲ توسط اداره حمل و نقل کلرادو درباره آسیب دیدگی رطوبتی و سمینار آسیب دیدگی رطوبتی سال ۲۰۰۳ سن‌دیه‌گو کالیفرنیا، مشخص گردید که درصد بسیار زیادی از ادارات راه آمریکا (۸۲٪) آزمایش‌های حساسیت رطوبتی را با استفاده از آزمون کششی غیرمستقیم انجام می‌دهند (ASTM D4867, AASTO T283 یا استاندارد مشابه). از ادارات باقیمانده، ۱۰٪ از آزمون فشاری غرقابی یا استاندارد AASHTO T165 یا استاندارد مشابه، ۴٪ از آزمایش مقاومت باقیمانده و ۴٪ از هر دو آزمایش مسیر چرخ و کشش غیرمستقیم استفاده می‌کنند (هیکس و همکاران، ۲۰۰۳).

بنابراین لازم است کوشش‌های گسترده‌ای در صنعت روسازی انجام شود تا به ارائه روش‌های آزمون سنجش آسیب دیدگی رطوبتی با قابلیت اعتماد بالا ختم گردد (سلیمانیان و همکاران، ۲۰۰۳). بر این اساس، در تحقیق حاضر، برای ارزیابی آسیب دیدگی رطوبتی، روشی بر مبنای پردازش تصویر ارائه شده و از نتایج آزمون کشش غیر مستقیم لاتمن اصلاح شده به عنوان معیار سنجش اعتبار نتایج استفاده شده است.

۳. مواد و روش‌ها

برنامه آزمایشگاهی برای انجام این پژوهش به سه بخش به شرح زیر تقسیم شده است:

- تهیه و ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی: این بخش شامل ساخت نمونه‌های مارشال برای هفت نوع ترکیب مصالح است که برای تعیین درصد بهینه قیر و انجام مراحل دیگر تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

- انجام آزمایش لاتمن اصلاح شده: این بخش شامل انجام آزمایش کشش غیر مستقیم برای تعیین میزان حساسیت رطوبتی نمونه‌های ساخته شده با قیر بهینه و هر یک از هفت نوع ترکیب مصالح می‌باشد. در این بخش،

جدول ۲. میزان سرباره استفاده شده در نمونه‌ها

مقدار سرباره استفاده شده				شماره مصالح سنگی
ریزدانه**		درشت‌دانه*		
٪۱۰۰	٪۵۰	٪۱۰۰	٪۵۰	
				۱ (بدون سرباره)
		✓		۲
			✓	۳
✓				۴
	✓			۵
✓		✓		۶
	✓		✓	۷

* و ** مصالح مانده روی الک شماره ۴ به‌عنوان درشت دانه و رد شده از الک مذکور به‌عنوان ریزدانه منظور شده است.

جدول ۳. مشخصات قیر مصرفی

روش آزمایش	قیر ۶۰/۷۰	خصوصیات
ASTM D-70	۱/۰۳	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
ASTM D-5	۶۴	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
ASTM D-36	۵۴	نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)
ASTM D-113	۱۰۲	انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
ASTM D-92	۳۰۵	نقطه اشتعال
ASTM D-70	۳۱۷	نقطه احتراق

جدول ۴. درصد قیر بهینه

درصد بهینه قیر	شماره نمونه
۵/۱۰	۱ (مصالح آهکی)
۵/۴۰	۲ (۱۰۰٪ درشت‌دانه، سرباره‌ای باشد)
۵/۳۰	۳ (۵۰٪ درشت‌دانه، سرباره‌ای باشد)
۵/۵۰	۴ (۱۰۰٪ ریزدانه، سرباره‌ای باشد)
۵/۳۷	۵ (۵۰٪ ریزدانه، سرباره‌ای باشد)
۵/۶۵	۶ (۱۰۰٪ کل مصالح، سرباره‌ای باشد)
۵/۴۵	۷ (۵۰٪ کل مصالح، سرباره‌ای باشد)

۲-۳. انجام آزمایش لاتمن اصلاح شده

پس از تعیین درصد بهینه قیر به روش مارشال، از هر هفت نوع مصالح تعداد شش نمونه به روش تراکم ژیراتوری با درصد بهینه قیر تهیه شده و تحت آزمایش

کشش غیر مستقیم مطابق با استاندارد AASHTO T283 قرار گرفتند. نتایج انجام آزمایش کشش غیر مستقیم و محاسبه پارامتر TSR در جدول ۵ به نمایش درآمده است.

جدول ۵. نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم

شماره نمونه	مقاومت کشش غیرمستقیم خشک (kPa)	مقاومت کشش غیرمستقیم تر (kPa)	نرخ مقاومت کشش غیرمستقیم (TSR)
۱ (نمونه آهکی)	۹۰۱/۶	۷۰۷/۴۳	۰/۷۸
۲ (۱۰۰٪ درشت‌دانه سرباره‌ای باشد)	۹۳۱/۶	۸۳۸/۳۰	۰/۹۰
۳ (۵۰٪ درشت‌دانه سرباره‌ای باشد)	۹۰۲/۴	۷۵۵/۸۶	۰/۸۴
۴ (۱۰۰٪ ریزدانه سرباره‌ای باشد)	۱۱۹۷/۸	۸۹۹/۹۲	۰/۷۵
۵ (۵۰٪ ریزدانه سرباره‌ای باشد)	۱۰۲۶/۲	۸۴۱/۸۳	۰/۸۲
۶ (۱۰۰٪ مصالح سرباره‌ای باشد)	۱۱۴۶/۵	۹۸۲/۶۳	۰/۸۶
۷ (۵۰٪ مصالح سرباره‌ای باشد)	۱۰۵۶/۲	۸۶۶/۵۸	۰/۸۲

۳-۳. پردازش تصویر و معرفی پارامتر شاخص عریان‌شدگی

نمونه‌هایی که تحت آزمایش کشش غیر مستقیم بوده‌اند، در این مرحله برای تصویربرداری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نمونه‌ها که شامل نمونه‌های خشک (۲۱ نمونه) و نمونه‌های تر که تحت شرایط اشباع و یک چرخه ذوب-انجماد قرار داشته‌اند (۲۱ نمونه) می‌باشند، در جهتی که در آزمایش کشش غیرمستقیم ترک برداشته بودند، شکسته شدند. پس از آن از محل شکست عکس گرفته شده و عکس‌های گرفته شده توسط نرم‌افزار MATLAB پردازش شده است.

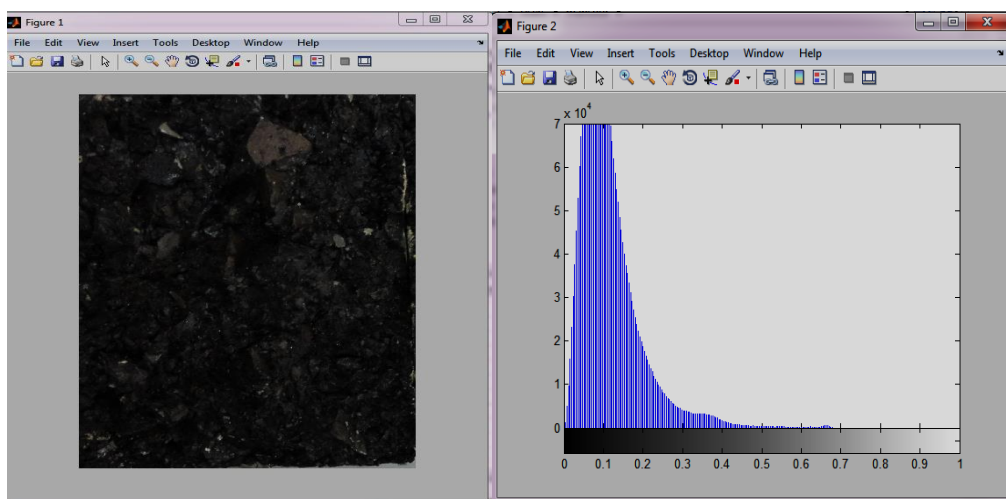
۳-۳-۱. نحوه پردازش تصویر در MATLAB

کوچکترین جزء ساختاری تصاویر دیجیتال، عنصر تصویر^۱ یا پیکسل^۲ نامیده می‌شود. هر پیکسل، متناسب با شدت روشنایی آن پیکسل، عددی از صفر تا ۲۵۵ را به خود اختصاص می‌دهد (گروه رباتیک دانشگاه پیام نور، ۱۳۸۷). با یک دستور ساده می‌توان این بازه را تغییر داد، به گونه‌ای که عدد اختصاصی به هر پیکسل در بازه [۰،۱] باشد. عدد ۱ کاملاً روشن و عدد صفر کاملاً تیره بوده و هر چه عدد اختصاصی به ۱ نزدیک‌تر باشد، پیکسل روشن‌تر می‌شود. برای هر تصویر می‌توان یک نمودار

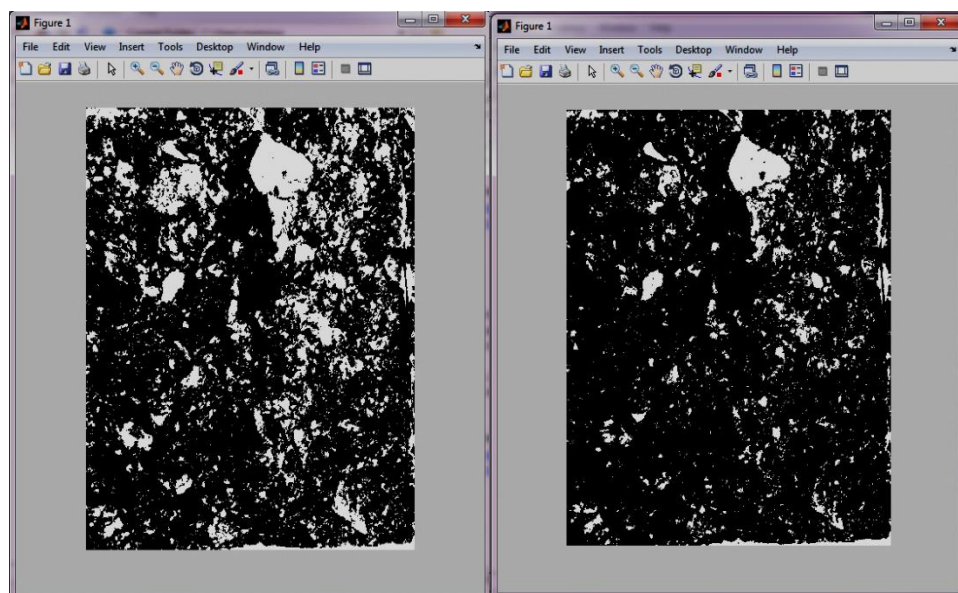
ترسیم کرد که فراوانی اعداد در بازه روشنایی [۰،۱] را نشان می‌دهد. این نمودار، هیستوگرام^۳ نامیده می‌شود. به‌عنوان مثال، تصویر محل شکست یکی از نمونه‌ها (نمونه شماره ۱۰۱) و نمودار هیستوگرام آن در شکل ۲ قابل مشاهده است. این تصویر و تصاویر مشابه را می‌توان به تصاویر دودویی (سیاه و سفید) تبدیل نمود. در تصاویر دودویی (باینری)، پیکسل‌ها فقط دو مقدار صفر (سیاه) و ۱ (سفید) را به خود می‌گیرند. منطق تشکیل تصاویر دودویی در این است که با تعیین یک مقدار آستانه^۴ در بازه [۰،۱]، برای مقادیر کمتر از آستانه، صفر و برای مقادیر بیشتر از آستانه، ۱ در نظر گرفته می‌شود. به‌عنوان مثال، برای نمونه مذکور، با در نظر گرفتن اعداد ۰/۲ و ۰/۱۵ به عنوان آستانه، تصاویر دودویی آن مطابق شکل ۳ است.

3- Histogram
4- Threshold

1- Picture element
2- Pixel



شکل ۲. محل شکست نمونه شماره ۱۰۱ (چپ) و هیستوگرام آن (راست)



شکل ۳. تصاویر باینری از نمونه شماره ۱۰۱ با آستانه ۰/۱۵ (راست) و ۰/۲۰ (چپ)

محاسبه آستانه هیستوگرام در نرم‌افزار MATLAB شده است. این روش حد آستانه هیستوگرام تصاویر را با در نظر گرفتن میانگین فراوانی‌ها و انحراف از معیارها و به روش‌های عددی محاسبه می‌کند (اتسو، ۱۹۷۹). حد آستانه هر تصویر با این روش، مختص همان تصویر است. به‌عنوان یک روش پیشنهادی که در این پژوهش از آن استفاده شده است، با روش اُتسو حد آستانه نمونه‌های خشک که با یک نوع مصالح و یک درصد بهینه قیر ساخته شده‌اند (از هر نوع مصالح ۳ نمونه) مشخص شده و میانگین حد آستانه این نمونه‌ها به عنوان آستانه

همانطور که اشاره شد و در شکل ۳ هم به خوبی قابل مشاهده است، با تغییر حد آستانه، شمای تصاویر دودویی متفاوت خواهد شد. بنابراین، تعیین حد آستانه بسیار مهم بوده و در صورت اشتباه در تعیین مقدار آن، تحقیقات با این روش به نتیجه مطلوب نخواهد رسید.

۳-۳-۲. تعیین حد آستانه هیستوگرام

برای به‌دست آوردن حد آستانه روش‌های زیادی پیشنهاد شده است. از میان این روش‌ها، روش اُتسو^۱ معیار

1- Otsu

قابل ذکر است که شاخص عریان‌شدگی، عددی نسبی و بدون بعد بین صفر و ۱ بوده که ۱ نشان دهنده بهترین وضعیت مخلوط در برابر عریان‌شدگی و صفر نشان دهنده بدترین وضعیت مخلوط در برابر عریان‌شدگی است. پس از محاسبه شاخص عریان‌شدگی نمونه‌های با مصالح مختلف و مقایسه آن با میانگین مقادیر TSR برای هر نوع مصالح، رابطه این دو پارامتر تعیین و مطابق با جدول ۶ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، مقادیر شاخص عریان‌شدگی به‌دست آمده از روش پیشنهادی با مقادیر TSR با یک رابطه خطی مرتبط بوده و از ضریب همبستگی بالایی نیز برخوردار است.

هیستوگرام تصاویر جهت تبدیل تصاویر به تصاویر دودویی استفاده شده است. به‌عبارت دیگر، در هر گروه هفت‌گانه مصالح، میانگین حد آستانه نمونه‌های خشک با روش اُتسو، به‌عنوان حد آستانه برای آن گروه، چه برای نمونه‌های خشک و چه برای نمونه‌های تر، در نظر گرفته شده است. با استفاده از این حد آستانه، نسبت تعداد پیکسل‌های سفید به سیاه که به‌عنوان شاخص برهنگی معرفی شده، محاسبه شده است. سپس، با مقایسه این شاخص در حالت خشک و تر، شاخص عریان‌شدگی نمونه‌ها مطابق با رابطه ۱ تعریف شده و محاسبه شده است.

جدول ۶. مقادیر شاخص عریان‌شدگی پردازش تصویر و رابطه آن با مقادیر TSR

نمونه	شاخص عریان‌شدگی (X)	TSR (Y)	XY	X ²	Y ²
شاهد (آهکی)	۰/۴۹	۰/۸۸	۰/۳۸	۰/۲۴۰۱	۰/۷۰۸۴
۱۰۰٪ درشت‌دانه، سرباره‌ای	۰/۲۴	۰/۹۰	۰/۲۲	۰/۰۵۷۶	۰/۸۱
۵۰٪ درشت‌دانه، سرباره‌ای	۰/۳۶	۰/۸۴	۰/۳۰	۰/۱۲۹۶	۰/۷۰۵۶
۱۰۰٪ ریزدانه، سرباره‌ای	۰/۶۷	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۴۴۸۹	۰/۵۶۲۵
۵۰٪ ریزدانه، سرباره‌ای	۰/۴۹	۰/۸۲	۰/۴۰	۰/۲۴۰۱	۰/۶۷۲۴
کلاً سرباره‌ای	۰/۳۲	۰/۸۶	۰/۲۸	۰/۱۰۲۴	۰/۷۳۹۶
۵۰٪ کل مصالح، سرباره‌ای	۰/۴۴	۰/۸۲	۰/۳۶	۰/۱۹۳۶	۰/۶۷۲۴
جمع			۲/۴۴	۱/۴۱	۴/۷۷

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{j=1}^n y_j)}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n \sum_{j=1}^n y_j^2 - (\sum_{j=1}^n y_j)^2]}} = 0.962 \quad \bar{y}_x = 0.971 - 0.341x$$

رطوبتی مخلوط آسفالتی بوده، به گونه‌ای که مقادیر این شاخص با مقادیر TSR، که شاخص اصلی میزان عریان‌شدگی است، ارتباط خطی با ضریب همبستگی قابل قبول (۰/۹۶۲) دارد. بنابراین، با استفاده از رابطه بیان شده و به روش پردازش تصویر، می‌توان میزان TSR را با دقت خوبی تعیین نمود. با این وجود، نیاز به مطالعات بیشتر با در نظر گرفتن جامعه آماری بزرگتر و متنوع‌تر که منجر به افزایش دقت و اعتبار رابطه مذکور می‌گردد وجود دارد. همچنین، لازم است برای تعیین حداقل مقدار شاخص

که S_i شاخص برهنگی، $AWSI$ میانگین شاخص برهنگی نمونه‌های تر و $ADSI$ میانگین شاخص برهنگی نمونه‌های خشک است.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پردازش تصویر نشان داد که شاخص عریان‌شدگی معیار مناسبی برای ارزیابی حساسیت

عریان‌شدگی مجاز بررسی و مطالعات تکمیلی صورت پذیرد تا روش پیشنهادی به‌عنوان روشی استاندارد مورد استفاده پژوهشگران و استفاده‌کنندگان قرار گیرد.

۵. مراجع

- محمدی، ع. ۱۳۸۹. "راهنمای جامع *Matlab* و *Simulink*". انتشارات آفرنگ، تهران.
- سزائی‌پور، م. ۱۳۷۷. "آسفالت". انتشارات دهخدا، چاپ چهارم، تهران.
- صمیمی، م.، روان‌شاد، ا.، عمو سلطانی، ا. و عاملی، ع. ۱۳۸۵. "بررسی مکانیزم خرابی‌های روسازی آسفالتی ناشی از رطوبت". فصل‌نامه ژئوتکنیک و مقاومت مصالح، ۲۳(۱۰۶): ۳۱-۴۱.
- عبدی، ع. و کاووسی، ا. ۱۳۸۳. "بررسی پدیده عریان‌شدگی مصالح سنگی در مخلوط‌های آسفالتی". دومین همایش قیر و آسفالت ایران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
- گروه رباتیک دانشگاه پیام نور. ۱۳۸۷. "پردازش تصویر با استفاده از نرم‌افزار *MATLAB*". قم.
- AASHTO T165-55. 1997. "Effect of Water on Cohesion of Compacted Bituminous Mixtures". Standard Specifications for Transportation Materials and Methods and Sampling and Testing, Part II: Tests, Washington D. C.
- AASHTO T182-84. 1997. "Coating and Stripping of Bitumen-Aggregate Mixtures". Standard Specifications for Transportation Materials and Methods and Sampling and Testing, Part II: Tests, Washington D. C.
- AASHTO T283-07, 1993. "Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage". Standard Specifications for Transportation Materials and Methods and Sampling and Testing, Part II: Tests, Washington D. C.
- Al-Swailmi, S. and Terrel, R. L. 1992. "Evaluation of water damage of asphalt concrete mixtures using the environmental conditioning system (ECS)". J. Assoc. Asphalt Paving Technol. 61: 405-435.
- Aschenbrener, T. 1995. "Evaluation of Hamburg wheel-tracking device to predict moisture damage in hot-mix asphalt". Transport. Res. Rec. 1492: 193-201.
- ASTM D 3625. 2005. "Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate using Boiling Water". Annual Book of ASTM Standards 4.03, West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM D1075. 2004. "Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures". Annual Book of ASTM Standards 4.03, West Conshohocken, PA, ASTM International.
- California Test 302. 1999. "Method of Test for Film Stripping". State of California, Department of Transportation.
- Cheng, D., Little, D. N., Lytton, R. L. and Holste, J. C. 2001. "Surface free energy measurement of aggregates and its application on adhesion and moisture damage of asphalt-aggregate system". Proc. of the 9th Intl. Center for Aggregate Research Symposium, Austin, Texas.
- Curtis, C. W., Ensley, K. and Epps, J. 1993. "Fundamental Properties of Asphalt-Aggregate Interactions Including Adhesion and Absorption". SHRP-A-341, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D. C.
- Ford, M. C., Manke, P. G. and O'Bannon, C. E. 1974. "Quantitative Evaluation of Stripping by the Surface Reaction Test", Transportation Research Record 515, TRB, National Highway Research Council, Washington, D. C., pp. 40-54.
- Fromm, H. J. 1974. "The mechanisms of asphalt stripping from aggregate surfaces". Proc., Assoc. Asphalt Paving Technol., 43: 191-223.
- Hammons, M. I., Von Quintus, H., Geary, G. M., Wu, P. Y. and Jared, D. M. 2006. "Detection of stripping in hot-mix asphalt". Transport. Res. Rec. 1949: 20-31.
- Hicks, R. G. 1991. "Moisture Damage in Asphalt Concrete". NCHRP 175, Transportation Research Board, National Highway Research Council, Washington, D. C.
- Hicks, R. G., Leahy, R. B., Cook, M., Moulthrop, J. S. and Button, J. 2003. "Road map for mitigating national moisture sensitivity concerns in hot-mix pavements". Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar, San Diego, CA.
- Image processing place, [Online]. Available: <http://www.imageprocessingplace.com>.
- Isacson, W. and Jorgensen, T. 1987. "Laboratory Methods for Determination of the Water Susceptibility of Bituminous Pavements". VIT Report, Swedish Road and Traffic Research Institute, No. 324A.
- Kandhal, P. S. 1994. "Field and laboratory investigation of stripping in asphalt pavements: State of the art report". Transport. Res. Rec. 1353: 69-72.
- Kandhal, P. S., Lynn, C. Y. and Parker, F. 1998. "Tests for Plastic Fines in Aggregates Related to Stripping in Asphalt Paving Mixtures". NCAT Report, No. 98-03.

- Kanitpong, K. and Bahia, H. U. 2003. "Role of adhesion and thin film tackiness of asphalt binders in moisture damage of HMA". J. Assoc. Asphalt Paving Technol. 72: 502-528.
- Kennedy, T. W., Roberts, F. L. and Lee, K. W. 1982. "Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures using the Texas freeze-thaw pedestal test". Proc., Assoc. Asphalt Paving Technol. 51: 327-341.
- Kiggundu, B. M. and Roberts, F. L. 1988. "The success/failure of methods used to predict the stripping potential in the performance of bituminous pavement mixtures". Submitted to Transport. Res. Rec., July.
- Little, D. and Kim, Y. 2002. "Using dynamic mechanical analysis as a tool to assess the suitable fillers in asphalt mixtures based on the mastic properties". Proc. 10th Annual Intl. Center for Aggregate Research Symposium, Baltimore, MD.
- Lottman, R. P. 1982. "Laboratory Test Method for Predicting Moisture-Induced Damage to Asphalt Concrete". Transportation Research Record 843, National Highway Research Council, Washington, D. C., pp. 88-95.
- Majidzadeh, X. and Brovold, P. N. 1968. "State-of-the-Art: Effect of Water on Bitumen-Aggregate Mixtures". Special HRB Report No. 98, Highway Research Board.
- McCann, M. and Sebaaly, P. 2001. "A quantitative evaluation of stripping potential in hot mix asphalt using ultrasonic energy for moisture accelerated conditioning". Transport. Res. Rec. 1767: 48-59.
- Otsu, N. 1979. "A threshold selection method from gray-level histograms". IEEE Trans. on Sys., Man, and Cyber. 9(1): 62-66.
- Rice, J. M. 1958. "Relationship of Aggregate Characteristics to the Effect of Water on Bituminous Paving Mixtures". Symposium on Effect of Water on Bituminous Paving Mixtures, ASTM STP No. 240, pp. 17-34.
- Santucci, L. 2003. "Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements". Technology Transfer Program, Institute of Transportation Studies, Pavement Research Center, UC, Berkeley.
- Shatnawi, S., Nagarajaiah, M. and Harvey, J. 1995. "Moisture sensitivity evaluation of binder-aggregate mixtures". Transport. Res. Rec. 1492: 71-84.
- Shukla, S. K. and Yin, J. H. 2002. "Function and Installation of Paving Geosynthetics". Department of Civil Engineering, Institute of Technology, Banaras Hindue University, Varanasi, India.
- Solaimanian, M., Harvey, J., Tahmoressi, M. and Tandon, V. 2003. "Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements". Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar, Transportation Research Board, San Diego, CA.
- Stuart, K. D. 1986. "Evaluation of Procedures Used to Predict Moisture Damage in Asphalt Mixtures". FHWA/RD-86/091, Draft Report, March.