

## بررسی کیفیت داده‌های ثبت‌شده با شتاب‌سنج گوشی‌های هوشمند برای مطالعات مهندسی زلزله

عماد صداقتی<sup>۱</sup>، رضا خواجه‌جوی<sup>۲\*</sup>، و سید کیوان حسینی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مرکز زمین‌لرزه‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۲</sup>استادیار، مرکز زمین‌لرزه‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۳</sup>استادیار، مرکز زمین‌لرزه‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۲۴)

### چکیده

امروزه گوشی‌های هوشمند با انواع حسگرها از جمله شتاب‌سنج، مغناطیس‌سنج و سامانه موقعیت‌یابی جغرافیایی (GPS) مجهز شده‌اند؛ از این رو، گوشی‌های هوشمندی که قبل از رویداد زلزله در موقعیت ساکن قرار دارند، می‌توانند به‌عنوان یک شبکه بزرگ از لرزه‌نگارهایی با کیفیت ضعیف تا متوسط برای ارزیابی خطر زلزله، تهیه نقشه لرزش و مدیریت بحران رخداد زلزله استفاده شوند. در این مقاله، هدف آن است تا با ساخت یک نرم‌افزار کاربردی (اپلیکیشن) اندروید، داده‌های شتاب‌سنج گوشی هوشمند ثبت و توانایی گوشی‌های هوشمند در ثبت مناسب داده زلزله، بازسازی محتوای بسامدی در گستره بسامدی مورد نیاز در مهندسی زلزله، بیشینه دامنه‌های شتاب، سرعت و جابه‌جایی (که در برآورد آسیب ساختمان به کار می‌آیند) و طیف‌های فوریه و پاسخ ارزیابی شود. همچنین میزان تأثیرپذیری این شاخصه‌ها از لغزش گوشی نامتصل به زمین نیز بررسی شده است. برای شبیه‌سازی تحریک‌های هارمونیک و حرکت زلزله از میز لرزان استفاده شده و داده‌های برداشت‌شده برای دو گوشی هوشمند آزمون با داده‌های ثبت‌شده با شتاب‌نگار مرجع مقایسه شده است. مقایسه شاخصه‌های لرزه‌ای نشان می‌دهد استفاده از شتاب‌سنج‌های گوشی‌های همراه در توسعه یک شبکه گسترده شتاب‌نگاری شهری برای مطالعات مهندسی زلزله توجیه‌پذیر است.

**واژه‌های کلیدی:** زمین‌لرزه، شتاب‌نگار، شبکه لرزه‌نگاری، گوشی هوشمند، نرم‌افزار کاربردی اندروید

## ۱ مقدمه

زمین‌لرزه پدیده‌ای طبیعی و ناشی از آزاد شدن انرژی‌های درونی ذخیره شده در پوسته جامد زمین است. این پدیده زندگی صدها میلیون نفر را در سراسر جهان در معرض خطر بزرگی قرار داده و وضعیت اقتصادی و اجتماعی منطقه‌ای، ناحیه‌ای و حتی ملی جوامع را همواره تهدید کرده است. شناخت کمی و کیفی پدیده زمین‌لرزه مستلزم به‌کارگیری دستگاه‌های لرزه‌نگار و شتاب‌نگار به منظور مکان‌یابی و اندازه‌گیری هرچه دقیق‌تر پارامترهای مربوط به آن است. با برپایی شبکه‌ای از این لرزه‌نگارها، امکان تعیین مکان و بزرگای زمین‌لرزه، اعلان هشدارها، نظارت لرزه‌ای، مدیریت بحران و گردآوری اطلاعات برای تحقیق درباره ساختار زمین فراهم می‌شود. یکی از چالش‌های اساسی سامان‌بخشی به شبکه‌های لرزه‌نگاری، هزینه زیاد لرزه‌نگارهاست. پوشش کامل نواحی لرزه‌خیز مستلزم به‌کارگیری شمار مناسبی از ایستگاه‌های لرزه‌نگاری است، اما هزینه گزاف دستگاه‌های لرزه‌نگاری، این پوشش کامل را به شدت خدشه‌دار می‌کند.

به تازگی و به دنبال پیشرفت چشمگیر فناوری‌های ارتباطی و گوشی‌های هوشمند، پژوهشگران بر آن شده‌اند به منظور ساخت شبکه‌های لرزه‌نگاری و برای کمک به شبکه‌های موجود، از شتاب‌سنج گوشی‌های هوشمند بهره‌جویند. هم‌اکنون گوشی‌های هوشمند می‌توانند انواع مختلف حرکت (از جمله حرکت زمین‌لرزه) را با استفاده از حسگرهای گوشی هوشمند (مانند شتاب‌سنج، جی‌پی‌اس و غیره) برداشت و ثبت کنند (کنگ همکاران، ۲۰۱۵). حتی مدل‌های ارزان‌قیمت گوشی‌های هوشمند نیز امکانات درخور توجهی مانند پردازش داده، حافظه و قابلیت‌های ارتباطی دارند. این ویژگی پژوهشگران را قادر می‌سازد تا برنامه‌های کاربردی مناسبی را با استفاده از فراخوانی حسگرها و بهره‌گیری از قابلیت‌های گوشی‌های

هوشمند توسعه دهند. این گوشی‌ها را می‌توان طوری برنامه‌ریزی کرد که حرکات گوشی را در سه بعد (محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$ ) و در بازه‌های زمانی از پیش تعیین شده ترسیم کنند. با فرض اینکه گوشی هوشمند به یک انسان متصل است (مثلاً در جیب شلوار)، فعالیت‌های مختلف انسان مانند راه رفتن، ایستادن، نشستن، خوابیدن و رفتن به بالا و پایین پله‌ها را می‌توان با تجزیه و تحلیل داده‌های سری زمانی بررسی کرد (مورالز و آکویان، ۲۰۱۷).

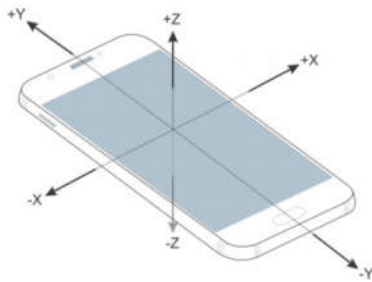
مزیت استفاده از گوشی‌های هوشمند این است که در حال حاضر تمام سخت‌افزارهای مورد نیاز در یک دستگاه بسته‌بندی شده است و در محیط‌های شهری در سراسر جهان استفاده می‌شود. معایب گوشی‌های هوشمند به‌عنوان حسگرهای لرزه‌ای نیز واضح است: گوشی‌ها ثابت نیستند؛ سخت‌افزار گوشی برای فعالیت‌های لرزه‌نگاری کیفیت خوبی ندارد؛ ثبت زمین‌لرزه‌ها به‌طور معمول برای صاحبان گوشی همراه مهم نیست و گوشی‌ها انواع حرکت‌هایی را ثبت می‌کنند که هیچ ارتباطی با زمین‌لرزه‌ها ندارند. توانایی‌های گوشی‌های هوشمند به‌طور فزاینده‌ای در حال رشد است و استفاده از آنها به‌عنوان ابزار نظارت بر زلزله امیدوارکننده است؛ با این حال حسگر گوشی یک دستگاه ناقص است که عملکرد آن در بین گوشی‌های مختلف و حتی در میان مدل‌های مختلف یک گوشی متفاوت است. در حال حاضر، دقت داده‌هایی که شتاب‌سنج گوشی هوشمند ثبت می‌کند نسبت به داده‌های شتاب‌سنج حرفه‌ای کمتر است، اما این گوشی‌ها می‌توانند با فراوانی بسیار زیاد خود، شبکه شتاب‌نگاری را کامل‌تر کنند. گسترش شبکه شتاب‌نگاری با استفاده از گوشی‌های هوشمند، به تهیه نقشه لرزش (shakemap) کمک می‌کند و از طرفی می‌توان با استفاده از این گوشی‌ها، شدت زلزله تجربه شده توسط افراد مختلف را به دست آورد که نقش مهمی در تهیه نقشه‌های DYFT (Did You Feel It?) دارد. در همین راستا نرم‌افزارها و شبکه‌های مختلفی ایجاد شده است که از جمله آنها می‌توان به پروژه‌های MyShake و iShake اشاره کرد.

ارسال می‌شوند. نمونه‌های ثبت‌شده قادر هستند امواج S و P را تا فاصله ۲۰۰ کیلومتر شناسایی کنند. همچنین داده‌های MyShake در فاصله ۵۰ تا ۱۰۰ کیلومتری، PGA قابل قبولی ارائه می‌دهند. در سال‌های اخیر، نسخه‌های ارائه‌شده برای گوشی‌های هوشمند نسبت به زلزله‌هایی با بزرگای ۳/۵ حساسیت نشان می‌دهند (کنگ و همکاران، ۲۰۱۶ ب). انتظار می‌رود با گذشت زمان کیفیت حسگرها در گوشی‌ها بهبود یابد. شایان ذکر است که برخی حسگرهای سامانه میکروالکترومکانیکی (MEMS) (Micro Electro-Mechanical Systems) می‌توانند قابلیت‌هایی مشابه با حسگرهای قوی‌تر مورد استفاده در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری داشته باشند (کنگ و همکاران، ۲۰۱۶ الف).

پروژه iShake از گوشی‌های هوشمند آی‌پد و آی‌فون و الگوریتم‌های فناوری اطلاعات برای اندازه‌گیری پارامترهای شدت حرکت زمین بهره می‌جوید. این پروژه تلاش می‌کند تا با استفاده از داده‌های فراوان گوشی همراه که کیفیت ضعیف‌تری نسبت به شتاب‌نگارهای حرفه‌ای دارند، نقشه لرزش و نقشه (DYFI) (Did You Feel It?) (اتکینسون و والد، ۲۰۰۷ و والد و همکاران، ۲۰۱۲) را تولید کند. توزیع گوشی‌های هوشمند یکنواخت نیست و به سمت مراکز شهرها متراکم‌تر است. علاوه بر این بسیاری از این گوشی‌ها در طول رویداد زلزله در موقعیت ثابت قرار نمی‌گیرند (برای مثال، گوشی موجود در جیب شخص در حال حرکت)؛ بنابراین اندازه‌گیری‌های اعتمادناپذیری دارند. این عوامل، چالش‌هایی را برای پروژه iShake ایجاد کرده است؛ باین‌حال با توجه به محدودیت‌های استفاده از افراد برای ارائه مشاهدات عینی در DYFI و تعداد محدود شتاب‌سنج‌های با کیفیت خوب، استفاده از گوشی‌های هوشمند ارزشمند است (دشتی و همکاران، ۲۰۱۱ و دشتی و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین عملکرد مناسب گوشی‌های هوشمند به‌ویژه در مهندسی زلزله (دشتی و همکاران، ۲۰۱۳ و ریلی و همکاران،

برنامه کاربردی و در حال توسعه MyShake را مرکز نوآوری دره سیلیکون دانشگاه برکلی کالیفرنیا برای گوشی همراه پدید آورده است. این برنامه اطلاعات حسگر را از گوشی‌های هوشمند می‌گیرد سپس از شبکه عصبی مصنوعی برای طبقه‌بندی این داده‌ها استفاده می‌کند. برنامه می‌تواند امواج P را تشخیص دهد و رویدادهایی با بزرگای بیش از ۲/۵ را ثبت کند (کنگ و همکاران، ۲۰۱۶ ب). هدف پروژه این است که یک شبکه لرزه‌نگاری گوشی هوشمند را ایجاد و سامانه‌های هشدار سریع زلزله (Earthquake Early Warning) (EEW) را تقویت کند. ایجاد چنین شبکه‌هایی از حسگرهای لرزه‌ای مبتنی بر گوشی‌های هوشمند می‌تواند ایمنی جوامع آسیب‌پذیر در برابر زلزله را در سراسر جهان افزایش دهد. در شش ماه اول پس از انتشار، برنامه MyShake تقریباً ۲۰۰ هزار بار بارگیری (دانلود) شد. در یک روز معمولی، حدود ۸ هزار گوشی داده‌های شتاب را به بایگانی MyShake ارسال می‌کنند. پروژه MyShake حرکت گوشی‌های هوشمند را در سه مؤلفه کلیدی بررسی می‌کند و با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) (ANN) می‌تواند جنبش زمین‌لرزه را از فعالیت انسانی تشخیص دهد. هرگاه الگوریتم ANN تشخیص دهد حرکت ثبت‌شده ناشی از زلزله است، برنامه یک پیام در زمان واقعی به سرور ارسال می‌کند. این پیام که حاوی مکان، زمان و دامنه شتاب زلزله است، می‌تواند برای هشدار سریع زلزله یا سایر برنامه‌های تشخیص سریع استفاده شود. در همان زمان، برنامه به جمع‌آوری داده‌های سری شتاب در سه مؤلفه به طول پنج دقیقه می‌پردازد. این پنج دقیقه شامل یک دقیقه قبل و چهار دقیقه پس از رسید موج است. یک دقیقه قبل از موج اولیه تضمین می‌کند کل شکل موج زلزله ثبت شده است. هنگامی که گوشی به اینترنت متصل است، نگاشت‌های موج برای تجزیه و تحلیل بیشتر به سرور

هوشمند یکی از ابزارهایی هستند که به شتاب‌سنج‌های MEMS خازنی مجهز شده‌اند و قادر به برداشت داده‌های شتاب در سه مؤلفه اصلی هستند (شکل ۱).



شکل ۱. راسنای اصلی برداشت داده در شتاب‌سنج گوشی هوشمند (فلدباخ و همکاران، ۲۰۱۷)

شتاب‌سنج گوشی هوشمند یک مدار مبتنی بر MEMS است که شتاب وارده به دستگاه را محاسبه می‌کند. این شتاب‌سنج متشکل از یک جرم لرزه‌ای (ساخته شده از سیلیکون) در میان صفحات خازنی است. شتاب با اندازه‌گیری نیروی لختی جرم لرزه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. با نوسان جرم لرزه‌ای در میان صفحات خازنی به هنگام حرکت یا لرزش، ظرفیت خازن و در پی آن، ولتاژ خروجی مدار MEMS تغییر می‌کند (بی‌بی و همکاران، ۲۰۰۴؛ کمپ، ۲۰۱۱ و گجراتی، ۲۰۱۳).

ویژگی‌های شتاب‌سنج‌های نصب شده در گوشی‌های هوشمند، متفاوت از حسگرهای شتاب‌سنج حرفه‌ای مورد استفاده در تحلیل لرزش است. فناوری کوچک‌سازی (Miniaturization) در گوشی‌های هوشمند به همراه مصرف کم انرژی و قیمت کم از ویژگی‌های گوشی همراه است. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که طیف بسامدی نگاشت‌های ثبت شده با شتاب‌نگارهای حرفه‌ای و شتاب‌سنج‌های MEMS اغلب مشابه‌اند (بی‌فلد و همکاران، ۲۰۰۰؛ زی و فدر، ۲۰۰۰ و پلازا و همکاران، ۲۰۰۲)، اما شتاب‌سنج‌های MEMS با محدودیت‌هایی در

۲۰۱۳) و پایش سازه‌ها (فنگ و همکاران، ۲۰۱۵) در مطالعات مختلف بررسی و تأیید شده و حتی گزارش‌هایی درباره موفقیت نسبی بهره‌گیری از انواع شتاب‌نگارهای MEMS ارزان‌قیمت در مطالعات زلزله‌شناسی برای زلزله‌های متوسط و بزرگ ارائه شده است (ایوانز و همکاران، ۲۰۱۴ و لارنس و همکاران، ۲۰۱۴).

مقاله پیش رو بر آن است تا امکان استفاده از گوشی‌های هوشمند معمولی را در ثبت داده‌های شتاب زمین‌لرزه به منظور استفاده در مهندسی زلزله بررسی کند. این مقاله، بخشی از تلاش نویسندگان در سامان‌دهی یک شبکه شتاب‌نگاری سازمان‌نهاد (government-based) شهری است که در آن، یک نهاد متولی همانند شهرداری، از گوشی‌های ساکن و ثابت به جای شتاب‌نگارهای حرفه‌ای ای‌گران‌قیمت برای پوشش شتاب‌نگاری شهر و تهیه نقشه‌های لرزش شهری برای زلزله‌های بزرگ و به نسبت بزرگ استفاده می‌کند. سامان‌دهی شبکه شتاب‌نگاری عمومی یا مردم‌نهاد (public-based) که در آن از گوشی‌های در اختیار مردم جهت برپایی شبکه شتاب‌نگاری استفاده می‌شود (و نیازمند الگوریتم‌های تشخیص نگاشت‌های زلزله از دیگر نگاشت‌های حرکتی است)، در دستور کار آینده این گروه پژوهشی قرار دارد و فعلاً به آن پرداخته نمی‌شود.

## ۲ ساختار و ویژگی‌های کارکردی شتاب‌سنج گوشی هوشمند

شتاب‌سنج‌های مورد استفاده در گوشی‌های هوشمند از نوع MEMS هستند. این شتاب‌سنج‌ها که به دو نوع پیروزستیو و خازنی تقسیم می‌شوند، در صنایع مختلف کاربردهای فراوانی دارند. کوچک‌سازی و قیمت کم به همراه پیشرفت روزافزون دقت و حساسیت شتاب‌سنج‌های MEMS طی سال‌های گذشته سبب توجه فراوان صنایع مختلف به آنها شده است. گوشی‌های

جدول ۱. مشخصات شتاب‌نگار مرجع و دو گوشی هوشمند

ویژگی	شتاب‌نگار مرجع	گوشی هوشمند ۱	گوشی هوشمند ۲
نام شتاب‌سنج	CMG-5T	PSH-accelerometer	MPU6050-accel
سازنده شتاب‌سنج	Güralp Systems	Intel	Invensense
نام گوشی هوشمند	-	ASUS-Z00AD	Xiaomi redmi2
حساسیت	5 Volts/g	-	-
دقت	-	0.1 mm/s <sup>2</sup>	0.5 mm/s <sup>2</sup>
محدوده اندازه‌گیری شتاب	± 4 g	± 4 g	± 2 g
بسامد نمونه‌برداری	250	100	100

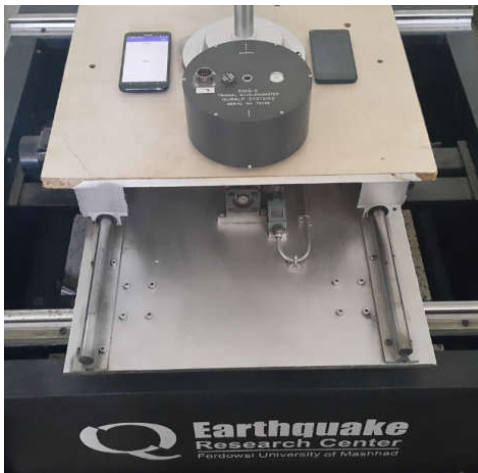
در این راستا، توانمندی شتاب‌سنج گوشی‌ها در بازسازی محتوای بسامدی در گستره بسامدی مورد نیاز در مهندسی زلزله، طیف‌های پاسخ و بیشینه دامنه‌های شتاب (PGA)، سرعت (PGV) و جابه‌جایی (PGD) - که در برآورد آسیب ساختمان به کار می‌آیند - حائز اهمیت فراوان است. از آنجا که مطالعه کنونی در راستای تهیه نقشه شتاب بیشینه زمین برای برآورد آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهری با بسامد اصلی ارتعاشی در بازه ۱ تا ۸ هرتز صورت می‌گیرد، بازه بسامدی مورد مطالعه ۰/۵ Hz (فلدباخ و همکاران، ۲۰۱۷) تا ۲۰ Hz منظور شده است. همچنین برداشت‌های لرزه‌ای در این پژوهش برای تحریک زلزله، برای دو حالت متصل بودن و متصل نبودن گوشی به پایه لرزنده انجام شده است تا میزان تأثیرپذیری این شاخصه‌ها از لغزش احتمالی ناشی از متصل نبودن گوشی به پایه بررسی شود.

چگونگی برداشت داده‌های شتاب با سه دستگاه شتاب‌سنج یادشده برای دو گونه تحریک هارمونیک (با بسامدهای ۰/۲ و ۲ هرتز) و زلزله (بم) بررسی می‌شود. در تحریک هارمونیک که برای بررسی عملکرد شتاب‌سنج گوشی هوشمند در ثبت نگاشت‌های با بسامد کم صورت می‌پذیرد، گوشی‌ها به پایه متصل و محکم شده‌اند. برای

دقت ثبت دامنه همراه هستند (بدری و همکاران، ۲۰۱۰). با پیشرفت‌های انجام‌گرفته در فناوری MEMS در سالیان اخیر، بیشینه نرخ نمونه‌برداری شتاب‌سنج یک گوشی هوشمند می‌تواند ۲۰۰ نمونه در ثانیه باشد که البته این نرخ در مدل‌های مختلف متفاوت است، ولی به‌طور کلی می‌توان گفت تمام گوشی‌های هوشمند موجود توانایی برداشت ۱۰۰ نمونه را در ثانیه دارند (ثندو، ۲۰۱۴). برای مطالعه کنونی که با هدف به‌کارگیری مهندسی زلزله در ساختمان‌های شهری انجام می‌گیرد، این نرخ نمونه‌برداری کاملاً کفایت می‌کند؛ زیرا بر پایه روابط ارائه‌شده در آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران، بسامد اصلی ارتعاشی عمده ساختمان‌های معمول شهری در ایران در بازه ۱ تا ۸ هرتز است. سایر ویژگی‌های شتاب‌سنج‌های گوشی‌های هوشمند در مدل‌های مختلف اندکی متفاوت است. در گوشی‌های هوشمند اخیر، شتاب‌سنج‌های MEMS با وضوح ۰/۰۰۱ g و حتی کمتر و محدوده اندازه‌گیری ۴± و بیشتر نصب شده است (فلدباخ و همکاران، ۲۰۱۷)؛ این در حالی است که حسگرهای بسیار دقیق حرفه‌ای دقتی در حدود ۱۰<sup>-۹</sup> g دارند. در ایران بیشینه شتاب زمین (PGA) که موجب آسیب رساندن یا تخریب شده باشد، ۰/۱ (زمین‌لرزه گلباف، سال ۱۹۸۱) تا ۱ g (زمین‌لرزه زنجیران، سال ۱۹۹۴) است.

### ۳ ارزیابی کارکرد شتاب‌سنج گوشی هوشمند

هدف اصلی این پژوهش آن است که با اجرای آزمون‌های لرزه‌ای مختلف، امکان بهره‌گیری از شتاب‌سنج گوشی‌های هوشمند برای برداشت‌های لرزه‌ای به‌منظور استفاده در مهندسی زلزله ارزیابی شود. برای این-منظور، برنامه کاربردی (اپلیکیشن) ثبت داده‌های شتاب-سنج برای گوشی‌های اندروید در محیط Android Studio نوشته و از دو گوشی هوشمند و یک شتاب‌نگار حرفه‌ای با مشخصات معرفی شده در جدول ۱ استفاده شد.



شکل ۲. دستگاه شتاب‌نگار مرجع و گوشی‌های هوشمند آزمون روی میز لرزان

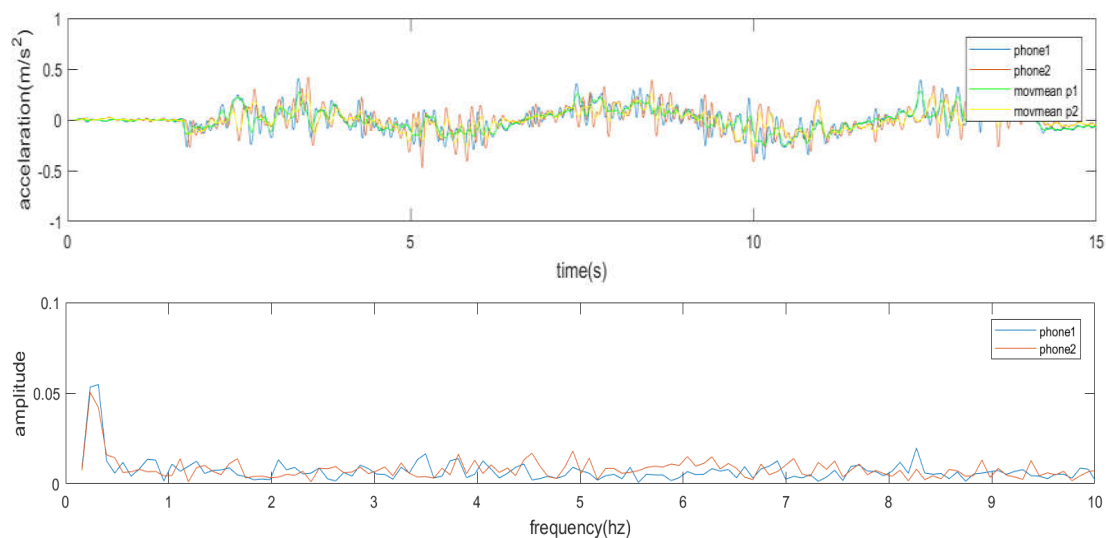
شکل‌های ۳ و ۴ نگاشت‌های زمانی در دو راستای x و y (برداشت شده با شتاب‌سنج‌های گوشی‌های آزمون) و طیف‌های نظیر آنها را در برابر تحریک هارمونیک در راستای y به ترتیب با دو بسامد ۰/۲ و ۲ هرتز نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که نگاشت‌های زمانی راستای y به‌ازای بسامد ۲ هرتز از روند هارمونیک لرزش به‌خوبی پیروی می‌کنند و طیف به‌دست‌آمده برای دو گوشی، علاوه‌بر انطباق کامل با یکدیگر، محتوای بسامدی ۲ هرتز را به‌درستی به نمایش می‌گذارد. در بسامد ۰/۲ هرتز، نوسانات شتاب گوشی‌ها زیاد است و طیف به‌دست‌آمده از نگاشت‌های دو گوشی با وجود تطابق نسبی با یکدیگر، تا اندازه کمی از بیشینه ۰/۲ هرتز منحرف شده است. البته ذکر این نکته نیز مهم است که به‌سبب محدودیت میز لرزان، دامنه نوسانات هارمونیک بسامدهای کم در مقایسه با بسامدهای زیاد کمتر است و در نتیجه بیشتر تحت تأثیر نوفه قرار می‌گیرند. با این حال شایان توجه است که نگاشت‌های زمانی در بسامد ۰/۲ هرتز نیز با هموار کردن میانگین متحرک (moving average smoothing) (خواجه‌وی، ۱۳۹۷) تا اندازه زیادی بهبود یافته‌اند.

اعمال بارهای هارمونیک و زلزله از دستگاه میز لرزان ساخته شده در مرکز تحقیقات زمین‌لرزه‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد (شکل ۲) استفاده شده است. مشخصات این میز لرزان که مجهز به سامانه سرووالکتریک است عبارت از توان تحریک دو مؤلفه‌ای، ابعاد  $55 \times 55 \text{ cm}^2$  و بیشینه جابه‌جایی ۲۰ cm است. بازخورد جابه‌جایی سروو، کنترل‌کننده جابه‌جایی دقیق میز است، اما مطالعه صادقی و همکاران (۱۳۹۱) نشان می‌دهد که با افزایش بار، پاسخ قابل قبول بسامدی به بسامدهای کمتر محدود می‌شود. برای بارهای کمتر از ۱۰ کیلوگرم، محتوای بسامدی در بازه ۰/۲ - ۱۰ Hz مطابق با نگاشت واقعی بازسازی شده است. مشخصات فنی این میز لرزان در جدول ۲ گزارش شده است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۱).

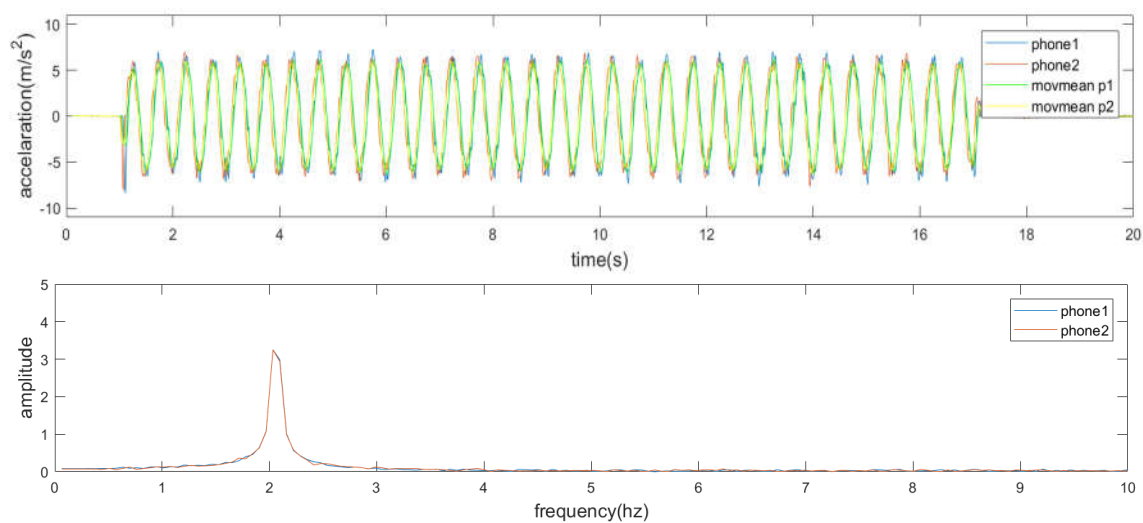
جدول ۲. مشخصات میز لرزان به‌کاررفته در آزمایش دستگاه‌های شتاب‌سنج (صادقی و همکاران، ۱۳۹۱)

Specification	Value
Payload Area (cm×cm)	55×55
Servo Motor Power (w)	750
Motor Maximum Torque (N.m)	2.4
Lead Screw Pitch (cm/rev)	2
Encoder Feedback (pulse/rev)	2500
Travel (cm)	±20
Peak Velocity (cm/s)	100
Peak Acceleration (g)	1.23 (at 1.25 Hz)
Payload (kg)	30 (up to 10 Hz)
x (upper axis)	50 (up to 7 Hz)
Payload (kg)	30 (up to 5 Hz)
y (lower axis)	50 (up to 3 Hz)

پس از برداشت داده‌های شتاب در راستای افقی (x و y) تحت تحریک‌های اشاره‌شده، تصحیحات لازم شامل تصحیح خط پایه و فیلترگذاری میان‌گذر با بسامد گوشه ۰/۵ و ۲۰ هرتز (گستره بسامدی در مهندسی زلزله) انجام می‌شود. گفتنی است در این بازه بسامدی، پاسخ بسامدی شتاب‌نگار مرجع، تخت است (Güralp Systems, 2009).



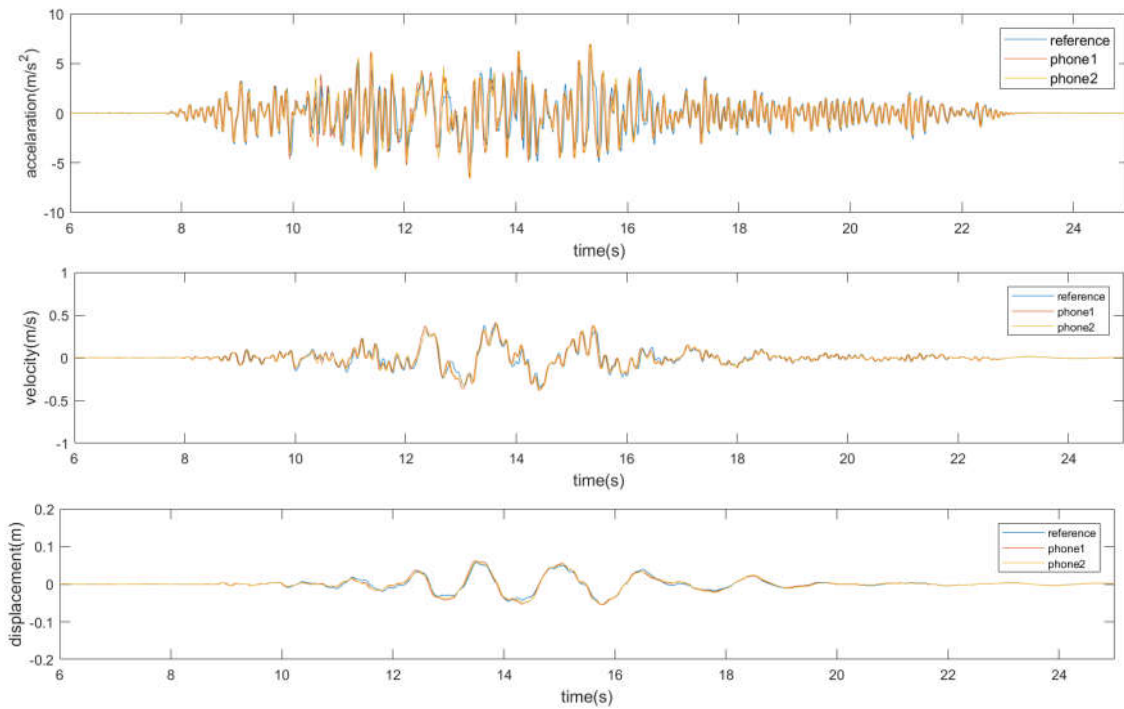
شکل ۳. نگاشت زمانی شتاب و طیف نظیر آن در راستای  $y$  ثبت شده برای لرزش هارمونیک با بسامد ۰/۲ هرتز



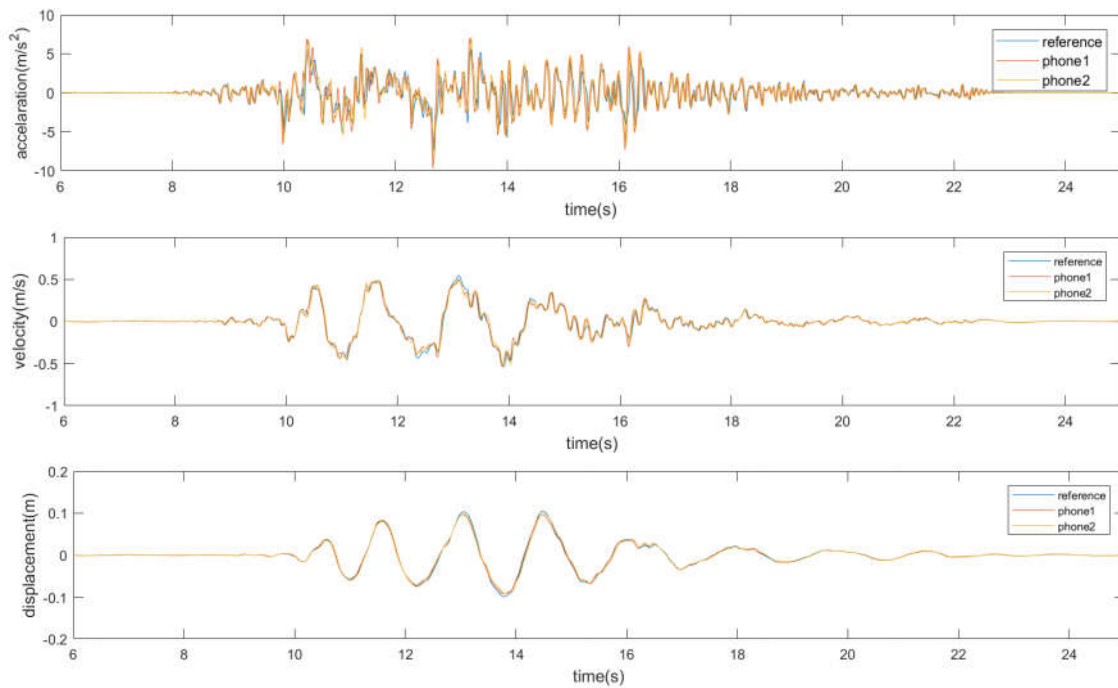
شکل ۴. نگاشت زمانی شتاب و طیف نظیر آن در راستای  $y$  ثبت شده برای لرزش هارمونیک با بسامد ۲ هرتز

داده‌های هر سه کمیت برای هر سه دستگاه وجود دارد؛ بنابراین در تحریک‌های با دامنه زیاد، شتاب‌سنج گوشی هوشمند قابل اعتماد است.

شکل‌های ۵ و ۶ نگاشت‌های شتاب، سرعت و جابه‌جایی را در دو راستای  $x$  و  $y$  نمایش می‌دهند. در این حالت، گوشی‌ها به پایه متصل شده‌اند و امکان لغزش وجود ندارد. ملاحظه می‌شود که تطابق بسیار خوبی میان



شکل ۵. نگاهت‌های زمانی شتاب، سرعت و جابه‌جایی در راستای X برای دو گوشی هوشمند و شتاب‌نگار مرجع در حالت متصل



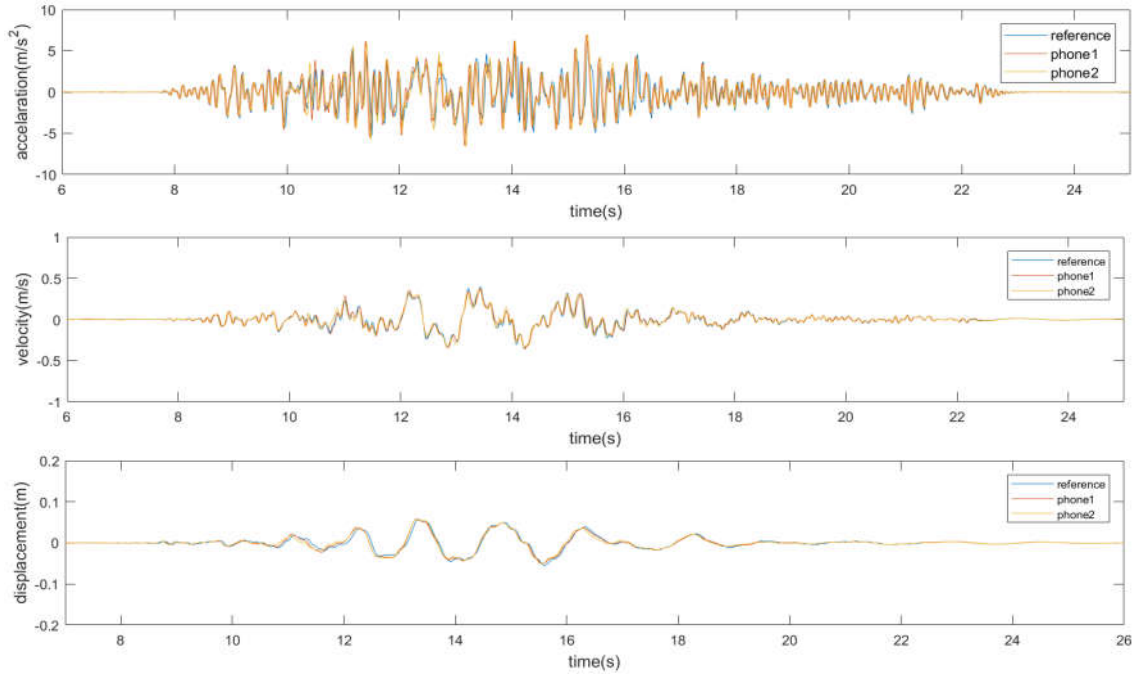
شکل ۶. نگاهت‌های زمانی شتاب، سرعت و جابه‌جایی در راستای Y برای دو گوشی هوشمند و شتاب‌نگار مرجع در حالت متصل

گوشی‌ها به پایه نمایش می‌دهند. ملاحظه می‌شود که با وجود سطح صاف میز لرزان، همچنان نگاهت شتاب‌سنج

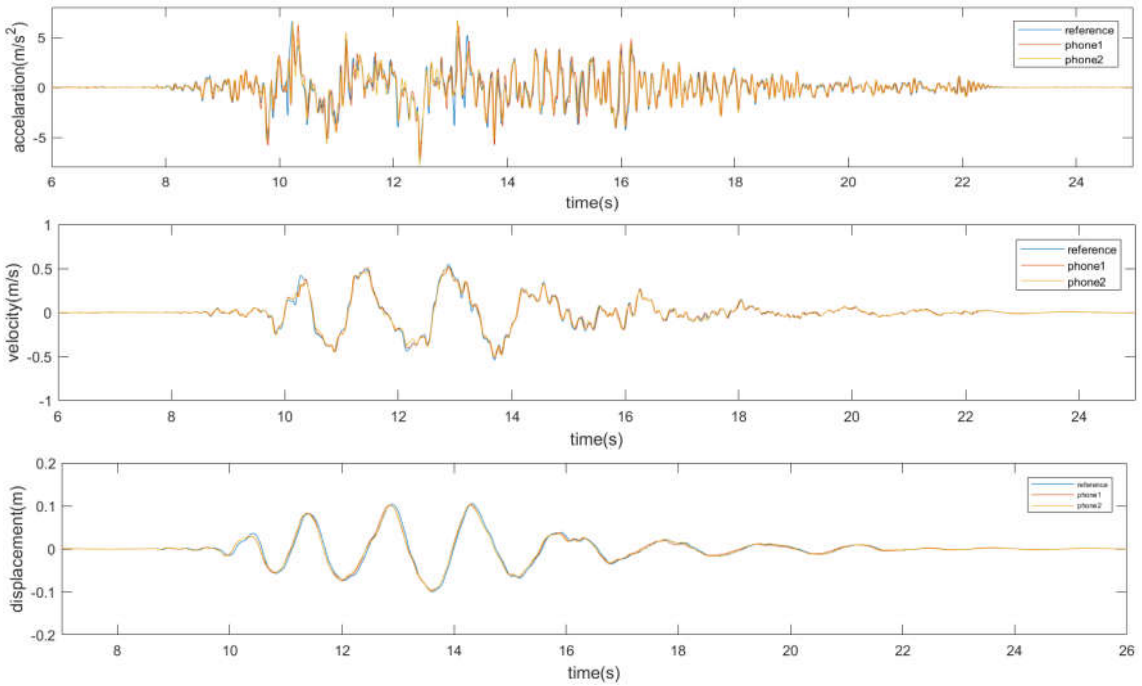
شکل‌های ۷ و ۸ نگاهت‌های شتاب، سرعت و جابه‌جایی را در دو راستای X و Y در حالت متصل نبودن



گوشی‌ها تطابق خوبی با نگاشت‌های شتاب‌نگار مرجع دارد.



شکل ۷. نگاشت‌های زمانی شتاب، سرعت و جابه‌جایی در راستای X برای دو گوشی هوشمند و شتاب‌نگار مرجع برای حالت نامتصل



شکل ۸. نگاشت‌های زمانی شتاب، سرعت و جابه‌جایی در راستای Y برای دو گوشی هوشمند و شتاب‌نگار مرجع برای حالت نامتصل

PGA به‌جز در راستای  $y$  حالت متصل، کمتر از ۱۰٪ هستند. مقادیر خطاهای نسبی برای PGV و PGD کمتر هستند و در مواردی به حدود ۱ درصد نیز می‌رسند. بدین ترتیب، به نظر می‌رسد که عملکرد شتاب‌سنج گوشی‌های هوشمند در گزارش مقادیر بیشینه کمیت‌های حرکتی قابل قبول است، اما مناسب است که پیش از گزارش نهایی مقادیر بیشینه (به‌ویژه PGA) و به‌کارگیری آنها در تهیه نقشه‌های لرزش، اصلاحاتی روی آنها صورت پذیرد.

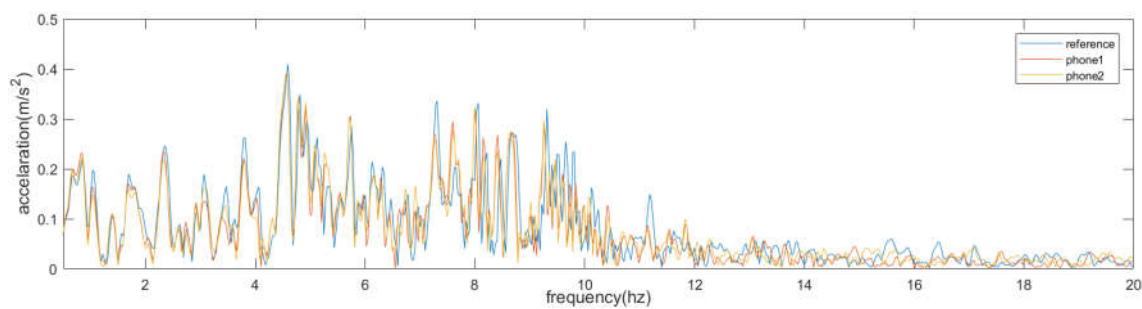
شکل‌های ۹ و ۱۰ طیف‌های فوریه مربوط به نگاشت‌های شتاب شکل‌های ۵ تا ۸ را برای دو حالت متصل و نامتصل نمایش می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود طیف‌های شتاب در هر دو حالت و در تمام بازه بسامدی، تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارند. شایان ذکر است که این تطابق در نگاشت‌های سرعت و جابه‌جایی نیز به‌خوبی وجود دارد.

در جدول ۳، ضرایب همبستگی (خواجوی، ۹۷) میان نگاشت‌های شتاب، سرعت و جابه‌جایی شتاب‌سنج گوشی‌ها با نگاشت‌های متناظر شتاب‌نگار مرجع گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای هر دو گوشی هوشمند، ضرایب همبستگی اغلب بیشتر از ۹۰٪ و در برخی موارد بسیار نزدیک ۱ است. ضرایب همبستگی نمودارهای سرعت و جابه‌جایی اندکی بهتر از ضرایب همبستگی نمودارهای شتاب است. علت این امر را می‌توان تا اندازه‌ای به هموارشدگی ناشی از انتگرال‌گیری مربوط دانست. همچنین ضرایب همبستگی مربوط به حالت‌های متصل و نامتصل تفاوت زیاد و معناداری را نشان نمی‌دهند. این نشان‌دهنده آن است که لغزش‌های احتمالی گوشی‌ها در حالت نامتصل بسیار اندک بوده است.

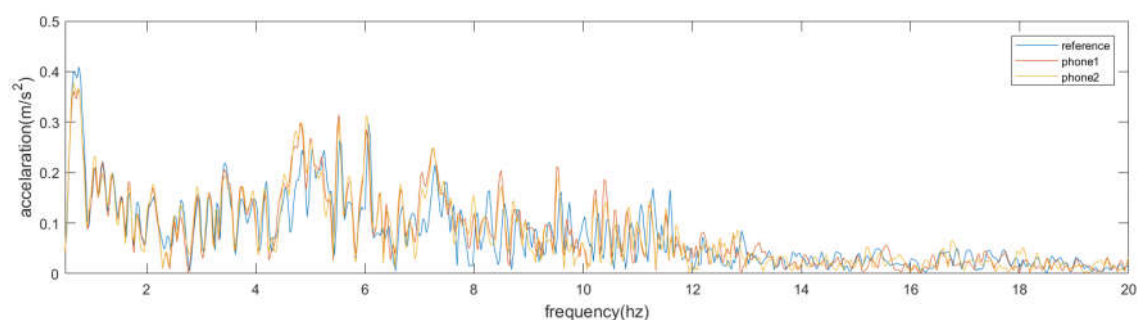
در جدول ۴، مقادیر بیشینه شتاب (PGA)، سرعت (PGV) و جابه‌جایی (PGD) و اختلاف آن با مقادیر مربوط به شتاب‌نگار مرجع (برحسب درصد خطای نسبی) گزارش شده است. ملاحظه می‌شود خطاهای مربوط به

جدول ۳. ارزیابی برداشت‌های ثبت شده توسط شتاب‌سنج‌های گوشی‌های آزمون

جابه‌جایی	حالت نامتصل		حالت متصل		شتاب	
	سرعت	شتاب	جابه‌جایی	سرعت		
گوشی هوشمند ۱						
۰/۹۷۵	۰/۹۸۹	۰/۹۶۳	۰/۹۸۲	۰/۹۲۸	۰/۹۲۷	X ضریب همبستگی
۰/۰۵۸	۰/۳۷۵	۶/۹۱۸	۰/۰۶۲	۰/۴۱۳	۶/۹۱۸	بیشینه
۱/۲۰	۵/۳۱	۱۰/۹۰	۹/۳۷	۴/۳۶	۱۰/۹۰	درصد خطا در بیشینه
۰/۹۸۶	۰/۹۹۵	۰/۹۲۹	۰/۹۹۷	۰/۹۸۰	۰/۸۷۶	Y ضریب همبستگی
۰/۱۰۲	۰/۵۲۲	۷/۰۹۸	۰/۰۹۷	۰/۵۴۰	۹/۷۱۷	بیشینه
۳/۰۴۶	۴/۶۵۲	۵/۹۸۸	۸/۰۱۱	۱/۳۲۶	۲۸۷	درصد خطا در بیشینه
گوشی هوشمند ۲						
۰/۹۶۴	۰/۹۵۵	۰/۹۴۶	۰/۹۸۷	۰/۹۷۳	۰/۹۱۳	X ضریب همبستگی
۰/۰۵۷	۰/۳۸۷	۶/۹۵۶	۰/۰۶۰	۰/۳۹۶	۶/۹۵۶	بیشینه
۰/۶۰۱	۴/۵۱۵	۱۱/۵۱۱	۵/۶۷۴	۰/۰۸۳	۱۱/۵۱	درصد خطا در بیشینه
۰/۹۸۸	۰/۹۹۱	۰/۸۷۵	۰/۹۹۷	۰/۹۹۲	۰/۸۶۲	Y ضریب همبستگی
۰/۱۰۳	۰/۵۱۴	۷/۸۴۲	۰/۱۰۰	۰/۵۱۸	۸/۲۵۹	بیشینه
۱/۶۲۲	۶/۰۵۵	۳/۸۶۸	۴/۸۹۳	۵/۲۸۳	۸/۵۹۳	درصد خطا در بیشینه

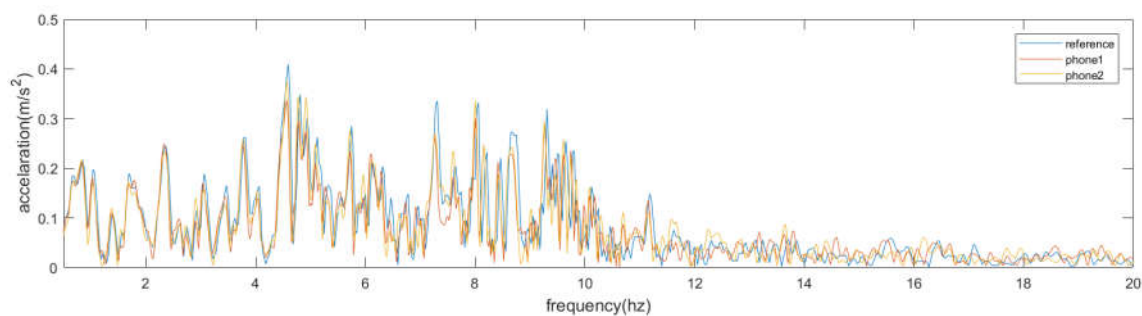


(الف)

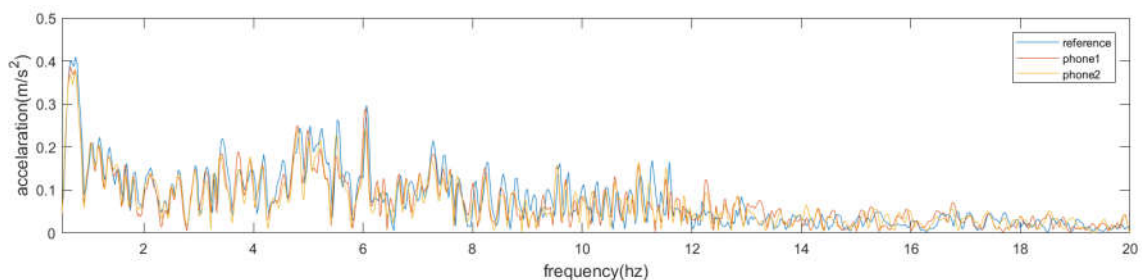


(ب)

شکل ۹. طیف شتاب برای دو گوشی هوشمند و شتاب‌نگار مرجع برای حالت متصل در راستای (الف) X (ب) Y



(الف)



(ب)

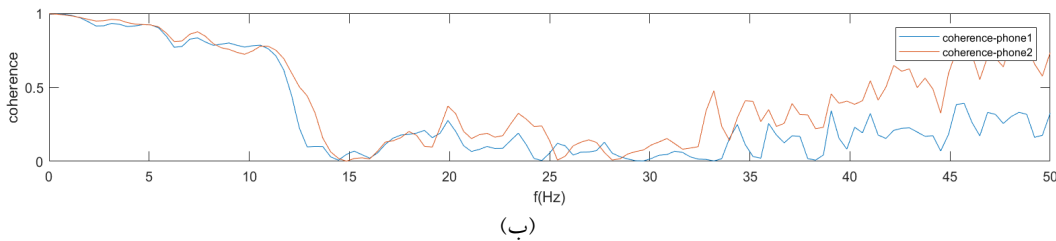
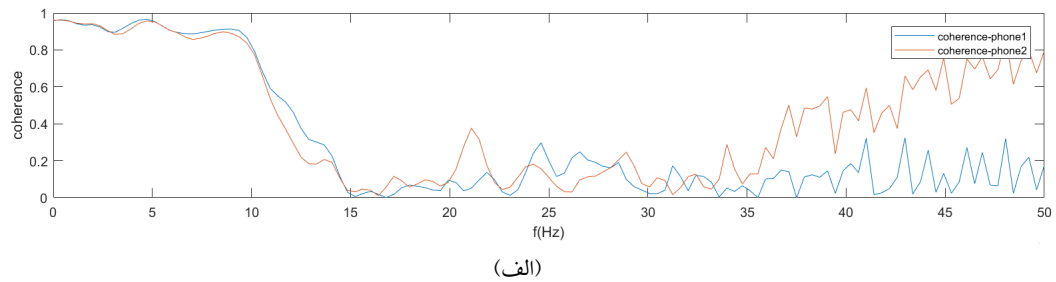
شکل ۱۰. طیف شتاب برای دو گوشی هوشمند و شتاب‌نگار مرجع برای حالت نامتصل در راستای (الف) X (ب) Y

نامتصل نشان می‌دهد. نمودار همدوسی برآوردی از همبستگی میان دو نداشت زمانی را به‌ازای بسامد مشخص

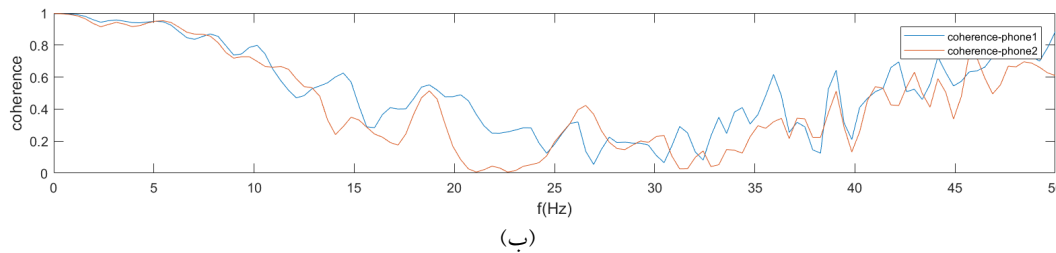
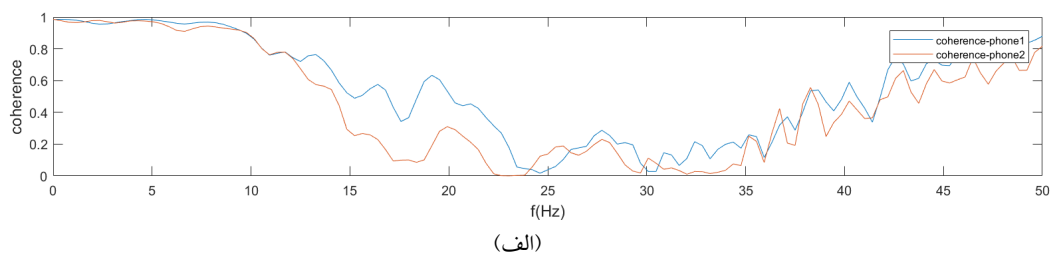
شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمودارهای همدوسی را برای نداشت‌های شتاب دو گوشی در دو حالت متصل و

گزارش نشده‌اند - نیز دیده می‌شود. بدین ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت که کارکرد شتاب‌سنج این گوشی‌ها در بازه بسامدی ۰/۵ تا ۱۰ هرتز مناسب است. البته این بازه بسامدی، گستره بسامدهای اصلی ساختمان‌های معمول شهری را که از حدود ۲ تا ۸ هرتز متغیر است به‌خوبی پوشش می‌دهد.

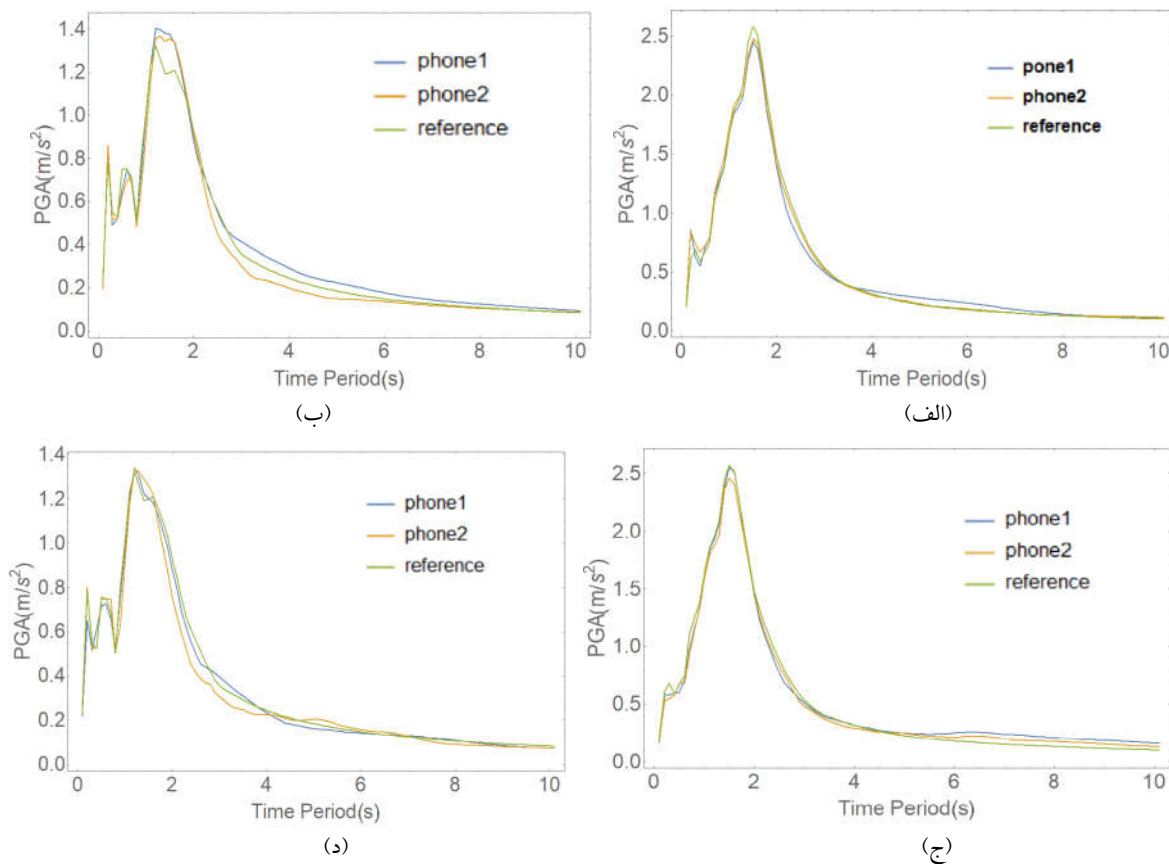
فراهم می‌کند (بهاتاچاریا، ۲۰۱۲). از شکل‌ها به‌خوبی مشخص است که تا بسامد ۱۰ هرتز، تطابق خوبی میان نگاشت شتاب برداشت شده با شتاب‌سنج گوشی و نگاشت شتاب‌نگار مرجع وجود دارد. این تطابق از بسامد حدود ۱۰ هرتز دچار افت به‌نسبت ناگهانی می‌شود. چنین رفتاری در نگاشت‌های سرعت و جابه‌جایی - که در این مقاله



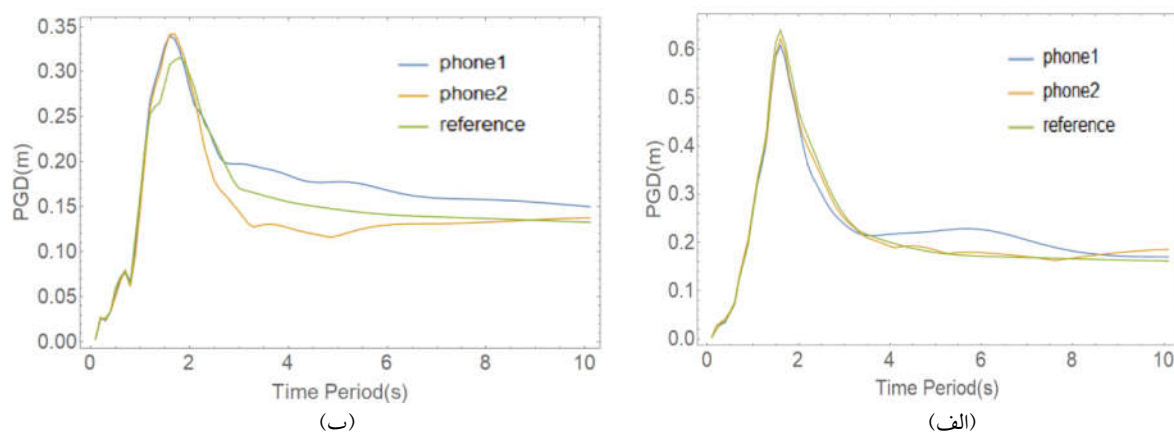
شکل ۱۱. نمودارهای هم‌دوسی مربوط به برداشت‌های شتاب دو گوشی هوشمند آزمون برای حالت متصل در راستای (الف) X (ب) Y



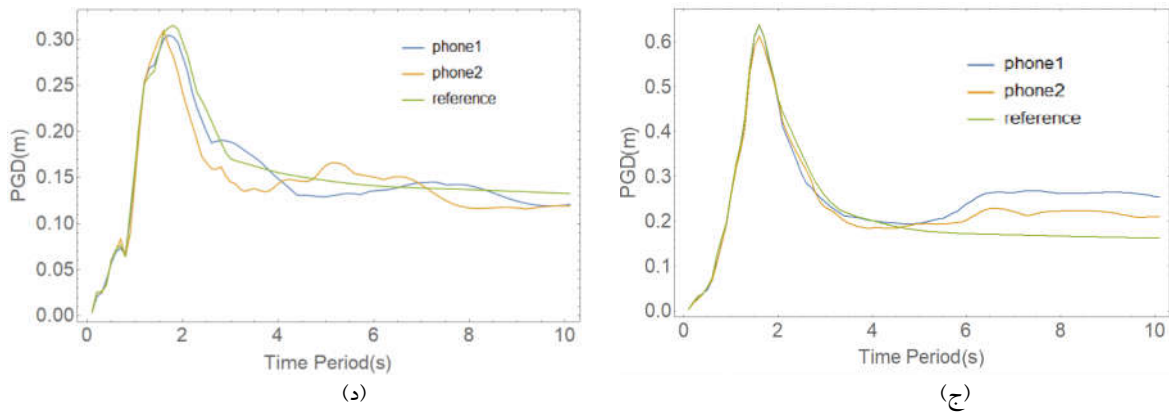
شکل ۱۲. نمودارهای هم‌دوسی مربوط به برداشت‌های شتاب دو گوشی هوشمند آزمون برای حالت نامتصل در راستای (الف) X (ب) Y



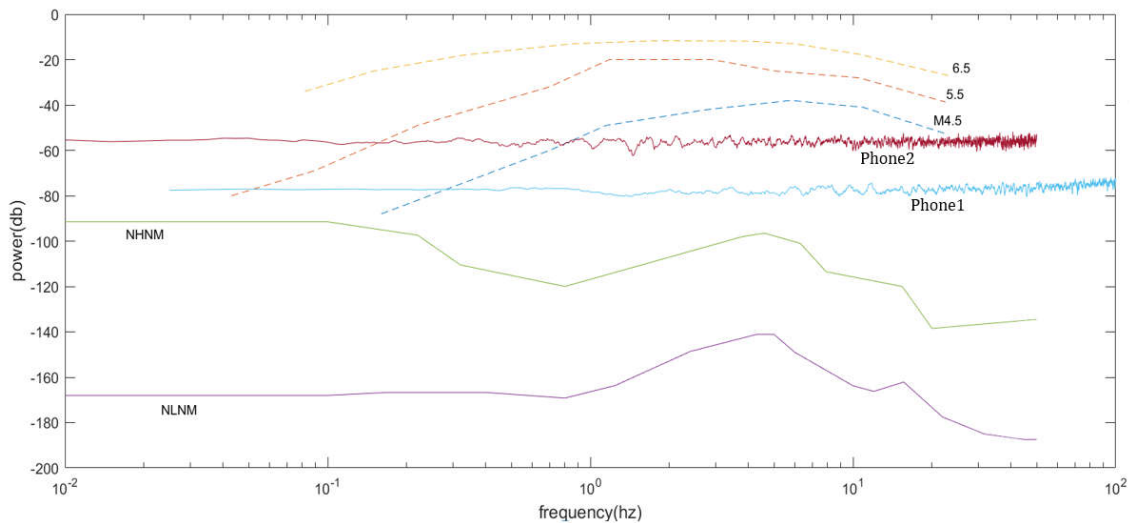
شکل ۱۳. طیف پاسخ شتاب برای دو گوشی هوشمند و شتاب‌نگار مرجع در راستاهای (الف) X و (ب) Y برای حالت متصل و در راستاهای (ج) X و (د) Y برای حالت نامتصل



شکل ۱۴. طیف پاسخ جابه‌جایی دو گوشی هوشمند و شتاب‌نگار مرجع در راستاهای (الف) X و (ب) Y برای حالت متصل و در راستاهای (ج) X و (د) Y برای حالت نامتصل



ادامه شکل ۱۴.



شکل ۱۵. ارزیابی توانایی شتاب‌سنج گوشی‌های آزمون در ثبت زمین‌لرزه‌ها با بزرگ‌های مختلف (برای فاصله رومرکزی ۱۰ کیلومتر)

مطالعات مهندسی ساختمان که بیشتر دوره‌تناوب‌های طبیعی در محدوده ۰/۲ تا ۴ ثانیه به کار می‌آیند، شتاب‌سنج‌های گوشی‌های هوشمند به‌خوبی پاسخگو هستند.

برای درک میزان حساسیت شتاب‌سنج‌های گوشی‌های آزمون، نمودارهای کف نوفه ثبت شده توسط این شتاب‌سنج‌ها با بیشینه و کمینه سطح نوفه زمینه (HNM و LNM) و نیز داده‌های پردازش شده بر مبنای

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب طیف‌های پاسخ شتاب و جابه‌جایی را برای نگاشت ورودی زلزله بم، برای دو گوشی هوشمند و شتاب‌نگار مرجع در هر دو حالت متصل و نامتصل در راستای x و y نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، طیف‌های پاسخ شتاب تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارند، اما این تطابق در طیف‌های جابه‌جایی به‌ازای دوره‌تناوب‌های بیش از ۵ ثانیه تا اندازه‌ای خدشه‌دار شده است. به این ترتیب باید گفت که در

زمین لرزه‌های ثبت شده در فاصله رومرکزی ۱۰ کیلومتری و به‌ازای بزرگ‌گای ۴/۵، ۵/۵ و ۶/۵ (کنگ و همکاران، ۲۰۱۵ و کنگ و همکاران، ۲۰۱۶ ب) مقایسه شده‌اند (شکل ۱۵). نوفه ثبت شده توسط شتاب‌سنج‌ها شامل نوفه ذاتی به‌علاوه نوفه زمینه در محیطی آرام است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نوفه مربوط به شتاب‌سنج گوشی از LNM و HNMM بالاتر است، اما در بازه بسامدی مورد نظر برای کاربرد مهندسی زلزله در ساختمان‌های معمول شهری (۱ تا ۱۰ هرتز)، هر دو گوشی توانایی ثبت زلزله-هایی با بزرگ‌گای بیش از ۴/۵ را در فاصله رومرکزی ۱۰ کیلومتری دارند.

#### ۴ نتیجه‌گیری

این پژوهش بر آن بود تا امکان بهره‌گیری از شتاب‌سنج گوشی هوشمند را در برداشت‌های لرزه‌ای برای مطالعات مهندسی زلزله درباره ساختمان‌های شهری ارزیابی کند. در این پژوهش دامنه کارکردی شتاب‌سنج‌های گوشی‌های هوشمند موجود در ثبت مناسب شاخصه‌های مهم مورد استفاده در بررسی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های معمول شهری (یک تا شش طبقه) برآورد می‌شود. شاخصه‌های ارزیابی شده در این مقاله، نگاشت زمانی شتاب به همراه نگاشت‌های سرعت و جابه‌جایی به‌دست آمده از آن، طیف‌های فوریه نگاشت‌ها و محتوای بسامدی، بیشینه مقادیر شتاب (PGA)، سرعت (PGV) و جابه‌جایی (PGD) و طیف‌های پاسخ شتاب و جابه‌جایی هستند. برای این منظور، دو گوشی هوشمند به‌همراه یک شتاب‌نگار حرفه‌ای تحت تحریک‌های مختلف لرزه‌ای قرار گرفتند و شاخصه‌های کاربردی در مهندسی زلزله برای نگاشت‌های برداشت شده با هر سه دستگاه به‌دست آمدند و با یکدیگر مقایسه شدند.

این پژوهش نشان داد دامنه بسامدی شتاب‌سنج گوشی‌های هوشمند برای بیشتر مطالعات مهندسی زلزله،

به‌ویژه برای ساختمان‌های کوتاه و متوسط کافی به‌نظر می‌رسد به‌طوری که می‌توان گفت شتاب‌سنج گوشی همراه، داده‌های واقع در دامنه بسامدی ۱ تا ۱۰ هرتز را به‌خوبی برداشت می‌کند. این دامنه بسامدی، به‌خوبی بسامدهای اصلی ارتعاش ساختمان‌های معمول شهری ایران را (بین ۲ تا ۸ هرتز) پوشش می‌دهد. به‌این ترتیب، شتاب‌سنج گوشی‌های هوشمند قادر به برداشت محتوای بسامدی لرزش‌هایی است که به ساختمان وارد می‌شود. ذکر این نکته جالب توجه است که هم‌اکنون در بازار گوشی همراه ایران، گوشی‌های هوشمندی در دسترس هستند که شتاب‌سنج‌هایی با بسامد نمونه‌برداری ۵۰۰ هرتز دارند که بالاتر از شتاب‌نگار مرجع مورد استفاده در این مطالعه است.

مطالعات انجام گرفته در این تحقیق نشان داد که دقت شتاب‌سنج گوشی همراه برای برداشت لرزش‌های ناشی از زلزله‌های شدیدی همچون زلزله بم کافی و مناسب است. شتاب‌سنج گوشی همراه در مقایسه با شتاب‌نگار مرجع، دقت کمتر و نوفه ذاتی بیشتری دارد و از این رو، دامنه‌های شتاب را تنها در صورتی به‌درستی برداشت می‌کند که به اندازه کافی از آستانه نوفه زمینه بالاتر باشند. مقادیر برداشت شده با شتاب‌سنج گوشی هوشمند برای زلزله‌های شدیدی همچون زلزله بم، تطابق بسیار خوبی با نگاشت‌های ثبت شده با شتاب‌نگارهای حرفه‌ای دارد. خاطرنشان می‌کند که کنگ و همکاران (۲۰۱۶ الف)، عملکرد شتاب‌سنج گوشی‌های هوشمند را برای زلزله‌های با بزرگ‌گای بیشتر از ۵ و در محدوده فاصله مکانی تا ۱۰۰ کیلومتر مناسب می‌دانند. همچنین بر پایه مطالعات این مقاله شتاب‌سنج‌های گوشی‌های همراه مقادیر بیشینه شتاب، سرعت و جابه‌جایی را اغلب با خطای کمتر از ۱۰ درصد گزارش می‌کنند؛ با این حال، در مواردی و به‌ویژه برای شتاب، مقادیر بیشینه اختلاف نسبی بیشتر از ۱۰ درصد نیز در برخی از گوشی‌ها تجربه می‌شود.

- Accelerometer: Measurement, **43**, 1425–1430.
- Beeby, S., Ensel, G., Kraft, M., and White, N., 2004, MEMS Mechanical Sensors: Artech House, Inc.
- Bhattacharya, S., Krishna, A. M., Lombardi, D., Crewe, A., and Alexander, N., 2012, Economic MEMS based 3-axis water proof accelerometer for dynamic geo-engineering applications: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **36**, 111–118.
- Biefeld, V., Buhrdorf, A., and Binder, J., 2000, Laterally driven accelerometer fabricated in single crystalline silicon: Sensors and Actuators A: Physical, **82**(1), 149–154.
- Dashti, S., Bray, J. D., Reilly, J., Glaser, S., and Bayen, A., 2012, iShake: The reliability of phones as seismic sensors: In Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- Dashti, S., Bray, J. D., Reilly, J., Glaser, S., Bayen, A., and Mari, E., 2013, Evaluating the reliability of phones as seismic monitoring instruments: Earthquake Spectra, **30**, 721–742.
- Dashti, S., Reilly, J., Bray, J. D., Bayen, A., Glaser, S., Mari, E., and Bray, P. J. D., 2011, iShake: Using Personal Devices to Deliver Rapid Semi-Qualitative Earthquake Shaking Information: GeoEngineering Report.
- Evans, J. R., Allen, R., Chung, A., Cochran, E., Guy, R., Hellweg, M., and Lawrence, J., 2014, Performance of several low-cost accelerometers: Seismological Research Letters, **85**.
- Feldbusch, A., Sadegh-Azar, H., and Agne, P., 2017, Vibration analysis using mobile devices (smartphones or tablets): Procedia Engineering, **199**, 2790-2795.
- Feng, M., Fukuda, Y., Mizuta, M., and Ozer, E., 2015, Citizen sensors for SHM: use of accelerometer data from smartphones: Sensors, **15**(2), 2980–2998.
- Gujarati, P., 2013, What is Accelerometer and how does it work on smartphones, accessed 20 June 2018, <http://www.techulator.com/resources/8930-How-does-smart-phone-accelerometer-work.aspx>.
- Güralp Systems, CMG-5T Operator's guide, 2009.
- Kempe, V., 2011, Inertial MEMS: Principles and Practice: Cambridge University Press.
- Kong, Q., Kwony, Y. W., Schreierz, L., Allen, S., Allen, R., and Strauss, J., 2015, Smartphone-based networks for earthquake detection: In به‌نظرمی‌رسد که الگوریتم مناسب اصلاحی که از مقادیر PGA گزارش شده با گوشی‌های همسایه نیز استفاده می‌کند، قادر خواهد بود مقادیر با اختلاف زیاد را تصحیح یا از روند تهیه نقشه لرزش حذف کند.
- هدف دیگر این مطالعه بررسی تأثیر متصل نبودن و اتصال محکم گوشی به زمین بود تا امکان بهره‌گیری از گوشی‌های ساکن در دسترس مردم را نیز بسنجد. مطالعه حاضر نشان داد که با وجود سطح به‌نسبت لغزنده میز لرزان، متصل نبودن گوشی به کف، تأثیر اندکی در برداشت لرزه‌ای انجام شده با شتاب‌سنج گوشی داشت و گوشی‌ها به سبب وزن مناسب خود، لغزش‌های اندکی را تجربه کردند. این نتیجه با نتایج کنگ و همکاران (۲۰۱۶ ب) مطابقت دارد که در آن تأثیر بسیار اندک لغزش‌ها بر محتوای بسامدی گزارش شده است. به این ترتیب می‌توان گفت استفاده از شتاب‌سنج گوشی همراه ساکن روی زمین در توسعه یک شبکه گسترده شتاب‌نگاری شهری برای مطالعات مهندسی زلزله مربوط به ساختمان‌های معمول شهری توجیه‌پذیر است.

## منابع

خواجهی، رضا، ۱۳۹۷، ریاضیات کاربردی علوم زمین: چاپ اول، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۳۲۰ ص.

صادقی، ح.، شوشتری، ا.، مسکرانیان، م.، ۱۳۹۱، طراحی و ساخت میز لرزان تحت تحریک دو مؤلفه‌ای افقی: نهمین کنگره بین‌المللی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت ماه ۹۱.

Atkinson, G. M., and Wald, D. J., 2007, "Did You Feel It?" intensity data: A surprisingly good measure of earthquake ground motion: Seismological Research Letters, **78**, 362–368.

Badri, A. E., Sinha, J. K., and Albarbar, A., 2010, A typical filter design to improve the measured signals from MEMS



- Plaza, J., Collado, A., Cabruja, E., and Esteve, J., 2002, Piezoresistive accelerometers for MCM package: *Journal of Microelectromechanical Systems*, **11**(6), 794–801.
- Reilly, J., Dashti, S., Ervasti, M., Bray, J. D., Glaser, S. D., and Bayen, A. M., 2013, Mobile phones as seismologic sensors: Automating data extraction for the iShake system: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **2**, 242–251.
- Thandu, S. C., 2014, On temporal and frequency responses of smartphone accelerometers for explosives detection: M.Sc. thesis, Missouri University of Science and Technology.
- Wald, D. J., Quitoriano, V., Worden, C. B., Hopper, M., and Dewey, J. W., 2012, USGS “Did you feel it?” internet-based macroseismic intensity maps: *Annals of Geophysics*, **54**, doi:10.4401/ag-5354.
- Xie, H., and Fedder, G., 2000, CMOS Z-axis capacitive accelerometer with combfinger sensing, in: *Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 496–501.
- 15<sup>th</sup> International Conference on Innovations for Community Services (I4CS) IEEE, 1-8.
- Kong, Q., Allen, R. M., and Schreier, L., 2016a, MyShake: Initial observations from a global smartphone seismic network: *Geophysical Research Letters*, **43**(18), 9588-9594.
- Kong, Q., Allen, R. M., Schreier, L., and Kwon, Y. W., 2016b, MyShake: A smartphone seismic network for earthquake early warning and beyond: *Science Advances*, **2**(2), e1501055.
- Lawrence, J. F., Cochran, E., Chung, A., Kaiser, A., Christensen, C., Allen, R., Baker, J., Fry, B., Heaton, T., Kilb, D., Kohler, M., and Taufer, M., 2014, Rapid earthquake characterization using MEMS accelerometers and volunteer hosts following the M 7.2 Darfield, New Zealand earthquake: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **104**(1), 184–192.
- Morales, J., and Akopian, D., 2017, Physical activity recognition by smartphones, a survey: *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, **37**(3), 388-400.