

# تشخیص و طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های روسازی بر پایه آنالیز بافت تصویر در حوزه مکان و تبدیل

رضا شهبان مقدم، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

سید علی صحاف (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

ابوالفضل محمدزاده مقدم، استادیار دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

حمیدرضا پوررضا، استاد، گروه کامپیوتر، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

E-mail: asahaf@um.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۲۱ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۱۵

## چکیده

ارزیابی عملکرد روسازی یکی از مهم‌ترین مراحل تعیین استراتژی بهینه، در عملیات مدیریت روسازی محسوب می‌شود. در دو دهه اخیر تحقیقات گسترده‌ای پیرامون توسعه روش‌های خودکار، جهت ارزیابی خرابی‌های روسازی انجام گرفته است. اغلب این روش‌ها بر پایه بینایی ماشین و تکنیک‌های پردازش تصویر هستند. در سال‌های اخیر روش‌های آنالیز چند دقتی همچون تبدیل موجک، ابزار مناسبی جهت تحلیل و شناسایی هوشمند خرابی‌ها با سرعت و دقتی قابل قبول فراهم آورده است. در این مطالعه، روشی بر مبنای تبدیل موجک به کارگیری شده که قادر به آنالیز صفحه‌ای بافت روسازی با در نظر گرفتن اجزای افقی، قائم و قطری بافت روسازی است. در این پژوهش پس از اعمال تبدیل موجک گسسته و جداسازی باندهای فرکانسی تصویر توسط چهار خانواده مختلف از موجک‌ها، ویژگی‌های بافتی زیرباندها بر مبنای ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری استخراج شده و با نتایج حاصل از آنالیز بافت تصویر در حوزه مکان مقایسه گردید. در انتها روش کمینه فاصله ماهالانویس به منظور تفکیک و طبقه‌بندی تصاویر خرابی در ۷ کلاس شامل ترک پوست-سوسماری، آسفالت سالم (بدون خرابی)، ترک طولی، ترک عرضی، قیرزدگی، وصله و عریان‌شدگی به کارگیری گردید. نتایج اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد کلاس‌بندی حاکی از آن است که طبقه‌بندی تصاویر خرابی توسط آنالیز بافت تصویر در حوزه تبدیل نسبت به حوزه نتایج دقیق‌تری در پی دارد. دقت عملکردی کلاس‌بندی تصاویر خرابی در حوزه تبدیل به طور میانگین برابر با ۶۷ درصد بوده درحالی‌که دقت طبقه‌بندی داده‌های خرابی مبتنی بر استخراج ویژگی‌های بافتی در حوزه مکان برابر با ۴۹/۷۶ درصد است. در حوزه تبدیل، اگرچه فیلتر 2 Daubechies در شناسایی خرابی قیرزدگی حساسیت عملکرد بالاتری داشته، اما به طور میانگین فیلتر Haar نسبت به سایر موجک‌های استفاده شده، با دقت عملکردی ۹۵/۲۴ درصد نتایج برتری در شناسایی و کلاسه‌بندی خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی حاصل نموده است.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی روسازی، بافت تصویر، بردار ویژگی، تبدیل موجک گسسته، ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری

## ۱. مقدمه

ارزیابی روسازی نقش بسیار حیاتی در سیستم مدیریت روسازی ایفا می‌کند. انتخاب گزینه صحیح عملیات ترمیم و نگهداری، وابسته به نتایج ارزیابی و بازرسی روسازی است. یکی از عناصر اصلی عملیات ارزیابی روسازی، بررسی و پیمایش خرابی‌های سطحی راه است. ساده‌ترین روش ارزیابی خرابی‌های روسازی، بازرسی چشمی کارشناسان راه از وضعیت ظاهری راه است. این رویکرد ارزیابی روسازی، علاوه بر آن‌که هزینه و زمان عملیات بازرسی را افزایش می‌دهد، وابسته به قضاوت شخصی ارزیابان بوده و نتایجی تکرارناپذیر به دنبال خواهد داشت [Zakeri, Moghadas Nejad and Fahimifar, 2016]. در سالهای اخیر به منظور رفع نقائص و مشکلات مربوط به ارزیابی دستی و چشمی خرابی‌های روسازی، تحقیقات گسترده‌ای به منظور توسعه روش‌های خودکار و نیمه خودکار بازرسی وضعیت روسازی انجام گرفته است. اغلب این روش‌ها بر پایه بینایی ماشین و تکنیک‌های پردازش تصویر هستند. اگر چه استانداردهایی 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 شده است. علاوه بر این، اغلب روش‌های ارزیابی اتوماتیک به دلیل بکارگیری الگوریتم‌های پیچیده، بار محاسباتی طولانی و سنگینی داشته و تمرکز اصلی آن‌ها بیشتر بر روی شناسایی و کلاس‌بندی خودکار ترک‌های 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 عریان‌شدگی 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، بکارگیری روشی با دقت و کارایی برتر جهت شناسایی و پردازش خودکار انواع خرابی‌های سطح روسازی ضروری است. [Zhang et al. 2014].

چووا و زو [Chua and Xu, 1994] به منظور استخراج ویژگی‌های ترک‌های روسازی از ثوابت ممانی بهره جستند. این

گشتاورهای هفت‌گانه که مستقل از انتقال، اندازه، دوران و آئینه‌ای 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 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 ممانی 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 شناسایی و تفکیک داده‌ها دارا است. لازم به ذکر است که اغلب ویژگی‌های استخراجی با یکدیگر ارتباط و وابستگی داشته و فاصله اقلیمی قادر به لحاظ نمودن این وابستگی ناست. نالاموتها و وانگ [Nallamutho and Wang, 1996] از تابع خودهمبستگی به منظور توصیف بافت ۴ 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 حالیکه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری 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) 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. در تحقیق مذکور

ترک خوردگی‌ها 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 توصیف‌کننده‌های آماری بافت تصویر به منظور تقطیع و شناسایی ناحیه خرابی و با اتصال ترک‌های منفصل و استخراج ویژگی‌های هندسی به طبقه‌بندی انواع ترک خوردگی روسازی آسفالتی پرداخت. 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 داوپیچ استفاده نمودند. در این مقاله 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 ترک خوردگی‌ها تمرکز دارند در صورتی‌که کلاس‌بندی خودکار دیگر خرابی‌های ایجاد شده در سطح روسازی هم‌چون قیرزدگی، عریان‌شدگی و ... نیز بسیار حائز اهمیت است که در این پژوهش این امر لحاظ گردیده است. الگوریتم‌های ارائه شده پیشین که خطای کلاس‌بندی کمتر از ۵٪ گزارش نمودند اغلب بار محاسباتی سنگین و نسبتاً پیچیده‌ای (پیش‌پردازش تصاویر، استفاده از تبدیل جهت‌دار با افزودگی بالا، تعداد ویژگی‌های زیاد، الگوریتم کلاس‌بندی پیچیده و ...) دارا هستند که به تبع منجر به افزایش زمان و هزینه ارزیابی عملکرد روسازی می‌گردد. از آنجائیکه اطلاعات مهم تصاویر خرابی روسازی آسفالتی بیشتر شامل لبه‌های افقی و عمودی (مولفه‌های غیر جهت‌دار) بوده،

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) ناست، بلکه اطلاعات فرکانس و مکان به طور هم‌زمان وجود ندارد، در حالیکه برای شناسایی و تمیز دادن الگوهای مختلف خرابی هم‌چون ترک‌های طولی و عرضی، هم اجزای فرکانسی و هم مکان رخداد آنها اهمیت فراوان دارد. در ادامه این تحقیق زو و همکاران [Zou et al. 2008] از روش‌های ارتقا تصویر 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 به منظور استخراج بردار ویژگی بافتی انواع ترک خوردگی 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. 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

## ۲. مبانی نظری پژوهش

در این بخش، مفاهیم پایه پیرامون تبدیل موجک و شاخص‌های آماری مرتبه دوم مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری ارائه شده است.

### ۲-۱ تبدیل موجک گسسته دو بعدی

تبدیل موجک به دلیل ویژگی آنالیز چند دقت<sup>۸</sup> 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، در تحقیقات مختلف اثبات گردیده است [Busch, 2004]. از عمده دلایل آن، تجزیه تصاویر به زیرباندهای مختلف بوده که علاوه بر فراهم آوردن امکان توصیف اجزای بافت در سه جهت مجزا، پیچیدگی‌های محاسباتی مربوط به آنالیز ساختار بافت تصویر را نیز تا حد زیادی کاهش داده است [Zhu, Song and Chen, 2016].

تبدیل موجک گسسته دو بعدی قادر به تجزیه تصویر و ایجاد زیرباندهای فرکانسی توسط اعمال توابع جزئی ویولت (Wavelet) و مقیاس (Scaling) با نرخ نمونه‌کاهی<sup>۲</sup> می‌باشد. توابع جزئی ویولت و مقیاس به ترتیب به عنوان فیلتر بالاگذر (g) و پایین‌گذر (h) عمل می‌نمایند. این توابع جزئی (روابط ۲ الی ۳) از انتقال (ثلیفت) و مقیاس نمودن تابع ویولت مادر<sup>۹</sup> (W) مطابق با رابطه ۱ مشتق می‌گردند [Wimmer et al. 2016].

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

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

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

z سطح تجزیه (مقیاس اعمالی تابع موجک) و k پارامتر انتقال بوده و هر دو عدد صحیح هستند. G(k) و H(k) به ترتیب معرف ضرائب توابع ویولت و مقیاس بوده و وابسته به اینکه جز کدام خانواده از موجک‌ها باشند، متفاوت هستند.

حساسیت جهتی توابع موجک گسسته دوبعدی (افقی، عمودی و قطری) مناسب و کافی بوده و در چنین الگوهایی بهتر است بر روی نوع (شکل) 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 بافت زیرباندهای هر چندین خانواده مختلف از موجک‌های گسسته انتخاب گردید و از یک شیوه کلاس‌بندی ساده (کمینه فاصله ماهالانویس) 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 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 آماری بافت تصویر<sup>۵</sup> با استفاده از ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری<sup>۶</sup> در حوزه مکان انجام گرفت. پس از آن ۴ گروه از فیلترهای مختلف تبدیل موجک گسسته<sup>۷</sup> دوبعدی بر تصاویر اعمال گشته و ویژگی‌های بافتی هر یک از باندهای تجزیه شده بر مبنای شاخص‌های آماری مرتبه دوم، استخراج شد. در نهایت با استفاده از آمارگان محاسبه شده، طبقه‌بندی تصاویر خرابی بر اساس روش کمینه فاصله ماهالانویس صورت گرفته و عملکرد کلاس‌بندی توسط ۴ شاخص تصریح، صحت، حساسیت و دقت مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که کلیه محاسبات و تحلیل داده‌های خرابی در این مقاله، توسط نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۱۶ انجام گرفته است.

در بخش دوم مقاله، به بررسی مفاهیم تئوری و اطلاعات پایه پیرامون تبدیل موجک گسسته و نحوه توصیف آماری بافت تصویر توسط ماتریس هم‌رخداد پرداخته شده است. در بخش سوم روند پژوهش و نتایج اعتبارسنجی بررسی و تحلیل شده و در بخش چهارم خلاصه‌ای از تحقیق ارائه می‌شود.

شده از این ماتریس‌ها به عبارتی بررسی نحوه توزیع و ارتباط مکانی ضرائب (محتوای فرکانسی) به طور منحصر به فردی قادرند خصوصیات بافت تصویر را توصیف نمایند [Dettori and Semlera, 2007].

هر یک از خانواده‌های مختلف تبدیل موجک، توابع جزئی مقیاس و ویولت منحصر به فردی دارند. در این مطالعه، عملکرد ۴ فیلتر (خانواده) معروف و پرکاربرد موجک‌های گسسته شامل ویولت Haar، Daubechies 2، Daubechies 3 و CDF به مقیاس و ویولت 7-9 مورد ارزیابی قرار گرفت. ضرائب توابع جزئی ویولت و مقیاس (فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر) این موجک‌ها در پیوست (الف) 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 (مرتبط با تعداد پیکسل‌های مجاور بکارگیری شده) و طول فیلترهای این موجک‌ها است عرض ساپورت و طول فیلتر موجک Haar به ترتیب برابر با ۱ و ۲ بوده، این مقادیر در موجک Daubechies 2 به ترتیب برابر با ۳ و ۴، در موجک Daubechies 3 به ترتیب برابر با ۵ و ۶ و در موجک CDF9/7 به ترتیب برابر با ۷ و ۸ است. [Dettori and Semlera, 2007]. موجک‌های Daubechies شمایی هم‌چون نوار قلب داشته و نامتقارن بوده در حالیکه موجک CDF 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 ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری

بافت تصویر وابسته به نحوه توزیع مکانی مقادیر سطوح خاکستری پیکسل‌ها در تصویر است. استخراج ویژگی‌های بافتی، نقش بسیار مهمی در کاربردهای بینایی ماشین از جمله طبقه بندی انواع خرابی، شناسایی الگو، آنالیز تصاویر پزشکی و سنجش از راه دور ایفا می‌کنند. ویژگی‌های بافت تصویر می‌توانند در حوزه مکان یا تبدیل بر پایه ماتریس هم‌رخداد، اندازه‌گیری انرژی بافت law، مدل مارکوف و گشتاورهای آماری

وابسته به میزان دقت مورد نیاز، تجزیه خروجی حاصل از فیلتر پایین‌گذر می‌تواند مطابق شکل ۱ تکرار شود.

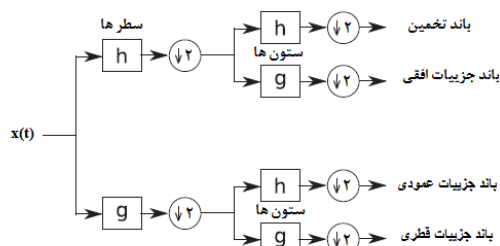
$A_2$	$\gamma_{23}$		$C_2$	$W_{2,3}$	
	$\gamma_{21}$	$\gamma_{22}$		$W_{2,1}$	$W_{2,2}$
		$\gamma_{13}$			$W_{1,3}$
				$W_{1,1}$	$W_{1,2}$
		$\gamma_{11}$			
		$\gamma_{12}$			

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

در انتها ضرائب ویولت سیگنال  $x(t)$  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، فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر ابتدا به سطرها و سپس به ستون‌های سیگنال تصویری اعمال می‌گردند.



شکل ۲. باندهای حاصل از اعمال موجک در سطح اول

در هر مرحله از تجزیه تصویر، حاصل اعمال فیلتر پایین‌گذر، 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 در سه جهت افقی، عمودی و قطری بوده که به عنوان ماتریس‌های ضرائب جزئیات موجک (زیرباندهای فرکانس بالا) قلمداد می‌شوند. ویژگی‌های استخراج

## تشخیص و طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های روسازی بر پایه آنالیز.....

تبدیل‌های موجک ۳. استخراج ویژگی در حوزه مکان و تبدیل ۴. کلاس‌بندی تصاویر و تحلیل نتایج.

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

به منظور برداشت تصاویر در کیفیت بالا و شرایط نور کنترل شده، سخت‌افزاری مطابق شکل ۳ مورد استفاده قرار گرفت. این سخت‌افزار 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 نموده است.



شکل ۳. سخت‌افزار برداشت تصاویر خرابی در شرایط کنترل شده  
تصاویر برداشت شده از سطح روسازی در ۷ گروه شامل ۱. ترک پوست‌سوسماری ۲. آسفالت سالم (بدون خرابی) ۳. ترک طولی ۴. ترک عرضی ۵. قیرزدگی ۶. وصله ۷. عریان‌شدگی مطابق شکل ۴ طبقه‌بندی 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. تصاویر آموزشی به منظور محاسبه بردار ویژگی میانگین و ماتریس کواریانس هر کلاس بکارگیری شده است.

هیستوگرام تصویر و غیره استخراج شوند. توصیف آماری بافت توسط ماتریس هم‌رخداد یکی از بهترین روش‌های استخراج ویژگی‌های بافتی تصویر بوده و در شرح طیف وسیعی از بافت‌ها عملکرد مناسبی دارد. [Singh, 2016].

ماتریس هم‌رخداد، ماتریسی مربعی و نامتقارن بوده که نشان دهنده تعداد تکرار جفت پیکسل‌هایی از تصویر با سطوح خاکستری  $i$  و  $j$  است که در آن مقدار سطح خاکستری اولین پیکسل برابر  $i$  بوده و  $j$  در فاصله و در جهتی مشخص از  $i$  قرار دارد  $P(i,j)$ . در انتها این مقدار بر مجموع کل مقادیر ماتریس نرمالیزه شده و درایه‌های ماتریس هم‌رخداد  $p(i,j)$  را مطابق با رابطه ۵ تشکیل می‌دهند.

$$p(i,j) = \frac{P(i,j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P(i,j)} \quad (5)$$

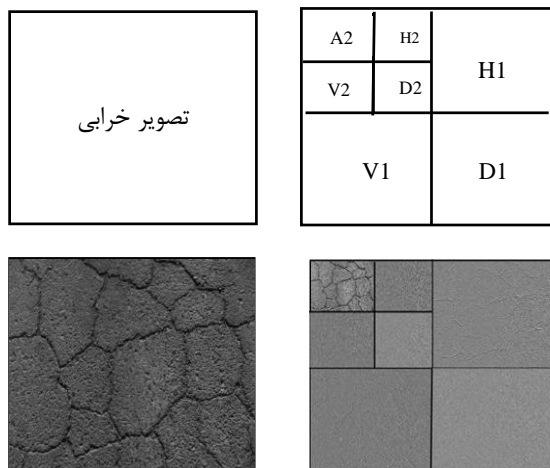
$N$  در این رابطه، ابعاد ماتریس هم‌رخداد است. ابعاد ماتریس هم‌رخداد برابر با بیشینه مقدار سطح خاکستری موجود در تصویر است.

ماتریس هم‌رخداد را می‌توان به عنوان یک تابع چگالی احتمال در نظر گرفته و با محاسبه شاخص‌های آماری مختلفی همچون تضاد (کنتراست) <sup>۱۰</sup>، همبستگی <sup>۱۱</sup>، همسانی (انرژی) <sup>۱۲</sup> و همگنی <sup>۱۳</sup> از این ماتریس، ویژگی‌های بافت تصویر را توصیف نمود. این شاخص‌ها از آنجائیکه از مقادیر دو پیکسل جهت تفسیر و توصیف بافت تصویر بهره می‌گیرند، به آمارگان مرتبه دوم شهرت دارند و برخلاف شاخص‌های آماری مرتبه اول نسبت به جابجایی پیکسل‌های تصویر حساس هستند.

### ۳. روند انجام پژوهش و اعتبارسنجی تحقیق

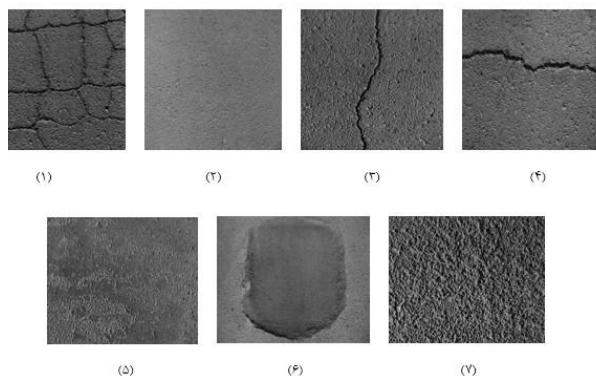
در این بخش از تحقیق، به منظور اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص و تفکیک خودکار خرابی‌های روسازی، اقدام به برداشت تصاویر خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی نموده و الگوریتم پیشنهادی بر روی این تصاویر مورد آزمایش قرار گرفت. مراحل انجام تحقیق به طور کلی شامل ۴ مرحله است: ۱. برداشت تصاویر ۲. اعمال

دوم (H2)، ضرائب جزئیات عمودی مرتبه دوم (V2)، ضرائب جزئیات قطری مرتبه دوم (D2) و ضرائب تخمین مرتبه دوم (A2) به ترتیب صورت پذیرفت. در شکل ۵ نحوه اعمال ۲ مرحله تبدیل ویولت Haar بر خرابی ترک پوست سوسماری نشان داده شده است.



شکل ۵. اعمال ۲ مرحله تبدیل ویولت (Haar) و استخراج ضرائب تخمین و جزئیات خرابی ترک پوست سوسماری

۳-۳ توصیف آماری بافت توسط ماتریس هم‌رخداد در این تحقیق، ابعاد ماتریس هم‌رخداد (G) برابر با ۲۵۶ انتخاب شده، پارامتر فاصله برابر با واحد و با توجه به توزیع مکانی گوناگون سطوح خاکستری در الگوهای خرابی مختلف، ۴ زاویه مجزا (۰°، ۴۵°، ۹۰°، ۱۳۵°) به عنوان پارامتر جهت به منظور تشکیل ماتریس هم‌رخداد مطابق با شکل ۶ انتخاب گردید. پس از نرمالیزه نمودن مقادیر ماتریس هم‌رخداد، شاخص‌های آماری مرتبه دوم شامل تضاد، همبستگی، انرژی یا همسانی و همگنی به طور مجزا در هر ۴ جهت استخراج شده و میانگین حسابی آنها به عنوان شاخص‌های نهایی تضاد (CT)، همبستگی (CN)، همسانی (EY) و همگنی (HY) محاسبه می‌شوند. هر کدام از این شاخص‌ها که به منظور توصیف آماری بافت تصویر خرابی، محاسبه و استخراج می‌شوند، توصیف‌گر خاصیتی ویژه در تصویر است. کنتراست یا تضاد بیانگر میزان تفاوت مقادیر یک پیکسل با همسایه هایش در تصویر است. همبستگی بیانگر میزان وابستگی مقادیر یک پیکسل با همسایه هایش در تصویر بوده که به صورت عددی



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

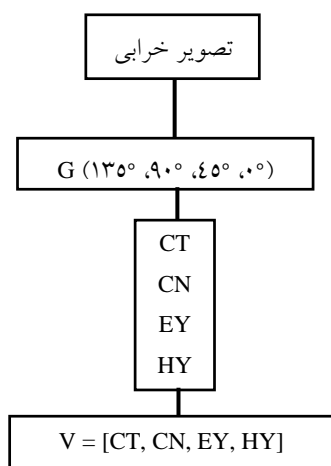
### ۲-۳ اعمال تبدیل موجک و جداسازی باندهای

#### فرکانسی

در این پژوهش از ۴ گروه مختلف از فیلترهای تبدیل موجک شامل ویولت Haar، Daubechies 2، Daubechies 3، CDF 9-7 به منظور تجزیه تصاویر در ۲ سطح استفاده گردید. سطح تجزیه اعمال شده نقش موثری در برجسته‌سازی و آشکارسازی لبه‌ها و ناسازگاری‌های موجود در بافت سطح روسازی ایفا می‌کند. اگر سطح تجزیه اعمال شده کم باشد، الگوی خرابی‌ها به طور کامل قابل تفکیک نبوده، از طرفی اگر تجزیه تصاویر در سطوح بالاتری ادامه یابند، ناسازگاری‌ها و الگوهای موجود در ساختار بافت سطحی روسازی با یکدیگر ترکیب و ادغام شده که می‌تواند تاثیر معکوسی در نتیجه تفکیک و کلاس‌بندی داده‌ها داشته باشد [Moghadas Nejad and Zakeri, 2011].

در این تحقیق مطابق شکل ۵ پس از اعمال ۲ مرحله تبدیل ویولت (توسط ۴ فیلتر انتخابی) و استخراج ضرائب تخمین و ضرائب جزئیات تصویر شامل جزئیات افقی، عمودی و قطری، مقادیر این ضرائب بین صفر و یک نرمالایز گشته و در انتها عملیات استخراج ویژگی و آنالیز بافت بر روی تمامی ۷ زیرتصویر تجزیه شده شامل ضرائب جزئیات افقی مرتبه اول (H1)، ضرائب جزئیات عمودی مرتبه اول (V1)، ضرائب جزئیات قطری مرتبه اول (D1)، ضرائب جزئیات افقی مرتبه

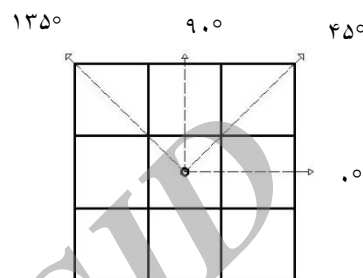
## تشخیص و طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های روسازی بر پایه آنالیز.....



شکل ۷. الگوریتم استخراج بردار ویژگی در حوزه مکان

مرحله دوم استخراج بردار ویژگی پس از اعمال تبدیل موجک صورت می‌گیرد. در این مرحله، از ماتریس هم‌رخداد هر ۷ بانده تجزیه شده از تصویر خرابی، به ترتیبی که ذکر گردید، ۴ شاخص آماری استخراج شده و در انتها برداری با ۲۸ درایه به عنوان توصیف‌گر بافت و بردار نماینده تصویر اصلی (اولیه) (V) تشکیل می‌گردد. (شکل ۸)

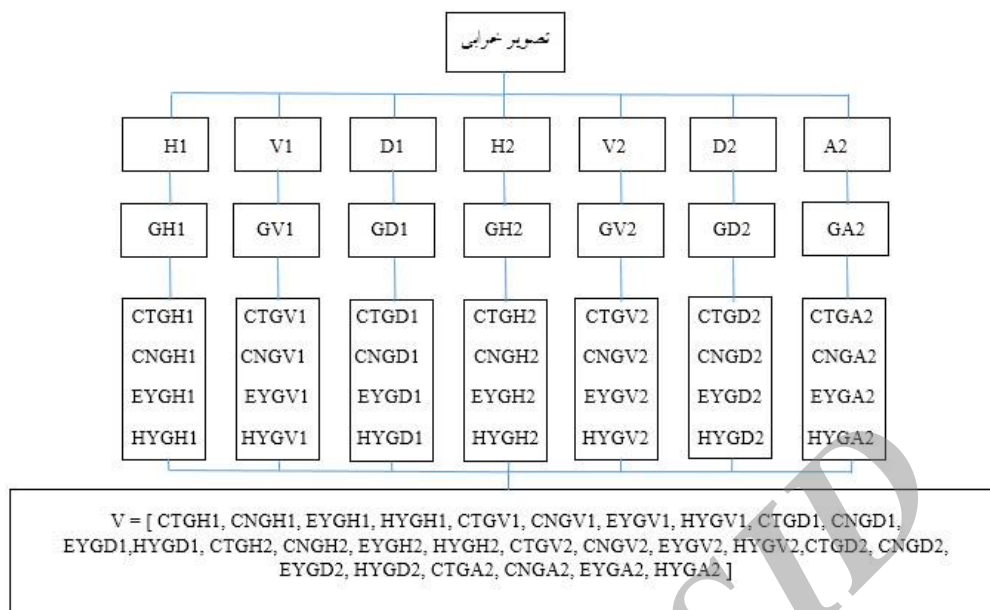
بین ۱- و ۱ تعریف می‌شود. همسانی توصیف‌گر یکنواختی تصویر بوده و مقادیری در محدوده ۰ تا ۱ دارد. همگنی بیانگر نزدیکی مکانی مقادیر توزیع اجزای ماتریس هم‌رخداد به قطر بوده و بیشینه آن برای یک ماتریس قطری به دست می‌آید [Zayed and Elnemr, 2016]. روابط و شرح این شاخص‌ها در پیوست (ب) ارائه شده است.



شکل ۶. زوایای انتخابی به منظور تشکیل ماتریس هم‌رخداد

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 ماتریس هم‌رخداد هر تصویر خرابی، ۴ شاخص آماری که توصیف‌گر بافت آن بوده استخراج شده و در نهایت برداری با ۴ درایه به عنوان بردار نماینده تصویر اصلی (اولیه) (V) تشکیل می‌گردد (شکل ۷).





شکل ۸. الگوریتم استخراج بردار ویژگی در حوزه تبدیل

در این روش، پس از استخراج ۳۰ بردار ویژگی از ۳۰ تصویر آموزشی، در هر کدام از ۷ کلاس تصاویر طبقه‌بندی شده، میانگین درایه‌های 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) حاصل می‌شود. با محاسبه فاصله ماهالانوبیس بردار ویژگی هر یک از تصاویر آزمایشی از بردار نماینده هر طبقه از تصاویر آموزشی، بر اساس کمینه فاصله ماهالانوبیس، هر تصویر آزمایشی به یکی از ۷ کلاس خرابی موجود اختصاص می‌یابد.

ماتریس در هم‌ریختگی<sup>۱۵</sup> نشان دهنده نحوه تخصیص تصاویر آزمایشی به طبقات مختلف خرابی است. ماتریس در هم‌ریختگی تصاویر، حاصل از استخراج بردار ویژگی در حوزه مکان و حوزه تبدیل، به ترتیب در جداول ۱ تا ۵ نشان داده شده است.

### ۳-۴ طبقه بندی تصاویر خرابی و بررسی نتایج

در این تحقیق از روش کمینه فاصله به منظور کلاس بندی تصاویر خرابی استفاده گردیده است. بدین منظور فاصله ماهالانوبیس<sup>۱۴</sup> طبق رابطه ۶ به کارگیری شده است.

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

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  $c$ ) است.  $C_c$  بیانگر ماتریس کواریانس مجموعه ویژگی‌های تصاویر آموزشی کلاس  $c$  است. 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 کلاس بندی می‌شود.

تشخیص و طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های روسازی بر پایه آنالیز.....

جدول ۱. ماتریس در هم ریختگی، حاصل از استخراج بردار ویژگی در حوزه مکان

نوع خرابی	ترک پوست سوسماری	آسفالت سالم	ترک طولی	ترک عرضی	قیرزدگی	وصله	عریان‌شدگی
ترک پوست سوسماری	۲۰	۱	۰	۶	۲	۰	۱
آسفالت سالم	۰	۷	۶	۱۱	۴	۱	۰
ترک طولی	۱	۸	۱۴	۴	۲	۱	۰
ترک عرضی	۵	۱	۳	۱۰	۴	۲	۵
قیرزدگی	۷	۲	۱	۶	۱۱	۲	۱
وصله	۶	۱	۱	۲	۶	۱۲	۲
عریان‌شدگی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰

جدول ۲. ماتریس در هم ریختگی، حاصل از استخراج بردار ویژگی در حوزه تبدیل 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

جدول ۳. ماتریس در هم ریختگی، حاصل از استخراج بردار ویژگی در حوزه تبدیل Daubechies 2

نوع خرابی	ترک پوست سوسماری	آسفالت سالم	ترک طولی	ترک عرضی	قیرزدگی	وصله	عریان‌شدگی
ترک پوست سوسماری	۰	۰	۰	۳۰	۰	۰	۰
آسفالت سالم	۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰
ترک طولی	۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰
ترک عرضی	۲۴	۰	۰	۰	۰	۶	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

جدول ۴. ماتریس در هم‌ریختگی، حاصل از استخراج بردار ویژگی در حوزه تبدیل 3 Daubechies

نوع خرابی	ترک پوست سوسماری	آسفالت سالم	ترک طولی	ترک عرضی	قیرزدگی	وصله	عریان‌شدگی
ترک پوست سوسماری	۰	۰	۰	۳۰	۰	۰	۰
آسفالت سالم	۰	۰	۰	۳۰	۰	۰	۰
ترک طولی	۰	۰	۳۰	۰	۰	۰	۰
ترک عرضی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰
قیرزدگی	۱۰	۰	۱	۲	۱۱	۶	۰
وصله	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰	۰
عریان‌شدگی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰

جدول ۵. ماتریس در هم‌ریختگی، حاصل از استخراج بردار ویژگی در حوزه تبدیل 9-7 CDF

نوع خرابی	ترک پوست سوسماری	آسفالت سالم	ترک طولی	ترک عرضی	قیرزدگی	وصله	عریان‌شدگی
ترک پوست سوسماری	۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰
آسفالت سالم	۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰
ترک طولی	۰	۰	۳۰	۰	۰	۰	۰
ترک عرضی	۰	۰	۰	۱۹	۰	۱۱	۰
قیرزدگی	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
وصله	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰	۰
عریان‌شدگی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰

$$Sp_g = \frac{\sum_{k=1}^G (n'_k - n_{gk})}{n - n_g} \quad (7)$$

در این رابطه،  $n'_k$  بیانگر تعداد کل تصاویر اختصاص یافته به طبقه  $k$  بوده،  $n_{gk}$  بیانگر تعداد تصاویر متعلق به طبقه  $g$  بوده که به طبقه  $k$  تخصیص یافته،  $n$  برابر با تعداد کل تصاویر و  $n_g$  بیانگر تعداد کل تصاویر متعلق به طبقه  $g$  است. در جدول ۶ و شکل ۹ میزان تصریح الگوریتم‌های پیشنهادی در طبقه‌بندی خودکار تصاویر خرابی، در حوزه مکان و تبدیل، ارائه و مقایسه شده است.

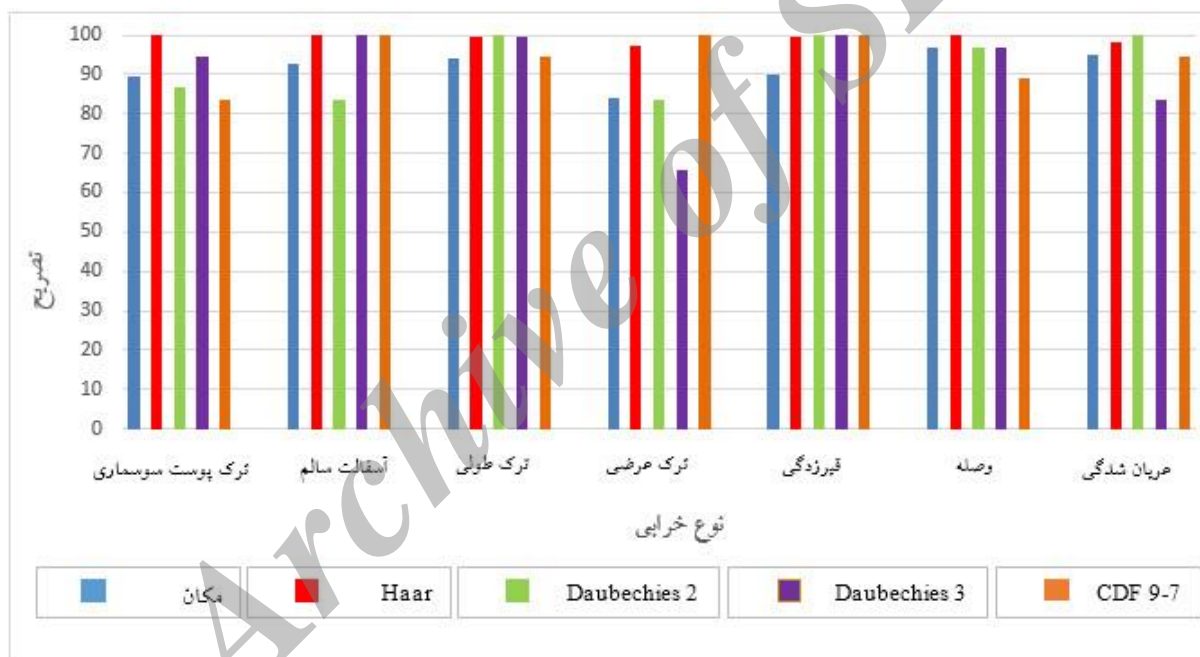
در این مطالعه، به منظور ارزیابی عملکرد هر کدام از فیلترها (الگوریتم‌ها) در طبقه‌بندی خودکار تصاویر خرابی سطح روسازی آسفالتی، از ۴ شاخص مختلف شامل میزان تصریح<sup>۱۶</sup>، حساسیت<sup>۱۷</sup>، صحت<sup>۱۸</sup> و دقت<sup>۱۹</sup> استفاده شده است. حساسیت و دقت عملکردی از مهم‌ترین شاخص‌های مستخرج از ماتریس درهم‌ریختگی جهت ارزیابی عملکرد کلاس‌بندی هستند [Moghadas Nejad and Zakeri, 2011].

تصریح (Sp) بیانگر قابلیت طبقه در عدم پذیرش تصاویر باقی طبقه‌ها می باشد و بصورت رابطه ۷ تعریف می‌شود.

## تشخیص و طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های روسازی بر پایه آنالیز.....

جدول ۶. تصریح عملکردی کلاس‌بندی تصاویر خرابی در حوزه مکان و تبدیل

نوع خرابی \ حوزه	حوزه مکان	حوزه تبدیل (Haar)	حوزه تبدیل (Daubechies 2)	حوزه تبدیل (Daubechies 3)	حوزه تبدیل (CDF 9-7)
ترک پوست سوسماری	۸۹/۳۹	۱۰۰	۸۶/۶۷	۹۴/۴۴	۸۳/۳۳
آسفالت سالم	۹۲/۷۸	۱۰۰	۸۳/۳۳	۱۰۰	۱۰۰
ترک طولی	۹۳/۸۵	۹۹/۴۴	۱۰۰	۹۹/۴۴	۹۴/۴۴
ترک عرضی	۸۳/۸۰	۹۷/۲۲	۸۳/۳۳	۶۵/۵۶	۱۰۰
قیرزدگی	۸۹/۹۴	۹۹/۴۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
وصله	۹۶/۶۵	۱۰۰	۹۶/۶۷	۹۶/۶۷	۸۸/۸۹
عریان‌شدگی	۹۴/۹۷	۹۸/۳۳	۱۰۰	۸۳/۳۳	۹۴/۴۴



شکل ۹. مقایسه تصریح عملکردی طبقه‌بندی تصاویر خرابی در حوزه مکان و تبدیل

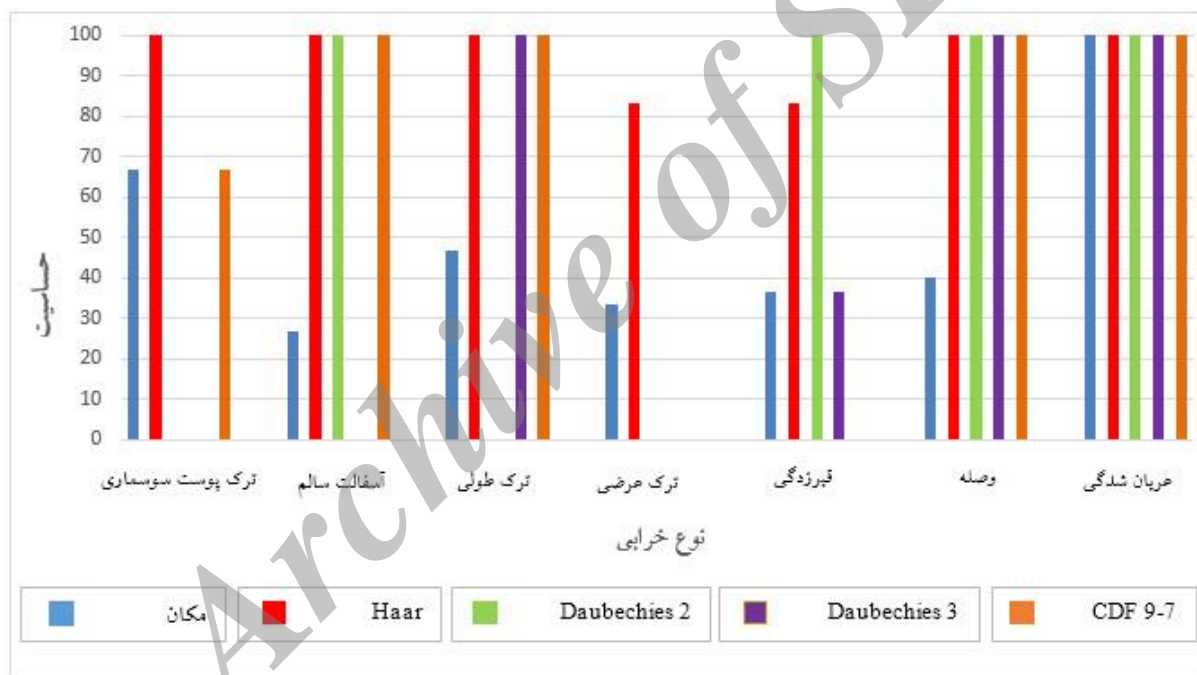
در این رابطه  $n_{gg}$  برابر با تعداد تصاویر متعلق به طبقه  $g$  بوده که به طور صحیح به همان طبقه اختصاص یافته و  $n_g$  بیانگر تعداد کل تصاویر متعلق به طبقه  $g$  است. در جدول ۷ و شکل ۱۰ میزان حساسیت الگوریتم‌های پیشنهادی در طبقه‌بندی خودکار تصاویر خرابی روسازی، در حوزه مکان و تبدیل، ارائه و مقایسه گشته است.

حساسیت ( $Sn$ ) توانایی طبقه در شناسایی صحیح تصاویر را توصیف نموده و طبق رابطه ۸ محاسبه می‌گردد. [Rezaei and Agahi 2015]

$$Sn_g = \frac{n_{gg}}{n_g} \quad (۸)$$

جدول ۷. حساسیت عملکردی الگوریتم‌های پیشنهادی به منظور طبقه بندی تصاویر خرابی در حوزه مکان و تبدیل

نوع خرابی \ حوزه	مکان	تبدیل (Haar)	تبدیل (Daubechies 2)	تبدیل (Daubechies 3)	تبدیل (CDF 9-7)
ترک پوست سوسماری	۶۶/۶۷	۱۰۰	۰	۰	۶۶/۶۷
آسفالت سالم	۲۶/۶۷	۱۰۰	۱۰۰	۰	۱۰۰
ترک طولی	۴۶/۶۷	۱۰۰	۰	۱۰۰	۱۰۰
ترک عرضی	۳۳/۳۳	۸۳/۳۳	۰	۰	۶۳/۳۳
قیرزدگی	۳۶/۶۷	۸۳/۳۳	۱۰۰	۳۶/۶۷	۰
وصله	۴۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
عریان‌شدگی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰



شکل ۱۰. مقایسه حساسیت عملکردی طبقه بندی تصاویر خرابی در حوزه مکان و تبدیل

در این رابطه  $n_{gg}$  برابر با تعداد تصاویر متعلق به طبقه  $g$  بوده که به طور صحیح به همان طبقه اختصاص یافته و  $n'_g$  بیانگر تعداد کل تصاویر اختصاص یافته به طبقه  $g$  است. در جدول ۸ و شکل ۱۱ میزان صحت الگوریتم‌های پیشنهادی در طبقه‌بندی خودکار تصاویر خرابی روسازی، در حوزه مکان و تبدیل، ارائه و مقایسه شده است.

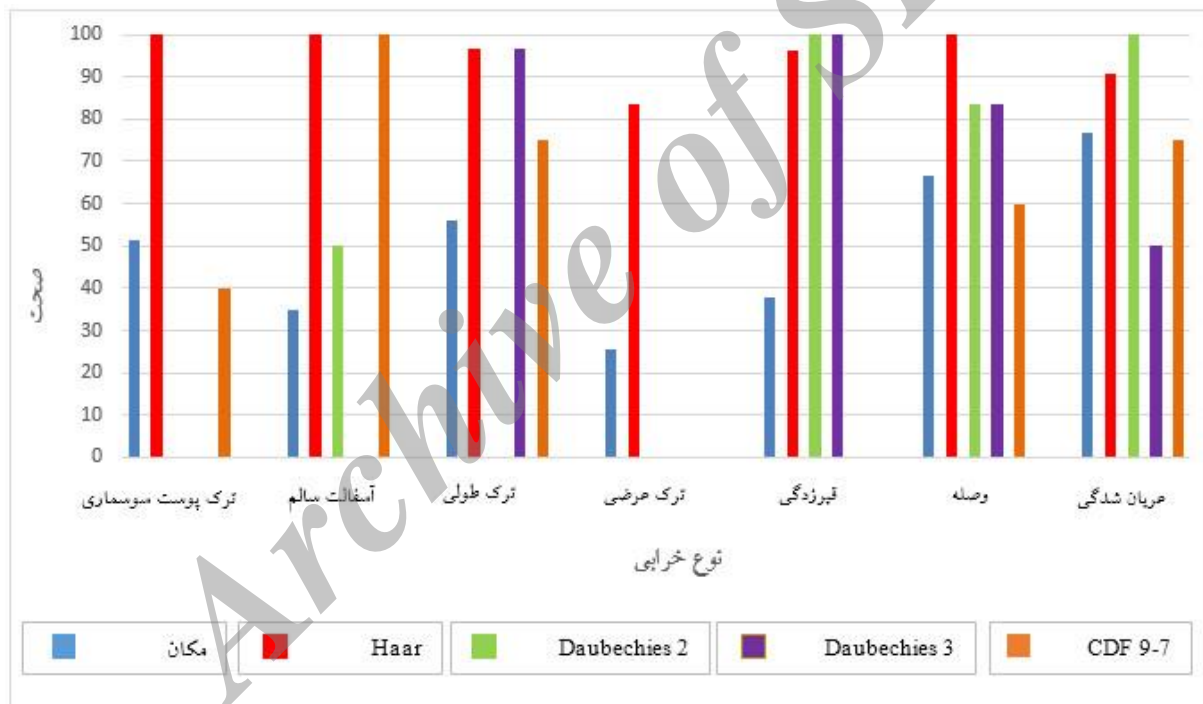
صحت (Pr) نشان دهنده توانایی طبقه در عدم شمول تصاویر باقی طبقه‌ها بوده و مطابق با رابطه ۹ تعریف می‌گردد.

$$Pr_g = \frac{n_{gg}}{n'_g} \quad (9)$$

## تشخیص و طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های روسازی بر پایه آنالیز.....

جدول ۸. صحت عملکردی الگوریتم‌های پیشنهادی به منظور طبقه‌بندی تصاویر خرابی در حوزه مکان و تبدیل

حوزه نوع خرابی	حوزه مکان	حوزه تبدیل (Haar)	حوزه تبدیل (Daubechies 2)	حوزه تبدیل (Daubechies 3)	حوزه تبدیل (CDF 9-7)
ترک پوست سوسماری	۵۱/۲۸	۱۰۰	۰	۰	۴۰
آسفالت سالم	۳۵	۱۰۰	۵۰	۰	۱۰۰
ترک طولی	۵۶	۹۶/۷۷	۰	۹۶/۷۷	۷۵
ترک عرضی	۲۵/۶۴	۸۳/۳۳	۰	۰	۰
قیرزدگی	۳۷/۹۳	۹۶/۱۵	۱۰۰	۱۰۰	۰
وصله	۶۶/۶۷	۱۰۰	۸۳/۳۳	۸۳/۳۳	۶۰
عریان‌شدگی	۷۶/۹۲	۹۰/۹۱	۱۰۰	۵۰	۷۵



شکل ۱۱. مقایسه صحت عملکردی طبقه‌بندی تصاویر خرابی در حوزه مکان و تبدیل

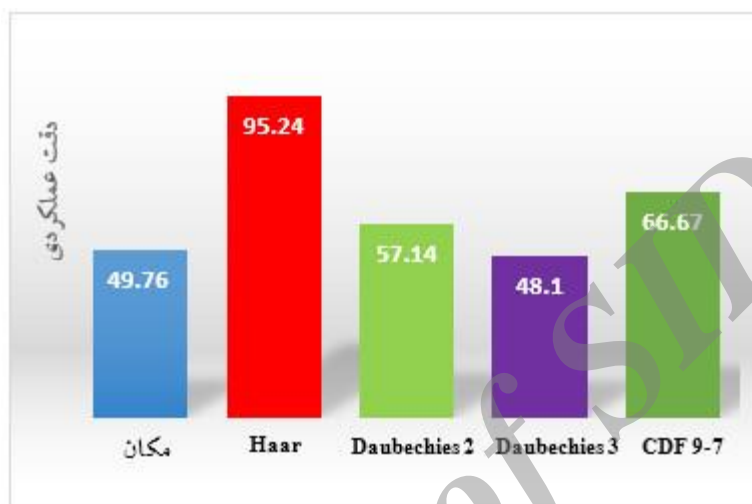
در این رابطه  $ngg$  بیان‌گر تعداد تصاویر متعلق به طبقه  $g$  بوده که به طور صحیح به همان طبقه اختصاص یافته و  $n$  برابر با تعداد کل تصاویر موجود است. در جدول ۹ و شکل ۱۲ میزان دقت الگوریتم‌های پیشنهادی در طبقه‌بندی خودکار تصاویر خرابی، در حوزه مکان و تبدیل، ارائه و مقایسه شده است.

دقت (Ac) بیان‌گر عملکرد کلی الگوریتم در طبقه‌بندی خودکار تصاویر بوده و طبق رابطه ۱۰ از ماتریس درهم‌ریختگی تصاویر آزمایشی استخراج می‌گردد.

$$Ac = \frac{\sum_{g=1}^G ngg}{n} \quad (10)$$

جدول ۹. دقت عملکردی الگوریتم‌های پیشنهادی به منظور طبقه بندی تصاویر خرابی در حوزه مکان و تبدیل

تبدیل (CDF 9-7)	تبدیل (Daubechies 3)	تبدیل (Daubechies 2)	تبدیل (Haar)	مکان	حوزه
۶۶/۶۷	۴۸/۱۰	۵۷/۱۴	۹۵/۲۴	۴۹/۷۶	دقت عملکردی



شکل ۱۲. مقایسه دقت عملکردی طبقه بندی تصاویر خرابی در حوزه مکان و تبدیل

نداشته است (حساسیت عملکردی ۱۰۰٪). زیرا الگوی این نوع خرابی از تغییرات بی در پی مقادیر سطوح خاکستری (قیر و سنگدانه) ایجاد شده و یک بافت کاملاً زبر و منظم را تشکیل می‌دهد. در نتیجه این امر شاخص‌های آماری مرتبه دوم (ماتریس هم-رخداد) قابلیت بالایی در توصیف آماری بافت این نوع خرابی در حوزه مکان و نیز حوزه تبدیل دارا هستند. 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 هستند.

وصله جرئی 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

نتایج تحقیق و اعتبار سنجی حاکی از آن است که :

- به طور میانگین آنالیز بافت تصاویر خرابی در حوزه تبدیل به دلیل تجزیه تصویر و تحلیل جهتی زیرباندهای فرکانسی و آشکارسازی ساختار بافت خرابی‌ها، نتایج بهتری به دنبال داشته است. دقت عملکردی کلاس بندی تصاویر خرابی در حوزه تبدیل به طور میانگین برابر با ۶۷ درصد بوده درحالی‌که طبقه بندی داده‌های خرابی مبتنی بر استخراج ویژگی-های بافتی در حوزه مکان برابر با ۴۹/۷۶ درصد است. لازم به یادآوری است که در حوزه تبدیل، مقادیر و میزان شباهت با الگوی تابع موجک (محتوای فرکانسی) بررسی و تحلیل می‌شود. این امر تا حد زیادی از بی‌نظمی‌های سطوح خاکستری بافت خرابی‌ها که در حوزه مکان موجود بوده، می‌کاهد.
- در حوزه مکان و تبدیل، الگوریتم‌های پیشنهادی، در شناسایی خرابی عریان‌شدگی هیچ‌گونه خطایی در بر

## تشخیص و طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های روسازی بر پایه آنالیز.....

سطوح خاکستری تشکیل‌دهنده جزئیات بافت و لبه-های خرابی هم‌خوانی و سازگاری بیشتری داشته باشد. در غیر اینصورت پراکندگی نتایج افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. موجک (CDF) به دلیل شکل منظم‌تر و گنبدی‌شکل (افزایش و کاهش تدریجی مقادیر تابع)، به طور میانگین دقت عملکردی برتری نسبت به توابع موجک (D2) و (D3) در شناسایی الگوی انواع خرابی‌ها داشته است. توابع موجک D2 و D3 دارای شکل نسبتاً یکسان، اما از آنجائیکه طول پنجره موجک D3 نسبت به D2 بیشتر است، مطابق با بند پیشین، دقت عملکردی کلاس‌بندی پائین‌تری حاصل نموده است.

- اگرچه الگوی کلی ترک‌های طولی و عرضی مشابه با یکدیگر هستند، اما این دو نوع خرابی صرفاً چرخش یافته یکدیگر نیستند و بروز اختلاف در حساسیت کلاس‌بندی این کلاس‌ها اجتناب‌ناپذیر است، زیرا میزان بی‌نظمی‌های موجود در تصاویر این کلاس‌های خرابی و حتی محل قرارگیری ترک‌ها در تصویر مشابه با یکدیگر نبوده و تمامی الگوریتم‌های استخراج بردار ویژگی بافتی نسبت به این بی‌نظمی‌ها، شدیداً حساس هستند.

- فیلتر Daubechies 2 با حساسیت عملکردی ۱۰۰٪ در تشخیص خرابی قیرزدگی آسفالت نسبت به تبدیل Haar (حساسیت عملکردی ۸۳/۳۳٪) نتیجه برتری حاصل نموده است. الگوی بافت این نوع خرابی بر خلاف دیگر خرابی‌ها از جمله ترک‌های طولی، عرضی و پوست سوسماری، شمائی گنبدی‌شکل نداشته و از طرفی دارای تغییرات تدریجی سطوح خاکستری (نیاز به درگیر نمودن سهم بیشتری از سیگنال) است. در نتیجه این امر موجک D2 که از فیلتری با ابعاد بزرگتر و پنجره‌هایی نرم‌تر نسبت به فیلتر Haar استفاده می‌نماید، و نمایی گنبدی‌شکل نیز ندارد، حساسیت عملکردی برتری در استخراج

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 تمامی الگوریتم‌ها، حساسیت عملکردی مناسبی در تشخیص و طبقه‌بندی آن داشته باشند.

- در الگوهای بی‌نظمی هم‌چون خرابی‌های ایجاد شده در سطح روسازی آسفالتی، وارد کردن و درگیر نمودن تعداد زیادی از پیکسل‌ها در استخراج ضرائب و شاخص‌ها عملکرد صحیحی ناست، زیرا احتمال وقوع و جذب بی‌نظمی‌ها افزایش می‌یابد. به همین دلیل است که توابع (فیلتر) موجک‌های Daubechies 2 (D2)، Daubechies 3 (D3) و CDF9/7 (CDF) چون عرض ساپورت (پنجره) بزرگتری نسبت به موجک Haar (H) داشته و سهم بیشتری از سیگنال اصلی را به منظور استخراج ضرائب موجک بکار می‌گیرند، دقت عملکردی ضعیف‌تری در تشخیص و کلاس‌بندی تصاویر خرابی نسبت به موجک گسسته Haar که از میانگین وزنی دو پیکسل مجاور به منظور استخراج ضرائب موجک استفاده می‌نماید، حاصل نموده‌اند. دقت عملکردی کلاس‌بندی در حوزه تبدیل موجک گسسته دوبعدی (H)، (D2)، (D3) و (CDF) به ترتیب برابر با ۹۵/۲۴ درصد، ۵۷/۱۴ درصد، ۴۸/۱۰ درصد و ۶۶/۶۷ درصد است. با بکارگیری موجک Haar و استفاده از الگوریتم پیشنهادی (آمارگان مستخرج از ماتریس هم‌رخداد زیرباند‌ها) جهت استخراج بردار ویژگی، بیش از ۹۵٪ تصاویر خرابی برداشتی به طور صحیح به کلاس مربوطه تخصیص می‌یابند.

- با افزایش عرض ساپورت فیلترها، اهمیت شکل تابع موجک دوجندان می‌شود و بایستی موجکی انتخاب شود که شکل آن با الگوی (نرخ) تغییرات مقادیر



#### ۴. خلاصه و نتیجه گیری

در این تحقیق از الگوریتم‌هایی مبتنی بر پردازش تصویر و آنالیز بافت در حوزه مکان و تبدیل به منظور تشخیص و طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی استفاده شده است. در این روش پس از برداشت تصاویر خرابی در شرایط کنترل شده و تجزیه (جداسازی زیرباندهای فرکانسی) آن‌ها توسط اعمال ۴ گروه مختلف از فیلترهای تبدیل موجک، از آمارگان مستخرج از ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری به منظور توصیف آماری بافت باندهای تجزیه شده و استخراج بردار ویژگی استفاده شد. در انتها، روش کمینه فاصله ماهالانویس به منظور تفکیک و کلاس بندی تصاویر آزمایشی به کارگیری گردید. نتایج اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد کلاس بندی، بیان‌گر عملکرد برتر الگوریتم‌های طبقه‌بندی تصاویر خرابی در حوزه تبدیل نسبت به حوزه مکان است. دقت عملکردی کلاس بندی در حوزه مکان و تبدیل‌های موجک گسسته دوبعدی (Haar)، (Daubechies 2)، (Daubechies 3) و (CDF 9/7) به ترتیب برابر با ۴۹/۷۶ درصد، ۹۵/۲۴ درصد، ۵۷/۱۴ درصد، ۴۸/۱۰ درصد و ۶۶/۶۷ درصد است. در حوزه تبدیل اگر چه موجک Daubechies 2 در شناسایی خرابی قیرزدگی حساسیت عملکرد بهتری (حساسیت عملکردی کلاس بندی ۱۰۰ درصد) داشته اما به طور میانگین فیلتر Haar نسبت به سایر فیلترهای استفاده شده در این پژوهش، دقت عملکردی بالاتری به دنبال داشته و به منظور شناسایی و تفکیک خودکار خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی پیشنهاد می‌گردد. الگوریتم پیشنهادی ساده و فاقد بار محاسباتی سنگین بوده و در صورت بهره‌گیری از آن در سیستم‌های ارزیابی اتوماتیک روسازی، تنها حدود ۰.۵٪ خطا در تشخیص و طبقه بندی داده‌های خرابی ایجاد می‌گردد.

#### ۵. پی‌نوشت‌ها

1. Pavement Management System (PMS)
2. Image Enhancement
3. 2D Gabor Filter
4. Discrete Beamlet Transform
5. Image Texture

ویژگی‌های بافتی و کلاس بندی این نوع خرابی به دنبال داشته است.

به طور خلاصه در صورت استفاده از موجک‌هایی با عرض ساپورت و پنجره‌ای عریض، به منظور استخراج لبه‌های انواع ترک خوردگی (طولی، عرضی و پوست سوسماری) که اطلاعات مهم و جزئیات ساختاری بافت خرابی‌ها محسوب می‌شود، بایستی از موجک‌هایی گنبدی شکل 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 تابع موجک CDF)، اما در تشخیص خرابی قیرزدگی چون وقوع قیرزدگی در سطح آسفالت (دبداگاه 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 D2 و D3) استفاده نمود. لازم به یادآوری است که در الگوهای بی‌نظمی هم‌چون بافت خرابی-های سطح روسازی آسفالتی، استفاده از موجکی با عرض ساپورت کم و تغییرات ناگهانی مقادیر تابع هم‌چون Haar، نتیجه برتر و دقت عملکردی بالاتری به دنبال دارد. حساسیت عملکردی کلاس بندی ترک-های طولی، عرضی و پوست سوسماری در حوزه موجک CDF9/7 به ترتیب برابر با ۱۰۰ درصد، ۶۳/۳۳ درصد و ۶۶/۶۷ درصد است در حالی که در حوزه تبدیل‌های موجک D2 و D3 به طور میانگین برابر با ۰.۵۰٪، ۰٪ و ۰٪ است. حساسیت عملکردی کلاسه بندی خرابی قیرزدگی در حوزه موجک‌های D2 و D3 به طور میانگین برابر با ۶۹٪ بوده در حالی که در حوزه تبدیل موجک CDF9/7 برابر با ۰٪ است.

- Medicine, Vol. 37, No. 4, pp. 486–498.
- Jiang, J., Liu, H., Ye, H. and Feng, F. (2015) “Crack enhancement algorithm based on improved EM”, Journal of Comput Science, Vol. 12, No. 3, pp. 1037–1043.
  - Kara, B., Watsuji, N. (2003) “Using wavelets for texture classification”, In IJCI proceedings of international conference on signal processing, ISN 1304-2386, pp. 920–924.
  - Lee, D. (2003) “A robust position invariant artificial neural network for digital Pavement crack analysis”, Technical report, TRB Annual Meeting, Washington, DC, USA.
  - Manning, K. and Mohajeri, R. (1991) “An operating system of pavement distress diagnosis by image processing”, Transportation Research Record, TRB, National Research Council, Washington, DC, No. 1311, pp. 120–130.
  - 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.
  - 6. Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM)
  - 7. Discrete Wavelet Transform (DWT)
  - 8. Multi-resolution Analysis (MRA)
  - 9. Mother Wavelet Function
  - 10. Contrast
  - 11. Correlation
  - 12. Energy
  - 13. Homogeneity
  - 14. Mahalanobis Distance
  - 15. Confusion Matrix
  - 16. Specificity
  - 17. Sensitivity
  - 18. Precision
  - 19. Accuracy
۶. مراجع
- Acosta, J. A., Figueroa, J. L. and Mullen, R. L. (1995) “Algorithm for pavement distress classification by video image analysis”, Transportation Research Record, No. 1505, pp. 27–38.
  - Busch, A. W. (2004) “Wavelet transform for texture analysis with application to document analysis”, Doctoral dissertation, PhD Thesis, Queensland University of Technology.
  - 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 Semler, L. (2007) “A comparison of wavelet, ridgelet, and curvelet based texture classification algorithms in computed tomography”, Computers in Biology and

- “Pavement crack detection using the Gabor filter”, in: 2013 16th international IEEE conference on intelligent transportation systems: intelligent transportation systems for all modes, ITSC 2013. The Hague, pp. 2039-2044.
- 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.
  - Wang, W., Watkins, H. and Kuchikulla, K. (2002) “Digital distress survey of airport pavement surface”, Federal aviation administration airport technology transfer conference.
  - Wang, K. C. P. (2009) “Wavelet-based pavement distress image edge detection with Troun algorithm”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2024, pp. 73-81.
  - 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.
  - 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.
  - Mulcahy, C. (1997) “Image compression using the Haar wavelet transform”, Spelman Science and Math Journal, Vol. 1, pp. 22-31.
  - Nallamothu, 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.
  - Rezaei, K. and Agahi, H. (2015) “Segmentation and classification of brain tumor images using statistical texture features and SVM”, 2st National Conference on Development of Civil Engineering and Electricity, Iran, 17 Dec, 2015.
  - Rosa, P. (2012) “Automatic pavement crack detection and classification system”, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 57-65.
  - Salman, M., Mathavan, S., Kamal, K. and Rahman, M. (2013)

- evaluation”, Optical Engineering, Vol. 45, No. 2, pp. 2006-2011.
- 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, November 11-13.
  - 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.
  - 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.
  - Zhang, W., Zhang, Z., Qi, D. and Liu, Y. (2014) “Automatic crack detection and classification method for subway tunnel safety monitoring”, Sensors, Vol. 14, No. 10, pp. 19307-19328.
  - Zhou, J., Huang, P. S. and Chiang, F. (2006) “Wavelet-based pavement distress detection and

#### ۷. پیوست‌ها

پیوست ۱. ضرائب توابع جزئی ویولت (فیلتر بالاگذر) و مقیاس (فیلتر پائین‌گذر) موجک‌های منتخب

مقیاس	H(0)	H(1)	H(2)	H(3)	H(4)	H(5)	H(6)	H(7)	H(8)
Haar	۰/۷۱	۰/۷۱							
Daubechies 2	۰/۴۸	۰/۸۴	۰/۲۲	-۰/۱۳					
Daubechies 3	۰/۳۳	۰/۸۱	۰/۴۶	-۰/۱۳	-۰/۰۸	۰/۰۳			
CDF 9-7	۰/۰۴	-۰/۰۲	-۰/۱۱	۰/۳۸	۰/۸۵	۰/۳۸	-۰/۱۱	-۰/۰۲	۰/۰۴
ویولت	G(0)	G(1)	G(2)	G(3)	G(4)	G(5)	G(6)	G(7)	G(8)
Haar	۰/۷۱	-۰/۷۱							
Daubechies 2	-۰/۱۳	-۰/۲۲	۰/۸۴	-۰/۴۸					
Daubechies 3	۰/۰۳	۰/۰۸	-۰/۱۳	-۰/۴۶	۰/۸۱	-۰/۳۳			
CDF 9-7	-۰/۰۶	-۰/۰۴	۰/۴۲	۰/۷۹	۰/۴۲	-۰/۰۴	-۰/۰۶		

پیوست ۲. روابط و شرح توصیف‌کننده‌های بافت تصویر مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری [Aggarwal and Agrawal, 2012]

رابطه	شرح	ویژگی
$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (i-j)^2 p_{ij}$	بیانگر اختلاف و تضاد سطح خاکستری یک پیکسل با همسایه هایش در کل تصویر است. مقدار آن بین ۰ و $(N-1)^2$ است.	تضاد

$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{(i - m_r)(j - m_c)p_{ij}}{\sigma_r \sigma_c}$	<p>بیانگر میزان وابستگی سطح خاکستری یک پیکسل با مقادیر همسایه اش در کل تصویر است. مقدار حاصل بین ۱- و ۱ بوده که به ترتیب بیانگر همبستگی کامل مثبت و منفی است. در صورتی که واریانس صفر باشد، این ویژگی تعریف نشده است.</p>	<p>همبستگی</p>
$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ij}^2$	<p>بیانگر یکنواختی بوده و مقداری در رنج ۰ و ۱ دارد. ۱ به معنای یک تصویر کاملاً یکنواخت است.</p>	<p>همسانی</p>
$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{p_{ij}}{1 +  i - j }$	<p>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.</p>	<p>همگنی</p>

## تشخیص و طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های روسازی بر پایه آنالیز.....

رضا شهبابیان مقدم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه فردوسی مشهد و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-گرایش راه و ترابری را در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه فردوسی مشهد اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت روسازی و ارزیابی خودکار عملکرد روسازی است.



سید علی صحاف، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۴ از دانشگاه صنعتی شریف و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-گرایش راه و ترابری را در سال ۱۳۷۷ از دانشگاه صنعتی شریف اخذ نمود. در سال ۱۳۸۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مواد و مصالح روسازی آسفالتی و بتنی، مدیریت نگهداری روسازی و مهندسی ترافیک بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه فردوسی مشهد است.



حمیدرضا پوررضا، مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۳۶۸ در رشته الکترونیک از دانشگاه فردوسی مشهد اخذ نمود. وی سپس مدارج کارشناسی ارشد و دکتری خود در رشته‌های الکترونیک و کامپیوتر را در سالهای ۱۳۷۲ و ۱۳۸۲ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر دریافت نمود. ایشان از سال ۱۳۷۲ عضو هیات علمی دانشگاه فردوسی مشهد بوده و در حال حاضر با درجه دانشگاهی استاد، بر روی موضوعات پردازش تصویر، بینایی ماشین و حمل و نقل هوشمند تحقیق می‌کند.



ابوالفضل محمدزاده مقدم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-گرایش راه و ترابری را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه فردوسی مشهد اخذ نمود. در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران-گرایش راه و ترابری از دانشگاه فردوسی مشهد گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان ایمنی ترافیک، مهندسی حمل و نقل و تکنولوژی بتن آسفالتی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه فردوسی مشهد است.

