تعیین شاخص ناهمواری بین‌المللی
با استفاده از حسگرهای شتاب‌سنج نصب‌شده روی اتومبیل

مقاله علمی-پژوهشی

محمدجواد عراقی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
علیرضا عسکری، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
*امیر کاووسی (نویسنده مسئول)، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: kavussia@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۷- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵
صفحه ۳۴-۱۷

چکیده

ناهمواری روسازی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکردی راه است که نقش تعیین‌کننده‌ای در ایمنی، راحتی سواری و هزینه‌های نگهداری دارد. اندازه‌گیری این شاخص معمولاً با استفاده از تجهیزات پیشرفته‌ای مانند پروفیل‌سنج‌های لیزری انجام می‌شود که با وجود دقت بالا، به دلیل هزینه زیاد، نیاز به تجهیزات تخصصی و محدودیت در دسترسی، امکان استفاده گسترده از آن‌ها را محدود می‌سازد. ازاین‌رو توسعه روش‌های کم‌هزینه، قابل‌حمل و مبتنی بر تجهیزات در دسترس برای تخمین شاخص ناهمواری بین‌المللی (IRI) می‌تواند گامی مؤثر در پایش وضعیت روسازی باشد. در این پژوهش، کارایی حسگرهای میکروالکترومکانیکی (MEMS) در تخمین غیرمستقیم IRI مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، داده‌های شتاب قائم با استفاده از یک حسگر MEMS نصب‌شده در دو موقعیت کنسول و داشبورد خودرو برداشت شد. داده‌های خام پس از پردازش شامل فیلترکردن نویز، حذف رانش، هم‌ترازسازی سیگنال و انتگرال‌گیری عددی برای محاسبه IRI به‌کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که هر دو محل نصب حسگر قادر به ارائه مقادیر قابل‌قبول IRI هستند و اختلاف میان مقادیر محاسبه‌شده و داده‌های مرجع سامانه مدیریت روسازی (PMS) در محدوده قابل‌قبول قرار دارد. همچنین مشخص شد که محل نصب حسگر، نرخ نمونه‌برداری و کیفیت پردازش سیگنال از عوامل مؤثر بر دقت نهایی هستند. یافته‌ها بیانگر آن است که حسگرهای MEMS به‌دلیل هزینه پایین، سهولت نصب و قابلیت حمل می‌توانند ابزاری کارآمد برای پایش وضعیت روسازی باشند.

واژه‌های کلیدی: شتاب‌سنج MEMS ، شاخص ناهمواری بین‌المللی، پایش وضعیت روسازی، مدیریت روسازی، پردازش سیگنال

۱- مقدمه

ناهمواری سطح جاده یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکرد روسازی است که تأثیر مستقیم بر ایمنی ترافیک، کیفیت سواری، مصرف سوخت و هزینه‌های بهره‌برداری دارد (Llopis-Castelló et al., 2026; Tarnini et al., 2026). تغییرات ارتفاعی سطح راه موجب افزایش ارتعاشات وارد بر خودرو شده و رفتار دینامیکی وسیله نقلیه را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ موضوعی که می‌تواند پایداری حرکت، توانایی کنترل خودرو و سطح راحتی سرنشینان را کاهش دهد (Stan & Oprea, 2026). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که افزایش ناهمواری نه‌تنها احتمال بروز حوادث را افزایش می‌دهد،

بلکه موجب رشد مصرف سوخت، کاهش عمر قطعات خودرو و افزایش هزینه‌های نگهداری ناوگان حمل‌ونقل می‌شود (Llopis-Castelló et al., 2026).

از این رو، پایش دقیق و مستمر ناهمواری برای حفظ ایمنی، بهبود کیفیت سواری و مدیریت بهینه زیرساخت‌های حمل‌ونقل ضروری است(Islam et al., 2014).

در شبکه راه‌های برون‌شهری ایران، به‌ویژه مسیرهای پرتردد، فرسودگی روسازی و نبود سامانه‌های پایش پیوسته موجب شده است که بسیاری از خرابی‌ها در مراحل اولیه شناسایی نشوند و مداخلات نگهداری با تأخیر انجام گیرد. این تأخیر، هزینه‌های مرمت را افزایش داده و سطح خدمت‌دهی جاده را کاهش می‌دهد. بنابراین، توسعه روش‌های سریع، کم‌هزینه و قابل‌اعتماد برای ارزیابی وضعیت روسازی، یکی از نیازهای اساسی مدیریت راه در کشور به شمار می‌آید (Ghanbari et al., 2026; Jayakody et al., 2024).

برای ارزیابی ناهمواری طولی، شاخص بین‌المللی ناهمواری (IRI) به‌عنوان معتبرترین معیار سنجش وضعیت روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص بر اساس پروفیل طولی سطح جاده محاسبه می‌شود و امکان مقایسه عملکرد روسازی در شبکه‌های مختلف را فراهم می‌سازد (Baimukhametov & White, 2024). روش‌های سنتی اندازه‌گیری ناهمواری عمدتاً مبتنی بر استفاده از پروفیل‌سنج‌های لیزری و تجهیزات تخصصی برداشت هستند که اگرچه دقت بالایی دارند، اما هزینه‌بر، زمان‌بر و وابسته به نیروی متخصص‌اند. علاوه بر این، اجرای این تجهیزات در شبکه‌های گسترده راهی دشوار است و محدودیت در تعداد دفعات برداشت موجب می‌شود تغییرات سریع در وضعیت روسازی به‌موقع شناسایی نشود(Islam et al., 2014).

در بسیاری از کشورها، از جمله ایران، نبود سامانه‌های پایش مستمر و وابستگی به روش‌های دوره‌ای موجب شده است که خرابی‌ها در مراحل اولیه تشخیص داده نشوند و مداخلات نگهداری با تأخیر انجام گیرد. این مسئله هزینه‌های مرمت را افزایش داده و سطح خدمت‌دهی جاده را کاهش می‌دهد. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که توسعه ابزارهای کم‌هزینه و قابل‌حمل می‌تواند نقش مهمی در افزایش پوشش برداشت و کاهش هزینه‌های پایش داشته باشد(Ghanbari et al., 2026; Jayakody et al., 2024).

پیشرفت فناوری‌های هوشمند در سال‌های اخیر، رویکردهای جدیدی برای اندازه‌گیری ناهمواری و پایش وضعیت روسازی ارائه کرده است. حسگرهای شتاب‌سنج و ژیروسکوپ مبتنی بر فناوری سامانه‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) که در تلفن‌های هوشمند و تجهیزات قابل‌حمل به‌کار می‌روند، امکان برداشت سریع، گسترده و کم‌هزینه داده‌های ارتعاشی را فراهم کرده‌اند(Islam et al., 2014). این حسگرها با وجود قیمت پایین، قادرند ارتعاشات قائم خودرو را با دقت قابل‌قبولی ثبت کنند و در صورت پردازش مناسب، شاخص‌هایی مانند IRI را تخمین بزنند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که استفاده از حسگرهای MEMS می‌تواند به‌عنوان جایگزینی عملی برای تجهیزات تخصصی برداشت ناهمواری مطرح شود، به‌ویژه در مسیرهایی که پوشش‌دهی گسترده و برداشت مکرر مورد نیاز است (Yiliguoqi et al., 2026).

علاوه بر این، توسعه الگوریتم‌های پردازش سیگنال و مدل‌های تحلیلی پیشرفته، امکان استخراج ویژگی‌های دقیق‌تری از داده‌های ارتعاشی را فراهم کرده است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ترکیب داده‌های حسگرهای MEMS با روش‌های تحلیل ارتعاشی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت سطح راه ارائه دهد و در برخی موارد، دقتی نزدیک به تجهیزات استاندارد برداشت ایجاد کند(Purwanto et al., 2025). با وجود این پیشرفت‌ها، ارزیابی میدانی عملکرد این حسگرها در شرایط واقعی ترافیکی، به‌ویژه در مسیرهای پرتردد، همچنان محدود است و نیاز به بررسی‌های دقیق‌تر دارد(Wasiq et al., 2025).

با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در حوزه پایش وضعیت روسازی، همچنان خلأهای مهمی در ارزیابی دقیق عملکرد حسگرهای MEMS در شرایط واقعی بهره‌برداری وجود دارد. بسیاری از مطالعات پیشین یا بر مقایسه اولیه این حسگرها با تجهیزات استاندارد تمرکز داشته‌اند، یا تنها در مسیرهای محدود و شرایط کنترل‌شده آزمایش شده‌اند (Purwanto et al., 2025; Wasiq et al., 2025). علاوه بر این، بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌ها به تحلیل الگوریتمی یا مدل‌های یادگیری ماشین پرداخته‌اند، بدون آنکه رفتار واقعی خودرو، شرایط ترافیکی و ویژگی‌های مسیر را به‌صورت یکپارچه در تحلیل دخیل کنند(Yiliguoqi et al., 2026). در کشورهای در حال توسعه،

از جمله ایران، این خلأ پژوهشی برجسته‌تر است؛ زیرا شبکه راه‌های برون‌شهری گسترده، محدودیت منابع و نبود سامانه‌های پایش مستمر، نیاز به روش‌های کم‌هزینه و قابل‌اعتماد را دوچندان می‌کند(Shrestha et al., 2025).

بر این اساس، هدف این پژوهش ارزیابی کارایی حسگرهای MEMS در تخمین غیرمستقیم شاخص ناهمواری بین‌المللی (IRI) و اعتبارسنجی نتایج با داده‌های مرجع سامانه مدیریت روسازی در یک مسیر پرتردد برون‌شهری است. در این مطالعه، داده‌های شتاب قائم در دو محل نصب حسگر برداشت شده و با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال، پروفیل قائم بازسازی و شاخص IRI محاسبه شده است. سپس دقت نتایج در شرایط واقعی ترافیکی و هندسی مسیر ارزیابی شده است.

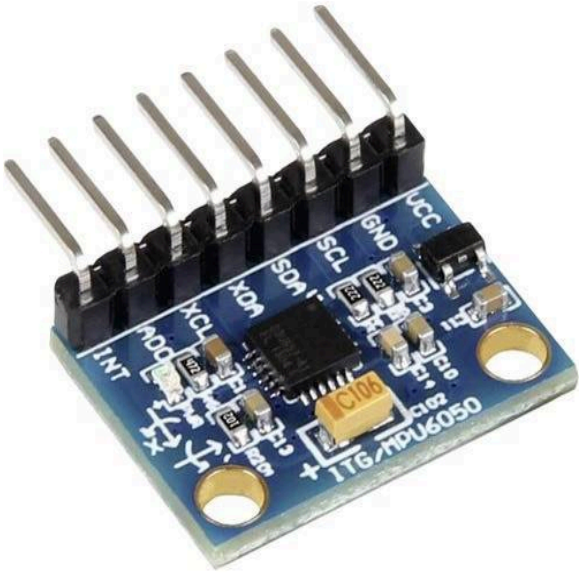
ساختار مقاله به این صورت است: در بخش بعد، مواد و روش پژوهش شامل معرفی مسیر، تجهیزات برداشت و الگوریتم‌های پردازش داده تشریح می‌شود. در ادامه، نتایج تحلیل‌ها و مقایسه داده‌های حسگر با مقادیر مرجع ارائه می‌گردد. در نهایت، جمع‌بندی و پیشنهادهای کاربردی برای بهبود فرآیندهای پایش و مدیریت روسازی بیان می‌شود.

۲- شتاب‌سنج مورد استفاده و نحوه نصب

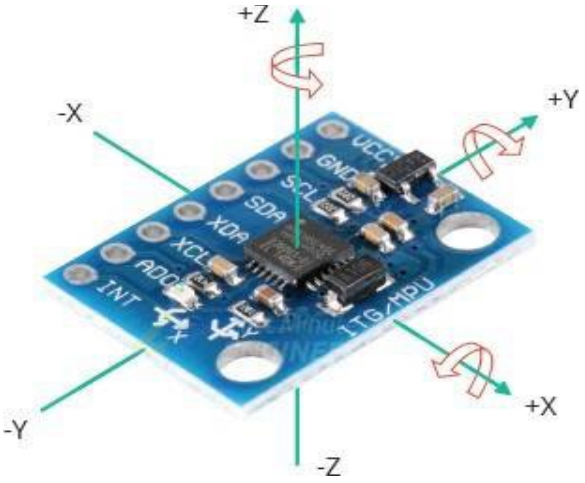
در این پژوهش از حسگر میکروالکترومکانیکی MPU-6050 به‌عنوان ابزار اصلی برداشت شتاب قائم استفاده شد. این حسگر یک واحد اندازه‌گیری اینرسی شش‌محوره است که شامل شتاب‌سنج سه‌محوره و ژیروسکوپ سه‌محوره مجتمع‌شده بر روی یک تراشه واحد بوده و به دلیل ابعاد کوچک، پایداری مناسب، مصرف توان پایین و قابلیت ادغام آسان با واحدهای ثبت داده، گزینه‌ای مناسب برای پایش دینامیکی حرکت خودرو و استخراج شاخص‌های مرتبط با ناهمواری روسازی محسوب می‌شود. ساختار فیزیکی ماژول، اجزای اصلی و نحوه قرارگیری تراشه بر روی برد در شکل۱ نمایش داده شده است که نمایی کلی از حسگر مورد استفاده در این پژوهش را ارائه می‌دهد.

حسگر MPU-6050 قادر است شتاب خطی را در سه محور X، Y و Z در محدوده‌های قابل‌تنظیم ±۲ g تا ±۱۶ g اندازه‌گیری کند و ژیروسکوپ داخلی آن نیز سرعت زاویه‌ای را در بازه‌های ±۲۵۰ تا ±۲۰۰۰ درجه بر ثانیه ثبت می‌کند. ارتباط حسگر با واحد ثبت داده از طریق رابط I2C برقرار شد و پین‌های اصلی شامل VCC، GND، SCL، SDA، AD0 و INT مطابق استاندارد ماژول مورد استفاده قرار گرفتند. این پیکربندی امکان تبادل داده پایدار و کم‌نویز را فراهم کرده و شرایط لازم برای ثبت پیوسته شتاب قائم را مهیا ساخت. سامانه برداشت داده شامل ماژول MPU-6050، واحد ثبت داده مجهز به رابط I2C و سامانه موقعیت‌یابی GPS بود که به‌صورت یکپارچه عمل کرده و داده‌های برداشت‌شده را برای پردازش‌های بعدی ذخیره می‌کرد.

برای دستیابی به سیگنال پایدار و قابل‌اعتماد، حسگر در دو موقعیت مختلف داخل خودرو نصب شد: روی کنسول و روی داشبورد. در هر دو حالت، محور Z حسگر در راستای قائم خودرو تنظیم شد تا شتاب عمودی ناشی از ناهمواری مسیر با بیشترین دقت ثبت شود و محورهای X و Y نیز مطابق جهت طولی و عرضی خودرو هم‌راستا شدند. دیاگرام جهت‌گیری محورها، راستای اندازه‌گیری شتاب و چرخش، و نحوه قرارگیری حسگر در شکل۲ ارائه شده است.



شکل ۱. نمایی از ماژول شتاب‌سنج و ژیروسکوپ MPU-6050 مورد استفاده در پژوهش



شکل ۲. جهت‌گیری محورها و نحوه قرارگیری حسگر MPU-6050 در داخل خودرو

نصب حسگر روی کنسول به دلیل نزدیکی به مرکز جرم خودرو، سیگنال یکنواخت‌تر و کم‌نویزتری تولید کرد، در حالی‌که نصب روی داشبورد تحت تأثیر ارتعاشات بدنه قرار داشت و حساسیت بیشتری نسبت به نویزهای محیطی نشان داد. این تفاوت‌ها در بخش تحلیل نتایج به‌طور تفصیلی بررسی شده‌اند.

برای جلوگیری از انتقال ارتعاشات ناخواسته، حسگر با استفاده از پایه ثابت و نوار ضدلرزش در محل نصب محکم شد و جهت جلوگیری از چرخش یا جابه‌جایی، بدنه حسگر در راستای محورهای مختصات تثبیت گردید. این اقدامات موجب افزایش پایداری سیگنال و کاهش خطاهای ناشی از حرکت نسبی حسگر نسبت به بدنه خودرو شد و شرایط لازم برای برداشت داده‌های قابل‌اعتماد و استفاده از آن‌ها در محاسبه شاخص ناهمواری بین‌المللی (IRI) را فراهم کرد.

۳- مواد و روش‌ها

۳–۱- معرفی مسیر مطالعه

مسیر مورد مطالعه بخشی از محور برون‌شهری گرگان–آزادشهر است که به‌عنوان یکی از مسیرهای پرتردد شمال و شمال‌شرق کشور شناخته می‌شود. بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که این محور در بخش‌هایی با خرابی‌های سطحی شامل چاله‌ها، ترک‌های طولی و عرضی، نشست‌های موضعی و وصله‌های متعدد مواجه است؛ خرابی‌هایی که می‌توانند موجب افزایش ارتعاشات قائم خودرو و تغییرات محسوس در پروفیل طولی مسیر شوند(Gansonré et al., 2025; Sias et al., 2025).

در شکل ۳ نمونه‌ای از خرابی‌های سطحی در محور گرگان–آزادشهر نمایش داده شده است. وجود این خرابی‌ها بیانگر فرسودگی روسازی و ضرورت پایش دقیق ناهمواری برای ارزیابی وضعیت عملکردی مسیر است. انتخاب این محور به دلیل تنوع خرابی‌ها، تردد بالای ناوگان سنگین و اهمیت منطقه‌ای آن انجام شده است، عواملی که آن را به گزینه‌ای مناسب برای ارزیابی کارایی حسگرهای MEMS در تخمین شاخص IRI تبدیل می‌کند(Llopis-Castelló et al., 2026).





شکل ۳. نمونه‌ای از خرابی‌های سطحی در محور گرگان–آزادشهر

۳–۲– تجهیزات و ابزارهای پژوهش

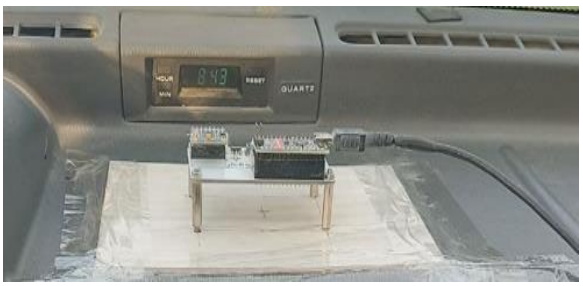
در این پژوهش از یک سامانه اندازه‌گیری مبتنی بر شتاب‌سنج میکروالکترومکانیکی(MEMS)، گیرنده موقعیت‌یاب جهانی (GPS)، واحد ثبت داده و نرم‌افزارهای پردازش سیگنال برای برداشت و تحلیل داده‌ها استفاده شد. حسگر MEMS مورد استفاده از نسل جدید شتاب‌سنج‌های کم‌مصرف و پایدار است که به دلیل ابعاد کوچک، هزینه پایین و قابلیت کارکرد طولانی‌مدت، در سال‌های اخیر به‌طور گسترده در پایش زیرساخت‌های جاده‌ای به‌کار گرفته شده‌اند(Yan & Wei, 2025). این حسگر بر روی یک برد الکترونیکی شامل میکروکنترلر، مدار تغذیه و رابط USB نصب شده و امکان ثبت شتاب قائم با نرخ نمونه‌برداری بالا را فراهم می‌کند. شکل ٤ ماژول شتاب‌سنج MEMS و محل نصب آن در داخل خودرو را نمایش میدهد.

برای بررسی اثر محل نصب حسگر، ماژول MEMS در دو موقعیت کنسول مرکزی و داشبورد خودرو نصب شد؛ انتخاب این دو محل بر اساس مطالعات اخیر انجام شد که نشان می‌دهند موقعیت نصب می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر کیفیت سیگنال ارتعاشی و پایداری داده‌ها تأثیر بگذارد (Konieczny et al., 2025). ثبت موقعیت مکانی با استفاده از گیرنده GPS انجام شد تا امکان هم‌ترازی داده‌های شتاب با موقعیت واقعی مسیر فراهم شود. نرخ‌های نمونه‌برداری ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز برای ثبت داده‌ها به‌کار گرفته شد؛ انتخاب این نرخ‌ها با توجه به یافته‌های پژوهش‌های اخیر صورت گرفت که تأکید می‌کنند نرخ‌های بالا برای ثبت دقیق مؤلفه‌های فرکانسی مرتبط با ناهمواری ضروری است (Sang et al., 2024; Yiliguoqi et al., 2026).

پردازش داده‌ها در محیط نرم افزار متلب(MATLAB) انجام شد که شامل فیلترکردن نویز، حذف رانش، انتگرال‌گیری عددی و محاسبه شاخص IRI بود. از نرم افزار اکسل(Excel) برای سازمان‌دهی داده‌ها و از نرم‌افزار گوگل ارث(Google Earth) برای نمایش مسیر و تطبیق داده‌های GPS استفاده شد. ترکیب این تجهیزات امکان ثبت دقیق ارتعاشات قائم، موقعیت مکانی و شرایط واقعی بهره‌برداری را فراهم کرد و بستر لازم برای تحلیل ناهمواری مسیر را مهیا ساخت(Pipanmekaporn et al., 2024).



(الف)



(ب)

شکل ٤. ماژول شتاب‌سنج MEMS و محل نصب آن در داخل خودرو؛ (الف) ساختار الکترونیکی حسگر و واحد ثبت داده، (ب) محل نصب ماژول بر روی داشبورد خودرو

۳–۳- روش جمع‌آوری داده‌ها

برداشت داده‌ها با هدف ثبت رفتار واقعی خودرو در مواجهه با ناهمواری‌های محور گرگان–آزادشهر و ارزیابی کارایی حسگر MEMS در شرایط عملیاتی انجام شد. عملیات برداشت در مسیر رفت و برگشت و در شرایط ترافیکی واقعی صورت گرفت تا اثر تغییر جهت حرکت، تنوع بار ترافیکی و تغییرات محیطی در نتایج لحاظ شود. پیش از برداشت، مسیر به‌صورت میدانی بازبینی شد و بخش‌های دارای خرابی‌های شاخص، تغییرات پروفیل طولی و وصله‌های سطحی شناسایی گردید؛ رویکردی که در مطالعات اخیر به‌عنوان مرحله ضروری پیش‌مطالعه معرفی شده است (Bidone, 2024; Xu et al., 2025).

برای کاهش اثر سرعت بر دامنه ارتعاشات، سرعت خودرو در محدوده ۴۰ تا ۶۰ کیلومتر بر ساعت ثابت نگه داشته شد؛ بازه‌ای که در پژوهش‌های اخیر به‌عنوان سرعت مناسب برای ثبت پاسخ دینامیکی خودرو در ارزیابی ناهمواری پیشنهاد شده است (Sang et al., 2024). در طول برداشت، از ترمزهای ناگهانی، تغییر مسیرهای سریع و عبور از موانع غیرمرتبط با ناهمواری جلوگیری شد تا داده‌ها تحت شرایط پایدار ثبت شوند.

داده‌های شتاب قائم با نرخ‌های نمونه‌برداری ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز ثبت شدند تا امکان تحلیل اثر نرخ نمونه‌برداری بر کیفیت سیگنال فراهم شود. انتخاب این نرخ‌ها با توجه به مطالعاتی انجام شد که نشان می‌دهند نرخ‌های پایین می‌توانند مؤلفه‌های فرکانسی مرتبط با ناهمواری‌های کوتاه‌موج را حذف کرده و دقت بازسازی پروفیل را کاهش دهند (Certada et al., 2026). داده‌های GPS نیز به‌صورت هم‌زمان ثبت شدند تا امکان هم‌ترازی دقیق سیگنال‌های شتاب با موقعیت مکانی فراهم شود؛ روشی که در سامانه‌های نوین پایش زیرساخت به‌عنوان یک الزام کلیدی مطرح است (Abazeed & Maciuk, 2026).

پس از برداشت، داده‌های خام در محیط MATLAB ذخیره و برای مراحل پیش‌پردازش شامل حذف نویز، فیلترکردن، هم‌ترازی زمانی و حذف نقاط پرت آماده شدند. این مراحل مطابق با چارچوب‌های استاندارد تحلیل ارتعاشات در پژوهش‌های اخیر انجام شد که بر اهمیت پاک‌سازی دقیق داده‌های خام پیش از محاسبه شاخص‌های عملکردی تأکید دارند (Xu et al., 2025).

۴–۳–پردازش داده‌ها

فرآیند پردازش داده‌ها با هدف تبدیل سیگنال خام شتاب قائم به پروفیل طولی و محاسبه شاخص ناهمواری بین‌المللی (IRI) طراحی شد. داده‌های برداشت‌شده ابتدا در محیط MATLAB وارد شدند و مراحل پیش‌پردازش شامل حذف نویز، هم‌ترازی زمانی، فیلترکردن و حذف نقاط پرت بر روی آن‌ها اعمال گردید. هم‌ترازی زمانی میان داده‌های شتاب و GPS با استفاده از برچسب‌های زمانی مشترک انجام شد تا موقعیت دقیق هر نمونه شتاب مشخص شود؛ رویکردی که در سامانه‌های نوین پایش زیرساخت و روش‌های ادغام چندحسگری به‌عنوان یک مرحله کلیدی مطرح است (Agebjär et al., 2025).

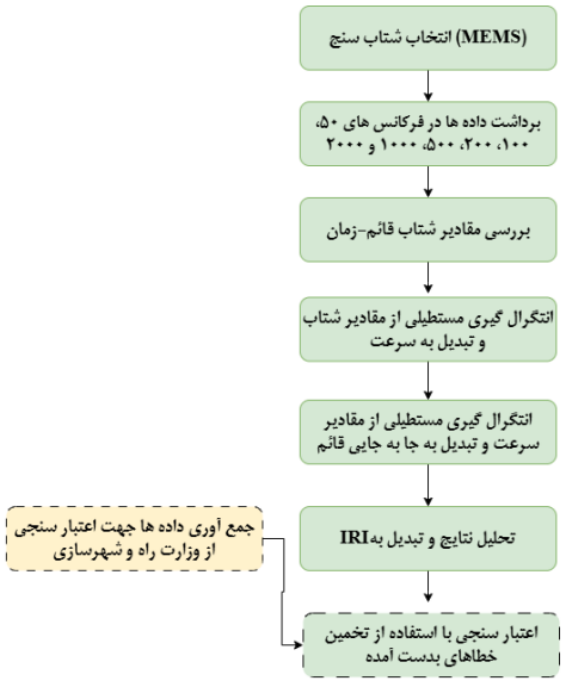
در مرحله پیش‌پردازش، ابتدا میانگین سیگنال حذف شد تا مؤلفه‌های شبه‌استاتیک ناشی از شیب مسیر یا رانش حسگر کنترل شود. سپس از فیلتر پایین‌گذر برای حذف نویزهای فرکانس بالا استفاده شد. انتخاب فرکانس قطع فیلتر بر اساس تحلیل طیفی داده‌های خام انجام شد و با یافته‌های مطالعات اخیر هم‌خوانی دارد که تأکید می‌کنند بخش عمده انرژی ارتعاشی مرتبط با ناهمواری در بازه فرکانسی پایین قرار دارد (Bisconsini et al., 2026). نقاط پرت ناشی از توقف، تغییر سرعت ناگهانی یا ضربه‌های غیرمرتبط با ناهمواری نیز با استفاده از روش‌های آماری حذف شدند.

در مرحله بعد، سیگنال شتاب برای استخراج پروفیل سرعت و سپس پروفیل جابه‌جایی قائم انتگرال‌گیری شد. برای کنترل رانش ناشی از انتگرال‌گیری، از روش‌های استاندارد شامل حذف میانگین، فیلتر بالاگذر با فرکانس قطع پایین و تصحیح خط پایه استفاده شد؛ روش‌هایی که در پژوهش‌های اخیر به‌عنوان راهکارهای مؤثر برای تحلیل ارتعاشات حسگرهای MEMS معرفی شده‌اند (Li et al., 2025). پروفیل طولی بازسازی‌شده به‌عنوان ورودی مدل استاندارد مدل ربع‌خودرو (Quarter-Car) مورد استفاده قرار گرفت تا شاخص IRI محاسبه شود؛ مدلی که در مطالعات مبتنی بر حسگرهای MEMS و تلفن هوشمند به‌طور گسترده به‌کار رفته است (Ajayi et al., 2025; Bisconsini et al., 2026).

در نهایت، پروفیل طولی مسیر در بازه‌های مکانی ثابت تقسیم‌بندی شد تا امکان مقایسه مقاطع مختلف فراهم شود. خروجی نهایی

شامل سری زمانی شتاب، پروفیل بازسازی‌شده و مقادیر IRI برای هر مقطع بود که مبنای تحلیل‌های بخش نتایج قرار گرفت.

برای شفاف‌سازی مراحل انجام‌شده در این پژوهش، فلوچارت کلی فرآیند پردازش داده‌ها و محاسبه شاخص IRI در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۵. فلوچارت مراحل پردازش داده و محاسبه IRI

۳–۵- محاسبه شاخص IRI

محاسبه شاخص ناهمواری بین‌المللی (IRI) بر اساس پروفیل طولی بازسازی‌شده از سیگنال شتاب قائم انجام شد. پس از تکمیل مراحل پیش‌پردازش و انتگرال‌گیری عددی، پروفیل طولی مسیر استخراج و به‌عنوان ورودی مدل استاندارد Quarter-Car مورد استفاده قرار گرفت. این مدل با شبیه‌سازی رفتار دینامیکی یک سیستم تعلیق ساده‌شده شامل جرم معادل بدنه، جرم چرخ، سختی و میرایی، امکان تبدیل پروفیل طولی به شاخص کمی ناهمواری را فراهم می‌کند؛ رویکردی که در مطالعات اخیر به‌عنوان روش مرجع محاسبه IRI معرفی شده است(Zhang et al., 2025).

در این پژوهش، پروفیل طولی مسیر در بازه‌های مکانی ثابت تقسیم‌بندی شد تا امکان محاسبه IRI برای هر مقطع فراهم شود. برای هر بخش، مدل Quarter-Car با سرعت مرجع ۸۰ کیلومتر بر ساعت اجرا شد؛ انتخاب این سرعت مطابق با استانداردهای بین‌المللی و مطالعاتی است که نشان می‌دهند استفاده از سرعت ثابت موجب افزایش قابلیت مقایسه نتایج و کاهش اثرات تغییرات سرعت خودرو می‌شود (Sarkar & Sinha, 2026). خروجی مدل به‌صورت مقدار IRI بر حسب متر بر کیلومتر استخراج شد و برای تحلیل‌های بخش نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

٤- نتایج و بحث

٤–١–نتایج IRI مسیر

در این بخش، نتایج محاسبه شاخص ناهمواری بین‌المللی (IRI) برای قطعه مورد مطالعه از محور گرگان–آزادشهر ارائه می‌شود. ابتدا اطلاعات کلی وضعیت روسازی مسیر از سامانه مدیریت روسازی استخراج شد تا مبنایی برای مقایسه نتایج فراهم شود. مطابق داده‌های مرجع، مقدار IRI ثبت‌شده برای این محور برابر با ۳٫۸ متر بر کیلومتر (m/km) است که نشان‌دهنده وضعیت نسبتاً خشن سطح راه در این بخش است.



شکل ٦. شرایط مسیر در محور گرگان–آزادشهر (کیلومتر ۱۲۰)

برای قطعه برداشت‌شده، مقدار IRI مرجع برابر با ۲٫۷ متر بر کیلومتر (m/km) گزارش شده است. این مقدار به‌عنوان معیار اصلی برای ارزیابی دقت روش مبتنی بر شتاب‌سنج مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱. اطلاعات قطعه برداشت‌شده در محور گرگان–آزادشهر

پارامتر	مقدار
کیلومتر ابتدا	**۱۲۰٫۵**
کیلومتر انتها	**۱۲۱٫۵**
طول قطعه	**۱**
شاخص وضعیت روسازی(PCI)	**۸۷**
شاخص ناهمواری(IRI)	**۲٫۷**
شاخص شیارشدگی(Rut)	**٤**
شاخص زبری(ETD)	**۹٫۳٤**
شاخص سواری دهی(RN)	**۳٫۲**
رویکرد نگهداری	**نگهداری پیشگیرانه**

* واحدها: IRI بر حسب m/km، Rut بر حسب mm، ETD بر حسب mm

به‌منظور بررسی دقت روش پیشنهادی، مقادیر IRI محاسبه‌شده در نرخ‌های مختلف نمونه‌برداری برای دو محل نصب حسگر (کنسول و داشبورد) استخراج شد. نتایج مربوط به نصب حسگر روی کنسول در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف میان مقدار IRI محاسبه‌شده و مقدار مرجع در اغلب نرخ‌ها در محدوده قابل‌قبول قرار دارد.

مقایسه دو جدول نشان می‌دهد که هر دو محل نصب توانایی مناسبی در تخمین IRI دارند، اما رفتار حسگر در نرخ‌های مختلف نمونه‌برداری متفاوت است. در نرخ‌های پایین‌تر، اختلاف با مقدار مرجع بیشتر بوده و با افزایش نرخ نمونه‌برداری، مقدار IRI محاسبه‌شده به مقدار مرجع نزدیک‌تر می‌شود. این روند در بخش تحلیل حساسیت به‌صورت دقیق‌تر بررسی خواهد شد.

به‌طور کلی، نتایج این بخش نشان می‌دهد که روش مبتنی بر شتاب‌سنج MEMS قادر است مقدار IRI مسیر را با دقت قابل‌قبول تخمین بزند و اختلاف میان مقدار محاسبه‌شده و مقدار مرجع PMS در محدوده قابل‌قبول قرار دارد. این موضوع بیانگر قابلیت استفاده از حسگرهای MEMS برای پایش سریع و کم‌هزینه وضعیت روسازی در مسیرهای برون‌شهری است.

جدول ۲. مقادیر IRI برای حسگر نصب‌شده روی کنسول

فرکانس نمونه‌برداری	IRI محاسبه‌شده	IRI ثبت‌شده (PMS)	اختلاف مطلق (ΔIRI)
۵۰ هرتز	۳٫٤۲۷۹۷۵	۲٫۷	۰٫۷۲۷۹۷۵
۱۰۰ هرتز	۳٫٤۷۳۲۳۵	۲٫۷	۰٫۷۷۳۲۳۵
۲۰۰ هرتز	۳٫۳٤۹٤۱	۲٫۷	۰٫٦٤۹٤۱
۵۰۰ هرتز	۳٫٤٤٦۳٤۵	۲٫۷	۰٫۷٤٦۳٤۵
۱۰۰۰ هرتز	–	۲٫۷	–
۲۰۰۰ هرتز	۳٫٦۲۰٤۸۵	۲٫۷	۰٫۹۲۰٤۸۵

در ادامه، جدول ۳ نتایج مربوط به نصب حسگر روی داشبورد را نشان می‌دهد. مقادیر به‌دست‌آمده بیانگر آن است که این محل نصب نیز قادر به ارائه نتایج قابل‌قبول بوده و اختلاف‌ها نسبت به مقدار مرجع محدود است.

جدول ۳. مقادیر IRI برای حسگر نصب‌شده روی داشبورد

فرکانس نمونه‌برداری	IRI محاسبه‌شده	IRI ثبت‌شده (PMS)	اختلاف مطلق (ΔIRI)
۵۰ هرتز	۳٫۵۱۵۸٤	۲٫۷	۰٫۸۱۵۸٤
۱۰۰ هرتز	۲٫۸۳٦۳۳۵	۲٫۷	۰٫۱۳٦۳۳۵
۲۰۰ هرتز	۲٫۷۹۲۵۳۵	۲٫۷	۰٫۰۹۲۵۳۵
۵۰۰ هرتز	۲٫۸۱٦۸۵۵	۲٫۷	۰٫۱۱٦۸۵۵
۱۰۰۰ هرتز	۲٫۸۲۲۳۸	۲٫۷	۰٫۱۲۲۳۸
۲۰۰۰ هرتز	۲٫۹۳۳۳۵۵	۲٫۷	۰٫۲۳۳۳۵۵

٤–۲–تحلیل حساسیت نرخ نمونه‌برداری

در این بخش، تأثیر نرخ نمونه‌برداری بر دقت محاسبه شاخص ناهمواری بین‌المللی (IRI) مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آنجا که سیگنال شتاب قائم شامل مؤلفه‌های فرکانسی مرتبط با ناهمواری‌های کوتاه‌موج، رفتار سیستم تعلیق و نویزهای محیطی

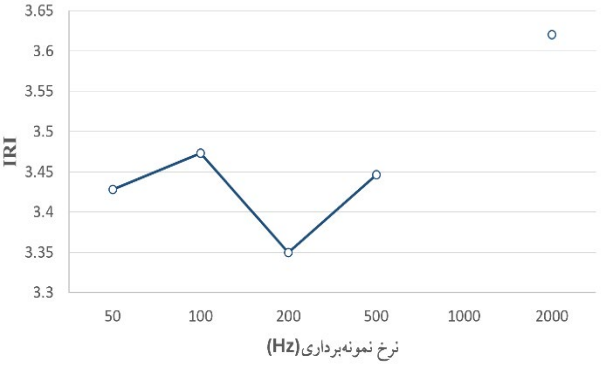
است، نرخ نمونه‌برداری نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ جزئیات دینامیکی سیگنال دارد. برای ارزیابی این اثر، داده‌ها در نرخ‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز پردازش و مقادیر IRI برای هر نرخ استخراج شد.

جدول ٤. مقادیر IRI در نرخ‌های مختلف نمونه‌برداری (سری اول)

فرکانس نمونه‌برداری (Hz)	مقدار IRI (m/km)
۵۰	۳،٤۲۷۹۷۵
۱۰۰	۳،٤۷۳۲۳۵
۲۰۰	۳،۳٤۹٤۱
۵۰۰	۳،٤٤٦۳٤۵
۱۰۰۰	–
۲۰۰۰	۳،٦۲۰٤۸۵

نتایج جدول ٤ نشان می‌دهد که تغییر نرخ نمونه‌برداری موجب تغییرات قابل‌توجهی در مقدار IRI می‌شود. در نرخ‌های پایین‌تر، مقدار IRI نوسانات بیشتری دارد و با افزایش نرخ نمونه‌برداری، مقدار IRI به سمت مقادیر بالاتر و پایدارتر حرکت می‌کند. این روند در شکل ۷ نیز قابل مشاهده است.

شکل ۸ روند تغییرات IRI در سری دوم را نمایش می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که در نرخ‌های پایین‌تر، مقدار IRI رفتار ناپایدارتر و نوسانات بیشتری دارد، در حالی‌که در نرخ‌های بالاتر، رفتار سیگنال یکنواخت‌تر شده و مقدار IRI به مقدار مرجع نزدیک‌تر می‌شود.

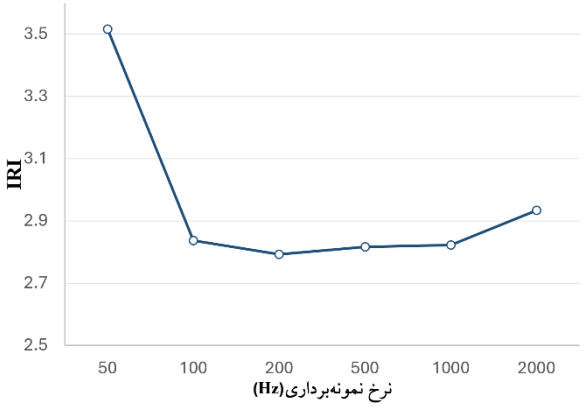


شکل ۷. روند تغییرات IRI در نرخ‌های نمونه‌برداری (سری اول)

برای افزایش دقت تحلیل، سری دوم داده‌ها نیز بررسی شد. نتایج این سری در جدول ۵ ارائه شده است. مقایسه دو جدول نشان می‌دهد که الگوی تغییرات IRI در هر دو سری مشابه بوده و افزایش نرخ نمونه‌برداری معمولاً موجب افزایش مقدار IRI و کاهش نوسانات آن می‌شود.

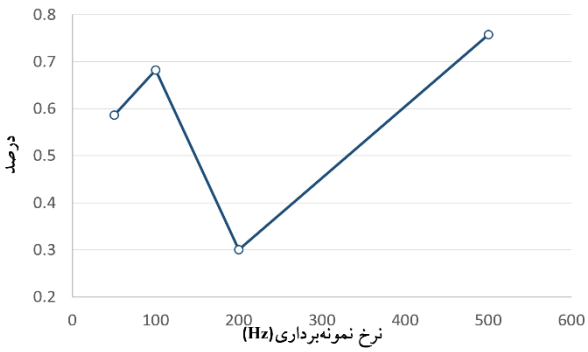
جدول ۵. مقادیر IRI در نرخ‌های مختلف نمونه‌برداری (سری دوم)

فرکانس نمونه‌برداری (Hz)	مقدار IRI (m/km)
۵۰	۳،۵۱۵۸٤
۱۰۰	۲،۸۳٦۳۳۵
۲۰۰	۲،۷۹۲۵۳۵
۵۰۰	۲،۸۱٦۸۵۵
۱۰۰۰	۲،۸۲۲۳۸
۲۰۰۰	۲،۹۳۳۳۵۵



شکل ۸. روند تغییرات IRI در نرخ‌های نمونه‌برداری (سری دوم)

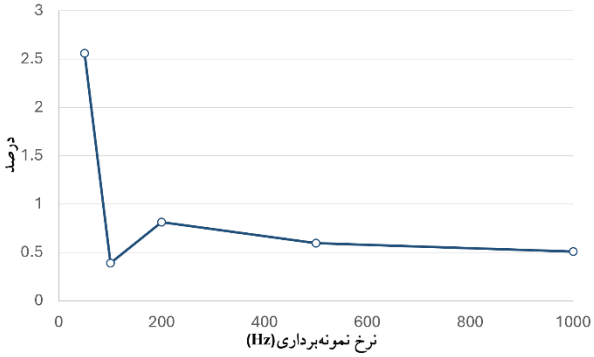
برای بررسی دقیق‌تر اثر نرخ نمونه‌برداری، نرخ ۲۰۰۰ هرتز به‌عنوان مقدار مرجع در نظر گرفته شد و خطای نسبی سایر نرخ‌ها نسبت به آن محاسبه گردید. شکل ۹ مقدار خطای نسبی را برای نرخ‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نرخ‌های پایین‌تر مانند ۵۰ و ۱۰۰ هرتز بیشترین خطا را دارند، در حالی‌که نرخ‌های ۲۰۰ و ۵۰۰ هرتز خطای کمتری داشته و به مقدار مرجع نزدیک‌تر هستند.



شکل ۹. خطای نسبی نسبت به نرخ ۲۰۰۰ هرتز

(نصب روی کنسول)

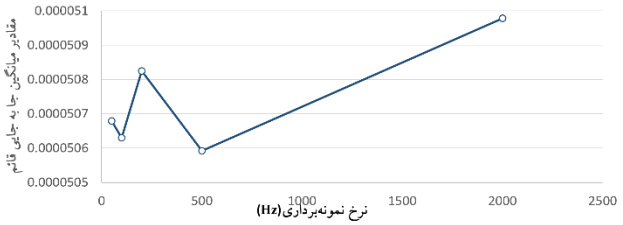
شکل ۱۰ روند تغییرات خطای نسبی را به‌صورت یکنواخت‌تر نمایش می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش نرخ نمونه‌برداری، خطای نسبی کاهش یافته و در نرخ‌های بالا به مقدار حداقلی می‌رسد. این رفتار بیانگر آن است که نرخ‌های بالاتر قادرند جزئیات بیشتری از سیگنال را ثبت کنند و در نتیجه، بازسازی پروفیل و محاسبه IRI با دقت بیشتری انجام می‌شود.



شکل ۱۰. خطای نسبی نسبت به نرخ ۲۰۰۰ هرتز

(نصب روی داشبورد)

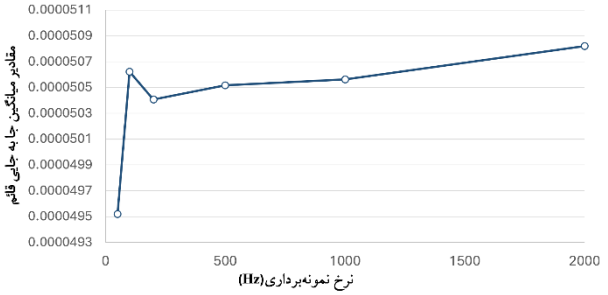
برای تحلیل اثر نرخ نمونه‌برداری بر بازسازی پروفیل، میانگین جابه‌جایی قائم محاسبه‌شده از سیگنال شتاب نیز بررسی شد. شکل ۱۱ میانگین جابه‌جایی قائم را برای محل نصب حسگر روی کنسول نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که با کاهش نرخ نمونه‌برداری، مقدار میانگین جابه‌جایی دچار تغییرات قابل‌توجهی می‌شود که ناشی از حذف بخش‌هایی از سیگنال در نرخ‌های پایین‌تر است.



شکل ۱۱. تحلیل حساسیت میانگین جابه‌جایی قائم

(نصب روی کنسول)

شکل ۱۲ همین تحلیل را برای محل نصب حسگر روی داشبورد ارائه می‌دهد. مقایسه دو شکل نشان می‌دهد که حساسیت نرخ نمونه‌برداری در دو محل نصب متفاوت است و در محل داشبورد، تغییرات میانگین جابه‌جایی یکنواخت‌تر بوده و نوسانات کمتری مشاهده می‌شود.



شکل ۱۲. تحلیل حساسیت میانگین جابه‌جایی قائم

(نصب روی داشبورد)

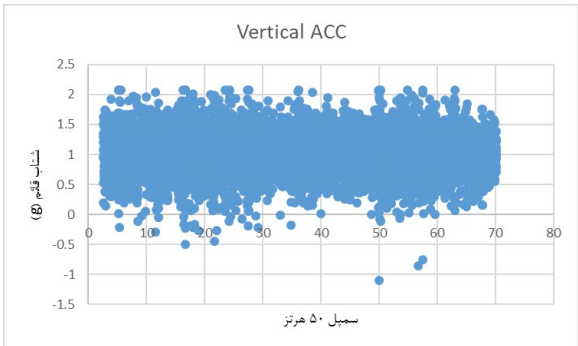
در مجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که نرخ نمونه‌برداری یکی از عوامل کلیدی در دقت محاسبه IRI است. نرخ‌های پایین‌تر موجب افزایش خطا و کاهش دقت بازسازی پروفیل می‌شوند، در حالی‌که نرخ‌های متوسط و بالا عملکرد بهتری دارند. همچنین مشاهده شد که محل نصب حسگر نیز بر میزان حساسیت نرخ نمونه‌برداری تأثیرگذار است. این یافته‌ها مبنای انتخاب نرخ

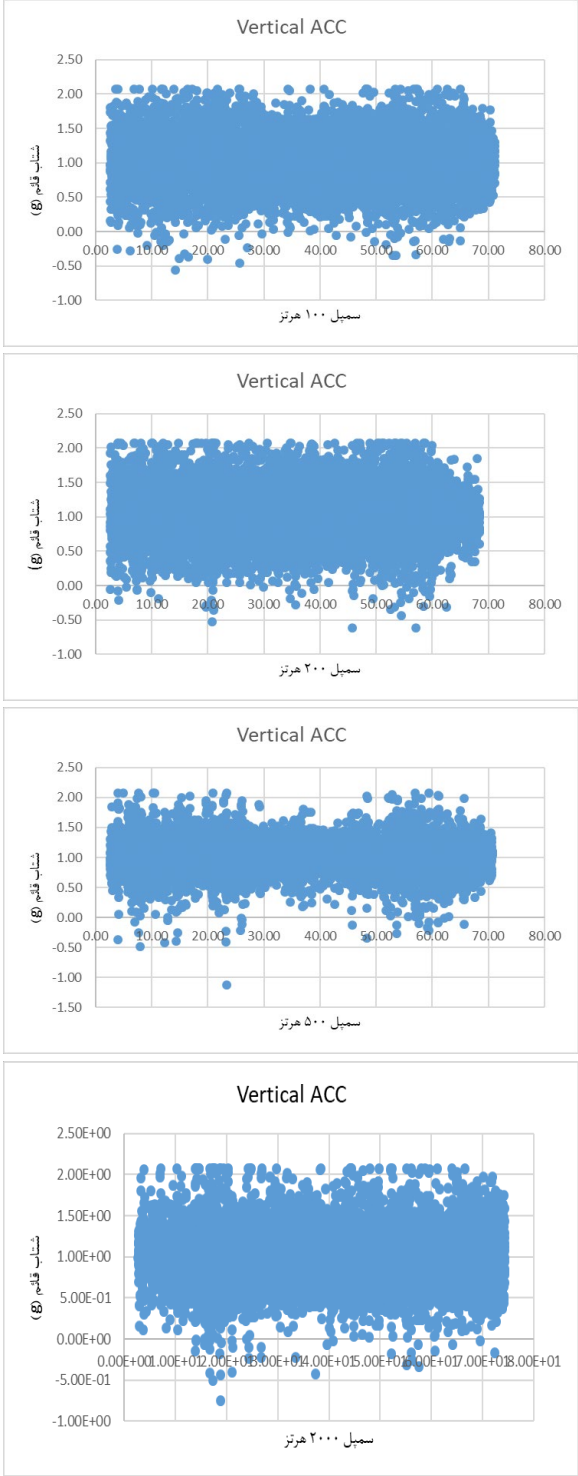
نمونه‌برداری مناسب در کاربردهای میدانی و طراحی سامانه‌های ارزیابی ناهمواری مبتنی بر حسگرهای MEMS خواهند بود.

٤–۳– تحلیل رفتار دینامیکی خودرو

در این بخش، رفتار دینامیکی خودرو بر اساس سیگنال شتاب قائم برداشت‌شده از حسگر MEMS در دو محل نصب مختلف (کنسول و داشبورد) و در نرخ‌های متفاوت نمونه‌برداری مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف از این تحلیل، ارزیابی کیفیت سیگنال ورودی، بررسی پایداری سیستم تعلیق و تعیین میزان تأثیر محل نصب حسگر و نرخ نمونه‌برداری بر شکل‌گیری سیگنال نهایی است. از آنجا که خروجی انتگرال‌گیری و در نهایت مقدار IRI به‌طور مستقیم تحت تأثیر رفتار دینامیکی خودرو قرار دارد، تحلیل این بخش نقش کلیدی در تفسیر نتایج دارد.

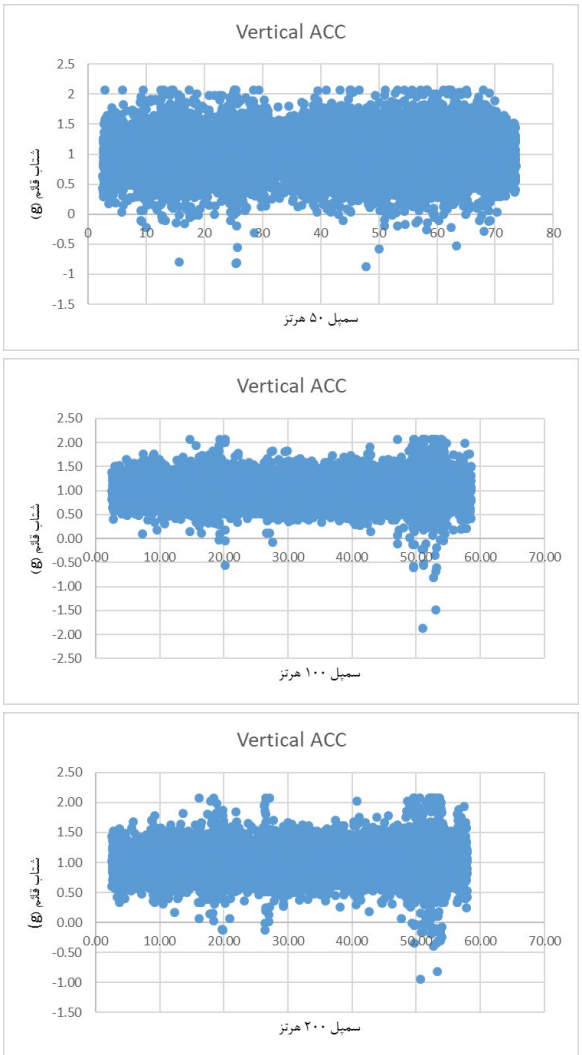
سیگنال شتاب قائم ثبت‌شده در محل نصب حسگر روی کنسول در شکل ۱۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نرخ‌های بالاتر نمونه‌برداری، جزئیات بیشتری از رفتار دینامیکی خودرو ثبت شده و دامنه نوسانات سیگنال با وضوح بیشتری قابل مشاهده است. این موضوع نشان می‌دهد که نرخ نمونه‌برداری بالا قادر است مؤلفه‌های فرکانسی مرتبط با ناهمواری‌های کوتاه‌موج و رفتار گذرای سیستم تعلیق را حفظ کند. در مقابل، در نرخ‌های پایین‌تر، سیگنال حالت هموارتر و فیلترشده‌تری پیدا کرده که ناشی از حذف بخش‌هایی از سیگنال در فرآیند نمونه‌برداری است.

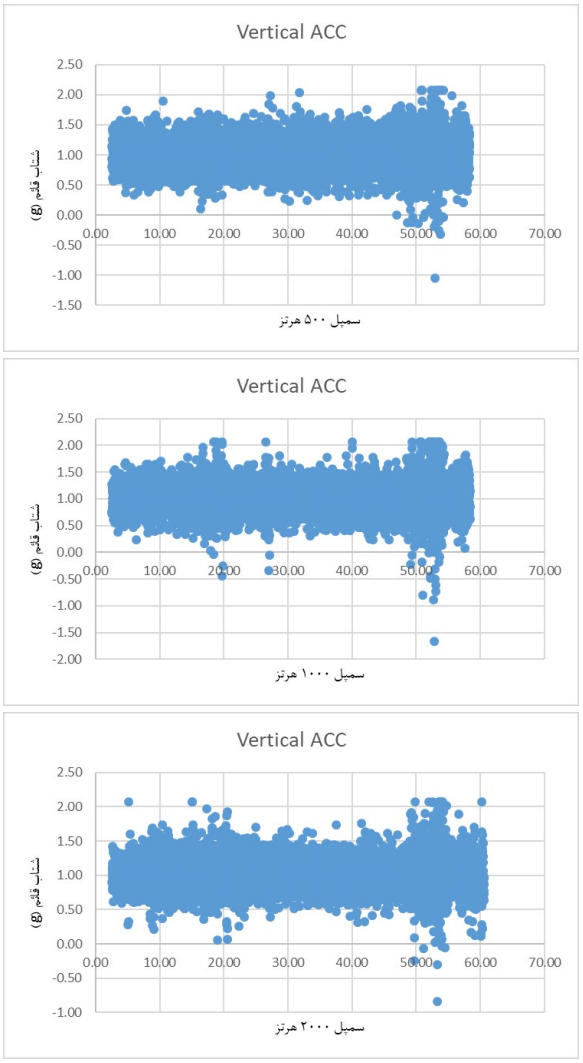




شکل ۱۳. سیگنال شتاب قائم در نرخ‌های مختلف نمونه‌برداری (نصب روی کنسول)

سیگنال شتاب قائم در محل نصب حسگر روی داشبورد در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. مقایسه این شکل با شکل ۵ نشان می‌دهد که رفتار سیگنال در محل داشبورد متفاوت از کنسول است. در محل داشبورد، دامنه نوسانات در نرخ‌های پایین‌تر کمتر بوده و سیگنال رفتار یکنواخت‌تری دارد. این موضوع می‌تواند ناشی از فاصله بیشتر حسگر از مرکز جرم خودرو و تأثیر بیشتر ارتعاشات بدنه باشد. در نرخ‌های بالاتر، جزئیات بیشتری از رفتار دینامیکی ثبت شده و سیگنال به رفتار واقعی سیستم تعلیق نزدیک‌تر می‌شود.





شکل ۱۴. سیگنال شتاب قائم در نرخ‌های مختلف نمونه‌برداری (نصب روی داشبورد)

مقایسه دو محل نصب نشان می‌دهد که حسگر نصب‌شده روی کنسول به دلیل نزدیکی بیشتر به مرکز جرم خودرو، سیگنال پایدارتری تولید می‌کند و تغییرات ناشی از نرخ نمونه‌برداری در آن واضح‌تر قابل مشاهده است. در مقابل، حسگر نصب‌شده روی داشبورد تحت تأثیر ارتعاشات بدنه قرار دارد و در نرخ‌های پایین‌تر، بخشی از رفتار دینامیکی سیستم تعلیق در سیگنال آن تضعیف می‌شود. این تفاوت‌ها در بخش‌های بعدی، به‌ویژه در تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی، اثر خود را بر مقدار IRI نشان می‌دهند. به‌طور کلی، نتایج این بخش نشان می‌دهد که محل نصب حسگر و نرخ نمونه‌برداری هر دو نقش مهمی در کیفیت سیگنال شتاب

قائم دارند. نرخ‌های بالاتر موجب ثبت دقیق‌تر رفتار دینامیکی خودرو شده و اطلاعات بیشتری درباره ناهمواری‌های کوتاه‌موج فراهم می‌کنند. همچنین، نصب حسگر در نواحی نزدیک به مرکز جرم خودرو (مانند کنسول) موجب افزایش پایداری سیگنال و کاهش اثرات نویزهای بدنه می‌شود. این یافته‌ها مبنای انتخاب محل نصب مناسب و نرخ نمونه‌برداری بهینه در کاربردهای میدانی هستند.

٤–٤–اعتبارسنجی روش پیشنهادی

در این پژوهش، برای ارزیابی دقت روش مبتنی بر شتاب‌سنج MEMS، نتایج محاسبه‌شده با داده‌های مرجع سامانه مدیریت روسازی (PMS) مقایسه شد. مقدار IRI ثبت‌شده برای محور گرگان–آزادشهر و همچنین مقدار مرجع مربوط به قطعه برداشت‌شده در شکل‌های ٤ و ٥ ارائه شده‌اند. مقایسه مقادیر محاسبه‌شده با مقدار مرجع نشان داد که اختلاف‌ها در اغلب نرخ‌های نمونه‌برداری محدود بوده و مقدار IRI به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی با مقدار مرجع هم‌خوانی قابل‌قبولی دارد. این موضوع بیانگر آن است که روش مبتنی بر شتاب‌سنج قادر است الگوی کلی ناهمواری مسیر را به‌درستی بازتاب دهد.

برای بررسی پایداری روش در شرایط عملیاتی مختلف، داده‌های مسیر رفت و برگشت به‌صورت مستقل پردازش شدند. نتایج نشان داد که الگوی تغییرات IRI در دو جهت حرکت مشابه است و مقادیر به‌دست‌آمده در مقاطع متناظر اختلاف محدودی دارند. این رفتار نشان‌دهنده تکرارپذیری مناسب روش و پایداری عملکرد حسگر در برابر تغییرات جزئی مسیر حرکت، شرایط ترافیکی و رفتار خودرو است.

از سوی دیگر، تحلیل حساسیت نرخ نمونه‌برداری نشان داد که دقت محاسبه IRI به‌طور مستقیم تحت تأثیر نرخ برداشت داده قرار دارد. شکل‌های ۸ و ۹ روند تغییرات خطای نسبی را نسبت به نرخ مرجع ۲۰۰۰ هرتز نمایش می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که نرخ‌های پایین‌تر موجب افزایش خطا و کاهش دقت بازسازی پروفیل می‌شوند، در حالی‌که نرخ‌های متوسط و بالا عملکرد بهتری دارند. همچنین، تحلیل میانگین جابه‌جایی قائم در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داد که نرخ نمونه‌برداری بر کیفیت بازسازی پروفیل تأثیرگذار است و نرخ‌های پایین‌تر موجب از دست رفتن بخشی از مؤلفه‌های فرکانسی سیگنال می‌شوند.

به‌طور کلی، نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد که روش مبتنی بر شتاب‌سنج MEMS قادر است مقدار IRI را با دقت قابل‌قبول تخمین بزند، از تکرارپذیری مناسبی برخوردار است و در نرخ‌های نمونه‌برداری مناسب، عملکردی پایدار و قابل‌اعتماد ارائه می‌دهد. این یافته‌ها بیانگر آن است که روش پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری کم‌هزینه و کارآمد برای پایش وضعیت روسازی در مسیرهای برون‌شهری مورد استفاده قرار گیرد.

٤–٥–تحلیل نتایج

نتایج به‌دست‌آمده از پردازش داده‌های شتاب قائم نشان می‌دهد که روش مبتنی بر حسگر MEMS قادر است تغییرات ناهمواری مسیر را با دقت قابل‌قبول بازتاب دهد و الگوی کلی رفتار پروفیل طولی را بازسازی کند. مقایسه مقادیر IRI محاسبه‌شده با داده‌های مرجع سامانه مدیریت روسازی نشان داد که اختلاف‌ها در اغلب نرخ‌های نمونه‌برداری محدود بوده و روند تغییرات ناهمواری در هر دو مجموعه داده مشابه است. این موضوع بیانگر آن است که سیگنال شتاب قائم، در صورت اعمال مراحل مناسب پیش‌پردازش، می‌تواند اطلاعات کافی برای استخراج ویژگی‌های مرتبط با ناهمواری را فراهم کند.

یکی از یافته‌های مهم این پژوهش، نقش نرخ نمونه‌برداری در دقت محاسبه IRI است. نتایج نشان داد که نرخ‌های پایین‌تر موجب افزایش خطا و نوسان در مقدار IRI می‌شوند، در حالی‌که نرخ‌های متوسط و بالا عملکرد پایدارتر و دقیق‌تری ارائه می‌دهند. این رفتار را می‌توان به از دست رفتن بخشی از مؤلفه‌های فرکانسی سیگنال در نرخ‌های پایین نسبت داد؛ مؤلفه‌هایی که نقش تعیین‌کننده‌ای در بازسازی دقیق پروفیل طولی دارند. در مقابل، نرخ‌های بالاتر قادرند جزئیات بیشتری از رفتار دینامیکی خودرو را ثبت کنند و در نتیجه، مقدار IRI محاسبه‌شده به مقدار مرجع نزدیک‌تر می‌شود. این موضوع اهمیت انتخاب نرخ نمونه‌برداری مناسب را در کاربردهای میدانی برجسته می‌کند. تحلیل اثر محل نصب حسگر نیز نشان داد که موقعیت حسگر بر کیفیت سیگنال و مقدار IRI تأثیرگذار است. حسگر نصب‌شده روی کنسول، به دلیل نزدیکی بیشتر به مرکز جرم خودرو، سیگنال پایدارتر و یکنواخت‌تری تولید کرد و تغییرات

ناشی از نرخ نمونه‌برداری در آن با وضوح بیشتری قابل مشاهده بود. در مقابل، حسگر نصب‌شده روی داشبورد تحت تأثیر ارتعاشات بدنه قرار داشت و در نرخ‌های پایین‌تر، بخشی از رفتار دینامیکی سیستم تعلیق در سیگنال آن تضعیف شد. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که انتخاب محل نصب مناسب می‌تواند نقش مهمی در افزایش دقت محاسبه IRI داشته باشد.

بررسی تکرارپذیری نتایج در برداشت‌های رفت و برگشت نیز نشان داد که روش مبتنی بر حسگر MEMS از پایداری مناسبی برخوردار است. الگوی کلی تغییرات IRI در دو جهت حرکت مشابه بود و اختلاف‌ها در مقاطع متناظر محدود باقی ماند. این موضوع نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در برابر تغییرات جزئی مسیر حرکت، شرایط ترافیکی و رفتار خودرو مقاوم است و می‌تواند در شرایط واقعی عملکرد قابل‌اعتمادی ارائه دهد.

برای ارزیابی بیشتر دقت روش، مقادیر IRI به‌دست‌آمده از حسگر MEMS با داده‌های برداشت‌شده توسط پروفیل‌سنج لیزری وزارت راه نیز مقایسه شد. نتایج این مقایسه نشان داد که روند تغییرات ناهمواری در هر دو روش مشابه بوده و نقاط دارای ناهمواری بالا در هر دو مجموعه داده به‌صورت هم‌زمان شناسایی شده‌اند. اختلاف میانگین بین مقادیر IRI حاصل از حسگر MEMS و پروفیل‌سنج لیزری در محدوده قابل‌قبول قرار داشت و عمدتاً ناشی از تفاوت در نرخ نمونه‌برداری، نحوه نصب حسگر و حساسیت تجهیزات بود. این هم‌خوانی نشان می‌دهد که حسگرهای MEMS، با وجود سادگی و هزینه پایین، قادرند الگوی تغییرات ناهمواری را با دقت مناسبی بازتاب دهند و در کاربردهای پایش سریع و کم‌هزینه روسازی قابل اتکا باشند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کارایی حسگرهای میکروالکترومکانیکی در تخمین شاخص ناهمواری بین‌المللی و پایش وضعیت روسازی در یک مسیر برون‌شهری مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی، بررسی امکان‌پذیری استفاده از داده‌های شتاب قائم برای بازسازی پروفیل طولی و استخراج شاخص‌های عملکردی روسازی بود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان جمع‌بندی زیر را ارائه کرد:

-سیگنال شتاب قائم، در صورت اعمال مراحل مناسب پیش‌پردازش شامل فیلترکردن نویز، حذف رانش و انتگرال‌گیری عددی، قادر است اطلاعات کافی برای بازسازی پروفیل طولی فراهم کند. مقادیر IRI محاسبه‌شده با داده‌های مرجع سامانه مدیریت روسازی (PMS) هم‌خوانی قابل‌قبولی داشت و اختلاف‌ها در اغلب نرخ‌های نمونه‌برداری محدود بود.

-نرخ نمونه‌برداری نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت محاسبه IRI دارد. نرخ‌های پایین‌تر موجب از دست رفتن بخشی از مؤلفه‌های فرکانسی سیگنال و افزایش خطا می‌شوند، در حالی‌که نرخ‌های متوسط و بالا عملکرد دقیق‌تر و پایدارتری ارائه می‌دهند. این موضوع اهمیت انتخاب نرخ نمونه‌برداری مناسب را در کاربردهای میدانی برجسته می‌کند.

-محل نصب حسگر تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت سیگنال دارد. نصب حسگر در نواحی نزدیک به مرکز جرم خودرو، مانند کنسول، موجب افزایش پایداری سیگنال و کاهش اثرات نویزهای بدنه می‌شود. در مقابل، نصب حسگر روی داشبورد حساسیت بیشتری نسبت به ارتعاشات بدنه دارد و در نرخ‌های پایین‌تر دقت کمتری ارائه می‌دهد.

-تکرارپذیری نتایج در برداشت‌های رفت و برگشت نشان داد که روش مبتنی بر حسگر میکروالکترومکانیکی از پایداری مناسبی برخوردار است و در برابر تغییرات جزئی مسیر حرکت، شرایط ترافیکی و رفتار خودرو مقاوم است. این ویژگی برای کاربردهای عملیاتی و برداشت‌های میدانی اهمیت زیادی دارد.

-یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که حسگرهای میکروالکترومکانیکی می‌توانند به‌عنوان ابزاری کم‌هزینه، قابل‌حمل و کارآمد برای پایش سریع وضعیت روسازی مورد استفاده قرار گیرند. این روش با کاهش هزینه‌های برداشت، افزایش پوشش مکانی و امکان استفاده در شرایط عملیاتی متنوع، می‌تواند مکمل مناسبی برای روش‌های سنتی ارزیابی ناهمواری باشد و در برنامه‌ریزی نگهداری پیشگیرانه نقش مؤثری ایفا کند.

-با وجود نتایج امیدوارکننده، این روش محدودیت‌هایی نیز دارد؛ از جمله وابستگی دقت به نرخ نمونه‌برداری، محل نصب حسگر و رفتار دینامیکی خودرو پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، اثر سرعت خودرو، نوع وسیله نقلیه، مدل‌های پیشرفته‌تر پردازش سیگنال و ترکیب داده‌های میکروالکترومکانیکی با روش‌های یادگیری ماشین بررسی شود تا دقت و پایداری روش بیش از پیش افزایش یابد.

٦- مراجع

-Abazeed, A., & Maciuk, K. (2026). Comprehensive review of advancements in low-cost sensor technologies for bridge deformation monitoring. *Survey Review*, 1–14.

-Agebjär, M., Zetterqvist, G., Gustafsson, F., Wahlström, J., & Hendeby, G. (2025). *Road Roughness Estimation via Fusion of Standard Onboard Automotive Sensors*. 1–8.

-Ajayi, O. O., Kurien, A. M., Djouani, K., & Dieng, L. (2025). An Integrated Machine Learning-Based Framework for Road Roughness Severity Classification and Predictive Maintenance Planning in Urban Transportation System. *Applied Sciences*, *15*(24), 12916.

-Baimukhametov, G., & White, G. (2024). Development, Verification and Assessment of a Laser Profilometer and Analysis Algorithm for Microtexture Assessment of Runway Surfaces. *Sensors*, *24*(23), 7661.

-Bidone, M. (2024). *Design and Development of a Distributed Monitoring System for Bridges*.

-Bisconsini, D. R., Selli, B. S. K., Katicha, S., & Flintsch, G. (2026). Modeling Pavement Roughness Using Simulated Vertical Accelerations Across Multiple Vehicles and Speeds. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1–17.

-Certada, N., Aghanouri, A., Gorospe, J., & Olaverri-Monreal, C. (2026). Multi-Modal Assessment of Road Roughness Using Smartphone Applications, Acceleration, and Passenger Ratings. *arXiv Preprint arXiv:2606.03427*.

-Gansonré, Y., Breul, P., Benz, M., & Gourves, R. (2025). Effect of Overloaded Traffic on Road Pavements Service Life, Structure and Maintenance Costs. *Journal of Transportation Technologies*, *15*(3), 313–334.

-Ghanbari, M., Flaih Hassan, S., Salami, B., & Skitmore, M. (2026). Beyond initial costs: A holistic optimization model for sustainable pavement maintenance in Iraq. *International Journal of Construction Management*, 1–28.

-Islam, S., Buttlar, W. G., Aldunate, R. G., & Vavrik, W. R. (2014). Measurement of pavement roughness using android-based smartphone application. *Transportation Research Record*, *2457*(1), 30–38.

-Jayakody, N., Robert, D., Navaratnarajah, S., Tran, H., Nasvi, M., Gunarathna, P., Kurukulasuriya, C., Giustozzi, F., Gunasekara, C., & Setunge, S. (2024). Road maintenance optimization using a probabilistic approach calibrated with 15-year monitoring data. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1–20.

-Konieczny, L., Fabis, P., Matijošius, J., Duda, K., Deuszkiewicz, P., & Kilikevičius, A. (2025). Analysis of the Impact of Vibrations on the Driver of a Motor Vehicle. *Applied Sciences*, *15*(10), 5510.

-Li, T., Ma, Z., Wei, Z., Ran, L., He, J., & Zhou, W. (2025). *Self-Compensation Technology for Temperature Drift in Resonant Accelerometers*. 1–4.

-Llopis-Castelló, D., Arce-Blanco, C., & Valdecantos-Álvarez, J. C. (2026). Before–after study of pavement roughness impact on vehicle fuel consumption and emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *151*, 105131.

-Pipanmekaporn, L., Kamonsantiroj, S., Sutthaweekul, R., Lee, W., & Srisomboon, K. (2024). *Smartphone-based Road Condition Sensing using Machine Learning techniques*. 246–247.

-Purwanto, A., Tjendani, H. T., & Witjaksana, B. (2025). Analysis of Pavement Condition Using The International Roughness Index (IRI) Method With The Roadroid Application on The Genengan–Lembeyan Road Section In Magetan District. *Journal of Social Research*, *4*(3), 337–346.

-Sang, Y., Yu, Q., Fang, Y., Vo, V., & Wix, R. (2024). Smartphone-based IRI estimation for pavement roughness monitoring: A data-driven approach. *IEEE Internet of Things Journal*, *11*(11), 19708–19720.

-Sarkar, H., & Sinha, S. (2026). State-of-the-art review of pavement deterioration models for enhancing transportation infrastructure management. *International Journal of Pavement Engineering*, *27*(1), 2633306.

-Shrestha, S., Kunwar, D. B., Shrestha, A. R., Kafle, S. R., & Amgain, A. (2025). A Historical Review of Pavement Management Approaches Employed in Nepal. *International Journal on Engineering Technology and Infrastructure Development*, *2*(1), 284–303.

-Sias, J. E., Dave, E. V., Underwood, B. S., Bowers, B. F., Harvey, J. T., Henning, T. F., Tighe, S. L., Jacobs, J. M., Pregnolato, M., & Qiao, Y. (2025). Climate change impacts on roadways. *Nature Reviews Earth & Environment*, *6*(9), 555–573.

-Stan, C., & Oprea, R. A. (2026). Vibration Comfort Assessment Methods in Heavy Vehicles: Models, Standards and Numerical Approaches—A State-of-the-Art Review. *Technologies*, *14*(2), 98.

-Tarnini, Y., Gharaibeh, N. G., Kutela, B., & Gao, L. (2026). Assessing Pavement Crash Susceptibility for Consideration in Pavement Management Decisions. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, *152*(2), 04026015.

-Wasiq, S., Golroo, A., Amani, M. J., & Hajikarimi, P. (2025). Prediction of pavement performance via smatrphone vibration-induced unevenness signature using machine learning. *Scientific Reports*.

-Xu, H., Chen, X., Chen, J., Shi, L., Yang, D., Wang, Z., & Yang, Y. (2025). Review of vehicle scanning method for bridges from 2004 to 2024. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, *25*(19), 2530003.
-Yan, C., & Wei, Y. (2025). Integrated Design, Performance Testing, and Field Application of a Novel MEMS Acceleration Sensor with Long-Term Service Life for Road Infrastructure Monitoring. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1–21.
-Yiliguoqi, B., Siriguleng, B., Arong, Guo, G., & Wang, J. (2026). Research on the evaluation and analysis of road surface roughness based on smartphone sensors and SVM. *Scientific Reports*.
-Zhang, J., Zhou, S., Nie, L., & Guo, W. (2025). An Intelligent Evaluation Approach for Riding Comfort Incorporating Vehicle Vibration Acceleration Distribution Characteristics. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1–20.

Determination of the International Roughness Index Using Vehicle-Mounted Accelerometer Sensors

Mohammad Javad Araqhi, M.Sc., Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Alireza Askari, Ph.D., Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

***Amir Kavousi,** Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

E-mail: kavussia@modares.ac.ir

Received: May 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT

Pavement roughness is one of the most important functional indicators of roadway performance, playing a critical role in safety, ride comfort, and maintenance costs. This indicator is typically measured using advanced instruments such as laser profilometers, which, despite their high accuracy, are expensive, require specialized equipment, and have limited accessibility, making widespread use challenging. Therefore, developing low-cost, portable, and readily available methods for estimating the International Roughness Index (IRI) can significantly enhance pavement condition monitoring and support maintenance planning. In this study, the performance of micro-electromechanical sensors (MEMS) in the indirect estimation of IRI was evaluated. Vertical acceleration data were collected using a MEMS accelerometer installed at two locations inside a vehicle: the center console and the dashboard. The raw data were processed through noise filtering, drift removal, signal alignment, and numerical integration, and subsequently used to compute IRI values. The results showed that both sensor installation locations were capable of producing acceptable IRI estimates, with differences between the computed values and reference data from the Pavement Management System (PMS) falling within an acceptable range. The findings also indicated that sensor placement, sampling rate, and signal-processing quality are influential factors affecting the final accuracy. Overall, the results demonstrate that MEMS sensors, due to their low cost, ease of installation, portability, and ability to rapidly collect data, can serve as an efficient tool for pavement condition monitoring and support pavement management systems.

Keywords: MEMS Accelerometer, International Roughness Index (IRI), Pavement Condition Monitoring, Pavement Management, Signal Processing