

آنالیز آماری بافت تصاویر خرابی روسازی آسفالتی بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری

مقاله علمی - پژوهشی

رضا شهبان مقدم، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
سید علی صحاف*، استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
ابوالفضل محمدزاده مقدم، استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
حمیدرضا پوررضا، استاد، گروه کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: asahaf@um.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۵ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸

صفحه ۸۲-۶۹

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 می‌باشد. 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. ویژگی‌های بافتی در مقایسه با دیگر ویژگی‌ها هم‌چون رنگ و ویژگی‌های هندسی، اطلاعات بیشتر و دقیق‌تری را از الگوهای موجود در نواحی تصویر ارائه می‌نمایند. در این تحقیق، پس از برداشت تصاویر شش گروه مختلف از خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی در شرایط کنترل شده، به منظور آنالیز آماری بافت آن‌ها، از شاخص‌های آماری مرتبه دوم بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری استفاده شده است. به منظور تشکیل ماتریس هم‌رخداد تصاویر، ϵ زاویه مجزا (صفر درجه، ۴۵ درجه، ۹۰ درجه و ۱۳۵ درجه) و ۳ مقدار فاصله مختلف (۱، ۲ و ۳) بکارگیری شده است. نتایج حاصل از کلاس‌بندی تصاویر خرابی بر اساس روش کمینه فاصله مایلانویس، حاکی از آن است که آمارگان مستخرج از ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری با پارامتر فاصله یک، عملکرد برتری نسبت به استفاده از دیگر پارامترهای فاصله، در تشخیص و طبقه‌بندی داده‌های خرابی داشته است. میزان دقت عملکردی کلاس‌بندی تصاویر خرابی روسازی آسفالتی بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری با مقادیر پارامتر فاصله یک، دو و سه به ترتیب برابر با ۸۰ درصد، ۷۵ درصد و ۶۰ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خرابی روسازی، بافت تصویر، ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری، فاصله مایلانویس

۱-مقدمه

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 [Wang et al., 2015]. ساده‌ترین روش ارزیابی خرابی‌های روسازی، بازرسی

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

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 [Zakeri, Moghadas Nejad and Fahimifar, 2016]. 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 اتومبیل‌های (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 به‌کار برده می‌شوند. 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 فنون 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 به‌کارگیری الگوریتم‌های پیچیده، بار محاسباتی طولانی و سنگینی دارند. با توجه به محدودیت‌های ذکر شده، به‌کارگیری روشی با دقت و کارایی برتر جهت شناسایی و پردازش خرابی‌ها ضروری می‌باشد

[Moghadas Nejad and Zakeri, 2011b]. 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 [Maning and Mohajeri, 1991]. 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 ثمانی و شبکه‌های عصبی بهره جستند [Chua and Xu, 1994].

در این تحقیق، از تصاویر سطوح خاکستری 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 [Acosta, Figueroa and Mullen, 1995].

نالاموتها و وانگ در سال ۱۹۹۶ پس از تقطیع ناحیه ترک خوردگی توسط ویژگی‌های هندسی در حوزه مکان، نوعی شبکه عصبی مصنوعی را به منظور شناسایی الگوی ترک خوردگی‌های مختلف به‌کار گرفتند [Nallamutho and Wang, 1996]. چنگ و همکاران (۱۹۹۹) از تبدیل هاف به منظور تجزیه تصویر و تشخیص نوع ترک استفاده کردند [Cheng, Glazier and Hu, 1999]. وانگ و همکاران (۲۰۰۲) توسط مقایسه تصاویر با خصوصیات هندسی ترک‌های پایگاه داده از پیش تعریف شده، به ارزیابی تمام‌خودکار ترک‌های روسازی و استخراج نقشه آنها پرداختند [Wang, Watkins and Kuchikulla, 2002].

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 [Lee, 2003]. در سال ۲۰۰۶، چندین ضابطه آماری نظیر درصد ضراب دامنه باند موجک، درصد انرژی فرکانس بالا و انحراف استاندارد به منظور تفکیک و شناسایی انواع خرابی‌های روسازی پیشنهاد شد [Zhou, Huang and Chiang, 2006]. زو و همکاران (۲۰۰۸) بر اساس آستانه تفاوت هیستوگرام

فرایند کلاس‌بندی و شناسایی الگوی تصویر محسوب می‌شود. ویژگی‌های مستخرج از تصویر هم‌چون رنگ، بافت، ثوابت ثمنانی 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 [Srinivasan and Shobha, 2008]. بافت تصویر عبارت است از تکرار یک المان (تکسل) 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 و خطی اشاره نمود. روش‌های توصیف بافت شامل رویکردهای ساختاری و آماری می‌باشد. به طور کلی، هنگامی که تکسل‌ها به حد کافی بزرگ بوده و به راحتی می‌توانند از زمینه تفکیک و به صورت مجزا تقطیع و شرح داده شوند مانند اکثر بافت‌های مصنوعی (ساخته شده توسط انسان)، از روش‌های ارائه و توصیف ساختاری بافت هم‌چون مفروش نمودن و مدل گرامری می‌توان بهره جست. در غیر این صورت، مانند اغلب بافت‌های طبیعی هم‌چون خرابی‌های به‌وجود آمده در سطح روسازی آسفالتی، بایستی از روش‌های توصیف و آنالیز آماری بافت تصویر استفاده نمود. علاوه بر این، روش‌های تحلیل آماری بافت از کارایی، سادگی و محبوبیت بیشتری برخوردار می‌باشند. آنالیز آماری بافت به طور کلی در دو حوزه مکان و تبدیل قابل پیاده‌سازی می‌باشد. در آنالیز آماری بافت در حوزه مکان، نحوه توزیع و ارتباط مکانی مقادیر سطوح خاکستری پیکسل‌های تصویر در سطح المان ارایه می‌شود [Anuradha, and Sankaranarayanan, 2013]. بسته به تعداد پیکسل‌های به‌کارگیری شده جهت ارایه و توصیف بافت تصویر، روش‌های آنالیز آماری به دو دسته مرتبه اول و مرتبه دوم تقسیم‌بندی می‌شوند. آمارگان مرتبه دوم برخلاف شاخص‌های آماری مرتبه اول، با در نظر گرفتن ارتباط مکانی میان مقادیر سطوح خاکستری پیکسل‌های تصویر محاسبه و

همسایگی، روش جدیدی برای آنالیز اتوماتیک ترک‌ها مطرح نمودند. در مقاله مذکور، با جایجایی متعدد مقدار آستانه، در شناسایی و طبقه‌بندی ترک‌های طولی، عرضی و بلوکی بیش از ۹۰٪ دقت عملکردی حاصل گردید [Zou et al., 2008]. وانگ (۲۰۰۹) با استفاده از شناسایی لبه بر اساس تبدیل موجک توسط الگوریتم تروس اقدام به تقطیع و طبقه‌بندی انواع خرابی‌های روسازی کرد [Wang, 2009]. مقدس‌نژاد و ذاکری (۲۰۱۱) از شیوه تبدیل دو مرحله‌ای به‌وسیله 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 [Moghadas Nejad and Zakeri, 2011a]. روسا (۲۰۱۲) از توصیف‌کننده‌های آماری بافت تصویر به منظور تقطیع و شناسایی ناحیه خرابی و با اتصال ترک‌های منفصل و استخراج ویژگی‌های هندسی به طبقه‌بندی انواع ترک خوردگی روسازی آسفالتی پرداخت [Rosa, 2012]. سلمان و همکاران (۲۰۱۳) از فیلتر دوبعدی گابور و استخراج ویژگی‌های ثمنانی تصویر خرابی بهره جستند [Salman et al., 2013]. اوپانگ و همکاران (۲۰۱۴) از تبدیل گسسته بیلمت و استخراج ویژگی‌های بافت تصویر در حوزه تبدیل به منظور طبقه‌بندی خرابی‌ها استفاده نمودند [Ouyang et al., 2014]. جیانگ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از الگوریتم حداکثر انتظار (EM) و به‌کارگیری ویژگی‌های هندسی، سعی در توسعه روش‌های تشخیص و طبقه‌بندی اتوماتیک خرابی‌های روسازی نمودند [Jiang et al., 2015]. 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 [Zakeri, Moghadas Nejad and Fahimifar, 2016]. 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 تبدیل داده‌های ورودی به یک سری جزئیات مفید بوده و یکی از مهم‌ترین اجزای تشکیل دهنده سیستم‌های بینایی ماشین در

و دوم (آنالیز آماری بافت) در حوزه تبدیل استفاده شده است. بدین منظور اغلب تبدیل مویجک به کارگیری شده است زیرا این تبدیل علاوه بر حفظ اطلاعات فرکانسی و مکانی تصویر (برخلاف تبدیل فوریه) قادر است مؤلفه‌های سیگنال تصویری را به صورت چنددقته آنالیز نماید. اگرچه اکثر روش‌های آنالیز بافت چند دقته هم‌چون تبدیل مویجک بر مبنای فیلتر هار و تبدیل کرولت، 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 بافت تصویر در حوزه مکان بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری، علاوه بر آن‌که در شناسایی بسیاری از کلاس‌های خرابی حساسیت عملکردی بالایی داشته، نسبت به بسیاری از روش‌های آنالیز بافت چنددقته هم‌چون تبدیل بیملت و تبدیل ویولت دابجیز میانگین دقت عملکردی بالاتری نیز دارد [Dettori and Semler, 2007]. لازم به ذکر است که آنالیز آماری بافت تصویر خرابی بر پایه ماتریس هم‌رخداد در حوزه مکان، نسبت به تحلیل‌های 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 [Zakeri, Moghadas Nejad and Fahimifar, 2016]. باید متذکر شد که ترک‌ها تنها نمایانگر یک جنبه مهم از خرابی‌های روسازی هستند. سایر موارد نظیر چاله‌ها، وصله‌ها، قیرزدگی و عریان‌شدگی نیز همانند ترک‌خوردگی، نقش مهمی در افت شاخص کیفیت روسازی داشته و گزینه‌های ترمیم و نگهداری پیشنهادی توسط سیستم مدیریت روسازی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

۲- شاخص‌های آماری مرتبه دوم

شاخص‌های آماری مرتبه دوم، ارتباط میان مقادیر سطوح خاکستری دو پیکسل را در فاصله و جهتی مشخص از

استخراج شده و نسبت به جابجایی پیکسل‌های تصویر حساس می‌باشند. [Singh, 2016]. مقادیر سطوح خاکستری 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 مقادیر سطوح خاکستری، از آمارگان مرتبه دوم بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری استفاده شده است.

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

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 دوم بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری استفاده شده است. با توجه به توزیع مکانی گوناگون سطوح خاکستری در الگوهای خرابی مختلف، ۴ زاویه مجزا (صفر درجه، ۴۵ درجه، ۹۰ درجه و ۱۳۵ درجه) به عنوان پارامتر جهت به منظور تشکیل ماتریس هم‌رخداد بکارگیری شده است. علاوه بر این در پژوهش حاضر به منظور بررسی و مقایسه نتایج شناسایی و کلاس‌بندی تصاویر خرابی، ۳ پارامتر فاصله مختلف (۱، ۲ و ۳) در ساخت ماتریس هم‌رخداد لحاظ شده است. در نهایت طبقه‌بندی تصاویر خرابی بر اساس روش کمینه فاصله مایلانویس صورت گرفته است. لازم به ذکر است که کلیه محاسبات و تحلیل داده‌های خرابی در این مقاله، توسط جعبه‌ابزار 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

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 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. 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.

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 ۲ طبقه‌بندی 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.

یکدیگر در نظر می‌گیرند. شاخص‌های آماری مرتبه دوم اغلب بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری تصویر 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. [Shahabian et al., 2017]. 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 d و در جهتی مشخص (θ) از i قرار دارد $P(i,j)$. در انتها، این مقدار 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 را می‌توان به عنوان یک تابع چگالی احتمال در نظر گرفته و با محاسبه شاخص‌های آماری مختلف همچون تضاد (کنتراست)، همبستگی، همسانی (انرژی)، همگنی، حداکثر احتمال و آنتروپی از این ماتریس، ویژگی‌های بافتی تصویر را آنالیز نمود.

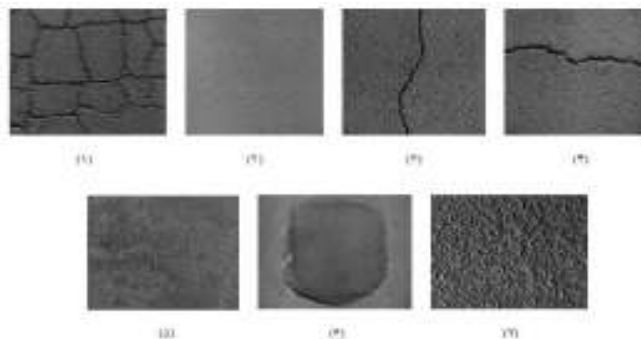
۳- روند انجام پژوهش و اعتبارسنجی تحقیق

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 تصاویر ۳- کلاس‌بندی تصاویر و ارزیابی عملکردی آن
- ۴- بررسی و تحلیل نتایج.



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

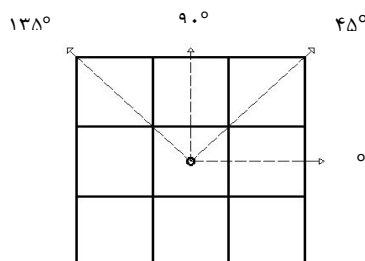


شکل ۲. طبقه‌بندی تصاویر خرابی برداشت شده از سطح روسازی آسفالتی: (۱) ترک پوست‌سوسماری، (۲) آسفالت سالم (بدون خرابی)، (۳) ترک طولی، (۴) ترک عرضی، (۵) قیرزدگی، (۶) وصله و (۷) عریان‌شدگی

۲-۳ آنالیز بافت تصاویر خرابی بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری

است. در این تحقیق، ابعاد ماتریس هم‌رخداد (GLCM) برابر با ۲۵۶ انتخاب شده، ۳ پارامتر فاصله (۱، ۲ و ۳) و با توجه به توزیع مکانی گوناگون سطوح خاکستری در الگوهای خرابی مختلف، ۴ زاویه مجزا (صفر درجه، ۴۵ درجه، ۹۰ درجه و ۱۳۵ درجه) به عنوان پارامترهای جهت به منظور تشکیل ماتریس هم‌رخداد مطابق با شکل ۳ انتخاب گردید.

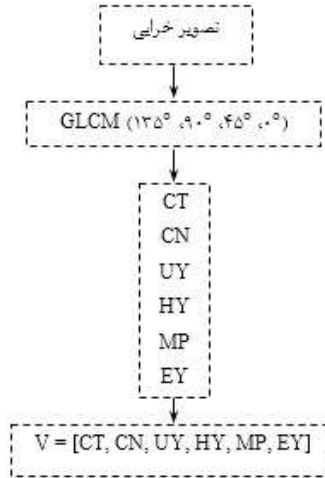
پس از برداشت تصاویر انواع خرابی روسازی آسفالتی، تمامی تصاویر از حالت رنگی به تک‌رنگ با مقادیر شدت سطوح خاکستری (محدوده پویا) بین صفر تا ۲۵۵ (۸ بیت) تبدیل شدند. سپس، به منظور مقایسه نتایج بکارگیری رویکردهای مختلف آنالیز بافت تصویر در شناسایی و طبقه‌بندی انواع خرابی‌های روسازی آسفالتی، از سه شیوه تشکیل ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری بهره‌گیری شده



شکل ۳. زوایای انتخابی به منظور تشکیل ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری

(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 فرایند طبقه‌بندی تصاویر خرابی قلمداد می‌شود. هر یک از این شاخص‌ها، ویژگی خاصی از تصویر را توصیف می‌نمایند.

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



شکل ۴. الگوریتم استخراج بردار ویژگی تصویر مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری

۳-۳ کلاس‌بندی تصاویر خرابی

کلاس‌بندی به فرایند نگاشت یک تصویر ناشناخته به مجموعه‌ای از گروه‌های از پیش تعریف شده اطلاق می‌گردد. در این تحقیق، از روش کمینه فاصله به منظور کلاس‌بندی تصاویر خرابی استفاده گردیده است. بدین منظور، فاصله ماہالانوبیس (d) طبق رابطه (۲) محاسبه 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 بردار ویژگی تصاویر آموزشی کلاس c (بردار میانگین کلاس آموزشی c) و C_c ماتریس کواریانس مجموعه ویژگی‌های تصاویر آموزشی کلاس c می‌باشد. برتری استفاده از فاصله ماہالانوبیس 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 کلاس‌بندی می‌شود [Shahabian et al., 2017].

به منظور پیاده‌سازی الگوریتم استخراج بردار ویژگی تصویر (شکل ۵) در نرم‌افزار متلب، بایستی ابتدا با استفاده از توابع `graycomatrix` و `offsets`، در هر یک از مقادیر انتخابی پارامتر فاصله، ماتریس‌های هم‌رخداد نرمال شده تصویر را در چهار جهت منتخب به دست آورده و سپس با استفاده از دستور `mean_glcm_features` میانگین آمارگان مرتبه دوم از ماتریس‌های هم‌رخداد سطوح خاکستری استخراج شدند. کد اجرای توابع مذکور در کتاب پردازش تصاویر دیجیتال [Gonzalez and Woods, 2006] ارائه شده است.

لازم به ذکر است که دستور `glcm_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 ۱ در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۶ کدنویسی شده است.

در این روش، پس از استخراج ۳۰ بردار ویژگی از ۳۰ تصویر آموزشی، در هر کدام از ۷ کلاس تصاویر طبقه‌بندی 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 کمینه فاصله ماهالانویس، هر تصویر آزمایشی به یکی از ۷ کلاس خرابی موجود اختصاص می‌یابد.

جدول ۱. روابط و شرح توصیف‌کننده‌های بافت تصویر مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری [Shahabian, 2017].

| ویژگی | شرح | رابطه |
|-----------------|--|---|
| کنتراست | بیانگر اختلاف و تضاد سطح خاکستری یک پیکسل با همسایه‌هایش 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 همسایه‌هایش در کل تصویر است. مقدار حاصل بین -۱ و ۱ بوده که به ترتیب بیانگر همبستگی کامل مثبت و منفی است. در صورتی که مقدار واریانس صفر باشد، این ویژگی تعریف نشده است. | $\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (i-m_i)(j-m_j) p_{ij}}{\sigma_i \sigma_j}$ |
| انرژی یا همسانی | معیاری از یکنواختی بوده و مقداری در محدوده صفر و یک دارد؛ یک به معنای یک تصویر کاملاً یکنواخت است. | $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N m_{ij}^2$ |
| همگنی | بیانگر نزدیکی مکانی توزیع اجزای ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری به قطر است. مقداری در محدوده صفر و ۱ داشته و بیشینه مقدار برای یک ماتریس قطری به دست می‌آید. | $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{p_{ij}}{1+ i-j }$ |
| حداکثر احتمال | شاخصی از قوی‌ترین پاسخ ماتریس هم‌رخداد می‌باشد. میزان اتفاقی بودن مقادیر را بیان می‌کند. مقدار صفر در حالتی به دست می‌آید که همه مقادیر ماتریس صفر باشند؛ وقتی تمامی مقادیر ماتریس برابر باشند، ماکزیمم است. | $\text{Max}(p_{ij})$ |
| آنتروپی | | $-\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ij} \log_2 p_{ij}$ |

شده، در کلاس‌بندی خودکار تصاویر خرابی آسفالت، دو شاخص مختلف شامل میزان حساسیت و دقت برای هر کدام از ماتریس‌های درهم‌ریختگی محاسبه گشته است. حساسیت و دقت، مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد کلاس‌بندی (شناسایی الگو) می‌باشند [Shahabian, 2017]. 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 ۳ و ۴ توسط مؤلفین در نرم‌افزار متلب کدنویسی شده است.

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 [Shahabian, 2017]. ماتریس درهم‌ریختگی تصاویر آزمایشی، حاصل از توصیف آماری بافت تصویر مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری بر مبنای پارامترهای فاصله ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب در جداول ۲ تا ۴ ارائه شده است. به منظور ارزیابی عملکرد رویکردهای آنالیز بافت به کارگیری

یافته (اعضای قطری ماتریس درهم‌ریختگی) و M_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 M_g برابر ۳۰ می‌باشد. در جدول ۵ میزان حساسیت عملکردی الگوریتم‌های پیشنهادی، مبتنی بر روش‌های مختلف استخراج بردار ویژگی بافتی تصویر، ارایه شده است.

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

$$Sn_g = \frac{M_{gg}}{M_g} \quad (3)$$

در این رابطه M_{gg} برابر با تعداد تصاویر آزمایشی متعلق به طبقه g بوده که به طور صحیح به همان طبقه اختصاص

جدول ۲. ماتریس درهم‌ریختگی حاصل از استخراج بردار ویژگی بر مبنای پارامتر فاصله یک

| نوع خرابی | ترک پوست سوسماری | آسفالت سالم | ترک طولی | ترک عرضی | قیرزدگی | وصله | عریان‌شدگی |
|------------------|---------------------|----------------|----------|-------------|---------|------|------------|
| 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 |
| عریان‌شدگی | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۳۰ |

جدول ۳. ماتریس درهم‌ریختگی حاصل از استخراج بردار ویژگی بر مبنای پارامتر فاصله دو

| نوع خرابی | ترک پوست سوسماری | آسفالت سالم | ترک طولی | ترک عرضی | قیرزدگی | وصله | عریان‌شدگی |
|------------------|---------------------|----------------|----------|-------------|---------|------|------------|
| 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 ۴. ماتریس درهم‌ریختگی حاصل از استخراج بردار ویژگی بر مبنای پارامتر فاصله سه

| نوع خرابی | ترک پوست سوسماری | آسفالت سالم | ترک طولی | ترک عرضی | قیرزدگی | وصله | عریان‌شدگی |
|------------------|---------------------|----------------|-------------|-------------|---------|------|------------|
| 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 |

جدول ۵. حساسیت عملکردی کلاس‌بندی خرابی‌های روسازی مبتنی بر رویکردهای مختلف آنالیز آماری بافت تصویر

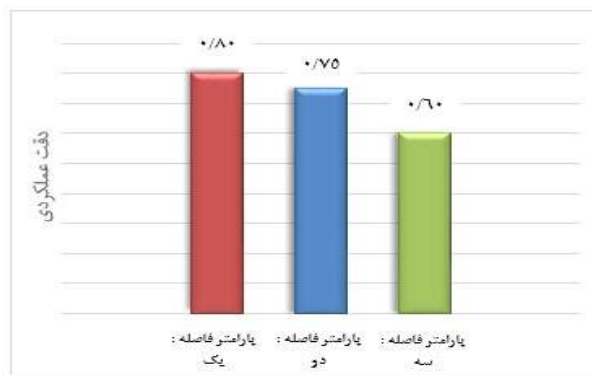
| الگوریتم نوع خرابی | ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری (پارامتر فاصله برابر با سه) | ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری (پارامتر فاصله برابر با دو) | ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری (پارامتر فاصله برابر با یک) |
|-----------------------|---|---|---|
| ترک پوست سوسماری | ۰/۶۳ | ۱ | ۰/۹ |
| آسفالت سالم | ۰/۸۷ | ۰/۹۳ | ۱ |
| ترک طولی | ۰/۳۰ | ۰/۴۳ | ۰/۴۷ |
| ترک عرضی | ۰/۳۷ | ۰/۵۰ | ۰/۵۳ |
| قیرزدگی | ۰/۵۰ | ۰/۶۰ | ۰/۸ |
| وصله | ۰/۷۷ | ۰/۸۰ | ۰/۹ |
| عریان‌شدگی | ۰/۹ | ۱ | ۱ |

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.

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

در این رابطه، m_{gg} بیان‌گر تعداد تصاویر متعلق 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. در شکل ۵ میزان دقت عملکردی الگوریتم‌های پیشنهادی، مبتنی بر رویکردهای مختلف استخراج بردار ویژگی بافتی تصویر، مقایسه شده است.



شکل ۵. دقت عملکردی کلاس بندی خرابی های روسازی مبتنی بر رویکردهای مختلف آنالیز آماری بافت تصویر

۳-۴- بحث و بررسی نتایج

در الگوهای بی نظمی هم چون خرابی های ایجاد شده در سطح روسازی آسفالتی که دارای ماهیتی تصادفی می باشند، در نظر گرفتن ارتباط و وابستگی مکانی میان مقادیر سطوح خاکستری دو پیکسل در فاصله ای زیاد از یکدیگر، عملکرد صحیحی در شناسائی الگو نمی باشد، زیرا در چنین الگوهای احتمال وقوع نظم و تعامل مکانی میان مقادیر پیکسل های همسایه بیشتر می باشد. لذا، در پژوهش حاضر، ماتریس هم رخداد با پارامتر فاصله یک، که بر مبنای ارتباط مکانی میان مقادیر سطوح خاکستری دو پیکسل مجاور محاسبه می شود، نتیجه برتری نسبت به دیگر رویکردهای آنالیز بافت، در تشخیص و تفکیک خرابی ها حاصل نموده است. دقت عملکردی کلاس بندی تصاویر خرابی آسفالت بر مبنای پارامتر فاصله یک، دو و سه به ترتیب برابر با ۰/۸۰، ۰/۷۵ و ۰/۶۰ می باشد. این نتایج حاکی از آن است که افزایش پارامتر فاصله، تاثیر منفی در شناسایی و طبقه بندی تصاویر خرابی روسازی آسفالتی دارد.

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 کلاسه بندی نسبتا نزدیکی در شناسائی 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 با یکدیگر نبوده و تمامی الگوریتم های استخراج بردار ویژگی بافتی نسبت به این بی نظمی ها شدیداً حساس می باشند. اختلاف حساسیت

عملکردی طبقه بندی این کلاس های خرابی بر مبنای تمامی رویکردهای آنالیز بافت استفاده شده در این تحقیق، کمتر از ۱۰٪ می باشد.

اکثر الگوریتم های آنالیز بافت استفاده شده در این پژوهش، در تشخیص و تفکیک خرابی عریان شدگی و آسفالت سالم (بدون خرابی) حساسیت عملکردی بالایی دارا می باشند، زیرا سطوح خاکستری این کلاس ها، به ترتیب یک بافت کاملا زبر (ناشی از تغییرات پی در پی مقادیر سطوح خاکستری قیر و سنگدانه) و کاملا صاف را تشکیل داده و الگوی بافتی تصاویر آن ها کمتر دچار بی نظمی می باشند.

وصله جزئی از عمیات ترمیم و بهسازی راه به منظور افزایش عمر مفید روسازی محسوب می شود اما به دلیل ایجاد ناهمواری، یکی از انواع خرابی قلمداد می شود. فرآیند وصله نمودن طبق اصول و قواعد مشخصی توسط متصدیان راه ها انجام می گیرد، لذا این خرابی ماهیت جوی و یا ترافیکی نداشته و به صورت مصنوعی توسط انسان ایجاد می شود. این امر باعث شده بافت این نوع خرابی بی نظمی کمتری داشته و اغلب الگوریتم های توصیف بافت، حساسیت عملکردی مناسبی در تشخیص و طبقه بندی آن داشته باشند.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، از الگوریتم هایی مبتنی بر پردازش تصویر و آنالیز بافت به منظور تشخیص و کلاس بندی خودکار رابی های سطح روسازی آسفالتی استفاده شده است. پس از برداشت تصاویر خرابی در شرایط کنترل شده، از سه رویکرد

۶-مراجع

-شهابیان مقدم، ر. صحاف، س.ع. محمدزاده مقدم، ا. و پوررضا، ح.ر.، (۱۳۹۶)، "مقایسه روش‌های آنالیز بافت تصویر به منظور شناسایی و طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های روسازی آسفالتی"، فصلنامه مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، دوره سوم، شماره سوم، ص. ۱-۲۲.

- شهابیان مقدم، ر.، (۱۳۹۶)، "تشخیص و طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های روسازی آسفالتی بر پایه آنالیز بافت تصویر در حوزه مکان و تبدیل"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، اساتید راهنما: صحاف، س.ع. محمدزاده مقدم، ا. دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

- Acosta, J. A., Figueroa, J. L. and Mullen, R. L., (1995), "Algorithm for pavement distress classification by video image analysis", *Transport. Res. Record*, 1505:, pp.27-38.

-Anuradha, K. and Sankaranarayanan, K., (2013), "Statistical feature extraction to classify oral cancers", *J. Global Res. Comp. Sci.*, 4(2), pp.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), pp.270-280.

-Chua, K. M. and Xu, L., (1994), "Simple procedure for identifying pavement distresses from video images". *J. Transport, Eng.*, 120(3), pp.412-431.

-Dettori, L. and Semlera, L., (2007), "A comparison of wavelet, ridgelet, and curvelet based texture classification algorithms in computed tomography", *Comp. Biol. Med.*, 37(4), pp.486-498.

-Gonzalez, R.C. and Woods, R.E., (2006), "Digital image processing 3/E", 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), pp.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, pp.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), pp.2857-2872.

آنالیز آماری مختلف در حوزه مکان شامل ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری با مقادیر پارامترهای فاصله یک، دو و سه به منظور توصیف بافت خرابی و استخراج بردار ویژگی تصاویر استفاده شد. در انتها، روش کمینه فاصله ماهالانویس به منظور تفکیک و طبقه‌بندی تصاویر آزمایشی به کار گرفته شد. نتایج اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد کلاس‌بندی نشان می‌دهد که افزایش مقدار پارامتر فاصله، تاثیر معکوس در شناسایی و طبقه‌بندی تصاویر خرابی روسازی آسفالتی دارد. الگوریتم استخراج ویژگی تصاویر بر مبنای ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری با پارامتر فاصله یک، با دقت عملکردی کلاس‌بندی ۸۰ درصد نتیجه برتری نسبت به دیگر پارامترهای فاصله انتخابی، در تشخیص و تفکیک خرابی‌ها حاصل نموده و به منظور شناسایی و تفکیک خودکار خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی پیشنهاد می‌گردد. الگوریتم پیشنهادی ساده، روان و فاقد بار محاسباتی سنگین بوده و در صورت بهره‌گیری از آن در سیستم‌های ارزیابی اتوماتیک خرابی‌های سطح روسازی، در شناسایی اغلب کلاس‌های خرابی، کمتر از ۱۰٪ خطا حاصل خواهد شد.

۵-پی‌نوشت‌ها

1. Moment Invariants
2. Grey level
3. Hough
4. Wavelet transform
5. Trous
6. Image texture
7. 2D Gabor filter
8. Discrete beamlet transform
9. Texel
10. Spatial and transformation domain
11. Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM)
12. Mahalanobis distance
13. Multi-resolution texture analysis
14. Curvelet transform
15. Contrast
16. Correlation
17. Homogeneity
18. Maximum probability
19. Sensitivity
20. Accuracy

- Srinivasan, G. N. and Shobha, G., (2008), "Statistical texture analysis", Proc. World Acad. Sci., Eng. Technol., 36, pp.207-213.
- Wang, K. C. P., (2009), "Wavelet-based pavement distress image edge detection with Troust algorithm", Transport. Res. Record, 2024, pp. 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., (2016), "Image based techniques for crack detection, classification and quantification in asphalt pavement: A review", Arch. Comp. Meth. Eng., 24(4), pp.935-977.
- Zhou, J., Huang, P. S. and Chiang, F., (2006), "Wavelet-based pavement distress detection and evaluation". Opt. Eng., 45(2), pp.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), pp. 227-238.
- 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), pp.7088-7101.
- Nallamothe, S. and Wang, K. C. P., (1996), "Experimenting with recognition accelerator for pavement distress identification", Transport. Res. Record, 1536, pp.130-135.
- 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.
- Rosa, P., (2012), "Automatic pavement crack detection and classification system", Transport. Res. Board, 11, pp.57-65.
- 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.
- 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), pp. 9-17.

Statistical Texture Analysis of Asphalt Pavement Distress Images Based on Grey Level Co-occurrence Matrix

*Reza Shahabian, M.Sc., Grad., Civil Engineering Department,
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*

*Seyed Ali Sahaf, Assistant Professor, Civil Engineering Department,
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*

*Abolfazl Mohammadzadeh Moghaddam, Associate Professor, Department of Civil Engineering,
Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*

*Hamidreza Pourreza, Professor, Department of Computer Engineering,
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*

E-mail: asahaf@um.ac.ir

Received: August 2021-Accepted: February 2022

ABSTRACT

Evaluation of pavement performance plays a major role in pavement management systems for determination of optimum strategy in repair and maintenance of the road. One of the most prominent assets in evaluation of the pavement is identification and survey of pavement surface distresses. In the past two decades, extensive studies have been carried out in order to develop automatic methods for pavement distress evaluation. Most of these methods are based on computer vision and image processing techniques. Of the most important components of machine vision systems is the feature extraction process. Textural features present more detailed information about the image regions characteristics compared to other features such as color and geometrical (shape) properties. In the present study, after acquisition of six different groups of asphalt pavement distress images under controlled condition, in order to analyze and describe their texture, second order statistics based on grey level co-occurrence matrix has been employed. In order to generate the images co-occurrence matrices, four distinct directions and three different distance (offset) parameters have been utilized. Based on the results of the classification of distress images acquired by Mahalanobis minimum distance classifier, it can be concluded that statistical indices extracted from grey level co-occurrence matrix having distance parameter equal to one, have superior discrimination performance in comparison to other selected distance values. The classification accuracy rates of asphalt pavement distress images based on grey level co-occurrence matrix with one, two and three distance parameters values are 80%, 75% and 60%, respectively.

Keywords: Pavement Distress, Image Texture, Grey Level Co-Occurrence Matrix (GLCM), Mahalanobis Distance