

## ارزیابی ناهمواری سطح روسازی بر اساس تحلیل ارتعاشات ناشی از سامانه پایش سلامت راه

محمد ارباب پور بیدگلی<sup>۱</sup>، امیر گلرو<sup>۱\*</sup>، علی غلمانی رشیدآباد<sup>۲</sup>، امیر ابوالفضل صورتگر<sup>۲</sup>، محمد اعظم خسروی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶-۱۲-۰۹

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۲-۰۶

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۲-۰۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۲-۱۰

### کلمات کلیدی:

سیستم مدیریت روسازی

نیمرخ طولی راه

شاخص بین المللی ناهمواری

پردازش سیگنال دیجیتال

حسگر شتاب سنج

**خلاصه:** پیاده سازی یک سیستم مدیریت روسازی کارآمد مشروط به برداشت مطلوب اطلاعات از وضعیت روسازی هر شبکه راهی است. برداشت اطلاعات به وسیله سامانه های مکانیزه باوجود دقت و سرعت برداشت داده کافی، مورد استقبال است. در این راستا سامانه های متنوعی ارائه شده اند که هزینه های راه اندازی و کاربری بالایی دارند. لذا توسعه دستگاه های نوین مجهز به ابزار دقیق مقرون به صرفه مستقل از ارتعاشات خودرو با وجود ارائه روند ارزیابی ساده و محاسبات دقیق ناهمواری روسازی نیاز است. در این پژوهش، سامانه هوشمند پایش سلامت روسازی به عنوان سامانه اندازه گیری نیمرخ طولی و ناهمواری راه بر پایه پاسخ وسیله نقلیه با بهره گیری از حسگرهای شتاب سنج، فاصله سنج طولی و ردیاب مسیر توسعه داده می شود. با برداشت پاسخ ارتعاشی وسیله نقلیه و سامانه ناشی از ناهمواری سطح روسازی، اقدام به پیرایش داده ها و فرآیندهای فیلتراسیون سیگنال ها به وسیله روش های پردازش سیگنال دیجیتال می شوند. معادلات دینامیکی حاکم بر رفتار سامانه با عملکرد یک درجه آزادی و پارامترهای دینامیکی سامانه بر اساس رویکرد بهینه سازی از طریق الگوریتم های بهینه سازی ژنتیک و ازدحام ذرات استخراج می شوند. سپس نیمرخ طولی راه استخراج شده از روی پاسخ های ارتعاشی، با اتکا به الگوریتم رابطه سرعت و فرکانس برداشت اطلاعات، به نیمرخ طولی راه به ازای سرعت ثابت و معین تبدیل می شود. پس از محاسبه شاخص بین المللی ناهمواری از روی نیمرخ طولی مسیر مورد مطالعه به وسیله نرم افزار پروول، صحت نتایج سامانه پایش سلامت با محاسبه روش دستی درصد خطای میانگین و میانگین مجذور مربعات خطای نرمال شده بین خروجی سامانه و دستگاه نیمرخ یاب سطح روسازی به ترتیب با مقادیر ۱۹/۷۲ و ۹/۶۸ درصد ارزیابی می شود. در نهایت ارزیابی تکرارپذیری خروجی سامانه و نتایج به دست آمده از صحت سنجی حاکی از دقت و سطح کیفیت قابل توجه سامانه پایش سلامت راه است.

### ۱- مقدمه

توسعه به دنبال ایجاد یک سیستم مدیریت روسازی کارآمد هستند تا بتوانند بیشترین بازده اقتصادی را از بودجه های کلانی که در بخش راه مصرف می شود، به دست آورند. سیستم های مدیریتی کارآمد و موفق برای دستیابی به اهداف مدیریتی خود نیازمند برنامه ریزی های دقیق و کاربردی هستند و هر برنامه ریزی برای تحقق اهداف خود، نیازمند اطلاع از وضعیت گذشته، فعلی و آتی مجموعه مورد نظر بوده و بدون آگاهی از شرایط پیش رو و وضعیت بخش های مختلف مجموعه در زمان های مختلف، هیچ برنامه ریزی مؤثری امکان پذیر نیست.

روسازی راه ها به عنوان یکی از مهم ترین سرمایه های ملی کشور، سالانه بخش قابل توجهی از بودجه عمرانی را به خود اختصاص می دهد. این بودجه، صرف احداث، تعمیر، نگهداری و بهسازی سطح راه ها می شود. از این رو نیاز به سیستم مدیریت روسازی با تخصیص بهینه اعتبارات در عین آگاهی و شناخت از وضعیت فعلی و آینده راه ها امری اجتناب ناپذیر است. در سال های اخیر اکثر کشورهای در حال

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: agolroo@aut.ac.ir



جدول ۱. بازه‌بندی طول موج‌های ناهمواری روسازی [۱]  
Table 1. Interval of pavement roughness wavelengths

نام	بسامد موج (C/m)	طول موج (mm)
بافت ریز <sup>۱</sup>	۲۰۰۰ <	> ۰/۵
بافت درشت <sup>۲</sup>	۲۰ - ۲۰۰۰	۰/۵ - ۵۰
بافت کلان <sup>۳</sup>	۲ - ۲۰	۵۰ - ۵۰۰
ناهمواری <sup>۴</sup>	۲ >	۵۰۰ <

<sup>1</sup> Micro texture

<sup>2</sup> Macro texture

<sup>3</sup> Mega texture

<sup>4</sup> Unevenness

ناهمواری روسازی وابسته به نوع مکانیزم و عملکرد سامانه‌ها لحاظ می‌شوند. بنابراین تصمیم گرفته شد در جهت پیشبرد اهداف دستیابی به سامانه‌های ارزیابی ناهمواری روسازی به منظور به کارگیری خروجی آن در اطلاعات ورودی مورد نیاز سیستم مدیریت روسازی، سامانه هوشمند پایش سلامت روسازی بر پایه پاسخ وسیله نقلیه مجهز به ابزارهای دقیق مقرون به صرفه توسعه داده شود، به طوری که امکان استفاده از سامانه در شبکه راه‌های شهری و برون شهری بدون ایجاد اختلال ترافیکی وجود داشته باشد.

## ۲- مرورادبیات موضوع و مفاهیم کلی

### ۲-۱- مفاهیم کلی

خرابی‌های سطحی اثر کرده در روسازی باعث ظهور ناهمواری‌هایی با طول موج‌های متفاوت می‌شوند. محدوده کلی طول موج‌های ناهمواری به چهار دسته تقسیم بندی می‌شوند. بازه بندی طول موج‌های ناهمواری روسازی در جدول ۱ ارائه شده است [۱]. جهت ارزیابی وضعیت روسازی از منظر ناهمواری طول موج‌های سطح روسازی بالای ۵۰ میلی متر که دو محدوده بافت کلان و ناهمواری را در بر می‌گیرد، در دستور کار می‌باشد.

دو رویکرد در توسعه دستگاه‌های ارزیابی ناهمواری وجود دارد. یکی از رویکردها شامل برداشت مستقیم نیمرخ راه است و دیگری تعیین ناهمواری بر اساس عکس‌العمل سیستم تعلیق وسیله نقلیه است. میله و تراز<sup>۲</sup>، نیمرخ یاب عصایی<sup>۳</sup> و نیمرخ کش<sup>۴</sup> دستگاه‌های

به منظور مدیریت بهینه منابع و بررسی میزان اثرگذاری هر یک از سیاست‌های اجرایی در بخش نگهداری از سطح شبکه راه‌های کشور، دفتر نگهداری راه‌های سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای از سال ۱۳۹۵، پروژه ایجاد و پیاده‌سازی سیستم مدیریت روسازی را به عنوان یک اولویت اصلی، در دستور کار خود قرار داده است. یکی از مهمترین بخش‌های پیاده‌سازی سیستم مدیریت روسازی، راه‌اندازی روش و سامانه‌های جمع‌آوری اطلاعات از وضعیت روسازی در طی بهره‌برداری راه‌هاست. از جمله اطلاعات مورد نیاز و موثر در ارزیابی وضعیت روسازی، برداشت و بررسی وضعیت ناهمواری روسازی در مرحله ساخت و بهره‌برداری راه‌ها قلمداد می‌شود.

ناهمواری سطح روسازی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفیت روسازی محسوب می‌شود که به‌طور مستقیم روی کیفیت سواری از منظر راحتی سرنشینان وسایل نقلیه و ایمنی رانندگی تأثیرگذار است و نیز جهت ارزیابی وضعیت روسازی بایستی برداشت شود. اندازه‌گیری ناهمواری روسازی چه در سطح شبکه و چه در سطح پروژه امری تأیید شده است. ناهمواری در سطح شبکه برای تقسیم شبکه به قطعات یکنواخت، تعیین حدود رواداری وضعیت قابل قبول و تعیین اولویت‌های ترمیم و نگهداری است. اندازه‌گیری ناهمواری در سطح پروژه به منظور تعیین مکان سطوح دارای ناهمواری بیش از حد و اجرای کنترل کیفیت در مرحله ساخت به کار می‌رود. با توجه به اهمیت موضوع ناهمواری از نظر کاربران راه، پژوهشکده حمل‌ونقل مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی کشور، بین چندین شاخص جهت محاسبه و ارزیابی ناهمواری راه‌ها، شاخص بین‌المللی ناهمواری<sup>۱</sup> به عنوان شاخص استاندارد پذیرفته شده برای جاده‌های ایران پیشنهاد نموده‌اند.

ارزیابی ناهمواری به عنوان قسمتی از برداشت اطلاعات روسازی به صورت دستی، نیمه مکانیزه و مکانیزه امکان پذیر است. با توجه به دقت موردنیاز و زمان دسترسی به داده‌ها، برای برداشت حجم بالای شبکه جاده‌ها، سامانه‌های مکانیزه با استقبال روبرو بوده است. در این راستا سامانه‌های متنوعی جهت برداشت و ارزیابی وضعیت روسازی راه‌ها با هدف دستیابی به داده‌های اولیه برای تصمیم‌گیری در سیستم مدیریت روسازی به کار گرفته می‌شوند. علاوه براین، روش‌های تحلیلی و محاسباتی مختلفی به منظور استخراج میزان

2 Rod and level survey

3 Dipstick

4 Profilograph

1 International Roughness Index (IRI)

و اندازه گیری نیمرخ طولی راه مطابق الگوریتم معین شاخص بین المللی ناهمواری را از نیمرخ استخراج شده محاسبه می کند [۴]. کانتیسانی<sup>۱۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰ مدلی از وسیله نقلیه‌ای را به هدف تعیین رابطه ارتعاشات بدنه خودرو و ناهمواری سطح روسازی شبیه‌سازی کردند. از نتایج به دست آمده در این پژوهش همبستگی مناسبی بین شتاب قائم وزن دار خودرو و شاخص بین‌المللی ناهمواری ایجاد شده است که در نتیجه آن آستانه‌هایی بر اساس میزان ناهمواری و ارتعاشات اثرگذار روی راحتی سرنشینان وسایل نقلیه استخراج شده است [۵]. کاویانی پور و همکاران در سال ۲۰۱۴ با شبیه سازی مدل یک چهارم سیستم تعلیق خودرو با مکانیسم دو درجه آزادی و تحلیل دینامیکی سیستم در مسیر کوتاهی از یک دست انداز به تعیین شاخص بین المللی ناهمواری، شاخص خدمت دهی روسازی<sup>۱۱</sup> و بررسی چگالی توان طیف نیمرخ طولی مسیر برداشت شده پرداختند. برداشت پاسخ ارتعاشی مکانیسم سیستم نوع پاسخ دو درجه آزادی به وسیله شتاب سنج انجام می شود به طوری که شتاب جرم فربندی شده و جرم فربندی نشده برداشت شده است و نیمرخ طولی راه را از اختلاف تحرکات بین دو جرم سامانه استخراج می کنند [۶]. پتر موکا<sup>۱۲</sup> در سال ۲۰۱۶ روی شناسایی محدوده ناهمواری طولی راه بر اساس پاسخ ارتعاشی محاسبه شده در اثر متقابل خودرو و راه مطالعه کرد و روابط جامع بین پاسخ ارتعاشی خودرو و شاخص بین‌المللی ناهمواری مطالعات گذشته را خلاصه شده ارائه کرد. از این مطالعه می‌توان با اعتبار بالایی به روابط حاکم بین پاسخ ارتعاشی خودروی پایش سلامت روسازی با مقادیر شاخص بین‌المللی ناهمواری پی برد [۷]. سامانه‌هایی دیگری نیز مانند سامانه پایش وترز با بکارگیری حسگرهای شتاب سنج، فشارسنج و میکروفون نصب شده روی خودروی پایش سلامت برای اندازه گیری ناهمواری موجود هستند [۸]. هرچند دستگاه‌های برداشت ناهمواری به صورت خودکار و نیمه خودکار دارای دقت قابل توجهی هستند اما گران قیمت و دارای فرآیند محاسباتی و اندازه گیری ناهمواری پیچیده ای هستند.

آنجلینی<sup>۱۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۶ دستگاهی را برای پیدا کردن دست اندازهای جاده طراحی نمودند. این دستگاه از یک شتاب سنج،

برداشت مستقیم نیمرخ راه هستند. از جمله دستگاه‌های اندازه‌گیری ناهمواری بر اساس پاسخ وسیله نقلیه می‌توان نیمرخ یاب سبک<sup>۱</sup>، نیمرخ یاب اینرسی سریع<sup>۲</sup>، نیمرخ یاب سوس داکوتا<sup>۳</sup>، رایدمتر<sup>۴</sup>، دستگاه ارزیابی ناهمواری اران<sup>۵</sup> و جدیدترین دستگاه اندازه‌گیری سامانه وترز<sup>۶</sup> را نام برد [۲]. در روش اندازه گیری براساس پاسخ وسیله نقلیه، نتایج به دست آمده به نوع وسیله، وزن وسیله، وضعیت دینامیکی وسیله و سرعت اندازه گیری وابسته است و در نتیجه هرگاه هر یک از فاکتورهای فوق تغییر نماید، نتایج حاصله را دیگر نمی توان با نتایج قبلی مقایسه کرد.

اصول کلی دستگاه‌های ذکر شده بر پایه اندازه گیری جابجایی، فاصله و شتاب است. روش‌های بسیاری برای اندازه گیری جابجایی، سرعت و شتاب خطی و زاویه ای وجود دارد. در آنها غالباً جابه جایی و شتاب مستقیماً اندازه گیری می شوند. یکی از رویکردهای مقرون به صرفه‌ی که برای برداشت ناهمواری وجود دارد، رویکرد اندازه گیری شتاب با استفاده از حسگر شتاب سنج<sup>۷</sup> است. بطور کلی برای بررسی مشخصه‌های خودروهای سواری، تحریکات از سوی زمین به شکل‌های مختلف امواج سینوسی، توابع پله ای یا موج‌های مثلثی مورد استفاده قرار می گیرند. بعدها متوجه شدند که نیمرخ سطح روسازی‌ها بصورت یک تابع تصادفی عملی تر و واقعی تر است. مقادیر میانگین یا میانگین مربعات یک تابع تصادفی می تواند با استفاده از میانگین دامنه و ضریب فرکانس، با استفاده از تبدیلات سریع فوریه<sup>۸</sup> تابع تعیین می شود [۳].

## ۲-۲- سامانه‌های ارزیابی ناهمواری رایج

بنت<sup>۹</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۴ در شهر دهلی نو جهت بررسی وضعیت روسازی از منظر ناهمواری به ارزشیابی نیمرخ‌یاب اران پرداختند. در این نوع نیمرخ‌یاب با استفاده از دو شتاب سنج، شتاب بدنه و اکسل برداشت می شود. بنت پس از برداشت داده‌ها

- 1 Lightweight profiler
- 2 High speed inertial profiler
- 3 South Dakota Road Profiler
- 4 May's Ride Meter (MRM)
- 5 Automatic Road Analyzer (ARAN)
- 6 Versatile Onboard Traffic Embedded Roaming Sensors (VOTERS)
- 7 Accelerometer
- 8 Fast Fourier Transform (FFT)
- 9 Bennett

10 Cantisani

11 Present Serviceability Index (PSI)

12 Peter Mucka

13 Angelini

در این پژوهش‌ها ماژول<sup>۸</sup> شتاب‌سنج به‌عنوان حسگر ناهمواری به کار گرفته شده است. تفاوت تحقیقات صورت گرفته در نحوه ارتباط (کابلی، وای فای تحت وب<sup>۹</sup> و بلوتوث<sup>۱۰</sup>) حسگرها با برد ثبت داده، تلفن همراه هوشمند به‌عنوان نمایشگر وضعیت روسازی، سیستم موقعیت‌یاب جهانی و نرم‌افزار گوگل مپ<sup>۱۱</sup> به‌عنوان نقشه مسیره‌ای مورد آزمایش است [۱۱-۱۳]. در این پژوهش‌ها توجه به خطاهای ناشی از ارتعاشات وسیله نقلیه و میزان خطا در اطلاعات جمع‌آوری شده توسط حسگرها بسیار مهم است.

ایراد عمده دستگاه‌های صنعتی و یا مقرون به صرفه مانند تلفن همراه هوشمند که بر پایه شتاب‌سنج نصب شده روی خودرو عمل می‌کنند، وابستگی به سیستم تعلیق وسیله نقلیه است. در مطالعات انجام شده بر مبنای پاسخ سیستم تعلیق وسیله نقلیه، احتمال بالای خطای محاسباتی ناشی از بکارگیری روابط و مدل‌های تقریبی دینامیکی جهت شبیه‌سازی و تحلیل پاسخ ارتعاشی وسیله نقلیه و در پی آن ناهمواری روسازی مستخرج شده از تحلیل نتایج وجود دارد. در پژوهش‌ها توجه به خطاهای ناشی از ارتعاشات وسیله نقلیه و میزان خطا در اطلاعات جمع‌آوری شده توسط حسگرها بسیار مهم است؛ بنابراین در راه‌اندازی سامانه‌های ارزیابی ناهمواری روسازی دقت در کاهش خطاهای ناشی از ارتعاشات خودروی پایش سلامت و محاسبات اندازه‌گیری ناهمواری باید انجام شود.

### ۳- بیان مسأله و قلمروی تحقیق

در این پژوهش به دنبال ارائه و توسعه سامانه‌ای بر پایه پاسخ وسیله نقلیه مجهز به ابزارهای دقیق مقرون‌به‌صرفه همچون شتاب‌سنج جهت اندازه‌گیری نارتزای‌های روسازی دارای سرعت برداشت داده بالا و دقت کافی در ارزیابی ناهمواری روسازی است. پارامتر اساسی که در رابطه با ارزیابی و محاسبه ناهمواری روسازی با استفاده از سامانه‌ی خودکار به اهمیت موضوع دامن می‌زند، هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم مرتبط به راه‌اندازی و اجرای سامانه‌های خودکار پایش سلامت است. در این خصوص مسئله مورد نظر چگونگی انتخاب و به‌کارگیری ابزارهای دقیق مانند حسگرهای

یک آشکارساز اوج<sup>۱</sup> و یک دستگاه ثبت موقعیت مکان<sup>۲</sup> تشکیل شده است. عملکرد دستگاه مطابق آستانه‌ی حساس شتابی به محدوده پاسخ ارتعاشی دریافت شده از دست‌اندازها در سطح راه برنامه ریزی شده است، به طوری که به محض مواجهه دستگاه به دست‌انداز که از آستانه پاسخ ارتعاشی عبور کند، دستگاه به عنوان ناهمواری مورد نظر ثبت می‌کند [۹]. آبولیزی<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ با ارائه روندی جهت محاسبه و ارزیابی وضعیت ناهمواری روسازی راه‌ها با شاخص بین‌المللی ناهمواری به وسیله نیمرخ‌یاب فشرده شده تعبیه شده روی سیستم تعلیق اقدام کردند. به طور موازی از شبیه‌سازی وسیله نقلیه جهت برداشت پاسخ ارتعاشی در مواجهه با ناهمواری روسازی استفاده کردند که جهت اعتبارسنجی سامانه واقعی به کار گرفتند [۱۰]. در این پژوهش اثر مسیره‌های چرخ داخلی و خارجی جهت برداشت شتاب جرم فنربندی شده و جرم فنربندی نشده وسیله نقلیه مد نظر قرار گرفته است که جهت ارزیابی ناهمواری روسازی با هزینه قابل توجه تحقیقاتی، سختی در محاسبات و تقریب روبرو می‌شوند.

سامانه‌های مکانیزه توسعه داده شده دارای هزینه‌های بالای راه‌اندازی و کاربری هستند. در عین حالی که مشکل سرعت داده‌برداری با استفاده از دستگاه‌های مدرن با نرخ نمونه‌برداری و دقت بالا حل شود، ولی معضلی که سیستم مدیریت روسازی را تحت شعاع قرار می‌دهد، هزینه‌های بالای ساخت و بهره‌برداری از سامانه هاست. بنابراین لزوم توسعه سامانه‌ای مجهز به ابزار دقیق مقرون‌به‌صرفه به‌عنوان دستگاه مکانیزه با نتایج قابل قبول در برداشت و ارزیابی ناهمواری روسازی حس می‌شود.

### ۳-۲- سامانه‌های ارزیابی ناهمواری روسازی مقرون‌به‌صرفه

چن<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵، ماوریا<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ و راجمان<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ به هدف برداشت ناهمواری و چاله سطح روسازی با استفاده از سامانه‌های مقرون‌به‌صرفه بر پایه برد آردوینو<sup>۷</sup> و تلفن همراه هوشمند به ارزیابی وضعیت روسازی پرداختند.

- 1 Peak detector
- 2 Global Positioning System (GPS)
- 3 Abulizi
- 4 Chen
- 5 Maurya
- 6 Rajmane
- 7 Arduino

- 8 Module
- 9 Wi-Fi under Web
- 10 Bluetooth
- 11 Google Map

ارتعاشی ثبت شده، داده‌های خالص شتاب ناشی از ناهمواری روسازی جهت به‌کارگیری در اندازه‌گیری نیمرخ طولی راه حاصل می‌شود که در این بین، معادلات دینامیکی حاکم بر سامانه پایش سلامت و پارامترهای دینامیکی سیستم با وجود رویکرد حل مسائل بهینه‌سازی استخراج شد. پس از آن نیمرخ‌های طولی مسیره‌های مورد مطالعه به ازای سرعت ثابت و معینی از وسیله نقلیه تصحیح شده‌اند. در مرحله انتهایی پژوهش با محاسبه شاخص بین‌المللی ناهمواری محاسبه شده از روی نیمرخ طولی مسیر مورد مطالعه و نیمرخ دقیق مسیر به‌عنوان معیار، با استفاده از تحلیل آماری صحت خروجی‌های سامانه پایش سلامت و اعتبارسنجی عملکرد سامانه بررسی شدند و پس از آن قابلیت تکرارپذیری خروجی سامانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش تحقیق به کار گرفته‌شده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. جزئیات هر کدام از قسمت‌ها در ادامه این بخش به تفصیل بیان می‌شود.

#### طراحی و ساخت سامانه پایش سلامت روسازی

سامانه پایش سلامت روسازی با رویکرد مکانیسم یک درجه آزادی در نظر گرفته است. سامانه ای متشکل از یک چرخ لاستیکی توپر با قطر ۳۰ سانتی متر و ضخامت ۴ سانتی متر و دستکی فلزی به عنوان جرم فنربندی نشده ساخته شده است که به وسیله اتصال لولایی به خودرو وصل شده و از فنرهای کششی و فشاری به ترتیب در ناحیه تحتانی و فوقانی سامانه جهت اصلاح رفتار مکانیکی آن استفاده شده‌اند. این سامانه در زمان پایش سطح روسازی قادر به چرخش حول محور  $Y^2$  به علت وجود لولا است و علاوه بر این در قوس‌های قائم و ناهمواری‌های موضعی روسازی مانند چاله و موج زدگی‌ها، امکان برداشت کامل ناهمواری را دارد. با وجود چرخش دستگاه ارتعاشات کمتری در اثر ناهمواری‌ها به دستگاه وارد می‌شود. چرخش دستگاه حول محور قائم  $Z^3$  نیز به منظور جلوگیری از لغزش چرخ روی سطح روسازی فراهم شد. دستگاه چرخ پنجم به وسیله دو دستک فلزی به شاسی خودرو پیچ شده و ثابت می‌شود. شماتیک دستگاه بدون اصلاح سیستم مکانیکی به صورت شکل ۲ است. پس از طراحی و ساخت دستگاه، جهت حذف پرش‌های آن در اثر مواجهه با ناهمواری شدید، اصلاح سیستم مکانیکی دستگاه مطابق روندی صورت گرفت و

شتاب‌سنج، مسافت‌سنج و موقعیت یاب جهت تجهیز دستگاه پایش ناهمواری روسازی به‌طوری که جنبه‌های اقتصادی سامانه دیده شود، برای برداشت نیمرخ طولی راه و در ادامه آن میزان ناهمواری سطح روسازی مطرح می‌شود. از آن مهم‌تر، پرسش در خصوص انتخاب و به‌کارگیری رویکرد و روش‌های دقیق نرم‌افزاری در اندازه‌گیری نیمرخ طولی راه و محاسبه ناهمواری روسازی در این پژوهش به چالش افتاده است.

گستره پژوهش منوط به راه‌اندازی سامانه‌ای جهت برداشت نیمرخ طولی راه و محاسبه شاخص بین‌المللی ناهمواری برای تحویل موقت راه‌ها در کشور مطابق نیاز سازمان‌های متصدی مدیریت روسازی راه‌ها مدنظر قرار گرفته است. از آنجاکه راه‌های تازه احداث شده تحت عبور ترافیک نیست، بنابراین سرعت حرکتی دستگاه کمتر از سرعت معمولی ترافیک لحاظ شده است. با توجه به نظر کارشناسان، سرعت پیشنهادی ۳۵ کیلومتر بر ساعت برای توسعه فاز اول این دستگاه در نظر است. اضافه بر آن، قلمروی پژوهش مد نظر روی ارزیابی ناهمواری سطح روسازی‌های آسفالتی تمرکز دارد که جهت ارزیابی آن از شاخص بین‌المللی ناهمواری بهره گرفته شده است. در ادامه قلمروی پژوهش، با توجه به شرایط سامانه از ۲ مائول حسگرهای شتاب‌سنج به منظور برداشت ارتعاشات خودرو و سامانه پایش سلامت استفاده شده است، به طوری که پاسخ ارتعاشی چرخ پنجم الحاق شده به خودرو در مسیر عبور چرخ وسیله نقلیه (مسیر محور سمت راننده) به عنوان سامانه پایش سلامت و محل اتصال سامانه به خودرو بهره گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است پس از برداشت و ذخیره‌سازی داده‌ها، اطلاعات به دفتر انتقال پیدا می‌کند و تحلیل و استخراج نتایج ناهمواری روسازی به صورت برون‌خط<sup>۱</sup> در دفتر اطلاعات صورت می‌پذیرد.

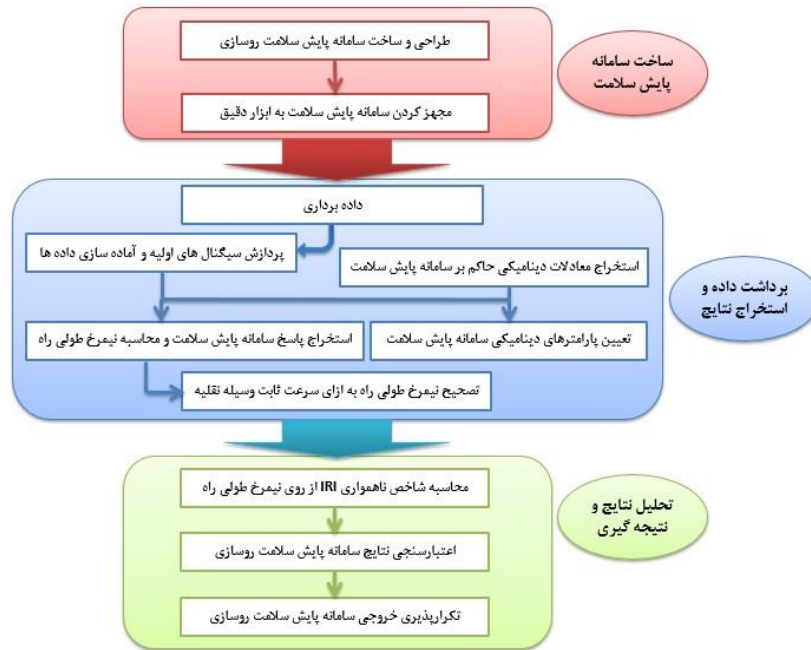
#### ۴- روش تحقیق

روش تحقیق این پژوهش شامل مراحل اصلی، ساخت سامانه، برداشت داده، ثبت داده، استخراج اطلاعات، تحلیل نتایج و اعتبارسنجی آنها است. در مرحله اول ساخت، تجهیز و تصحیح مکانیکی سامانه صورت پذیرفت. در مرحله دوم پس از برداشت داده، با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال دیجیتال و پاسخ

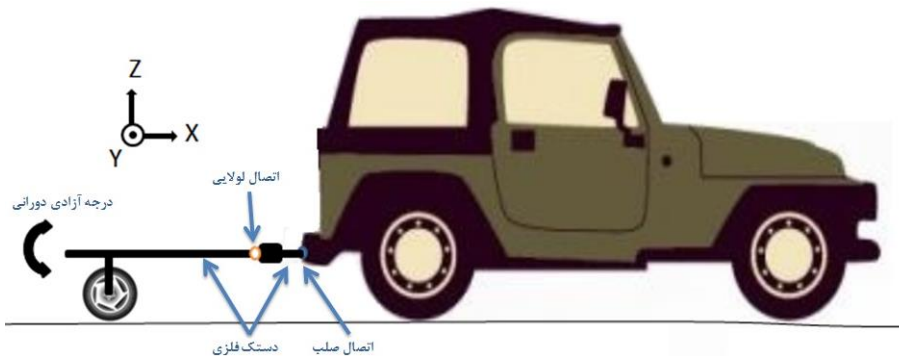
2 Pitch

3 Yaw

1 Offline



شکل ۱. روش تحقیق  
Fig. 1. Methodology

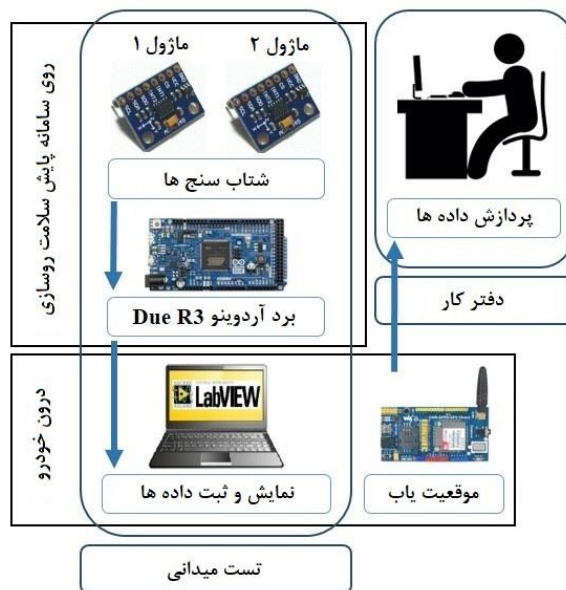


شکل ۲. شماتیک سامانه پایش سلامت روسازی  
Fig. 2. Schematic of the pavement health monitoring system

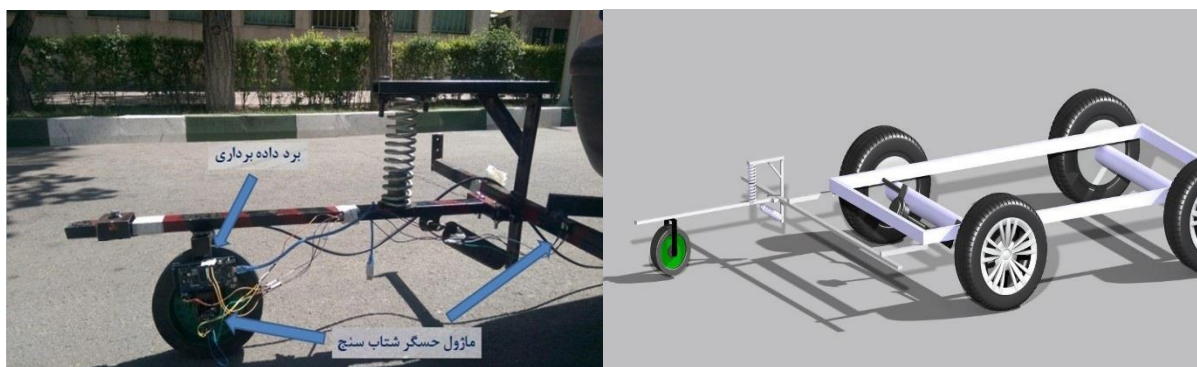
۴-۲- مجهز کردن چرخ پنجم در سامانه پایش سلامت روسازی به ابزار دقیق های مورد نظر  
دستگاه چرخ پنجم به تجهیزات برداشت پاسخ ارتعاشی مجهز شده است. تجهیزات به کار گرفته شده و روند استفاده آنها در سامانه پایش ناهمواری روسازی مطابق شکل ۳ است.  
با توجه به تغییرات دامنه شتاب بدست آمده در تحقیقات گذشته [۱۴-۱۶] در زمینه بررسی پاسخ شتاب سیستم های ارتعاشی در اثر

دستگاه تبدیل به یک سامانه پایش سلامت روسازی اولیه شد.  
یکی از مراجع خطا ثبت پاسخ ارتعاشی دستگاه هنگام ترمز گیری و شتاب گیری وسیله نقلیه است که باعث اختلال در ثبت داده صحیح توسط شتاب سنج ها می شود. جهت حل این مشکل و ثبت داده های صحیح، اتصال دستگاه به وسیله لولا با قابلیت دوران در جهت  $Y$  امکان پذیر است، به طوری که سپر اتصالی دستگاه مستقیماً به شاسی خودروی پایش سلامت متصل می شود.





شکل ۳. تجهیزات دقیق و روند بکارگیری آنها در سامانه پایش سلامت روسازی  
 Fig. 3. Precise equipment and the process of using them in the pavement health monitoring system



شکل ۴. سامانه پایش سلامت روسازی متصل به خودرو به صورت واقعی (سمت چپ) و به صورت مدل سازی شده (سمت راست)  
 Fig. 4. Pavement health monitoring system connected to the vehicle (left) and modeled (right)

داده ها از برد آردوینو از نوع دیو آر ۳ استفاده شده است. ماژول شتاب شماره ۱ در جایگاهی واقع در محور مرکزی چرخ پنجم قرار گرفته است و ماژول شتاب شماره ۲ در محل اتصال سامانه پایش سلامت روسازی به خودرو به هدف برداشت ارتعاشات منتقل شده از خودرو در اثر ناهمواری به سامانه پایش سلامت روسازی نصب شده است. برد داده بردار روی محور چرخ تعبیه شده است. سامانه پایش سلامت روسازی خودروی پایش سلامت به صورت واقعی در شکل ۴ سمت چپ و به صورت مدل سازی شده در نرم افزار کتیا<sup>۲</sup> در شکل ۴ سمت راست نشان داده شده است.

ناهمواری روسازی راه، دو عدد ماژول حسگر شتاب سنج از نوع ای دی ایکس ال ۳۴۵ با تکنولوژی ممرز<sup>۱</sup> با قابلیت برداشت میزان ۱۶ برابر شتاب گرانش زمین با وضوح ۱۰ بیت و حساسیت ۷/۸ میلی برابر شتاب گرانش زمین جهت تجهیز چرخ انتخاب شد و در برنامه نویسی ثبت داده حسگر شتاب سنج، نرخ نمونه برداری ۲۰۰ هرتز برای آن لحاظ شده است. برای برچسب زدن مسیر حرکتی پیموده شده در آزمایش ها از ماژول جی اس ام - سیم ۹۰۸<sup>۲</sup> برای ثبت مسافت پیموده شده و سرعت حرکت سامانه استفاده می شود و جهت ثبت

1 Micro-Electro-Mechanical system  
 2 Grouped Special Mobile (Global System for Mobile Communications)

3 CATIA software

#### ۴-۴- پردازش سیگنال های اولیه و آماده سازی داده ها

حسگر شتاب سنج از جمله حسگرهای اتوماسیون صنعتی است که دارای نویز سیستماتیک و داخلی قابل ملاحظه ای است. برای حل مشکل نویز آن بایستی در ابتدا بخش مربوط به نویز را در سیگنال های شتاب به وسیله فیلتراسیون مناسبی مانند فیلتر بسل حذف نمود. بدین منظور پاسخ ارتعاشی سامانه در حالت سکون خودروی پایش سلامت برداشت شد. علاوه براین، داده حسگر شتاب سنج در حالت خاموش بودن موتور خودروی پایش سلامت نیز برداشت و ثبت شد که بدین ترتیب تخمینی از میزان تغییرات شتاب ثبت شده از حسگر شتاب سنج ناشی از نویز داخلی به دست آمد. این دو سیگنال در فیلتراسیون داده های شتاب سامانه پایش سلامت روسازی به کار گرفته شدند. به کمک این دو سیگنال تخمینی از طیف نویز دریافتی بدست آمده و سپس از این تخمین در طراحی فیلتر استفاده شده است.

پس از برداشت پاسخ ارتعاشی وسیله نقلیه مولفه های فرکانسی ناشی از نویز محیطی و شرایط فیزیکی مسیر خارج از بازه طول موج های ارزیابی ناهمواری، حذف شدند. فرکانس های بالا ناشی از ارتعاشات موتور و نویز مکانیکی و الکتریکی خودرو و همچنین فرکانس های پایین ناشی از تغییر شیب راه و طول موج های بلند و غیر کاربردی ناهمواری سطح روسازی از داده ها فیلتر شدند. پایه ای ترین پردازش جهت استخراج ناهمواری از نیمرخ ها، فیلتر کردن صرفاً طول موج های کاربردی و لازم برای محاسبه ناهمواری مسیر از نیمرخ طولی راه است. مطابق تحقیقات گذشته جهت فیلتر کردن فرکانس های بالا و پایین داده ها می توان از فیلتر میان گذر استفاده کرد به طوری که فرکانس های بالاتر از ۸۰ هرتز و پایین تر از ۰/۵ هرتز حذف شوند [۱۹].

با توجه به طیف سیگنال پاسخ ارتعاشی برداشت شده در حالت سکون خودرو (ترسیم شده به روش ولج<sup>۴</sup>) که در شکل ۵ نمایش داده شده است، ظاهر شدن قله ی طیفی<sup>۵</sup> به صورت هارمونیک در سیگنال قابل مشاهده است.

در سیگنال اصلی برداشت شده بایستی این مولفه های فرکانسی ناشی از موتور ماشین حذف شوند. بدین منظور لازم است از توان

ثبت و نمایش در لحظه سیگنال ها با استفاده از نرم افزار صنعتی لب ویو [۱۷] صورت می پذیرد. تأمین برق لپ تاپ و برد داده برداری از برق باتری خودرو به وسیله اینورتور انجام می شود. ارتباط اجزای ابزار دقیق سامانه (حسگر، برد و لپ تاپ) به صورت کابلی است. تمام تجهیزات به کار گرفته شده در این پژوهش مقرون به صرفه، قابل دسترس و در برداشت داده های مورد نیاز در زمینه برداشت ناهمواری روسازی راه ها کارآمد هستند.

#### ۴-۳- داده برداری

پس از تجهیز سامانه پایش سلامت روسازی به ماژول های حسگر شتاب سنج و برد داده بردار، با برنامه ای نوشته شده در فضای برنامه نویسی آردوینو (۱۸) و ترکیب آن با کدنویسی نرم افزار لب ویو براساس پروتکل ارتباطی I<sub>2</sub>C، سامانه آماده داده برداری شد.

آزمایش میدانی در شبکه راهی سطح شهر تهران به منظور اعتبارسنجی خروجی های سامانه پایش سلامت در نظر گرفته شد. در این راستا معبری به طول ۷۰۰ متر از راه فرعی درجه یک دوخطه (پارک طبیعت پردیسان) در بزرگراه شهید حکیم در شهر تهران با تردد ۵۰۰ وسیله نقلیه میانگین ترافیک روزانه در سال<sup>۱</sup> برای داده برداری انتخاب شد. خطوط عبوری رفت و برگشت مسیر مذکور با عدم وجود ترافیک به تعداد ۳ تکرار با سرعت های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ کیلومتر بر ساعت برداشت شد. لازم به ذکر است، معبر مورد مطالعه دارای ناهمواری های مشخص و متمایز از یکدیگر است و سامانه راه اندازی شده قابلیت برداشت ناهمواری های کم، متوسط و زیاد را در گستره کاملی از بازه های طول موجی معرفی شده از ناهمواری روسازی مطابق استاندارد را داراست.

علاوه بر برداشت مسیر مورد مطالعه به وسیله سامانه پایش سلامت، به منظور مقایسه و محاسبه خطای خروجی های سامانه پایش سلامت، باید مسیر آزمایش میدانی به وسیله سامانه دیگری با دقت بالا و صحت قابل قبول در برداشت نیمرخ طولی راه و ناهمواری روسازی نیز برداشت شود. از این رو مسیر مدنظر به وسیله دستگاه نیمرخ باب سطح روسازی<sup>۲</sup> آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وابسته به وزارت راه کشور برداشت.

3 Bessel filter

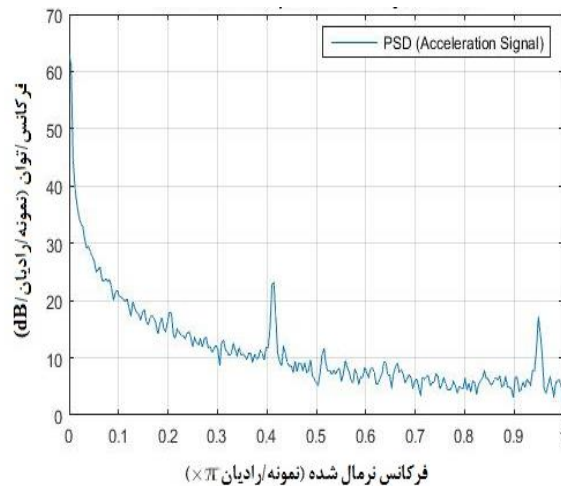
4 Welch

5 Pitch

1 Annual Average Daily Traffic (AADT)

2 Road Surface Profiler (RSP)





شکل ۵. چگالی طیف توان سیگنال پاسخ ارتعاشی سامانه در حالت روشن وسیله نقلیه به صورت ساکن  
 Fig. 5. Power spectral density of vibration response of the system when the vehicle is on and stationary

می‌شوند. سپس سیگنال خواسته شده به صورت خروجی یک فیلتر پاسخ ضربه محدود<sup>۵</sup> مدل شده و مسئله به مسئله یافتن ضرایب این فیلتر تبدیل می‌شود. با توجه به این که در این روش هر دو سیگنال غیر ایستاد فرض می‌شوند، بنابراین ضرایب فیلتر نیز تابع زمان بوده و متغیر هستند. برای این که بتوان این ضرایب را با یک تقریب زیر بهینه در هر لحظه به دست آورد از روش بهینه‌سازی گرادیان دست<sup>۶</sup> در تقریب ضرایب فیلتر استفاده شده است، به این صورت که در هر لحظه خروجی فیلتر به سیگنال ورودی، با سیگنال خواسته شده مقایسه شده و از تابع اختلاف آن‌ها برای تنظیم ضرایب فیلتر به صورت لحظه به لحظه استفاده می‌شود. در این پژوهش، با توجه به این که هدف، یافتن اثر ارتعاشات بدنه در سیگنال به دست آمده از حسگر موجود بر روی چرخ پنجم است، ارتعاشات به دست آمده از سپر عقب به عنوان سیگنال خواسته شده و ارتعاشات چرخ پنجم در سامانه پایش سلامت به عنوان ورودی در نظر گرفته شده‌اند.

به‌طور نمونه سیگنال‌های پاسخ ارتعاشی ثبت شده از مسیری در محدوده دانشگاه صنعتی امیرکبیر توسط حسگرهای نصب شده روی سامانه پایش سلامت و خودروی کشنده (محل اتصال سامانه به خودرو روی سپر عقب خودرو نمایش داده شده در شکل ۴ و در شکل ۶ بر اساس تعداد داده‌های برداشت شده نشان داده شده‌اند. پس از اعمال فیلتر سیگنالی تشریح شده به روش فوقی روی دو سیگنال

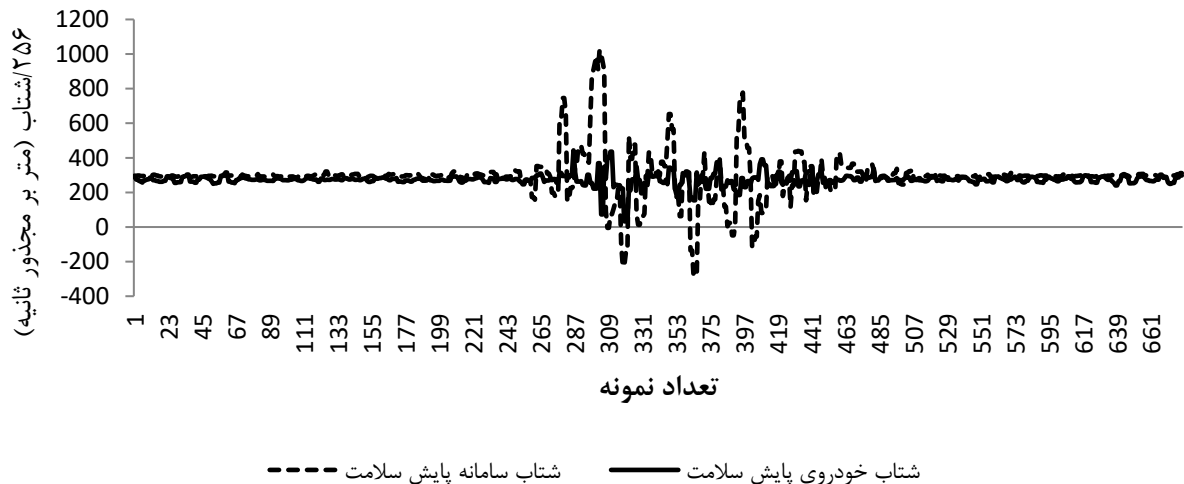
سیگنال اصلی در فرکانس‌هایی به تناوب ۴۲/۵ هرتز، نقاط متناظر قله‌ی طیفی سیگنال، کاسته شود تا بدین ترتیب تأثیر مولفه‌ی ارتعاشی ناشی از موتور ماشین در سیگنال به کار رفته جهت محاسبه‌ی ناهمواری حذف شده باشد. بدین منظور لازم است سیگنال اصلی را پس از عبور از فیلتر میان‌گذر از یک فیلتر ناچ<sup>۱</sup>، که بر روی مولفه‌ی فرکانسی موتور تنظیم شده است، نیز عبور داد تا به این ترتیب خروجی حاصل شده تنها بیانگر تغییرات ناشی از ناهمواری سطح راه شود.

ویژگی‌های آماری تغییرات سطح راه، در طول راه ثابت نیستند و به عبارت دیگر خاصیت ایستانی برقرار نیست. بدین منظور و پس از عبور دادن سیگنال از دو فیلتر فوق، برای از بین بردن اثر نویز و ارتعاشات منتقل شده از بدنه‌ی ماشین به حسگر شتاب سنج به صورت لحظه به لحظه، از یک روش پردازش فوقی<sup>۲</sup> کمک گرفته می‌شود. بدین منظور از داده‌های ثبت شده توسط مازول شتاب‌سنج شماره ۲ نصب شده در محل اتصال سامانه پایش سلامت روسازی و خودروی پایش بهره گرفته می‌شود.

در روش فوقی به کار رفته (الگوریتم تصویر وابسته‌ی سریع<sup>۳</sup>) در پردازش پاسخ ارتعاشی سامانه از دو سیگنال داده شده، یکی به عنوان سیگنال خواسته شده<sup>۴</sup> و دیگری به عنوان ورودی پردازش استفاده

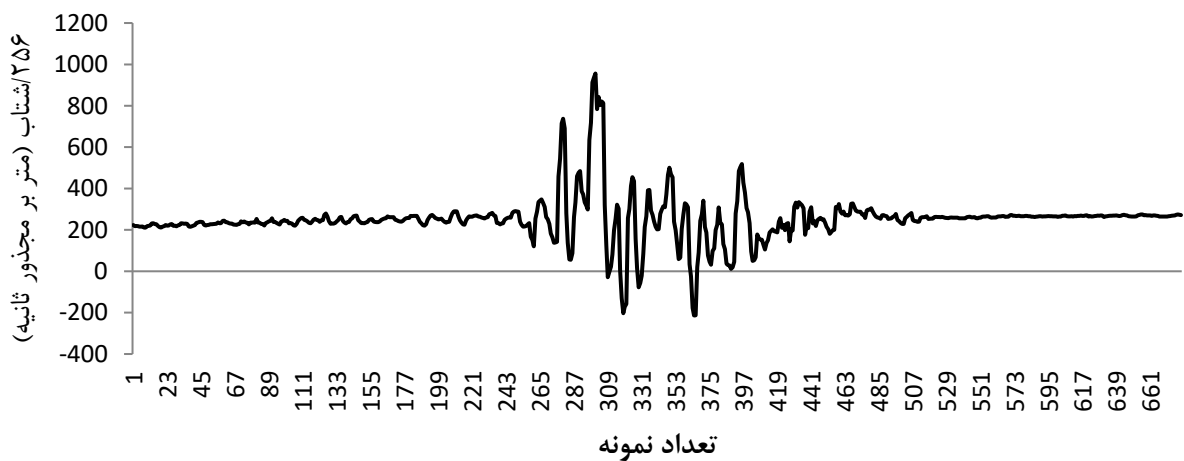
5 Finite Impulse Response (FIR) filter  
 6 Gradient Descent Optimization method

1 Notch filter  
 2 Adaptive Method  
 3 Fast affine projection algorithm  
 4 Desired Signal



شکل ۶. سیگنال به دست آمده از حسگرهای شتابسنج نصب شده روی سامانه پایش سلامت و خودروی پایش سلامت

Fig. 6. An obtained signal from accelerometer installed on the health monitoring system and the health monitoring vehicle



شکل ۷. پاسخ ارتعاشی ناشی از ناهمواری روسازی مسیر دارای حفره آدمرو تخمین زده شده به روش وقتی

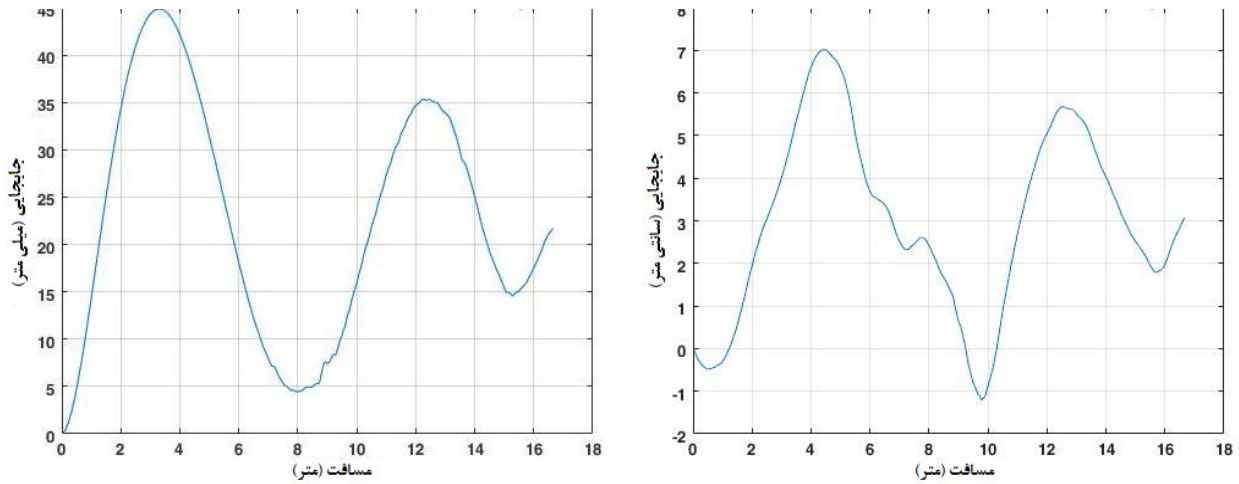
Fig. 7. Estimated vibration response due to pavement roughness of the pathway including manhole by the adaptive method

پنجم را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. در شکل ۸ نتیجه به دست آمده برای تخمین نیمرخ راه قبل و بعد از اعمال پردازش وقتی نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، پس از اعمال پردازش وقتی نیمرخ طولی از منظر مطابقت الگوی ناهمواری نیمرخ برداشت شده با نیمرخ طولی دقیق مسیر مدنظر دیده شده است.

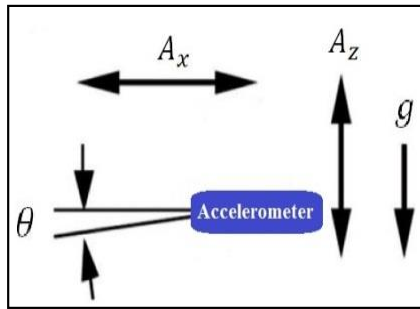
سامانه در حین برداشت داده دچار حرکت دورانی حول محور عرضی خودرو ( $y$ ) می‌شود که در اثر آن داده‌های شتاب دچار خطا و سوگیری می‌شوند. برداشت داده‌های شتاب سنسور به کار رفته به صورت جهتی (قائم) نسبت به محور  $z$  شتاب سنسور ثبت می‌شود. به دلیل ثابت بودن حسگر در محل قرارگیری آن روی محور مرکزی چرخ، در اثر مواجه شدن سامانه با نارتازی‌های روسازی، سامانه دچار

پاسخ ارتعاشی برداشت شده به وسیله حسگرهای شتابسنج نصب شده روی سامانه و خودرو، سیگنال پاسخ ارتعاشی تصحیح یافته ناشی از ناهمواری نیمرخ طولی مسیر دارای حفره آدمرو استخراج می‌شود که در شکل ۷ قابل مشاهده است.

با وجود اعمال روش پردازش وقتی روی سیگنال به دست آمده توسط حسگر موجود بر روی سامانه پایش سلامت اثر ارتعاشات بدنه خودرو به مقدار بسیار زیادی خنثی می‌شود. سیگنال خروجی نمایش داده شده به‌طور شهودی با خواسته‌های محققین سازگار است، بدین صورت که در ابتدای حرکت و در حالت سکون ارتعاشی به سامانه پایش سلامت منتقل نمی‌شود و به مرور زمان تأثیر ارتعاشات بدنه افزایش یافته و سیگنال به دست آمده از حسگر نصب شده روی چرخ



شکل ۸. نیمرخ تخمین زده شده قبل (سمت راست) و بعد از اعمال پردازش وقتی (سمت چپ)  
 Fig. 8. Estimated profile before (right) and after (left) adaptive processing



شکل ۹. عملکرد دورانی حسگر شتابسنج حین برداشت ناهمواری [۱۲]  
 Fig. 9. Rotational performance of accelerometer during pavement roughness collection

I: ممان اینرسی جرمی محور چرخ پنجم حاوی جرم چرخ و محور چرخ (m)،  
 C: ضریب مجازی میراگری چرخ و محور چرخ متصل به خودرو،  
 $K_s$ : ضریب مجازی ضریب ارتجاعی فنرهای متصل به محور چرخ جهت فنربندی سامانه برای جلوگیری از پرش،  
 $K_f$ : ضریب فنریت فرضی برای لحاظ کردن خاصیت ارتجاعی تایر چرخ سامانه،  
 l: طول محور چرخ از مفصل اتصال تا مرکز محور چرخ،  
 r: میزان جابه جایی ناشی از ناهمواری سطح روسازی اثر کرده روی سامانه،  
 $\theta$ : میزان چرخش چرخ نسبت به محور نقطه اتصال سامانه به وسیله نقلیه،

انحراف از راستای قائم و حرکت دورانی می شود، به علت این رفتار حرکتی سامانه، شتاب ثبت شده دچار خطا می شود. با به کارگیری مفهوم هندسی مکانیسم حرکت دورانی تشریح شده مطابق شکل ۹، امکان دستیابی به داده های شتاب اصلی وجود دارد. برای اصلاح این سوگیری در ثبت داده ها، شتاب برداشت شده از طریق حسگر شتاب سنج تعبیه شده در مرکز چرخ از رابطه ۱ استفاده می شود.

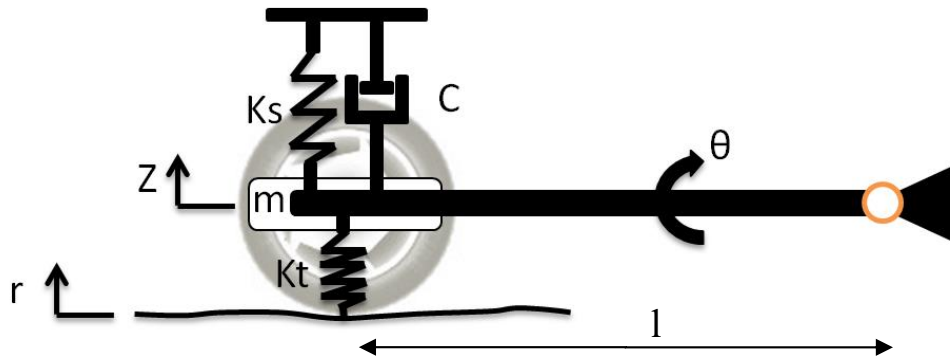
$$A_{\text{recorded}} = (A_z - g) * \cos(\theta) + A_x * \sin(\theta) \quad (1)$$

در رابطه ۲،  $A_{\text{recorded}}$  شتاب ثبت شده توسط حسگرها،  $A_z$  شتاب قائم مورد نیاز تحلیل ارتعاشی سامانه جهت دستیابی به ناهمواری روسازی و  $A_x$  شتاب افقی ثبت شده در راستای حرکت سامانه در امتداد مسیر وسیله نقلیه است. پارامترهای  $\theta$  و  $g$  به ترتیب زاویه دوران و شتاب گرانشی زمین است.

۴-۵- استخراج معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم یک درجه آزادی سامانه ساخته شده، یک درجه آزادی با امکان چرخش حول محور  $y$  است. در این راستا معادلات دینامیکی حاکم بر سامانه چرخ پنجم خودروی پایش سلامت به طور کلی مطابق مباحث مبانی ارتعاشات از ویلیام تامسون از رابطه ۲ تبعیت می کند [۲۰]. سیستم یک درجه آزادی به صورت شماتیک در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

$$I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K_s\theta + K_f l(r - \theta) = 0 \quad (2)$$

در این رابطه،



شکل ۱۰. شماتیک سیستم دینامیکی یک درجه آزادی سامانه پایش سلامت  
 Fig. 10. Schematic of a dynamic system of one freedom degree of a health monitoring system

۴-۶- تعیین پارامترهای دینامیکی سامانه پایش سلامت روسازی  
 سامانه پایش سلامت روسازی با وجود مکانیسم یک درجه آزادی دارای مشخصات دینامیکی از جمله جرم، ضریب میراگری و ضریب فنریت است که جهت تحلیل سیستم ارتعاشی بایستی محاسبه شوند. از طرفی به علت آنکه سامانه به کار گرفته شده در این پژوهش به صورت متداول نیست و به طور کامل شبیه سازی مدل یک چهارم خودرو نیست، لازم است پارامترهای دینامیکی سامانه پایش سلامت بر مبنای معادلات دینامیکی حاکم بر سامانه استخراج شود.

جهت دستیابی به پارامترهای دینامیکی سامانه پایش سلامت روسازی از الگوریتم های بهینه سازی استفاده شده است. رویکرد بهینه سازی با هدف تعیین پارامترهای دینامیکی به صورت کمینه کردن اختلاف بین نیمرخ دقیق مسیر و نیمرخ محاسبه شده در سیر اندازه گیری مکانیسم یک درجه آزادی سامانه است. در این راستا از دو الگوریتم بهینه سازی ژنتیک<sup>۱</sup> و ازدحام ذرات<sup>۲</sup> استفاده شده است که قابلیت کاربرد در مسائل پیوسته بهینه سازی را دارند. داده ورودی الگوریتم ها، نیمرخ دقیق ( $r_{precision}$ ) و نیمرخ محاسبه شده ( $r_{measured}$ ) به وسیله مکانیسم سامانه پایش سلامت روسازی است که از نیمرخ طولی مسیر مورد نظر در این پژوهش بهره گرفته شده است. تابع هدف الگوریتم ها ( $Z$ ) بر اساس کمینه کردن مجموع مجذور میانگین مربعات خطای<sup>۳</sup> بین تمام نقاط متناظر دو نیمرخ طولی از مسیر مد نظر است که مطابق رابطه ۴ نوشته می شود. متغیرهای این فرآیند، پارامترهای دینامیکی سامانه پایش سلامت در نظر گرفته

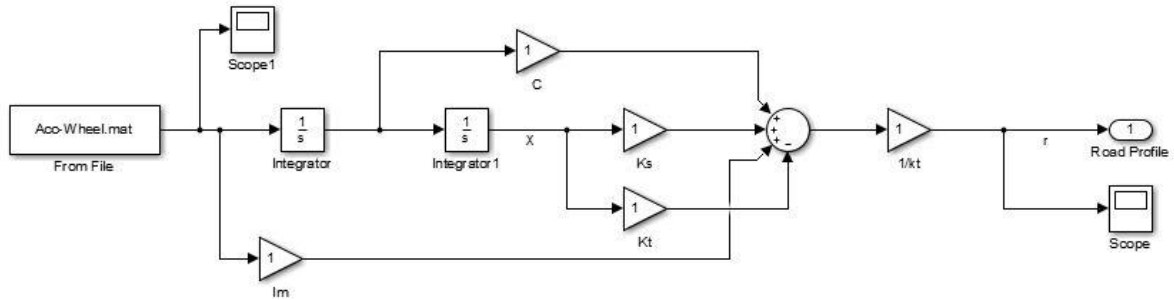
و از میرایی تأیر صرف نظر شده است. پس از اعمال روابط ساده سازی شده در رابطه دینامیکی حاکم بر سیستم یک درجه آزادی، در نهایت رابطه ۳ استخراج می شود.

$$I\ddot{Z} + C\dot{Z} + K_s Z + K_t(Z - r) = 0 \quad (3)$$

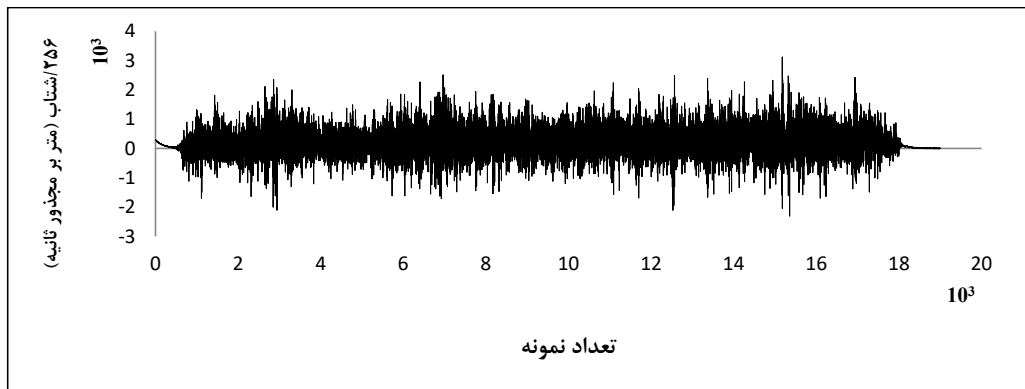
در رابطه ۳ پارامتر  $Z$  میزان جابه جایی قائم محور چرخ پنجم،  $K_t$  ضریب فنریت مجازی تأیر چرخ،  $K_s$  ضریب فنریت سامانه،  $C$  ضریب میرایی سامانه و  $I$  ضریب ممان جرمی سامانه است. لازم به ذکر است جهت تعیین پارامترهای دینامیکی سامانه، چهار متغیر  $I, C, K_s, K_t$  به صورت متغیرهای ترمیک در نظر گرفته می شوند.

نکته قابل توجه در این پژوهش آن است که سامانه به کار گرفته شده در مقایسه با سامانه های متداولی که جهت برداشت ناهمواری سطح روسازی به کار گرفته می شوند، در فرآیند برداشت و محاسبه ناهمواری سطح روسازی متفاوت است. تفاوت در برداشت پاسخ ارتعاشی هر دو جرم فنربندی شده و جرم فنربندی نشده مطابق شبیه سازی مدل دینامیکی یک چهارم خودرو در سامانه های متداول، در مقابل صرفاً برداشت پاسخ ارتعاشی جرم فنربندی نشده سامانه مد نظر این پژوهش وجود دارد که از طریق آن میزان ناهمواری سطح روسازی حاصل می شود. با این وجود خطاها و تقریب های در نظر گرفته شده در روند محاسبه و تبدیل ارتعاشات به ناهمواری روسازی، به مراتب کاهش پیدا می کند و در سامانه پایش سلامت روسازی تلاش شده است با کمترین خطا، بیشترین اثر ناهمواری توسط ابزار دقیق به کار گرفته شده برداشت شود.

- 1 Genetic Algorithm
- 2 Particle Swarm Optimization
- 3 Root Mean Square Error (RMSE)



شکل ۱۱. کد برنامه سیمولینک (مت لب) محاسبه نیمرخ راه از روی پاسخ ارتعاشی  
**Fig. 11. Coding Simulink program (in MATLAB) for calculating road profile from vibration response**



شکل ۱۲. پاسخ ارتعاشی ناشی از شناسایی مسیر مورد مطالعه  
**Fig. 12. The vibration response induced by identification of the studied pathway**

نوشته شده در سیمولینک (مت لب) <sup>۱</sup> اندازه گیری می شود. پس از برداشت پاسخ ارتعاشی سامانه در آزمایش میدانی، آماده سازی و فیلتراسیون سیگنال های ناشی از پاسخ ارتعاشی انجام می شود. با توجه به پارامترهای دینامیکی سامانه پایش سلامت روسازی و معادلات دینامیکی حاکم بر سامانه مطابق کد سیمولینک نوشته شده بر پایه پاسخ ارتعاشی تصحیح یافته سامانه، نیمرخ طولی مسیر مورد مطالعه قابل استخراج است. کد برنامه مورد نظر در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.

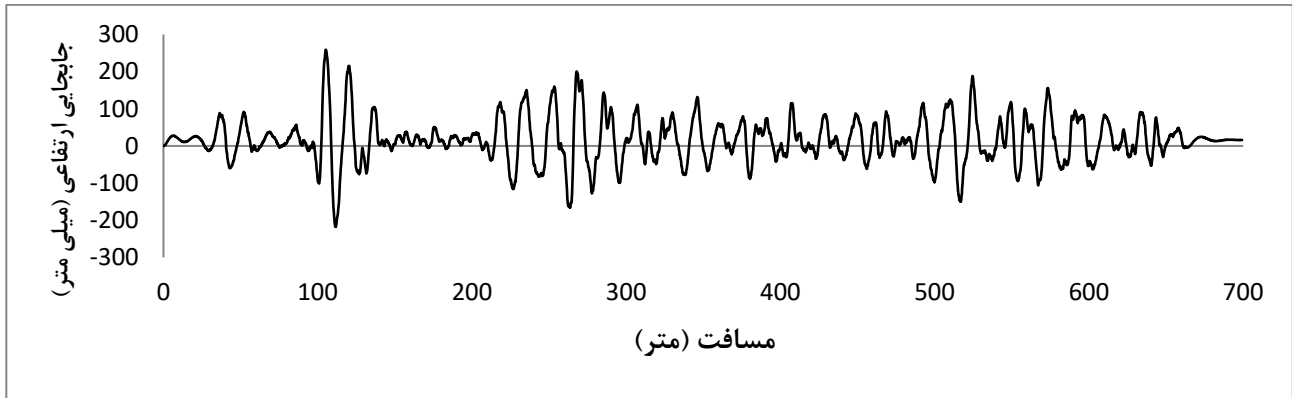
مطابق کدنویسی نوشته شده در نرم افزار مت لب، نمونه ای از سیگنال پاسخ ارتعاشی ناشی از ناهمواری سطح روسازی برگرفته از نیمرخ طولی مسیر برداشت شده باوجود تغییرات برحسب شتاب گرانش زمین (متر بر مجذور ثانیه) تقسیم بر ۲۵۶ (عدد بیانگر ۸ بیت سیگنال به ازای یک برابر شتاب گرانش زمین) نسبت به تعداد نمونه های برداشت شده، باوجود نرخ نمونه برداری ۲۰۰ هرتز در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

می شوند که در معادلات دینامیکی جهت محاسبه نیمرخ راه از روی پاسخ شتاب سیستم وجود دارند. شرط توقف الگوریتم ها مقدار خطای نتیجه شده از جواب بهینه در نظر گرفته شده است. تشخیص الگوریتمی که جواب بهتری را ارائه می کند، از طریق میزان زمان همگرایی الگوریتم به ازای مقدار خطای کمتر انجام شده است. از طرفی برای الگوریتم های در نظر گرفته شده شرط توقف ثانویه تعداد تکرار در حلقه الگوریتم جهت دستیابی به جواب بهینه در نظر گرفته شده است که الگوریتم در صورت نرسیدن به جواب بهینه به ازای تغییرات مقدار خطای مشخص با تعداد تکرار محدود شده متوقف می شود.

$$Z = \text{Min} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(r_{i,measured} - r_{i,precision})^2}{n}} \quad (4)$$

۴-۷- استخراج پاسخ ارتعاشی سامانه پایش سلامت و محاسبه نیمرخ طولی راه

نیمرخ مقطع طولی مسیر مورد مطالعه با استفاده از برنامه



شکل ۱۳. نیمرخ طولی مسیر مورد مطالعه برگرفته از پاسخ ارتعاشی  
 Fig. 13. Longitudinal profile of the studied pathway derived from the vibration response

شود. برای تفهیم بهتر این موضوع می‌توان فرض کرد که وسیله نقلیه با سرعت  $v$  روی مسیر دارای موج‌های سینوسی با طول موج‌های  $\lambda$  عبور می‌کند. فرکانس حس شده توسط وسیله نقلیه طبق رابطه ۵ حاصل می‌شود [۶].

$$f = v/\lambda \quad (5)$$

طبق روند ارائه شده توسط منتظری و همکاران جهت محاسبه نیمرخ راه به ازای سرعت ثابت از ترکیب نیمرخ راه و الگوی رانندگی بهره گرفته شده است. برای دستیابی به این الگوی ترکیبی متناسب با هر منطقه ترافیکی، لازم است پس از مدل‌سازی نیمرخ راه در حوزه زمان به وسیله دریافت پاسخ ارتعاشی سامانه و روش تابع چگالی طیفی توان برای سیگنال‌هایی با ماهیت فرآیند تصادفی مانند نیمرخ راه مطابق استاندارد ASTM E950 [۲۴] و تعیین تغییرات سرعت بر حسب زمان به عنوان الگوی رانندگی در شرایط عادی ترافیکی اقدام شود [۱۹]. اگر نیمرخ راه در سرعت متغیر با  $\gamma(t)$  و نیمرخ راه به ازای سرعت ثابت با  $Z(t)$  نشان داده شود با توجه به اینکه خودرو با دو سرعت متفاوت در دو زمان مختلف به یک نقطه خاص می‌رسد، می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} Z(t) = y \left( \frac{X}{V_0} \right) \\ X = \int_0^t v(t) dt \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه ۶،  $v(t)$  الگوی تغییرات سرعت رانندگی است و  $V_0$  سرعت ثابت مدنظر جهت به‌کارگیری در محاسبه نیمرخ راه است که به منظور محاسبه شاخص بین‌المللی ناهمواری بایستی برابر ۸۰ کیلومتر بر

نیمرخ طولی حاصل از مسیر مورد مطالعه در معبر فرعی بزرگراه شهید حکیم در شهر تهران به طول ۷۰۰ متر استخراج شده از نمونه پاسخ ارتعاشی سامانه پایش سلامت شکل ۱۲ مطابق کدنویسی انجام شده بر مبنای رفتار مکانیکی یک درجه آزادی سامانه در شکل ۱۳ ارائه شده است. این خروجی نیمرخ طولی مسیر به عنوان اولین نتیجه سامانه پایش سلامت محسوب می‌شود که در ادامه با وجود دستیابی به نیمرخ‌های طولی مسیر می‌توان اقدام به محاسبه میزان ناهمواری روسازی کرد.

#### ۴-۸- تصحیح نیمرخ راه به ازای سرعت ثابت وسیله نقلیه

سرعت وسیله نقلیه یکی از پارامترهای تأثیرگذار در اندازه‌گیری نیمرخ طولی راه است. برای ارزیابی وضعیت ناهمواری سطح روسازی راه‌ها مطابق با استانداردها، بایستی نیمرخ راه با سرعت ثابت و معینی برداشت شود. از طرفی برداشت با سرعت ثابت در راه‌ها با وجود وضعیت ترافیک و شرایط آن، وجود ندارد. جهت برطرف نمودن این مشکل، با استفاده از روابط محاسباتی، نیمرخ راه برداشت شده با سرعت متغیر به نیمرخ راه با سرعت ثابت و مشخص تبدیل می‌شود.

اگر یک وسیله نقلیه با سرعت‌های متفاوت روی یک نوع روسازی حرکت کند با وجود ثابت بودن ارتفاع ناهمواری‌های سطح روسازی، فرکانس‌های متفاوتی به وسیله نقلیه وارد می‌شود. در حقیقت پاسخ ارتعاشی ناهمواری‌های سطح جاده در حوزه زمان، تابع مستقیمی از سرعت وسیله نقلیه است. جهت استخراج نیمرخ طولی راه با وجود سرعت ثابت وسیله نقلیه در حال برداشت ناهمواری روسازی لازم است نیمرخ راه محاسبه شده با تغییرات سرعت وسیله نقلیه ترکیب



عمل می‌کند به طوری که تحرکات سیستم تعلیق خودرو با تجهیزات سنجش جابجایی در جهت قائم برای اندازه‌گیری و محاسبه ناهمواری ثبت می‌شود [۲۱ و ۲۲].

جهت محاسبه شاخص بین‌المللی ناهمواری از روی نیمرخ راه مطابق نتایج خروجی سامانه پایش سلامت در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار پروول<sup>(۲۳)</sup> به‌عنوان نرم‌افزاری شناخته‌شده مطابق استاندارد محاسبه شاخص ناهمواری روسازی بر اساس نیمرخ طولی راه و به کارگرفته شده در پژوهش‌های متداول ارزیابی ناهمواری روسازی راه‌ها، انجام شده است. نیمرخ‌های برداشت شده به صورت نقطه‌ای نتیجه شده از مکانیسم برداشت پاسخ ارتعاشی توسط حسگرهای شتاب صورت می‌گیرد که در نرم‌افزار پروول به‌طور خودکار فیلتر ۲۵۰ میلی‌متری برای ساختن نیمرخ طولی پیوسته راه روی نیمرخ ورودی و پارامترهای شبیه‌سازی یک چهارم خودرو اعمال می‌شود.

#### ۴-۱۰- مقایسه نتایج سامانه پایش سلامت روسازی با خروجی دستگاه

##### نیمرخ یاب سطح روسازی

به‌منظور اعتبارسنجی خروجی سامانه پایش سلامت، از تحلیل رگرسیون خطی استفاده می‌شود، به طوری که میزان همبستگی بین خروجی سامانه پایش سلامت و دستگاه نیمرخ‌یاب سطح روسازی بر مبنای میزان شاخص ناهمواری روسازی به‌عنوان متغیرهای وابسته و مستقل مدل خطی استخراج‌شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این راستا، جهت ارزیابی صحت نتایج برداشت ناهمواری روسازی از معبر فرعی بزرگراه شهید حکیم به طول ۷۰۰ متر به‌وسیله سامانه پایش سلامت و دستگاه نیمرخ‌یاب سطح روسازی برداشت ناهمواری انجام شده است. بدین طریق با مقایسه شاخص ناهمواری روسازی محاسبه شده از روی نیمرخ‌های برداشت شده از طریق دو سامانه، اعتبارسنجی نتایج سامانه پایش سلامت انجام شده است. در نتیجه اعتبارسنجی خروجی سامانه با استفاده از شاخص بین‌المللی ناهمواری صورت می‌گیرد.

با توجه به حداقل طول ارزیابی ناهمواری روسازی جهت محاسبه شاخص بین‌المللی ناهمواری مطابق استاندارد ASTM E1926 مسیر برداشت شده از معبر فرعی بزرگراه شهید حکیم با طول ۷۰۰ به ۷ قطعه صد متری تقسیم شده است. برای هر قطعه نیمرخ طولی و

ساعت در نظر گرفته شود.  $X$  مسافت پیموده شده است و  $X/V_0$  معرف زمان معادل ترکیب نیمرخ راه به ازای تغییرات سرعت رانندگی است [۱۹]. نکته قابل ذکر این است که بازه‌های نمونه‌برداری  $\Delta t$  برای  $Z(t)$  و  $y(t)$  با یکدیگر برابرند و علاوه بر آن نقطه شروع  $Z(t)$  و اولین نقطه  $y(t)$  به‌طور یکسان در نظر گرفته شده است [۶].

در این پژوهش ارزیابی ناهمواری مسیر مورد مطالعه با سرعت‌های متفاوت داده‌برداری شده است و در ابتدا تأثیر تغییرات سرعت سامانه پایش سلامت در ارزیابی ناهمواری و برداشت نیمرخ طولی راه بررسی شده است. سپس با وجود الگوریتم اشاره شده، نیمرخ‌های طولی مسیر مورد مطالعه با وجود تغییرات سرعت برداشت داده به نیمرخ طولی راه به ازای سرعت معین تبدیل شده است که در ادامه آن امکان محاسبه شاخص ناهمواری مطابق با استاندارد ارزیابی ناهمواری روسازی وجود داشته باشد.

نکته قابل توجه، محدودیت‌های برداشت داده‌های ناهمواری در سرعت‌های بالاست. توجه به این موضوع قابل اهمیت است که مطابق آیین‌نامه محاسبه شاخص بین‌المللی ناهمواری، سرعت ثابت و معین ارزیابی ناهمواری روسازی برابر ۸۰ کیلومتر بر ساعت است. جهت دستیابی به این مهم، کافی است با مشخص کردن سرعت مناسب برداشت نیمرخ طولی راه توسط سامانه پایش سلامت (به‌طور مثال ۳۰ کیلومتر بر ساعت) و به کارگیری الگوریتم تشریح شده تبدیل نیمرخ طولی راه به ازای سرعت متغیر به سرعت ثابت، به نیمرخ طولی مدنظر به ازای سرعت ثابت و معین ۸۰ کیلومتر بر ساعت دست پیدا کرد. با این وجود نیازی به برداشت داده در شرایط سرعت بالا وجود ندارد و نیز از نظر مقایسه با خروجی‌های دستگاه نیمرخ‌یاب سطح روسازی (شاخص بین‌المللی ناهمواری) که با سرعت‌های بیش از ۳۵ کیلومتر بر ساعت برداشت اطلاعات می‌کنند، نیازی به بررسی تفاوت خروجی‌ها از منظر تغییرات سرعت برداشت داده دیده نمی‌شود.

#### ۴-۹- محاسبه شاخص بین‌المللی ناهمواری به‌وسیله نیمرخ طولی راه

شاخص بین‌المللی ناهمواری دارای بیشترین استفاده در کشورها برای تعیین ناهمواری سطح روسازی است. استاندارد ASTM E1926 در دهه ۹۰ میلادی روندی جهت محاسبه شاخص ناهمواری از روی نیمرخ طولی راه ارائه کرد [۱۹]. این استاندارد بر اساس مدل ریاضی یک چهارم وسیله نقلیه با سرعت حرکتی ۸۰ کیلومتر بر ساعت

1 Profile Viewing and Analysis (ProVal) software

جدول ۲. نتایج الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و ازدحام ذرات  
Table 2. Results of genetic and particle swarm optimization algorithms

خطا	تکرار	زمان (ثانیه)	الگوریتم
۲/۱۳۱۶ e-۱۵	۱۳۳	۹/۸۸	ژنتیک
۷/۱۰۵۳ e-۱۵	۱۳۳	۱۴/۸۶	ازدحام ذرات

مقدار شاخص بین‌المللی ناهمواری اندازه‌گیری و محاسبه شدند. نیمرخ طولی مسیر به ازای سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت تصحیح شده است. با به‌کارگیری ۳ دسته از داده‌های ناهمواری به ازای ۳ مرتبه تکرار آزمایش که هر دسته حاوی ۷ مقدار شاخص بین‌المللی ناهمواری از برداشت ناهمواری خط عبوری رفت مسیر مورد مطالعه به‌عنوان داده‌های مدل‌سازی، می‌توان رابطه رگرسیون خطی بین خروجی سامانه پایش سلامت و دستگاه نیمرخ‌یاب سطح روسازی دست پیدا کرد. ارزیابی صحت نتایج سامانه پایش سلامت مطابق رابطه آماری استخراج شده انجام شده است. بدین منظور با استفاده از دسته ۷ تایی شاخص بین‌المللی ناهمواری ناشی از برداشت ناهمواری خط عبوری برگشت مسیر مورد مطالعه، اقدام به محاسبه میزان میانگین درصد خطا و در پی آن بررسی اعتبار خروجی سامانه پایش سلامت شده است.

پس از استخراج مدل بین خروجی سامانه پایش سلامت و دستگاه نیمرخ‌یاب سطح روسازی، برای اعتبارسنجی نتایج، مجذور میانگین مربعات خطا و نرمال شده مجذور میانگین مربعات خطا مطابق رابطه ۷ و ۸ محاسبه شده است. از طرفی دیگر جهت ارزیابی صحت نتایج از میانگین خطای بین خروجی سامانه پایش سلامت و دستگاه نیمرخ‌یاب سطح روسازی برای ناهمواری خط عبوری برگشت مسیر مورد نظر به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی استفاده شده است.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (IRI_{RSP,i} - IRI_{HMS,i})^2}{n}} \quad (7)$$

$$NRMSD = \frac{RMSD}{IRI_{max} - IRI_{min}} \quad (8)$$

در روابط فوق خطا بر اساس اختلاف شاخص بین‌المللی ناهمواری محاسبه شده بر اساس مدل استخراجی برای خروجی‌های سامانه پایش سلامت ( $IRI_{HMS}$ ) و شاخص بین‌المللی ناهمواری خروجی دستگاه نیمرخ‌یاب سطح روسازی ( $IRI_{RSP}$ ) به تعداد کل نمونه‌های

جدول ۳. پارامترهای دینامیکی سامانه پایش سلامت روسازی نتیجه از الگوریتم ژنتیک  
Table 3. Dynamic parameters of the pavement health monitoring system resulting from the genetic algorithm

مقادیر	پارامترهای دینامیکی
۳۳۶/۷۱	$I_m$
۴/۹۸	$C$
۷۳۳۰۵/۸۰	$K_s$
۱۶۷۹۴۵/۳۳	$K_t$

برداشت شده است. اضافه بر آن، نرمال شدگی خطا براساس نسبت اختلاف بیشینه و کمینه شاخص بین‌المللی ناهمواری محاسبه شده بر اساس مدل ارائه‌شده صورت گرفته است.

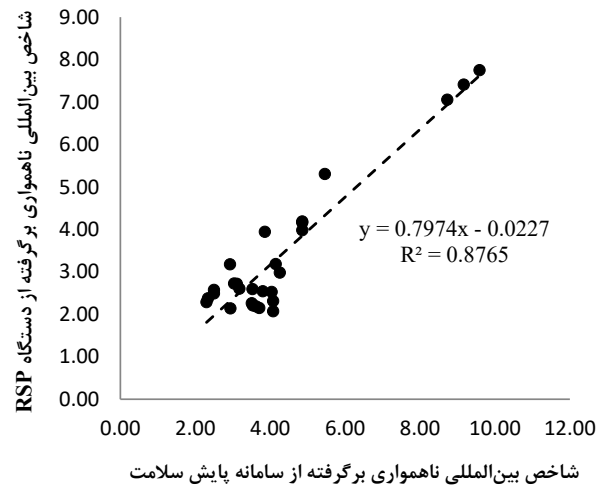
#### ۵- بیان و تحلیل نتایج

۵-۱- تعیین پارامترهای دینامیکی سامانه پایش سلامت روسازی  
نتایج الگوریتم‌های ژنتیک (GA) و ازدحام ذرات (PSO) در جدول ۲ قابل مشاهده است. با توجه به حد گذاری در مقدار خطای جواب الگوریتم‌ها، الگوریتم ژنتیک به ازای زمان همگرایی ۹/۸۸ ثانیه و تعداد تکرار ۱۳۳ مرتبه در عین خطای اندک ۲/۱۳۱۶ e-۱۵ نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات جواب بهتری را نتیجه می‌دهد. بنابراین پارامترهای دینامیکی سامانه پایش سلامت روسازی استخراج شده از الگوریتم ژنتیک در ترم‌های  $I_m$ ،  $C$ ،  $K_s$  و  $K_t$  به ترتیب برابر ۳۳۶/۷۱، ۴/۹۸، ۷۳۳۰۵/۸۰ و ۱۶۷۹۴۵/۳۳ مطابق جدول ۳ حاصل می‌شود.

#### ۵-۲- ارزیابی صحت نتایج سامانه پایش سلامت در مقایسه با خروجی دستگاه نیمرخ‌یاب سطح روسازی

پس از حصول نیمرخ‌های طولی معبر فرعی بزرگراه شهید حکیم، به ازای سرعت ثابت ۸۰ کیلومتر بر ساعت وسیله نقلیه از طریق سامانه پایش سلامت و دستگاه نیمرخ‌یاب سطح روسازی به‌عنوان نیمرخ دقیق طولی مسیر مورد مطالعه، شاخص بین‌المللی ناهمواری به ازای هر نیمرخ طولی برداشت شده به‌وسیله نرم‌افزار پروول محاسبه شده‌اند.

پس از طراحی آزمایش معرفی‌شده، مقادیر شاخص بین‌المللی ناهمواری محاسبه شده بر اساس نیمرخ‌های برداشت شده از طریق دو



شکل ۱۴. داده‌های مدل‌سازی شاخص ناهمواری روسازی برگرفته از خط عبوری رفت مسیر مورد مطالعه  
 Fig. 14. Modeling data of IRI taken from one-way of the studied pathway

جدول ۴. اطلاعات شاخص بین‌المللی ناهمواری به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی از برداشت ناهمواری خط عبوری برگشت مسیر مورد مطالعه  
 Table 4. IRI of studied pathway segments as validation data from another side pathway

میانگین درصد خطا	قطعه هفتم	قطعه ششم	قطعه پنجم	قطعه چهارم	قطعه سوم	قطعه دوم	قطعه اول	
	۲/۵۱	۲/۳۴	۳/۳۲	۲/۲۵	۲/۵۳	۴/۱۸	۵/۵۹	IRI <sub>HMS</sub>
	۱/۹۸	۱/۸۴	۲/۶۲	۱/۷۷	۱/۹۹	۳/۳۱	۴/۴۳	IRI <sub>model</sub>
	۲/۵۷	۲/۳۸	۳/۱۸	۲/۲۹	۲/۴۹	۳/۹۴	۵/۳۱	IRI <sub>RSP</sub>
درصد خطا	۲۳/۰۰	۲۲/۵۵	۱۷/۴۶	۲۲/۶۴	۱۹/۸۹	۱۵/۹۸	۱۶/۴۸	

بین‌المللی ناهمواری در محدوده بالا بیشتر دیده می‌شود. جهت اثبات این فرضیه که خروجی‌ها سامانه در محدوده بالایی شاخص ناهمواری انطباق بهتری دارند، نیاز به برداشت اطلاعات بیشتری از مسیرهای متنوع است که در حدود تحقیقات این پژوهش قرار نمی‌گیرد و نیز عنایت به این موضوع که برداشت داده‌ها جهت اعتبارسنجی خروجی‌های سامانه ماهیت تصادفی داشته‌اند.

با استفاده از داده‌های برگرفته از برداشت ناهمواری خط عبوری برگشت مسیر مورد مطالعه، صحت رابطه و در پی آن صحت نتایج سامانه پایش سلامت ارزیابی شد. بدین منظور میانگین درصد خطای حاصل از نتایج ناشی از شاخص ناهمواری تخمین زده شده، برگرفته از نتایج سامانه پایش سلامت و نتایج دستگاه نیمرخ یاب سطح روسازی بر اساس مقدار شاخص بین‌المللی ناهمواری انجام شده است.

جدول ۴ اطلاعات شاخص بین‌المللی ناهمواری جهت محاسبه درصد خطا را به ازای یک دسته از داده‌های صحت‌سنجی نتایج سامانه نمایش داده است. در این جدول شاخص بین‌المللی ناهمواری

سامانه به کار گرفته شده در این پژوهش به ازای برداشت ناهمواری خط عبوری رفت مسیر مورد مطالعه در قالب نموداری در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این شکل محور افقی مقادیر شاخص بین‌المللی ناهمواری برگرفته از سامانه پایش سلامت و محور عمودی معرف مقادیر شاخص بین‌المللی ناهمواری نتیجه شده از دستگاه نیمرخ‌یاب سطح روسازی است.

مدل خطی  $y = 0.7974x - 0.0227$  با ضریب تعیین  $R^2$  برابر ۰/۸۷۶۵ از تحلیل رگرسیون بین نتایج سامانه پایش سلامت و دستگاه نیمرخ‌یاب سطح روسازی به‌عنوان سامانه برداشت ناهمواری روسازی دقیق استخراج شده است. در راستای تحلیل خطای نتایج سامانه پایش سلامت، مطابق روابط ۷ و ۸، مجذور میانگین مربعات خطا و نرمال شدگی مجذور میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر با ۵۹/۲۸ درصد و ۹/۶۸ درصد محاسبه شده‌اند.

همان‌طور که از نمودار شاخص ناهمواری مسیر مورد مطالعه بین خروجی‌های سامانه‌ها مشاهده می‌شود، انطباق بین شاخص‌های

عملکرد و کیفیت مناسب سامانه پایش سلامت راه جهت به کارگیری در سیستم مدیریت روسازی در سطح پروژه پی برد. با وجود محاسبه میزان خطای نتایج سامانه پایش سلامت، سطح کیفیت و دقت کافی سامانه در ارزیابی ناهمواری روسازی، قابل مقایسه با سامانه های دقیق ارزیابی ناهمواری است و از نظر عملکردی، خروجی های نزدیک به سامانه های دقیق را ارائه کرده است و علاوه بر آن، از منظر سطح کیفیت با سامانه های مقرون به صرفه همچون سامانه های مجهز به تلفن همراه هوشمند فاصله قابل توجهی دارد. علاوه بر توجیه فنی سامانه پیشنهادی، با توجه به پایین بودن هزینه های خرید، راه اندازی، بهره برداری و نگهداری سامانه پایش سلامت نسبت به دستگاه نیمرخ یاب سطح روسازی، به کارگیری سامانه پایش سلامت توجیه اقتصادی بیشتری را جهت ارزیابی وضعیت ناهمواری روسازی راه ها به خود اختصاص داده است که به عنوان مهمترین وجه تمایز سامانه در مقایسه با سامانه های دیگر در نظر قرار گرفته است.

**۵-۳- ارزیابی تکرارپذیری نتایج استخراج شده از سامانه پایش سلامت**  
علاوه بر بررسی اعتبارسنجی نتایج سامانه پایش سلامت راه، بایستی قابلیت تکرارپذیری خروجی های برداشت شده از سامانه پایش سلامت بررسی شود. بدین منظور می توان با تعیین میزان همبستگی بین پاسخ های ارتعاشی حاصل شده توسط سامانه در تکرارهای برداشت داده از مسیر مشخص را به عنوان ملاک ارزیابی تکرارپذیری مدنظر قرار داد. در این راستا نمونه های پاسخ های ارتعاشی برداشت شده از آزمایش های میدانی محدوده دانشگاه صنعتی امیرکبیر مبنای تشخیص قرار گرفتند. براین اساس میزان همبستگی بین سیگنال های شتاب برداشت شده در تکرار داده برداری ارزیابی شد. مقدار همبستگی بین پاسخ های ارتعاشی برابر با ۰/۸۵ محاسبه شد که برگرفته از میانگین ۵ مرتبه ارزیابی همبستگی به ازای هر برداشت اطلاعات استخراج شده است. با وجود نزدیک بودن میزان همبستگی به مقدار ۱ می توان به قابلیت تکرارپذیری نتایج سامانه پایش سلامت پی برد.

#### ۶- نتیجه گیری

با وجود تحقیقات صورت گرفته در زمینه سامانه های پایش سلامت روسازی، خلاء وجود دستگاه های مقرون به صرفه مجهز به

برداشت شده از طریق سامانه پایش سلامت ( $IRI_{HMS}$ ) به ازای ۷ قطعه صد متری از مسیر مورد مطالعه داخل مدل ارائه شده قرار گرفته است و خروجی آن با مقادیر خروجی شاخص بین المللی ناهمواری دستگاه نیمرخ یاب سطح روسازی ( $IRI_{RSP}$ ) مقایسه شده است.

مطابق جدول ۴ میانگین درصد خطای بین شاخص بین المللی ناهمواری تخمین زده شده ( $IRI_{model}$ ) و شاخص بین المللی ناهمواری از خروجی دستگاه نیمرخ یاب سطح روسازی ( $IRI_{RSP}$ ) برابر با ۱۹/۷۲ درصد است. از طرفی دیگر به طور جزئی می توان مشاهده کرد که نتایج شاخص ناهمواری تخمین زده شده (مطابق مدل خطی استخراج شده) نسبت به شاخص ناهمواری نتیجه شده از دستگاه نیمرخ یاب سطح روسازی از یک مسیر مشترک مقداری کمتری را خروجی می دهد که این نتیجه نیز در جهت توجیه به کارگیری سامانه پایش سلامت با وجود بهتر نمایش دادن وضعیت روسازی، به هدف ارزیابی ناهمواری روسازی، می تواند مورد توجه قرار گیرد.

نیمرخ یاب های دقیق مجهز به سیستم لیزری که در این پژوهش جهت اعتبارسنجی نتایج سامانه به کار گرفته شده است، در برداشت ناهمواری با مشکلاتی روبرو هستند. در درجه اول، با توجه به اینکه نیمرخ یاب های دقیق در محدوده طول موج های کوتاه، قابلیت برداشت ترک ها را دارند، لذا در نهایت شاخص بین المللی ناهمواری بالایی را به عنوان خروجی اندازه گیری می کنند. معضل این موضوع وقتی دیده می شود که هدف ارزیابی ناهمواری های مؤثر بر راحتی و ایمنی سرنشینان خودرو است. بنابراین نیازی به برداشت ناهمواری با این دقت در محدوده طول موج های کوتاه، شامل ترک ها دیده نمی شود. چرا که بخش عمده ی ترک های سطحی در محدوده طیف ناهمواری روسازی، در حین عبور از راه قابل حس نیستند. دوم آنکه نتایج خروجی نیمرخ یاب های دقیق در محدوده طول موج های کوتاه، به طور کامل تکرارپذیر نیستند. به همین علت، مشکل ترک ها در محاسبه شاخص بین المللی ناهمواری یکنواخت نیست و تأثیر آن با هر شاخص ناهمواری وجود دارد. در نتیجه بکارگیری سامانه ای مناسب با ارزیابی طیف طول موج های سطحی روسازی خواسته شده و مؤثر بر راحتی و ایمنی سرنشینان خودرو، مورد نیاز دیده می شود. پس از مقایسه ها و ارزیابی های صورت گرفته بین خروجی های سامانه پایش سلامت و خروجی روش های دقیق برداشت ناهمواری روسازی به ویژه دستگاه نیمرخ یاب سطح روسازی، می توان به سطح

- تعیین پارامترهای دینامیکی سامانه پایش سلامت با رویکرد بهینه‌سازی بدون نیاز به آزمایش‌های سخت‌افزاری و استخراج پاسخ‌های بهینه‌تر پارامترهای دینامیکی سامانه با مقایسه دو روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک انجام شد.
- به‌کارگیری روش‌های نوآورانه با روش‌های پردازش سیگنال دیجیتال برای فیلتراسیون سیگنال‌های شتاب برداشت شده از سامانه پایش سلامت و خودرو منجر به استخراج اطلاعات اولیه جهت اندازه‌گیری نیمرخ طولی راه و در ادامه آن محاسبه میزان ناهمواری روسازی شد.

### تقدیر و تشکر

در فرآیند انجام این پژوهش سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده ای کشور و شرکت مهندسی مشاور آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک کمک‌های شایانی داشته‌اند که از حمایت‌های ایشان کمال تشکر را داریم.

### مراجع

- [1] G. Loprencipe, G. Cantisani, Unified Analysis of Road Pavement Profiles for Evaluation of Surface Characteristics, *Modern Applied Science*, 7(8) (2013).
- [2] G.P. Ong, S. Noureldin, K. Sinha, Automated Pavement Condition Data Collection Quality Control, Quality Assurance, and Reliability, *Purdue University*, (2011).
- [3] K. reza kashyadeh, M.J. Ostad Ahmad Ghorabi, A. Arghavan, Airstrip Roughness Simulation to Dynamic and Vibration Analysis For Take off and Land on, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3 (2013) 245.
- [4] CR. Bennett and PE. Salt, Evaluation of the ARAN high speed profilometer, N.D. Lea International Ltd. V6G 2T3, Canada, (1994).
- [5] G. Cantisani, G. Loprencipe, Road Roughness and Whole Body Vibration: Evaluation Tools and Comfort Limits, *Journal of Transportation Engineering*, 136(9) (2010) 818-826.

ابزارهای دقیق با هدف ارزیابی ناهمواری روسازی دیده شد که توانایی برداشت عوارض سطحی روسازی در مرحله ساخت و بهره‌برداری روسازی راه‌ها به عنوان یکی از ورودی‌های سیستم مدیریت روسازی در سطح پروژه و سطح شبکه داشته باشند. این پژوهش با استفاده از سامانه پایش سلامت راه توسعه یافته بر پایه شتاب سنج روی اندازه‌گیری شاخص ناهمواری روسازی تمرکز داشته است، به طوری که با بهره‌گیری از روش‌های محاسباتی و تحلیلی نوین و کمترین خطا در ارزیابی ناهمواری روسازی به راه‌اندازی سامانه پایش سلامت روسازی با کمترین اجزای ارتجاعی پرداخته شد. در این سامانه پس از ساخت و تجهیز آن به ابزار دقیق مقرون به صرفه، برداشت داده‌های خام و طی کردن فرآیند پردازش داده‌ها بر اساس تکنیک‌های پردازش سیگنال‌های دیجیتال به هدف دستیابی به پاسخ ارتعاشی صرفاً ناشی از ناهمواری روسازی صورت گرفت. سپس با استخراج پارامترهای دینامیکی و تحلیل رفتار دینامیکی یک درجه‌آزادی سامانه پایش سلامت، امکان حصول نیمرخ طولی راه و میزان ناهمواری به کمک روش‌های برنامه‌نویسی به وجود آمد. پس از استخراج نیمرخ طولی راه، تصحیح آن بر اساس دستیابی به نیمرخ طولی راه به ازای سرعت ثابت و معین برداشت ناهمواری بدست می‌آید. سپس با محاسبه شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی از روی نیمرخ طولی مسیرها اقدام به ارائه مدلی با ضریب تعیین ۰/۸۷ بر اساس خروجی‌های دستگاه نیمرخ‌یاب سطح روسازی شد. در نهایت نتیجه ارزیابی صحت نتایج با محاسبه مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده کمتر از ۱۰٪ و میانگین درصد خطای کمتر از ۲۰٪ برای سامانه پایش سلامت که مورد توجه متولیان امر می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفت.

دست‌آوردهای این پژوهش در جمع‌بندی مطابق موارد زیر است:

- طرح و توسعه سامانه‌ای مقرون به صرفه با قابلیت برداشت نیمرخ طولی راه و محاسبه شاخص بین‌المللی ناهمواری با سرعت حرکتی بیش از سرعت پیاده‌روی صورت گرفته است. به طوری که سامانه فاقد جرم فنربندی شده، میراگر و بهره‌گیری از چرخ پنجم لاستیکی توپر در راستای کاهش خطا در فرآیند ارتعاشی ارزیابی مستقیم ناهمواری سطح روسازی و کمترین دخالت روند تحلیل و محاسبات ارتعاشی نسبت به روش‌های متداول انجام شده است. از طرفی امکان اتصال سامانه پایش سلامت به هر خودرویی با کمترین دریافت اثر ارتعاشی از طرف خودرو وجود دارد.

- of smartphones under realistic settings to estimate road roughness condition, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014(1) (2014).
- [15] A. González, E.J. O'Brien, Y.Y. Li, K. Cashell, The use of vehicle acceleration measurements to estimate road roughness, Vehicle System Dynamics, 46(6) (2008) 483-499.
- [16] M. Ahmad, W. Raza, Z. Omer, M. Asif, A Participatory System to Sense the Road Conditions, International Journal of Engineering and Manufacturing, 7(3) (2017) 31-40.
- [17] Misc, National Instrument Company, On the WWW, May. URL <http://www.ni.com/en-us/shop/labview>.
- [18] Misc, ARDUINO Software, On the WWW, May. URL <http://www.arduino.cc/en/Main/Software>.
- [19] M.M. Gh, S.Y.J. M, M. Soleymani, Vehicle ride evaluation based on a time-domain variable speed driving pattern, International Journal of Vehicle Design, 47(1/2/3/4) (2008) 81.
- [20] W.T. Thomson, Theory of Vibration with Applications, in, CRC Press, (2018).
- [21] Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements, in, ASTM International E.1926, 14 (1999) 1-18.
- [22] M. Sayers, S. Karamihas, The little book of profiling: basic information about measuring and interpreting road profiles, in, 9 (1998) 100.
- [23] Misc, ProVAL (Profile Viewing and Analysis) software, On the WWW, May. URL <http://www.roadprofile.com/proval-software>.
- [24] Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference, in, ASTM International E950/950M-09,9 (2009) 1135-1140.
- [6] O. Kaviani-pour, M. Montazeri-Gh, M. Moazamizadeh, Road profile measurement using the two degrees of freedom response-type mechanism, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 229(6) (2014) 1074-1087.
- [7] P. Múčka, Road Roughness Limit Values Based on Measured Vehicle Vibration, Journal of Infrastructure Systems, 23(2) (2017) 04016029.
- [8] D.M. Vines-Cavanaugh, M.L. Wang, J.G. McDaniel, Real-world application and validation of vehicle-mounted pavement inspection system, in: Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2013, SPIE, (2013).
- [9] M. Gdula, J.A. Brache, N.D. Angelini, C. Shevlin, Mapping City Potholes, Worcester Polytechnic Institute, 2006.
- [10] N. Abulizi, A. Kawamura, K. Tomiyama, S. Fujita, Measuring and evaluating of road roughness conditions with a compact road profiler and ArcGIS, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 3(5) (2016) 398-411.
- [11] S.-Y. Chen, A. Shih, C.-Y. Hsiao, Road conditions detection using Arduino based sensing module and smartphone, in: 2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan, IEEE, (2015) 254-255.
- [12] A.R. Maurya, A. Yadav, P. Arote, A. Baviskar, J. Baviskar, Real Time Arduino Based Depth Sensing for Road Condition Monitoring, 4(4) (2016) 947-952.
- [13] O. Rajmane, V. Rane, A. Bhosale, Road Condition Detection Using Arduino Based Sensing Module And Android Smartphone-IJAERD, in, (2017) 52-57.
- [14] V. Douangphachanh, H. Oneyama, A study on the use

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Arbabbpour Bidgoli, A. Golroo, A. Ghelmani Rashidabad, A.A. Suratgar, M. Azam Khosravi, Evaluating Pavement Roughness Based on Vibration Analysis Due to Road Health Monitoring System, Amirkabir J. Civil Eng., 51(6) (2020) 1297-1296

DOI: [10.22060/ceej.2018.14136.5569](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14136.5569)

