



Psychoacoustic Analysis of Noise Produced by Grain Combine Harvesters

Mahsa Forouzandeh Shahraki¹ | Ali Maleki² | Shahin Besharati³ | Majid Lashgari³

1. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Email: mahsa.forouzandeh.sh1997@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: maleki@sku.ac.ir

3. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Email: besharati248@gmail.com

4. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Arak University, Arak, Iran.

Email: m-lashgari@araku.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Dec. 22, 2025

Revised: June. 28, 2026

Accepted: July. 15, 2026

Published online: Autumn 2026

Keywords:

*Sound pressure level,
Psychoacoustics,
Loudness,
Roughness,
Combine harvester*

ABSTRACT

Noise pollution in agricultural machinery, particularly grain harvest combines, not only causes quantitative adverse effects but also leads to significant psychoacoustic impacts on operators. Although most previous studies have primarily focused on evaluating sound pressure levels, limited attention has been paid to qualitative psychoacoustic parameters such as loudness, sharpness, and roughness in combine harvesters. Therefore, the present study aimed to perform a psychoacoustic analysis of acoustic signals generated by two grain combine harvester models, namely John Deere and Sampo, under different operating conditions, while simultaneously evaluating both quantitative and qualitative sound characteristics. In this study, acoustic signals were recorded under various operational conditions including idle speed, high engine speed, free movement, and harvesting operation. The recorded signals were then analyzed using signal processing techniques to extract quantitative sound indices, including sound pressure level, as well as psychoacoustic parameters such as loudness, sharpness, and roughness. The results demonstrated that operating conditions, engine speed, and operational mode significantly affected the acoustic characteristics of the combines. The average loudness values of the Sampo and John Deere combines at idle and high engine speeds were 7.1 and 12.95 sone, and 8.6 and 17.57 sone, respectively. Furthermore, the average sound pressure levels for the Sampo and John Deere combines were measured as 54.1 and 59.6 dB, and 54.7 and 65.0 dB, respectively. The highest roughness values for both combines were observed during harvesting operations, whereas the lowest values occurred during free movement conditions. Overall, the John Deere combine exhibited higher sharpness and roughness values compared with the Sampo combine, indicating a greater potential for inducing auditory annoyance and operator discomfort. The findings of this study can be applied to the acoustic design, cabin optimization, and enhancement of ergonomic conditions in locally manufactured combine harvester cabins in comparison with imported models.

Cite this article: Forouzandeh Shahraki, M., Maleki, A., Besharati, Sh. & Lashgari, M., (2026). Analysis of Psychoacoustic Parameters of Grain Harvester Sound Signals., *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 57 (3), 111-130. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.406784.665628>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.406784.665628>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction and Objectives

Noise pollution in agricultural machinery, particularly grain harvest combines, not only causes quantitative adverse effects but also leads to significant psychoacoustic impacts on operators. Although most previous studies have primarily focused on evaluating sound pressure levels, limited attention has been paid to qualitative psychoacoustic parameters such as loudness, sharpness, and roughness in combine harvesters. Therefore, the present study aimed to perform a psychoacoustic analysis of acoustic signals generated by two grain combine harvester models, namely John Deere and Sampo, under different operating conditions, while simultaneously evaluating both quantitative and qualitative sound characteristics. In this study, acoustic signals were recorded under various operational conditions including idle speed, high engine speed, free movement, and harvesting operation. The recorded signals were then analyzed using signal processing techniques to extract quantitative sound indices, including sound pressure level, as well as psychoacoustic parameters such as loudness, sharpness, and roughness. The results demonstrated that operating conditions, engine speed, and operational mode significantly affected the acoustic characteristics of the combines. The average loudness values of the Sampo and John Deere combines at idle and high engine speeds were 7.1 and 12.95 sone, and 8.6 and 17.57 sone, respectively. Furthermore, the average sound pressure levels for the Sampo and John Deere combines were measured as 54.1 and 59.6 dB, and 54.7 and 65.0 dB, respectively. The highest roughness values for both combines were observed during harvesting operations, whereas the lowest values occurred during free movement conditions. Overall, the John Deere combine exhibited higher sharpness and roughness values compared with the Sampo combine, indicating a greater potential for inducing auditory annoyance and operator discomfort. The findings of this study can be applied to the acoustic design, cabin optimization, and enhancement of ergonomic conditions in locally manufactured combine harvester cabins in comparison with imported models.

Materials and Methods

Field measurements were conducted on a John Deere 1055 and a Sampo 3065 combine harvester during actual harvesting and road travel (free movement). Sound signals were recorded using calibrated Brüel & Kjær type-1 microphones positioned at multiple locations: inside the cabin, at the operator's ear (with and without cabin), and at bystander distances of 7.5 m and 20 m. Engine speed (idle/low vs. full/high), gear position (parking, 1–3, and road gears), and operational mode (harvesting vs. free movement) were systematically varied.

Raw signals were pre-processed to remove environmental noise, A-weighted, and filtered. Quantitative SPL (dB(A)) and psychoacoustic parameters were then extracted in MATLAB using standardized Zwicker models (ISO 532-1). Loudness was calculated according to the time-varying loudness model, sharpness via the weighted spectral centroid method, and roughness through modulation analysis in critical bands. Statistical analysis was performed with ANOVA to assess main effects and interactions, followed by Tukey post-hoc tests at 95 % confidence level.

Results

All four operational factors showed highly significant effects ($p < 0.01$) on every measured parameter. Engine speed, operational mode, and microphone position affected SPL, loudness, sharpness, and roughness; gear ratio significantly influenced SPL and sharpness. Mean SPL ranged from 54.1–59.7 dB(A) for the Sampo and 54.8–65.0 dB(A) for the John Deere. Loudness was substantially higher in the John Deere (8.6–17.6 sone) than in the Sampo (7.1–13.0 sone). Sharpness followed the same trend (John Deere 1.08–1.18 acum; Sampo 1.05–1.09 acum), as did roughness (John Deere 0.07–0.09 asper; Sampo 0.06–0.07 asper).

Harvesting produced the highest values across all metrics due to simultaneous engagement of cutter bar, threshing drum, straw walkers, and unloading systems. High engine speed increased mechanical energy and high-frequency content, elevating loudness, sharpness, and roughness. Cabin presence reduced SPL by 5–12 dB, loudness by 4–8 sone, sharpness by up to 0.15 acum, and roughness by 0.02–0.03 asper, demonstrating effective attenuation of high- and mid-frequency components. Increasing distance from the source caused the expected exponential decay in all parameters. Interaction effects were particularly pronounced: harvesting at high speed without cabin yielded peak annoyance values, while idle/low speed inside a properly equipped cabin produced the lowest. Across almost all conditions, the John Deere exhibited significantly higher SPL (+5–8 dB), loudness (+1.5–4.6 sone), sharpness (+0.03–0.09 acum), and roughness (+0.01–0.02 asper) than the Sampo, indicating less effective noise control and poorer cabin acoustic treatment.

Conclusion

Although both machines operate below the 85 dB(A) threshold for hearing damage risk, the John Deere's

consistently poorer psychoacoustic profile suggests greater potential for long-term annoyance, fatigue, and reduced operator performance. Cabin insulation proved to be the single most effective measure for improving perceived sound quality, followed by operational mode and engine speed management. Gear ratio effects were complex and sometimes nonlinear, highlighting the need for integrated powertrain–acoustic optimization.

These findings demonstrate that compliance with SPL standards alone is insufficient for genuine auditory comfort. Modern combine design must incorporate psychoacoustic targets — particularly reduction of high-frequency and modulated noise sources — to minimize subjective annoyance. The results provide manufacturers with concrete, quantitative evidence for prioritizing cabin sealing, strategic placement of sound-absorbing materials, and active or passive control of dominant noise sources, ultimately contributing to enhanced operator health, sustained productivity, and reduced occupational risk in mechanized agriculture.

Funding

This study was carried out with the financial and moral support of the Vice Chancellor for Research of Shahrekord University.

Authorship contribution

The authors' contributions to this study are as follows:

First Author (Graduate Student): Sample preparation and processing; conducting experiments and data collection; performing calculations and statistical analyses; data analysis and interpretation; and preparation of the original manuscript draft.

Second Author (Thesis Supervisor): Conceptualization and study design; supervision of all research stages; validation and review of results; and manuscript review, revision, and finalization.

Third Author (Thesis Advisor): Contribution to study design; research supervision; and manuscript review and revision.

Fourth Author (Thesis Advisor): Contribution to study design; research supervision; and manuscript review and revision.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this manuscript, the authors used artificial intelligence solely to improve the language and edit the text. After using this tool, the authors carefully reviewed and revised the manuscript and take full responsibility for its content. No artificial intelligence technologies were used in the writing, interpretation, or development of the scientific content of this manuscript.

Data availability statement

All data and information supporting the findings of this study are included in this article.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to Shahrekord University for its financial and moral support in conducting this research. They also extend their sincere appreciation to the anonymous reviewers for their valuable constructive and scientific comments, which greatly contributed to improving the quality of this manuscript.

Ethical considerations

This study received ethical approval from the Ethics Committee of Shahrekord University under the ethics code IR.SKU.REC.1401.030. The authors adhered to the ethical principles governing the conduct and publication of scientific research, and all authors confirm their compliance with these ethical standards.

Conflict of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper

تحلیل عامل‌های روان آکوستیک سیگنال‌های صوتی کمباین برداشت غلات

مهسا فروزنده شهرکی^۱ | علی ملکی^۲ | شاهین بشارتی^۳ | مجید لشگری^۴

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

رایانامه: mahsa.forouzandeh.sh1997@gmail.com۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، رایانامه: maleki@sku.ac.ir۳. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، رایانامه: besharati248@gmail.com۴. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه m-lashgari@araku.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۴/۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۲۴

تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

تراز فشار صوت،

روان کوستیک،

بلندی،

زبری،

کمباین.

آلودگی صوتی در ماشین‌های کشاورزی، به‌ویژه کمباین‌های برداشت غلات، علاوه بر اثرات کمی، دارای پیامدهای روان‌آکوستیکی قابل توجهی بر رانندگان است. اگرچه اغلب مطالعات پیشین بر ارزیابی شاخص کمی صدا مانند تراز فشار صوت تمرکز داشته‌اند، بررسی شاخص‌های کیفی صدا نظیر بلندی، تیزی و زبری در کمباین‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، تحلیل روان‌آکوستیکی سیگنال‌های صوتی دو مدل کمباین برداشت غلات شامل جاندیر و سمپو در شرایط کاری مختلف و ارزیابی هم‌زمان شاخص‌های کمی و کیفی صدا است. در این مطالعه، سیگنال‌های صوتی در شرایط مختلف عملکردی شامل دور آرام، دور تند، حرکت آزاد و عملیات برداشت ثبت و با استفاده از تکنیک‌های پردازش سیگنال تحلیل شدند. سپس شاخص‌های کمی شامل تراز فشار صوت و شاخص‌های روان‌آکوستیکی شامل بلندی، تیزی و زبری استخراج و مقایسه گردیدند. نتایج نشان داد شرایط کاری، دور موتور و نوع عملیات تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های صوتی کمباین‌ها دارند. میانگین بلندی صدا در کمباین سمپو و جاندیر در دور آرام و تند به ترتیب برابر ۷/۱ و ۱۲/۹۵ سون، و ۸/۶ و ۱۷/۵۷ سون بود. همچنین میانگین تراز فشار صوت در کمباین سمپو و جاندیر به ترتیب ۵۴/۱ و ۵۹/۶ دسی‌بل، و ۵۴/۷ و ۶۵/۰ دسی‌بل اندازه‌گیری شد. بیشترین مقدار زبری در هر دو کمباین در شرایط برداشت و کمترین مقدار آن در حالت حرکت آزاد مشاهده شد. به‌طور کلی، کمباین جاندیر مقادیر بالاتری از شاخص‌های زبری و تیزی را نسبت به کمباین سمپو نشان داد که می‌تواند بیانگر پتانسیل بیشتر ایجاد آلودگی صوتی در راننده باشد. نتایج این پژوهش می‌تواند در طراحی آکوستیکی، بهینه‌سازی و ارتقای شرایط ارگونومیکی کابین کمباین‌های ساخت داخل در مقابل کمباین‌های وارداتی مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: استناد: فروزنده شهرکی، مهسا، ملکی، علی، بشارتی، شاهین، و لشگری، مجید. (۱۴۰۵). تحلیل عامل‌های روان آکوستیک سیگنال‌های صوتی کمباین برداشت

غلات، مجله مهندسی بیوسیستم ایران/ ایران، ۵۷ (۳)، ۱۱۱-۱۳۰. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.406784.665628>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.406784.665628>

مقدمه

با افزایش روزافزون استفاده از کمباین‌ها برای سرعت بخشیدن به برداشت محصولات، نگرانی‌ها در مورد سلامت کاربران نیز افزایش یافته است. سروصدا و ارتعاشات این دستگاه‌ها خطرات جبران‌ناپذیری به همراه دارد که شایع‌ترین آن، افت شنوایی ناشی از صدا به عنوان یک بیماری شغلی شناخته شده است (Barać et al., 2024). از آنجایی که تراز صوتی بالاتر از ۸۵ دسی‌بل به شنوایی آسیب می‌رساند و مدت زمان قرارگیری در معرض صدا این آسیب را تشدید می‌کند، بی‌توجهی به این موضوع می‌تواند منجر به افت شنوایی دائمی شود (Cecchini, M., 2024). برای حفظ سلامت و افزایش کارایی اپراتورها، طراحی محیط کار و تجهیزات باید منطبق بر اصول ارگونومی و آسایش شنیداری باشد (Mehrabi Matin et al., 2022).

صدا را می‌توان با کمیت‌های آکوستیکی مانند طیف بسامد و سطح فشار صدا توصیف کرد. تراز فشار صوت یکی از متداول‌ترین شاخص‌ها برای اندازه‌گیری میزان صدا در ماشین‌ها است. این شاخص نسبت فشار صوت اندازه‌گیری شده به یک فشار مرجع را بیان کرده و بر حسب دسی‌بل (dB) گزارش می‌شود. تراز فشار صوت معمولاً در محدوده ۰ تا ۱۴۰ دسی‌بل قرار دارد. بر اساس استانداردهای بهداشت شغلی، صداهای با تراز کمتر از ۸۵ دسی‌بل عموماً ایمن تلقی می‌شوند، در حالی که مواجهه طولانی مدت با صداهای بالاتر از ۸۵ دسی‌بل می‌تواند موجب آسیب‌های شنوایی شود (World Health Organization [WHO], 2021; OSHA, 2023). با وجود اهمیت تراز فشار صوت در ارزیابی آلودگی صوتی، آسایش و راحتی صوتی از دیگر موضوعات مهم در حوزه آکوستیک ماشین‌های کشاورزی محسوب می‌شود که صرفاً با اندازه‌گیری شاخص‌های کمی قابل توصیف نیست. در ارزیابی آسایش صوتی، شاخص‌هایی نظیر سطح فشار صوت به‌تنهایی قادر به بیان کامل احساسات، ادراک و پاسخ شنیداری انسان نیستند. به همین دلیل، در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران به بررسی شاخص‌های روان آکوستیکی و ویژگی‌های کیفی صدا به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر تأثیرات صوت بر کاربران ماشین‌های کشاورزی افزایش یافته است.

آزردگی صوتی موضوعی بسیار تازه و مهم است که به‌تازگی توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. آزردگی صوتی و تجربه احساساتی مانند ناراحتی، خستگی، کاهش توانایی حرفه‌ای، اختلال در خواب، استرس، وزوز گوش، و همچنین کاهش یا عدم تمرکز، می‌توانند موجب بروز خطاهای انسانی و حوادث شغلی شوند. این موضوع اهمیت میزان تراز فشار صدا را از منظر بهداشت، سلامت و ایمنی محیط کار نشان می‌دهد. سروصدا یا نویز برای افرادی که در معرض آن قرار دارند، منجر به آزردگی صوتی می‌شود که بر سلامت و آسایش افراد تأثیر منفی داشته و ارتباطی با سلامت جسمی آن‌ها ندارد و از بارزترین پاسخ‌های ذهنی قابل‌اندازه‌گیری به شمار می‌آید (Alimohammadi et al., 2025; Jafari et al., 2019).

آزردگی صوتی به بررسی و مطالعه‌ی معیارهای کیفی صدا می‌پردازد. شاخص‌های کمی صوت، مانند تراز فشار صدا، نمی‌توانند معیار مناسبی برای بیان راحتی و آسایش کاربرانی که در معرض صدا قرار دارند، به‌حساب آیند. این درحالی است که ممکن است صدای تولیدشده دارای تراز فشار پایین و در محدوده‌ی استاندارد باشد و از نظر ایمنی تهدیدی برای شنوایی فرد ایجاد نکند، اما از نظر کیفی، شرایطی آزاردهنده و مخاطره‌آمیز را رقم بزند. بیشتر تحقیقات انجام‌شده در حوزه آکوستیک، بر کاهش شاخص‌های کمی صوت، مانند تراز فشار صدا، متمرکز بوده‌اند. به همین علت، لازم است معیارهای کیفی صدا که از عوامل مؤثر در ایجاد آزردگی صوتی هستند، بیشتر مورد توجه قرار گیرند. کیفیت صدا با ادراک ذهنی و روانی افراد مرتبط است که به آن "روان آکوستیک" نیز گفته می‌شود. از مهم‌ترین و بارزترین معیارهای کیفیت صدا می‌توان به بلندی، تیزی، زبری،^۲ تونالیت^۴ و قدرت نوسان^۵ اشاره کرد (Zwicker & Fastl, 2007; Fastl & Florentine, 2011; Di et al., 2023).

با گسترش استفاده از ماشین‌های کشاورزی، به‌ویژه کمباین‌های برداشت غلات، ارتباط افرادی که با این ماشین‌ها سروکار دارند روزبه‌روز بیشتر شده است که به معنای مواجهه طولانی مدت آن‌ها با صدا است. افزایش آسایش و راحتی صوتی در محیط کار می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد، کاهش خستگی ذهنی و ارتقای شرایط ارگونومیکی کاربران داشته باشد؛ از این رو، بررسی هم‌زمان شاخص‌های

1. Loudness
2. Sharpness
3. Roughness
4. Tonality
5. Fluctuation Strength

کمی و کیفی صدا در ماشین‌های کشاورزی ضروری به نظر می‌رسد. با وجود انجام مطالعات متعدد در زمینه ارزیابی تراز فشار صوت، بیشتر پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر شاخص‌های کمی صدا تمرکز داشته‌اند، درحالی‌که شاخص‌های روان‌آکوستیکی نظیر بلندی، تیزی و زبری که نقش مهمی در ادراک صوت و ایجاد آزردهی صوتی دارند، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، اطلاعات محدودی درباره تأثیر شرایط مختلف عملیاتی کمباین‌ها بر ویژگی‌های روان‌آکوستیکی صدای تولیدی وجود دارد.

همچنین، اگرچه مطالعات متعددی به ارزیابی نویز و ارتعاشات در ماشین‌های کشاورزی پرداخته‌اند، اما پژوهش‌های محدودی به مقایسه عملکرد آکوستیکی کابین‌های تولید داخل و نمونه‌های وارداتی اختصاص یافته‌اند. با توجه به توسعه ساخت و بومی‌سازی کابین کمباین‌ها در کشور، ارزیابی سطح کیفی این کابین‌ها از منظر شاخص‌های آکوستیکی و روان‌آکوستیکی اهمیت ویژه‌ای دارد. در این راستا، مقایسه عملکرد کابین ساخت داخل با نمونه‌های وارداتی می‌تواند معیار مناسبی برای سنجش کیفیت طراحی، ساخت و میزان تأمین آسایش اپراتور فراهم آورد. کمباین سمپو مورد استفاده در این پژوهش دارای کابین وارداتی و طراحی‌شده در خارج از کشور است، در حالی که کابین کمباین جان‌دیر مورد مطالعه در داخل کشور طراحی و ساخته شده است. از این‌رو، مقایسه این دو کمباین فرصت مناسبی را برای ارزیابی عملکرد آکوستیکی کابین تولید داخل در برابر یک نمونه خارجی فراهم می‌سازد.

بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش مقایسه شاخص‌های کمی و روان‌آکوستیکی صدا در کابین دو کمباین برداشت غلات شامل کمباین سمپو (وارداتی) و کمباین جان‌دیر (دارای کابین ساخت داخل) در شرایط کاری مختلف است. در این مطالعه، علاوه بر شاخص‌های متداول صوتی، پارامترهای روان‌آکوستیکی نظیر بلندی، تیزی و زبری نیز مورد بررسی قرار گرفتند تا ضمن شناسایی تفاوت‌های احتمالی میان دو کابین (ساخت داخل و وارداتی)، میزان تأثیر این تفاوت‌ها بر آسایش صوتی و شرایط کاری اپراتور ارزیابی شود. بنابراین، با توجه به خلأ پژوهشی موجود در حوزه روان‌آکوستیک ماشین‌های کشاورزی، پژوهش حاضر با هدف تحلیل و ارزیابی شاخص‌های روان‌آکوستیکی صدای منتشرشده از دو مدل کمباین برداشت غلات (جان‌دیر و سمپو) در شرایط مختلف عملیاتی انجام شد. در این پژوهش، علاوه بر ارزیابی تراز فشار صوت، شاخص‌های کیفی صدا با استفاده از تکنیک‌های پردازش سیگنال استخراج و تحلیل شدند تا تأثیر شرایط کاری بر کیفیت ادراکی صدا و میزان آزردهی صوتی اپراتورها مورد بررسی قرار گیرد.

پیشینه پژوهش

پیش‌بینی تراز سطح فشار صوت در کنار اپراتور داخل کابین تراکتور کشاورزی تحت شرایط مختلف عملیاتی توسط Di Fulvio et al., (2024) بررسی گردید. اندازه‌گیری‌های صوتی بر اساس استانداردهای ISO انجام شد و تأثیر پارامترهایی نظیر سرعت حرکت تراکتور، نوع سطح حرکت و فشار باد تایرها بر میزان نویز مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور پیش‌بینی تراز صوت، از روش‌های یادگیری ماشین شامل رگرسیون خطی چندگانه، ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی چندلایه استفاده شد. نتایج نشان داد که روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، به‌ویژه شبکه عصبی چندلایه و ماشین بردار پشتیبان، دقت بالایی در پیش‌بینی تراز نویز دارند و تغییر شرایط کاری و نوع سطح حرکت تأثیر معنی‌داری بر میزان نویز دریافتی اپراتور دارد.

میزان مواجهه شغلی رانندگان و اطرافیان دروگر چهارچرخ مدل BCS622 با آلودگی صوتی انتشاریافته از آن در دنده‌ها و دورهای مختلف موتور توسط حسین‌پور و همکاران (۱۳۹۴) بررسی گردید. آزمایش‌ها در دو حالت با حرکت تیغه و بدون حرکت تیغه برش، سه دور مختلف موتور و چهار حالت نسبت دنده انجام شد. نتایج نشان داد که در دور موتور ۳۰۰۰ دور بر دقیقه، رانندگان در معرض آلودگی صوتی بیش از حد مجاز استاندارد قرار دارند. افزایش میزان مواجهه راننده و اطرافیان با آلودگی صوتی، افزایش دور موتور، حرکت تیغه برش و تغییر نسبت دنده در سطح احتمال ۱٪ تأثیر معنی‌داری داشتند.

ارزیابی میزان مواجهه کاربران یک روتوتیلر با ارتعاش و صدای حاصل از عملکرد آن توسط طباطبایی و همکاران (۱۳۹۷) انجام شد. در این پژوهش ارتعاش دست و بازو و تراز فشار صوت دستگاه، در سه وضعیت کاری درجا، حرکت در مسیرهای بین مزارع، و عملیات شخم‌زنی زمین در دنده‌های مختلف اندازه‌گیری و تحلیل شد. نتایج حاصل نشان داد که مواجهه بیش از حد استاندارد ارتعاش دست و بازو، منجر به خستگی، ناراحتی و اختلالات عضلانی ناشی از آن می‌شود. همچنین در بررسی تراز صدای ثبت‌شده در محل گوش راننده و اطرافیان، بیشترین مواجهه با تراز صوت مربوط به وضعیت شخم‌زنی و کمترین آن در حالت درجا بود و انجام مطالعات بیشتر برای کاهش ارتعاش و صدای موتور تیلر (به‌عنوان منبع اصلی ایجاد آلودگی صوتی و لرزش) و نیز اقدامات مدیریتی در کاهش مواجهه و استفاده از تجهیزات حفاظت فردی داری اهمیت خواهد بود.

ارزیابی میزان مواجهه کارگران با سروصدای محیط کار در یک کارخانه صنعتی توسط Ricketts. (2020) انجام شد. در این

پژوهش، تراز فشار صوت محیط کار در نقاط مختلف و در طول یک شیفت کاری با استفاده از دستگاه‌های سنجش SPL اندازه‌گیری و تحلیل شد. نتایج نشان داد که مواجهه کارگران با تراز صدای بالاتر از حدود مجاز (۸۵ دسی‌بل) می‌تواند منجر به اختلالات شنوایی، خستگی و کاهش عملکرد کاری شود. همچنین بررسی داده‌ها نشان داد که نقاط نزدیک به منابع تولید صدا، مانند ماشین‌آلات سنگین، بیشترین سطح مواجهه صوتی را داشته‌اند و کمترین مواجهه مربوط به فضاهای اداری یا فاصله‌های بیشتر از ماشین‌آلات بود. پژوهشگر تأکید کرد که استفاده از اقدامات مدیریتی، تجهیزات حفاظت فردی، و طراحی سیستم‌های کنترل صوتی برای کاهش مواجهه کارگران با سروصدا ضرورت دارد.

لشگری و همکاران (۱۴۰۰) به همبستگی سیگنال‌های مغزی و سیگنال‌های صدای تراکتور مبتنی بر تحلیل فرکتال در یک تراکتور باغی پرداختند. در این پژوهش نوار مغزی ۱۶ داوطلب در مواجهه صدای تراکتور در چهار دور مختلف موتور ثبت شد. از دو روش هیگوچی و کاتز برای محاسبه بُعد فرکتال سیگنال‌های صدا و همچنین سیگنال‌های مغزی کمک گرفته شد. نتایج بیانگر افزایش مقادیر بُعد فرکتال صدا در دو روش هیگوچی و کاتز، با افزایش دور موتور بود. همچنین شاهد افزایش بُعد فرکتال سیگنال‌های مغزی در اثر افزایش دور موتور بودند. این بررسی نشان داد که واکنش افراد زمانی که در مواجهه با صدا قرار دارند، به کمک بُعد فرکتال قابل پیش‌بینی است.

Chen et al., (2022) به بررسی مدل و پیش‌بینی کیفیت صدای تراکتور بر اساس الگوریتم ژنتیک پرداختند. آنان از روش درجه‌بندی برای ارزیابی کیفیت صدا در حالت‌های عملیاتی و موقعیت‌های مختلف تراکتور استفاده نمود. همچنین عامل‌های مهم صدا شامل سطح فشار صوت، بلندی، وضوح، زبری و قدرت نوسان در این تحقیق محاسبه گردید و با در نظر گرفتن عامل‌های عینی کیفیت صدا به‌عنوان ورودی و مقادیر ارزیابی کیفیت صدا به‌عنوان خروجی، مدل شبکه عصبی انتشار برگشتی و مدل رگرسیون برداری ایجاد شدند. نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک می‌تواند دقت پیش‌بینی مدل را بهبود بخشد و در مقایسه با نتایج پیش‌بینی سایر مدل‌ها، این مدل کیفیت صدای نواز تراکتور را با دقت بالاتری پیش‌بینی کرد.

Shen et al., (2024) مکانیزم شناسایی سیگنال‌های آکوستیکی مرتبط با افت برداشت در کمابین‌ها و روش‌های کاهش نویز را بررسی نمودند. آنان ویژگی‌های بسامدی و زمانی سیگنال‌های صوتی تحلیل شده و روش‌های پیشرفته کاهش نویز، از جمله فیلترهای تطبیقی و تکنیک‌های پردازش سیگنال، برای افزایش دقت شناسایی بررسی نمودند. یافته‌های آنان نشان داد که استفاده از این روش‌ها باعث تفکیک بهتر سیگنال‌های مربوط به دانه و ساقه شده و دقت ارزیابی افت برداشت را بهبود می‌بخشد و می‌تواند به توسعه سیستم‌های هوشمندتر و دقیق‌تر برای کنترل کیفیت برداشت در کمابین‌ها کمک کند.

در بررسی تأثیر ویژگی‌های روان آکوستیکی صداها تولیدشده در کابین خودروهای خارج جاده‌ای بر سطح آسایش و آزرده‌گی صوتی سرنشینان توسط Fornaris, (2024) مشخص شد که عوامل روان آکوستیکی، مانند تیزی و زبری صدا، نسبت به معیارهای کمی معمول مانند سطح فشار صوت، ارتباط قوی‌تری با احساس ناراحتی و کاهش آسایش کاربران دارند. همچنین، افزایش مقادیر این شاخص‌ها موجب افزایش استرس و تجربه ناخوشایند صوتی در سرنشینان می‌شود.

روش‌شناسی پژوهش

در این مطالعه، سیگنال‌های صوتی دو کمابین برداشت غلات شامل کمابین سمپو مدل ۳۰۶۵ و کمابین جاندیر مدل ۱۰۵۵ در شرایط مختلف عملیاتی ثبت و مورد بررسی قرار گرفتند. به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های آکوستیکی و روان آکوستیکی صداها تولیدشده، داده‌های صوتی در شرایط مختلف شامل دورهای موتور، وضعیت‌های دنده و عملیات برداشت و حرکت آزاد جمع‌آوری شدند. عامل‌های مورد بررسی و تأثیرگذار در این پژوهش شامل دور موتور، نسبت دنده، وضعیت عملیات و فاصله میکروفن بودند که سطوح مختلف متغیرهای اندازه‌گیری‌شده در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. سطوح مختلف متغیرهای اندازه‌گیری شده

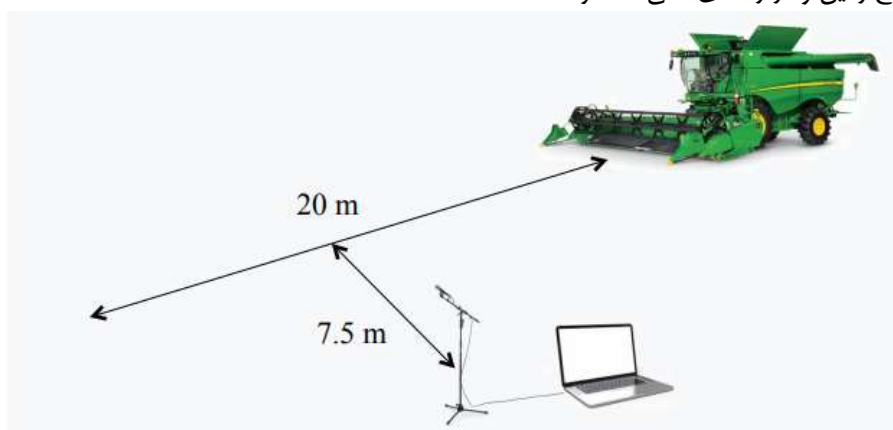
سطوح متغیرها				متغیرها	
۴ سبک	۳ سبک	۲ سنگین	۱ سنگین	دور موتور	۱۲۵۰ دور بر دقیقه
				نسبت دنده	پارک
اطرافیان ۲۰ متر	اطرافیان ۷/۵ متر	گوش کاربر در کمابین کابین دار	هنگام برداشت	وضعیت عملیات	حرکت آزاد
				موقعیت میکروفن	گوش کاربر در کمابین فاقد کابین

به منظور ثبت سیگنال‌های صوتی، از تجهیزات اندازه‌گیری صدا شرکت BSWA استفاده شد. این تجهیزات به دلیل برخورداری از نرخ نمونه‌برداری بالا، دامنه دینامیکی مناسب و قابلیت ثبت دقیق سیگنال‌های صوتی، امکان اندازه‌گیری قابل اعتماد داده‌های آکوستیکی را فراهم می‌کند. مشخصات فنی تجهیزات مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. تجهیزات مورد استفاده در این پژوهش

تجهیزات	سازنده	مدل	دامنه	دقت
میکروفن	BSWA	MP201	16-146 dB	50 mV/Pa
تقویت کننده	BSWA	MAP231	19 Hz-150 kHz	-
پایش داده	BSWA	MC3022	35-118 dB	-
کالیبراتور	BSWA	CA111	94 and 114 dB at 1000 Hz	-
ثبت داده	BSWA	MC3022	20-20000	-

ثبت داده‌های صوتی در سه موقعیت مکانی مختلف شامل ناحیه گوش اپراتور، محدوده نزدیک به دستگاه و ناحیه دورتر با فاصله‌های تقریبی ۷/۵ و ۲۰ متر از کمباین (شکل ۱)، در حین عملکرد ماشین انجام شد. در اندازه‌گیری تراز صوتی در محل گوش اپراتور، میکروفن در فاصله حدود ۱۰۰ میلی‌متر از گوش وی نصب گردید (شکل ۲). همچنین برای دو موقعیت دیگر، میکروفن‌ها بر روی سه‌پایه و در ارتفاع تقریبی ۱/۲ متر از سطح زمین و در راستای افقی مستقر شدند.



شکل ۱. مسیر حرکت کمباین و موقعیت قرار گیری میکروفن



شکل ۲. میکروفن اندازه‌گیری در موقعیت گوش اپراتور

شرایط و مشخصات محل انجام آزمون‌ها مطابق با الزامات استاندارد بین‌المللی ISO 7216 انتخاب گردید. بدین منظور، یک فضای باز در محوطه کارخانه کمباین‌سازی ایران که دارای فاصله کافی از سطوح بازتاب‌دهنده صدا نظیر ساختمان‌ها و پوشش‌های گیاهی بود، به عنوان محل آزمون در نظر گرفته شد. در طول آزمایش‌ها، سرعت جریان هوا به وسیله بادسنج دیجیتال اندازه‌گیری شد که در تمامی مراحل مقدار آن کمتر از ۵ متر بر ثانیه ثبت گردید.

پس از ثبت، سیگنال‌های صوتی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB مورد پردازش قرار گرفتند. مراحل پردازش شامل حذف نویزهای محیطی، فیلترگذاری، تحلیل در حوزه زمان و بسامد و استخراج ویژگی‌های آکوستیکی و روان آکوستیکی بود. به منظور تبدیل داده‌های حوزه زمان به حوزه بسامد، از تبدیل فوریه سریع استفاده شد. سپس شاخص‌های کمی و کیفی صدا از سیگنال‌های ثبت شده استخراج و محاسبه گردیدند.

جهت ارزیابی مواجهه کارگران و همچنین ارزیابی محیطی صدا، از تراز فشار صوت استفاده شد. تراز فشار صوت یکی از مهم‌ترین شاخص‌های فیزیکی در اندازه‌گیری شدت صدا بوده و بر حسب دسی‌بل بیان می‌شود. این کمیت از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد که در آن P فشار مؤثر صوت در نقطه اندازه‌گیری و P_0 فشار مرجع صوت برابر با ۲۰ میکروپاسکال است.

$$\text{SPL} = 10 \log\left(\frac{P^2}{P_0^2}\right) = 20 \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

با وجود اهمیت تراز فشار صوت، ارزیابی کیفیت صدا تنها بر مبنای شاخص‌های فیزیکی امکان‌پذیر نیست. ادراک انسان از صدا ماهیتی ذهنی داشته و تحت تأثیر عوامل متعددی قرار می‌گیرد. از این رو، برای ارزیابی جامع‌تر کیفیت صدا، شاخص‌های روان آکوستیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این شاخص‌ها نحوه ادراک و احساس شنونده نسبت به صدا را توصیف می‌کنند و ارتباط بیشتری با آسایش یا آزرده‌گی صوتی دارند.

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های روان آکوستیکی، بلندی صدا است که بیانگر ادراک ذهنی انسان از حجم کلی صدا می‌باشد. در این پژوهش، بلندی صدا بر اساس روش زوئکر محاسبه شد (Zwicker & Fastl, 2007). ابتدا بلندی مخصوص صدا مطابق رابطه (۲) تعیین گردید که در آن N' بلندی مخصوص بر حسب سون/بارک، E تحریک صوت، E_{TQ} تحریک متناظر آستانه شنوایی و E_0 تحریک متناظر با شدت مرجع صوت است.

$$N' = 0.08 \left(\frac{E_{TQ}}{E_0}\right)^{0.23} \left[\left(0.5 + 0.5 \frac{E}{E_{TQ}}\right)^{0.23} - 1 \right] \quad \text{رابطه (۲)}$$

بلندی کل صدا از انتگرال‌گیری بلندی مخصوص در محدوده نرخ باند بحرانی (۰ تا ۲۴ بارک) مطابق رابطه (۳) به دست آمد:

$$N = \int_0^{24} N' dz \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه، z نرخ باند بحرانی در واحد بارک است. از آنجا که سیستم شنوایی انسان رفتار فیلترهای باندگذر را دارد، در محاسبات روان آکوستیکی از مفهوم نرخ باند بحرانی استفاده می‌شود. نرخ باند بحرانی بر اساس رابطه (۴) محاسبه گردید:

$$Z = \left[13 \tan^{-1}(0.76 f) + 3.5 \tan^{-1}\left(\frac{f}{7.5}\right)^2 \right] \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در این رابطه، Z نرخ باند بحرانی، f بسامد بر حسب کیلوهرتز است. شاخص دیگر مورد استفاده در این پژوهش، تیزی صدا بود که میزان غالب بودن مؤلفه‌های فرکانس بالای صدا را نشان می‌دهد. تیزی صدا با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد:

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24} N'(z)g(z)z dz}{\int_0^{24} N'(z) dz} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن S تیزی صدا بر حسب آکوم و $g(z)$ تابع وزنی وابسته به نرخ باند بحرانی است. تابع وزنی $g(z)$ مطابق رابطه (۶) تعیین شد:

$$g(z) = \begin{cases} 1 & \text{for } z \leq 16 \\ 0.066e^{0.171z} & \text{for } z > 16 \end{cases} \quad \text{رابطه (۶)}$$

همچنین برخی پژوهشگران از رابطه اصلاح شده (۷) برای محاسبه تیزی استفاده کرده‌اند (Park & Lee, 2012):

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24} N'(z)g'(z)z dz}{\ln\left(\frac{N+20}{20}\right)} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در این رابطه تابع وزنی $g'(z)$ از رابطه (۸) به دست می‌آید.



$$g'(z) = e^{0/171z}$$

رابطه (۸)

زبری صدا نیز به عنوان یکی دیگر از شاخص‌های مهم روان‌آکوستیکی مورد بررسی قرار گرفت. زبری به مدولاسیون دامنه سیگنال در بازه بسامدی ۲۰ تا ۳۰۰ هرتز وابسته بوده و بیانگر احساس خشونت یا ناهنجاری صدا است. زبری مخصوص مطابق رابطه (۹) محاسبه شد:

$$R'(z) = 0.3 f_{mod} + \Delta L_E(z) \Delta z$$

رابطه (۹)

که در آن f_{mod} فرکانس مدولاسیون و ΔL_E تغییرات تحریک صوتی است. تغییرات تحریک صوتی از رابطه (۱۰) محاسبه گردید:

$$20 \log\left(\frac{N'_z(1)}{N'_z(99)}\right) = \Delta L_E(z)$$

رابطه (۱۰)

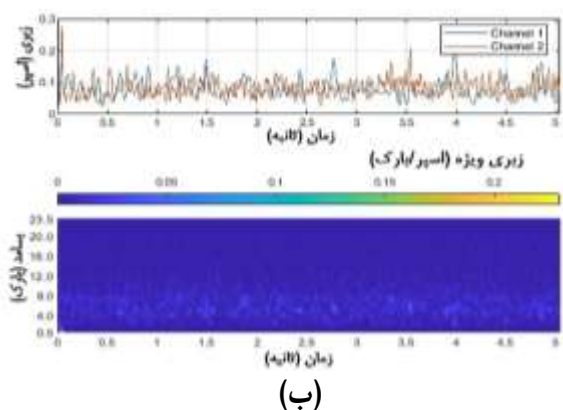
که در این رابطه، $N'(1)$ و $N'(99)$ به ترتیب صدک یکم و ۹۹ام مقادیر بلندی صداست. می‌توان $N'(1)$ و $N'(99)$ را به ترتیب به صورت $N'_{(Min)}$ و $N'_{(Max)}$ نوشت. به بیان دیگر، نشان‌دهنده مقادیر حداکثر و حداقل بلندی صدای مشخص در باند بسامد ویژگی برای یک سیگنال صوتی است. مقدار زبری کل بر حسب اسپر از رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$R = \int_0^{24} R'(z) dz$$

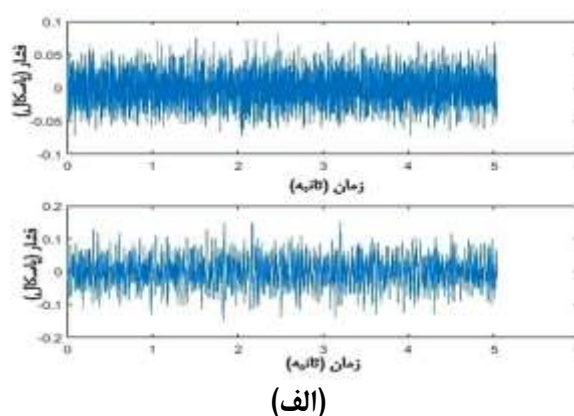
رابطه (۱۱)

به منظور محاسبه شاخص‌های بلندی، تیزی و زبری، تمامی روابط فوق در نرم افزار متلب کدنویسی و برای هر سیگنال صوتی اجرا شدند. در مرحله نهایی، داده‌های حاصل با استفاده از آزمون تحلیل واریانس مورد ارزیابی قرار گرفتند و مقایسه میانگین‌ها با آزمون توکی در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد.

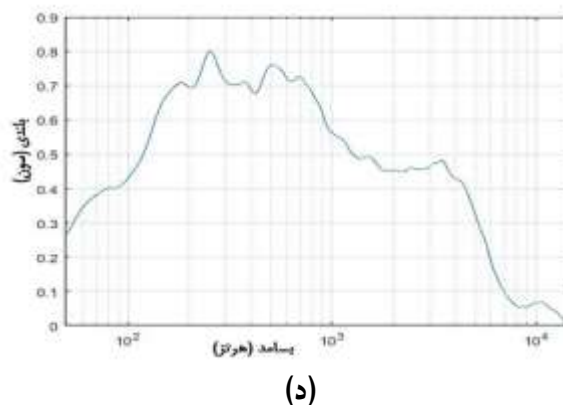
شکل ۳ نمونه‌ای از مراحل پردازش و تحلیل یک سیگنال صوتی ثبت‌شده از کمباین را نشان می‌دهد. این شکل شامل: (الف) فشار صدا، (ب) زبری صدا، (ج) تیزی صدا و (د) توزیع بلندی صدا در کمباین است.



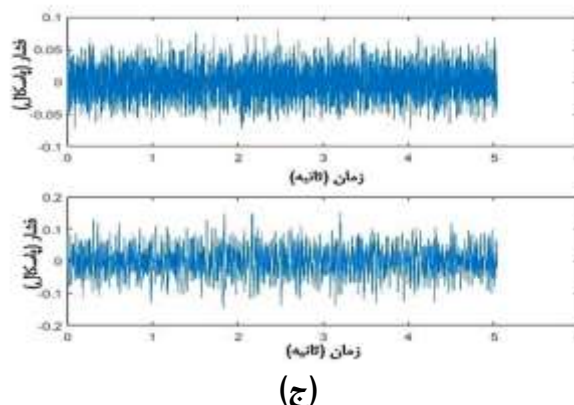
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳. نمونه‌ای از نتایج پردازش سیگنال صوتی کمباین شامل: (الف) فشار صدا، (ب) زبری صدا، (ج) تیزی صدا و (د) توزیع بلندی صدا در باندهای بسامدی مختلف.

یافته‌های پژوهش

در این مطالعه عامل‌های صدای ضبط شده در دو کمباین سمپو ۳۰۶۵ و جاندیر ۱۰۵۵ پرداخته شده و ارتباط بین معیارهای کیفیت صدا و معیار کمی با استفاده از تحلیل‌های بررسی گردید. نتایج تجزیه واریانس و اثرات برهم‌کنش عامل‌های اصلی دور موتور، وضعیت دنده، نوع عملیات و فاصله میکروفن بر مقادیر بلندی صدا (سون)، تیزی (آکوم)، زبری (آسپر) و تراز صدا (دسی‌بل) سیگنال‌های صوتی کمباین‌های سمپو و جاندیر در جدول (۲) نشان شده است. نتایج حاصل از تحلیل واریانس عامل‌های مختلف سیگنال صوتی این دو کمباین نشان داد که عامل دور موتور، نوع عملیات و موقعیت میکروفن بر میانگین‌های کلیه متغیرها در سطح احتمال ۹۹٪ تاثیر معنی داری داشت. عامل وضعیت دنده بر میانگین عامل‌های تیزی و تراز صوت در هر دو کمباین در سطح احتمال ۹۹٪ اثر معنی داری داشت، اما بر میانگین بلندی و زبری صدا کمباین سمپو و عامل زبری کمباین جاندیر اختلاف معناداری نداشت.

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس عوامل اصلی دور موتور، وضعیت دنده، نوع عملیات و فاصله میکروفن و اثرات برهم‌کنش آنها بر بلندی (سون)، تیزی (آکوم)، زبری (آسپر) و تراز صوت (دسی‌بل) سیگنال‌های صوتی کمباین سمپو ۳۰۶۵ و جاندیر ۱۰۵۵

میانگین مربعات عامل‌های کمباین سمپو ۳۰۶۵										میانگین مربعات عامل‌های کمباین جاندیر ۱۰۵۵									
منابع تغییر		درجه آزادی	بلندی (سون)	تیزی (آکوم)	زبری (آسپر)	تراز صدا (دسی‌بل)	درجه آزادی	بلندی (سون)	تیزی (آکوم)	زبری (آسپر)	تراز صدا (دسی‌بل)								
دور موتور		۱	۲۱۷۸/۲۲ **	۰/۱۳ **	۰/۰۱ **	۹۷ **/۱۹۳۴	۱	۷۱۳۴/۲۲ **	۰/۶۱ **	۰/۰۱ **	۸۵۶۶/۹۷ **								
وضعیت دنده		۳	۵۸ ns/۱	۰/۰۴ **	۰/۰۰ ns	۲۱ **/۲۵۳	۴	۱۷/۸۴ **	۰/۰۴ **	۰/۰ ns	۲۵/۳۹ **								
عملیات		۱	۰۷ **/۱۰۴۱	۰/۷۱ **	۰/۰۰ **	۵۴ **/۵۷۵	۱	۱۵۵۶/۵۱ **	۰/۳۵ **	۰/۰۰ **	۱۰۲۹/۹۷ **								
موقعیت میکروفن		۳	۰۶ **/۱۶۴۳	۵۰ **/۱	۰/۰۱ **	۵۹ **/۱۵۸۷	۳	۲۳۳۰/۷۳ **	۱/۱۹ **	۰/۰۱ **	۷۶۶۲/۸۷ **								
دور موتور × وضعیت دنده		۳	۶۰ **/۸	۰/۰۶ **	۰/۰۰ ns	۷۹ **/۱۳	۴	۳۱/۵۸ **	۰/۰۱ ns	۰/۰ *	۳۳/۴۳ **								
دور موتور × عملیات		۱	۰۴ **/۲۸	۰/۰۵ **	۵۰ ns/۱	۲۹ **/۴۷	۱	۴۵/۸۶ **	۰/۰ ns	۰/۰ ns	۳۳/۰۰ **								
دور موتور × موقعیت میکروفن		۳	۳۸ **/۱۰۴	۰/۰۰ **	۰/۰۰ ns	۴۰ **/۱۵	۳	۱۷۳/۰۵ **	۰/۰۵ **	۰/۰۰ **	۶۶/۲۲ **								
وضعیت دنده × عملیات		۳	۲۷ **/۹	۰/۰۰ ns	۰/۰۰ ns	۴۱ **/۵۷	۴	۷/۱۶ *	۰/۰۲ **	۰/۰ ns	۷/۱۶ ns								
وضعیت دنده × موقعیت میکروفن		۹	۸۸ **/۸	۰/۰۰ ns	۰/۰۰ ns	۶۴ **/۵۳	۱۲	۶/۰۰ **	۰/۰۱ *	۰/۰ *	۹/۷۸ **								
عملیات × موقعیت میکروفن		۳	۶۵ **/۱۵۰	۰/۲۳ **	۰/۷ ns/۲	۹۴ **/۳۰	۳	۸۱/۶۷ **	۰/۰۱ ns	۰/۰ ns	۴۵/۱۸ **								
خطا		۱۲۸	۱۴/۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۸/۲	۱۶۰	۲/۶۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۳/۱۱								

* و ** به ترتیب سطوح معنی‌داری ۵ و ۱ درصد و ns عدم معنی‌داری را نیز نشان می‌دهد.

عامل دور موتور اثر معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹٪ بر میانگین مربعات شاخص‌های بلندی صدا، تیزی، زبری و تراز صوتی در هر دو کمباین داشت. با افزایش سرعت موتور، سطح تولید انرژی مکانیکی و به تبع آن ارتعاشات و نویز تولیدشده در آن افزایش می‌یابد، که مستقیماً بر شاخص‌های آکوستیکی تأثیر می‌گذارد. وضعیت مختلف دنده بر میانگین مربعات تیزی و تراز صدا در سطح احتمال ۹۹٪ معنی‌دار بود اما بر میانگین مربعات زبری صدا اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. تیزی صدا وابسته به محتوای بسامدی بالا است که می‌تواند تحت تأثیر بارهای لحظه‌ای ناشی از تعویض دنده و انتقال ناگهانی نیرو بین چرخ‌دنده‌ها باشد. اما زبری صدا بیشتر از مدت‌زمان و پایداری منبع صوت تأثیر می‌پذیرند و از آنجایی که وضعیت دنده در شرایط بارگذاری یکسان، تأثیر مشخصی بر حجم کلی صدا یا نرخ نوسانات سریع ندارد، اختلاف بوجود آمده در این عوامل قابل توجه است.

نوع عملیات نیز تأثیر معنی‌داری بر تمامی شاخص‌های آکوستیکی در سطح ۹۹٪ داشته است. اختلاف شاخص در تعداد و نحوه کارکرد دو وضعیت عملیاتی حرکت درجا و برداشت دلیل واضح و روشن بر این اختلاف معنی‌دار متغیرهای ذکر شده است. عملیات برداشت به دلیل درگیر شدن سیستم‌های متعدد مکانیکی مانند شانه برش، مارپیچ، بالابر و سامانه تخلیه، سطح نویز و ویژگی‌های بسامدی متنوعی ایجاد می‌کند که موجب تغییر در ویژگی‌های شنوایی‌سنجی سیگنال می‌شود. موقعیت میکروفن نیز اثر کاملاً معنی‌داری بر همه شاخص‌ها داشت زیرا مکان اندازه‌گیری نسبت به منبع نویز، بازتاب سطوح داخل کابین، عایق‌بندی صوتی و نزدیکی به مسیر انتقال صدا (مستقیم یا انعکاسی) همگی بر کیفیت سیگنال دریافتی اثرگذار هستند.

شکل ۴ اثرات برهم‌کنش دور موتور و وضعیت دنده و همچنین اثرات برهم‌کنش نوع عملیات و موقعیت میکروفن بر تراز صدای کمباین‌های سمپو و جاندیر را نشان می‌دهد. در کمباین سمپو (شکل ۴-الف)، میانگین تراز صدا در دور آرام و دور تند به ترتیب ۵۴/۱ و

۵۹/۶ دسی بل اندازه گیری شد. بیشترین مقدار تراز صدا در شرایط دور تند و دنده سه با مقدار ۶۱/۸ دسی بل و کمترین مقدار آن در دور آرام و دنده پارک با مقدار ۵۲/۲ دسی بل مشاهده گردید. افزایش تراز صدا با افزایش دور موتور را می توان به افزایش نرخ احتراق، ارتعاشات موتور و سرعت اجزای دوار نسبت داد که موجب افزایش انرژی صوتی منتشر شده می شوند. همچنین تغییر وضعیت دنده با تغییر بار وارد بر موتور، بر میزان نویز تولیدی تأثیرگذار بوده است. نتایج مشابهی توسط (Barač et al., 2025) و (Di Stefano et al., 2025) گزارش شده است که نشان دادند افزایش دور موتور ماشین های کشاورزی موجب افزایش معنی دار تراز فشار صوت در محل قرارگیری اپراتور می شود. همچنین تغییر وضعیت دنده با تغییر بار وارد بر موتور و سامانه انتقال قدرت، بر میزان نویز تولیدی تأثیرگذار بوده است؛ به گونه ای که با افزایش بارگذاری موتور، شدت ارتعاشات مکانیکی و نویز ناشی از درگیری اجزای انتقال قدرت افزایش می یابد (Barač et al., 2025).

در کمباین جاندر (شکل ۴-ب)، میانگین تراز صدا در دور آرام و دور تند به ترتیب ۵۴/۸ و ۶۴/۹ دسی بل به دست آمد. نتایج نشان داد که افزایش دور موتور در این کمباین باعث افزایش بیشتری در تراز صدا نسبت به کمباین سمپو شده است. این موضوع می تواند ناشی از توان بالاتر موتور، ظرفیت بیشتر سامانه انتقال قدرت و تفاوت در ویژگی های طراحی آکوستیکی این کمباین باشد. همچنین افزایش بارگذاری موتور در برخی نسبت های دنده سبب افزایش نویز تولیدی شده است.

نتایج مربوط به اثر برهم کنش نوع عملیات و موقعیت میکروفن در کمباین سمپو (شکل ۴-ج) نشان داد که میانگین تراز صدا در موقعیت گوش راننده هنگام برداشت و حرکت آزاد به ترتیب ۵۸/۴ و ۵۵/۴ دسی بل بود. بیشترین مقدار تراز صدا در حالت برداشت و موقعیت بدون کابین با مقدار ۶۵/۵ دسی بل و کمترین مقدار آن در حالت حرکت آزاد و فاصله ۲۰ متری از کمباین با مقدار ۵۱/۸ دسی بل ثبت شد. افزایش تراز صدا در هنگام برداشت ناشی از فعالیت همزمان سامانه های برش، کوبش، جداسازی و انتقال محصول است که تعداد منابع تولیدکننده نویز را افزایش می دهد.

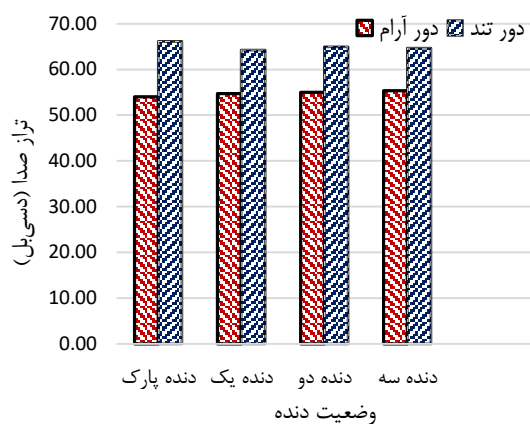
در کمباین جاندر (شکل ۴-د)، میانگین تراز صدا در موقعیت گوش راننده هنگام برداشت و حرکت آزاد به ترتیب ۶۱/۸ و ۵۸/۴ دسی بل اندازه گیری شد. بیشترین مقدار تراز صدا در حالت برداشت و موقعیت بدون کابین با مقدار ۷۳/۲ دسی بل و کمترین مقدار آن در حالت حرکت آزاد و فاصله ۲۰ متری با مقدار ۴۹/۴ دسی بل مشاهده گردید. مقادیر بالاتر تراز صدا در مقایسه با کمباین سمپو نشان می دهد که منابع تولید نویز در این کمباین سهم بیشتری در میدان صوتی اطراف دستگاه دارند. این اختلاف می تواند ناشی از تفاوت در ساختار موتور، سامانه های عملیاتی و عملکرد عایق بندی کابین باشد. به طور کلی، هر دو کمباین روند مشابهی را در تغییرات تراز صدا نشان دادند؛ به طوری که افزایش دور موتور و انجام عملیات برداشت موجب افزایش تراز صدا شد. با این حال، کمباین جاندر در اکثر شرایط عملیاتی تراز صدای بالاتری نسبت به کمباین سمپو تولید کرد که بیانگر تفاوت در مشخصات فنی و عملکرد آکوستیکی دو ماشین مورد بررسی است.

به منظور ارزیابی پیامدهای بهداشتی ناشی از مواجهه اپراتور با صدای تولیدشده توسط کمباین ها، مدت زمان مجاز مواجهه بر اساس حدود توصیه شده مؤسسه ملی ایمنی و بهداشت شغلی حاسبه شد. در این استاندارد، حد مجاز مواجهه برای یک شیفت کاری ۸ ساعته برابر با ۸۵ دسی بل در نظر گرفته شده و با افزایش هر ۳ دسی بل، مدت زمان مجاز مواجهه به نصف کاهش می یابد. بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین تراز فشار صوت در کمباین سمپو و جاندر به ترتیب برابر با ۶۵/۵ و ۷۳/۲ دسی بل اندازه گیری شد. با این وجود، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که ارزیابی شرایط صوتی ماشین های کشاورزی نباید تنها بر مبنای تراز فشار صوت انجام شود. اگرچه مقادیر تراز صدا در هر دو کمباین کمتر از حدود مجاز مواجهه شغلی بودند، اما اختلاف قابل توجهی در شاخص های روان آکوستیکی نظیر بلندی، تیزی و زبری صدا مشاهده شد. این شاخص ها ارتباط مستقیمی با ادراک شنیداری، میزان آزردهی صوتی، خستگی ذهنی و آسایش اپراتور دارند و می توانند حتی در سطوح ایمن تراز فشار صوت نیز بر عملکرد و رفاه کاربران تأثیرگذار باشند. از این رو، استفاده همزمان از شاخص های آکوستیکی و روان آکوستیکی می تواند ارزیابی جامع تری از کیفیت صوتی کمباین ها و شرایط کاری اپراتورها فراهم آورد.

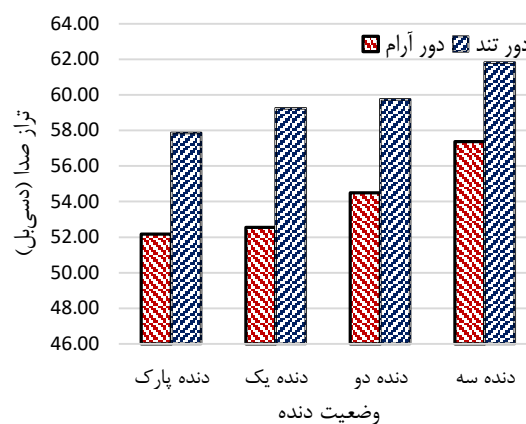
شکل ۵ اثرات برهم کنش دور موتور و وضعیت دنده و همچنین اثرات برهم کنش نوع عملیات و موقعیت میکروفن بر بلندی صدای کمباین های سمپو و جاندر را نشان می دهد. بلندی صدا یکی از مهم ترین شاخص های روان آکوستیکی است که بیانگر ادراک ذهنی انسان از شدت صدا بوده و علاوه بر سطح فشار صوت، به توزیع بسامدی صدا و ویژگی های سیستم شنوایی انسان نیز وابسته است (Bigras et al., 2024).

در کمباین سمپو (شکل ۵-الف)، میانگین بلندی صدا در دور آرام و دور تند به ترتیب ۷/۱ و ۱۳/۰ سون اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که افزایش دور موتور موجب افزایش قابل توجه بلندی صدا شده است. بیشترین مقادیر بلندی در دورهای بالاتر و نسبت دنده های

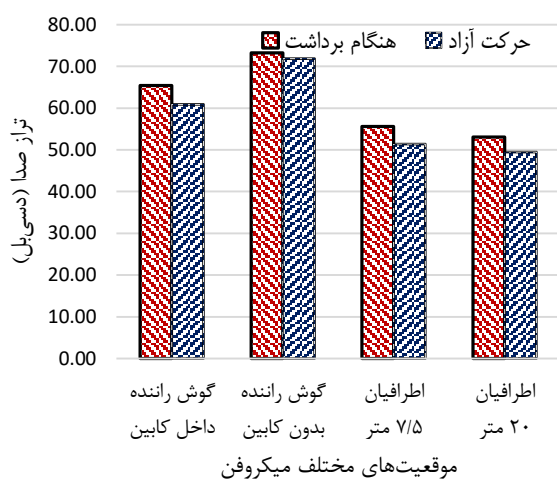
بزرگ‌تر مشاهده شد که می‌تواند ناشی از افزایش سرعت دوران اجزای متحرک، ارتعاشات بیشتر موتور و افزایش شدت صوت تولیدی باشد. با افزایش بارگذاری موتور و فعالیت سامانه انتقال قدرت، انرژی صوتی بیشتری در محدوده بسامدی حساس گوش انسان تولید شده و در نتیجه بلندی ادراک شده افزایش می‌یابد.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴. اثرات بر همکنش دور موتور و وضعیت دنده بر تراز صدا در کمباین سمپو (الف) و کمباین جاندیر (ب)، نوع عملیات و موقعیت‌های مختلف میکروفن بر تراز صدا در کمباین سمپو (ج) و کمباین جاندیر (د)

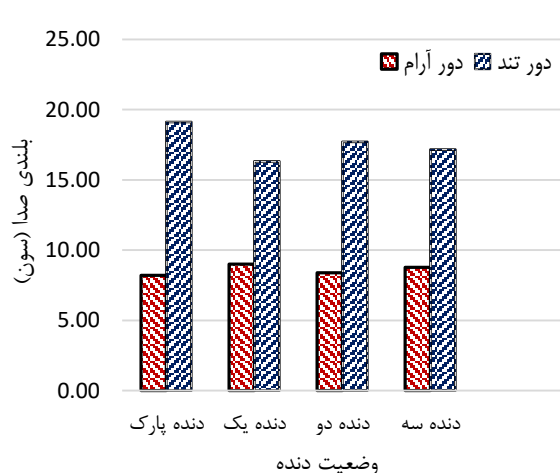
در کمباین جاندیر (شکل ۵-ب)، میانگین بلندی صدا در دور آرام و دور تند به ترتیب ۸/۶ و ۱۷/۶ سون بود. نتایج مربوط به اثر برهم‌کنش نوع عملیات و موقعیت میکروفن در کمباین سمپو (شکل ۵-ج) نشان داد که میانگین بلندی صدا در هنگام برداشت و حرکت آزاد به ترتیب ۱۲/۱ و ۸/۰ سون بود. کمترین مقدار بلندی در شرایط حرکت آزاد و موقعیت کنار گوش راننده در کمباین کابین‌دار با مقدار ۳/۹ سون و بیشترین مقدار آن در شرایط برداشت و کمباین بدون کابین با مقدار ۲۱/۴ سون مشاهده شد. افزایش بلندی در زمان برداشت را می‌توان به فعالیت همزمان سامانه‌های برش، کوبش، جداسازی و انتقال محصول نسبت داد که سبب افزایش حجم صوت ادراک شده توسط شنونده می‌شود.

در کمباین جاندیر (شکل ۵-د)، میانگین بلندی صدا در هنگام برداشت و حرکت آزاد به ترتیب ۱۵/۳ و ۱۱/۱ سون اندازه‌گیری شد. بیشترین مقدار بلندی در موقعیت کنار گوش راننده و در حالت بدون کابین با مقدار ۲۱/۱ سون و کمترین مقدار آن در فاصله ۲۰ متری از کمباین با مقدار ۶/۸ سون ثبت شد. نتایج نشان داد که در تمامی موقعیت‌های اندازه‌گیری، بلندی صدای کمباین جاندیر بیشتر از کمباین سمپو بوده است که می‌تواند ناشی از شدت صوت بیشتر و سهم بالاتر مؤلفه‌های بسامدی مؤثر بر ادراک شنوایی انسان باشد. به‌طور کلی، در هر دو کمباین افزایش دور موتور و انجام عملیات برداشت موجب افزایش بلندی صدا شد. همچنین وجود کابین و افزایش فاصله از منبع صوتی باعث کاهش محسوس بلندی ادراک شده گردید.

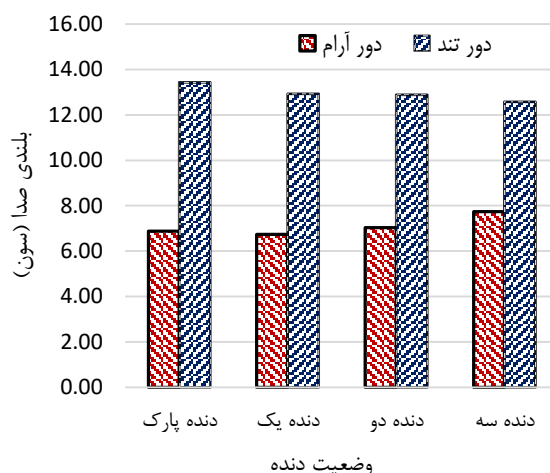
شکل ۶ اثرات برهم‌کنش دور موتور و وضعیت دنده و همچنین اثرات برهم‌کنش نوع عملیات و موقعیت میکروفن بر تیزی صدای

کمباین‌های سمپو و جاندیر را نشان می‌دهد. تیزی صدا یکی از مهم‌ترین شاخص‌های روان‌آکوستیکی است که میزان بودن مؤلفه‌های بسامدی بالا در یک سیگنال صوتی را بیان می‌کند. افزایش سهم فرکانس‌های بالا در طیف صوتی موجب افزایش تیزی و در نتیجه افزایش احتمال ایجاد احساس ناخوشایند و آزرده‌گی در شنونده می‌شود (Asady et al., 2025).

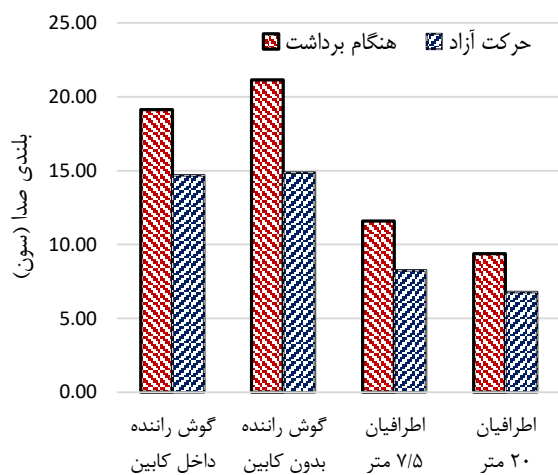
در کمباین سمپو (شکل ۶-الف)، میانگین تیزی صدا در دور آرام و دور تند به ترتیب ۱/۰۵ و ۱/۰۹ آکوم اندازه‌گیری شد. بیشترین مقدار تیزی در شرایط دور تند و دنده پارک با مقدار ۱/۱۵ آکوم و کمترین مقدار آن در دور آرام و دنده دو با مقدار ۱/۰۲ آکوم مشاهده گردید. اختلاف نسبتاً محدود بین مقادیر تیزی در شرایط مختلف نشان می‌دهد که تغییر دور موتور و وضعیت دنده تأثیر چندانی بر توزیع بسامدی سیگنال صوتی این کمباین نداشته است. این موضوع می‌تواند ناشی از عملکرد مناسب سامانه عایق‌بندی و کنترل ارتعاشات باشد که از گسترش مؤلفه‌های بسامدی بالا جلوگیری کرده است.



(ب)

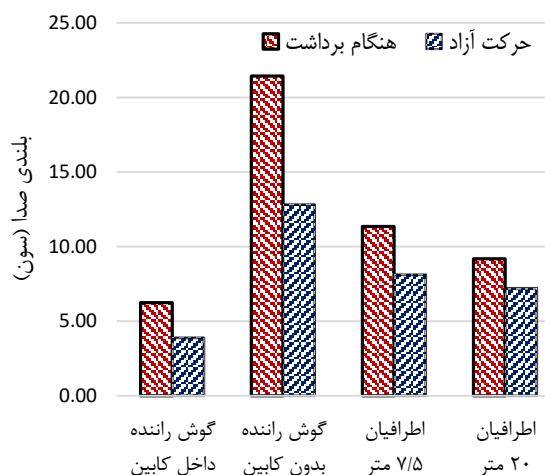


(الف)



موقعیت‌های مختلف میکروفن

(د)



موقعیت‌های مختلف میکروفن

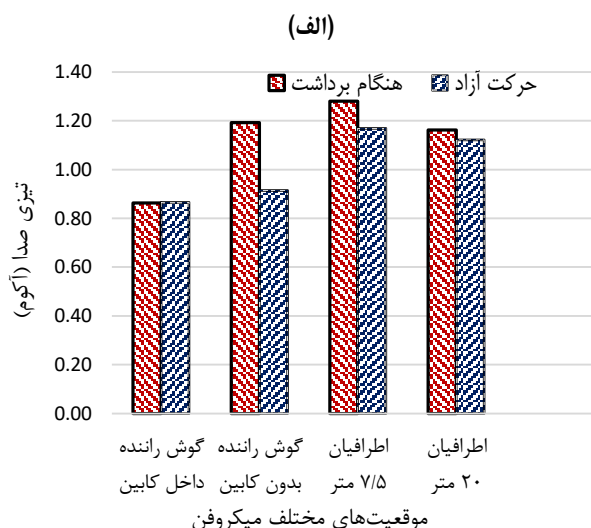
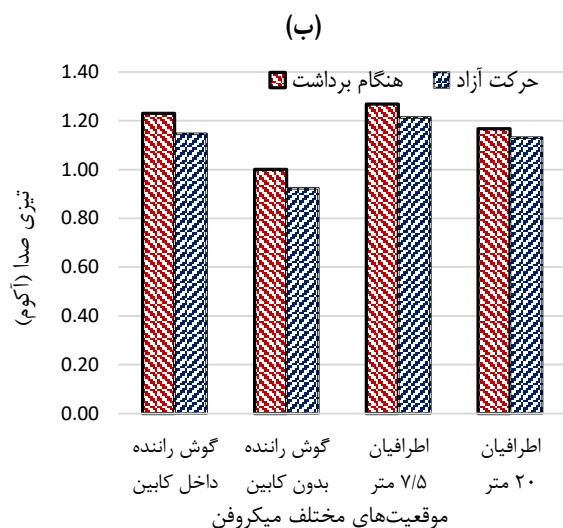
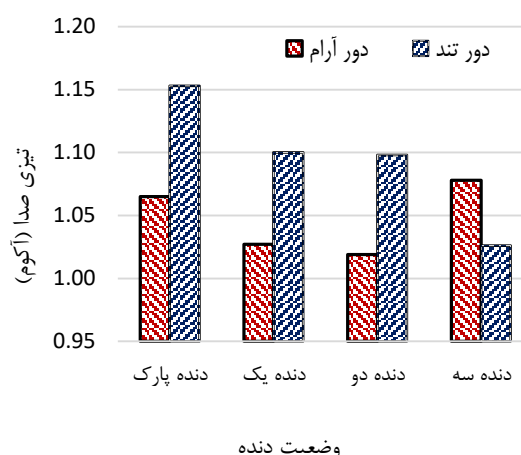
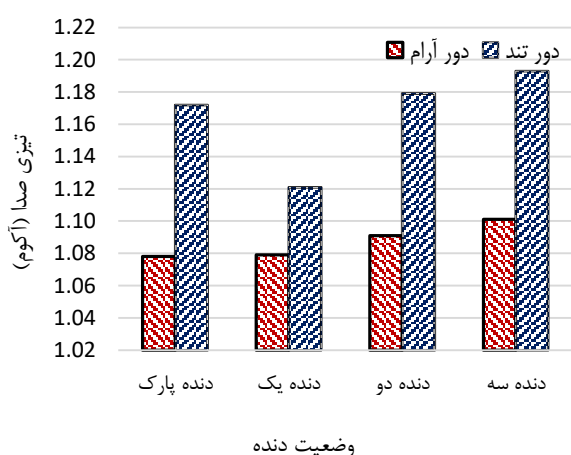
(ج)

شکل ۵. اثرات بر همکنش دور موتور و وضعیت دنده بر تراز صدا در کمباین سمپو (الف) و کمباین جاندیر (ب)، نوع عملیات و موقعیت‌های مختلف میکروفن بر بلندی صدا در کمباین سمپو (ج) و کمباین جاندیر (د)

در کمباین جاندیر (شکل ۶-ب)، میانگین تیزی صدا در دور آرام و دور تند به ترتیب ۱/۰۸ و ۱/۱۸ آکوم بود. افزایش محسوس تیزی صدا در دورهای بالاتر نشان می‌دهد که با افزایش سرعت موتور، سهم مؤلفه‌های بسامدی بالا در طیف صوتی افزایش یافته است. این پدیده می‌تواند ناشی از افزایش ارتعاشات اجزای دوار، درگیری بیشتر اجزای سامانه انتقال قدرت و افزایش نویز آیرودینامیکی در سرعت‌های بالاتر باشد. مقادیر بالاتر تیزی در کمباین جاندیر نسبت به سمپو بیانگر آن است که صدای تولیدی این کمباین از دیدگاه ادراکی،

گوش خراش تر و بالقوه آزاردهنده تر است.

نتایج مربوط به اثر برهم کنش نوع عملیات و موقعیت میکروفن در کمباین سمپو (شکل ۶-ج) نشان داد که میانگین تیزی صدا در حالت برداشت و حرکت آزاد به ترتیب ۱/۱۲ و ۱/۰۱ اکوم بود. بیشترین مقدار تیزی در حالت برداشت و موقعیت میکروفن در فاصله ۷،۵ متری اطرافیان با مقدار ۱/۲۸ اکوم و کمترین مقدار آن در شرایط حرکت آزاد با مقدار ۰/۸۶ اکوم ثبت شد. افزایش تیزی در زمان برداشت را می‌توان به فعالیت همزمان سامانه‌های برش، کوبش و جداسازی نسبت داد که سبب تولید مؤلفه‌های بسامدی بالاتر در طیف صوتی می‌شوند. در کمباین جاندیر (شکل ۶-د)، میانگین تیزی صدا در حالت برداشت و حرکت آزاد به ترتیب ۱/۱۶ و ۱/۱۰ اکوم اندازه‌گیری شد. افزایش تیزی در زمان برداشت بیانگر آن است که بار کاری بیشتر و فعالیت همزمان سامانه‌های مختلف کمباین موجب تولید مؤلفه‌های بسامدی با انرژی بالاتر شده است.

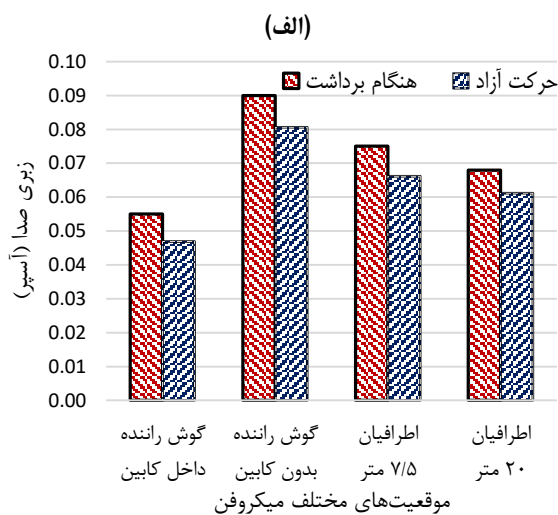
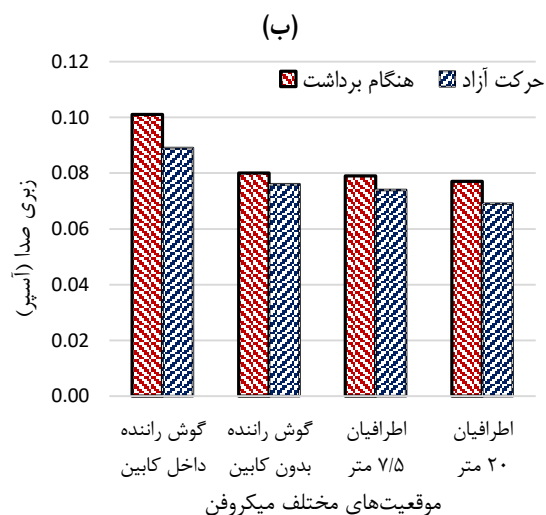
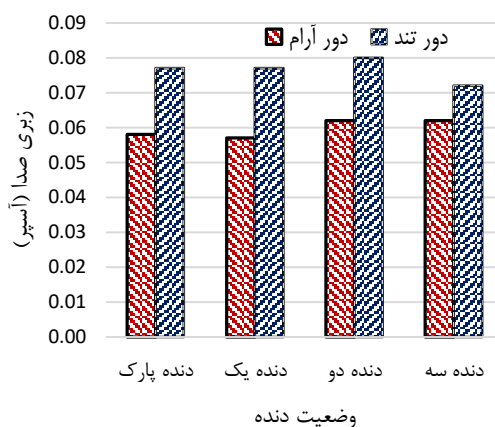
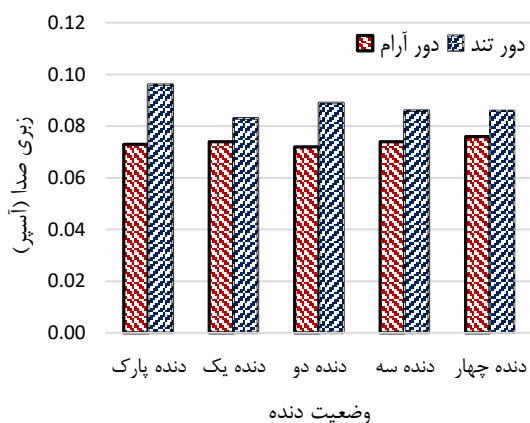


شکل ۶. اثرات بر همکنش دور موتور و وضعیت دنده بر تراز صدا در کمباین سمپو (الف) و کمباین جاندیر (ب)، نوع عملیات و موقعیت‌های مختلف میکروفن بر تیزی صدا در کمباین سمپو (ج) و کمباین جاندیر (د)

زبری صدا یکی از شاخص‌های مهم روان آکوستیکی است که به عنوان یک حس شنیداری ناشی از مدولاسیون سریع دامنه سیگنال صوتی تعریف می‌شود. این شاخص عمدتاً با تغییرات شدت صوت در بازه بسامدی ۲۰ تا ۳۰۰ هرتز مرتبط بوده و هرچه میزان مدولاسیون دامنه بیشتر باشد، صدا خشن‌تر و ناهنجارتر ادراک می‌شود. زبری یکی از معیارهای مهم ارزیابی کیفیت صدا بوده و واحد اندازه‌گیری آن آسپر است. شکل ۷ اثرات برهم کنش دور موتور و وضعیت دنده و همچنین اثرات برهم کنش نوع عملیات و موقعیت میکروفن بر زبری صدای کمباین‌های سمپو و جاندیر را نشان می‌دهد. در کمباین سمپو (شکل ۷-الف)، میانگین زبری صدا در دور آرام و دور تند به ترتیب برابر با ۰/۰۶ و ۰/۰۷ آسپر بود. افزایش زبری در دورهای بالاتر نشان می‌دهد که با افزایش سرعت موتور، نوسانات دامنه سیگنال صوتی و

ارتعاشات ناشی از عملکرد اجزای دوار افزایش یافته است. این موضوع می‌تواند ناشی از افزایش ارتعاشات موتور، سامانه انتقال قدرت و اجزای متحرک کمباین باشد که سبب ایجاد تغییرات سریع‌تر در شدت صدا می‌شوند.

در کمباین جان‌دیر (شکل ۷-ب)، میانگین زبری صدا در دور آرام و دور تند به ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۰۹ آسپر اندازه‌گیری شد. مقادیر بالاتر زبری نسبت به کمباین سمپو نشان می‌دهد که تغییرات دامنه سیگنال صوتی در این کمباین شدیدتر بوده و صدا از دیدگاه روان‌آکوستیکی خشن‌تر ادراک می‌شود. این موضوع می‌تواند ناشی از تفاوت در مشخصات موتور، سامانه‌های مکانیکی و نحوه انتشار ارتعاشات در ساختار کمباین باشد. نتایج مربوط به اثر برهم‌کنش نوع عملیات و موقعیت میکروفن در کمباین سمپو (شکل ۷-ج) نشان داد که میانگین زبری صدا در شرایط برداشت و حرکت آزاد به ترتیب برابر با ۰/۰۷ و ۰/۰۶ آسپر بود. بیشترین مقدار زبری در موقعیت کنار گوش راننده بدون کابین و هنگام برداشت با مقدار ۰/۰۹ آسپر مشاهده شد، درحالی‌که کمترین مقدار آن در حالت حرکت آزاد و موقعیت راننده در کمباین کابین‌دار برابر با ۰/۰۵ آسپر بود. در کمباین جان‌دیر (شکل ۷-د)، میانگین زبری صدا در شرایط برداشت و حرکت آزاد به ترتیب برابر با ۰/۰۸ و ۰/۰۷ آسپر بود. مقادیر بالاتر زبری نسبت به کمباین سمپو نشان می‌دهد که طیف صوتی این کمباین دارای نوسانات دامنه بیشتری است. همچنین بیشترین مقادیر زبری در شرایط برداشت و در موقعیت‌های نزدیک به منبع تولید صدا مشاهده شد که بیانگر تأثیر مستقیم فعالیت مکانیزم‌های عملیاتی بر افزایش ناهنجاری ادراک شده صدا است.



شکل ۷. اثرات بر هم‌کنش دور موتور و وضعیت دنده بر تراز صدا در کمباین سمپو (الف) و کمباین جان‌دیر (ب)، نوع عملیات و موقعیت‌های مختلف میکروفن بر زبری صدا در کمباین سمپو (ج) و کمباین جان‌دیر (د)

بحث

بررسی اثر نوع عملیات بر شاخص‌های کمی و روان‌آکوستیکی صدا در هر دو کمباین نشان داد که تغییر وضعیت عملکرد از حرکت آزاد به برداشت موجب افزایش قابل توجه سطح صدای تولیدی می‌شود. این افزایش عمدتاً ناشی از فعال شدن هم‌زمان مجموعه‌ای از مکانیزم‌های

عملیاتی کمباین از جمله استوانه کوبنده، کاه‌پران‌ها، الک‌ها و سامانه برش است که با ایجاد ارتعاشات مکانیکی متعدد، به‌عنوان مهم‌ترین منابع تولید صدا در فرآیند برداشت عمل می‌کنند. فعالیت هم‌زمان این اجزا سبب افزایش سطح انرژی صوتی و در نتیجه افزایش شاخص‌هایی نظیر تراز فشار صوت، بلندی، تیزی و زبری می‌شود. صداهای تولیدشده از این منابع از طریق نوسانات ایجادشده در ذرات هوا منتشر شده و در حین انتشار، بخشی از انرژی خود را به دلیل جذب و اتلاف در محیط از دست می‌دهند. از این‌رو، در موقعیت نزدیک به گوش اپراتور، به دلیل کوتاه‌تر بودن مسیر انتشار و کاهش کمتر انرژی موج صوتی، سطوح صدای اندازه‌گیری‌شده نسبت به نقاط دورتر بیشتر است. این موضوع با نتایج گزارش‌شده در مطالعات پیشین نیز همخوانی دارد؛ به‌طوری‌که کاهش سطح صدا با افزایش فاصله از منبع صوت مشاهده شده است، هرچند این کاهش در فواصل بیشتر از یک حد مشخص روند ملایم‌تری پیدا می‌کند که ناشی از پراکندگی و جذب انرژی صوتی در محیط است.

نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که شرایط کاری، دور موتور و نوع عملیات برداشت تأثیر معناداری بر شاخص‌های کمی و روان‌آکوستیکی صدا در هر دو کمباین مورد مطالعه دارند. مقایسه مستقیم عملکرد آکوستیکی کمباین سمپو با کابین وارداتی و کمباین جاندیر مجهز به کابین ساخت داخل نشان داد که اگرچه در شرایط کاری مختلف، مقادیر برخی شاخص‌های صوتی و روان‌آکوستیکی در کمباین جاندیر اندکی بالاتر از کمباین سمپو بوده است، اما این اختلاف‌ها در اغلب موارد محدود بوده و از دیدگاه عملی، ارگونومیکی و آسایش اپراتور قابل توجه ارزیابی نمی‌شوند.

بررسی هم‌زمان شاخص‌های کمی و کیفی صدا نشان داد که رفتار آکوستیکی دو کابین از الگوی نسبتاً مشابهی پیروی می‌کند و تفاوت‌های مشاهده‌شده به اندازه‌ای نیست که منجر به کاهش محسوس آسایش صوتی، افزایش خستگی شنیداری یا محدودیت معنادار در مدت زمان کارکرد اپراتور شود. به بیان دیگر، اگرچه کابین وارداتی سمپو در برخی شاخص‌ها عملکرد اندکی مطلوب‌تر را نشان داده است، اما کابین ساخت داخل کمباین جاندیر نیز توانسته است شرایط آکوستیکی مناسبی را برای اپراتور فراهم کند و از نظر کیفیت محیط صوتی عملکردی نزدیک به نمونه وارداتی داشته باشد.

در مجموع، نتایج این تحقیق بیانگر آن است که کابین تولید داخل مورد استفاده در کمباین جاندیر، علی‌رغم تفاوت‌های جزئی در برخی شاخص‌های صوتی و روان‌آکوستیکی، از منظر آسایش صوتی و شرایط کاری اپراتور عملکردی قابل قبول و نزدیک به کابین وارداتی سمپو دارد. این یافته علاوه بر تأیید توانمندی طراحی و ساخت داخلی در حوزه کابین ماشین‌های کشاورزی، می‌تواند مبنایی برای توسعه، بهینه‌سازی و ارتقای بیشتر طراحی آکوستیکی کابین‌های تولید داخل با هدف بهبود رفاه، سلامت و بهره‌وری اپراتور باشد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش با هدف ارزیابی هم‌زمان شاخص‌های کمی و روان‌آکوستیکی صدا در دو کمباین برداشت غلات شامل کمباین سمپو با کابین وارداتی و کمباین جاندیر مجهز به کابین ساخت داخل انجام شد. نتایج نشان داد که تغییر شرایط کاری، دور موتور و نسبت دنده بر تمامی شاخص‌های مورد بررسی تأثیرگذار بوده و موجب تغییر در کیفیت و شدت صدای ادراک‌شده توسط اپراتور می‌شود. همچنین مشخص شد که شاخص‌های روان‌آکوستیکی قادرند ابعاد مختلفی از کیفیت محیط صوتی را آشکار کنند که صرفاً با استفاده از تراز فشار صوت قابل تشخیص نیستند.

مقایسه دو کمباین نشان داد که اگرچه در برخی شرایط کاری، مقادیر برخی شاخص‌های صوتی و روان‌آکوستیکی در کمباین جاندیر اندکی بیشتر از کمباین سمپو بوده است، اما اختلاف‌های مشاهده‌شده در محدوده‌ای قرار دارند که از نظر عملیاتی تأثیر چشمگیری بر شرایط کاری اپراتور ایجاد نمی‌کنند. بر این اساس، عملکرد آکوستیکی کابین ساخت داخل مورد استفاده در کمباین جاندیر در سطحی قابل قبول ارزیابی شد و نتایج بیانگر آن است که این کابین توانسته است شرایطی نزدیک به نمونه وارداتی از نظر آسایش صوتی فراهم کند.

علاوه بر این، ارزیابی مدت زمان مجاز مواجهه نشان داد که در تمامی شرایط آزمایش، زمان مجاز قرارگیری اپراتور در معرض نویز بیش از یک شیفت کاری متداول بوده و خطر مستقیم آسیب شنوایی برای اپراتور مشاهده نشد. با این وجود، تفاوت‌های مشاهده‌شده در برخی شاخص‌های روان‌آکوستیکی نشان می‌دهد که ارزیابی محیط صوتی ماشین‌های کشاورزی نباید صرفاً بر اساس تراز فشار صوت انجام شود و لازم است معیارهای مرتبط با ادراک شنیداری انسان نیز در فرآیند طراحی و ارزیابی مورد توجه قرار گیرند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از رویکردهای طراحی آکوستیکی در مراحل توسعه کابین، بهبود عایق‌بندی صوتی، بهره‌گیری از مواد جاذب صوت و کاهش مسیرهای انتقال ارتعاش می‌تواند به ارتقای کیفیت محیط صوتی و افزایش آسایش اپراتور منجر شود. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، ارزیابی‌های روان‌آکوستیکی با سنجش‌های ذهنی اپراتورها تلفیق شده و تأثیر عوامل مختلف عملیاتی



در دامنه گسترده‌تری از ماشین‌های کشاورزی مورد بررسی قرار گیرد. استفاده از روش‌های هوشمند و مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده برای تحلیل هم‌زمان اطلاعات صوتی و ارتعاشی نیز می‌تواند زمینه را برای طراحی نسل جدید کابین‌های کم‌صدا و کاربرمحور فراهم سازد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است: نویسنده اول (دانشجوی تحصیلات تکمیلی): آماده‌سازی و فرآوری نمونه‌ها؛ انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌ها؛ انجام محاسبات و تحلیل‌های آماری؛ تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌ها؛ و تهیه پیش‌نویس اولیه مقاله. نویسنده دوم (استاد راهنما): ایده‌پردازی و طراحی پژوهش؛ نظارت بر تمامی مراحل اجرای پژوهش؛ اعتبارسنجی و بررسی نتایج؛ و بازنگری، ویرایش و نهایی‌سازی مقاله.

نویسنده سوم (استاد مشاور): مشارکت در طراحی پژوهش؛ نظارت بر اجرای پژوهش؛ و بازنگری و ویرایش مقاله. نویسنده چهارم (استاد مشاور): مشارکت در طراحی پژوهش؛ نظارت بر اجرای پژوهش؛ و بازنگری و ویرایش مقاله.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در طول آماده‌سازی این اثر، نویسندگان از هوش مصنوعی به منظور ویرایش جملات و متن مقاله استفاده کردند. پس از استفاده از این ابزار نویسندگان مطالب بررسی و ویرایش گردید و مسئولیت کامل محتوای نشریه را بر عهده می‌گیرند. همچنین نویسندگان از هیچ نوع فناوری مبنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش استفاده نکرده‌اند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و داده‌های پژوهش حاضر در متن مقاله قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از کلیه حمایت‌های مالی، معنوی دانشگاه شهرکرد در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری نمایند. همچنین از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این پژوهش کد اخلاق را به شماره IR.SKU.REC.1401.030 از کمیته اخلاق دانشکده/دانشگاه شهرکرد دریافت کرده است. نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ گونه منافع مالی رقابتی یا روابط شخصی شناخته‌شده‌ای که ممکن است بر کار گزارش‌شده در این مقاله تأثیر گذاشته باشد، ندارند.

منابع

- حسین‌پور، رضا، جعفری‌نعمی، کاظم، و قطبی‌راوندی، محمدرضا. (۱۳۹۴). تعیین میزان مواجهه شغلی رانندگان و اطرافیان دروگر چهارچرخ با آلودگی صوتی. طباطبایی کلور، رضا، خسروی بیزکی، مجید و موسوی، سید رضا. (۱۳۹۷). ارزیابی مواجهه کاربر با ارتعاش و صدای تولید شده توسط یک روتوتیلر باغی. مهندسی بیوسیستم ایران. ۱۴۹: ۱۳۹-۱۴۸.
- لشگری، مجید، و ملکی، علی. (۱۳۹۴). مقایسه تراز فشار صوت دو نوع کمباین مورد استفاده در ایران و بررسی برخی از عوامل موثر بر آن. سلامت کار ایران، ۱۲(۴)، ۲۰-۱۱. SID. <https://sid.ir/paper/510529/fa>
- لشگری مجید، عرب محمدرضا، نجفی محسن، ملکی علی. (۱۴۰۰). همبستگی سیگنال‌های مغزی و سیگنال‌های صدای تراکتور مبتنی بر تحلیل

REFERENCES

- Alimohammadi, I., Rafieepour, A., Ashtarinezhad, A., Hosseini, A. F., Tabatabaei, S. H., Jafari, H., & Asadi, R. (2025). Occupational noise annoyance and sensitivity as potential contributors to oxidative stress in metal industry workers. *Scientific Reports*, 15(1), 30280. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30280-x>
- Asady, H., Forouharmajd, F., Pourabdian, S., Jalali, M., Ahmadi, A., Ansari, F., & Fuente, A. (2025). Ear canal role and psychoacoustic parameters: Loudness, sharpness, roughness, and fluctuation strength. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 14(2), 10.
- Barač, Ž., Plaščak, I., Radočaj, D., & Jurišić, M. (2025). The impact of noise on agricultural tractor operator in relation to certain operational parameters: An analytical hierarchy process (AHP) approach. *Agriculture*, 15(5), 466. <https://doi.org/10.3390/agriculture15050466>
- Barač, Ž., Radočaj, D., Plaščak, I., Jurišić, M., & Marković, M. (2024). Prediction of noise levels according to some exploitation parameters of an agricultural tractor: A machine learning approach. *AgriEngineering*, 6(2), 995–1007. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6020057>
- Barač, Ž., Jurić, M., Plaščak, I., Jurić, T., & Marković, M. (2025). Assessing whole-body vibrations in an agricultural tractor based on selected operational parameters: A machine learning-based approach. *AgriEngineering*, 7(3), 72.
- Bigras, C., Duda, V., & Hébert, S. (2024). Sensory and affective dimensions in loudness perception: Insights from young adults. *Hearing Research*, 454, 109147. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2024.109147>
- Cecchini, M., Assettati, L., Rossi, P., Monarca, D., & Riccioni, S. (2024). Noise exposure, prevention, and control in agriculture and forestry: A scoping review. *Safety*, 10(1), 15. <https://doi.org/10.3390/safety10010015>
- Chen, P., Xu, L., Tang, Q., Shang, L., & Liu, W. (2022). Research on prediction model of tractor sound quality based on genetic algorithm. *Applied Acoustics*, 185, 108411. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108411>
- Di, G., Liu, X., Zheng, Y., & Wang, L. (2023). Psychoacoustic evaluation methods and sound quality analysis: A review. *Applied Acoustics*, 210, 109451. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109451>
- Di Stefano, V., Cecchini, M., Riccioni, S., Di Domenico, G., & Bianchini, L. (2025). Exposure to noise from agricultural machinery: Risk assessment of agricultural workers in Italy. *AgriEngineering*, 7(3), 87. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7030087>
- Fastl, H., & Florentine, M. (2011). Subjective and psychoacoustical evaluation of sounds. In T. D. Rossing (Ed.), *Springer handbook of acoustics* (2nd ed., pp. 293–324). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7160-5_10
- Fornaris, A. (2024). Evaluation of the impact of cabin noise characteristics on the comfort and annoyance levels of off-road vehicle occupants. *Journal of Acoustical Engineering*, 45(3), 123–135.
- Golmohammadi, R. (2023). Noise prediction indices in common closed rooms. *Journal of Vibration and Sound*, 11(22), 31–37. (In Persian)
- Hosseinpour, R., Jafari Naeimi, K., & Ghotbi Ravandi, M. R. (2015). Determination of occupational exposure of drivers and bystanders of the four-wheel mower to noise pollution. *Journal of Hygiene and Development*, 4(1), 52–64. (In Persian)
- ISO. (2015). ISO 7216: Agricultural and forestry tractors—Measurement of noise emitted when in motion. International Organization for Standardization.
- Jafari, M. J., Sadeghian, M., Khavanin, A., Khodakarim, S., & Jafarpisheh, A. S. (2019). Effects of noise on mental performance and annoyance considering task difficulty level and tone components of noise. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 17(1), 353–365. <https://doi.org/10.1007/s40201-019-00357-4>
- Jahanbakhshi, A., Ghamari, B., & Heidarbeigi, K. (2016). Effect of engine rotation speed and gear ratio on the acoustic emission of John Deere 1055I combine harvester. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(3), 106–112.
- Lashgari, M., Arab, M. R., Nadjafi, M., & Maleki, A. (2021). Correlation of brain signals and tractor sound signals based on fractal analysis. *Iranian Journal of Ergonomics*, 9(2), 69–81. (In Persian)
- Mehrabi Matin, A., Alefi, M., Monazzam, M. R., Mazloumi, A., & Azam, K. (2022). Study of noise loudness and sharpness effects on cognitive performance among male students of Tehran University of Medical Sciences. *Journal of Health and Safety at Work*, 12(1), 67–81.
- National Institute for Occupational Safety and Health. (1998). *Criteria for a recommended standard:*



- Occupational noise exposure*. U.S. Department of Health and Human Services. Occupational Safety and Health Administration. (2023). *Occupational noise exposure*. U.S. Department of Labor. <https://www.osha.gov/noise>
- Park, Y., & Lee, S. (2012). Evaluation of lawn tractor noise using acoustic and psychoacoustic parameters. *Journal of Sound and Vibration*, 331(11), 2583–2593. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.01.006>
- Ricketts, M. (2020). The case of the noisy workplace. *Professional Safety*, 65(4), 45–55.
- Tabatabaei Kolor, R., Khosravi Bizaki, M., & Mousavi, R. (2018). Evaluation of operators' exposure to vibration and noise generated by an orchard rototiller. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 49(1), 139–148. (In Persian)
- World Health Organization. (2021). *Environmental noise guidelines for the European Region*. World Health Organization. <https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>
- Zwicker, E., & Fastl, H. (2007). *Psychoacoustics: Facts and models* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68888-4>