

## مقایسه روش‌های آنالیز بافت تصویر به منظور شناسایی و طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های روسازی آسفالتی

رضا شهبان مقدم، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

سید علی صحاف\*، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

ابوالفضل محمدزاده مقدم، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

حمیدرضا پوررضا، استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

Email: asahaf@um.ac.ir

دریافت: ۹۶/۰۲/۲۲ - پذیرش: ۹۶/۰۸/۱۴

### چکیده

ارزیابی عملکرد روسازی یکی از مهم‌ترین عناصر سیستم‌های مدیریت روسازی جهت تعیین راهکار بهینه عملیات ترمیم و نگهداری راه محسوب می‌شود. پیمایش خرابی‌های سطحی راه جزو مراحل اصلی فرایند ارزیابی روسازی در سطح شبکه و همچنین در سطح پروژه است. در دو دهه اخیر، تحقیقات گسترده‌ای پیرامون توسعه روش‌های خودکار، جهت شناسایی خرابی‌های روسازی انجام گرفته که اغلب بر پایه بینایی ماشین و فنون پردازش تصویر می‌باشند. یکی از مهم‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده سیستم بینایی ماشین، فرایند استخراج ویژگی می‌باشد. در این تحقیق، پس از برداشت تصاویر شش گروه مختلف از خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی در شرایط کنترل شده، به منظور مقایسه روش‌های مختلف آنالیز آماری بافت تصویر در تشخیص و طبقه‌بندی خودکار انواع خرابی‌ها، از شاخص‌های آماری مرتبه اول بر پایه هیستوگرام تصویر، شاخص‌های آماری مرتبه دوم بر پایه ماتریس هم‌رخداد و از آمارگان مرتبه سوم و بالاتر مبتنی بر ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری، استفاده شده است. نتایج حاصل از کلاس‌بندی تصاویر خرابی بر اساس روش کمینه فاصله ماهالانویس، حاکی از آن است که آمارگان مستخرج از هیستوگرام و ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری، اگر چه در شناسایی ترک‌های پوست سوسماری نسبت به ماتریس طول تکرار، حساسیت عملکردی طبقه‌بندی بهتری داشته، اما به طور میانگین شاخص‌های آماری مرتبه سوم و بالاتر بر پایه ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری، با دقت عملکردی ۸۰٪، نسبت به سایر رویکردهای توصیف بافت به‌کارگیری شده در این تحقیق، نتایج برتری در شناسایی و کلاس‌بندی خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی حاصل نموده است.

واژه‌های کلیدی: عملکرد روسازی، ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری، ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری، پردازش تصویر

## ۱. مقدمه

اخیر، از ترکیب فن آوری های مذکور، تصاویر سه بعدی از روسازی (اسکن لیزری) که شامل رنگ و ارتفاع هر پیکسل تصویر بوده، نیز قابل برداشت است. استفاده از سیستم های تصویربرداری (اسکن) سه بعدی لیزری به دلیل هزینه زیاد و پیچیدگی الگوریتم های سه بعدی شناسایی الگو، عملکردی بهینه و مقرون به صرفه به منظور آنالیز خرابی های روسازی نمی باشد زیرا خصوصیات سطحی (دو بعدی) خرابی ها، بخش عمده و مهم اطلاعات و ویژگی های توصیف کننده هر خرابی را مخصوصاً به منظور تفکیک و شناسایی الگوی آن، شامل می شود. لذا، در این تحقیق، به منظور برداشت تصاویر خرابی، از تصویربرداری دو بعدی توسط دوربین دیجیتال استفاده شده است. به طور خلاصه، اکثر سامانه های برداشت اتوماتیک خرابی های روسازی مشکلی در تهیه اطلاعات نداشته و مهم ترین نقص و محدودیت آن ها در پردازش اتوماتیک و ارزیابی اطلاعات خرابی نهفته است. در این تحقیق نیز تمرکز اصلی بر فاز آنالیز تصاویر و الگوریتم های شناسایی الگوی انواع خرابی های روسازی آسفالتی می باشد. اغلب این الگوریتم ها بر پایه بینایی ماشین و فنون پردازش تصویر می باشند. اگر چه استانداردها و پروتکل هایی متناسب با شرایط و کارایی روش های خودکار برداشت و آنالیز خرابی ها تدوین شده، اما به دلیل بی نظمی و بی قاعدگی شدید خرابی های ایجاد شده در سطح روسازی، موفقیت محدودی در شناسایی و طبقه بندی خرابی های مختلف حاصل گشته است. علاوه بر این، اغلب رویکردهای ارزیابی اتوماتیک به دلیل به-کارگیری الگوریتم های پیچیده، بار محاسباتی طولانی و سنگینی دارند. با توجه به محدودیت های ذکر شده، به-کارگیری روشی با دقت و کارایی برتر جهت شناسایی و پردازش خرابی ها ضروری می باشد (مقدس نژاد و ذاکری، ۲۰۱۱b). لازم به ذکر است که گرچه تمرکز اصلی در این پژوهش بر شناسایی و تفکیک الگوی

ارزیابی عملکرد روسازی نقش بسیار مهمی در مدیریت روسازی ایفا می کند و بر انتخاب گزینه صحیح عملیات راهداری تأثیرگذار می باشد. بسته به نوع سیستم مدیریت روسازی<sup>۱</sup> پیاده سازی شده، ارزیابی روسازی شامل بررسی و اندازه گیری فاکتورهای مختلفی از راه از جمله میزان ناهمواری و اصطکاک می باشد. شناسایی و پیمایش خرابی های سطحی راه یکی از فاکتورهای اصلی در عملیات ارزیابی روسازی در سطح شبکه و هم چنین در سطح پروژه قلمداد می شود (وانگ و همکاران، ۲۰۱۵). ساده ترین روش ارزیابی خرابی های روسازی، بازرسی چشمی کارشناسان راه از وضعیت ظاهری راه می باشد. این رویکرد ارزیابی روسازی، علاوه بر آنکه هزینه و زمان عملیات بازرسی را افزایش می دهد، وابسته به قضاوت شخصی ارزیابان بوده و نتایجی تکرارناپذیر به دنبال خواهد داشت (ذاکری و همکاران، ۲۰۱۷). در دهه اخیر، به منظور رفع نقائص و مشکلات مربوط به ارزیابی دستی و چشمی خرابی های روسازی، تحقیقات گسترده ای به منظور توسعه روش های نیمه خودکار و تمام خودکار بازرسی وضعیت روسازی انجام گرفته است. در ارزیابی تمام خودکار روسازی، تمامی مراحل برداشت و پردازش داده های خرابی به صورت اتوماتیک و بدون دخالت انسان انجام می گیرد. ارزیابی اتوماتیک روسازی معمولاً توسط اتومبیل های (ون) مجهز به سنسور (هم چون لیزر)، دوربین دیجیتال و پردازشگر انجام می پذیرد. از داده های حاصل از لیزر بیشتر به منظور بررسی و تحلیل عمق شیار، بافت درشت و میزان ناهمواری سطح روسازی استفاده شده، در صورتی که داده های (تصاویر) حاصل از دوربین ها، اغلب در جهت بازرسی وضعیت سطحی و خرابی های روسازی به کار برده می شوند. در سال های

1- Pavement Management System (PMS)

سال ۲۰۰۶، چندین ضابطه آماری نظیر درصد ضراب دانه باند موجک، درصد انرژی فرکانس بالا و انحراف استاندارد به منظور تفکیک و شناسایی انواع خرابی‌های روسازی پیشنهاد شد (ژو و همکاران، ۲۰۰۶). زو و همکاران (۲۰۰۸) بر اساس آستانه تفاوت هیستوگرام همسایگی، روش جدیدی برای آنالیز اتوماتیک ترک‌ها مطرح نمودند. در مقاله مذکور، با جابجایی متعدد مقدار آستانه، در شناسایی و طبقه‌بندی ترک‌های طولی، عرضی و بلوکی بیش از ۹۰٪ دقت عملکردی حاصل گردید. وانگ (۲۰۰۹) با استفاده از شناسایی لبه بر اساس تبدیل موجک<sup>۴</sup> توسط الگوریتم تروس<sup>۵</sup> اقدام به تقطیع و طبقه‌بندی انواع خرابی‌های روسازی کرد. مقدس‌نژاد و ذاکری (۲۰۱۱a) از شیوه تبدیل دو مرحله‌ای به وسیله موجک و تبدیل رادون به جهت تشخیص و از شبکه عصبی مصنوعی دینامیک به منظور تفکیک هفت نوع مختلف از انواع ترک خوردگی استفاده نموده و کمتر از ۵٪ خطا در طبقه‌بندی تصاویر خرابی گزارش دادند. روسا (۲۰۱۲) از توصیف‌کننده‌های آماری بافت تصویر<sup>۶</sup> به منظور تقطیع و شناسایی ناحیه خرابی و با اتصال ترک‌های منفصل و استخراج ویژگی‌های هندسی به طبقه‌بندی انواع ترک خوردگی روسازی آسفالتی پرداخت. سلمان و همکاران (۲۰۱۳) از فیلتر دوبعدی گیبور<sup>۷</sup> و استخراج ویژگی‌های ممانی تصویر خرابی بهره جستند. اویانگ و همکاران (۲۰۱۴) از تبدیل گسسته بيملت<sup>۸</sup> و استخراج ویژگی‌های بافت تصویر در حوزه تبدیل به منظور طبقه‌بندی خرابی‌ها استفاده نمودند. جیانگ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از الگوریتم حداکثر انتظار (EM) و به‌کارگیری ویژگی‌های هندسی، سعی در توسعه روش‌های تشخیص و طبقه-

انواع خرابی‌های سطح آسفالت بوده، اما در سیستم‌های مدیریت روسازی، علاوه بر تشخیص نوع خرابی، سنجش وسعت و شدت آن نیز حائز اهمیت می‌باشد. مانینگ و مهاجری (۱۹۹۱) بر مبنای روشی قاعده-مند و با تلفیق دانش پیرامون الگوهای منحصر به فرد ترک‌ها، به توصیف و طبقه‌بندی انواع ترک‌ها پرداختند. روش مذکور اگر چه قادر به اندازه‌گیری وسعت و شدت خرابی‌ها بوده، اما الگوهای بسیار محدودی از ترک‌ها را شامل می‌شود. چوآ و شو (۱۹۹۴) به منظور تشخیص و طبقه‌بندی خودکار ترک‌های روسازی، به ترتیب از ویژگی ثوابت ممانی<sup>۱</sup> و شبکه‌های عصبی بهره جستند. در این تحقیق، از تصاویر سطوح خاکستری<sup>۲</sup> ۸ بیتی استفاده شده و تنها ترک‌های روسازی مورد ارزیابی قرار گرفتند و در انتها حدود ۱۵٪ خطا در طبقه‌بندی تصاویر گزارش شد. آکوستا و همکاران (۱۹۹۵) به منظور توصیف تصاویر خرابی، از ویژگی‌های بافتی برای تشخیص نوع ترک و از ویژگی‌های هندسی به منظور اندازه‌گیری شدت آن استفاده نمودند. نالاموتها و وانگ (۱۹۹۶) پس از تقطیع ناحیه ترک‌خوردگی توسط ویژگی‌های هندسی در حوزه مکان، نوعی شبکه عصبی مصنوعی را به منظور شناسایی الگوی ترک‌خوردگی‌های مختلف به‌کار گرفتند. چنگ و همکاران (۱۹۹۹) از تبدیل هاف<sup>۳</sup> به منظور تجزیه تصویر و تشخیص نوع ترک استفاده کردند. وانگ و همکاران (۲۰۰۲) توسط مقایسه تصاویر با خصوصیات هندسی ترک‌های پایگاه داده از پیش تعریف شده، به ارزیابی تمام خودکار ترک‌های روسازی و استخراج نقشه آنها پرداختند. لی (۲۰۰۳) از روش‌های ارتقای تصویر هم‌چون بهبود هیستوگرام تصویر و تبدیل فوریه به منظور پیش‌پردازش تصاویر ورودی به سیستم شبکه عصبی استفاده نمود و حدود ۶٪ دقت شناسایی خرابی‌ها را افزایش داد. در

4- Wavelet transform

5- Trous

6- Image texture

7- 2D Gabor Filter

8- Discrete Beamlet transform

1- Moment invariants

2- Gray level

3- Hough

بزرگ بوده و به راحتی می توانند از زمینه تفکیک و به صورت مجزا تقطیع و شرح داده شوند مانند اکثر بافت های مصنوعی (ساخته شده توسط انسان)، از روش های ارائه و توصیف ساختاری بافت هم چون مفروش نمودن و مدل گرامری می توان بهره جست. در غیر این صورت، مانند اغلب بافت های طبیعی هم چون خرابی های به وجود آمده در سطح روسازی آسفالتی، بایستی از روش های توصیف و آنالیز آماری بافت تصویر استفاده نمود. علاوه بر این، روش های تحلیل آماری بافت از کارایی، سادگی و محبوبیت بیشتری برخوردار می باشند. آنالیز آماری بافت به طور کلی در دو حوزه مکان و تبدیل<sup>۲</sup> قابل پیاده سازی می باشد. در آنالیز آماری بافت، نحوه توزیع و ارتباط مکانی مقادیر سطوح خاکستری پیکسل های تصویر در سطح المان ارائه می شود (آنورادها و سنکرایانان، ۲۰۱۳). بسته به تعداد پیکسل های به کارگیری شده جهت تفسیر و توصیف بافت تصویر، روش های آنالیز آماری به سه دسته مرتبه اول، مرتبه دوم و مراتب بالاتر تقسیم بندی می شوند. شاخص های آماری مرتبه اول، برخلاف شاخص های آماری مرتبه دوم و مراتب بالاتر، بدون در نظر گرفتن ارتباط مکانی میان مقادیر سطوح خاکستری پیکسل های تصویر محاسبه و استخراج می شوند (سینگ، ۲۰۱۶).

در این پژوهش، به منظور تهیه تصاویر خرابی به وجود آمده در سطح روسازی آسفالتی چندین پارامتر مهم از جمله وضوح، کیفیت بالا و تأمین شرایط روشنایی کنترل شده در نظر گرفته شده است. سخت افزار مورد استفاده با حذف کامل نور محیط اطراف توسط برزنت و تأمین یک نورپردازی مناسب با شدت ثابت برای تمامی برداشت ها از یک فاصله مشخص، ضرورت انجام عملیات نرم افزاری (پردازش تصویر) به منظور ارتقای تصویر و کاهش نویز حاصل از شرایط محیطی را برطرف نموده است.

بندی اتوماتیک خرابی های روسازی نمودند. در سال ۲۰۱۶ در مقاله ای توسط ذاکری و همکاران (۲۰۱۷) کلیه روش های برداشت و پردازش نیمه اتوماتیک و تمام اتوماتیک خرابی های روسازی آسفالتی گردآوری و بررسی شده است.

تکنیک های پردازش تصویر و بینایی ماشین از عناصر مختلفی در فرایند تفسیر تصاویر بهره می گیرند. از اجزای تشکیل دهنده سیستم بینایی ماشین می توان به برداشت داده، پردازش تصویر، بهبود و ارتقا تصویر، تقطیع، استخراج ویژگی و شناسایی الگو اشاره نمود. استخراج ویژگی در حقیقت تبدیل داده های ورودی به یک سری جزئیات مفید بوده و یکی از مهم ترین اجزای تشکیل دهنده سیستم های بینایی ماشین در فرایند کلاس بندی و شناسایی الگوی تصویر محسوب می شود. ویژگی های مستخرج از تصویر هم چون رنگ، بافت، ثوابت ممانی و ویژگی های هندسی (شکل) اغلب در قالب برداری عددی (کمیت) بوده و بردار ویژگی نماینده تصویر تلقی می شوند. ویژگی های بافتی در مقایسه با دیگر ویژگی ها، اطلاعات بیشتر و دقیق تری از ویژگی ها و خصوصیات نواحی موجود در تصویر ارائه نموده و در بسیاری از کاربردها از جمله آنالیز تصاویر پزشکی، دسته بندی تصاویر راداری، تشخیص چهره، اثر انگشت و مخصوصاً شناسایی و تفکیک الگوی انواع خرابی، عملکرد برتری به دنبال دارند (سرینواسان و شوبها، ۲۰۰۸).

بافت تصویر عبارت است از تکرار یک المان (تکسل<sup>۱</sup>) با الگویی خاص که این المان خود از تغییرات محلی مقادیر سطوح خاکستری پیکسل های تصویر تشکیل یافته است. از انواع بافت می توان به بافت خشن، ظریف، هموار، موج و خطی اشاره نمود. روش های توصیف بافت شامل روش های ساختاری و آماری می باشد. به طور کلی، هنگامی که تکسل ها به حد کافی

2- Spatial and transformation domain

1- Texel

توصیف بافت تصویر در حوزه مکان، در تشخیص و طبقه‌بندی خرابی‌های روسازی، به طور میانگین دقت عملکردی بالاتری دارا می‌باشند. اما نتایج تحقیق حاکی از آن است که استخراج ویژگی‌های بافت تصویر در حوزه مکان بر پایه ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری علاوه بر آن‌که در شناسایی بسیاری از کلاس‌های خرابی حساسیت عملکردی بالایی داشته، نسبت به بسیاری از روش‌های آنالیز بافت چنددقته هم - چون تبدیل بیملت و تبدیل ویولت بر اساس فیلتر Coiflet و فیلتر Daubechies میانگین دقت عملکردی بالاتری نیز دارد (دتوری و سملرا، ۲۰۰۷). لازم به ذکر است که آنالیز آماری بافت تصویر خرابی بر پایه ماتریس طول تکرار در حوزه مکان، نسبت به تحلیل - های چنددقته (آنالیز بافت در حوزه تبدیل)، الگوریتم ساده‌تر و بار محاسباتی بسیار کمتری داشته که به تبع منجر به کاهش زمان و هزینه آنالیز تصاویر و ارزیابی عملکرد روسازی می‌گردد. این امر یکی از مهم‌ترین فاکتورهای ارزیابی سیستم‌های خودکار برداشت خرابی می‌باشد. همچنین در الگوریتم‌های پیشین تمرکز اصلی بیشتر بر شناسایی و طبقه‌بندی خودکار ترک‌های روسازی بوده است (ذاکری و همکاران، ۲۰۱۷). باید متذکر شد که ترک‌ها تنها نمایانگر یک جنبه مهم از خرابی‌های روسازی هستند. سایر موارد نظیر چاله‌ها، وصله‌ها، قیرزدگی و عریان‌شدگی نیز همانند ترک - خوردگی، نقش مهمی در افت شاخص کیفیت روسازی داشته و گزینه‌های ترمیم و نگهداری پیشنهادی توسط سیستم مدیریت روسازی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

## ۲. مبانی نظری پژوهش

در این بخش، مفاهیم پایه پیرامون شاخص‌های آماری مرتبه اول، مرتبه دوم و مراتب بالاتر به ترتیب ارائه می‌شوند.

### ۲-۱. شاخص‌های آماری مرتبه اول

برداشت‌های انجام شده از سطح روسازی در هفت گروه مختلف طبقه‌بندی شده است. هر گروه شامل تصاویر آموزشی و آزمایشی می‌باشد. در این مطالعه، چون المان‌های بافت (تکسل) تصاویر خرابی سطح روسازی آسفالتی به طور مجزا قابل جداسازی و تفسیر نبوده، از توصیف آماری بافت تصویر بهره‌گیری شده است. بدین منظور از شاخص‌های آماری مرتبه اول بر پایه هیستوگرام تصویر، شاخص‌های آماری مرتبه دوم بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری<sup>۱</sup> و از شاخص‌های آماری مرتبه سوم و بالاتر بر پایه ماتریس طول تکرار (طول دنباله) سطوح خاکستری<sup>۲</sup>، در حوزه مکان استفاده شده است. در نهایت طبقه‌بندی تصاویر خرابی بر اساس روش کمینه فاصله مالهالانوبیس<sup>۳</sup> صورت گرفته است. لازم به ذکر است که کلیه محاسبات و تحلیل داده‌های خرابی در این مقاله، توسط جعبه افزار پردازش تصویر نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۱۶ انجام گرفته است. در تحقیقات پیشین، به منظور استخراج ویژگی تصاویر خرابی روسازی، اغلب از ویژگی‌های هندسی یا شاخص‌های آماری مرتبه اول و دوم (آنالیز آماری بافت) در حوزه تبدیل استفاده شده است. بدین منظور اغلب تبدیل موجک به‌کارگیری شده است زیرا این تبدیل علاوه بر حفظ اطلاعات فرکانسی و مکانی تصویر (برخلاف تبدیل فوری) قادر است مؤلفه‌های سیگنال تصویری را به صورت چنددقته آنالیز نماید. اگرچه اکثر روش‌های آنالیز بافت چند دقته<sup>۴</sup> هم - چون تبدیل موجک بر مبنای فیلتر Haar) و تبدیل کرولت<sup>۵</sup>، به دلیل تجزیه تصاویر و جداسازی باندهای فرکانسی (زیرباندها) و توصیف (آشکارسازی) جزئیات ساختاری بافت خرابی در جهات مجزا، نسبت به

- 2- Grey level run length matrix (GLRL)
- 3- Mahalanobis distance
- 4- Multiresolution texture analysis
- 5- Curvelet transform

سطوح خاکستری دو پیکسل را در فاصله و جهتی مشخص از یکدیگر در نظر می گیرند. شاخص های آماری مرتبه دوم اغلب بر پایه ماتریس هم رخداد تصویر استخراج می شوند (زاید و النمر، ۲۰۱۵). ماتریس هم-رخداد، ماتریسی مربعی و نامتقارن بوده که نشان دهنده تعداد تکرار جفت پیکسل هایی از تصویر با سطوح خاکستری  $i$  و  $j$  می باشد که در آن مقدار سطح خاکستری اولین پیکسل برابر  $i$  بوده و  $j$  در فاصله  $d$  و در جهتی مشخص  $(\theta)$  از  $i$  قرار دارد  $P(i,j)$ . در انتها، این مقدار بر مجموع کل مقادیر ماتریس نرمالیزه شده و درایه های ماتریس هم رخداد  $(p_{ij})$  را مطابق با رابطه (۲) تشکیل می دهند:

$$p_{ij} = \frac{P(i,j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P(i,j)} \quad (2)$$

که  $N$  در این رابطه، ابعاد ماتریس هم رخداد می باشد. ابعاد ماتریس هم رخداد برابر با بیشینه مقدار سطح خاکستری موجود (ممکن) در تصویر می باشد. ماتریس هم رخداد را می توان به عنوان یک تابع چگالی احتمال در نظر گرفته و با محاسبه شاخص های آماری مختلف همچون تضاد (کنتراست)  $^4$ ، همبستگی  $^5$ ، همسانی (انرژی)، همگنی  $^6$ ، حداکثر احتمال  $^7$  و آنتروپی از این ماتریس، بافت تصویر را آنالیز نمود.

### ۲-۳. شاخص های آماری مرتبه سوم و بالاتر

ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری تصویر، ابزار مناسبی جهت محاسبه شاخص های آماری مرتبه سوم و بالاتر فراهم آورده است. این ماتریس در شرح طیف وسیعی از بافت ها عملکرد مناسبی دارد. درایه های این ماتریس  $(P(i,j))$  نشان دهنده طول تکرار  $(j)$  پیکسل هایی با سطح خاکستری  $(i)$  در جهتی مشخص  $(\theta)$  در تصویر

شاخص های آماری مرتبه اول، مستقیماً از مقادیر سطوح خاکستری پیکسل های تصویر اصلی، بدون در نظر گرفتن ارتباط مکانی میان آن ها محاسبه و استخراج می شوند. به طور معمول، شاخص های آماری مرتبه اول، از محاسبه گشتاورهای آماری هیستوگرام تصویر حاصل می شوند. هیستوگرام تصویر  $P(z_i)$  بیان کننده تعداد پیکسل هایی در تصویر بوده که دارای سطح خاکستری برابر با  $z_i$  می باشد (آگاروال و آگاروال، ۲۰۱۲). از تقسیم این مقدار بر مجموع کل تعداد پیکسل های تصویر، هیستوگرام نرمالیزه شده  $p(z_i)$  مطابق با رابطه (۱) به دست می آید.

$$p(z_i) = \frac{P(z_i)}{\sum_{i=1}^L P(z_i)} \quad (1)$$

که  $L$  برابر با تعداد سطوح خاکستری موجود (ممکن) در تصویر می باشد.

هیستوگرام نرمالیزه شده را می توان به عنوان تابع چگالی احتمال در نظر گرفته و با محاسبه شاخص های آماری مختلفی هم چون میانگین، انحراف استاندارد، نرمی  $^1$ ، گشتاور مرتبه سوم، همسانی  $^2$  و آنتروپی  $^3$  ویژگی های بافت تصویر را توصیف نمود.

### ۲-۲. شاخص های آماری مرتبه دوم

آنالیز بافت تصویر توسط شاخص های آماری مستخرج از هیستوگرام، اگرچه اطلاعات مفیدی پیرامون نحوه توزیع مکانی سطوح خاکستری پیکسل ها در تصویر ارائه می نماید اما هیچ اطلاعاتی درباره ارتباط مکانی نسبی مقادیر سطوح خاکستری پیکسل ها ارائه نمی کند. دلیل این موضوع، عدم حساسیت مقادیر هیستوگرام به جابجایی پیکسل های تصویر می باشد (سینگ، ۲۰۱۶).

شاخص های آماری مرتبه دوم، ارتباط میان مقادیر

- 
- 4- Contrast
  - 5- Correlation
  - 6- Homogeneity
  - 7- Maximum probability

- 
- 1- Smoothness
  - 2- Uniformity
  - 3- Entropy

با شدت ثابت و فاصله‌ای مشخص از سطح روسازی آسفالتی برای تمامی برداشت‌ها، ضرورت انجام عملیات نرم‌افزاری به منظور بهبود و ارتقا تصاویر را برطرف نمود. لازم به ذکر است که تمامی تصاویر خرابی در شرایط یکسان و با دوربین دیجیتال Fujifilm با مساحت تصویر (رزولوشن) ۱۴ مگاپیکسل از ارتفاع یک متری سطح آسفالت (بدون بزرگنمایی) برداشت شده است. در تهیه تصاویر خرابی سعی شده خصوصیات رنگ سطح آسفالت و وضعیت نمایان شدن سنگدانه‌ها ثابت باشد. به منظور ارزیابی صحیح عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی در این پژوهش، تمامی حالت‌ها و مدل‌های گروه‌های مختلف خرابی برداشت شده است، به عنوان مثال، در سطح روسازی آسفالتی هم وصله‌های مربعی‌شکل و هم وصله‌های مستطیل‌شکل موجود است که از هر دو مدل، تصاویری برداشت شده است. لازم به یادآوری است که در این تحقیق چون شناسایی و تفکیک کلاس‌های مختلف خرابی مبتنی بر آنالیز بافت تصویر بوده، بایستی از سطوح خاکستری تشکیل‌دهنده خرابی به میزان کافی در تصویر موجود باشد. به عبارتی، به منظور تشخیص انواع خرابی، بایستی تصویر محدوده نسبتاً بزرگی از نمونه خرابی را شامل گردد. اما الگوریتم‌های ارائه شده حساس و وابسته به محل قرارگیری خرابی در تصویر و همچنین ابعاد تصویر (ابعاد پیکسل‌ها) نمی‌باشند. در نتیجه این امر، در تصاویر برداشت شده، مکان رخداد عارضه خرابی در تصویر، جایگاه مشخص و منظمی ندارد. لازم به ذکر است که در صورت افزایش وسعت و شدت خرابی‌ها در تصویر، چون تعداد سطوح خاکستری تشکیل‌دهنده بافت خرابی گسترده‌تر می‌گردد، شناسایی و تفکیک بافت الگوهای مختلف با خطای کمتری همراه می‌باشد.

اصلی می‌باشد (تانگ، ۱۹۹۸). پس از تقسیم مقادیر طول تکرار بر مجموع کل مقادیر ماتریس، درایه‌های نرمال شده  $(p_{ij})$  ماتریس طول تکرار مطابق با رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$p_{ij} = \frac{P(i,j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P(i,j)} \quad (3)$$

که  $N$  در این رابطه، برابر با بیشینه مقدار سطح خاکستری موجود (ممکن) و  $M$  برابر با حداکثر تعداد پیکسل‌های تصویر (حداکثر تکرار ممکن) در جهت (0) می‌باشد.

ماتریس نرمال شده طول تکرار را می‌توان به عنوان یک تابع چگالی احتمال در نظر گرفته و با محاسبه شاخص‌های متنوعی هم‌چون قوه تکرار کوتاه، عدم یکنواختی سطوح خاکستری و درصد تکرار، ویژگی‌های بافت تصویر را استخراج نمود.

### ۳. روند انجام پژوهش و اعتبارسنجی تحقیق

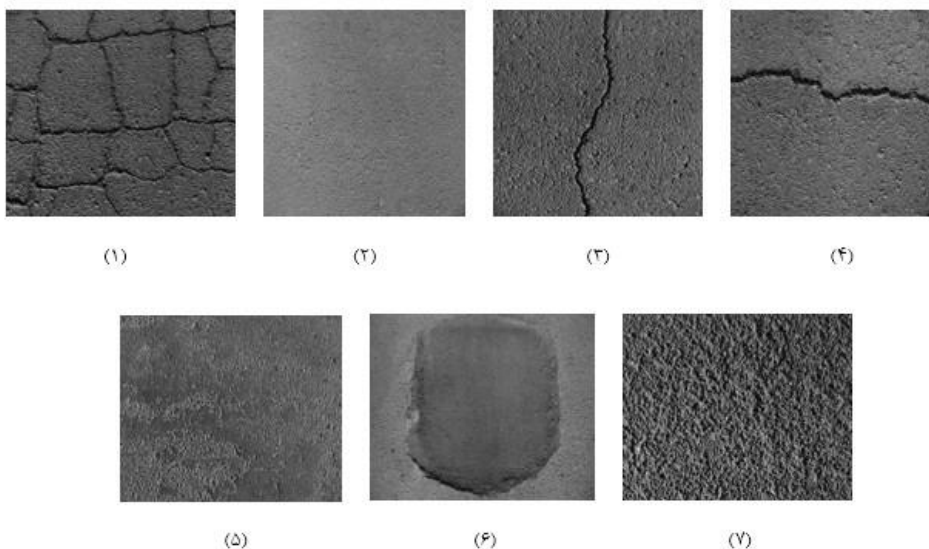
در این بخش از تحقیق، به منظور اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص و تفکیک خودکار خرابی‌های روسازی، اقدام به برداشت تصاویر خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی نموده و الگوریتم پیشنهادی روی این تصاویر مورد آزمایش قرار گرفت. به طور کلی، انجام تحقیق شامل چهار مرحله می‌باشد: ۱- برداشت تصاویر خرابی، ۲- استخراج ویژگی و آنالیز بافت، ۳- کلاس‌بندی تصاویر و ارزیابی عملکردی آن و ۴- بررسی و تحلیل نتایج.

#### ۳-۱. برداشت تصاویر خرابی روسازی آسفالتی

به منظور برداشت تصاویر خرابی در کیفیت بالا و شرایط نور کنترل شده، سخت‌افزاری مطابق شکل ۱ مورد استفاده قرار گرفت. این سخت‌افزار با حذف کامل نور محیط توسط برزنت و تأمین یک روشنایی مصنوعی



شکل ۱. سخت افزار برداشت تصاویر خرابی روسازی آسفالتی در شرایط کنترل شده



شکل ۲. طبقه بندی تصاویر خرابی برداشت شده از سطح روسازی: (۱) ترک پوست سوسماری، (۲) آسفالت سالم (بدون خرابی)، (۳) ترک طولی، (۴) ترک عرضی، (۵) قیرزدگی، (۶) وصله و (۷) عریان شدگی

### ۲-۳. استخراج ویژگی و آنالیز بافت تصاویر خرابی

پس از برداشت تصاویر انواع خرابی روسازی آسفالتی، تمامی تصاویر از حالت رنگی به تک رنگ با مقادیر شدت سطوح خاکستری (محدوده پویا) بین صفر تا ۲۵۵ (۸ بیت) تبدیل شدند. سپس، به منظور مقایسه روش های مختلف آنالیز بافت تصویر در شناسایی و طبقه بندی انواع خرابی های روسازی

تصاویر برداشت شده از روسازی در ۷ گروه شامل: (۱) ترک پوست سوسماری، (۲) آسفالت سالم (بدون خرابی)، (۳) ترک طولی، (۴) ترک عرضی، (۵) قیرزدگی، (۶) وصله و (۷) عریان شدگی مطابق شکل ۲ طبقه بندی گردید. از هر گروه، تعداد ۶۰ عدد تصویر برداشت گردید که ۳۰ عدد از آنها به منظور آموزش الگوریتم و ۳۰ عدد با هدف آزمایش الگوریتم مورد آنالیز و بررسی قرار گرفت.

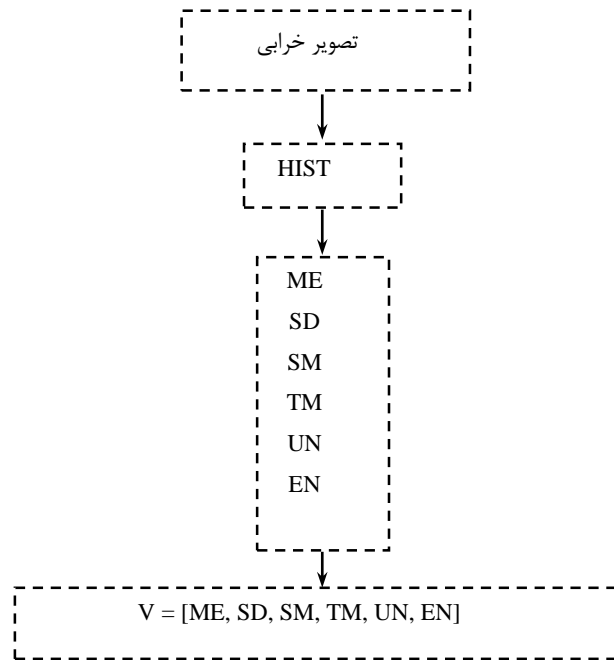


(SM)، گشتاور مرتبه سوم (TM)، همسانی (UN) و آنتروپی (EN) از هیستوگرام نرمال شده تصویر (HIST) استخراج شده و مطابق با شکل ۳ به ترتیب درایه‌های بردار ویژگی تصویر (V) را تشکیل می‌دهند. بردار V نماینده بافت تصویر اصلی در فرایند طبقه‌بندی تصاویر خرابی قلمداد می‌شود.

آسفالتی، از گشتاورهای آماری هیستوگرام تصویر و آمارگان مستخرج از ماتریس هم‌رخداد و ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری بهره‌گیری شده است.

### ۳-۲-۱. آنالیز بافت بر پایه هیستوگرام تصویر

در این پژوهش، شش شاخص آماری مرتبه اول شامل میانگین (ME)، انحراف استاندارد (SD)، نرمی



شکل ۳. الگوریتم استخراج بردار ویژگی مبتنی بر هیستوگرام تصویر

شده تصویر را به دست آورده و سپس با استفاده از دستور `statxture` آمارگان مرتبه اول را از هیستوگرام نرمال شده استخراج نمود. کد توابع مذکور در کتاب پردازش تصاویر دیجیتال (گزنالس و وودز، ۲۰۰۴) ارائه شده است. لازم به ذکر است که دستور `statxture` تنها قادر به محاسبه شاخص‌های آماری میانگین، انحراف استاندارد، نرمی و ممان مرتبه سوم بوده و دستورات مربوط به محاسبه آمارگان همسانی و آنتروپی توسط مؤلفین با استفاده از روابط جدول ۱ در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۶ کدنویسی شده است.

هر کدام از شاخص‌های آماری مذکور که به منظور آنالیز آماری بافت تصویر خرابی، محاسبه و استخراج می‌شوند، بیانگر خاصیتی ویژه در تصویر می‌باشند. به عنوان مثال، انحراف استاندارد بیانگر میانگین کنتراست موجود در سطوح خاکستری تصویر می‌باشد. گشتاور آماری مرتبه سوم نشان‌دهنده میزان چولگی هیستوگرام و آنتروپی معیاری از تصادفی بودن توزیع مقادیر سطوح خاکستری پیکسل‌های تصویر می‌باشد (آگاروال و آگاروال، ۲۰۱۲). به منظور پیاده‌سازی الگوریتم استخراج بردار ویژگی تصویر (شکل ۳) در نرم‌افزار متلب، بایستی ابتدا با استفاده از تابع `imhist` هیستوگرام نرمال

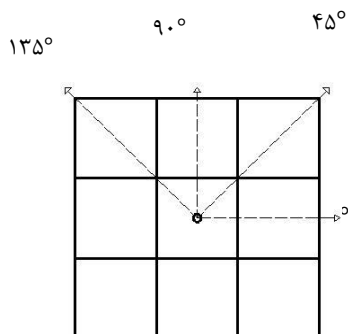
جدول ۱. روابط و شرح توصیف کننده های بافت تصویر مبتنی بر هیستوگرام سطوح خاکستری (آگاراول و آگاراول، ۲۰۱۲)

ویژگی	شرح	رابطه
میانگین	شاخصی از متوسط مقدار سطوح خاکستری موجود در تصویر	$m = \sum_{i=1}^L z_i p(z_i)$
انحراف استاندارد	معیاری از متوسط تضاد موجود در مقادیر سطوح خاکستری تصویر است. بیانگر نرمی نسبی مقادیر سطوح خاکستری تصویر. نرمی در ناحیه ای	$\sigma = \sum_{i=1}^L (z_i - m)^2 p(z_i)$
نرمی	با سطوح خاکستری یکنواخت برابر با صفر و در ناحیه ای با مقادیر تفاوت (گردش) بالا در سطوح خاکستری برابر با یک می باشد.	$1 - \frac{1}{(1 + \sigma^2)}$
گشتاور مرتبه سوم	معیاری از چولگی هیستوگرام تصویر است. این مقدار برای یک هیستوگرام متقارن برابر صفر می باشد. شاخصی از همسانی یکنواختی	$\sum_{i=1}^L (z_i - m)^3 p(z_i)$
همسانی	سطوح خاکستری تصویر بوده و هنگامی که تمامی سطوح خاکستری برابر باشد، ماکزیمم می باشد. بیانگر میزان تصادفی بودن توزیع	$\sum_{i=1}^L p^2(z_i)$
آنتروپی	مقادیر سطوح خاکستری در تصویر است.	$-\sum_{i=1}^L p(z_i) \log_2 p(z_i)$

### ۲-۲-۳. آنالیز بافت تصویر بر پایه ماتریس هم رخداد

#### سطوح خاکستری

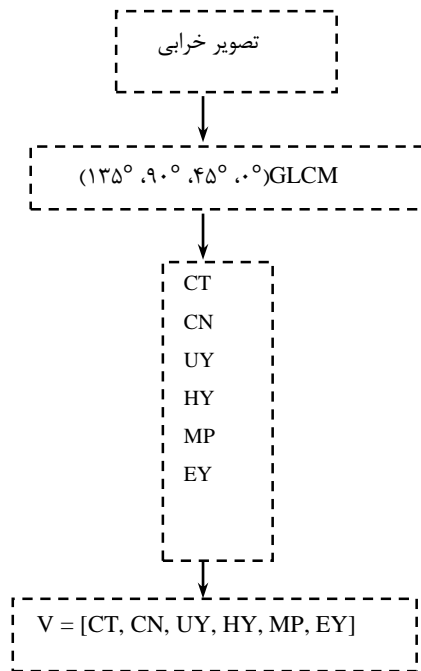
در این تحقیق، ابعاد ماتریس هم رخداد (GLCM) برابر با ۲۵۶ انتخاب شده، پارامتر فاصله برابر با واحد و با توجه به توزیع مکانی گوناگون سطوح خاکستری در الگوهای خرابی مختلف، ۴ زاویه مجزا (۰°، ۴۵°، ۹۰° و ۱۳۵°) به عنوان پارامتر جهت به منظور تشکیل ماتریس هم رخداد مطابق با شکل ۴ انتخاب گردید.



شکل ۴. زوایای انتخابی به منظور تشکیل ماتریس هم-رخداد سطوح خاکستری

کتراست (تضاد) بیانگر میزان تفاوت مقادیر یک پیکسل با همسایه‌هایش در تصویر می‌باشد. همبستگی بیانگر میزان وابستگی مقادیر یک پیکسل با همسایه‌هایش در تصویر بوده که به صورت عددی بین ۱- و ۱ تعریف می‌شود. همسانی معیاری از میزان یکنواختی تصویر بوده و مقادیری در محدوده صفر تا ۱ دارد. همگنی شاخصی از نزدیکی مکانی توزیع مقادیر اجزای ماتریس هم‌رخداد به قطر بوده و بیشینه آن برای یک ماتریس قطری به دست می‌آید (زاید و النمر، ۲۰۱۵).

پس از نرمال نمودن مقادیر ماتریس هم‌رخداد، شاخص‌های آماری مرتبه دوم شامل تضاد، همبستگی، انرژی یا همسانی، همگنی، حداکثر احتمال و آنتروپی به طور مجزا در هر چهار جهت استخراج شده و میانگین حسابی آنها به عنوان شاخص‌های نهایی تضاد (CT)، همبستگی (CN)، همسانی (UY)، همگنی (HY)، حداکثر احتمال (MP) و آنتروپی (EY) محاسبه می‌شوند. این شاخص‌های نهایی مطابق با شکل ۵ به ترتیب درایه‌های بردار ویژگی نماینده تصویر (V) را تشکیل می‌دهند. هر یک از این شاخص‌ها، ویژگی خاصی از تصویر را توصیف می‌نماید. به عنوان مثال،



شکل ۵. الگوریتم استخراج بردار ویژگی تصویر مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری

تصاویر دیجیتال (گنزالس و وودز، ۲۰۰۴) ارائه شده است. لازم به ذکر است که دستور `gldm_features` تنها قادر به محاسبه شاخص‌های آماری تضاد، همبستگی، همسانی و همگنی بوده و دستورات مربوط به محاسبه آمارگان حداکثر احتمال و آنتروپی توسط مؤلفین با استفاده از روابط ارائه شده در جدول ۲ در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۶ کدنویسی شده است.

به منظور پیاده‌سازی الگوریتم استخراج بردار ویژگی تصویر (شکل ۵) در نرم‌افزار متلب، بایستی ابتدا با استفاده از توابع `offsets` و `graycomatrix`، ماتریس-های هم‌رخداد نرمال شده تصویر را در چهار جهت منتخب به دست آورده و سپس با استفاده از دستور `mean_gldm_features` میانگین آمارگان مرتبه دوم از ماتریس‌های هم‌رخداد سطوح خاکستری استخراج شدند. کد اجرای توابع مذکور در کتاب پردازش

جدول ۲. روابط و شرح توصیف کننده های بافت تصویر مبتنی بر ماتریس هم رخداد سطوح خاکستری (سینگ، ۲۰۱۶)

ویژگی	شرح	رابطه
کنتراست	بیانگر اختلاف و تضاد سطح خاکستری یک پیکسل با همسایه- هایش در کل تصویر است. مقدار آن بین صفر و $(N-1)^2$ است.	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (i-j)^2 p_{ij}$
همبستگی	شاخصی از میزان وابستگی سطح خاکستری یک پیکسل با مقادیر همسایه هایش در کل تصویر است. مقدار حاصل بین $-1$ و $1$ بوده که به ترتیب بیانگر همبستگی کامل مثبت و منفی است. در صورتی که مقدار واریانس صفر باشد، این ویژگی تعریف نشده است.	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{(i-m_r)(j-m_c)p_{ij}}{\sigma_r\sigma_c}$
انرژی یا همسانی	معیاری از یکنواختی بوده و مقداری در محدوده صفر و $1$ دارد؛ $1$ به معنای یک تصویر کاملاً یکنواخت است.	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ij}^2$
همگنی	بیانگر نزدیکی مکانی توزیع اجزای ماتریس هم رخداد سطوح خاکستری به قطر است. مقداری در محدوده صفر و $1$ داشته و بیشینه مقدار برای یک ماتریس قطری به دست می آید.	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{p_{ij}}{1+ i-j }$
حداکثر احتمال	شاخصی از قوی ترین پاسخ ماتریس هم رخداد می باشد. میزان اتفافی بودن مقادیر را بیان می کند. مقدار صفر در حالتی به- دست می آید که همه مقادیر ماتریس صفر باشند؛ وقتی تمامی مقادیر ماتریس برابر باشند، ماکزیمم است.	$\text{Max}(p_{ij})$
آنتروپی		$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ij} \log_2 p_{ij}$

### ۳-۲-۳. آنالیز بافت تصویر بر پایه ماتریس طول

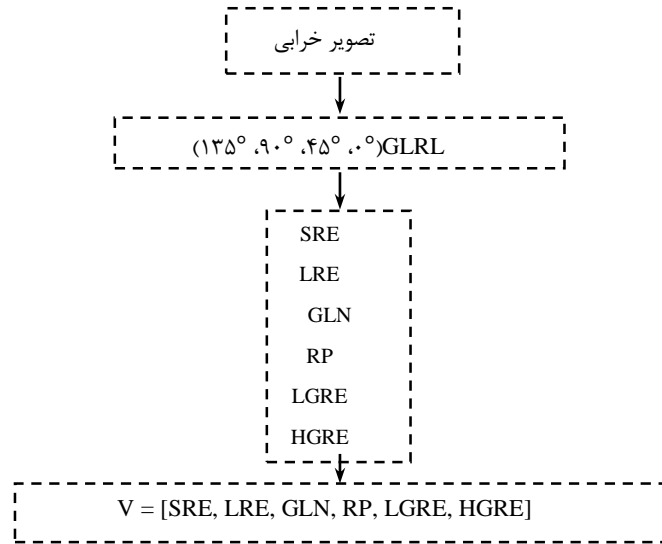
#### تکرار سطوح خاکستری

اغلب خرابی های سطح روسازی از تکرار الگوهای خاصی از سطوح خاکستری در جهت های مختلف تشکیل می شوند. در این مطالعه، همانند فرایند تشکیل ماتریس هم رخداد، چهار زاویه  $(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ)$  به عنوان پارامتر جهت، به منظور تشکیل ماتریس طول تکرار (GLRL) انتخاب گردید. به منظور مقایسه صحیح میان روش های آنالیز بافت به کارگیری شده در این پژوهش جهت طبقه بندی تصاویر انواع خرابی، همانند هیستوگرام و ماتریس هم رخداد، شش شاخص آماری از

ماتریس طول تکرار نرمال شده استخراج گردید. شاخص های آماری مرتبه سوم و بالاتر شامل قوه تکرار کوتاه<sup>۱</sup> (SRE)، قوه تکرار بلند<sup>۲</sup> (LRE)، عدم یکنواختی سطوح خاکستری<sup>۳</sup> (GLN)، درصد تکرار<sup>۴</sup> (RP)، قوه تکرار سطوح خاکستری پایین<sup>۵</sup> (LGRE) و قوه تکرار سطوح خاکستری بالا<sup>۶</sup> (HGRE) در هر چهار جهت مذکور از ماتریس طول تکرار استخراج شده و میانگین

- 1- Short run emphasis (SRE)
- 2- Long Run Emphasis (LRE)
- 3- Grey level nonuniformity (GLN)
- 4- Run percentage (RP)
- 5- Low grey level run emphasis (LGRE)
- 6- High grey level run emphasis (HGRE)

آنها به ترتیب درایه‌های بردار ویژگی نماینده تصویر (V) را مطابق با شکل ۶ تشکیل می‌دهند.



شکل ۶. الگوریتم استخراج بردار ویژگی مبتنی بر ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری تصویر

شده است. لازم به ذکر است که دستور `grayrlprops` تنها قادر به محاسبه شاخص‌های آماری قوه تکرار کوتاه، قوه تکرار بلند، عدم یکنواختی سطوح خاکستری و درصد تکرار بوده و دستورات مربوط به محاسبه آمارگان قوه تکرار سطوح خاکستری پایین و قوه تکرار سطوح خاکستری بالا توسط مؤلفین با استفاده از روابط ارائه شده در جدول ۳ در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۶ کدنویسی شده است.

به منظور پیاده‌سازی الگوریتم استخراج بردار ویژگی تصویر (شکل ۶) در نرم‌افزار متلب، بایستی ابتدا با استفاده از توابع `offsets` و `grayrlmatrix`، ماتریس‌های طول تکرار نرمال شده تصویر را در چهار جهت منتخب به دست آورده و سپس با استفاده از دستور `mean_grayrlprops` میانگین آمارگان مرتبه سوم و بالاتر را از ماتریس‌های طول تکرار سطوح خاکستری استخراج نمود. کد اجرای توابع مذکور در کتاب پردازش تصاویر دیجیتال (گنزالس و وودز، ۲۰۰۴) ارائه

جدول ۳. روابط توصیف کننده‌های بافت تصویر مبتنی بر ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری (تانگ، ۱۹۹۸)

رابطه	ویژگی
$\frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{p_{ij}}{j^2}$ $n_r =$ مجموع کل تعداد تکرارها	قوه تکرار کوتاه (SRE)
$\frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (p_{ij} \cdot j^2)$	قوه تکرار بلند (LRE)
$\frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^M p_{ij} \right)^2$ $n_r =$ مجموع کل تعداد پیکسل‌های تصویر	عدم یکنواختی سطوح خاکستری (GLN)
$\frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{p_{ij}}{i^2}$	درصد تکرار (RP)
$\frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{p_{ij}}{i^2}$	قوه تکرار سطوح خاکستری پایین (LGRE)
$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (p_{ij} \cdot i^2)$	قوه تکرار سطوح خاکستری بالا (HGRE)

### ۳-۳. کلاس بندی تصاویر خرابی

کلاس بندی به فرایند نگاشت یک تصویر ناشناخته به مجموعه ای از گروه های از پیش تعریف شده اطلاق می گردد. در این تحقیق، از روش کمینه فاصله به منظور کلاس بندی تصاویر خرابی استفاده گردیده است. بدین منظور، فاصله ماهالانویس طبق رابطه (۴) محاسبه شده است:

$$d^2 = (x - m_c) C_c^{-1} (x - m_c) \quad (4)$$

در این رابطه،  $x$  بردار ویژگی تصویر آزمایشی،  $m_c$  میانگین حسابی درایه های بردار ویژگی تصاویر آموزشی کلاس خرابی  $c$  (بردار میانگین کلاس آموزشی  $c$ ) و  $C_c$  ماتریس کواریانس مجموعه ویژگی های تصاویر آموزشی کلاس  $c$  می باشد. برتری استفاده از فاصله ماهالانویس نسبت به فاصله اقلیدسی، در نظر گرفتن ارتباط و همبستگی میان درایه های بردار ویژگی از طریق محاسبه کواریانس ویژگی ها بوده که منجر به هم سنگ شدن محاسبه فاصله نهایی و افزایش دقت و صحت کلاس بندی می شود (تانگ، ۱۹۹۸).

در این روش، پس از استخراج ۳۰ بردار ویژگی از

جدول ۴. ماتریس درهم ریختگی حاصل از استخراج بردار ویژگی بر پایه هیستوگرام تصویر

نوع خرابی	ترک پوست سوسماری	آسفالت سالم	ترک طولی	ترک عرضی	قیر- زدگی	و صله	عریان- شدگی
ترک پوست سوسماری	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
آسفالت سالم	۰	۲۵	۴	۰	۰	۱	۰
ترک طولی	۸	۱	۱۳	۲	۱	۵	۰
ترک عرضی	۲	۰	۶	۱۵	۱	۴	۲
قیرزدگی	۰	۰	۰	۴	۲۱	۵	۰
وصله	۰	۱	۴	۱	۰	۲۴	۰
عریان شدگی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰

جدول ۵. ماتریس درهم‌ریختگی حاصل از استخراج بردار ویژگی تصویر بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری

نوع خرابی	ترک پوست سوسماری	آسفالت ت سالم	ترک طولی	ترک عرضی	قیر- زدگی	و صله	عریان- شدگی
ترک پوست سوسماری	۲۸	۰	۰	۲	۰	۰	۰
آسفالت سالم	۰	۲۳	۶	۱	۰	۰	۰
ترک طولی	۷	۶	۶	۸	۰	۲	۱
ترک عرضی	۸	۰	۶	۱۱	۰	۵	۰
قیرزدگی	۵	۰	۲	۲	۱۵	۵	۱
وصله	۳	۰	۰	۰	۱۳	۱۴	۰
عریان‌شدگی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰

جدول ۶. ماتریس درهم‌ریختگی حاصل از استخراج بردار ویژگی تصویر بر پایه ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری

نوع خرابی	ترک پوست سوسماری	آسفالت ت سالم	ترک طولی	ترک عرضی	قیر- زدگی	و صله	عریان- شدگی
ترک پوست سوسماری	۲۷	۰	۳	۰	۰	۰	۰
آسفالت سالم	۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰
ترک طولی	۱	۲	۱۴	۷	۱	۵	۰
ترک عرضی	۲	۰	۸	۱۶	۰	۴	۰
قیرزدگی	۱	۰	۱	۰	۲۴	۲	۲
وصله	۰	۰	۱	۲	۰	۲۷	۰
عریان‌شدگی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰

های درهم‌ریختگی محاسبه می‌گردد. حساسیت و دقت، مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد کلاس-بندی می‌باشند (مقدس‌نژاد و ذاکری، ۲۰۱۱). لازم به ذکر است که در این تحقیق، تشکیل ماتریس‌های درهم‌ریختگی تصاویر به صورت دستی (نه کدنویسی) انجام گرفته است. اما محاسبه شاخص‌های ارزیابی عملکرد کلاس‌بندی بر پایه روابط (۵) تا (۸) توسط مؤلفین در

به منظور ارزیابی عملکرد روش‌های آنالیز بافت به-کارگیری شده، در کلاس‌بندی خودکار تصاویر خرابی، چهار شاخص مختلف شامل میزان تصریح<sup>۱</sup>، حساسیت<sup>۲</sup>، صحت<sup>۳</sup> و دقت<sup>۴</sup> برای هر کدام از ماتریس-

- 1- Specificity
- 2- Sensitivity
- 3- Precision
- 4- Accuracy

نرم افزار متلب کدنویسی شده است.

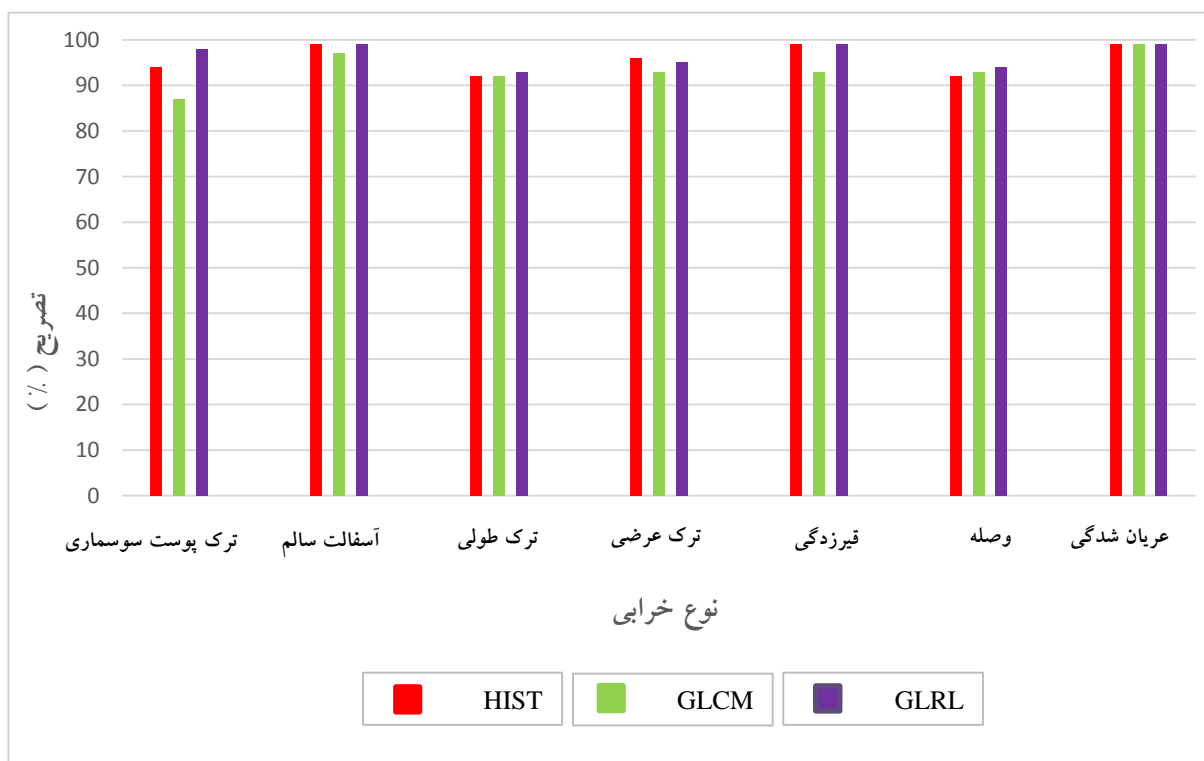
تصریح (Sp) بیانگر قابلیت طبقه در عدم پذیرش تصاویر باقی طبقه ها می باشد و طبق رابطه (۵) تعریف می شود:

$$Sp_g = \frac{\sum_{k=1}^g (n'_k - n_{gk})}{n - n_g} \quad (5)$$

در این رابطه،  $n'_k$  بیانگر تعداد کل تصاویر اختصاص

جدول ۷. تصریح عملکردی الگوریتم های آنالیز بافت، به منظور کلاس بندی تصاویر خرابی روسازی آسفالتی

ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری (GLRL)	ماتریس هم رخداد سطوح خاکستری (GLCM)	هیستوگرام تصویر (HIST)	الگوریتم نوع خرابی
۰/۹۸	۰/۸۷	۰/۹۴	ترک پوست سوسماری
۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۹	آسفالت سالم
۰/۹۳	۰/۹۲	۰/۹۲	ترک طولی
۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۹۶	ترک عرضی
۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۹۹	قیرزدگی
۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۹۲	وصله
۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	عریان شدگی



شکل ۷. مقایسه تصریح عملکردی الگوریتم های آنالیز بافت به منظور کلاس بندی تصاویر خرابی روسازی آسفالتی



کل تصاویر متعلق به طبقه  $g$  می باشد. در جدول ۵ و شکل ۸، میزان حساسیت عملکردی الگوریتم های پیشنهادی، مبتنی بر روش های مختلف استخراج ویژگی بافتی تصویر، ارائه و مقایسه شده است.

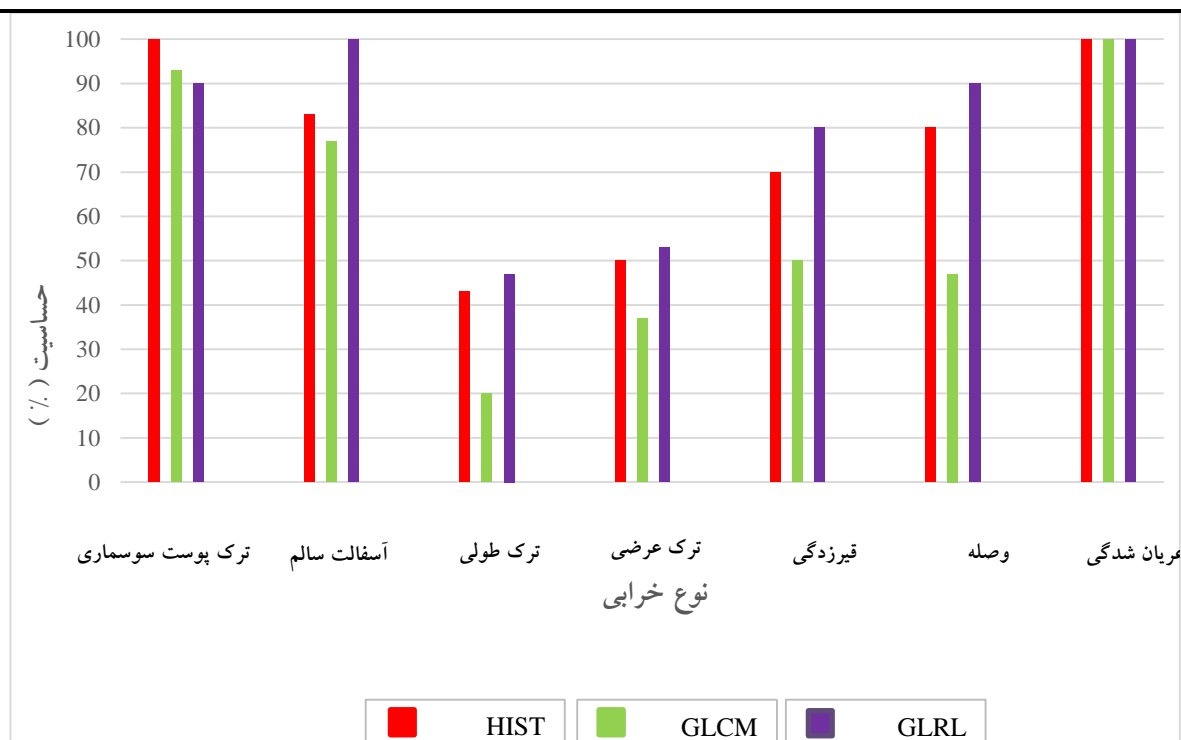
حساسیت ( $S_n$ )، توانایی طبقه در شناسایی صحیح تصاویر هر کلاس را توصیف نموده و طبق رابطه (۶) محاسبه می گردد:

$$S_n = \frac{n_{gg}}{n_g} \quad (6)$$

در این رابطه،  $n_{gg}$  تعداد تصاویر متعلق به طبقه  $g$  که به طور صحیح به همان طبقه اختصاص یافته و  $n_g$  تعداد

جدول ۸. حساسیت عملکردی الگوریتم های آنالیز بافت، به منظور کلاس بندی تصاویر خرابی روسازی آسفالتی

ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری (GLRL)	ماتریس هم رخداد سطوح خاکستری (GLCM)	هیستوگرام تصویر (HIST)	الگوریتم نوع خرابی
۰/۹	۰/۹۳	۱۰۰	ترک پوست سوسماری
۱۰۰	۰/۷۷	۰/۸۳	آسفالت سالم
۰/۴۷	۰/۳	۰/۴۳	ترک طولی
۰/۵۳	۰/۳۷	۰/۵	ترک عرضی
۰/۸	۰/۵	۰/۷	قیرزدگی
۰/۹	۰/۴۷	۰/۸	وصله
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	عریان شدگی



شکل ۸. مقایسه حساسیت عملکردی الگوریتم های آنالیز بافت، به منظور کلاس بندی تصاویر خرابی روسازی آسفالتی

که به طور صحیح به همان طبقه اختصاص یافته و  $n'_g$  تعداد کل تصاویر اختصاص یافته به طبقه  $g$  می باشد. در جدول ۹ و شکل ۹ میزان صحت عملکردی الگوریتم های پیشنهادی، مبتنی بر روش های مختلف استخراج ویژگی بافتی تصویر، ارائه و مقایسه شده است.

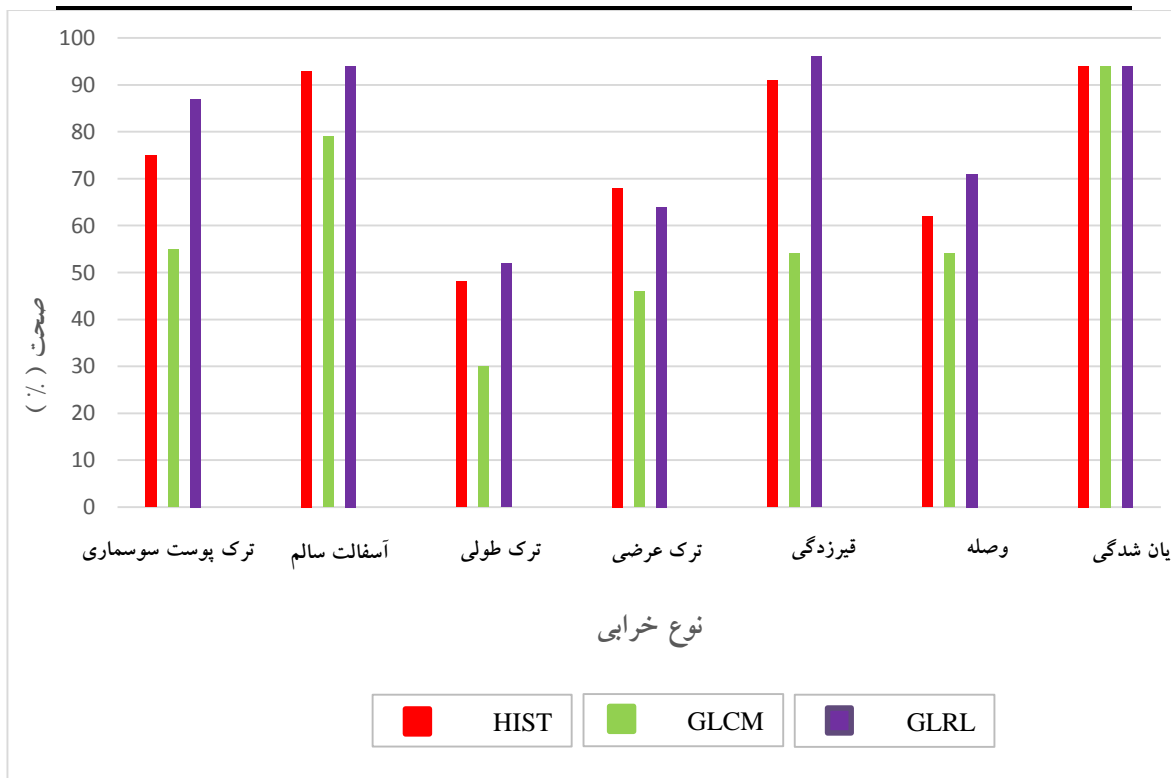
صحت (Pr) نشان دهنده توانایی طبقه در عدم شمول تصاویر باقی کلاس ها بوده و مطابق با رابطه (۷) تعریف می گردد:

$$Pr_g = \frac{n_{gg}}{n'_g} \quad (7)$$

در این رابطه،  $n_{gg}$  تعداد تصاویر متعلق به طبقه  $g$

جدول ۹. صحت عملکردی الگوریتم های آنالیز بافت، به منظور کلاس بندی تصاویر خرابی روسازی آسفالتی

الگوریتم نوع خرابی	هیستوگرام تصویر (HIST)	ماتریس هم رخداد سطوح خاکستری (GLCM)	ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری (GLRL)
ترک پوست سوسماری	۰/۷۵	۰/۵۵	۰/۸۷
آسفالت سالم	۰/۹۳	۰/۷۹	۰/۹۴
ترک طولی	۰/۴۸	۰/۳	۰/۵۲
ترک عرضی	۰/۶۸	۰/۴۶	۰/۶۴
قیرزدگی	۰/۹۱	۰/۵۴	۰/۹۶
وصله	۰/۶۲	۰/۵۴	۰/۷۱
عریان شدگی	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴



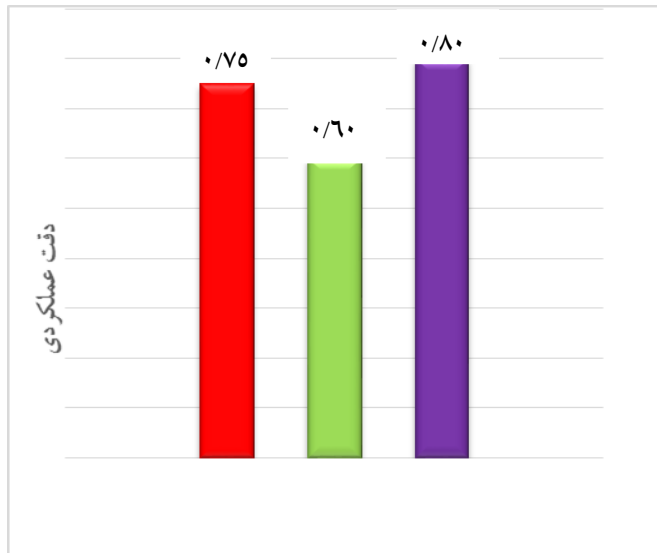
شکل ۹. مقایسه صحت عملکردی الگوریتم های آنالیز بافت، به منظور کلاس بندی تصاویر خرابی روسازی آسفالتی

که به طور صحیح به همان طبقه اختصاص یافته و  $n$  تعداد کل تصاویر موجود می باشد. در شکل ۱۰، میزان دقت عملکردی الگوریتم های پیشنهادی، مبتنی بر روش های مختلف استخراج بردار ویژگی بافتی تصویر، ارائه شده است.

دقت (Ac) بیانگر عملکرد کلی الگوریتم در طبقه بندی خودکار تصاویر بوده و طبق رابطه (۸) از ماتریس درهم ریختگی تصاویر استخراج می گردد:

$$Ac = \frac{\sum_{g=1}^G n_{gg}}{n} \quad (8)$$

در این رابطه،  $n_{gg}$  تعداد تصاویر متعلق به طبقه  $g$



شکل ۱۰. مقایسه دقت عملکردی الگوریتم های آنالیز بافت، به منظور کلاس بندی تصاویر خرابی روسازی آسفالتی

#### ۴-۳. بررسی نتایج و بحث

نتایج پژوهش و اعتبارسنجی نشان می دهد که:

هر یک از روش های توصیف و تفسیر بافت تصویر، خصوصیات منحصر به فردی دارند. انتخاب روش درست آنالیز بافت و در نتیجه افزایش دقت کلاس بندی، وابسته به نوع بافت تشکیل دهنده تصویر می باشد. اگرچه شباهت های زیادی میان بافت تصاویر کلاس های مختلف خرابی روسازی آسفالتی وجود دارد، اما به طور کلی الگوی تشکیل اکثر آنها متفاوت بوده و هیچیک از روش های آنالیز بافت تصویر در حوزه مکان، به تنهایی قادر به شناسایی الگوی تمامی خرابی ها نمی باشد. به طور میانگین، استخراج ویژگی بافت تصاویر خرابی مبتنی بر ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری (GLRL) با دقت کلاس بندی ۸۰٪، در مقایسه با دیگر روش-

های استفاده شده در این تحقیق، عملکرد برتری داشته است. لازم به یادآوری است که حساسیت و دقت عملکردی از مهم ترین شاخص های مستخرج از ماتریس درهم ریختگی جهت ارزیابی عملکرد کلاس بندی و شناسایی الگو می باشند.

اگرچه الگوی کلی ترک های طولی و عرضی مشابه با یکدیگر بوده و تمامی الگوریتم های آنالیز بافت استفاده شده در این پژوهش، حساسیت عملکردی کلاس بندی نسبتاً نزدیکی در شناسایی این خرابی ها حاصل نموده اند، اما این دو نوع خرابی صرفاً چرخش یافته یکدیگر نبوده و بروز اختلاف در حساسیت طبقه بندی این کلاس های خرابی اجتناب ناپذیر است. زیرا میزان بی نظمی های موجود در تصاویر این کلاس های خرابی مشابه یکدیگر نبوده و تمامی الگوریتم های استخراج بردار ویژگی بافتی

نتایج پژوهش و اعتبارسنجی نشان می دهد که:

هر یک از روش های توصیف و تفسیر بافت تصویر، خصوصیات منحصر به فردی دارند. انتخاب روش درست آنالیز بافت و در نتیجه افزایش دقت کلاس بندی، وابسته به نوع بافت تشکیل دهنده تصویر می باشد. اگرچه شباهت های زیادی میان بافت تصاویر کلاس های مختلف خرابی روسازی آسفالتی وجود دارد، اما به طور کلی الگوی تشکیل اکثر آنها متفاوت بوده و هیچیک از روش های آنالیز بافت تصویر در حوزه مکان، به تنهایی قادر به شناسایی الگوی تمامی خرابی ها نمی باشد. به طور میانگین، استخراج ویژگی بافت تصاویر خرابی مبتنی بر ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری (GLRL) با دقت کلاس بندی ۸۰٪، در مقایسه با دیگر روش-

دارد. یادآوری می شود که الگوی تشکیل خرابی ها در سطح روسازی، شدیداً ماهیت تصادفی داشته و ارزیابی و کلاس بندی خودکار آن ها همیشه با درصدی از خطا همراه می باشد.

#### ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق، از الگوریتم هایی مبتنی بر پردازش تصویر و آنالیز بافت به منظور تشخیص و کلاس بندی خودکار خرابی های سطح روسازی آسفالتی استفاده شده است. پس از برداشت تصاویر خرابی در شرایط کنترل شده، از سه روش آنالیز آماری مختلف در حوزه مکان شامل هیستوگرام تصویر، ماتریس هم رخداد و ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری، به منظور توصیف بافت خرابی و استخراج بردار ویژگی تصاویر استفاده شد. در انتها، روش کمینه فاصله ماهالانویس به منظور تفکیک و طبقه بندی تصاویر آزمایشی به کار گرفته شد. نتایج اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد کلاس بندی نشان می دهد که شاخص های آماری مرتبه اول (هیستوگرام تصویر) و مرتبه دوم (ماتریس هم رخداد سطوح خاکستری)، اگر چه در شناسایی ترک های پوست-سوسماری نسبت به ماتریس طول تکرار، حساسیت عملکردی بیشتری داشته، اما به طور میانگین شاخص های آماری مرتبه سوم و بالاتر مبتنی بر ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری، نسبت به دیگر روش ها، دقت عملکردی برتری به دنبال داشته و به منظور شناسایی و تفکیک خودکار خرابی های سطح روسازی آسفالتی پیشنهاد می گردند. الگوریتم پیشنهادی ساده، روان و فاقد بار محاسباتی سنگین بوده و در صورت بهره گیری از آن در سیستم های ارزیابی اتوماتیک خرابی های سطح روسازی، در شناسایی اغلب کلاس های خرابی، کمتر از ۱۰٪ خطا حاصل خواهد شد.

نسبت به این بی نظمی ها شدیداً حساس می باشند. اختلاف حساسیت عملکردی طبقه بندی این کلاس های خرابی بر مبنای تمامی الگوریتم های آنالیز بافت استفاده شده در این تحقیق، کمتر از ۱۰٪ می باشد.

- با افزایش تعداد پیکسل های به کارگیری شده در توصیف و تفسیر بافت تصویر، لزوماً دقت و حساسیت فرایند کلاس بندی بهبود نمی یابد. زیرا سطوح خاکستری تصویر خرابی، لزوماً ارتباط مکانی منظمی با یکدیگر ندارند.
- تصاویر خرابی روسازی، اغلب از تکرار الگوهای مشخصی از سطوح خاکستری تشکیل شده و تنها در نظر گرفتن ارتباط مکانی میان مقادیر دو پیکسل مجاور، منجر به حاصل شدن نتیجه قابل قبولی در کلاس بندی تصاویر خرابی روسازی نمی گردد. برتری نسبی روش ماتریس طول تکرار (GLRL) بر روش ماتریس هم رخداد (GLCM) به همین خاطر است.
- تمامی روش های آنالیز آماری بافت استفاده شده در این پژوهش، در تشخیص و تفکیک خرابی عریان-شدگی خطایی نداشتند. زیرا سطوح خاکستری خرابی عریان شدگی، تشکیل یک بافت کاملاً زبر را داده و الگوی بافت این نوع خرابی کمتر دچار بی نظمی می شود.
- در تشخیص و کلاس بندی ترک های پوست سوسماری، روش هیستوگرام (HIST) و ماتریس هم رخداد سطوح خاکستری تصویر (GLCM) نسبت به روش ماتریس طول تکرار (GLRL) حساسیت عملکردی بیشتری دارد. دلیل این امر می تواند ساختار شطرنجی این نوع خرابی باشد (شکل ۲). در شناسایی الگوی شطرنجی، توصیف نحوه توزیع و ارتباط مکانی میان مقادیر سطوح خاکستری دو پیکسل مجاور، نسبت به آنالیز تکرار مقادیر خاصی از سطوح خاکستری در کنار یکدیگر اهمیت بیشتری

## ۵. مراجع

- Acosta, J. A., Figueroa, J. L. and Mullen, R. L. 1995. "Algorithm for pavement distress classification by video image analysis". *Transport. Res. Record*, 1505: 27-38.
- Aggarawal, N. and Agrawal, R. K. 2012. "First and second order statistics features for classification of magnetic resonance brain images". *J. Signal Info. Process.*, 3: 146-153.
- Anuradha, K. and Sankaranarayanan, K. 2013. "Statistical feature extraction to classify oral cancers". *J. Global Res. Comp. Sci.*, 4(2): 8-12.
- Cheng, H. D., Glazier, C. and Hu, Y. G. 1999. "Novel approach to pavement cracking detection based on fuzzy set theory". *J. Comp. Civ. Eng.*, 13(3): 270-280.
- Chua, K. M. and Xu, L. 1994. "Simple procedure for identifying pavement distresses from video images". *J. Transport. Eng.*, 120(3): 412-431.
- Dettori, L. and Semler, L. 2007. "A comparison of wavelet, ridgelet, and curvelet based texture classification algorithms in computed tomography". *Comp. Biol. Med.*, 37(4): 486-498.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. 2006. "Digital Image Processing". Third Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Jiang, J., Liu, H., Ye, H. and Feng, F. 2015. "Crack enhancement algorithm based on improved EM". *J. Comp. Sci.*, 12(3): 1037-1043.
- Lee, D. 2003. "A Robust Position Invariant Artificial Neural Network for Digital Pavement Crack Analysis". Technical Report, TRB Annual Meeting, Washington, DC, USA.
- Manning, K. and Mohajeri, R. 1991. "An operating system of pavement distress diagnosis by image processing". *Transport. Res. Record*, 1311: 120-130.
- Moghadas Nejad, F. and Zakeri, H. 2011a. "A comparison of multi-resolution methods for detection and isolation of pavement distress". *Expert Syst. Appl.*, 38(3): 2857-2872.
- Moghadas Nejad, F. and Zakeri, H. 2011b. "An expert system based on wavelet transform and radon neural network for pavement distress classification". *Expert Syst. Appl.*, 38(6): 7088-7101.
- Moghadas Nejad, F. and Zakeri, H. 2011c. "An optimum feature extraction method based on Wavelet-Radon Transform and Dynamic Neural Network for pavement distress classification". *Expert Syst. Appl.*, 38(8): 9442-9460.
- Nallamothu, S. and Wang, K. C. P. 1996. "Experimenting with recognition accelerator for pavement distress identification". *Transport. Res. Record*, 1536: 130-135.
- Ouyang, A., Dong, Q., Wang, Y. and Liu, Y. 2014. "The classification of pavement crack image based on beamlet algorithm". 7<sup>th</sup> IFIP WG 5.14 International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture.
- Rosa, P. 2012. "Automatic pavement crack detection and classification system". *Transport. Res. Board*, 11: 57-65.
- Salman, M., Mathavan, S., Kamal, K. and Rahman, M. 2013. "Pavement crack detection using the Gabor filter". *Proc. 16<sup>th</sup> International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems: Intelligent Transportation Systems for All Modes*, The Hague, Netherlands, pp. 2039-2044.
- Singh, R. 2016. "A comparison of gray-level run length matrix and gray-level co-occurrence matrix towards cereal grain classification". *Int. J. Comp. Eng. Technol. (IJCET)*, 7(6): 9-17.
- Srinivasan, G. N. and Shobha, G. 2008. "Statistical texture analysis". *Proc. World Acad. Sci., Eng. Technol.*, 36: 207-213.
- Tang, X. 1998. "Texture information in run-length matrices". *IEEE Trans. Image Process.*, 7(11): 1602-1609.
- Wang, K. C. P. 2009. "Wavelet-based pavement distress image edge detection with Troun algorithm". *Transport. Res. Record*, 2024: 73-81.
- Wang, K. C. P., Li, Q. J., Yang, G., Zhan, Y. and Qiu, Y. 2015. "Network level pavement evaluation with 1 mm 3D survey system". *J. Traffic Transport. Eng.*, 2(6): 391-398.
- Wang, W., Watkins, H. and Kuchikulla, K. 2002. "Digital distress survey of airport pavement surface". *Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference*, Washington, DC.
- Zakeri, H., Moghadas Nejad, F. and Fahimifar, A. 2017. "Image based techniques for crack detection, classification and quantification in asphalt pavement: A review". *Arch. Comp. Meth. Eng.*, 24(4): 935-977.
- Zayed, N. and Elnemr, H. 2015. "Statistical analysis of Haralick texture features to discriminate lung abnormalities". *Int. J. Biomed. Imag.*, 2015: 1-7.
- Zhou, J., Huang, P. S. and Chiang, F. 2006. "Wavelet-based pavement distress detection and evaluation". *Opt. Eng.*, 45(2): 2006-2011.
- Zou, Q., Cao, Y., Li, Q., Mao, Q. and Wang, S. 2008. "CrackTree: Automatic crack detection from pavement images". *Pattern Recog. Lett.*, 33(3): 227-238.

