

## تشخیص و طبقه‌بندی خودکار بافت خرابی‌های روسازی آسفالتی بر پایه

### تبدیل موجک

#### مقاله 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

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

دریافت: ۹۹/۰۵/۲۷- پذیرش: ۹۹/۱۱/۰۴

صفحه ۱۹۷-۱۷۵

#### چکیده

ارزیابی خرابی‌های روسازی یکی از مهم‌ترین عناصر سیستم‌های مدیریت روسازی جهت تعیین راهکار بهینه عملیات ترمیم و نگهداری راه محسوب می‌شود. در دو دهه اخیر، تحقیقات گسترده‌ای پیرامون توسعه روش‌های خودکار جهت شناسایی خرابی‌های روسازی انجام گرفته است. اغلب این روش‌ها بر پایه بینایی ماشین و فنون پردازش تصویر می‌باشند. یکی از مهم‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده سیستم‌های بینایی ماشین، فرآیند استخراج ویژگی است. در سال‌های اخیر روش‌های آنالیز چنددقتی همچون تبدیل موجک، ابزار مناسبی جهت تجزیه و تحلیل ویژگی‌های بافتی تصویر با سرعت و دقتی قابل قبول، فراهم آورده است. در این پژوهش، پس از برداشت تصاویر شش گروه مختلف از خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی در شرایط کنترل شده، به منظور تشخیص و طبقه‌بندی آن‌ها، از نوع تبدیل چنددقتی دوبعدی شامل موجک گسسته Haar، موجک گسسته 3 Daubechies، موجک گسسته 1 Coiflet و موجک مختلط دو درختی استفاده گردید. پس از تجزیه تصاویر توسط اعمال تبدیل‌های مذکور، شاخص‌های آماری مرتبه اول بر پایه خصوصیات هیستوگرام و آمارگان مرتبه دوم مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری، به منظور آنالیز آماری بافت باندهای فرکانسی موجک‌ها به کارگیری گردید. نتایج حاصل از طبقه‌بندی تصاویر خرابی بر اساس روش کمینه فاصله ماهالانویس، حاکی از آن است که شاخص‌های آماری مرتبه دوم مستخرج از زیرباندهای تبدیل موجک مختلط دودرختی و موجک گسسته Haar به ترتیب با دقت کلاس‌بندی ۹۹ درصد و ۹۵ درصد، نسبت به سایر الگوریتم‌های توصیف بافت استفاده شده در این تحقیق، در شناسایی انواع خرابی نتایج بهتری به دنبال داشته است. همچنین شاخص‌های آماری حاصل از ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری، به طور میانگین با دقت عملکردی ۸۷ درصد، عملکرد برتری نسبت به خصوصیات آماری هیستوگرام در کلاس‌بندی تصاویر خرابی دارا می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: خرابی‌های روسازی، بافت تصویر، تبدیل موجک گسسته، تبدیل موجک مختلط دو درختی، کمینه فاصله ماهالانویس

#### ۱- مقدمه

فرآیند ارزیابی روسازی در سطح شبکه و هم‌چنین در سطح پروژه محسوب می‌شود [Semnarshad, Kavussi and Saffarzadeh, 2017]. ساده‌ترین روش ارزیابی خرابی‌های روسازی، بازرسی چشمی کارشناسان راه از وضعیت ظاهری راه می‌باشد. این رویکرد ارزیابی روسازی، علاوه بر آن‌که

ارزیابی عملکرد روسازی نقش حیاتی در سیستم مدیریت روسازی<sup>۱</sup> ایفا می‌کند. انتخاب گزینه مناسب و زمان‌بندی صحیح جهت اجرای عملیات ترمیم و نگهداری راه، وابسته به نتایج ارزیابی و بازرسی روسازی می‌باشد. شناسایی و پیمایش خرابی‌های سطحی راه یکی از عناصر اصلی در

ترک‌ها استفاده گردید و در انتها بیش از ۵۰٪ خطای کلاس‌بندی گزارش گردید. استفاده از ویژگی‌های بافتی (استفاده شده در این تحقیق) در مقایسه با دیگر ویژگی‌ها همچون رنگ و ثوابت ممائی اطلاعات بیشتر و دقیق‌تری از الگوهای موجود در نواحی تصویر ارائه داده و در بسیاری از کاربردها از جمله آنالیز تصاویر پزشکی، تشخیص انواع خرابی و غیره عملکرد برتری نسبت به دیگر ویژگی‌ها در شناسائی و تفکیک داده‌ها دارا می‌باشد. لازم به ذکر است که اغلب ویژگی‌های استخراجی با یکدیگر ارتباط و وابستگی داشته و فاصله اقلیدسی قادر به لحاظ نمودن این وابستگی‌ها نمی‌باشد. نالاموتها و وانگ [Nallamutho and Wang, 1996] از تابع خودهمبستگی<sup>۳</sup> به منظور توصیف بافت تصویر<sup>۴</sup> نوع مختلف از ترک‌های آسفالت استفاده نمودند. اندازه‌گیری تناوب فواصل بین الگوها اساس کار این روش است. ویژگی‌های بافتی رابطه مستقیمی با اندازه فواصل یاد شده دارند. مثلا بافت درشت از ریزبافت‌های درشت با فواصل زیاد (تناوب کمتر) و بافت‌های نرم از ریزبافت‌های ریز با فواصل کوچک (تناوب بزرگ‌تر) تشکیل شده است. لذا بافت می‌تواند بر اساس فواصل بین ریزبافت‌ها به وسیله تابع خودهمبستگی توصیف شود.

در این مقاله از روش K-NN به منظور تفکیک تصاویر خرابی استفاده شد و دقت عملکردی کلاس‌بندی به طور میانگین حدود ۵۶٪ گزارش گردید. همان‌طور که ذکر گردید مقادیر سطوح خاکستری تشکیل دهنده بافت خرابی‌های سطح روسازی بسیار بی‌نظم بوده و در نظرگیری ارتباط مکانی مشخص میان تعداد از پیکسل‌ها و تناوب فواصل (تابع خودهمبستگی) عملکرد صحیحی نبوده در حالی که ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری<sup>۵</sup> از مقادیر دو پیکسل مجاور به منظور استخراج آمارگان بهره می‌گیرد. چنگ و همکاران [Cheng, Glazier and Hu, 1999] از ۱۱ ویژگی بافتی مستخرج از ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری (توصیف‌گرهای بافتی هارالیک<sup>۶</sup>) به منظور آنالیز بافت تصاویر ترک‌خوردگی سطح روسازی آسفالتی استفاده نمودند. نتایج حاصل از کلاس‌بندی این تصاویر بر اساس روش درخت تصمیم‌گیری حدود ۳۵٪ خطا به دنبال داشت.

هزینه و زمان عملیات بازرسی را افزایش می‌دهد، وابسته به قضاوت شخصی ارزیابان بوده و نتایجی تکرارناپذیر به دنبال خواهد داشت. 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. اغلب این روش‌ها بر پایه بینایی کامپیوتر و تکنیک‌های پردازش تصویر می‌باشند. در ارزیابی تمام خودکار روسازی، تمامی مراحل برداشت و پردازش داده‌های خرابی به صورت اتوماتیک و بدون دخالت انسان انجام می‌گیرد. اگرچه پروتکل‌هایی متناسب با محدودیت‌های روش‌های خودکار برداشت و آنالیز خرابی‌ها تدوین شده، اما به دلیل بی‌نظمی و بی‌قاعدگی شدید خرابی‌های ایجاد شده در سطح روسازی آسفالتی، موفقیت محدودی در شناسایی و طبقه‌بندی خرابی‌های مختلف حاصل گشته است. علاوه بر این، اغلب سیستم‌های ارزیابی اتوماتیک موجود به دلیل به‌کارگیری الگوریتم‌های پیچیده، بار محاسباتی طولانی و سنگینی داشته و تمرکز اصلی آن‌ها بیشتر بر روی شناسایی و کلاس‌بندی خودکار ترک‌های سطح روسازی بوده است. لازم به ذکر است که ترک‌ها تنها نمایانگر یک جنبه مهم از خرابی‌های روسازی بوده و سایر خرابی‌ها همچون چاله‌ها، وصله‌ها، قیرزدگی و عریان شدگی نیز هم‌چون ترک خوردگی، 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، به‌کارگیری روشی با دقت و کارایی برتر جهت شناسایی و پردازش خودکار خرابی‌ها ضروری می‌باشد [Zakeri, Moghadas Nejad and Fahimifar, 2016, Wang et al., 2015]. چووا و زو [Chua and Xu, 1994] به منظور استخراج ویژگی تصاویر ترک‌های روسازی از ثوابت ممائی<sup>۷</sup> بهره جستند. این گشتاورهای هفت‌گانه که مستقل از انتقال، اندازه، دوران و آینه‌ای شدن تصاویر استخراج می‌شوند، درایه‌های بردار ویژگی را تشکیل می‌دهند. در این مقاله از کمینه فاصله اقلیدسی به منظور دسته‌بندی تصاویر چندین نوع مختلف از

مقدس‌نژاد و ذاکری [Moghadas Nejad and Zakeri, 2011] از ترکیبی از آمارگان مرتبه اول و مرتبه دوم (۱۸ ویژگی) در حوزه تبدیل موجک هار و کوئیفلت ۶ و کرولت استفاده نمودند و از شبکه عصبی دینامیکی به جهت کلاس‌بندی ۷ نوع مختلف از ترک‌خوردگی‌ها شامل ترک بلوکی، ترک پوست‌سوسماری، ترک موئی، ترک طولی، ترک عرضی، ترک قطری و ترک‌های چندگانه بهره‌گیری نمودند. لازم به ذکر است که در مقاله مزبور از روش‌های پیش‌پردازش تصویر هم‌چون بهبود هیستوگرام نیز استفاده گردید. در انتها در حوزه تبدیل موجک گسسته هار، کوئیفلت و تبدیل جهت‌دار کرولت به ترتیب حدود ۴٪، ۱۵٪ و ۲٪ خطای کلاس‌بندی گزارش گردید. روسا [Rosa, 2012] از توصیف کننده‌های آماری بافت تصویر به منظور تقطیع<sup>۹</sup> و شناسایی ناحیه خرابی و با اتصال ترک‌های منفصل و استخراج ویژگی‌های هندسی به طبقه‌بندی انواع ترک خوردگی روسازی آسفالتی پرداخت. اوپانگ و همکاران [Ouyang et al., 2014] از روش‌های مختلف کاهش ابعاد فضای ویژگی (انتخاب ویژگی) به منظور تشکیل بردار ویژگی بافتی نماینده در حوزه تبدیل موجک داوچیچ استفاده نمودند. در مقاله مزبور از ۳ لایه تجزیه هرم موجک و میانگین‌گیری میان زیرباندهای جزئیات افقی، عمودی و قطری به طرق مختلف استفاده شد و نتایج مقایسه گردید. دقت عملکردی کلاس‌بندی در مقاله مذکور بر مبنای میانگین‌گیری میان ویژگی‌های حاصل از ماتریس‌های ضرائب جزئیات جهات مجزا در سطوح تجزیه سه‌گانه، بهترین نتیجه را حاصل نمود. در سال ۲۰۱۶ در مقاله ای کلیه روش‌های برداشت و پردازش نیمه اتوماتیک و تمام اتوماتیک خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی گردآوری و بررسی شده است [Zakeri, Moghadas Nejad and Fahimifar, 2016]. اغلب الگوریتم‌ها و روش‌های آنالیز و شناسایی تمام خودکار خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی بر روی تشخیص و طبقه‌بندی انواع ترک‌خوردگی‌ها تمرکز دارند در صورتی‌که کلاس‌بندی خودکار دیگر خرابی‌های ایجاد شده در سطح روسازی هم‌چون قیرزدگی، عریان‌شدگی و ... نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد که در این پژوهش این امر لحاظ گردیده

در تحقیق مذکور علاوه بر استفاده از تعداد زیادی از ویژگی‌ها و بار محاسباتی زیاد، ماتریس هم‌رخداد تنها در یک جهت تشکیل گردید در حالیکه به منظور تفکیک الگوهای خرابی بایستی توزیع مکانی سطوح خاکستری خرابی‌ها را در جهات مختلف استخراج و آنالیز نمود. وانگ و همکاران [Wang, Watkins and Kuchikulla, 2002] در سال ۲۰۰۲ از ثوابت ممانی مستخرج از ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری به منظور تشکیل بردار ویژگی بافتی بهره جستند و از روش کمینه فاصله اقلیدسی و درخت تصمیم‌گیری به منظور طبقه‌بندی انواع ترک‌های ایجاد شده در سطح روسازی آسفالتی استفاده نمودند و به ترتیب ۵۹٪ و ۶۴٪ دقت عملکردی کلاس‌بندی گزارش نمودند. لی [Lee, 2003] از گشتاورهای آماری هیستوگرام در حوزه تبدیل فوری به منظور استخراج ویژگی‌های بافتی انواع ترک‌های سطح روسازی استفاده نمود و از روش ماشین بردار پشتیبان به منظور تفکیک تصاویر بهره جست و حدود ۷۲٪ دقت عملکردی طبقه‌بندی، حاصل نمود. تبدیل فوری نه تنها در ارائه اطلاعات و جزئیات مهم تصویر خرابی هم‌چون لبه‌ها تبدیلی کارا (تنک) نمی‌باشد، بلکه اطلاعات فرکانس و مکان نیز به طور هم‌زمان وجود ندارند، در حالی‌که برای شناسایی و تمیز دادن الگوهای مختلف خرابی هم‌چون ترک‌های طولی و عرضی، هم اجزای (طیف) فرکانسی و هم مکان رخداد آنها اهمیت فراوان دارد. در ادامه این تحقیق زو و همکاران [Zou et al., 2008] از روش‌های ارتقا تصویر<sup>۷</sup> هم‌چون بهبود هیستوگرام و تبدیل فوری به منظور پیش‌پردازش تصاویر و از روش شبکه عصبی مصنوعی به منظور دسته‌بندی آنها استفاده کردند و حدود ۲۵٪ خطا در طبقه‌بندی تصاویر گزارش نمودند. وانگ [Wang, 2009] از شیوه ماتریس طول شکاف سطوح خاکستری در حوزه تبدیل فوری و تبدیل موجک گسسته<sup>۸</sup> به منظور استخراج بردار ویژگی بافتی انواع ترک‌خوردگی سطح روسازی آسفالتی و از سیستم شبکه عصبی مصنوعی جهت کلاس‌بندی تصاویر بهره‌گیری نمود. دقت عملکردی کلاس‌بندی در حوزه فرکانس (تبدیل فوری) و حوزه فرکانس-مکان (تبدیل موجک) به ترتیب ۷۹٪ و ۸۹٪ گزارش گردید.

می توان به صورت یک تابع از تغییرات مکانی مقادیر شدت روشنایی (سطوح خاکستری در تصاویر تکرنگ) پیکسل‌های تصویر تعریف نمود. از انواع بافت می‌توان به بافت خشن، ظریف، هموار، موج و خطی اشاره نمود. به منظور استخراج ویژگی‌های بافتی تصویر از ابزارهای متعددی همچون توصیف ساختاری، توصیف آماری و تکنیک‌های آنالیز چند دقته<sup>۱۴</sup> استفاده می‌شود [Aggarawal and Agrawal, 2012]. روش‌های آنالیز بافت چند دقته یا به عبارتی توصیف آماری بافت تصویر در حوزه تبدیل که ترکیبی از روش‌های آماری و پردازش سیگنال بوده، به دلیل تجزیه تصویر و جداسازی باندهای فرکانسی (زیرباندها<sup>۱۵</sup>) و توصیف (آشکارسازی) جزئیات ساختاری بافت تصویر در جهات مجزا، نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد. علاوه بر آن در حوزه تبدیل، میزان شباهت (نزدیکی) با الگوی تابع موجک و محتوای فرکانسی تصویر بررسی و تحلیل می‌شود. این امر تا حد زیادی از بی‌نظمی‌های سطوح خاکستری تشکیل‌دهنده بافت خرابی‌ها که در حوزه مکان موجود بوده، می‌کاهد. آنالیزهای چند دقته توسط بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی ساختار بافت تصویر، قادر است اطلاعات مفید تصویر را بدون توجه به تغییر ابعاد همسایگی پیکسل‌ها حفظ کند [Moghadas Nejad and Zakeri, 2011]. همین امر باعث شده روش‌های آنالیز چند دقته هم‌چون تبدیل موجک، در فشرده‌سازی تصویر، کاهش نویز و به ویژه آنالیز بافت، عملکرد بسیار موثری دارا باشد. تبدیل موجک از بانک فیلتر به منظور تجزیه سیگنال و تفکیک باندهای فرکانسی و نمایش آن در حوزه فرکانس-زمان بهره می‌گیرد، به عبارتی موجک‌ها قابلیت استخراج اطلاعات زمانی (اطلاعات مکانی در تصویر) و فرکانسی را به طور هم‌زمان دارند، در صورتی که تبدیل فوریه تنها در حوزه فرکانس جانمایی دارد. تحقیقات نشان داده است که استفاده از تبدیل موجک به علت انعطاف‌پذیری، توانایی بیشتر در تحلیل تصاویر، آنالیز چند دقته، کاهش حجم اطلاعات و در نتیجه افزایش سرعت پردازش داده‌ها، نسبت به تبدیل فوریه کارایی برتری دارد. [Wimmer et al., 2016]. زیرباندهای حاصل از اعمال

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<sup>۱۶</sup> با افزونگی<sup>۱۷</sup> بالا، تعداد ویژگی‌های زیاد، الگوریتم کلاس‌بندی پیچیده و ...) دارا می‌باشند که به تبع منجر به افزایش زمان و هزینه ارزیابی عملکرد روسازی می‌گردد. در این پژوهش با بررسی بسیاری از تحقیقات پیشین در زمینه آنالیز و کلاسه‌بندی انواع بافت‌ها، تعداد اندکی از ویژگی‌ها (۴ توصیف‌گر آماری) اما با بیشترین قدرت تمیزدهندگی به منظور توصیف بافت زیرباندهای موجک‌ها (محتوای فرکانسی تصاویر خرابی) انتخاب گردید و از یک شیوه کلاس‌بندی ساده (کمینه فاصله ماکسیمی<sup>۱۸</sup>) 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. 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 بینایی ماشین در فرآیند کلاس‌بندی و شناسایی الگوی تصویر، محسوب می‌شود. ویژگی‌های مستخرج از تصویر هم‌چون رنگ، بافت، ثوابت ممائی و ویژگی‌های هندسی (شکل) اغلب در قالب برداری عددی بوده و به عنوان 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]. این امر نشان‌دهنده اهمیت و توان‌مندی آنالیز بافت تصویر می‌باشد. بافت تصویر را

تبدیل موجک گسسته دوبعدی، اجزای بافت تصویر را در جهات افقی، قائم و قطری در بر دارند.

این سه جهت ممکن است در تفسیر ساختار بافت و جزئیات لبه‌های (گسستگی‌ها)<sup>۱۶</sup> بسیاری از تصاویر کفایت نکند. به منظور رفع نقائص تبدیل موجک گسسته، بایستی حساسیت جهتی<sup>۱۷</sup> آن افزایش یابد. از جمله معروف‌ترین تبدیل‌های موجک جهت دار می‌توان به تبدیل موجک مختلط دو درختی<sup>۱۸</sup> اشاره نمود. در این پژوهش به منظور تهیه تصاویر خرابی، چندین پارامتر مهم از جمله وضوح، کیفیت بالا و تامین شرایط روشنایی کنترل شده در نظر گرفته شده‌است. سخت افزار مورد استفاده با حذف کامل نور محیط اطراف توسط برزنت و تامین یک نورپردازی مناسب با شدت ثابت برای تمامی برداشتها از یک فاصله و ارتفاع مشخص، ضرورت عملیات نرم‌افزاری به منظور ارتقا تصویر و کاهش نویز حاصل از شرایط محیطی را برطرف نموده‌است. برداشتهای انجام شده از سطح روسازی در هفت گروه مختلف طبقه‌بندی شده‌است. هر گروه شامل تصاویر آموزشی و آزمایشی می‌باشد. در این تحقیق، به منظور تجزیه تصاویر خرابی روسازی آسفالتی و جداسازی زیرباند‌های فرکانسی، از ۴ نوع تبدیل چند دفته بر پایه موجک گسسته (Haar)، موجک گسسته (3 Daubechies)، موجک گسسته (1 Coiflet) و موجک مختلط دو درختی استفاده شده‌است. هر یک از باندهای تجزیه شده موجک‌ها، به عنوان تصویری (ماتریس) مجزا تلقی شده که ساختار بافت تصویر اصلی را در جهات گوناگون در بر دارد. روش‌های آنالیز آماری بافت وابسته به تعداد پیکسل‌های (ضرائب موجک نرمالیزه شده) بکارگیری شده جهت ارائه و توصیف بافت تصویر (زیرباند)، به دو دسته مرتبه اول و مرتبه دوم تقسیم‌بندی می‌شوند. در این تحقیق به منظور آنالیز آماری بافت زیرباندها و تحلیل نحوه توزیع ضرائب موجک (محتوای فرکانسی تصویر خرابی)، از آمارگان مرتبه اول بر پایه هیستوگرام و شاخص‌های آماری مرتبه دوم بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری استفاده شده‌است. شاخص‌های آماری مرتبه اول بر خلاف آمارگان مرتبه دوم بدون نظرگیری ارتباط مکانی میان مقادیر سطوح خاکستری

بیکسل‌های تصویر، محاسبه و استخراج می‌شوند [Singh, 2016]. لازم به ذکر است که در آنالیز بافت تصاویر خرابی در حوزه مکان، آمارگان مرتبه اول مبتنی بر هیستوگرام سطوح خاکستری، نسبت به شاخص‌های آماری مرتبه دوم (ماتریس هم‌رخداد) دقت عملکردی بالاتری در شناسایی و طبقه‌بندی انواع خرابی‌های روسازی آسفالتی حاصل نموده‌است [Shahabian, 2017]. در نهایت، با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده، طبقه‌بندی تصاویر خرابی بر اساس روش کمینه فاصله ماکسیمیوم صورت گرفته و عملکرد کلاس‌بندی توسط ۲ شاخص حساسیت<sup>۲۰</sup> و دقت<sup>۲۱</sup> مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که کلیه محاسبات و تحلیل داده‌های خرابی در این مقاله، توسط جعبه‌ابزار پردازش تصویر نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۱۶ انجام گرفته‌است. در بخش دوم مقاله، مفاهیم تئوری و اطلاعات پایه پیرامون آنالیزهای چند دفته و رویکردهای توصیف بافت استفاده شده در این تحقیق، ارائه شده‌است. در بخش سوم روند پژوهش و نتایج اعتبارسنجی تحلیل و تشریح شده و در بخش چهارم خلاصه‌ای از تحقیق ارائه می‌شود.

## ۲- پیشینه تحقیق

در این بخش، مبانی پایه تبدیلات موجک گسسته و موجک مختلط به همراه مفاهیم شاخص‌های آماری مرتبه اول و دوم ارائه شده‌است.

### ۲-۱- تبدیل موجک گسسته

نخستین بار ملات از تبدیل موجک جهت آنالیز بافت تصویر استفاده نمود [Mallat, 1989]. تبدیل موجک گسسته قادر به تجزیه سیگنال و ایجاد زیرباندهای فرکانسی توسط اعمال توابع جزئی ویولت و مقیاس<sup>۲۲</sup> با نرخ نمونه‌گیری<sup>۲۳</sup> می‌باشد. توابع جزئی ویولت و مقیاس به ترتیب به عنوان فیلتر بالاگذر (g) و پایین‌گذر (h) عمل می‌نمایند [Wimmer et al., 2016]. این توابع جزئی (روابط ۲ الی ۳) از انتقال (شیفت) و مقیاس نمودن تابع موجک مادر (W) مطابق با رابطه ۱ مشتق می‌گردند.

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

معرف ضرائب توابع ویولت و مقیاس بوده و وابسته به اینکه جز کدام خانواده از موجک‌ها باشند، متفاوت می‌باشند.

وابسته به میزان دقت مورد نیاز، تجزیه زیرباند حاصل از اعمال فیلتر پایین گذر می‌تواند مطابق شکل ۱ تکرار شود.

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

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

سطح تجزیه (مقیاس اعمالی تابع موجک) و  $k$  پارامتر انتقال بوده و هر دو عدد صحیح می‌باشند.  $H(k)$  و  $G(k)$  به ترتیب

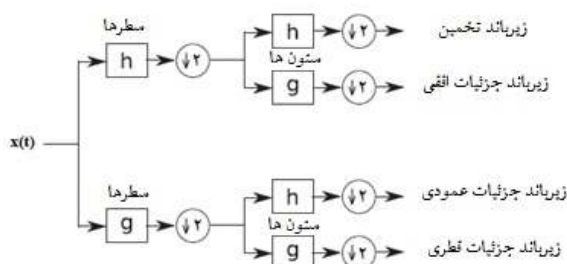


شکل ۱. زیرباندهای فرکانسی حاصل از اعمال دو لایه تجزیه هرم موجک گسسته دوبعدی

در انتها ضرائب ویولت (جزئیات) سیگنال اولیه  $x(t)$  مطابق با رابطه ۴ محاسبه می‌گردد.

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

مطابق آنچه در شکل ۲ نشان داده شده، در حالت دوبعدی فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر ابتدا به سطرها و سپس به ستون‌های سیگنال تصویری اعمال می‌گردند.



شکل ۲. باندهای فرکانسی حاصل از اعمال یک مرحله (لایه) تبدیل موجک گسسته دوبعدی توسط فیلترینگ بالاگذر و پایین‌گذر

[Wimmer et al., 2016]

میان ضرائب موجک (محتوای فرکانسی تصویر) به طور منحصر به فردی قادرند خصوصیات بافت تصویر را توصیف نمایند [Zhu, Song and Chen, 2016]. هر یک از خانواده‌های مختلف تبدیل موجک، توابع جزئی مقیاس و ویولت منحصر به فردی دارند. در این مطالعه، عملکرد ۳ خانواده (فیلتر) معروف و پرکاربرد از موجک‌های گسسته شامل موجک Haar (H)، موجک Daubechies 3 (D3) و موجک Coiflet 1 (C1) مورد ارزیابی قرار گرفت. ضرائب توابع جزئی ویولت و مقیاس (فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر) این موجک‌ها توسط دتوری و سملارا [Dettori and

در هر مرحله از تجزیه تصویر، حاصل اعمال فیلتر پایین‌گذر و نمونه‌کاهی، تصویری با رزولوشن پایین‌تر نسبت به تصویر اولیه بوده که تحت عنوان ماتریس ضرائب تخمین موجک (زیرباند فرکانس پایین) شناخته می‌شود. حاصل اعمال ترکیبی از فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، استخراج جزئیات ساختاری تصویر (لبه‌ها) در سه جهت افقی، عمودی و قطری بوده که ماتریس‌های ضرائب جزئیات موجک (زیرباندهای فرکانس بالا) قلمداد می‌شوند. ویژگی‌های استخراج شده از این ماتریس‌ها، به عبارتی بررسی نحوه توزیع و ارتباط مکانی

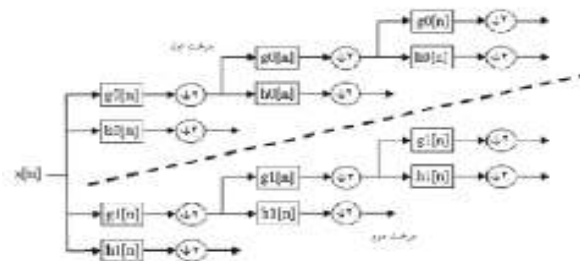
تشخیص مولفه‌های قطری تصویر بوده و همچنین دارای حساسیت جهتی پایینی (افقی، عمودی و قطری) می‌باشند؛ در نتیجه باعث ناکارآمدی تبدیل مذکور در شناسایی گسستگی‌های جهت‌دار شامل لبه‌های منحنی و خطی مورب موجود در بسیاری از تصاویر می‌شود. تبدیل موجک مختلط با اضافه کردن افزودنی محدودی (برابر با ۴)، بر این دو نقص غلبه کرده است [Wimmer et al., 2016]، اما بازسازی کامل توسط فیلترهای مختلط بعد از مرحله اول دشوار خواهد بود زیرا ورودی‌های فیلتر، بعد از مرحله اول، مختلط خواهند بود و این مسئله طراحی فیلتر را برای بازسازی کامل دشوار می‌کند. به منظور حل این مشکل روش جدیدی به نام تبدیل موجک مختلط دو درختی توسط کینگزبوری [Kingsbury, 1998] ارائه شده است. این روش علاوه بر مزایای تبدیل موجک مختلط، امکان بازسازی کامل را فراهم می‌آورد. این روش، دو تبدیل موجک گسسته را در قالب دو درخت (مطابق شکل ۳) به کار می‌گیرد. تبدیل موجک گسسته اول (درخت اول) بخش حقیقی تبدیل مختلط و تبدیل موجک گسسته دوم (درخت دوم) بخش موهومی موجک مختلط را تولید می‌کند. به عبارت دیگر توابع موجک و مقیاس در این تبدیل به شکل مختلط در نظر گرفته می‌شوند. بخش حقیقی و بخش موهومی توابع موجک مختلط دو درختی یک جفت هیلبرت<sup>۴</sup> را تشکیل داده (۹۰° اختلاف فاز داشته) و در نتیجه حوزه پشتیبانی موجک مختلط تنها یک نیمه از محور فرکانسی (طیف فوریه یک‌طرفه) را شامل می‌گردد. این امر باعث شده شمای توابع موجک مختلط دوبعدی بر خلاف توابع موجک گسسته حالت شطرنجی نداشته و کاملاً در جهات مختلف جهت‌دهی شده باشند. دلیل به وجود آمدن حالت شطرنجی در تابع موجک گسسته دوبعدی، حقیقی بودن تابع مربوطه و دو طرفه بودن طیف فرکانسی آن می‌باشد.

[Semler, 2007] ارائه شده است. دلیل انتخاب این ویولت‌ها، علاوه بر فرضیه آزمون و خطا، شمای متفاوت توابع موجک و مقیاس این ویولت‌ها، با در نظر گرفتن عرض ساپورت پنجره (مرتبط با تعداد پیکسل‌های مجاور بکارگیری شده) و طول فیلترهای این موجک‌ها به منظور استخراج ضرائب تخمین و جزئیات می‌باشد. عرض ساپورت و طول فیلترهای موجک Haar به ترتیب برابر با ۱ و ۲ بوده و این مقادیر در موجک‌های (D3) و (C1) مشترکاً به ترتیب برابر با ۵ و ۶ می‌باشند. در این صورت با مقایسه نتایج حاصل از اعمال موجک‌های (D3) و (C1) تاثیر شکل این موجک‌ها در نظر گرفته می‌شود. موجک‌های Daubechies شمایی هم‌چون نوار قلب داشته و نامتقارن بوده در حالی‌که موجک‌های Coiflet نمایی گنبدی‌شکل، منظم و متقارن دارند. لازم به ذکر است که موجک‌های Daubechies در آنالیز تصاویر پزشکی و همچنین پردازش امواج زمین‌لرزه کاربردهای وسیعی دارند. به منظور کسب جزئیات بیشتر در ارتباط با شکل و خواص این موجک‌ها رجوع شود به [Kara and Watsuji, 2003, Mulcahy, 1997].

## ۲-۲- تبدیل موجک مختلط دو درختی

تبدیل موجک گسسته دوبعدی علی‌رغم پردازش چنددقتی و حفظ اجزای فرکانس بالا (لبه‌های تصویر) دارای دو نقص مهم بوده که باعث محدودیت کاربرد آن در بسیاری از تحلیل‌ها می‌شود، این دو نقص عبارتند از:

- نسبت به انتقال (شیفت) متغیر است یعنی یک شیفت کوچک در سیگنال ورودی، منجر به تغییرات نسبتاً شدیدی در ضرایب موجک در اطراف گسستگی‌ها می‌شود. این نقیصه باعث تفاوت در ضرایب موجک دو الگوی یکسان شده و کاهش دقت کلاسه‌بندی داده‌ها را به دنبال خواهد داشت.
- از آنجایی‌که توابع دو بعدی موجک‌های گسسته، جداپذیر و دارای مقادیر حقیقی هستند دارای ضعف در



شکل ۳. اعمال ۳ مرحله (لایه) تبدیل موجک مختلط دو درختی توسط فیلترینگ پایین‌گذر و بالاگذر [Wimmer et al., 2016]

خاکستری برابر با  $(z_i)$  می‌باشند [Aggarwal and Agrawal, 2012]. از تقسیم این مقدار بر مجموع کل تعداد پیکسل‌های تصویر (مجموع مقادیر هیستوگرام)، هیستوگرام نرمالیزه شده  $p(z_i)$  مطابق با رابطه ۵ بدست می‌آید.

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

$L$  در این برابر با تعداد سطوح خاکستری موجود (ممکن) در تصویر می‌باشد. هیستوگرام نرمالیزه شده را می‌توان به عنوان تابع چگالی احتمال در نظر گرفته و با محاسبه شاخص‌های آماری متعددی هم‌چون میانگین، انحراف استاندارد، گشتاور مرتبه سوم، و آنتروپی ویژگی‌های بافت تصویر را توصیف نمود.

#### ۲-۴- شاخص‌های آماری مرتبه دوم

آنالیز بافت ماتریس‌های ضرائب توسط شاخص‌های آماری مستخرج از هیستوگرام، اگرچه اطلاعات مفیدی پیرامون نحوه توزیع مکانی سطوح خاکستری پیکسل‌ها (ضرائب زیرباندها) ارائه می‌نماید اما هیچ اطلاعاتی درباره تعامل مکانی مقادیر سطوح خاکستری (ضرائب موجک) ارائه نمی‌کند. دلیل این موضوع، عدم حساسیت مقادیر هیستوگرام به جابجایی پیکسل‌های تصویر می‌باشد [Singh, 2016]. شاخص‌های آماری مرتبه دوم، ارتباط میان مقادیر سطوح خاکستری (ضرائب موجک) دو پیکسل را در فاصله و جهتی مشخص از یکدیگر در نظر می‌گیرند. شاخص‌های آماری مرتبه دوم اغلب بر پایه ماتریس هم‌رخداد استخراج می‌شوند. این ماتریس در شرح طیف وسیعی از بافت‌ها عملکرد مناسبی دارد [Zayed and Elnemr, 2015]. ماتریس هم‌رخداد، ماتریسی مربعی و نامتقارن بوده که نشان دهنده فرکانس 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  $(\theta)$  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 ۶ تشکیل می‌دهند.

$$p_{ij} = \frac{P(i, j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P(i, j)} \quad (6)$$

تبدیل موجک مختلط دوبعدی از شش تابع موجک مختلط به منظور تجزیه سیگنال تصویری و یافتن زیرباندهای فرکانس بالا که تغییرات محلی و اجزای بافت تصویر (هم‌چون لبه‌ها) را در شش جهت  $15^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $75^\circ$  در بر دارند، استفاده می‌نماید. در واقع در اثر اعمال این تبدیل و لحاظ نمودن بخش موهومی توابع، در هر مرحله از تجزیه، در مجموع ۱۲ زیرباند فرکانس بالا (۶ زیرباند حقیقی و ۶ زیرباند موهومی) استخراج شده که ماتریس‌های ضرائب جزئیات موجک مختلط قلمداد می‌شوند. افزایش حساسیت جهتی در تبدیل موجک مختلط نسبت به موجک گسسته باعث شده مولفه‌های جهت‌دار تصویر در زیرباندهای مختلفی پراکنده نشده و نتیجه برتری در تحلیل و آنالیز بافت تصاویر حاصل نماید. لازم به ذکر است که پراکنده شدن اطلاعات مهم تصویر هم‌چون لبه‌های خرابی در زیرباندهای مختلف موجب افزایش احتمال استخراج ویژگی‌های مشابه از الگوهای متفاوت و تداخل آن‌ها شده و کاهش نرخ دقت طبقه‌بندی داده‌ها را به دنبال دارد.

#### ۲-۳- شاخص‌های آماری مرتبه اول

زیرباندهای تجزیه شده در اثر اعمال تبدیل‌های موجک دوبعدی، هر کدام تصویری (ماتریس) مجزا تلقی شده که ضرائب تخمین و جزئیات موجک را در بر دارند. در این مطالعه، با هدف آنالیز بافت این زیرتصاویر (زیرباندها) و استخراج بردار ویژگی، از آمارگان مرتبه اول بر پایه خصوصیات هیستوگرام و شاخص‌های آماری مرتبه دوم بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری، استفاده شده است. شاخص‌های آماری مرتبه دوم از مقادیر دو پیکسل جهت ارائه و توصیف بافت تصویر بهره می‌گیرد، در صورتی که تعداد پیکسل‌های بکارگیری شده جهت استخراج آمارگان اول، برابر با یک و لذا مستقل از مقادیر سطوح خاکستری (ضرائب موجک) دیگر پیکسل‌ها محاسبه می‌شوند.

شاخص‌های آماری مرتبه اول، مستقیماً از مقادیر سطوح خاکستری پیکسل‌های تصویر، بدون در نظر گرفتن ارتباط مکانی میان آن‌ها محاسبه و استخراج می‌شوند. به طور معمول، این نوع آمارگان، از محاسبه گشتاورهای آماری هیستوگرام تصویر حاصل می‌شوند. هیستوگرام تصویر  $P(z_i)$  بیان‌کننده تعداد پیکسل‌هایی در تصویر بوده که دارای سطح



شاخص‌های آماری مرتبه اول و دوم ۴. کلاس‌بندی تصاویر خرابی و ارزیابی عملکرد آن ۵. بحث و بررسی نتایج.

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

در این تحقیق به منظور برداشت تصاویر خرابی در کیفیت بالا و شرایط نور کنترل شده، سخت افزاری مطابق شکل ۴ مورد استفاده قرار گرفت. این سخت افزار با حذف کامل نور محیط توسط برزنت و تامین 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 و سپس از حالت رنگی به تک‌رنگ با محدوده پویا ۰ تا ۲۵۵ (۸ بیت) تبدیل شدند. در صورت افزایش وسعت و شدت خرابی‌ها در تصویر، چون تعداد سطوح خاکستری تشکیل‌دهنده بافت خرابی افزایش می‌یابد، شناسایی و تفکیک بافت الگوهای مختلف با خطای کمتری همراه می‌باشند.



شکل ۴. سخت افزار برداشت تصاویر خرابی روسازی آسفالتی در شرایط کنترل شده

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.

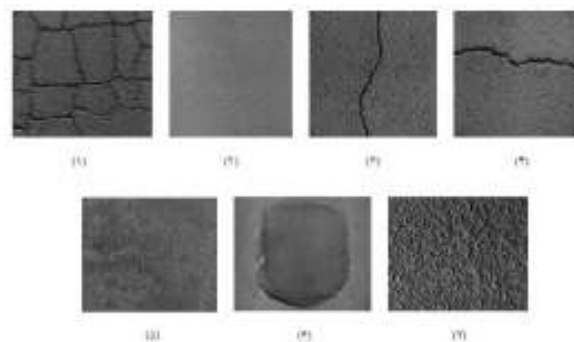
$N$  در این رابطه، ابعاد ماتریس هم‌رخداد می‌باشد. ابعاد ماتریس هم‌رخداد برابر با بیشینه مقدار سطح خاکستری موجود (ممکن) در تصویر می‌باشد. ماتریس هم‌رخداد نرمالیزه شده را می‌توان به عنوان یک تابع چگالی احتمال در نظر گرفته و با محاسبه شاخص‌های آماری مختلفی هم‌چون تضاد<sup>۲۹</sup>، همبستگی<sup>۳۰</sup>، همسانی<sup>۳۱</sup> و همگنی<sup>۳۲</sup> از این ماتریس، بافت تصویر (زیرباند) را آنالیز نمود. به این ویژگی‌ها (آماره‌ها) اصطلاحاً توصیف‌گرهای بافتی هارالیک اطلاق می‌شود.

### ۳-۲- 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 الگوریتم‌های پیشنهادی جهت استخراج ویژگی بر روی این تصاویر مورد آزمایش قرار گرفت. مراحل انجام تحقیق به طور کلی شامل ۵ مرحله می‌باشد: ۱. برداشت تصاویر در شرایط کنترل شده ۲. اعمال تبدیل‌های موجک ۳. استخراج بردار ویژگی بر پایه

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 ۷. عریان-شدگی مطابق شکل ۵ طبقه‌بندی گردید. از هر گروه، تعداد

شکل ۵. 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)



فرکانسی، تفکیک پذیری و محلی سازی مکانی (رزولوشن مکانی) کاهش یافته و باعث اغتشاش و تنزل کیفیت ارائه خرابی در زیرباند ها می گردد. در نتیجه تحلیل و استخراج ویژگی های این زیرباند ها 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 [Dettori and Semler, 2007]. در این تحقیق پس از اعمال ۲ مرحله تبدیل موجک گسسته دوبعدی ( توسط ۳ فیلتر منتخب) 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 (باند) 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 (a2) به ترتیب صورت پذیرفت. در شکل ۶ نحوه اعمال ۲ مرحله تبدیل موجک گسسته دوبعدی Haar بر خرابی ترک پوست سوسماری نشان داده شده است.

### ۲-۳- اعمال تبدیل های موجک و جداسازی باندهای

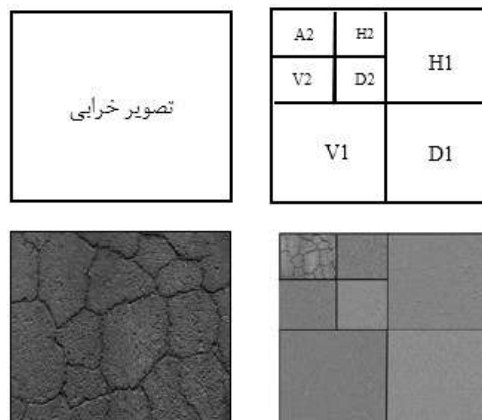
#### فرکانسی

در این پژوهش به منظور تجزیه تصاویر و تولید زیرباندها (ماتریس های ضرائب)، از دو نوع تبدیل موجک شامل تبدیل موجک گسسته و تبدیل موجک مختلط دو درختی استفاده شده است. به منظور مقایسه خانواده های مختلف تبدیل موجک گسسته، از ۳ گروه از فیلترها شامل موجک Haar، موجک 3 Daubechies و موجک 1 Coiflet بهره گیری شده است.

#### ۳-۲-۱- اعمال تبدیل موجک گسسته دوبعدی

در این پژوهش از ۳ گروه مختلف از فیلترهای تبدیل موجک گسسته شامل موجک Haar، 3 Daubechies و 1 Coiflet به منظور تجزیه تصاویر در ۲ سطح استفاده گردید. سطح تجزیه اعمال شده نقش موثری در برجسته سازی و آشکارسازی ساختار لبه ها و ناسازگاری های<sup>۳۳</sup> 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

در این تحقیق، به منظور آنالیز بافت زیرباند های تجزیه شده و توصیف نحوه توزیع محتوای فرکانسی تصاویر خرابی، از آمارگان مستخرج از هیستوگرام و ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری، استفاده شده است.



شکل ۶. اعمال ۲ لایه تبدیل موجک (Haar) و استخراج تخمین و جزئیات ساختاری بافت ترک پوست سوسماری

### ۳-۳-۱- آنالیز آماری بافت بر پایه هیستوگرام سطوح خاکستری

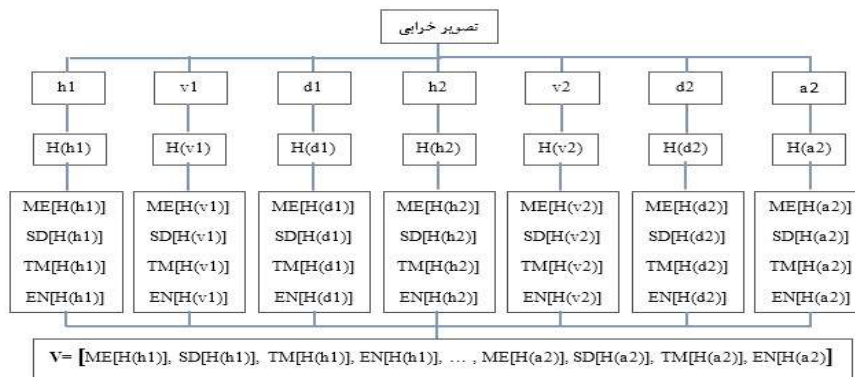
در این پژوهش ۴ شاخص آماری مرتبه اول شامل میانگین (ME)، انحراف استاندارد (SD)، گشتاور مرتبه سوم (TM) و آنتروپی (EN) از هیستوگرام نرمالیزه شده (H) زیرباندهای تجزیه شده توسط اعمال تبدیل های موجک استخراج شده و درایه های بردار ویژگی (V) را تشکیل می دهند. این بردار، نماینده بافت تصویر اصلی در فرآیند کلاس بندی تصاویر خرابی قلمداد می شود. در شکل های ۷ و ۸ روند استخراج بردار ویژگی تصویر به وسیله هیستوگرام، مبتنی بر تبدیل موجک گسسته و تبدیل موجک مختلط دو درختی ارائه شده است. این بردارها به ترتیب ۲۸ و ۴۸ درایه دارا می باشند. هر کدام از شاخص های آماری مذکور که به منظور آنالیز بافت ماتریس های ضرائب، محاسبه و استخراج می شوند، توصیف گر خاصیتی ویژه در تصویر می باشند. به عنوان مثال، انحراف استاندارد بیان گر میانگین تضاد موجود در سطوح خاکستری تصویر می باشد.

گشتاور آماری مرتبه سوم نشان دهنده میزان چولگی هیستوگرام و آنتروپی معیاری از تصادفی بودن توزیع مقادیر سطوح خاکستری پیکسل های تصویر (محتوای فرکانسی زیرباندها) می باشد [Aggarwal and Agrawal, 2012]. روابط و شرح این شاخص ها (ویژگی ها) در پیوست (الف) ارائه شده است.

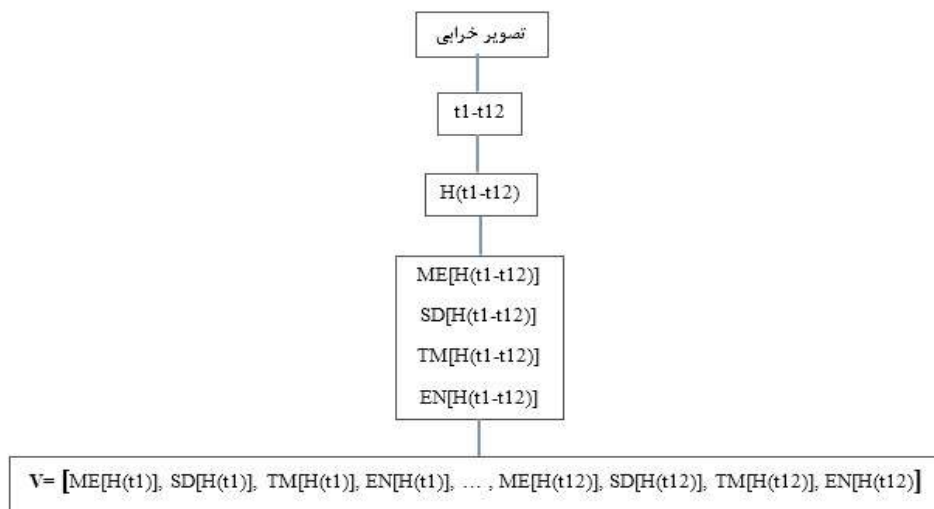
### ۳-۲-۲- اعمال تبدیل موجک مختلط دو درختی

در اثر اعمال این تبدیل، در مجموع ۱۲ زیرباند فرکانس بالا ایجاد شده، ۶ زیرباند بخش حقیقی ماتریس های ضرائب جزئیات (t1-t6) و ۶ زیرباند دیگر بخش موهومی این ماتریس ها (t7-t12) را تشکیل می دهند. زیرباندهای این بخش ها، جزئیات ساختاری بافت خرابی و اطلاعات مربوط به لبه های تصویر را در ۶ جهت مجزا  $\pm 15^\circ$ ،  $\pm 45^\circ$  و  $\pm 75^\circ$  ارائه می نمایند. در این پژوهش، همانند تبدیل موجک گسسته، پس از آنکه مقادیر ماتریس ها بین صفر و یک نرمالیزه گشتند، شاخص های آماری مرتبه دوم و بالاتر از تمامی زیرتصویرها (زیرباندها) به منظور آنالیز بافت تصاویر خرابی استخراج می شوند.

### ۳-۳-۳- توصیف آماری بافت زیرباندها و استخراج بردار ویژگی



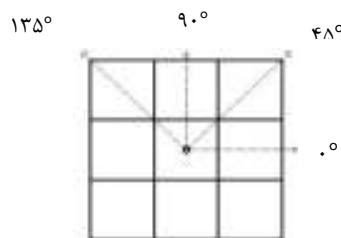
شکل ۷. الگوریتم استخراج بردار ویژگی بر پایه هیستوگرام زیرباندهای تبدیل موجک گسسته



شکل ۸. الگوریتم استخراج بردار ویژگی بر پایه هیستوگرام زیرباندهای تبدیل موجک مختلط دو درختی

مکانی گوناگون سطوح خاکستری در الگوهای خرابی مختلف، ۴ زاویه مجزا (۰°، ۴۵°، ۹۰°، ۱۳۵°) به عنوان پارامتر جهت به منظور تشکیل ماتریس هم‌رخداد مطابق با شکل ۹ انتخاب گردید.

۳-۲- آنالیز آماری بافت بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری  
در این تحقیق، ابعاد ماتریس هم‌رخداد برابر با ۲۵۶ انتخاب شده، پارامتر فاصله برابر با واحد و با توجه به توزیع



شکل ۹. زوایای انتخابی به منظور تشکیل ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری

همبستگی بیان‌گر میزان وابستگی مقادیر یک پیکسل با همسایه‌هایش بوده که به صورت عددی بین ۱- و ۱ تعریف می‌شود. همسانی معیاری از میزان یکنواختی تصویر بوده و مقادیری در محدوده ۰ تا ۱ دارد. همگنی بیان‌گر نزدیکی مکانی توزیع مقادیر اجزای ماتریس هم‌رخداد به قطر بوده و بیشینه آن برای یک ماتریس قطری به دست می‌آید [Zayed and Elnemr, 2015]. روابط و شرح این شاخص‌ها (توصیف‌گرها) در پیوست (ب) ارائه شده است. الگوریتم استخراج بردار ویژگی بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری و تعداد درایه بردارهای ویژگی تصویر، دقیقاً مشابه با روند آنالیز آماری بافت زیرباندها توسط هیستوگرام

پس از نرمالیزه نمودن مقادیر ماتریس هم‌رخداد زیرباندهای تجزیه شده توسط اعمال تبدیل‌های موجک، به منظور مقایسه صحیح میان رویکردهای آنالیز بافت به‌کارگیری شده در این پژوهش ۴ آماره مرتبه دوم شامل تضاد، همبستگی، همسانی و همگنی به طور مجزا در هر ۴ جهت انتخابی استخراج شده و میانگین حسابی آنها به عنوان شاخص‌های نهایی محاسبه می‌شوند. این شاخص‌های نهایی درایه‌های بردار ویژگی نماینده تصویر را تشکیل می‌دهند. هر کدام از آمارگان مذکور که به منظور آنالیز بافت زیرباندهای فرکانسی، محاسبه و استخراج می‌شوند، ویژگی خاصی از باندهای فرکانسی را توصیف می‌نمایند. به عنوان مثال، تضاد بیان‌گر میزان تفاوت مقادیر یک پیکسل با همسایه‌هایش در تصویر می‌باشد.

Shahabian et al., 2017]. 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 کلاس‌های خرابی، بر اساس کمینه فاصله ماهالانویس، هر تصویر آزمایشی به یکی از ۷ کلاس خرابی موجود اختصاص می‌یابد. ماتریس در هم‌ریختگی<sup>۳۴</sup> نشان دهنده نحوه تخصیص تصاویر آزمایشی به کلاس‌های مختلف خرابی می‌باشد. در حقیقت درایه‌های قطری این ماتریس، نشان‌دهنده اختصاص صحیح تصاویر خرابی به گروه مربوطه می‌باشد. ماتریس در هم‌ریختگی تصاویر آزمایشی، حاصل از آنالیز آماری بافت زیرباندهای فرکانسی (زیرتصاویر) مبتنی بر هیستوگرام و ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری در حوزه تبدیل موجک گسسته Haar در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. ماتریس در هم‌ریختگی، حاصل از استخراج بردار ویژگی بر پایه هیستوگرام زیرباندها در حوزه تبدیل موجک Haar

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	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰
ترک طولی	۱	۰	۲۱	۰	۰	۸	۰
ترک عرضی	۰	۰	۰	۲۴	۰	۶	۰
قیرزدگی	۱	۰	۰	۰	۲۵	۴	۰
وصله	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰	۰
عریان‌شدگی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰

جدول ۲. ماتریس در هم‌ریختگی، حاصل از استخراج بردار ویژگی بر پایه هیستوگرام هم‌رخداد زیرباندها در حوزه تبدیل موجک Haar

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	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰
ترک طولی	۰	۰	۳۰	۰	۰	۰	۰
ترک عرضی	۰	۰	۱	۲۵	۱	۰	۳
قیرزدگی	۰	۰	۰	۵	۲۵	۰	۰
وصله	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰	۰
عریان‌شدگی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰

بوده، با این تفاوت که شاخص‌های آماری مرتبه دوم مذکور جایگزین آمارگان مرتبه اول شده‌اند.

### ۳-۴- کلاس‌بندی تصاویر خرابی

کلاس‌بندی به فرآیند نگاشت یک تصویر ناشناخته به مجموعه‌ای از گروه‌های از پیش تعریف شده، اطلاق می‌گردد. از روش کمینه فاصله به منظور کلاس‌بندی تصاویر خرابی استفاده گردیده است. بدین منظور فاصله ماهالانویس طبق رابطه ۷ به کارگیری شده است.

$$d^2 = (x - m_c)^T C_c^{-1} (x - m_c) \quad (7)$$

در این رابطه  $x$  بردار ویژگی تصویر آزمایشی بوده و  $m_c$  میانگین حسابی درایه‌های بردار ویژگی تصاویر آموزشی کلاس خرابی  $c$  (بردار میانگین کلاس آموزشی  $c$ ) می‌باشد.  $C_c$  بیان‌گر 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 کلاس‌بندی می‌شود

ماتریس در هم‌ریختگی تصاویر خرابی، حاصل از توصیف پایه هیستوگرام سطوح خاکستری و ماتریس هم‌رخداد در آماری بافت ماتریس‌های ضرائب موجک 3 Daubechies بر جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب ارائه شده است.

جدول ۳. ماتریس درهم‌ریختگی، حاصل از استخراج بردار ویژگی بر پایه هیستوگرام زیرباند‌ها در حوزه تبدیل موجک 3 Daubechies

نوع خرابی	ترک پوست سوسماری	آسفالت سالم	ترک طولی	ترک عرضی	قیرزدگی	وصله	عریان‌شدگی
ترک پوست سوسماری	۱۰	۰	۰	۲۰	۰	۰	۰
آسفالت سالم	۰	۱۰	۰	۲۰	۰	۰	۰
ترک طولی	۰	۰	۲۷	۰	۰	۰	۳
ترک عرضی	۰	۰	۰	۲۰	۰	۰	۱۰
قیرزدگی	۰	۰	۰	۰	۹	۲۱	۰
وصله	۰	۰	۰	۰	۲	۲۸	۰
عریان‌شدگی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰

جدول ۴. ماتریس درهم‌ریختگی، حاصل از استخراج بردار ویژگی بر پایه ماتریس هم‌رخداد زیرباند‌ها در حوزه تبدیل موجک

### Daubechies 3

نوع خرابی	ترک پوست سوسماری	آسفالت سالم	ترک طولی	ترک عرضی	قیرزدگی	وصله	عریان‌شدگی
ترک پوست سوسماری	۱۳	۰	۰	۰	۱	۱۶	۰
آسفالت سالم	۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰
ترک طولی	۰	۰	۶	۱۷	۷	۰	۰
ترک عرضی	۰	۷	۰	۱۳	۰	۰	۰
قیرزدگی	۰	۰	۰	۰	۳۰	۰	۰
وصله	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰	۰
عریان‌شدگی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰

ماتریس درهم‌ریختگی تصاویر خرابی روسازی، حاصل از آنالیز آماری بافت ماتریس‌های ضرائب، بر پایه شاخص‌های آماری مرتبه اول و دوم در حوزه تبدیل موجک گسسته

Coiflet 1 در جدول‌های ۵ و ۶ به ترتیب نشان داده شده است.

جدول ۵. ماتریس درهم‌ریختگی، حاصل از استخراج بردار ویژگی بر پایه هیستوگرام زیرباند‌ها در حوزه تبدیل موجک 1 Coiflet

نوع خرابی	ترک پوست سوسماری	آسفالت سالم	ترک طولی	ترک عرضی	قیرزدگی	وصله	عریان‌شدگی
ترک پوست سوسماری	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰
آسفالت سالم	۰	۲۸	۲	۰	۰	۰	۰
ترک طولی	۰	۰	۱۸	۱۲	۰	۰	۰
ترک عرضی	۰	۰	۰	۱۰	۰	۰	۲۰
قیرزدگی	۰	۰	۰	۰	۲۸	۰	۲
وصله	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰	۰
عریان‌شدگی	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰

جدول ۶. ماتریس درهم‌ریختگی، حاصل از استخراج بردار ویژگی بر پایه ماتریس هم‌رخداد زیربافته‌ها در حوزه تبدیل موجک Coiflet 1

نوع خرابی	ترک پوست سوسماری	آسفالت سالم	ترک طولی	ترک عرضی	قیرزدگی	وصله	عریان‌شدگی
ترک پوست سوسماری	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۵
آسفالت سالم	۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰
ترک طولی	۰	۰	۳۰	۰	۰	۰	۰
ترک عرضی	۰	۰	۰	۲۴	۳	۰	۳
قیرزدگی	۰	۰	۲۵	۰	۵	۰	۰
وصله	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰	۰
عریان‌شدگی	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۲۸

ماتریس در هم‌ریختگی تصاویر خرابی آزمایشی، حاصل از آنالیز آماری بافت باندهای فرکانسی بر پایه هیستوگرام (آمارگان مرتبه اول) و ماتریس هم‌رخداد (آمارگان مرتبه دوم) در حوزه تبدیل موجک مختلط دو درختی در جدول‌های ۷ و ۸ به ترتیب ارائه شده است.

جدول ۷. ماتریس درهم‌ریختگی، حاصل از استخراج بردار ویژگی بر پایه هیستوگرام زیربافته‌ها در حوزه تبدیل موجک مختلط دو درختی

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	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰
ترک طولی	۱۵	۰	۱۵	۰	۰	۰	۰
ترک عرضی	۰	۰	۰	۱۵	۰	۰	۱۵
قیرزدگی	۰	۰	۰	۰	۳۰	۰	۰
وصله	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰	۰
عریان‌شدگی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰

جدول ۸. ماتریس درهم‌ریختگی، حاصل از استخراج بردار ویژگی بر پایه ماتریس هم‌رخداد زیربافته‌ها در حوزه تبدیل موجک مختلط دو درختی.

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	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰
ترک طولی	۰	۰	۲۹	۱	۰	۰	۰
ترک عرضی	۰	۰	۰	۳۰	۰	۰	۰
قیرزدگی	۰	۰	۰	۰	۳۰	۰	۰
وصله	۰	۰	۰	۰	۱	۲۹	۰
عریان‌شدگی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰

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 جدول‌های ۹ و ۱۰ میزان حساسیت عملکردی الگوریتم‌های آنالیز آماری بافت در کلاس‌بندی خودکار تصاویر خرابی آسفالت ارائه شده است.

در این مطالعه، به منظور ارزیابی عملکرد هر یک از الگوریتم‌های آنالیز بافت، در کلاس‌بندی خودکار تصاویر خرابی سطح روسازی آسفالتی، از دو شاخص حساسیت و دقت استفاده شده است. حساسیت و دقت عملکردی از مهم‌ترین شاخص‌های مستخرج از ماتریس درهم‌ریختگی جهت ارزیابی عملکرد کلاس‌بندی (شناسایی الگو) می‌باشند [Moghadas Nejad and Zakeri, 2011]. حساسیت ( $Sn$ )، توانایی طبقه در شناسایی صحیح تصاویر هر کلاس را توصیف نموده و طبق رابطه ۸ محاسبه می‌گردد.

$$Sn_g = \frac{n_{gg}}{n_g} \quad (8)$$

جدول ۹. حساسیت عملکردی کلاس‌بندی تصاویر خرابی بر پایه هیستوگرام زیرباندهای فرکانسی در حوزه تبدیل‌های موجک

موجک‌ها نوع خرابی	موجک گسسته (Haar)	موجک گسسته (Daubechies 3)	موجک گسسته (Coiflet 1)	موجک مختلط دو درختی (DT-CWT)
ترک پوست سوسماری	۱	۰/۳۳	۰/۷	۱
آسفالت سالم	۱	۰/۳۳	۰/۹۳	۱
ترک طولی	۰/۷	۰/۵	۰/۶۰	۰/۵
ترک عرضی	۰/۸	۰/۵۷	۰/۶۳	۰/۵
قیرزدگی	۰/۸۳	۰/۸	۰/۳۳	۱
وصله	۱	۰/۹۳	۰/۸	۱
عریان‌شدگی	۱	۱	۰/۸	۱

جدول ۱۰. حساسیت عملکردی کلاس‌بندی تصاویر خرابی بر پایه ماتریس هم‌رخداد زیرباندهای فرکانسی در حوزه تبدیل‌های موجک

موجک‌ها نوع خرابی	موجک گسسته (Haar)	موجک گسسته (Daubechies 3)	موجک گسسته (Coiflet 1)	موجک مختلط دو درختی (DT-CWT)
ترک پوست سوسماری	۰/۹	۰/۴۳	۰/۹۳	۱
آسفالت سالم	۱	۱	۱	۱
ترک طولی	۱	۰/۲	۰/۹	۰/۹۷
ترک عرضی	۰/۹۳	۰/۴۳	۰/۸	۱
قیرزدگی	۰/۸۳	۱	۰/۱۷	۱
وصله	۱	۱	۱	۰/۹۷
عریان‌شدگی	۱	۱	۰/۹۳	۱



### ۳-۵- تحلیل و تشریح نتایج

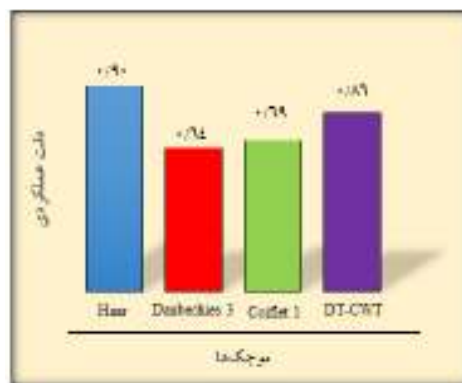
نحوه تجزیه و استخراج جزئیات ساختاری تصویر (نوع و مقیاس تبدیل اعمالی) و همچنین شیوه تحلیل و آنالیز بافت زیرباند های حاصل شده، در شناسایی و طبقه بندی تصاویر اهمیت فراوان داشته و نقش مکمل دارند. همان طور که در مقدمه تحقیق ذکر گردید آنالیز بافت تصویر در حوزه تبدیل موجک به معنای بررسی نحوه توزیع و تعامل مکانی میان ضرائب موجک می باشد. این ضرائب در حقیقت بیانگر میزان شباهت و نزدیکی محتوای فرکانسی سیگنال اصلی با الگوی تابع موجک از طریق محاسبه ضرب داخلی می باشد. نتیجه اعمال این ضرب داخلی و شباهت سنجی، نوعی میانگین گیری و همسان سازی (منظم سازی) مقادیر سطوح خاکستری مولفه های خرابی می باشد. در نتیجه در تشکیل محتوای فرکانسی تصاویر خرابی، بی نظمی های موجود در مقادیر سطوح خاکستری پیکسل های تصاویر خرابی تا حد زیادی برطرف می شود. علاوه بر آن مقادیر سطوح خاکستری تشکیل دهنده بافت اکثر خرابی های سطح روسازی و به تبع ضرائب موجک، ارتباط مکانی مشخصی با یکدیگر داشته لذا با توجه به نظم حاصل شده در محتوای فرکانسی تصاویر خرابی و همچنین حفظ هم زمان اطلاعات فرکانسی و مکانی در تبدیل موجک (بر خلاف تبدیل فوریه)، استخراج آمارگان مرتبه دوم بر پایه ماتریس هم رخداد سطوح خاکستری زیرباند ها، در تمامی تبدیل های اعمالی در این تحقیق (۴ تبدیل)، نتایج برتری (دقت عملکردی بالاتر) نسبت به هیستوگرام (آمارگان مرتبه اول) به دنبال داشته است. لازم به یادآوری است که آمارگان مرتبه دوم بر پایه ارتباط مکانی میان مقادیر دو پیکسل (ضریب) محاسبه می شوند. در این مطالعه، میانگین دقت عملکردی کلاسه بندی تصاویر خرابی روسازی آسفالتی مبتنی بر خصوصیات آماری هیستوگرام زیرباند ها برابر با ۷۷ درصد بوده در حالی که این مقدار بر پایه ماتریس هم رخداد سطوح خاکستری برابر با ۸۷ درصد می باشد.

افزایش حساسیت جهتی تبدیل، اگرچه باعث کاهش پراکندگی و ارائه موثر اطلاعات مهم تصویر هم چون لبه های خرابی شده اما استخراج ویژگی های غیر مناسب با قدرت تمیزدهندگی پایین<sup>۳۵</sup> (حاصل از هیستوگرام) در چنین تبدیلاتی، تاثیر منفی بسزایی در دقت شناسایی و کلاسه بندی

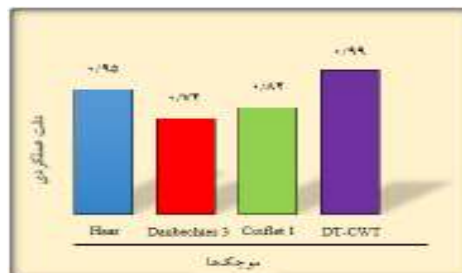
دقت (Ac) بیانگر عملکرد کلی الگوریتم در طبقه بندی خودکار تصاویر بوده و طبق رابطه ۹ از ماتریس درهم ریختگی تصاویر آزمایشی استخراج می گردد. به عبارت دیگر، دقت برابر با میانگین حساسیت عملکردی کلاسه بندی تمامی گروه های خرابی می باشد.

$$Ac = \frac{\sum_{g=1}^{n} n_{gg}}{n} \quad (9)$$

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 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 های ۱۰ و ۱۱ میزان دقت عملکردی الگوریتم های استخراج بردار ویژگی، مبتنی بر شاخص های آماری مستخرج از زیرباند های تبدیل های موجک مقایسه شده است.



شکل ۱۰. دقت عملکردی کلاسه بندی تصاویر خرابی سطح روسازی آسفالتی بر پایه هیستوگرام زیرباند ها در حوزه تبدیل های موجک.



شکل ۱۱. دقت عملکردی کلاسه بندی تصاویر خرابی سطح روسازی آسفالتی بر پایه ماتریس هم رخداد زیرباند ها در حوزه تبدیل های موجک

-با افزایش عرض ساپورت فیلترها (تعداد پیکسل‌های درگیر شده)، اهمیت شکل تابع موجک افزایش می‌یابد و بایستی موجکی انتخاب شود که شکل آن با الگوی (نرخ) تغییرات مقادیر سطوح خاکستری تشکیل‌دهنده جزئیات بافت و لبه‌های خرابی هم‌خوانی و سازگاری بیشتری داشته باشد. موجک (C1) به دلیل شکل منظم‌تر و گنبدی‌شکل (افزایش و کاهش تدریجی مقادیر تابع)، دقت عملکردی برتری (بر پایه تمامی شاخص‌های توصیف‌گر بافت) نسبت به تابع موجک (D3) در شناسایی الگوی انواع خرابی‌ها داشته است.

-اگرچه الگوی کلی ترک‌های طولی و عرضی مشابه با یکدیگر بوده و تمامی الگوریتم‌های آنالیز بافت استفاده شده در این پژوهش، حساسیت عملکردی کلاسه‌بندی نسبتاً نزدیکی در شناسایی این خرابی‌ها حاصل نموده‌اند، 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 تمامی الگوریتم‌های استخراج بردار ویژگی بافتی نسبت به این بی‌نظمی‌ها، شدیداً حساس می‌باشند. اختلاف حساسیت عملکردی طبقه‌بندی این کلاس‌های خرابی بر مبنای اکثر الگوریتم‌های آنالیز بافت استفاده شده در این تحقیق، کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد.

-در صورت استفاده از موجک‌هایی با عرض ساپورت و پنجره‌ای عریض، به منظور استخراج لبه‌های انواع ترک‌خوردگی (طولی، عرضی و پوست‌سوسماری) که اطلاعات مهم (تمیز دهنده) و جزئیات ساختاری بافت خرابی‌ها محسوب می‌شود، بایستی از موجک‌هایی گنبدی‌شکل هم‌چون CDF و یا موجک‌های Coiflet استفاده نمود، چون تغییرات مقادیر سطوح خاکستری در اطراف این گسستگی‌ها به صورت تدریجی کاهش و سپس افزایش می‌یابد (مطابق با الگوی گنبدی‌شکل تابع موجک Coiflet)، اما در تشخیص خرابی قیرزدگی چون وقوع قیرزدگی در سطح آسفالت (دیدگاه میکرو) به صورت پراکنده و نقطه‌ای است، به منظور شناسایی لبه‌ها و تغییرات محلی بافت این نوع خرابی، بایستی از موجک‌هایی که تغییرات مقادیر آن به صورت ناگهانی فراز و نشیب دارد (هم‌چون Daubechies) استفاده نمود. میانگین حساسیت عملکردی کلاس‌بندی

داده‌ها دارد؛ به عبارت دیگر به شرطی حساسیت جهتی بالا در فرآیند تشخیص و طبقه‌بندی بافت‌ها کارساز است که ویژگی‌ها و شاخص‌هایی مناسب (حاصل از ماتریس هم‌رخداد) از زیرباندهای حاصله استخراج شوند، در غیر این صورت افزایش حساسیت جهتی تبدیل و افزایش زیرباندها و به تبع افزایش تعداد ویژگی‌ها، تاثیر قابل توجهی در نتیجه شناسایی و دسته‌بندی داده‌ها ایجاد نمی‌نماید. دقت عملکردی کلاس‌بندی تصاویر خرابی در حوزه تبدیل موجک مختلط دودرختی بر پایه ماتریس هم‌رخداد در مقایسه با هیستوگرام بیش از ۱۰ درصد برتری دارد. آنالیز بافت خرابی‌ها مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری در حوزه تبدیل موجک مختلط دودرختی با دقت عملکردی ۹۹٪، برترین الگوریتم در کلاسه‌بندی خودکار بافت تصاویر خرابی سطح روسازی آسفالتی در میان تمامی الگوریتم‌های به کارگیری شده در این پژوهش (۸ الگوریتم) بوده است.

-در الگوهای بی‌نظمی هم‌چون خرابی‌های ایجاد شده در سطح روسازی آسفالتی که ماهیتی تصادفی داشته، وارد کردن و درگیر نمودن تعداد زیادی از پیکسل‌ها در استخراج ضرائب و شاخص‌ها عملکرد صحیحی نمی‌باشد، زیرا احتمال وقوع و جذب بی‌نظمی‌ها افزایش می‌یابد. به همین دلیل است که توابع (فیلتر) موجک‌های Daubechies 3 (D3) و Coiflet 1 (C1) چون عرض ساپورت (پنجره) بزرگتری نسبت به موجک Haar (H) داشته و سهم (پیکسل‌های) بیشتری از سیگنال اصلی را به منظور استخراج ضرائب موجک بکار می‌گیرند، دقت عملکردی ضعیف‌تری بر پایه تمامی رویکردهای توصیف آماری بافت، در تشخیص و کلاسه‌بندی تصاویر خرابی نسبت به موجک گسسته Haar که از میانگین وزنی دو پیکسل مجاور به منظور استخراج ضرائب موجک استفاده می‌نماید، [Dettori and Semler, 2007] حاصل نموده‌اند. میانگین دقت عملکردی کلاس‌بندی در حوزه تبدیل موجک گسسته دویعدی (H)، (D3) و (C1) به ترتیب برابر با ۹۲/۵۰ درصد، ۶۸ درصد و ۷۵/۵۰ درصد می‌باشد. با بکارگیری موجک Haar و استفاده از آمارگان مستخرج از ماتریس هم‌رخداد زیرباندها جهت استخراج بردار ویژگی، بیش از ۹۵٪ تصاویر خرابی برداشتی به طور صحیح به کلاس مربوطه تخصیص یافته‌اند.

بیشتر در بیان و ارائه لبه‌های منحنی‌شکل و خطی مورب (جهت‌دار) نمود دارد. از آنجائیکه اطلاعات مهم تصاویر خرابی سطح 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) موجک اعمالی و ویژگی‌های مستخرج از زیرباندها تمرکز نمود تا افزایش حساسیت جهتی تبدیل (هم‌چون استفاده از تبدیل موجک مختلط دودرختی). به همین دلیل است که استخراج آمارگان مرتبه دوم زیرباندهای موجک گسسته Haar با دقت عملکردی ۹۵ درصد نتیجه بسیار قابل قبولی در شناسایی و تفکیک الگوهای مختلف خرابی حاصل نموده است.

میزان حساسیت جهتی تبدیل اعمالی بایستی متناسب با کاربرد آنالیز و نوع بافت تصویر هدف انتخاب گردد، زیرا با استخراج جزئیات ساختاری بافت تصاویر در جهات متعدد، به همان نسبت افزونگی بیشتری نیز ایجاد شده که این امر موجب افزایش بار محاسباتی و به تبع افزایش زمان و هزینه آنالیز و تحلیل تصاویر می‌شود و علاوه بر آن لزوم شناسایی ویژگی‌هایی با قدرت تمیزدهندگی بالاتر، به شدت افزایش می‌یابد. به طور کلی شیوه آنالیز تصاویر و الگوریتم اعمالی بایستی علاوه بر دارا بودن دقت کلاس‌بندی بالا، به لحاظ سادگی و بار محاسباتی بهینه باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از ۴ ابزار آنالیز چند دقته و ۲ روش توصیف آماری بافت تصویر که در مجموع تشکیل ۸ الگوریتم استخراج بردار ویژگی را می‌دهد، به منظور شناسایی و طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی استفاده شده است. پس از برداشت تصاویر خرابی در شرایط کنترل شده، به جهت جداسازی زیرباندهای فرکانسی، از تبدیل‌های موجک دوبعدی شامل موجک گسسته Haar، موجک گسسته Daubechies 3، موجک گسسته Coiflet 1 و موجک مختلط دو درختی استفاده شده است. در این مطالعه، از شاخص‌های آماری مستخرج از هیستوگرام و ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری، به منظور

ترک‌های طولی، عرضی و پوست‌سوسماری در حوزه موجک C1 به ترتیب برابر با ۷۵ درصد، ۷۲ درصد و ۸۲ درصد می‌باشد در حالی که این مقادیر در حوزه تبدیل موجک D3 به طور میانگین برابر با ۳۵ درصد، ۵۰ درصد و ۳۸ درصد می‌باشد. میانگین نرخ حساسیت عملکردی کلاس‌بندی خرابی قیرزدگی در حوزه موجک D3 برابر با ۹۰ درصد بوده در حالی که در حوزه تبدیل موجک C1 برابر با ۲۵ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است که الگوی بافتی خرابی قیرزدگی جهت‌دار بوده، به عبارتی ویژگی‌های بافتی این نوع خرابی در جهات متعددی تشکیل می‌شود. این امر باعث شده تبدیل موجک مختلط دودرختی حساسیت عملکردی بهتری نسبت به موجک‌های گسسته، در تشخیص این نوع خرابی داشته باشد.

اکثر الگوریتم‌های آنالیز بافت استفاده شده در این پژوهش، در تشخیص و تفکیک خرابی عریان‌شدگی و آسفالت سالم (بدون خرابی) خطایی در بر نداشتند (حساسیت عملکردی بالا)، زیرا سطوح خاکستری این کلاس‌ها، به ترتیب یک بافت کاملاً زبر (ناشی از تغییرات پی در پی مقادیر سطوح خاکستری ناشی از قیر و سنگدانه) و کاملاً صاف را تشکیل داده و الگوی بافتی آن‌ها کمتر دچار بی‌نظمی می‌باشند. لازم به ذکر است که در صورت وجود نظم در مقادیر سطوح خاکستری بافت، محتوای فرکانسی تصویر (ضرائب موجک) نیز به تبع دارای الگوی منظمی می‌باشد.

وصله جری از عمیات ترمیم 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، در نتیجه این خرابی ماهیت ترافیکی و یا جوی نداشته و به صورت مصنوعی توسط انسان ایجاد می‌شود. این امر باعث شده بافت این نوع خرابی بی‌نظمی کمتری داشته و اغلب الگوریتم‌ها، عملکرد مناسبی در تشخیص و طبقه‌بندی آن داشته باشند.

تفائص تبدیل موجک گسسته در آنالیز تصاویر هم‌چون حساسیت جهتی پایین و پراکندگی اطلاعات مولفه‌های بافتی،

29. Short Run Emphasis (SRE)
30. Long Run Emphasis (LRE)
31. Gray Level Non-uniformity (GLN)
32. Run Percentage (RP)
33. Anomaly
34. Confusion Matrix
35. Discriminating Power

## ۶- مراجع

-شهبان 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: سیدعلی صحاف و ابوالفضل محمدزاده مقدم، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

-شهبان 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 زیر ساخت های حمل و نقل، دوره سوم، شماره سوم، ص. ۱-۲۲.

-سمنارشاد، مح.س. کاووسی، ا. و صفارزاده، م.، (۱۳۹۶)، "ارائه مدل نگهداری و بهسازی شبکه راه‌های اصلی با به کارگیری تحلیل هزینه چرخه عمر -مطالعه موردی استان خراسان جنوبی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره نهم، شماره دوم، ص. ۲۰۹-۲۳۰.

-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.

-Cheng, H. D., Glazier, C. and Hu, Y. G., (1999), "Novel approach to pavement cracking detection based on fuzzy set theory", *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 270-280.

-Chua, K. M. and Xu, L., (1994), "Simple procedure for identifying pavement distresses from video images", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 120, No. 3, pp. 412-431.

-Dettori, L. and Semmler, 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.

توصیف بافت زیربناها و استخراج بردار ویژگی بهره‌گیری شده است. در انتها، روش کمینه فاصله ماهالانویس به منظور تفکیک و طبقه‌بندی تصاویر آزمایشی به کارگیری گردید. نتایج اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد کلاس‌بندی، نشان می‌دهد که الگوریتم استخراج بردار ویژگی توسط ماتریس هم‌رخداد بر پایه تبدیل موجک مختلط دودرختی، نسبت به سایر الگوریتم‌ها عملکرد برتری داشته است. توصیف آماری بافت تصاویر خرابی روسازی بر پایه آمارگان مرتبه دوم در حوزه موجک مختلط دودرختی با دقت عملکردی کلاس‌بندی ۹۹ درصد تنها ۴٪ در مقایسه با تبدیل موجک گسسته Haar (دقت عملکردی کلاس‌بندی ۹۵ درصد) برتر بوده، اما نسبت افزونگی ۴:۱ است، بنابراین تصمیم‌گیری در ارتباط با انتخاب شیوه آنالیز بکارگیری شده در دستگاه‌های ارزیابی خودکار خرابی‌های روسازی منوط به میزان دقت لازم، بودجه پروژه ارزیابی جاده و نظر کارفرما می‌باشد.

## ۵- پی‌نوشت‌ها

1. Pavement Management System (PMS)
2. Moment Invariants
3. Auto-correlation function
4. Image Texture
5. Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM)
6. Haralick Texture Descriptors
7. Image Enhancement
8. Discrete Wavelet Transform (DWT)
9. Segmentation
10. Directional Selective
11. Redundancy
12. Minimum Mahalanobis Distance
13. Texel
14. Multi-Resolution Analysis
15. Sub-band
16. Singularity
17. Directional Sensitivity
18. Dual-Tree Complex Wavelet Transform
19. Gray Level Run Length Matrix (GLRLM)
20. Sensitivity
21. Accuracy
22. Scaling
23. Sub-Sampling
24. Hilbert Pair
25. Contrast
26. Correlation
27. Energy
28. Homogeneity

- Singh, R., (2016), "A comparison of gray-level run length matrix and gray-level co-occurrence matrix towards cereal grain classification", *International Journal of Computer Engineering & Technology (IJCET)*, Vol. 7, No. 6, pp. 9-17.
- Srinivasan, G. N. and Shobha, G., (2008), "Statistical texture analysis", *proceedings of world academy of science, engineering and technology*, No. 36, pp. 207-213.
- Tang, X., (1998), "Texture information in run-length matrices", *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 7, No. 11, pp. 1602-1609.
- 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", *journal of traffic and transportation engineering*, Vol. 2, No. 6, pp. 391-398.
- Wang, K. C. P., (2009), "Wavelet-based pavement distress image edge detection with Troust algorithm", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2024, pp.73-81.
- Wang, W., Watkins, H. and Kuchikulla, K., (2002), "Digital distress survey of airport pavement surface", *Federal aviation administration airport technology transfer conference*.
- 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.
- Zakeri, H., Moghadas Nejad, F. and Fahimifar, A., (2016), "Image based techniques for crack detection, classification and quantification in asphalt pavement: a review", *Archives of Computational Methods in Engineering*, pp. 1-43.
- Zayed, N. and Elnemr, H., (2015), "Statistical analysis of haralick texture features to discriminate lung abnormalities", *International Journal of Biomedical Imaging*, Vol. 2015, Article ID 267807, pp. 1-7.
- Kingsbury, N. G., (1998), "The dual-tree complex wavelet transform: a new technique for shift invariance and directional filters", *Proceedings of the IEEE Digital Signal Processing Workshop*, No. 98, pp. 9-12.
- Lee, D., (2003), "A robust position invariant artificial neural network for digital Pavement crack analysis", *Technical report, TRB Annual Meeting, 2009, Washington, DC, USA*.
- Mallat, S., (1989), "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 11, No. 7, pp. 674-693 .
- 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.
- Moghadas Nejad, F. and Zakeri, H., (2011), "A comparison of multi-resolution methods for detection and isolation of pavement distress", *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 3, pp. 2857-2872.
- Moghadas Nejad, F. and Zakeri, H., (2011), "An expert system based on wavelet transform and radon neural network for pavement distress classification", *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 3, pp. 7088-7101.
- Nallamothe, S. and Wang, K. C. P., (1996), "Experimenting with recognition accelerator for pavement distress identification", *Transportation Research Record*, Vol. 1536, pp. 130-135.
- Ouyang, A., Dong, Q., Wang, Y. and Liu, Y., (2014), "The classification of pavement crack image based on beamlet algorithm", in: *7th IFIP WG 5.14 international conference on computer and computing technologies in agriculture, CCTA 2013*.
- Rosa, P., (2012), "Automatic pavement crack detection and classification system", *Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.*, pp. 57-65.

-Zou, Q., Cao, Y., Li, Q., Mao, Q. and Wang, S., (2008), "Cracktree: automatic crack detection from pavement images", Pattern Recognition Letters, Vol. 33, No. 3, pp. 227-238.

-Zhu, Z., Song, R. and Chen, S., (2016), "A novel method of image features extraction and application", 31st Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, Wuhan, China.

### پیوست‌ها

پیوست الف. روابط و شرح توصیف‌کننده‌های بافت تصویر مبتنی بر هیستوگرام سطوح خاکستری [Gonzalez and Woods, 2006].

ویژگی	شرح	رابطه
میانگین	شاخصی از متوسط مقدار سطوح خاکستری موجود در تصویر	$m = \sum_{i=1}^L z_i p(z_i)$
انحراف استاندارد	معیاری از متوسط تضاد موجود در مقادیر سطوح خاکستری تصویر	$\sigma = \sum_{i=1}^L (z_i - m)^2 p(z_i)$
گشتاور مرکزی مرتبه سوم	شاخصی از میزان چولگی هیستوگرام تصویر می‌باشد. این مقدار برای یک هیستوگرام متقارن برابر با صفر می‌باشد.	$\sum_{i=1}^L (z_i - m)^3 p(z_i)$
آنتروپی	معیاری از میزان تصادفی بودن توزیع مقادیر سطوح خاکستری تصویر	$-\sum_{i=1}^L p(z_i) \log_2 p(z_i)$

پیوست (ب). روابط و شرح توصیف‌کننده‌های بافت تصویر مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری [Shahabian, 2017]

ویژگی	شرح	رابطه
تضاد	بیان‌گر اختلاف و تضاد سطح خاکستری یک پیکسل با همسایه هایش در کل تصویر است. مقدار آن بین ۰ و $(N-1)^2$ است.	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (i - j)^2 p_{ij}$
همبستگی	بیان‌گر میزان وابستگی سطح خاکستری یک پیکسل با مقادیر همسایه هایش 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.	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{(i - m_r)(j - m_c) p_{ij}}{\sigma_r \sigma_c}$
همسانی	بیان‌گر یکنواختی بوده و مقداری در محدوده ۰ و ۱ دارد. ۱ به معنای یک تصویر کاملاً یکنواخت است.	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ij}^2$
همگنی	بیان‌گر نزدیکی مکانی توزیع اجزای ماتریس هم‌رخداد به قطر است. مقداری در محدوده ۰ و ۱ داشته و بیشینه مقدار برای یک ماتریس قطری به دست می‌آید.	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{p_{ij}}{1 +  i - j }$

# Automatic Recognition and Classification of Asphalt Pavement Distress Texture Based on Wavelet Transform

*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.*

*E-mail: asahaf@um.ac.ir*

Received: March 2021-Accepted: July 2021

## ABSTRACT

Inspection of the pavement distresses is one of the most prominent phases of pavement management process in regard with determining optimum pavement maintenance strategies. Over the past few decades, a considerable number of efforts have been carried out on developing automatic methods for objectively distress detection all of which rely on machine vision and image processing techniques. One of the most important assets comprising machine vision systems is the feature extraction process. In the past few years, multi-resolitional analysis approaches, namely wavelet transforms has provided a great tool for fast and accurate image texture representation. In the present study, after acquisition of six different types of asphalt pavement distresses under controlled condition, in order to identify and categorize them, four 2-D multi-resolution transforms including Haar discrete wavelet, Daubechies3 discrete wavelet, Coiflet1 discrete wavelet and dual-tree complex wavelet were utilized. After decomposition of the distress images by applying the aforementioned transforms, first-order statistical indices based on histogram and second-order statistics based on gray level co-occurrence matrix were employed, in order to describe the wavelet frequency sub-bands texture. The distress classification results based on minimum Mahalanobis distance classifier indicate that extracting second-order statistics from the sub-bands of the dual-tree complex wavelet and Haar discrete wavelet transforms, yielding classification accuracy of 99% and 95% respectively, outperform other feature extraction algorithms in distress recognition. Furthermore, statistical indices acquired from gray level co-occurrence matrix with average classification rate of 87%, obtained superior performance in distress images discrimination compared to histogram statistics.

**Keywords:** Pavement Distress, Image Texture, Discrete Wavelet Transform (DWT), Dual-Tree Complex Wavelet Transform (DT-CWT), Minimum Mahalanobis Distance Classifier