



ارائه ی روشی جدید جهت ارزیابی زهکشی سطحی روسازی آسفالتی براساس پردازش تصویر

بهروز مطاعی، فریدون مقدس نژاد*، حمزه ذاکری

دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۸-۲۷

بازنگری: ۱۳۹۷-۱۰-۰۹

پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۰۵

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷

کلمات کلیدی:

روسازی

زهکشی سطحی

پردازش تصویر

ایمنی

دسته بندی

خلاصه: بهبود مشخصات بافت سطحی روسازی و کیفیت زهکشی روسازی امری مهم در جهت افزایش ایمنی و کاهش نرخ تصادفات به خصوص در شرایط آب و هوایی بارانی می باشد. تاریخچه بررسی مشخصات سطحی روسازی به حدود ۶۰ سال قبل بازمی گردد اما در زمینه زهکشی سطحی روسازی پژوهش های گسترده ای صورت نگرفته است. در این تحقیق سیستمی جهت ارزیابی زهکشی سطحی روسازی ارائه شده است. به این منظور سخت افزاری طراحی شده است تا در شرایطی ثابت و به دور از تاثیر شرایط محیطی، امکان اشباع سازی سطح و برداشت تصاویر مربوط به روند زهکشی سطحی را فراهم سازد. اساس بخش تحلیلی سیستم مذکور بر تکنیک های پردازش تصاویر دیجیتال استوار است. براساس ویژگی های تصاویر برداشت شده، سه شاخص تغییرات آنروپی، انرژی و نسبت پیکسل ها در تصاویر در طی زمان برای ارزیابی زهکشی سطحی روسازی تعیین گردیده است. با مقایسه عملکرد مدل های مختلف داده کاوی از الگوریتم C5.0 جهت دسته بندی روسازی ها استفاده شده و با ارائه ترکیب مناسبی از شاخص های ارائه شده، روسازی ها از نظر کیفیت زهکشی سطحی در سه دسته مناسب، قابل قبول و نامناسب قرار گرفته اند. ارزیابی نتایج حاصل از سیستم ارائه شده، نشان می دهد که این سیستم قادر است با دقتی معادل ۹۵.۷٪، وضعیت زهکشی سطحی روسازی را ارزیابی کند. نتایج این سیستم می تواند به عنوان معیاری مناسب جهت ارزیابی ایمنی روسازی در شرایط بارندگی و همچنین ارتقای ایمنی راه ها، در سیستم های مدیریت روسازی در سطوح پروژه و شبکه مورد استفاده قرار گیرد.

۱-مقدمه

در دنیای امروز، وضعیت مشخصات سطحی روسازی راهها در تامین ایمنی راه ها و راحتی کاربران این تسهیلات، از اهمیت بالایی برخوردار است. به همین دلیل اجرای صحیح و کنترل به موقع شرایط روسازی در جهت انجام تعمیر و بازسازی روسازی های فاقد شرایط استاندارد امری حیاتی به نظر می رسد. در این میان بررسی و کنترل کیفیت زهکشی روسازی های در حال اجرا و یا اجرا شده به دلیل تاثیر آن بر تصادفات جاده ای از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا ارائه روشی که به واسطه آن بتوان ویژگی های زهکشی روسازی را با دقت و سرعت بالایی بررسی کرد اهمیت زیادی دارد.

علی رغم اینکه پارامترهای مختلفی در وقوع تصادفات موثر هستند

* نویسنده عهده دار مکاتبات: moghadas@aut.ac.ir

اما مطالعات دقیق بر این حوادث ارتباط مهمی بین وقوع تصادفات و مشخصات روسازی راه شامل بافت سطح روسازی و ویژگی های اصطکاکی نشان می دهند، بنابراین برای کاهش امکان وقوع شرایط خطرناک، توجه به این عوامل ضروری بنظر می رسد [۱].

اصطکاک سطحی روسازی معیاری برای ارزیابی ایمنی یک راه است و نقش مهمی در کاهش تصادفات بخصوص در شرایط آب و هوای مرطوب ایفا می کند [۲]. نیروی اصطکاک بین لاستیک خودرو و سطح روسازی بخش مهمی از برهم کنش وسیله نقلیه و روسازی می باشد که امکان شتابگیری، مانور و توقف را در شرایط ایمن محقق می سازد [۳].

مقاومت لغزشی نیروی اصطکاک ایجاد شده در محل تماس روسازی و لاستیک اتوموبیل می باشد که نتیجه برهم کنش بسیاری



وسرعت بالایی ارائه کنند. راهکارهای ارائه شده در این زمینه بیشتر در محدوده روش‌های غیر تماسی شامل استفاده از لیزر و تصاویر دیجیتال است.

در تحقیقی باهدف تعیین بافت درشت روسازی وباتوجه به روش‌های موجود اندازه‌گیری مانند روش ماسه و لیزرکه اطلاعات سه بعدی از روسازی در اختیار قرار می‌دهند، محققان اقدام به ارائه دو روش جدید با استفاده از تابع همبستگی^۱ و wavelet برای آنالیز بافت روسازی براساس پردازش تصویر کردند. در این تحقیق نتایج حاصل از SMTD^۲ با نتایج حاصل از آنالیز تصاویر از طریق تبدیل فوریه و دو روش پیشنهادی دیگر مقایسه گردید. در نهایت با حذف ۱۰٪ از داده‌های پرت نتایج حاصل از آنالیز wavelet بیشترین همبستگی را با نتایج SMTD با ضریب همبستگی (R²) برابر با ۰/۸۵ نشان دادند. نتایج حاصل از این تحقیقات نشان دادند که می‌توان از روش wavelet به عنوان یک ابزار موثر در آنالیز بافت روسازی استفاده کرد [۱۵].

در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۱۱ روشی براساس پردازش تصویر ارائه شد که در آن توزیع زبری‌های سطح روسازی با استفاده از پروفیل لبه‌های اجزای بافت روسازی تعیین می‌شوند. در این روش سطح روسازی شبیه سازی و توزیع اندازه ذرات سطح روسازی شبیه سازی شده براساس طول قوس‌های پروفیل لبه‌های اجزای بافت روسازی تعیین می‌شود. در نهایت میانگین هر توزیع با عمق بافت به دست آمده از پروفیل سنج لیزری مقایسه شد که ارائه دهنده R² مساوی ۰/۹۴ بود [۱۶].

محققان به منظور اندازه‌گیری بافت سطح روسازی، روشی بر مبنای پردازش تصویر ارائه دادند. در این روش با استفاده از دوربین CCD از سطح روسازی تصویر برداری شده و از همان نقطه آزمایش ماسه انجام شد. تصاویر دیجیتال با استفاده از تبدیل فوریه به فرکانس‌های مختلف تجزیه شده و در نهایت مقادیر پیکسل‌های مربوط با چند دسته از حلقه‌های فرکانس جمع شد. مقایسه نتایج حاصل از پردازش تصاویر و آزمایش ماسه، همبستگی قابل قبولی (R²=۵۱٪) ارائه داد. آنها ادعا می‌کنند که روش پیشنهادی می‌تواند جایگزین خوبی برای آزمایش ماسه باشد [۱۷].

در تحقیقی محققان با استفاده از قابلیت stereo vision یک سیستم برای اندازه‌گیری بافت روسازی با هزینه پایین ارائه دادند. در

از عوامل است [۴]. عوامل زیادی از قبیل بافت سطح روسازی، سرعت وسیله نقلیه و حضور آب بر اصطکاک بین لاستیک وسیله نقلیه و سطح روسازی موثر است [۵]. یکی از مهمترین عوامل مهم تاثیر گذار بر مقاومت لغزشی، خشک یا خیس بودن روسازی است که در این زمینه تحقیقات زیادی تاثیر شرایط آب و هوایی را بر اصطکاک سطح روسازی مورد مطالعه قرار داده و تاثیر آن را قابل توجه ارزیابی کرده‌اند [۶ و ۷].

پدیده هیدرو پلنینگ به عنوان مهمترین عامل وقوع تصادفات در شرایط آب و هوایی بارانی پدیده‌ای است که در اثر وجود لایه آب بین لاستیک وسیله نقلیه و سطح روسازی بعثت عدم زهکشی مناسب رخ می‌دهد و عملیات‌های شتاب و ترمزگیری را با سختی مواجه می‌کند [۸].

بافت سطح روسازی تاثیر قابل توجهی بر اندرکنش روسازی - لاستیک دارد [۹]. ویژگی‌های اصطکاکی یک روسازی به بافت سطح آن بستگی دارد [۱۰]. بافت روسازی را براساس ابعاد مختلف آن می‌توان به دو دسته بافت ریز و بافت درشت تقسیم کرد. بافت درشت نامنظمی‌های بزرگتر در سطح جاده هستند که به وجود فضای خالی بین مصالح سطح روسازی مربوط می‌باشند. اندازه بافت درشت به روش اجرای لایه رویه، سایز، شکل و چگونگی توزیع مصالح درشت استفاده شده در ساخت روسازی و بزرگترین اندازه‌ی اسمی مصالح بکاررفته مربوط می‌باشد. بافت ریز نیز به نامنظمی‌های کوچکتر در سطح مصالح اطلاق می‌شود که در بعد میکرون اندازه‌گیری می‌شوند و بیشتر تابعی از ویژگی‌های معدنی مصالح استفاده شده می‌باشند [۱۱ و ۱۲].

تحقیقات نشان داده‌اند که بافت درشت در سرعت بالا، مقاومت لغزشی و زهکشی آب را تحت تاثیر قرار می‌دهد، اما این بافت در سرعت پایین تاثیر کمی بر اصطکاک دارد، به عبارت دیگر در سرعت پایین بافت ریز عامل غالب بوده و سطوح اصطکاک را تعریف می‌کند [۱۳].

جهت اندازه‌گیری مشخصات سطحی روسازی روش‌های مختلفی وجود دارد که در تحقیقی توسط مطاعی و همکاران در دو دسته روش‌های آزمایشگاهی و میدانی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱۴]. امروزه محققان بیشتر تمایل به ارائه روش‌های هوشمندی دارند که نتایج مورد نظر را بدون تماس مستقیم با سطح روسازی و بادقت

1 Autocorrelation function

2 Sensor measured texture depth

شده، سیستمی جهت برداشت و ارزیابی وضعیت زهکشی سطحی روسازی پیشنهاد شده است. توجه به این نکته الزامی است که عواملی مانند شیب عرضی، خرابی‌های سطحی و قسمت‌های رنگ آمیزی شده در زهکشی سطحی تاثیر دارند و این مقاله تاثیر بافت روسازی را بر کیفیت زهکشی مورد بررسی قرار می‌دهد.

۲-زهکشی سطحی روسازی

زهکشی سطحی روسازی به فرآیند تخلیه آب موجود در سطح روسازی و شانه‌ی راه اطلاق می‌شود. تخلیه آب موجود باید با سرعت مناسبی انجام گیرد. اگر زهکشی آب موجود در سطح روسازی بصورت مناسبی صورت نگیرد، این آب در سطح روسازی انباشته شده و ایمنی جاده را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین ضعف در زهکشی سطحی روسازی منجر به وقوع پدیده خطرناک پراش آب^۳ در سطح روسازی می‌شود. پدیده پراش آب هنگامی رخ می‌دهد که در اثر بارندگی، لایه‌ای از آب بین لاستیک و سطح روسازی انباشته شده و تماس بین سطح روسازی با لاستیک خودرو را از بین می‌برد، در نتیجه این موضوع باعث از کنترل خارج شدن خودرو و انحراف آن از مسیر اصلی خود خواهد شد. این پدیده مهمترین عامل وقوع تصادفات در شرایط بارندگی می‌باشد، به همین دلیل ارزیابی شرایط وقوع آن از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۴].

در خلال انجام عملیات زهکشی سطحی روسازی،^۳ فرآیند انجام می‌شود که توجه به این فرآیندها به ارزیابی روند زهکشی سطحی روسازی کمک خواهد کرد:

- اول اینکه حجم آب سطحی با زمان کاهش می‌یابد که این نشان دهنده شاخص دبی سطحی خروجی است.

-دوم اینکه تعداد سنگدانه‌های بیرون زده از سطح آب با گذشت زمان افزایش می‌یابد.

-نکته سوم اینکه مساحت دانه‌های بیرون آمده از سطح آب با زمان افزایش می‌یابد.

شکل ۱، توضیح شماتیک سه فرآیند توضیح داده شده را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، با گذشت زمان همانطور که بر تعداد سنگدانه‌های بیرون آمده از سطح مایع، افزوده

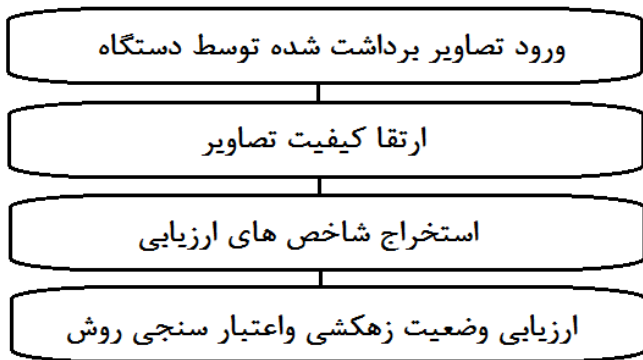
این سیستم با شبیه سازی توانایی چشم انسان در دید STEREO، روشی طراحی شد که در آن با استفاده از دو دوربین CCD که با فاصله‌ای اندک از هم قرار می‌گیرند، تصاویری از سطح روسازی تهیه شد. پس از پیش پردازش اولیه تصویر، دو تصویر تهیه شده با هم ترکیب شده و با استفاده از قابلیت تشخیص لبه بافت روسازی یک نقشه سه بعدی از سطح روسازی تهیه شده که با استفاده از آن می‌توان میانگین عمق پروفایل (MPD^۱) و همچنین میانگین عمق بافت (MTD^۲) روسازی را بدست آورد. مقایسه نتایج با روش R²،CT meter نزدیک ۰/۹ ارائه داد که نشان دهنده توانایی بالای سیستم پیشنهادی در آنالیز بافت روسازی است [۱۸].

محققان در یک مطالعه، با ارائه یک روش عکس برداری از نمونه‌های آسفالتی تهیه شده از روسازی‌های واقعی و استفاده از آنالیز تصاویر دیجیتال به روش Lacunarity، اقدام به ارائه روشی جایگزین برای آزمایش ماسه کردند. در این تحقیق از آنالیز Lacunarity که یک روش آنالیز تصاویر دیجیتال می‌باشد، برای بدست آوردن اندازه بافت روسازی استفاده شد. در واقع Lacunarity تکنیکی است که بافت عکس‌های بدست آمده از سطح روسازی را در الگوهای با ابعاد مختلف ارزیابی می‌کند. در نهایت مقایسه نتایج مقدار متوسط عمق بافت سطح (MTD) با استفاده از روش ماسه و مقدار متوسط عمق بافت روسازی با استفاده از روش Lacunarity همبستگی بالایی نشان داد [۱۹].

یکی از این روش‌های جدید ارزیابی بافت روسازی که مواردی از کاربرد آنها ارائه شد، روش پردازش تصویر است که در سال‌های اخیر استفاده از آن در بررسی و تعیین مشخصات بافت روسازی توسعه یافته است. مزیت استفاده از این روش در مقایسه با سایر تکنولوژی‌های پیشرفته مانند لیزر، به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز با استفاده از تصاویر دیجیتال بدست آمده از سطح روسازی با هزینه کم و در تعداد کمی برداشت، همچنین بررسی بخش‌های دلخواه از سطح روسازی در صورت نیاز است. نتایج کسب شده از بررسی تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که پردازش تصویر به عنوان یک روش غیر تماسی و بادقت و سرعت بالا، می‌تواند روش مناسبی جهت استخراج ویژگی‌های بافت سطح روسازی باشد. از این رو در این تحقیق با ارائه روشی جدید بر پایه پردازش تصویر و طراحی سخت افزاری متناسب با روش ارائه

1 Mean profile depth

2 Mean texture depth



شکل ۲. روند طراحی سیستم ارزیابی زهکشی سطحی روسازی
 Fig. 2. Flowchart of pavement surface drainage evaluation method

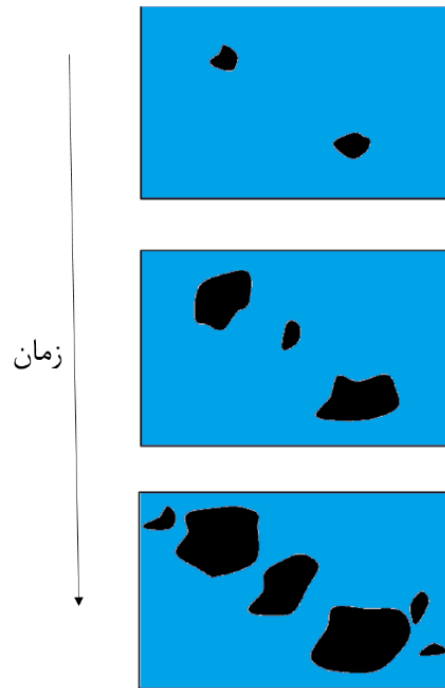
مربوط به روند زهکشی سطحی روسازی می‌باشد، دستگاه مورد نظر قابلیت اشباع کردن سطح و تصویر برداری در شرایط کاملاً کنترل شده از نظر شرایط محیطی و توانایی تصویر برداری در فواصل زمانی مختلف را دارا می‌باشد. استفاده از یک سیستم روشنایی مخصوص موجب شده تا دستگاه توانایی تصویر برداری را در هر نوع شرایط محیطی در طول شبانه روز داشته باشد. شکل ۳ تصویر دستگاه را نشان می‌دهد.

جهت دستیابی به داده‌های موردنیاز، تصاویر مربوط به روند زهکشی سطحی روسازی به وسیله دستگاه برداشت شده است. برداشت داده‌ها به این صورت بوده که بعد از استقرار دستگاه بر روی روسازی مورد نظر، سطح روسازی اشباع شده، سپس دستگاه شروع به تصویر برداری تا زمان تکمیل زهکشی نموده است. فواصل تصویر برداری قابل تنظیم بوده که در این کار دو ثانیه در نظر گرفته شده است.

استخراج روند تخلیه آب و خروج سنگدانه‌ها از سطح آب از اهمیت بالایی برخوردار است، در همین راستا از یک مایع مخصوص سفید رنگ با ویسکوزیته برابر با آب، برای اشباع کردن سطح روسازی استفاده شده است تا با رنگ سطح دانه‌ها تضاد ایجاد کرده و روند زهکشی به وسیله تصاویر بهتر نمایش داده شود. شکل ۴ نمونه‌ای از تصاویر برداشت شده در طی زمان برای یک روسازی را نمایش می‌دهد.

۳-۲- پیش پردازش تصاویر

روش‌های مختلفی بمنظور ارتقا کیفیت تصویر وجود دارد که عموماً جزء روش‌های پیش پردازشی دسته بندی می‌شوند. در این



شکل ۱. توضیح شماتیک روش بکار گرفته شده بمنظور بررسی اثر زهکشی سطحی با زمان

Fig. 1. Schematic illustration of pavement surface drainage over time

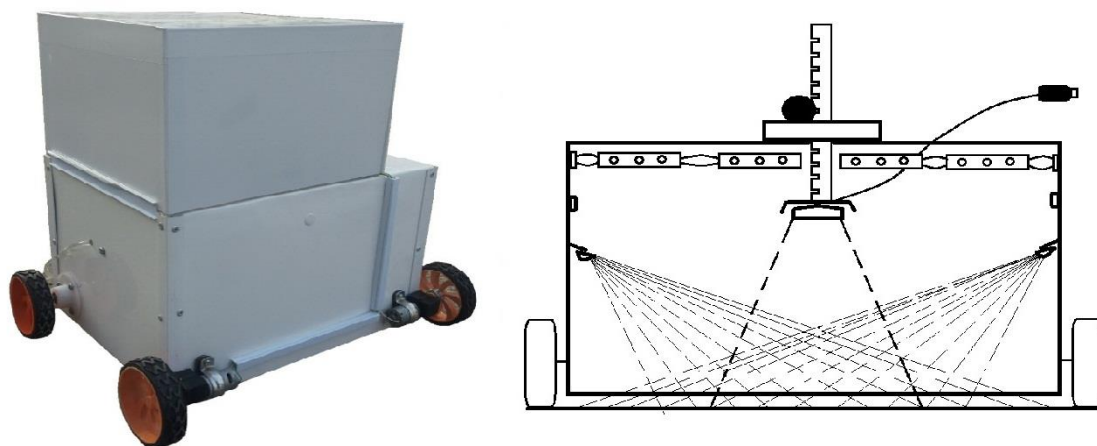
شده، مساحت این سنگدانه‌ها نیز افزایش می‌یابد. بر اساس این قوانین ساده، می‌توان شرایط زهکشی سطحی یک روسازی را مورد ارزیابی قرار داد. اساس این روش، بر پایه نحوه توزیع و پراکندگی سنگدانه‌ها استوار می‌باشد. همچنین نحوه خروج و یا جذب آب از سطح روسازی با این روش قابل شبیه سازی است.

۳-۳- روند طراحی سیستم تحلیلی ارزیابی زهکشی سطحی روسازی

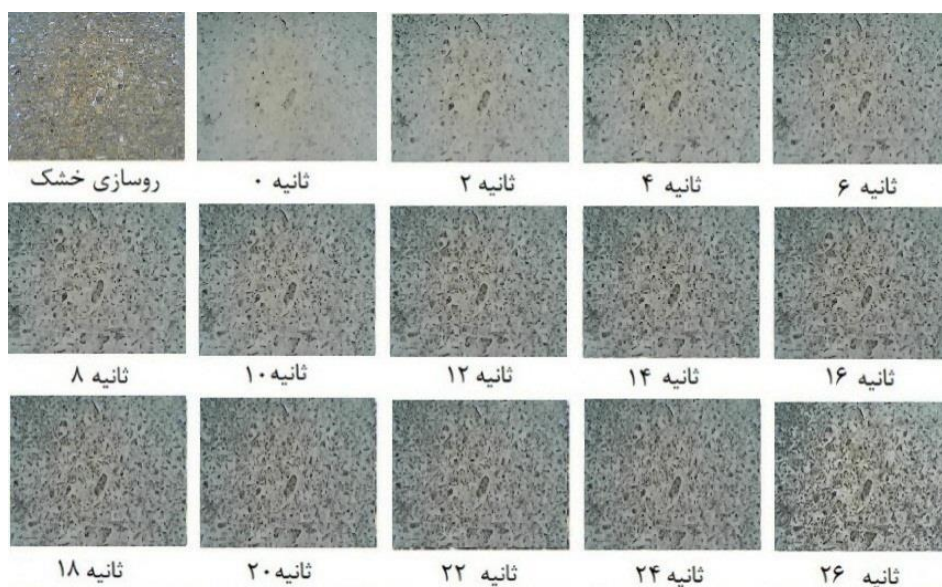
به منظور معرفی مراحل سیستم ارزیابی زهکشی سطحی روسازی، شکل ۲ به صورت یک فلوچارت نمایش داده شده است. همانطور که در این فلوچارت ارائه شده است، ابتدا تصاویر برداشت شده توسط دستگاه به کمک روش‌های پیش پردازش، ارتقا کیفیت داده شده، سپس با بررسی تصاویر از لحاظ مورفولوژی شاخص‌هایی جهت ارزیابی وضعیت زهکشی روسازی‌ها استخراج شده و در نهایت روشی جهت ارزیابی روسازی‌ها ارائه و این روش مورد اعتبار سنجی قرار گرفته شده است.

۳-۱- سخت افزار و برداشت داده‌های تصویری

با توجه به اینکه هدف از طراحی این دستگاه، دستیابی به تصاویر



شکل ۳. نمایی از قسمت‌های مختلف دستگاه [۲۰]
 Fig. 3. The presented method hardware



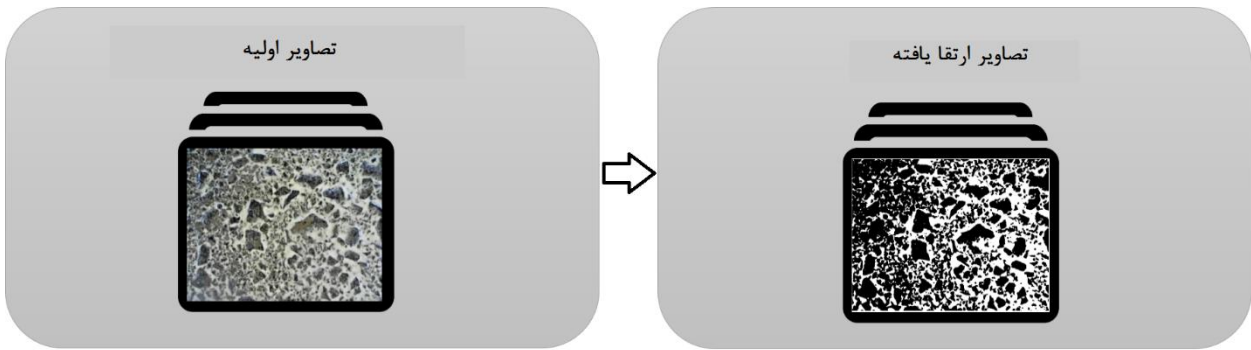
شکل ۴. تصاویر برداشت شده از روند زهکشی یک روسازی [۲۰]
 Fig. 4. Pavement surface drainage process images

و حذف نویز در تصاویر برداشت شده، صورت گرفته است. شکل ۵ فرآیند پیش پردازش تصاویر را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.

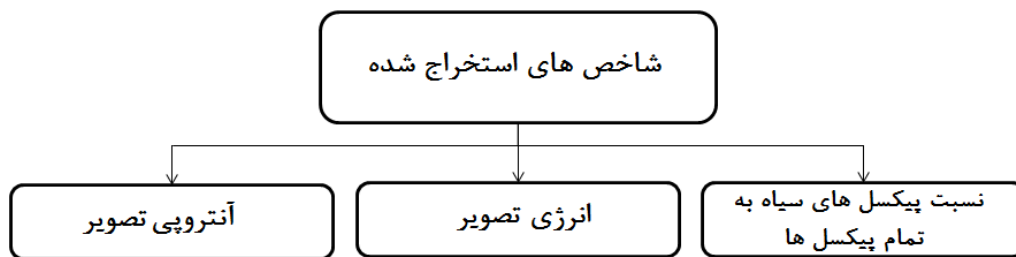
۳-۳- استخراج شاخص‌های مورفولوژی

پس از پیش پردازش تصاویر، با استفاده از ویژگی‌های مورفولوژی، شاخص‌هایی جهت ارزیابی زهکشی سطحی روسازی استخراج شده است. شکل ۶ شاخص‌های استخراج شده را نشان می‌دهد و در ادامه هریک از این شاخص‌ها جداگانه توضیح داده شده‌اند. با توجه به

کار از روشی ابتکاری- ترکیبی به منظور ارتقاء کیفیت تصویر استفاده شده است. بدین منظور از ابتدا همانگونه که در قسمت‌های قبل گفته شد، مایعی سفید رنگ، که خود باعث ایجاد یک حالت تضاد بین رنگ سنگدانه‌های سطح روسازی و مایع اشباع کننده می‌شود و تشخیص روند تخلیه آب و بیرون آمدن سنگدانه‌ها از سطح آب را ساده تر می‌کند استفاده شده است. همچنین به منظور تشخیص روند زهکشی، ارتقا کیفیت تصاویر و کاهش پیچیدگی محاسباتی و همچنین سهولت و تسریع در تحلیل تصاویر دو عمل فشرده سازی



شکل ۵. پیش پردازش تصاویر جهت ارتقا کیفیت
Fig. 5. Preprocessing of pavement images



شکل ۶. شاخص های ارزیابی استخراج شده از تصاویر
Fig. 6. Images derived features

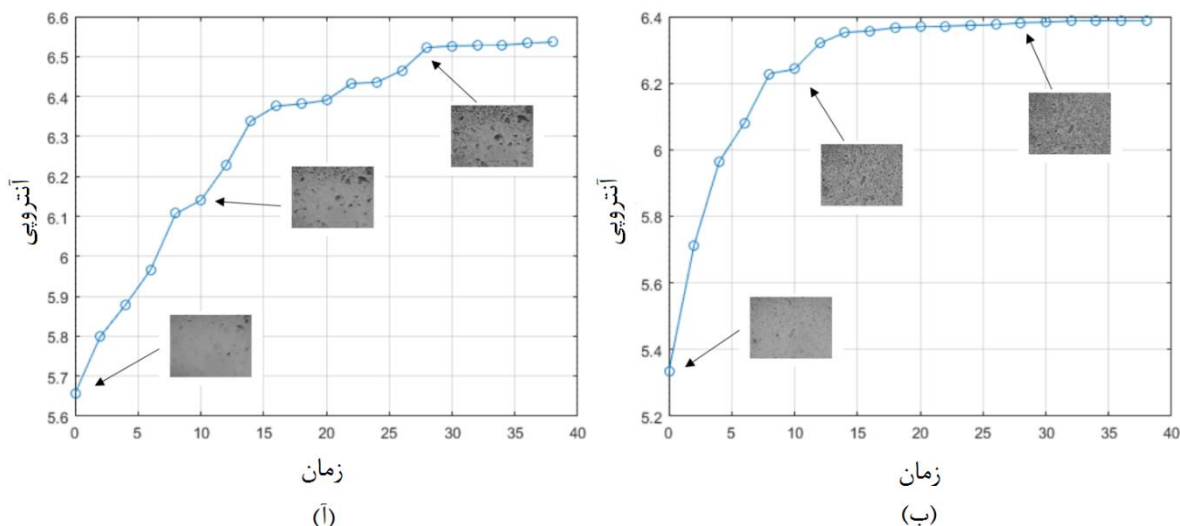
که در آن $p(i, j)$ تصویر موردنظر و m و n ابعاد تصویر هستند. شاخص آنتروپی تصاویر مربوط به فرآیند زهکشی سطحی روسازی پس از ارتقا کیفیت و تبدیل آنها به فرمت خاکستری محاسبه شده است. شکل ۷ روند تغییرات آنتروپی طی زمان برای دینوع روسازی را نمایش می دهد. همانگونه که در این شکل مشخص است تغییرات این شاخص دارای نرخی صعودی است. روند صعودی این نرخ در زمان های اولیه بیشتر بوده و پس از گذشت چند ثانیه کاهش می یابد. براساس این مشاهدات می توان دریافت که شاخص آنتروپی شاخص مناسبی برای ارزیابی وضعیت زهکشی سطحی روسازی خواهد بود. افزایش آنتروپی در این تصاویر به معنای افزایش سطح بیرون زده از آب روسازی می باشد که بالا بودن نرخ افزایش این شاخص در زمان های اولیه نشان دهنده سرعت بیشتر زهکشی در این زمان می باشد. بعد از مدتی نرخ افزایش آنتروپی کاهش می یابد چون سرعت زهکشی آب از روی روسازی کاهش یافته است. بعد از گذشت مدت زمانی خاص این نرخ به صفر میرسد که این زمان برای روسازی های مختلف متفاوت خواهد بود و همانطور که در این شکل مشخص هست برای روسازی

اینکه این شاخص ها مرتبط با ویژگی های مورفولوژی تصاویر دیجیتال می باشند و با ایجاد تغییرات جزئی در تصاویر تحت تاثیر قرار می گیرند و همچنین این حقیقت که در این بخش از تحقیق هدف به دست آوردن پارامترهایی است که تغییرات موجود در تصاویر برداشت شده را به صورت کمی بیان کنند، از این شاخص ها جهت استخراج روند تغییرات تصاویر و به تبع آن تغییرات روند زهکشی استفاده شده است.

۳-۳-۱- شاخص آنتروپی

آنتروپی تصویر سیاه و سفید، اولین شاخص استخراج شده است. آنتروپی یک معیار اندازه گیری آماری از تغییرات تصادفی است که می تواند جهت ارزیابی بافت تصویر ورودی مورد استفاده قرار گیرد. مقادیر آنتروپی در تصویری که بافت یکنواختی دارند، کوچکتر است و بافت های پیچیده و تصاویر ناهمگن تر، آنتروپی بالاتری را ارائه می دهند [۲۱]. شاخص آنتروپی بصورت رابطه ۱ محاسبه می شود:

$$Entropy = -\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p(i, j) \log_2 p(i, j) \quad (1)$$



شکل ۷. نرخ تغییرات شاخص آنتروپی دو نوع روسازی با زمان
 Fig. 7. Rate of change in entropy of images by time for two different kinds of pavement

چند ثانیه کاهش می‌یابد. براساس این مشاهدات می‌توان دریافت که شاخص انرژی نیز مانند شاخص آنتروپی شاخص مناسبی برای ارزیابی وضعیت زهکشی سطحی روسازی خواهد بود. افزایش انرژی در این تصاویر به معنای افزایش سطح بیرون زده از آب روسازی می‌باشد که بالا بودن نرخ افزایش این شاخص در زمان‌های اولیه نشان دهنده سرعت بیشتر زهکشی خواهد بود. بعد از مدتی نرخ افزایش کاهش می‌یابد چون سرعت زهکشی روسازی کاهش یافته است. بعد از گذشت مدت زمان خاصی این نرخ به صفر می‌رسد که این زمان برای روسازی‌های مختلف متفاوت خواهد بود همانطور که در اینجا برای روسازی (آ) طولانی‌تر از روسازی (ب) می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که سرعت زهکشی روسازی (ب) بیشتر از روسازی (آ) است.

۳-۳-۳- نسبت پیکسل‌های سیاه به تمام پیکسل‌ها (ن.س.ت)

پس از تبدیل تصاویر به فرمت باینری، تعداد پیکسل‌های سیاه (دارای مقدار ۰) می‌تواند شمارش شود تا نسبت تعداد پیکسل‌های سیاه به تعداد کل پیکسل‌ها محاسبه شود. این شاخص بصورت رابطه ۳ قابل ارائه است:

$$\text{نسبت پیکسل‌های سیاه به تمام پیکسل‌ها} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p(i,j) = 0}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p(i,j) \geq 0} \quad (3)$$

(آ) طولانی‌تر از روسازی (ب) می‌باشد. از این امر می‌توان نتیجه گرفت که زهکشی روسازی (ب) شرایط مناسب‌تری در مقایسه با روسازی (آ) دارد.

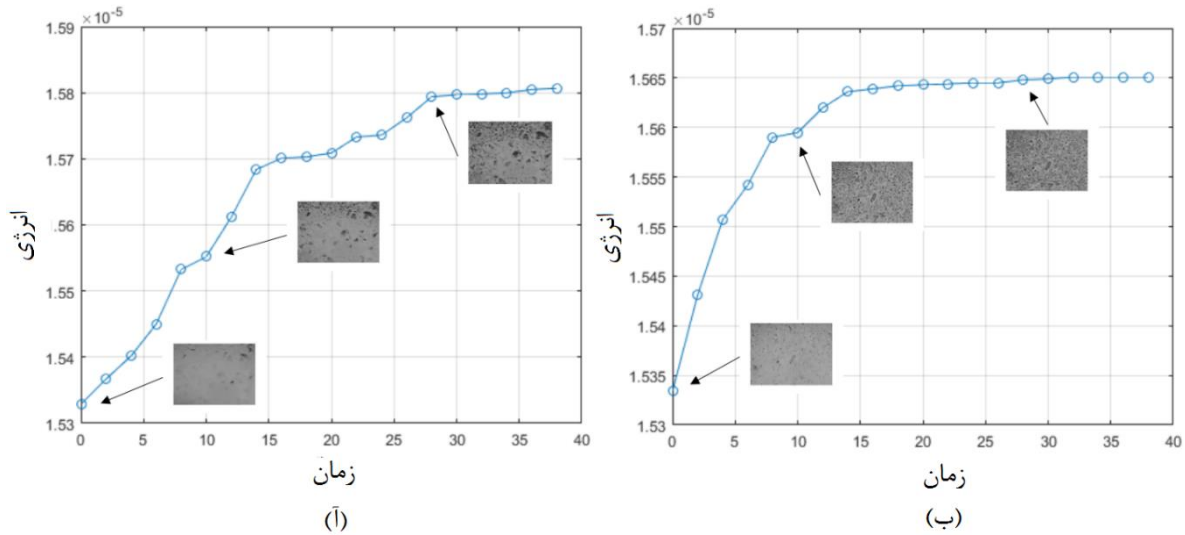
۳-۳-۲- شاخص انرژی

شاخص انرژی، توصیفی از میزان اطلاعات تصویر تحت یک چارچوب احتمالاتی می‌باشد. این ویژگی مجموع مربعات عناصر ماتریس Gray-Level Co-Occurrence Matrix (GLCM) را محاسبه می‌کند. GLCM، که به عنوان ماتریس وابستگی فضایی خاکستری شناخته می‌شود، یک روش آماری است که ارتباط فضایی پیکسل‌ها را در نظر می‌گیرد. انرژی یک تصویر ثابت برابر با مقدار ۱ است [۲۱]. رابطه ۲ انرژی تصویر را اندازه‌گیری می‌کند:

$$\text{Energy} = \sum_{i,j} p(i,j)^2 \quad (2)$$

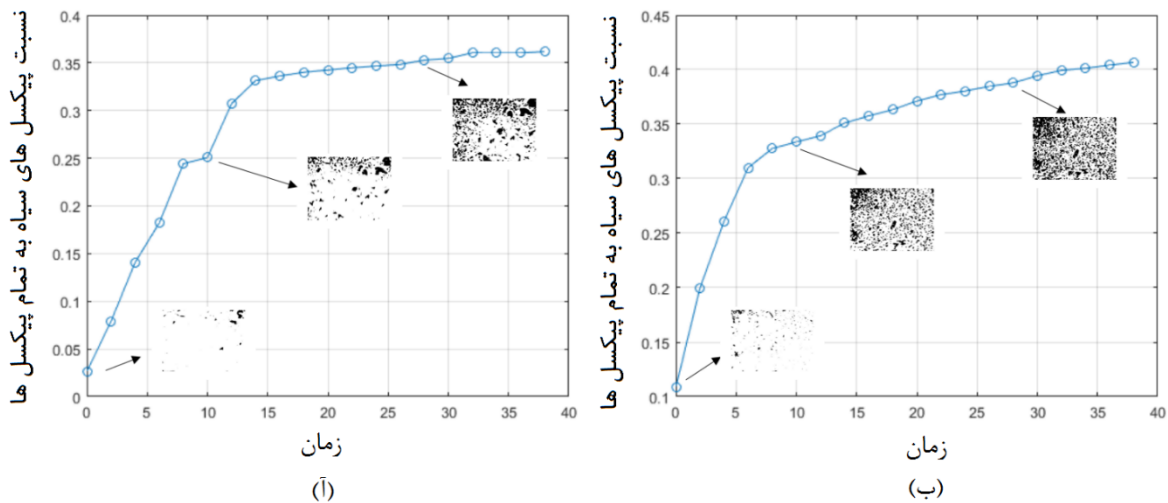
که در آن $p(i,j)$ تصویر موردنظر است.

شاخص انرژی تصاویر با فرمت خاکستری مربوط به فرآیند زهکشی سطحی روسازی پس از ارتقا کیفیت این تصاویر محاسبه شده است. شکل ۸ روند تغییرات انرژی تصاویر مربوط به روند زهکشی را در طی زمان برای دونوع روسازی نمایش می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود تغییرات این شاخص دارای نرخی صعودی در طی زمان است. این نرخ افزایشی در زمان‌های اولیه بیشتر بوده و پس از گذشت



شکل ۸. نرخ تغییرات شاخص انرژی دو نوع روسازی با زمان

Fig. 8. Rate of change in energy of images by time for two different kinds of pavement



شکل ۹. نرخ تغییرات شاخص ن.س.ت دو نوع روسازی با زمان

Fig. 9. Rate of change in RBT of images by time for two different kinds of pavement

مشاهده کردیم در زمان‌های اولیه بیشتر بوده و پس از گذشت چند ثانیه کاهش می‌یابد. همانطور که می‌شود انتظار داشت افزایش تعداد پیکسل‌های سیاه در این تصاویر به معنای افزایش سطح بیرون زده از آب روسازی می‌باشد که بالا بودن نرخ افزایش این شاخص در زمان‌های اولیه نشان دهنده سرعت بیشتر زهکشی خواهد بود. بعد از مدتی نرخ افزایش کاهش می‌یابد چون سرعت زهکشی روسازی کاهش یافته است. بعد از گذشت مدت زمان خاصی این نرخ به صفر می‌رسد که

که در آن $p(i, j)$ تصویر مورد نظر و m و n ابعاد تصویر هستند. پس از تبدیل تصاویر به فرمت باینری نسبت پیکسل‌های سیاه به تمام پیکسل‌ها برای تمام تصاویر مربوط به پروسه زهکشی روسازی محاسبه شده است. شکل ۹ روند تغییرات این شاخص را برای تصاویر در طی زمان برای دو نوع روسازی نمایش می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشخص است تغییرات این شاخص نرخی صعودی را در طی زمان دارد. این نرخ افزایشی مشابه آنچه در مورد دو شاخص دیگر

جدول ۱. نتایج مقایسه الگوریتم‌های دسته بندی مختلف

Table 1. Comparison of different classification algorithms

الگوریتم	Accuracy	Precision	Sensitivity	Specifity	F-measure
C5.0	۹۵.۷	۹۳.۷	۹۳.۳	۹۶.۷	۹۳.۳
Gradient boosted tree	۹۰.۸	۸۶.۷	۸۶.۷	۹۲.۸	۸۶.۲
Random Forest	۹۰.۸	۸۶.۷	۸۶.۷	۹۲.۹	۸۶.۷
Neural Network	۹۰.۷	۸۷.۹	۸۶.۷	۹۲.۹	۸۶.۷
KNN	۹۵.۵	۹۳.۷	۹۳.۳	۹۶.۴	۹۳.۱
naïve bayes	۸۵.۸	۸۲	۸۰	۸۸.۸	۷۹.۴

زهکشی روسازی‌های مختلف، زمانی قراردادی به عنوان یک زمان قابل قبول برای نقطه عطفی که در بالا تعریف شده بود، تعیین شده است. مدت زمان ده ثانیه برای این نقطه در نظر گرفته شد و پس از آن، نسبت میزان تغییرات قبل از ۱۰ ثانیه به میزان تغییرات پس از ۱۰ ثانیه برای ۳ شاخص ارائه شده بعنوان پارامتر ارزیابی معرفی شده است. این پارامترها را می‌توان بصورت زیر معرفی کرد:

$$(۴) \text{ پارامتر آنتروپی} = \frac{\text{نرخ تغییرات ده ثانیه اول شاخص آنتروپی}}{\text{نرخ تغییرات مقطع پس از ده ثانیه اول}}$$

$$(۵) \text{ پارامتر انرژی} = \frac{\text{نرخ تغییرات ده ثانیه اول شاخص انرژی}}{\text{نرخ تغییرات مقطع پس از ده ثانیه اول}}$$

$$(۶) \text{ پارامتر نسبت پیکسل‌های سیاه به تمام پیکسل‌ها} = \frac{\text{نرخ تغییرات ده ثانیه اول شاخص ها پیکسل تمام به سیاه های پیکسل نسبت}}{\text{نرخ تغییرات مقطع پس از ده ثانیه اول}}$$

پارامترهای ارزیابی ارائه شده برای ۳۰ روسازی مختلف محاسبه شده و فرآیند زهکشی این روسازی‌ها توسط کارشناسان مورد مطالعه قرار گرفت و تحت سه دسته مناسب، قابل قبول و نامناسب دسته بندی شد.

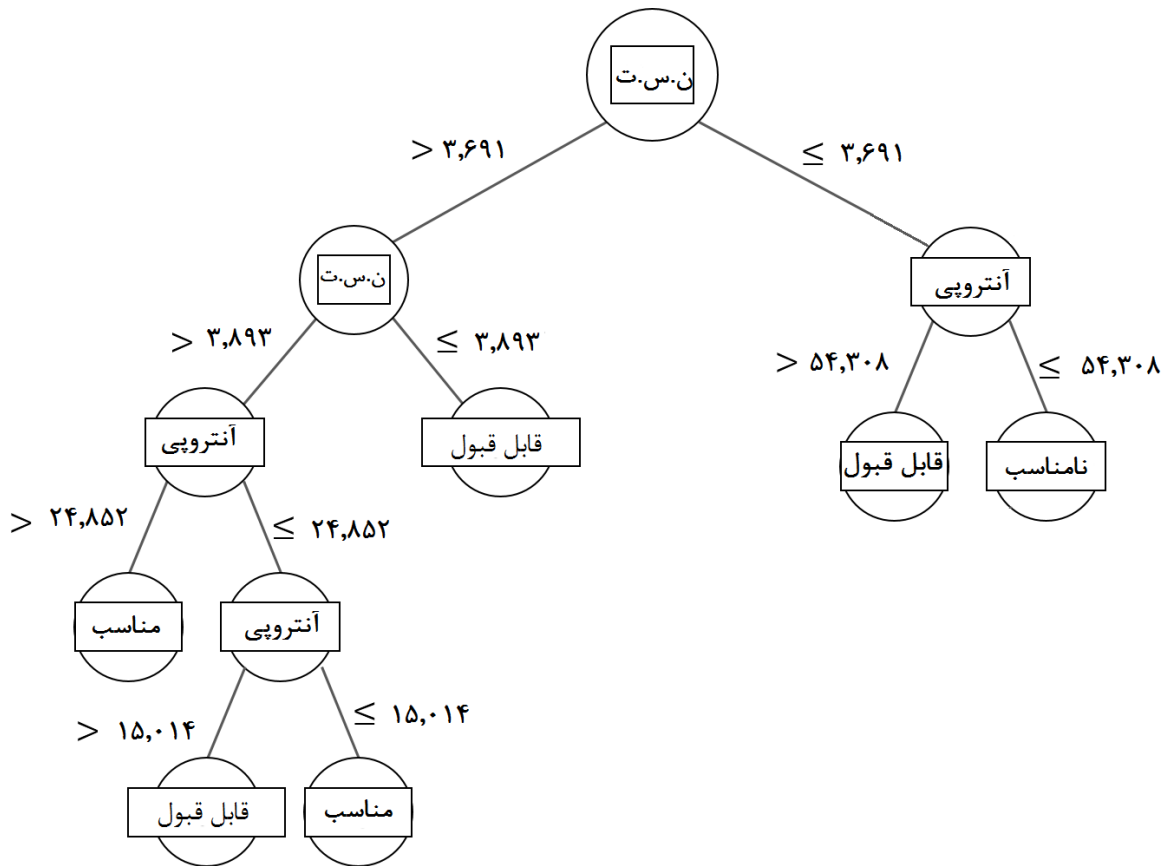
باتوجه به اینکه تحقیق حاضر به دنبال ارائه مدلی جهت ارزیابی زهکشی روسازی و دسته بندی روسازی‌های مختلف از نظر شرایط زهکشی سطحی است در این بخش الگوریتم‌های مختلف داده کاوی در جهت انجام دسته بندی موردنظر توسط نرم افزار رپید ماینر اجرا شده و عملکرد آنها توسط شاخص‌های ارزیابی مورد بررسی قرار گرفته

این زمان برای روسازی‌های مختلف متفاوت خواهد بود همانطور که در اینجا برای روسازی (آ) طولانی تر از روسازی (ب) می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که سرعت زهکشی روسازی (ب) بیشتر است.

۴-نتایج و بحث

در این بخش، جهت ارزیابی وضعیت زهکشی سطحی روسازی‌های آسفالتی مجموعه ای از پارامترها که از شاخص‌های معرفی شده در بخش قبلی استخراج شده اند ارائه می‌شود. همانطور که در بخش قبلی نشان داده شد، روند زهکشی در هر روسازی دارای دو بخش است؛ بخش بحرانی فرآیند زهکشی که چند ثانیه پس از حالت اشباع سطح است که اکثر آبهای جمع شده روی سطح در این زمان تخلیه می‌شوند. پس از گذشت این زمان سرعت تخلیه کاهش می‌یابد تا زمانی که تقریباً متوقف شود. هر پروسه زهکشی روسازی دارای نقطه عطفی است که در آن سرعت زهکشی به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. این زمان برای هر روسازی متفاوت است و در روسازی‌های با کیفیت پایین زهکشی نسبت به روسازی‌های با شرایط مناسب بیشتر خواهد بود. همچنین نرخ تغییرات بخش قبل از نقطه عطف برای روسازی‌های با عملکرد زهکشی مناسب بیشتر است.

از آنجاییکه نرخ تغییرات شاخص‌های استخراج شده به خوبی با سرعت زهکشی سطحی ارتباط دارد، ارزیابی وضعیت زهکشی سطحی می‌تواند براساس تحلیل روند تغییرات این شاخص‌ها در طول زمان صورت گیرد. با توجه به ماهیت موضوع تحقیق و این واقعیت که آب انباشته شده بر روی سطح روسازی باید به سرعت زهکشی شود تا از وقوع پدیده پراش آب که به عنوان مهمترین عامل در حوادث جاده ای در شرایط بارانی به شمار می‌رود جلوگیری شود، و نیز بررسی نحوه



شکل ۱۰. درخت تصمیم ارزیابی وضعیت زهکشی سطحی روسازی
 Fig. 10. Decision tree of pavement surface drainage evaluation

می‌تواند به صورت زیر تعیین شود که با کمک این قوانین می‌توان
 کیفیت زهکشی سطحی روسازهای آسفالتی را ارزیابی کرد:
 - اگر پارامتر نسبت پیکسل‌های سیاه به تمام پیکسل‌ها کمتر از
 ۳/۶۹۱ و پارامتر آنتروپی بیشتر از ۵۴/۳۰۸ باشد روسازی در شرایط
 قابل قبول می‌باشد.
 - اگر پارامتر نسبت پیکسل‌های سیاه به تمام پیکسل‌ها کمتر از
 ۳/۶۹۱ و پارامتر آنتروپی کمتر از ۵۴/۳۰۸ باشد روسازی در شرایط
 نامناسب می‌باشد.
 - اگر پارامتر نسبت پیکسل‌های سیاه به تمام پیکسل‌ها بیشتر از
 ۳/۶۹۱ و کمتر از ۳/۸۹۳ باشد روسازی در شرایط قابل قبول قرار دارد.
 - اگر پارامتر نسبت پیکسل‌های سیاه به تمام پیکسل‌ها بزرگتر از
 ۳/۸۹۳ و پارامتر آنتروپی بیشتر از ۲۴/۸۵۲ باشد روسازی در شرایط
 مناسب می‌باشد.
 - اگر پارامتر نسبت پیکسل‌های سیاه به تمام پیکسل‌ها بزرگتر از

است. جدول ۱ نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد.
 همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود بهترین عملکرد در
 تمام پارامترها متعلق به الگوریتم C5.0 است. به همین علت از
 الگوریتم درخت تصمیم (C5.0) برای یافتن یک مدل مناسب برای
 دسته بندی روسازی‌ها براساس شرایط زهکشی سطحی و استخراج
 قوانین ارزشمند جهت ارزیابی آن استفاده شده است. از نرم افزار
 رییدمانیر^۱ برای اجرای مدل و انجام این دسته بندی استفاده شده
 است. در بخش انتخاب شاخص‌های مناسب، مدل دسته بندی کننده
 پارامترهای آنتروپی و نسبت پیکسل‌های سیاه به تمام پیکسل‌ها را به
 دلیل پیش بینی بهتر وضعیت روسازی به عنوان شاخص‌های تعیین
 کننده برای دسته بندی انتخاب کرده است. شکل ۱۰ درخت تصمیم
 مربوط به این دسته بندی را نمایش می‌دهد.
 بر اساس این دسته بندی، مجموعه‌ای از قوانین تعیین کننده

1 Rapidminer

جدول ۲. ماتریس پریشانی مدل

Table 2. Model confusion matrix

		دسته پیش بینی شده		
		مناسب	قابل قبول	نامناسب
دسته حقیقی	مناسب	۹	۱	۰
	قابل قبول	۰	۹	۱
	نامناسب	۰	۰	۱۰

جدول ۳. نتایج ارزیابی مدل پیشنهادی

Table 3. Results of model validation

	Accuracy	Precision	Sensitivity	Specifity	F-measure
مناسب	۹۷	۱۰۰	۹۰	۱۰۰	۹۵
قابل قبول	۹۳	۹۰	۹۰	۹۵	۹۰
نامناسب	۹۷	۹۱	۱۰۰	۹۵	۹۵
مدل	۹۵.۷	۹۳.۷	۹۳.۳	۹۶.۷	۹۳.۳

ماتریس پریشانی سیستم ارائه شده را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۳ مقادیر مختلف شاخص‌های ارزیابی مدل را نشان می‌دهد.

هریک از شاخص‌های استفاده شده در جدول ۳ بیانگر ارزیابی یک جنبه از عملکرد مدل می‌باشد. شاخص Accuracy بیانگر میزان درستی طبقه بندی روسازی‌های مورد بررسی است و بر مجموع میزان رو سازی‌هایی که به درستی در دسته خود قرار گرفته‌اند و روسازی‌هایی که به درستی در هرکدام از دسته‌ها قرار نگرفته‌اند نسبت به تعداد تمام روسازی‌ها، دلالت دارد.

شاخص Precision نشان دهنده این است که چه میزان از روسازی‌ها به درستی در دسته موردنظر طبقه بندی شده‌اند. یعنی میزان روسازی‌هایی که به درستی در دسته موردنظر قرار گرفته‌اند نسبت به مجموع میزان روسازی‌هایی که به درستی در دسته موردنظر قرار گرفته‌اند و تعداد روسازی‌هایی که به اشتباه در دسته موردنظر طبقه بندی شده‌اند.

شاخص Sensitivity عبارت است از اینکه چه میزان از روسازی‌ها به درستی در دسته خود قرار گرفته‌اند و معادل است با میزان روسازی‌هایی که به درستی در دسته موردنظر قرار گرفته‌اند نسبت به مجموع میزان روسازی‌هایی که به درستی در دسته موردنظر قرار گرفته و میزان روسازی‌هایی که به اشتباه در دسته‌ای به غیر از دسته

۸۹۳/۳ و پارامتر آنتروپی کمتر از ۱۵/۰۱۴ باشد روسازی در شرایط مناسب می‌باشد.

- اگر پارامتر نسبت پیکسل‌های سیاه به تمام پیکسل‌ها بزرگتر از ۳/۸۹۳ و پارامتر آنتروپی کمتر از ۲۴/۸۵۲ و بیشتر از ۱۵/۰۱۴ باشد روسازی در شرایط قابل قبول می‌باشد.

بر اساس این قوانین ارزشمند، هر روسازی آسفالتی جدید را می‌توان ارزیابی و طبقه بندی نموده و به عنوان روسازی با شرایط مناسب، قابل قبول یا نامناسب از لحاظ زهکشی معرفی نمود.

۵- اعتبار سنجی روش ارائه شده

جهت ارزیابی سیستم ارائه شده و اعتبار سنجی نتایج حاصل از شاخص‌های ارائه شده از روش ماتریس پریشانی^۱ استفاده شده است. به منظور ارزیابی صحت نتایج و مدل ارائه شده، از مقایسه شرایط واقعی موجود که توسط گروهی از کارشناسان مورد ارزیابی قرار گرفت با آنچه که از طریق شاخص‌های استخراج شده بدست آمده است استفاده شده است. نتایج بدست آمده از این تحلیل نشان دهنده عملکرد مطلوب سیستم ارائه شده است و دقت ۹۵/۷ درصد را در دسته بندی زهکشی سطحی روسازی نشان می‌دهد. جدول ۲

1 Confusion Matrix

موردنظر پیش بینی شده‌اند.

شاخص Specificity بیانگر نسبت میزان روسازی‌هایی است که به درستی جزو هر کدام از دسته‌های روسازی قرار نگرفته‌اند (بطور مثال میزان روسازی‌های نامناسب یا قابل قبولی که به درستی جزو دسته روسازی مناسب قرار نگرفته‌اند). و معادل است با میزان روسازی‌هایی که به درستی در دسته مورد نظر قرار نگرفته‌اند نسبت به مجموع میزان روسازی‌هایی که به درستی در دسته مورد نظر قرار نگرفته‌اند و میزان روسازی‌هایی که به اشتباه در دسته مورد نظر قرار گرفته‌اند. شاخص F-measure نیز یک نوع میانگین گیری بین پارامتر Precision و پارامتر Sensitivity (Recall) است.

هر کدام از پنج شاخص‌های ارزیابی استفاده شده عددی بین صفر تا یک را ارائه می‌دهند که هرچه این عدد بزرگتر باشد نشان دهنده اعتبار بیشتر روش ارائه شده می‌باشد. اعداد بدست آمده برای پنج پارامتر اصلی اعتبار سنجی شاخص‌ها همگی اعدادی بالای ۹۰ درصد را ارائه می‌دهند که این موضوع نشان از دقت و صحت بالای نتایج روش بکار رفته دارد و می‌تواند تائیدی بر ارزیابی مناسب زهکشی توسط این سیستم باشد.

۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این تحقیق رویکردی جدید جهت ارزیابی وضعیت زهکشی سطحی روسازی ارائه گردید. در این رویکرد تصاویر مربوط به روند روسازی توسط دستگاه برداشت شده و به بخش تحلیل انتقال می‌یابد. در این بخش تصاویر با الگوریتم‌های پردازش تصویر، پیش پردازش شده و کیفیت آنها ارتقا یافتند. سپس شاخص‌هایی جهت ارزیابی وضعیت زهکشی روسازی ارائه شده و براساس این شاخص‌ها روسازی‌ها از نظر وضعیت زهکشی دسته بندی شدند. ارزیابی نتایج روش ارائه شده نشان دهنده دقت معادل ۹۵/۷ درصدی آن بوده که این نشان دهنده عملکرد مناسب این روش در ارزیابی مشخصات زهکشی سطحی روسازی دارد. در نهایت می‌توان گفت سیستم ارزیابی زهکشی سطحی روسازی بعنوان اولین سیستم در زمینه بررسی زهکشی سطحی براساس پردازش تصاویر دیجیتال می‌تواند در سطوح شبکه و پروژه‌های در سیستم‌های مدیریت روسازی مورد استفاده قرار گیرد. به عبارت دیگر نتایج عمده تحقیق انجام شده را می‌توان بصورت زیر ارائه داد:

- ارائه سیستمی جهت رصد و برداشت رفتار زهکشی سطحی روسازی
- ارزیابی کمی کیفیت زهکشی سطحی روسازی با استفاده از شاخص‌های بدست آمده از آنالیز تصاویر
- ارزیابی کیفی و دسته بندی روسازی‌ها براساس وضعیت زهکشی سطحی آن توسط مدل داده کاوی C5.0
- در پژوهش‌های آتی بایستی در راستای کاهش زمان ارزیابی و تفسیر داده‌ها، افزایش تعداد تصاویر روسازی و داده‌های آموزشی، ارتقا کیفیت شاخص‌های استخراج شده و مدل‌های ارزیابی گام نهاده شود. همچنین در تحقیقات آینده می‌توان ارتباط بین سایر مشخصات روسازی مانند مقاومت لغزشی و یا بافت ریز و درشت را بدست آورد و یا جهت ارایه سیستمی جهت ارزیابی مشخصات سطحی روسازی سیستمی با تلفیق ابزارهای لیزری و پردازش سیگنال و تصاویر دیجیتال ارائه داد.

مراجع

- [1] J. Hall, K.L. Smith, L. Titus-Glover, J.C. Wambold, T.J. Yager, Z. Rado, Guide for pavement friction, Final Report for NCHRP Project, 1 (2009) 43.
- [2] S. Li, K. Zhu, S. Noureldin, D. Harris, Identifying friction variations with the standard smooth tire for network pavement inventory friction testing, Transportation research record, 1905(1) (2005) 157-165.
- [3] G.R. Dewey, A.C. Robords, B.T. Armour, R. Muethel, Aggregate wear and pavement friction, in: Transportation Research Board, Annual Meeting CD-ROM, 17p, 2001.
- [4] D.A. Noyce, H.U. Bahia, J.M. Yambo, G. Kim, Incorporating road safety into pavement management: maximizing asphalt pavement surface friction for road safety improvements, Draft Literature Review and State Surveys, Midwest Regional University Transportation Center (UMTRI), Madison, Wisconsin, (2005).
- [5] E. Masad, A. Rezaei, A. Chowdhury, P. Harris, Predicting asphalt mixture skid resistance based on aggregate characteristics, Texas. Dept. of Transportation. Research and Technology Implementation Office, 2008.
- [6] P.M. Gandhi, B. Colucci, S.P. Gandhi, Polishing of

- 682-694.
- [14] B. Mataei, H. Zakeri, M. Zahedi, F.M. Nejad, Pavement friction and skid resistance measurement methods: A literature review, *Open Journal of Civil Engineering*, 6(04) (2016) 537.
- [15] R. Elunai, V. Chandran, P. Mabukwa, Digital image processing techniques for pavement macro-texture analysis, in: *Proceedings of the 24th ARRB Conference: Building on 50 Years of Road and Transport Research*, ARRB Group, 2010, pp. 1-5.
- [16] R. Elunai, V. Chandran, E. Gallagher, Asphalt concrete surfaces macrotexture determination from still images, *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 12(3) (2011) 857-869.
- [17] A. Cigada, F. Mancosu, S. Manzoni, E. Zappa, Laser-triangulation device for in-line measurement of road texture at medium and high speed, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(7) (2010) 2225-2234.
- [18] E.D. de Leon Izeppi, G.W. Flintsch, M. Saleh, K.K. McGhee, Area-based macrotexture measurements: stereo vision approach, 2009.
- [19] S.N. Goodman, Y. Hassan, O. Abd El Halim, *Digital Sand Patch Test: Use of Digital Image Analysis for Measurement of Pavement Macrotecture*, 2010.
- [20] B. Mataei, H. Zakeri, and F.M. Nejad, Automatic, Evaluation of pavement surface drainage using image processing, 10th bitumen, asphalt and Machinery Conference, (2017) in Persian.
- [21] R.C. Gonzalez, R.E. Woods, S.L. Eddins, *Digital image processing using MATLAB*, Pearson Education India, 2004.
- aggregates and wet-weather accident rates for flexible pavements, *Transportation Research Record*, (1300) (1991).
- [7] C.-G. Wallman, H. Åström, Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety: A literature review, *Statens väg-och transportforskningsinstitut*, 2001.
- [8] B. Sengoz, A. Topal, S. Tanyel, Comparison of pavement surface texture determination by sand patch test and 3D laser scanning, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 56(1) (2012) 73-78.
- [9] A. El Gendy, A. Shalaby, M. Saleh, G.W. Flintsch, Stereo-vision applications to reconstruct the 3D texture of pavement surface, *International Journal of Pavement Engineering*, 12(03) (2011) 263-273.
- [10] E. Masad, A. Rezaei, A. Chowdhury, T.J. Freeman, Field evaluation of asphalt mixture skid resistance and its relationship to aggregate characteristics, *Texas Transportation Institute*, 2010.
- [11] J.N. Meegoda, S. Gao, S. Liu, N.C. Gephart, Pavement texture from high-speed laser for pavement management system, *International Journal of Pavement Engineering*, 14(8) (2013) 697-705.
- [12] H. Zelelew, A. Papagiannakis, E. de León Izeppi, Pavement macro-texture analysis using wavelets, *International Journal of Pavement Engineering*, 14(8) (2013) 725-735.
- [13] W. Wang, X. Yan, H. Huang, X. Chu, M. Abdel-Aty, Design and verification of a laser based device for pavement macrotexture measurement, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(4) (2011)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Mataei, F. Moghadas Nejad, H. Zakeri, Presentation of a new surface drainage assessment method based on image processing, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(5) (2020) 1299-1312.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15290.5880](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15290.5880)



