

توصیف آماری مرتبه دوم بافت خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی بر پایه الگوی باینری محلی تصویر

رضا شهبان مقدم^۱، سید علی صحاف^{۲*}، ابوالفضل محمدزاده مقدم^۲، حمیدرضا پوررضا^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استاد، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه فردوسی مشهد

asahaf@um.ac.ir

خلاصه

ارزیابی عملکرد روسازی یکی از مهم‌ترین عناصر سیستم‌های مدیریت روسازی جهت تعیین راهکار بهینه عملیات ترمیم و نگهداری راه محسوب می‌شود. شناسایی خرابی‌های سطحی راه جزو مراحل اصلی فرایند ارزیابی روسازی می‌باشد. در دو دهه اخیر، تحقیقات گسترده‌ای پیرامون توسعه روش‌های خودکار، جهت شناسایی خرابی‌های روسازی انجام گرفته که اغلب بر پایه فنون پردازش تصویر می‌باشند. یکی از مهم‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده سیستم‌های 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 استخراج ویژگی و آنالیز آماری بافت آن‌ها، از ترکیبی از الگوی باینری محلی تصویر و شاخص‌های آماری مرتبه دوم بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری استفاده شده است. نتایج حاصل از کلاس‌بندی تصاویر خرابی بر اساس روش کمینه فاصله ماکسیمی، حاکی از آن است که آمارگان مرتبه دوم مستخرج از الگوی باینری محلی تصویر، با دقت طبقه‌بندی ۹۰ درصد، عملکرد بسیار خوبی در تشخیص و کلاس‌بندی خرابی‌های روسازی داشته است.

کلمات کلیدی: خرابی‌های روسازی، بافت تصویر، الگوی باینری محلی، ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری.

۱. مقدمه

ارزیابی عملکرد روسازی نقش بسیار مهمی در مدیریت روسازی ایفا می‌کند و بر انتخاب گزینه صحیح عملیات راهداری تأثیرگذار می‌باشد. بسته به نوع سیستم مدیریت روسازی پیاده‌سازی شده، ارزیابی روسازی شامل بررسی و اندازه‌گیری فاکتورهای مختلفی از راه از جمله خرابی‌های سطحی، میزان ناهمواری، اصطکاک و غیره می‌باشد. شناسایی و پیمایش خرابی‌های سطحی راه یکی از فاکتورهای اصلی در عملیات ارزیابی روسازی در سطح شبکه و هم‌چنین در سطح پروژه قلمداد می‌شود [۱]. ساده‌ترین روش ارزیابی خرابی‌های روسازی، بازرسی چشمی کارشناسان راه از وضعیت ظاهری راه می‌باشد. این رویکرد ارزیابی روسازی، علاوه بر آنکه هزینه و زمان عملیات بازرسی را افزایش می‌دهد، وابسته به قضاوت شخصی ارزیابان بوده و نتایجی تکرارناپذیر به دنبال خواهد داشت [۲]. در دهه اخیر، به منظور رفع نقائص و مشکلات مربوط به ارزیابی دستی و چشمی خرابی‌های روسازی، تحقیقات گسترده‌ای به منظور توسعه روش‌های نیمه‌خودکار و تمام‌خودکار بازرسی وضعیت روسازی انجام گرفته است. در ارزیابی تمام‌خودکار روسازی، تمامی مراحل برداشت و پردازش داده‌های خرابی به صورت اتوماتیک و بدون دخالت انسان انجام می‌گیرد. ارزیابی اتوماتیک روسازی معمولاً توسط اتومیل‌های (ون) مجهز به سنسور (هم‌چون لیزر)، دوربین دیجیتال و پردازشگر انجام می‌پذیرد. از داده‌های حاصل از لیزر بیشتر به منظور بررسی و تحلیل عمق شیار، بافت درشت و میزان ناهمواری سطح روسازی استفاده شده، در صورتی که داده‌های (تصاویر) حاصل از دوربین‌ها، اغلب در جهت بازرسی وضعیت سطحی و خرابی‌های روسازی به کار برده می‌شوند.

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

^۲ استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

^۳ استاد، گروه کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

لذا در این تحقیق به منظور برداشت تصاویر خرابی، از تصویربرداری دوبعدی توسط دوربین دیجیتال استفاده شده است. به طور خلاصه، اکثر سامانه‌های برداشت اتوماتیک خرابی‌های روسازی مشکلی در تهیه اطلاعات نداشته و مهم‌ترین نقص و محدودیت آن‌ها در پردازش اتوماتیک و ارزیابی اطلاعات خرابی نهفته است. در این تحقیق نیز تمرکز اصلی بر فاز آنالیز تصاویر و الگوریتم‌های شناسایی الگوی انواع خرابی‌های روسازی آسفالتی می‌باشد. اغلب این الگوریتم‌ها بر پایه بینایی ماشین و فون پردازش تصویر می‌باشند. اگر چه استانداردها و پروتکل‌هایی متناسب با شرایط و کارایی روش‌های خودکار برداشت و آنالیز خرابی‌ها تدوین شده، اما به دلیل بی‌نظمی و بی‌قاعدگی شدید خرابی‌های ایجاد شده در سطح روسازی، موفقیت محدودی در شناسایی و طبقه‌بندی خرابی‌های مختلف حاصل گشته است. علاوه بر این، اغلب رویکردهای ارزیابی اتوماتیک به دلیل به کارگیری الگوریتم‌های پیچیده، بار محاسباتی طولانی و سنگینی دارند [۳]. با توجه به محدودیت‌های ذکر شده، به کارگیری روشی با دقت و کارایی برتر جهت شناسایی و پردازش خرابی‌ها ضروری می‌باشد.

مانینگ و مهاجری در سال ۱۹۹۱ بر مبنای روشی قاعده‌مند و با تلفیق دانش پیرامون الگوهای منحصر به فرد ترک‌ها، به توصیف و طبقه‌بندی انواع ترک‌ها پرداختند [۴]. روش مذکور اگر چه قادر به اندازه‌گیری وسعت و شدت خرابی‌ها بوده، اما الگوهای بسیار محدودی از ترک‌ها را شامل می‌شود. چوآ و شو در سال ۱۹۹۴ به منظور تشخیص و طبقه‌بندی خودکار ترک‌های روسازی، به ترتیب از ویژگی ثوابت مُمانی^۱ و شبکه‌های عصبی بهره جستند [۵]. در این تحقیق، از تصاویر سطوح خاکستری^۲ 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 در سال ۱۹۹۵ میلادی به منظور توصیف تصاویر خرابی، از ویژگی‌های بافتی برای تشخیص نوع ترک و از ویژگی‌های هندسی به منظور اندازه‌گیری شدت آن استفاده نمودند [۶]. نالاموتها و وانگ در سال ۱۹۹۶ پس از تقطیع ناحیه ترک‌خوردگی توسط ویژگی‌های هندسی در حوزه مکان، نوعی شبکه عصبی مصنوعی را به منظور شناسایی الگوی ترک‌خوردگی‌های مختلف به کار گرفتند [۷]. چنگ و همکاران (۱۹۹۹) از تبدیل هاف^۳ به منظور تجزیه تصویر و تشخیص نوع ترک استفاده کردند [۸]. 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 [۹]. لی (۲۰۰۳) از روش‌های ارتقای تصویر هم‌چون بهبود هیستوگرام تصویر و تبدیل فوری به منظور پیش‌پردازش تصاویر ورودی به سیستم شبکه عصبی استفاده نمود و حدود ۶٪ دقت شناسایی خرابی‌ها را افزایش داد [۱۰]. در سال ۲۰۰۶، چندین ضابطه آماری نظیر درصد ضرایب دامنه باند موجک، درصد انرژی فرکانس بالا و انحراف استاندارد به منظور تفکیک و شناسایی انواع خرابی‌های روسازی پیشنهاد شد [۱۱]. 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 [۱۲]. وانگ (۲۰۰۹) با استفاده از شناسایی لبه بر اساس تبدیل موجک^۴ توسط الگوریتم تروس^۵ اقدام به تقطیع و طبقه‌بندی انواع خرابی‌های روسازی کرد [۱۳]. مقدس‌نژاد و ذاکری (۲۰۱۱) 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 ترک‌خوردگی استفاده نموده و کمتر از ۵٪ خطا در طبقه‌بندی تصاویر خرابی گزارش دادند [۱۴]. روسا (۲۰۱۲) از توصیف‌کننده‌های آماری بافت تصویر^۶ به منظور تقطیع و شناسایی ناحیه خرابی و با اتصال ترک‌های منفصل و استخراج ویژگی‌های هندسی به طبقه‌بندی انواع ترک‌خوردگی روسازی آسفالتی پرداخت [۱۵]. سلمان و همکاران (۲۰۱۳) از فیلتر دوبعدی گابور^۷ و استخراج ویژگی‌های مُمانی تصویر خرابی بهره جستند [۱۶]. اویانگ و همکاران (۲۰۱۴) از تبدیل گسسته یملت^۸ و استخراج ویژگی‌های بافت تصویر در حوزه تبدیل به منظور طبقه‌بندی خرابی‌ها استفاده نمودند [۱۷]. جیانگ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از الگوریتم حداکثر انتظار (EM) و به کارگیری ویژگی‌های هندسی، سعی در توسعه روش‌های تشخیص و طبقه‌بندی اتوماتیک خرابی‌های روسازی نمودند [۱۸]. در سال ۲۰۱۶ در مقاله‌ای توسط ذاکری و همکاران کلیه روش‌های برداشت و پردازش نیمه اتوماتیک و تمام اتوماتیک خرابی‌های روسازی آسفالتی گردآوری و بررسی شده است [۲].

تکنیک‌های پردازش تصویر و بینایی ماشین از عناصر مختلفی در فرایند تفسیر تصاویر بهره می‌گیرند. از اجزای تشکیل دهنده سیستم بینایی ماشین می‌توان به برداشت داده، پردازش تصویر، بهبود و ارتقا تصویر، تقطیع، استخراج ویژگی و شناسایی الگو اشاره نمود. استخراج ویژگی در حقیقت

- 1- Moment invariants
- 2- Gray level
- 3- Hough
- 4- Wavelet transform
- 5- Trous
- 6- Image texture
- 7- 2D Gabor Filter
- 8- Discrete beamlet transform

تبدیل داده‌های ورودی به یک سری جزئیات مفید بوده و یکی از مهم‌ترین اجزای تشکیل دهنده سیستم‌های بینایی ماشین در فرایند کلاس‌بندی و شناسایی الگوی تصویر محسوب می‌شود. ویژگی‌های مستخرج از تصویر هم‌چون رنگ، بافت، ثوابت ممانی و ویژگی‌های هندسی (شکل) اغلب در قالب برداری عددی (کمیت) بوده و بردار ویژگی نماینده تصویر تلقی می‌شوند. ویژگی‌های بافتی در مقایسه با دیگر ویژگی‌ها، اطلاعات بیشتر و دقیق‌تری از ویژگی‌ها و خصوصیات نواحی موجود در تصویر ارائه نموده و در بسیاری از کاربردها از جمله آنالیز تصاویر پزشکی، دسته‌بندی تصاویر راداری، تشخیص چهره، اثر انگشت و مخصوصاً شناسایی و تفکیک الگوی انواع خرابی، عملکرد برتری به دنبال دارند [۱۹].

بافت تصویر عبارت است از تکرار یک المان (تکسل^۱) با الگویی خاص که این المان خود از تغییرات محلی مقادیر سطوح خاکستری پیکسل‌های تصویر تشکیل یافته است. از انواع بافت می‌توان به بافت خشن، ظریف، هموار، موج، خطی و غیره اشاره نمود. روش‌های توصیف بافت شامل رویکردهای ساختاری و آماری می‌باشد. الگوی باینری محلی (LBP) ترکیبی از روش‌های ساختاری و آماری آنالیز بافت بوده و توصیفی از نحوه تشکیل ساختارهای محلی (ریزبافت) تصویر و نحوه توزیع آماری آن‌ها می‌باشد [۲۰]. اگرچه هیستوگرام، اطلاعات مفیدی از فراوانی الگوهای محلی تصویر ارائه نموده اما هیچ اطلاعاتی پیرامون ارتباط و تعامل مکانی میان ساختارهای بافتی تصویر ارائه نمی‌کند. ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری برخلاف هیستوگرام، با در نظر گرفتن ارتباط و موقعیت مکانی میان دو پیکسل محاسبه و استخراج شده و نسبت به جابجایی پیکسل‌های تصویر حساس می‌باشند [۲۱]. مقادیر سطوح خاکستری و ریزبافت‌های تشکیل دهنده بافت اکثر خرابی‌های سطح روسازی، ارتباط مکانی مشخصی با یکدیگر داشته لذا در این تحقیق به منظور آنالیز بافت تصاویر خرابی و تحلیل نحوه توزیع المان‌های بافتی، از آمارگان مرتبه دوم بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری استفاده شده است.

تصاویر برداشت شده از سطح روسازی در هفت گروه مختلف طبقه‌بندی شده است. در این مطالعه، ابتدا الگوی باینری محلی تصاویر خرابی تشکیل شده و سپس از ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری به منظور توصیف آماری نحوه توزیع ساختار و الگوهای محلی بافت تصاویر استفاده گردید. آماره‌های مستخرج از ماتریس هم‌رخداد، بردار ویژگی تصویر را تشکیل می‌دهد. در نهایت طبقه‌بندی تصاویر خرابی بر اساس روش کمینه فاصله ماهالانوبیس^۲ صورت گرفته است. لازم به ذکر است که کلیه محاسبات و تحلیل داده‌های خرابی در این مقاله، توسط 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 موجه که کارگیری شده است زیرا این تبدیل علاوه بر حفظ اطلاعات فرکانسی و مکانی تصویر (برخلاف تبدیل فوری) قادر است مؤلفه‌های سیگنال تصویری را به صورت چنددقیقه آنالیز نماید. اگرچه اکثر روش‌های آنالیز بافت چنددقیقه^۳ هم‌چون تبدیل موجه بر مبنای فیلترها و تبدیل کرولت^۴، به دلیل تجزیه تصاویر و جداسازی باندهای فرکانسی (زیرباندها) و توصیف (آشکارسازی) جزئیات ساختاری بافت خرابی در جهات مجزا، نسبت به 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 بافتی تصویر در حوزه مکان بر پایه ماتریس هم‌رخداد الگوی باینری محلی، علاوه بر آن که در شناسایی بسیاری از تصاویر خرابی حساسیت عملکردی بالایی داشته، نسبت به بسیاری از روش‌های آنالیز بافت چنددقیقه هم‌چون تبدیل بیملت و تبدیل وولت دابچیز میانگین دقت عملکردی بالاتری نیز دارا می‌باشد. [۲۲]. لازم به ذکر است که آنالیز آماری بافت تصویر خرابی توسط الگوریتم پیشنهادی، نسبت به تحلیل‌های چنددقیقه، 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 و آنالیز خرابی می‌باشد. همچنین در الگوریتم‌های پیشین تمرکز اصلی بیشتر بر شناسایی و طبقه‌بندی خودکار ترک‌های روسازی بوده است [۲]. 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 از تحقیق، مفاهیم پایه پیرامون الگوی باینری محلی و ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری ارائه شده است.

1- Texel

2- Mahalanobis distance

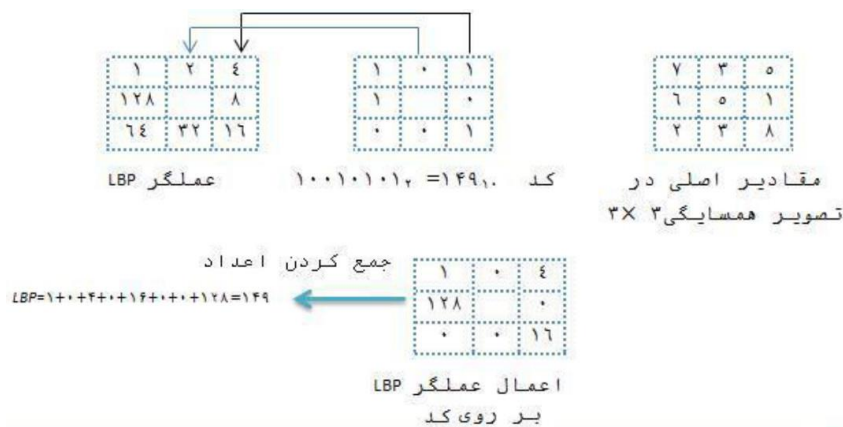
3- Multiresolution texture analysis

4- Curvelet transform

۲-۱- الگوی باینری محلی (LBP)

در سال‌های اخیر، کاربرد الگوی باینری محلی در زمینه پردازش بافت تصویر و دید کامپیوتری افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است. بصورت خلاصه، الگوی باینری محلی به عنوان یک روش غیر پارامتری، ساختارهای محلی تصاویر را بطور کارآمد با مقایسه هر کدام از پیکسل‌ها با پیکسل‌های مجاور ارائه می‌نماید. از مهم‌ترین ویژگی‌های آن، مقاومت به تغییرات مقادیر سطوح خاکستری و سادگی محاسباتی آن می‌باشد. الگوی باینری محلی به عنوان رویکردی قدرتمند برای آنالیز بافت و توصیف ساختارهای محلی تصاویر شناخته می‌شود [۲۰].

عملگر الگوی باینری محلی ابتدا یک همسایگی از تصویر را در نظر گرفته و شدت روشنایی (سطح خاکستری) نقاط موجود در این همسایگی را با شدت روشنایی نقطه موجود در مرکز همسایگی مقایسه می‌کند. در این تحقیق، همسایگی به صورت مربعی در نظر گرفته شده است. این روش اولین بار توسط اوجلا و همکارانش به صورت یک عملگر مربعی ۳ در ۳ مطرح گردید. طرز کار این روش بدین صورت می‌باشد که ۸ همسایگی روی عملگر، با پیکسل مرکزی مقایسه می‌شود. هر یک از این ۸ پیکسل اگر مقدارش از مقدار پیکسل مرکزی بزرگتر یا مساوی باشد با ۱ جایگزین می‌شود. در غیر اینصورت مقدار آن برابر با ۰ منظور خواهد شد. در پایان، مقدار پیکسل مرکزی با جمع کردن وزن‌دار باینری پیکسل‌های همسایه جایگزین شده و پنجره ۳ در ۳ به پیکسل بعدی منتقل می‌شود. در شکل ۱ عملکرد عملگر الگوی باینری محلی نمایش داده شده است. با تشکیل ماتریس هم‌رخداد مقادیر حاصل شده و استخراج آمارگان مرتبه دوم، می‌توان به طور موثری بافت تصویر را تحلیل نمود.



شکل ۱. عملگر الگوی باینری محلی به منظور توصیف بافت تصویر [۲۰].

۲-۲- آماره‌های مرتبه دوم

شاخص‌های آماری مرتبه دوم، ارتباط میان مقادیر سطوح خاکستری دو پیکسل را در فاصله و جهتی مشخص از یکدیگر در نظر می‌گیرند. آماره‌های مرتبه دوم اغلب بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری استخراج می‌شوند. این ماتریس در شرح طیف وسیعی از بافت‌ها عملکرد مناسبی داشته و برخلاف آمارگان مرتبه اول، حاوی اطلاعات مکانی مقادیر پیکسل‌های تصویر می‌باشد. [۲۳]. ماتریس هم‌رخداد، ماتریسی مربعی و نامتقارن بوده که نشان‌دهنده تعداد تکرار جفت پیکسل‌هایی از تصویر با سطوح خاکستری i و j می‌باشد که در آن مقدار سطح خاکستری اولین پیکسل برابر i بوده و j در فاصله معین d و در جهتی مشخص (θ) از i قرار دارد $P(i, j)$. در انتها، این مقادیر بر مجموع کل مقادیر ماتریس نرمالیزه شده و درایه‌های ماتریس هم‌رخداد p_{ij} را مطابق با رابطه (۱) تشکیل می‌دهند.

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

که N در این رابطه، ابعاد ماتریس هم‌رخداد می‌باشد. ابعاد ماتریس هم‌رخداد برابر با بیشینه مقدار سطح خاکستری موجود (ممکن) در تصویر می‌باشد.

ماتریس هم‌رخداد نرمالیزه شده را می‌توان به عنوان یک تابع چگالی احتمال در نظر گرفته و با محاسبه شاخص‌های آماری مختلف همچون تضاد (کنتراست)^۱، همبستگی^۲، همسانی (انرژی)، همگنی^۳، حداکثر احتمال^۴ و آنتروپی از این ماتریس، ویژگی‌های بافتی تصویر را آنالیز نمود.

۳. روند انجام پژوهش و صحت‌سنجی الگوریتم پیشنهادی

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

۳-۱- برداشت تصاویر خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی

به منظور برداشت تصاویر خرابی در کیفیت بالا و شرایط نور کنترل شده، سخت‌افزاری مطابق شکل ۲ مورد استفاده قرار گرفت. این سخت‌افزار با حذف کامل نور محیط توسط برزنت و تأمین یک روشنایی مصنوعی 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 مربعی شکل و هم وصله‌های مستطیل شکل 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.



شکل ۲. سخت‌افزار برداشت تصاویر خرابی سطح روسازی آسفالتی در شرایط کنترل شده.

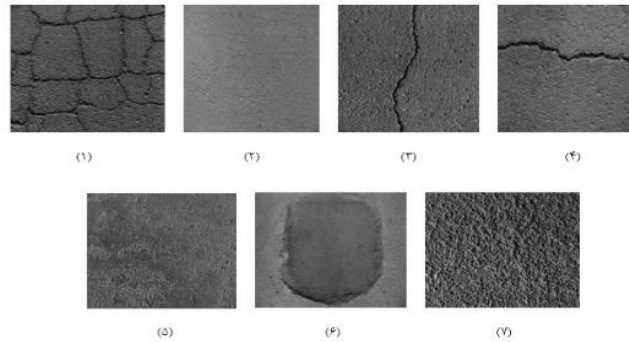
تصاویر برداشت شده از روسازی در ۷ گروه شامل: (۱) ترک پوست‌سوسماری، (۲) آسفالت سالم (بدون خرابی)، (۳) ترک طولی، (۴) ترک عرضی، (۵) قیرزدگی، (۶) وصله و (۷) عریان‌شدگی مطابق شکل ۳ طبقه‌بندی گردید. از هر گروه، تعداد ۶۰ عدد تصویر برداشت گردید که ۳۰ عدد از آنها به طور تصادفی به منظور آموزش الگوریتم و ۳۰ عدد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

1- Contrast

2- Correlation

3- Homogeneity

4- Maximum probability



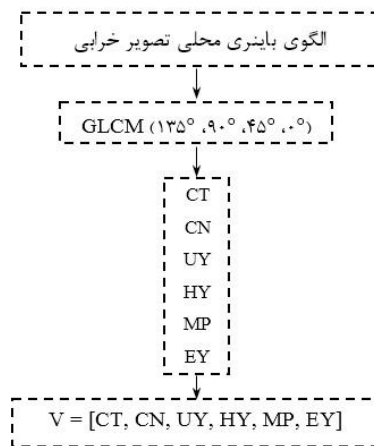
شکل ۳. طبقه بندی تصاویر خرابی برداشت شده از سطح روسازی (۱. ترک پوست سوسماری ۲. آسفالت سالم ۳. ترک طولی ۴. ترک عرضی ۵. قیرزدگی ۶. وصله ۷. عریان شدگی)

۳-۲- آنالیز آماری بافت تصاویر خرابی بر پایه ماتریس هم‌رخداد الگوی باینری محلی

پس از برداشت تصاویر انواع خرابی روسازی آسفالتی، تمامی تصاویر از حالت رنگی به تک‌رنگ با مقادیر سطوح خاکستری (محدوده پویا) بین صفر تا ۲۵۵ (۸ بیت) تبدیل شدند. سپس، الگوی باینری محلی تصاویر خرابی تشکیل شد. در انتها به منظور توصیف بافت و بررسی نحوه توزیع و ارتباط مکانی میان الگوهای محلی تصویر، از آمارگان مرتبه دوم بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری استفاده گردید.

در این تحقیق، ابعاد ماتریس هم‌رخداد (GLCM) برابر با ۲۵۶ انتخاب شده، پارامتر فاصله برابر با یک و با توجه به توزیع مکانی گوناگون سطوح خاکستری و تابع ساختارهای محلی بافتی در الگوهای خرابی مختلف، ۴ زاویه مجزا (۰°، ۴۵°، ۹۰° و ۱۳۵°) به عنوان پارامترهای جهت به منظور تشکیل ماتریس هم‌رخداد انتخاب گردید.

با انتخاب هر یک از مقادیر پارامتر فاصله، پس از نرمالیزه نمودن مقادیر ماتریس هم‌رخداد محاسبه شده، شاخص‌های آماری مرتبه دوم شامل تضاد، همبستگی، انرژی یا همسانی، همگنی، حداکثر احتمال و آنتروپی به طور مجزا در هر چهار جهت مذکور 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 ۴ به ترتیب درایه‌های بردار ویژگی تصویر (V) را تشکیل می‌دهند. این بردار نماینده بافت تصویر اصلی در فرآیند طبقه‌بندی تصاویر خرابی قلمداد می‌شود. هر یک از این شاخص‌ها، ویژگی خاصی از تصویر را توصیف می‌نمایند [۲۳]. روابط و شرح این آماره‌ها در مرجع ارائه شده است.



شکل ۴. الگوریتم استخراج بردار ویژگی بافتی مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد الگوی باینری محلی تصویر.

۳-۳- کلاس بندی تصاویر خرابی

کلاس بندی به فرایند نگاشت یک تصویر ناشناخته به مجموعه‌ای از گروه‌های از پیش تعریف شده اطلاق می‌گردد. در این تحقیق، از روش کمیته فاصله به منظور کلاس بندی تصاویر خرابی استفاده گردیده است. بدین منظور، فاصله ماهالانویس (D) طبق رابطه (۲) بکارگیری شده است.

$$D^2 = (x - m_c) C_c^{-1} (x - m_c)^T \quad (2)$$

در این رابطه، x بردار ویژگی تصویر آزمایشی، m_c میانگین حسابی درایه‌های نظیر به نظیر بردار ویژگی تصاویر آموزشی کلاس خرابی c (بردار میانگین کلاس آموزشی c) و C_c ماتریس کواریانس مجموعه ویژگی‌های تصاویر آموزشی کلاس c می‌باشد. برتری استفاده از فاصله ماهالانویس نسبت به فاصله اقلیدسی، در نظر گرفتن ارتباط و همبستگی میان درایه‌های بردار ویژگی از طریق محاسبه کواریانس ویژگی‌ها بوده که منجر به هم‌سنگ شدن محاسبه فاصله نهایی و افزایش دقت و صحت کلاس بندی می‌شود [۲۳].

در این روش، پس از استخراج ۳۰ بردار ویژگی از ۳۰ تصویر آموزشی، در هر کدام از ۷ کلاس تصاویر طبقه بندی شده، میانگین درایه‌های نظیر به نظیر آن‌ها به عنوان بردار نماینده هر طبقه از خرابی‌ها محاسبه می‌شود. بدین ترتیب ۷ بردار نماینده و ۷ ماتریس کواریانس (مربوط به مجموعه تصاویر آموزشی هر کلاس خرابی) حاصل می‌شود. با محاسبه فاصله ماهالانویس بردار ویژگی هر یک از تصاویر آزمایشی از بردار نماینده هر طبقه، بر اساس کمیته فاصله ماهالانویس، هر تصویر آزمایشی به یکی از ۷ کلاس خرابی موجود اختصاص می‌یابد.

ماتریس درهم‌ریختگی نشان‌دهنده نحوه تخصیص تصاویر آزمایشی به کلاس‌های مختلف خرابی می‌باشد. در حقیقت، درایه‌های قطری این ماتریس، نشان‌دهنده اختصاص صحیح تصاویر خرابی به گروه مربوطه می‌باشد [۲۴]. به منظور ارزیابی عملکرد رویکرد آنالیز بافت به کارگیری شده در این تحقیق، در شناسایی و کلاس بندی خودکار تصاویر خرابی آسفالت، دو شاخص مختلف شامل میزان حساسیت و دقت^۲ از ماتریس درهم‌ریختگی محاسبه گشته است. حساسیت و دقت، مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد کلاس بندی (شناسایی الگو) می‌باشند [۲۴]. لازم به ذکر است که در این تحقیق، تشکیل ماتریس درهم‌ریختگی تصاویر به صورت دستی (نه کدنویسی) انجام گرفته است. اما محاسبه شاخص‌های ارزیابی عملکرد کلاس بندی بر پایه روابط ۳ و ۴ توسط مؤلفین در نرم‌افزار متلب کدنویسی شده است.

حساسیت (Sn)، توانایی طبقه در شناسایی صحیح تصاویر هر کلاس را توصیف نموده و طبق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$Sn_g = \frac{n_{gg}}{n_g} \quad (3)$$

در این رابطه n_{gg} برابر با تعداد تصاویر آزمایشی متعلق به طبقه g بوده که به طور صحیح به همان طبقه اختصاص یافته (اعضای قطری ماتریس درهم‌ریختگی) و n_g بیانگر تعداد کل تصاویر متعلق به طبقه g (مجموع هر یک از درایه‌های سطری) می‌باشد. لازم به یادآوری است که در این تحقیق، پارامتر n_g برابر ۳۰ می‌باشد. در جدول ۱ میزان حساسیت عملکردی کلاس بندی الگوریتم استخراج ویژگی پیشنهادی، مبتنی بر آمارگان مرتبه دوم الگوی باینری محلی تصویر خرابی، ارائه شده است.

جدول ۱. حساسیت عملکردی کلاس بندی خرابی‌های روسازی آسفالتی مبتنی بر الگوریتم آنالیز بافت پیشنهادی.

نوع خرابی	الگوریتم
ترک پوست سوسماری	۰/۸۰
آسفالت سالم	۱
ترک طولی	۰/۸۳
ترک عرضی	۰/۸۷
قیرزدگی	۰/۸۳
وصله	۰/۹۷
عریان شدگی	۱

¹- Sensitivity

²- Accuracy

دقت (AC) بیانگر عملکرد کلی الگوریتم در طبقه‌بندی خودکار تصاویر بوده و طبق رابطه (۴) از ماتریس درهم‌ریختگی تصاویر استخراج می‌گردد. به عبارت دیگر، دقت برابر با میانگین حساسیت عملکردی کلاس‌بندی تمامی گروه‌های خرابی می‌باشد.

$$Ac = \frac{\sum_{g=1}^G n_{gg}}{n} \quad (4)$$

در این رابطه، n_{gg} بیانگر تعداد تصاویر متعلق به طبقه g بوده که به طور صحیح به همان طبقه اختصاص یافته (اعضای قطری ماتریس درهم‌ریختگی)، G برابر با تعداد طبقات و پارامتر n برابر با تعداد کل تصاویر موجود (مجموع کل درایه‌های ماتریس درهم‌ریختگی) می‌باشد. لازم به یادآوری بوده که در این تحقیق، پارامتر G برابر ۷ و پارامتر n برابر با ۲۱۰ می‌باشد. با توجه به جدول ۱، دقت عملکردی (میانگین حساسیت عملکردی) کلاس‌بندی تصاویر خرابی مبتنی بر الگوریتم آنالیز بافت پیشنهادی، برابر با ۹۰ درصد می‌باشد. به عبارت دیگر با استفاده از این الگوریتم، از مجموع ۲۱۰ تصویر خرابی موجود، ۱۹۰ تصویر به طور صحیح شناسایی و کلاس‌بندی شده است، که نشان از عملکرد بسیار مناسب روش پیشنهادی در تجزیه و تحلیل بافت خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی می‌باشد.

۳-۴- بحث و بررسی نتایج

۱- در دیدگاه میکرو، خرابی‌های ایجاد شده در سطح روسازی آسفالتی بسیار بی‌قاعده بوده و سطوح خاکستری تشکیل دهنده بافت تصاویر آن‌ها دارای ماهیت تصادفی می‌باشند، زیرا نحوه تشکیل و گسترش خرابی‌ها در سطح آسفالت بسته به میزان بارگذاری (حجم آمد و شد) و شرایط آب و هوایی تغییر می‌نماید. در یک کلاس از خرابی‌ها، اگرچه الگوی کلی بافتی مشابه بوده اما تغییرات و مقادیر سطوح خاکستری تشکیل دهنده بافت خرابی‌ها متغیر و بی‌نظم می‌باشد. از آنجایی که الگوی باینری محلی نسبت به تغییرات مقادیر شدت روشنایی (سطوح خاکستری) پیکسل‌های تصویر مقاوم (ثابت) بوده و بر پایه مقایسه کلی (بزرگتر یا کوچک‌تر) مقادیر پیکسل‌های همسایه محاسبه و استخراج می‌شود، سبب منظم‌سازی الگوهای محلی تصویر می‌گردد. مقادیر سطوح خاکستری و تابع الگوهای محلی بافتی تصاویر خرابی، ارتباط مکانی مشخصی در جهات معینی با یکدیگر دارا می‌باشند. لذا استخراج آمارگان مرتبه دوم بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری الگوهای باینری محلی، با دقت طبقه‌بندی ۹۰ درصد، عملکرد بسیار مناسبی در شناسایی و کلاس‌بندی انواع خرابی‌های سطح روسازی داشته است.

۲- اگرچه الگوی کلی ترک‌های طولی و عرضی مشابه با یکدیگر بوده و الگوریتم آنالیز بافت استفاده شده در این پژوهش، نرخ‌های حساسیت عملکردی کلاس‌بندی نزدیکی در شناسایی این خرابی‌ها حاصل نموده است، اما این دو نوع خرابی صرفاً چرخش یافته یکدیگر نبوده و بروز اختلاف در حساسیت طبقه‌بندی این کلاس‌های خرابی اجتناب‌ناپذیر است. زیرا میزان بی‌نظمی‌های موجود در تصاویر این کلاس‌های خرابی مشابه با یکدیگر نبوده و الگوریتم استخراج بردار ویژگی بافتی پیشنهادی نسبت به این بی‌نظمی‌ها حساس می‌باشد. اختلاف حساسیت عملکردی طبقه‌بندی این کلاس‌های خرابی بر مبنای رویکرد آنالیز بافت استفاده شده در این تحقیق، کمتر از ۵ درصد می‌باشد.

۳- الگوریتم آنالیز بافت استفاده شده در این پژوهش، در تشخیص و تفکیک خرابی عریان‌شدگی و آسفالت سالم (بدون خرابی)، حساسیت عملکردی ۱۰۰ درصد دارا می‌باشد، زیرا سطوح خاکستری این کلاس‌ها، به ترتیب الگوهای بافتی محلی کاملاً زبر (ناشی از تغییرات پی در پی مقادیر سطوح خاکستری قیر و سنگدانه) و کاملاً صاف را تشکیل داده و الگوی بافتی تصاویر آن‌ها کمتر دچار بی‌نظمی می‌باشند.

۴- وصله جزئی از عمیات ترمیم و بهسازی راه به منظور افزایش عمر مفید روسازی محسوب می‌شود اما به دلیل ایجاد ناهمواری، یکی از انواع خرابی قلمداد می‌شود. فرآیند وصله نمودن طبق اصول و قواعد مشخصی توسط متصدیان راه‌ها انجام می‌گیرد، لذا این خرابی ماهیت جوی و یا ترافیکی نداشته و به صورت مصنوعی توسط انسان ایجاد می‌شود. این امر باعث شده بافت این نوع خرابی بی‌نظمی کمتری داشته و الگوریتم توصیف بافت پیشنهادی، حساسیت عملکردی بالایی (۹۷ درصد) در تشخیص و طبقه‌بندی آن داشته باشد.

۴. مراجع

1. 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.
2. Zakeri, H., Moghadas Nejad, F. and Fahimifar, A. 2016. "Image based techniques for crack detection, classification and quantification in asphalt pavement: A review". Arch. Comp. Meth. Eng., 24(4): 935-977.

3. 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.
4. Manning, K. and Mohajeri, R. 1991. "An operating system of pavement distress diagnosis by image processing". *Transport. Res. Record*, 1311: 120-130.
5. Chua, K. M. and Xu, L. 1994. "Simple procedure for identifying pavement distresses from video images". *J. Transport. Eng.*, 120(3): 412-431.
6. 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.
7. Nallamotheu, S. and Wang, K. C. P. 1996. "Experimenting with recognition accelerator for pavement distress identification". *Transport. Res. Record*, 1536: 130-135.
8. 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.
9. Wang, W., Watkins, H. and Kuchikulla, K. 2002. "Digital distress survey of airport pavement surface". Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference, Washington, DC.
10. Lee, D. 2003. "A Robust Position Invariant Artificial Neural Network for Digital Pavement Crack Analysis". Technical Report, TRB Annual Meeting, Washington, DC, USA.
11. Zhou, J., Huang, P. S. and Chiang, F. 2006. "Wavelet-based pavement distress detection and evaluation". *Opt. Eng.*, 45(2): 2006-2011.
12. Zou, Q., Cao, Y., Li, Q., Mao, Q. and Wang, S. 2008. "Crack-Tree: Automatic crack detection from pavement images". *Pattern Recog. Lett.*, 33(3): 227-238.
13. Wang, K. C. P. 2009. "Wavelet-based pavement distress image edge detection with Troust algorithm". *Transport. Res. Record*, 2024: 73-81.
14. 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.
15. Rosa, P. 2012. "Automatic pavement crack detection and classification system". *Transport. Res. Board*, 11: 57-65.
16. Salman, M., Mathavan, S., Kamal, K. and Rahman, M. 2013. "Pavement crack detection using the Gabor filter". *Proc. 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems: Intelligent Transportation Systems for All Modes*, The Hague, Netherlands, pp. 2039-2044.
17. Ouyang, A., Dong, Q., Wang, Y. and Liu, Y. 2014. "The classification of pavement crack image based on beamlet algorithm". 7th IFIP WG 5.14 International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture.
18. Jiang, J., Liu, H., Ye, H. and Feng, F. 2015. "Crack enhancement algorithm based on improved EM". *J. Comp. Sci.*, 12(3): 1037-1043.
19. Srinivasan, G. N. and Shobha, G. 2008. "Statistical texture analysis". *Proc. World Acad. Sci., Eng. Technol.*, 36: 207-213.
20. T. Ojala, M. Pietikäinen, and T. T. Mäenpää, 2002. "Multiresolution grayscale and rotation invariant texture classification with Local Binary Pattern," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell*, vol. 24, no. 7, pp. 971-987.
21. 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.
22. 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.

۲۳. شهبان مقدم، رضا، صحاف، سید علی، محمدزاده مقدم، ابوالفضل و پوررضا، حمیدرضا (۱۳۹۶) "مقایسه روش های آنالیز بافت تصویر به منظور شناسایی و طبقه بندی خودکار خرابی های روسازی آسفالتی"، فصلنامه مهندسی زیرساخت های حمل و نقل، دوره سوم، شماره سوم، ص. ۱-۲۲.
۲۴. شهبان مقدم، رضا (۱۳۹۶)، "تشخیص و طبقه بندی خودکار خرابی های روسازی آسفالتی بر پایه آنالیز بافت تصویر در حوزه مکان و تبدیل"، پایان نامه کارشناسی ارشد، اساتید راهنما: سیدعلی صحاف و ابوالفضل محمدزاده مقدم، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.