Archive of SID
DOI: 10.22059/ijbse.2018.243332.664996 مهندسی بیوسیستم ایران، دوره ۴۹، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷ (ص ۴۴۵-۴۳۷)

# Acoustic Annoyance Modelling in Backhoe Loader Based on Sound Qualitative Metrics

**ABBAS KHANMOHAMMADI[1*], ALI RAJABIPOUR[2], MAJID LASHGARI[3] AND HOSSEIN MOBLI[4]**

1. MSc. Student, Mechanics of Agricultural Machinery Department, Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2. Professor, Mechanics of Agricultural Machinery Department, Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3. Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Arak University, Arak, Iran
4. Professor, Mechanics of Agricultural Machinery Department, Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: Oct. 9, 2017- Revised: Dec. 20, 2017- Accepted: Jan. 23, 2018)

## ABSTRACT

In addition to harmful effects on the physical health of people, noise pollution can also create annoyance conditions for those who are exposed to it. Therefore, in addition to evaluating the sound quantity parameters, it is absolutely essential to examine the sound qualitative parameters in the work environment. In this research, the sound qualitative metrics of the HEPCO backhoe loader were evaluated. The acoustic annoyance model of the tested machine was determined using loudness, sharpness and fluctuation strength. The coefficient of determination of acoustic annoyance model and jury test was 0.93. Also, the acoustic annoyance model from this study was compared with two unbiased and psychoacoustic annoyance models. The results of this comparison showed that the proposed model changes in the gear ratios are not identical with the other two models. Therefore, by measuring the sound of the machine and extracting its quality metrics, it can calculate the acoustic annoyance inside the cabin.

**Keywords:** Unbiased Annoyance, Psychoacoustic, Jury Test, Gear Ratio.

* Corresponding author's e-mail: ab.khanmohammadi@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID



# مدلسازی آزردگی صوتی بکهو لودر بر اساس معیارهای کیفیت صدا

**عباس خانمحمدی[1*]، علی رجبی‌پور[2]، مجید لشگری[3] و حسین مبلی[2]**

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. استاد، گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. استادیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۴. استاد، گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۲۷/ ۷/ ۱۳۹۶- تاریخ بازنگری: ۲۹/ ۹/ ۱۳۹۶- تاریخ تصویب: ۳/ ۱۱/ ۱۳۹۶)

## چکیده

آلودگی صوتی علاوه بر اثرات سوء بر سلامت جسمی افراد به لحاظ کیفی نیز می‌تواند شرایط آزاردهنده‌ای برای افرادی که در معرض آن قرار دارند ایجاد نماید. بنابراین علاوه بر ارزیابی پارامترهای کمّی صدا، بررسی پارامترهای کیفی صدا در محیط‌های کاری نیز کاملاً ضروری است. در این تحقیق، معیارهای کیفی صدای یک دستگاه بکهو لودر شرکت هپکو مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از معیارهای بلندی، تیزی و قدرت نوسان، مدل آزردگی صوتی ماشین مورد آزمون تعیین شد. ضریب تشخیص مدل آزردگی صوتی و آزمون ژوری برابر ۰/۹۳ به دست آمد. همچنین مدل آزردگی صوتی حاصل از این تحقیق با دو مدل آزردگی بی‌طرفانه و روان-آکوستیک مقایسه شد. نتایج حاصل از این مقایسه نشان داد که روند تغییرات مدل پیشنهاد شده در نسبت‌های دنده مختلف با دو مدل دیگر متفاوت است. بنابراین می‌توان با اندازه‌گیری صدای ماشین و استخراج معیارهای کیفی آن، میزان آزردگی صوتی داخل کابین را محاسبه نمود.

**واژه‌های کلیدی:** آزردگی بی‌طرفانه، روان-آکوستیک، آزمون ژوری، نسبت دنده.

*ایمیل نویسنده مسئول: ab.khanmohammadi@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID


## مقدمه

به‌کارگیری تجهیزات و ماشین‌ها همواره با معضلاتی نیز همراه بوده است. شاید سروصدای ناشی از کارکرد دستگاه‌ها را بتوان به عنوان یکی از مهم‌ترین معضلاتی دانست که کاربران با آن روبرو هستند. به همین دلیل تحقیقات فراوانی طی سالیان متمادی به منظور کاهش اثرات سوء سروصدا بر کاربران و یا کسانی که به نحوی در معرض سروصدای آنها قرار دارند انجام گرفته است. در گذشته بیشتر تحقیقات معطوف به کاهش کمیت صدا همچون تراز فشار صدا بوده است. با توجه به این که پارامترهای کمّی صدا می‌تواند باعث افت شنوایی، اختلال در سیستم بینایی، بر هم زدن سیستم تعادلی بدن و ایجاد ناراحتی‌های عصبی و روانی شود و سلامتی کاربران را به مخاطره اندازد، انجام تحقیقات به منظور کاهش اثرات زیان‌بار کاملاً منطقی بوده است. این در حالی است که امروزه با توجه به پیشرفت‌های انجام گرفته در صنایع مختلف، تحقیقاتی با موضوع کاهش کمیت صدا کمتر به چشم می‌خورد.

مقوله جدیدی که طی سالیان اخیر بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته آزردگی صوتی (Acoustic Annoyance) است. در مبحث آزردگی صوتی به معیارهای کیفی صدا پرداخته می‌شود. موضوعی که ارتباطی به سلامت جسمی کاربران نداشته و بلکه آسایش و راحتی آنها را مورد توجه قرار می‌دهد (Fujii *et al.*, 2002). برای این منظور معیارهای کیفیت صدا (Sound Quality) همچون بلندی (Loudness)، تیزی (Sharpness)، زبری (Roughness)، قدرت نوسان (Fluctuation Strength) و تونالیتی (Tonality) مورد توجه قرار گرفتند (Fastl & Zwicker, 2007). در واقع این معیارها ویژگی‌های فیزیکی صدا را به احساس و درک برخاسته از آن مربوط می‌سازند (Allen, 2000). از آنجایی که مقوله کیفیت صدا با درک ذهنی و روانی افراد سروکار دارد از آن به روان-آکوستیک یا سایکوآکوستیک (Psychoacoustic) نیز تعبیر می‌شود.

امروزه کیفیت صدا از نظر مصرف‌کننده به عنوان معیاری برای ارزش‌گذاری محصول به شمار می‌آید (Cho & Karavadi, 1999). از این رو تولیدکنندگان نیز کیفیت صدا را در طراحی محصولات خود مدنظر قرار می‌دهند. به همین دلیل موضوع کیفیت صدا و راهکارهای ارتقای آن مورد توجه محققین قرار گرفته است که به تعدادی از تحقیقات مرتبط اشاره می‌شود.

در تحقیقی با استفاده از معیارهای کیفیت صدا همچون بلندی، تیزی، زبری و قدرت نوسان، شاخص آسایش صوتی برای یک خودروی سواری ارائه شد. شاخص معرفی شده همبستگی بالایی با نتایج آزمون ژوری (Jury Test) نشان داد (Nor *et al.*, 2008). در تحقیق دیگری که انجام گرفت شاخصی به منظور تخمین میزان آزردگی صوتی درون واگن‌های قطار مسافربری با استفاده از بلندی، تیزی و زبری صدا به‌دست آمد. شاخص مذکور با شاخص آزردگی روان-آکوستیک مورد مقایسه قرار گرفت که ضریب تشخیص آن برابر ۰/۳۹ به‌دست آمد. علیرغم پایین بودن ضریب تشخیص، همبستگی بالای مدل پیشنهادی و آزمون ژوری با ضریب تشخیص ۰/۹۶۵ گزارش شد (Park *et al.*, 2015). در تحقیقی دیگر یک تراکتور با استفاده از معیارهای کیفیت صدا و آزردگی روان-آکوستیک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحقیق مذکور بیانگر همبستگی بالای آزردگی روان-آکوستیک و تراز فشار صدا در تراکتور مورد آزمون بود (Lashgari & Maleki, 2016). در همین راستا مطالعاتی نیز در خصوص ماشین‌های راهسازی (Brambilla *et al.*, 2001; Pedrielli *et al.*, 2008; Carletti *et al.*, 2011)، کشتی (Seiler & Holbach, 2013; Han, 2012; Hong *et al.*, 2011)، هواپیما (Janssens *et al.*, 2008; Västfjäll *et al.*, 2003; Sahai & Stumpf, 2014) انجام گرفته است.

تمامی کاربران ماشین‌های غیرجاده‌ای از جمله ماشین‌های راهسازی با توجه به نوع فعالیت و شرایط کار در معرض سروصداهای فراوانی قرار دارند. لذا کمیت و کیفیت صدا در این گونه ماشین‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. این در حالی است که تحقیقات اندکی در خصوص مقوله کیفیت صدا در مورد ماشین‌های راهسازی انجام گرفته و در ایران نیز چنین تحقیقاتی در این زمینه انجام نشده است. لذا هدف از این تحقیق تدوین مدل آزردگی صوتی بکهو لودر با استفاده از معیارهای کیفیت صداست.

## مواد و روش‌ها

### تجهیزات مورد استفاده

در این مطالعه داده‌های صدای یک دستگاه بکهو لودر (Backhoe Loader) هپکو مدل M542 ضبط شدند (شکل ۱). ماشین انتخاب شده برای این تحقیق، در واقع یک تراکتور کشاورزی است که با نصب لودر در قسمت جلو و بیل در قسمت عقب آن به عنوان ماشین راهسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تمامی مراحل ضبط صدا، در و پنجره‌ها در وضعیت کاملاً بسته قرار داشته و سیستم تهویه و صوتی نیز خاموش بودند. آزمایش‌ها به صورت طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام

www.SID.ir

Archive of SID



شدند. عامل‌های مورد مطالعه شامل نسبت‌های مختلف دنده (درجا، دنده یک، دنده دو، دنده سه و دنده چهار) در دور موتور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه بودند. اندازه‌گیری صدای ماشین در موقعیت گوش کاربر انجام گرفت. برای این منظور، میکروفن با فاصله ۱۰۰ میلی‌متر نسبت به گوش راست کاربر قرار داده شد که در شکل (۱) نشان داده شده است.

**شکل ۱. بکهو لودر (راست) و میکروفن اندازه‌گیری در موقعیت گوش کاربر (چپ)**

به منظور اندازه‌گیری صدا، مسیری مستقیم برای حرکت دستگاه در نظر گرفته شد. پس از تنظیم دور موتور در ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، با توجه به تیمار مورد نظر دنده انتخاب شد. پیش از ورود به مسیر آزمون، دستگاه حرکت داده شده و با وضعیت جدید مسافتی طی شده تا شرایط جدید کاملاً پایدار شود. سپس در فاصله زمانی سپری شده جهت عبور ماشین در فاصله مذکور، سیگنال‌های صدای ساطع شده به مدت ۱۰ ثانیه اندازه‌گیری شدند.

در این تحقیق تجهیزاتی که جهت اندازه‌گیری صدا مورد استفاده قرار گرفتند عبارت بودند از: میکروفن مدل MP201، پیش تقویت کننده مدل MA231 و سامانه جمع‌آوری اطلاعات مدل MC3022 که تمامی آنها ساخت شرکت BSWA بودند. در این تحقیق میکروفن متراکم‌کننده از پیش قطبی شده با قطر ۰/۵ اینچ و حساسیت ۵۰ mV/Pa مورد استفاده قرار گرفت. سامانه جمع‌آوری اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق نسبت به تمامی بسامدهای صوتی دارای حساسیت یکسان بوده و دارای سرعت نمونه‌برداری ۴۴/۱ کیلوهرتز می‌باشد. با توجه به وجود مبدل آنالوگ به دیجیتال ۲۴ بیتی در این سامانه، میزان نویز ذاتی سامانه در حد پایین است. سیگنال‌های دریافت شده در حین آزمون، با استفاده از نرم‌افزار Scope V1.32 نصب شده بر روی رایانه قابل حمل، ذخیره شدند. پس از انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌های به دست آمده، به کمک نرم‌افزار SAS ویرایش ۹/۱ مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند.

**معیارهای کیفیت صدا**

از آنجا که برای بیان یا اندازه‌گیری مقادیر صدا از کمیت‌های فیزیکی یا لگاریتمی استفاده می‌شود، لیکن احساس شنونده نسبت به مقادیر در فرکانس‌های مختلف یکسان نبوده و به همین دلیل علاوه بر کمیت صدا، نحوه درک شنوایی آن نیز در فرکانس مربوطه اهمیت دارد. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که ترازهای یکسان در فرکانس‌های مختلف به یک اندازه درک نمی‌شوند. در این حالت یک مشخصه درک صوت بنام بلندی صدا تعریف می‌شود. اگر چه بلندی صدا وابسته به تراز صوت است اما با آن برابر نیست. تنها در فرکانس یک کیلوهرتز تراز فشار صدا با تراز بلندی صدا برابر است. بلندی صدایی با تراز فشار صوت ۴۰ دسی‌بل در فرکانس یک کیلوهرتز برابر یک سون (Sone) است.

تیزی صدا یک حس شنوایی مربوط به فرکانس بوده و احساس دردناکی حاصل از صداهای با فرکانس بالاست و در واقع میزان انرژی فرکانس بالا به کل انرژی است. الگوریتم تیزی صدا از روی سیگنال فشار صدا و در طیف یک سوم اکتاوباند در بازه ۲۵ هرتز تا ۱۲/۵ کیلوهرتز قابل محاسبه است. به طور کلی ترکیبات فرکانسی بالاتر در سیگنال منجر به افزایش تیزی صدا خواهد شد. تیزی صدایی با تراز فشار صوت ۶۰ دسی‌بل در فرکانس یک کیلوهرتز برابر یک آکوم (Acum) است.

زبری صدا حسی شنوایی است که مربوط به مدولاسیون صدا در فرکانس‌های بسیار بالا همانند فرکانس‌های مدولاسیون ۳۰۰-۱۵ هرتز است. زبری صدایی با تراز فشار صوت ۶۰ دسی‌بل در فرکانس یک کیلوهرتز و فرکانس مدولاسیون دامنه ۷۰ هرتز برابر یک آسپر (Asper) است.

قدرت نوسان صدا حسی شبیه به زبری صداست با این تفاوت که قدرت نوسان مربوط به مدولاسیون صدا در

www.SID.ir

Archive of SID


فرکانس‌های پایین یعنی فرکانس‌های مدولاسیون حداکثر ۲۰ هرتز است. قدرت نوسان صدایی با تراز فشار صوت ۶۰ دسی‌بل در فرکانس یک کیلوهرتز و فرکانس مدولاسیون دامنه ۴ هرتز برابر یک واسیل (Vacil) است.

روابط محاسباتی هر یک از چهار معیار کیفیت صدا در سایر تحقیقات ارائه شده است (Lashgari, 2017).

**مدل‌های آزردگی**

طی سالیان اخیر تحقیقات فراوانی در خصوص یافتن مدل آزردگی صوتی انجام شده است. در این تحقیقات با استفاده از آزمون ژوری و تحلیل رگرسیونی، مدل‌هایی نیز پیشنهاد شده‌اند. اما در سال ۱۹۹۰، مدلی جامع‌تر موسوم به آزردگی بی‌طرفانه (Unbiased Annoyance) معرفی شد (Zwicker & Fastl, 1990). این مدل تابعی از صدک دهم مقادیر بلندی، تیزی و قدرت نوسان صداست و رابطه (۱) بیانگر آن است:

(رابطه ۱)

$$UBA = d(N_{10})^{1.3}\left(1+0.25(S-1)log(N_{10}+10)+0.3\left(F\frac{1+N_{10}}{N_{10}+0.3}\right)\right)$$

که در آن، $N_{10}$ صدک دهم مقادیر بلندی صدا، S تیزی، F قدرت نوسان و d ضریب شب و روز است که مقدار آن را می‌توان از رابطه (۲) محاسبه نمود:

(رابطه ۲)

$$d=\begin{cases}1 & \text{6 am to 10 pm}\\ 1+\left(\frac{N_{10}}{5}\right)^{0.5} & \text{10 pm to 6 am}\end{cases}$$

در سال ۱۹۹۷ مدلی دیگر بنام آزردگی روان-آکوستیک (Psychoacoustic Annoyance) معرفی شد (Zwicker & Fastl, 1997). در مدل جدیدتر، از صدک پنجم مقادیر بلندی بجای صدک ۱۰ درصد استفاده شد و همچنین زبری صدا نیز مورد استفاده قرار گرفت که مقدار آن از رابطه (۳) بدست می‌آید:

(رابطه۳)

$$PA = N_5\left(1+\sqrt{\omega_S^2+\omega_{FR}^2}\right)$$

که در آن، $N_5$ صدک پنجم مقادیر بلندی صداست و $\omega_S$ (ضریب مربوط به تیزی) و $\omega_{FR}$ (ضریب مربوط به زبری و قدرت نوسان) نیز به ترتیب از روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند:

(رابطه ۴)

$$\omega_S=\begin{cases}(S-1.75)0.25\ log\ (N_5+10) & \text{for } S>1.75 \text{ acum}\\ \omega_S=0 & \text{for } S<1.75 \text{ acum}\end{cases}$$

$$\omega_{FR}=\frac{2.18}{(N_5)^{0.4}}(0.4F+0.6R)$$ (رابطه ۵)

که در آن، R زبری صداست.

**آزمون ژوری**

تعداد ۳۰ کاربر ماشین‌های راهسازی به عنوان گروه آزمون ژوری انتخاب شدند. محدوده سنی این افراد بین ۳۱ تا ۴۶ سال با میانگین سنی تقریبی ۳۹ سال بود. برای انجام آزمون ژوری از روش امتیازی (Rating Scales) استفاده شد. برای این منظور پرسشنامه استاندارد ۵ معیاره طراحی شد. در این پرسشنامه، عدد ۱ خوشآیند، عدد ۲ نیمه خوشآیند، عدد ۳ حد مرزی، عدد ۴ نیمه آزاردهنده و عدد ۵ آزاردهنده تعریف شد.

صداهای ضبط شده از طریق یک هدفون برای افراد مورد آزمون مجدداً پخش شد و امتیاز مورد نظر هر یک از افراد در پرسشنامه‌ای جداگانه انتخاب و ثبت شد. در انتها، میانگین ۳۰ پرسشنامه برای هر یک از صداهای ضبط شده محاسبه شد (Wang *et al.*, 2014). به منظور بررسی ارتباط بین نتایج ذهنی (Subjective) یعنی اطلاعات حاصل از آزمون ژوری و نتایج عینی (Objective) یعنی داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به معیارهای کیفیت صدا، آزمون رگرسیون چند متغیره انجام گرفت.

## نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس چهار معیار کیفیت صدای بکهو لودر در جدول (۱) گزارش شده است. همان گونه که در این جدول مشخص می‌باشد، میانگین‌های اثر متغیر نسبت دنده بر دو معیار بلندی و تیزی در سطح احتمال ۱٪ و بر دو معیار زبری و قدرت نوسان در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار شده است. به طور کلی با افزایش دنده‌ها، سرعت حرکت ماشین افزایش یافته و در نتیجه سروصدای ناشی از حرکت سریع‌تر لاستیک‌ها بر روی مسیر آزمون و هم چنین حرکات ارتعاشی قطعات و اجزاء مختلف بیشتر می‌شود. بنابراین تغییرات مقادیر معیارهای کیفیت صدا با تغییر نسبت دنده‌ها منطقی به نظر می‌رسد که با نتایج تحقیقات دیگر مطابقت دارد (Nor *et al.*, 2008). با توجه به این که تمامی مدل‌های آزردگی براساس این معیارها شکل می‌گیرند، لذا مواجهه با تغییرات میزان آزردگی در ماشین مذکور در اثر تغییر نسبت دنده دور از انتظار نخواهد بود.

www.SID.ir

Archive of SID



**جدول ۱. نتایج آنالیز واریانس پارامترهای کیفیت صدا**

| منبع تغییر | درجه آزادی | میانگین مربعات | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | بلندی (سون) | تیزی (آکوم) | زبری (آسپر) | قدرت نوسان (واسیل) |
| دنده | ۴ | ۰/۳۴۶۸۶** | ۰/۰۱۵۵۳** | ۰/۰۰۰۱۵* | ۰/۰۲۶۰۲* |
| خطا | ۱۰ | ۰/۰۳۳۵۱ | ۰/۰۰۱۳۳ | ۰/۰۰۰۰۳ | ۰/۰۰۶۲۷ |

**در جدول، علائم * و ** به ترتیب سطوح معنی‌دار ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهد.**

اثر تغییر دنده برای ماشین مورد آزمون در جدول (۲) نشان داده شده است. از جدول ۲ مشاهده می‌شود مقادیر بلندی صدا با تغییر از حالت درجا به طرف دنده‌های بالاتر افزایش یافته است. در خصوص سه معیار دیگر نیز روند صعودی مقادیر آنها قابل مشاهده است اگر چه در برخی از حالت‌ها تغییراتی خارج از این روند نیز به چشم می‌خورد.

همچنین در جدول (۲) نتایج حاصل از آزمون ژوری ارائه شده است. این مقادیر در واقع میانگین ۳۰ عدد متفاوت است که مورد نظر هر یک از نفرات گروه آزمون ژوری بوده است. همان گونه که مشاهده می‌شود با تغییر از حالت درجا به طرف دنده‌های بالاتر، میانگین آزمون ژوری نیز سیر صعودی داشته است.

**جدول ۲. میانگین معیارهای کیفیت صدا و آزمون ژوری در نسبت دنده مختلف**

| | درجا | دنده ۱ | دنده ۲ | دنده ۳ | دنده ۴ |
|---|---|---|---|---|---|
| بلندی (سون) | ۳/۲۵۳ | ۳/۶۸۸ | ۳/۷۰۴ | ۴/۲۲۲ | ۴/۳۸۶ |
| تیزی (آکوم) | ۱/۰۴۰ | ۱/۰۹۷ | ۱/۰۹۴ | ۱/۱۳۷ | ۱/۱۴۹ |
| زبری (آسپر) | ۰/۰۳۹ | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۱۶ | ۰/۰۱۹ | ۰/۰۲۷ |
| قدرت نوسان (واسیل) | ۰/۰۴۵ | ۰/۰۷۴ | ۰/۱۲۴ | ۰/۱۸۲ | ۰/۱۵۴ |
| میانگین آزمون ژوری | ۳/۶۳۳ | ۳/۱۳۳ | ۲/۷۳۳ | ۲/۶۶۶ | ۲/۶۳۳ |
| انحراف معیار آزمون ژوری | ۰/۹۶۴ | ۰/۸۹۹ | ۰/۶۹۱ | ۰/۸۸۴ | ۰/۸۰۸ |

با توجه به این که از آزمون رگرسیون چند متغیره برای دستیابی به مدل خطی آزردگی صوتی بهره گرفته شد، انتخاب مدلی ساده که از پارامترهای کمتری تشکیل شده باشد منطقی به نظر می‌رسد. بنابراین گام اول در مدلسازی، شناسایی پارامترهای با اهمیت و حذف پارامترهای کم‌اهمیت است. به همین منظور دو شرط اولیه در نظر گرفته شد که در سایر تحقیقات نیز بر همین اساس عمل شده است (Junoh *et al.*, 2011; Nor *et al.*, 2008): مقدار $R^2$ که نشان دهنده میزان همبستگی معیارها با میانگین آزمون ژوری است بیشتر از ۵۰٪ باشد و همچنین مقدار P که بیانگر معنی‌داری معیارهاست کمتر از ۰/۰۵ باشد. نتایج این مرحله در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به شروط بالا، سه معیار بلندی، تیزی و قدرت نوسان در مدلسازی آزردگی صوتی ماشین مورد آزمون مورد استفاده قرار گرفتند و معیار زبری به دلیل مقدار کم $R^2$ و مقدار زیاد P حذف شد.

بنابراین مدل آزردگی صوتی که قابلیت پیش‌بینی سطح آزردگی بکهو لودر را در نسبت‌های مختلف دنده داشته باشد مطابق معادله (۶) حاصل شد که در آن، L، S و F به ترتیب بلندی، تیزی و قدرت نوسان هستند:

(رابطه ۶)

مدل آزردگی صوتی =(1.4311)L-(17.5785)S-(5.5027)F+17.4823

**جدول ۳. نتایج تحلیل رگرسیون**

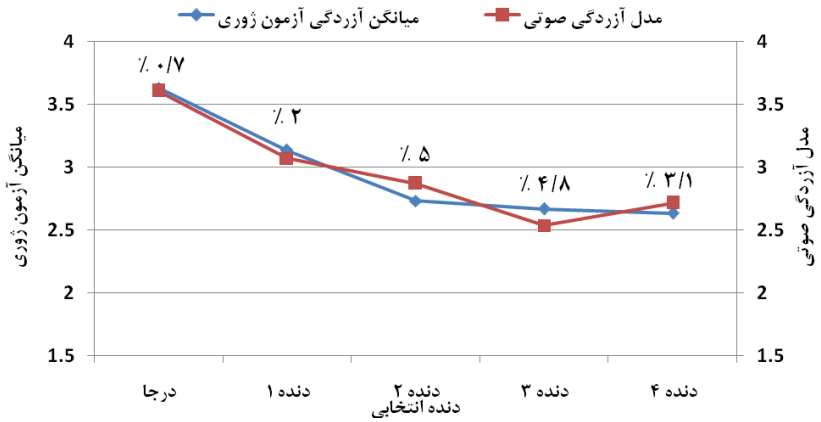
| معیار | $R^2$ | P |
|---|---|---|
| بلندی (سون) | ۰/۷۷ | ۰/۰۵ |
| تیزی (آکوم) | ۰/۸۲ | ۰/۰۳ |
| زبری (آسپر) | ۰/۱۷ | ۰/۴۹ |
| قدرت نوسان (واسیل) | ۰/۸۵ | ۰/۰۲ |

به منظور اطمینان از صحت رابطه (۶)، مقادیر حاصل از رابطه مذکور در دنده‌های مختلف در مقابل میانگین آزمون ژوری در یک شکل ترسیم شدند (شکل ۲). درصد تفاوت آنها نیز در شکل (۲) ارائه شده است. همان‌گونه‌که مشاهده می‌شود، اگرچه تفاوت‌های جزئی در مقادیر این دو نمودار به چشم می‌خورد اما هر دو نمودار دارای روند یکسانی هستند. نتایج

www.SID.ir

Archive of SID


رگرسیون نیز میزان همبستگی دو مدل را برابر ۰/۹۳ نشان داد. در سایر تحقیقات نیز همبستگی از ۰/۸۵ تا ۰/۹۷ برای خودرو سواری (Nor *et al.*, 2008) و از ۰/۸۷ تا ۰/۹۶ برای مینی لودر (Carletti *et al.*, 2009) گزارش شده است. با توجه به میزان همبستگی بالا می‌توان نتیجه گرفت که رابطه پیشنهادی با نتایج آزمون ژوری که برگرفته از نظرات کاربران خبره این ماشین است تطبیق خوبی دارد. لذا با ضبط صدا و محاسبه لحظه‌ای سه معیار بلندی، تیزی و قدرت نوسان، می‌توان میزان آزردگی صوتی بکهو لودر را با استفاده از رابطه (۶) تعیین نمود.




**شکل ۲. مقایسه نتایج مدل آزردگی صوتی و میانگین آزمون ژوری**

روابط آزردگی بی‌طرفانه و روان-آکوستیک که در بخش مواد و روش‌ها مورد اشاره قرار گرفتند در تعدادی از تحقیقات برای ارزیابی آزردگی برخی از تجهیزات مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Park *et al.*, 2012; Nielsen *et al.*, 2005). از این دو رابطه معمولاً برای مقایسه میزان آزردگی بین دستگاه‌های مختلف و یا تشخیص روند تغییرات در یک دستگاه استفاده می‌شود. بنابراین نتایج این دو رابطه ممکن است جواب‌های دقیقی برای یک دستگاه خاص نداشته باشند. برای مقایسه نتایج حاصل از رابطه به‌دست آمده در این تحقیق و دو رابطه آزردگی بی‌طرفانه و روان-آکوستیک، مقادیر آنها به صورت نمودار در شکل (۳) ارائه شده است. اگرچه تفاوت بین مقادیر دو رابطه آزردگی بی‌طرفانه و روان-آکوستیک در نسبت‌های مختلف دنده کاملاً محرز می‌باشد اما وجه مشترک آنها، سیر صعودی مقادیر در ازای افزایش نسبت دنده‌هاست.

همان گونه که شکل (۳) نشان می‌دهد روند کلی دو نمودار آزردگی بی‌طرفانه و روان-آکوستیک با مدل آزردگی صوتی متفاوت است. در ازای انتخاب دنده‌های سبک‌تر، نتایج مدل ارائه شده حاکی از کاهش آزردگی صوتی ماشین مورد آزمون است در حالی که دو مدل دیگر افزایش آزردگی را نشان می‌دهند. با توجه به این که مقوله آزردگی صوتی با دریافت ذهنی کاربران مرتبط است لذا استفاده از نظرات کاربران خبره که در بسیاری از تحقیقات نیز از آن بهره گرفته شده است ضروری به نظر می‌رسد (Nor *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2014; Garcia *et al.*, 2000). در واقع هدف اصلی از انجام آزمون ژوری، دستیابی به واکنش‌های واقعی کاربران به صدای محیطی است (Aladdin & Jalil, 2017). انتظار کاربران وسایل نقلیه گوناگون نسبت به صدای ایجاد شده توسط وسیله نقلیه مورد استفاده آنها متفاوت است. به عبارت دیگر تعریف کاربران از میزان آزردگی و یا آسایش صوتی وسایل گوناگون با یکدیگر فرق دارد (Aladdin & Jalil, 2017). حتی انتظارات کاربران به مرور زمان نیز تغییر می‌کند. به طور مثال انتظارات رانندگان دهه ۷۰ نسبت به دهه ۹۰ در خصوص کیفیت صدای خودروها تغییر محسوسی داشته است (Fish, 1998). بنابراین مدلی که بتواند گویای وضعیت کیفیت صدای ماشین‌ها و تجهیزات و به تعبیری دیگر بیانگر میزان آزردگی آنها باشد باید براساس ذائقه کاربران آن شکل گرفته باشد (Cerrato, 2009). به همین دلیل در سایر تحقیقات نیز همبستگی پایین آزردگی روان-آکوستیک و مدل منتج از آزمون ژوری گزارش شده است (Park *et al.*, 2015). از سوی دیگر نیز مدل‌هایی که براساس آزمون ژوری به‌دست می‌آیند در مقایسه با مدل‌های آزردگی بی‌طرفانه و روان-آکوستیک ساده‌تر هستند.

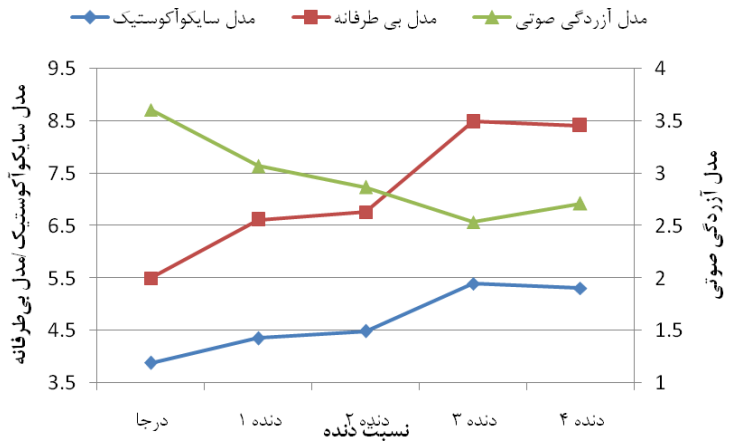
از سوی دیگر با نگاهی به شکل (۳) می‌توان دریافت که مقادیر آزردگی روان-آکوستیک بکهو لودر در محدوده ۳/۸-۵/۳ قرار دارد. نتایج سایر تحقیقات نیز نشان داده است که مقادیر

www.SID.ir

Archive of SID



آزردگی روان-آکوستیک ۲۵ مدل خودرو سواری که دارای انواع موتور بنزینی و دیزلی بودند در محدوده ۲-۰/۴ قرار دارد (Fastl & Zwicker, 2007). با توجه به این که پدیده ضربه در موتورهای دیزلی بیشتر حادث می‌شود، به‌طور کلی کیفیت صدا در موتورهای دیزلی نسبت به موتورهای بنزینی در وضعیت نامناسب‌تری قرار دارد (Sellerbeck *et al.*, 2007). بنابراین در مقایسه با نتایج تحقیقات مورد اشاره می‌توان دریافت که بکهو لودر به لحاظ آزردگی روان-آکوستیک در وضعیت نسبتاً مناسبی قرار دارد. اگرچه با ایجاد تغییرات در کابین آن می‌توان وضعیت آزردگی صوتی را بهبود بخشید. بنابراین در تحقیقات آتی با تعیین میزان هوا-برد (Air-Borne) و سازه-برد (Structure-Borne) در صدای منتشر شده از ماشین و ارائه راهکارهای مناسب جهت تقلیل هر یک از آنها می‌توان به این مهم دست یافت (Genuit, 2004).




**شکل ۳. مقایسه نتایج مدل آزردگی صوتی و مدل‌های بی‌طرفانه و روان-آکوستیک**

## نتیجه‌گیری کلی

یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که میانگین‌های اثر متغیر دنده انتخابی بر هر چهار معیار کیفیت صدا در سطوح احتمال مختلف معنی‌دار است. بررسی آزمون ژوری نشان می‌دهد که یک سیر نزولی در میانگین مقادیر آزمون در اثر تغییر از حالت درجا به طرف دنده‌های بالاتر وجود دارد. با استفاده از رگرسیون چند متغیره مشخص شد که سه معیار بلندی، تیزی و قدرت نوسان در مدل آزردگی صوتی بکهو لودر موثرند. در نهایت مدل پیشنهاد شده همبستگی بالایی با آزمون ژوری نشان داد. با توجه به این که کاهش آزردگی صوتی می‌تواند تاثیر به‌سزایی در افزایش کارآیی افراد داشته باشد، لذا پرداختن به مقوله کیفیت صدا در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود. با توجه به این‌که دو عامل بلندی و تیزی صدا سهم به‌سزایی در میزان آزردگی دستگاه مورد آزمایش دارند، ضروری است که در تحقیقات آتی مشخص شود که بلندی و تیزی صدا بیشتر از کدام مسیر (هوا یا سازه) منتشر می‌شوند. در صورتی که بخش اعظم آن به صورت هوا-برد باشد باید تغییراتی در جنس، ضخامت و شکل دیواره‌ها و شیشه‌های کابین انجام گیرد. اگر به صورت سازه-برد باشد با توجه به این که این دستگاه فاقد سیستم تعلیق است می‌توان با تغییر در سیستم تعلیق کابین آن به این مهم دست یافت.

## REFERENCES


Aladdin, M. F., & Jalil, N. A. A. (2017). Psychoacoustic bias in vehicle interior noise–preliminary study. *Procedia Engineering*, *170*, 217-225.

Allen, P. (2000). *Acoustics and psychoacoustics. Audiology Diagnosis* (1st ed.). New York: Thieme Medical Publisher Inc.

Brambilla, G., Carletti, E., & Pedrielli, F. (2001). Perspective of the sound quality approach applied to noise control in earth moving machines. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 6(2), 90-6.

Carletti, E., Pedrielli, F., & Casazza, C. (2009). Annoyance prediction model for assessing the acoustic comfort at the operator station of compact loaders. In: Proceedings of *16th International Congress on Sound and Vibration, Kraków, Poland.*

Carletti, E., Pedrielli, F., & Casazza, C. (2011). Development and validation of a numerical prediction model to estimate the annoyance condition at the operation station of compact loaders. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 17(3), 233-240.


www.SID.ir

Archive of SID


Cerrato, G. (2009). Automotive sound quality–powertrain, road and wind noise. *Sound & vibration*, 43(4), 16-24.

Cho, P., & Karavadi, A. (1999). Sound quality target development process for agricultural and construction machinery (No. 1999-01-2820). SAE Technical Paper.

Fastl, H., & Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics: facts and methods* (3rd ed.). Berlin: Springer-Verlag.

Fish, D. G. (1998). Application of the composite rating of preference to road and wind noise (No. 980393). SAE Technical Paper.

Fujii, K., Atagi, J., & Ando, Y. (2002). Temporal and spatial factors of traffic noise and its annoyance. *Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment*, 2(1), 33-41.

Garcia, J. J., Iturbe, J., & Planas, J. L. (2000). Exhaust Noise Design based on Psycho-acoustic Parameters. In FISITA World Automotive Congress.

Genuit, K. (2004). The sound quality of vehicle interior noise: a challenge for the NVH-engineers. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 1(1-2), 158-168.

Han, H. S. (2012). Psycho-acoustic evaluation of the indoor noise in cabins of a naval vessel using a back-propagation neural network algorithm. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4(4), 374-385.

Hong, H. S., Shim, S. R., & Han, H. S. (2011). Psycho-acoustic evaluation and analysis of the indoor noise in cabins of a naval vessel to specify its allowable limit. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 21(7), 650-656.

Janssens, K., Vecchio, A., & Van der Auweraer, H. (2008). Synthesis and sound quality evaluation of exterior and interior aircraft noise. *Aerospace Science and Technology*, 12(1), 114-124.

Junoh, A. K., Muhamad, W. Z. A. W., & Fouladi, M. (2011). A Study on the effects of tyre vibration to the noise in passenger car cabin. *Advanced Modeling and Optimization*, 13(3), 567-581.

Lashgari, M., & Maleki, A. (2016). Evaluation of lawn tractor noise using acoustic and psychoacoustic descriptors. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 9(1), 116-122.

Lashgari, M. (2017). Analysis of acoustic annoyance using sound quality metrics. *Sound and Vibration*, 5(10), 107-116. (In Farsi).

Nielsen, T., Nielsen, T. V., Johansen, P., Hasenkam, J. M., & Nygaard, H. (2005). Psychoacoustic quantification of mechanical heart valve noise. *The Journal of heart valve disease*, 14(1), 89-95.

Nor, M. J. M., Fouladi, M. H., Nahvi, H., & Ariffin, A. K. (2008). Index for vehicle acoustical comfort inside a passenger car. *Applied Acoustics*, 69(4), 343-353.

Park, S. G., Park, J. T., Seo, K. W., & Lee, G. B. (2012). Comparison of the Sound Quality Characteristics for the Outdoor Unit according to the Compressor Model. *International Compressor Engineering Conference*. Paper 2229.

Park, B., Jeon, J. Y., Choi, S., & Park, J. (2015). Short-term noise annoyance assessment in passenger compartments of high-speed trains under sudden variation. *Applied Acoustics*, 97, 46-53.

Pedrielli, F., Carletti, E., & Casazza, C. (2008). Just noticeable differences of loudness and sharpness for earth moving machines. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5), 3164-3164.

Sahai, A. K., & Stumpf, E. (2014). Incorporating and minimizing aircraft noise annoyance during conceptual aircraft design. In: Proceedings of *20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference-Part of AVIATION forum*.

Seiler, R. D., & Holbach, G. (2013). Acoustic quality on board ships. In: Proceedings of *Meetings on Acoustics ICA2013* (Vol. 19, No. 1, p. 040132). ASA.

Sellerbeck, P., Nettelbeck, C., Heinrichs, R., & Abels, T. (2007). Improving diesel sound quality on engine level and vehicle level-a holistic approach (No. 2007-01-2372). SAE Technical Paper.

Västfjäll, D., Kleiner, M., & Gärling, T. (2003). Affective reactions to interior aircraft sounds. *Acta Acustica united with Acustica*, 89(4), 693-701.

Wang, Y. S., Shen, G. Q., & Xing, Y. F. (2014). A sound quality model for objective synthesis evaluation of vehicle interior noise based on artificial neural network. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 45(1), 255-266.

Zwicker, E., & Fastl, H. (1990). *Psychoacoustics: facts and methods* (1st ed.). Berlin: Springer-Verlag.

Zwicker, E., & Fastl, H. (1997). *Psychoacoustics: facts and methods* (2nd ed.). Berlin: Springer-Verlag.

www.SID.ir