Journal of Nondestructive Testing Technology
Online ISSN: 2676-6655
Doi: 10.30494/jndt.2026.521220.1162

Evaluation of Non-Destructive Pavement Health Monitoring Methods Based on Intelligent Systems

Farogh Zabihi [1] | Saeed Mirbeygi [2] | Hassan Sadeghi [3] | Mohadeseh Khedmati [4]

1. Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: St_f.zabihi@urmia.ac.ir
2. Faculty of Civil Engineering, K.N.Toosi, Tehran, Iran. E-mail: saeed.mirbeygi325767@gmail.com
3. Faculty of Civil Engineering, K.N.Toosi, Tehran, Iran. E-mail: hasan.sadeghi.a@gmail.com
4. Faculty of Civil Engineering, K.N.Toosi, Tehran, Iran. E-mail: khedmatimohadese@gmail.com

Article Information:
Research Article
Received 04 May 2025
Revised 14 July 2025
Accepted 19 Feb. 2026

Keywords:
Pavement Health Monitoring,
Intelligent Sensors,
Image Processing,
Transportation Infrastructure Management.

ABSTRACT

Pavement condition monitoring represents a critical aspect of transportation infrastructure management, directly influencing road safety, lifecycle maintenance planning, and the overall efficiency of roadway networks. With the increasing demand for resilient and sustainable transportation systems, the development and implementation of effective pavement health assessment methods have become a top priority for both researchers and infrastructure authorities. In recent years, a variety of approaches have been proposed to evaluate road surface conditions. These include conventional manual surveys, sensors embedded within pavements, mobile sensing platforms installed on vehicles, crowdsourced data collection through smartphone applications, and remote sensing techniques such as aerial or satellite imagery. Each method offers distinct advantages and limitations when evaluated based on criteria such as cost, spatial and temporal resolution, data accuracy, operational complexity, automation potential, and scalability. Traditional approaches, although accurate and widely validated, are often constrained by high labor requirements, limited coverage, and elevated operational costs. In contrast, recent innovations involving low-cost inertial sensors mounted on passenger vehicles or smartphones provide a more affordable and scalable alternative for continuous, real-time pavement monitoring. However, these methods may face challenges regarding signal noise, environmental sensitivity, and the need for robust preprocessing algorithms to ensure reliable interpretation. Furthermore, the integration of aerial imaging and computer vision techniques has enabled the assessment of road surfaces in remote or difficult-to-access regions, thereby expanding the coverage of monitoring systems. The fusion of different sensing modalities (ground-based, vehicular, airborne, and crowdsourced) within a unified analytical framework holds the potential to create a comprehensive and intelligent monitoring system capable of predictive maintenance and timely decision-making. Such a hybrid and intelligent approach is particularly valuable for developing countries, where limited financial and technical resources necessitate cost-effective, scalable, and low-maintenance solutions. By leveraging real-time data streams and predictive analytics, transportation agencies can significantly enhance the reliability and efficiency of pavement management systems and move toward evidence-based infrastructure planning.

Cite this article: Zabihi, F., Mirbeygi, S., Sadeghi, H., & Khedmati, M. (2026). Evaluation of Non-Destructive Pavement Health Monitoring Methods Based on Intelligent Systems. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 4 (2), 10-29.

© The Author(s).
DOI: http//doi.org/10.30494/jndt.2026.521220.1162
Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب
شاپای الکترونیکی: ۶۶۵۵-۲۶۷۶
Doi: 10.30494/jndt.2026.521220.1162

ارزیابی روش‌های غیرمخرب پایش سلامت روسازی جاده‌ها مبتنی بر سیستم‌های هوشمند

فاروق ذبیحی [۱] ✉ | سعید میربیگی [۲] | حسن صادقی [۳] | محدثه خدمتی [۴]

۱. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: St_f.zabihi@urmia.ac.ir
۲. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: saeed.mirbeygi325767@gmail.com
۳. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: hasan.sadeghi.a@gmail.com
۴. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: khedmatimohadese@gmail.com

اطلاعات مقاله:
مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۲/۱۴
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۴/۰۴/۲۳
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۱۱/۳۰

کلیدواژگان:
پایش سلامت جاده،
حسگرهای هوشمند،
پردازش تصویر،
مدیریت زیرساخت‌های حمل‌ونقل

چکیده:

پایش وضعیت جاده‌ها به‌عنوان یکی از ارکان اساسی مدیریت زیرساخت‌های حمل‌ونقل، نقش حیاتی در ارتقای ایمنی، کاهش هزینه‌های نگهداری و بهبود کارایی شبکه جاده‌ای ایفا می‌کند. در سال‌های اخیر، روش‌های متعددی برای ارزیابی سلامت جاده‌ها توسعه یافته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به بازدیدهای میدانی سنتی، حسگرهای تعبیه‌شده در جاده، سامانه‌های مبتنی بر وسایل نقلیه مجهز به حسگر، روش‌های مبتنی بر داده‌برداری جمعی شده از طریق گوشی‌های هوشمند و فناوری‌های تصویربرداری هوایی اشاره کرد. هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی در زمینه دقت، هزینه، پوشش مکانی، اتوماسیون و مقیاس‌پذیری هستند. بررسی این روش‌ها نشان می‌دهد که روش‌های سنتی اگرچه از دقت بالایی برخوردارند، اما به دلیل هزینه‌های اجرایی زیاد و پوشش محدود، برای شبکه‌های گسترده جاده‌ای چندان مناسب نیستند. در مقابل، فناوری‌های نوین مانند حسگرهای کم‌هزینه نصب‌شده بر روی خودروها یا استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده از طریق تلفن‌های همراه، با وجود چالش‌هایی در زمینه دقت و پردازش داده‌ها، به دلیل مقرون‌به‌صرفه بودن و قابلیت گسترش در مقیاس وسیع، گزینه‌های امیدوارکننده‌ای برای پایش مستمر جاده‌ها محسوب می‌شوند. همچنین، روش‌های مبتنی بر تصویربرداری هوایی و پردازش تصویر، به‌ویژه در مناطق صعب‌العبور، می‌توانند به‌عنوان مکمل سایر روش‌ها مورد استفاده قرار گیرند. در نهایت، ترکیب هوشمندانه روش‌های مختلف با تأکید بر فناوری‌های کم‌هزینه و مقیاس‌پذیر، می‌تواند به ایجاد سامانه‌های پایش یکپارچه و کارآمد منجر شود. توسعه چنین سیستم‌هایی با بهره‌گیری از تحلیل‌های پیش‌بینانه و داده‌های بلادرنگ، زمینه را برای تحول در مدیریت نگهداری جاده‌ها و تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر شواهد فراهم می‌کند. این امر به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه با منابع مالی محدود، از اهمیت بسزایی برخوردار است.

استناد: ذبیحی، فاروق؛ میربیگی، سعید؛ صادقی، حسن و خدمتی، محدثه. (۱۴۰۴). ارزیابی روش‌های غیرمخرب پایش سلامت روسازی جاده‌ها مبتنی بر سیستم‌های هوشمند. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۴ (۲)، ۲۹-۱۰.

© نویسندگان
ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران
DOI: http//doi.org/10.30494/jndt.2026.521220.1162

۱- مقدمه

پایش وضعیت سطح جاده‌ها در سال‌های اخیر، از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار شده است. جاده‌هایی که به‌طور مؤثر و منظم نگهداری می‌شوند، ایمنی و راحتی کاربران جاده را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند [۱]. از این رو، نظارت مستمر بر وضعیت جاده‌ها برای بهبود سیستم‌های حمل‌ونقل، ارتقاء ایمنی و تضمین راحتی کاربران، حیاتی به شمار می‌رود [۲]. طبق مطالعه‌ای که توسط وزارت حمل‌ونقل ایالات متحده انجام شده، وضعیت سطحی و سازه‌ای جاده‌ها یکی از عوامل کلیدی در ارزیابی کیفیت جاده‌ها به شمار می‌رود. به عنوان مثال اندازه چاله‌ها، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در ارزیابی وضعیت سطح جاده، می‌تواند آسیب‌های جدی به خودروها وارد کرده و در صورتی که به‌موقع تعمیر نشود، ایمنی کاربران را به خطر بیندازد [۳, ۴]. علاوه بر این، میزان زبری سطح جاده‌ها، یکی از شاخص‌های مهم دیگری است که وضعیت سلامت جاده را ارزیابی می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که شرایط سطحی جاده، می‌تواند منجر به رفتار پیش‌بینی‌نشده در رانندگی و کاهش ارزش خودروها شود، که نه تنها تأثیرات اقتصادی به همراه دارد بلکه در برخی موارد می‌تواند منجر به بروز حوادث و صدمات جانی گردد [۵, ۶]. این تأثیرات در کشورهای در حال توسعه، به‌ویژه به دلیل ضعف زیرساخت‌های جاده‌ای بسیار چشمگیرتر است. بنابراین، ایجاد یک سیستم کارآمد جهت برداشت وضعیت سلامت جاده‌ها، می‌تواند به‌طور قابل توجهی ایمنی رانندگان و عابران پیاده را بهبود بخشد [۷, ۸].

چندین روش مختلف برای طراحی و استفاده از ابزارهای گوناگون مانند حسگرهای جاده‌ای، حسگرهای خودرو و حسگر گوشی‌های هوشمند توسعه یافته است. هر یک از این ابزارها مزایا و معایب خاص خود را دارند. حسگرهای نوری به‌عنوان یکی از این ابزارها، برای شناسایی انواع مختلف خرابی‌ها و تأیید صحت ناهمواری‌های مشاهده شده، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹, ۱۰]. اگرچه این تکنولوژی به‌طور قابل قبولی ناهمواری جاده‌ای را شناسایی می‌کند، اما نیاز به تغییراتی در خودروها با هزینه‌های زیاد دارد که می‌تواند استفاده گسترده از آن را محدود کند [۸, ۱۱]. یک روش مبتنی بر حسگرهای گوشی هوشمند با بهره‌گیری از روش‌های پردازش سیگنال نیز طراحی شده است. در این روش از یک تکنیک چندآستانه‌ای برای تولید سیگنال شناسایی چاله‌ها استفاده می‌شود که سپس برای شبیه‌سازی سطح جاده با خرابی‌های نمایان‌شده در فرکانس‌های بالا به‌کار می‌رود. با این حال، این روش منجر به ایجاد سیگنال‌های مثبت کاذب شده که دقت و اعتبار سیستم را کاهش می‌دهد [۸, ۱۲]. همچنین، روش دیگری با استفاده از یک برنامه گوشی هوشمند طراحی شده که داده‌ها را از شتاب‌سنج جمع‌آوری کرده و از فیلترهای نویز برای جلوگیری از ثبت حرکات اشتباه و سریع استفاده می‌کند. روش‌های شناسایی نویز در این رویکرد، به ورودی دستی پارامترهای سیستم وابسته هستند. برای اطمینان از صحت داده‌ها، به آموزش و آزمایش‌های جامع نیاز است. حتی اگر داده‌ها در تمامی برداشت‌ها نتایج دقیقی تولید نکنند، چندین روش موجود برای استفاده موفق از حسگرهای گوشی هوشمند طراحی شده‌اند، اما هر یک از این روش‌ها محدودیت‌هایی دارند و برای برخی شرایط مناسب نیستند [۱۳-۱۵]. یک راه‌حل دیگر مبتنی بر حسگرهای شتاب‌سنج گوشی‌های هوشمند طراحی شده که در این سیستم، داده‌ها جمع‌آوری شده و برای هر آزمایش رانندگی یک امتیاز اعتماد محاسبه و در پایگاه داده ذخیره می‌شود. سپس یک روش خوشه‌بندی روی امتیازهای اعتماد ذخیره‌شده انجام می‌شود تا پردازش‌های بیشتری انجام گیرد. اگرچه این روش از مشتقات برای ساخت نمایش‌های دقیق‌تری از سیگنال استفاده می‌کند، اما هنوز حسگرهای شتاب‌سنج دارای چندین نقص هستند [۱۶, ۱۷]. علاوه بر این، یک سیستم مبتنی بر سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) طراحی شده است، اما داده‌های GPS دارای خطای چند متری هستند. همچنین، تعامل انسانی و رفتار رانندگی می‌تواند در تمام موارد بر نتایج تأثیر بگذارد [۱۸]. روش‌های مبتنی بر لیزر و تصویر دو روش اصلی هستند که بیشترین تحقیقات و استفاده‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. روش‌های مبتنی بر لیزر معمولاً دقت بالاتری دارند، اما هزینه‌های بیشتری را به همراه دارند. در بسیاری از این کاربردها از حسگرهای سیمی استفاده می‌شود، اما به دلیل ماهیت ثابت آن‌ها، نصب این حسگرها دشوار بوده و همچنین می‌توانند هزینه‌بر باشند [۱۹-۲۲]. دولت‌ها با چالش‌های زیادی در زمینه نگهداری

شرایط شبکه جاده‌ای مواجه هستند. این مشکلات عمدتاً به دلیل کمبود منابع مالی و فیزیکی مقامات مسئول در حوزه راهسازی است. از این رو، تکنولوژی‌های خودکار کم‌هزینه در حال توسعه هستند تا این چالش‌ها را برطرف کرده و شرایط جاده‌ای مناسب‌تری را برای کاربران فراهم کنند. نگهداری صحیح و مؤثر شبکه جاده‌ای برای ایمنی و پایداری خودروها و برای سلامت افرادی که از جاده‌ها استفاده می‌کنند، حیاتی است [۲۳, ۲۴].

سیستم‌های پایش سلامت راه (RHMS)[1] مجموعه‌ای از روش‌ها و فناوری‌ها هستند که برای نظارت و ارزیابی وضعیت سازه‌ای و عملکردی جاده‌ها طراحی شده‌اند. این سیستم‌ها به‌منظور شناسایی و تحلیل خرابی‌های موجود در روسازی‌ها، از جمله ترک‌ها، نشست‌ها و خرابی‌های سطحی، به‌طور پیوسته و غیرمخرب، استفاده می‌شوند [۲۴]. سیستم‌های RHMS معمولاً شامل حسگرها، تجهیزات تصویربرداری و نرم‌افزارهای تحلیلی هستند [۲۵] که داده‌های برداشت شده از وضعیت جاده‌ها را جمع‌آوری و پردازش می‌کنند [۲۶]. این سیستم‌ها قادر به شبیه‌سازی رفتار جاده در برابر بارهای ترافیکی، شرایط محیطی و عوامل دیگر هستند و به‌طور دقیق‌تر نواقص سازه‌ای و تغییرات شرایط سطحی را شناسایی می‌کنند. هدف اصلی این سیستم‌ها، ارتقای ایمنی جاده‌ای، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و بهبود تصمیم‌گیری در مدیریت زیرساخت‌های جاده‌ای است [۲۷]. در نتیجه، سیستم‌های RHMS به عنوان ابزاری ضروری برای پایش مستمر سلامت جاده‌ها شناخته می‌شوند و امکان پیشگیری از خرابی‌های عمده و هزینه‌بر را فراهم می‌کنند.

یکی از رایج‌ترین تکنولوژی‌ها، سنسورهای تعبیه‌شده هستند که به‌صورت مستمر داده‌هایی از وضعیت جاده‌ها، مانند شتاب وسایل‌نقلیه، فشار وارد بر جسم راه، دما، ارتعاشات سطحی و ... را جمع‌آوری می‌کنند [۲۸-۳۱]. این سنسورها معمولاً در لایه‌های مختلف روسازی قرار می‌گیرند [۳۲] و به‌طور پیوسته تغییرات سطحی و داخلی را ثبت می‌کنند [۳۰].

سامانه‌های تصویربرداری به‌عنوان یکی از ابزارهای کارآمد در حوزه پایش وضعیت روسازی جاده‌ها شناخته می‌شوند. این سامانه‌ها با بهره‌گیری از دوربین‌های معمولی یا پیشرفته نظیر دوربین‌های حرارتی و نوری، قادرند ترک‌ها، چاله‌ها و سایر خرابی‌های سطحی روسازی را شناسایی کنند [۳۳]. تحلیل تصاویر حاصل از این دوربین‌ها به‌وسیله الگوریتم‌های پردازش تصویر، امکان مدلسازی دقیق شرایط روسازی و تشخیص خرابی‌ها در بازه‌های زمانی مختلف را فراهم می‌سازد [۳۴]. علاوه بر این، وسایل نقلیه‌ای که به‌طور ویژه برای پایش وضعیت جاده‌ها تجهیز شده‌اند (شامل شتاب‌سنج‌ها، دوربین‌های تصویربرداری و انواع حسگرهای تخصصی) نقش مهمی در جمع‌آوری داده‌های میدانی ایفا می‌کنند. این وسایل قادر هستند، به صورت خودکار اطلاعات مرتبط با وضعیت سطح جاده، تغییرات سازه‌ای روسازی و همچنین بارهای ترافیکی را ثبت نمایند [۳۵, ۳۶]. تلفیق این فناوری‌ها با پیشرفت‌های نوین در حوزه پردازش داده و تحلیل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، موجب افزایش چشمگیر دقت و کارایی سامانه‌های پایش سلامت جاده‌ای شده و زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های هوشمندانه‌تر در فرآیندهای نگهداری و بهسازی زیرساخت‌های حمل‌ونقل می‌شود [۳۷, ۳۸]. با این حال، سامانه‌های فعلی پایش سلامت جاده‌ها با چالش‌ها و محدودیت‌های قابل‌توجهی مواجه هستند. نخستین و شاید مهم‌ترین محدودیت، هزینه‌های بالای این فناوری‌ها است که شامل هزینه‌های اولیه برای تهیه تجهیزات پیشرفته، راه‌اندازی زیرساخت‌ها و نیز هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری بلندمدت آن‌ها می‌شود. این مسأله به ویژه در کشورها و مناطقی با منابع مالی محدود، می‌تواند مانع از به‌کارگیری گسترده این سامانه‌ها شود [۳۹]. علاوه بر این، بسیاری از این روش‌ها نیازمند حضور نیروی انسانی متخصص برای نصب، راه‌اندازی و تحلیل داده‌ها هستند. یکی دیگر از موانع، وابستگی برخی از این سیستم‌ها به انسداد یا محدودسازی موقت مسیرهای ترافیکی جهت انجام ارزیابی‌هاست که این امر می‌تواند موجب اختلال در جریان ترافیک شده و هزینه‌های اجتماعی و اقتصادی غیرمستقیمی را به شبکه حمل‌ونقل تحمیل کند [۴۰, ۴۱].

با توجه به تنوع روش‌های نوین پایش غیرمخرب سلامت روسازی جاده‌ها و نیاز به یکپارچه‌سازی این فناوری‌ها، در این پژوهش چارچوبی سیستماتیک در شکل (۱) ارائه شده

[1] Road Health Monitoring Systems (RHMS)

است. این چارچوب سه لایه اصلی شامل: ۱) روش‌های جمع‌آوری داده مبتنی بر حسگرها و پردازش تصویر، ۲) هسته پردازش هوشمند برای ادغام و تحلیل داده‌ها و ۳) خروجی‌های عملیاتی را در برمی‌گیرد. هدف از طراحی این ساختار، ایجاد مسیری روشن برای تبدیل داده‌های خام به اطلاعات قابل اجرا در مدیریت نگهداری جاده‌هاست، به‌گونه‌ای که بتواند همزمان نیازهای دقت فنی، مقرون به صرفه بودن و مقیاس‌پذیری را پاسخگو باشد.

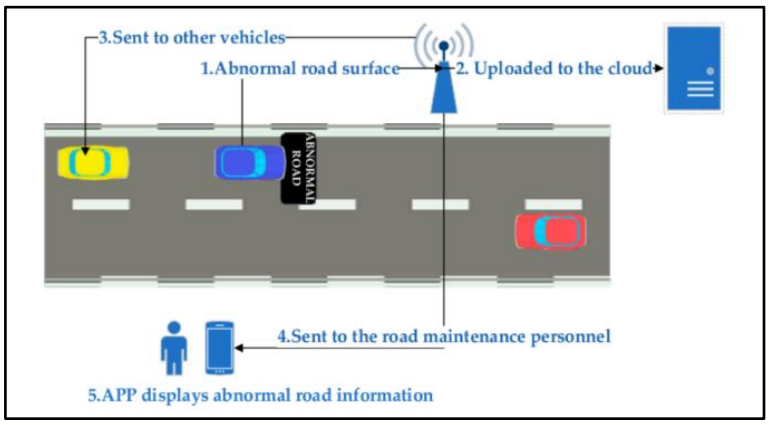
شکل ۱) چارچوب سیستماتیک سیستم‌های پایش غیرمخرب سلامت روسازی جاده‌ها

۲- سامانه‌های ارزیابی وضعیت راه‌ها

محققان مختلف در سراسر جهان تلاش‌های زیادی برای کمک به تصمیم‌گیرندگان در اولویت‌بندی بخش‌های جاده‌ای و تحلیل وضعیت سلامت جاده‌ها انجام داده‌اند.

۲-۱ روش مبتنی بر استفاده از گوشی هوشمند

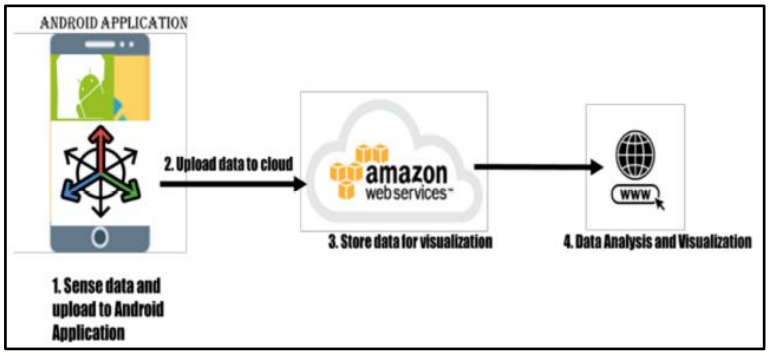
رونگ‌هوا و همکاران [۴۲] از فناوری شبکه سلولی موجود برای جمع‌آوری داده‌های مربوط به سطح جاده استفاده کردند. ساختار مدل پیشنهادی آن‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. در این سامانه، مختصات جغرافیایی وسیله نقلیه (عرض و طول جغرافیایی)، سرعت حرکت و داده‌های ارتعاشی حاصل از شتاب‌سنج، از طریق یک گوشی هوشمند مجهز به سنسور شتاب‌سنج و دستگاه GPS که برروی خودرو نصب شده، ثبت می‌گردد. در هنگام عبور خودرو از سطوح جاده‌ای ناهموار، موقعیت و اطلاعات مربوط به ناهمواری‌ها به صورت آنی به فضای ابری ارسال و سپس به تیم‌های نگهداری جاده منتقل میشود. همچنین، هنگامی که سایر خودروها به منطقه ناهمواری نزدیک می‌شوند، سامانه ابری هشدارهایی را صادر می‌کند تا امکان عبور ایمن و روان از این نواحی فراهم شود. این سیستم صرفاً متکی بر پیکربندی ساده یک گوشی هوشمند تک وظیفه‌ای است و از داده‌های خام شتاب‌سنج استفاده می‌کند. اما این موضوع ممکن است در اثر رفتارهای رانندگی غیرعادی یا ترمزهای ناگهانی، منجر به ایجاد هشدارهای نادرست (مثبت کاذب) شود. از سوی دیگر، به‌دلیل عدم بهره‌مندی از سازوکار بافر، در صورت قطع اتصال اینترنت، احتمال از دست رفتن داده‌ها وجود دارد.



شکل ۲) شماتیک سامانه به‌اشتراک‌گذاری اطلاعات جاده‌ای [۴۲]

۲-۲ روش سامانه ابری چهارمرحله‌ای

پاوار و همکاران [۴۳] یک سیستم پایه برای سامانه تشخیص وضعیت جاده ارائه کرده‌اند که شامل چهار وظیفه اصلی حسگری، ذخیره‌سازی، پردازش و بازیابی داده‌ها است که ساختار آن در شکل (۳) نشان داده شده است. در مرحله نخست، داده‌ها از طریق حسگرهای موجود در گوشی هوشمند جمع‌آوری می‌شوند. در مرحله دوم، داده‌های گردآوری‌شده به فضای ابری ارسال می‌شوند. در گام سوم، داده‌های موجود در ابر، مورد تحلیل قرار گرفته تا وضعیت سطح جاده پیش‌بینی گردد. در مرحله چهارم، نتایج پردازش، بازیابی شده و وضعیت جاده بر روی نقشه نشان داده می‌شود. تمرکز این سیستم عمدتاً بر استفاده از داده‌های خام شتاب‌سنج است که بدون اعمال فیلترهای لازم، به فضای ابری منتقل می‌شوند. این موضوع می‌تواند منجر به ایجاد هشدارهای نادرست (مثبت‌های کاذب) شود. علاوه بر این، مشکل دوم این سیستم، فقدان سازوکار ذخیره‌سازی در شرایط قطع اتصال به شبکه ابری است. به همین دلیل، در صورت عدم دسترسی به اینترنت، داده‌ها ممکن است از بین بروند. بنابراین طراحی یک راهکار برای ذخیره‌سازی موقت داده‌ها تا زمان بازیابی اتصال ضروری به نظر می‌رسد.

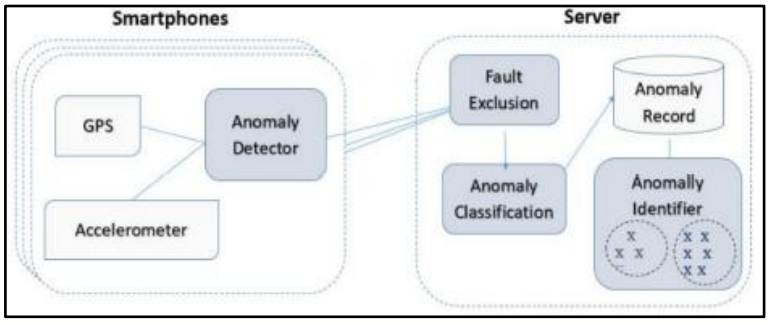


شکل ۳) شماتیک ارزیابی روش سامانه ابری چهار مرحله‌ای [۴۳]

۲-۳ روش سامانه کلاینت سرور سه مرحله‌ای

خانگ و همکاران [۴۴] سیستم کلاینت سرور را به منظور بهره‌برداری از حسگرهای تعبیه شده در گوشی‌های هوشمند برای شناسایی خرابی‌ها پیشنهاد داده‌اند. این سامانه دارای سه مرحله اصلی برای کشف خرابی‌ها است که شامل: آشکارساز اختلالات، حذف خطا و دسته‌بندی اختلالات می‌باشد. فرایند شناسایی به اجزای مختلفی تقسیم شده تا امکان توزیع بهینه وظایف پردازشی میان

کلاینت‌ها و سرور فراهم گردد. اجزای مختلف این سیستم در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. دستگاه شناسایی خرابی که بر روی گوشی هوشمند قرار دارد، مسئولیت شناسایی اولیه خرابی‌هایی نظیر چاله‌های جاده‌ای را بر عهده دارد. در این سامانه، یک برنامه بر روی دستگاه نصب می‌شود که داده‌ها را از حسگر شتاب‌سنج و دستگاه GPS دریافت کرده و آن‌ها را به مؤلفه شناسایی خرابی‌ها تبدیل می‌کند. در صورت اتصال نرم‌افزار به سرور، خرابی شناسایی‌شده منتقل می‌شوند. دستگاه حذف خطا با هدف کاهش نرخ مثبت‌های کاذب، اقدام به حذف خرابی کرده که ناشی از حرکت معمول کاربر با گوشی (نظیر ترمزگیری) است. در مرحله دسته‌بندی خرابی‌ها، سامانه بین انواع مختلف خرابی از جمله چاله‌ها و برآمدگی‌ها تمایز قائل می‌شود. جهت بهبود دقت شناسایی، سامانه از ترکیب و ادغام داده‌ها از منابع مختلف بهره برده و در تحلیل خود عوامل مؤثر نظیر نحوه حرکت خودرو و انواع خرابی‌های سطح جاده را در نظر می‌گیرد. با این حال، عملکرد سامانه به حضور فعال کاربر وابسته است، چرا که فاقد حسگرهای تصویری یا ابزارهای اعتبارسنجی پیشرفته دیگر می‌باشد.



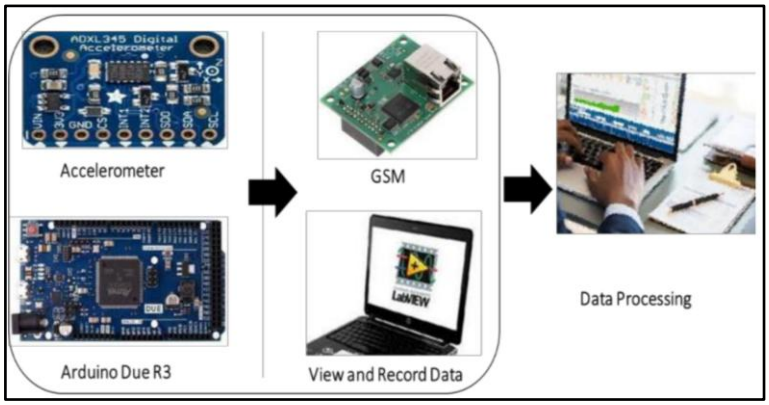
شکل ۴) سیستم سرور گوشی هوشمند جهت تشخیص سلامت جاده [۴۴]

۲-۴ روش سامانه متن‌باز و کم‌هزینه پایش زبری روسازی

بیدگلی و همکاران [۴۵] یک سامانه نوآورانه برای پایش زبری سطح جاده توسعه داده‌اند که در شکل (۵) نشان داده شده است. این سامانه با هدف اندازه‌گیری ناهمواری‌های سطح جاده و تحلیل کیفی وضعیت روسازی طراحی شده است. در طراحی این سیستم، از بسترهای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری متن‌باز بهره گرفته شده که باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش انعطاف‌پذیری در توسعه این سیستم شده است. در بخش سخت‌افزاری، سامانه به دو جزء شتاب‌سنج (به‌عنوان حسگر لرزش و نوسان) و یک بُرد میکروکنترلر مجهز شده است که نقش واحد کنترل مرکزی را ایفا می‌کند. داده‌ها از طریق این حسگرها جمع‌آوری شده و به برد میکروکنترلر منتقل می‌شوند. در ادامه، ارتباط میان اجزای سیستم با استفاده از پروتکل ارتباطی[1] برقرار می‌شود که امکان انتقال داده بین بخش‌های مختلف را با سرعت مناسب و پیچیدگی کم فراهم می‌سازد. در بخش نرم‌افزاری، کدنویسی اصلی سیستم در محیط Arduino IDE انجام شده که مسئولیت دریافت داده از حسگرها و ارسال آن به رابط گرافیکی را برعهده دارد. برای تحلیل داده‌های زبری سطح، از نرم‌افزار LabVIEW استفاده شده است. این نرم‌افزار، به‌عنوان یک محیط توسعه گرافیکی قدرتمند، امکان پردازش آنی داده‌ها و تولید خروجی بصری را فراهم می‌سازد. به کمک این پلتفرم، می‌توان رفتار سطح جاده را در قالب نمودارها و شاخص‌های عددی تحلیل کرد. از جمله مزایای این سامانه می‌توان به هزینه پایین پیاده‌سازی به‌دلیل استفاده از پلتفرم‌های متن‌باز، قابلیت توسعه و سفارشی‌سازی بالا، امکان پایش سریع زبری جاده و استفاده از حسگرهای دقیق با قابلیت نصب آسان بر روی خودروها یا دستگاه‌های اندازه‌گیری اشاره کرد. با این حال، یکی از چالش‌های اصلی این سیستم، نیاز به حضور کارشناسان فنی آموزش دیده برای نصب، کالیبراسیون و تفسیر داده‌ها است. همچنین، عملکرد دقیق آن در شرایط مختلف آب‌وهوایی، نوع آسفالت، سرعت حرکت و وزن وسیله نقلیه، باید در مطالعات میدانی

[1] Inter-Integrated Circuit

گسترده‌تری ارزیابی شود. در مجموع، سامانه پیشنهادی گامی مؤثر در راستای توسعه ابزارهای مقرون‌به‌صرفه و دقیق برای پایش وضعیت جاده‌ها به‌شمار می‌رود و می‌تواند در پروژه‌های مدیریت و نگهداری راه، سیستم‌های هوشمند حمل‌ونقل، و مطالعات مهندسی ترافیک کاربرد گسترده‌ای داشته باشد.



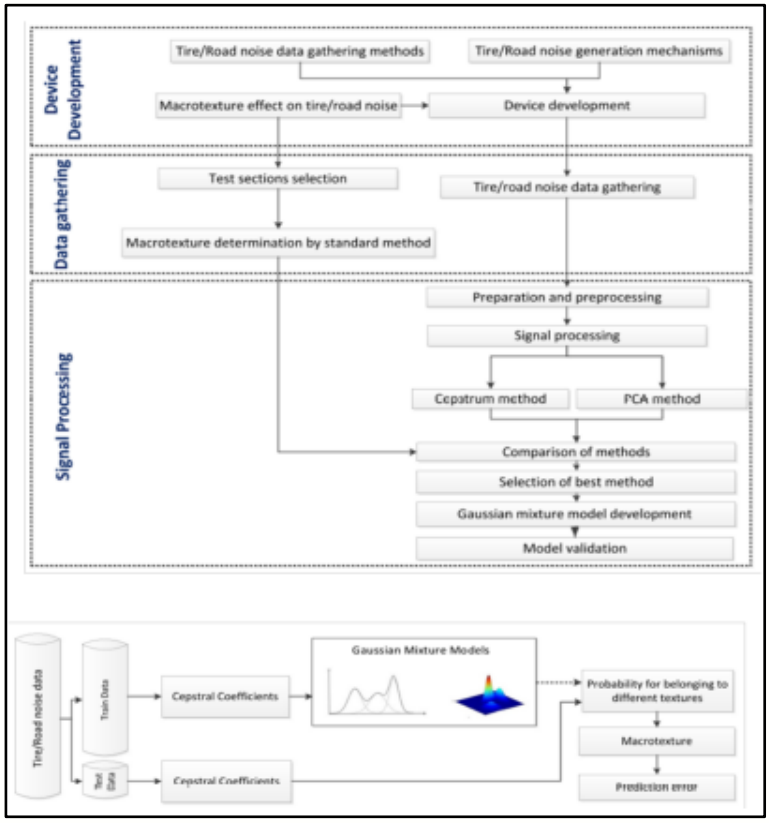
شکل ۵) سیستم پایش ناهمواری جاده [۴۵]

۲-۵ روش پایش بافت سطحی روسازی

در پژوهش انجام‌شده توسط گنجی و همکاران [۴۶] سامانه‌ای نوین برای ارزیابی سطح جاده بر پایه‌ی تحلیل صوتی تماس تایر با روسازی پیشنهاد شده است. این سامانه که در شکل (۶) نشان داده شده، از میکروفون‌ها برای ثبت صدای حاصل از تماس تایر با سطح جاده بهره گرفته و پردازش این داده‌ها با استفاده از تکنیک پردازش سیگنال سپسترال[1] انجام می‌گیرد. هدف از به‌کارگیری این روش، شناسایی مشخصات بافت سطحی روسازی (به‌ویژه بافت ماکروسکوپی) از طریق تحلیل صدای ناشی از حرکت خودرو است. بافت درشت روسازی[2]، که از مشخصات بافت درشت سطح راه است، یکی از پارامترهای کلیدی در مدیریت و ارزیابی عملکرد روسازی به‌شمار می‌رود. این ویژگی تأثیر بسزایی بر تولید نویز اندرکنش تایر با جاده، زهکشی سطحی، اصطکاک و ایمنی دارد. بر این اساس، در مطالعه مذکور، ابزاری ارتعاشی طراحی و ساخته شده که با تأکید بر پاسخ ارتعاشی ناشی از تماس تایر با بافت ماکروسکوپی، داده‌های لازم را ثبت می‌نماید. با وجود نوآوری این سامانه، مطالعه با محدودیت‌هایی از جمله اینکه عملیات جمع‌آوری داده‌ها تنها در سرعت‌های پایین (حداکثر ۳۰ کیلومتر بر ساعت) امکان‌پذیر بوده، چراکه در سرعت‌های بالاتر احتمال ایجاد گردوغبار و کاهش دقت داده‌ها وجود دارد. دوم اینکه داده‌برداری، صرفاً در شرایط محیطی یکنواخت و ثابت صورت گرفته و از تحلیل تأثیر متغیرهای محیطی نظیر رطوبت، دما و نوع تایر صرف‌نظر خواهد شد. همچنین، این پژوهش تنها بر روسازی‌هایی با دانه‌بندی متراکم متمرکز بوده و سایر انواع روسازی، نظیر آسفالت‌های با دانه‌بندی باز یا روسازی‌های بتنی، در چارچوب مطالعه قرار نگرفتند.

از دیگر محدودیت‌های قابل توجه، وابستگی سامانه به حسگرهای صوتی بوده که ممکن است، به نویز محیطی حساس و در نتیجه، منجر به ثبت داده‌های نادرست یا متأثر از عوامل مزاحم شوند. نبود حسگر شتاب‌سنج در سامانه نیز می‌تواند باعث ایجاد داده‌های کاذب در شناسایی خرابی‌ها شود، چراکه تنها اتکا به داده‌های صوتی ممکن است برای تشخیص جامع و دقیق وضعیت سطح جاده کافی نباشد. بر این اساس، محققان توصیه کرده‌اند که برای افزایش اعتبار نتایج به‌دست آمده، آزمایش‌های تکمیلی در شرایط مختلف و با تجهیزات متنوع انجام شود. در مجموع، این سامانه رویکردی خلاقانه در بهره‌گیری از تحلیل صوت برای پایش روسازی ارائه کرده، اما از نظر پایداری و دقت عملکرد، نیازمند بهبود و توسعه‌های بیشتر در مطالعات آتی است.

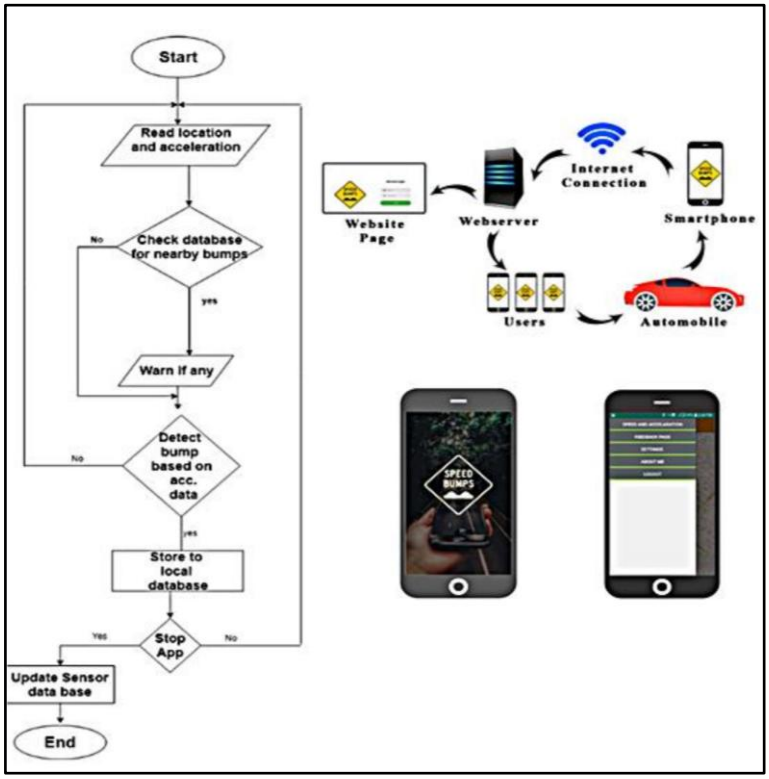
[1] Cepstral Processing
[2] Macrotexture



شکل ۶) سیستم ارزیابی زبری سطح روسازی [۴۶]

۲-۶ سامانه موبایل مبتنی بر گزارش انسانی

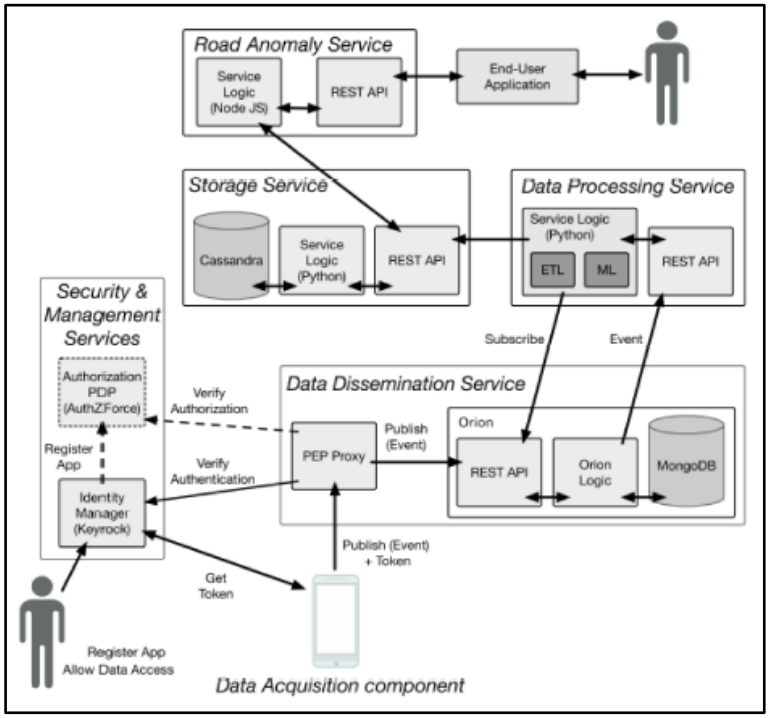
یک اپلیکیشن مبتنی بر موبایل برای ایجاد سیستمی کم‌هزینه جهت تشخیص وضعیت سلامت روسازی جاده‌ها توسط ادوان و همکاران [۴۷] پیشنهاد شده که مدل آن در شکل (۷) نشان داده شده است. این سامانه به‌طور کامل بر داده‌های انسانی متکی بوده و فرآیند تشخیص وضعیت سطح جاده تنها براساس مشاهده‌های مستقیم کاربران از سطح جاده انجام می‌شود. در نتیجه، یکی از محدودیت‌های اصلی این سیستم، احتمال وجود خطا در داده‌های ورودی بوده که ممکن است ناشی از اشتباهات انسانی یا قضاوت‌های متغیر افراد مختلف باشد. این وابستگی به داده‌های انسانی به معنای آن است که در صورت وجود خطا یا عدم دقت در ارزیابی‌ها، سامانه فاقد قابلیت اعتبارسنجی خودکار برای اصلاح داده‌ها است. به این ترتیب، ممکن است نتایج نهایی به‌ویژه در شرایط پیچیده یا متغیر محیطی به نتایج نادرستی منتهی شود. در نهایت، این سیستم، به‌رغم هزینه پایین و سهولت در استفاده، به دلیل عدم وجود سازوکارهای خودکار برای تصحیح و اعتبارسنجی داده‌ها، در مقایسه با روش‌های پیچیده‌تر و مبتنی بر فناوری‌های پیشرفته‌تر، ممکن است نتایج نادرستی را ارائه دهد.



شکل ۷) سیستم تشخیص سلامت روسازی با هزینه کم [۴۷]

۲-۷ اپلیکیشن اندرویدی خودکار با دو بسته عملکردی

سیلوا و همکاران [۴۸] مدل دیگری از اپلیکیشن مبتنی بر سیستم عامل اندروید برای تشخیص وضعیت سلامت روسازی جاده‌ها ارائه کردند که در شکل (۸) نشان داده شده است. طراحی این سیستم به‌گونه‌ای است که شامل دو بسته اصلی ذخیره‌سازی داده‌ها و خدمات پردازش اطلاعات است. همچنین، در این اپلیکیشن خدماتی برای ارسال و توزیع داده‌ها پیش‌بینی شده که امکان انتقال داده‌ها به سیستم‌های مرکزی و تحلیل‌های بعدی را فراهم می‌کند. این سامانه از نظر طراحی دارای کارایی بالا است، زیرا می‌تواند به‌طور خودکار داده‌ها را ضبط کرده و آن‌ها را در فواصل زمانی معین ذخیره نماید. با این حال، یکی از نقاط ضعف این سیستم، عدم وضوح در مورد روش‌های دقیق انتقال و شناسایی داده‌ها است. به عبارتی دیگر، مشخص نیست که چگونه داده‌های جمع‌آوری‌شده از دستگاه‌های مختلف به سیستم منتقل و در فرآیند پردازش، داده‌ها به‌طور دقیق شناسایی می‌شوند. این مسئله می‌تواند منجر به مشکلاتی در یکپارچگی داده‌ها و دقت در تحلیل آن‌ها شود. علاوه بر این، استفاده از ورودی‌های دستی برای ثبت برخی از اطلاعات، ممکن است باعث ایجاد داده‌های مثبت اما کاذب در نتایج سیستم شود. به این ترتیب، سیستم ممکن است به‌طور نادرست مشکلات سطح روسازی را شناسایی کند یا از شناسایی صحیح برخی خرابی‌ها ناتوان باشد.



شکل ۸) سیستم تشخیص ناهمواری و خرابی جاده مبتنی بر اپلیکیشن دو عملکردی [۴۸]

۲-۸ روش سیستم حسگر مبتنی بر آردوینو و اندروید

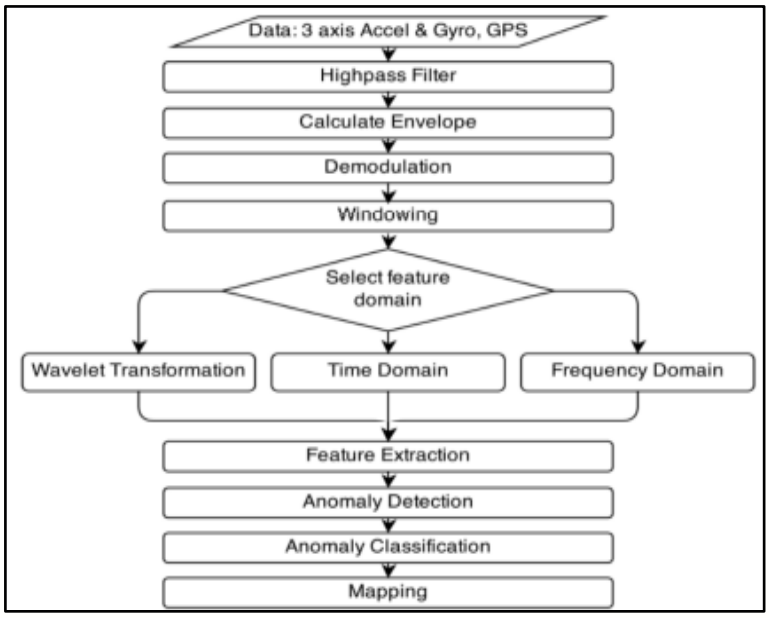
یک سیستم دیگر برای شناسایی وضعیت جاده براساس دستگاه حسگر مبتنی بر آردوینو و یک گوشی هوشمند اندرویدی توسط راجمانه و همکاران [۴۹] پیشنهاد شده که در شکل (۹) این سیستم نشان داده شده است. در این سیستم، سنسور GPS، داده‌ها را دریافت کرده و به صورت خام ذخیره می‌کند. همانطور که بیان شد این سیستم از دو بخش آردوینو و اندروید تشکیل شده که از طریق یک دستگاه بلوتوث به صورت سریال با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند. پس از دریافت داده‌ها توسط سنسور، این اطلاعات از طریق بلوتوث به کارت حافظه SD منتقل شده تا برای پردازش‌های بعدی یا ذخیره‌سازی طولانی‌مدت آماده شوند. این فرایند به‌صورت آنی، داده‌ها را جمع‌آوری و ذخیره می‌کند، که می‌تواند به طور مؤثر در کاربردهای مختلف نظارت بر وضعیت جاده‌ها استفاده شود. با این حال، در این مطالعه جزئیاتی درباره نحوه پردازش داده‌ها یا نوع داده‌های ذخیره شده ارائه نشده است. به عبارت دیگر، چگونگی تحلیل و تفسیر داده‌های جمع‌آوری شده از سنسور GPS و نحوه بهره‌برداری از این داده‌ها در تحلیل وضعیت جاده به‌طور کامل روشن نشده است. این نقص در اطلاعات، ممکن است بر دقت و قابلیت استفاده از سیستم در سناریوهای پیچیده تأثیر منفی بگذارد. علاوه براین، به نظر می‌رسد این سیستم از استحکام و قابلیت اطمینان کافی برای عملکرد در شرایط واقعی جاده برخوردار نیست. ممکن است این سامانه تحت شرایط محیطی مختلف مانند تغییرات دما، رطوبت یا حتی ارتعاشات شدید جاده، دچار اختلال یا خرابی شود. بنابراین، این سیستم به طور بالقوه، نیاز به توسعه و بهبود در راستای افزایش مقاومت و تطبیق‌پذیری با شرایط متنوع جاده دارد.

شکل ۹) سیستم تشخیص وضعیت جاده [۴۹]

۲-۹ روش دستگاه گوشی هوشمند برای جمع‌آوری، پردازش و طبقه‌بندی خرابی سطح جاده

سراج و همکاران [۵۰] یک دستگاه مبتنی بر گوشی هوشمند برای جمع‌آوری، پردازش و توزیع داده‌ها به‌منظور شناسایی و طبقه‌بندی خرابی‌های سطح جاده پیشنهاد داده‌اند که مدل آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است. این سیستم با هدف ردیابی وضعیت و شناسایی زوال بخش‌های مختلف جاده در زمان واقعی طراحی شده است. داده‌های جمع‌آوری شده در این مطالعه، شامل سه مؤلفه حسگری مختلف هستند که برای پردازش اولیه از فیلترهای بالاگذر[1] استفاده می‌کنند. این فیلترها برای حذف نویزهای با فرکانس پایین و تمرکز بر داده‌های با فرکانس بالاتر به‌کار می‌روند، اما جزئیاتی درباره نحوه عملکرد و پارامترهای این فیلترها ارائه نشده است. یکی از چالش‌های اساسی در این سیستم، نحوه تبدیل داده‌ها و ترکیب آن‌هاست. در این مطالعه مشخص نشده است که چگونه سه نوع داده مختلف حسگری با یکدیگر ترکیب و همگام‌سازی می‌شوند. نبود شفافیت در این بخش ممکن است، منجر به تفسیر نادرست داده‌ها و برچسب‌گذاری اشتباه وضعیت سطح جاده شود. به ویژه در شرایط پیچیده یا زمانی که داده‌های حسگر به‌طور همزمان وارد سیستم می‌شوند، نداشتن یک فرایند دقیق و یکپارچه برای ترکیب داده‌ها، می‌تواند به نتایج نادرست منتهی شود. در نتیجه، این سیستم اگرچه قادر به شناسایی و طبقه‌بندی خرابی‌های سطح جاده است، اما به دلیل محدودیت‌ها در نحوه پردازش داده‌ها و ترکیب آن‌ها، ممکن است مشکلاتی در دقت و صحت نتایج ایجاد کند. بنابراین، بهبود روش‌های پردازش داده‌ها و ارائه جزئیات دقیق‌تر در مورد نحوه ترکیب داده‌ها می‌تواند به افزایش کارایی و دقت این سیستم کمک کند.

[1] High Pass Filters

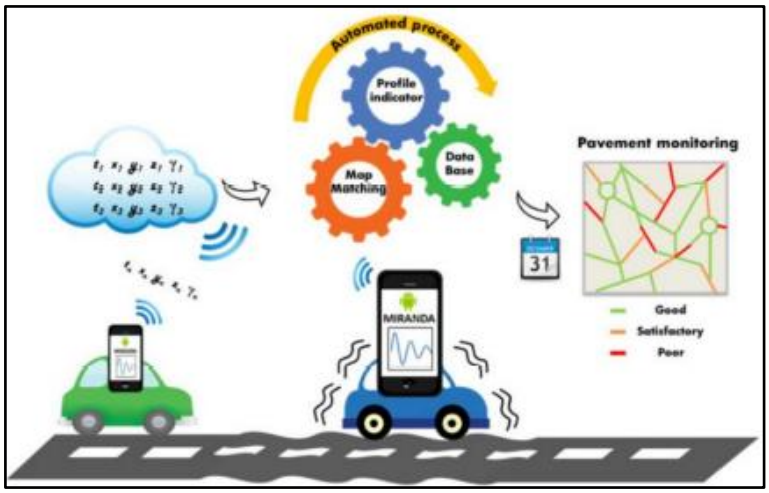


شکل ۱۰) ارزیابی وضعیت جاده با استفاده از دستگاه‌های گوشی هوشمند [۵۰]

۲-۱۰ سیستم خودکار اندازه‌گیری و پردازش داده‌های میراندا

یک سیستم خودکار اندازه‌گیری و پردازش داده‌ها تحت عنوان سیستم میراندا[1] توسط اریکسون و همکاران [۵۱] معرفی شده است. سیستم میراندا (شکل ۱۱) یک سیستم خودکار اندازه‌گیری برای پایش یکنواختی طولی سطح جاده است که توسط IFSTTAR توسعه یافته و بر اساس استفاده از خودروهای کاوشگر[2] مجهز به حسگرهای کم هزینه که در گوشی‌های هوشمند نیز یافت می‌شود، طراحی شده است. این سیستم از یک روش مشابه با تکنیک‌های پیشین برای ذخیره‌سازی داده‌ها استفاده می‌کند، به این معنا که داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط حسگرها ذخیره شده و سپس برای پردازش و تحلیل ارسال می‌شوند. این شیوه ذخیره‌سازی با وجود کارایی خود، ممکن است با مشکلاتی مواجه شود. یکی از مشکلات عمده این است که سیستم ممکن است با از دست رفتن داده‌ها یا ایجاد داده‌های مثبت اما کاذب روبه‌رو شود. از دست رفتن داده‌ها می‌تواند به دلیل مشکلات فنی در انتقال داده‌ها یا خطاهای انسانی رخ دهد، و داده‌های مثبتِ کاذب، ممکن است به علت حساسیت زیاد حسگرها و عدم تمایز دقیق میان انواع مختلف خرابی‌های سطح جاده ایجاد شوند. به‌طور کلی، سیستم میراندا به‌عنوان یک روش خودکار و مبتنی بر حسگرهای کم هزینه برای پایش وضعیت سطح جاده، می‌تواند مزایای قابل‌توجهی در تحلیل وضعیت جاده‌ها ارائه دهد.

[1] Miranda
[2] Probe Vehicles



شکل ۱۱) سیستم پایش جاده‌ای میراندا [۵۱]

۲-۱۱ سیستم P2 مبتنی بر حسگرها

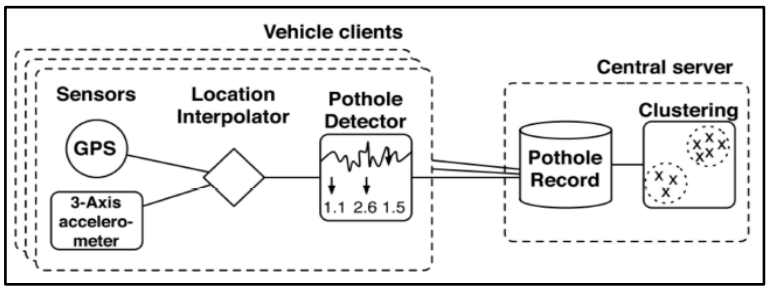
یک سیستم با نام P2 و رویکرد مبتنی بر حسگرها توسط اریکسون و همکاران [۵۲] پیشنهاد شده است. سیستم P2 شامل مجموعه‌ای از خودروهای مجهز به حسگر و یک سرور مرکزی است که در شکل (۱۲) نشان داده شده است. این روش از چندین رکورد از افراد مختلف استفاده می‌کند. در این روش، هر فرد با استفاده از حسگرهای نصب‌شده بر روی خودرو، مقادیر مختلفی را ثبت کرده و این داده‌ها سپس با سایر افراد دیگر به اشتراک گذاشته می‌شود. پس از ادغام این داده‌ها، یک تأییدیه برای رکوردها ایجاد می‌شود تا اطمینان حاصل شود که اطلاعات جمع‌آوری شده دقیق و معتبر است. با این حال، مشکلاتی در این روش نیز وجود دارد که یکی از آن‌ها این است که هر فردی دارای تحلیل و رویکرد خاص خود بوده که ممکن است منجر به ثبت مقادیر متفاوت برای یک خرابی مشابه شود. به عبارت دیگر، ممکن است داده‌های ثبت شده توسط خودروهای مختلف به دلیل تفاوت در تنظیمات حسگرها یا ویژگی‌های خاص هر دستگاه، تفاوت‌هایی داشته باشد که در تحلیل نهایی تأثیر بگذارد. رویکرد خوشه‌بندی[1] برای جمع‌آوری و پردازش داده‌ها از جنبه عملی قابل‌توجه است، اما این روش تنها زمانی به‌طور کامل مؤثر است که چاله‌ها یا خرابی‌های سطح جاده شناسایی و گزارش شوند. در صورتی که این گزارش‌ها ثبت نشوند، ممکن است خودروهایی که از آن بخش جاده عبور می‌کنند نیز تحت تأثیر خرابی‌ها قرار گیرند و مشکلاتی را تجربه کنند. بنابراین، این سیستم نیازمند یک سازوکار مؤثر برای شناسایی و گزارش دقیق وضعیت سطح جاده در تمام نقاط است.

۳- تحلیل و مقایسه روش‌های پایش سلامت جاده

روش‌های پایش سلامت جاده را می‌توان به طور کلی در پنج دسته اصلی روش‌های سنتی بازدید میدانی، حسگرهای تعبیه‌شده در زیرساخت، سامانه‌های مبتنی بر وسایل نقلیه، پایش مبتنی بر داده‌برداری جمعی[2] و فناوری‌های تصویربرداری هوایی مانند پهپادها یا تصاویر ماهواره‌ای تقسیم‌بندی کرد. هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند که در انتخاب روش مناسب برای شرایط مختلف نقش کلیدی دارند. روش‌های سنتی مبتنی بر بازدید میدانی از جمله قدیمی‌ترین و متداول‌ترین روش‌های ارزیابی وضعیت جاده‌ها هستند. این روش‌ها علی‌رغم دقت بالا در ارزیابی کیفی، با محدودیت‌هایی نظیر هزینه‌های بالا، زمان‌بر بودن و نیاز به نیروی انسانی متخصص مواجه‌اند.

[1] Clustering

[2] Crowdsourcing



شکل ۱۲- شماتیک سیستم پایش جاده به روش P2 [۵۲]

در مقابل، استفاده از حسگرهای تعبیه شده در سطح یا زیرسطح جاده مانند کرنش‌سنج‌ها، حسگرهای فشار و ارتعاش، امکان پایش پیوسته و با دقت بالا را فراهم می‌کند، اما هزینه‌های نصب و نگهداری آن‌ها بالا بوده و مستلزم ایجاد زیرساخت‌های تخصصی است، ازاین‌رو بیشتر در پروژه‌های بزرگ مقیاس مانند پل‌ها، تونل‌ها یا بزرگراه‌های حیاتی کاربرد دارند.

یکی از روش‌های نوین و کم‌هزینه‌تر، استفاده از سامانه‌های مبتنی بر وسایل نقلیه است که با نصب حسگرهایی مانند شتاب‌سنج، GPS و دوربین روی خودروها انجام می‌شود. این روش قابلیت پوشش وسیع‌تری دارد و به‌ویژه در مسیرهای طولانی و پرتردد می‌تواند اطلاعات ارزشمندی ارائه دهد. با این حال، کیفیت داده‌ها می‌تواند تحت تأثیر شرایط جاده، خودرو و رفتار راننده قرار گیرد و نیازمند پردازش پیشرفته برای حذف نویز و استخراج اطلاعات معتبر است.

در سال‌های اخیر، داده‌های جمع‌آوری‌شده از تلفن‌های همراه کاربران از طریق اپلیکیشن‌های موبایلی به‌عنوان منبع اطلاعاتی جدید برای پایش سلامت جاده‌ها مطرح شده‌اند. این روش با هزینه بسیار پایین، قابلیت مقیاس‌پذیری بالا و پوشش گسترده در مناطق مختلف، گزینه‌ای جذاب برای کشورهای در حال توسعه به‌شمار می‌رود. البته داده‌های جمع‌سپاری‌شده معمولاً دارای کیفیت ناهمگن و دقت کمتر نسبت به روش‌های دیگر هستند و نیاز به الگوریتم‌های پالایش و تحلیل دارند. در نهایت، تصویربرداری هوایی با استفاده از پهپادها یا تصاویر ماهواره‌ای نیز به‌عنوان روشی نوین برای پایش سطحی جاده‌ها مورد توجه قرار گرفته است. این فناوری‌ها امکان پایش سریع و بدون تماس فیزیکی را در مناطق صعب‌العبور فراهم می‌کنند، ولی محدودیت‌هایی مانند هزینه بالا، وابستگی به شرایط جوی و نیاز به پردازش تصویر پیشرفته دارند. در مجموع، انتخاب روش مناسب برای پایش سلامت جاده‌ها باید بر اساس معیارهایی مانند دقت مورد نیاز، هزینه اجرا، پوشش مکانی، شرایط اقلیمی، دسترسی به زیرساخت و اهداف پروژه انجام گیرد. ترکیب چند روش مکمل نیز می‌تواند موجب افزایش دقت و کارایی سامانه‌های پایش شود.

برای مقایسه و ارزیابی روش‌های مختلف پایش سلامت جاده به‌صورت علمی و نظام‌مند، لازم است از مجموعه‌ای از پارامترهای کلیدی استفاده شود که جنبه‌های مختلف عملکرد، هزینه، و قابلیت اجرای هر روش را پوشش می‌دهند. نخستین پارامتر مهم، دقت داده‌ها[1] است که نشان‌دهنده میزان صحت و اعتبار اطلاعات به‌دست‌آمده نسبت به وضعیت واقعی جاده می‌باشد و تأثیر مستقیمی بر تصمیم‌گیری‌های مهندسی دارد .هزینه اجرا و نگهداری نیز یکی از اساسی‌ترین معیارها در انتخاب روش مناسب به‌شمار می‌رود، به‌ویژه در پروژه‌هایی با محدودیت منابع مالی. پوشش مکانی[2] به توانایی سیستم در نظارت بر گستره وسیعی از مسیرهای شهری، روستایی یا صعب‌العبور اشاره دارد. میزان اتوماسیون[3] نیز اهمیت دارد، زیرا روش‌هایی که وابستگی کمتری به نیروی انسانی دارند، معمولاً قابلیت اطمینان و بهره‌وری بیشتری دارند. همچنین، پیوستگی زمانی یا نرخ نمونه‌برداری[4] مشخص می‌کند که داده‌ها به‌صورت مداوم، دوره‌ای یا لحظه‌ای گردآوری می‌شوند، که برای پایش‌های بلندمدت و تحلیل روند خرابی‌ها حیاتی است. از دیگر پارامترهای مهم می‌توان به نیاز به زیرساخت

[1] Accuracy
[2] Spatial Coverage
[3] Level of Automation
[4] Temporal Continuity

فیزیکی اشاره کرد، که شامل تجهیزات لازم برای نصب حسگرها یا ابزارهای جمع‌آوری داده است. مقاومت در برابر شرایط محیطی نیز تعیین می‌کند که سیستم تا چه اندازه می‌تواند در شرایط جوی مختلف عملکرد مناسب داشته باشد. همچنین، پیچیدگی تحلیل داده‌ها[1] می‌تواند تعیین‌کننده نیاز به تخصص بالا یا الگوریتم‌های پیچیده برای تفسیر داده‌ها باشد. در ارزیابی‌های کلان، قابلیت مقیاس‌پذیری[2] یکی دیگر از شاخص‌های کلیدی است، زیرا یک روش مناسب باید توان گسترش به مناطق وسیع‌تر را بدون افزایش نمایی هزینه‌ها داشته باشد. در نهایت، سرعت دستیابی به اطلاعات[3] نیز به بازه زمانی بین وقوع خرابی و شناسایی آن توسط سامانه اشاره دارد که در سامانه‌های هشدار سریع اهمیت زیادی دارد. در ادامه، یک جدول مقایسه‌ای تحلیلی بین روش‌های مختلف پایش سلامت جاده بر اساس پارامترهای کلیدی ارائه شده است.

۴- نتیجه‌گیری

پایش سلامت جاده‌ها به عنوان بخش مهمی از مدیریت زیرساخت‌های حمل‌ونقل، نقش مؤثری در تضمین ایمنی، کاهش هزینه‌های نگهداری و ارتقاء بهره‌وری سیستم حمل‌ونقل ایفا می‌کند. در این مقاله با تمرکز بر روش‌های نوین پایش و به‌ویژه استفاده از حسگرهای هوشمند و فناوری‌های نوظهور، رویکردهای مختلف مورد تحلیل قرار گرفت. بررسی تطبیقی این روش‌ها نشان داد که هیچ‌کدام به‌تنهایی قادر به پوشش کامل نیازهای عملکردی، اقتصادی و عملیاتی نیستند و انتخاب روش مناسب مستلزم توجه به مجموعه‌ای از پارامترهای کلیدی است. مهم‌ترین پارامترهای مقایسه‌ای شامل دقت داده‌ها، هزینه اجرا و نگهداری، پوشش مکانی، میزان اتوماسیون، پیوستگی زمانی، نیاز به زیرساخت فیزیکی، مقاومت در برابر شرایط محیطی، پیچیدگی تحلیل داده‌ها، مقیاس‌پذیری و سرعت دستیابی به اطلاعات بودند. در این میان، روش‌های سنتی با وجود دقت بالا، از محدودیت‌هایی چون هزینه زیاد و پوشش محدود رنج می‌برند، در حالی که روش‌های نوین مانند داده‌های جمع‌سپاری، وسایل نقلیه حسگرپوش و تحلیل تصاویر پهپادها، با هزینه کمتر، پوشش وسیع‌تر و اتوماسیون بالا، گزینه‌های کارآمدتری به‌ویژه برای پایش گسترده و هوشمند محسوب می‌شوند. با در نظر گرفتن مزایا و محدودیت‌های هر روش، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ترکیب هوشمندانه روش‌ها، یعنی بهره‌گیری هم‌زمان از فناوری‌های دقیق (مانند حسگرهای فیزیکی یا تصویربرداری هوایی) و فناوری‌های مقیاس‌پذیر و کم‌هزینه (مانند داده‌های موبایلی یا جمع‌سپاری)، بهترین راهکار برای ایجاد سامانه‌های پایش جامع، منعطف و مقرون‌به‌صرفه خواهد بود. در نهایت، حرکت به سوی بهره‌برداری از داده‌های بزرگ، تحلیل‌های پیش‌بینانه و سامانه‌های خودکار، افق جدیدی در نگهداری جاده‌ها می‌گشاید که در آن تصمیم‌گیری‌ها نه‌تنها دقیق و به‌هنگام، بلکه بر پایه داده‌های زنده، هوشمند و یکپارچه صورت می‌پذیرد. چنین نگاهی، لازمه عبور از مدل‌های سنتی به سوی مدیریت نوین و پویای زیرساخت‌های حمل‌ونقل در آینده‌ای نزدیک است.

[1] Data Processing Complexity
[2] Scalability
[3] Data Latency

جدول ۱) مقایسه‌ی روش‌های پایش راه‌ها

سیستم	حسگرها و تجهیزات استفاده شده	ویژگی‌ها	چالش‌ها و محدودیت‌ها	مزایا	معایب
سیستم پاوار و همکاران [۴۳]	حسگرهای شتاب‌سنج در گوشی‌های هوشمند	جمع‌آوری داده‌ها از گوشی هوشمند	احتمال ایجاد مثبت‌های کاذب، فقدان ذخیره‌سازی محلی در شرایط قطع اتصال به شبکه	استفاده از گوشی‌های هوشمند رایج، کاهش هزینه‌ها	وابستگی به دقت حسگرهای گوشی، محدودیت‌های عملکرد در شرایط سخت
سیستم خانگ و همکاران [۴۴]	حسگر شتاب‌سنج، GPS، گوشی هوشمند، سرور کلاینت-سرور	شناسایی خرابی‌ها و طبقه‌بندی اختلالات در سطح جاده	وابستگی به حضور کاربر، عدم وجود ابزارهای اعتبارسنجی پیشرفته	قابلیت شناسایی دقیق خرابی‌ها، استفاده از حسگرهای مختلف برای دقت بیشتر	نیاز به حضور فعال کاربر، خطا در قضاوت‌های انسانی
سیستم بیدگلی و همکاران [۴۵]	شتاب‌سنج، برد میکروکنترلر، گوشی هوشمند	سیستم مبتنی بر آردوینو و نرم‌افزار LabVIEW برای تحلیل و نمایش- هزینه پایین و سفارشی‌سازی بالا	نیاز به کارشناسان فنی برای نصب و کالیبراسیون، نیاز به ارزیابی در شرایط مختلف	هزینه پایین و انعطاف‌پذیری بالا، قابلیت سفارشی‌سازی	نیاز به تخصص فنی، محدودیت در تست‌های میدانی گسترده
سیستم گنجی و همکاران [۴۶]	میکروفن، پردازش سیگنال سپسترال	شناسایی ویژگی‌های بافت سطحی جاده از طریق تحلیل صوتی تماس تایر	محدودیت در سرعت‌های بالا، حساسیت به نویز محیطی، وابستگی به داده‌های صوتی	رویکرد نوآورانه با استفاده از صوت، هزینه کمتر نسبت به سیستم‌های پیچیده‌تر	حساسیت به نویز محیطی، عملکرد محدود در سرعت‌های بالا
سیستم ادوان و همکاران [۴۷]	داده‌های انسانی (مشاهده مستقیم وضعیت سطح جاده)	هزینه پایین و سهولت در استفاده	خطای انسانی در داده‌ها، فاقد قابلیت اعتبارسنجی خودکار	آسان برای استفاده، نیاز به هزینه کمتر نسبت به سیستم‌های پیچیده	دقت پایین به دلیل خطای انسانی، عدم اعتبارسنجی خودکار
سیستم سیلوا و همکاران [۴۸]	داده‌های خودکار از گوشی‌های هوشمند	جمع‌آوری داده‌ها به‌طور خودکار در فواصل زمانی معین	عدم وضوح در روش‌های انتقال و شناسایی داده‌ها، استفاده از ورودی‌های دستی برای ثبت اطلاعات	جمع‌آوری داده‌های خودکار، قابلیت ارسال داده‌ها به سیستم‌های مرکزی	نبود وضوح در انتقال داده‌ها، ورودی‌های دستی ممکن است به نتایج نادرست منجر شوند
سیستم راجمانه و همکاران [۴۹]	سنسور GPS، آردوینو، بلوتوث	جمع‌آوری داده‌ها به‌صورت بی‌درنگ و ذخیره‌سازی آن‌ها	عدم وضوح در پردازش داده‌ها، استحکام کم در شرایط محیطی مختلف	جمع‌آوری داده‌ها در زمان واقعی، طراحی ساده و مقرون به صرفه	مشکلات در پردازش داده‌ها، حساسیت به شرایط محیطی مختلف
سیستم	حسگرهای	استفاده از فیلترهای	مشکل در ترکیب و	استفاده از فیلترهای	مشکل در

سیستم	حسگرها و تجهیزات استفاده شده	ویژگی‌ها	چالش‌ها و محدودیت‌ها	مزایا	معایب
سراج و همکاران [۵۰]	مختلف (شامل شتاب‌سنج)	بالاگذر برای پردازش اولیه- شناسایی و طبقه‌بندی رویدادها	همگام‌سازی داده‌های حسگری، تفسیر نادرست داده‌ها	پیشرفته برای پردازش داده‌ها، شناسایی رویدادهای سطح جاده	همگام‌سازی داده‌ها، احتمال خطا در تفسیر داده‌ها
سیستم میراندا (اریکسون) [۵۱]	حسگرهای کم‌هزینه (در گوشی‌های هوشمند)	سیستم خودکار برای پایش یکنواختی طولی سطح جاده	از دست رفتن داده‌ها، مثبت‌های کاذب به دلیل حساسیت بیش از حد حسگرها	استفاده از حسگرهای کم‌هزینه و گوشی‌های هوشمند، خودکار بودن جمع‌آوری داده‌ها	مشکلات در حفظ یکپارچگی داده‌ها، حساسیت بیش از حد حسگرها
سیستم P2 (اریکسون) [۵۲]	خودروهای مجهز به حسگر، سرور مرکزی	استفاده از داده‌های ثبت‌شده توسط خودروهای مختلف و اشتراک‌گذاری آن‌ها	تفاوت در تنظیمات حسگرها در خودروهای مختلف، نیاز به مکانیزم مؤثر برای شناسایی و گزارش خرابی‌ها	جمع‌آوری داده‌ها از چندین خودرو برای دقت بیشتر، اشتراک‌گذاری داده‌ها برای افزایش دقت	تفاوت در تنظیمات خودروها، نیاز به مکانیزم مؤثر برای شناسایی خرابی‌ها

۱. مراجع

[۱] P. Harikrishnan and V. P. Gopi, "Vehicle vibration signal processing for road surface monitoring," *IEEE Sensors Journal,* vol. 17, no. 16, pp. 5192-5197, 2017.

[۲] K. De Zoysa, C. Keppitiyagama, G. P. Seneviratne, and W. Shihan, "A public transport system based sensor network for road surface condition monitoring," in *Proceedings of the 2007 workshop on Networked systems for developing regions*, 2007, pp. 1-6 .

[۳] V. Bassoo, Y. Beeharry, R. Ramjug-Ballgobin, M. Deenmahomed, and K. Soin, "A low-cost real-time road surface condition monitoring and alert system," in *2022 4th International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronic and Communications Engineering (ELECOM)*, 2022: IEEE, pp. 1-5 .

[۴] G. Alessandroni *et al.*, "Smartroadsense: Collaborative Road surface condition monitoring," *Proceedings of the UBICOMM,* pp. 210-215, 2014.

[۵] E. Golov, S. Evtyukov, M. Protsuto, S. Evtyukov, and E. Sorokina, "Influence of the road surface roughness (according to the International Roughness Index) on road safety," *Transportation research procedia,* vol. 63, pp. 999-1006, 2022.

[۶] X. Nguyen, T. Nguyen, and P. H. Tran, "The effect of road surface roughness to recommended speed of vehicles," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* ,2020 ,vol. 886, no. 1: IOP Publishing, p. 012014 .

[۷] A. Babu, D. Gerber, S. V. Baumgartner, and G. Krieger, "Road Surface Roughness Estimation Using Spaceborne Synthetic Aperture Radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,* vol. 20, pp. 1-5, 202.۳

[۸] A. Louhghalam, M. Akbarian, and F.-J. Ulm, "Roughness-induced pavement–vehicle interactions: key parameters and impact on vehicle fuel consumption," *Transportation Research Record,* vol. 2525, no. 1, pp. 62-70, 2015.

[۹] A. Basavaraju, J. Du, F. Zhou, and J. Ji, "A machine learning approach to road surface anomaly assessment using smartphone sensors," *IEEE Sensors Journal,* vol. 20, no. 5, pp. 2635-2647, 2019.

[۱۰] S. Sattar, S. Li, and M. Chapman, "Road surface monitoring using smartphone sensors: A review," *Sensors,* vol. 18, no. 11, p. 3845, 2018.

[۱۱] A. Khandakar *et al.*, "Harnessing Smartphone Sensors for Enhanced Road Safety: A Comprehensive Dataset and Review," *Scientific Data,* vol. 12, no. 1, p. 418, 2025.

[۱۲] C. Wu *et al.*, "An automated machine-learning approach for road pothole detection using smartphone sensor data," *Sensors,* vol. 20, no. 19, p. 5564, 2020.

[۱۳] P. K. Shukla, A. Vijayvargiya, and R. Kumar, "Human activity recognition using accelerometer and gyroscope data from smartphones ",in *2020*

Portable Road Health Monitoring System Utilizing Measurement Uncertainty Analysis," *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering,* vol. 10, no. 4, p. 044501, 2024.

[۲۶] S. H .Khahro, Y. Javed, and Z. A. Memon, "Low Cost Road Health Monitoring System: A Case of Flexible Pavements," *Sustainability,* vol. 13, no. 18, p. 10272, 2021.

[۲۷] M. A. Khan, M. H. Tariq, A. Ali, Y. A. Bakhtiar, and T. Kamal, "Design and Implementation of Smart Inertial Profilometer System for Road Quality Assessment," in *IECON 2023-49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2023: IEEE, pp. 1-6 .

[۲۸] D. M. Dilip, "Thermal Digital Twins of Asphalt Pavements using Physics-informed Neural Networks".

[۲۹] Z. Dong, H. Song, X. Ma, Y. Li, and D. Wang, "Intelligent Weigh-in-Motion System Using Embedded MEMS Sensors for Pavement Monitoring," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* 2024.

[۳۰] M. Barriera, S. Pouget, B. Lebental, and J. Van Rompu, "In situ pavement monitoring: A review," *Infrastructures,* vol. 5, no. 2, p. 18, 2020.

[۳۱] N. A. Prabatama, M. L. Nguyen, P. Hornych, S. Mariani, and J. M. Laheurte, "Pavement Monitoring with a Wireless Sensor Network of MEMS Accelerometers," in *2024 IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N)*, 2024: IEEE, pp. 1-6 .

[۳۲] J. Braunfelds *et al.*, "Road pavement structural health monitoring by embedded fiber-bragg-grating-based optical sensors," *Sensors,* vol. 22, no ,۱۲ .p. 4581, 2022.

[۳۳] M. Abdellatif, H. Peel, A. G. Cohn, and R. Fuentes, "Hyperspectral imaging for autonomous inspection of road pavement defects," in *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)* :۲۰۱۹ ,International Association for Automation and Robotics in Construction, pp. 384-392 .

[۳۴] S. Jana, S. Thangam, A. Kishore, V. Sai Kumar, and S. Vandana, "Transfer learning based deep convolutional neural network model for pavement crack detection from images," *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications,* vol. 13, no. 1, pp. 1209-1223, 2022.

[۳۵] D. Grabowski, M. Szczodrak, and A. Czyżewski, "Economical methods for measuring road surface roughness," *Metrology and Measurement Systems* ,pp. 533-549-533-549, *International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3)*, 2020: IEEE, pp. 1-6 .

[۱۴] P. Kamranfar, D. Lattanzi, A. Shehu, and S. Stoffels, "Pavement distress recognition via wavelet-based clustering of smartphone accelerometer data," *Journal of Computing in Civil Engineering,* vol. 36, no. 4, p. 04022007, 2022.

[۱۵] A. F. Olsen and J. Torresen, "Smartphone accelerometer data used for detecting human emotions," in *2016 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*, 2016: IEEE, pp. 410-415 .

[۱۶] M. Monteiro, C. Cabeza, and A. C. Marti, "Acceleration measurements using smartphone sensors: Dealing with the equivalence principle," *Revista Brasileira de Ensino de Física,* vol. 37, p. 1303, 2015.

[۱۷] J. Wahlström, I. Skog, P. Händel, B. Bradley, S. Madden, and H. Balakrishnan, "Smartphone placement within vehicles," *IEEE transactions on intelligent transportation systems,* vol. 21, no. 2, pp. 669-679, 2019.

[۱۸] J. Jun, R. Guensler, and J. Ogle, "Smoothing methods designed to minimize the impact of GPS random error on travel distance, speed, and acceleration profile estimates," *Transportation Research Record,* 2005.

[۱۹] Á. Catalá-Prat, F. Köster, and R. Reulke, "Image and laser scanner processing as confident cues for object detection in driving situations," in *Proc. of the ISPRS Com. V Symposium:" Image Engineering and Vision Metrology*, 2010 .

[۲۰] V. Usenko, J. Engel, J. Stückler, and D. Cremers, "Reconstructing street-scenes in real-time from a driving car," in *2015 International Conference on 3D Vision*, 2015: IEEE, pp. 607-614 .

[۲۱] H. Qin and H. Qin, "Image-based dedicated methods of night traffic visibility estimation," *Applied Sciences,* vol. 10, no. 2, p. 440, 2020.

[۲۲] L. D'Orazio, F. Visintainer, and M. Darin, "Sensor networks on the car: State of the art and future challenges," *2011 Design, Automation & Test in Europe,* pp. 1-6, 2011.

[۲۳] R. Roberts, G. Giancontieri, L. Inzerillo, and G. Di Mino, "Towards low-cost pavement condition health monitoring and analysis using deep learning," *Applied Sciences,* vol. 10, no. 1, p. 319, 2020.

[۲۴] S. H. Khahro *et al.*, "Low-cost pavement management system for developing countries," *Sustainability,* vol. 13, no. 11, p. 5941, 2021.

[۲۵] Y. Wang *et al.*, "An Android Sensors-Based

[۴۵] M. A. Bidgoli, A. Golroo, H. S. Nadjar, A. G. Rashidabad, and M. R. Ganji, "Road roughness measurement using a cost-effective sensor-based monitoring system," *Automation in Construction,* vol. 104, pp. 140-152, 2019.

[۴۶] M. R. Ganji, A. Golroo, H. Sheikhzadeh, A. Ghelmani, and M. A. Bidgoli" ,Dense-graded asphalt pavement macrotexture measurement using tire/road noise monitoring," *Automation in construction,* vol. 106, p. 102887, 2019.

[۴۷] E. Edwan, N. Sarsour, and M. Alatrash, "Mobile application for bumps detection and warning utilizing smartphone sensors," in *2019 International conference on promising electronic technologies (ICPET)*, 2019: IEEE, pp. 50-54 .

[۴۸] N. Silva, V. Shah, J. Soares, and H. Rodrigues, "Road anomalies detection system evaluation," *Sensors,* vol. 18, no. 7, p. 1984 , .۲۰۱۸

[۴۹] O. Rajmane, V. Rane, and A. Bhosale, "Road condition detection using arduino based sensing module and android smartphone," *Int. J. Adv. Eng. Res. Dev,* vol. 4, pp. 52-57, 2017.

[۵۰] F. Seraj, B. J. Van Der Zwaag, A. Dilo, T. Luarasi, and P. Havinga, "RoADS: A road pavement monitoring system for anomaly detection using smart phones," in *International Workshop on Modeling Social Media*, 2014: Springer, pp. 128-146 .

[۵۱] F. Menant, J.-M. Martin, D. Meignen, D. Bétaille, and M. Ortiz, "Using probe vehicles for pavement monitoring: experimental results from tests performed on a road network," *Transportation Research Procedia,* vol. 14, pp. 3013-3020, 2016.

[۵۲] J. Eriksson, L. Girod, B. Hull, R. Newton, S. Madden, and H. Balakrishnan, "The pothole patrol: using a mobile sensor network for road surface monitoring," in *Proceedings of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services*, 2008, pp. 29-39. 2018.

[۳۶] S. Cafiso, A. Di Graziano, and S. Battiato, "Evaluation of pavement surface distress using digital image collection and analysis," in *Seventh International congress on advances in civil Engineering*, 2006, pp. 1-10 .

[۳۷] H. A. Gabbar *et al.*, "HAIS: Highways Automated-Inspection System," *Technologies,* vol. 11, no. 2, p. 51, 2023.

[۳۸] L. Manoni, S. Orcioni, and M. Conti, "Recent Advancements in Deep Learning Techniques for Road Condition Monitoring: A Comprehensive Review ",*IEEE Access,* 2024.

[۳۹] M. Adamiak *et al.*, "Deep Learning Enhanced Road Traffic Analysis: Scalable Vehicle Detection and Velocity Estimation Using PlanetScope Imagery," *arXiv preprint arXiv:2410.14698,* 2024.

[۴۰] V. Radojčić, A. S. Cvetković, M. Dobrojević, P. Spalević, and J. M. E. Guider, "Advancements in Computer Vision Applications for Traffic Surveillance Systems," 2024.

[۴۱] N. V. Hung, N. H. Dung, T. M. Hoang, and N. T. Dzung, "A traffic monitoring system for a mixed traffic flow via road estimation and analysis," in *2016 IEEE Sixth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, 2016: IEEE, pp. 375-378 .

[۴۲] R. Du, G. Qiu, K. Gao, L. Hu, and L. Liu, "Abnormal Road surface recognition based on smartphone acceleration sensor ",*Sensors,* vol. 20, no. 2, p. 451, 2020.

[۴۳] T. Dange, D. Pawar, R. Potdar, S. Kaul, and P. Pawar, "Evaluation of Road Condition Using Android Sensors and Cloud Computing," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET),* 2019.

[۴۴] N. Van Khang and É. Renault, "Cooperative sensing and analysis for a smart pothole detection," in *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2019: IEEE, pp. 1785-1790 .