



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

Behrouz Mataei, Fereidoon Moghadas Nejad , Hamzeh Zakeri

Department of Civil and Environmental Engineering, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran

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.

Review History:

Received: Jun. 08, 2022
Revised: Aug. 30, 2023
Accepted: Apr. 20, 2024
Available Online: May, 03, 2024

Keywords:

Pavement Texture Depth
Low Cost Evaluation
3D Modeling, Drainage
Pavement Management

1- Introduction

Pavement texture is the main factor affecting road surface friction. The surface friction condition is one of the most important indicators of pavement safety and the probability of accidents. For this reason, the accurate evaluation of pavement texture characteristics is one of the main goals of pavement management systems [1,2].

In this paper, to achieve a method for automatic evaluation of pavement texture with high accuracy, a three-dimensional automatic system for pavement texture measurement is presented. A new method for calculating MTD in three dimensions is proposed. The possibility of automatic evaluation of surface characteristics in the presence of water and any other polluting liquid is one of the innovations of this research.

2- Data acquisition device

One of the main goals of this paper is to provide an automatic, accurate, fast, and low-cost system for recording pavement surface texture details. In this work, a data acquisition device is presented to provide images required for further analysis.

The most optimal imaging mode in terms of lighting,

camera position, and imaging angle has been obtained by performing various data acquisitions and reconstruction of different 3D models. Figure 1 shows the components and output of the pavement texture imaging system.

3- Evaluation of pavement surface texture characteristics

In this research, SfM is used to convert 2D images into 3D models with high accuracy. This method is compatible with image data obtained from the presented acquisition system. Figure 2 shows the 2D images obtained by the presented device and the 3D model made by the SfM method.

In this section, the pavement mean texture depth has been calculated in a planar and directional manner. The calculation method of this index is presented in equation (1).

The volume is calculated by measuring the three-dimensional space lower than the highest point in the point cloud and its area is considered equal to the number of points in the desired area, and the desired index is calculated from their division.

*Corresponding author's email: Moghadas@aut.ac.ir



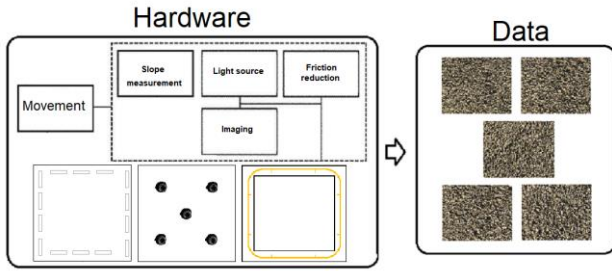


Fig. 1. The process of data collection

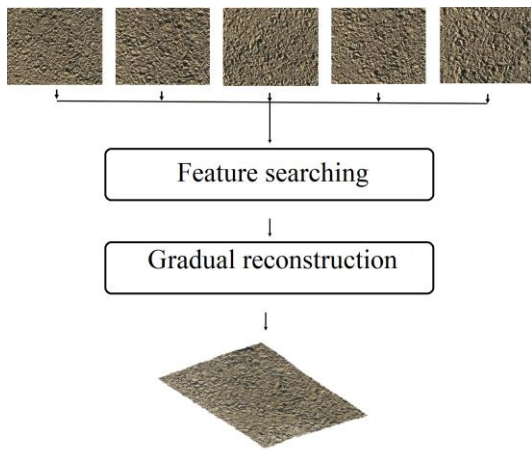


Fig. 2. The process of 3D modeling

$$\begin{aligned}
 D(p) &= Maz(z) - z(p) \\
 Vol &= \sum_{p=1}^N D(p) \\
 MTD &= \frac{Vol}{A}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

The directional measurement of texture characteristics is very important in evaluating its effect on characteristics such as friction and surface drainage. The texture depth is an important indicator in evaluating the surface drainage capability of the pavement.

4- Results and Discussion

The evaluation of the pavement texture in its different states shows its effects on various characteristics of the surface texture. In this research, a method for measuring the pavement texture depth index was presented in a three-dimensional plane. This index is the most important criterion for evaluating the impact of texture on surface friction and drainage. The calculation of this index can be done for the

Table 1. An example of directional MTD measurement

MTD 0	MTD 30	MTD 45	MTD 90
0.32	0.3	0.29	0.37

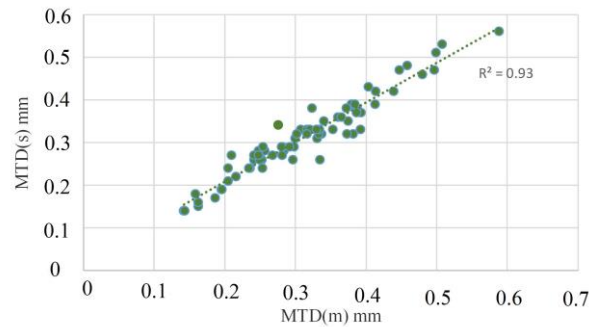
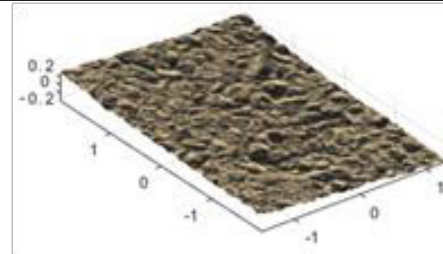


Fig. 3. Correlation between the device and sand patch test results

entire surface of the pavement or a part of it, each of which can be considered a separate and unique criterion.

This system can evaluate linear and planar directions as well. In the linear mode, the pavement texture depth index is a measure of the surface friction. The reason for this claim is that this index indicates how the aggregates are placed next to each other, which affects the hysteresis and adhesion components of friction. If the directional texture is evaluated as a plane, it provides a measure of drainage capability. The depth of the texture in each direction indicates the presence of water drainage channels between the aggregates in that particular direction; Therefore, by checking whether the desired direction is in line with the road surface transverse slope, it is possible to provide a criterion to evaluate the pavement surface drainage.

Table 1 presents the application of this method in evaluating directional pavement surface friction.

Figure 3 shows the correlation of the measurement results of the presented method with the sand patch method.

As seen in this figure, the results of the proposed method have a high correlation with the results of the sand method, which is a standard method. The correlation coefficient (R)

is equal to 0.96. This correlation shows the efficiency of the proposed method.

5- Conclusions

In this research, a new system was presented to measure the depth of pavement texture. The main achievement of this research is to provide a method based on 2D imaging to achieve accurate 3D texture details using simple and cheap equipment. An automated 3D data acquisition system was presented using a set of five simple digital cameras. Based on the accurate three-dimensional models obtained, the pavement texture depth index was calculated in different modes.

In addition to the ability to calculate texture depth using the conventional method that expresses the characteristics of pavement texture, linear directional evaluation is a measure of pavement surface friction and planar directional evaluation is a measure of pavement surface drainage condition that can be calculated by this method.

The proposed system is also capable of simulating the process of reducing pavement friction due to rainfall. With the help of this feature, a suitable method for monitoring and evaluating pavement behavior in rainy conditions has been provided.

A comparison of the mean texture depth values calculated using the presented system and measured by sand patch test showed a high correlation between their results. A correlation coefficient of 0.96 has been obtained.

References

- [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.



ارائه روش جدید ارزیابی سه‌بعدی بافت روسازی آسفالتی

بهروز مطاعی، فریدون مقدس نژاد*^{1b}، حمزه ذاکری

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۲/۱۴

کلمات کلیدی:

عمق بافت روسازی
ارزیابی کم‌هزینه
مدل‌سازی سه‌بعدی
زهکشی
مدیریت روسازی

خلاصه: 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 دوبعدی 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 دوبعدی 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.

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 به عنوان یکی از مشکلات زیست‌محیطی با ارزیابی دقیق بافت روسازی قابل بررسی است [۳]. بافت ناپیوسته و غیریکنواخت ممکن است نشان‌دهنده وجود عیوب مانند ترک خوردگی یا جداشدگی سنگ‌دانه‌ها^۱ 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 قابل تشخیص است [۵ و ۴]. بافت روسازی یک عامل اصلی در زهکشی آب‌های سطحی نیز هست که تأثیر زیادی بر پتانسیل وقوع پراش آب^۲ دارد [۶].

۱- مقدمه

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 قابل بررسی 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

- 1 Macrottexture
- 2 Hysteresis

- 3 Segregation
- 4 Hydroplaning

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moghadas@aut.ac.ir



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 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^۳، ثبت تصاویر، مثلث‌بندی^۴ و تنظیم دسته‌ای^۵ 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^۶) 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^۷) 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

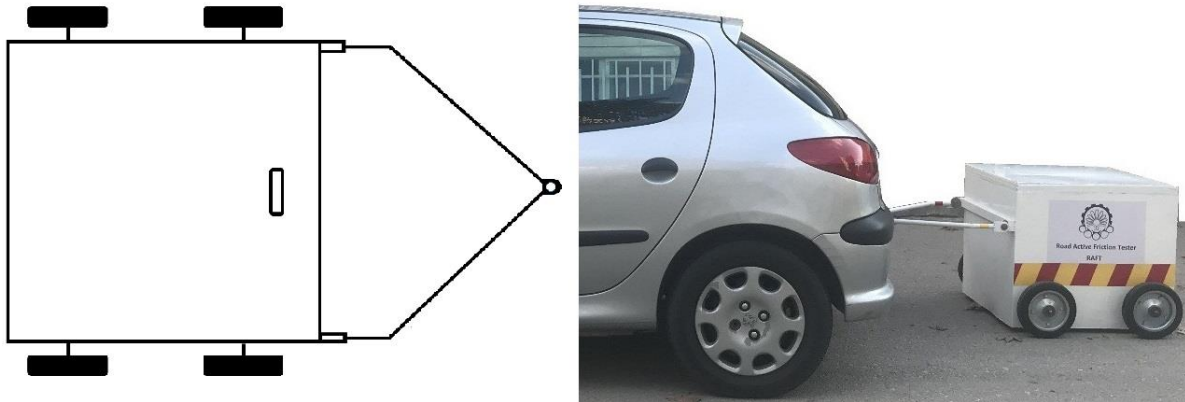
شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی وضعیت بافت روسازی معرفی شده‌اند. شاخص میانگین عمق بافت (MTD^۱) معروف‌ترین شاخص برای توصیف بافت درشت است که عمدتاً از طریق روش استاندارد ماسه محاسبه می‌شود [۷]. روش‌های مرسوم ارزیابی بافت که برای سال‌های متمادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، محدودیت‌هایی در اندازه‌گیری دارند. 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 سالیان 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^۲) ابزار دیگری برای اندازه‌گیری سه‌بعدی سطح است. نتایج به‌کارگیری این تجهیزات با تکنیک‌های آنالیز طیف در استخراج سطح و توزیع بافت در تحقیق ارائه شده توسط دونگ و همکاران، قابل قبول گزارش شده است [۱۰]. حسگرها و دوربین‌های لیزری ابزارهای اصلی تصویربرداری سه‌بعدی هستند که دقت آنها در اندازه‌گیری جزئیات بافت روسازی ثابت شده است [۱۲ و ۱۱].

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. باتوجه به 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

- 3 Image pair selection
- 4 Triangulation
- 5 Bundle adjustment
- 6 Scale Invariant Feature Transform
- 7 Random Sample Consensus

- 1 Mean Texture Depth
- 2 Laser texture scanner



شکل ۱. دستگاه برداشت داده‌های تصویری سه‌بعدی بافت روسازی

Fig. 1. Pavement texture 3D image acquisition device

۲- اجزای سیستم داده‌برداری

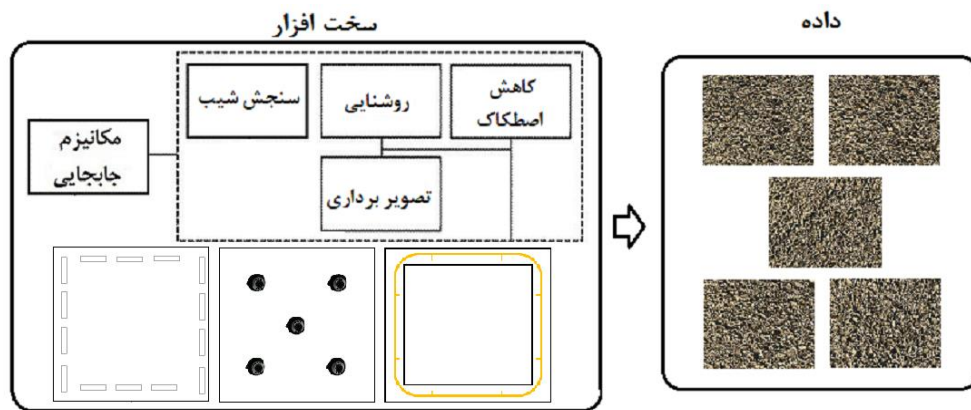
یکی از اهداف اصلی این مقاله ارائه یک سیستم خودکار، دقیق، سریع و کم‌هزینه برای ثبت جزئیات بافت سطح روسازی است. در این کار، یک دستگاه برداشت داده برای ارائه تصاویر موردنیاز برای تجزیه و تحلیل بیشتر ارائه شده است. در این بخش اجزای دستگاه ساخته شده ارائه می‌شود. چارچوب این دستگاه از دو قسمت داخلی و خارجی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

۲-۱- سیستم کاهنده اصطکاک سطحی

این سیستم برای شبیه‌سازی فرایند کاهش اصطکاک روسازی ارائه

سطح روسازی تعیین می‌شود. آزمایش ماسه روش اصلی محاسبه MTD است [۱۹].

باهدف دستیابی به روشی جهت ارزیابی خودکار بافت روسازی با دقت 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.



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

Fig. 2. Components of pavement texture image acquisition device

موقعیت و زاویه تصویربرداری به دست آمده و در سیستم داده برداری لحاظ شده است تا مدل سازی با کمترین خطا انجام شود.

۳- ارزیابی مشخصات بافت سطحی روسازی

۳-۱- مدل سازی سه بعدی بافت

در این تحقیق از SfM برای تبدیل تصاویر دوبعدی به مدل های سه بعدی با دقت بالا استفاده می شود. این روش با داده های تصویری به دست آمده از سیستم جمع آوری 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 می دهد.

۳-۲- استخراج شاخص سه بعدی

داده های سه بعدی مبتنی بر ابر نقطه امکان اندازه گیری شاخص های ارزیابی بافت روسازی را با دقت بالا فراهم کرده اند. در این بخش شاخص عمق بافت روسازی به صورت صفحه ای و جهت محاسبه شده است.

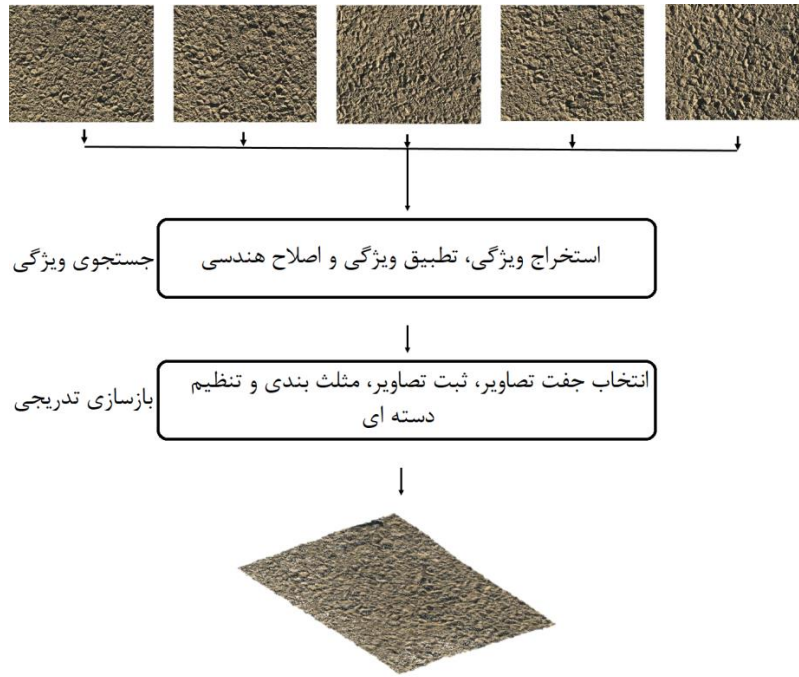
۳-۲-۱- عمق بافت روسازی

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 می شود، حجم روسازی فضای سه بعدی پایین تر از بلندترین نقطه در ابر نقطه و مساحت آن برابر با تعداد نقطه های موجود در ناحیه مورد نظر

شده است. این کار با پاشش مایع روی سطح روسازی با شدت های مختلف انجام می شود که می تواند سطوح مختلف کاهش اصطکاک سطح روسازی را شبیه سازی کند. مایع می تواند از هر نوع باشد (آب، روغن یا هر نوع آلاینده دیگری).

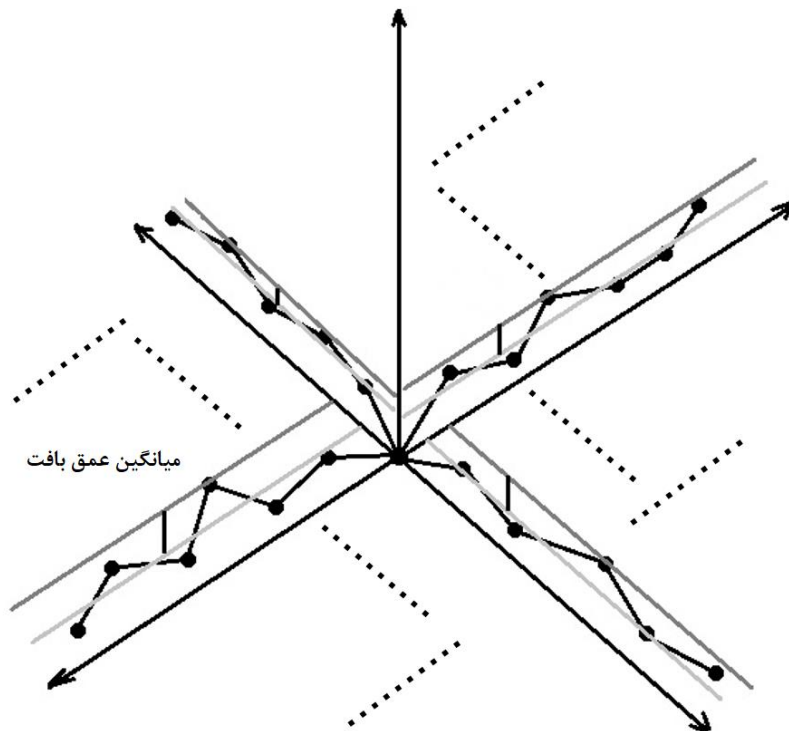
۲-۲- سیستم داده برداری تصویری

این قسمت شامل ۵ دوربین با قابلیت تصویربرداری دوبعدی است که در فواصل یکسان در فضایی به وسعت 2500 cm^2 نصب شده اند. همپوشانی ۶۰٪ روبه جلو و ۳۰٪ به صورت جانبی در جای گذاری دوربین ها در نظر گرفته شده است. همچنین این بخش قابلیت اندازه گیری شیب عرضی و طولی روسازی را به عنوان عاملی مؤثر در زهکشی و اصطکاک سطحی دارد. خروجی این بخش پنج تصویر دوبعدی است که توسط دوربین های تعبیه شده برداشت شده اند. شکل ۲ اجزا سیستم جمع آوری داده های تصویری بافت روسازی و خروجی آن را نشان می دهد. به منظور جلوگیری از تأثیر دمای محیط در نتایج ارزیابی، داده برداری انجام شده در این تحقیق در محدوده دمایی ۱۸ تا ۲۳ درجه انجام شده است. همچنین در این پژوهش از روشی استفاده شده که مدل های سه بعدی را به صورت ابر نقاط بازسازی می کند. در صورت وجود شرایط نامطلوب در تصاویر، مدل ایجاد شده از نقاط کمتری تشکیل شده و در نتیجه جزئیات بافت با دقت بالایی بازسازی نشده و در تحلیل های بعدی مورد استفاده قرار نمی گیرند؛ بنابراین با انجام داده برداری های مختلف و ساخت مدل سه بعدی، بهترین حالت تصویربرداری از نظر روشنایی،



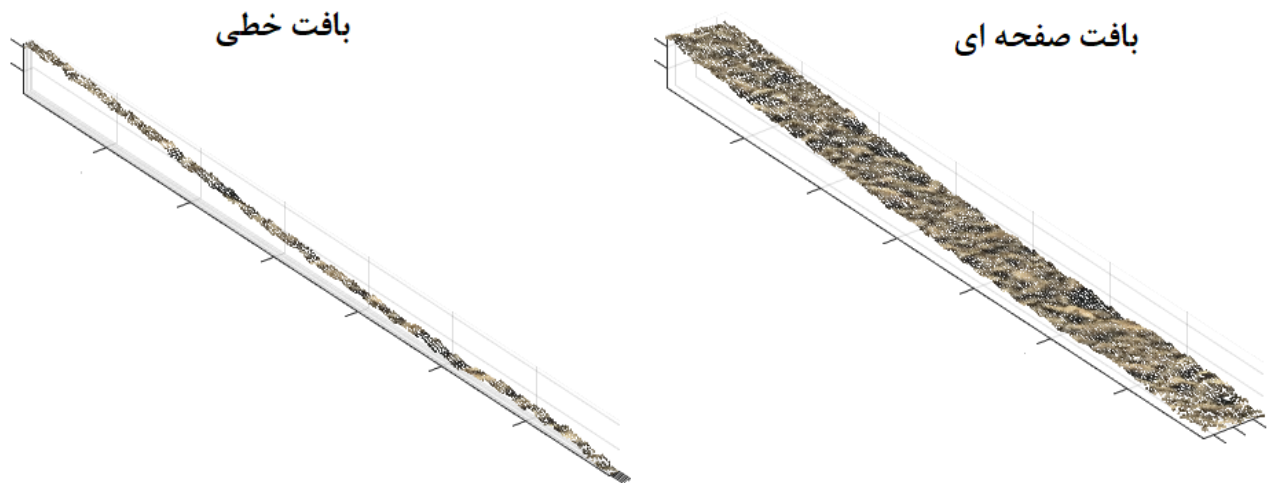
شکل ۳. روند دستیابی به مدل سه بعدی

Fig. 3. The process of 3D model reconstruction



شکل ۴. محاسبه شاخص میانگین عمق بافت روسازی

Fig. 4. Calculation of pavement mean texture depth



شکل ۵. استخراج بافت خطی و صفحه ای جهت‌ی روسازی

Fig. 5. Extraction of linear and planar directional pavement texture

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.

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 جهت 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

در نظر گرفته می‌شود و از تقسیم آنها شاخص موردنظر محاسبه می‌شود.

$$D(p) = Maz(z) - z(p)$$

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

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

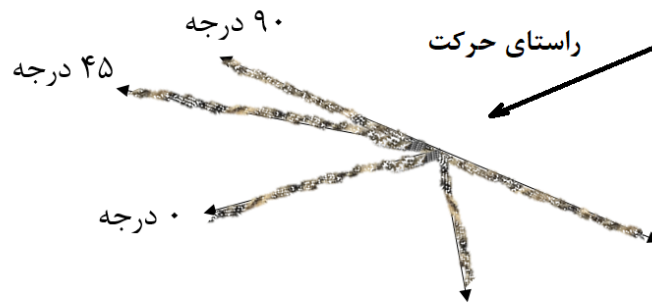
که در آن p هر نقطه، Z ارتفاع، D عمق، Vol حجم و A مساحت ناحیه موردنظر در روی سطح روسازی است.

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

1 Hysteresis
2 Adhesive



حالت بهینه:

بیشترین عمق بافت در راستای حرکت (۰ درجه)

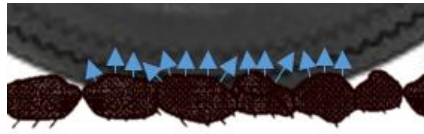
شکل ۶. کاربرد روش ارائه شده در ارزیابی اصطکاک سطحی روسازی

Fig. 6. Ehe application of the presented method in the evaluation of pavement surface friction

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.

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

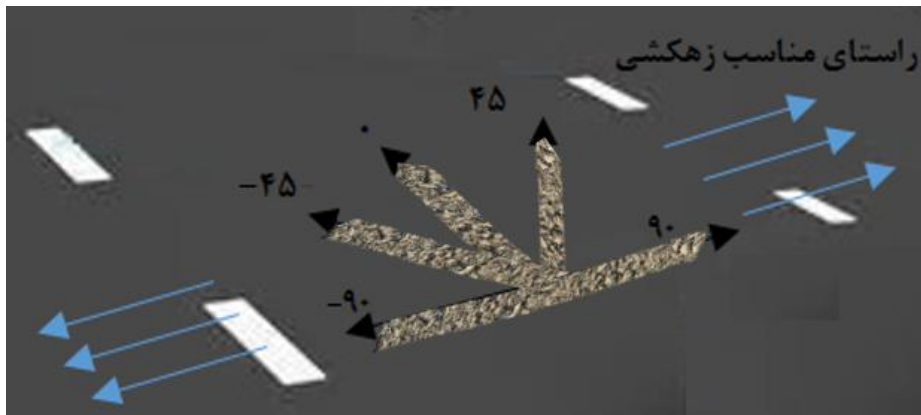
زهکشی را ارائه می‌دهد. عمق بافت جهتی بیشتر در هر جهت بیانگر وجود کانال‌های تخلیه آب در بین سنگ‌دانه‌ها در آن جهت خاص است؛ بنابراین می‌توان با بررسی اینکه آیا جهت موردنظر در راستای شیب عرضی و خروج آب از سطح جاده قرار گرفته است یا خیر، معیاری جهت ارزیابی زهکشی سطحی روسازی ارائه داد. جدول ۱ انواع مختلف شاخص‌های ارائه شده و مشخصه مورد ارزیابی مرتبط با آن‌ها را نشان می‌دهد. در این جدول باتوجه 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 واقعتاً ذکر شده در مورد تأثیر عمق بافت بر مؤلفه‌های پس‌بافت و چسبندگی بافت را نمایش می‌دهد. مؤلفه پس‌بافت اصطکاک مربوط به پتانسیل مستهلک کردن انرژی لاستیک در حال حرکت توسط سنگ‌دانه‌های



مولفه پسماند اصطکاک

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

Fig. 7. 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

Fig. 8. The application of the presented method in evaluating pavement surface drainage

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.

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

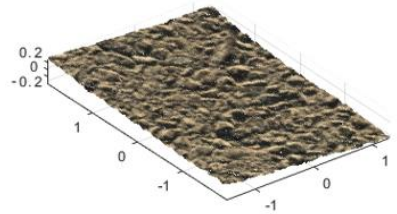
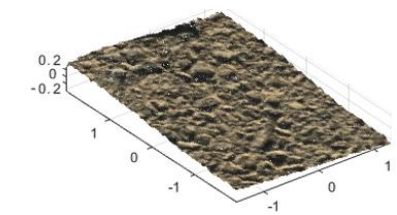
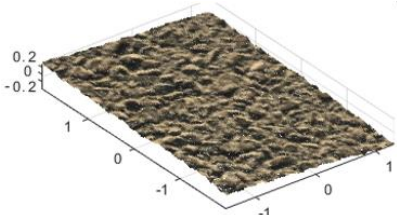
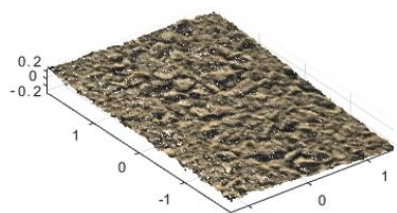
کانال‌های آب در جهت عمود بر راستای حرکت و خروج آب از کناره روسازی است که این شرایط مناسبی از نظر زهکشی سطحی خواهد بود.

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 منحصر به فرد جهت اندازه‌گیری بافت روسازی، یک سیستم کاهش اصطکاک نیز ارائه شده

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

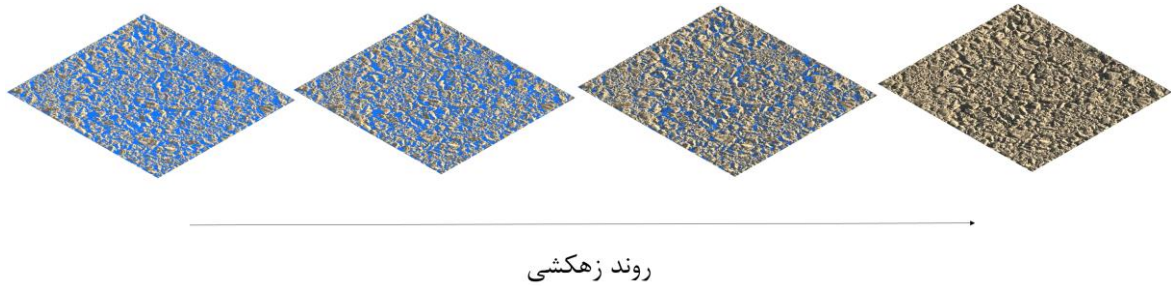
Table 1. The results of the presented method in pavement directional texture evaluation

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

جدول ۲. شاخص‌ها و مشخصه مورد ارزیابی

Table 2. 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

Fig. 9. Texture evaluation in rainy conditions

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 جداول 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.

۵- نتیجه‌گیری

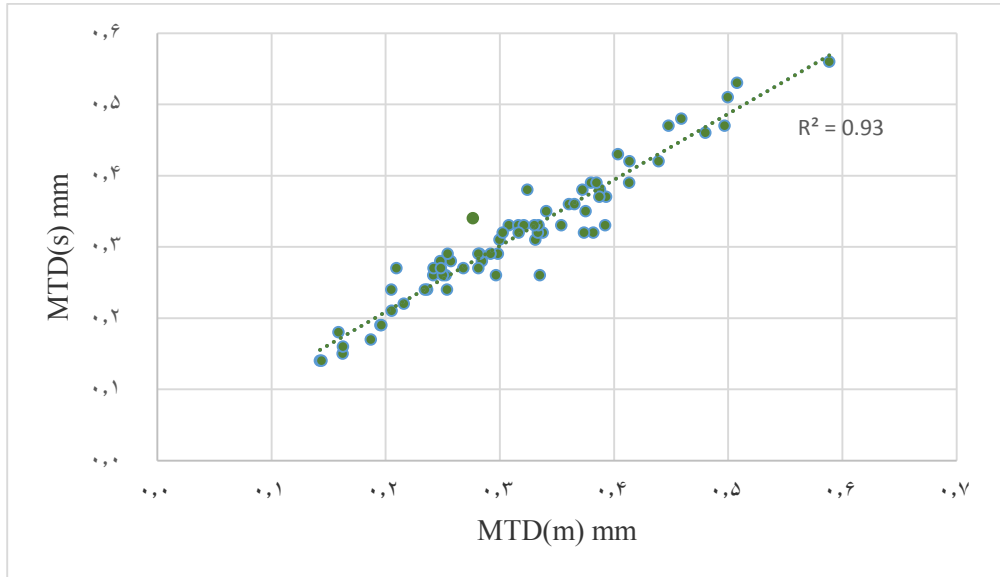
در این پژوهش سیستمی جدید جهت اندازه‌گیری عمق بافت روسازی ارائه شد. دستاورد اصلی این تحقیق ارائه روشی مبتنی بر برداشت دوبعدی جهت دستیابی به جزئیات دقیق سه‌بعدی بافت با استفاده از تجهیزات ساده و ارزان است. یک سیستم برداشت داده سه‌بعدی خودکار با استفاده از مجموعه‌ای متشکل از پنج دوربین دیجیتال ساده ارائه شد. بر اساس مدل‌های سه‌بعدی دقیق به‌دست‌آمده، شاخص عمق بافت روسازی در سه حالت مختلف محاسبه شد. علاوه بر توانایی محاسبه عمق بافت به روش مرسوم که بیانگر ویژگی‌های بافت درشت روسازی است، ارزیابی جهتی خطی معیاری از اصطکاک سطحی روسازی و ارزیابی جهتی صفحه‌ای معیاری از وضعیت زهکشی سطحی روسازی هستند که توسط این روش

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. مقایسه بین شاخص‌های میانگین عمق روسازی به‌دست‌آمده 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:

$$\begin{aligned}
 MTD(s) &= b(0) + b(1)MTD(m) \\
 b(1) &= \frac{\sum (MTD(m(i)) - \overline{MTD(m)}) (MTD(s(i)) - \overline{MTD(s)})}{\sum (MTD(m(i)) - \overline{MTD(m)})^2 * 2} = 0.93 \quad (2) \\
 b(0) &= \bar{y} - b(1)\bar{x} = 0.02 \\
 MTD(s) &= 0.02 + 0.93MTD(m)
 \end{aligned}$$

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



شکل ۱۰. همبستگی نتایج روش ارائه شده با روش ماسه

Fig. 10. Correlation between the results of the presented method and the sand patch method

جدول ۳. جزئیات نتایج دو روش

Table 3. 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. جدول 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	۰		
کل	۶۹	۰/۵۸	۰		

جدول ۵. جزئیات آماری ضریبها

Table 5. Statistical details of coefficients

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

منابع

- قابل محاسبه خواهند بود. سخت‌افزار پیشنهادی همچنین قابلیت شبیه‌سازی 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 اندازه‌گیری 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 می‌توان به ارزیابی خودکار بافت روسازی در سه بعد سطحی، جهتی خطی و جهتی صفحه‌ای، حذف تأثیر مهارت و قضاوت انسان و امکان محاسبه تمامی شاخص‌های ارزیابی بافت روسازی در سه بعد با دقت بالا اشاره کرد. یکی از ویژگی‌های مهم سیستم پیشنهادی، توانایی استخراج رفتار روسازی در شرایط بارندگی و نحوه زهکشی آب‌های سطحی است. تأثیر بافت روسازی بر اصطکاک در مجاورت آب قابل اندازه‌گیری 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 با توجه 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 با دقت 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.
- [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,

- 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 macrotexture depth using a volumetric technique." Annual book of American society for testing materials. ASTM standards (2015).
- 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,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Mataei, F. Moghadas Nejad, H. Zakeri, A new method for three-dimensional evaluation of asphalt pavement texture, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 56(4) (2024) 441-456.

DOI: [10.22060/ceej.2024.21475.7734](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.21475.7734)

