

ارائه روش جدید ارزیابی سه‌بعدی بافت روسازی آسفالتی

بهروز مطاعی^۱، فریدون مقدس نژاد^{۱*}، حمزه ذاکری^۱

۱- دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: moghadas@aut.ac.ir

چکیده

عمق بافت سطحی شاخصی مهم جهت ارزیابی قابلیت‌های مقاومت لغزشی و زهکشی سطحی روسازی آسفالتی به شمار می‌آید که تأثیری مستقیم در تأمین ایمنی و راحتی کاربران راه‌ها دارد. ارزیابی بافت یکی از اهداف اصلی سیستم مدیریت روسازی است. در این مقاله، یک دستگاه خودکار سه‌بعدی مبتنی بر تکنیک تصویربرداری ترکیبی برای اندازه‌گیری بافت روسازی ارائه شده است. در این دستگاه یک سیستم متشکل از دوربین‌های دیجیتال دویبعدی جهت تهیه داده‌های تصویری موردنیاز طراحی شده است. سیستم ارائه شده دارای یک ابزار کاهش اصطکاک سطحی است که شرایط زهکشی سطحی را در انواع روسازی شبیه‌سازی می‌کند. این سیستم ارزیابی بافت را در شرایط بارندگی نیز امکان‌پذیر می‌کند. بر اساس تصاویر دویبعدی برداشت شده از سطح روسازی مدل‌های ابر نقطه سه‌بعدی بافت روسازی با استفاده از تکنیک ساختار از حرکت ارائه شده است. روشی جهت محاسبه شاخص میانگین عمق بافت روسازی بر اساس مدل‌های سه‌بعدی تولید شده ارائه شده است. اندازه‌گیری عمق بافت روسازی به صورت صفحه‌ای در جهات مختلف از قابلیت‌های این روش است که ارزیابی یکنواخت عمق بافت در جهات مختلف و دستیابی به عمق بافت بحرانی زهکشی را امکان‌پذیر می‌کند. سیستم ارائه شده جهت اندازه‌گیری عمق بافت در مقاطع مختلف روسازی مورد استفاده قرار گرفته است و مقادیر به دست آمده توسط آن با نتایج روش استاندارد ماسه مقایسه شده است که نشان‌دهنده همبستگی بالای نتایج این دو روش ارزیابی بافت روسازی است ($R^2=93\%$) نتایج این تحقیق می‌تواند به ارائه یک روش جدید و کم‌هزینه برای ارزیابی اصطکاک و ایمنی روسازی در سیستم‌های مدیریت شبکه روسازی منتج شود.

کلمات کلیدی

عمق بافت روسازی، ارزیابی کم‌هزینه، مدل‌سازی سه‌بعدی، زهکشی، مدیریت روسازی.

بافت روسازی عامل اصلی مؤثر بر اصطکاک سطحی راه است. شرایط اصطکاک سطحی روسازی یکی از مهم‌ترین پارامترهای معرف ایمنی روسازی و احتمال وقوع حادثه است. به همین دلیل ارزیابی دقیق ویژگی‌های بافت روسازی یکی از اهداف اصلی سیستم‌های مدیریت روسازی است [۲ و ۱]. بافت سه‌بعدی روسازی در دودسته میکرو و ماکرو قابل‌بررسی است. بافت ماکرو^۱ (بافت درشت) با ارتفاع ۰/۵ mm تا ۵۰ mm، در مؤلفه پس‌افت^۲ اصطکاک مؤثر است. بافت درشت همچنین با تسهیل زهکشی سطحی روسازی به بهبود مقاومت در برابر لغزش در شرایط بارندگی کمک می‌کند. بافت میکرو (ریزبافت) با ارتفاع ۱ μm تا ۰/۵ mm عامل اصلی تأثیرگذار بر اصطکاک در رانندگی با سرعت کم است. این جزء باعث افزایش سطح تماس تایر و جاده می‌شود. اندازه‌گیری مشخصات بافت روسازی، ارزیابی غیرمستقیم سایر مشخصات روسازی را ممکن می‌کند. آلودگی صوتی ناشی از عبور وسایل نقلیه از روسازی به‌عنوان یکی از مشکلات زیست‌محیطی با ارزیابی دقیق بافت روسازی قابل‌بررسی است [۳]. بافت ناپیوسته و غیریکنواخت ممکن است نشان‌دهنده وجود عیوب مانند ترک‌خوردگی یا جدایش سنگ‌دانه‌ها^۳ در روسازی باشد. همچنین وجود سطوح صاف مقطعی بر روی بافت روسازی ممکن است نشان‌دهنده وقوع قیر زدگی باشد که با ارزیابی دقیق بافت کاملاً قابل‌تشخیص است [۴ و ۵]. بافت روسازی یک عامل اصلی در زهکشی آب‌های سطحی نیز هست که تأثیر زیادی بر پتانسیل وقوع پراش آب^۴ دارد [۶].

شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی وضعیت بافت روسازی معرفی شده‌اند. شاخص میانگین عمق بافت (MTD^۵) معروف‌ترین شاخص برای توصیف بافت درشت است که عمدتاً از طریق روش استاندارد ماسه محاسبه می‌شود [۷]. روش‌های مرسوم ارزیابی بافت که برای سال‌های متمادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، محدودیت‌هایی در اندازه‌گیری دارند. این محدودیت‌ها در سال‌های اخیر با معرفی روش‌های جدیدی که از آخرین فناوری‌های ارائه شده استفاده می‌کنند، پوشش داده شده است. یکی از این روش‌ها پردازش تصویر است. از جنبه‌های مختلف این روش در ارزیابی مشخصات روسازی استفاده شده است. اندازه‌گیری دقیق جزئیات بافت روسازی مانند مساحت، تعداد، فواصل، توزیع، یکنواختی و ده‌ها اطلاعات دیگر با کمترین هزینه از مزیت‌های این روش‌ها نسبت به روش‌های سنتی هستند. در سال‌های اخیر هدف محققان افزایش کارایی و دقت ارزیابی و ارائه روش‌های خلاقانه و کم‌هزینه برای ارزیابی مشخصات مختلف روسازی بوده است. روش‌های نوین ارزیابی غالباً بر اساس مدل‌سازی سه‌بعدی استوار هستند. مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی ویژگی‌های روسازی بر اساس داده‌های سه‌بعدی روسازی انجام شده است [۹ و ۸]. اسکنر بافت لیزری (LTS^۶) ابزار دیگری برای اندازه‌گیری سه‌بعدی سطح است. نتایج به‌کارگیری این تجهیزات با تکنیک‌های آنالیز طیف در استخراج سطح و توزیع بافت در تحقیق ارائه‌شده توسط دونگ و همکاران، قابل‌قبول گزارش شده است [۱۰]. حسگرها و دوربین‌های لیزری ابزارهای اصلی تصویربرداری سه‌بعدی هستند که دقت آنها در اندازه‌گیری جزئیات بافت روسازی ثابت شده است [۱۱ و ۱۲].

روش‌های دوبعدی شاخص‌های دوبعدی و روش‌های سه‌بعدی شاخص‌های سه‌بعدی را ارائه می‌دهند. از آنجایی که هدف اصلی اندازه‌گیری بافت، ارزیابی سطح معینی از روسازی با بالاترین دقت ممکن است، شاخص‌های سه‌بعدی معیار بهتری برای ارزیابی روسازی هستند. یکی از چالش‌های جدی در استفاده از روش‌های ارزیابی سه‌بعدی، دسترسی به ابزارهای اندازه‌گیری متناسب با اهداف تحقیقاتی موردنظر است. در برخی از مطالعات، ابزارهای اندازه‌گیری بافت باید با ابزارهای دیگر ترکیب شوند تا به هدف خود دست یابند و کل داده‌های موردنیاز را فراهم کنند. دردسترس بودن و هزینه کم روش مورد استفاده نیز بسیار مهم است. باتوجه‌به روش ارائه شده در [۱۳] می‌توان داده‌های سه‌بعدی مناسب را از بافت سطحی روسازی استخراج کرد.

تکنیک ساختار از حرکت (SfM) یکی از روش‌های مدل‌سازی سه‌بعدی هر سطح، جسم یا ناحیه موردنظر است. در این روش مدل‌سازی سه‌بعدی بر اساس تصاویر دوبعدی برداشت شده از زوایا یا موقعیت‌های مختلف استوار است. SfM با استفاده از مجموعه‌ای

¹ Macrotecture

² Hysteresis

³ Segregation

⁴ Hydroplaning

⁵ Mean Texture Depth

⁶ Laser texture scanner

از الگوریتم‌ها برای تشخیص ویژگی‌های معین در تصاویر و اتصال آنها با مقایسه تصاویر مختلف، مدل‌های سه‌بعدی را می‌سازد. پس از شناسایی ویژگی‌های مختلف در تصاویر، اندازه، شکل و موقعیت ویژگی‌های شناسایی شده توسط تکنیک‌های فتوگرامتری تعیین می‌شود. در نهایت، مدل‌های چندوجهی با محاسبه جهت‌های نسبی تصاویر و مختصات سه‌بعدی نقاط بازسازی می‌شوند [۱۶-۱۴]. اصول مدل‌سازی سه‌بعدی را می‌توان در قالب دو جزء اساسی توضیح داد: جستجوی نقاط موردنظر و بازسازی تدریجی. استخراج ویژگی، تطبیق ویژگی و اصلاح هندسی سه مرحله از مرحله جستجوی نقاط موردنظر است. خروجی این مرحله روابط بین تصاویر اصلاح شده هندسی است. فاز دوم SfM از محاسبه موقعیت تصاویر و ساخت مدل ابر نقطه سه‌بعدی تشکیل شده است. مراحل این فاز انتخاب جفت تصاویر^۱، ثبت تصاویر، مثلث‌بندی^۲ و تنظیم دسته‌ای^۳ است.

در اصل، سطح روسازی از چندین نما با مجموعه‌ای از دوربین‌های دیجیتال تصویربرداری می‌شود. لازم است سطح بالایی از همپوشانی بین تصاویر در نظر گرفته شود. الگوریتم تبدیل ویژگی ثابت مقیاس (SIFT^۴) برای شناسایی ویژگی‌های مشترک در تصاویر استفاده می‌شود [۱۷]. ویژگی‌های شناسایی شده استخراج شده و در همه تصاویر مطابقت داده می‌شوند تا موقعیت‌های اولیه دوربین و مختصات جزئیات تصویر برآورد شود. این مختصات به طور مکرر با استفاده از کمینه‌سازی حداقل مربعات غیرخطی پالایش می‌شوند. الگوریتم اجماع نمونه تصادفی (RANSAC^۵) برای تطبیق ویژگی استفاده می‌شود [۱۸]. پارامترهای دوربین، موقعیت‌های نسبی دوربین و هندسه صحنه با تنظیم دسته‌ای تخمین زده می‌شوند. نتیجه این فرایند، مکان‌یابی مشخصه‌های بافت به شکل ابر نقطه‌ای پراکنده در یک سیستم مختصات سه‌بعدی است.

شاخص میانگین عمق بافت روسازی یکی از پرکاربردترین شاخص‌های سه‌بعدی است که عمدتاً برای توصیف زبری بافت استفاده می‌شود [۷]. این شاخص به طور سنتی با تقسیم حجم مقدار معینی ماسه یا هر ماده دیگری با دانه‌بندی یکنواخت بر مساحت توزیع آن در یک مساحت دایره‌ای بر روی سطح روسازی تعیین می‌شود. آزمایش ماسه روش اصلی محاسبه MTD است [۱۹].

باهداف دستیابی به روشی جهت ارزیابی خودکار بافت روسازی بادقت بالا، در این مقاله یک سیستم خودکار سه‌بعدی برای اندازه‌گیری بافت روسازی ارائه شده است. در ابتدا، دستگاهی متشکل از یک سیستم جمع‌آوری تصویر با ترکیبی از دوربین‌های دوبعدی ارائه شده است. یک سیستم نوآورانه کاهش اصطکاک سطحی طراحی شده است که امکان ارزیابی بافت را در حضور سطوح مختلف آب روی روسازی ارائه می‌دهد. سپس مدل‌های ابر نقطه سه‌بعدی بافت روسازی بر اساس روش ساختار از حرکت (SfM) به دست می‌آیند. عمق بافت روسازی بر اساس ویژگی‌های مورفولوژیکی سه‌بعدی بافت استخراج می‌شوند. در نهایت با استفاده از توانایی ایجاد شرایط بارندگی، روشی برای ارزیابی بافت روسازی ارائه می‌شود. نوآوری این تحقیق در ارائه یک سیستم جدید و کم‌هزینه برای محاسبه شاخص‌های سه‌بعدی روسازی در شرایط خشک و بارانی است. سیستم پیشنهادی با استفاده از سیستم نورپردازی خاص و ایجاد محیطی با نور یکنواخت مشکل تغییرات روشنایی و ایجاد سایه در اندازه‌گیری دوبعدی که منجر به ایجاد حفره در مدل سه‌بعدی می‌شود را حل می‌کند. روش جدیدی برای محاسبه MTD در سه بعد پیشنهاد شده است. امکان ارزیابی خودکار مشخصات سطح در شرایط وجود آب و هر مایع آلوده‌کننده دیگر از دیگر نوآوری‌های این تحقیق است.

۲- اجزای سیستم داده‌برداری

یکی از اهداف اصلی این مقاله ارائه یک سیستم خودکار، دقیق، سریع و کم‌هزینه برای ثبت جزئیات بافت سطح روسازی است. در این کار، یک دستگاه برداشت داده برای ارائه تصاویر موردنیاز برای تجزیه و تحلیل بیشتر ارائه شده است. در این بخش اجزای دستگاه ساخته شده ارائه می‌شود.

¹ Image pair selection

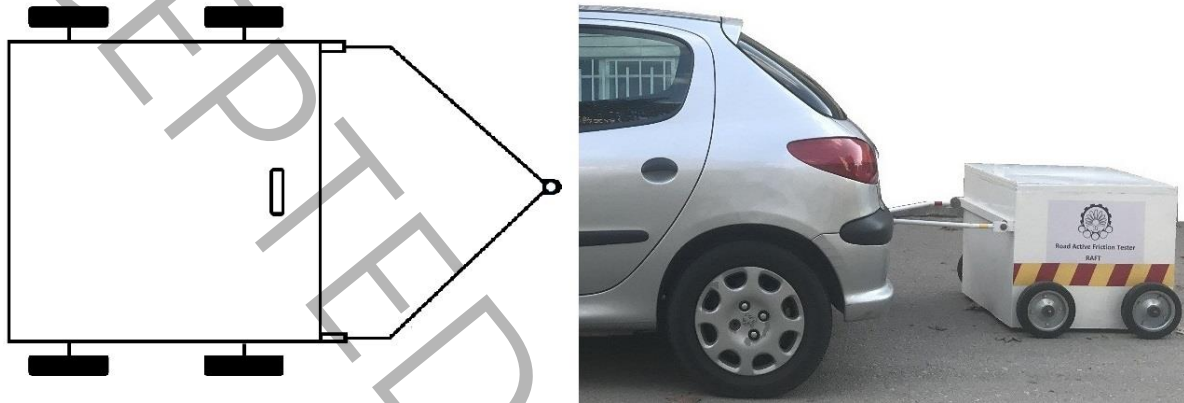
² Triangulation

³ Bundle adjustment

⁴ Scale Invariant Feature Transform

⁵ Random Sample Consensus

چارچوب این دستگاه از دو قسمت داخلی و خارجی تشکیل شده است. قسمت خارجی این امکان را فراهم می‌کند تا فرایند تصویربرداری تحت تأثیر شرایط محیطی قرار نگیرد. این چارچوب همچنین امکان اتصال کل سیستم به وسیله نقلیه را برای انجام برداشت‌های میدانی فراهم می‌کند. قسمت داخلی دستگاه مربوط به سیستم برداشت داده است که با کمک امکانات تأمین روشنایی فضایی عاری از تأثیر عوامل خارجی را فراهم کرده است. در فرایند تصویربرداری، زاویه نور ممکن است عمود بر سطح نباشد. در این شرایط سنگ‌دانه‌های بالاتر روی سطح روسازی سایه می‌اندازند. این مشکل منجر به ایجاد حفره‌هایی در مدل‌های سه‌بعدی می‌شود. سیستم روشنایی برای ایجاد نور یکنواخت در محیط تصویربرداری و جلوگیری از ایجاد سایه بر روی سطح نصب شده است. شکل ۱ دستگاه جمع‌آوری داده‌های تصویری سه‌بعدی بافت روسازی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: دستگاه برداشت داده‌های تصویری سه‌بعدی بافت روسازی

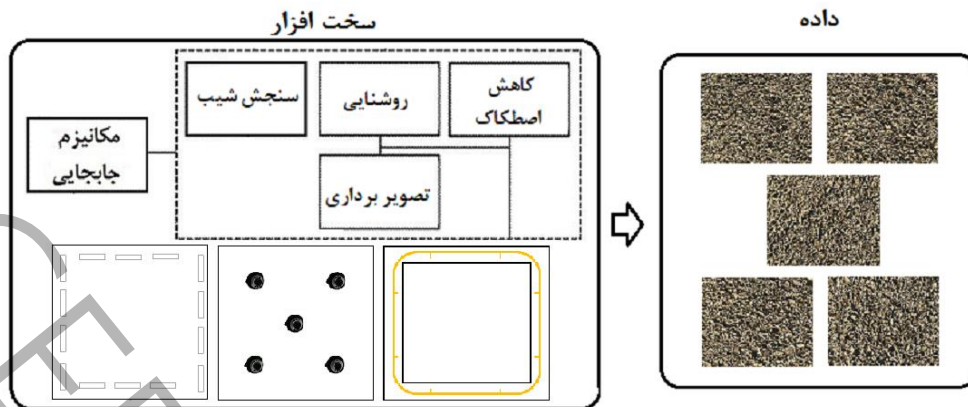
Figure1: Pavement texture 3D image acquisition device

۲-۱- سیستم کاهنده اصطکاک سطحی

این سیستم برای شبیه‌سازی فرایند کاهش اصطکاک روسازی ارائه شده است. این کار با پاشش مایع روی سطح روسازی با شدت‌های مختلف انجام می‌شود که می‌تواند سطوح مختلف کاهش اصطکاک سطح روسازی را شبیه‌سازی کند. مایع می‌تواند از هر نوع باشد (آب، روغن یا هر نوع آلاینده دیگری).

۲-۲- سیستم داده‌برداری تصویری

این قسمت شامل ۵ دوربین با قابلیت تصویربرداری دوبعدی است که در فواصل یکسان در فضایی به وسعت 2500 cm^2 نصب شده‌اند. همپوشانی ۶۰٪ روبه‌جلو و ۳۰٪ به‌صورت جانبی در جای‌گذاری دوربین‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین این بخش قابلیت اندازه‌گیری شیب عرضی و طولی روسازی را به‌عنوان عاملی مؤثر در زهکشی و اصطکاک سطحی دارد. خروجی این بخش پنج تصویر دوبعدی است که توسط دوربین‌های تعبیه شده برداشت شده‌اند. شکل ۲ اجزا سیستم جمع‌آوری داده‌های تصویری بافت روسازی و خروجی آن را نشان می‌دهد. به‌منظور جلوگیری از تأثیر دمای محیط در نتایج ارزیابی، داده‌برداری انجام شده در این تحقیق در محدوده دمایی ۱۸ تا ۲۳ درجه انجام شده است. همچنین در این پژوهش از روشی استفاده شده که مدل‌های سه‌بعدی را به‌صورت ابرنقاط بازسازی می‌کند. در صورت وجود شرایط نامطلوب در تصاویر، مدل ایجاد شده از نقاط کمتری تشکیل شده و در نتیجه جزئیات بافت بادقت بالایی بازسازی نشده و در تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند؛ بنابراین با انجام داده‌برداری‌های مختلف و ساخت مدل سه‌بعدی، بهترین حالت تصویربرداری از نظر روشنایی، موقعیت و زاویه تصویربرداری به‌دست‌آمده و در سیستم داده‌برداری لحاظ شده است تا مدل‌سازی با کمترین خطا انجام شود.



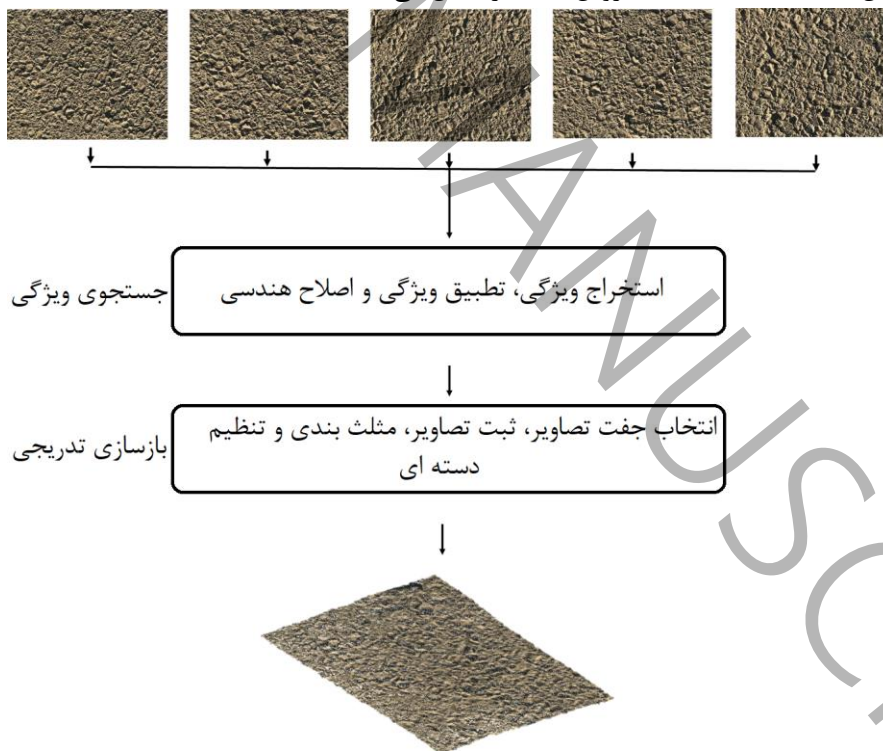
شکل ۲: اجزا و خروجی سیستم برداشت داده‌های تصویری بافت روسازی

Figure2 : Components of pavement texture image acquisition device

۳- ارزیابی مشخصات بافت سطحی روسازی

۳-۱- مدل سازی سه بعدی بافت

در این تحقیق از SfM برای تبدیل تصاویر دوبعدی به مدل‌های سه بعدی با دقت بالا استفاده می‌شود. این روش با داده‌های تصویری به دست آمده از سیستم جمع‌آوری داده ارائه شده در این مقاله سازگار است. شکل ۳ تصاویر دوبعدی به دست آمده توسط دستگاه ارائه شده و مدل سه بعدی ساخته شده با روش SfM را نشان می‌دهد.



شکل ۳: روند دستیابی به مدل سه بعدی

Figure3: The process of 3D model reconstruction

۳-۲- استخراج شاخص سه بعدی

داده‌های سه بعدی مبتنی بر ابر نقطه امکان اندازه‌گیری شاخص‌های ارزیابی بافت روسازی را با دقت بالا فراهم کرده‌اند. در این بخش شاخص عمق بافت روسازی به صورت صفحه‌ای و جهتی محاسبه شده است.

۳-۲-۱- عمق بافت روسازی

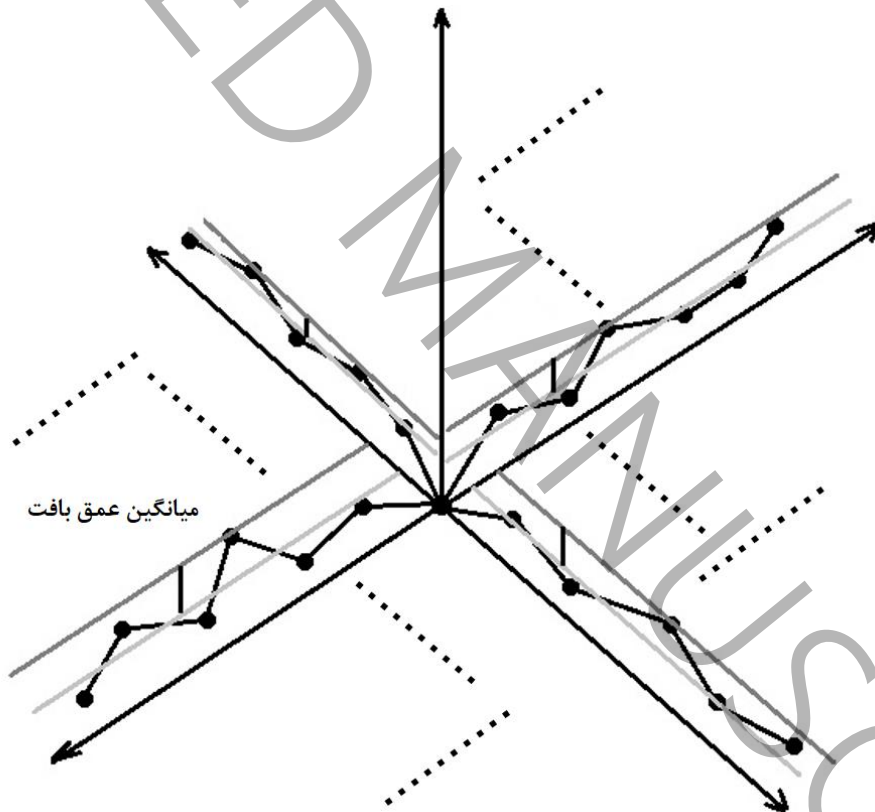
روش محاسبه این شاخص در رابطه (۱) ارائه شده و در شکل ۴ به طور شماتیک نشان داده شده است. در این روش مطابق با ماهیت شاخص عمق بافت روسازی که از تقسیم حجم بر سطح ماده پخش شده بر سطح روسازی محاسبه می‌شود. حجم روسازی فضای سه بعدی پایین‌تر از بلندترین نقطه در ابر نقطه و مساحت آن برابر با تعداد نقطه‌های موجود در ناحیه موردنظر در نظر گرفته می‌شود و از تقسیم آنها شاخص موردنظر محاسبه می‌شود.

$$D(p) = \text{Max}(z) - z(p)$$

$$\text{Vol} = \sum_{p=1}^N D(p) \quad (1)$$

$$\text{MTD} = \frac{\text{Vol}}{A}$$

که در آن p هر نقطه، z ارتفاع، D عمق، Vol حجم و A مساحت ناحیه موردنظر در روی سطح روسازی است.



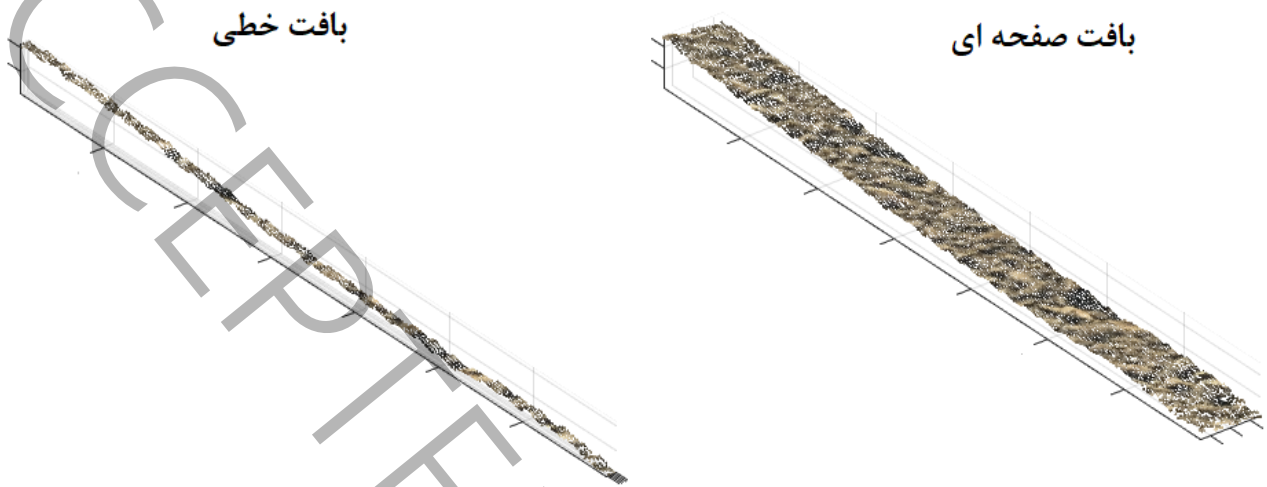
شکل ۴: محاسبه شاخص میانگین عمق بافت روسازی

Figure4: Calculation of pavement mean texture depth

۳-۲-۲- عمق بافت جهتی

اندازه‌گیری جهتی مشخصه‌های بافت اهمیت زیادی در ارائه مناسب‌ترین معیارها برای ارزیابی وضعیت بافت و تأثیر آن در مشخصه‌هایی مانند اصطکاک و زهکشی سطحی دارد. عمق بافت شاخص مهمی در ارزیابی قابلیت زهکشی سطحی روسازی به شمار می‌آید. ارزیابی این شاخص در راستاهای مختلف در سطح روسازی می‌تواند معیاری از وضعیت زهکشی روسازی ارائه بدهد.

سیستم ارائه شده توانایی استخراج جهتی مشخصات بافت سطحی روسازی را دارد. این مشخصات می‌تواند به صورت خطی و صفحه‌ای را دارد. شکل ۵ استخراج بافت روسازی به صورت خطی و صفحه‌ای را در چهار جهت ۰، ۳۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نشان می‌دهد. با محاسبه شاخص‌ها در جهت‌های مختلف می‌توان راستای بحرانی اصطکاک را در سطح روسازی استخراج کرد.



شکل ۵: استخراج بافت خطی و صفحه ای جهتی روسازی

Figure5: Extraction of linear and planar directional pavement texture

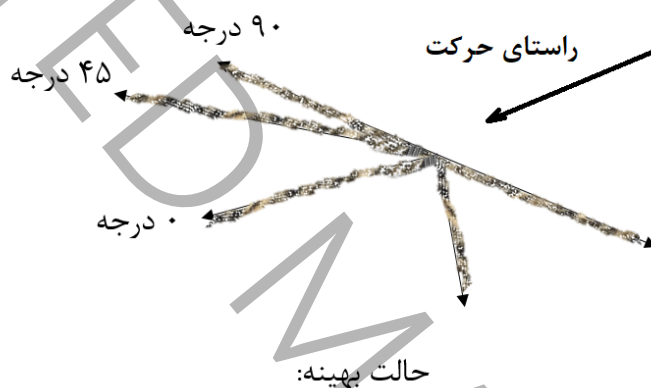
۴- نتایج و بحث

ارزیابی بافت روسازی در حالات مختلف آن بیانگر تأثیرات بافت در مشخصه‌های مختلف بافت سطحی است. در این تحقیق روشی جهت اندازه‌گیری شاخص عمق بافت روسازی به صورت صفحه‌ای سه‌بعدی ارائه شد. این شاخص مهم‌ترین معیار ارزیابی تأثیر بافت در اصطکاک و زهکشی سطحی است. محاسبه این شاخص می‌تواند برای کل سطح موردنظر از روسازی یا بخشی از آن صورت گیرد که هر کدام می‌توانند معیاری جداگانه و منحصر به فرد محسوب شوند. این سیستم توانایی ارزیابی جهتی خطی و صفحه‌ای را نیز دارد. در حالت خطی شاخص عمق بافت روسازی معیاری از قابلیت اصطکاک سطحی روسازی است. دلیل این ادعا از این جهت است که این شاخص بیانگر چگونگی قرار گرفتن سنگ‌دانه‌ها در کنار یکدیگر است که بر مؤلفه‌های پس‌افت^۱ و چسبندگی^۲ اصطکاک تأثیرگذار است. در صورتی که بافت جهتی به صورت صفحه‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد معیاری از قابلیت زهکشی را ارائه می‌دهد. عمق بافت جهتی بیشتر در هر جهت بیانگر وجود کانال‌های تخلیه آب در بین سنگ‌دانه‌ها در آن جهت خاص است؛ بنابراین می‌توان با بررسی این جهت موردنظر در راستای شیب عرضی و خروج آب از سطح جاده قرار گرفته است یا خیر، معیاری جهت ارزیابی زهکشی سطحی روسازی ارائه داد. جدول ۱ انواع مختلف شاخص‌های ارائه شده و مشخصه مورد ارزیابی مرتبط با آن‌ها را نشان می‌دهد. در این جدول با توجه به موارد مورد بحث در این بخش، به طور خلاصه چگونگی ارزیابی مشخصات سطحی بافت روسازی توسط شاخص‌های پیشنهاد شده ارائه شده است. شکل ۶ کاربرد روش ارائه شده در ارزیابی اصطکاک سطحی روسازی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود راستای بحرانی اصطکاک با اندازه‌گیری عمق بافت جهتی روسازی در راستاهای مختلف می‌تواند معیاری از مقاومت لغزشی روسازی ارائه دهد. در این حالت با محاسبه شاخص بحرانی، اگر این شاخص در راستای حرکت خودروها در خط عبوری راه‌ها باشد، ایمنی راه موردنظر از منظر مشخصات روسازی کمتر خواهد بود. زیرا در آن راستا عمق بافت روسازی کمتر بوده و در نتیجه نوع قرارگیری سنگ‌دانه‌ها پتانسیل مقاومت در برابر لغزش روسازی و مؤلفه‌های آن را تحت تأثیر قرار داده و اصطکاک روسازی کمتر خواهد بود. شکل ۷ واقعیت ذکر شده در مورد تأثیر عمق بافت بر مؤلفه‌های پس‌افت و چسبندگی بافت را نمایش می‌دهد. مؤلفه پس‌افت

¹ Hysteresis

² Adhesive

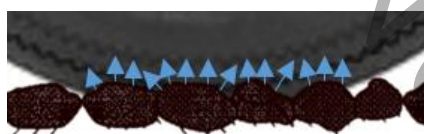
اصطکاک مربوط به پتانسیل مستهلک کردن انرژی لاستیک در حال حرکت توسط سنگ‌دانه‌های روسازی است. در این حالت سنگ‌دانه‌های هر نوع روسازی باعث تغییر شکل لاستیک‌های خودرو می‌شوند. بدیهی است که این تغییر حالت موقتی بوده و لاستیک سعی در حفظ حالت طبیعی خود دارد. در نتیجه پس از عبور از هر سنگ‌دانه روسازی، لاستیک دوباره به حالت قبلی خود بازمی‌گردد؛ اما این تغییر حالت‌ها موجب استهلاک انرژی چرخ می‌شود. هرچه این تغییر شکل بزرگ‌تر باشد تلاش لاستیک برای اندرکنش با سطح جهت حفظ ساختار خود بیشتر بوده و چسبندگی و اصطکاک بین لاستیک و سطح روسازی بیشتر خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود چگونگی قرارگیری سنگ‌دانه‌ها در مقدار و زاویه اندرکنش بین چرخ و سطح مؤثر است که این قرارگیری کاملاً متأثر از عمق بافت روسازی است. همچنین وجود ریزبافت مناسب در سطح روسازی موجب زبر شدگی بافت می‌شود که این زبری بافت عامل مهمی در تأمین اصطکاک سطحی روسازی خواهد بود. البته باتوجه به مدل‌سازی سه‌بعدی بادقت بالا توسط این روش امکان برداشت بافت ریز میسر بوده؛ اما این مؤلفه تأثیری بر عمق بافت روسازی ندارد. سیستم ارائه شده توانایی برداشت پیوسته راه را دارد که با استفاده از آن می‌توان راستای بحرانی را در طول مسیر برای یک شبکه راه برداشت کرد و معیاری از مناسب بودن یا نبودن بافت روسازی از منظر زهکشی و اصطکاک سطحی ارائه داد.



بیشترین عمق بافت در راستای حرکت (0 درجه)

شکل ۶: کاربرد روش ارائه شده در ارزیابی اصطکاک سطحی روسازی

Figure6: The application of the presented method in the evaluation of pavement surface friction

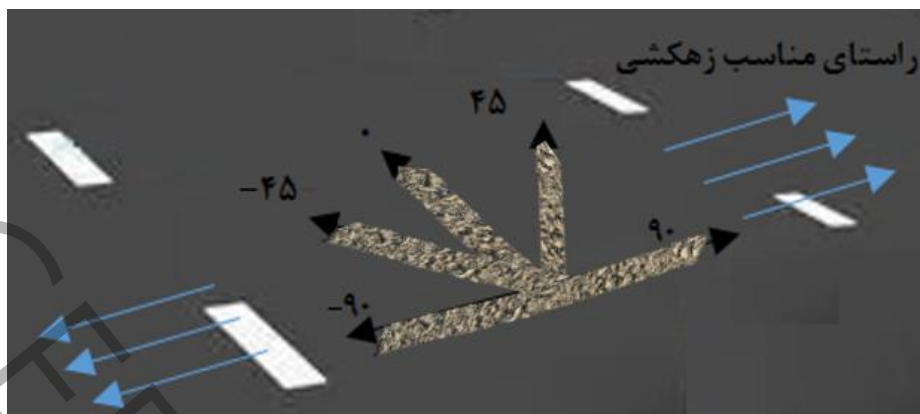


مؤلفه پسماند اصطکاک

شکل ۷: تأثیر عمق بافت روسازی در اصطکاک بین سطح روسازی و لاستیک خودرو

Figure7: Effect of pavement texture depth on friction between pavement surface and car tires

شکل ۸ کاربرد روش ارائه شده در ارزیابی زهکشی سطحی بافت روسازی را ارائه می‌دهد. در این حالت وجود عمق بافت بیشتر در هر جهت نشان‌دهنده وجود کانال‌های خروج آب در جهت عمود بر آن راستا و پتانسیل زهکشی بیشتر است. بدیهی است که این جهت بایستی در جهت خروج آب از سطح راه باشد و با بررسی جهت بحرانی زهکشی می‌توان معیاری از مناسب بودن شرایط آن برای مقاطع روسازی مورد مطالعه ارائه داد که در این سیستم با بهره‌گیری از روش استخراج جهتی بافت که در بخش‌های قبل توضیح داده شد قابلیت انجام آن وجود دارد.



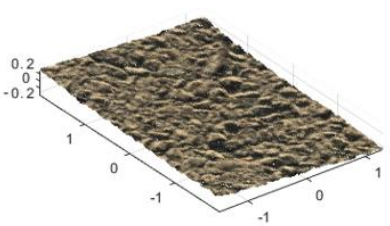
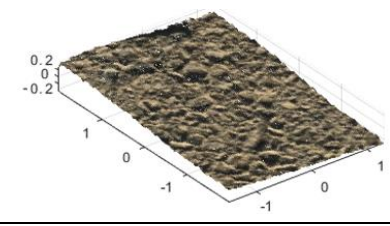
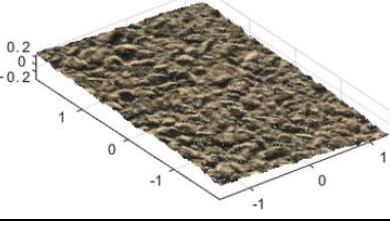
شکل ۸: کاربرد روش ارائه شده در ارزیابی زهکشی سطحی بافت روسازی

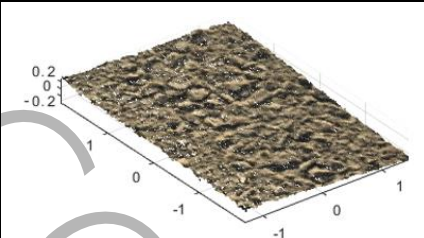
Figure8: The application of the presented method in evaluating pavement surface drainage

باتوجه به توضیحات ارائه شده جدول ۱ نمونه‌ای از بررسی انجام شده توسط سیستم ارائه شده در ۴ مقطع روسازی به صورت نمونه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مقطع دوم راستای صفر درجه میانگین عمق بافت بیشتری دارد. این موضوع نشان می‌دهد که اصطکاک در راستای حرکت وسیله نقلیه بیشتر خواهد بود. همچنین این موضوع نشان‌دهنده وجود کانال‌های آب در جهت عمود بر راستای حرکت و خروج آب از کناره روسازی است که این شرایط مناسبی از نظر زهکشی سطحی خواهد بود.

جدول ۱: نتایج روش ارائه شده در ارزیابی بافت جهت‌ی روسازی

Table1: The results of the presented method in pavement directional texture evaluation

تصویر مقطع روسازی	عمق بافت ۰ درجه	عمق بافت ۳۰ درجه	عمق بافت ۴۵ درجه	عمق بافت ۹۰ درجه
	۰/۳۲	۰/۳	۰/۲۹	۰/۳۷
	۰/۳۶	۰/۳	۰/۳۳	۰/۲۹
	۰/۳	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۳۵

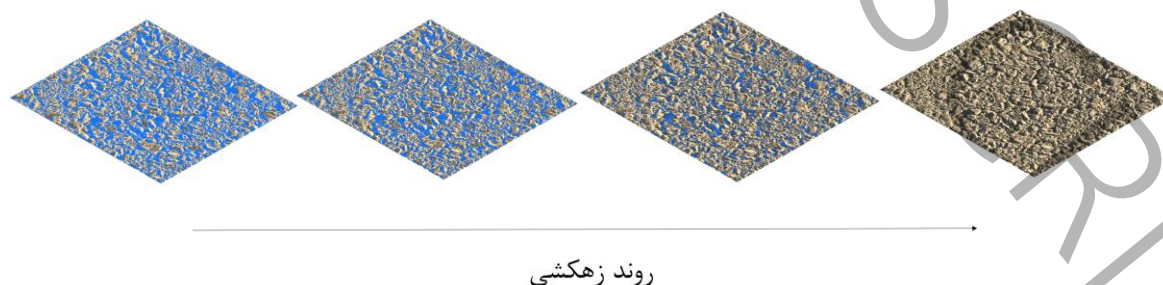
	۰/۲۹	۰/۳۲	۰/۳۵	۰/۳۳
---	------	------	------	------

ارزیابی بافت روسازی در شرایط بارانی معیاری برای سنجش ایمنی راه است. در این شرایط پتانسیل تصادف در بالاترین حد است. وجود آب اصطکاک سطح روسازی را کاهش می‌دهد. ارائه روش‌های مناسبی برای ارزیابی وضعیت کاهش اصطکاک در قالب شاخص‌های عددی اهمیت زیادی دارد. جدول ۲ شاخص‌های مختلف و مشخصه مورد ارزیابی آنها را نمایش می‌دهد. در سیستم ارائه شده در این کار، علاوه بر ارائه یک دستگاه منحصربه‌فرد جهت اندازه‌گیری بافت روسازی، یک سیستم کاهش اصطکاک نیز ارائه شده است. شکل ۹ روند کاهش سطح آب و افزایش اصطکاک روسازی را در یک بخش روسازی نشان می‌دهد که توسط دستگاه پیشنهادی گرفته شده است. وجود سطوح مختلف آب در روسازی تأثیر متغیری بر پتانسیل اصطکاک سطح روسازی دارد. با استفاده از سه شاخص توصیف شده، می‌توان یک اندازه‌گیری از پتانسیل اصطکاک روسازی در طی زهکشی آب سطحی ارائه کرد. در این راستا می‌توان یک روش ارزیابی بافت روسازی ارائه کرد. این روش مناطقی را که همچنان می‌توانند در ایجاد اصطکاک در هنگام بارندگی نقش داشته باشند، مشخص می‌کند. این رویکرد قسمت‌های متأثر از آب را حذف می‌کند و بافت را بر اساس شاخص‌های پیشنهادی ارزیابی می‌کند.

جدول ۲: شاخص‌ها و مشخصه مورد ارزیابی

Table2: Indicators and characteristic to be evaluated

شاخص	مشخصه مورد ارزیابی	توضیحات
میانگین عمق بافت	درشت‌بافت	با توجه با ماهیت اندازه‌گیری، این شاخص بیانگر درشت‌بافت روسازی است که در مؤلفه پس‌افت اصطکاک مؤثر است. بافت درشت با تسهیل زهکشی سطحی روسازی به بهبود مقاومت در برابر لغزش در شرایط بارندگی کمک می‌کند.
میانگین عمق بافت جهتی خطی	اصطکاک سطحی	تأثیر بر مؤلفه‌های پس‌افت اصطکاک سطحی
میانگین عمق بافت جهتی صفحه‌ای	زهکشی سطحی	بیانگر وجود کانال‌های تخلیه آب در بین سنگ‌دانه‌ها در جهت مورد ارزیابی



شکل ۹: برداشت وضعیت بافت در شرایط بارندگی

Figure9: Texture evaluation in rainy conditions

مقایسه بین شاخص‌های میانگین عمق روسازی به دست آمده توسط سیستم ارائه شده و اندازه‌گیری تجربی با روش استاندارد ماسه ارائه شده است. آزمایش ماسه بر روی ۷۰ مقطع روسازی انجام شده است. سیستم ارائه شده نیز برای اندازه‌گیری MTD روسازی در همان مقاطع مورد استفاده قرار گرفته است. رابطه نتایج دو روش با استفاده از رگرسیون خطی ساده بررسی شده است. مراحل محاسبه معادله خطی رگرسیون مطابق با رابطه (۲) است:

$$MTD(s) = b(0) + b(1)MTD(m)$$

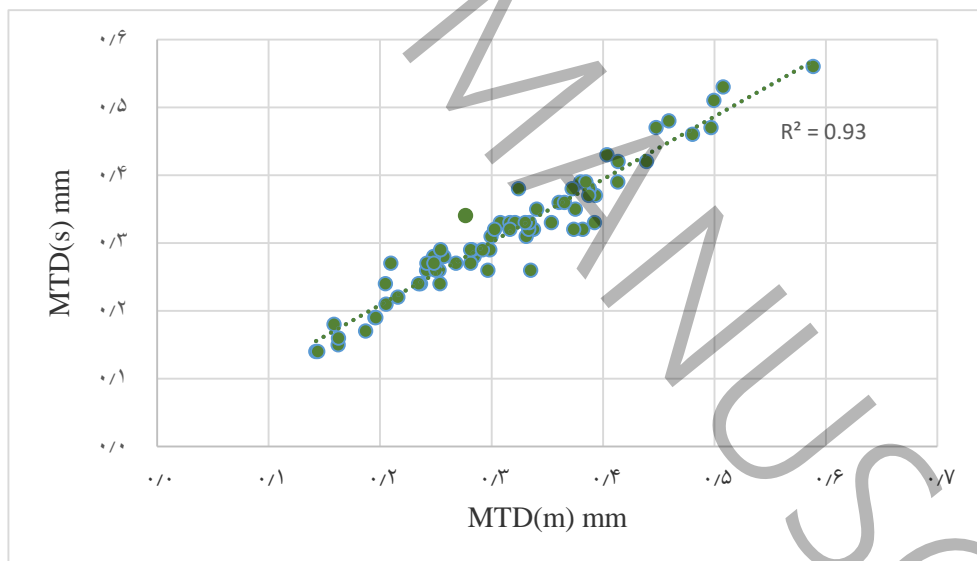
$$b(1) = \frac{\sum (MTD(m(i)) - \overline{MTD(m)})(MTD(s(i)) - \overline{MTD(s)})}{\sum (MTD(m(i)) - \overline{MTD(m)})^2} = 0.93$$

$$b(0) = \overline{y} - b(1)\overline{x} = 0.02$$

$$MTD(s) = 0.02 + 0.93MTD(m)$$

که در آن S و m به ترتیب بیانگر روش ماسه و سیستم پیشنهادی هستند.

شکل ۱۰ همبستگی نتایج اندازه‌گیری روش ارائه شده را با روش ماسه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج روش پیشنهادی همبستگی بالایی با نتایج روش ماسه که یک روش استاندارد است، دارد. جدول ۳ جزئیات نتایج دو روش و جدول ۴ و ۵ نتایج تست ANOVA رگرسیون و اطلاعات آماری ضرایب را ارائه می‌دهند. ضریب همبستگی (R) برابر ۰٫۹۶ است. این موضوع نشان می‌دهد که یک رابطه مستقیم بسیار قوی بین میانگین عمق بافت‌های اندازه‌گیری شده وجود دارد. این همبستگی نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی است. از آنجایی که در این روش از داده‌های مبتنی بر ابر نقطه استفاده می‌شود که دقت بالایی در ثبت جزئیات دارد، می‌توان گفت که تفاوت جزئی در نتایج اندازه‌گیری بافت به دلیل دقت کمتر روش ماسه است. دخالت مهارت‌های انسانی در فرایند اندازه‌گیری و دقت پایین در برداشت ویژگی‌های ریزبافت دو نقص آزمایش ماسه است که موجب این اختلاف ناچیز شده است.



شکل ۱۰: همبستگی نتایج روش ارائه شده با روش ماسه

Figure10: Correlation between the results of the presented method and the sand patch method

جدول ۳: جزئیات نتایج دو روش

Table3: Details of the methods results

روش	ماسه	سه بعدی
تعداد	۷۰	۷۰
میانگین	۰/۳۱۵۱	۰/۳۱۴۹
هنجاری	۰/۲۰	۰/۴۵
سطح معنی داری: (α)		۰/۰۵
چولگی	۰/۳۸۵	۰/۳۹۲

جدول ۴: ANOVA

Table 4: ANOVA table

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F محاسبه شده	نتیجه
رگرسیون	۱	۰/۵۴	۰/۵۴	۸۶۵	P=0
خطا	۶۸	۰/۴	.		
کل	۶۹	۰/۵۸	.		

جدول ۵: جزئیات آماری ضریبها

Table5: Statistical details of coefficients

نتیجه	ضریب استاندارد	T	خطا	ضریب
p=0.03	.	۲/۲۳	۰/۰۱	۰/۰۲
P=0	۰/۹۶	۲۹/۴۱	۰/۰۳	۰/۹۳

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش سیستمی جدید جهت اندازه گیری عمق بافت روسازی ارائه شد. دستاورد اصلی این تحقیق ارائه روشی مبتنی بر برداشت دوبعدی جهت دستیابی به جزئیات دقیق سه بعدی بافت با استفاده از تجهیزات ساده و ارزان است. یک سیستم برداشت داده سه بعدی خودکار با استفاده از مجموعه ای متشکل از پنج دوربین دیجیتال ساده ارائه شد. بر اساس مدل های سه بعدی دقیق به دست آمده، شاخص عمق بافت روسازی در سه حالت مختلف محاسبه شد. علاوه بر توانایی محاسبه عمق بافت به روش مرسوم که بیانگر ویژگی های بافت درشت روسازی است، ارزیابی جهتی خطی معیاری از اصطکاک سطحی روسازی و ارزیابی جهتی صفحه ای معیاری از وضعیت زهکشی سطحی روسازی هستند که توسط این روش قابل محاسبه خواهند بود. سخت افزار پیشنهادی همچنین قابلیت شبیه سازی فرایند کاهش اصطکاک روسازی در اثر بارندگی را دارد. به کمک این قابلیت، روشی مناسب برای پایش و ارزیابی رفتار روسازی در شرایط بارانی ارائه شده است. مقایسه مقادیر میانگین عمق بافت محاسبه شده با استفاده از سیستم ارائه شده و اندازه گیری شده با آزمایش ماسه، همبستگی بالایی را بین نتایج آنها نشان داد. ضریب همبستگی ۰,۹۶ به دست آورده شده است. از مزایای سیستم پیشنهادی می توان به ارزیابی خودکار بافت روسازی در سه بعد سطحی، جهتی خطی و جهتی صفحه ای، حذف تأثیر مهارت و قضاوت انسان و امکان محاسبه تمامی شاخص های ارزیابی بافت روسازی در سه بعد با دقت بالا اشاره کرد. یکی از ویژگی های مهم سیستم پیشنهادی، توانایی استخراج رفتار روسازی در شرایط بارندگی و نحوه زهکشی آب های سطحی است. تأثیر بافت روسازی بر اصطکاک در مجاورت آب قابل اندازه گیری است.

در نهایت، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از روش مبتنی بر تصویر با کمک دوربین‌های ساده و ترکیب آن با ابزارهایی که وضعیت کاهش اصطکاک را شبیه‌سازی می‌کنند، منجر به ارائه روشی مناسب برای ارزیابی وضعیت روسازی شده است؛ بنابراین باتوجه به عدم امکان استفاده از روش استاندارد مانند آزمایش ماسه در سطح شبکه، اجرای این روش در سیستم‌های مدیریت روسازی منجر به دستیابی به جزئیات بافت روسازی بادقت بالا و هزینه کم خواهد شد. این روش قابلیت ارزیابی بافت در شرایط خشک و حضور سطوح مختلف آب را دارد و می‌تواند چگونگی کاهش اصطکاک را در انواع روسازی ارزیابی کند. تأثیر حضور آب در انواع روسازی منتج به کاهش اصطکاک می‌شود. این کاهش اصطکاک در هر روسازی متفاوت است. این روش می‌تواند این کاهش را در انواع روسازی محاسبه کند و رویه‌هایی که کاهش اصطکاک کمتری داشته باشند به‌عنوان رویه مناسب از نظر اصطکاک و مقاومت لغزشی معرفی می‌شوند.

۶- منابع

- [1] 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.
- [2] J. Peng, L. Chu, T. Wang, T. Fwa, Analysis of vehicle skidding potential on horizontal curves, *Accident Analysis & Prevention*, 152 (2021) 105960.
- [3] S. Ling, F. Yu, D. Sun, G. Sun, L. Xu, A comprehensive review of tire-pavement noise: Generation mechanism, measurement methods, and quiet asphalt pavement, *Journal of Cleaner Production*, 287 (2021) 125056.
- [4] X. Zhao, L. Xue, F. Xu, Asphalt pavement paving segregation detection method using more efficiency and quality texture features extract algorithm, *Construction and Building Materials*, 277 (2021) 122302.
- [5] S. Ranjbar, F.M. Nejad, H. Zakeri, An image-based system for asphalt pavement bleeding inspection, *International Journal of Pavement Engineering*, (2021) 1-17.
- [6] B. Mataei, F.M. Nejad, M. Zahedi, H. Zakeri, Evaluation of pavement surface drainage using an automated image acquisition and processing system, *Automation in Construction*, 86 (2018) 240-255.
- [7] International Organization for Standardization. ISO 13473-1: 2019 Characterisation of pavement texture by the use of surface profiles – Part 1: determination of mean profile depth. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, (2019).
- [8] D. Zhang, Q. Zou, H. Lin, X. Xu, L. He, R. Gui, Q. Li, Automatic pavement defect detection using 3D laser profiling technology, *Automation in Construction*, 96 (2018) 350-365.
- [9] W. Luo, L. Liu, L. Li, Measuring rutting dimension and lateral position using 3D line scanning laser and inertial measuring unit, *Automation in Construction*, 111 (2020) 103056.
- [10] S. Dong, S. Han, Q. Zhang, X. Han, Z. Zhang, T. Yao, Three-dimensional evaluation method for asphalt pavement texture characteristics, *Construction and Building Materials*, 287 (2021) 122966.
- [11] N. Dong, J.A. Prozzi, F. Ni, Reconstruction of 3D pavement texture on handling dropouts and spikes using multiple data processing methods, *Sensors*, 19(2) (2019) 278.
- [12] M. Ran, S. Xiao, X. Zhou, W. Xiao, Asphalt pavement texture 3D reconstruction based on binocular vision system with SIFT algorithm, in: 2017 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA), IEEE, 2017, pp. 213-218.
- [13] R.B. Kogbara, E.A. Masad, D. Woodward, P. Millar, Relating surface texture parameters from close range photogrammetry to Grip-Tester pavement friction measurements, *Construction and Building Materials*, 166 (2018) 227-240.
- [14] M.J. Westoby, J. Brasington, N.F. Glasser, M.J. Hambrey, J.M. Reynolds, 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, 179 (2012) 300-314.
- [15] S. Zancajo-Blazquez, D. Gonzalez-Aguilera, H. Gonzalez-Jorge, D. Hernandez-Lopez, An automatic image-based modelling method applied to forensic infography, *PloS one*, 10(3) (2015) e0118719.
- [16] A. Ahmed, M. Ashfaq, M.U. Ulhaq, S. Mathavan, K. Kamal, M. Rahman, Pothole 3d reconstruction with a novel imaging system and structure from motion techniques, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, (2021).
- [17] D. Lowe, BObject recognition from local scale-invariant features, [in Proc. 7th Int. Conf, Computer Vision, Kerkyra, Greece, (1999) 1150-1157.

[18] M.A. Fischler, R.C. Bolles, 'Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography', Commun, in, ACM, (1981).

[19] ASTM E965-15. "Standard test method for measuring pavement macrottexture depth using a volumetric technique." Annual book of American society for testing materials. ASTM standards (2015).

A new method for three-dimensional evaluation of asphalt pavement texture

ABSTRACT

The surface texture depth is an important indicator for evaluating the skid resistance capabilities and providing suitable surface drainage conditions for asphalt pavement, which has a direct effect on the safety and comfort of road users. Texture evaluation is one of the main goals of the pavement management system. Three-dimensional evaluation is the most accurate method of measuring pavement texture characteristics. In this paper, a three-dimensional automatic device based on a hybrid imaging technique is presented. In this device, a system consisting of two-dimensional digital cameras is designed to provide the required image data. The proposed system has a tool for reducing surface friction. This system also makes it possible to evaluate the texture in rainy conditions. Based on the two-dimensional images taken from the pavement surface, the three-dimensional models of the pavement texture are presented. A method for calculating the mean texture depth is presented. Measuring the depth of pavement texture in different directions is a capability of this method, which makes it possible to uniformly evaluate the depth of the texture in different directions and find the critical direction for texture drainage capacity. The proposed system has been used to measure the depth of texture in different sections of pavement and the results have been compared with the results of the standard sand patch method. This comparison shows a high correlation between the results of the proposed method and a standard pavement texture evaluation method.

KEYWORDS

Pavement texture depth, Low cost evaluation, 3D modeling, Drainage, Pavement management.