فصلنامه مهندسی ترافیک، سال بیست و چهارم، شماره ۹۶، بهار ۱۴۰۳، ص. ۵۳-۳۳

ارزیابی ریسک زیست‌محیطی و پهنه‌بندی مخاطره آلودگی صوتی در ایستگاه-های (روباز و سرپوشیده) مترو تهران

هومن بهمن‌پور، استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده فنی و مهندسی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران
E-mail: hooman.bahmanpour@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق، آلودگی صوتی در خط ۵ متروی تهران موردبررسی قرار گرفت. پارامترهای تراز فشار صوت (SPL یا LP)، میانگین تراز صوتی ($\overline{LP}$)، تراز پیوسته معادل صدا (Leq) و دز روزانه فردی $L_{AEp,d}$ محاسبه گردید. بدین منظور، از روش ایستگاهی برای سنجش و اندازه‌گیری میزان تراز صوت استفاده گردید. تراز صوتی توسط دستگاه پرتابل و نرم‌افزار Decible X نسخه ۲۰۱۹ اندازه‌گیری گردید و با استاندارد صوتی (OSHA-90 dBA) مورد مقایسه قرار گرفت. مدت‌زمان اندازه‌گیری در هر ایستگاه ۳۰ دقیقه و هرکدام ۳ بار تکرار گردید. از روش کیفی و روش دوعاملی برای ارزیابی ریسک استفاده شد. نتایج نشان داد که کمترین میانگین تراز صوتی ۶۹,۷۳ دسی‌بل است. همچنین؛ بیشترین میانگین تراز صوتی ۹۲,۳ دسی‌بل است. هیچ‌یک از ایستگاه‌های واقع در طول مسیر دارای تراز فشار صوت در حد استاندارد داخلی نیستند. میانگین تراز صوت در طول مسیر برابر با ۷۴,۴ dB است. تراز معادل مواجهه صوت (Leq ۸۴,۴ dBA) دسی‌بل برآورد می‌گردد. همچنین؛ دز روزانه فردی $L_{Ep,d}$ ک مسافر در ایستگاه‌های واقع در طول مسیر مطالعاتی برابر با ۸۵,۶۵ دسی‌بل است. مدت‌زمان مجاز جهت حضور و تردد در مسیر برای مسافران حدود ۱ ساعت (۵۶ دقیقه) تعیین گردید که با وضعیت موجود مطابقت دارد. از سوی دیگر، تفاوت چندانی میان تراز صوت در نوبت اول و سوم مشاهده نمی‌شود (در حد ۲,۵ دسی‌بل). تراز معادل ۸۲,۵ دسی‌بل برآورد گردید. دز روزانه فردی $L_{Ep,d}$ ک مسافر در طول مسیر و در داخل کابین ۸۳,۷۵ محاسبه شد. شدت ریسک مربوط به آلودگی صوتی در مسیر موردمطالعه، زیاد (شدید) است و احتمال وقوع نیز ممکن (محتمل) است. درنتیجه، سطح ریسک **قابل‌توجه** ارزیابی می‌گردد. درجه ریسک نیز، 3B تعیین می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: سنجش صوت، تراز صوت، تراز معادل، حدود مجاز مواجهه، خط ۵ مترو

۱. مقدمه

باوجودآنکه امواج صوتی به‌عنوان یک عامل ضروری در زندگی انسان محسوب می‌شوند، اما در برخی از موارد و در شرایط خاص، شنیدن این امواج صوتی چندان خوشایند نبوده و مواجهه بیش از حد مجاز با صدا سبب آزار و افت شنوایی در انسان می‌گردد (Agrawal et al., 2010: 236). آلودگی صوتی پخش و انتشار هرگونه صدا و ارتعاش، بیش از حد مجاز در فضای باز (غیر سرپوشیده) تعریف می‌گردد و یکی از مصادیق آسیب‌های محیط زیستی است (Vogiatzis, 2019: 71) به‌طوری‌که دارای پیامدهای کاملاً بارز و مشخصی بر سلامتی انسان و اکوسیستم‌ها است (WHO, 2018). مواجهه با صدا نه‌تنها در محیط کاری رخ می‌دهد، بلکه فعالیت‌های غیر شغلی ازجمله اوقات فراغت، حمل‌ونقل، خرید و غیره را نیز شامل می‌شود (Clark et al., 2013: 8). آلودگی صوتی نقش محسوسی بر نارضایتی از فضا دارد (Parkes et al., 2002: 2420). کاهش آلاینده‌های صوتی در فضای باز به‌طوری‌که مطلوب اکثر کاربران باشد، تعیین‌کننده آسایش صوتی است (Yang and Kang, 2005: 213). سروصدا علاوه براثر سوء بر سیستم شنوایی، به‌عنوان یک استرسور عمومی بر روی قلب و عروق اثر گذاشته و موجب تحریک اعصاب، اضطراب، مشکلات روحی و روانی می‌شود (Bazaras, 2016: 22). در برخی بررسی‌ها اثرات صدا به‌عنوان یک عامل استرس‌زا موردمطالعه قرارگرفته و در آن‌ها از آلودگی صوتی به‌عنوان یک فاکتور خطرناک برای سلامت انسان‌ها یاد شده است (Zannin et al., 2003: 245). استرس ایجادشده توسط آلودگی صوتی، ماهیت روان‌شناختی دارد (Sommerhoff et al., 2004; Babisch et al., 2013). همچنین؛ مواجهه با صدا می‌تواند کارایی فرد را به‌ویژه در کارهای فکری تحت تأثیر قرار دهد (Dobie, 2002: 666). امروزه انسان‌ها به دنبال مکان‌هایی هستند که از کیفیت محیطی بالایی برخوردار باشد. انسان‌ها محیط جذاب، تمیز، کم‌جمعیت و عاری از آلودگی را دوست دارند (Haji Beg Lou & Morsal, 2021: 398).

۲. مفاهیم پژوهش

توسعه جوامع شهرنشین منجر به بروز تحولاتی در زندگی شهری شده است که یکی از جلوه‌های آن بروز ناهنجاری‌ها در جوامع شهری است. ازجمله این موارد می‌توان به انواع آلودگی‌های محیطی اشاره داشت که سبب کاهش کیفیت زندگی شهری می‌گردد (Malekshahi et al., 2020: 111). کیفیت زندگی نشان‌دهنده ویژگی‌های کلی اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی است و می‌تواند به‌عنوان ابزار قدرتمندی برای نظارت بر برنامه‌ریزی توسعه اجتماعی به کار رود (Mousavi, and Bagheri Kashkoli, 2014: 97). امروزه کیفیت زندگی به‌عنوان کلیدی‌ترین مفهوم در برنامه‌ریزی شهری مطرح است. بر این اساس در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته برنامه‌ریزان در تلاش برای نمایش سطوح کیفیت زندگی در سطوح مختلف جغرافیایی هستند تا از این طریق بتوانند راهکارهای بهینه‌ای را برای بهبود کیفیت زندگی (و حتی محیط‌های کاری و ...) فراهم سازند (Pourqorban, 2018: 12). کیفیت زندگی توسط شاخص‌های گوناگون ذهنی و عینی تعیین می‌شود. یکی از شاخص‌های محیطی زیستی در کیفیت زندگی، میزان تنش‌ها و استرس‌های محیطی است. بر این مبنا، آلودگی صوتی نقشی بسیار پررنگ در بیان رضایت و یا نارضایتی شهروندان نسبت به محیط‌های کاری و یا زندگی دارد (Keles, 2010). به‌طورکلی می‌توان گفت محیط پر سروصدا علاوه بر آنکه موجب اختلال در مکالمه و تفهیم مطالب می‌شود، باعث بی‌دقتی فعالیت‌های مغزی و ناهماهنگی کارهای فکری نیز می‌گردد. به‌علاوه از قدرت فراگیری کاسته شده و بر تعداد اشتباهات افزوده می‌شود. در اثر صداهای ناگهانی و بلند که موجب دلهره و ترس می‌گردد، فشارخون به‌ویژه فشار داخل جمجمه بالا رفته، ترشحات بزاق کم شده و دهان خشک

می‌شود (Babisch and Van Kamp, 2019). مطابق با مطالعات سازمان بهداشت جهانی و سازمان جهانی کار، نشانه‌های عوارض فیزیولوژیکی مرتبط با آلودگی صوتی در انسان در تراز ۶۰-۳۰ دسی‌بل بروز می‌نماید. همچنین؛ عوارض شدید فیزیولوژیکی و بیماری‌های ناشی از آن در ترازهای بالاتر و محدوده ۱۲۰-۸۵ دسی‌بل رخ می‌دهد (Arsalan et al., 2002; Hassmen and Koivula, 2001). مواجهه با سطوح بالاتر صدا می‌تواند اثرات قابل‌ردیابی یا اندازه‌گیری فیزیولوژیک بر بدن تحمیل نماید. این درجه از اثرات را «استرین[1]» یا تنش می‌گویند. در اینجا علاوه بر اثرات ذهنی تغییرات در امواج عصبی و مغزی، تغییرات در فشارخون و ضربان قلب، سخت شدن دیواره عروق و تغییرات برخی هورمون‌ها مانند آدرنالین و کورتیزول قابل‌سنجش خواهد بود (Hansell et al., 2013). طبق گزارش سازمان جهانی بهداشت، مواجهه با تراز فشار صوت ۸۰ دسی‌بل می‌تواند سبب بروز رفتارهای پرخاشگرانه در افراد شود. آلودگی صوتی در ترازهای بالای فشار صوت (بیش از ۸۵ دسی‌بل) باعث اثرات مستقیم به روی اندام شنوایی شامل تغییرات موقت آستانه شنوایی (TTS[2]) و در صورت تماس طولانی‌مدت، باعث ایجاد افت دائم شنوایی (PTS[3]) می‌گردد. طبق تحقیقات پزشکی، در افرادی که مدتی در معرض صدایی با شدت ۸۰dB(A) بوده‌اند، علائمی مبنی بر کاهش قدرت شنوایی مشاهده شده است (Stansfeld et al., 2000; Evans and Hygge, 2007). اختلال در سیستم گوارشی و افزایش کلسترول و تری‌گلیسرید و تشدید دیابت از عوارض شایع مواجهه با صدا است (Evans and Hygge, 2007). قرارگیری در معرض سروصدا در بلندمدت می‌تواند منجر به آسیب‌های شنوایی گردد به‌طوری‌که حتی افراد متوجه آن نخواهند شد (Vogel et al., 2007; Muhr et al., 2007; Sorensen et al., 2007).

شکل ۱ که معروف به هرم اثرات صدا است، پیامدهای آلودگی صوتی را بر اساس دو پارامتر شدت و تعداد افراد در معرض، نشان می‌دهد. در سال‌های اخیر آلودگی صوتی و پیامدهای ناشی از آن، به یک موضوع با اهمیت در تحقیقات علمی تبدیل شده است. پایش آلودگی صوتی در سه زمینه متفاوت صورت می‌گیرد که عبارت‌اند از: ۱- ترافیک و حمل‌ونقل ۲- فعالیت‌های صنعتی ۳- ورزش، تجارت و اماکن تفریحی. امروزه به‌خوبی مشخص شده است که آلودگی صوتی یک مشکل بالقوه برای سلامتی، ارتباطات و لذت بردن از زندگی اجتماعی است (Sukru et al., 2006).

شکل ۱. هرم اثرات صدا (منبع: WHO, 2018)

هدف توسعه پایدار شهری، ایجاد شهری سالم مطابق با نیازهای کاربران آن است. کاهش آلودگی‌های محیطی، ارتقای بهسازی محیط، افزایش در بهره‌وری انرژی و ارتقای سرانه‌های خدماتی، آموزشی، بهداشتی و ... ازجمله این موارد است. مطابق استانداردهای سازمان حفاظت از محیط‌زیست ایران، حد مجاز تراز معادل فشار صوت (Leq dBA) برای منطقه مسکونی از ۷ صبح تا ۱۰ شب ۵۵ دسی‌بل و از ۱۰ شب تا ۷ صبح ۴۵ دسی‌بل است (OEL, 2017; Karimi et al., 2011). استاندارد آژانس حفاظت محیط‌زیست کشور آمریکا (EPA) برای میزان صدا در مناطق باز (زمین‌های بازی) حداقل ۵۵ دسی‌بل و حداکثر ۷۰ دسی‌بل است. مطابق با استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای مکان‌های باز و عمومی،

تراز صوتی در ۱ ساعت نباید بیشتر از ۸۵ دسی‌بل باشد (WHO, 2018).

هدف از انجام این تحقیق، سنجش تراز صوت و ارزیابی ریسک زیست‌محیطی ناشی از آن در خط ۵ متروی تهران است.

۳. ادبیات پژوهش

یکی از متداول‌ترین و مهم‌ترین منابع آلودگی صدا در محیط‌زیست شهری صدای ناشی از وسایط نقلیه نظیر ترافیک شهری، فرودگاه و سیستم راه‌آهن شهری (مترو) است. تردد وسایط نقلیه در خیابان‌ها و بزرگراه‌ها اثرات روانی نامطلوبی بر مردمی می‌گذارد که در اطراف این نواحی زندگی و کار می کنند. رشد و توسعه واحدهای صنعتی و مراکز تجاری خود عامل دیگری است که انسان را در معرض صداهای ناخواسته قرار می‌دهد. با توجه به رشد فزاینده جمعیت و افزایش ترددها در شهر بزرگی چون تهران نیاز به تأسیس و بهره‌برداری از راه‌آهن شهری بیش‌ازپیش احساس می‌شود، ولیکن قبل از به‌کارگیری این سیستم حمل‌ونقل لازم است توجهی خاص به آلودگی زیست‌محیطی ناشی از آن به‌ویژه انتشار صدای ناشی از بهره‌برداری این سیستم مبذول داشت (Bahmanpour & Fahiminejad, 2021). با وجودی که ظرفیت جابه‌جایی مسافر در دو خط مترو روزانه بالغبر دو میلیون نفر برآورد شده است، ولی نباید ازنظر دور داشت که نظیر هر شاخه‌ای از تکنولوژی عواقبی نیز به همراه خواهد داشت. صدای ایجادشده از راه‌آهن شهری که ناشی از به‌کارگیری ماشین‌های مختلف برقی، لکوموتیوها، حرکت چرخ‌ها روی ریل، سیگنال‌های خطر، تجهیزات تعمیر و نگهداری و بالاخره تجهیزات ساختمانی است، خود عامل دیگری است که صدا را در زندگی شهرنشینی خواه‌ناخواه افزایش می‌دهد.

مدل‌سازی تولید آلودگی صوتی توسط منابع مختلف در حالت کلی فرایندی پیچیده است. غیرخطی بودن اثر منابع مختلف و اثر ویژگی‌های فضایی اعم از موانع و سطوح موجود و نیز تأثیر مستقیم تراکم منابع ازجمله عواملی است که باعث می‌شود ارزیابی تحلیلی تولید آلودگی صوتی فرایندی سرراست نباشد.

ریسک با ابهام در ارتباط است؛ هر چه میزان ابهامات و ناشناخته‌ها در مورد یک فرآیند یا موضوع موردعلاقه بیشتر باشد، پارامترهای منفی زیادی به‌عنوان عامل تهدیدکننده وجود خواهد داشت که تصمیم‌گیری را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

ارزیابی ریسک، فرآیندی است که نتایج آنالیز ریسک (یعنی ریسک‌های برآورد شده) را با رتبه‌بندی و یا مقایسه آن‌ها با مقادیر هدف (اهداف عملکردی یا الزامات قانونی) برای تصمیم‌گیری به کار می‌برد. ارزیابی ریسک نشان می‌دهد که ریسک‌ها قابل‌قبول هستند یا خیر (Chang et al., 2021).

تاکنون، در سطح جهان، مطالعات متعددی جهت کاهش مشکل آلودگی صوتی در شهرها و سکونتگاه‌های مختلف انسانی انجام شده است (WHO, 2018; Babisch et al., 2009; Abbaspour, 2016; WG-AEN, 2007). در ایران بیش از دو دهه است که آلاینده‌های زیست‌محیطی آب، خاک و هوا موردتوجه روزافزون قرار گرفته است. لیکن؛ در مورد آلودگی صوتی هنوز جای کار بسیار است (Ghanbari et al., 2011). درحالی‌که افزایش فعالیت‌های مختلف در خدمات شهری موجب گردیده است تا آلودگی صدا به‌عنوان یک مشکل اجتماعی بروز نماید، متأسفانه اهمیت و جایگاه آلودگی صدا در کشور ما مانند بیشتر آلودگی‌ها چندان روشن و مشخص نشده است. در تحقیقی که توسط (Taheri Hosseinabadi et al., 2019) صورت گرفت، میزان آلودگی صوتی را در مسیر کوهنوردی در درکه تهران بررسی نمودند و مشخص گردید که بخش اعظمی از زون مطالعاتی دارای تراز بالاتر از استاندارد بوده است و نشان دادند که حدود ۲۵-۲۰ درصد از مربیان و معلمان تربیت‌بدنی تحت تأثیر صداهای بالاتر از حد مجاز قرار می‌گیرند؛ بنابراین لازم است که به‌طور دقیق تمام عواملی که می‌توانند بر ایجاد سروصدا در این محیط‌ها تأثیر بگذارند، مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گیرند تا

دستورالعمل‌هایی را برای مسئولان و برنامه‌ریزان جهت مدیریت استرس و برنامه‌های حفاظت از شنوایی، تهیه کنند.

سرخیل و دیگران (۱٤۰۱)؛ آلودگی صوتی در ایستگاه‌های مترو دروازه دولت و تجریش تهران را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، مورد مدل‌سازی قرار دادند. مقادیر اندازه‌گیری شده در فاصله‌های معین از لبه سکو نشان داد که میزان آلودگی صدای حاصل از ورود قطار به سکو، ورود هم‌زمان دو قطار به سکو، ورود قطار بدون توقف و عبور از سکو در بیشتر زمان‌ها، بالاتر از حد استاندارد بوده و در برخی ایستگاه‌های برداشت، به بالای ۱۰۰ دسی‌بل هم می‌رسید که این خود نشان‌دهنده شرایط بحرانی آلودگی صوتی در این سکوهای مترو بوده است.

سالارپور و دیگران (۱۳۹۵)؛ وضعیت آلودگی صوتی و عوامل مؤثر بر آن را در ایستگاه‌های متروی شهر تهران بررسی کردند. نتایج نشان داد که سطح صدای تولیدشده در حالت‌های ورود، توقف و خروج مترو به ترتیب برابر ۸۵،۸۷ ۸۱،٦۹ و ۸۷،٤۵ دسی‌بل بوده که این مقادیر بیش‌ازحد مجاز (۷۵ دسی‌بل) است.

نری موسی و سلطانیان (۱۳۹۵)؛ تأثیر آلودگی صوتی ناشی از ترافیک را بر سلامت شهروندان امیدیه بررسی نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که شدت تراز صوت در تمام بازه‌های زمانی موردسنجش بالاتر از حد استاندارد بوده است. گل‌محمدی (۱۳۹۵)؛ اقدام به تدوین راهنمای اندازه‌گیری صدا و ارتعاش در محیط کار نمود که توسط مرکز سلامت محیط کار مورد تأیید قرارگرفته و برای تمامی مطالعات الزامی و قابل‌اجرا است. در این دستورالعمل علاوه بر ذکر تعاریف استاندارد از مباحث صوت و ارتعاش، اقدام به ارائه ضوابط مختلف در مورد مفاهیم و حدود مجاز و نیز نحوه اندازه‌گیری گردیده است. نصیری و دیگران (۱۳۹٤)؛ میزان آلودگی صوتی در منطقه ۵ تهران را بررسی کردند. یافته‌های تحقیق نشان داد که میانگین تراز صدای اندازه‌گیری شده در این منطقه ۷۲،۳ دسی‌بل بوده است. همچنین ماکزیمم تراز معادل صدا نیز L90, L10 شاخص صدای ترافیک برابر با ۹۲،۲ دسی‌بل و تراز آلودگی صدا نیز ۸۰،۳ دسی‌بل بوده است. صیادی اناری و موفق (۱۳۹۳)؛ با استفاده از تکنیک آماری و GIS آلودگی صوتی شهر بیرجند را مورد ارزیابی قرار دادند. نقشه‌های هم‌تراز نشان‌دهنده تأثیر مستقیم ترافیک بر تراز صوت بوده است. رنجبر و دیگران (۱۳۹۱)؛ اقدام به مدل‌سازی ۳ بعدی آلودگی صوتی با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی شهری و نرم‌افزار GIS در منطقه ۳ تهران کردند. قنبری و دیگران (۱۳۹۰)؛ آلودگی صوتی شهر تبریز در مناطق تجاری و مسکونی پرترافیک را بررسی کردند. بدین منظور ۲ ایستگاه منتخب را در طی بازه زمانی موردسنجش قرار داده و سپس با استاندارد کشور ایالات‌متحده موردسنجش و تطبیق قرار دادند. یافته‌های تحقیق نشان داد که آلودگی صوتی در هر ۲ ایستگاه انتخابی بالاتر از حد مجاز بوده است. عباسپور و میرحیدری در سال ۱۳۸۹ اقدام به مدل‌سازی انتشار آلودگی صوتی در خطوط متروی آن زمان تهران نمود. مطابق با برآورد صورت گرفته توسط آن‌ها در خط متروی تهران – کرج – مهرشهر عمده منبع تولید صدا واگن‌های برقی نیروی محرکه شامل موتور، جعبه‌دنده و سیستم خنک‌کننده و نیز حرکت چرخ‌ها روی ریل بودند. حمیدی و دیگران (۱۳۸۹)؛ آلودگی صوتی در راه‌آهن تهران و حومه را ارزیابی و بررسی کردند. نتایج نشان داد که میانگین تراز معادل صوتی در داخل کابین‌ها کمتر از حد مجاز اما در داخل واگن‌ها بیشتر از حد مجاز است. لذا اقدامات کنترلی لازم و واجب بوده است. بابیچ و دیگران (۲۰۱۳)؛ رابطه میان تراز صوتی بالا و بروز عوارض قلبی و عروقی را بررسی نمودند و مشخص کردند که با افزایش تراز صوت از حد استاندارد (۷۵ دسی‌بل) به بالا به ازای هر ۵ دسی‌بل عوارض محسوسی در سیستم گردش خون افراد بروز می‌نماید. آگراوال و دیگران (۲۰۱۰)؛ در تحقیقی اقدام به تعیین آستانه تحمل شنوایی در مورد انواع اصوات در گروه‌های سنی مختلف نمودند و نتیجه گرفتند که میزان تحمل و آستانه شنوایی افراد با پارامترهای گوناگونی در ارتباط است. به‌طوری که سن، جنسیت، سابقه بیماری، ورزشکار بودن و محیط

زندگی در این میان اثرگذار است. جاناس بازاراس در سال ۲۰۰۶ آلودگی صوتی داخل ۲ نوع قطار باری و مسافربری در روسیه را موردبررسی قرار داد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، میزان تراز صوتی در کابین هر دو قطار بیش‌ازحد مجاز بوده است. زنین در سال ۲۰۰۶ آلودگی صوتی را در داخل ۳ نوع اتوبوس شهری برزیل موردبررسی قرار داد. بر اساس ایزو ۱۹۹۹ نتایج نشان داد که کابین هر سه اتوبوس ایمن بوده‌اند.

هدف از انجام این تحقیق، سنجش و اندازه‌گیری تراز صوتی در خطوط و ایستگاه‌های مترو تهران و ارزیابی ریسک زیست‌محیطی مربوط به آن است.

٤. روش پژوهش

در این تحقیق، خط ۵ متروی تهران موردبررسی قرار گرفت. خط ۵ متروی تهران که از میدان صادقیه در تهران شروع و به ایستگاه گلشهر در کرج (استان البرز) ختم می‌شود، درگذشته خطی درون استانی محسوب می‌گردید. ولیکن با تبدیل کرج به استان البرز و جدا شدن آن از تهران، عملاً این خط مترو تبدیل به یک خط برون‌استانی و به عبارتی میان استانی گردید. این خط دارای ٤٣ کیلومتر طول و ١١ ایستگاه است. بدین منظور، از روش نقطه‌ای و ایستگاهی برای اندازه‌گیری میزان تراز صوت استفاده گردید. در هر یک از ایستگاه‌ها تمامی ترازهای صوتی (ماکزیمم، میانگین و مینیمم) و همچنین تراز معادل سنجش و اندازه‌گیری شدند. در ادامه، اقدام به ارزیابی ریسک زیست‌محیطی ایستگاه‌ها و بافر آن‌ها شد. سپس، از طریق استفاده از نرم‌افزار Arcview در محیط GIS اقدام به پهنه‌بندی شد (شکل ۲).

شکل ۲. نمایی از خط ۵ مترو و ایستگاه‌های موردمطالعه

داده‌ها به طریق برداشت میدانی استخراج شده‌اند. روش تجزیه‌وتحلیل داده‌ها نیز به روش تحلیلی و مقایسه تطبیقی با

استانداردهای ملی و بین‌المللی است. در گام نخست، از طریق برداشت و ثبت نقاط زمینی (GPS[٤]) اقدام به تدقیق و تعیین مسیر موردمطالعه گردید.

سپس نقاط زمینی برداشت‌شده برای تولید نقشه و تعیین مساحت سایت وارد نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS[٥] گردیدند و نقشه محدوده و مسیر موردمطالعه با در نظر گرفتن عرض باند ۱۰ متر از هر طرف، تهیه شد. به‌منظور تهیه نقشه تراز صوتی در مسیر خط ۵ متروی تهران، از روش ایستگاهی برای ثبت نقاط اندازه‌گیری استفاده گردید. بر این اساس، ۱۱ ایستگاه مذکور موردسنجش قرار گرفتند. مشخصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری یازده‌گانه مسیر

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	مختصات ایستگاه در سیستم LatLon
۱	کرج گلشهر	۳۵,۷٦٤۸۵ – ۵۱,۰٦۵۹۹
۲	محمد شهر	۳۵,۷٦۷٤۵ – ۵۱,۰٦٤۷۱
۳	کرج	۳۵,۷٦۹۹۰ – ۵۱,۰٦٤۰۱
٤	اتمسفر	۳۵,۷٦۲۸۸ – ۵۱,۰٦۲۲۳
۵	گرم دره	۳۵,۷٦۵۰۰ – ۵۱,۰٦۱۱٦
٦	وردآورد	۳۵,۷٦۵۱۲ – ۵۱,۰٦۱۰۹
۷	ایران‌خودرو	۳۵,۷٦۵۹٤ – ۵۱,۰٦۰۸۹
۸	چیتگر	۳۵,۷٦٦٤٤ – ۵۱,۰٦۹۹٤
۹	ورزشگاه آزادی	۳۵,۷٦۹۷٦ – ۵۱,۰٦۰٦۵
۱۰	ارم سبز	۳۵,۷٦۰۲۵ – ۵۱,۰٦۰۳۰
۱۱	صادقیه	۳۵,۷٦۰۷٦ – ۵۱,۰٦۹۹۳

(منبع: یافته‌های تحقیق)

تراز صوتی منتشره در مسیر عبوری کاربران در فاصله یک متری، در تراز A و به‌صورت تراز معادل توسط دستگاه پرتابل و نرم‌افزار Decible X نسخه ۲۰۱۹ اندازه‌گیری گردید و با استاندارد صوتی (OSHA[٦] 90 dBA-) مورد مقایسه قرار گرفت. در هنگام ارزیابی صدا، میکروفن صداسنج بر اساس دستورالعمل‌های موجود (Dursun & Özdemir, 2014) از سطوح انعکاسی (مانند دیوارها) حداقل ۳ متر و از سطح زمین ۱,۵ متر فاصله داشت (EPA. 2014). همچنین؛ به اندازه طول بازو از بدن اپراتور فاصله رعایت شده است. لازم به ذکر است که خطای تا ٦ دسی‌بل در هنگام ارزیابی قابل‌اغماض است (Motallebi Kashani, 2002). اندازه‌گیری در روزهای بدون بارش و حداقل وزش باد انجام گرفت. مدت‌زمان اندازه‌گیری در هر ایستگاه ۳۰ دقیقه (طبق استاندارد هوای آزاد ایران، تعریف‌شده از سوی سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران) و هرکدام ۳ بار تکرار گردید. اولین اندازه‌گیری ۷/۳۰–۷ صبح، دومین اندازه‌گیری ۱۲/۳۰–۱۲ ظهر و سومین اندازه‌گیری ۱۷/۳۰–۱۷ عصر بوده است.

به‌منظور اعتبارسنجی، در ابتدا و در ایستگاه اول، از ۳ دستگاه جداگانه اقدام به سنجش تراز صوتی گردید و با توجه به آنکه اختلاف تراز صوتی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه‌های مختلف از ۱ دسی‌بل کمتر بوده است، درنتیجه ارزیابی مورد تأیید قرار گرفت.

در این تحقیق، پارامترهای تراز فشار صوت (SPL[٧] یا LP)، میانگین تراز صوتی ($\overline{LP}$)، تراز پیوسته معادل صدا (Leq) و دز روزانه فردی $L_{AEp,d}$ محاسبه گردید. بدین ترتیب که ابتدا در هر ایستگاه، میزان تراز فشار صوت (SPL (dBA توسط دستگاه پرتابل و بر اساس رابطه زیر اندازه‌گیری و در جدول مربوطه ثبت گردید (South, 2004).

$$SPL(dB) = LP = 10\,log\left(\frac{P^2}{P_0^2}\right) = 20\,log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (1)$$

$$SPL = 20\,log\,P + 94$$

در این رابطه، P فشار مطلق صوت در نقطه اندازه‌گیری است و P_0 نیز فشار مبنا بوده که برابر با 2×10^{-5} پاسکال (Pa) است. به علت ماهیت لگاریتمی ترازهای فشار صوت، نمی‌توان مستقیماً اعمال ریاضی نظیر جمع، تفریق و یا میانگین‌گیری را در مورد آن‌ها به کار برد. بدین‌جهت، میانگین ترازهای صوتی

در مسیر موردمطالعه از رابطه زیر برآورد می‌گردد (OEL, 2017):

$$\overline{LP}\,(dB) = 10\log\left[\frac{1}{n}\times\sum_{i=1}^{n}10^{\frac{LPi}{10}}\right] \qquad (۲)$$

در این رابطه، n: تعداد نقاط اندازه‌گیری و LPi: تراز فشار صوت در هر نقطه است.

ازآنجاکه کاربر (مسافر) در طول مدت‌زمان سفر در معرض ترازهای مختلف فشار صوت قرار می‌گیرد، به‌منظور ارزیابی دقیق، از تراز معادل مواجهه صوت (Leq ^(dBA) استفاده می‌گردد. رابطه زیر نحوه محاسبه را نشان می‌دهد (Golmohammadi, 2010):

$$L_{eq}(dB) = 10\,log\left[\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n}t_i\,10^{LP_i/10}\right] \qquad (۳)$$

در این رابطه، LP_i تراز فشار صوت در طول زمان ti با واحدهای یکسان (برحسب ساعت، دقیقه و یا ثانیه) و T زمان مرجع است. همچنین؛ دز روزانه فردی $L_{AEp,d}$ یک کاربر، در منطقه مطالعاتی از رابطه زیر محاسبه گردید (South, 2004):

$$L_{Ep,d} = Leq\ + 10\,log\frac{t}{m} \qquad (٤)$$

در این رابطه، Leq تراز معادل مواجهه صوت و t مدت‌زمان حضور مسافر در محدوده و m حداکثر مدت‌زمان قرارگیری در معرض آلودگی صوتی در استاندارد سازمان جهانی کار و برابر ۸ ساعت است. با استفاده از جدول استاندارد منتشره به‌وسیله سازمان ایمنی و بهداشت بریتانیا[۹] در زمینه کاهش صدا در محیط‌های کاری، حد زمان مجاز مواجه با صدا برای مسافران در خط ۵ متروی تهران محاسبه گردید. مراکز تحقیقاتی گوناگون نشان داده‌اند که تهیه نقشه آلودگی صوتی یکی از ابزارهای مهم مطالعه، تشخیص و کنترل آلودگی صدا در محیط‌زیست است. به‌منظور انجام تجزیه‌وتحلیل در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نقشه رقومی منطقه مطالعاتی از سازمان نقشه‌برداری کشور با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ در فرمت Shape file تهیه و پس از ایجاد نقشه GIS Ready منطقه مورد پژوهش به‌منظور تشکیل یک پایگاه داده مکانی و انجام آنالیزهای مربوطه آماده گردید. سپس داده‌های مربوط به صدا برای نقاط مجهول به روش Spline از Interpolation یا درون‌یابی به دست آمد. در این حالت، در محدوده‌های حدفاصل میان ایستگاه‌ها برای تعیین تراز فشار صوت از رابطه زیر استفاده گردید:

$$LP_2 = LP_1 - 20\,log\,{r_2}/{r_1} \qquad (۵)$$

LP_1: تراز فشار در فاصله r_1/ LP_2: تراز فشار در فاصله r_1 /r_2 و r_2: فاصله از منبع نقطه‌ای (m)

برای ارزیابی ریسک از دو روش ارزیابی کمی و کیفی استفاده شده است. ارزیابی ریسک‌های کیفی ساده به‌وسیله انجام قضاوت‌های آگاهانه در مورد یک فعالیت به‌خصوص صورت می‌پذیرد. ارزیابی‌های ساختاریافته کیفی حالتی ذهنی (غیر عینی) داشته و بر اساس قضاوت‌های شخصی صورت می‌پذیرد و به‌وسیله مشاهدات تصمیم یافته پشتیبانی می‌شود. پیامدها و فراوانی (تعداد دفعات) نوعاً بر یک پایه تقریبی (مانند پایین، وسط یا بالا) تخمین زده می‌شود (جدول ۲). در این روش برای تعیین شدت حادثه از مقایسه نتایج اندازه‌گیری‌شده با استانداردهای موجود استفاده می‌شود. همچنین برای تعیین احتمال وقوع نیز از تواتر رخداد در زمان‌های تصادفی استفاده می‌شود. درنهایت، برآیند این دو مورد نشان‌دهنده نوع ریسک است.

به‌منظور تأیید و برازش ارزیابی صورت گرفته، نتایج مستخرج در اختیار ۲ کارشناس خبره نیز قرار گرفتند تا صحت ارزیابی صورت گرفته را بررسی نمایند.

جدول ۲. روش کیفی محاسبه ریسک

بسیار شدید	شدید	شدت کم	شدت حادثه / احتمال وقوع
ریسک متوسط	ریسک قابل‌تحمل	ریسک جزئی	**بسیار نامحتمل**
ریسک قابل‌توجه	ریسک متوسط	ریسک قابل‌تحمل	**نامحتمل**
ریسک غیرقابل‌تحمل	ریسک قابل‌توجه	ریسک متوسط	**محتمل**

(منبع: یافته‌های تحقیق)

برای ارزیابی کمی ریسک از روش دو عاملی ارزیابی استفاده شده است. عددی که در این ستون قید می‌شود، حاصل از فرمول زیر است:

درجه ارزیابی جنبه = S× P

احتمال وقوع × شدت اثر = درجه ارزیابی جنبه

۵. تحلیل داده‌ها

یافته‌های تحقیق در چند بخش جداگانه ارائه می‌شود.

۵-۱ نتایج اندازه‌گیری تراز صوت در ایستگاه‌های موردمطالعه

تراز فشار صوت (Lp (dBA برای هر یک از ایستگاه‌ها در نوبت‌های جداگانه، اندازه‌گیری و ثبت گردید. همچنین؛ میانگین تراز صوتی در هر ایستگاه و هر نوبت نیز محاسبه گردید (جدول ۳).

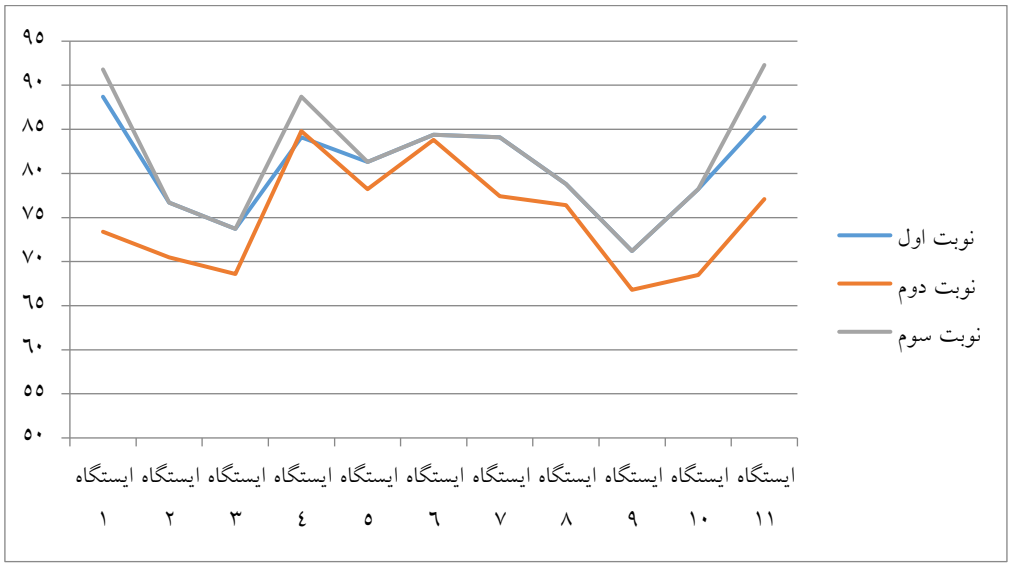
جدول ۳. متوسط ۳۰ دقیقه‌ای تراز فشار صوت در شبکه وزنی Leq (30min) dB(A) در سه بازه زمانی در ایستگاه‌های موردمطالعه

شماره ایستگاه	میزان تراز معادل صدای اندازه‌گیری شده			میانگین تراز صوتی در هر ایستگاه
	نوبت اول ۷-۷/۳۰	نوبت دوم ۱۲-۱۲/۳۰	نوبت سوم ۱۷-۱۷/۳۰	
۱	۸۸/۷	۷۳/٤	۹۱/۸	۸٤/٦۳
۲	۷٦/۷	۷۰/۵	۷٦/۷	۷٤/٦۳
۳	۷۳/۷	٦۸/٦	۷۳/۷	۷۲7
٤	۸٤/۱	۸٤/۸	۸۸/۷	۸۵/۸٦
۵	۸۱/۳	۷۸/۲	۸۱/۳	۸۰/۲٦
٦	۸٤/٤	۸۳/۸	۸٤/٤	۸٤/۲
۷	۸٤/۱	۷۷/٤	۸٤/۱	۸۱/۸٦
۸	۷۸/۸	۷٦/٤	۷۸/۸	۷۸
۹	۷۱/۲	٦٦/۸	۷۱/۲	٦۹/۷۳
۱۰	۷۸/۲	٦۸/۵	۷۸/۲	۷٤/۹٦
۱۱	۸٦/٤	۷۷/۱	۹۲/۳	۹۲/۳
میانگین	**۸۰/٦۹**	**۷۵/۰٤**	**۸۱/۹۲**	**۷۹/۲۱**

(منبع: یافته‌های تحقیق)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، کمترین تراز فشار صوت اندازه‌گیری شده در محدوده مطالعاتی، در ایستگاه شماره ۹ و در نوبت دوم برابر با ٦٦,٨ دسی‌بل بوده است. همچنین؛ بیشترین تراز فشار صوت اندازه‌گیری شده نیز متعلق به ایستگاه شماره ۱۱ و در نوبت سوم برابر با ۹۲,۳ دسی‌بل بوده است.

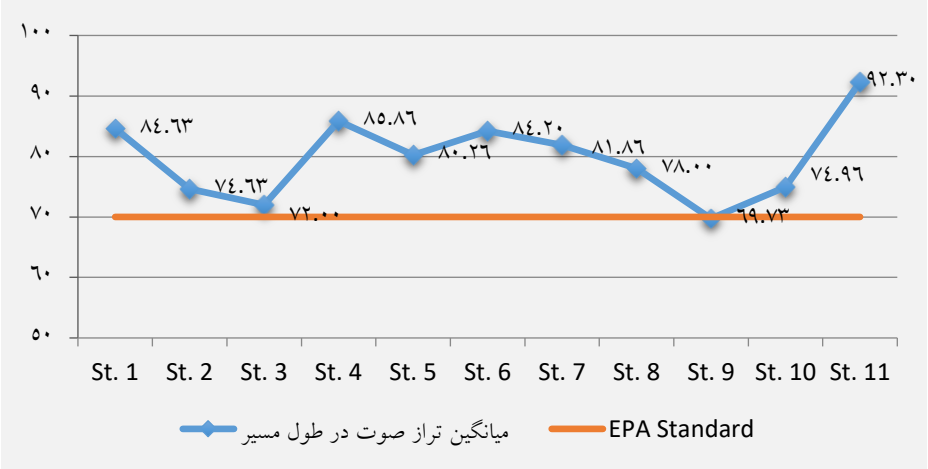
از سوی دیگر، تراز فشار صوت اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که متناسب با تغییر ساعت از صبح زود (ساعت ۷ صبح) به سمت ظهر (ساعت ۱۲ صبح) میانگین تراز فشار صوت کاهش می‌یابد؛ که احتمالاً به تعداد کمتر مسافران و تراکم خلوت‌تر در ایستگاه‌ها مربوط است. ولیکن از ظهر به سمت بعد از ظهر (۵ عصر) تراز فشار صوت افزایش می‌یابد که می‌تواند به شلوغ‌تر شدن ایستگاه‌ها مربوط باشد (شکل ۳).



شکل ۳. نمودار مقایسه‌ای تراز فشار صوت اندازه‌گیری شده Leq (30min) dB(A) در مسیر خط ۵ مترو در نوبت‌های جداگانه (منبع: یافته‌های تحقیق)

درمجموع، کمترین میانگین تراز صوتی متعلق به ایستگاه شماره ۹ (ورزشگاه آزادی) با ٦٩,٧٣ دسی‌بل است. البته خاطرنشان می‌گردد، در زمان‌های اندازه‌گیری، هیچ مسابقه ورزشی در استادیوم آزادی برگزار نمی‌گردید و احتمالاً به همین دلیل تراکم جمعیتی در این ایستگاه نسبت به سایر ایستگاه‌ها کمتر بوده که درنتیجه تراز فشار صوت نیز در این ایستگاه پایین‌تر بوده است. همچنین؛ بیشترین میانگین تراز صوتی متعلق به ایستگاه شماره ۱۱ (فلکه صادقیه) با ۹۲,۳ دسی‌بل است.

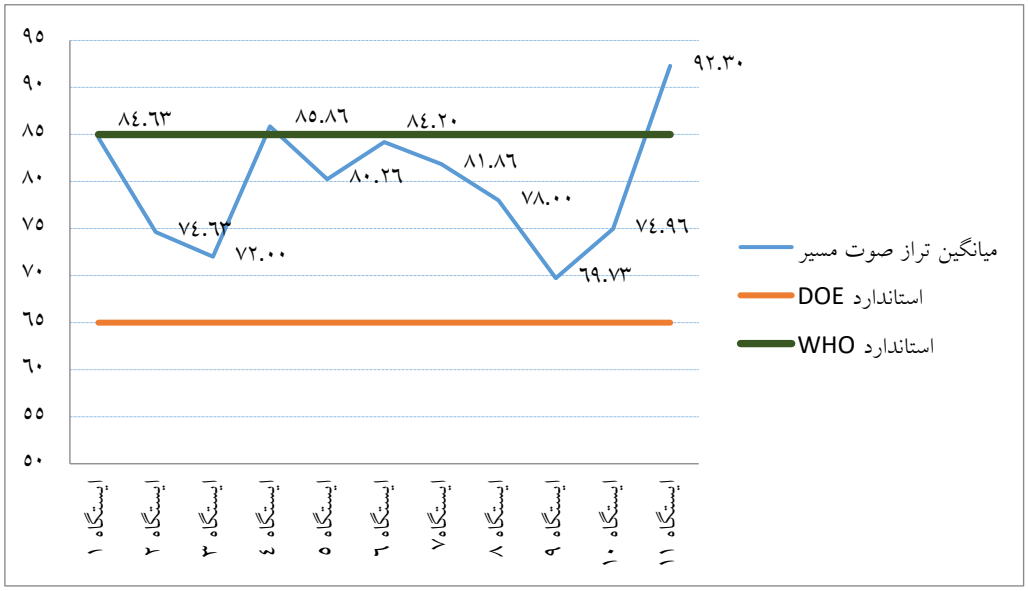
شکل ٤ مقایسه میان میانگین تراز صوت در ایستگاه‌های مسیر با استاندارد آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات‌متحده آمریکا (EPA) را نشان می‌دهد.



شکل ٤. نمودار مقایسه‌ای میانگین تراز صوت dB(A) اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها با استاندارد EPA (منبع: یافته‌های تحقیق)

همان‌طور که پیشتر ارایه شد، استاندارد صوت آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات‌متحده آمریکا، برای فضاهای عمومی حداقل ۵۵ و حداکثر ۷۰ دسی‌بل است. بر این اساس، در این پژوهش، حد بالای (بیشینه) این استاندارد، یعنی ۷۰ دسی‌بل، انتخاب گردیده است. با توجه به نمودار بالا می‌توان مشاهده نمود که تنها ایستگاه شماره ۹ دارای تراز فشار صوتی کمتر از استاندارد EPA است و مابقی ایستگاه‌ها دارای تراز فشار صوتی بالاتر از این استاندارد هستند.

شکل ۵ نمودار مقایسه‌ای میانگین تراز صوت در ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده با استانداردها و حدود مجاز صوت سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران (DOE) و سازمان بهداشت جهانی (WHO) را نشان می‌دهد. منحنی آبی‌رنگ تراز صوت سنجش شده در ایستگاه‌های مسیر را نشان می‌دهد. استاندارد ملی ایران در مبحث صوت، عدد ٦۵ دسی‌بل (ساعت ۷ صبح تا ۱۰ شب) را برای محیط‌های تجاری در نظر گرفته است (خط نارنجی)؛ بر این اساس، نمودار زیر بیانگر آن است که هیچ‌یک از ایستگاه‌های واقع در طول مسیر دارای تراز فشار صوت در حد استاندارد داخلی نبوده‌اند. از سوی دیگر، حد مجاز صوت که از سوی سازمان بهداشت جهانی برای فضاهای عمومی و باز ارائه شده است، برابر با ۸۵ دسی‌بل است (خط سبزرنگ). مطابق با این استاندارد، ۲ ایستگاه شماره ٤ (اتمسفر) و شماره ۱۱ (فلکه صادقیه) دارای حد فراتر از استاندارد هستند و مابقی با این حد همخوانی دارند.



شکل ۵. نمودار مقایسه‌ای میانگین تراز صوت dB(A) اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها با استاندارد DOE (منبع: یافته‌های تحقیق)

تفسیر شکل‌های شماره ٤ و ۵ بیانگر آن است که میانگین تراز صوت اندازه‌گیری‌شده در طول مسیر از یکنواختی برخوردار نبوده و اختلاف تراز صوت اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های منتخب نسبتاً زیاد است (از حداقل ٦۹/۷۳ تا حداکثر ۹۲/۳). همچنین، مقایسه تطبیقی وضعیت موجود با استاندارد ملی صوت نشان می‌دهد که تمامی ایستگاه‌ها (بدون استثنا) دارای میانگین تراز صوت بالاتری از حد مجاز (٦۵ دسی‌بل) هستند. ولیکن در خصوص استاندارد آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات‌متحده (۷۰ دسی‌بل) مشاهده گردید که تنها ۱ ایستگاه در محدوده مجاز قرار داشته و سایر ایستگاه‌ها در خارج از استاندارد صوتی قرار دارند. درنهایت، در مورد استاندارد سازمان بهداشت جهانی (۸۵ دسی‌بل)، تنها ۲ ایستگاه بالاتر از حد مجاز بوده و مابقی ایستگاه‌ها در بازه استاندارد قرار دارند.

در شکل ٦ چند نمونه از نمودارهای تراز صوت SPL (dBA) که در ایستگاه‌های اندازه‌گیری ثبت گردیده، آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر نمایه ۳ نوع تراز صوت مشخص شده است که عبارت‌اند از تراز صوت ماکزیمم، تراز صوت لحظه‌ای و تراز صوت میانگین. مسلماً تراز صوت میانگین به‌عنوان مبنای اندازه‌گیری استفاده شده است.

شکل ٦. چند نمونه از نمودارهای تراز صوت SPL (dBA) در طول مسیر و ایستگاه‌ها (منبع: یافته‌های تحقیق)

در ادامه، با استفاده از رابطه (۲)، میانگین تراز صوت در طول مسیر محاسبه گردید که برابر با ۷٤,٤ dB است.

$$\overline{LP}\ (dB) = 10\log\left[\frac{1}{n}\times\sum_{i=1}^{n}10^{\frac{LPi}{10}}\right]$$

$$= 10\log\left[\frac{10^{8.46}+10^{7.46}+10^{7.2}+10^{8.58}+10^{8.02}+10^{8.42}+10^{8.18}+10^{7.8}+10^{6.97}+10^{7.49}+10^{9.23}}{11}\right]$$

$$= 74.4\ dB$$

سپس، از طریق *رابطه (۳)* اقدام به برآورد تراز معادل مواجهه صوت (dBA) Leq گردید. بر اساس برآورد صورت گرفته، ماکزیمم زمان سپری‌شده در یک مسافرت با مترو از تهران به کرج و بالعکس حدود ۱ ساعت است. بر این اساس، تراز معادل ۸٤,٤ دسی‌بل برآورد می‌گردد.

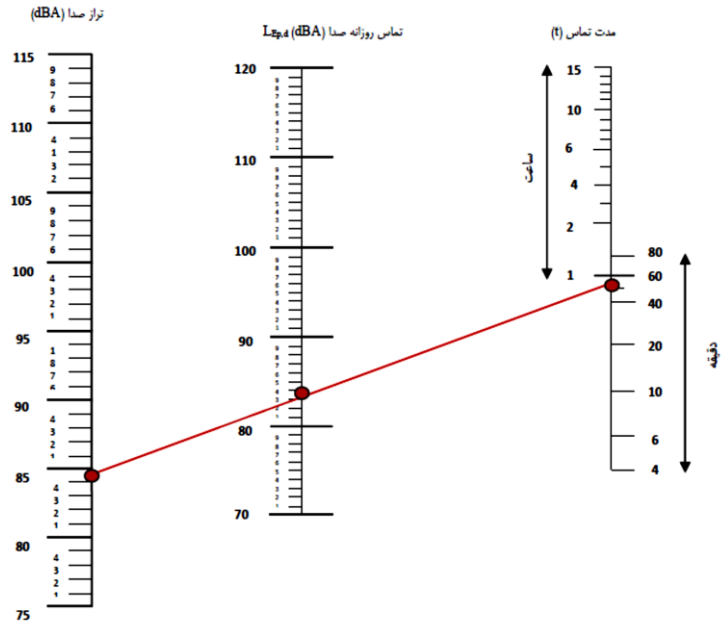
$$L_{eq}(dB) = 10\ log\left[\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n}t_i\,10^{LP_i/10}\right] = 84.4\ (dB)$$

در ادامه و با استفاده از رابطه (٤)، دز روزانه فردی $L_{Ep,d}$ یک مسافر در ایستگاه‌های واقع در طول مسیر مطالعاتی محاسبه گردید که برابر با ۸۵,٦۵ دسی‌بل است:

$$L_{Ep,d} = Leq\ + 10\log\left(\frac{t}{m}\right)$$

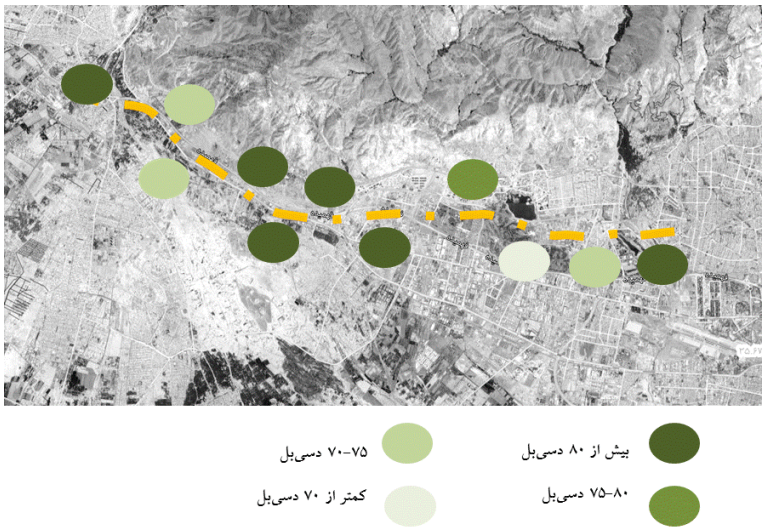
$$L_{Ep,d} = 84.4\ + 10\log\left(\frac{1}{8}\right) = 85.65(dB)$$

همان‌طور که مشخص است، در مسیر خط ۵ مترو، مسافر در معرض آلودگی صوتی بالایی قرار دارد. به‌منظور تعیین حد زمان مجاز مواجهه با صدا در محیط موردمطالعه، از نموگرام HSE استفاده گردید (شکل ۷). همان‌طور که مشخص است، مدت‌زمان مجاز جهت حضور و تردد در مسیر برای مسافران حدود ۱ ساعت (٥٦ دقیقه) تعیین گردیده که با وضعیت موجود تا حدود بسیار زیادی مطابقت دارد.



شکل ۷. نموگرام محاسبه مدت‌زمان مجاز مواجهه با صدا برای مسافر در ایستگاه‌های مسیر خط ۵ مترو (منبع: یافته‌های تحقیق)

با استفاده از ترازهـای صـوتی به‌دسـت‌آمده و همچنـین روش درون‌یابی داده‌ها، نقشه آلودگی صوتی منطقه موردمطالعه است، تهیه گردید (شکل ۸).



شکل ۸. نقشه آلودگی صوتی در منطقه مطالعاتی (منبع: یافته‌های تحقیق)

۵-۲ نتایج تراز فشار صوت در داخل قطار (کابین‌ها)

با توجه به طول مسیر و ازآنجاکه بخش زیادی از زمان مسافران در داخل کابین قطار سپری می‌گردد، لازم بود تا میانگین تراز صوت در داخل کابین‌ها نیز سنجش شود. به همین منظور، به تعداد ٦٥ مرتبه و در تمامی طول مسیر (هرکدام ۵ دقیقه) تراز صوت اندازه‌گیری شد. جدول ٤ نتایج این سنجش را نشان می‌دهد.

جدول ٤. متوسط ٥ دقیقه‌ای تراز فشار صوت در شبکه وزنی Leq (5min) dB(A) در سه بازه زمانی در طول مسیر

تعداد اندازه‌گیری	زمان (نوبت)	مشخصات	میانگین
٣١	٧ الی ٧,٣٠ صبح	تمام طول مسیر	**٧٣,١**
١٠	١٢ الی ١٢,٣٠ ظهر	تمام طول مسیر	**٦٨,٩**
٢٤	١٧ الی ١٧,٣٠ عصر	تمام طول مسیر	**٧٥,٦**
٦٥	**مجموع**	تمام طول مسیر	**٧٢,٥**

(منبع: یافته‌های تحقیق)

همان‌طور که از جدول مشخص است، بیشترین تراز صوتی دریافت شده برای مسافران متعلق به نوبت سوم (ساعت ١٧ تا ١٧,٣٠ عصر) است که ٧٥,٦ دسی‌بل است. همچنین؛ کمترین تراز صوت دریافت شده نیز متعلق به نوبت دوم (١٢ تا ١٢,٣٠ ظهر) است که ٦٨,٩ دسی‌بل است. میانگین تراز صوتی نیز در کل زمان‌ها و در تمام طول مسیر، برابر با ٧٢,٥ دسی‌بل بوده است.

از سوی دیگر، تفاوت چندانی میان‌تراز صوت در نوبت اول و سوم مشاهده نمی‌شود (در حد ٢,٥ دسی‌بل). مطابق با حالت قبلی و بر اساس فرمول‌های پیشین، تراز معادل مواجهه صوت Leq (dBA) محاسبه گردید. بر اساس برآورد صورت گرفته، ماکزیمم زمان سپری‌شده در یک مسافرت با مترو از تهران به کرج و بالعکس حدود ١ ساعت است. بر این اساس، تراز معادل ٨٢,٥ دسی‌بل برآورد می‌گردد.

$$L_{eq}(dB) = 10\,log\left[\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n} t_i\, 10^{LP_i/10}\right] = 82.5\ (dB)$$

در ادامه و با استفاده از *رابطه (٤)*، دز روزانه فردی $L_{Ep,d}$ یک مسافر در طول مسیر مطالعاتی و در داخل کابین محاسبه گردید که برابر با ٨٣,٧٥ دسی‌بل است:

$$L_{Ep,d} = Leq\ + 10\log\left(\frac{t}{m}\right)$$

$$L_{Ep,d} = 84.4\ + 10\log\left(\frac{1}{8}\right) = 83.75(dB)$$

همان‌طور که مشخص است، در مسیر خط ٥ مترو، مسافر در معرض آلودگی صوتی بالایی قرار دارد.

٥-٣ نتایج مربوط به ارزیابی ریسک

بر اساس روش‌شناسی که در فصل سوم اشاره شد، در این قسمت اقدام به ارزیابی ریسک کیفی می‌گردد. مطابق با یافته‌های پژوهش، به دلیل آنکه تراز صوتی اندازه‌گیری‌شده بالاتر از تمامی استانداردهای ملی و بین‌المللی بوده است (به‌استثنای چند مورد اندک) درنتیجه، شدت ریسک مربوط به آلودگی صوتی در مسیر موردمطالعه، زیاد (شدید) برآورد می‌گردد. از سوی دیگر، به دلیل آنکه در چندین نوبت اندازه‌گیری نتایج مشابه ثبت شده است، احتمال وقوع نیز ممکن (محتمل) برآورد می‌گردد. درنتیجه، سطح ریسک از برآیند موارد فوق‌الذکر، **قابل‌توجه** ارزیابی می‌گردد (جدول ٥).

جدول ٥. ارزیابی ریسک کیفی آلودگی صوتی مسیر مطالعاتی

بسیار شدید	شدید	شدت کم	شدت حادثه / احتمال وقوع
ریسک متوسط	ریسک قابل‌تحمل	ریسک جزئی	بسیار نامحتمل
ریسک قابل‌توجه	ریسک متوسط	ریسک قابل‌تحمل	نامحتمل
ریسک غیرقابل‌تحمل	ریسک قابل‌توجه	ریسک متوسط	محتمل

(منبع: یافته‌های تحقیق)

به‌علاوه، بر اساس روش ارزیابی ریسک دوعاملی نیز می‌توان سطح ریسک را ارزیابی نمود.

احتمال وقوع × شدت اثر = درجه ارزیابی جنبه

B × ۳ = 3B (بارز)

با توجه به نتایج بررسی‌ها، شدت آلودگی صوتی، «مهم» و تکرار آن‌ها، «محتمل» ارزیابی می‌گردد. درنتیجه، درجه ریسک نیز، 3B تعیین می‌گردد (جدول ٦).

جدول ٦. ماتریس ارزیابی درجه جنبه خطر دوعاملی برای خط ۵ متروی تهران

شدت		فاجعه‌بار	مهم	مرزی	جزئی
تکرار		4	3	2	1
مکرر (بالا)	A	4A	3A	2A	1A
محتمل (متوسط)	B	4B	◆ 3B	2B	1B
گاه‌به‌گاه (کم)	C	4C	3C	2C	1C
جزئی (به‌ندرت)	D	4D	3D	2D	1D
ناچیز	E	4E	3E	2E	1E

(منبع: یافته‌های تحقیق)

٦. تفسیر داده‌ها

این تحقیق با هدف سنجش تراز صوت و ارزیابی ریسک زیست‌محیطی ناشی از آن در سایت متروی تهران صورت گرفته است. بدین منظور، فضای سکوهای ایستگاه‌های واقع در خط ۵ متروی تهران و نیز کابین قطارها مورداندازه‌گیری قرار گرفتند. روش مورداستفاده در این تحقیق، دقیقاً برگرفته از دستورالعمل داخلی است؛ درنتیجه کاملاً با مطالعات کاکویی و شکوهی (۱۳۹۰) و گل‌محمدی (۱۳۹۵) مطابقت دارد. الگوی مورداستفاده در این تحقیق کاملاً با الگوی استفاده‌شده توسط وگی‌آتزیس (۲۰۱۲) و کلارک و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت و مشابهت داشته است.

نوآوری این تحقیق را می‌توان در اتخاذ روش ترکیبی ارزیابی ریسک (کمی و کیفی) و همچنین موردکاوی (مسیر موردبررسی) دانست.

نتایج نشان داد که کمترین تراز فشار صوت اندازه‌گیری شده در محدوده مطالعاتی، در ایستگاه شماره ۹ و در نوبت دوم برابر با ٦٦٫۸ دسی‌بل بوده است. همچنین؛ بیشترین تراز فشار صوت اندازه‌گیری شده نیز متعلق به ایستگاه شماره ۱۱ و در نوبت سوم برابر با ۹۲٫۳ دسی‌بل بوده است. از سوی دیگر، تراز فشار صوت اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که متناسب با تغییر ساعت از صبح زود (ساعت ۷ صبح) به سمت ظهر (ساعت ۱۲ صبح) میانگین تراز فشار صوت کاهش می‌یابد؛ که احتمالاً به تعداد کمتر مسافران و تراکم خلوت‌تر در ایستگاه‌ها مربوط است. ولیکن از ظهر به سمت بعدازظهر (۵ عصر) تراز فشار صوت افزایش می‌یابد که می‌تواند به شلوغ‌تر شدن ایستگاه‌ها مربوط باشد.

درمجموع، کمترین میانگین تراز صوتی متعلق به ایستگاه شماره ۹ (ورزشگاه آزادی) با ٦۹٫۷۳ دسی‌بل است. البته خاطرنشان می‌گردد، در زمان‌های اندازه‌گیری، هیچ مسابقه ورزشی در استادیوم آزادی برگزار نمی‌گردید و احتمالاً به همین دلیل تراکم جمعیتی در این ایستگاه نسبت به سایر ایستگاه‌ها کمتر بوده که درنتیجه تراز فشار صوت نیز در این ایستگاه پایین‌تر بوده است.

همچنین؛ بیشترین میانگین تراز صوتی متعلق به ایستگاه شماره ۱۱ (فلکه صادقیه) با ۹۲٫۳ دسی‌بل است. تنها ایستگاه شماره ۹ دارای تراز فشار صوتی کمتر از استاندارد اعلامی EPA است

و مابقی ایستگاه‌ها دارای تراز فشار صوتی بالاتر از این استاندارد هستند. از سوی دیگر، هیچ‌یک از ایستگاه‌های واقع در طول مسیر دارای تراز فشار صوت در حد استاندارد داخلی نیستند. مطابق با استاندارد سازمان بهداشت جهانی نیز، ۲ ایستگاه شماره ٤ (اتمسفر) و شماره ۱۱ (فلکه صادقیه) دارای حد فراتر از استاندارد هستند و مابقی با این حد همخوانی دارند. میانگین تراز صوت در طول مسیر محاسبه گردید که برابر با ٧٤,٤ dB است. بر اساس برآورد صورت گرفته، ماکزیمم زمان سپری‌شده در یک مسافرت با مترو از تهران به کرج و بالعکس حدود ۱ ساعت است. بر این اساس، تراز معادل مواجهه صوت (Leq (dBA ٨٤,٤ دسی‌بل برآورد می‌گردد. همچنین؛ دز روزانه فردی $L_{Ep,d}$ یک مسافر در ایستگاه‌های واقع در طول مسیر مطالعاتی محاسبه گردید که برابر با ٨٥,٦٥ دسی‌بل است. مدت‌زمان مجاز جهت حضور و تردد در مسیر برای مسافران حدود ۱ ساعت (٥٦ دقیقه) تعیین گردیده که با وضعیت موجود تا حدود بسیار زیادی مطابقت دارد.

در خصوص وضعیت داخل کابین‌ها، بیشترین تراز صوتی دریافت شده برای مسافران متعلق به نوبت سوم (ساعت ۱۷ تا ۱۷,۳۰ عصر) است که ٧٥,٦ دسی‌بل است. همچنین؛ کمترین تراز صوت دریافت شده نیز متعلق به نوبت دوم (۱۲ تا ۱۲,۳۰ ظهر) است که ٦٨,٩ دسی‌بل است. میانگین تراز صوتی نیز در کل زمان‌ها و در تمام طول مسیر، برابر با ۷۲,٥ دسی‌بل بوده است. از سوی دیگر، تفاوت چندانی میان‌تراز صوت در نوبت اول و سوم مشاهده نمی‌شود (در حد ۲,٥ دسی‌بل). تراز معادل ۸۲,٥ دسی‌بل برآورد گردید. دز روزانه فردی $L_{Ep,d}$ یک مسافر در طول مسیر مطالعاتی و در داخل کابین محاسبه گردید که برابر با ۸۳,۷٥ دسی‌بل است.

مطابق با یافته‌های پژوهش، شدت ریسک مربوط به آلودگی صوتی در مسیر موردمطالعه، زیاد (شدید) است. از سوی دیگر، احتمال وقوع نیز ممکن (محتمل) است. درنتیجه، سطح ریسک **قابل‌توجه** ارزیابی می‌گردد. با توجه به نتایج بررسی‌ها، شدت آلودگی صوتی، «مهم» و تکرار آن‌ها، «محتمل» ارزیابی می‌گردد. درنتیجه، درجه ریسک نیز، 3B تعیین می‌گردد.

یافته‌های تحقیق حاضر به لحاظ مقایسه، با نتایج تحقیق سرخیل و همکاران (۱٤۰۱) اندکی اختلاف داشته است. چراکه در این تحقیق تراز صوتی در هیچ‌یک از ایستگاه‌ها از ۹۲ دسی‌بل فراتر نرفته است، درحالی‌که در مطالعه سرخیل و همکاران (۱٤۰۱) تراز صوتی بالاتر از ۱۰۰ دسی‌بل نیز گزارش شده است. ولیکن به لحاظ عدم تطابق با استاندارد، نتایج هر دو تحقیق هم‌راستا و مشابه هستند. از سوی دیگر، یافته‌های سالارپور و همکاران (۱۳۹٥) و عباسپور و میرحیدری (۱۳۸۹) نیز حکایت از آن داشته است که تراز صوتی در ایستگاه‌های مترو بالاتر از حد مجاز (۷٥ دسی‌بل) بوده است که در تحقیق حاضر نیز این مورد اثبات گردید.

ازجمله محدودیت‌های این تحقیق می‌توان به عدم اجازه سنجش در برخی از مواقع (در داخل کابین قطار و محدوده خط قرمز حاشیه ایستگاه‌ها) اشاره داشت. درعین‌حال، در مورد منبع آلودگی صوتی نیز بررسی خاصی صورت نگرفته است. همچنین تمامی اندازه‌گیری‌ها در فصل تابستان صورت گرفته است و سایر فصول موردبررسی قرار نگرفتند که به‌عنوان پیشنهادات تحقیق می‌توان این بررسی را به سایر زمان‌ها و دیگر خطوط مترو تعمیم داد.

۷. نتیجه‌گیری

ازآنجاکه بر اساس ارزیابی ریسک کیفی به‌عمل‌آمده، سطح ریسک آلودگی صوتی در خط ٥ متروی تهران "قابل‌توجه" تعیین گردیده است، بنابراین؛ فعالیت پیشنهادی به‌عنوان راهکار مدیریتی، عبارت است از:

«تا زمانی که ریسک کاهش نیافته کار نباید آغاز شود. منابع قابل‌توجهی باید در جهت کاهش میزان ریسک تخصیص داده شوند».

جنبه‌های عملیاتی و اجرایی مرتبط با نتایج این تحقیق در اتخاذ روش‌های مدیریتی خلاصه می‌شوند. در اصل، آنچه به‌عنوان خروجی کاربردی از این تحقیق می‌توان ارائه داد مربوط به پیشنهادات اجرایی هستند که به‌منظور ایمن‌سازی محیطی و کنترل آلودگی صدا در سایت مطالعاتی مطرح هستند.

با توجه به ماتریس دوعاملی ارزیابی ریسک نیز، «**اقدام کنترلی مناسب و ضرورت اقدام اصلاحی**» پیشنهاد می‌گردد.

فهرست برنامه‌های کنترلی عبارت‌اند از:

- درزبندی و عایق‌کاری کابین‌ها
- تعمیر و بهسازی کابین‌ها و سیستم محرکه قطار
- تنظیم صدای بلندگوها و رادیو داخل ایستگاه‌ها
- نصب جاذب صوت در بدنه ایستگاه‌ها
- پایش دوره‌ای و منظم

۸. پی‌نوشت‌ها

1. Strain
2. Temporary Threshold Shift
3. Permanent Threshold Shift
4. Geographic Position System
5. Geographic Information System
6. Occupational Safety and Health Administration
7. Sound Pressure Level
8. Equivalent Sound Level
9. Health and Safety Executive, HSE

۹. مراجع

– Abbaspoor, M. (2016). Environmental engineering, second edition, Islamic Azad University, 628 p. [In Persian].

– Agrawal, Y., Niparko, J.K., Dobie, R.A. (2010). Estimating the effect of occupational noise exposure on hearing thresholds: the importance of adjusting for confounding variables. Ear and hearing. 2010; 31: 234-237.

– Arslan, C., Gürel, E., Yıldırım, E., Orhan, S. (2002). Noise Pollution in Sports Areas and Researching Health Risks. Result from Noise Pollution, 16, 281-288.

– Babisch, W., Pershagen, G., Selander, J., Houthuijs, D., Breugelmans, O., Cadum, E. (2013). Noise annoyance a modifier of the association between noise level and cardiovascular health? Sci. Tot. Environ. 452-453.

– Babisch, W., Van Kamp, I. (2019). Exposure-response relationship of the association between aircraft noise and the risk of hypertension. Noise Health. 11, 161-168.

– Babisch, W., Houthuijs, D., Pershagen, G., Cadum, E., Katsouyanni, K., Velonakis, M., Dudley, M.L., Marohn, H.D., Swart, W., Breugelmans, O. (2009). Annoyance due to aircraft noise has increased over the years, results of the HYENA study. Environment International, 35: 1169-1176.

– Bahmanpour, H., Fahiminejad, A. (2021). The importance of measuring noise pollution in sports spaces, Environmental Management, Sustainable Development, Volume 2, Issue 19 (March-April. 2021), 6 p. [In Persian].

– Bazaras, J. (2016). Internal noise modeling problems of transport power equipment. Transport 2006; 21(1); 19-24.

– Chang, L.H., Bahmanpour, H., Fahiminejad, A. (2021). Measurement of sound level in sports clubs with the approach of maintaining the health of athletes, Anthropogenic Pollution Journal, Vol 5 (1), 2021: 62-71.

– Clark, C., Head, J., Stansfeld, S.A. (2013). Longitudinal effects of aircraft noise exposure on children's health and cognition: a six-year follow-up of the UK RANCH cohort. J. Environ. Psychol. 2013; 35, 1-9.

– Haji Beg Lou, M., Morsal, B. (2021). Presenting a model of the effects of tourism of sports venues on sustainable urban development (Case study: Mehdi Shahr city), Quarterly of New Attitudes in Human Geography (summer) 2021, Vol. 13. No 3. 393-419 pp. [In Persian].

– Hansell, A.L., Blangiardo, M., Fortunato, L., Floud, S., Hoogh, K., Fecht, D. (2013). Aircraft noise and cardiovascular disease near London Heathrow Airport. Br. Med. J. 8, 347:f5432.

– Hassmen, P., Koivula, N. (2001). Cardiac Deceleration in Elite Golfers as Modified by Noise and Anxiety during Putting Percept Mot Skills, 92, 947-957.

– Karimi, E., Nassiri, P., Monnazam, M. (2011). Noise Pollution assessment in 14 distinctions of Tehran. Human and environment. 23. [In Persian].

– Keles, R, (2010), The Quality of life and the Environment, Social and Behavioral Sciences, V. 35, pp. 23-32.

– Malekshahi, G.H., Barani Pasyan, V., Aghaei, A., Nami, M.H., Molavi, M. (2020), Spatial pattern analysis of quality of life indicators in urban communities (Case study: Islamshahr), Journal of New Attitudes in Human Geography (Human Geography), Volume 12, Number 1; pp 11-129. (In Persian).

– Motallebi Kashani, M., Hannani, M., Akbari, H., Almasi, H. (2002). Noise Pollution Survey in Kashan City (2000- 2001). Feyz Journal. 6(1):30-36 [In Persian].

– Mousavi, M., Bagheri Kashkoli, A. (2014), Evaluating the Spatial Distribution of Quality of Life in Sardasht Neighborhoods, Journal of

– Clark, W.W. (1991). Noise exposure from leisure activities: A review. Journal of the Acoustical Society of America, 90, 175–181.

– Dobie, R. (2002). Economic comparison for hearing loss. Occup Med State Art Rev 10: 663-668.

– Dursun, Ş., Özdemir, C. (2014). Preparing the Map of Noise Pollution in Konya City Centre, Project No: 97-081, Konya.

– EPA. (2014). Information on levels of environmental noise requisite to protect public health welfare with an adequate margin of safety, U.S. Environmental Protection Agency, EPA technical document.

– Evans, G., Hygge, S. (2007). Noise and performance in adults and children. In: Luxon, L., Prasher, D. (Eds.), Noise and its Effects. Whurr Publishers, London. Blanchfield B. Feldman J. Dunbar J. Gardner E. The severely to profoundly hearing-impaired population in the United States: Prevalence estimates and demographics. Journal of the American Academy of Audiology, 2001; 12, 183–189.

– Ghanbari, M., Nadafi, K., Mosaferi, M., Yoonesian, M., Aslani, H. (2011). Study of noise pollution in the city of Tabriz in commercial and residential districts of Iran, Journal of Health and Environment, Iranian Society of Environmental Health, Fourth Edition, No.3, 375-384 pp. [In Persian].

– Golmohammadi, R. (2010). Evaluation of Noise Propagation Characteristics of Compressors in Tehran Oil Refinery Center and Presenting Control Methods, Journal of Research in Health Sciences (JRHS). South T. Managing noise and vibration at work; a practical guide to assessment, measurement and control, Routledge; 1 edition, 2016; ISBN-13: 978-1138177994, 280 p.

– Stansfeld, S., Haines, M., Brown, B. (2000). Noise and Health in the Urban M Environment, Reviews of Environmental Health, 15:43-82.

– Stansfeld, S.A., Matheson, M.P. (2003). Noise pollution: non-auditory effects on health. Br. Med. Bull. 68, 243-257.

– Sommerhoff, J., Recuero, M., Suárez, E. (2004). Community noise survey of the city of Valdivia, Chile. Applied Acoustics. 2004; 65(7):643–56.

– Sorensen, M., Andersen, Z.J., Nordsborg, R.B., Jensen, S.S., Lillelund, K.G., Beelen, R. (2007). Road traffic noise and incident myocardial infarction: a prospective cohort study. PLoS One, 7 (6), e39283. http://dx.doi.org/10.1371/ journal.pone.0039283.

– South, T. (2004). Managing noise and vibration at work, Oxford, Elsevier.

– Sukru, D., Celalettin, O., Hakan, K., Sain, K. (2006). Noise pollution and map of Konja city in Turkey. Journal of International Environmental Application and Science. 1(1–2):63–72.

– Taheri Hosseinabadi, M., Tayebi Sani, SM., Bahmanpour, H., Fahiminejad, A. (2019). Measurement of Sound Level in Sport Natural Areas Using the Maintaining Athletes' Health Approach (The Case of Darakeh Mountainous Region, Tehran), Ann Appl Sport Sci, 7(4): 787.

– Vogel, I., Brug, J., Vander Ploeg, C., Raat, H. (2007). Young people's exposure to loud music: A summary of the literature. American Journal of Preventive Medicine, 33, 124–133.

Urban Research and Planning, Volume 3, Number 9, pp 97-118. (In Persian).

– Muhr, P., Rasmussen, F., Rosenhall, U. (2007). Prevalence of hearing loss among 18-year-old Swedish men during the period 1971–1995. Scandinavian Journal of Public Health, 35, 524–532.

– Nassiri, P., Esmaeelpour, M., Rahimi, A., Ebrahimi, H., Salimi, Y. (2014). Occupational noise exposure evaluation in drivers of bus transportation of Tehran City. Iranian Journal of Health and Environment. 2(2):124-31 [In Persian].

– OEL. (2017). Assessment guideline for Noise and Vibration, Islamic Republic of IRAN Ministry of Health and Medical Education Environmental and Occupational Health Center (EOHC)

– Parkes, A., Kearns, A., Atkinson, R. (2002). What Makes People Dissatisfied with their Neighborhoods? Urban Studies. 39: 2413–38.

– Pourqorban, A. (2018), Analysis and Evaluation of Quality of Life in Urban Areas (Case Study of Tabriz Landscape), Payashahr Monthly, 1 (9). (In Persian).

– Salarpour, M., Vaziri, M., Jafari, M. (2017), Study of sound pollution and effective factors in Tehran Subway, The 16th International Conference on Transportation and Traffic Engineering, Sharif University, Tehran, Iran.

– Sarkheil, H., Karimi Asl, Z., Talaeian Araghi, M. (2022), Modeling and estimating noise pollution on metro platforms of Darvazeh Doulat and Tajrish Stations in Tehran metropolis, Environmental sciences, Vol. 20 (1), 113-128 pp.

– Vogiatzis, K. (2019). Airport environmental noise mapping and land use management as an environmental protection action policy tool. The case of the Larnaka International Airport (Cyprus). Sci Total Environ; 424:162–73.

– WG-AEN. (2007). Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure. Position paper. European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN): Version 2; August 2007.

– WHO. (2018). European Centre for Environment and Health. Burden of disease from environmental noise quantification of healthy life years lost in Europe 2011. Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe.

– Yang, W., Kang, J. (2005). Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces. Applied Acoustics. 66: 211–29.

– Zannin, P.H.T., Calixto, A., Diniz, F.B., Ferreira, J.A.C.A. (2003). Survey of urban noise annoyance in a large Brazilian city: the importance of a subjective analysis in conjunction with an objective analysis. Environmental Impact Assessment Review. 23(2):245–55.