مطالعات محیطی هفت حصار شماره چهل‌ودوم/ سال یازدهم/ زمستان ۱۴۰۱
صفحات ۱۰۶-۸۵

شبیه‌سازی متغیرهای آکوستیکی به منظور رضایتمندی شنیداری در ایستگاه‌های مترو با استفاده از نرم‌افزار اودئون (مطالعه موردی: مترو تهران، تبریز، اصفهان)[1]

پریا مشک‌آبادی*، عباس غفاری**، الهام ناظمی***، نرگس دهقان****

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۷/۲۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲

چکیده

کیفیت آکوستیکی در فضاهای عمومی به ویژه خدماتی معمولاً بر اساس دریافت اصوات گفتاری یا وضوح گفتار به همراه آسایش صوتی تعیین می‌شود. ایستگاه‌های مترو به لحاظ عملکردی جزء فضاهای شلوغ و پر رفت‌وآمد و از نظر ساختاری و کالبدی دارای هندسه نامتناسب (طول زیاد) و مصالح با ضریب جذب صوتی پایین بوده لذا محیطی پر سر و صدا و دارای اختلالات صوتی هستند. سر و صدای نسبتاً زیاد که علاوه بر نویز زمینه (صدای تجهیزات و سیستم‌های تهویه و غیره) در اثر منابع صوتی دیگر (قطار، ترمز، موتور، گفتگوی افراد و غیره) سبب ایجاد نویز در ایستگاه‌های مترو می‌شود از مسائل مهم آزاردهنده‌ای است که در مواجهه طولانی‌مدت می‌تواند سبب سلب آسایش و آسیب‌های جسمانی شود. صداهای مزاحم و بازتاب‌های پی‌درپی، شنیدن پیام‌های ایمنی و ارتباطات کلامی مخاطبان را مختل نموده و باعث خستگی، آشفتگی، عدم تمرکز و خوانایی در محیط می‌شود. بنابراین در این پژوهش به منظور بررسی و مقایسه متغیرهای آکوستیکی با استانداردهای بین‌المللی اقدام به شبیه‌سازی شده تا در جهت رضایتمندی شنیداری در ایستگاه‌های مترو راهکارهایی اندیشیده شود. نمونه‌های مورد بررسی از شهرهای تهران، تبریز و اصفهان انتخاب و در دو نوع و سه حجم متفاوت دسته‌بندی شده‌اند. با وارد کردن سه‌بعدی نمونه‌های موردی در نرم‌افزار اودئون و تعیین متریال سطوح، منبع صوتی و نویز زمینه بر اساس داده‌های بدست آمده از اندازه‌گیری‌های میدانی، مشخص کردن نقاط گیرنده و تنظیمات مربوط به طول پاسخ ضربه‌ای، شبیه‌سازی صورت گرفته و متغیرهای آکوستیکی تأثیرگذار استخراج شده است. متغیرهایی همچون تراز فشار صوتی، زمان واخنش، زمان افت اولیه، شاخص انتقال گفتار، درصد اشتباهات گفتاری، وضوح صدا و شفافیت گفتار در رابطه با موضوع نویز در محیط و وضوح گفتار ضروری است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد حداکثر تراز فشار صوتی در تمام ایستگاه‌ها بالاتر از ۸۵ دسی‌بل و حداکثر زمان واخنش در تمام ایستگاه‌ها بالاتر از ۲ ثانیه بوده که با استانداردهای بین‌المللی فاصله دارد. این امر آسایش صوتی و نیز درک گفتار را که مهمترین عامل در ایجاد ایمنی و عملکرد فضاست و ارتباط مستقیمی با رضایتمندی شنیداری کاربران دارد، تحت تأثیر قرار می‌دهد. سنجش و ارزیابی متغیرهای آکوستیکی بصورت کمی نیز دلیلی بر اثبات این ادعا بود. همچنین با بررسی ظرفیت جذب صوتی در فرکانس‌های مختلف نیز به منظور بهینه‌سازی شرایط آکوستیکی در راستای تأمین رضایتمندی شنیداری پیشنهاداتی ارائه شده است تا ظرفیت‌های جذب در فرکانس‌های پایین و فرکانس‌های محدوده گفتاری و شنیداری انسان از طریق ایجاد تنگ‌بری‌ها، گوشه‌سازی‌ها و فضاهای عملکردی حفره‌مانند افزایش یابد.

واژگان کلیدی

شبیه‌سازی آکوستیکی، رضایتمندی شنیداری، ایستگاه‌های مترو، نرم‌افزار اودئون، وضوح گفتار

۱- این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول با عنوان "ارائه مدل آکوستیکی برای ایستگاه‌های مترو به منظور رضایتمندی شنیداری (نمونه موردی: شهرهای تهران، تبریز و اصفهان)" به راهنمایی نگارندگان دوم و سوم و مشاوره نگارنده چهارم در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد است.

* پژوهشگر دوره‌ی دکتری گروه معماری، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. paria.meshkabadi@gmail.com
** استاد مدعو گروه معماری، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران و دانشیار گروه معماری، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی، تبریز، ایران. (نویسنده مسئول) ghaffari@tabriziau.ac.ir
*** استادیار گروه شهرسازی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. elhamnazemi@par.iaun.ac.ir
**** استادیار گروه معماری، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. dehghan@par.iaun.ac.ir

ISSN: 2322-5602
©: IAUH

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

مقدمه

متروها به عنوان یکی از سیستم‌های حمل و نقل درون شهری، ترافیک و فشار بر روی محیط‌های شهری را کاهش می‌دهند. با این وجود، فضاهای داخلی ایستگاه‌های مترو از نظر آکوستیکی دارای مشکلات جدی هستند. سر و صدای ایجاد شده در اثر برخورد و اصطکاک چرخ‌ها و ریل‌ها و همچنین صدای ترمز و انعکاس آن‌ها در سطوح سخت (Berardi, et al, 2015) از جمله نویزهای آزاردهنده به شمار می‌آیند. از دید آکوستیکی، وجود نویز بخصوص در فرکانس‌های پایین سبب ایجاد مشکلات جسمانی در کارکنان شاغل در سیستم مترو و مسافران می‌شود. از موارد مهم دیگر در تعیین شرایط آکوستیکی این ایستگاه‌ها، وضوح گفتار است که در مواقع اضطراری، برای هشدار خطر و سایر اطلاعات از طریق سیستم‌های اطلاع‌رسانی ضروری است (Alvers-Pereira, et al, 2004). بنابراین ایستگاه‌های مترو از نظر آکوستیکی جزء فضاهای نیمه حساس به شمار می‌آیند زیرا سر و صدای زیاد، ایمنی ایستگاه را از بین می‌برد.

رضایتمندی به عنوان یکی از معیارهای کلیدی سنجش میزان کیفیت محیطی و ادراک کیفیت آن است (رفیعیان، ۱۳۸۹: ۲۰۰) که در مطالعات سایکوآکوستیکی به رابطه بین ویژگی‌های فیزیکی صدا و ویژگی‌های ادراکی آن گفته می‌شود (Moor, 2012) در واقع رضایت شنیداری یک تجربه عاطفی و واکنش احساسی در مقابل ارزیابی عملکردی است (Oliver, 1981). با توجه به اینکه احساس آسایش خاطر، ضروری‌ترین تجربه شنیداری است (پالاسما، ۱۳۸۸: ۶۴-۶۱) درک و رضایت شنیداری مخاطبان تا حد زیادی وابسته به خصوصیات صوتی فضا است (Willemsen, Rao, 2010). در آکوستیک عواملی همچون حجم و شکل فضا، جذب صدا و پراکندگی سطوح، ویژگی‌های طیفی و زمانی نویز زمینه، فاصله منبع تا گیرنده، جهت‌گیری منبع و گیرنده، اعوجاج غیرخطی بلندگو، پاسخ فرکانس/میزان صدا در کانال انتقال بر وضوح گفتار یک فضا اثر گذارند (Gomez Agustina, 2013: 4). سطح صدا عامل مهمی است که در تعیین رضایت محیطی و آسایش جسمانی و روانی نقش دارد (Altay, 1997). حجم، فرم، تناسبات و متریال سطوح؛ جزء پارامترهای معماری در محیط آکوستیکی به شمار می‌آیند. بدین معنی که تناسبات هندسی ایستگاه‌ها با سطوح بازتابی به کار رفته سبب می‌شود زمان واخنش در ایستگاه‌ها طولانی‌تر شده و تأثیر منفی بر وضوح گفتار بگذارد (Van, Verhage, 2001). بنابراین میزان سطوح صدا و درک گفتار با کیفیت و رضایتمندی شنیداری ارتباط دارد لذا باید متغیرهایی که در جهت مطلوب‌سازی این دو مولفه تحقیق (محیط و انسان) کاربرد دارند مورد بررسی قرار گیرند.

شبیه‌سازی تکرار شرایط یا رویدادی از زندگی واقعی (یا شرایطی مفروض از زندگی واقعی) تعریف شده است و رایانه به عنوان ابزاری فنی در شبیه‌سازی کاربرد دارد. تحقیقات بر پایه شبیه‌سازی برای پرداختن به مسائلی چون مقیاس و پیچیدگی در مدل‌های فضایی مفید است و امکان پردازش اطلاعات زیاد در زمان کوتاه و با دقت بالا از دیگر نقاط قوت آن است (گروت و همکاران، ۱۳۹۴: ۳۰۰-۲۷۵). شبیه‌سازی‌های کامپیوتری دارای پتانسیل تبدیل جنبه‌های فنی پیچیده به داده‌های قابل مدیریت در فرایند معماری نیز هستند. این پتانسیل‌ها اجازه می‌دهند تا با وجود پیچیدگی‌های بسیار، مدلسازی را انجام داد (Schmidt, et al, 2005: 86).

اودئون نرم افزاری برای تحلیل آکوستیک فضا[1] است که با دو نوع الگوریتم کار می‌کند. یکی برای بازتاب‌های اولیه و دیگری برای سایر بازتاب‌ها. روش تصویر- منبع برای بازتاب‌های اولیه با در نظر گرفتن منابع صوتی و روش ردیابی اشعه‌ای برای بازتاب‌های ثانویه بر طبق قانون لامبرت[2] است. با فرض اینکه ایستگاه‌های مترو شرایط آکوستیکی بهینه‌ای ندارند سوالاتی که در این رابطه مطرح می‌شود این است که چگونه می‌توان فضاهای بزرگی همچون ایستگاه‌های مترو را از نظر آکوستیکی بررسی نمود و چه پارامترها و متغیرهایی از لحاظ آکوستیکی، معماری و انسانی در شناخت شرایط و بهینه‌سازی آن نقش دارند. مرجع استاندارد برای تعیین کیفیت هر شاخص، ابعاد و محدودیت‌های کمی و کیفی آن‌ها کدام است. چه پیشنهادها و راهکارهایی برای ارتقای کیفیت با توجه به بررسی‌های صورت گرفته می‌توان ارائه داد. این تحقیق به دنبال بررسی شرایط، بیان استانداردها و ارزیابی متغیرهای آکوستیکی مهم در ایجاد آسایش صوتی و وضوح گفتار در ایستگاه‌های مترو از طریق شبیه‌سازی است که تاکنون پژوهشی از این منظر در ایران انجام نشده است. بدین منظور، نمونه‌های موردی از بین کلانشهرهای دارای سیستم حمل و نقل عمومی مترو در ایران انتخاب و دسته‌بندی خواهند شد. سپس نمونه‌ها در محیط نرم افزار اسکچاپ سه‌بعدی و لایه‌بندی شده تا در نرم افزار اودئون با اعمال متریال، تعیین منابع صوتی و نویز زمینه و موقعیت گیرنده‌ها شبیه‌سازی گردند (از دلایل استفاده از نرم‌افزار اودئون، کاربرد آن برای شبیه‌سازی فضاهای بزرگ با حجم زیاد است). در نهایت یافته‌های حاصل از هر ایستگاه با دیگر نمونه‌ها و نیز استانداردهای بین‌المللی ISO 3382 و BS EN 60268 مقایسه و نتیجه‌گیری خواهد شد.

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

پیشینه تحقیق

آکوستیک حداقل از ۲۵۰۰ سال پیش برای طراحان ساختمان‌ها به ویژه در طراحی تئاترها و آمفی تئاترهای روباز مهم بوده است. اکثر مواقع طراحان از روش‌های تجربی استفاده کرده و به آن‌ها نیز اعتماد می‌کردند در حالیکه محدودیت‌هایی داشتند و بکارگیری آن‌ها در اتاق‌ها و سالن‌ها موفقیت‌آمیز نیز نبود. علم آکوستیک در قرن‌های ۱۸ و ۱۹ بطور عمده در ارتباط با ابزارهای موسیقی توسعه یافت. با این حال، روش‌های طراحی آکوستیک اتاق در ساختمان تنها در قرن بیستم بصورت علمی و کمی درآمدند. فیزیکدان، والاس سابین[۳] حدوداً در سال ۱۸۹۵ کشف کرد که چه چیزی در زمان واخنش یک اتاق تأثیر می‌گذارد و از این آن برای اولین بار در بهبود آکوستیک تالارهای سخنرانی و سپس در طراحی اتاق‌های جدید استفاده کرد. از نظر سابین رابطه‌ای ریاضی بین حجم فضا، مقدار جذب‌کننده و زمان واخنش وجود دارد. هر چه حجم سالن بزرگتر باشد، طبیعتاً زمان واخنش نیز بزرگتر می‌گردد. در این رابطه فرض بر این است که تباهی صدا بصورت یکنواخت، ممتد و به آرامی صورت پذیرفته و بطور کاملاً همگن به سطوح مختلف اتاق برخورد نماید. ایرینگ[۴] نیز درصدد اصلاح چنین موضوعی بر آن شد تا پرتوهای آکوستیکی پس از هر بار بازتاب مقداری از انرژی خود را از دست بدهند (قیابکلو، ۱۳۹۴: ۱۳۰–۱۲۸). مدل‌های تئوری و محاسبات دستی فراوانی نیز معرفی شده است که مهمترین و کارآمدترین آنها تاکنون معادلات سابین و ایرینگ در رابطه با تعیین زمان واخنش است.

ریندل روش‌های مدلسازی در آکوستیک را به سه دسته تقسیم‌بندی کرده است که شامل مدلسازی فیزیکی، مقیاس و کامپیوتری است (Rindel, 2011: 1). مدلسازی کامپیوتری آکوستیک و شنیداری‌سازی[۵] از دهه ۱۹۶۰ حدوداً ۶۰ سال قبل توسط شرودر و همکارانش شروع شده که ایده‌های اصلی این مفهوم را در همان سال در کنگره بین المللی آکوستیک ارائه کرده است (Schroeder, 1961) و به طور پیوسته از آن زمان به بعد توسعه یافته‌اند برخی از روش‌های مدلسازی کامپیوتری شامل؛ روش منبع-تصویر[۶]، پرتویابی[۷]، اشکال مختلف ردیابی اشعه‌ای، روش رادیوسیتی[۸]، روش المان محدود[۹] و روش المان مرزی[۱۰] هستند (Rindel, 2011: 1). که در آن‌ها از نظریه‌های مبتنی بر موج، انکسار–پراکنش و هندسی استفاده شده است (Raudales et al., 2019). تکنیک‌های آکوستیک هندسی معمولاً با انرژی صدا عمل می‌کنند، اما روش منبع–تصویر قادر به بررسی فشار صوت نیز است (Savioja et al, 2019:2598). در اغلب شبیه‌سازی‌های کامپیوتری از دو روش ردیابی اشعه و منبع تصویر برای بازتاب‌های آینه‌ای و پخشا استفاده می‌شود. اودئون یک الگوریتم هیبریدی با روش منبع تصویری و ردیابی اشعه‌ای است که در آن برای محاسبه بازتاب‌های پخشا، هر سطح پخشگر به شبکه‌های مربع شکل تقسیم و به عنوان گیرنده انرژی تابشی عمل می‌کنند. سپس به عنوان منابع ثانویه برای انرژی پراکنده عمل می‌کنند (Kuttruff, 2017:263). کروکستد و همکارانش (Krokstad et al, 2015) نیز یک مرور تاریخی بر شبیه‌سازی کامپیوتری با استفاده از ردیابی اشعه‌ای انجام دادند. در کل مدل‌سازی‌های کامپیوتری به منظور تخمین زمان واخنش و وضوح گفتار کاربرد دارند (Su, Caliskan, 2007,1)

در رابطه با ایستگاه‌های مترو، تضعیف صدا در امتداد طولی فضاهای طویل، شاخص مهمی است که بطور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته و فرضیات، روش‌ها و فرمول‌های متفاوتی نیز (Yamamoto 1961, Davies 1973, Said 1981, Redmore 1982, Kuttruff 1989) ارائه شده است اما در بررسی‌ها مشخص شده است زمان واخنش متفاوت از میدان انتشار است (Sergeev 1979, Barnett 1994). جان کنگ (Kang, 1997 a) به مطالعه ویژگی‌های اولیه توزیع صدا و بارتاب در فضاهای طویل پرداخته و (Kang, 1997b) مدل مقیاس را برای انتشار نویز قطار ارائه داده است. هریسون (Harrison, 2001) نیز روشی محاسباتی برای وضوح گفتار سیستم‌های اطلاع‌رسانی در ایستگاه‌های مترو را ارائه داده است. ینگ و شیلد (Yang, Shield, 1998) مدل ردیابی اشعه‌ای برای پیش بینی وضوح صدا در ایستگاه‌های با مقاطع عرضی مستطیلی را پیشنهاد داده و لم و لی (Lam, Li, 2004) مشخصه‌های زمان واخنش را بررسی کرده و مدل تئوری برای پیش بینی وضوح گفتار در فضاهای بسته طویل مستطیلی را توسعه داده‌اند. وضوح گفتار و شاخص انتقال گفتار نیز توسط شو، ایان، یو و ژی (Shou-Xian, Yue-Zhe, 2004) با استفاده از روش تصویری مطالعه شده است. کارمن (Carman, 2004) نیز مدل تئوری برای پیش بینی نویز قطار در ایستگاه‌ها و تأثیر آن بر وضوح گفتار را ارائه داده است. همانطور که گفته شد آکوستیک بحث جدیدی نیست اما آکوستیک در فضاهای طویل چندین سال است که مورد بررسی قرار گرفته و اخیراً پژوهشگران سعی بر این دارند تا پارامترهای آکوستیکی را با شبیه‌سازی کامپیوتری بررسی کنند. نرم‌افزارهای گوناگونی نیز برای این کار به وجود آمده‌اند (همچون اودئون[۱۱]، ایز[۱۲]، کامسول[۱۳]، اکتران[۱۴] و غیره) که آکوستیک فضا را پیش‌بینی می‌کنند و حتی می‌توان در آن‌ها به صداها گوش داد و نقشه‌های صوتی خروجی گرفت. در جدول شماره (۱) برخی از تحقیقات تجربی شبیه‌سازی‌شده بر اساس سال و محل انتشار، عنوان تحقیق، روش و سنجه‌های مورد مطالعه به طور اجمالی آمده است که در استخراج متغیرهای مورد نیاز تحقیق نیز از آن‌ها استفاده شده است.

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

جدول ۱- مروری بر پیشینه تحقیقات انجام شده در رابطه با روش شبیه‌سازی و متغیرهای آکوستیکی

سال	محل انتشار	عنوان تحقیق	نویسندگان	روش شبیه‌سازی	سنجه‌ها
۱۹۹۶	Sound Vibration	The speech intelligibility of the public address systems at 14 Dutch railway stations	P.A.A. Kootwijk	مدلسازی کامپیوتری با روش Ray Tracing	STI - SPL
۱۹۹۸	Acoustical Society of America	Modeling of acoustic parameters and speech intelligibility in long enclosures	Yang, Shield	مدلسازی کامپیوتری با روش Ray Tracing	RT، EDT، D50، STI، C50
۲۰۰۱	17th International Congress on Acoustics Italy	Guidelines for predicting acoustic characteristics in subway stations	Kang, Orlowski	مدل تئوری- کامپیوتری به روش TNS (نیمه‌تجربی)	AI, STI, RASTI
۲۰۰۷	Building Acoustics, Volum 14, number 3	Acoustical Design and Noise Control in Metro Stations: Case Studies of the Ankara Metro System	Su, Caliskan	شبیه‌سازی کامپیوتری با نرم افزار ODEON	RT, T_{20}, T_{30}، STI و SPL متریال‌های مختلف جاذب صوت
۲۰۱۰	Master Thesis. Address: www.cpasegypt.com	Effect of Architectural Treatments on the Acoustic Environment (Case Study: Underground Stations)	Mohamed Hassan Hussein	مدلسازی کامپیوتری با نرم افزار ODEON	RT و SPL مصالح جاذب سقف و زیر سکو
۲۰۱۳	Applied Acoustics, No.74	Architectural Treatment for Improving Sound Fields for Public Address Announcements in Underground Station Platforms	Kim, Soeta	شبیه‌سازی کامپیوتری با نرم افزار ODEON با روش Ray Tracing	SPL, STI, EDT, T_{20}, T_{30}, D_{50}, C_{50}, I-IACC
۲۰۱۳	Building Acoustics, 20(3)	Sound Field Simulation and Optimization at an Underground	Tang, Wang, Guo	شبیه‌سازی کامپیوتری با نرم‌افزار ACTRAN با روش اجزا محدود (FEM)	SPL و توزیع انرژی
۲۰۱۴	Armanshahr Architecture & Urban Development	Comparing Reverberation Time in West Churches and Mosques of Qajar Era in Tabriz	Ghaffari, Mofidi	شبیه‌سازی کامپیوتری با نرم‌افزار EASE	RT حجم فضا
۲۰۱۴	building performance simulation, Vol. 7, No. 1	Simulation of Acoustic Parameters in Rectangular Churches	Berardi	شبیه‌سازی کامپیوتری با نرم‌افزار CATT	C_{80}, L_{LF}, T_s ابعاد، حجم، موقعیت منابع
۲۰۱۵	USA: inter. Noise con	Acoustic Characteristics of Four Subway Stations in Naples, Italy	Berardi, Iannace, Giordano	شبیه‌سازی کامپیوتری با نرم افزار ODEON و DIRAK	D_{50}، C_{80}، T_{30}، STI, RT
۲۰۱۸	Engineering structures and technologies, Vol 10, issue 1	Experimental Investigation And Computer Simulations to Solve Acoustic Problems in the Modern Church	Sygulska et al	مدلسازی کامپیوتری با Sketchup و شبیه‌سازی با ODEON	RASTI, STI, RT, T_{30}, EDT, T_s, C_{50}, C_{80}, D_{50}
۲۰۱۹	Acoustics, Vol 1	Acoustic Simulation of Julius Caesar's Battlefield Speeches	Boren	شبیه‌سازی با CATT V9.1	STI, L_{eq}, BN, SPL
۲۰۲۰	Acoustics Australia, No.48	Comparative Evaluation of Ray Tracing and Diffusion Equation Modeling in Room Acoustics Design of Subway Stations	Su Gul, Odabas, Caliskan	شبیه‌سازی کامپیوتری با DIRAK	RT, SPL

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

سال	محل انتشار	عنوان تحقیق	نویسندگان	روش شبیه‌سازی	سنجه‌ها
۲۰۲۱	Applied Acoustics	The architectural acoustic design for a multipurpose auditorium: Le Serre hall in the Villa Erba Convention Center	Maria Cairoli	مدلسازی کامپیوتری با sketchup و شبیه‌سازی در CATT	SPL, D_{50}, C_{80}, T_{30}, EDT,
۲۰۲۱	Applied Acoustics	Virtual acoustic reconstruction of the Miners' Theatre in Idrija (Slovenia)	Tronchin, Merli, Dolci	مدلسازی سه بعدی با CAD و شبیه‌سازی در RAMSETE	EDT, T_{30}, C_{50}, C_{80}, STI

روش تحقیق

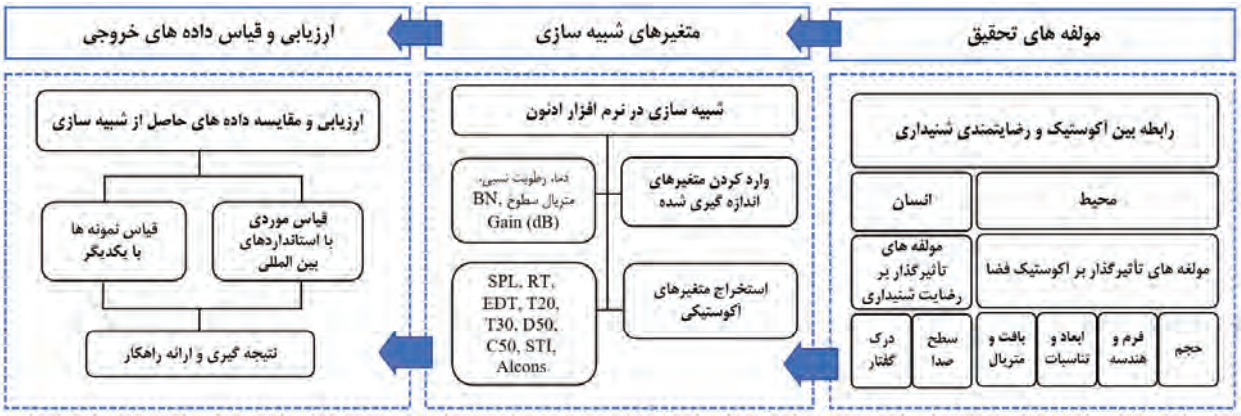
از آنجایی که پژوهش حاضر به بررسی متغیرهای آکوستیکی به منظور رضایتمندی شنیداری در ایستگاه‌های مترو بر اساس شبیه‌سازی می‌پردازد؛ از نظر هدف، پژوهشی کاربردی بوده و از نظر گونه، پژوهشی کمی به شمار آمده زیرا دارای داده‌های کمی است که از اندازه‌گیری میدانی و شبیه‌سازی حاصل شده است. در حقیقت، شبیه‌سازی در این پژوهش روشی برای توصیف رفتار آکوستیکی در ایستگاه‌های مترو و تحلیل شرایط صوتی و وضوح گفتار است. انتخاب نمونه‌های موردی بر اساس اهمیت و موقعیت ایستگاه‌ها در سه کلانشهر ایران (تهران، تبریز و اصفهان)، حجم ایستگاه‌ها (کوچک، متوسط و بزرگ) و نوع سکوهای انتظار (طرفینی و جزیره‌ای)[۱۵] است. در جدول شماره (۲) نمونه‌های موردی بر اساس نوع و حجم دسته‌بندی شده و مشخصات هر ایستگاه آمده است. طول ایستگاه‌ها تقریباً برابر بوده اما عرض و ارتفاع متفاوتی دارند که دو پارامتر مهم و اثرگذار در رفتار آکوستیکی هستند.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی- معماری ایستگاه‌های مورد بررسی (مأخذ: شرکت بهره‌برداری مترو تهران، تبریز و اصفهان)

نوع ایستگاه	حجم	نمونه موردی	مساحت (m^2)	عرض (m)	ارتفاع (سکو- ریل)	مقطع عرضی از سکو
طرفینی	کوچک	خیام (تبریز)	۴۹۰۰	۱۵	۸/۱ - ۴/۷۶	
	متوسط	امام خمینی (تهران)	۱۷۹۶۵	۲۳/۲	۶/۴ - ۴	
		دروازه دولت (تهران)	۱۲۶۷۳	۱۳/۵	۶/۶ — ۴/۲	
	بزرگ	میدان ولیعصر (تهران)	۴۲۰۰۰	۱۳/۵	۶/۰۵ — ۲/۵	
جزیره‌ای	کوچک	آزادگان (تهران)	۸۰۰۰	۱۷/۵	۸-۶/۸۰	
	متوسط	ساعت (تبریز)	۱۰۶۸۰	۲۱/۲۰	۵/۴ — ۳	
		آزادی (اصفهان)	۲۱۸۶۸	۲۴/۸۰	۷/۲۱ — ۵	
	بزرگ	امام حسین (اصفهان)	۱۹۳۶۲	۳۲/۱۰	۶/۸ — ۳	

با توجه به اینکه محیط و انسان دو عنصر کلیدی در سنجش میزان کیفیت فضای آکوستیکی در ایستگاه‌های مترو به شمار می‌آیند گام اول این تحقیق بررسی مولفه‌های تحقیق؛ محیط فیزیکی از نظر معماری و آکوستیکی است که دارای چهار شاخص مهم (حجم، فرم، تناسبات و بافت) بوده و همچنین رضایتمندی شنیداری که با میزان نویز محیط (آسایش صوتی) و درک گفتار (وضوح پیام‌ها) در آن ارتباط دارد. گام دوم؛ سعی بر شبیه‌سازی آکوستیکی است که از طریق وارد کردن داده‌های برداشت شده از مطالعات میدانی به سه‌بعدی نمونه‌ها، اقدام به استخراج متغیرهای آکوستیکی به منظور رضایتمندی شنیداری شده است. در آخر، نتایج کمی حاصل از شبیه‌سازی هر ایستگاه با دیگر ایستگاه‌ها و استانداردهای بین‌المللی مقایسه و ارزیابی صورت گرفته است. در مدل زیر زیر روابط بین مولفه‌های تحقیق، متغیرهای شبیه‌سازی و روش‌های ارزیابی و قیاس نشان داده شده است.

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]



نمودار ۱- مدل مفهومی تحقیق

در شبیه‌سازی؛ منبع صوتی با دو شدت صوتی ۹۴ و ۱۱۰ دسی‌بل بر اساس داده‌های بدست آمده از اندازه‌گیری میدانی با دستگاه صوت‌سنج B&K دانمارکی در دو حالت قطار ایستاده و در حال حرکت در مرکز طولی ایستگاه‌های مترو مورد نظر با فاصله ۱/۵ متری از لبه‌ی سکو و در ارتفاع ۱/۲۰ متر قرار داده شده است. (با توجه به اینکه نتایج حاصل از شدت صوت بالاتر در آستانه دردناکی قرار داشته و لزوم توجه بدان ضرورت دارد لذا از نمایش نتایج شدت صوت پایین‌تر در این تحقیق صرفنظر شده است). نویز زمینه و برخی از اطلاعات همچون دما و رطوبت نسبی، ویژگی‌های سطوح (جنس، نوع، ضریب جذب و پراکندگی) را بر طبق بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌های انجام شده وارد نرم‌افزار نموده و طول پاسخ ضربه‌ای و تعداد پرتوها را تنظیم و در ادامه به منظور بررسی شرایط شنیداری کاربران به ازای هر ۵ متر در دو طرف سکوها گیرنده‌های صوتی معرفی شده است که در کل ۴۰ مورد در هر ایستگاه است.

ادبیات تحقیق

متغیرهای صوتی اتاق در استاندارد بین المللی ISO 3382-1 ، مرجعی برای ارزیابی عینی آکوستیک از طریق پاسخ ضربه‌ای است. پارامترها را می‌توان از طریق اندازه‌گیری پاسخ ضربه‌ای اتاق موجود یا به وسیله شبیه‌سازی با برخی از الگوریتم‌های آکوستیک هندسی، بدست آورد. البته هر دو روش دارای نقاط قوت و محدودیت‌هایی هستند. اگر فضایی وجود نداشته باشد و یا قرار است بازسازی شود، شبیه‌سازی به منظور پیش‌بینی و بهینه کردن آکوستیک مفید هستند. عمدتاً در اندازه‌گیری پاسخ ضربه‌ای می‌توان بیش از یک منبع را برای تحریک پاسخ ضربه‌ای به کار برد اما برای اندازه‌گیری استانداردهای ISO 3382-1 تنها یک منبع کروی یا همه جانبه کافی است (ISO 3382-1, 2009). از آنجایی که بررسی رفتار صوتی بدون تعیین ابعاد، حدود و استانداردهای متغیرهای آکوستیکی امکانپذیر نیست در زیر مهمترین متغیرهایی که در سنجش سطح صدا و درک گفتار به منظور دستیابی به رضایتمندی شنیداری ضروت دارد، تعریف و استانداردهای مربوطه بیان شده است تا با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گیرد.

نویز زمینه (BN) [۱۶]؛ درون هر محیط آکوستیکی، غالباً یک تراز صدای محیطی و زمینه وجود دارد. تراز این صدا به فعالیت‌های درون و اغلب خارج از فضا بستگی دارد. یکی از مهمترین دلایل کاهش نسبت پیام به صدای ناخواسته که شنونده را مجبور را به تمرکز بیشتر می‌نماید، وجود همین صدای زمینه است که برخی اوقات بر صدای سخنرانی چیره می‌شود (قیابکلو، ۱۳۹۴: ۱۴۰). شرایط نسبتاً خوب شنیداری در سیستم‌های حمل و نقل نیاز به محدود کردن نویز زمینه تا ۵۵ NC برای قطارهای از نوع A/C به همراه سیستم‌های تهویه و امکانات جانبی بر طبق دستورالعمل‌های APTA [۱۷] دارد (Knight, 1973). براساس معیارهای نویز متعادل (NBC) نیز مقادیر پیشنهادی برای نویز زمینه در ایستگاه‌های زیرزمینی بین ۵۰ تا ۶۰ است (Barron, 2002).

تراز فشار صوتی (SPL) [۱۸]؛ حداکثر مقداری است که در طول یک رویداد یا در گذر از آن اتفاق می‌افتد. در ایستگاه‌های مترو دو حالت در تعیین این متغیر در نظر گرفته می‌شود. زمانی که قطار در ایستگاه مترو ایستاده است باید مقدار آن در فاصله ۴/۵ متری محدود به ۶۵ dB(A) و در تمام سطح سکو حداکثر ۶۷ dB(A) باشد. حالت دوم زمانی مد نظر است که قطار در حال نزدیک شدن، گذر یا خارج شدن از ایستگاه باشد. قطارهای سریع السیر با سرعت‌های بالای ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت کار می‌کنند که در موقع رسیدن به ایستگاه می‌توانند با استفاده از حداکثر شتاب و سطح ترمز سرعت خود را به ۸۰ کیلومتر بر ساعت برسانند که به طول سکو، ورود و خروج، فاصله ایستگاه‌ها از هم و عوامل دیگر بستگی دارد. با در نظر گرفتن تمام این شرایط، حداکثر تراز فشار صوتی در ایستگاه‌های مترو نباید از ۸۵ دسی‌بل بالاتر رود (Knight, 1973).

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

زمان واخنش (RT) [19]؛ اغلب در فضاهای بزرگ با سطوح سخت قابل شنیدن است. جایی که صدا مدت‌ها پس از انتشار از منبع پژواک می‌شود (Barron, 2002). بازآوایش در یک فضا به اندازه اتاق و میزان جذب صدا بستگی دارد (Cox, et al, 2009). بر طبق استانداردهای بین المللی حداکثر زمان واخنش در سکوی انتظار ایستگاه باید محدود به ۱/۶ تا ۲ ثانیه در بازه فرکانس‌های میانی به منظور کاهش تداخل گفتار باشد (Nelson, 1997). اما برای حصول به نتیجه بهینه بهتر است زمان واخنش در سکو تا بازه‌ی ۱ تا ۱/۴ ثانیه در فرکانس‌های میانی کاهش یابد. زمان‌های واخنش پایین مطلوب بوده اما به اندازه ایستگاه، طراحی و رفتار آکوستیکی نیز بستگی دارند. این امر به قابل فهم بودن اطلاعیه‌ها و ارتباطات صوتی کمک می‌کند (Wilson, 1977). تعیین زمان واخنش بر اساس محاسبات و فرمول‌های مربوطه، طراح را قادر می‌سازد تا ارزیابی اولیه و کلی از شرایط آکوستیکی فضای مورد نظر انجام دهد (Nowicka, 2020:2) و در ایجاد محیطی با وضوح گفتار بالا تأثیرگذار باشد.

وضوح گفتار (SI) [20]؛ توانایی درک پیام انتقال یافته است که در برقراری ارتباط، درک دستورالعمل‌ها و هشدارهای ایمنی ضروری است. نویز زمینه و واخنش باعث کاهش وضوح گفتار می‌شوند (Havelock, 2008). به عبارتی وضوح گفتار مربوط به کیفیت انتقال گفتار به شنوندگان است و در یک فضای واخنا با صدای زمینه آزاردهنده، انتقال گفتار مشکل است. لذا وضوح گفتار یکی از عوامل اصلی تعیین‌کننده کیفیت آکوستیکی در فضاهای طویل به شمار می‌رود. اطمینان از وضوح گفتار مناسب در چنین فضاهایی غالباً یکی از مهمترین چالش‌هایی است که طراح باید با آن مقابله کند (Nowicka, 2020:2).

از شاخص‌هایی که برای سنجش **وضوح** و **شفافیت گفتار** به کار می‌رود C_{50} [21] و D_{50} [22] هستند. در واقع وضوح و آشکاری صدا مربوط به شنیدن اجزای یک صدا به راحتی و با وضوح از میان اصوات جاری موجود است. اصوات جاری می‌توانند شکل‌های مختلفی از قبیل: گفتگو، موسیقی، فریاد بلند، صدای ماشین آلات و غیره داشته باشند. هنگامی که دو صدا (اصلی و بازتابی) در فاصله زمانی ۵۰ هزارم ثانیه به گوش می‌رسد، گوش انسان آن‌ها را به عنوان یک صدای یکپارچه تشخیص می‌دهد. این بدان معنا است که هر صدایی که در این فاصله زمانی به گوش برسد، در واقع میزان شدت صدای مستقیم دریافتی را تشدید خواهد کرد. زیرا صدای اصلی به اضافه صدای بازتابی موجب بالا رفتن شدت انرژی صوتی دریافتی و اصطلاحاً طنین می‌گردد (قیابکلو، ۱۳۹۴: ۱۴۰). مشخصات و محدوده مجاز این متغیرها در استاندارد یاد شده در جدول شماره (۳) آمده است.

جدول ۳- مشخصات پارامترهای آکوستیکی بر اساس استاندارد ISO 3382 (ISO 3382-1, 2009).

پارامترهای ISO 3382	نماد	محدوده متعارف	ارزیابی لیمن (JND)
زمان افت اولیه	EDT(s)	۱ تا ۳ ثانیه	۵٪
زمان واخنش (۲۰ دسی بل)	T_{20}(s)	۵- تا ۲۵- دسی بل	۵٪
زمان واخنش (۳۰ دسی بل)	T_{30}(s)	۵- تا ۳۵- دسی بل	۵٪
شفافیت صدا(۵۰ میلی ثانیه)	C_{50}(db)	۳- تا ۳+ دسی بل	۱ دسی بل
شفافیت صدا (۸۰ میلی ثانیه)	C_{80}(db)	۵- تا ۵+ دسی بل	۱ دسی بل
شفافیت گفتار	D_{50}	۰/۳ تا ۰/۷	۰/۰۵
زمان مرکزی	T_s(s)	۶۰ تا ۲۶۰ میلی ثانیه	۱۰ میلی ثانیه
قدرت صدا	G(dB)	۲- تا ۱۰+ دسی بل	۱ دسی بل

شاخص‌هایی همچون **شاخص انتقال گفتار (STI)** [23]، شاخص سریع انتقال گفتار (RASTI) [24] و AL_{Cons} [25] نیز پارامترهای دیگری هستند که کیفیت گفتار در فضا را توصیف می‌کنند. STI و AL_{cons} رابطه‌ی عکس با هم دارند. AL_{cons} بصورت درصدی بیان می‌شود و هر چه درصد اشتباهات گفتاری کمتر باشد وضوح گفتار بیشتر است اما STI دارای بازه‌ای بین ۰ تا ۱ است و هر چه نزدیک به ۱ باشد وضوح گفتار بهتر است. جدول (۴) رابطه بین این دو پارامتر مهم در تعیین میزان وضوح گفتار را با هم بررسی کرده است.

جدول ۴- رابطه بین دو پارامتر STI و AL_{cons} با وضوح گفتار (IEC 60268-16, 2011)

وضوح گفتار	غیرقابل قبول	ضعیف	نسبتاً خوب	خوب	عالی
STI	۰/۳ – ۰	۰/۴۵ – ۰/۳	۰/۶ – ۰/۴۵	۰/۷۵ – ۰/۶	۱ – ۰/۷۵
ALCons	٪ ۱۰۰ – ۳۳	٪ ۳۳ – ۱۵	٪ ۱۵ – ۷	٪ ۷ – ۳	٪ ۳ – ۰

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

بحث و مقایسه یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی

همانطور که گفته شد اودئون از جمله نرم‌افزارهای شبیه‌سازی است که در آن از روش‌های محاسباتی هیبریدی برای پیش‌بینی زمان‌های بازتاب‌ها در یک گیرنده و قدرت بازتاب‌ها در باند اوکتاوی استفاده می‌شود. روش‌های محاسبه مبتنی بر انرژی هستند بنابراین افزودن انرژی باند اوکتاو به یک هیستوگرام زمان، مستقیماً پاسخ ضربه‌ای مربعی را ایجاد می‌کند که برای استخراج پارامترهایی مانند T_{30} و C_{80} بدون هر گونه فیلتر دیجیتالی مورد نیاز است. طول پاسخ ضربه‌ای پیش‌بینی شده معمولاً محدود به حداکثر طول مسیری است که اشعه در آن ردیابی می‌شود. بخش اول پاسخ‌ها (بازتاب‌های اولیه) توسط لیستی از منابع تصویر تا یک دستور انتقال مشخص در بار دوم تعیین می‌شود. برای بازتاب‌های دیگر، یک عکسبرداری مارپیچی از اشعه آغاز می‌شود و در نتیجه تعداد زیادی از نقاط انعکاس بر روی سطح اتاق توزیع می‌شود. هر نقطه با یک منبع ثانویه جایگزین می‌شود که با توجه به قدرت نسبی و تاخیر بازتاب مربوطه صدا را تابش می‌کند. یک الگوریتم به نام بازتاب و بردار مبتنی بر پراکندگی از داده‌های ورودی ضریب پراکندگی سطح، فاصله بین نقاط بازتاب موجود و قبلی و همچنین زاویه انتشار برای تولید الگوی منحصر به فرد برای منبع ثانویه استفاده می‌کند (Christensen, 2013). در شبیه‌سازی که به تخمین شرایط آکوستیکی در یک فضای سه بعدی می‌پردازد، در ابتدا با تعیین ضرایب جذب صوتی متریال‌های بکار رفته در هر سطح از فضا و تعبیه منبع صوتی و گیرندگان صوتی، شرایط محیطی (دما، رطوبت و نویز زمینه)، پارامترهای محاسباتی (تعداد پرتوها، طول پاسخ ضربه‌ای و غیره) و قدرت منابع صوتی به سنجش تراز فشار صوتی و تخمین زمان واخنش و پارامترهای آکوستیکی دیگر که در تعیین وضوح گفتار کاربرد دارند می‌پردازد و به صورت جداگانه در هر یک از نقاط گیرنده اندازه‌گیری می‌کند. در این تحقیق هشت نمونه در نرم‌افزار اودئون شبیه‌سازی شده‌اند که خروجی‌های حاصل از آن در زیر آمده است. نقاط گیرنده از ابتدای طولی سکو (شماره ۱) تا انتهای آن در یک طرف (شماره ۲۰) شروع شده و ادامه آن در روبروی سکوی طرفینی و جزیره‌ای از ۲۱ تا ۴۰ شماره‌گذاری شده‌اند.

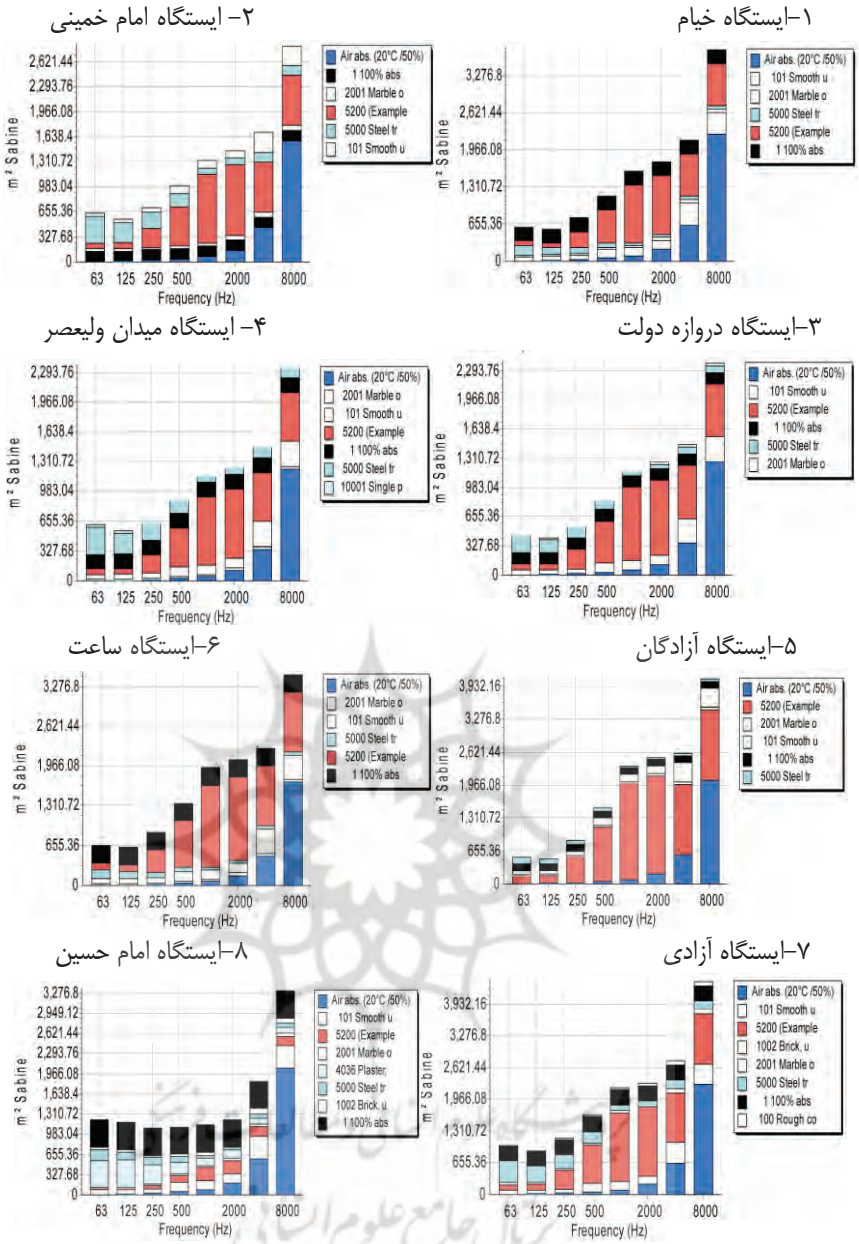
ضرایب و ظرفیت جذب صوتی: مصالح، دارای ضرایب جذب صوتی متفاوتی هستند به عنوان مثال ضریب جذب صوتی مصالح ناهموار بیشتر از مصالح صاف و صیقلی است. مصالح صاف همچون سنگ صوت را بیشتر انعکاس داده و سبب تداخل امواج می‌شود که این امر در فضاهای باریک تشدید گردیده و درنتیجه محیطی پر سر و صدا و نامفهوم ایجاد می‌کند. در جدول شماره (۵) لیستی از متریال‌های پرکاربرد به همراه ضرایب جذب صوتی در بازه فرکانس‌های میانی آمده است که در ادامه نشان می‌دهد مصالح بکار رفته در ایستگاه‌های مترو دارای چه ظرفیت و ضریب جذبی هستند.

جدول ۵- لیست متریال و ضرایب جذب آن‌ها (Christensen, 2002)

متریال	۶۳	۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱	۲	۴	۸
ویدها با جذب ۵۰٪	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
سرامیک با سطوح صاف	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
گرانیت	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
پانل های گچی	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۹
پروفیل های فلزی	۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۱۵
ملات ماسه (۳/۲ سانتی متری)	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۵۳	۰/۶۴	۰/۸۴	۰/۹۱	۰/۶۳	۰/۶۳
بلوک بتنی با سطح ناهموار	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۴۴	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۳۹	۰/۲۵	۰/۸۲
بلوک بتنی رنگ شده	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۸
قطعات بزرگ شیشه	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
سقف کاذب	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۸۰	۰/۶۵	۰/۷۲	۰/۷۸	۰/۷۴	۰/۷۴
پله برقی	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۴۰	۰/۰۲	۰/۰۲
درب فلزی	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۴۰	۰/۰۲	۰/۰۲

نمودارهای شماره (۲) در واقع نحوه توزیع ظرفیت جذب صوتی متریال‌های بکار رفته در ایستگاه‌های مورد بررسی را بر حسب مترمربع در محدوده‌ی فرکانس‌های میانی را نشان می‌دهد. ایستگاه‌های ۱ تا ۴ ایستگاه‌های طرفینی و ایستگاه‌های ۵ تا ۸ مربوط به ایستگاه‌های جزیره‌ای است. بیشترین مساحت مربوط به جذب صوت در فرکانس ۸۰۰۰ هرتز و کمترین مساحت در فرکانس ۱۲۵ هرتز در تمام ایستگاه‌ها به جز ایستگاه امام حسین قابل مشاهده است. مقادیر زیادی از جاذب‌های صوت در وهله نخست مربوط به هوا، سپس سقف‌های کاذب، ویدها و تونل‌ها در محدوده فرکانس‌های بالایی می‌باشند.

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]



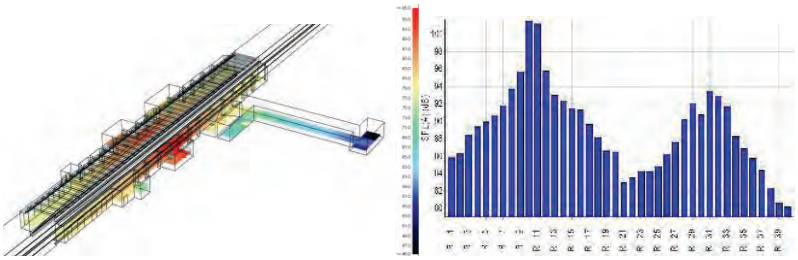
نمودار ۲- توزیع ظرفیت‌های جذب صوتی متریال‌های هر ایستگاه با توجه به عملکردشان در فرکانس‌های میانی

تراز فشار صوتی (SPL)؛ در نرم‌افزار اودئون، تراز فشار صوتی در نقاط گیرنده هم بصورت نمودار میله‌ای و هم شبکه‌ای رنگی نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است در نمودارهای میله‌ای، در نقاط نزدیک به منبع صوتی که نقاط شماره ۱۰، ۱۱ و حتی ۹، ۱۲ می‌باشند، تراز فشار صوتی بالاترین میزان را به علت فاصله کم با منبع دارند و همچنین نقاط روبرویی این موقعیت ها که شماره های ۳۰ و ۳۱ می‌باشند. می‌توان گفت مثلث وسط ایستگاه بیشترین تراز فشار صوتی داشته و هر چه به انتهای ایستگاه (تونل‌های قطار) نزدیک‌تر می‌شود از تراز فشار صوتی کاسته می‌شود. تنها ایستگاهی که در آن تراز فشار صوتی در سکوی دیگر از منبع صوتی تأثیر کمتری دارد، ایستگاه آزادی است زیرا ارتباط دو لبه سکو به وسیله دیوارهای مابین سکوی جزیره‌ای قطع شده و تنها نقاط اشتراک در دو انتهای سکو برای استفاده از پله‌ها است و با قرار گرفتن منبع صوت در مرکز، نقطه روبروی منبع در سمت دیگر دارای کمترین تراز فشار صوتی بعد از گوشه‌های ایستگاه است. در نمودار بعدی شدت تراز فشار صوتی را در سکوی انتظار هر ایستگاه بصورت شبکه‌ای با رنگ‌های مختلف نشان می‌دهد. رنگ قرمز مربوط به بیشترین و رنگ آبی تیره کمترین مقدار در هر ایستگاه است. در اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی تنها مناطق نزدیک منبع صوتی قرمز رنگ و

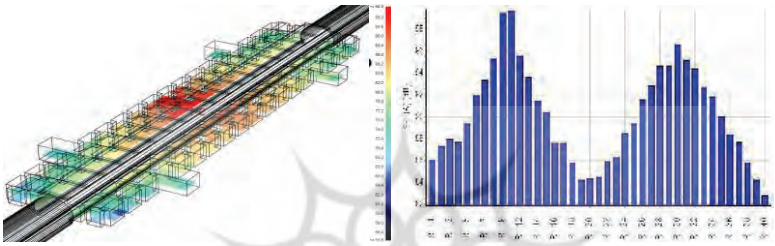
[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

شبکه‌های روبروی آن‌ها نارنجی بوده و با دور شدن از منبع صوتی به ترتیب شدت تراز فشار صوتی با رنگ‌های زرد، سبز، آبی و در نهایت در تونل‌های دسترسی به پله برقی و پله‌ها به رنگ آبی تیره یا سیاه نمایش داده شده است. در بررسی‌های نمونه‌ای مشاهده می‌شود اکثر شبکه‌بندی‌های سکوی ایستگاه امام حسین به رنگ قرمز و نارنجی است. علت آن را می‌توان استفاده زیاد از گچ در سقف و دیوارها با ضریب جذب کمتری نسبت به سقف‌های کاذب و همچنین بزرگی و حجم زیاد فضا اشاره کرد.

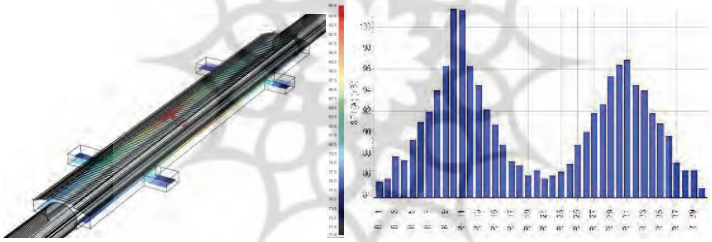
خیام



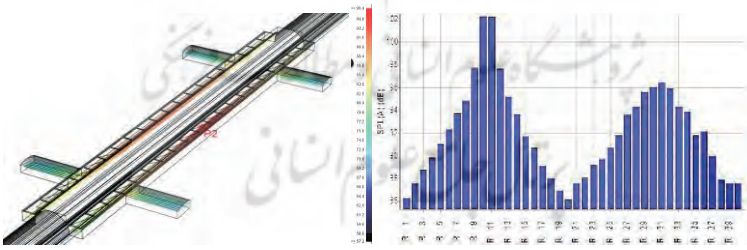
امام خمینی



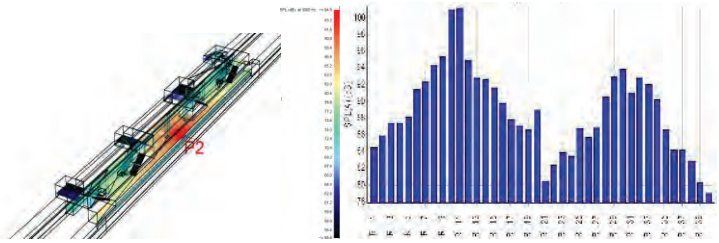
دروازه دولت



میدان ولیعصر

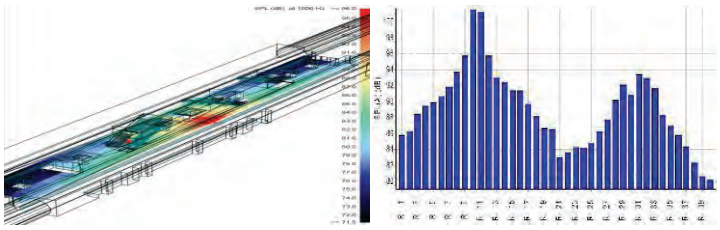


آزادگان

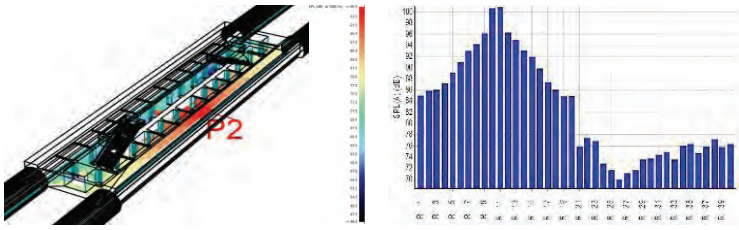


[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

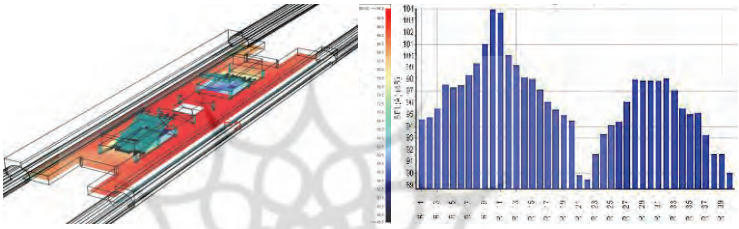
ساعت



آزادی



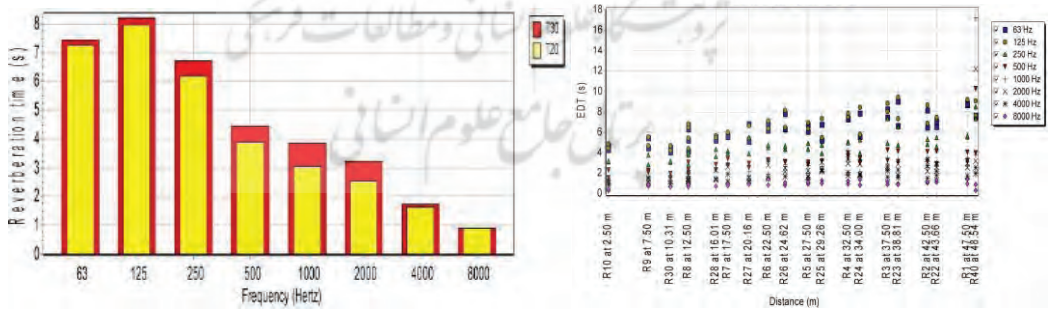
امام حسین



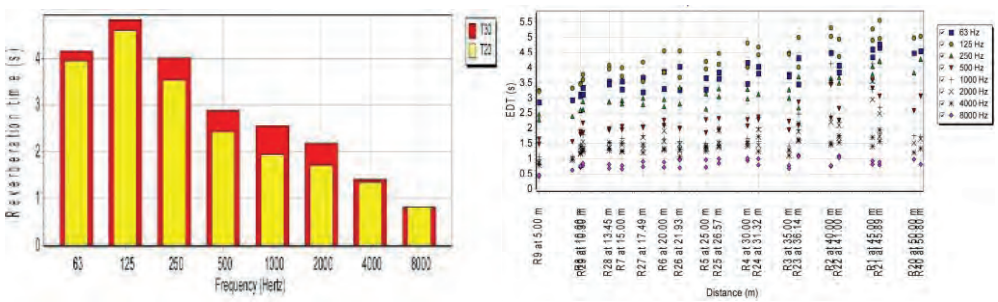
نمودار ۳- تراز فشار صوتی وزن‌یافته با توجه به موقعیت دریافت کننده در هر ایستگاه به دو صورت نموداری و شبکه‌ای

زمان واخنش (RT) و زمان افت اولیه (EDT): آنچه از بررسی اسپکتوگرام زمان واخنش در ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود این است که در تمام ایستگاه‌ها به غیر از ایستگاه امام حسین، زمان واخنش در فرکانس ۱۲۵ هرتز و در ایستگاه امام حسین در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز دارای بالاترین مقدار است. ماکزیمم زمان واخنش نیز حدوداً ۸ ثانیه در ایستگاه خیام تخمین زده شده است. زمان افت اولیه در شبیه‌سازی نسبت به موقعیت گیرنده‌ها و در بازه‌ی فرکانس‌های میانی سنجیده شده است. فرکانس‌های بالاتر زمان افت اولیه کمتری نسبت به فرکانس‌های پایین‌تر دارند و نزدیکترین نقاط به منبع صوتی دارای کمترین زمان هستند.

خیام

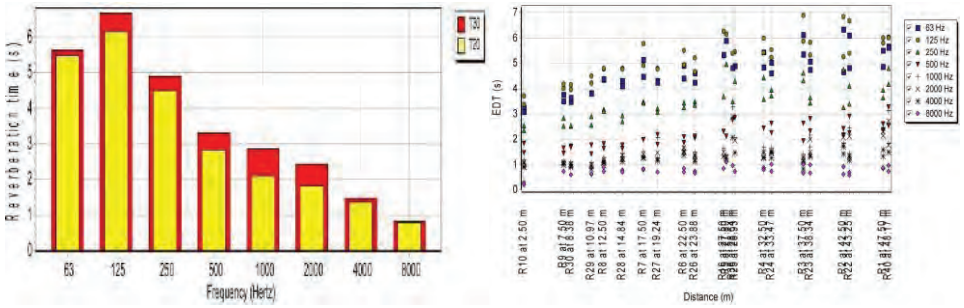


امام خمینی

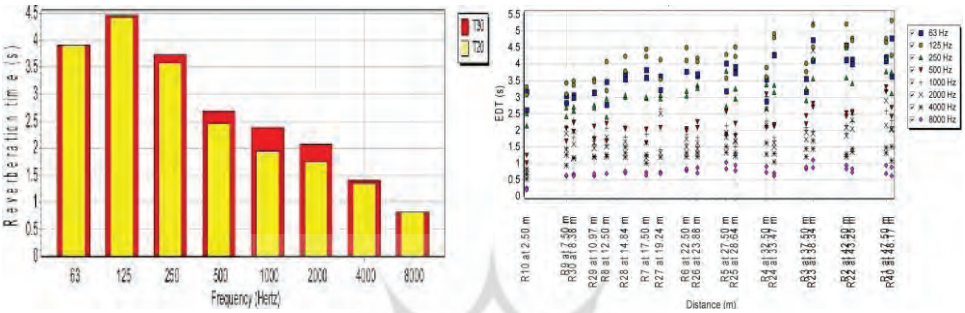


[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

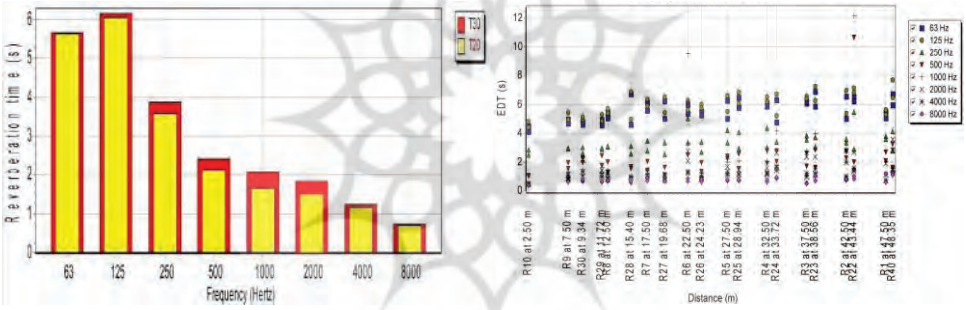
دروازه دولت



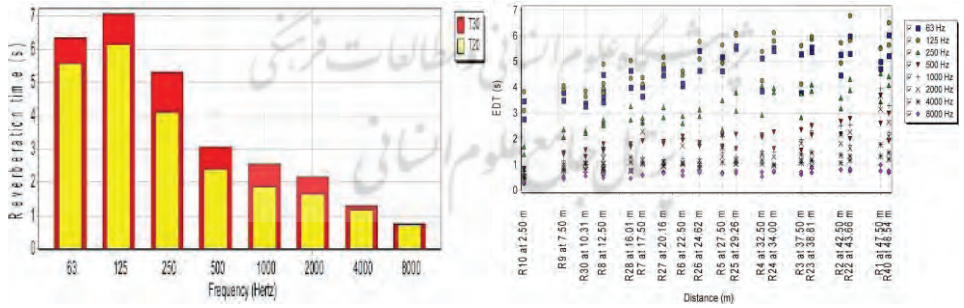
میدان ولیعصر



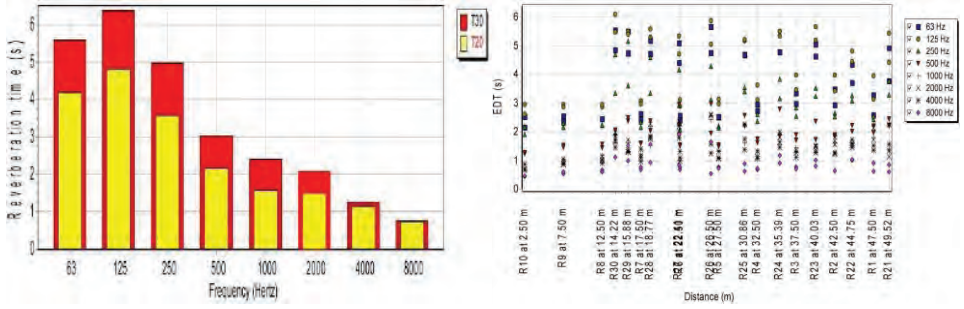
آزادگان



ساعت

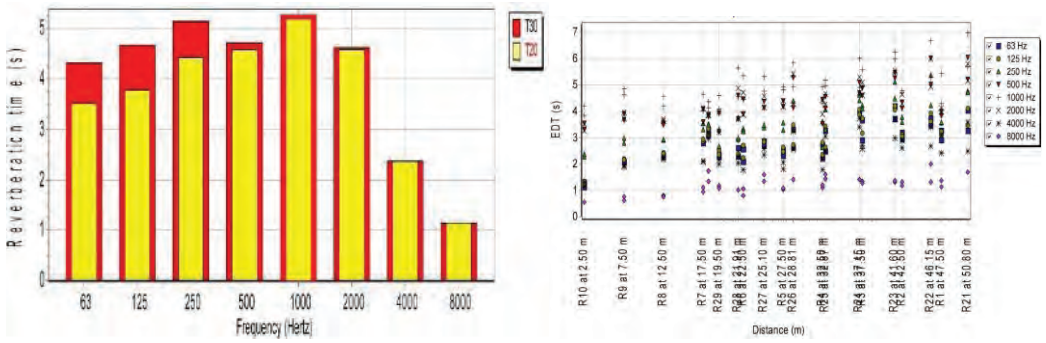


آزادی



[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

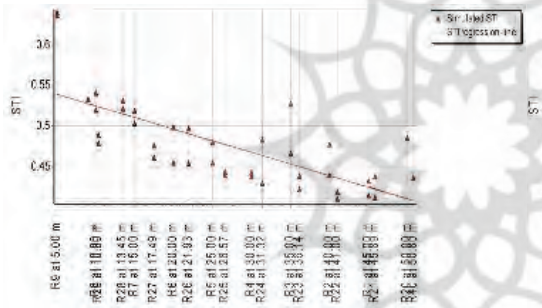
امام حسین



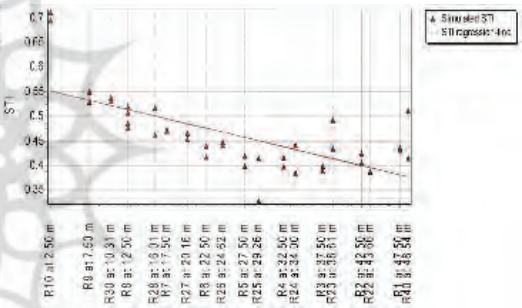
نمودار ۴- سمت راست: زمان افت اولیه (EDT) نسبت به موقعیت گیرنده‌ها سمت چپ: زمان واخنش (RT) در بازه فرکانس‌های میانی

شاخص انتقال گفتار (STI): نتایج حاصل از شبیه‌سازی هشت ایستگاه مترو برای بررسی شاخص انتقال گفتار در نمودار (۵) آمده است. شاخص انتقال گفتار طبق استانداردها اگر پایین‌تر از ۰/۶ باشد، متوسط و پایین‌تر از ۰/۴۵ ضعیف به شمار می‌آید. همانطور که نمودارها نشان می‌دهند اکثر نقاط اندازه‌گیری شده دارای شاخص انتقال گفتار متوسط و ضعیف هستند. تنها موقعیتی که دارای شاخص انتقال گفتار خوب یعنی ۰/۶ تا ۰/۷۵ هستند نزدیک‌ترین نقطه به منبع صوتی بوده و بعد از آن شیب نمودار نزولی شده است. تعداد و تجمع داده‌ها در بازه‌ی متوسط و ضعیف نیز نشاندهنده کیفیت پایین گفتار و وضوح آن است.

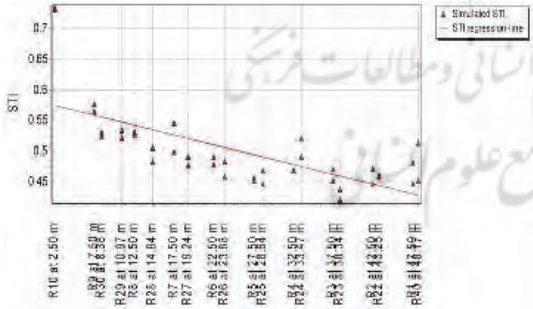
امام خمینی



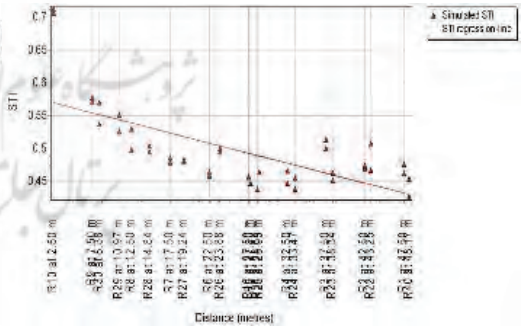
خیام



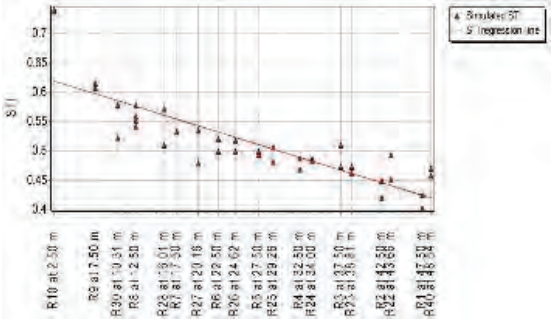
میدان ولیعصر



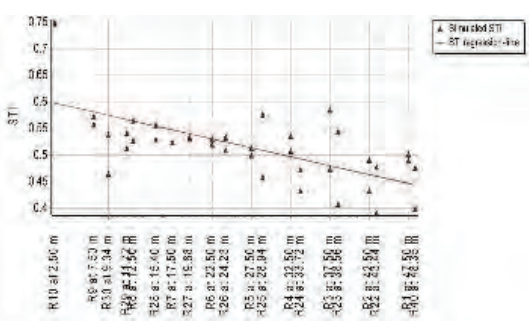
دروازه دولت



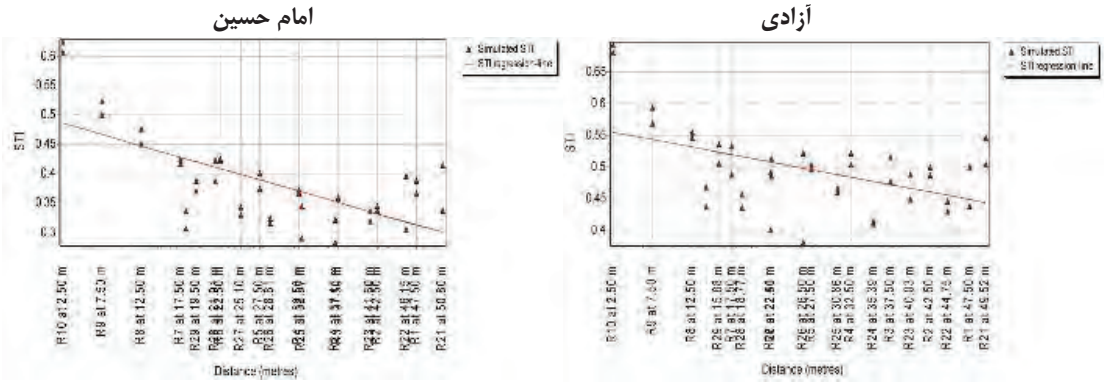
ساعت



آزادگان



[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]



نمودار ۵- شاخص انتقال گفتار (STI) نسبت به موقعیت هر گیرنده در ایستگاه‌های مورد بررسی

درصد اشتباهات گفتاری (AL_{Cons}%): از بررسی داده‌های استخراج شده مربوط به پارامتر AL_{cons} در نرم‌افزار اودئون، مینیمم، میانه و ماکزیمم مقدار هر ایستگاه در جدول (۶) آمده است. بالاترین میزان اشتباهات گفتاری در ایستگاه امام حسین و خیام که شاخص انتقال گفتار آن‌ها نیز پایین‌تر نسبت به ایستگاه‌های دیگر بود، برآورد شده است. پایین‌ترین مقدار در ایستگاه آزادگان ۳/۴۹ درصد است. بیشترین انحراف معیار در ایستگاه امام حسین و کمترین در ایستگاه دروازه دولت تخمین زده شده است. بر طبق استانداردها، Al_{cons} بالاتر از ۱۸٪ غیرقابل قبول تلقی شده بنابراین مقادیر ماکزیمم در بازه غیر قابل قبول و مقادیر میانه در بازه بد و مینیمم مقدارها در بازه‌ی بسیار خوب قرار دارند.

جدول ۶- خروجی‌های Al_{cons} از نرم‌افزار اودئون

ایستگاه	مینیمم	میانه	ماکزیمم	انحراف استاندارد
خیام	۴/۲۳	۱۵/۷۴	۲۸/۹۵	۴/۸۵
امام خمینی	۶/۰۶	۱۴/۱۸	۱۹/۱۱	۳/۲۶
دروازه دولت	۴/۲۱	۱۲/۸۳	۱۷/۶۶	۳/۰۵
میدان ولیعصر	۳/۷۸	۱۲/۷۶	۱۸/۲۰	۳/۰۸
آزادگان	۳/۴۹	۱۱/۸۰	۲۱/۱۲	۳/۷۱
ساعت	۳/۶۴	۱۱/۹۰	۱۹/۹۲	۳/۴۵
امام حسین	۶/۵۸	۲۳/۰۴	۳۶/۲۳	۷/۰۵
آزادی	۴/۶۶	۱۳/۰۶	۲۲/۲۵	۳/۷۶

وضوح صدا (C_{50}) و شفافیت گفتار (D_{50})؛ نمودارهای C_{50} و D_{50} هر ایستگاه به طور جداگانه در بازه‌ی فرکانس‌های میانی در زیر جدول (۷) ترسیم شده است. از آنجایی که وضوح گفتار معمولاً در فرکانس‌های گفتاری انسان در بازه‌ی ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز بررسی می‌شوند لذا نتایج بدست آمده نشان می‌دهد وضوح صدا در محدوده‌ی این فرکانس‌ها در هیچ ایستگاهی استاندارد نبوده و شفافیت گفتار تا حدودی در ایستگاه آزادی بهتر است.

جدول ۷- وضوح (C_{50}) و شفافیت گفتار (D_{50}) ایستگاه‌ها در بازه فرکانس‌های میانی

ایستگاه خیام

D(50) Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum	0.03	0.02	0.04	0.07	0.10	0.11	0.14	0.27
Maximum	0.56	0.56	0.66	0.77	0.84	0.85	0.86	0.93
Average	0.14	0.13	0.20	0.30	0.40	0.42	0.46	0.64
Standard deviation	0.11	0.11	0.13	0.15	0.16	0.16	0.15	0.13
C(50) dB Band (Hz)	**63**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
Minimum	-15.8	-16.0	-14.2	-11.6	-9.4	-8.9	-7.8	-4.3
Maximum	1.1	1.0	2.9	5.1	7.3	7.6	8.0	11.5
Average	-8.8	-9.1	-6.8	-4.1	-2.0	-1.5	-0.6	2.8
Standard deviation	3.5	3.5	3.4	3.2	3.3	3.3	3.1	3.0

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

ایستگاه امام خمینی

D(50) Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum	0.08	0.07	0.11	0.21	0.27	0.27	0.32	0.46
Maximum	0.45	0.42	0.52	0.65	0.77	0.79	0.79	0.89
Average	0.17	0.15	0.22	0.33	0.45	0.46	0.49	0.66
Standard deviation	0.08	0.08	0.09	0.10	0.12	0.12	0.11	0.09

C(50) dB Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum	-10.5	-11.5	-8.9	-5.8	-4.4	-4.4	-3.4	-0.7
Maximum	-0.8	-1.4	0.3	2.7	5.3	5.8	5.9	9.0
Average	-7.2	-7.9	-5.8	-3.1	-0.9	-0.7	-0.2	3.0
Standard deviation	2.2	2.3	2.0	1.9	2.2	2.2	2.0	1.9

ایستگاه دروازه دولت

D(50) Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum	0.05	0.05	0.09	0.18	0.30	0.30	0.35	0.48
Maximum	0.55	0.53	0.63	0.75	0.83	0.84	0.85	0.92
Average	0.15	0.14	0.21	0.34	0.49	0.50	0.51	0.67
Standard deviation	0.11	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.09

C(50) dB Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum	-12.7	-13.1	-10.2	-6.6	-3.8	-3.7	-2.8	-0.3
Maximum	1.0	0.5	2.3	4.7	6.8	7.1	7.5	10.6
Average	-8.1	-8.5	-6.1	-2.9	-0.2	0.0	0.3	3.2
Standard deviation	3.1	3.0	2.6	2.3	2.1	2.1	2.0	2.1

ایستگاه میدان ولیعصر

D(50) Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum	0.08	0.07	0.12	0.23	0.26	0.24	0.38	0.56
Maximum	0.66	0.64	0.71	0.79	0.86	0.86	0.87	0.93
Average	0.21	0.19	0.26	0.37	0.45	0.46	0.52	0.68
Standard deviation	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.08

C(50) dB Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum	-10.7	-11.3	-8.5	-5.2	-4.5	-4.9	-2.2	1.0
Maximum	2.9	2.4	3.8	5.9	7.8	8.0	8.4	11.4
Average	-6.3	-6.7	-4.9	-2.5	-0.8	-0.6	0.5	3.5
Standard deviation	3.0	3.0	2.7	2.4	2.4	2.4	2.2	2.2

ایستگاه آزادگان

D(50) Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum	0.01	0.01	0.02	0.05	0.07	0.08	0.10	0.17
Maximum	0.56	0.55	0.72	0.85	0.93	0.93	0.92	0.96
Average	0.13	0.12	0.22	0.37	0.50	0.52	0.52	0.65
Standard deviation	0.11	0.11	0.15	0.18	0.20	0.20	0.19	0.18

C(50) dB Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum	-19.8	-20.5	-16.3	-13.0	-11.3	-10.8	-9.8	-7.0
Maximum	1.1	0.8	4.0	7.7	10.9	11.0	10.8	13.8
Average	-9.7	-9.9	-6.3	-2.8	0.0	0.3	0.4	3.2
Standard deviation	4.4	4.5	4.2	4.1	4.3	4.2	4.0	4.1

ایستگاه ساعت

D(50) Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum	0.02	0.02	0.05	0.11	0.18	0.19	0.19	0.28
Maximum	0.63	0.60	0.72	0.82	0.85	0.86	0.88	0.93
Average	0.18	0.17	0.25	0.36	0.45	0.46	0.49	0.63
Standard deviation	0.15	0.14	0.17	0.18	0.17	0.17	0.17	0.16

C(50) dB Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum	-17.8	-17.7	-13.1	-9.0	-6.7	-6.4	-6.2	-4.1
Maximum	2.3	1.8	4.2	6.7	7.7	7.9	8.8	11.3
Average	-8.0	-8.4	-5.6	-2.9	-0.9	-0.7	0.0	2.6
Standard deviation	4.6	4.5	4.1	3.7	3.3	3.3	3.4	3.5

ایستگاه آزادی

C(50) dB Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum	-23.8	-25.5	-22.3	-18.8	-19.6	-20.7	-17.1	-13.7
Maximum	1.6	0.8	2.2	4.4	6.7	6.7	7.1	9.8
Average	-9.0	-10.0	-7.9	-5.5	-3.5	-3.6	-2.7	-0.1
Standard deviation	7.4	7.7	7.1	6.7	7.0	7.0	6.7	6.8

D(50) Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Maximum	0.59	0.55	0.63	0.73	0.82	0.82	0.84	0.90
Average	0.13	0.12	0.15	0.21	0.27	0.27	0.29	0.37
Standard deviation	0.16	0.14	0.17	0.22	0.27	0.27	0.28	0.34

ایستگاه امام حسین

C(50) dB Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum	-19.6	-20.0	-21.4	-23.0	-24.1	-24.2	-20.0	-14.9
Maximum	5.1	4.9	3.7	2.4	1.6	2.2	4.2	7.8
Average	-6.9	-7.0	-8.3	-9.6	-10.6	-10.1	-7.1	-3.0
Standard deviation	6.2	6.2	6.3	6.4	6.6	6.6	6.1	5.7

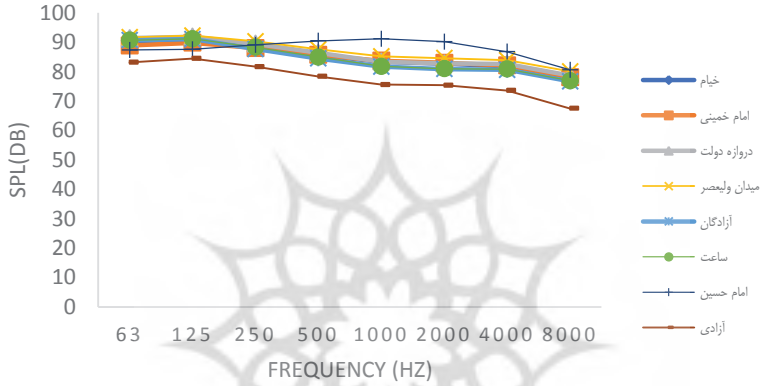
D(50) Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Minimum	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03
Maximum	0.76	0.76	0.70	0.64	0.59	0.62	0.73	0.86
Average	0.24	0.23	0.20	0.16	0.14	0.15	0.23	0.38
Standard deviation	0.19	0.19	0.17	0.15	0.14	0.15	0.18	0.23

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

ارزیابی نمونه‌ها و جمع‌بندی

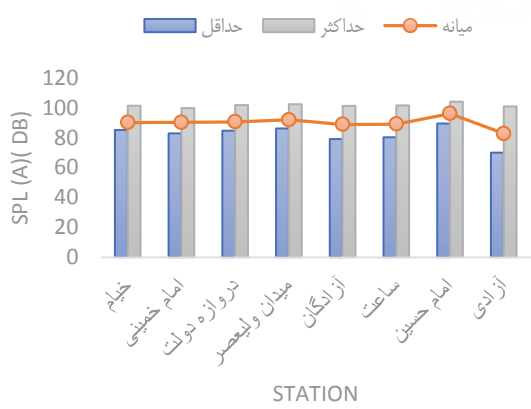
با توجه به اهمیت موضوع و به منظور ارزیابی و درک بیشتر به جمع‌بندی و مقایسه رفتار آکوستیکی در ایستگاه‌های مترو مورد مطالعه پرداخته شده است تا راهکارها و پیشنهاداتی برای بهبود شرایط آکوستیکی در ایستگاه ها ارائه شود.

در نمودار شماره (۶) میانگین تراز فشار صوتی ایستگاه ها با توجه به فرکانس‌های میانی آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود به جز ایستگاه امام حسین که نموداری متفاوت نسبت به دیگر ایستگاه‌ها دارد بقیه ایستگاه‌ها در فرکانس‌های پایین دارای تراز فشار صوتی بالاتری است و در حالت کلی شیب نمودار نزولی است. ایستگاه آزادی، تراز فشار صوتی معقول‌تر و استانداردتری دارد. از آنجایی که این نمودار تراز فشار صوتی را بصورت میانگین نشان می‌دهد اما همچنان فرکانس‌های پایین‌تر از ۱۰۰۰ هرتز بالاتر از استانداردهای جهانی است. با توجه به ماهیت بازتاب‌ها در فرکانس‌های مختلف انتظار می‌رود تراز فشار صوتی در فرکانس‌های پایین به علت پخشاگر بودن بازتاب‌ها، بالاتر باشد. آنچه در این تحقیق اهمیت دارد رضایت شنیداری مخاطبان است و بهتر است تراز فشار صوتی در محدوده فرکانس‌های گفتاری و شنیداری انسان که برای وضوح گفتار لازم است، در حد استاندارد قرار گرفته و آسایش صوتی تأمین شود.

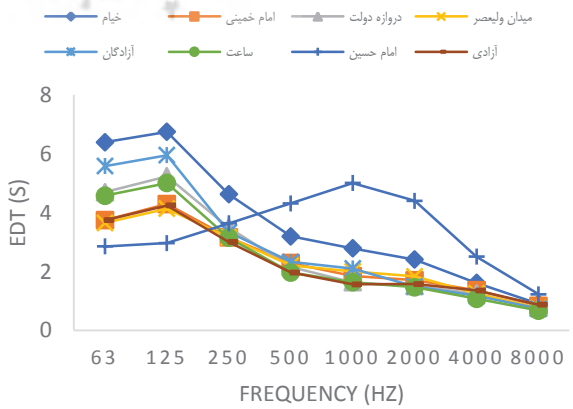


نمودار ۶- میانگین تراز فشار صوتی در بازه فرکانس‌های میانی ایستگاه‌های مورد بررسی

نمودار (۷) مینیمم، متوسط و ماکزیمم تراز فشار صوتی وزن یافته را با توجه به هر ایستگاه جداگانه نشان می‌دهد. ماکزیمم مقدار تراز فشار صوتی در تمام ایستگاه‌ها بالاتر از ۱۰۰ دسی بل بوده و میانگین آن در بازه‌ای بین ۸۰ تا ۱۰۰ دسی بل و مینیمم مقدار آن بین ۷۰ تا ۹۰ دسی بل می‌باشد. در حالت کلی بالاترین مقدار در هر سه سطح مینیمم، متوسط و ماکزیمم تراز فشار صوتی مربوط به ایستگاه امام حسین و پایین‌ترین مقدار در ایستگاه آزادی و امام خمینی است. از مقایسه زمان افت اولیه (EDT) در ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود ایستگاه امام حسین برخلاف ایستگاه‌های دیگر سیر صعودی در فرکانس‌های بالایی دارند این در حالی است که ایستگاه‌های دیگر از فرکانس ۱۲۵ هرتز شروع به نزول کرده‌اند. در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز به غیر از ایستگاه امام حسین و خیام بقیه ایستگاه‌ها زمان افت اولیه تقریباً یکسان و در حدود ۲ ثانیه دارند.



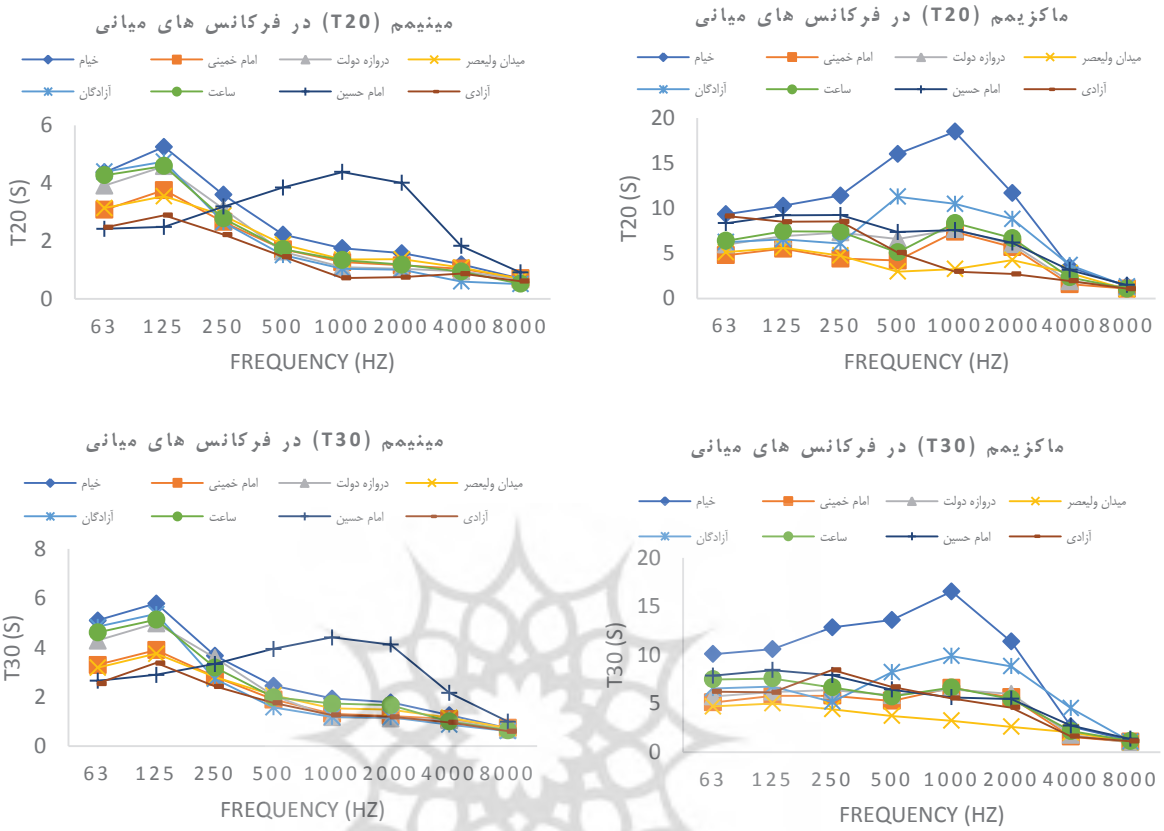
چپ: حداقل، میانگین و حداکثر تراز فشار صوتی وزن یافته



نمودار ۷- نمودار راست: متوسط زمان افت اولیه (EDT) در فرکانس‌های میانی

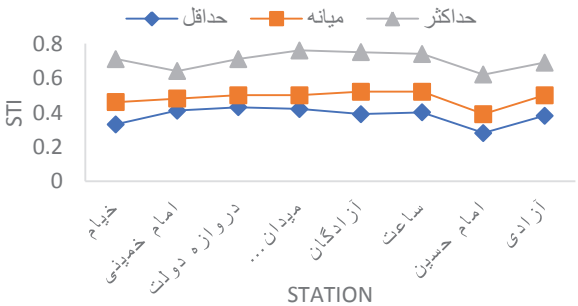
[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

در نمودارهای (۸) مینیمم و ماکزیمم T_{20} و T_{30} در فرکانس‌های مختلف در ایستگاه‌های مورد مطالعه آمده است و نشان می‌دهد تفاوت فاحشی بین T_{20} و T_{30} وجود ندارد. تنها مورد اختلاف در ایستگاه میدان ولیعصر و آزادی در ماکزیمم T_{20} و T_{30} است که اهمیت آنچنانی ندارد.

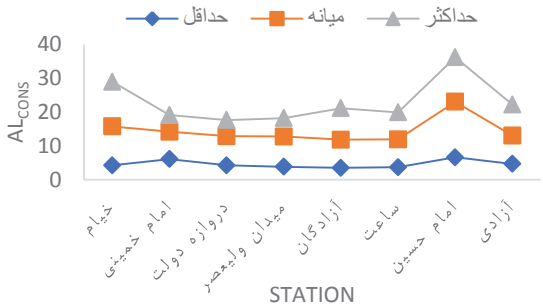


نمودار ۸– مینیمم و ماکزیمم مقدار (T20) و (T30) در فرکانس‌های میانی

نمودار (۹) سمت راست مینیمم، متوسط و ماکزیمم مقدار STI بدست آمده در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً نیز بررسی شد تنها یک یا دو نقطه در محدوده خوب و باقی نقاط در محدوده متوسط یا ضعیف قرار گرفته بودند. با این حال ماکزیمم مقدار این نمودار مربوط به نقاط نزدیک منبع صوتی هستند که کمترین تعداد را داراست. این نمودار به منظور تعیین بالاترین و پایین‌ترین میزان در هر ایستگاه ترسیم شده است. لذا بر اساس این نمودار، پایین‌ترین میزان STI در ایستگاه امام حسین و سپس خیام است. هیچ ایستگاهی دارای کیفیت عالی نیست و متوسط ایستگاه‌ها در بازه ۰/۴ تا ۰/۵ قرار گرفته‌اند. نمودار سمت چپ نیز نشان می‌دهد بالاترین درصد AL_{cons} مربوط به ایستگاه امام حسین و سپس ایستگاه خیام است. همچنین این دو ایستگاه بیشترین دامنه تغییرات را دارند. بقیه ایستگاه‌ها اختلاف کمتری با هم داشته و نمودار میانه آن‌ها در حد ضعیف و نمودار مینییمم آن‌ها در بازه خوب قرار دارد. بالا بودن AL_{cons} و پایین بودن STI دلیلی بر عدم وضوح گفتار است که ایستگاه‌های مترو با آن مواجه هستند.



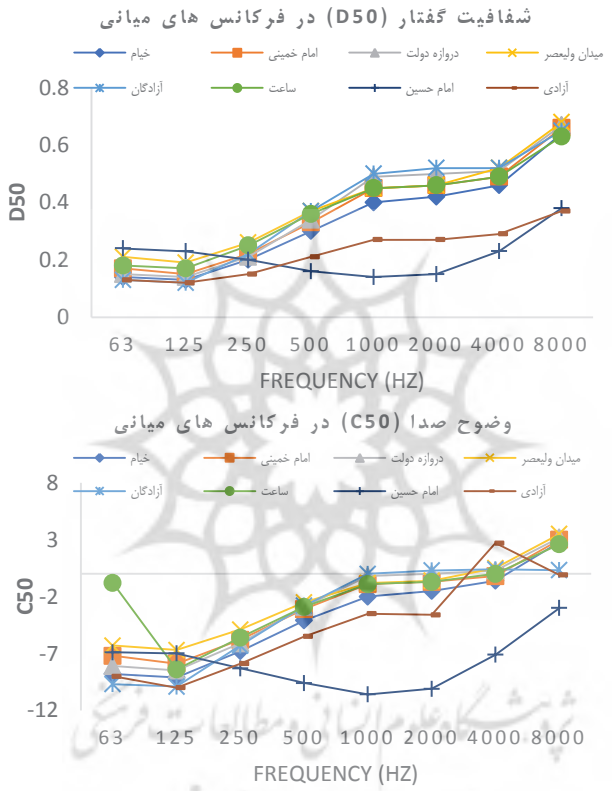
چپ: مینیمم، میانه و ماکزیمم مقدار AL_{cons} در هر ایستگاه



نمودار ۹–راست: مینیمم، میانه و ماکزیمم مقدار در هر ایستگاهSTI نمودار

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

مقدار D_{50} در مهمترین فرکانس مربوط به گفتار یعنی ۱۰۰۰ هرتز در دو ایستگاه آزادگان و دروازه دولت در آستانه مجاز قرار گرفته و ایستگاه‌های امام حسین و آزادی خیلی پایین‌تر از حد مجاز هستند. باقی ایستگاه‌ها نیز در حد وسط این دو حالت قرار دارند. وضوح صدا (C_{50}) در هیچ ایستگاهی در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز به حد مجاز نرسیده ایستگاه امام حسین در وضعیت بدتری قرار دارد و دو ایستگاه آزادگان و دروازه دولت از بین هشت ایستگاه مورد بررسی نزدیکتر به آستانه مجاز هستند. وضوح صدا و شفافیت گفتار دو پارامتری هستند که بر شمردگی، رسایی، دقت و قابل درک بودن گفتار تأکید دارند. پایین بودن این شاخص‌ها پیام‌های صوتی پخش شده در ایستگاه‌ها را غیرقابل فهم ارزیابی نموده و کیفیت آکوستیکی محیط را زیر سوال می‌برد. از آنجایی که ایستگاه‌های مترو به عنوان فضاهای خدماتی نیازمند وضوح گفتار بیشتر از فضاهای تفریحی و کمتر از فضاهای آموزشی است لذا کاهش بازتاب‌ها و تداخلات ناشی از حجم، فرم کالبدی و مصالح بکار رفته در ایستگاه‌ها تأثیر بسزایی در این امر دارد.



نمودار ۱۰- راست: شفافیت گفتار (D_{50}) چپ: وضوح گفتار (C_{50}) در بازه فرکانس‌های میانی

نتیجه‌گیری

همانطور که در مقاله نیز آمده است ایستگاه‌های مترو جزء مکان‌های عمومی پر سر و صدا هستند که وضعیت آکوستیکی آن‌ها تأثیر بسزایی در ایمنی و امنیت فضا دارد و با گذشت زمان منجر به کاهش شنوایی، عدم تمرکز و آسایش صوتی مخاطبان شده و در نتیجه نارضایتی آنان سبب کاهش کیفیت فضا می‌شود. با توجه به کاربردی بودن چنین فضاهایی بخصوص در شهرهای بزرگ و پر ترافیک لزوم رسیدگی به این امر مهم را تبدیل به ضرورت می‌کند. در همین راستا در این پژوهش سعی شد با استفاده از روش شبیه‌سازی کامپیوتری به تعیین شرایط آکوستیکی ایستگاه‌های مترو از سه شهر تهران، تبریز و اصفهان به منظور رضایتمندی شنیداری پرداخته و نتایج حاصل مورد بحث و مقایسه قرار گیرند تا در طراحی‌های آینده مد نظر قرار گیرند.

ازمهمترین پارامترهایی که به توصیف شرایط آکوستیکی در ایستگاه‌های مترو می‌پردازد؛ تراز فشار صوتی و زمان واخنش هستند. از بررسی سطوح و جداره‌های ایستگاه‌های مترو مورد مطالعه و همچنین مصالح و ضرایب جذب آن‌ها می‌توان نتیجه گرفت که هیچکدام از ایستگاه‌ها از نظر آکوستیکی در شرایط ایده‌آلی نیستند. نویز زمینه و تراز فشار صوتی مقادیر بالاتری از استانداردهای بین‌المللی را دارند که این امر سبب

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

می‌شود پیام‌های صوتی شنیده نشوند و مخاطبان آسایش صوتی نداشته باشند. از طرفی استفاده بیش از حد از مصالح سنگی و صیقلی زمان واخنش را افزایش داده و وضوح گفتار را دچار مشکل می‌کند. از دیگر پارامترهای مهم و تأثیرگذار در تعیین وضوح گفتار STI، AL_{cons}، C_{50}، D_{50} می‌باشند که افزایش SPL و RT بر روی آن‌ها نیز اثر گذاشته و وضوح گفتار را کاهش می‌دهد.

شبیه‌سازی نمونه‌های موردی نشان می‌دهند مقادیر زیاد جاذب‌های صوت مربوط به جذب هوا، سقف‌های کاذب، ویدها و تونل‌ها در محدوده فرکانس‌های بالا هستند. با توجه به اینکه اکثر سطوح کف و دیوارها را سنگ و بتن و در موارد اندکی آجر و گچ تشکیل داده و سقف‌ها بصورت کاذب و فلزی (دامپا) و گچ کار شده است، لذا سطوح جاذب صوت بسیارکم است. با قرارگیری منبع صوتی در مرکز ایستگاه‌ها، آلودگی صوتی بیشتر در مثلث وسط ایستگاه بوده و هر چه به انتهای ایستگاه (تونل‌های قطار) نزدیک‌تر می‌شود از تراز فشار صوتی کاسته می‌شود. نقشه‌های صوتی نیز بصورت شبکه‌ای و با طیف رنگی گرم رو به سرد، روند کاهش تراز فشار صوتی در نقاط مختلف سکوها را نشان می‌دهد. ماکزیمم مقدار زمان واخنش در فرکانس ۱۲۵ هرتز و ۱۰۰۰ هرتز تخمین زده شده است. پارامتر زمان افت اولیه (EDT) در فرکانس‌های بالاتر نسبت به فرکانس‌های پایین‌تر میزان کمتری داشته‌اند. در رابطه با بررسی شاخص‌های مربوط به وضوح گفتار، STI از جمله مهمترین پارامترهای ارزیابی به شمار می‌آید. تجمیع داده‌ها در بازه‌ی متوسط و ضعیف نیز نشاندهنده کیفیت پایین گفتار و وضوح آن در حالت کلی است. بالابودن درصد اشتباهات گفتاری (AL_{cons}) و پایین بودن STI دلیلی دیگر بر عدم وضوح گفتار در ایستگاه‌های مترو است. مقادیر D_{50} و C_{50} نیز در هیچ از نمونه‌های مورد بررسی به حد مجاز نرسیده است.

با بررسی‌ها و مقایسه‌های تطبیقی که انجام شد می‌توان چنین نتیجه گرفت که نوع سکو، حجم، تناسبات، مصالح متفاوت بکار رفته در ایستگاه‌ها دلیلی بر ناهمگنی رفتار آکوستیکی در بین ایستگاه‌ها است و تأثیر عناصر محیطی بخصوص معماری فضا بر شرایط آکوستیکی و نارضایتی شنیداری غیرقابل انکار است. از آنجایی که در هیچ کدام از ایستگاه‌های مورد بررسی آسایش صوتی و وضوح گفتار وجود ندارد. اما در این بین، بزرگترین ایستگاه جزیره‌ای با ضریب جذب پایین (ایستگاه امام حسین) و کوچکترین ایستگاه طرفینی با ضریب انعکاس بالاتر (ایستگاه خیام) شرایط آکوستیکی نامناسب‌تری دارند. بنابراین بهتر است به منظور بهینه‌سازی شرایط صوتی و گفتاری، ظرفیت‌های جذب صوتی را از طریق ایجاد تنگ‌بری‌ها، گوشه‌سازی‌ها، افزایش حفره‌ها و کانال‌ها در محیط کالبدی و استفاده از مصالح با ضریب جذب مناسب بهبود بخشید تا خطاهای شنیداری، اختلالات در انتقال و تبادل اطلاعات کاهش یافته و ارتباطات کلامی و شناسایی کلمات آسانتر گردد.

پی‌نوشت

۱- Room Acoustic
۲- Lambert
۳- Wallace Sabin
۴- Eyring
۵- Auralization
۶- Image-Source
۷- Ray Tracing
۸- Radiosity
۹- Finite Element Method (FEM)
۱۰- Boundary Element Method (BEM)
۱۱- ODEON
۱۲- EASE
۱۳- COMSOL
۱۴- ACTRON
۱۵- به‌طور کلی سکوها بر دو نوع کلی‌اند: ۱- سکوهای مرکزی یا جزیره‌ای؛ که در میان دو مسیر رفت و برگشت قطارها قرار می‌گیرند. ۲- سکوهای جانبی یا طرفینی؛ که در طرفین مسیر رفت و برگشت قطارها قرار می‌گیرند. (سلحشور، ۱۳۸۸: ۹۳).
۱۶- Background Noise
۱۷- American Physical Therapy Association
۱۸- Sound Pressure Level
۱۹- Reverberation Time
۲۰- Speech intelligibility

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

۲۱- Clarity
۲۲- Definition
۲۳- Speech Transmission Index
۲۴- Rapid Speech Transmission Index
۲۵- Articulation Loss of Consonants

منابع

- پالاسما، ی. (۱۳۸۸)، چشمان پوست (معماری و ادراکات حسی)، مترجم: رامین قدس، چاپ اول، تهران: گنج هنر.
- رفیعیان، م.، عسگری زاده، ز.، عسگری زاده، م. (۱۳۸۹)، ارزیابی میزان کیفیت مجتمع های سکونتی با تأکید بر رویکرد رضایت‌مندی در محل نواب. فصل‌نامه مدرس علوم انسانی، ۱۴ (۱): ۲۱۲-۱۹۷.
- سلحشور، ن. (۱۳۸۸)، طراحی معماری ایستگاه های قطار شهری، تهران: کارور.
- شرکت بهره‌برداری مترو (۱۴۰۰)، https://metro.tehran.ir، https://metro.tabriz.ir/، https://metroisfahan.ir
- قیابکلو، ز. (۱۳۹۴)، مبانی فیزیک ساختمان۱ (آکوستیک)، تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی.
- گروت، ل.، وانگ، د. (۱۳۹۴). روش‌های تحقیق در معماری، ترجمه: علیرضا عینی فر، تهران: دانشگاه تهران.
- Altay, Y. (1997). Planning considerations for underground train stations (Doctoral dissertation, Bilkent Universitesi (Turkey)).
- Alvers-Pereira, M., Joanaz de Melo, J., & Castelo Branco, N. A. A. (2004, August). Low frequency noise in subways. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 2004, No. 4, pp. 3381-3385). Institute of Noise Control Engineering.
- Barnett, P. (1994). Acoustics of underground platforms. PROCEEDINGS-INSTITUTE OF ACOUSTICS, 16, 433-433.
- Barron, R. F. (2002). Industrial noise control and acoustics. CRC Press.
- Berardi, U. (2014). Simulation of acoustical parameters in rectangular churches. Journal of Building Performance Simulation, 7(1), 1-16.
- Berardi, U., Iannace, G., & Giordano, G. (2015, August). Acoustic characteristics of four subway stations in Naples, Italy. In Proceedings of the INTER-NOISE.
- Bo, E., Shtrepi, L., Pelegrín Garcia, D., Barbato, G., Aletta, F., & Astolfi, A. (2018). The accuracy of predicted acoustical parameters in Ancient Open-Air Theatres: A case study in Syracuse. Applied Sciences, 8(8), 1393.
- Boren, B. (2018, October). Acoustic Simulation of Julius Caesar's Battlefield Speeches. In Acoustics (Vol. 1, No. 1, pp. 3-13). MDPI.
- Cairoli, M. (2021). The architectural acoustic design for a multipurpose auditorium: Le Serre hall in the Villa Erba Convention Center. Applied Acoustics, 173, 107695.
- Carman, R. (2004, August). Prediction of train noise in tunnels and stations. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 2004, No. 8, pp. 424-430). Institute of Noise Control Engineering.
- Christensen, C. L. (2002). Odeon Room Acoustics Program, Version 6.0: User Manual, industrial, auditorium, and combined editions. Lyngby: Oersted Plads.
- Christensen, C. L., Koutsouris, G., & Gil, J. (2013). ODEON Room Acoustics Software, Version 12, User Manual. Universidade Técnica da Dinamarca.
- Cox, T. J., & D'antonio, P. (2009). Acoustic absorbers and diffusers: theory, design, and application. CRC Press.
- Davies, H. G. (1973). Noise propagation in corridors. The Journal of the Acoustical Society of America, 53(5), 1253-1262.
- Ghaffari, A., & Mofidi, S. M. (2014). Comparing Reverberation Time in West Churches and Mosques of Qajar Era in Tabriz. Armanshahr Architecture & Urban Development, 7(12), 13-29.

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

- Gomez Agustina, L. (2013), Improvement of Voice Alarm Systems in Underground Stations, Proceedings of the Institute of Acoustics, 35(2).
- Harrison, M. F. (2001). Calculating speech intelligibility for the design of public address systems at railway stations. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 215(4), 319-329.
- Havelock, D., Kuwano, S., & Vorländer, M. (Eds.). (2008). Handbook of signal processing in acoustics (Vol. 1). New York: Springer.
- IEC, I. (2011). IEC 60268-16: International Standard: Sound system equipment-Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.
- ISO, E. 3382, Acoustics–Measurement of room acoustic parameters–Part 1: Performance spaces, 2009.
- Kang, J. (1997a). Acoustics of long underground spaces. Tunneling and underground space technology, 12(1), 15-21.
- Kang, J. (1997b). Scale modeling of train noise propagation in an underground station. Journal of sound and vibration, 202(2), 298-302.
- Kang, J., & Orlowski, R. J. (2001). Guidelines for predicting acoustic characteristics in subway stations. In 17th International Congress on Acoustics (Vol. 3).
- Kim, Y. H., & Soeta, Y. (2013). Architectural treatments for improving sound fields for public address announcements in underground station platforms. Applied Acoustics, 74(11), 1205-1220.
- Knight, K.G. (1973) Guidelines and Principles for Design of Rapid Transit Facilities, ed. W.H. Paterson. Washington: Institute for Rapid Transit.
- Kootwijk, P. A. A. (1996). The speech intelligibility of the public address systems at 14 Dutch railway stations. Journal of sound and vibration, 193(1), 433-434.
- Krokstad, A., Svensson, U. P., & Strøm, S. (2015). The early history of ray tracing in acoustics. Acoustics, Information, and Communication: Memorial Volume in Honor of Manfred R. Schroeder, 15-31.
- Kuttruff, H. (1989). Stationäre schallausbreitung in langräumen. Acta Acustica united with Acustica, 69(2), 53-62.
- Kuttruff, H. (2017). Room Acoustics, Boca Raton: CRC Press.
- Lam, P. M., & Li, K. M. (2004, August). The predicted reverberation time in a rectangular long enclosure. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 2004, No. 3, pp. 3752-3758). Institute of Noise Control Engineering.
- Mohamed Hassan Hussein, M., (2010), Effect of Architectural Treatments on Acoustic Environment (Case Study: Underground Stations). Master Thesis: Ain Shams University
- Moore, B. C. (2012). An introduction to the psychology of hearing. Brill.
- Nelson, J. T. (1997). Wheel/rail noise control manual.
- Nowicka, E. (2020). Initial acoustic assessment of long underground enclosures for designers. Tunnelling and Underground Space Technology, 105, 103577.
- Oliver, R. L. (1981). Measurement and evaluation of satisfaction processes in retail settings. Journal of retailing.
- Raudales, D., Bliss, D. B., Michalis, K. A., Rouse, J. W., & Franzoni, L. P. (2019). Benchmark analytical solutions for steady state high-frequency broadband sound fields in three rectangular enclosures. The Journal of the Acoustical Society of America, 145(4), 2601-2612.
- Redmore, T. L. (1982). A method to predict the transmission of sound through corridors. Applied Acoustics, 15(2), 133-146.
- Rindel, J. H. (2011). Room acoustic modeling techniques: A comparison of a scale model and a computer model for a new opera theatre. Building Acoustics, 18(3-4), 259-280.
- Said, A. (1981). Schalltechnische untersuchungen im strassentunnel. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 28(5).

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

- Savioja, L., & Xiang, N. (2019). Introduction to the special issue on room acoustic modeling and auralization. The Journal of the Acoustical Society of America, 145(4), 2597-2600.
- Schmidt, A. M. D., & Kirkegaard, P. H. (2005). From architectural acoustics to acoustical architecture using computer simulation. Building Acoustics, 12(2), 85-98.
- Schroeder, M. R. (1961, October). Natural sounding artificial reverberation. In Audio Engineering Society Convention 13. Audio Engineering Society.
- Sergeev, M. V. (1979). Scattered sound and reverberation on city streets and in tunnels. Soviet Physics-Acoustics, 25, 248-252.
- Shuo-Xian, W., & Yue-Zhe, Z. (2004). Predicting STI in a tunnel in case of emergency with the image wall method. In The 33rd international congress and exposition on noise control engineering, proceedings of inter-noise August 2004.
- Standard, I. S. O. (2009). 3382-1 (2009), acoustics-measurement of room acoustic parameters-part 1: performance spaces. Genève: International Organization for Standardization.
- Sü Gül, Z., Odabaş, E., & Çalışkan, M. (2020). Comparative evaluation of ray tracing and diffusion equation modeling in room acoustics design of subway stations. Acoustics Australia, 48(1), 93-105.
- Sü, Z., & Çalışkan, M. (2007). Acoustical design and noise control in metro stations: case studies of the Ankara metro system. Building Acoustics, 14(3), 203-221.
- Sygulska, A., Czerniak, T., & Czarny-Kropiwnicki, A. (2018). Experimental investigations and computer simulations to solve acoustic problems in the modern church. Engineering Structures and Technologies, 10(1), 34-45.
- Tang, C. H., Wang, Y. S., & Guo, H. (2013). Sound Field Simulation and Optimization at an Underground Subway Station. Building Acoustics, 20(3), 243-253.
- Tronchin, L., Merli, F., & Dolci, M. (2021). Virtual acoustic reconstruction of the Miners' Theatre in Idrija (Slovenia). Applied Acoustics, 172, 107595.
- Van Wijngaarden, S. J., & VERHAGE, J. (2001). The influence of fan and traffic noise on speech intelligibility in Dutch traffic tunnels. In INTER-NOISE 2001-ABSTRACTS FROM INTERNATIONAL CONGRESS AND EXHIBITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING.
- Willemsen, A. M., & Rao, M. D. (2010, August). Characterization of sound quality of impulsive sounds using loudness-based metric. In Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, Sydney (Vol. 5, pp. 3397-3404).
- Wilson, G. P. (1977). Noise levels from operations of CTA rail transit trains.
- Yamamoto, T. (1961). On the distribution of sound in a corridor. Journal of the Acoustical Society of Japan, 17, 286-292.
- Yang, L., & Shield, B. M. (1998). Modeling of acoustic parameters and speech intelligibility in long enclosures. The Journal of the Acoustical Society of America, 103(5), 2999-2999.

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]

Simulation of acoustic variables for auditory satisfaction in metro stations by using ODEON Software (Case Studies: metro of Tehran, Tabriz and Isfahan Cities)

Paria Meshkabadi, Ph.D. Candidate, Department of Architecture, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
Abbas Ghaffari*, Associate professor, Department of Architecture, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, and Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.
Elham Nazemi, Assistant Professor, Department of Urban Planning, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
Narges Dehghan, Assistant Professor, Department of Architecture, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

Received: 2021/10/12 *Accepted: 2022/1/12*

Introduction: Considering the importance of sound comfort and speech intelligibility in determining the acoustical quality of a space, especially functional spaces, the important indexes of these two factors should be considered. In this research, acoustics in metro stations have been studied, which are functional in crowded and busy spaces, and structurally and physically have disproportionate geometry (long length) and materials with low sound absorption coefficient, thus, a noisy environment with sound disorders. Relatively high noise, which in addition to the background noise (noise of equipment and ventilation systems, etc.), in the effect of other sound sources (trains, brakes, engines, People talking, etc.), noise in metro stations is one of the most annoying issues that can cause discomfort and physical damage in the long run.
Method: This research is quantitative because it has quantitative data that has been got from field measurements and simulations. simulation in this research is a method for describing acoustical behavior in metro stations. We have performed simulations to investigate and compare acoustic variables with international standards to devise solutions for auditory satisfaction in metro stations. The case studies were selected from Tehran, Tabriz, and Isfahan and classified into two types and three different volumes. Then, by entering the three-dimensional case studies in ODEON software and determining the surface material, sound source, and background noise based on the data got from field measurements, specifying the receiver points and settings related to the impulse response length, simulation is performed and effective acoustic variables are extracted. Variables such as SPL, RT, EDT, STI, AL_{Cons}, C, and D concerning the subjects of noise in the environment and speech intelligibility are essential.
Results: The results of simulations show that the maximum sound pressure level in all stations is higher than 85 dB(A) and the maximum reverberation time is more than 2s, which is far from international standards. These effects sound comfort as well as speech understanding, which is the most important factor in creating safety and performance of the space and is directly related to the user`s auditory satisfaction. Quantitative measurement and assessment of acoustic variables were also proof of this claim.
Conclusion: It can be concluded that the type of platform, volume, proportions, and different materials used in the stations are the reason for the heterogeneity of acoustical behavior among stations and the effect of environmental elements, especially space architecture on acoustical conditions and audio dissatisfaction is undeniable. It is also suggested to study the sound absorption capacity at different frequencies to optimize the acoustic conditions for providing auditory satisfaction to increase the absorption capacities at low frequencies and frequencies of human speech and auditory range by creating cutouts, corners, and cavity-like functional spaces.
Keywords: Acoustic Simulation, Auditory Satisfaction, Metro Stations, ODEON Software, Speech Intelligibility

* Corresponding Author's E-mail: ghaffari@tabriziau.ac.ir

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2023-07-18]