



## ارائه یک معیار جدید ارزیابی مقاومت لغزندگی روسازی آسفالتی

فریدون مقدس‌نژاد<sup>\*</sup>، نسرین کریمی، حمزه ذاکری

دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۱ فروردین ۱۳۹۴  
بازنگری: ۳۱ تیر ۱۳۹۴  
پذیرش: ۱۳ آبان ۱۳۹۴  
ارائه آنلاین: ۲۷ دی ۱۳۹۴

### کلمات کلیدی:

مقاومت لغزشی  
ایمنی  
بافت روسازی  
پردازش تصویر  
سیستم خبره.

**چکیده:** اصطکاک سطح یک روسازی نشان‌دهنده ایمنی روسازی است. ویژگی‌های اصطکاکی یک روسازی به مشخصات بافت ریز و بافت درشت سطح آن روسازی بستگی دارد. امروزه محققان به دنبال ارائه روش‌هایی هستند که با دقت و سرعت بالایی مقاومت لغزشی روسازی را اندازه‌گیری کنند. راهکارهای ارائه شده در این زمینه بیشتر در محدوده روش‌های غیرتماسی، استفاده از لیزر و تصاویر دیجیتال است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که پردازش تصویر به عنوان یک روش غیرتماسی و با دقت قابل قبول و سرعت بالا، می‌تواند زمینه خوبی برای تحقیقات بعدی درباره تعیین مقاومت لغزشی روسازی باشد. در این مطالعه سیستم هوشمندی بر مبنای پردازش تصویر معرفی می‌شود که قادر به تحلیل بافت روسازی و ارائه یک شاخص جدید برای مقاومت لغزشی روسازی با در نظر گرفتن تاثیر اجزای افقی، قائم و قطری بافت روسازی در آن است. با مقایسه نتایج نهایی سیستم پیشنهادی و نتیجه آزمایش پاندول بریتانیایی (BPN) متناظر با آنها می‌توان گفت که، سیستم پیشنهادی با بهره‌گیری از تکنولوژی پردازش تصویر و بررسی بافت روسازی قادر است بافت روسازی را درک کرده و نتایج تکرارپذیری در ارتباط با قابلیت لغزشی روسازی ارائه کند.

### ۱- مقدمه

مقدار اصطکاک سطح یک روسازی نشان‌دهنده میزان ایمنی روسازی است [۱-۵]. در تمام عمر یک روسازی، سطح روسازی باید زبری کافی برای تامین اصطکاک بین لاستیک وسیله نقلیه و روسازی را داشته باشد [۶-۸]. عوامل بسیاری از قبیل بافت سطح روسازی، سرعت وسیله نقلیه و حضور آب می‌تواند در میزان اصطکاک بین لاستیک وسایل نقلیه و سطح روسازی موثر باشد. علاوه بر این‌ها ویژگی‌های مواد تشکیل‌دهنده، روش‌های ساخت و هوازدگی، بافت سطح روسازی را تحت تاثیر قرار می‌دهند [۱،۳].

ویژگی‌های اصطکاکی یک روسازی به ویژگی‌های بافت سطح آن روسازی بستگی دارد [۱،۳،۹]. بافت روسازی را بر اساس ابعاد مختلف آن می‌توان به سه دسته: بافت ریز<sup>۱</sup>، بافت درشت<sup>۲</sup> و بافت خیلی درشت<sup>۳</sup> تقسیم کرد [۲،۷،۱۰]. مطالعات نشان می‌دهند که بافت ریز (نامنظمی‌های روی سطح مصالح با طول موج کمتر از ۰/۵ میلی‌متر) و بافت درشت (نامنظمی‌های

بزرگتر در سطح جاده با طول موج ۰/۵ تا ۵۰ میلی‌متر) مقاومت لغزشی روسازی را در سرعت‌های مختلف تحت تاثیر قرار می‌دهد [۹-۱۵، ۷، ۳]. یکی از مشکلات دیگر پدیده هیدروپلانینگ است که در صورت وجود بافت درشت کافی، به منظور تخلیه سریع آب جمع شده بر روی سطح روسازی از این پدیده جلوگیری می‌شود [۱،۴،۸].

از آنچه گفته شد می‌توان به اهمیت بافت روسازی در ایمنی جاده‌ها پی برد. برای بیان مقاومت لغزشی روسازی پارامترهای مختلفی وجود دارد که روش‌های اندازه‌گیری این پارامترها نیز متفاوت است. در یک دسته‌بندی کلی می‌توان این روش‌ها را به دو گروه تقسیم کرد:

- اندازه‌گیری مستقیم مقاومت لغزشی
- اندازه‌گیری غیرمستقیم مقاومت لغزشی

علاوه بر این، روش‌های مربوط به اندازه‌گیری غیر مستقیم مقاومت لغزشی را می‌توان به دو دسته تماسی و غیرتماسی تقسیم کرد که روش‌های تماسی شامل BPT<sup>۴</sup>، DFT<sup>۵</sup>، OFT<sup>۶</sup> و روش ماسه است. روش‌های غیرتماسی نیز شامل روش‌های لیزری (APMD<sup>۷</sup> و

<sup>\*</sup> نویسنده عهده‌دار مکاتبات moghadas@aut.ac.ir

<sup>۴</sup> British Pendulum Tester

<sup>۵</sup> Dynamic Friction Tester

<sup>۶</sup> Outflow Time

<sup>۱</sup> Micro texture

<sup>۲</sup> Macro texture

<sup>۳</sup> Mega Texture

۹CTmeter) و روش‌های پردازش تصویر (FFT و wavelet) است. شکل ۱ دسته‌بندی روش‌های متداول تعیین مقاومت لغزشی روسازی را ارائه می‌دهد

با توجه به اینکه بسیاری از روش‌های سابق اندازه‌گیری بافت به صورت تماسی هستند، امروزه محققان به دنبال ارائه روش‌هایی هستند که با دقت و سرعت بالایی مقاومت لغزشی روسازی را اندازه‌گیری کنند. راهکارهای ارائه شده در این زمینه بیشتر در محدوده روش‌های غیرتماسی، استفاده از لیزر و تصاویر دیجیتال هستند. پیدوربسیکی و همکاران (۲۰۰۶) به منظور اندازه‌گیری بافت سطح روسازی، روشی جایگزین و ایمن برای آزمایش ماسه، بر مبنای پردازش تصویر ارائه دادند. در این روش تصاویر دیجیتال با استفاده از انتقال سریع فوریه (FFT) تحلیل شده و مقایسه نتایج حاصل از پردازش تصاویر و آزمایش ماسه، همبستگی قابل قبولی نشان داده است [۱۶]. سیگادا و همکاران (۲۰۱۰) روشی ارائه داده‌اند که با استفاده از دو میدل لیزری می‌توان در طول عملیات استاندارد وسیله نقلیه، بافت ریز و درشت روسازی را بلافاصله اندازه‌گیری کرد [۱۷]. ایزبی و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از قابلیت دید استریو، یک سیستم برای اندازه‌گیری بافت روسازی با هزینه پایین ارائه دادند. در این سیستم با شبیه‌سازی توانایی چشم انسان، اقدام به طراحی روشی شده است که در آن با ترکیب و پردازش تصاویر تهیه شده از یک سطح می‌توان مقدار بافت روسازی را اندازه‌گیری کرد [۱۸]. گودمن و همکاران (۲۰۱۰) در یک مطالعه، با ارائه یک روش عکسبرداری از نمونه‌های آسفالتی تهیه شده از روسازی‌های واقعی و استفاده از تحلیل تصاویر دیجیتال به روش Lacunarity، اقدام به ارائه روشی جایگزین برای آزمایش ماسه کردند [۱۹]. ونگ و همکاران (۲۰۱۱) یک ابزار لیزری کم‌وزن و قابل حمل با هزینه پایین برای اندازه‌گیری بافت درشت روسازی ارائه کردند که می‌توان از آن در محل و در آزمایشگاه در بعد کوچک استفاده کرد [۱۴]. الونای و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقی روشی بر اساس پردازش تصویر ارائه دادند که در آن توزیع زبری‌های سطح روسازی با استفاده از پروفیل لبه‌های اجزای بافت روسازی تعیین می‌شود [۲۰].

در سال‌های اخیر استفاده از پردازش تصویر در زمینه تعیین مقاومت لغزشی روسازی آغاز شده است. با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه، روش متداول بررسی بافت روسازی، FFT است. اما اخیراً تحقیقات نشان داده است که استفاده از Wavelet به علت انعطاف‌پذیری بودن و توانایی بیشتر در تحلیل تصاویر و کاهش حجم اطلاعات و در نتیجه افزایش سرعت پردازش داده‌ها، نسبت به FFT برتری دارد. آلروزن و همکاران (۲۰۰۷) در یک تحقیق، مقایسه‌های بین روش‌های متداول تحلیل تصاویر به منظور بررسی مشخصات بافت مصالح سنگی روسازی انجام دادند که در نهایت تحلیل تصاویر خاکستری با Wavelet را بهترین روش برای بررسی بافت مصالح معرفی کردند [۲۱]. در تحقیقی دیگر، با هدف تعیین بافت درشت روسازی، الونای و همکاران (۲۰۱۰) اقدام به ارائه دو روش جدید یعنی استفاده از autocorrelation function و wavelet برای تحلیل

بافت روسازی بر اساس پردازش تصویر کردند. نتایج حاصل از تحقیقات نشان داد که می‌توان از wavelet به عنوان یک ابزار موثر در تحلیل بافت روسازی استفاده کرد [۲۲].

نتایج به دست آمده از این تحقیقات بیانگر این نکته است که پردازش تصویر به عنوان یک روش غیرتماسی و با دقت قابل قبول و سرعت بالا، می‌تواند زمینه خوبی برای تحقیقات بعدی درباره تعیین مقاومت لغزشی روسازی باشد. بر همین اساس در این مطالعه سیستم هوشمندی بر مبنای پردازش تصویر معرفی می‌شود که قادر به تحلیل صفحه‌های بافت روسازی و ارائه یک شاخص جدید برای مقاومت لغزشی روسازی با در نظر گرفتن تاثیر اجزای افقی، قائم و قطری بافت روسازی در آن است.

در بخش دوم این مقاله مفاهیم اساسی به کار رفته در این تحقیق تشریح می‌گردد. همچنین به معرفی و بررسی سیستم پیشنهادی و قسمت‌های مختلف تشکیل‌دهنده آن پرداخته شده است. در بخش سوم نتایج نهایی حاصل از سیستم پیشنهادی بر روی دسته دوم تصاویر ارائه شده و کارایی سیستم پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل تفسیر و بررسی شده است. در نهایت در بخش چهارم نتیجه‌گیری نهایی حاصل از این تحقیق ارائه شده است.

## ۲- اصول و تئوری

### ۲-۱- سیستم‌های هوشمند (ES)

سیستم‌های هوشمند (ES) شاخ‌های از هوش مصنوعی (AI) هستند. هدف از ارائه سیستم‌های خبره مبتنی بر دانش (KBES) به کارگیری روش‌های هوش مصنوعی برای دستیابی به تخصص انسانی در یک موضوع خاص است [۲۳، ۲۴].

یک مدل سیستم خبره مشتمل بر چهار بخش اصلی است [۲۵-۲۳]:  
۱- پایگاه دانش: محلی است که اطلاعات و قوانین درباره یک موضوع خاص در آن ذخیره می‌شود. پایگاه دانش این اطلاعات و قوانین را به صورت قابل فهم برای موتور استنتاج تبدیل می‌کند.

۲- موتور استنتاج: بخش استنتاج یک سیستم خبره است که با توجه به قوانین موجود در پایگاه دانش برای مسئله مورد نظر راهکار ارائه می‌دهد  
۳- رابط کاربر: مجموعه‌ای از عملگرها است که به صورت کانال ارتباط کاربر و سیستم خبره عمل می‌کند.

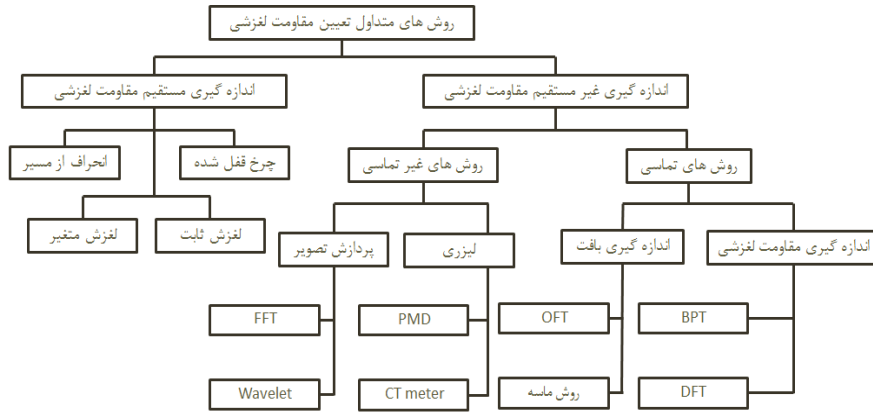
۴- مهندس دانش: هدایت و ساخت سیستم خبره و پشتیبانی از سیستم خبره را بر عهده دارد.

در شکل ۲ نمایی از اجزای یک سیستم خبره و نحوه ارتباط آن‌ها نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Expert Systems

<sup>2</sup> Artificial Intelligence

<sup>3</sup> Knowledge Based Expert Systems



شکل ۱: دسته بندی روش های متداول تعیین مقاومت لغزشی روسازی

Fig.1. Typical methods for determining the skid resistance of pavement

فرکانس تبدیل می کند [۲۷-۳۰].

فرض کنید (که  $1-M, \dots, 1, 2=y$  و  $1-N, \dots, 1, 2=x$ ) یک تصویر  $M \times N$  باشد. تبدیل فوریه گسسته دو بعدی تصویر با نشان داده می شود و به صورت زیر محاسبه می شود [۲۷]:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \times \exp \left\{ -j2\pi \times \left[ \frac{u_x}{M} + \frac{v_y}{N} \right] \right\}.$$

به همین ترتیب می توان تصویر تبدیل یافته را با استفاده از تبدیل فوریه گسسته معکوس به حالت اولیه درآورد. تبدیل فوریه گسسته معکوس از رابطه ۲ محاسبه می شود [۲۷]:

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \times \exp \left\{ -j2\pi \times \left[ \frac{u_x}{M} + \frac{v_y}{N} \right] \right\}.$$

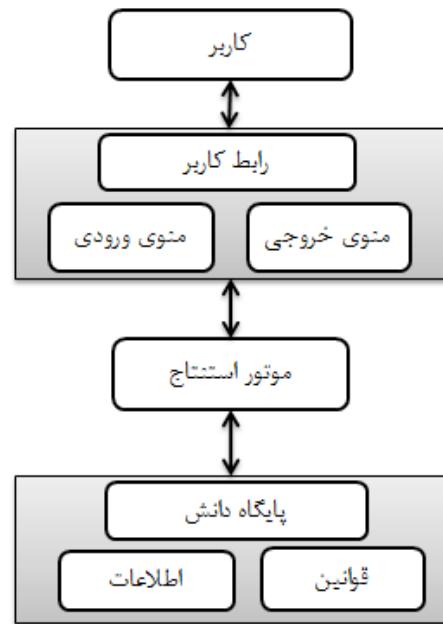
در این تحقیق به منظور ارتقاء کیفیت تصاویر، تصویری از سطح روسازی که HE نیز به آن اعمال شده به بلوک هایی با ابعاد  $100 \times 100$  پیکسل تقسیم شد و تابع تبدیل فیلتر برای آن انتخاب شد. که در آن قدم مطلق مقدار حقیقی به دست آمده از FFT است. پارامتر تجربی مقداری در محدوده بین صفر و یک است که مقادیر مناسب برای آن پس از اعمال تبدیل موجک بر روی تصاویر  $0/6, 0/7, 0/9$  تعیین شد.

در نهایت تصویری که کیفیت آن در مرحله پیش پردازش و با استفاده از FFT ارتقاء یافته از رابطه ۳ حاصل شد:

$$g(x, y) = \left\{ F^{-1} F(u, v) \times |F(u, v)|^K \right\}.$$

۲-۲-۳- استفاده از تبدیل موجک (WT)

تبدیل موجک یک ابزار ریاضی مناسب برای نمایش و پردازش تصاویر دیجیتال با وضوح متفاوت است [۲۷]. در دو دهه اخیر قابلیت موجک در تحلیل بافت به دلیل ویژگی چند دقتی آن در تحقیقات مختلف ثابت شده



شکل ۲: اجزای یک سیستم خبره [۲۶].

Fig.2. Components of an expert system [26]

۲-۲-۲- روند پردازش تصاویر روسازی (ارتقاء کیفیت، فشرده سازی، تجزیه)

۲-۲-۱- بهبود هیستوگرام تصویر (HE)

بهبود هیستوگرام یک ابزار اولیه در پردازش تصویر است. این فرایند در ارتقاء کیفیت جزئیات سفید یا خاکستری در تصاویر تاریک بسیار موثر است [۲۷]. شکل ۳ نمونه های از یک تصویر و شدت رنگ آن را قبل و بعد از اعمال HE نشان می دهد

۲-۲-۲- تبدیل سریع فوریه (FFT)

روش FFT، یک راهکار موثر برای محاسبه، انتقال فوریه مجزا بصورت متوالی و سریع است. این روش در محدوده سیگنال و تصویر دارای کاربرد است و بعد تصویر یا سیگنال مورد نظر را از زمان به

محاسبات عددی را استخراج کرده و در نهایت پس از کالیبراسیون نهایی به صورت شاخص مقاومت لغزشی نهایی روسازی ارائه می‌کند. به طور کلی مراحل شکلگیری سیستم پیشنهادی شامل: جمع‌آوری داده، تحلیل داده و انتخاب مدل تحلیل، طراحی مدل نرم‌افزار، اصلاح مدل و طراحی شاخص و ارائه شاخص نهایی است.

### ۲-۳-۱- سخت‌افزار

برای تامین تصاویر دیجیتال مورد نیاز از سطح روسازی، چند پارامتر مهم در نظر گرفته شد:

- تهیه تصاویری با وضوح قابل قبول.
- تهیه تصاویر با سرعت بالا.
- تامین شرایط کنترل شده به هنگام تهیه تصاویر.

با توجه به مشکلات موجود در برداشت دستی و نیمه اتوماتیک، طرح دستگاهی که معیارهای ثابتی برای برداشت داشته و تمامی جزئیات را با شرایط ثابت برداشت کند ضروری به نظر می‌رسید. به همین منظور سخت‌افزاری طراحی شد که برای تهیه تصاویر دیجیتال از سطح روسازی، در ساختمان آن از سیستم اسکن خطی استفاده شد. چارچوب کلی سخت‌افزار از جنس فولاد و با قابلیت حمل آسان ساخته شد. همچنین طراحی دستگاه به‌گونه‌ای است که به دلیل نمونه‌برداری از فاصله نزدیک قادر است جزئیات سطح روسازی را به صورت دقیق‌تر ثبت کند. علاوه بر این با توجه به سیستم ترمز تعبیه شده، علاوه بر سطوح مسطح می‌توان در روسازی‌های شیبدار نیز اقدام به تهیه نمونه کرد. در ضمن سیستم چرخ‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده که قابلیت مانور و چرخش ۳۶۰ درجه را به دستگاه می‌دهد در حالت کلی دستگاه از لحاظ فیزیکی به‌گونه‌ای طراحی شده است که هم برای مطالعات آزمایشگاهی و هم برای برداشت‌های میدانی کاربردی باشد. کار با آن بسیار ساده بوده و نیاز به افراد متخصص ندارد. همچنین با توجه به تجهیزات استفاده شده در ساختمان آن، هزینه‌ی تمام شده بسیار پایینتر از هزینه برداشت‌های خودکار است. علاوه بر این دستگاه برداشت و اندازه‌گیری مقاومت لغزشی روسازی به دلیل طراحی منحصر به فرد آن با حذف کامل نور محیط اطراف و تامین یک نورپردازی مناسب با شدت ثابت برای تمامی برداشت‌ها، حجم عملیات نرم‌افزاری را به منظور حذف اختلال حاصل از شرایط محیط اطراف به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد شکل ۶ نمایی از سخت‌افزار را نشان می‌دهد کاربری کلی دستگاه به‌گونه‌ای است که می‌توان با برداشت و انتقال همزمان اطلاعات به نرم‌افزار تعیین مقاومت لغزشی روسازی، وضعیت روسازی مورد نظر را در محل بررسی کرد. به طور کلی با توجه به تجهیزات تعبیه شده در دستگاه برداشت و اندازه‌گیری مقاومت لغزشی روسازی، می‌توان گفت این دستگاه یک آزمایشگاه سیار تشخیص و بررسی مقاومت لغزشی روسازی است.

است. تبدیل موجک به دلیل این ویژگی قادر است اطلاعات مفید تصاویر را بدون توجه به تغییر ابعاد همسایگی پیکسل‌ها حفظ کند که همین امر باعث موثر بودن تحلیل موجک در فشرده‌سازی تصویر، حذف اختلال و غیره شده است [۳۴-۳۱].

### ۲-۳-۱- تبدیل موجک (WT) دو بعدی

تابع  $W$  بصورت دو بعدی با استفاده از روابط زیر تولید می‌شود [۲۳، ۲۷]:

$$\ddot{O}(x, y) = \varphi(x)\varphi(y). \quad (1)$$

$$\varnothing^H(x, y) = \varphi(x)\Psi(y). \quad (2)$$

$$\varnothing^V(x, y) = \Psi(x)\varphi(y) \quad (3)$$

$$\varnothing^D(x, y) = \Psi(x)\Psi(y). \quad (4)$$

در این روابط  $\varnothing^D$  و  $\varnothing^V$  و  $\varnothing^H$  مولفه‌های موجک قائم مطابق با سه جهت افقی، قائم و قطری هستند و  $\Phi$  یک تابع مقیاس‌گذاری دو بعدی با اطلاعات تقریبی از تصویر است که به ابعاد دیگری تبدیل می‌شود. اصل انتقال قائم دو بعدی  $\Psi D$  بصورت روابط زیر است [۲۷، ۳۵]:

$$\ddot{O}(x, y) = \varphi(\varphi^{-k}x - m)\varphi(\varphi^{-k}y - n). \quad (8)$$

$$\Psi_{kmn}^H(x, y) = \varphi(\varphi^{-k}x - m)\Psi(\varphi^{-k}y - n) \quad (9)$$

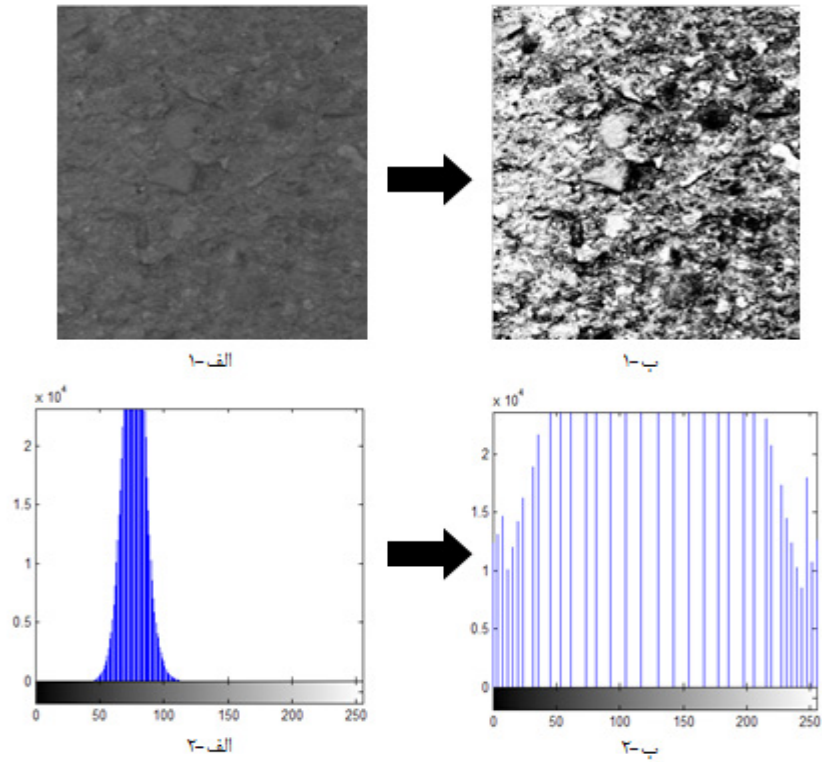
$$\Psi_{kmn}^V(x, y) = \varphi(\varphi^{-k}x - m)\varphi(\varphi^{-k}y - n) \quad (10)$$

$$\Psi_{kmn}^D(x, y) = \varphi(\varphi^{-k}x - m)\Psi(\varphi^{-k}y - n) \quad (11)$$

در روابط بالا  $n$  و  $m$  ابعاد تصویر (تعداد ضرایب موجک) و  $k$  سطح تجزیه موردنظر است. اعمال تبدیل موجک با استفاده از فیلتر haar و در سطح دوم بر یک تصویر در شکل ۴ به صورت شماتیک و واقعی نشان داده شده است که در آن  $D_P^D$  و  $D_P^V$  و  $D_P^H$  جزئیات سطح اول بدست آمده برای موجک‌های  $\varnothing^D$  و  $\varnothing^V$  و  $\varnothing^H$  هستند  $D_P^D$  و  $D_P^V$  و  $D_P^H$ . جزئیات سطح دوم ( $k=2$ ) و  $A_2$  تقریب در زیر سطح دوم است [۲۷، ۳۵].

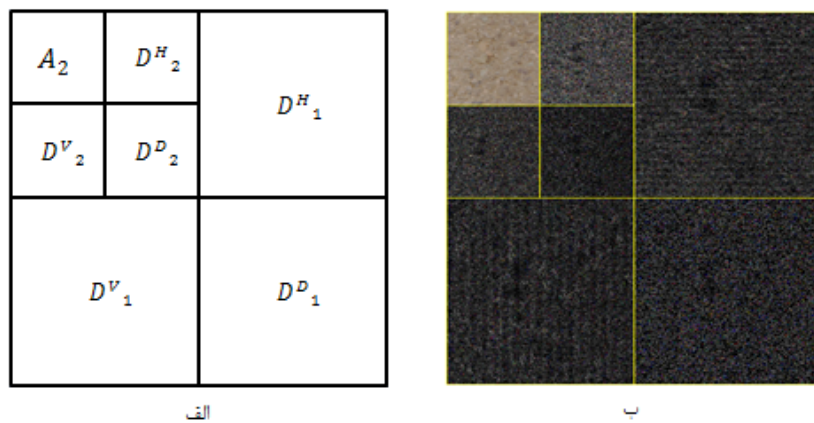
### ۲-۳- سیستم خبره پیشنهادی

قسمت‌های مختلف تشکیل‌دهنده سیستم پیشنهادی را می‌توان به صورت شکل ۵ ارائه کرد. این سیستم از دو بخش سخت‌افزار و نرم‌افزار تشکیل شده است. بخش سخت‌افزار شامل دستگاهی است که برای تهیه تصاویر روسازی بر اساس پارامترهای مورد نظر طراحی و ساخته شد و ورودی مورد نیاز بخش نرم‌افزار را تامین می‌کند. بخش نرم‌افزار از سیستم خبره‌ای تشکیل شده است که، اطلاعات مفید بافت تصاویر روسازی ورودی را در مراحل پیش‌پردازش فشرده‌سازی و تجزیه توسط تحلیل موجک و



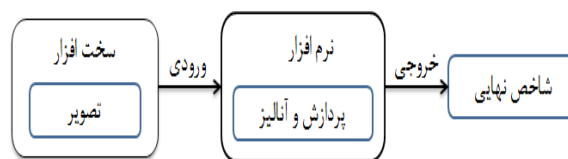
شکل ۳: الف-۱ قبل از اعمال HE، الف-۲ شدت رنگ تصویر روسازی قبل از اعمال HE، ب-۱ بعد از اعمال HE و ب-۲ شدت رنگ تصویر روسازی بعد از اعمال HE [۲۹].

Fig.3. A.1 Before applying HE, A.2 Color intensity of pavement image Before applying HE, B 1- after applying HE and B 2- Color intensity of pavement image after applying HE [29]



شکل ۴: الف- طرح شماتیک تحلیل دوبعدی با استفاده از تحلیل موجک تا سطح دوم، ب- تحلیل دوبعدی تصویر روسازی با استفاده از تحلیل موجک تا سطح دوم

Fig.4. A. Schematic design of two-dimensional analysis using wavelet analysis to second level; BD-analysis of pavement image using wavelet analysis to second level.



شکل ۵: قسمت‌های مختلف تشکیل دهنده سیستم پیشنهادی تعیین شاخص مقاومت لغزشی روسازی

Fig.5. Different parts of the proposed system to determine the skid resistance index of pavement

## ۲-۳-۲- نرم افزار

مانند سایر سیستم‌های خبره، سیستم خبره پیشنهادی نیز با توجه به نوع کاربری از رابط‌گرافیکی، پایگاه دانش و موتور استنتاج مخصوص به خود تشکیل شده است.

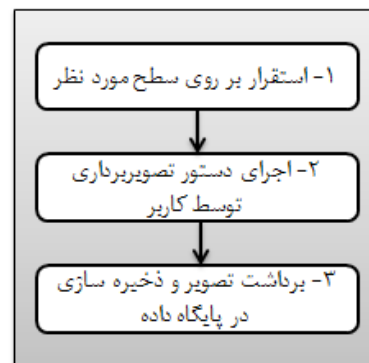
## ۲-۴-۲-۱- رابط گرافیکی کاربر (GUI) ۰۳

یک سیستم خبره را زمانی می‌توان موفق نامید که از امکانات ارتباطی خوبی برخوردار باشد. بدین معنی که اطلاعات مورد نیاز را از کاربر دریافت کرده و برای تحلیل به زبان سیستم ترجمه کند. همچنین نتایج حاصل از نرم‌افزار را به‌صورت مناسب و قابل فهم به کاربران نشان دهد [۳۶]. از اینرو طراحی GUI که متناسب با سیستم خبره مورد نظر باشد ضروری است. GUI طراحی شده برای نرم‌افزار سنجش مقاومت لغزشی در شکل ۷ نشان داده شده است. شمای کلی و عملگرهای GUI سیستم تعیین مقاومت لغزشی روسازی براساس مراحل تحلیل تصاویر و اطلاعاتی که لازم بود تا از

طریق GUI در اختیار کاربر قرار بگیرد، همچنین اطلاعاتی که در حین تحلیل تصاویر از کاربر خواسته می‌شود طراحی گردید. در GUI طراحی شده، به منظور نمایش تصویر روسازی در مراحل مختلف تحلیل و همچنین نمایش نتیجه نهایی، قسمت‌هایی برای نمایش تصویر روسازی ارتقا یافته و تصویر اولیه روسازی در نظر گرفته شد. در قسمت راست، راهنمایی در جهت تعیین نوع روسازی که در حین مراحل تحلیل برای تعیین وضعیت روسازی از کاربر سوال می‌شود و همچنین راهنمای تشخیص وضعیت روسازی بر اساس رنگ نشان داده، قرار داده شد.

## ۲-۴-۲-۲- طراحی پایگاه دانش

به منظور طراحی پایگاه دانش نرم‌افزار سیستم پیشنهادی، چندین اقدام اساسی به صورت نموداری که در شکل ۸ نشان داده شده، انجام شد که در ادامه هرکدام از این مراحل به صورت کامل بررسی می‌شود.



شکل ۶: نمایی از سخت‌افزار دستگاه

Fig.6. A View of Hardware

بیشتری نیاز دارد. به همین دلیل در سیستم تعیین مقاومت لغزشی روسازی نمونه‌ها در ابتدا از حالت رنگی به خاکستری تبدیل می‌شود. ارتقاء کیفیت تصاویر به منظور بهبود قابلیت تشخیص مشخصات بافت روسازی که در نتیجه باعث بهبود نتایج نهایی تشخیص مقاومت لغزشی می‌شود، با استفاده از دو ابزار مهم یعنی بهبود هیستوگرام و FFT انجام شد که روند آن در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

## ۲-۴-۲-۲-۲- اعمال موجک و جداسازی باندها

در این مرحله تصاویر روسازی ارتقاء یافته در مرحله قبل با استفاده از تبدیل موجک (۳۲WT) فشرده شده و تجزیه می‌شود. پس از تجزیه تصویر بافت روسازی، سه تصویر مجزا در سه جهت مختلف حاصل می‌شود که هر کدام از این تصاویر، اجزای بافت روسازی در جهت افقی، قائم و قطری را در بر دارد. شکل ۱۰ نمونه‌ای از یک تصویر روسازی پس از تجزیه در ۲ سطح

## ۲-۴-۲-۲-۱- برداشت داده

به منظور سنجش نتایج نهایی حاصل از نرم‌افزار لازم بود تا یکی از شاخص‌های استاندارد ارائه شده برای سنجش مقاومت لغزشی روسازی به عنوان معیار انتخاب شود. با توجه به امکان دسترسی به دستگاه پاندول بریتانیایی در آزمایشگاه روسازی دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر، از نتایج این دستگاه (که شاخص BPN ۳۱ را برای مقاومت لغزشی روسازی ارائه می‌دهد) استفاده شد. داده‌های تصویری به‌همراه BPN متناظر با آن‌ها در دو دسته، یکی برای مرحله طراحی و دیگری برای مرحله آزمایش نرم‌افزار تهیه شد.

## ۲-۴-۲-۲-۲- پردازش تصاویر

## ۲-۴-۲-۲-۱- پیش پردازش (ارتقاء کیفیت)

تصاویر رنگی در مقایسه با تصاویر خاکستری برای تحلیل به زمان

تأثیر قرار می‌دهد، در ارائه شاخص اولیه، محدودهای ۳۳ بر اساس واریانس تصویر تعریف شد تا بواسطه آن شاخص اولیه به صورت: نسبت پیکسل‌های نشان‌دهنده پستی‌وبلندی‌های نیمه بالای این محدوده (threshold) در هر تصویر، به تمام پیکسل‌های تشکیل‌دهنده آن تصویر تعریف شود. این محدوده و شاخص در روابط ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است.

$$threshold_i = mean\left(var\left(\phi^i(x, y)\right)\right) \quad (12)$$

$$SRI_i = \left( \frac{\sum\left(\sum\left(\phi^i(x, y) > threshold_i\right)\right)}{\sum\left(\sum\left(\phi^i(x, y) > 0\right)\right)} \right) * 100 \quad (13)$$

که در آن:

$\phi^i(x, y)$ : تصویر حاصل از تبدیل موجک  $D$   $H$   $V$   $i$

$threshold_i$ : میانگین، واریانس تصویر حاصل از تبدیل موجک.

$\sum\left(\sum\left(\phi^i(x, y)\right)\right)$ : مجموع تمام پیکسل‌های تصویر  $i$ .

$SRI_i$ : شاخص مقاومت لغزشی اولیه، تصویر  $i$ .

شکل ۱۱ قسمت‌هایی از بافت روسازی که بر اساس تعریف

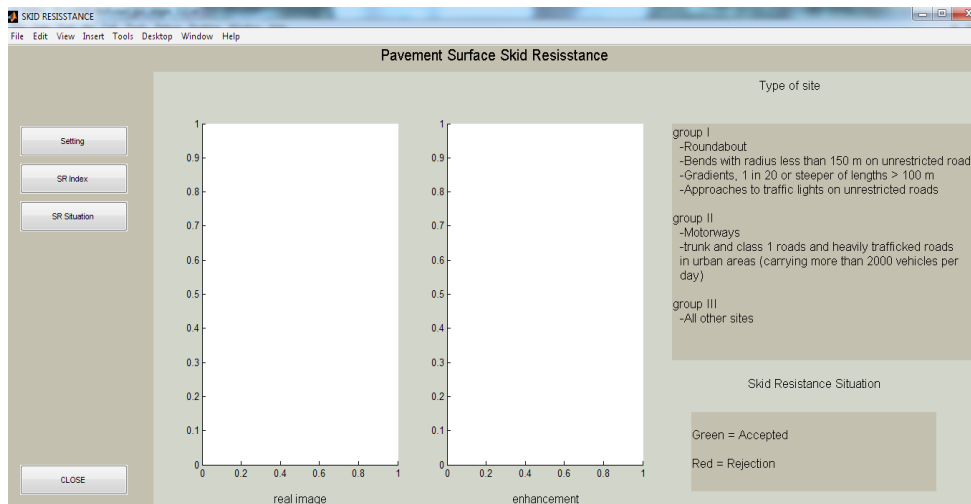
$threshold$  در تعیین شاخص اولیه موثر است را نشان می‌دهد

توسط تبدیل موجک با فیلتر haar را نشان می‌دهد

زمانی که اتومبیل در یک مسیر مستقیم حرکت می‌کند، اجزای افقی بافت روسازی می‌تواند تأثیر بیشتری نسبت به دو جزء قائم و قطری در ایجاد اصطکاک بین سطح روسازی و چرخ‌های وسیله نقلیه داشته باشد. در صورتیکه در یک قوس افقی با توجه به وجود نیروی گریز از مرکز و زاویه چرخش چرخ‌های وسیله نقلیه تأثیر اجزای افقی، قائم و قطری بافت روسازی در ایجاد اصطکاک، احتمالاً با آنچه که درباره مسیر مستقیم گفته شد متفاوت خواهد بود. این مطلب درباره شرایطی مانند شیب‌های سربالا و سرپایین یک مسیر نیز صادق است. بر همین اساس در این تحقیق با تجزیه بافت روسازی به اجزای افقی، قائم و قطری تشکیل‌دهنده آن و ارائه شاخص‌های جداگانه‌ای برای هر کدام از آن‌ها و ارائه یک شاخص نهایی ترکیبی، تلاش شد تا تأثیر هر یک از اجزای بافت روسازی به‌صورت جداگانه در تعیین شاخص مقاومت لغزشی نهایی روسازی اعمال شود. تا به این ترتیب بتوان مقاومت لغزشی روسازی را به‌صورت انعطاف‌پذیرتری بررسی کرد.

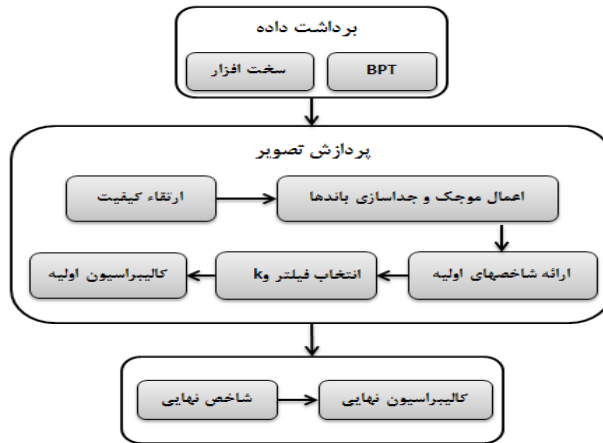
۲-۴-۲-۲-۳ ارائه شاخص‌های اولیه

شاخص اولیه باید به‌گونه‌ای تعریف می‌شد که بتواند ویژگی‌های بافت سطح روسازی را در برگیرد. عمده‌ترین ویژگی تصویر روسازی که نشان‌دهنده پستی‌وبلندی‌های روسازی است، تغییرات شدت رنگ پیکسل‌ها است. با توجه به این ویژگی و با توجه به اینکه پستی‌وبلندی‌های نزدیک به سطح، مقاومت لغزشی را بیشتر تحت



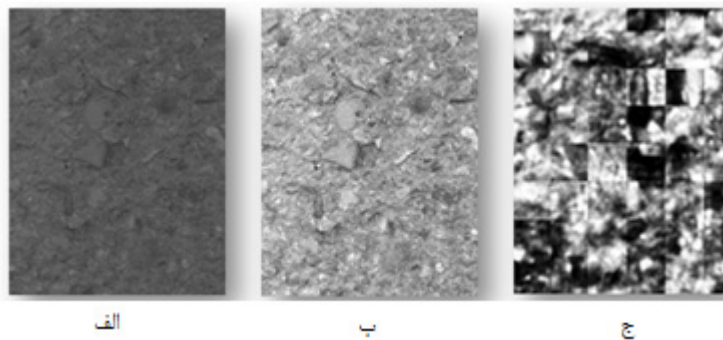
شکل ۷: شمای کلی سیستم تعیین مقاومت لغزشی

Fig.7. General Schema of the GUI of skid resistance determination expert system



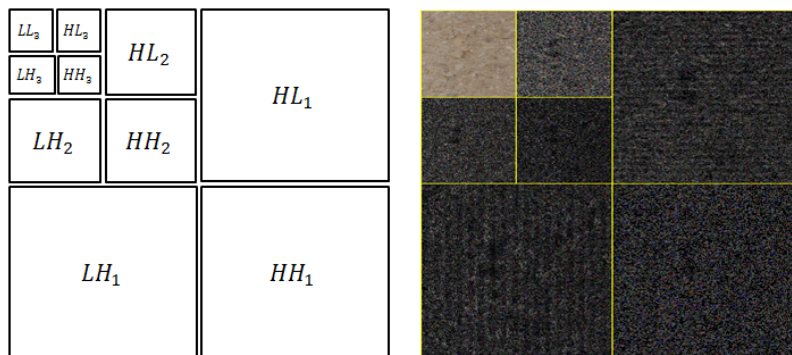
شکل ۸: نمودار مراحل شکلگیری پایگاه دانش سیستم سنجش مقاومت لغزشی روسازی

Fig.8. The chart of the formation stages of the knowledge base of the skid resistance determination expert system



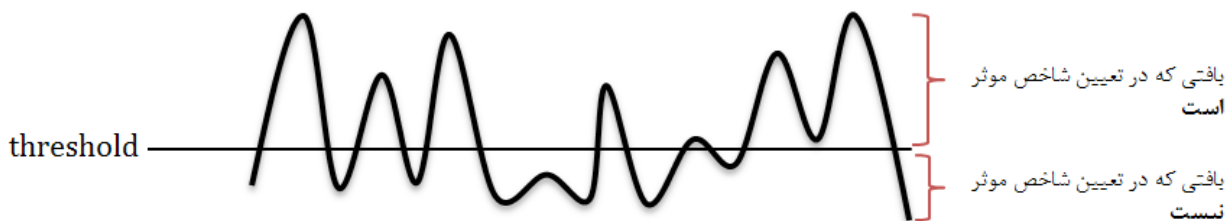
شکل ۹: الف) تبدیل تصویر رنگی به تصویر خاکستری ب) بهبود هیستوگرام تصویر خاکستری ج) اعمال FFT به تصویر

Fig.9. A) Converts a color image to a gray image b) Improves the histogram of the gray image c) Apply FFT to the image



شکل ۱۰: تجزیه تصویری از روسازی تا سطح دوم با فیلتر Haar [۲۸،۳۰].

Fig.10. analysis of pavement Image to second level with haar filter [28,30]



شکل ۱۱: قسمتهایی از بافت روسازی که بر اساس تعریف threshold در تعیین شاخص موثر است

Fig.11. Parts of the pavement texture that is effective in determining the index based on the definition of the threshold



نیز مناسب باشد اقدام به کالیبراسیون شاخص‌های اولیه شد تا در نهایت فیلتری انتخاب شود که نتایج حاصل از کالیبره کردن شاخص به دست‌آمده از آن در مقایسه با سه فیلتر دیگر بهتر باشد. برای کالیبره کردن شاخص به‌دست‌آمده از هر کدام از فیلترها از رابطه تجربی پیشنهادی ۱۴ استفاده شد. در رابطه ۱۴،  $SRI_i$  شاخص افقی، قائم یا قطری اولیه تصویر  $A_m$  است. همچنین عدد پاندول بریتانیایی متناظر با تصویر  $A_m$  است. با اعمال این رابطه به شاخص اولیه، نتایج حاصل از بعضی فیلترهای ارائه شده در جدول ۲ بهبود یافت. مقادیر پارامترهای  $a$  و  $A$  و همچنین مقادیر  $MSE$  حاصل برای هر کدام از فیلترها در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر  $MSE$  در جدول ۳، فیلتر haar و  $k=9$ ، برای شاخص افقی اولیه، فیلتر  $db10$  و  $k=6$  برای شاخص قائم اولیه و فیلتر  $coif5$  و  $k=7$ ، برای شاخص قطری اولیه انتخاب شد.

جدول ۲: چهار فیلتر و  $k$  منتخب برای هر کدام از شاخص‌های افقی، قائم و قطری به همراه  $MSE$  آن‌ها

Table 2. 4 selected filters and “k” values for each of the horizontal, vertical and diagonal indicators along with their MSE

MSE	k	Filter	SRI
۳۶,۹۴	۰,۹	Haar	SRIh
۴۲,۷۱	۰,۴	db45	
۴۸,۸۸	۰,۱	db45	
۵۲,۲۶	۰,۸	Haar	
۵۰,۳۶	۰,۵	bior3.7	SRIv
۵۰,۵۳	۰,۴	db30	
۵۵,۷۵	۰,۷	db40	
۵۷,۵۹	۰,۶	db10	
۵۴,۱۰	۰,۶	db45	SRI d
۵۴,۲۷	۰,۷	coif5	
۵۷,۵۶	۱	db40	
۵۹,۱۳	۰,۶	bior3.3	

$$SRI_i^a / A \quad (14)$$

که در آن:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n (SRI_i - BPN_i)}{n}$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}$$

#### ۲-۴-۲-۲-۵- کالیبراسیون اولیه

در ادامه به منظور انعطاف‌پذیرتر کردن شاخص‌های اولیه منتخب، اقدام به تعریف ضرایب کالیبره‌های شد که با تغییر شرایط تصویر روسازی،

#### ۲-۴-۲-۲-۴- انتخاب فیلتر موجک، سطح تجزیه و $k$ مناسب

در مرحله پیشپردازش، در قسمت اعمال تبدیل FFT برای ارتقاء کیفیت تصویر روسازی، پارامتری به نام  $k$  ارائه شد. محدوده این پارامتر بین صفر و یک است که باید مقدار مناسبی برای آن تعیین شود. در این مرحله علاوه بر مقدار پارامتر  $k$ ، باید فیلتر و سطح تجزیه مناسبی برای هر کدام از سه تصویر افقی، قائم و قطری تعیین می‌شد تا در نهایت شاخص اولیه تعریف شده، به عدد پاندول بریتانیایی (BPN) به‌دست‌آمده از آزمایش پاندول بریتانیایی نزدیکتر باشد. جدول ۱ نشان‌دهنده خلاص‌های از فیلترهای خانواده موجک به‌کار رفته در مرحله انتخاب فیلتر،  $k$  و سطح تجزیه مناسب است. گرچه با افزایش سطح تجزیه، تصویر فشرده‌تر شده و این امر سرعت تحلیل را افزایش می‌دهد، اما از سوی دیگر باعث حذف اطلاعات مفید از تصویر می‌شود که نهایتاً تأثیر نامطلوب بر نتیجه خواهد داشت. بر این اساس در این تحقیق تصاویر تا سطح سوم تجزیه شد. در نهایت با استفاده از هر کدام از فیلترهای جدول ۱ و برای هر کدام از نمونه‌های اولیه تهیه شده، با استفاده از (۱۱ ضریب  $k$ )،  $k=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$  و تجزیه تصاویر تا سه سطح، در هر تحلیل سه شاخص  $SRIH$  ۳۴،  $SRIV$  ۳۵ و  $SRI d$  ۳۶ به دست آمد. که به ترتیب نشان‌دهنده شاخص مقاومت لغزشی افقی، قائم و قطری یک روسازی است. برای انتخاب بهترین فیلتر و مقدار  $k$  از روش میانگین مربعات خطا ( $MSE$ ) ۳۷ استفاده شد. با استفاده از این معیار، برآوردگری که دارای کمترین  $MSE$  باشد انتخاب می‌شود.

جدول ۱: فیلترهای منتخب برای مرحله انتخاب فیلتر،  $k$  و سطح تجزیه مناسب

Table1. Selected filters for the filter, k and appropriate decomposition level selection stage

خانواده موجک	فیلتر
Daubechies	'db1', 'db2', 'or', 'haar', 'db3', 'db5', 'db10', 'db15', 'db20', 'db25', 'db30', 'db35', 'db40', 'db45'
	Coiflets
Biorthogonal	'bior1,3', 'bior1,5', 'bior2,4', 'bior2,6', 'bior3,1', 'bior3,3', 'bior3,9', 'bior3,07', 'bior5,5', 'bior6,8'

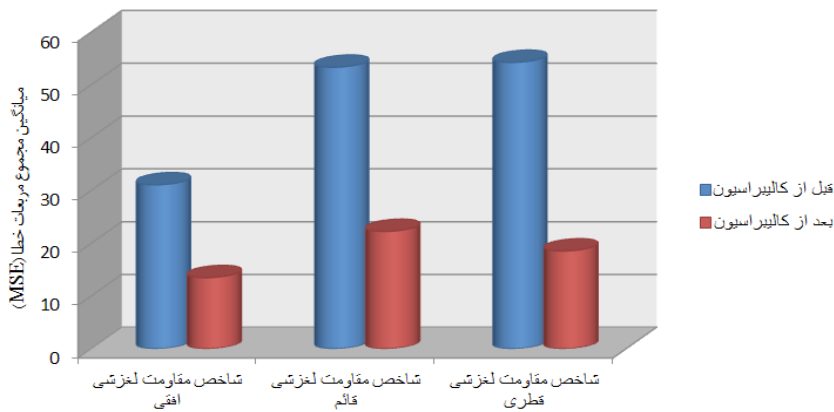
برای انتخاب بهترین فیلتر و پارامتر  $k$  مناسب، میانگین مربعات خطای شاخص افقی، قائم و قطری همه فیلترها با هم مقایسه شد تا در نهایت برای هر شاخص، چهار فیلتر با پارامتر  $k$  مناسب انتخاب شد. این فیلترها و پارامتر  $k$  مربوط به هر کدام از آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. برای انتخاب فیلتری که علاوه بر تصاویر نمونه با BPN مشخص، برای تصاویر جدید

شاخص مقاومت لغزشی اولیه را اصلاح کند. در این مرحله با اعمال تاثیر تغییرات واریانس تصاویر بر ضرایب کالیبره، نتایج به اندازه قابل قبولی بهبود یافت. شکل ۱۲ تفاوت میان مقادیر MSE شاخص‌های افقی، قائم و قطری را قبل و بعد از کالیبراسیون نشان می‌دهد

جدول ۳: شاخص‌های اصلاح شده و MSE نتایج حاصل از آن‌ها

Table 3. Modified Indices and MSE Results

MSE	SRI <sup>a</sup> /A	k	filter	SRI
۳۲,۶۱	SRIh <sup>1.175/1.876</sup>	۰,۹	haar	
۴۵,۳۱	SRIh <sup>1.43/4.01</sup>	۰,۴	db45	SRIh
۷۰,۰۷	SRIh <sup>1.27/2.28</sup>	۰,۱	db45	
۳۴,۴۳	SRIh <sup>1.35/4.12</sup>	۰,۸	haar	
۷۶,۷	SRIv <sup>1.48/4.18</sup>	۰,۵	bior3.7	
۶۰,۵۲	SRIv <sup>1.5/4.81</sup>	۰,۴	db30	SRIv
۴۸,۳۹	SRIv <sup>1.49/4.76</sup>	۰,۷	db40	
۳۰,۲۵	SRIv <sup>0.495/0.168</sup>	۰,۶	db10	
۵۸,۰۴	SRI <sup>d</sup> 1.25/2.25	۰,۶	db45	
۳۴,۹۱	SRI <sup>d</sup> 1.326/2.776	۰,۷	coif5	SRI <sup>d</sup>
۸۳,۴۱	SRI <sup>d</sup> 1.43/3.96	۱	db40	
۴۶,۴	SRI <sup>d</sup> 0.167/0.05	۰,۶	bior3.3	



شکل ۱۲: مقایسه مقادیر MSE شاخص‌های افقی، قائم و قطری قبل و بعد از کالیبراسیون

Fig.12. Comparison of the MSE values of horizontal, vertical and diagonal indices before and after calibration

آن‌ها در جدول ۴ آورده شده است.

در این معادلات، SRI شاخص مقاومت لغزشی نهایی و SRI<sup>i</sup> نشان‌دهنده شاخص مقاومت لغزشی افقی، قائم و قطری کالیبره شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر MSE مربوط به معادله سوم کمتر از سه معادله دیگر هستند. ضریب ثابت موجود در ساختار این معادله نیز با استفاده از تغییرات واریانس تصاویر کالیبره شده و MSE بهبود یافته آن در جدول ۵ ارائه شده است.

۴-۲-۳- تعیین شاخص نهایی و کالیبراسیون نهایی

در پایان به منظور تعیین شاخص مقاومت لغزشی نهایی، ترکیبی از سه شاخص کالیبره شده افقی، قائم و قطری به گونه‌ای ارائه شد که نزدیکترین نتیجه را به BPN حاصل کند. به این ترتیب شاخص نهایی، نتیجه تحلیل تصویر یک روسازی به وسیله سه فیلتر haar، db10 و coif5 با مقادیر k متفاوت می‌باشد. برای تعیین شاخص مقاومت لغزشی نهایی ترکیباتی ارائه شد که به همراه مقادیر MSE

جدول ۴: چهار ترکیب از شاخص‌های مقاومت لغزشی افقی، قائم و قطری

Table 4. Four combinations of horizontal, vertical and diagonal skid resistance indicators

MSE	رابطه	شماره رابطه
۵۰/۷	$SRI = Ln(e^{SRI_h} + e^{SRI_v} + e^{SRI_d})$	Equation 1
۲۲/۲۱	$SRI = Ln(SRI_h + e^{SRI_v} + SRI_d)$	Equation 2
۱۱/۴۹	$SRI = ۳.۵ * Ln(SRI_h^e + SRI_v^e + SRI_d^e)$	Equation 3
۱۳/۱۶	$SRI = Ln((SRI_h + SRI_h + SRI_d) * \pi^{(SRI_h + SRI_h + SRI_d)})^{۰.۷۵}$	Equation 4

جدول ۵: شاخص مقاومت لغزشی نهایی کالیبره شده و MSE بهبود یافته آن

Table 5. The final calibrated skid resistance index and its improved MSE

MSE	رابطه کالیبره شده	شماره رابطه
۱۱,۰۷	$RI = ۳.۵ * \alpha * Ln(SRI_h^e + SRI_v^e + SRI_d^e)$	۳ Equation

همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر شاخص به دست آمده از نرم‌افزار با اختلاف اندکی از مقادیر BPN حاصل شده‌است. تحلیل نتایج حاصل نشان داد که دقت سیستم پیشنهادی در این مرحله  $R^2 = ۰.۶$  است.

جدول ۶: مقادیر حداقل BPN برای شرایط مختلف [۳۷].

Table 6. Minimum BPN values for different conditions [37]

گروه	کاربری	حداقل BPN
A	میدان قوس‌هایی با شعاع کمتر از ۱۵۰m شیب ۵ درصد یا سرازیری با طول بیش از ۱۰۰m مسیرهای منتهی به چراغ‌های راهنمایی	۶۵
B	بزرگراه-شاهراه و جاده‌های دسته ۱ و مسیرهایی با ترافیک بالا در مکان‌های شهری	۵۵
C	سایر موارد	۴۵

با توجه به این که هدف از این مطالعه و تحقیق ارائه یک راهکار جدید برای بررسی قابلیت لغزشی روسازی است، نتیجه به دست آمده تا حدود زیادی قابل قبول می‌باشد. زیرا سیستم ارائه شده یک روند انعطاف پذیر برای تعیین مقاومت لغزشی روسازی معرفی می‌کند که به واسطه آن می‌توان بسیاری از عوامل موثر بر مقاومت لغزشی روسازی

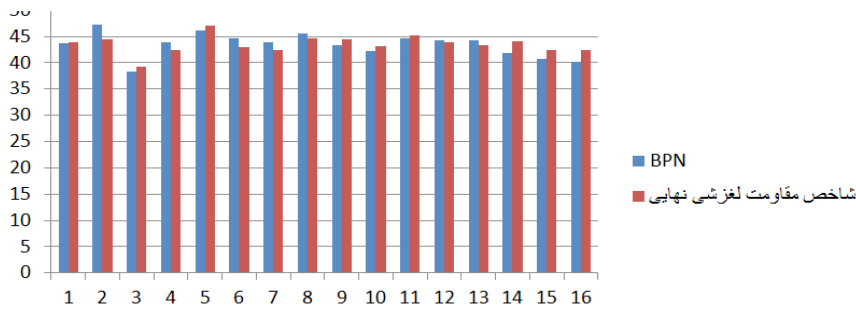
در گزارشی که دستورالعمل کامل استفاده از دستگاه پاندول بریتانیایی و نحوه انجام آزمایش توسط آن ارائه شده است، میزان BPN حداقل برای شرایط مختلف در سه دسته بندی به صورت جدول ۶ ارائه شده است. با توجه به اینکه سیستم تعیین مقاومت لغزشی روسازی بر اساس نتایج آزمایش پاندول بریتانیایی (BPN) کالیبره شده است، پس در این سیستم نیز محدوده‌های تعریف شده در جدول ۶ اساس تعیین وضعیت لغزشی روسازی در نظر گرفته شد. در پایان موتور استنتاج سیستم تعیین مقاومت لغزشی روسازی با توجه به نوع روسازی مورد مطالعه و شاخص نهایی مقاومت لغزشی به دست آمده، قادر است وضعیت روسازی را بررسی کرده و مقاومت لغزشی آن را تأیید یا رد کند.

### ۳- تحلیل و بررسی نتایج نهایی

به منظور آزمایش کارایی نرم‌افزار سیستم پیشنهادی، دسته دوم تصاویر (که جزو گروه C از جدول ۶ می‌باشند) و شاخص BPN آن‌ها با استفاده از دستگاه برداشت و اندازه‌گیری مقاومت لغزشی روسازی و پاندول بریتانیایی تهیه شد. تصاویر تهیه شده به‌طورمستقیم در نرم‌افزار تعیین مقاومت لغزشی روسازی، مورد تحلیل قرار گرفت و مقدار شاخص مقاومت لغزشی آن‌ها تعیین شد. نتایج حاصل از سیستم پیشنهادی به همراه مقادیر BPN این تصاویر در شکل ۱۳ ارائه شده است.

استفاده کرد. طرح کلی ساختار سیستم تعیین مقاومت لغزشی به صورت نموداری در شکل ۱۴ ارائه شده است.

را در تعیین شاخص دخیل کرد، از سوی دیگر به منظور بالا بردن هماهنگی نتایج به دست آمده می توان از روش های هوش مصنوعی نیز



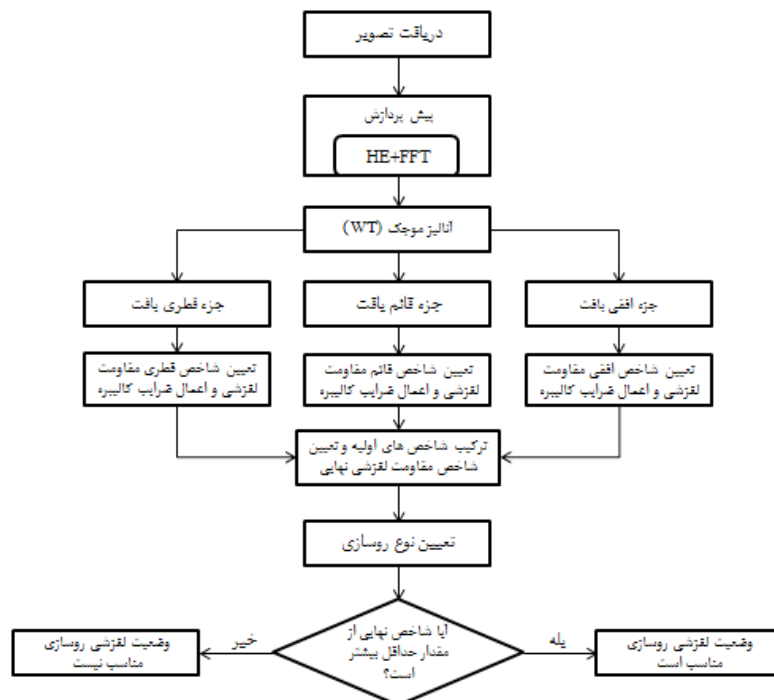
شکل ۱۳: مقایسه شاخص مقاومت لغزشی حاصل از سیستم پیشنهادی و مقادیر BPN متناظر برای دسته دوم تصاویر روسازی

Fig.13. Comparison of the slip resistance index obtained from the proposed system and the corresponding values of BPN for the second category of images

انجام برداشت های متوالی از یک نقطه ثابت هیچگاه نمی توان به نتایج کاملاً یکسانی دست یافت و این خود نشان دهنده تکرارپذیر نبودن نتایج آزمایش پاندول بریتانیایی است. در مقابل نتایج حاصل از سیستم پیشنهادی با بهره گیری مناسب از خصوصیات تبدیل موجک و ارائه یک روش متفاوت و انعطاف پذیر برای تحلیل تصاویر بافت روسازی، نشان می دهد که تبدیل موجک یک ابزار مناسب در زمینه تحلیل بافت سطح روسازی است. نتایج حاصل از تحلیل بافت روسازی توسط این سیستم با استفاده از تئوری تاثیر جداگانه هر کدام از اجزای افقی، قائم و قطری روسازی بر روی مقاومت لغزشی، کاملاً تکرارپذیر بوده و از لحظه برداشت تصویر سطح روسازی تا دستیابی به شاخص مقاومت لغزشی نهایی روسازی، زمانی کمتر از یک دقیقه صرف می شود (جدول ۷).

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق یک سیستم جدید بر اساس پردازش تصویر و پایگاه دانش به منظور تحلیل وضعیت لغزشی روسازی پیاده سازی و امکانسنجی شد، که نتایج حاصل از آن نشان می دهد، می توان با انعطاف پذیری بیشتری وضعیت بافت روسازی را تحلیل کرد. آزمایش پاندول بریتانیایی که یکی از روش های سنتی تعیین مقاومت لغزشی روسازی است، علاوه بر اینکه به افراد متخصص برای انجام آزمایش نیاز دارد، در مرحله آزمایش نیز زمان و انرژی قابل توجهی از کاربر می گیرد. نحوه کار این دستگاه به گونه ای است که در هر برداشت پاندول با سطح بسیار کوچکی از روسازی تماس پیدا می کند که به این ترتیب می توان گفت برداشت های دستگاه مذکور به صورت نقطه های است. از سوی دیگر در صورت



شکل ۱۴: فلوچارت ساختار نهایی سیستم تعیین مقاومت لغزشی روسازی

Fig.14. The final structure Flow chart of the pavement skid resistance determination expert system

جدول ۷: مقایسه زمان مورد نیاز برای تعیین مقاومت لغزشی یک سطح در سیستم پیشنهادی و آزمایش پاندول بریتانیایی

Table 7. Comparison of the time required to determine the slip resistance of a surface in the proposed system and British pendulum test

روش آزمایش	زمان مورد نیاز (بر حسب دقیقه)		کل زمان مورد نیاز برای تعیین مقاومت لغزشی یک سطح (بر حسب دقیقه)
	برداشت میدانی	تحلیل نرم‌افزاری-محاسبات عددی	
پاندول بریتانیایی	۱۰×۵=۵۰	۱۰	۶۰
سیستم پیشنهادی	۰.۵	۰.۵	۱

concrete mixes, *Building and Environment*, 42(1) (2007) 325-329.

- [7] G. Flintsch, E. de León, K. McGhee, I. Al-Qadi, Pavement surface macrotexture measurement and applications, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1860) (2003) 168-177.
- [8] M. Khasawneh, R.Y. Liang, Temperature Effect on Frictional Properties of HMA at Different Polishing Stages, *Jordan Journal of Civil Engineering*, 6(1) (2012) 39-53.
- [9] 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.
- [10] E. Masad, A. Luce, E. Mahmoud, A. Chowdhury, Relationship of Aggregate Texture to Asphalt Pavement Skid Resistance Using Image Analysis of Aggregate Shape, Final Report for Highway IDEA Project, 114 (2007).
- [11] A. Dunford, A. Ruff, R. Whiteoak, Measuring skid resistance without contact: 2007-2008 progress report, *TRL Published Project Report*, (2008).
- [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] C. Huang, Texture characteristics of unpolished and polished aggregate surfaces, *Tribology International*, 43(1) (2010) 188-196.
- [14] 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) 682-694.
- [15] S.P. Hadiwardoyo, E.S. Sinaga, H. Fikri, The influence of Buton asphalt additive on skid resistance based on penetration index and temperature, *Construction and Building Materials*, 42 (2013) 5-10.

علاوه بر این در این سیستم هم در قسمت سخت‌افزار و هم در قسمت نرم‌افزار نیاز به افراد متخصص نبوده و رابط کاربر آن اطلاعات کافی را در اختیار کاربران قرار می‌دهد در نهایت می‌توان گفت سیستم تعیین مقاومت لغزشی روسازی با یک راهکار ابتکاری در زمینه روند تحلیل تصاویر بافت روسازی، قادر است در همین مراحل اولیه توسعه، بافت روسازی را درک کرده و شاخص مقاومت لغزشی قابل قبولی ( $R_{2}=0.6$ ) به منظور بررسی وضعیت لغزشی روسازی ارائه کند. در ادامه مراحل توسعه سیستم پیشنهادی می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف هوش مصنوعی در مرحله مدل‌سازی و همچنین توسعه پایگاه داده و نیز ارائه ضرائب کالیبره جدیدی که تاثیر شرایط آبهوایی، نوع روسازی، دانه‌بندی، نوع قیر مصرفی و مصالح روسازی، حجم ترافیک عبوری و غیره را بر شاخص نهایی اعمال کند، نتایج حاصل را بهبود بخشید.

## مراجع

- [1] E. Masad, A. Rezaei, A. Chowdhury, P. Harris, Predicting asphalt mixture skid resistance based on aggregate characteristics, Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration, (2009).
- [2] 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.
- [3] S.M. Oh, S.M. Madanat, D.R. Ragland, C.-Y. Chan, Evaluation of traffic and environment effects on skid resistance in California, *Safe Transportation Research & Education Center*, (2010).
- [4] J. Hall, K. Smith, L. Titus-Glover, J. Wambold, T. Yager, Z. Rado, Guide for pavement friction, 1st edn, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies, USA, (2009).
- [5] P. Buddhavarapu, A. Banerjee, J.A. Prozzi, Influence of pavement condition on horizontal curve safety, *Accident Analysis & Prevention*, 52 (2013) 9-18.
- [6] I.M. Asi, Evaluating skid resistance of different asphalt

- [26] N. Ismail, A. Ismail, R. Atiq, An overview of expert systems in pavement management, *European Journal of Scientific Research*, 30(1) (2009) 99-111.
- [27] S.M. Kiya, digital image processing in MATLAB, khadamat nashr kiyan rayaneye sabz, 2009. (in Persian)
- [28] F.M. Nejad, H. Zakeri, An expert system based on wavelet transform and radon neural network for pavement distress classification, *Expert Systems with Applications*, 38(6) (2011) 7088-7101.
- [29] N. Karimi, automatic skid resistance measurement system based on image processing, MSC, amirkabir university of technology, 2011. (in Persian)
- [30] F.M. Nejad, H. Zakeri, An optimum feature extraction method based on wavelet–radon transform and dynamic neural network for pavement distress classification, *Expert Systems with Applications*, 38(8) (2011) 9442-9460.
- [31] F.M. Nejad, H. Zakeri, A comparison of multi-resolution methods for detection and isolation of pavement distress, *Expert Systems with Applications*, 38(3) (2011) 2857-2872.
- [32] A.M. Atto, Y. Berthoumieu, P. Bolon, 2-D wavelet packet spectrum for texture analysis, *IEEE Transactions on Image Processing*, 22(6) (2013) 2495-2500.
- [33] F.M. Nejad, H. Zakeri, The hybrid method and its application to smart pavement management, Metaheuristics in Water, *Geotechnical and Transport Engineering*, Elsevier, Waltham, (2012) 439-484.
- [34] A.W. Busch, Wavelet transform for texture analysis with application to document analysis, *Queensland University of Technology*, 2004.
- [35] E. Avci, An expert system based on Wavelet Neural Network-Adaptive Norm Entropy for scale invariant texture classification, *Expert Systems with Applications*, 32(3) (2007) 919-926.
- [36] M. Virvou, K. Kabassi, Evaluating an intelligent graphical user interface by comparison with human experts, *Knowledge-Based Systems*, 17(1) (2004) 31-37.
- [37] F. Mustakim, Treating Hazardous Locations at Federal Route 50, *Universiti Teknologi Malaysia*, 2005.
- [16] B. Pidwerbesky, J. Waters, D. Gransberg, R. Stemprok, Road surface texture measurement using digital image processing and information theory, *Land Transport New Zealand Research Report*, 290 (2006) 65-79.
- [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 Macrotecture Measurements: Stereo Vision Approach, in: *Transportation Research Board 88th Annual Meeting*, 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, in: *Transportation Research Board 89th Annual Meeting*, 2010.
- [20] R. Elunai, V. Chandran, E. Gallagher, Asphalt concrete surfaces macrotecture determination from still images, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(3) (2011) 857-869.
- [21] T. Al-Rousan, E. Masad, E. Tutumluer, T. Pan, Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics, *Construction and Building Materials*, 21(5) (2007) 978-990.
- [22] 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 transport research*, ARRB Group Ltd., 2010, pp. 1-5.
- [23] H. Zakeri, An expert system for pavement distress classification, MSC, *amirkabir university of technology*, 2008. (in Persian)
- [24] C.T. Hendrickson, B. Janson, Expert systems and pavement management, in: *Proceedings, 2nd North American Conference on Managing Pavements*, Toronto, 1987, pp. 2.255-252.266.
- [25] S.-H. Liao, Expert system methodologies and applications—a decade review from 1995 to 2004, *Expert systems with applications*, 28(1) (2005) 93-103.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

F. Moghadas Nejad, N. Karimi, H. Zakeri, "Providing a new criterion to evaluate the skid resistance of asphalt pavement". *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(2) (2017) 389-402.

DOI:10.22060/ceej.2016.591

