

# تحلیل میزان حساسیت جهتی تبدیل موجک در شناسایی هوشمند بافت خرابی‌های روسازی آسفالتی

رضا شهبان مقدم، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران- راه و ترابری، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

سید علی صحاف (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه عمران- راه و ترابری، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

ابوالفضل محمدزاده مقدم، استادیار، گروه عمران- راه و ترابری، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

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

E-mail: asahaf@um.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۲۸

دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۴

## چکیده

ارزیابی خرابی‌های سطحی راه جزء مراحل اصلی فرآیند مدیریت روسازی است. در دهه گذشته، مطالعات وسیعی پیرامون توسعه روش‌های خودکار شناسایی خرابی‌های روسازی انجام گرفته که غالباً بر پایه بینایی کامپیوتر و فنون پردازش تصویر هستند. یکی از مهم‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده سیستم‌های بینایی ماشین، الگوریتم استخراج ویژگی تصویر است. ویژگی‌های بافتی در مقایسه با دیگر ویژگی‌ها هم‌چون رنگ و ویژگی‌های هندسی، اطلاعات جامع‌تر و دقیق‌تری از الگوهای موجود در ناحیه‌های تصویر ارائه می‌نمایند. در سال‌های اخیر روش‌های آنالیز چندرزولوشن هم‌چون تبدیل موجک، ابزار کارآمدی جهت تجزیه و تحلیل بافت تصویر با سرعت و دقتی منحصر بفرد فراهم آورده است. در این پژوهش، پس از برداشت تصاویر شش گروه مختلف از خرابی‌های روسازی آسفالتی در شرایط کنترل شده، به منظور تحلیل ساختاری آن‌ها، از ۳ نوع تبدیل موجک گسسته دوبعدی شامل موجک‌های Haar 3 Daubechies و Coiflet 1 استفاده گردید. علاوه بر تبدیل‌های فوق، به منظور آنالیز میزان حساسیت جهتی تبدیل موجک در شناسایی بافت خرابی‌ها، تبدیل جهت‌دار موجک مختلط دودرختی نیز بر روی تصاویر اعمال گردید. پس از تجزیه تصاویر توسط اعمال تبدیل‌های مذکور، آمارگان مرتبه دوم بر پایه ماتریس هم‌رخداد و توصیف‌گرهای مرتبه سوم و بالاتر بر پایه ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری، به منظور تفسیر آماری بافت زیرباند‌های فرکانسی موجک‌ها و استخراج بردار ویژگی به کارگیری گردید. نتایج حاصل از طبقه‌بندی تصاویر خرابی بر اساس روش کمینه فاصله ممالانویس، حاکی از آن است که آمارگان مرتبه دوم مستخرج از زیرباند‌های تبدیل موجک مختلط دودرختی و موجک گسسته Haar به ترتیب با دقت کلاس‌بندی ۹۹ درصد و ۹۵ درصد، در تشخیص انواع خرابی نتایج بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها حاصل نموده‌اند. همچنین ویژگی‌های بافتی حاصل از ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری، به طور میانگین با دقت طبقه‌بندی ۸۷ درصد، عملکرد برتری نسبت به آمارگان ماتریس طول تکرار، در کلاس‌بندی تصاویر خرابی به دنبال داشته است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز بافت چندرزولوشن، حساسیت جهتی، خرابی روسازی آسفالتی، فاصله ممالانویس، موجک مختلط دودرختی.

## ۱. پیشگفتار

در کشور ایران که بیش از ۹۰ درصد حمل و نقل بار و مسافر متکی بر شبکه حمل و نقل زمینی است، شبکه جاده‌ای کشور نقش یک ثروت و سرمایه ملی فوق‌العاده کلیدی را داشته که بایستی با تمام توان در حفظ و نگهداری آن کوشید [Semnarshad, Kavussi and Saffarzadeh, 2017]. ارزیابی روسازی یکی از مهم‌ترین عناصر سیستم‌های مدیریت روسازی<sup>۱</sup> جهت تعیین راهکار صحیح و بهنگام عملیات مرمت و نگهداری راه محسوب می‌شود. ارزیابی روسازی شامل محدوده‌ای از اندازه‌گیری‌های کیفی و کمی برای تعیین شرایط عملکردی و سازه‌ای روسازی‌ها است. جمع‌آوری اطلاعات مرتبط با ارزیابی روسازی‌ها در قالب چهار بخش سرویس‌دهی، ظرفیت سازه‌ای، خرابی سطحی و ایمنی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شناسایی و پیمایش خرابی‌های سطحی راه از جمله مراحل اصلی فرآیند ارزیابی عملکردی روسازی در سطح شبکه و هم‌چنین در سطح پروژه محسوب می‌شود [Shahabian et al. 2017b]. اساساً از روش‌های دستی و بصری برای تعیین و تخمین خرابی‌های روسازی استفاده می‌شود. تجربیات نشان داده است که این رویکرد ارزیابی و نمره‌دهی روسازی علی‌رغم دقت بالا، هزینه و زمان زیادی طلب می‌کند، وابسته به قضاوت شخصی کارشناسان ارزیاب بوده و نتایجی ناپایدار و تکرارناپذیر به دنبال خواهد داشت. در دهه اخیر به منظور رفع نقائص مربوط به ارزیابی چشمی خرابی‌های روسازی، تحقیقات گسترده‌ای به منظور توسعه روش‌های نیمه خودکار و تمام خودکار بازرسی وضعیت روسازی انجام گرفته است. در ارزیابی تمام خودکار روسازی، تمامی مراحل برداشت و پردازش داده‌های خرابی به صورت اتوماتیک و بدون دخالت انسان انجام می‌گیرد. [Zakeri, Moghadas Nejad and Fahimifar, 2016, Wang et al. 2015].

چووا و زو [Chua and Xu, 1994] از ثوابت ممانی<sup>۲</sup> در حوزه مکان به منظور تقطیع و تشخیص ناحیه ترک‌خورگی استفاده نمودند. سپس با اتصال ترک‌های منفصل و بکارگیری الگوریتمی مبتنی بر ویژگی‌های هندسی به طبقه‌بندی انواع ترک خوردگی سطح روسازی آسفالتی پرداختند و در انتها بیش از ۵۵ درصد خطا گزارش نمودند. در مقاله مذکور از برنامه‌نویسی به منظور شناسایی نوع ترک‌خورگی استفاده گردید. به دلیل بی‌نظمی شدید، عدم وجود تعریف دقیقی از اغلب خرابی‌ها و وجود خیل عظیمی از اطلاعات مهم نهفته در داده‌های خرابی، نوشتن برنامه‌ای که قادر به توصیف انواع خرابی باشد، با خطای زیادی همراه است. بنابراین به منظور تحلیل انواع خرابی بایستی از الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین استفاده نمود. نالاموتها و وانگ [Nallamutho and Wang, 1996] از تابع خودهمبستگی<sup>۳</sup> به منظور توصیف بافت تصویر<sup>۴</sup> ترک‌های آسفالت استفاده نمودند. اندازه‌گیری تناوب فواصل بین الگوها اساس کار این روش است و بافت می‌تواند بر اساس فواصل بین ریزبافت‌ها به وسیله تابع خودهمبستگی توصیف شود. در این مقاله از روش K نزدیک‌ترین همسایه به منظور گروه بندی 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 دارای ماهیت تصادفی بوده و بسیار بی‌نظم بوده و در نظرگیری رابطه مکانی مشخصی میان تعداد از پیکسل‌ها (و ریزبافت‌ها) و تناوب فواصل عملکرد صحیحی نیست. ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری<sup>۵</sup> (استفاده شده در مقاله حاضر) از مقادیر دو پیکسل مجاور به منظور استخراج آمارگان بافتی 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>) متقارن به منظور آنالیز بافت تصاویر ترک‌خورگی سطح روسازی آسفالتی استفاده

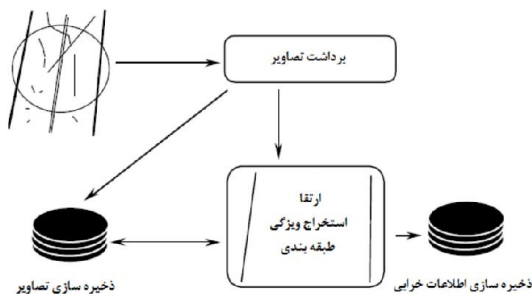
## تحلیل میزان حساسیت جهتی تبدیل موجک در شناسایی هوشمند بافت خرابی‌های روسازی آسفالتی

۶۴ درصد و ۷۶ درصد گزارش گردید. بایستی متذکر شد که ویژگی‌های بافتی خرابی‌ها با یکدیگر ارتباط و وابستگی داشته و فاصله اقلیدسی قادر به لحاظ نمودن این همبستگی‌ها نیست. [Moghadas Nejad and Zakeri, 2011b] از ترکیبی از ویژگی‌های بافتی مرتبه اول و مرتبه دوم (۱۸ ویژگی) در حوزه تبدیل موجک هار و کوئفلت ۶ و کرولت<sup>۹</sup> استفاده نمودند و از شبکه عصبی دینامیکی به جهت کلاس‌بندی ۷ نوع مختلف از ترک‌خوردگی‌ها شامل ترک بلوکی، ترک پوست-سوسماری، ترک موئی، ترک طولی، ترک عرضی، ترک قطری و ترک‌های چندگانه بهره‌گیری نمودند. لازم به ذکر است که در مقاله مزبور از روش‌های پیش‌پردازش و بهبود تصویر هم‌چون تعدیل هیستوگرام نیز استفاده گردید. در انتها در حوزه تبدیل موجک گسسته هار، کوئفلت و تبدیل جهت‌دار کرولت به ترتیب حدود ۰.۴٪، ۱.۵٪ و ۲٪ خطای کلاس‌بندی گزارش گردید. اویانگ 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 و تحلیل گردید. 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 کلاس-بندی خودکار دیگر خرابی‌های ایجاد شده در سطح روسازی هم چون قیرزدگی، عریان‌شدگی و غیره نیز بسیار حائز اهمیت بوده و گزینه‌های ترمیم و نگهداری پیشنهادی توسط سیستم مدیریت

نمودند. نتایج حاصل از کلاس‌بندی این تصاویر بر اساس روش یادگیری درخت تصمیم‌گیری حدود ۳۵٪ خطا به دنبال داشت. در تحقیق مزبور علاوه بر استفاده از تعداد زیادی از ویژگی‌ها و بار محاسباتی زیاد، ماتریس هم‌رخداد تنها در یک جهت و بصورت متقارن تشکیل گردید در حالی‌که به منظور تفکیک الگوهای خرابی بایستی نحوه توزیع مکانی سطوح خاکستری خرابی‌ها را در جهات مختلف و با در نظرگیری ترتیب قرارگیری پیکسل‌ها (ماتریس هم-رخداد غیر متقارن) آنالیز نمود. لی [Lee, 2003] از گشتاورهای آماری هیستوگرام ضرائب فوریه به منظور تحلیل بافت انواع ترک-های سطح روسازی استفاده نمود و از روش ماشین بردار پشتیبان به منظور کلاس‌بندی تصاویر بهره جست و حدود ۷۲٪ دقت عملکردی طبقه‌بندی، حاصل نمود. تبدیل فوریه نه تنها در ارائه اطلاعات مهم تصویر خرابی هم‌چون لبه‌ها تبدیلی کارا (تنک) نیست، بلکه تنها اطلاعات فرکانسی سیگنال را حفظ کرده و رزلوشن مکانی بطور کلی از بین می‌رود، در صورتی‌که برای تشخیص و تمیز دادن الگوهای مختلف خرابی روسازی هم‌چون ترک‌های طولی و عرضی، هم طیف فرکانسی و هم اطلاعات مکانی محتوای فرکانسی ضرورت دارد. در ادامه این تحقیق زو و همکاران [Zou et al. 2008] از روش‌های ارتقا تصویر<sup>۷</sup> هم‌چون بهبود هیستوگرام و تبدیل فوریه به منظور پیش‌پردازش تصاویر و از تکنیک‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین همچون شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور طبقه‌بندی آن‌ها استفاده کردند و حدود ۲۵٪ خطا در طبقه‌بندی تصاویر گزارش نمودند. وانگ [Wang, 2009] از آمارگان ماتریس طول شکاف سطوح خاکستری در قلمرو تبدیل فوریه و تبدیل موجک گسسته<sup>۸</sup> به منظور استخراج بردار ویژگی بافتی انواع ترک‌خوردگی‌های سطح روسازی آسفالتی و سپس از کمینه فاصله اقلیدسی جهت کلاس‌بندی تصاویر بهره‌گیری نمود. دقت عملکردی کلاس‌بندی تصاویر در حوزه فرکانس (تبدیل فوریه) و حوزه فرکانس-مکان (تبدیل موجک) به ترتیب

در این پژوهش بر روی شناسایی و تفکیک الگوی انواع خرابی‌های سطح آسفالت بوده اما در سیستم‌های مدیریت روسازی، علاوه بر تشخیص نوع خرابی، سنجش وسعت و شدت آن نیز حائز اهمیت است.

پردازش تمام‌خودکار خرابی‌های روسازی اغلب مبتنی بر سیستم‌های بینایی ماشین و الگوریتم‌های کامپیوتری است. از اجزای اصلی تشکیل دهنده این سیستم‌ها می‌توان به برداشت داده، بهبود و ارتقا تصویر، تقطیع، استخراج ویژگی تصویر و شناسایی الگو اشاره نمود (شکل ۱). 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 [Gonzalez and Woods, 2006]. ویژگی‌های مستخرج از تصویر هم‌چون رنگ، بافت، ثوابت ممانی 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 کامل‌تر 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].



شکل ۱. ساختار کلی سیستم‌های بینایی ماشین به منظور ارزیابی خودکار خرابی‌های روسازی.

روسازی را متاثر می‌نمایند. 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<sup>۱</sup> با افزونگی<sup>۱۱</sup> بالا، تعداد ویژگی‌های زیاد، الگوریتم کلاس‌بندی پیچیده و ...) دارا هستند که بالطبع منجر به افزایش زمان و هزینه ارزیابی عملکرد روسازی می‌گردد. در این پژوهش با بررسی بسیاری از تحقیقات پیشین در زمینه آنالیز و کلاس‌بندی انواع بافت‌ها، تعداد اندکی از ویژگی‌ها (۴ توصیف‌گر آماری) اما با بیشترین قدرت تمیزدهندگی به منظور توصیف بافت زیرباند‌های هرم موجک‌ها انتخاب گردید و از یک شیوه کلاس‌بندی ساده (کمینه فاصله ماکسولانویس<sup>۱۲</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 است.

استفاده از سیستم‌های تصویربرداری (اسکن) سه‌بعدی لیزری به دلیل هزینه زیاد و پیچیدگی الگوریتم‌های سه‌بعدی شناسایی الگو، عملکردی بهینه و مقرون به صرفه به منظور برداشت و آنالیز داده‌های خرابی روسازی نیست زیرا خصوصیات سطحی (دو بعدی) خرابی‌ها، بخش عمده و مهم اطلاعات و ویژگی‌های توصیف‌کننده هر خرابی را به منظور تفکیک و شناسایی الگوی آن، شامل می‌شود. بنابراین در این تحقیق به منظور برداشت تصاویر خرابی از تصویربرداری دو بعدی توسط دوربین دیجیتال استفاده شده است. به طور خلاصه اکثر سامانه‌های برداشت اتوماتیک خرابی‌های روسازی مشکلی در تهیه اطلاعات نداشته و مهم‌ترین نقص و محدودیت آن‌ها در آنالیز (پردازش) اتوماتیک و ارزیابی کارآمد داده‌های خرابی نهفته است [Moghadas Nejad and Zakeri, 2011a]. در این تحقیق نیز تمرکز اصلی بر روی فاز آنالیز تصاویر و الگوریتم‌های شناسایی الگوی انواع خرابی‌های روسازی آسفالتی است. لازم به ذکر است که اگرچه تمرکز اصلی

## تحلیل میزان حساسیت جهتی تبدیل موجک در شناسایی هوشمند بافت خرابی‌های روسازی آسفالتی

[Wimmer et al. 2016]. زیرباندهای حاصل از اعمال 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 جهت‌دار می‌توان به تبدیل موجک مختلط دو درختی<sup>۱۸</sup> اشاره نمود.

خرابی‌های مشاهده شده در روسازی‌ها، به دو خانواده اصلی شامل خرابی‌های بنیادی و خرابی‌های عملکردی (سطحی) تقسیم می‌شوند. از جمله مهم‌ترین خرابی‌های بنیادی روسازی آسفالتی می‌توان به ترک‌های خستگی (پوست‌سوسماری)، ترک‌های طولی و عرضی اشاره نمود. وصله، روزدگی قیر و عریان‌شدگی نیز از اهم خرابی‌های عملکردی سطح روسازی آسفالتی است [Shahabian, 2017]. علاوه بر خرابی‌های مذکور، تصاویر آسفالت سالم (بدون خرابی) نیز در این پژوهش مورد تحلیل و پردازش قرار گرفتند. بنابراین برداشت‌های انجام شده از سطح روسازی آسفالتی در هفت گروه مختلف طبقه‌بندی گردید. در این تحقیق، به منظور تجزیه تصاویر خرابی روسازی آسفالتی و جداسازی زیرباندهای فرکانسی، از ۴ نوع تبدیل چند دقتی دوبعدی بر پایه موجک گسسته Haar (H)، موجک گسسته Daubechies 3 (D3)، موجک گسسته Coiflet 1 (C1) و موجک مختلط دودرختی (DT-CWT) استفاده شده است. 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. مقادیر سطوح خاکستری تشکیل دهنده بافت اکثر خرابی‌های سطح روسازی، ارتباط مکانی مشخصی با یکدیگر داشته بنابراین در این تحقیق با توجه به حفظ اطلاعات مکانی در تبدیلات موجک (بر خلاف تبدیل فوری)، به منظور آنالیز بافت

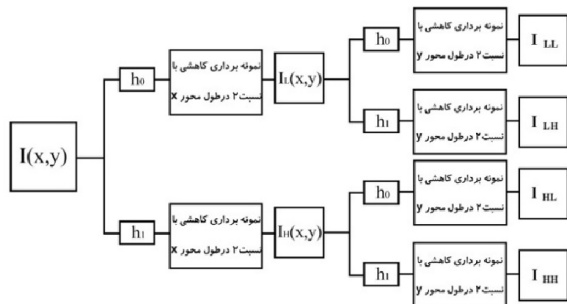
بافت تصویر عبارت است از تکرار یک المان (تکسل<sup>۱۳</sup>) با الگویی خاص که این المان خود از تغییرات محلی مقادیر سطوح خاکستری بیکسل‌های تصویر تشکیل یافته است. از انواع بافت می‌توان به بافت خشن، ظریف، هموار، موج و خطی اشاره نمود. به منظور استخراج ویژگی‌های بافتی تصویر از ابزارهای متعددی هم‌چون توصیف ساختاری، توصیف آماری و تکنیک‌های آنالیز چند دقتی<sup>۱۴</sup> (چند رزولوشن) استفاده می‌شود [Aggarawal and Agrawal, 2012]. روش‌های آنالیز آماری بافت چنددقتی یا به عبارتی توصیف آماری بافت تصویر در حوزه تبدیل چنددقتی 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 چنددقتی موجک، مقادیر و میزان شباهت (نزدیکی) با الگوی تابع موجک (محتوای فرکانسی) بررسی و تحلیل می‌شود. این امر تا حد زیادی از بی‌نظمی‌های سطوح خاکستری تشکیل دهنده بافت خرابی‌ها که در حوزه مکان موجود بوده، می‌کاهد. همین امر باعث شده روش‌های آنالیز چند دقتی 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 عبارت دیگر موجک‌ها قابلیت استخراج اطلاعات زمانی (اطلاعات مکانی در تصویر) و فرکانسی را به طور هم‌زمان دارند، در صورتی که تبدیل فوری تنها در حوزه فرکانس جانمایی (محلیت) دارد. تحقیقات نشان داده است که استفاده از تبدیل موجک به علت انعطاف‌پذیری، توانایی بیشتر در تحلیل تصاویر، آنالیز چند دقتی، کاهش حجم اطلاعات و در نتیجه افزایش سرعت پردازش داده‌ها، نسبت به تبدیل فوری کارایی برتری دارد.

که در آن  $h_0$  و  $h_1$  به ترتیب نعره ضرائب فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر (بانک فیلتر) می‌باشند و وابسته به اینکه جزء کدام خانواده از موجک‌ها باشند، متفاوت هستند [Chang and Kuo, 1993].

در کاربردهای عملی، مستقیماً به توابع موجک و مقیاس پرداخته نمی‌شود، بلکه به منظور اعمال تبدیل موجک و تجزیه سیگنال از فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر استفاده می‌گردد. خروجی فیلتر پایین‌گذر، زیرباند تخمین سیگنال بوده که دربرگیرنده اطلاعات فرکانس پایین است و خروجی فیلتر بالاگذر، زیرباند جزئیات تابع ورودی بوده که حاوی مولفه‌های فرکانس بالا سیگنال است. وابسته به میزان دقت فرکانسی مورد نیاز، تجزیه زیرباند حاصل از اعمال فیلتر پایین‌گذر می‌تواند تکرار شود و زیرباندهای سطوح مختلف تجزیه موجک را تشکیل دهد [Mostafa et al. 2006].

برای اعمال تبدیل موجک گسسته بر سیگنال‌های تصویری، بایستی از تبدیل موجک دوبعدی استفاده نمود. به این منظور تبدیل موجک یک‌بعدی به ترتیب بر سطرها و ستون‌های ماتریس تصویر اعمال می‌گردد تا از ترکیب مولفه‌های حاصله، تبدیل دوبعدی بدست آید. فرآیند مذکور در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. بلوک دیاگرام یک لایه تجزیه موجک تصویر [Mostafa et al. 2006].

در هر مرحله از تجزیه، تصویر  $I(x,y)$  در راستای سطرها از یک فیلتر پایین‌گذر و یک فیلتر بالاگذر عبور نموده و نمونه‌برداری کاهشی (زیرنمونه‌برداری) می‌شود. در این مرحله دو تصویر

زیرباندها و تحلیل نحوه توزیع ضرائب موجک (محتوای فرکانسی)، از آمارگان مرتبه دوم بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری و شاخص‌های آماری مرتبه سوم و بالاتر بر پایه ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری<sup>۱۹</sup> استفاده شده است. این آماره‌ها بر خلاف شاخص‌های آماری مرتبه اول با در نظرگیری تعامل مکانی میان مقادیر سطوح خاکستری پیکسل‌های تصویر (ضرائب موجک نرمالیزه شده)، محاسبه و استخراج می‌شوند [Singh, 2016]. در نهایت، با استفاده از شاخص‌های محاسبه شده، طبقه‌بندی تصاویر خرابی بر اساس روش کمینه فاصله ماهالانویس صورت گرفته و عملکرد کلاس‌بندی توسط ۲ شاخص حساسیت<sup>۲۰</sup> و دقت<sup>۲۱</sup> مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۲. مفاهیم تئوری

در این بخش از مقاله، مبانی نظری تبدیلات موجک گسسته و موجک مختلط دودرختی به همراه مفاهیم پایه توصیف‌گرهای بافتی مرتبه دوم و مراتب بالاتر ارائه شده است.

### ۲-۱ تبدیل موجک گسسته

تبدیل موجک گسسته عبارتست از تجزیه یک سیگنال به مجموعه‌ای از توابع موجک فرزند  $\phi_{mn}(t)$  که مطابق رابطه ۱ از انتقال و تغییر مقیاس تابع موجک مادر  $\phi(t)$  بدست آمده‌اند.

$$\phi_{mn}(t) = 2^{-m/2} \phi(2^{-m}t - n) \quad (1)$$

که در آن  $m$  و  $n$  به ترتیب شاخص‌های مربوط به تغییر مقیاس (سطح تجزیه)<sup>۲۲</sup> و انتقال (شیفت) هستند.

تابع موجک مادر از توابع مقیاس  $\phi(t)$  طبق رابطه ۲ و ۳ مشتق می‌گردند.

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_0(k) \phi(2t - k) \quad (2)$$

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_1(k) \phi(2t - k) \quad (3)$$

## تحلیل میزان حساسیت جهتی تبدیل موجک در شناسایی هوشمند بافت خرابی‌های روسازی آسفالتی

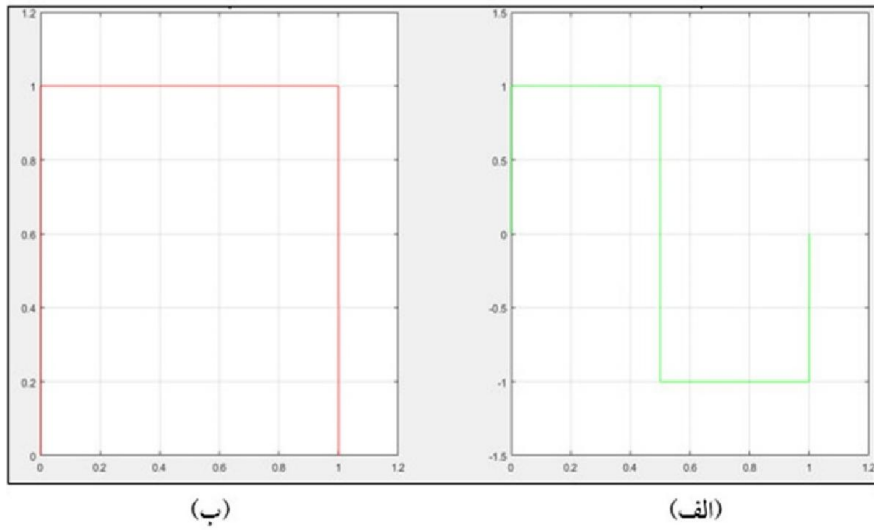
(فیلتر) معروف و پرکاربرد از موجک‌های گسسته شامل موجک-های (Haar (H), Daubechies 3 (D3) و Coiflet 1 (C1) به منظور تحلیل خرابی‌های آسفالت مورد ارزیابی قرار گرفت. دلیل انتخاب این موجک‌ها، علاوه بر فرضیه آزمون و خطا، شمای متفاوت توابع ویولت و مقیاس این موجک‌ها، با در نظر گرفتن عرض ساپورت پنجره (مرتبط با تعداد پیکسل‌های مجاور بکارگیری شده) و طول فیلترهای این موجک‌ها به منظور استخراج ضرائب تخمین و جزئیات است. 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. نمایی از توابع ویولت و مقیاس موجک‌های مذکور در شکل‌های ۳ الی ۵ ارائه شده است. موجک‌های Daubechies شمایی همچون نوار قلب داشته و نامتقارن و دارای تغییرات ناگهانی بوده در حالی‌که موجک‌های Coiflet شمایی گنبدی‌شکل (تغییرات نرم)، منظم و متقارن دارند. قابل 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، خواص، کاربرد و ضرائب بانک فیلتر این موجک‌ها رجوع شود به [Kara and Watsuji, 2003, Mulcahy, 1997].

حاصل می‌شود که یکی شامل فرکانسهای پایین تصویر  $I_L(x,y)$  و دیگری شامل فرکانسهای بالای تصویر  $I_H(x,y)$  است. در مرحله بعدی، عملیات فیلترینگ هر یک از این دو تصویر در راستای ستون‌ها انجام گرفته و نمونه‌برداری کاهش می‌شود. در نتیجه چهار زیرتصویر (زیربانند) حاصل می‌شود که عبارتند از:

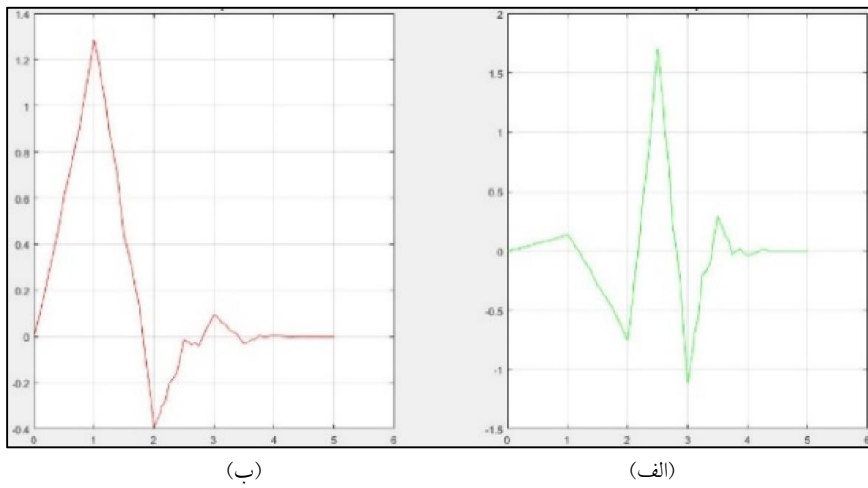
- زیربانند  $I_{LL}$  متناظر است با مولفه فرکانس پایین تصویر. این زیربانند حاوی کلیات تصویر اولیه بوده و تحت عنوان ماتریس ضرائب تخمین (تقریب) موجک شناخته می‌شود.
- زیربانند فرکانس بالا  $I_{LH}$  که دربرگیرنده جزئیات (لبه‌ها) افقی تصویر است.
- زیربانند فرکانس بالا  $I_{HL}$  که شامل جزئیات (لبه‌ها) عمودی تصویر است.
- زیربانند فرکانس بالا  $I_{HH}$  که حاوی جزئیات (لبه‌ها) قطری تصویر است.

ویژگی‌های استخراج شده از این ماتریس‌ها، به عبارتی بررسی نحوه توزیع و ارتباط مکانی میان ضرائب موجک (محتوای فرکانسی) به طور منحصر به فردی، قادرند خصوصیات بافت تصویر را توصیف نمایند [Mojsilovic and Sevic, 1996]. هر یک از خانواده‌های مختلف تبدیل موجک، توابع مادر مقیاس و ویولت منحصر به فردی دارند. در این مطالعه، عملکرد ۳ خانواده

رضا شهبان مقدم، سید علی صحاف، ابوالفضل محمدزاده مقدم، حمیدرضا پوررضا



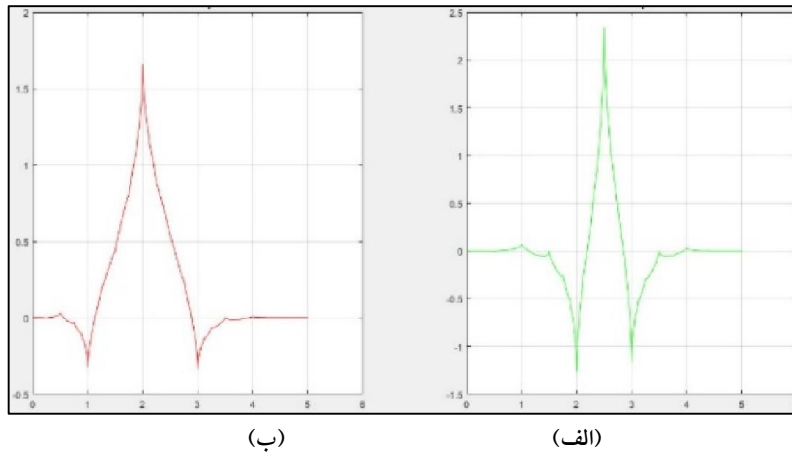
شکل ۳. تابع ویولت Haar / تابع مقیاس Haar



شکل ۴. تابع ویولت D3 / تابع مقیاس D3



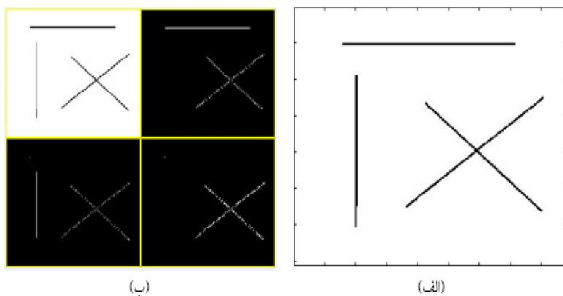
## تحلیل میزان حساسیت جهتی تبدیل موجک در شناسایی هوشمند بافت خرابی‌های روسازی آسفالتی



شکل ۵. تابع ویولت C1 / ب: تابع مقیاس C1.

مورب موجود در بسیاری از تصاویر می شود ( شکل

۶).



شکل ۶. الف: تصویری شامل ناپوستگی‌های خطی افقی، قائم و مورب/ ب: هرم حاصل از اعمال یک لایه تجزیه موجک گسسته هار

بر روی تصویر الف [Shahabian, 2017].

همان‌طور که در شکل ۶ مشهود است، جزئیات ساختاری بافت گسستگی‌های افقی و قائم در زیرباندهای مشخصی خلاصه شده، اما اطلاعات مولفه‌های مورب تصویر نه تنها در تمامی زیرباندها پراکنده شده بلکه تبدیل موجک گسسته دوبعدی قادر به تفکیک جهات  $+45^\circ$  و  $-45^\circ$  نیز نیست.

## ۲-۲ تبدیل موجک مختلط دو درختی

تبدیل موجک گسسته علی‌رغم تحلیل چنددقته و حفظ اجزای فرکانس بال سیگنالا (لبه‌های تصویر) دارای دو نقص مهم بوده که باعث محدودیت کاربرد آن در بسیاری از پردازش‌ها می‌شود، این دو نقص عبارتند از:

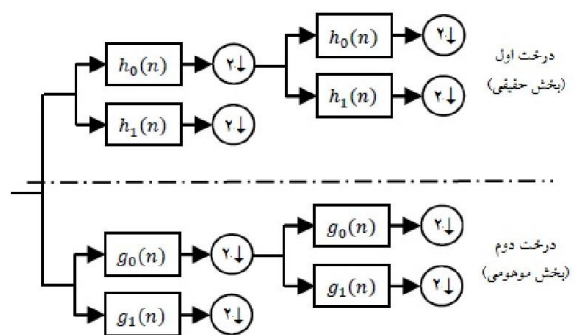
- نسبت به انتقال (شیفت) متغیر است یعنی یک شیفت کوچک در سیگنال ورودی، منجر به تغییرات نسبتاً شدیدی در ضرایب موجک در اطراف گسستگی‌ها می‌شود. این نقیصه باعث تفاوت در ضرایب موجک دو الگوی یکسان شده و کاهش دقت کلاسه‌بندی داده‌ها را به دنبال خواهد داشت.
- از آنجایی که توابع دو بعدی موجک‌های گسسته، جداپذیر و دارای مقادیر حقیقی هستند دارای ضعف در تفکیک عناصر و مولفه‌های قطری تصویر بوده و همچنین دارای حساسیت جهتی پایینی (افقی، عمودی و قطری) می‌باشند؛ در نتیجه باعث پراکندگی اطلاعات مهم و نا کارآمدی تبدیل مذکور در شناسایی گسستگی‌های جهت‌دار شامل لبه‌های منحنی و خطی

جهت  $\pm 15^\circ$ ،  $\pm 45^\circ$  و  $\pm 75^\circ$  در بر دارند، استفاده می‌نماید. در شکل ۸ شمایی از توابع موجک مختلط دوبعدی در حوزه مکان و طیف ایده‌آل فرکانسی هر کدام ارائه شده است. در واقع در اثر اعمال تبدیل موجک مختلط دو بعدی و در نظر گرفتن 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 غالباً نتیجه برتری در تحلیل و آنالیز بافت تصاویر حاصل نماید. لازم به ذکر است که پراکنده شدن اطلاعات مهم تصویر در زیرباندهای مختلف موجب افزایش احتمال استخراج ویژگی‌های مشابه از الگوهای متفاوت و تداخل آن‌ها شده و این امر، کاهش نرخ دقت شناسایی و طبقه‌بندی داده‌ها را به دنبال دارد [Sadeghi et al. 2015].

### ۲-۳ آمارگان بافتی مرتبه دوم

زیرباندهای تجزیه شده در اثر اعمال تبدیل‌های چند دقته، 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 تصاویر (زیرباندها) و استخراج بردار ویژگی، از آمارگان مرتبه دوم بر پایه ماتریس هم‌رخداد و شاخص‌های آماری مرتبه سوم و بالاتر بر پایه ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری، استفاده شده است. شاخص‌های آماری مرتبه دوم از مقادیر دو پیکسل جهت تفسیر و توصیف بافت تصویر بهره می‌گیرد، در صورتی که تعداد پیکسل-های بکارگیری شده جهت استخراج شاخص‌های آماری مرتبه سوم و بالاتر، برابر با بعد تصویر در راستای تشکیل ماتریس طول تکرار است.

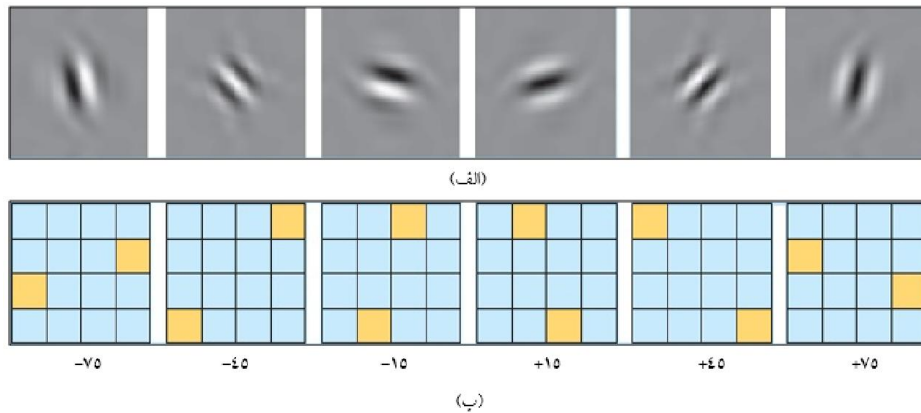
تبدیل موجک مختلط با اضافه کردن افزونگی محدودی (برابر با ۴)، بر این دو نقص غلبه کرده است [Wimmer et al. 2016]. این روش، دو تبدیل موجک گسسته را در قالب دو درخت (مطابق شکل ۷) بکار می‌گیرد. تبدیل موجک گسسته اول (درخت اول) بخش حقیقی تبدیل مختلط و تبدیل موجک گسسته دوم (درخت دوم) بخش موهومی موجک مختلط را تولید 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>۲۴</sup> را تشکیل داده ( $90^\circ$  اختلاف فاز داشته) و در نتیجه حوزه پشتیبانی موجک مختلط تنها یک نیمه از محور فرکانسی (طیف فوریه یک‌طرفه) را شامل می‌گردد [Kingsbury, 1998]. 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 دوطرفه بودن طیف فرکانسی آن است.



شکل ۷. اعمال ۱ مرحله (لایه) تبدیل موجک مختلط دودرختی یک بعدی توسط بانک فیلتر [Sadeghi et al. 2015].

تبدیل موجک مختلط دوبعدی از شش تابع موجک مختلط به منظور تجزیه سیگنال تصویری و یافتن زیرباندهای فرکانس بالا که تغییرات محلی و اجزا بافت تصویر (هم‌چون لبه‌ها) را در شش

## تحلیل میزان حساسیت جهتی تبدیل موجک در شناسایی هوشمند بافت خرابی‌های روسازی آسفالتی



شکل ۸. قسمت حقیقی توابع موجک جهت‌دار مرتبط با تبدیل موجک مختلط در حوزه مکان / ب: طیف فوریه ایده‌آل توابع قسمت (الف) در صفحه دوبعدی فرکانس.

که در زاویه  $\theta$  و فاصله  $d$  از هم قرار گرفته‌اند. در اغلب مقالات، پس از نرمالیزه نمودن ماتریس، به منظور توصیف و آنالیز آماری بافت تصویر (زیرباند) از  $\epsilon$  ویژگی مهم ماتریس هم‌رخداد شامل تضاد<sup>۲۵</sup>، همبستگی<sup>۲۶</sup>، انرژی<sup>۲۷</sup> و همگنی<sup>۲۸</sup> استفاده می‌شود. روابط و شرح این آماره‌ها در مرجع [Shahabian, 2017] ارائه گشته است.

### ۲-۴ آمارگان بافتی مرتبه سوم و بالاتر

ماتریس طول تکرار (طول دنباله) سطوح خاکستری تصویر، ابزار مناسبی جهت محاسبه شاخص‌های آماری مرتبه سوم و بالاتر فراهم آورده است. درایه‌های این ماتریس  $P(i,j)$  نشان‌دهنده طول تکرار  $(j)$  پیکسل‌هایی با سطح خاکستری  $(i)$  در جهت مشخص  $(\theta)$  در تصویر اصلی است [Tang, 1998]. پس از تقسیم مقادیر طول تکرار بر مجموع کل مقادیر ماتریس، درایه‌های نرمالیزه شده  $p_{ij}$  ماتریس طول تکرار مطابق با رابطه ۵ بدست می‌آید.

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

این شاخص‌ها بر خلاف آمارگان مرتبه اول نسبت به جابجایی پیکسل‌های تصویر حساس می‌باشند [Singh, 2016].

ماتریس هم‌رخداد اولین بار توسط هارالیک معرفی شد. این ماتریس را می‌توان در زوایای گوناگون و فواصل پیکسلی مختلف تعریف کرد که هر کدام به نوعی ویژگی‌های بافت را توصیف و ارائه می‌نمایند. از کاستی‌های این روش، حجم محاسباتی نسبتاً بالا است. برای استخراج ویژگی باید از تابع چگالی احتمال  $f(i,j|d,\theta)$  استفاده نمود. برای تخمین تابع چگالی احتمال باید جفت پیکسل-هایی (ضرائب موجک) با سطوح خاکستری  $i$  و  $j$  که به فاصله  $d$  و در زاویه  $\theta$  از هم قرار گرفته‌اند را شمارش کرد [Horng, Sun and Lin, 2000]. ماتریس هم‌رخداد طبق رابطه ۴ محاسبه می‌گردد.

$$P_{d,\theta}(x,y) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} g(i,j) = x, \quad g(I,J) = y \quad (4)$$

در رابطه ۴،  $M$  و  $N$  به ترتیب بیان‌گر تعداد پیکسل‌های تصویر در راستای افقی و عمودی هستند.  $g(i,j)$  مقدار سطح خاکستری پیکسل در نقطه  $(i,j)$  و  $g(I,J)$  نیز مقدار سطح خاکستری پیکسل در موقعیت  $(I=I+i, J=J+j)$  است.  $r$  فاصله بین دو پیکسل است

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 ارتقای تصاویر را برطرف نمود. لازم به ذکر است که تمامی تصاویر خرابی در شرایط یکسان و با دوربین دیجیتال Fujifilm با مساحت تصویر (رزولوشن) ۱۴ مگاپیکسل از ارتفاع یک متری سطح آسفالت (بدون بزرگنمایی) برداشت شده است. در 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. لازم به یادآوری است که الگوریتم‌های آنالیز بافت پیشنهادی، مبتنی بر تعداد و تعامل مکانی مقادیر سطوح خاکستری تصاویر خرابی است. قابل به ذکر است که تصویربرداری هنگام عدم تابش شدید نور خورشید (بعد از ظهر) و در زمانی تاثیر منفی سایه‌ها به حداقل می‌رسد، بیشترین شباهت را به شرایط روشنایی کنترل شده دارا است. این امر در پیاده‌سازی اجرایی سیستم‌های ارزیابی خودکار خرابی‌های روسازی بایستی در نظر گرفته شود.



شکل ۹. سخت افزار برداشت تصاویر خرابی روسازی آسفالتی در شرایط کنترل شده.

N در این رابطه، برابر با بیشینه مقدار سطح خاکستری موجود (ممکن) و M برابر با حداکثر تعداد پیکسل‌های تصویر (حداکثر تکرار ممکن) در جهت  $(\theta)$  است.

ماتریس نرمالیزه شده طول تکرار را می‌توان به عنوان یک تابع چگالی احتمال در نظر گرفته و با محاسبه شاخص‌های متنوعی هم‌چون ضربه (قوه) تکرار کوتاه<sup>۲۹</sup>، ضربه (قوه) تکرار بلند<sup>۳۰</sup>، عدم یکنواختی سطوح خاکستری<sup>۳۱</sup> و درصد تکرار<sup>۳۲</sup>، ویژگی‌های بافت تصویر (زیرباند) را استخراج و توصیف نمود. روابط و شرح این آماره‌ها در مرجع [Shahabian, 2017] ارائه گشته است.

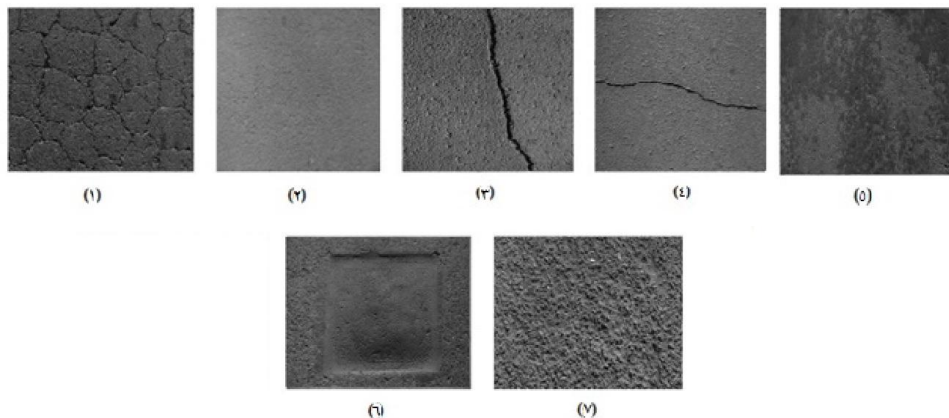
### ۳. صحت‌سنجی الگوریتم‌های استخراج ویژگی

در این بخش از تحقیق، به منظور اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد روش‌های پیشنهادی در تشخیص و تفکیک خودکار خرابی‌های روسازی آسفالتی، اقدام به برداشت تصاویر خرابی‌های سطح روسازی نموده و الگوریتم‌های استخراج بردار ویژگی بر روی این تصاویر مورد آزمایش قرار گرفت. مراحل انجام تحقیق به طور کلی شامل ۶ مرحله است: ۱. برداشت تصاویر خرابی آسفالت در شرایط کنترل شده ۲. اعمال تبدیل‌های موجک گسسته و مختلط دوبعدی ۳. استخراج بردار ویژگی بافتی بر پایه آماره‌های مرتبه دوم و بالاتر ۴. کلاس‌بندی تصاویر خرابی ۵. ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی ۶. بحث و بررسی نتایج.

### ۳-۱ برداشت تصاویر خرابی روسازی آسفالتی

در این تحقیق به منظور برداشت تصاویر خرابی در کیفیت بالا و شرایط نور کنترل شده، سخت‌افزاری مطابق شکل ۹ مورد استفاده قرار گرفت. این سخت‌افزار با حذف کامل نور محیط توسط

## تحلیل میزان حساسیت جهتی تبدیل موجک در شناسایی هوشمند بافت خرابی‌های روسازی آسفالتی



شکل ۱۰. طبقه بندی تصاویر برداشت شده از سطح روسازی آسفالتی (۱). ترک پوست‌سوماری ۲. آسفالت سالم ۳. ترک طولی ۴. ترک عرضی ۵. قیرزدگی ۶. وصله ۷. عریان‌شدگی).

### 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 Coiflet 1 به منظور تجزیه تصاویر در ۲ لایه استفاده گردید. سطح تجزیه اعمال شده نقش موثری در برجسته‌سازی ساختار لبه‌ها و ناسازگاریهای<sup>۳۳</sup> موجود در بافت تصویر خرابی ایفا می‌کند. 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-نظمی‌های بیشتری نیز جذب شوند. به عبارت دیگر علی‌رغم افزایش دقت فرکانسی، تفکیک‌پذیری و محلی‌سازی مکانی (رزولوشن مکانی) کاهش یافته و باعث اغتشاش و تنزل کیفیت ارائه خرابی در زیرباندها می‌گردد. در نتیجه تحلیل و استخراج ویژگی‌های این زیرباندها باعث افت دقت تشخیص و طبقه‌بندی داده‌ها می‌شود. در تحقیقات مختلف ثابت شده که تعداد سطوح تجزیه بهینه موجک به منظور شناسایی بسیاری از بافت‌ها برابر با ۲ است [Dettori and Semler, 2007].

تصاویر برداشت شده از روسازی در ۷ گروه شامل ۱. ترک پوست-سوماری ۲. آسفالت سالم (بدون خرابی) ۳. ترک طولی ۴. ترک عرضی ۵. قیرزدگی ۶. وصله ۷. عریان‌شدگی مطابق شکل ۱۰ طبقه بندی گردید. از هر گروه، تعداد ۶۰ عدد تصویر برداشت گردید که ۳۰ عدد از آنها به طور تصادفی به منظور یادگیری الگوریتم (تصاویر آموزشی) و ۳۰ عدد با هدف ارزیابی الگوریتم (تصاویر آزمایشی) مورد آنالیز و بررسی قرار گرفت

### ۳-۲ اعمال تبدیل‌های موجک

در این پژوهش به منظور تجزیه تصاویر و تولید زیرباندهای فرکانسی تصاویر (ماتریس‌های ضرائب)، از دو نوع تبدیل موجک دوبعدی شامل تبدیل موجک گسسته و تبدیل موجک مختلط دو درختی استفاده شده است. به منظور مقایسه خانواده‌های مختلف تبدیل موجک گسسته، از ۳ گروه از فیلترها شامل موجک Haar، موجک 3 Daubechies و موجک Coiflet 1 بهره‌گیری 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 ماتریس‌های ضرائب جزئیات  $t1$  (t6) و ۶ زیرباند دیگر بخش موهومی این ماتریس‌ها (t7-t12) را تشکیل می‌دهند. زیرباندهای این بخش‌ها، جزئیات ساختاری بافت خرابی و اطلاعات مربوط به لبه‌های تصویر را در ۶ جهت مجزا  $150^\circ \pm$ ،  $45^\circ \pm$  و  $75^\circ \pm$  ارائه می‌نمایند. در این پژوهش، همانند تبدیل موجک گسسته، پس از آن‌که مقادیر ماتریس‌ها بین صفر و یک نرمالیزه گشتند، آماره‌های مرتبه دوم و بالاتر از تمامی زیرتصویرها (زیرباندها) به منظور آنالیز بافت تصاویر خرابی استخراج می‌شوند.

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

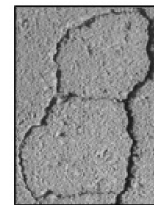
در این تحقیق، به منظور آنالیز بافت زیرباندهای تجزیه شده و توصیف نحوه توزیع محتوای فرکانسی تصاویر خرابی، از آمارگان مستخرج از ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری و ماتریس طول تکرار، استفاده شده است.

### ۳-۳-۱ آنالیز بافت بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری

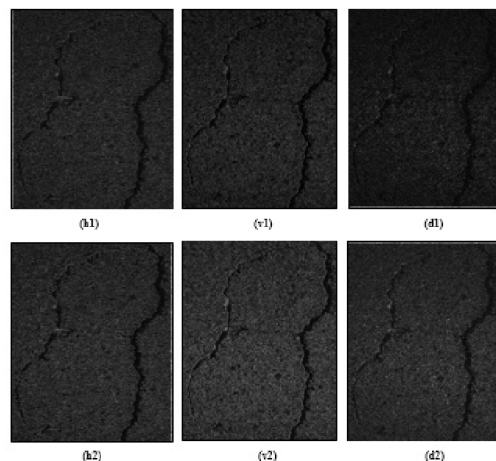
در این تحقیق، ابعاد ماتریس هم‌رخداد برابر با ۲۵۶، پارامتر فاصله برابر با واحد و با توجه به توزیع مکانی گوناگون سطوح خاکستری در الگوهای خرابی مختلف، ۴ زاویه مجزا ( $0^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $90^\circ$ ،  $135^\circ$ ) به عنوان پارامتر جهت به منظور تشکیل ماتریس هم‌رخداد انتخاب گردید.

پس از نرمالیزه نمودن مقادیر ماتریس هم‌رخداد (G) زیرباندهای تجزیه شده توسط تبدیل‌های موجک، شاخص‌های آماری مرتبه دوم شامل تضاد، همبستگی، همسانی و همگنی به طور مجزا در هر ۴ جهت انتخابی استخراج شده و میانگین حسابی آنها به عنوان

در این تحقیق پس از اعمال ۲ مرحله تبدیل موجک گسسته دوبعدی (توسط ۳ فیلتر منتخب) و استخراج ماتریس‌های ضرائب تخمین و جزئیات، شامل جزئیات افقی، عمودی و قطری، مقادیر این ماتریس‌ها بین صفر و یک نرمالیزه گردید. در انتها عملیات استخراج ویژگی و آنالیز بافت بر روی تمامی ۷ زیرتصویر (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. به عنوان نمونه در شکل ۱۱ زیرباندهای تخمین و جزئیات حاصل از دو لایه تجزیه موجک Haar بر ترک پوست‌سوسماری نشان داده شده است.



(a2)

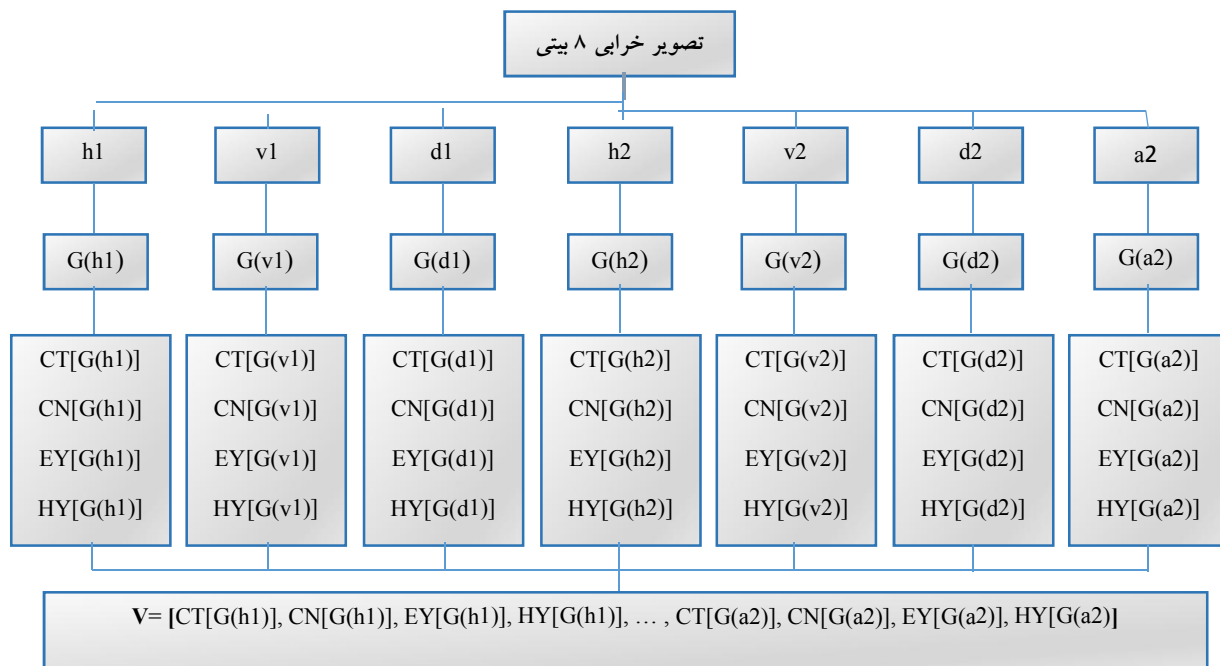


شکل ۱۱. اعمال دو لایه تبدیل موجک گسسته Haar و استخراج کلیات و جزئیات ساختاری بافت ترک پوست‌سوسماری.

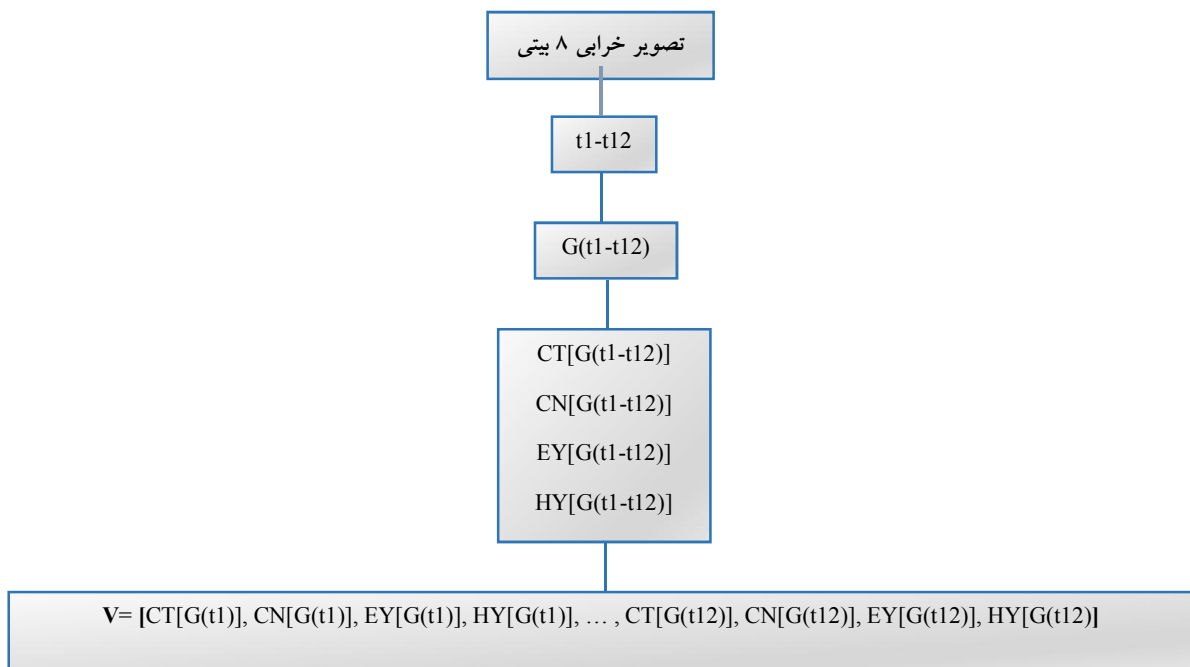
## تحلیل میزان حساسیت جهتی تبدیل موجک در شناسایی هوشمند بافت خرابی‌های روسازی آسفالتی

در اشکال ۱۲ و ۱۳ به ترتیب روند استخراج بردار ویژگی به وسیله آمارگان ماتریس هم‌رخداد، مبتنی بر تبدیل موجک گسسته و تبدیل موجک مختلط دو درختی ارائه شده است. این بردارها به ترتیب ۲۸ و ۴۸ درایه دارند.

شاخص‌های نهایی تضاد (CT)، همبستگی (CN)، همسانی (EY) و همگنی (HY) محاسبه می‌شوند. این شاخص‌های نهایی درایه-های بردار ویژگی (V) را تشکیل می‌دهند. این بردار، نماینده بافت تصویر اصلی در فرآیند کلاس‌بندی تصاویر خرابی قلمداد می‌شود.



شکل ۱۲. الگوریتم استخراج بردار ویژگی تصویر توسط ماتریس هم‌رخداد زیرباندهای تبدیل موجک گسسته.



شکل ۱۳. الگوریتم استخراج بردار ویژگی تصویر بر پایه ماتریس هم‌رخداد زیرباند‌های تبدیل موجک مختلط دو درختی

روش‌های آنالیز بافت به‌کارگیری شده در این پژوهش جهت طبقه‌بندی تصاویر انواع خرابی، همانند ماتریس هم‌رخداد، ۴ شاخص آماری از ماتریس طول تکرار زیرباند‌ها استخراج گردید. آمارگان مرتبه سوم و بالاتر شامل ضربه تکرار کوتاه، ضربه تکرار بلند، عدم یکنواختی سطوح خاکستری و درصد تکرار در هر ۴ جهت مزبور از ماتریس طول تکرار استخراج شده و میانگین حسابی آنها درایه‌های بردار ویژگی نماینده را تشکیل می‌دهند. الگوریتم استخراج بردار ویژگی بر پایه ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری و تعداد درایه‌های بردارهای نماینده، دقیقاً مشابه با روند آنالیز آماری بافت زیرباند‌ها توسط ماتریس هم‌رخداد بوده، با این تفاوت که توصیف‌گرهای مرتبه سوم و بالاتر مذکور جایگزین آماره‌های مرتبه دوم شده‌اند.

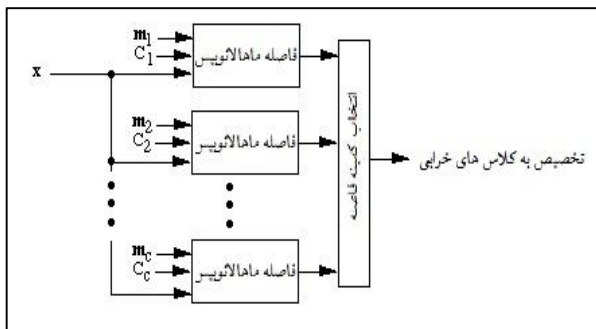
هر کدام از شاخص‌های آماری مذکور که به منظور آنالیز آماری بافت ماتریس‌های ضرائب، محاسبه و استخراج می‌شوند، توصیفگر خاصیتی ویژه در تصویر هستند. به عنوان مثال، پارامتر همسانی مبین میزان صافی سطح نمونه است، تضاد تنوع شدت سطوح خاکستری را نشان داده، همگنی مبین میزان یکنواختی تصویر و همبستگی میزان خطی بودن مقادیر پیکسل‌های تصویر را توصیف می‌نماید [Zayed and Elnemr, 2016].

### ۳-۲ آنالیز آماری بافت بر پایه ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری

در این مطالعه، همانند فرآیند تشکیل ماتریس هم‌رخداد، ۴ زاویه (۰°، ۴۵°، ۹۰°، ۱۳۵°) به عنوان پارامتر جهت، به منظور تشکیل ماتریس طول تکرار انتخاب گردید. به منظور مقایسه صحیح میان



## تحلیل میزان حساسیت جهتی تبدیل موجک در شناسایی هوشمند بافت خرابی‌های روسازی آسفالتی



### ۳-۴ کلاس بندی تصاویر خرابی

کلاس بندی به فرآیند نگاشت یک داده ناشناخته به مجموعه‌ای از گروه‌های از پیش تعریف شده، اطلاق می‌گردد و یکی از مهم‌ترین کاربردهای یادگیری ماشین نظارت شده است. در این تحقیق از روش کمینه فاصله به منظور کلاس بندی تصاویر خرابی استفاده گردیده است. بدین منظور فاصله ماهالانویس طبق رابطه ۶ به کارگیری شده است.

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

شکل ۱۴. الگوریتم کلاس بندی تصاویر آزمایشی خرابی‌های سطح روسازی آسفالتی بر پایه طبقه بند کمینه فاصله ماهالانویس.

### ۳-۵ ارزیابی عملکرد کلاسه بندی تصاویر

ماتریس در هم‌ریختگی<sup>۳۴</sup> ماتریسی مربعی بوده و نشان دهنده نحوه تخصیص تصاویر آزمایشی به کلاس‌های مختلف خرابی است. ابعاد این ماتریس برابر با تعداد کلاس‌های موجود و درایه‌های قطری آن، بیان‌کننده اختصاص صحیح تصویر خرابی به گروه مربوطه است. در این مطالعه، به منظور ارزیابی عملکرد هر یک از الگوریتم‌های آنالیز بافت، در کلاس بندی 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 کلاس بندی (شناسایی الگو) هستند [Moghadas Nejad and Zakeri, 2011c].

حساسیت (Sn)، توانایی طبقه‌بند در شناسایی صحیح تصاویر هر کلاس را توصیف نموده و طبق رابطه ۷ محاسبه می‌گردد.

$$Sn_g = \frac{n_{gg}}{n_g} \quad (7)$$

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

در این رابطه  $x$  بردار ویژگی تصویر آزمایشی بوده و  $m_c$  میانگین حسابی درایه‌های نظیر به نظیر 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 ماهالانویس نسبت به فاصله اقلیدسی، در نظر گرفتن ارتباط و همبستگی میان درایه‌های بردار ویژگی از طریق محاسبه کواریانس ویژگی‌ها بوده که منجر به هم-سنگ شدن محاسبه فاصله نهایی و افزایش دقت و صحت کلاس بندی می‌شود [Shahabian et al. 2017a].

در این روش کلاس بندی، پس از استخراج ۳۰ بردار ویژگی از ۳۰ تصویر آموزشی، در هر کدام از ۷ کلاس تصاویر طبقه بندی 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 هر کلاس خرابی) حاصل می‌شود. با محاسبه فاصله ماهالانویس بردار ویژگی هر یک از تصاویر آزمایشی از بردار نماینده هر طبقه از تصاویر آموزشی، بر اساس کمینه فاصله ماهالانویس، طبق شکل ۱۴ هر تصویر آزمایشی به یکی از ۷ کلاس موجود اختصاص می‌یابد.

رضا شهبان مقدم، سید علی صحاف، ابوالفضل محمدزاده مقدم، حمیدرضا پوررضا

متعلق به طبقه  $g$  (مجموع هر یک از درایه‌های سطری) است. لازم به یادآوری است که در این تحقیق، پارامتر  $n_g$  برابر ۳۰ است. در جداول ۱ و ۲ میزان حساسیت عملکردی الگوریتم‌های استخراج

بردار ویژگی بافتی در کلاس بندی خودکار تصاویر خرابی آسفالت ارائه شده است.

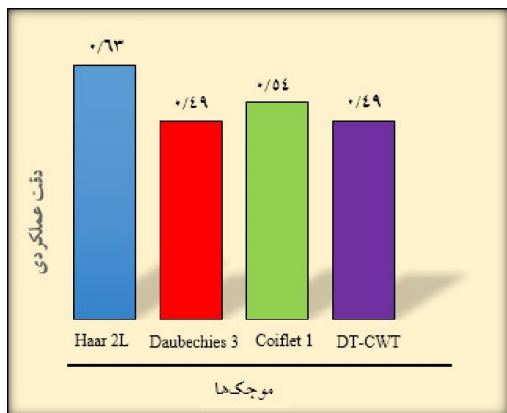
جدول ۱. حساسیت عملکردی کلاس بندی تصاویر خرابی بر پایه ماتریس هم‌رخداد زیرباند‌های فرکانسی در حوزه تبدیل‌های موجک.

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

جدول ۲. حساسیت عملکردی کلاس بندی تصاویر خرابی بر پایه ماتریس طول تکرار 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	۰/۷۷	۰	۰/۷۳	۰
آسفالت سالم	۱	۰	۰/۹	۱
ترک طولی	۰	۰/۱۷	۰/۷۰	۰/۲۷
ترک عرضی	۰/۰۷	۰/۳۳	۰/۷۷	۰/۱۷
قیرزدگی	۰/۷۳	۰/۹۰	۰	۱
وصله	۰/۹۳	۱	۰/۳۷	۰
عریان‌شدگی	۰/۹۰	۱	۰/۳	۱

## تحلیل میزان حساسیت جهتی تبدیل موجک در شناسایی هوشمند بافت خرابی‌های روسازی آسفالتی



شکل ۱۶. دقت عملکردی کلاسه‌بندی تصاویر خرابی سطح روسازی آسفالتی بر پایه آمارگان ماتریس طول تکرار زیرباند‌های تبدیل‌های موجک.

### ۶-۳ بررسی و تحلیل نتایج

نحوه تجزیه و استخراج جزئیات ساختاری تصویر (نوع و فرکانس تبدیل موجک اعمالی) و همچنین رویکرد تحلیل و آنالیز بافت زیرباند‌های حاصل شده، در تشخیص و طبقه‌بندی تصاویر اهمیت فراوان داشته و نقش مکمل دارند. همان‌طور که در مقدمه تحقیق ذکر گردید آنالیز بافت تصویر در حوزه تبدیل موجک به معنای بررسی نحوه توزیع و ارتباط مکانی میان ضرائب موجک است. این ضرائب در حقیقت معیاری از میزان شباهت و نزدیکی سیگنال اصلی با الگوی تابع موجک از طریق محاسبه ضرب داخلی است. نتیجه اعمال این ضرب داخلی و شباهت‌سنجی، نوعی میانگین‌گیری و همسان‌سازی (منظم‌سازی) مقادیر سطوح خاکستری بافت خرابی‌ها است. در نتیجه در تشکیل محتوای فرکانسی- مکانی تصاویر خرابی، بی‌نظمی‌های موجود در مقادیر سطوح خاکستری پیکسل‌های تصاویر خرابی (حوزه مکان) تا حد زیادی برطرف می‌شود. اگرچه همسان‌سازی باعث شده بی‌نظمی‌های موجود در مقادیر سطوح خاکستری پیکسل‌های تصویر تا حد

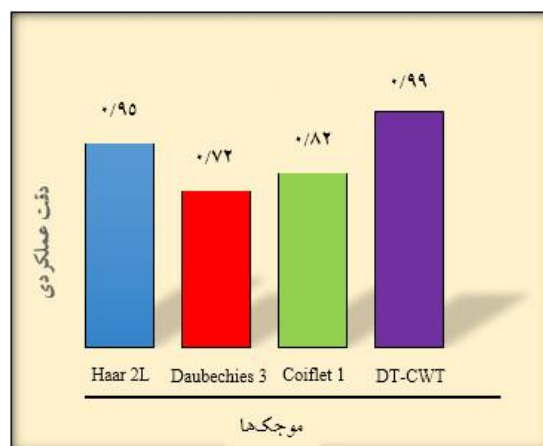
دقت (Ac) بیان‌گر عملکرد کلی الگوریتم در طبقه‌بندی خودکار تصاویر بوده و طبق رابطه ۸ از ماتریس درهم‌ریختگی تصاویر آزمایشی استخراج می‌گردد. به عبارت دیگر، دقت برابر با میانگین حساسیت عملکردی کلاسه‌بندی تمامی گروه‌های خرابی است.

$$AC = \frac{\sum_{g=1}^G n_{gg}}{n} \quad (۸)$$

رابطه  
بیان‌گر

در این رابطه تعداد تصاویر متعلق به طبقه  $g$  بوده که به طور صحیح به همان طبقه اختصاص یافته (اعضای قطری ماتریس درهم‌ریختگی)،  $G$  برابر با تعداد طبقات و پارامتر  $n$  برابر با تعداد کل تصاویر موجود (مجموع کل درایه‌های ماتریس درهم‌ریختگی) است. لازم به یادآوری بوده که در این تحقیق، پارامتر  $G$  برابر ۷ و پارامتر  $n$  برابر با ۲۱۰ است. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ دقت

زیرباند‌های تبدیل‌های موجک مقایسه شده است.



شکل ۱۵. دقت عملکردی کلاسه‌بندی تصاویر خرابی سطح روسازی آسفالتی بر پایه آمارگان ماتریس هم‌رخداد زیرباند‌های تبدیل‌های موجک.

دودرختی بر پایه ماتریس هم‌رخداد در مقایسه با ماتریس طول تکرار حدود ۵۰٪ برتری دارد. این اختلاف در تبدیلات موجک گسسته کمتر از ۳۰ درصد است. 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 نامنظمی هم‌چون خرابی‌های ظاهر شده در سطح روسازی آسفالتی، بکارگیری و درگیر نمودن تعداد زیادی از پیکسل‌ها در استخراج ضرائب موجک و هم‌چنین ویژگی‌ها صحیح نیست، زیرا احتمال 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 بیشتری از سیگنال اصلی را به منظور استخراج ضرائب موجک بکار می‌گیرند، دقت عملکردی پایین‌تری بر پایه هر دو رویکرد توصیف آماری بافت (آمارگان مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد و ماتریس طول تکرار)، در تشخیص و کلاسه‌بندی تصاویر خرابی حاصل نموده‌اند. یادآوری می‌شود که موجک گسسته Haar از میانگین وزن دار مقادیر دو پیکسل مجاور به منظور استخراج ضرائب موجک استفاده می‌نماید. میانگین دقت عملکردی کلاس‌بندی در حوزه تبدیل موجک گسسته دویعدی (H)، (D3) و (C1) به ترتیب برابر با ۷۹ درصد، ۶۰/۵۰ درصد و ۶۸ درصد است. با بکارگیری موجک Haar و استفاده از آمارگان مرتبه دوم زیرباندها جهت استخراج بردار ویژگی، بیش از ۹۵٪ تصاویر خرابی برداشتی به طور صحیح به کلاس مربوطه تخصیص یافته‌اند.

زیادی برطرف شود، اما این تبدیل تاثیر چندانی در بهبود بی‌نظمی - های مکانی الگوی خرابی‌ها (زیگ‌زاگ بودن و بی‌قاعدگی نقاط شروع و پایان لبه‌ها و گسستگی‌های موجود در بافت اکثر خرابی‌ها از جمله ترک‌ها) ندارد. در نتیجه این امر در نظر گرفتن تعامل مکانی و تداوم میان تعداد زیادی از ضرائب موجک ثابت (ماتریس طول تکرار) در کنار یکدیگر در الگوهای بی‌نظمی همچون خرابی - های سطح روسازی آسفالتی، نتایج قابل توجهی در پی نداشته و استخراج آمارگان مرتبه دوم بر پایه ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری زیرباندها، در تمامی تبدیل‌های اعمالی در این تحقیق نتایج برتری (دقت عملکردی بالاتر) نسبت به ماتریس طول تکرار به دنبال داشته است. لازم به یادآوری است که آمارگان مرتبه دوم بر پایه تعامل مکانی میان مقادیر دو پیکسل (ضریب) مجاور محاسبه می‌شوند. در این مطالعه، میانگین دقت عملکردی کلاسه‌بندی تصاویر انواع خرابی مبتنی بر ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری برابر با ۸۷ درصد بوده در حالی که این مقدار بر پایه ماتریس طول تکرار سطوح خاکستری برابر با ۵۳/۷۵ درصد است.

- افزایش حساسیت جهتی تبدیل، اگرچه باعث کاهش پراکندگی و ارائه موثر (تنک) اطلاعات مهم تصویر هم‌چون لبه‌های خرابی شده اما استخراج ویژگی‌های غیرمناسب (حاصل از ماتریس طول تکرار) در این گونه تبدیلات، تاثیر منفی شدیدی در دقت شناسایی و کلاسه‌بندی بافت داده‌ها دارد؛ به عبارت دیگر به شرطی حساسیت جهتی بالا در فرآیند تشخیص و طبقه‌بندی بافت‌ها کارآمد است که ویژگی‌ها و توصیف‌گرهایی مناسب (آمارگان ماتریس هم‌رخداد) از زیرباندهای حاصله استخراج شوند، در غیر این صورت افزایش حساسیت جهتی تبدیل، افزایش زیرباندها و به تبع افزایش تعداد ویژگی‌های استخراجی، تاثیر معکوسی در نتیجه شناسایی و دسته‌بندی داده‌ها ایجاد می‌نماید. دقت عملکردی کلاس‌بندی تصاویر خرابی در حوزه تبدیل موجک مختلط

## تحلیل میزان حساسیت جهتی تبدیل موجک در شناسایی هوشمند بافت خرابی‌های روسازی آسفالتی

- با افزایش عرض ساپورت فیلترها (تعداد پیکسل‌های درگیر شده)، اهمیت شکل و الگوی تابع موجک فزونی می‌یابد. در اینصورت 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 گنبدی-شکل (افزایش و کاهش تدریجی مقادیر تابع)، دقت عملکردی برتری (بر پایه هر دو رویکرد آنالیز بلفت) نسبت به تابع موجک (D3) در شناسایی الگوی انواع خرابی 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 کلاس‌بندی 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. دلیل این امر تفاوت میزان بی‌نظمی‌های موجود در تصاویر این دو نوع خرابی و حساسیت شدید الگوریتم‌های تحلیل بافت نسبت به این بی‌نظمی‌ها، است. اختلاف حساسیت عملکردی طبقه‌بندی ترک‌های طولی و عرضی بر مبنای اغلب الگوریتم‌های آنالیز بافت استفاده شده در این تحقیق، کمتر از ۱۰ درصد است.
- الگوی بافتی خرابی فیرزدگی جهت‌دار بوده، به عبارتی ویژگی‌ها و خواص بافتی این نوع خرابی در جهات متعددی و بصورت پراکنده تشکیل می‌شود. این امر باعث شده تبدیل جهت‌دار موجک مختلط دودرختی حساسیت عملکردی بالاتری نسبت به موجک‌های گسسته، در تشخیص این خرابی داشته باشد.
- اکثر الگوریتم‌های آنالیز بافت استفاده شده در این پژوهش، در تشخیص و تفکیک خرابی‌های عریان‌شدگی و آسفالت سالم (بدون خرابی) حساسیت عملکردی بالایی دارا می‌باشند زیرا مقادیر و نحوه توزیع 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 بافت آن‌ها کمتر دچار بی‌نظمی 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 است.
- وصله از جمله عملیات ترمیم راه به منظور افزایش عمر مفید روسازی محسوب می‌شود، اما به دلیل ایجاد ناهمواری، یکی از انواع خرابی روسازی قلمداد می‌شود. شیوه وصله نمودن آسفالت طبق اصول و قواعد مشخصی توسط متصدیان راه‌ها انجام می‌گیرد. اگرچه بافت وصله‌ها با توجه به حجم بارگذاری وسائط نقلیه در طول عمر آن به مرور ممکن است دچار دگرگونی و بی‌نظمی شود ولیکن پیدایش این خرابی ماهیت ترافیکی و یا جوی نداشته و به صورت مصنوعی توسط انسان ایجاد می‌شود. این امر باعث شده بافت این نوع خرابی به نسبت بی‌نظمی کمتری دارا باشد و اغلب الگوریتم‌های تحلیل بافت، حساسیت عملکردی مناسبی در تشخیص و طبقه‌بندی آن داشته باشند. میانگین حساسیت عملکردی دسته‌بندی خرابی وصله مبتنی بر الگوریتم‌های توصیف بافت پیشنهادی در این پژوهش، در حدود ۸۰ درصد است.
- نقائص تبدیل موجک گسسته دوبعدی در آنالیز تصاویر همچون حساسیت جهتی پایین و پراکندگی اطلاعات مولفه‌های بافتی در ضرائب و زیرباندهای مختلف، بیشتر در بیان ارائه لبه‌های منحنی‌شکل و خطی مورب (جهت‌دار) نمود دارد (رجوع شود به شکل ۶). از آنجائیکه اطلاعات اصلی و مهم

از الگوریتم پیشنهادی مقاله حاضر به منظور تحلیل و تشریح نوع خرابی استفاده نمایند.

- میزان حساسیت جهتی تبدیل موجک اعمالی بایستی متناسب با کاربرد آنالیز و نوع بافت تصاویر هدف انتخاب گردد. 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 تصاویر می‌شود. علاوه بر آن لزوم شناسایی ویژگی‌هایی با قدرت تمییزدهندگی بیشتر، به شدت افزایش می‌یابد. به طور کلی شیوه آنالیز تصاویر و الگوریتم اعمالی بایستی علاوه بر دارا بودن قدرت پردازش و دقت عملکردی بالا، به لحاظ سادگی و حجم محاسباتی بهینه باشد. با توجه به اینکه در برداشت اطلاعات روسازی با حجم داده‌های وسیعی مواجه هستیم، این امر از جمله مهم‌ترین فاکتورهای سامانه‌های ارزیابی تمام-اتوماتیک خرابی‌های روسازی می‌باشد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از ۴ ابزار آنالیز چند دقته و ۲ روش توصیف آماری بافت که در مجموع تشکیل ۸ الگوریتم استخراج بردار ویژگی را می‌دهد، به منظور شناسایی و طبقه‌بندی خودکار خرابی‌های 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 3 Daubechies، موجک گسسته 1 Coiflet و موجک جهت‌دار مختلط دو درختی استفاده شده است. موجک مختلط دوبعدی به دلیل حساسیت جهتی بالاتر نسبت به تبدیل موجک گسسته، اجزای بافت تصویر را در جهات بیشتری (۶ جهت در مقابل ۳ جهت) استخراج و آشکارسازی می‌نماید. در این مطالعه، از خواص آماری مستخرج از ماتریس هم‌رخداد سطوح خاکستری و

(تمییز دهنده) 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 (عدم پراکندگی اطلاعات خرابی) و در چنین الگوهای بهتر است بر روی نوع (شکل) و مقیاس موجک اعمالی و ویژگی‌های بافتی مستخرج از زیرباندها تمرکز نمود تا افزایش حساسیت جهتی تبدیل (هم‌چون استفاده از تبدیل موجک مختلط دودرختی). به همین دلیل است که در این تحقیق، استخراج آمارگان مرتبه دوم زیرباندهای موجک Haar با دقت عملکردی ۹۵ درصد نتیجه بسیار خوبی در شناسایی و تفکیک الگوهای مختلف خرابی حاصل نموده است.

- با توجه به عدم پیش‌پردازش تصویر خرابی در الگوریتم پیشنهادی، به منظور پیاده‌سازی اجرایی الگوریتم در سیستم‌های ارزیابی خودکار خرابی‌های روسازی بایستی تصویربرداری هنگام عدم تابش شدید نور خورشید (بعد از ظهر) و در زمانی که تاثیر منفی سایه‌ها به حداقل می‌رسد، انجام گیرد. تصویربرداری در این شرایط، بیشترین شباهت را به شرایط روشنایی کنترل شده دارا است. علاوه بر آن توصیه می‌شود از دوربین‌های دیجیتال اسکن خطی به منظور تصویربرداری استفاده گردد. در این صورت، مشکلات ناشی از ناپیوستگی و همپوشانی خرابی‌ها در تصاویر برداشتی به حداقل می‌رسد. تصاویر برداشت شده به صورت تمام اتوماتیک یا نیمه اتوماتیک توسط الگوریتم پیشنهادی قابلیت پردازش دارند. اگرچه کاربرد اصلی الگوریتم‌های کامپیوتری در ارزیابی تمام اتوماتیک تصاویر خرابی بوده، اما هنگامیکه کارشناسان مختلف در ارزیابی غیرهم‌زمان (نیمه‌خودکار) داده‌های خرابی دچار تردید یا اختلاف نظر باشند، می‌توانند

## تحلیل میزان حساسیت جهتی تبدیل موجک در شناسایی هوشمند بافت خرابی‌های روسازی آسفالتی

18. Dual-Tree Complex Wavelet Transform (DT-CWT)
19. Gray Level Run Length Matrix (GLRLM)
20. Sensitivity
21. Accuracy
22. Decomposition Level
23. Sub-Sampling
24. Hilbert Pair
25. Contrast
26. Correlation
27. Energy
28. Homogeneity
29. Short Run Emphasis (SRE)
30. Long Run Emphasis (LRE)
31. Gray Level Nonuniformity (GLN)
32. Run Percentage (RP)
33. Anomaly
34. Confusion Matrix

ماتریس طول تکرار، به منظور توصیف بافت زیرباندها و استخراج بردار ویژگی تصاویر بهره‌گیری شد. 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٪ نسبت به تبدیل موجک گسسته Haar (دقت عملکردی کلاس‌بندی ۹۵ درصد) برتر بوده، اما نسبت افزونگی و بار محاسباتی ۴:۱ است، بنابراین تصمیم‌گیری در ارتباط با انتخاب شیوه آنالیز و الگوریتم بکارگیری شده در دستگاه‌های ارزیابی خودکار خرابی‌های روسازی منوط به میزان دقت لازم، محدودیت بودجه و زمان پروژه ارزیابی جاده و نظر کارفرما است.

### ۶. مراجع

- سمنارشاد، محمدسینا، کاووسی، امیر و صفارزاده، محمود (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.

- شهبان مقدم، رضا (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، رضا، صحاف، سید علی، محمدزاده مقدم، ابوالفضل و پوررضا، حمیدرضا (۱۳۹۶a) "مقایسه روش های آنالیز بافت تصویر به منظور شناسایی و طبقه بندی خودکار

### 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. Curvelet
10. Directional Selective
11. Redundancy
12. Minimum Mahalanobis Distance
13. Texel
14. Multi-Resolution Analysis
15. Sub-band
16. Singularity
17. Directional Sensitivity

based texture classification algorithms in computed tomography”, *Computers in Biology and Medicine*, Vol. 37, No. 4, pp. 486-498.

- Gonzalez, R. C. and Woods, R.E. (2006) “Digital image processing 3/E”, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.

- Horng, M. H., Sun, Y.N. and Lin, X. Z. (2000) “Texture feature coding method for classification of liversonography”, *Computerized Medical Imaging & Graphics*, Vol. 26, pp. 33-42.

- 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.*

- Moghadas Nejad, F. and Zakeri, H. (2011a) “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. (2011b) “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. (2011c) “An expert system based on wavelet transform and radon neural network for pavement distress classification”, *Expert*

خرابی های روسازی آسفالتی ” ، فصلنامه مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، دوره سوم، شماره سوم، ص. ۱-۲۲.

- شهبایان مقدم، رضا، صحاف، سید علی، محمدزاده مقدم، ابوالفضل و پوررضا، حمیدرضا (۱۳۹۶b) “ تشخیص و طبقه بندی خودکار خرابی های روسازی بر پایه آنالیز بافت تصویر در حوزه مکان و تبدیل ” ، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره نهم، ویژه نامه روسازی، ص. ۱۲۱-۱۴۲.

- صادقی، حمید، آیت الهی، فضائل و راعی، ابوالقاسم (۱۳۹۴) “شناسایی حالت چهره با استفاده از نرمالیزاسیون هندسی و تبدیل موجک مختلط ”، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۵، شماره ۳، ص. ۹-۱۸.

- مصطفی، اکبر، احمدیان، علیرضا، ابوالحسنی، محمدجواد و گیتی، معصومه (۱۳۸۵) “ کلاس بندی بافت تصاویر سونوگرافی بیماری های منتشر کبدی با استفاده از تبدیل موجک ”، مجله فیزیک پزشکی ایران، دوره ۲، شماره ۷، ص. ۶۷-۷۶.

-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 Semler, L. (2007) “A comparison of wavelet, ridgelet, and curvelet



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 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.

- 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.

- Chang, T. and Kuo, J. (1993) "Texture analysis & classification with tree-Structured wavelet transform", IEEE Trans. Image Processing, Vol. 2, No. 4, pp. 429-441.

- 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.

Systems with Applications, Vol. 38, No. 3, pp. 7088-7101.

- Mojsilovic, A. and Sevic, D. (1996), Classification of the ultrasound liver images with the  $2N \times 1D$  wavelet transform, Proceedings of IEEE Int. Conf. Image Processing, 1, pp. 367-370.

- Nallamotheu, 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.

- 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",

## رضا شهبایان مقدم، سید علی صحاف، ابوالفضل محمدزاده مقدم، حمیدرضا پوررضا

رضا شهبایان 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. زمینه های 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- 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. زمینه های 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 گرفت. وی سپس مدارج کارشناسی ارشد و دکتری خود در رشته های الکترونیک و کامپیوتر 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 تمامی بر روی موضوعات پردازش تصویر، بینایی ماشین و حمل و نقل هوشمند تحقیق می کند.



ابوالفضل محمدزاده مقدم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد و درجه کارشناسی ارشد و دکتری در رشته مهندسی عمران-گرایش راه و ترابری را در سال ۱۳۸۷ و ۱۳۹۲ از دانشگاه فردوسی مشهد اخذ نمود. زمینه های 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.

