نشریه مکانیزاسیون کشاورزی/ دوره ۵ شماره ۱/ سال ۱۳۹۹/ صفحه‌های ۹۱-۸۱

ارزیابی شتاب و فرکانس غالب کف کامیون در جاده‌های ثانویه و بررسی پارامترهای موثر در ارتعاش

علی رمضانی بوکت[۱*]، حسین نوید[۱]، میر جواد موسوی نیا[۲]و سجاد رنجبر[۲]

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۲۲

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲- گروه مهندسی برق مخابرات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
* مسئول مکاتبه E-mail: ramezani.boukat@gmail.com

چکیده

بسته‌بندی میوه‌ها یک عامل مهم در کاهش آسیب‌های مکانیکی ناشی از حمل و نقل است. اطلاعات دقیق در مورد وضعیت حمل و نقل هر منطقه به طراحان بسته‌بندی کمک می‌کند تا شبیه‌سازی دقیق‌تری از شرایط موجود انجام دهند. این مطالعه با هدف تجزیه و تحلیل شتاب ارتعاش کف کامیون در حین حمل و نقل در جاده‌های ثانویه انجام شد. برای این منظور، یک شبکه حسگر بی‌سیم متشکل از سه گره حسگر با شتاب سنج سه محوره برای اندازه‌گیری شتاب لحظه‌ای در جلو و عقب کامیون‌های دارای سامانه تعلیق فنری به کار گرفته شد. مقادیر شتاب اندازه‌گیری شده توسط پایگاه داده جمع‌آوری و در لپ‌تاپ ثبت گردید. سطح چگالی طیف توان (PSD) برای جاده‌های ثانویه محاسبه شد. افزایش سرعت از ۷۰ به ۹۰ کیلومتر در ساعت باعث افزایش بیشینه PSD از ۰/۱۹۳ به G^2/Hz ۰/۳۴۰ گردید. در مقایسه با استاندارد ASTM 4728، سطح PSD کامیون‌های با سیستم تعلیق فنری در جاده ثانویه برای بازه ۱ تا ۳۵ هرتز بالاتر و برای بازه ۳۵ تا ۲۰۰ هرتز کمتر بود. بالاترین مقادیر PSD در فرکانس‌های کمتر از ۶ هرتز اتفاق افتاد و بازه فرکانسی ۴-۳ هرتز به‌عنوان فرکانس غالب در جاده‌های ثانویه تعیین گردید. متوسط RMS_G در راستای عمودی برای کامیون‌های سنگین ۰/۶۵۴G به‌دست آمد. در این مقاله، اثرات نوع جاده، سرعت حرکت، جهت شتاب و نیز موقعیت جعبه بر روی سطح ارتعاش به‌طور مفصل مورد بحث قرار گرفت. یافته‌های تحقیق می‌تواند در شبیه‌سازی شرایط حمل و نقل میوه‌های بسته‌بندی شده در میزهای ارتعاشی قابل برنامه‌ریزی آزمایشگاهی مورداستفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: ارتعاش، جاده ثانویه، چگالی طیف توان، فرکانس غالب، کامیون

Evaluation of the Acceleration and Predominant Frequency of Truck Bed on Local Roads and Investigation of the Effective Parameters in Vibration

Ali Ramezani Boukat[1*], Hossein Navid[1], Mir Javad Musevi Niya[2] and Sajjad Ranjbar[2]

Received: 10 Feb 2021 Accepted: 11 Apr 2021

[1]Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[2]Department of Communications Engineering, Faculty of Electrical & Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
*Corresponding author: ramezani.boukat@gmail.com

Abstract

Fruit packaging is an essential factor in reducing the mechanical damages caused by transportation. Accurate information on the transportation status of any region helps packaging designers to reproduce a more precise simulation of the existing conditions. This study was aimed to analyze the vibration acceleration of truck beds during transportation on local roads. For this, a wireless sensor network combined of three sensor nodes with a tri-axial accelerometer was used to measure the instant acceleration on the front and rear bed of the trucks equipped with leaf-spring suspensions. Acceleration values were three-dimensionally received by the sink node and recorded in a laptop. The average power spectral density (PSD) levels were computed for the local roads. Increasing the speed from 70 to 90 km/h increased the maximum PSD from 0.193 to 0.340 G^2/Hz. Compared to the ASTM 4728 standard, the PSD levels of the trucks with spring suspension on local roads were higher in 1 to 35 Hz and lower in 35 to 200 Hz. The highest PSD values occurred at frequencies below 6 Hz and the frequency range of 3-4 Hz was determined as the predominant frequency on local roads. The average RMS_G values in the vertical direction were 0.654 G for heavy trucks. In this study, the effects of road type, speed, direction, and location of package on vibration level were also discussed in detail. The findings can be applied to simulate the realistic transportation modes of the packaged fruit in lab-programmable-vibration tables.

Keywords: Local road, Power spectral density, Predominant frequency, Truck, Vibration

How to cite:
Ramezani Boukat A., Navid, H., Musevi Niya, M. J., Ranjbar, S. 2020. *Evaluation of the Acceleration and Predominant Frequency of Truck Bed on Local Roads and Investigation of the Effective Parameters in Vibration*. Journal of Machination Agriculture 5 (1): 81-91.

۱- مقدمه

تولید میوه‌ها و سبزی‌ها به فصل و منطقه بستگی دارد و باید مشکلات ذخیره‌سازی و حمل و نقل مورد توجه قرار گیرد (Zhang *et al.*, 2011). حمل و نقل میوه از باغ تا مصرف‌کننده امری پیچیده است و میوه‌ها در معرض انواع بارهای دینامیکی هستند که می‌تواند موجب بروز صدمات مختلفی گردد (Amer Eissa *et al.*, 2013). از طرفی تقاضا برای محصولات با کیفیت روزبه‌روز افزایش می‌یابد. کیفیت محصول بعد از برداشت بهبود پیدا نمی‌کند و فقط می‌توان آن را حفظ نمود؛ بنابراین برداشت میوه و سبزی‌ها باید در مرحله و اندازه مناسب و در بالاترین کیفیت انجام شود (Bachmann & Earles, 2000).

حمل و نقل کالاهای فاسد شدنی با کامیون به دلیل زمان حمل و نقل کوتاه‌تر و انعطاف‌پذیری در رسیدن به نواحی مختلف درون‌مرزی در مقایسه با روش‌های حمل ریلی و دریایی مرسوم‌تر است (Jarimopas *et al.*, 2005). کامیون‌ها به علت سرعت زیاد و ظرفیت‌های مختلف و انعطاف‌پذیری نقش بسیار مهمی را در حمل و نقل مواد کشاورزی دارند.

طبق سالنامه آماری حمل و نقل بیش از ۴۶۶ میلیون تن کالا در کشور جابجا شده است که بالغ بر ۵۵ میلیون تن آن مربوط به گروه کالای کشاورزی و دامی است. میزان کالای حمل شده درون استانی ۲۹ در صد با متوسط مسافت طی شده ۱۱۹ کیلومتر در هر سفر و میزان کالای حمل شده برون‌استانی ۷۱ در صد با متوسط مسافت طی شده ۶۴۳ کیلومتر در هر سفر بوده است که با استفاده از حدود ۳۴۳ هزار دستگاه وسیله نقلیه عمومی باری صورت گرفته است. طول کل راه‌های کشور (بدون راه‌های روستایی) تا پایان سال ۱۳۹۸، ۸۴۰۴۰ کیلومتر بوده است که از هر ۱۰۰ کیلومتر راه برون‌شهری موجود در سطح کشور، حدود ۲۲ کیلومتر آن آزادراه و بزرگراه است (Anonymous, 2019). از آنجا که عمده راه‌های ارتباطی کشور از نوع جاده‌های ثانویه است شرایط حمل و نقل در آن‌ها نیاز به بررسی و مطالعه بیشتری دارد.

حمل و نقل نوع متفاوتی از تنش را از طریق ارتعاش ایجاد می‌کند. ارتعاش ممکن است منجر به یکی از صدمات ناشی از ضربه، فشردگی، ارتعاش و یا هر سه صدمه به‌طور هم‌زمان گردد (Shahbazi *et al.*, 2010). نیروهای ارتعاشی از حرکت وسیله نقلیه در جاده ناشی می‌شوند که معمولاً از نیروهای ضربه کمتر هستند اما در بازه زمانی طولانی‌تری اتفاق می‌افتند. لذا ارتعاش ایجاد شده در حمل و نقل به‌عنوان یک منبع صدمه، شاید از ضربه خیلی مهم‌تر باشد (Soleimani & Ahmadi, 2014b). Springael *et al.* (2018) بیان کردند که ارتعاشات حمل و نقل نقش به سزایی در کوفتگی و سوراخ شدن سیب‌ها در بلژیک دارد و منجر به تلفات ۲۵-۱۰ درصدی، معادل ۲۵-۱۰ میلیون یورو می‌شود. Borocz (2019) اثرات حمل و نقل (سطح ارتعاش و شتاب) را در محموله‌های کانتینر با استفاده از چندین حالت حمل و نقل از مجارستان به مقصد مکزیک، هند و چین اندازه‌گیری نمود. نتایج تحقیق نشان داد سطح ارتعاش در روسیه و چین نسبت به اروپا شدت کمتری در بازه فرکانسی ۱۵-۱ هرتز و شدت بیشتری در بازه فرکانسی ۲۰۰-۱۵ داشت.

بر اساس مطالعات صورت گرفته، متغیرهای زیادی در میزان ارتعاش محصول هنگام حمل و نقل مؤثر است که می‌توان به خصوصیات کامیون (نوع وسیله و سامانه تعلیق، سرعت حمل و نقل، وزن محموله)، خصوصیات جاده (مزرعه‌ای، ثانویه، بزرگراه)، خصوصیات جعبه (جنس جعبه، سامانه بسته‌بندی، تأثیر وجود و عدم وجود ضربه‌گیر)، موقعیت جعبه و میوه (ارتفاع قرارگیری جعبه در ستون، موقعیت جعبه در طول تریلر، عمق میوه داخل جعبه) و خصوصیات میوه اشاره نمود.

Jarimopas *et al.* (2005) با دو نوع کامیون، صدمات را به‌عنوان تابعی از شرایط جاده، سرعت وسیله نقلیه و موقعیت میوه (نارنگی) در محموله اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که سه فاکتور کنترلی سطح جاده، سرعت وسیله و نوع کامیون به‌طور قابل‌توجهی در مقدار بیشینه PSD و صدمات به میوه مؤثرند. سطوح ارتعاش در تریلر کشنده تابعی از سطح جاده، سرعت وسیله نقلیه، نوع سیستم تعلیق و ساختار تریلر است که طی تحقیقی توسط Singh *et al.* (2006) سطوح ارتعاش به‌عنوان تابعی از سیستم تعلیق تریلر در سرعت‌های عملیاتی معمول در بیش از ۱۶۰۰۰ کیلومتر از سطح جاده‌های امریکای شمالی بررسی شد. شناسایی نوع نیروها و ارتعاشات و نیز فاکتورهای مؤثر در آن‌ها می‌تواند به ارائه راه‌حل برای کاهش صدمات کمک نماید. بهبود روش‌های بسته‌بندی در کاهش صدمات مکانیکی ناشی از حمل و نقل مؤثر است اما باید فاکتورهای اقتصادی نیز در نظر گرفته شود به‌طوری که با حداقل هزینه، بهترین عملکرد حاصل گردد (Rissi *et al.*, 2008).

یکی از روش‌های بررسی اثر ارتعاش روی محصولات کشاورزی و ارزیابی بسته‌بندی‌های مختلف، آزمون‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شرایط حمل و نقل با استفاده از میزهای ارتعاشی است. در همین راستا برخی از استانداردها مانند ASTM D 4728، ISTA 4AB و JIS Z 0232 سطوح چگالی طیف توان (PSD) را برای شبیه‌سازی ارتعاشات حمل و نقل ارائه داده‌اند (Lu *et al.*, 2010) اما برای دست‌یابی به بهترین نتایج در تجارت بین‌المللی، طراحان جعبه‌ها باید دانش خود از کانال‌های توزیع بین‌المللی را گسترش دهند (Singh *et al.*, 2007). بررسی ارتعاش میوه‌ها و سبزی‌ها در کامیون‌های یخچال‌دار نشان داد که بزرگ‌ترین مقادیر PSD در حدود ۳/۵ هرتز اتفاق افتاده است (Hinsch *et al.*, 1992). فرکانس غالب برای تریلرهای با سیستم تعلیق بادی بین ۱/۵ تا ۲ هرتز و برای سیستم تعلیق فنر تخت بین ۴ تا ۵ هرتز گزارش شده است (Garcia *et al.*, 2008). Zhou & Wang (2018) بیشینه PSD را برای ماشین ون در فرکانس ۲ هرتز، برای کامیون در فرکانس ۳ تا ۴ هرتز و برای دوچرخه برقی در فرکانس ۴ تا ۵ هرتز به دست آوردند. Slaughter *et al.* (1993) پاسخ فرکانسی جعبه‌های فیبری پالت‌بندی شده به ارتعاش و روابط بین فرکانس‌های ارتعاشی حمل و نقل و صدمات فیزیکی وارده به گلابی را بررسی کردند. مطالعات آزمایشگاهی نشان داد که صدمات ارتعاشی گلابی‌ها در ۳/۵ و ۱۸/۵ هرتز نسبت به ۹ و ۲۵ هرتز بیشتر است که این موضوع اهمیت فرکانس‌های غالب ارتعاش را پیش از پیش نمایان می‌سازد.

سطوح ارتعاش اندازه‌گیری شده در حمل و نقل واقعی با سطوح PSD ارائه شده در استانداردها متفاوت بوده و در نواحی مختلف متغیر است (Brocoz & Singh, 2017) لذا ضروری است بسته‌بندی و جابه‌جایی محصول با در نظر گرفتن شرایط واقعی حمل و نقل در هر منطقه صورت گیرد که برای تحقق این امر نیاز به داشتن اطلاعات دقیق از شرایط جاده‌ای مناطق مختلف است. هدف این تحقیق اندازه‌گیری و آنالیز ارتعاش وارد بر کف کامیون حین حمل و نقل در جاده‌های ثانویه برای به دست آوردن فرکانس غالب، مقایسه شرایط جاده‌های ثانویه با استاندارد مورد استفاده در آزمون‌های آزمایشگاهی ارتعاش و نیز مطالعه و بررسی فاکتورهای مؤثر در ارتعاش است. نتایج تحقیق، داده‌های موردنیاز برای طراحان جعبه و امکان شبیه‌سازی دقیق‌تر از شرایط جاده‌های کشور در آزمون‌های ارتعاش را فراهم می‌آورد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- داده‌برداری

به‌منظور بررسی پارامترهای مؤثر در ارتعاش کامیون‌های سبک و سنگینی که برای حمل میوه استفاده می شوند، دو نوع داده‌برداری در نظر گرفته شد. ۱) داده‌برداری در شرایط کنترل‌شده که در این حالت برای ارزیابی اثر پارامتر موردنظر روی سطح ارتعاش، سایر پارامترها ثابت نگه‌داشته شدند. این حالت برای بررسی اثر سرعت حرکت (با انتخاب دو سرعت ۷۰ و ۹۰ km/h) و نوع جاده بر سطح ارتعاش (با پنج تکرار)، مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور بررسی اثر سرعت حرکت، سایر پارامترهای مؤثر مانند جاده، کامیون، بار و ... باید ثابت در نظر گرفته شود. برای بررسی اثر نوع جاده بر سطح ارتعاش، مقادیر شتاب در سرعت ثابت (۹۰ km/h) اندازه‌گیری شد. ۲)داده‌برداری در شرایط حمل و نقل واقعی که برای به دست آوردن فرکانس غالب جاده، سطح ارتعاش در سه راستای طولی، عرضی و عمودی در جاده‌های ثانویه و با سرعت مرسوم در جاده‌های کشور (۷۰ تا ۹۰ km/h) با چهار تکرار در هر مسیر اندازه‌گیری شد و پارامترهای مؤثر موردبررسی قرار گرفت.

۲-۲- کامیون و مسیر

از آنجا که مطابق مطالعات قبلی (Dalla Costa *et al.*, 2007؛ Garcia *et al.*, 2008؛ Soleimani & Ahmadi, 2014a) شدت ارتعاشات در کامیون‌های دارای سیستم تعلیق فنری نسبت به نوع بادی مقدار بیشتری دارد، لذا در این تحقیق برای اندازه‌گیری ارتعاشات از کامیون‌های دارای سیستم تعلیق فنری استفاده شد. در چرخه توزیع محصولات کشاورزی از باغ تا مصرف‌کننده شرایط یکسانی را شاهد نیستیم و بار میوه عمدتاً به یکی از روش‌های زیر به‌دست مصرف‌کننده می‌رسد:

- انتقال مستقیم محصول برداشت شده از باغ به مراکز توزیع
- جمع‌آوری محصول برداشت شده در میادین تره‌بار و سپس انتقال به مراکز توزیع
- حمل محصول برداشت شده به انبارهای سورتینگ و سپس انتقال به مراکز توزیع

لذا در این تحقیق پس از تعیین مسیرهای داده‌برداری به نحوی که نتایج حاصل قابل‌تعمیم به کل جاده‌های کشور باشد، سه نوع بار با شرایط مختلف انتخاب گردید. بار مسیر ۱ مربوط به محصول سیب است که از باغ‌های اطراف شهر تبریز به میدان تره‌بار تبریز منتقل شده و آماده ارسال به شهر کرج بود. مسیر ۲ انتقال مستقیم محصول برداشت شده از باغ به مراکز توزیع را شامل می‌شد که سیب باغات روستای کرمجوان شهرستان مراغه مستقیما به میدان تره‌بار تهران جهت توزیع در بازار حمل می‌شد. مسیر ۳ مربوط به حمل محصول گوجه‌فرنگی است که پس از برداشت به انبار سورتینگ در شیراز انتقال داده شده و بعد از جداسازی و بسته‌بندی تا میدان تره‌بار بیرجند حمل می‌شد. در هر سه حالت سیستم تعلیق کامیون از نوع فنری و جعبه‌های مورد استفاده برای بسته‌بندی از نوع پلاستیکی بود. اطلاعات کامیون‌ها، بسته‌بندی و مسیرهای مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. شکل ۱ شرایط جاده ثانویه در مسیر مراغه – تهران را نشان داده است.

جدول ۱- ویژگی‌های کامیون و جزئیات بسته‌بندی و مسیرهای اندازه‌گیری سطح ارتعاش

Table 1. Truck features and details of the packaging, and routes for vibration levels measurement

شماره کامیون **Truck ID**	1	2	3
برند Brand	بنز آکسور ۸۴ Benz Axor84	فوتون ۸/۵ تن Foton 8.5 tons	بنزآکسور ۸۴ Benz Axor84
سیستم تعلیق Suspension type	فنری Leaf-spring	فنری Leaf-spring	فنری Leaf-spring
سال ساخت Year of built	2009	2014	2007
مدل موتور Engine model	MB-OM 457 LA	Cummins ISF 3.8 s 4154	MB-OM 457 LA
قدرت موتور Engine power	428hp (1900rpm)	155hp (2600rpm)	428hp (1900rpm)
تعداد سیلندر Number of cylinders	6	4	6
تایر Tire	315/80 R22.5	235/7.5 R17.5	315/80R22.5
ظرفیت بار Load capacity	10000 (kg)	4000 (kg)	10000 (kg)
نوع جعبه Package type	RPC*	RPC	RPC
مسیر Route	تبریز-کرج Tabriz-Karaj	مراغه-تهران Maragheh-Tehran	شیراز-بیرجند Shiraz-Birjand
فاصله Distance	550 (km)	600 (km)	1000 (km)
میوه Fruit	سیب Apple	سیب Apple	گوجه فرنگی Tomato

* جعبه پلاستیکی با قابلیت استفاده مجدد ($490*300*190\ mm^3$)

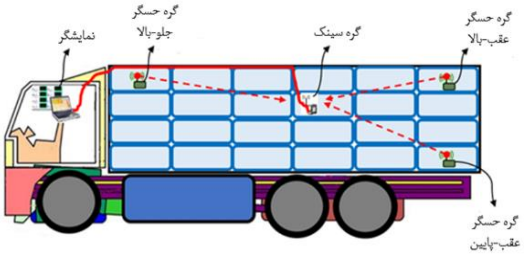
*Reusable Plastic Crates ($490*300*190\ mm^3$)

شکل ۱- جاده ثانویه در مسیر مراغه – تهران

Fig 1. The local road on the Maragheh-Tehran route

۱-۱- تجهیزات اندازه‌گیری

برای جمع‌آوری داده‌های شتاب با توجه به گستره کم داده‌برداری در طول کامیون (کمتر از ده متر) یک شبکه حسگر بی‌سیم ساده بدون ارتباط بین گرهی (شکل ۲) استفاده گردید. داده‌های به‌دست آمده از گره حسگر، به‌صورت بی‌سیم به پایگاه داده ارسال می‌شوند. پایگاه داده یک ارتباط کابلی با لپ‌تاپ (Acer, V3-571G) فراهم می‌کند تا ضمن نمایش آنی نمودار مقادیر شتاب با استفاده از نرم‌افزار نوشته شده، امکان ذخیره داده‌ها به‌صورت فایل متنی فراهم گردد.



شکل ۲- طرح‌واره شبکه حسگر بی‌سیم برای اندازه‌گیری سطح ارتعاشات کامیون

Fig 2. Schematic of wireless sensor network for measuring truck vibration levels

حسگر مورد استفاده ADXL345 بود که یک شتاب سنج سه محوره کوچک با توان مصرفی بسیار پایین و قابلیت اندازه‌گیری با تفکیک‌پذیری بالا (۱۳ بیت) تا شتاب ±۱۶g است. داده‌های خروجی دیجیتال در فرمت ۱۶ بیتی، از طریق رابط دیجیتالی SPI (سه یا چهار سیم) و یا I2C در دسترس قرار می‌گیرد. گره‌های حسگر مورد استفاده در تحقیق، در گروه مهندسی برق- مخابرات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تبریز طراحی و ساخته شد. هر گره شامل اجزای زیر است:

- حسگر (ADXL 345, ±4g ranges, Analog devices)
- میکروکنترلر (Texas instrument ARM Cortex-M3)
- فرستنده-گیرنده رادیویی (2.4 GHz ZigBee transceiver)
- منبع توان (4V external battery)

ارتباط بی‌سیم با استفاده از پروتکل ZigBee با فرکانس کاری GHz ۲/۴ ایجاد شد. IC مورد استفاده CC2538 بود که دارای یک میکروکنترلر ARM[1] و فرستنده-گیرنده[2] رادیویی GHz ۲/۴ است. کدهای نوشته شده برای گره‌های رادیویی بر روی میکروکنترلر ARM پروگرام شده که برای ارسال داده‌های خود از فرستنده-گیرنده رادیویی داخلی استفاده می‌کند. برای داده‌برداری، شتاب سنج ADXL345 از طریق رابط I2C به میکروکنترلر ARM موجود در CC2538، متصل گردید. سه گره به‌عنوان فرستنده و یک گره به‌عنوان گیرنده پیکربندی شد. گره حسگر درون محفظه مشبک قرار داده شد تا ضمن جلوگیری از صدمات احتمالی در حمل و نقل، مانعی برای انتقال بی‌سیم داده ایجاد نگردد.

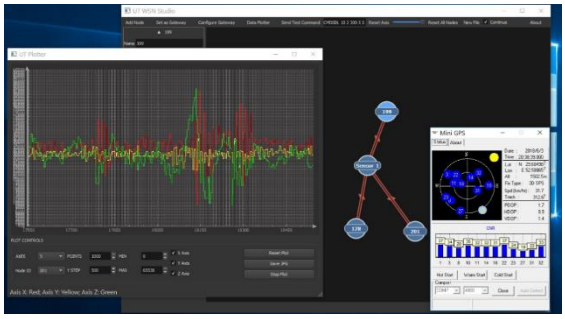
قبل از بارگیری، گره‌های حسگر با استفاده از چسب دوطرفه در کف جعبه‌ها نصب گردید و در هنگام بارگیری جعبه‌های حاوی گره حسگر، در موقعیت‌های از پیش تعیین شده عقب-پائین (ردیف اول از کف کامیون)، عقب-بالا و جلو-بالا (ردیف هفتم از کف کامیون) قرار داده شد. سپس جعبه به‌آرامی با محصول موردنظر پر شد. با توجه به قرارگیری سنسور در داخل محفظه مشبک، وزنی روی سنسور نبوده و امکان ارتعاش

[1]Texas instrument ARM Cortex-M3 embedded in CC2538

[2]Transceiver

آزاد برای سنسور وجود داشت. گره سینک نیز در موقعیت وسط گره‌های حسگر درون جعبه نصب شد. هر گره فرستنده اطلاعات داده‌ها را به گیرنده ارسال نموده و گیرنده اطلاعات دریافتی را از طریق پورت USB به لپ‌تاپ انتقال می‌داد. از یک دستگاه تعیین موقعیت[1] (GPS) برای مشخص نمودن محل داده‌برداری و نیز سرعت تقریبی کامیون استفاده گردید. این دستگاه دارای پورت USB بوده و پس از اتصال به لپ‌تاپ، موقعیت را به کمک نرم‌افزار مربوطه تعیین می‌کند.

نرم‌افزاری برای کنترل گره‌ها و همچنین دریافت، ثبت و نمایش لحظه‌ای شتاب ارتعاشی، به زبان C++ نوشته شد که شکل ۳ محیط کاربری نرم افراز، نمایشگر لحظه‌ای شتاب و نرم‌افزار مربوط به GPS را نشان داده است. با توجه به تنظیمات صورت گرفته برای حسگرها، بعد از ۱۰ ثانیه داده‌برداری، حسگر به مدت ۲ ثانیه در حالت خواب قرار می‌گرفت تا فرصت ارسال کامل داده‌های ثبت شده در حافظه داخلی آن به گره سینک فراهم گردد و مجدداً داده‌برداری ادامه یابد. نرخ نمونه‌برداری هر حسگر ۴۰۰ داده در ثانیه تعیین شده بود.



شکل ۳- نرم‌افزار برای ثبت شتاب ناشی از ارتعاشات جاده با استفاده از سه حسگر و نمایش برخط داده‌ها

Fig 3. The software for recording acceleration caused by road vibration using three sensors, and real-time monitoring of data

۲-۳- تحلیل داده‌ها و بررسی پارامترهای موثر در ارتعاش

برای پردازش و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای اکسل[2] و متلب[3] استفاده گردید. ارتعاشات تصادفی در حوزه فرکانس را می‌توان با چگالی طیف توان ارائه نمود که نمودار آن در باندهای باریک فرکانسی با استفاده از فرمول ۱ حاصل می‌گردد (Rissi *et al.*, 2008).

$$PSD = \frac{1}{BW}\sum_{i=1}^{n}\left(RMS_{G_i}^{2}\right)/N \qquad (۱)$$

که در آن، PSD چگالی طیف توان ($G^2\,Hz^{-1}$)، N تعداد نمونه‌ها، BW پهنای باند (Hz) و RMS_G ریشه میانگین مربعات شتاب (G) است.

مقادیر RMS_G نیز با استفاده از فرمول ۲ قابل محاسبه است (Zhou & Wang, 2018).

$$RMS_G = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} G_i^2} \qquad (۲)$$

که در آن G_i شتاب و M تعداد داده‌های شتاب است.

با توجه به مطالعات پیشین، طول نمونه مقادیر شتاب ثبت شده در محاسبات ۱۰۲۴ انتخاب گردید. جهش‌های موجود در داده‌ها با استفاده از دستور unwrap در نرم‌افزار متلب که بر اساس زاویه فاز[4] نمودار را اصلاح می‌کند، تصحیح گردید. مقادیر شتاب در جهات مختلف کامیون اندازه‌گیری و با استفاده از نمودارهای PSD، اثر موقعیت جعبه، سرعت حرکت و شرایط جاده بر سطح ارتعاش و نیز فرکانس غالب جاده‌های ثانویه بررسی گردید.

۳- نتایج و بحث

مقادیر شتاب اندازه‌گیری شده در راستای عمودی برای ۶۰ ثانیه در شکل ۴ نشان داده شده است. با استفاده از مقادیر شتاب، پارامترهای جهت شتاب، موقعیت جعبه، سرعت حرکت و شرایط جاده مورد مطالعه قرارگرفت.

۱-۳- بررسی سطوح ارتعاش در جهات طولی، عرضی و عمودی

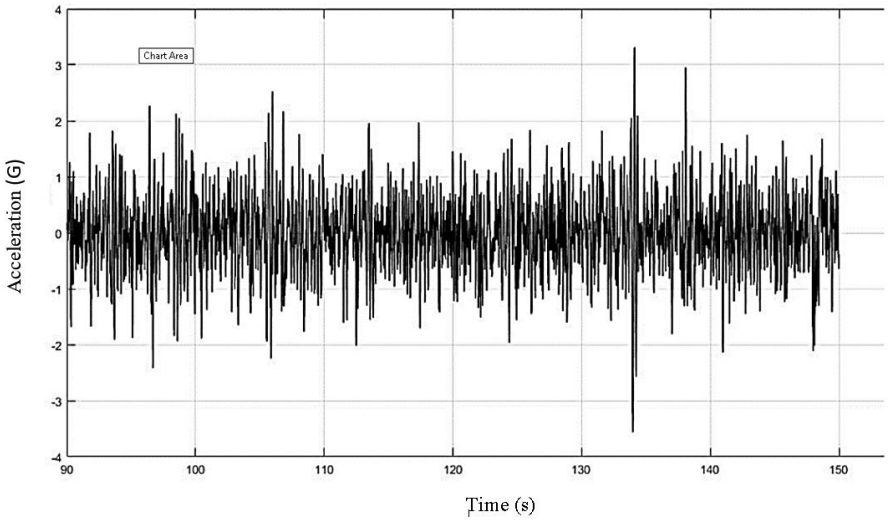
با پایش مقادیر شتاب اندازه‌گیری شده که به‌صورت لحظه‌ای در اتاقک راننده قابل مشاهده بود، تقریباً در کل مسیرهای طی شده مقدار ارتعاشات در راستای عمودی نسبت به راستاهای دیگر شدت بیشتری را نشان داد. وجود پیچ تند در جاده و اعمال ترمز ناگهانی به ترتیب منجر به افزایش شتاب در راستاهای عرضی و طولی می‌گردید. شکل ۵ نمونه‌ای از شتاب هم‌زمان اندازه‌گیری شده در سه راستای مختلف را نشان می‌دهد.

[1]VK-162 Gmouse USB GPS
[2]Excel 2013
[3]MATLAB R2015b
[4]Phase Angles

طبق یافته‌های Park *et al.* (2020) برای همه مسیرهای هدف سطح ارتعاش در محور عمودی به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از محورهای جانبی و طولی بود و تغییر در مقدار سطح ارتعاش طولی کوچک‌تر از دو جهت دیگر بود. این موضوع علاوه بر کامیون برای سایر وسایل حمل کالا مانند موتورسیکلت برقی، خودرو سواری و اتومبیل ون موردبررسی قرار گرفت که در همه موارد شتاب بیشتری در راستای عمودی مشاهده شد (Zhou & Wang, 2018).

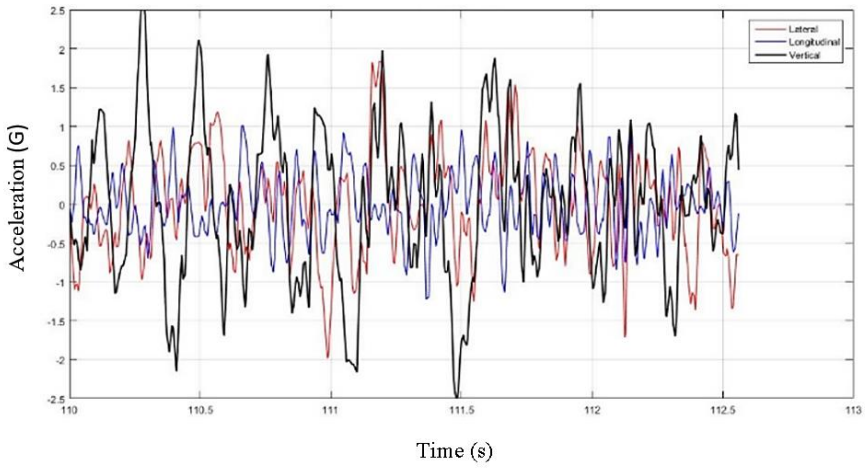
۲-۳- بررسی اثر موقعیت جعبه بر سطح ارتعاش

جمع‌آوری داده‌ها با به‌کارگیری سه حسگر و در سه موقعیت (عقب-پائین، عقب-بالا و جلو-بالا) به‌صورت هم‌زمان، نشان داد که در راستای طولی مقادیر بیشینه PSD در انتهای کامیون بیشتر از جلوی کامیون بود. این موضوع به‌وضوح در شکل ۶ (الف) قابل مشاهده است که نمودار PSD را برای دو سری داده اندازه‌گیری شده به‌صورت هم‌زمان، در دو موقعیت عقب-بالا و جلو-بالا نشان داده است. شکل ۶ (ب) نمودار PSD را برای دو سری داده اندازه‌گیری شده به‌صورت هم‌زمان، در دو موقعیت عقب-پائین و عقب-بالا نشان داده است. نتایج بیانگر آن است که در راستای عمودی مقادیر PSD در ردیف بالایی نسبت به ردیف پائینی در یک ستون، بیشتر است.



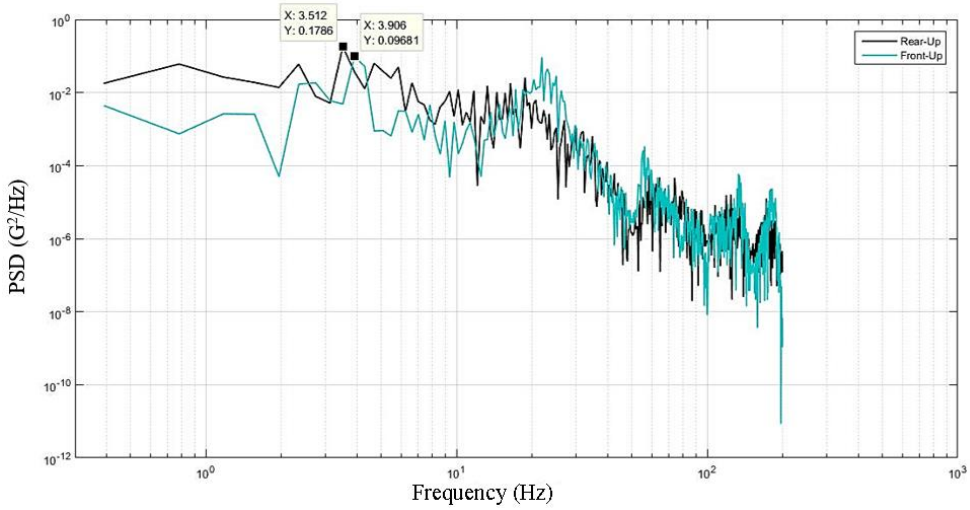
شکل ۴- شتاب اندازه‌گیری شده در راستای عمودی در کف کامیون ۳

Fig 4. Measured vertical acceleration on the bed of truck 3

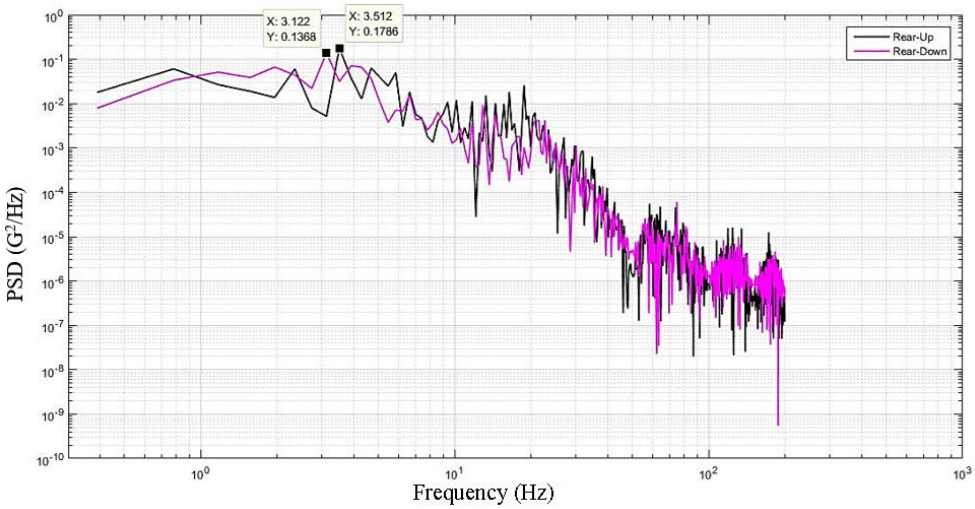


شکل ۵- شتاب عرضی، طولی و عمودی کامیون حین حمل و نقل در جاده ثانویه (موقعیت حسگر عقب-پائین، سرعت ۷۰ km/h)

Fig 5. Transverse, longitudinal and vertical acceleration of the truck during local road transport (rear-down sensor location, 70km/h speed)



(الف)



(ب)

شکل ۶- نمودار PSD ارتعاش کامیون به‌صورت هم‌زمان در دو موقعیت (الف) عقب-بالا و جلو-بالا (ب) عقب-پائین و عقب-بالا

Fig 6. The PSD spectrums of truck vibration at two locations simultaneously: (A) rear-up and front-up (B) rear-down and rear-up

نتایج با مشاهدات سایر محققان (Zhou *et al.*, 2007؛Li *et al.*, 2011؛ Zhang *et al.*, 2011) مطابقت دارد. Pretorius & Steyn (2012) بیان کردند در یک ستون از جعبه‌ها، به‌دلیل این‌که جعبه‌های پائینی توسط جعبه‌های بالایی در موقعیت خود نگه‌داشته می‌شوند، برای حرکت جعبه‌های پائینی نسبت به جعبه‌های بالایی انرژی بیشتری مورد نیاز است.

۳-۳- بررسی اثر سرعت حرکت بر سطح ارتعاش

سرعت حرکت کامیون در جاده به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در سطح ارتعاش کامیون مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی، سطح لرزش کامیون‌ها در جاده‌های ملی و بین‌المللی معمولاً ضعیف‌تر است، در حالی که در سایر مسیرها مانند جاده‌های ثانویه و شنی و ماسه‌ای، اغلب شدت ارتعاش زیاد است. علاوه بر این، سنگفرش و جاده بتونی شدیدترین لرزش را نسبت به جاده‌های آسفالته در هنگام حمل و نقل کامیون ایجاد می‌کند (Paternoster *et al.*, 2018).

با توجه به محدودیت‌های ترافیکی در جاده ثانویه، اثر سرعت روی ارتعاش در بزرگراه مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۷ سطوح PSD را در دو سرعت مختلف (۷۰ و km/h ۹۰) تحت شرایط یکسان (کامیون، نوع جاده و محل مشابه) نشان می‌دهد. افزایش سرعت کامیون از ۷۰ به km/h ۹۰ باعث افزایش بیشینه PSD از ۰/۱۹۳G به ۰/۳۴۰G گردید.

۱-۴- مقایسه سطح ارتعاش جاده ثانویه با استاندارد

یکی از مهم‌ترین روش‌های بررسی اثرات ناشی از ارتعاشات حمل‌ونقل جاده‌ای، شبیه‌سازی شرایط واقعی است که با استفاده از میزهای ارتعاشی در آزمایشگاه صورت می‌گیرد. شتاب ایجاد شده در روی میز ارتعاشی باید معادل شتاب کف کامیون باشد که به جعبه وارد می‌شود. در همین راستا برخی از استانداردها مانند ASTM D 4728 سطوح چگالی طیف توان را برای شبیه‌سازی ارتعاشات حمل‌ونقل ارائه داده‌اند (Lu *et al.*, 2010). برای به‌دست آوردن تخمینی از شرایط جاده‌های ثانویه، نتایج حاصل از پنج داده‌برداری در جاده ثانویه (جدول ۲) با استاندارد ASTM D 4728 مقایسه گردید. برای مقایسه بهتر، نمودارهای PSD با استفاده از نرم‌افزار متلب ساده‌سازی[1] شد که نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. چنانچه از نمودار مشخص است مقادیر PSD برای جاده ثانویه، در بازه فرکانسی ۳۵-۱ هرتز بیشتر از نمودار استاندارد ASTM D 4728 و برای فرکانس‌های بالای ۳۵ هرتز کمتر از استاندارد می‌باشد.

جدول ۲- مقادیر بیشینه PSD و فرکانس مربوطه برای پنج نمونه اندازه‌گیری شده در جاده ثانویه با کامیون ۲ در سرعت ۹۰ km/h

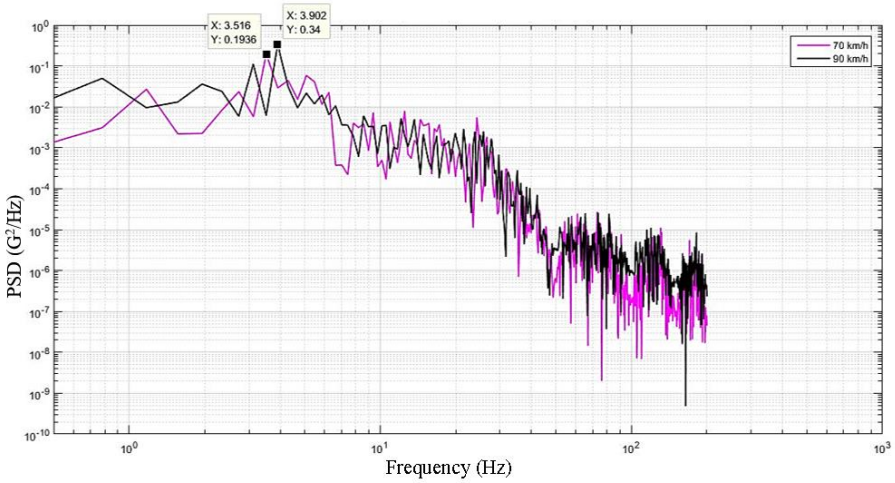
Table 2. Peak PSD values and corresponding frequency for five measured samples on truck 2 in local roads at 90 km/h speed

فرکانس (HZ) Frequency(Hz)	PSD_{Max} (G^2Hz^{-1})	داده Data
3.90	0.472	1
4.29	0.717	2
4.68	0.287	3
3.12	0.340	4
4.29	0.516	5

۱-۱- محاسبه فرکانس غالب جاده‌های ثانویه

به‌منظور به‌دست آوردن فرکانس غالب ارتعاش کف کامیون در حمل و نقل واقعی که بتوان آن را در آزمون‌های ارتعاش آزمایشگاهی استفاده نمود، مقادیر شتاب در موقعیت عقب-پائین که بیشترین شدت ارتعاش را در کف کامیون دارد، اندازه‌گیری و ثبت شد. جدول ۳ مقادیر PSD ثبت شده در حمل نقل در سه مسیر با چهار مرحله نمونه‌برداری را ارائه کرده است. باید در نظر داشت که در حمل و نقل واقعی، سرعت در مسیرهای مختلف یکسان نبوده و به‌تناسب شرایط جاده توسط راننده کنترل می‌گردد. لذا داده‌های جدول ۳ در حمل و نقل واقعی (سرعت ۷۰-km/h ۹۰) رخ داده است.

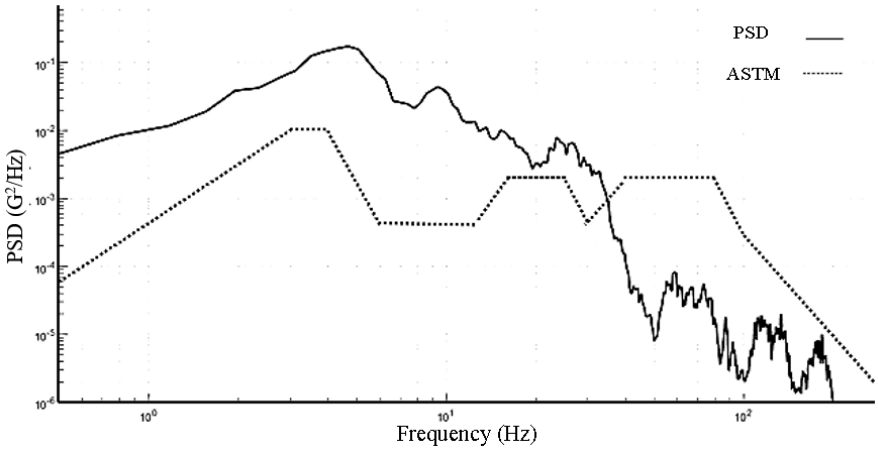
شکل ۹ نمودار فراوانی سه بیشینه PSD نمونه‌های ارائه شده در جدول ۳ را نشان داده است. قابل مشاهده است که مقادیر بیشینه PSD اغلب در بازه فرکانسی کمتر از ۶ هرتز رخ داده است و در بازه فرکانسی بیش از ۲۰ هرتز سطح ارتعاشات به‌طور قابل توجهی پائین است و برای جاده‌های ثانویه محدوده فرکانسی ۳ تا ۴ هرتز به‌عنوان فرکانس غالب ارتعاشات است که با مطالعات پیشین مطابقت دارد.



شکل ۷- نمودار چگالی طیف توان ارتعاش در کف کامیون ۳ (بزرگراه، موقعیت حسگر عقب-پائین، سرعت ۷۰ km/h و ۹۰ km/h)

Fig 7. The PSD spectrums of vibration levels of truck 3 (highway, rear-down sensor location, 70 km/h and 90 km/h speed)

[1] Smooth



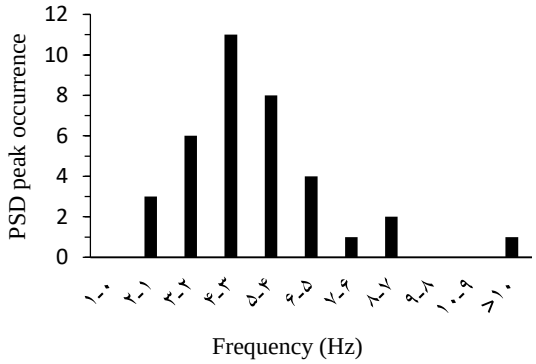
شکل ۸- نمودار PSD ساده‌سازی شده در راستای عمودی برای جاده ثانویه در مقایسه با استاندارد ASTM D 4728

Fig 8. Smoothed PSD spectrums of the local road in the vertical direction in comparison to ASTM D 4728 standard

جدول ۳- سه مقدار بیشینه نمودار PSD (G^2/Hz) برای جاده ثانویه در سه مسیر مختلف

Table 3. Three peak values of PSD (G^2 Hz^{-1}) spectrums on local road in three different routes

PSD_{Max3}	$Freq_3$	PSD_{Max2}	$Freq_2$	PSD_{Max1}	$Freq_1$	داده‌برداری Sampling	کامیون Truck
0.029	1.953	0.044	5.078	0.062	4.297	1	1
0.034	20.313	0.060	2.344	0.161	3.516	2	
0.032	2.344	0.038	3.125	0.050	4.297	3	
0.045	2.734	0.113	4.688	0.318	3.906	4	
0.113	3.516	0.263	2.734	0.717	4.297	1	2
0.162	5.469	0.335	4.688	0.472	3.906	2	
0.164	3.516	0.246	5.469	0.287	4.688	3	
0.120	7.031	0.138	3.906	0.299	5.078	4	
0.051	4.683	0.081	1.171	0.168	3.512	1	3
0.101	4.688	0.129	2.734	0.245	3.906	2	
0.053	6.250	0.103	2.734	0.129	3.906	3	
0.020	7.031	0.031	1.953	0.388	3.906	4	



شکل ۹- فراوانی تعداد بیشینه PSD به‌دست آمده در بازه‌های فرکانسی مربوط

Fig 9. A number of PSD peaks found according to the special frequency ranges

در تحقیق حاضر برای کل داده‌برداری مقادیر RMS شتاب در راستای عمودی کامیون‌های ۱ و ۳ به‌ترتیب ۰/۶۹۵G و ۰/۶۱۴G بود. مقادیر RMS شتاب برای مسیر ۲ در راستای عمودی ۰/۸۵۰G به‌دست آمد که نسبت به کامیون‌های ۱ و ۳ مقادیر بیشتری نشان می‌دهد. این اختلاف به‌دلیل به‌کارگیری کامیون سبک و وزن بار کمتر (۴ تن) نسبت به دو کامیون ۱ و ۳ (کامیون سنگین با بار ۱۰ تن) است. Shahbazi *et al.* (2010) طی تحقیقی شتاب‌های ۰/۳G و ۰/۷G را به‌عنوان پرتکرارترین مقادیر شتاب معرفی نمودند.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ارتعاشات جاده‌ای در شرایط حمل‌ونقل و در کف کامیون‌های مجهز به سیستم تعلیق فنری در جاده‌های ثانویه اندازه‌گیری شد و با به‌دست آوردن نمودارهای چگالی طیف توان، پارامترهای مؤثر در ارتعاشات جاده‌ای که نقش مهمی در حمل‌ونقل محصولات کشاورزی دارد، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق می‌تواند به‌عنوان معیاری در برنامه‌ریزی آزمون‌های ارتعاش با استفاده از میزهای ارتعاشی و شبیه‌سازی شرایط حمل‌ونقل جاده‌های کشور مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج تحقیق عبارتند از:

- شتاب ارتعاش در راستاهای طولی، عرضی و عمودی اندازه‌گیری شد که برای هر دو نوع جاده مقادیر شتاب در راستای عمودی نسبت به راستاهای طولی و عرضی بیشتر است.

- مقادیر شتاب در موقعیت‌های عقب-پائین، عقب-بالا و جلو-بالا اتاق بار کامیون اندازه‌گیری شد. نمودارهای چگالی طیف توان حاصل نشان می‌دهد مقادیر سطح ارتعاش در موقعیت انتهایی کف کامیون نسبت به جلوی آن بیشتر است. همچنین برای یک ستون از جعبه‌های میوه، سطح ارتعاش در ردیف‌های بالایی بیشتر بود.

- تأثیر سرعت‌های کم و زیاد کامیون بر ارتعاش در شرایط مشابه بررسی شد. با افزایش سرعت کامیون از ۷۰ به km/h ۹۰، بیشینه PSD از ۰/۱۹۳G به ۰/۳۴۰G افزایش یافت. لذا با افزایش سرعت کامیون مقادیر چگالی طیف توان افزایش می‌یابد.

- سامانه پایش لحظه‌ای شتاب ارتعاش در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت که در صورت تجهیز با مکانیسم هشدار می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای در کنترل سرعت توسط راننده کامیون داشته باشد. بدین صورت که با بیشتر شدن مقدار شتاب ارتعاش از یک مقدار از پیش تعریف شده، به راننده هشدار صوتی داده شود.

- در مقایسه با استاندارد ASTM 4728، سطوح چگالی طیف توان در بازه فرکانسی ۳۵-۱ هرتز برای جاده‌های ثانویه، بیشتر از استاندارد و در بازه فرکانسی بالای ۳۵ هرتز، کمتر از استاندارد به دست آمد.

- مقادیر RMS شتاب انتهای کف کامیون برای راستاهای عمودی، در کامیون‌های سنگین و سبک محاسبه گردید که می‌تواند در آزمون‌های ارتعاش آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرد.

- برای کامیون با سیستم تعلیق فنری، بالاترین مقادیر PSD در فرکانس‌های کمتر از ۶ هرتز اتفاق افتاد و بازه فرکانسی ۴-۳ هرتز در جاده ثانویه به‌عنوان فرکانس غالب تعیین گردید؛ بنابراین طراحان جعبه باید روی کاهش ارتعاش وارده به میوه بخصوص در فرکانس‌های کمتر از ۶ هرتز توجه ویژه‌ای داشته باشند.

۵- منابع

Anonymous. (2019). *Statistical yearbook of Iran road maintenance and transportation organization.* (In Persian).

Amer Eissa, A. H., Albaloushi, N. S., and Azam, M. M. (2013). *Vibration analysis influence during crisis transport of the quality of fresh fruit on food security*. Agricultural Engineering International: CIGR Journal. 15(3): 181-190.

Bachmann, J., and Earles, R. (2000). *Postharvest handling of fruits and vegetables*. Appropriate Technology Transfer for Rural Areas: 1-19.

Borocz, P. (2019). *Vibration and acceleration levels of multimodal container shipping physical environment.* Packaging Technology and Science.

Borocz, P., and Singh, S. P. (2017). *Measurement and analysis of vibration levels in rail transport in central Europe*. Packaging Technology and Science. 30: 361-371.

Dalla Costa, O., Faucitano, L., Coldebella, A., Ludke, J., Peloso, J., Dalla Roza, D., and da Costa, M. P. (2007). *Effects of the season of the year, truck type and location on truck on skin bruises and meat quality in pigs.* Livestock Science. 107(1): 29-36.

Garcia, M. A., Singh, S. P., and V. A. Cloquell-Ballester. (2008). *Measurement and analysis of vibration levels for truck transport in Spain as a function of payload, suspension and speed.* Packaging Technology and Science. 21(8): 439-451.

Hinsch, R., Craig, W., Slaughter, D., and Thompson, J. (1992). *Vibration of fresh fruits and vegetables during refrigerated truck transport.* Transactions of the ASAE. 36(4): 1039-1042.

Jarimopas, B., Singh, S. P., and Saengnil, W. (2005). *Measurement and analysis of truck transport vibration levels and damage to packaged tangerines*

Shahbazi, F., Rajabipour, A., Mohtasebi, S., and Rafie, S. (2010). *Simulated in-transit vibration damage to watermelons.* Journal of Agricultural Science and Technology. 12: 23-34.

Slaughter, D., Hinsch, R., and Thompson, J. (1993). *Assessment of virbration injury to Bartlett pears.* Transactions of the ASAE.

Soleimani, B., and Ahmadi, E. (2014a). *Evaluation and analysis of vibration during fruit transport as a function of road conditions, suspension system and travel speeds.* Engineering in Agriculture, Environment and Food. 8(1): 26-32.

Soleimani, B., and Ahmadi, E. (2014b). *Measurement and analysis of truck vibration levels as a function of packages locations in truck bed and suspension.* Computers and Electronics in Agriculture. 109: 141-147.

Springael, J., Paternoster, A., and Braet, J. (2018). *Reducing postharvest losses of apples: Optimal transport routing (while minimizing total costs).* Computers and Electronics in Agriculture. 146: 136-144.

Zhang, L. W., Yang, C., Wang, Y., Pan, D., Meng, X., and Tong, T. (2011). *Vibration and impact performance tests of cherry tomato transport packages.* Transactions China Society Agriculture Machinery. 42: 125-130.

Zhou, H., and Wang, Z. W. (2018). *Measurement and analysis of vibration levels for express logistics transportation in South China.* Packaging Technology and Science. 31(10): 665-678.

Zhou, R., Su, S., Yan, L., and Y. Li. (2007). *Effect of transport vibration levels on mechanical damage and physiological responses of Huanghua pears (Pyrus pyrifolia Nakai, cv. Huanghua).* Postharvest Biology and Technology. 46(1): 20-28.

*during transit***.** Packaging Technology and Science. 18(4): 179-188.

Li, C., Cao, B., and You, S. Z. (2011). *Simulation of Huangguan Pear Vibration Damage during Transportation.* Paper presented at the Applied Mechanics and Materials. Vol. 63: 453-456.

Lu, F., Ishikawa, Y., Kitazawa, H., and Satake, T. (2010). *Effect of vehicle speed on shock and vibration levels in truck transport.* Packaging Technology and Science. 23(2): 101-109.

Park, J., Choi, S., and Jung, H . M. (2020). *Measurement and Analysis of Vibration Levels for Truck Transport Environment in Korea.* Applied Science. 10: 6754

Paternoster, A., Vanlanduit, S., Springael, J., and Braet, J. (2018). *Vibration and shock analysis of specific events during truck and train transport of food products.* Food Packaging Shelf Life. 15: 95-104.

Pretorius, C., and Steyn, W. J. (2012). *Influence of road roughness on the transportation of fresh produce.* SATC 2012.

Rissi, G. O., Singh, S. P., Burgess, G., and Singh, J. (2008). *Measurement and analysis of truck transport environment in Brazil.* Packaging Technology and Science. 21(4): 231-246.

Singh, J., Singh, S. P., and Joneson. E. (2006). *Measurement and analysis of US truck vibration for leaf spring and air ride suspensions, and development of tests to simulate these conditions.* Packaging Technology and Science. 19(6): 309-323.

Singh, S. P., Sandhu, A., Singh, J. A., and Joneson, E. (2007). *Measurement and analysis of truck and rail shipping environment in India.* Industrial Technology. 45.