

طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی بر پایه آنالیز بافت تصویر در حوزه مکان و تبدیل

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

در دو دهه اخیر، تحقیقات گسترده‌ای پیرامون توسعه روش‌های خودکار ارزیابی خرابی‌های روسازی انجام گرفته است. اغلب این روش‌ها بر پایه تکنیک‌های بینایی ماشین می‌باشند. یکی از مهم‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده سیستم بینایی ماشین، فرآیند استخراج ویژگی می‌باشد. در سال‌های اخیر روش‌های آنالیز چند دفته هم‌چون تبدیل موجک، ابزار مناسبی جهت تحلیل ویژگی‌های بافتی تصویر با سرعت و دقتی قابل قبول، فراهم آورده است. در این پژوهش، از آمارگان مرتبه اول بر پایه هیستوگرام تصویر در حوزه مکان و حوزه تبدیل موجک هار، به منظور توصیف آماری بافت خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی استفاده گردید. نتایج حاصل از کلاسه‌بندی تصاویر خرابی بر اساس روش کمینه فاصله ماکسولانویس، حاکی از آن است که تحلیل آماری بافت خرابی‌ها در حوزه تبدیل موجک هار با دقت طبقه‌بندی ۹۰٪، عملکرد برتری نسبت به آنالیز مکانی بافت تصاویر در شناسایی و کلاسه‌بندی هوشمند انواع خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی دارا می‌باشد.

کلمات کلیدی: خرابی‌های روسازی، تبدیل موجک هار، هیستوگرام، بافت تصویر، کمینه فاصله ماکسولانویس.

۱. مقدمه

ارزیابی عملکرد روسازی نقش بسیار مهمی در مدیریت روسازی ایفا می‌کند و بر انتخاب گزینه صحیح عملیات راهداری تأثیر گذار 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 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 به کار برده می‌شوند. لذا در این تحقیق به منظور

^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.

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 به کارگیری الگوریتم‌های پیچیده، بار محاسباتی طولانی و سنگینی داشته و تمرکز اصلی آن‌ها اغلب بر روی شناسایی و کلاسه‌بندی خودکار ترک‌های سطح روسازی بوده است [۳]. لازم به ذکر است که ترک‌ها تنها نمایانگر یک جنبه مهم از خرابی‌های روسازی بوده و سایر خرابی‌ها همچون قیرزدگی، عریان‌شدگی و غیره نیز هم‌چون ترک خوردگی‌ها، نقش مهمی در افت شاخص کیفی سطح روسازی داشته و گزینه‌های ترمیم و نگهداری پیشنهادی توسط سیستم مدیریت روسازی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. با توجه به محدودیت‌های ذکر شده، به کارگیری روشی با دقت و کارایی برتر جهت شناسایی و پردازش انواع خرابی‌ها پیشنهاد می‌گردد.

مانینگ و مهاجری در سال ۱۹۹۱ میلادی 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. جوآ و شو در سال ۱۹۹۴ به منظور تشخیص و طبقه‌بندی خودکار ترک‌های روسازی، به ترتیب از ویژگی ثوابت ممانی^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. 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 به کار گرفتند [۶]. چنگ و همکاران در سال ۱۹۹۹ میلادی از تبدیل هاف^۳ به منظور تجزیه تصویر و تشخیص نوع ترک استفاده کردند [۷]. وانگ و همکاران در سال 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 [۸]. 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 [۹]. زو و همکاران در سال ۲۰۰۸ میلادی بر اساس آستانه تفاوت هیستوگرام 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 [۱۰]. مقدس‌نژاد و ذاکری در سال ۲۰۱۱ میلادی از شیوه تبدیل دو مرحله‌ای به وسیله موجک و تبدیل رادون به منظور تشخیص و از شبکه عصبی مصنوعی دینامیکی به منظور تفکیک هفت نوع مختلف از انواع ترک خوردگی استفاده نموده و کمتر از ۵٪ خطا در طبقه‌بندی تصاویر خرابی گزارش دادند [۱۱]. سلمان و همکاران در سال ۲۰۱۳ میلادی از فیلتر دوبعدی گابور^۴ و استخراج ویژگی‌های ممانی تصویر خرابی بهره جستند [۱۲]. 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]. اغلب الگوریتم‌ها و روش‌های آنالیز و شناسایی تمام خودکار خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی پیشین بر روی تشخیص و طبقه‌بندی انواع ترک خوردگی‌ها تمرکز دارند در صورتی که کلاسه‌بندی خودکار دیگر خرابی‌های ایجاد شده در سطح روسازی هم‌چون قیرزدگی، عریان‌شدگی، وصله و غیره نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد که در این پژوهش این امر لحاظ گردیده است. الگوریتم‌های ارائه شده پیشین که خطای کلاسه‌بندی کمتر از ۵٪ گزارش نمودند اغلب بار محاسباتی سنگین و نسبتاً پیچیده‌ای (پیش‌پردازش تصاویر، استفاده از تبدیل جهت‌دار با افزونگی بالا، تعداد ویژگی‌های زیاد، الگوریتم کلاس‌بندی پیچیده و ...) دارا می‌باشند که به تبع منجر به افزایش زمان و هزینه ارزیابی عملکرد روسازی می‌گردد. از آنجائی که مولفه‌ها و اطلاعات مهم تصاویر خرابی روسازی آسفالتی بیشتر شامل لبه‌های افقی و عمودی (مولفه‌های غیر جهت‌دار) بوده، حساسیت جهتی توابع موجک گسسته دوبعدی (افقی، عمودی و قطری) مناسب و کافی بوده و در چنین الگوهای بهتر است بر روی نوع (شکل) و مقیاس (تعداد لایه‌های

1- Moment invariants

2- Gray level

3- Hough

4- 2D Gabor Filter

تجزیه^{۱)} موجک اعمالی و ویژگی‌های مستخرج از زیرباندها تمرکز نمود تا افزایش حساسیت جهتی تبدیل (هم‌چون استفاده از تبدیل کرولت). در این پژوهش با بررسی بسیاری از تحقیقات پیشین در زمینه آنالیز و کلاسه‌بندی انواع بافت‌ها، تعداد اندکی از ویژگی‌ها (۴ توصیف‌گر) اما با بیشترین قدرت تمیزدهندگی به منظور توصیف آماری بافت زیرباندهای سطوح مختلف تجزیه هرم موجک انتخاب گردید و از یک شیوه کلاس‌بندی ساده (کمینه فاصله ماکسولانویس) به منظور دسته‌بندی داده‌ها استفاده گردید. الگوریتم ارائه شده در این مطالعه، علی‌رغم سادگی و بار محاسباتی اندک نسبت به روش‌های پیشین، از کارایی و دقت عملکردی بالایی در شناسایی انواع خرابی برخوردار می‌باشد. لازم به ذکر است که در الگوهای بی‌نظمی هم‌چون خرابی‌های ایجاد شده در سطح روسازی آسفالتی، وارد کردن و درگیر نمودن تعداد زیادی از پیکسل‌ها در استخراج ضرائب موجک (محتوای فرکانسی) عملکرد صحیحی نمی‌باشد، زیرا احتمال وقوع و جذب بی‌نظمی‌ها افزایش می‌یابد. به همین دلیل در این تحقیق، از تابع (فیلتر) موجک هار^۱ که دارای عرض ساپورت کمتری (پنجره ای برابر با دو پیکسل) نسبت به دیگر توابع موجک بوده و سهم کمتری از سیگنال اصلی را به منظور استخراج ضرائب موجک بکار می‌گیرد، استفاده شده است.

تکنیک‌های پردازش تصویر و بینایی ماشین از عناصر مختلفی در فرآیند 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 سیستم-های بینایی ماشین در فرآیند 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 [۱۳]. این امر نشان‌دهنده اهمیت و توانمندی آنالیز بافت تصویر می‌باشد.

بافت تصویر عبارت است از تکرار یک المان (تکسل^{۲)} 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 مفروض نمودن و مدل‌گرایی می‌توان بهره جست. در غیر این صورت، مانند اغلب بافت‌های طبیعی هم‌چون خرابی‌های موجود 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 [۱۴]. آنالیز آماری بافت به طور کلی در دو حوزه مکان و تبدیل^۳ قابل پیاده‌سازی می‌باشد. در آنالیز آماری بافت در حوزه مکان، مستقیماً نحوه توزیع و ارتباط مکانی مقادیر سطوح خاکستری پیکسل‌های تصویر در سطح المان ارائه می‌شود در حالیکه در حوزه تبدیل، توزیع و تعامل مکانی میان ضرائب حوزه تبدیل بررسی می‌گردد. بسته به تعداد پیکسل‌ها یا ضرائب به کارگیری شده جهت ارائه و توصیف بافت تصویر، روش‌های آنالیز آماری به دو دسته مرتبه اول و مرتبه دوم تقسیم‌بندی می‌شوند. آمارگان مرتبه اول برخلاف آماره‌های مرتبه دوم، بدون در نظر گرفتن تعامل مکانی میان مقادیر سطوح خاکستری پیکسل‌ها و یا ضرائب حوزه تبدیل محاسبه و استخراج می‌شوند [۱۵]. به دلیل ماهیت تصادفی، بی‌نظمی و بی‌قاعدگی شدید خرابی‌های ایجاد شده در سطح روسازی آسفالتی، در نظر گرفتن ارتباط و آرایش مکانی میان مولفه‌های بافتی تصویر عملکرد صحیحی نبوده و لحاظ نمودن توزیع فراوانی سطوح خاکستری و یا ضرائب، نتایج برتری در تشخیص و تفکیک الگوهای بی‌نظم به دنبال دارد. لذا در این تحقیق به منظور آنالیز بافت تصاویر خرابی، از آمارگان مرتبه اول بر پایه هیستوگرام در حوزه مکان و تبدیل موجک استفاده شده است.

در این پژوهش پس از برداشت تصاویر خرابی سطح روسازی آسفالتی در شرایط کنترل شده، داده‌ها در هفت گروه مختلف طبقه‌بندی گردید. در ابتدا آنالیز بافت تصویر با استفاده از خصوصیات آماری هیستوگرام در حوزه مکان انجام گرفت. پس از آن تبدیل موجک

1- Haar wavelet

2- Texel

3- Spatial and transformation domain

گسسته دوبعدی هار بر تصاویر اعمال گشته و ویژگی‌های بافتی هر یک از زیرباند‌های (زیرتصاویر) تجزیه شده بر مبنای آمارگان مرتبه اول هیستوگرام، استخراج شد. در نهایت با استفاده از آماره‌های محاسبه شده، بردار ویژگی تصاویر خرابی تشکیل یافته و طبقه بندی تصاویر بر اساس روش کمینه فاصله ماهالانویس صورت گرفت. در پایان، عملکرد کلاس بندی توسط شاخص حساسیت و دقت مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که کلیه محاسبات و تحلیل داده‌های خرابی در این مقاله، توسط نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۶ انجام گرفته است.

۲. مبانی نظری پژوهش

در این بخش، مفاهیم پایه پیرامون تبدیل موجک گسسته و شاخص‌های آماری مرتبه اول مبتنی بر هیستوگرام سطوح خاکستری ارائه شده است.

۲-۱- تبدیل موجک گسسته

تبدیل موجک به دلیل ویژگی آنالیز چند دفته^۱ قادر است اطلاعات مفید تصویر را بدون توجه به تغییر ابعاد همسایگی پیکسل‌ها حفظ نماید، که این امر باعث موثر بودن آنالیز موجک در فشرده سازی تصویر، حذف نویز و غیره شده است. در دهه اخیر قابلیت موجک در آنالیز بافت با توجه به استخراج هم‌زمان اطلاعات مکانی و فرکانسی تصویر (بر خلاف تبدیل فوری)، در تحقیقات مختلف اثبات گردیده است. تبدیل موجک گسسته قادر به تجزیه سیگنال و ایجاد زیرباند‌های فرکانسی توسط اعمال توابع جزئی ویولت و مقیاس^۲ با نرخ نمونه گاهی ۲ می باشد. توابع جزئی ویولت و مقیاس به ترتیب به عنوان فیلتر بالاگذر (g) و پایین گذر (h) عمل می‌نمایند [۱۶]. این توابع جزئی (روابط ۲ الی ۳) از انتقال (شیفت) و مقیاس نمودن تابع موجک مادر (W) مطابق با رابطه ۱ مشتق می‌گردند.

$$W_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} W\left(\frac{t-k2^j}{2^j}\right) \quad (1)$$

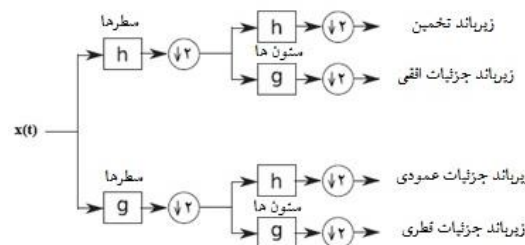
$$h(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} G(k) h(2t - k) \quad (2)$$

$$g(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} H(k) h(2t - k) \quad (3)$$

سطح تجزیه (مقیاس اعمالی تابع موجک) و k پارامتر انتقال بوده و هر دو عدد صحیح می‌باشند. $H(k)$ و $G(k)$ به ترتیب معرف ضرائب توابع ویولت و مقیاس بوده و وابسته به اینکه جز کدام خانواده از موجک‌ها باشند، متفاوت می‌باشند. ضرائب مربوط به موجک (فیلتر) هار در مرجع [۱۷] ارائه شده است. در انتها ضرائب ویولت (جزئیات) سیگنال اولیه $x(t)$ مطابق با رابطه ۴ محاسبه می‌گردند.

$$\gamma_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) W_{j,k}(t) dt \quad (4)$$

وابسته به میزان دقت مورد نیاز، تجزیه زیرباند حاصل از اعمال فیلتر پایین گذر می‌تواند تکرار شود و زیرباند‌های سطوح مختلف تجزیه هرم موجک را تشکیل دهد. مطابق آنچه در شکل ۱ نشان داده شده، در سیگنال‌های دوبعدی (هم‌چون تصاویر) عملیات فیلترینگ ابتدا به صورت افقی (سطرها) انجام شده و در مرحله بعد به صورت عمودی (ستون‌ها) روی سیگنال اعمال می‌شود.



شکل ۱. باندهای فرکانسی حاصل از اعمال یک مرحله (لایه) تبدیل موجک گسسته دوبعدی توسط فیلترینگ بالاگذر و پایین‌گذر [۱۶].

¹ . Multi-resolutional analysis

² . Scaling

در هر مرحله از تجزیه تصویر، حاصل اعمال فیلتر پایین گذر و نمونه کاهی (زیر نمونه برداری)، تصویری با رزولوشن پایین تر نسبت به تصویر اولیه بوده که حاوی کلیات تصویر بوده و تحت عنوان ماتریس ضرائب تخمین موجک (زیرباند فرکانس پایین) شناخته می شود. حاصل اعمال ترکیبی از فیلترهای پایین گذر و بالاگذر همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده، استخراج جزئیات ساختاری تصویر (لبه ها) در سه جهت افقی، عمودی و قطری بوده که ماتریس های ضرائب جزئیات موجک (زیرباند های فرکانس بالا) قلمداد می شوند. ویژگی های استخراج شده از این ماتریس ها، به عبارتی بررسی نحوه توزیع و ارتباط مکانی میان ضرائب موجک (محتوای فرکانسی تصویر) به طور منحصر به فردی قادرند خصوصیات بافت تصویر را توصیف نمایند [۱۷].

۲-۲- آماره های مرتبه اول

زیرباندهای تجزیه شده در اثر اعمال تبدیل موجک دوبعدی حاوی ساختار بافت تصویر در ۳ جهت مجزا بوده و هر کدام زیر تصویر (ماتریس) مجزا تلقی شده که ضرائب تخمین و جزئیات موجک را در بر دارند. در این مطالعه، با هدف آنالیز بافت تصاویر خرابی (حوزه مکان) و زیرباندها (حوزه تبدیل) و استخراج بردار ویژگی، از آمارگان مرتبه اول بر پایه خصوصیات هیستوگرام استفاده شده است. یادآوری می شود تعداد پیکسل های بکارگیری شده جهت استخراج آمارگان اول، برابر با یک و لذا مستقل از مقادیر سطوح خاکستری (ضرائب موجک) دیگر پیکسل ها محاسبه می شوند. به طور معمول، این نوع آمارگان، از محاسبه گشتاورهای آماری هیستوگرام 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 باشند [۱۸]. از تقسیم این مقدار بر مجموع کل تعداد پیکسل های تصویر (مجموع مقادیر هیستوگرام)، هیستوگرام نرمالیزه شده $p(z_i)$ مطابق با رابطه ۵ بدست می آید.

$$p(z_i) = \frac{P(z_i)}{\sum_{i=1}^L P(z_i)} \quad (5)$$

L در این برابر با تعداد سطوح خاکستری موجود (ممکن) در تصویر می باشد. هیستوگرام نرمالیزه شده را می توان به عنوان تابع چگالی احتمالی در نظر گرفته و با محاسبه شاخص های آماری متعددی هم چون میانگین، انحراف استاندارد، گشتاور مرتبه سوم، و آنتروپی ویژگی های بافت تصویر را توصیف نمود.

۳. روند انجام پژوهش و صحت سنجی الگوریتم پیشنهادی

در این بخش از تحقیق، به منظور اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص و تفکیک خودکار خرابی های روسازی، اقدام به برداشت تصاویر خرابی های سطح روسازی آسفالتی نموده و الگوریتم پیشنهادی بر روی این تصاویر مورد آزمایش قرار گرفت. مراحل انجام تحقیق به طور کلی شامل ۵ مرحله می باشد: ۱. برداشت تصاویر خرابی ۲. اعمال تبدیل موجک ۳. استخراج ویژگی بافتی در دو حوزه مکان و تبدیل ۴. کلاس بندی تصاویر ۵. ارزیابی عملکرد کلاس بندی و تشریح نتایج.

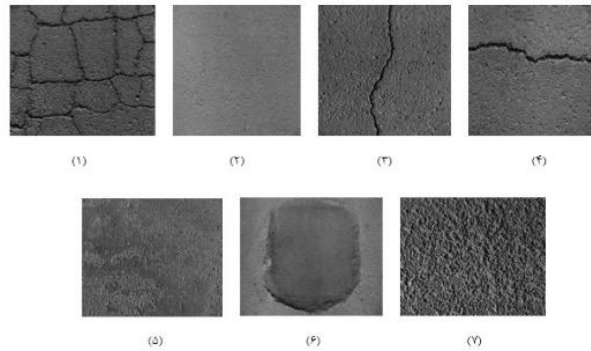
۳-۱- برداشت تصاویر خرابی سطح روسازی آسفالتی

به منظور برداشت تصاویر در کیفیت بالا و شرایط نور کنترل شده، سخت افزاری مطابق شکل ۲ مورد استفاده قرار گرفت. این سخت افزار با حذف کامل نور محیط توسط برزنت و تامین یک روشنایی مصنوعی با شدت ثابت و فاصله ای مشخص از سطح روسازی آسفالتی برای تمامی برداشت ها، ضرورت انجام عملیات نرم افزاری به منظور بهبود و ارتقا تصاویر را برطرف نموده است.



شکل ۲. سخت افزار برداشت تصاویر خرابی در شرایط کنترل شده.

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

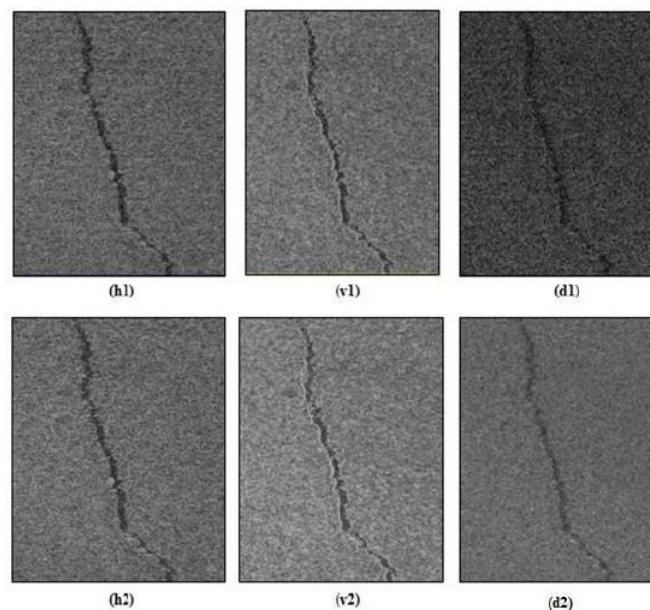


شکل ۳. طبقه بندی تصاویر خرابی برداشت شده از سطح روسازی (۱. ترک پوست سوسماری ۲. آسفالت سالم ۳. ترک طولی ۴. ترک عرضی ۵. قیرزدگی ۶. وصله ۷. عریان شدگی)

۳-۲- اعمال تبدیل موجک و جداسازی باندهای فرکانسی

در این پژوهش از تبدیل موجک گسسته هار به منظور تجزیه تصاویر در ۲ سطح (لایه) استفاده گردید. سطح تجزیه اعمال شده نقش موثری در برجسته سازی و آشکار سازی ساختار لبه ها و ناسازگاری های^{۳۳} موجود در بافت خرابی ایفا می کند. اگر سطح تجزیه اعمال شده کم باشد، الگوی انواع خرابی به طور کامل قابل تفکیک نبوده، از طرفی اگر تجزیه تصاویر در سطوح بالاتری ادامه یابند، با توجه به افزایش مقیاس (کاهش فرکانس) تابع موجک تعداد بیشتری از ضرائب موجک تحت تاثیر قرار گرفته و به تبع ممکن است بی نظمی های بیشتری نیز جذب شوند. به عبارت دیگر علی رغم افزایش دقت فرکانسی، تفکیک پذیری و محلی سازی مکانی (رزولوشن مکانی) کاهش یافته و باعث اغتشاش و تنزل کیفیت ارائه خرابی در زیرباندها می گردد. در نتیجه تحلیل و استخراج ویژگی های این زیرباندها باعث افت دقت تشخیص و طبقه بندی داده ها می شود. در تحقیقات مختلف ثابت شده که تعداد سطوح تجزیه بهینه موجک به منظور شناسایی بسیاری از بافت ها برابر با ۲ می باشد [۱۷].

در این تحقیق پس از اعمال ۲ مرحله تبدیل موجک گسسته دوبعدی هار بر تصاویر خرابی و استخراج ماتریس های ضرائب تخمین و جزئیات تبدیل، شامل جزئیات افقی، عمودی و قطری، مقادیر این ماتریس ها بین صفر و یک نرمالیزه گشته و در انتها عملیات استخراج ویژگی و آنالیز بافت بر روی تمامی ۷ زیر تصویر (زیرباند) تجزیه شده شامل ماتریس ضرائب جزئیات افقی مرتبه اول ($h1$)، ماتریس ضرائب جزئیات عمودی مرتبه اول ($v1$)، ماتریس ضرائب جزئیات قطری مرتبه اول ($d1$)، ماتریس ضرائب جزئیات افقی مرتبه دوم ($h2$)، ماتریس ضرائب جزئیات عمودی مرتبه دوم ($v2$)، ماتریس ضرائب جزئیات قطری مرتبه دوم ($d2$) و ماتریس ضرائب تخمین مرتبه دوم به ترتیب صورت پذیرفت. به عنوان نمونه در شکل ۴ زیرباندهای جزئیات حاصل از دو لایه تجزیه موجک هار بر ترک طولی نشان داده شده است.

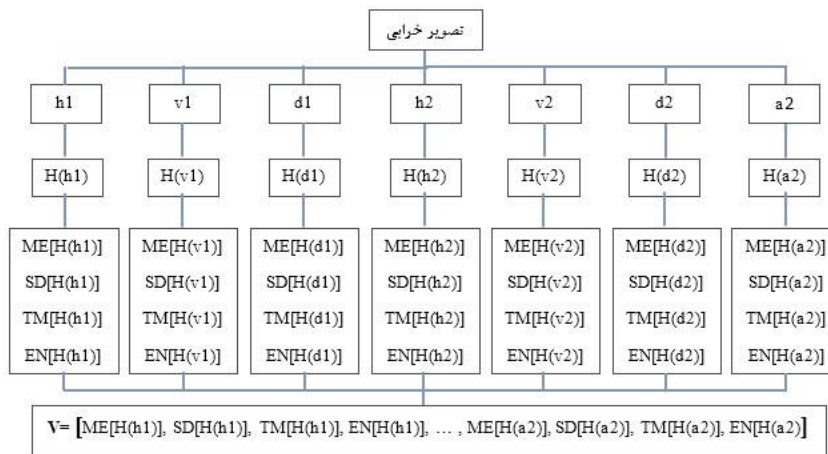


شکل ۴. اعمال ۲ لایه تبدیل موجک گسسته هار و استخراج جزئیات ساختاری بافت ترک طولی.

۳-۳- آنالیز بافت تصاویر توسط خصوصیات آماری هیستوگرام

در این پژوهش ۴ شاخص آماری مرتبه اول شامل میانگین (ME)، انحراف استاندارد (SD)، گشتاور مرتبه سوم (TM) و آنتروپی (EN) از هیستوگرام نرمالیزه شده (H) استخراج شده و درایه‌های بردار ویژگی (V) را تشکیل می‌دهند. این بردار، نماینده بافت تصویر اصلی در فرآیند کلاس‌بندی تصاویر خرابی قلمداد می‌شود. هر کدام از شاخص‌های آماری مذکور که به منظور آنالیز بافت تصویر (یا زیرباند)، محاسبه و استخراج می‌شوند، توصیف‌گر خاصیتی ویژه در تصویر می‌باشند. به عنوان مثال، انحراف استاندارد بیان‌گر میانگین تضاد 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 (یا محتوای فرکانسی زیرباندها) می‌باشد [۱۹]. روابط و شرح این شاخص‌ها (ویژگی‌ها) در مرجع [۲۰] ارائه شده است.

در این پژوهش، روند استخراج بردار ویژگی در ۲ مرحله انجام می‌پذیرد. مرحله اول قبل از اعمال تبدیل موجک و در حوزه مکان صورت می‌گیرد. در این مرحله به طور مستقیم از هیستوگرام هر تصویر خرابی، ۴ آماره مذکور که توصیف‌گر بافت آن بوده استخراج شده و در نهایت برداری با ۴ درایه به عنوان بردار نماینده تصویر اصلی تشکیل می‌گردد. مرحله دوم استخراج بردار ویژگی پس از اعمال دو لایه تبدیل موجک گسسته دوبعدی هار صورت می‌گیرد. در این مرحله، از هیستوگرام هر ۷ زیرباند تجزیه شده از تصویر خرابی، ۴ آماره استخراج شده و در انتها برداری با ۲۸ درایه به عنوان توصیف‌گر بافت و بردار ویژگی نماینده تصویر اصلی تشکیل می‌گردد. در شکل ۵ روند استخراج بردار ویژگی بافتی تصویر به وسیله هیستوگرام، مبتنی بر تبدیل موجک ارائه شده است



شکل ۵. الگوریتم استخراج بردار ویژگی بافتی تصویر خرابی بر پایه خصوصیات آماری هیستوگرام در حوزه تبدیل موجک.

۳-۴- کلاس‌بندی تصاویر خرابی

کلاس‌بندی به فرایند نگاشت یک داده 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 ماهالانوبیس^۱ (D) طبق رابطه (۶) بکارگیری شده است.

$$D^2 = (x - m_c) C_c^{-1} (x - m_c)^T \quad (6)$$

در این رابطه، x بردار ویژگی تصویر آزمایشی، m_c میانگین حسابی درایه‌های نظیر به نظیر بردار ویژگی تصاویر آموزشی کلاس خرابی c (بردار نماینده کلاس آموزشی c) و C_c ماتریس کواریانس مجموعه ویژگی‌های تصاویر آموزشی کلاس c می‌باشد. برتری استفاده از فاصله ماهالانوبیس 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 [۲۱]. بدین ترتیب ۷ بردار نماینده و ۷ ماتریس کواریانس حاصل می‌شود. با محاسبه فاصله ماهالانوبیس بردار ویژگی هر یک از ۲۱۰ تصویر آزمایشی از بردار نماینده هر طبقه، بر اساس کمینه فاصله ماهالانوبیس، هر تصویر آزمایشی به یکی از ۷ کلاس خرابی موجود اختصاص می‌یابد.

¹ . Mahalanobis distance

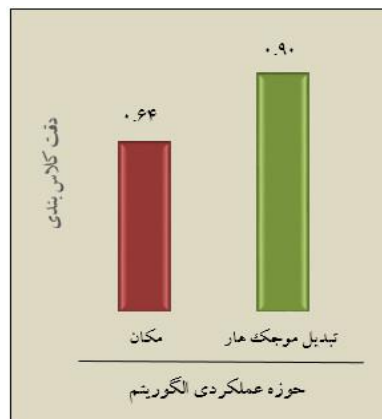
۳-۵- ارزیابی عملکرد کلاس بندی و نتایج تحقیق

ماتریس درهم ریختگی^۱ ماتریسی مربعی بوده و نشان دهنده نحوه تخصیص تصاویر آزمایشی به کلاس های مختلف خرابی می باشد. ابعاد این ماتریس برابر با تعداد کلاس های موجود و درایه های قطری آن، بیان کننده اختصاص صحیح تصویر خرابی به گروه مربوطه می باشد. در این مطالعه، به منظور ارزیابی عملکرد هر یک از الگوریتم های آنالیز بافت، در کلاس بندی خودکار تصاویر خرابی سطح روسازی آسفالتی، از شاخص دقت استفاده شده است. دقت عملکردی از مهم ترین شاخص های مستخرج از ماتریس درهم ریختگی جهت ارزیابی عملکرد کلاس بندی (شناسائی الگو) می باشد [۲۲].

دقت (Ac) بیان گر عملکرد کلی الگوریتم در طبقه بندی خودکار تصاویر بوده و طبق رابطه (۷) از ماتریس درهم ریختگی تصاویر آزمایشی استخراج می گردد.

$$Ac = \frac{\sum_{g=1}^G n_{gg}}{n} \quad (7)$$

در این رابطه، n_{gg} بیان گر تعداد تصاویر متعلق به طبقه g بوده که به طور صحیح به همان طبقه اختصاص یافته (اعضای قطری ماتریس درهم ریختگی)، G برابر با تعداد طبقات و پارامتر n برابر با تعداد کل تصاویر موجود (مجموع کل درایه های ماتریس درهم ریختگی) می باشد. لازم به یادآوری بوده که در این تحقیق، پارامتر G برابر ۷ و پارامتر n برابر با ۲۱۰ می باشد. در شکل ۶ میزان دقت عملکردی الگوریتم های استخراج بردار ویژگی در طبقه بندی خودکار بافت خرابی های روسازی، در حوزه مکان و تبدیل، مقایسه شده است.



شکل ۶. دقت عملکردی کلاس بندی تصاویر خرابی روسازی آسفالتی بر پایه آنالیز آماری بافت در حوزه مکان و تبدیل.

۴. نتیجه گیری

آنالیز آماری بافت تصویر در حوزه تبدیل چنددسته موجک که ترکیبی از روش های آماری و پردازش سیگنال بوده، به معنای بررسی نحوه توزیع ضرائب موجک می باشد. این رویکرد آنالیز بافت، به دلیل تجزیه تصویر و جداسازی زیربنادهای فرکانسی و ارائه (آشکار سازی) جزئیات ساختاری بافت تصویر در جهات مجزا (افقی، عمودی و قطری)، نسبت به تحلیل مکانی بافت تصویر برتری دارد. علاوه بر آن در حوزه تبدیل موجک، از طریق محاسبه ضرب داخلی، میزان شباهت و نزدیکی سیگنال اصلی با الگوی تابع موجک بررسی و تحلیل می شود. نتیجه اعمال این ضرب داخلی و شباهت سنجی، نوعی میانگین گیری و همسان سازی (منظم سازی) مقادیر سطوح خاکستری مولفه های خرابی می باشد. لذا در تشکیل محتوای فرکانسی تصاویر خرابی (ضرائب موجک)، بی نظمی های موجود در مقادیر سطوح خاکستری پیکسل های تصاویر خرابی در حوزه مکان تا حد زیادی برطرف می شود. در نتیجه این امر، آنالیز بافت تصاویر در حوزه تبدیل موجک، عملکرد برتری نسبت به تحلیل مکانی بافت تصویر در تشخیص و تفکیک انواع خرابی های روسازی دارا می باشد. دقت عملکردی کلاس بندی خرابی های سطح روسازی آسفالتی مبتنی بر استخراج ویژگی های بافتی تصویر توسط خصوصیات آماری هیستوگرام در حوزه مکان و تبدیل، به ترتیب برابر با ۶۴ درصد و ۹۰ درصد می باشد.

¹ . Confusion Matrix

۵. 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. 2011. "A comparison of multi-resolution methods for detection and isolation of pavement distress". *Expert Syst. Appl.*, 38(3): 2857-2872.
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. Nallamothe, S. and Wang, K. C. P. 1996. "Experimenting with recognition accelerator for pavement distress identification". *Transport. Res. Record*, 1536: 130-135.
7. 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.
8. Wang, W., Watkins, H. and Kuchikulla, K. 2002. "Digital distress survey of airport pavement surface". Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference, Washington, DC.
9. Zhou, J., Huang, P. S. and Chiang, F. 2006. "Wavelet-based pavement distress detection and evaluation". *Opt. Eng.*, 45(2): 2006-2011.
10. 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.
11. Moghadas Nejad, F. and Zakeri, H. 2011. "An expert system based on wavelet transform and radon neural network for pavement distress classification". *Expert Syst. Appl.*, 38(6): 7088-7101.
12. 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.
13. Srinivasan, G. N. and Shobha, G. 2008. "Statistical texture analysis". *Proc. World Acad. Sci., Eng. Technol.*, 36: 207-213.
۱۴. 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.
15. 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.
16. Wimmer, G., Tamaki, T., Hafner, M., Yoshida, S., Tanaka, S. and Uhl, A. (2016) "Directional wavelet based features for colonic polyp classification", *Medical Image Analysis*, Vol. 31, pp. 16-36.
17. Dettori, L. and Semler, L. (2007) "A comparison of wavelet, ridgelet, and curvelet based texture classification algorithms in computed tomography", *Computers in Biology and Medicine*, Vol. 37, No. 4, pp. 486-498.
18. Aggarawal, N. and Agrawal, R. K. (2012) "First and second order statistics features for classification of magnetic resonance brain images", *Journal of Signal and Information Processing*, No. 3, pp. 146-153.
19. Moghadas Nejad, F. and Zakeri, H. (2011) "An optimum feature extraction method based on Wavelet-Radon Transform and Dynamic Neural Network for pavement distress classification", *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 3, pp. 9442-9460.
۲۰. 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.
21. Tang, X. (1998) "Texture information in run-length matrices", *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 7, No. 11, pp. 1602-1609.
۲۲. شهبان مقدم، رضا، صحاف، سید علی، محمدزاده مقدم، ابوالفضل و پوررضا، حمیدرضا (۱۳۹۶) "تشخیص و طبقه بندی خودکار خرابی های روسازی آسفالتی بر پایه تبدیل موجک مختلط دو درختی"، نهمین همایش قیر و آسفالت ایران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران.