تبیین نقش عوامل کالبدی در پایداری آکوستیکی بازار تبریز

بیتا شفائی[1]، عباس غفاری*[2] و مرتضی میرغلامی[2]

تاریخ دریافت: 1400/11/12
تاریخ پذیرش: 1401/03/24

چکیده: زمان واخنش مؤلفه‌ای است که مبین نحوه رفتار آکوستیکی فضاست. اگر رفتار آکوستیکی فضا به‌نحوی باشد که بدون نیاز به مداخلات آکوستیکی سبب بروز زمان واخنش بهینه شود، می‌توان اذعان کرد فضای مذکور واجد پایداری آکوستیکی است. هدف پژوهش حاضر، بررسی پایداری آکوستیکی فضاهای بازار تبریز از طریق تحلیل رفتار آکوستیکی آنهاست تا مشخص شود کدام دسته از مؤلفه‌های کالبدی در پژواک فضا اثرگذارند و نحوه این اثرگذاری به چه صورت است. در این راستا، در موقعیت‌های مختلف بازار تبریز، زمان واخنش بر اساس اصول استاندارد اندازه‌گیری و عوامل کالبدی مؤثر بر رفتار آکوستیکی شناسایی شده است. از طریق تطبیق مقادیر زمان واخنش با واقعیات علمی از پیش اثبات شده، ویژگی‌های کالبدی مؤثر در رفتار آکوستیکی فضاهای بازار و چگونگی تأثیر آن‌ها روشن شده است. نتایج، حاکی از آن است که گنبدها و نیم‌گنبدهای بازار به مثابه حفره با حبس امواج صوتی باعث کاهش زمان واخنش می‌شود. شکستگی‌های موجود در پوسته‌ها و شکستگی‌های ظریف مصالح، آجر با بندکشی، با پراکندگی صوت طنین را کاهش می‌دهد. درمقابل الحاقات جدید شیشه‌ای با انعکاس امواج صوتی سبب افزایش شدید زمان واخنش می‌شود. بخش اصیل کالبد بازار تبریز، در راستای کاهش زمان واخنش سبب بروز رفتار آکوستیکی مناسب شده و کیفیت شنیداری مناسبی ایجاد می‌کند. طراحی فرم به گونه‌ای است که با پایداری وضوح آکوستیکی، با افزایش شدت صوت، میرایی صدا سریع‌تر اتفاق می‌افتد و مانع از ایجاد همهمه و بالارفتن شدت صوت می‌شود. بنابراین می‌توان اذعان کرد بازار تبریز از لحاظ آکوستیکی پایدار است و الگوی کالبد آن می‌تواند در طراحی فضاهای جدید مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: رفتار آکوستیکی، پایداری آکوستیکی، زمان واخنش، بازار تبریز.

[1] **دکتری** شهرسازی اسلامی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.
[2] **دانشیار** دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران، (نویسنده مسئول) ghaffari@tabriziau.ac.ir

1– مقدمه

درک رابطه چندسویه و پیچیده بین نیازهای انسانی و امکانات فیزیکی در فضاهای عمومی به علت خلاء علمی موجود در طراحی و تحقیقات شهرهای پایدار موضوعی است که مغفول مانده (Ye, Luo, Zhong, & Kang, 2021). یکی از جنبه‌های توجه به نیازهای انسانی و تأمین آسایش در فضاهای معماری و شهری، آسایش صوتی است که وابسته به رفتار آکوستیکی فضاهاست. رفتار آکوستیکی بدین معناست که فضای مورد نظر تا چه حدی سبب تشدید یا تضعیف امواج صوتی می‌شود. در برخی مواقع رفتار آکوستیکی به گونه‌ای است که بازگشت متناوب امواج صوتی سبب تقابل موج‌ها شده که همین امر سبب تضعیف شدت صوتی می‌شود[1]. در برخی شرایط نیز امواج صوتی با هم تداخل دارند که سبب تشدید صوت می‌شود. در واقع بسته به ویژگی‌های محیطی فضا این برخورد و تداخل می‌تواند به صورت‌های مختلفی انجام و سبب تشدید و یا تضیف صدا شود (Setyowati, Hardiman, & Purwanto, 2019). پر واضح است فقدان آسایش صوتی کافی سبب بروز برخی اثرات مضر روانی و فیزیولوژیکی است (Gramez, Ouis, & Belhamel, 2021). در محیط‌های پر ازدحام شهری، کالبد فضا باید عملکرد خاصی از خود بروز دهد که فشار صدا وضعیت پایداری داشته و روند رو به رشد نداشته باشد؛ به عبارتی زمان واخنش آن در محدده بهینه باشد. در غیر این صورت با گذشت زمان با افزایش فشار صوت همهمه شنیده‌شده بیشتر، آسایش صوتی کاهش و صداها نیز به صورت واضح درک نمی‌شوند (Trinite & Astolfi, 2021). زمان واخنش طولانی خود به تنهایی منجر به مشکلات سلامت روان از جمله تحریک‌پذیری[2] و سندرم خستگی مزمن[3] می‌شود (Dong et al., 2021). لذا کالبد فضاهای معماری و شهری باید قابلیت رفتار بهینه را در مقابل افزایش تراز فشار صوت داشته باشند تا با ممانعت از افزایش نوفه در فضاها در راستای حفظ سلامت انسان و فراهم آوردن آسایش صوتی عمل کنند.

در صورتی که طراحی کالبدی فضا قادر به تأمین نیازهای آکوستیکی مورد نظر نباشد، ضروری است تغییراتی در سطوح مواجه با امواج صوتی ایجاد یا از تجهیزات آکوستیکی استفاده شود. در همین راستا پیشنهاد می‌شود مفهومی به نام «پایداری آکوستیکی» را به مطالعات حوزه آکوستیک معماری و شهری افزوده شود. پایداری آکوستیکی در واقع عبارت و اصطلاحی نو برای توضیح مفهومی کهن است. فضاهایی که واجد پایداری آکوستیکی هستند، از لحاظ شنیداری مطلوب و آسایش صوتی را برای کاربران فضا فراهم می‌آورند. همچنین برقراری آرامش صوتی در فضاهایی که زمان واخنش بالایی دارند، مستلزم صرف هزینه‌های مازاد برای تجهیزات و طراحی آکوستیکی برای بهبود رفتار فضاست. لذا استفاده از الگوهای طراحی فضاهای خودکفا از نظر آکوستیکی، این هزینه‌ها را به حداقل ممکن می‌رساند.

در راستای شناسایی الگوهای طراحی واجد پایداری آکوستیکی، بازار تبریز به عنوان نمونه‌ای از فضاهای منسجم تجاری که مرکب از گونه‌های فضایی مختلف است، مطالعه می‌شود. فضاهای مختلف بازار تبریز، بنا به ویژگی‌های محیطی متفاوتی که دارند، می‌توانند در رسیدن به فهمی از رفتار آکوستیکی فضاهای مشابه راهگشا باشند. زمان واخنش به عنوان مؤلفه مبین رفتار آکوستیکی در فضاهای مختلف و در شرایط گوناگون طبق استانداردهای ISO اندازه‌گیری شده است. برای مشخص کردن عوامل مؤثر در رفتار آکوستیکی، مؤلفه‌های اثرگذار در زمان واخنش در هر موقعیت اندازه‌گیری مشخص شده‌اند. این عوامل، برگرفته از واقعیت‌هایی علمی هستند که در سالیان گذشته در مطالعات آکوستیکی به اثبات رسیده‌اند (بخش 1-2). هدف پژوهش حاضر، شناسایی مؤلفه‌های کالبدی مؤثر بر رفتار آکوستیکی بازار تبریز بر اساس اندازه‌گیری زمان واخنش و تطبیق یافته‌های آن با علوم بالادستی است. نتایج این پژوهش در کنار پژوهش‌های آتی می‌تواند رهنمون الگوها و ضوابطی برای طراحی فضاهای تجاری واجد پایداری آکوستیکی شود. در این راستا، پرسش‌های پژوهش به شرح زیر است:

الف) کدام ویژگی‌های کالبدی بازار تبریز در رفتار آکوستیکی فضاهای آن اثرگذار است؟

ب) ویژگی‌های کالبدی بازار تبریز چگونه در تحقق و یا عدم تحقق پایداری آکوستیکی در فضاهای آن عمل می-کنند؟

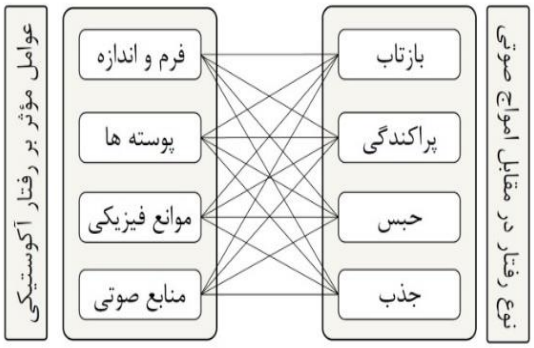
1-1- مروری بر پیشینه پژوهشی

زمان واخنش مؤلفه‌ای است که تا حد زیادی رفتار آکوستیکی فضا را روشن می‌کند و کمیتی است که کاملا بستگی به کالبد فضا داشته (Hornikx, 2009) و وابسته به هندسه آن است (Yang, Kang, & Kim, 2017). زمان واخنش مدت زمانی است که پس از قطع منبع صدا، تراز فشار صوت 60 dB افت کند (Ghiabaklou, 2018). واخنش به معنای دوام صدا پس از لحظه تولید آن است (Long, 2005). زمان واخنش که روشن‌کننده رفتار آکوستیکی فضاها است، از هندسه فضا تأثیر می‌پذیرد (Yang et al., 2017). در واقع، رفتار آکوستیکی محیط‌های شهری، در کنار عناصر حاضر در فضا و مصالح به کار رفته در محیط‌های انسان‌ساخت، بیش از هر چیری وابسته به هندسه و ویژگی‌های فضایی فضاهای شهری است. در این راستا پژوهش‌های مختلفی انجام شده‌اند که بنا به بستر مورد مطالعه، اعم از خیابان، میدان یا بافت شهری، مؤلفه‌های مختلفی را به عنوان شاخص‌های مؤثر در رفتار آکوستیکی فضاها بررسی کرده‌اند. در جدول 1 خلاصه‌ای از این پژوهش‌ها قابل بررسی است.

2-1- چارچوب نظری

در حالت کلی، عوامل مؤثر در انتشار صدا بین فرستنده و گیرنده را می‌توان در پنج مورد بررسی کرد: بازتاب صدا توسط سطوح (سطح زمین، جداره‌ها، کف‌ها و موانع)؛ انکسار[4] از لبه‌ها (لبه‌های موانع و ساختمان‌ها)، پراکندگی[5] از سطوح سخت (مثل نماهای نامنظم)؛ شکست[6] توسط دما و باد و ضعیف شدن امواج صوتی با جذب هوا (Hornikx, 2016). جداره‌ها به دو طریق بر صدای فضا تأثیر می‌گذارند: جذب[7] و پراکندگی (Hornikx, 2009). میزان جذب به جنس مصالح ساخته شده و پدیده پراکندگی به هندسه و میزان بی‌نظمی فرم جداره‌ها وابسته است. هندسه و شکل جداره‌ها بسته به طیف فرکانسی صدای موجود در فضا، رفتارهای مختلفی از خود بروز می‌دهند (Hornikx, 2016). فرم کالبد نیز می‌تواند با حبس امواج صوتی، رفتاری مشابه جذب انجام دهد. حفرات موجود در کالبد محصورکننده فضا می‌تواند باعث به دام انداختن امواج صوتی شده و با اتلاف بخشی از انرژی امواج صوتی از انعکاس آن در فضا جلوگیری کند. همین مسأله منجر به کاهش زمان واخنش می‌شود (Park, Moges, & Pyo, 2021; Setyowati et al., 2019). بر اساس نتایج پژوهش‌ها عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی فضاهای خردمقیاس شهری را می‌توان طبق جدول 2 خلاصه کرد.

در پژوهش حاضر، بر اساس مؤلفه‌های یادشده در جدول فوق، فرم و خصوصیات متریک فضاهای بازار تبریز، پوسته‌ها و موانع و منابع صوتی حاضر در آن فضاها شناسایی می‌شود. زمان واخنش به عنوان متغیر مورد آزمون، در شرایط گوناگون در گونه‌های فضایی مختلف اندازه‌گیری و در هر موقعیت، عوامل یادشده مشخص شده و اثرگذاری آن‌ها در اندازه زمان واخنش و نحوه رفتار آکوستیکی فضا روشن می‌شود. در شکل 1 مدل مفهومی از روابط ساختاری بین مؤلفه‌های مؤثر در اندازه زمان واخنش در فضاهای بازار تبریز و نوع رفتار در مقابل امواج صوتی ارائه شده است.



شکل 1- مدل مفهومی از روابط ساختاری بین مؤلفه‌های مؤثر در اندازه زمان واخنش

Fig. 1- A conceptual model of structural relationships between the effective components in Reverberation Time

جدول 1- مروری بر مطالعات در حوزه شاخص‌های مؤثر در رفتار آکوستیکی فضاهای شهری

Tab.1- A review of studies on important indicators in the acoustical behavior of urban spaces

شاخص	نتایج	منابع
نقش ریخت شهری در نحوه انتشار صدا	رابطه معناداری بین ریخت شهری و نحوه توزیع امواج صوتی و نوفه شهری، وجود دارد.	(Ariza-Villaverde, Jiménez-Hornero, & De Ravé, 2014; Hao & Kang, 2014; Hao, Kang, & Krijnders, 2015; J. Liu, Kang, Behm, & Luo, 2014a, 2014b) (Bouzir & Zemmouri, 2017; Wang & Kang, 2011)
فرم بنا	فرم بنا بر میزان قرارگیری در معرض سر و صدا مؤثر است. در مناطق با با تراکم ساختمانی بالاتر، میزان شدت صدا کم‌تر است.	(Salomons & Pont, 2012)
هندسه فضا و نحوه ادراک محیط صوتی	مکان‌های شهری با خصوصیات هندسی مشابه، از لحاظ درک صوتی نیز به طور مشابهی ادارک می‌شوند.	(de la Prida, Pedrero, Navacerrada, & Díaz, 2019)
تناسبات خیابان	رابطه مستقیمی بین نسبت عرض به ارتفاع خیابان و میزان آلودگی صوتی رابطه مستقیمی وجود دارد که این نسبت در مناطقی که ریخت بافت منظم-تر است، قوی‌تر است.	(Ariza-Villaverde et al., 2014)
	بین عرض خیابان و سطح صدا رابطه مستقیم و بین آسایش صوتی و ارتفاع ساختمان‌ها و سطح صدا رابطه معکوس برقرار است.	(F. Liu & Kang, 2018)
تأثیر اشکال مختلف جداره و مصالح به کار رفته	بالکن‌های مجود در جداره‌ها، اثر پوششی دارند و بسته به عمق بالکن، شیب جان‌پناه و مصالح استفاده‌شده در سطوح آن، رفتار آکوستیکی متفاوتی در کاهش تراز فشار صوت نشان می‌دهد.	(Can, Fortin, & Picaut, 2015; Sanchez, Van Renterghem, Thomas, & Botteldooren, 2016; Tang, Ho, & Tso, 2014; Tong, Tang, & Yeung, 2011)
	با افزایش عمق بالکن، میزان کاهش تراز فشار صوت نیز افزایش می‌یابد و استفاده از مصالح جاذب صوت نیز در این امر تأثیر به‌سزایی دارد.	(Badino, Manca, Shtrepi, Calleri, & Astolfi, 2019)

جدول 2- عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی فضاهای خردمقیاس شهری

Tab. 2- Factors affecting the acoustical behavior of micro-scale urban spaces

شاخص	معیار		منبع
فرم و خصوصیات متریک	حجم		(Long, 2005)
	ابعاد و اندازه		(F. Liu & Kang, 2018)
	تناسبات فضائی		(de la Prida et al., 2019)
	محصوریت		(F. Liu & Kang, 2018)
پوسته‌ها	پوسته افقی (کف)	مصالح	(Hornikx, 2016)
		هندسه	
	پوسته‌های عمودی (جداره‌ها)	مصالح	
		هندسه	
موانع فیزیکی	ابعاد و اندازه		(Ariza-Villaverde et al., 2014)
	مصالح		(Hornikx, 2009)
	موقعیت قرارگیری نسبت به منبع صوتی و شنونده		(Yang et al., 2017)
منابع صوتی	شدت صدا		(Zhang, Ba, Kang, & Meng, 2018)
	طیف فرکانسی		(Morillas, Escobar, & Gozalo, 2013)

فضای بازار به طور کلی و بازار تبریز به صورت اخص، فضایی است که همواره مملو از جمعیت انسانی بوده و فعالیت‌های مختلف در آن واحد در حال انجام است. اگر کالبد بازار در راستای تشدید امواج صوتی عمل کند، همهمه ناشی از گفتار و فعالیت‌های بازار به شدت بالا رفته و کیفیت صدای شنیده شده به شدت افت پیدا می‌کند. در واقع اگر زمان واخنش فضاهای بازار تبریز زیاد باشد، شدت صدا بیشتر شده و با کاهش آسایش صوتی، موجب آزردگی افراد حاضر می‌شود. پژوهش حاضر در پی مشخص کردن نحوه رفتار آکوستیکی

فضاهای بازار تبریز در مواجهه با امواج صوتی است. بدین منظور زمان واخنش به عنوان مؤلفه‌ای برای ارزیابی رفتار آکوستیکی فضاهای مورد مطالعه مد نظر قرار گرفته. در این راستا در نقاط مختلف از فضاهای بازار تبریز، زمان واخنش اندازه‌گیری شده و تأثیر عواملی که در جدول 2 گردآوردی شده، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته. در واقع این تحقیق در پی بررسی «پایداری آکوستیکی» در فضاهای بازار تبریز است.

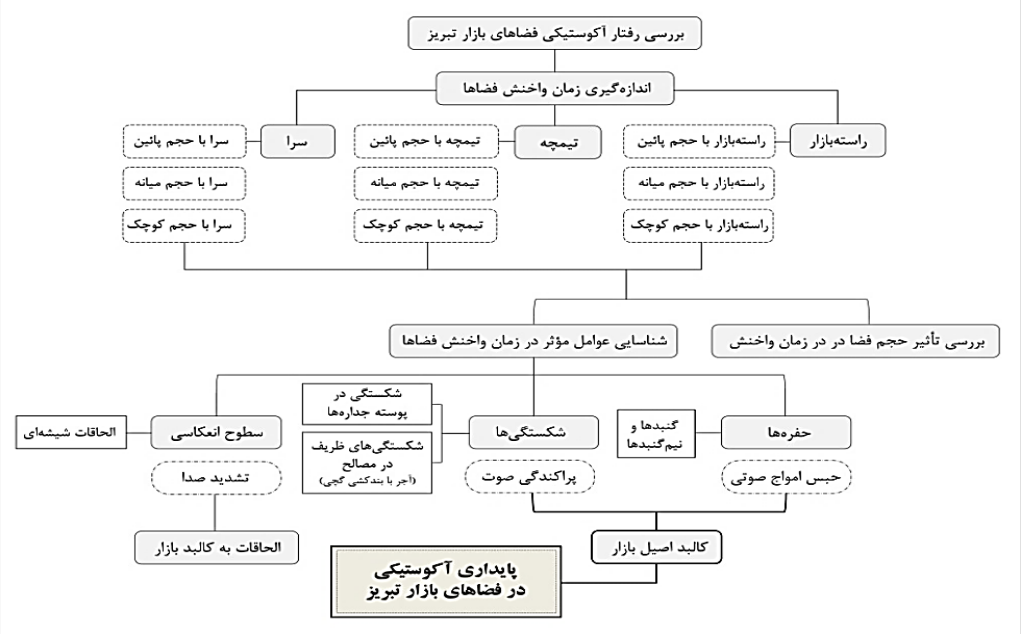
2- روش تحقیق

در پژوهش حاضر، برای بررسی اثرگذاری عوامل محیطی در رفتار آکوستیکی فضاهای بازار تبریز و تحقق پایداری آکوستیکی در آن‌ها، زمان واخنش به عنوان متغیر پایه مورد سنجش قرار گرفته است.

زمان واخنش یک مؤلفه فیزیکی است که بر اساس معادلات ریاضی[8] نیز نیز قابل محاسبه است. همچنین نحوه اثرپذیری این مؤلفه از عوامل کالبدی نیز در پژوهش‌های آکوستیکی پیشین نیز اثبات شده که امروزه به عنوان واقعیات علمی مورد پذیرش هستند.

بدین منظور در هر فضا موقعیت‌هایی برای اندازه‌گیری انتخاب شده‌اند که علت انتخاب آن‌ها در بخش 2-2 بررسی شده است. در هر موقعیت اندازه‌گیری، زمان واخنش با تجهیزات آکوستیکی اندازه‌گیری و تمامی عوامل در جدول 1 در همان موقعیت شناسایی شده است. با تطبیق مقادیر زمان واخنش و واقعیت‌های علمی از پیش اثبات‌شده، نحوه دخالت عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی فضاها روشن شده است. در واقع قیاس تطبیقی مقادیر زمان واخنش در شرایط مختلف با وجوه تمایز معین، روشن‌گر نحوه اثرگذاری عوامل مذکور در رفتار آکوستیکی فضاهاست. به بیانی دیگر، بر اساس اندازه‌گیری زمان واخنش در شرایط مختلف و مقایسه آن‌ها با همدیگر و تطبیق یافته‌های حاصل با علوم بالادستی، مؤلفه‌های کالبدی مؤثر بر رفتار آکوستیکی بازار تبریز شناسایی شده است. بر اساس نتایج حاصل از این بررسی‌ها، خوداکتفایی آکوستیکی بازار تبریز مورد ارزیابی قرار گرفته و الگوی طراحی بهینه، در صورت وجود، استخراج می‌شود.

بنا به آنچه که گفته شد، تحقیق حاضر در زمره پژوهش-های کمی و در پی آن است که با اندازه‌گیری زمان واخنش فضاهای مورد مطالعه، رفتار آکوستیکی آن‌ها و نحوه اثرگذاری کالبد بازار بر امواج صوتی و پایداری آکوستیکی را در آن فضاها مورد بررسی قرار دهد. در شکل 2 مدل تحقیق تشریح شده است.



شکل 2- مدل پژوهش

Fig. 2- Research model

2-1- روش و ابزار اندازه‌گیری زمان واخنش

زمان واخنش، متغیری اندازه‌ای بر حسب ثانیه است و به مدتی زمانی گفته می‌شود که یک صدا از لحظه تولید تا کاهش 60 دسی‌بلی، در فضا باقی می‌ماند (Ghiabaklou, 2018). به عبارتی میزان دوام و میرایی صدا در فضا است. هر چه زمان واخنش بیشتر باشد، پدیده طنین یا پژواک بیشتر در فضا حس می‌شود.

برای اندازه‌گیری زمان واخنش، از مجموعه بلندگوی چندوجهی[9]، آمپلی‌فایر[10] و صوت سنج Brüel & Kjær مدل 2260 (شکل3) استفاده شده است. این مجموعه تجهیزات، بیشترین کاربرد را در سنجش‌های صوتی داشته و معتبرترین دستگاه‌های موجود آکوستیکی است که در شمار زیادی از پژوهش‌های معتبر از آن‌ها استفاده شده (Bora, 2014; Herranz-Pascual, García, Diez, Santander, & Aspuru, 2017; Hong & Jeon, 2017; Maristany, López, & Rivera, 2016). شیوه اندازه-گیری بر اساس استاندارد ISO 3382-2 انجام و روایی و پایایی آن اثبات‌شده است (International Standard, ISO 3382-2, 2008). روش کار بدین صورت است که بلندگوی چندوجهی بر روی سه‌پایه‌ای که ارتفاع آن برابر با اندازه متوسط قد یک انسان است، برای پخش صدا مستقر می‌شود. آمپلی‌فایر در واقع دستگاهی است که وظیفه تقویت و تنظیم جریان الکتریکی و شدت صدای پخش‌شده را بر عهده دارد. یکی از ابزارهای تنظیم بر روی آمپلی‌فایر، درجه تقویت صدا[11] است که با استفاده از آن می‌توان شدت صدای پخش‌شونده از بلندگوی چندوجهی را تنظیم کرد. اعداد مربوط به این کمیت از 40- تا 0 متغیر است. درجه تقویت صدای 0 بیشترین تراز صوت را که صدایی برابر با 140 دسی‌بل است ایجاد می‌کند. عدد 40-سبب می‌شود بلندگو آهسته‌ترین صدا را ایجاد می‌کند. لازم به ذکر است در هر اندازه‌گیری، با دستگاه واسنج (کالیبراتور) [12]، عمل واسنجی (کالیبراسیون) [13] روی تجهیزات انجام می‌شود.

در هر برداشت، در طی یک دقیقه، سه بار صدایی که تمامی فرکانس‌ها را شامل می‌شود، در فضا پخش می‌شود. در طول این مدت دستگاه صوت‌سنج B&K 2260 از طریق میکروفونی که در رأس آن قرار گرفته‌است، امواج صوتی حاضر در فضا را ارزیابی می‌کند و طی انجام محاسبات، اندازه زمان واخنش را در فرکانس‌های مختلف ارائه می‌دهد.

شکل 3- مجموعه بلندگوی چندوجهی، آمپلی‌فایر و صوت-سنج B&K 2260

Fig. 3- Set of multi-dimensional speaker, amplifier and audiometer B&K 2260

در پژوهش حاضر، در هر نقطه استقرار بلندگو، دو یا سه برداشت انجام می‌شود؛ برداشت نخست در نقطه بالافصل از بلندگو و یک یا دو برداشت دیگر در فواصل 12 متری از بلندگو. در هر برداشت، در سه Gain اندازه‌گیری‌های انجام می‌گیرد، Gain-20، Gain-10 و Gain0. نام‌گذاری نمودارها نیز بر این اساس انجام شده که در آن‌ها S نشان-دهنده بلندگو، M دستگاه صوت‌سنج است. برای مثال نمودار S_2M_3Gain-10 نشانگر اندازه‌گیری در دومین موقعیت استقرار بلندگو (S_2)، سومین نقطه صوت‌سنجی (M_3) و در Gian-10 است.

نکته دیگر که شایان ذکر است این است که تمامی اندازه-گیری‌ها در روزهای تعطیل انجام شده. این امر به دو علت اساسی بوده است. نخست به علت ماهیت سنجش زمان واخنش که عبارت است از اندازه‌گیری مدت زمان حضور فرکانس‌های مختلف در فضا، بنا به میزان بازگشت امواج صوتی در اثر انعکاس از کالبد فضا. بنابراین ضروری است به غیر از صدایی که بلندگو تولید می‌کند، صدای دیگری در فضا وجود نداشته باشد تا در فرایند محاسباتی که صوت‌سنج انجام می‌دهد، خلل و اشتباهی وارد نشود. در واقع زمانی که تنها صدای ایجاد شده در فضا، صدای بلندگو است که شامل تمامی طیف‌های فرکانسی است، صوت‌سنج به درستی مدت‌زمان افول هر فرکانس را محاسبه می‌کند. اما اگر به غیر از صدای بلندگو، منابع صوتی دیگری وجود داشته باشند، در فرایند صوت‌سنجی، علاوه بر صدای منعکس‌شده از سطوح فضا، فرکانس‌هایی

که سایر منابع ایجاد می‌کنند نیز در فرایند محاسبات دخیل می‌شود.

علت دیگر انتخاب روز تعطیل و خالی از افراد برای سنجش بوده، رعایت اصول و موازین اخلاق حرفه‌ای در فرایند انجام پژوهش است. چرا که بلندگو صدایی با شدت 140 دسی‌بل به دفعات مکرر در فضا ایجاد می‌کند که برای انسان بسیار آزاردهنده است. این شدت صدا علاوه بر صدمات و مخاطراتی که برای شنوایی ایجاد می‌کند، می‌تواند از لحاظ روحی و روانی نیز بسیار آزاردهنده باشد.

2-2- انتخاب فضاهای مورد مطالعه

در این راستا، سه مورد از سه گونه فضایی بازار تبریز، راسته‌بازاراها، تیمچه‌ها و سراها برای مطالعه انتخاب شده‌اند. در شکل 4 موقعیت قرارگیری فضاهای مطالعه-شده در بازار تبریز قابل مشاهده است.

کلیدی‌ترین مؤلفه تأثیر گذار در زمان واخنش، حجم فضاست و تا حد زیادی به فرم و هندسه فضا و ویژگی-های سطوح بازتاب‌کننده امواج صوتی بستگی دارد (Long, 2005). براساس فرمول[14] سابین[15] نیز حجم فضا از مؤلفه‌های پایه‌ای در مطالعات آکوستیکی است و رابطه مستقیم با زمان واخنش دارد. لذا انتخاب فضاها از هر گونه فضایی بر اساس حجم انجام شده است. در واقع سه راسته‌بازار، سه تیمچه و سه سرا با حجم‌های بالا، میانه و پایین برای سنجش مشخص شده‌اند. علاوه بر مؤلفه حجم، دومین عامل تمایز بین فضاهای انتخاب‌شده، فرم و مصالح پوشاننده سطوح آن‌ها نیز است (جدول 2). با تحلیل مقادیر زمان واخنش در نُه فضای مورد مطالعه، مقایسه مقادیر آن در موقعیت‌های مختلف و تطبیق با مؤلفه‌های یادشده در جدول، عوامل مؤثر در نحوه رفتار آکوستیکی فضا در مواجهه با امواج صوتی مشخص می-شود.

بر این اساس، در راسته‌بازاراها از آن‌جائی‌که فرم و اصیل به یک صورت بوده و به عبارتی، فرم ثابت الگوی ساخت ثابت است، میزان الحاقات مبنای انتخاب بوده است که غالبا به صورت ویترین‌های شیشه‌ای برآمده یا سطوح شیشه‌ای حجرات است. راسته‌بازار امیر بیشترین الحاقات، سراجان کمترین و بلورفروشان وضعیتی میانه در این خصوص دارند. در تیمچه‌ها تناسبات هندسی در ابعاد که گویای میزان ایستایی یا پویایی فضاست در کنار میزان الحاقات به فضا، مؤلفه‌ای است که در گزینش فضاها نقش داشته. در واقع مؤلفه فرم در حیث انتخاب تیمپه‌ها دخیل بوده است. در سراها نیز میزان ایستایی و پویایی و موانع صوتی حاضر در آن‌ها، درختان و اجناس انبار شده، ملاک عمل بوده است.

شکل 4- موقعیت قرارگیری فضاهای مورد مطالعه در بازار تبریز

Fig. 4- Location of the study spaces in the Tabriz Bazaar

در جدول 3 فضاهای مورد مطالعه و ویژگی‌های خاص هر یک و عوامل مؤثر در رفتارآکوستیکی هر کدام به تفصیل بیان شده است. پس از اندازه‌گیری زمان واخنش در شرایط مختلف و قیاس آن‌ها بر اساس وجوه تمایز هر موقعیت اندازه‌گیری و مؤلفه‌های دخیل، اثرگذاری عوامل مستخرج از علوم بالادست در اندازه زمان واخنش و رفتار اکوستیکی فضاهای بازار تبریز مشخص می‌شود.

3- نتایج و بحث

همان‌طور که در سطور پیشین ذکر شد، برای روشن شدن نحوه رفتار آکوستیکی فضاهای بازار تبریز در مقابل امواج صوتی و میزان پایداری آکوستیکی آن‌ها، مؤلفه زمان واخنش اندازه‌گیری و عوامل دخیل در آن شناسایی شده است. عوامل دخیل در رفتار آکوستیکی بر اساس واقعیت‌های اثبات‌شده علمی در بخش 2-1 مشخص شده‌اند. در راسته‌بازارها نقاط مفصلی و چارسوق‌ها، در

تیمچه‌ها نقاط مرکزی و در سراها نقاط مرکزی و محوری به عنوان موقعیت‌های اندازه‌گیری زمان واخنش با مجموعه تجهیزات B&K انتخاب شده‌اند. در جداول 4 تا 6 موقعیت هر اندازه‌گیری در پلان فضاها، نمودار زمان واخنش به تفکیک فرکانس در شدت‌های مختلف و همچنین عوامل اثرگذار در اندازه زمان واخنش در هر یک از نقاط سنجش تشریح شده است. هر چه فاصله نقطه صوت‌سنجی از نقطه استقرار منبع صوتی بیشتر باشد، اثرگذاری عوامل کالبدی در اندازه زمان واخنش محسوس‌تر است. لذا در فواصل 12 متری از بلندگو، مؤلفه‌های محیطی بیش از مواردی که در کنار بلندگو سنجش انجام شده، در مدت زمان واخنش اثر گذاشته‌اند. در هر موقعیت از اندازه‌گیری که عوامل کالبدی متغیر هستند، نحوه اثرگذاری هر یک مشخص می‌شود. با توجه به جدول 2، تمامی مؤلفه‌های مؤثر بر رفتار آکوستیکی که در هر موقعیت اندازه‌گیری وجود دارند، شناسایی و نحوه اثرگذاری آن‌ها در اندازه زمان واخنش مورد تحلیل واقع شده‌اند.

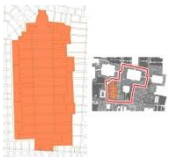
در جدول 4 مقادیر زمان واخنش در راسته‌بازارهای مورد مطالعه قابل بررسی است. موقعیت استقرار منبع صوتی در در راسته‌بازار امیر برای اندازه‌گیری زمان واخنش، چهارسوقی است که راسته‌بازار امیر را از طریق دو دالان به راسته‌بازار امیر پشتی و سرای امیر متصل می‌کند. اندازه‌گیری زمان واخنش در یک موقعیت بالافاصله از بلندگو و دو دو حالت فاصله 12 متری به سمت شمال و جنوب در امتداد راسته انجام شده است. در راسته‌بازار سراجان به علت واقع شدن پیچی که در انتهای آن قرار دارد و برای روشن شدن تأثیر آن بر رفتار آکوستیکی این راسته‌بازار، در چهار نقطه از این فضا بلندگو استقرار یافته که در حالات مختلف اندازه‌گیری زمان واخنش انجام شده است. محل استقرار منبع صوتی در راسته‌بازار بلورفروشان نیز مفصلی است که راسته‌بازار را به دالان قندفروشان و دالان منتهی به کاروانسرای گرجی‌لر متصل می‌کند.

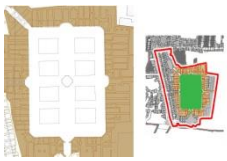
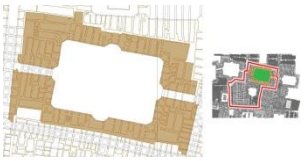
جدول 3- معرفی فضاهای مورد مطالعه

Tab.3 - Introduction of the study spaces

گونه فضایی	ردیف	نام فضا	حجم برحسب متر مکعب	وجه تمایز	پلان و موقعیت قرارگیری در بازار	تصویر از فضا
راسته‌بازارها	1	راسته‌بازار امیر	4007 حجم بالا	بیش‌ترین الحاقات شیشه‌ای (سطوح انعکاسی)		
عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی فضا						
			فرم	طاق و تویزه تکرار شونده		پراکندگی امواج صوتی به سبب شکستگی پوسته
				پوشش گنبدی سقف		رفتار به مثابه کاواک و حبس امواج صوتی
	پوسته‌ها		کف	هندسه	مسطح	جذب نسبی امواج صوتی
				مصالح	بتن	ضریب جذب بین 0.02 تا 0.07 (1 و2 و 3 National Building Regulations (Office (2017)
			جداره	هندسه	دارای شکستگی	پراکندگی امواج صوتی به سبب شکستگی
				مصالح	آجر با بندکشی گچی	ضریب جذب بین 0.08 تا 0.24 [2]
			موانع فیزیکی		ویترین‌های شیشه‌ای	انعکاس امواج صوتی ضریب جذب بین 0.30 تا 0.02 [3]
			منبع صوتی غالب		همهمه انسانی در وضعیت عادی بازار بلندگوی B&K در سنجش	ثابت

گونه فضایی	ردیف	نام فضا	حجم برحسب متر مکعب	وجه تمایز	پلان و موقعیت قرارگیری در بازار	تصویر از فضا
راسته‌بازار	2	سراجان	3172 حجم میانه	کمترین الحاقات شیشه‌ای (سطوح انعکاسی)		
عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی فضا						
		فرم		طاق و تویزه تکرار شونده		پراکندگی امواج صوتی به سبب شکستگی پوسته
				پوشش گنبدی سقف		رفتار به مثابه کاواک و حبس امواج صوتی
	پوسته‌ها	کف	هندسه	مسطح		جذب نسبی امواج صوتی
			مصالح	بتن		ضریب جذب بین 0.02 تا0.07
		جداره	هندسه	دارای شکستگی		پراکندگی امواج صوتی به سبب شکستگی
			مصالح	آجر با بندکشی گچی		ضریب جذب بین 0.08 تا 0.24
		موانع فیزیکی		ویترین‌های شیشه‌ای		انعکاس امواج صوتی ضریب جذب بین 0.30 تا 0.02
		منبع صوتی غالب		همهمه انسانی در وضعیت عادی بازار بلندگوی B&K در سنجش		ثابت
راسته‌بازار	3	بلورفروشان	2816 حجم پایین	وضعیت میانه به لحاظ الحاقات شیشه‌ای (سطوح انعکاسی)		
عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی فضا						
		فرم		طاق و تویزه تکرار شونده		پراکندگی امواج صوتی به سبب شکستگی پوسته
				پوشش گنبدی سقف		رفتار به مثابه کاواک و حبس امواج صوتی
	پوسته‌ها	کف	هندسه	مسطح		جذب نسبی امواج صوتی
			مصالح	بتن		ضریب جذب بین 0.02 تا 0.07
		جداره	هندسه	دارای شکستگی		پراکندگی امواج صوتی به سبب شکستگی
			مصالح	آجر با بندکشی گچی		ضریب جذب بین 0.08 تا 0.24
		موانع فیزیکی		ویترین‌های شیشه‌ای		انعکاس امواج صوتی ضریب جذب بین 0.30 تا 0.02
		منبع صوتی غالب		همهمه انسانی در وضعیت عادی بازار بلندگوی B&K در سنجش		ثابت
تیمچه‌ها	4	تیمچه امیر شمالی	1238 حجم پایین	فرم ایستا وضعیت میانه در میزان الحاقات		
عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی فضا						
		فرم		طاق‌نماهای جداره		پراکندگی امواج صوتی به سبب شکستگی پوسته
				پوشش سقف با گنبدهای خردمقیاس		رفتار به مثابه کاواک و حبس امواج صوتی
	پوسته‌ها	کف	هندسه	مسطح		جذب نسبی امواج صوتی
			مصالح	بتن		ضریب جذب بین 0.02 تا 0.07

ردیف	گونه فضایی	نام فضا	حجم برحسب متر مکعب		وجه تمایز	پلان و موقعیت قرارگیری در بازار	تصویر از فضا
5	تیمچه امیر	پوسته‌ها		جداره	هندسه	دارای شکستگی	پراکندگی امواج صوتی به سبب شکستگی
					مصالح	آجر با بندکشی گچی	ضریب جذب بین 0.08 تا 0.24
				موانع فیزیکی		ویترین‌های شیشه‌ای	انعکاس امواج صوتی ضریب جذب بین 0.30 تا 0.02
						فرش انبارشده در مرکز	جذب امواج صوتی ضریب جذب بین 0.49 تا 0.70
				منبع صوتی غالب		همهمه انسانی در وضعیت عادی بازار بلندگوی B&K در سنجش	ثابت
			5300 حجم میانه		فرم ایستا کمترین الحاقات		
			عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی فضا				
				فرم		پوشش سقف با یک گنبد کلان‌مقیاس	پراکندگی امواج صوتی و تشدید صوت
		پوسته‌ها		کف	هندسه	مسطح	جذب نسبی امواج صوتی
					مصالح	بتن	ضریب جذب بین 0.02 تا 0.07
				جداره	هندسه	دارای شکستگی	پراکندگی امواج صوتی به سبب شکستگی
					مصالح	آجر با بندکشی گچی	ضریب جذب بین 0.08 تا 0.24
				موانع فیزیکی		ویترین‌های شیشه‌ای	انعکاس امواج صوتی ضریب جذب بین 0.30 تا 0.02
				منبع صوتی غالب		همهمه انسانی در وضعیت عادی بازار بلندگوی B&K در سنجش	ثابت
6	تیمچه مظفریه		8450 حجم بالا		فرم پویا بیشترین الحاقات شیشه‌ای		
			عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی فضا				
				فرم		پوشش سقف با گنبدهای خردمقیاس	رفتار به مثابه کاواک و حبس امواج صوتی
		پوسته‌ها		کف	هندسه	مسطح	جذب نسبی امواج صوتی
					مصالح	بتن	ضریب جذب بین 0.02 تا 0.07
				جداره	هندسه	دارای شکستگی	پراکندگی امواج صوتی به سبب شکستگی
					مصالح	آجر با بندکشی گچی	ضریب جذب بین 0.08 تا 0.24
					هندسه	صاف و صیقلی	انعکاس امواج صوتی
					مصالح	شیشه (ویترین حجرات)	انعکاس امواج صوتی ضریب جذب بین 0.30 تا 0.02
				موانع فیزیکی		فرش انبارشده در مرکز	جذب امواج صوتی ضریب جذب بین 0.49 تا 0.70
				منبع صوتی غالب		همهمه انسانی در وضعیت عادی بازار بلندگوی B&K در سنجش	ثابت

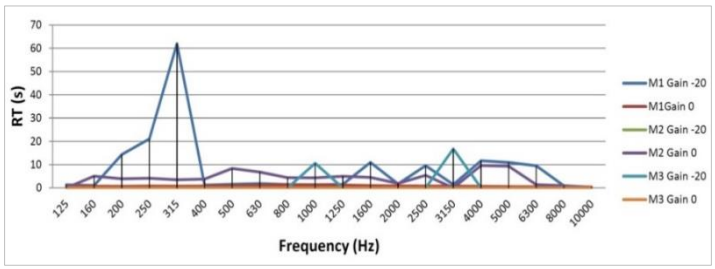
گونه فضایی	ردیف	نام فضا	حجم برحسب متر مکعب	وجه تمایز	پلان و موقعیت قرارگیری در بازار	تصویر از فضا
سراها	7	سرای امیر	25476 حجم بالا	فرم نسبتا پویا درختان پهن‌برگ تنومند، ارتفاع و حجم بالا به فرم چهارباغ		
			عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی فضا			
			فرم	دالان ورودی و نیم‌گنبد در مدخل آن		رفتار به مثابه کاواک و حبس امواج صوتی
			پوسته‌ها — کف — هندسه	مسطح		جذب نسبی امواج صوتی
			پوسته‌ها — کف — مصالح	بتن		ضریب جذب بین 0.02 تا 0.07
			پوسته‌ها — جداره — هندسه	دارای شکستگی		پراکندگی امواج صوتی به سبب شکستگی
			پوسته‌ها — جداره — مصالح	آجر با بندکشی گچی		ضریب جذب بین 0.08 تا 0.24
			پوسته‌ها — جداره — هندسه	صاف و صیقلی		انعکاس امواج صوتی
			پوسته‌ها — جداره — مصالح	شیشه (ویترین حجرات)		انعکاس امواج صوتی ضریب جذب بین 0.30 تا 0.02
			موانع فیزیکی	درختان تنومند و مرتفع		پخشایش نامنظم امواج صوتی و تضعیف صدا
			منبع صوتی غالب	همهمه انسانی در وضعیت عادی بازار بلندگوی B&K در سنجش		ثابت
سراها	8	سرای حاج حسینقلی	13260 حجم میانه	فرم نسبتاً پویا درختان پهن‌برگ تنومند، ارتفاع و حجم بالا به فرم چهارباغ		
			عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی فضا			
			فرم	دالان ورودی و نیم‌گنبد در مدخل آن		رفتار به مثابه کاواک و حبس امواج صوتی
			پوسته‌ها — کف — هندسه	مسطح		جذب نسبی امواج صوتی
			پوسته‌ها — کف — مصالح	بتن		ضریب جذب بین 0.02 تا 0.07
			پوسته‌ها — جداره — هندسه	دارای شکستگی		پراکندگی امواج صوتی به سبب شکستگی
			پوسته‌ها — جداره — مصالح	آجر با بندکشی گچی		ضریب جذب بین 0.08 تا 0.24
			پوسته‌ها — جداره — هندسه	صاف و صیقلی		انعکاس امواج صوتی
			پوسته‌ها — جداره — مصالح	شیشه (ویترین حجرات)		انعکاس امواج صوتی ضریب جذب بین 0.30 تا 0.02
			موانع فیزیکی	درختان تنومند و مرتفع		پخشایش نامنظم امواج صوتی و تضعیف صدا
				دکه نگهبانی		انعکاس امواج صوتی
			منبع صوتی غالب	همهمه انسانی در وضعیت عادی بازار بلندگوی B&K در سنجش		ثابت
	9	سرای میرزا محمد	2520 حجم پایین	فرم ایستا درختان کوچک، ارتفاع و حجم پایین به شکل پراکنده		
			عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی فضا			
			فرم	نیم‌گنبدهای واقع در کنج‌های سرا		رفتار به مثابه کاواک و حبس امواج صوتی
			پوسته‌ها — کف — هندسه	مسطح		جذب نسبی امواج صوتی
			پوسته‌ها — کف — مصالح	بتن		ضریب جذب بین 0.02 تا 0.07

گونه فضایی	ردیف	نام فضا	حجم برحسب متر مکعب	وجه تمایز		پلان و موقعیت قرارگیری در بازار	تصویر از فضا
				هندسه	دارای شکستگی		پراکندگی امواج صوتی به سبب شکستگی
				مصالح	آجر با بندکشی گچی		ضریب جذب بین 0.08 تا 0.24
			جداره	هندسه	صاف و صیقلی		انعکاس امواج صوتی
				مصالح	شیشه (ویترین حجرات)		انعکاس امواج صوتی ضریب جذب بین 0.30 تا 0.02
					درختان		پخشایش نامنظم امواج صوتی و تضعیف صدا
			موانع فیزیکی		منسوجات انبارشده در مرکز		جذب امواج صوتی ضریب جذب بین 0.49 تا 0.70
			منبع صوتی غالب		همهمه انسانی در وضعیت عادی بازار بلندگوی B&K در سنجش		ثابت

جدول 4- نمودارهای زمان واخنش در راسته‌بازارها، موقعیت سنجش در پلان و عوامل اثرگذار در اندازه زمان واخنش

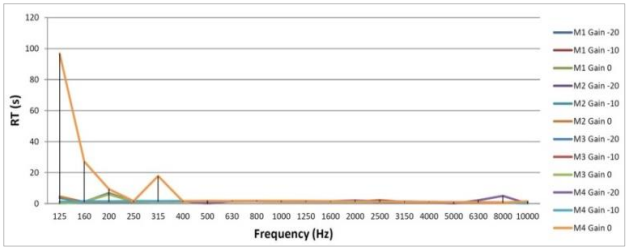
Tab. 4- Charts of Reverberation Time in the Rasteh-Bazaars, measurement position in the plan and factors influencing the amount of Reverberation Time

زمان واخنش در راسته‌بازار امیر

نقاط استقرار بلندگو و صوت‌سنج	نمودار مقادیر زمان واخنش به تفکیک فرکانس
	

تحلیل عوامل مؤثر در مقادیر زمان واخنش		عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی
- گنبد پوشاننده چهارسوق، در حبس فرکانس‌ها تأثیر کاملا مشخصی دارد؛ M_1 G -20 و M_1 G 0 - با فاصله گرفتن از منبع صوتی، اثر عوامل کالبدی در رفتار آکوستیکی روشن می‌شود (M_2 G -20 ، M_2 G 0 ، M_3 G -20 و M_3 G 0): زمان واخنش در برخی فرکانس‌های زیر به علت تأثیر شیشه‌های ویترین‌های حجره‌ها به طرز غیرقابل قبولی بالا می‌رود.	فرم	کاهش زمان واخنش توسط گنبد چهارسوق با حبس فرکانسی
	پوسته	ثابت
	موانع صوتی	شیشه با انعکاس زمان واخنش را افزایش می‌دهد.
	منبع صوتی	فاصله از منبع متغیر

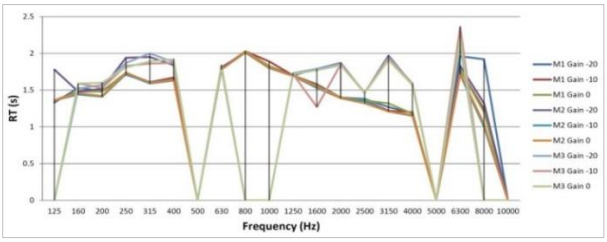
زمان واخنش در راسته‌بازار سراجان(1)

نقاط استقرار بلندگو و صوت‌سنج	نمودار مقادیر زمان واخنش به تفکیک فرکانس
	

تحلیل عوامل مؤثر در مقادیر زمان واخنش		عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی
- در دو حالت مشابه که صوت‌سنج در فواصل یکسان از منبع صوتی قرار گرفته است، مقادیر زمان واخش تقریبا یکسان است. در واقع فضا رفتار مشابهی را نشان می‌دهد؛ S_1M_2G-10 ، S_1M_2G-20 ، S_1M_2G0 ، S_1M_3G0 ، S_1M_3G-10 ، S_1M_3G-20	فرم	کاهش زمان واخنش توسط گنبد چهارسوق با حبس فرکانسی حذف پژواک با تغییر محور طراحی
	پوسته	ثابت

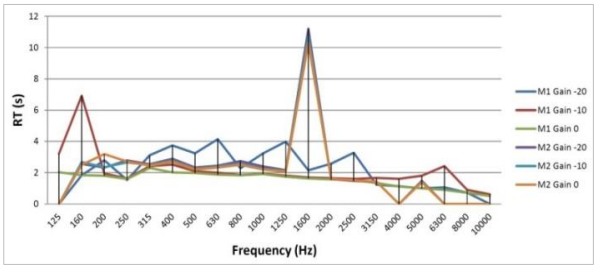
- ویژگی‌های محیطی این راسته‌بازار در راستای حذف امواج صوتی از طریق حبس فرکانسی در حفرات و کاواک‌های فضا (گنبدهای خُردمقیاس پوشش‌دهنده سقف) عمل می‌کند؛ S_1M_1G-20 ، S_1M_1G-10 ، S_1M_1G0	موانع صوتی	ثابت
- تغییر محور طراحی در انتهای راسته‌بازار باعث صفر شدن زمان واخنش می‌شود : S_1M_4G-20 ، S_1M_4G-10 ، S_1M_4G0. در واقع پژواک شنیده‌شده در انحنای انتهایی از سمت راسته‌بازار صفر است.	منبع صوتی	فاصله از منبع متغیر

زمان واخنش در راسته‌بازار سراجان(2)

نقاط استقرار بلندگو و صوت‌سنج	نمودار مقادیر زمان واخنش به تفکیک فرکانس
	

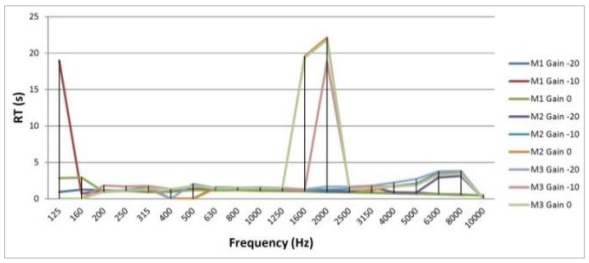
تحلیل عوامل مؤثر در مقادیر زمان واخنش	عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی	
- تغییرات کالبدی در قالب انحنا و پیچ در مسیرها، سبب می‌شود رفتار آکوستیکی فضا هم تغییر کند. در واقع آشفتگی مشاهده‌شده ناشی از تغییرات شدید در نظم و الگوی مشخص کالبد راسته‌بازار است. البته باید بدین نکته توجه شود که حداثر اندازه زمان 2 ثانیه است و تغییرات ایجادشده برای گوش انسان محسوس نیست. آن‌چه که واضح است این است که با ایجاد انحنا، پژو پژواک شنیده‌شده از سمت راسته‌بازار به شدت کاهش پیدا می‌کند. زمانی که منبع صوتی فاصله بیشتر از انحنا دارد، این مقدار به صفر ثانیه می‌رسد (S_1M_4G-20 ، S_1M_4G-10 ، S_1M_4G0).	فرم	کاهش پژواک با تغییر محور طراحی
	پوسته	ثابت
	موانع صوتی	ثابت
	منبع صوتی	فاصله از منبع متغیر

زمان واخنش در راسته‌بازار سراجان(3)

نقاط استقرار بلندگو و صوت‌سنج	نمودار مقادیر زمان واخنش به تفکیک فرکانس
	

تحلیل عوامل مؤثر در مقادیر زمان واخنش	عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی	
- نموداری دندانه‌ای فرکانس 250 تا 2500 هرتز نشان می‌دهد در این بازه فرکانسی در شدت پایین (Gian-20)، رفتار فضا در ایجاد پژواک قابل پیش‌بینی نیست. - چهارسوق، در هر سه شدت صدا، سه فرکانس از امواج صوتی ساطع‌شده از ابتدای بازار کاغذفروشان را به طور کامل حذف کرده است؛ S_3M_2G-20 ، S_3M_2G-10 ، S_3M_2G0.	فرم	کاهش زمان واخنش توسط گنبد چهارسوق با حبس فرکانسی کاهش پژواک با تغییر محور طراحی (عبور از انحنا و ورود به چهارسوق)
	پوسته	ثابت
	موانع صوتی	ثابت
	منبع صوتی	فاصله از منبع متغیر

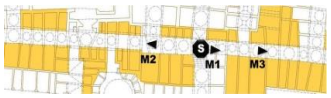
زمان واخنش در راسته‌بازار سراجان(4)

نقاط استقرار بلندگو و صوت‌سنج	نمودار مقادیر زمان واخنش به تفکیک فرکانس
	

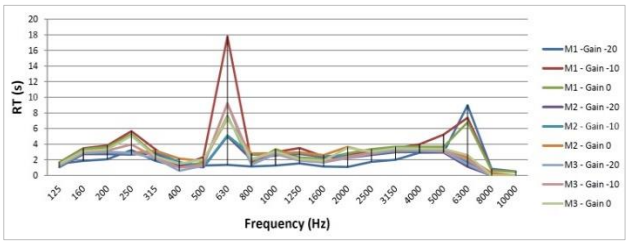
تحلیل عوامل مؤثر در مقادیر زمان واخنش	عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی	
- در صداهای بسیار زیر پدیده تشدید صدا مشاهده می‌شود (125 تا 200 هرتز در S_4M_1G-10 ، S_4M_1G0 ، S_4M_2G-10)؛ ولی از آن‌جایی که در شرایط واقعی شدت صداهای زیر در راسته‌بازار بسیار پایین است، همهمه‌ای ناشی از صداهای با فرکانس پایین ایجاد نمی‌شود.	فرم	ثابت
	پوسته	ثابت
	موانع صوتی	ثابت
- در طول راسته‌بازار سراجان، در حالتی که فاصله منبع صوتی و گیرنده صدا ثابت و در جهت‌های مختلف است، رفتار آکوستیکی کاملا مشابه به هم است؛ S_4M_2G-20 ، S_4M_2G-10 ، S_4M_2G0، S_4M_3G-20 ، S_4M_3G-10 ، S_4M_3G0.	منبع صوتی	ثابت

زمان واخنش در راسته‌بازار بلورفروشان

نقاط استقرار بلندگو و صوت‌سنج



نمودار مقادیر زمان واخنش به تفکیک فرکانس



تحلیل عوامل مؤثر در مقادیر زمان واخنش	عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی	
- فضا رفتار مشابهی را در دو جهت مقابل از منبع صوتی، نشان می‌دهد؛ M_2G-20، M_2G-10، M_2G0، M_3G-20، M_3G-10، M_3G0.	فرم	ثابت
	پوسته	ثابت
- در طول راسته‌بازار در فواصل مشترک از منابع صوتی، همهمه‌ای که شنیده می‌شود به علت مشابه بودن زمان واخنش در طیف فرکانسی، کیفیت همگونی دارد.	موانع صوتی	ثابت
	منبع صوتی	ثابت

در سکانس‌هایی که ویترین‌های شیشه‌ای در کالبد راسته‌بازارها نابسامانی‌هایی ایجادکرده‌اند، مشاهده می‌شود زمان واخنش از الگوی مشخص و قابل پیش‌بینی تبعیت نمی‌کند. (M_1G -20 و M_1G 0 در راسته‌بازار امیر). چرا که شیشه مصالحی است که به شدت باعث پخشایش صدا در محیط می‌شود و به ویژه زمانی که استفاده از آن تابع نظم مشخصی نباشد، باعث ایجاد وضعیت نامشخص در نمودارهای زمان واخنش فضا می‌شود. این مسأله در راسته‌بازار امیر (M_1G -20 و M_1G 0) که وسعت سطوح شیشه‌ای آن بیش از دو راسته دیگر است، شدیدتر است. زمانی که در طول مشخصی از مسیر راسته‌بازار، همگنی و تجانس در پوسته و فرم جداره‌ها وجود دارد، مشاهده می‌شود در فواصل مشترک از منابع صوتی، همهمه شنیده‌شده کیفیت یکسانی دارد. (S_1M_2G-20 ، S_1M_2G-10 ، S_1M_2G0 ، S_1M_3G-20 ، S_1M_3G-10 ، S_4M_2G-20 ، S_4M_2G-10 ، S_4M_2G0 ، S_4M_3G-20 ، S_4M_3G-10 ، S_4M_3G0 در راسته‌بازار سراجان و M_2G-20، M_2G-10، M_2G0، M_3G-20، M_3G-10، M_3G0 در راسته‌بازار بلورفروشان). چرا که اندازه زمان واخنش در طیف فرکانسی تقریبا یکسان است. این مسأله در طول راسته‌بازار سراجان و بلورفروشان که الحاقاتی کمتر از راسته‌بازار امیر دیگر دارند، مشهودتر است.

در سراسر راسته‌بازار سراجان و بلورفروشان، شکل و مصالح تشکیل‌دهنده پوسته فضا یکسان بوده و فرم کلی آن، تکرار مدولار و منظمی از طاق و گنبدها است. ولی پیچی که در انتهای این بازار سراجان قرار دارد، الگوی تکرارشونده کالبد فضا را دستخوش تغییر جدی می‌کند. مقایسه دو مقادیر زمان واخنش در دو نقطه اندازه‌گیری که ابتدای انحنا و نقطه انتهایی و خارج از انحنا را شامل می‌شود، نشانگر این است که تغییرات عمده در کالبد فضا به طور کاملا واضح و مشخص بر رفتار آکوستیکی فضا تأثیر می‌گذارد (S_2M_1G-20 ، S_2M_1G-10 ، S_2M_1G0، S_2M_2G-20 ، S_2M_2G-10 ، S_2M_4G0، S_2M_3G-20 ، S_2M_3G-10 ، S_2M_3G0). در واقع بر هم خوردن نظم مدولار در یک فضای همگن، باعث می‌شود رفتار یکنواخت فضا در مواجهه با امواج صوتی نیز متفاوت باشد. به عبارتی میزان پژواک در طول مسیر متفاوت بوده و بالتبع همهمه شنیده شده کمتر و یا بیشتر احساس می‌شود. از سویی به علت اینکه پدیده پژواک در خصوص همه فرکانس‌های مسیر نیز یکسان ناست، جنس همهمه شنیده‌شده، بم یا زیر، نیز متفاوت است.

با فهمی که از تحلیل اندازه‌گیری‌های زمان واخنش در سه راسته‌بازار امیر، سراجان و بلورفروشان به دست می‌آید می‌توان اذعان کرد کالبد اصیل راسته‌بازارها به لحاظ فرم و مصالح می‌تواند رفتار آکوستیکی مناسبی را ایجاد کند و با حبس فرکانس‌های صدا در گنبدهای خُردمقیاس سقف و همچنین با پراکندگی امواج صوتی توسط شگستگی‌های ظریف در جداره، مانع از ایجاد همهمه و نوفه حاصل از فعالیت‌های انسانی و گفتگو شوند؛ اما این مسأله به شدت تحت تأثیر حضور عناصر جدید و الحاقی در فضا قرار گرفته است. اثرگذاری مصالح غالب پوسته‌ها، آجر با بندکشی گچی، در مطالعات پیشین اثبات شده است. قرارگیری سطوح آجری با اختلاف ارتفاع جزئی در کنار بندکشی‌های گچی، شکستگی‌هایی جزئی ایجاد می‌کند که با پراکنده کردن امواج صوتی طنین فضا را کاهش می‌دهد (Ghaffari, 2013). در واقع پوشش پوسته‌های جداره، خود سبب شکل‌گیری فرمی در مقیاس خُرد شده که زمان واخنش را کم می‌کند. مقایسه مقادیر زمان واخنش سه راسته‌بازار نشان می‌دهد این مؤلفه بیش از آن که تحت تأثیر حجم فضاها باشد، از فرم آن‌ها اثر می‌شود.

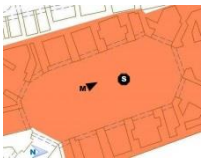
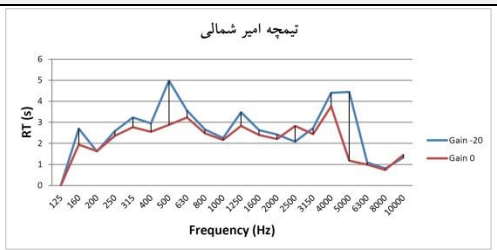
در تمیچه‌ها محل استقرار تجهیزات اندازه‌گیری زمان واخنش مراکز آن‌ها بوده که در تیمچه مظفریه به علت ابعاد بزرگ تیمچه، در دو نقطه صوت‌سنجی انجام شده است.

در تیمچه‌ها دو عامل اصلی در مقادیر زمان واخنش اثر می‌گذارند؛ سطوح شیشه‌ای و گنبدها به مثابه کاواک. به طور کلی نقش کاواک‌ها در حبس امواج صوتی و در نتیجه تضعیف صدای محیط، زمانی مؤثر است که ابعاد و فرم به‌خصوصی داشته باشند. زمانی که فرم کاواک کاملا منظم و ابعاد آن وسیع است، احتمال دارد رفتار غیر قابل پیش‌بینی در مواجهه با امواج صوتی بروز دهد؛ مانند گنبد عظیم تیمچه امیر که نه تنها نقشی در حبس فرکانسی ایفا نمی‌کند، بلکه به درجاتی موجب تشدید صدا نیز می‌شود (SMGain-20 و SMGain0 در تیمچه امیر). در حالی که گنیدهای خُردمقیاس تیچه امیرشمالی و مظفریه، با حبس امواج صوتی، پدیده طنین را کاهش می‌دهد.

سطوح شیشه‌ای نیز با انعکاس امواج صوتی، بیشترین نقش را در تشدید صدا ایفا می‌کنند. به گونه‌ای که اگر اندازه‌گیری زمان واخنش قبل از اینکه ویترین‌های شیشه‌ای به تیمچه‌ها الحاق شوند، انجام می‌گرفت، فرم خالص و دست‌نخورده تیمچه سبب شکل‌گیری نمودار منظمی از زمان واخنش در طیف فرکانسی می‌شد که روند کاهشی یا افزایشی قابل پیش‌بینی با کاهش و یا افزایش فرکانس‌ها داشت. مقایسه وضعیت آکوستیکی سه تیمچه حاکی از آن است که فرم‌های به کاررفته در کالبد فضاها بیش از اندازه حجم آن‌ها در مقادیر زمان واخنش اثرگذار است.

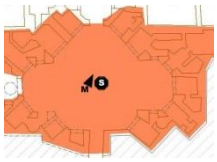
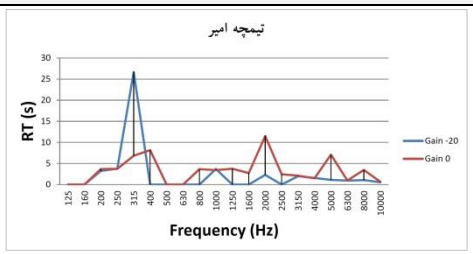
در سراها استقرار بلندگو در مرکز آن‌ها بوده و صوت‌سنجی در مرکز و در مسیرهای محوری و شعاعی انجام شده است. در جدول 6 مقادیر زمان واخنش در سراهای مورد مطالعه و عوامل مؤثر بر آن قابل مشاهده است.

جدول 5- نمودارهای زمان واخنش در تیمچه‌ها، موقعیت سنجش در پلان و عوامل اثرگذار در اندازه زمان واخنش
Tab. 5- Charts of Reverberation Time in the Timches, measurement position in the plan and factors influencing the amount of Reverberation Time

زمان واخنش در تیمچه امیرشمالی	نقاط استقرار بلندگو و صوت‌سنج	نمودار مقادیر زمان واخنش به تفکیک فرکانس
		
	تحلیل عوامل مؤثر در مقادیر زمان واخنش	عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی
		فرم کاهش زمان واخنش توسط گنبد با حبس فرکانسی

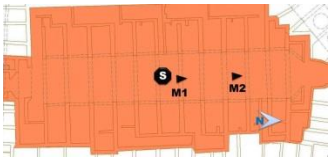
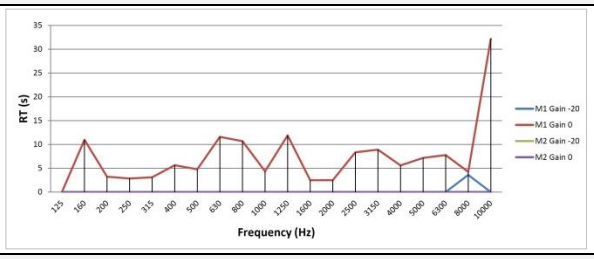
- صدا توسط گنبدهای پوشش‌دهنده سقف تضعیف می‌شود. - ویترین‌های شیشه‌ای در روند نامنظمِ کاهشی یا افزایشی بودن نمودارها تأثیر می‌گذارد.	پوسته	شیشه با انعکاس سبب بی‌نظمی در مقادیر زمان واخنش در طیف فرکانسی می‌شود.
	موانع صوتی	ثابت
	منبع صوتی	ثابت

زمان واخنش در تیمچه امیر

نقاط استقرار بلندگو و صوت‌سنج	نمودار مقادیر زمان واخنش به تفکیک فرکانس
	

تحلیل عوامل مؤثر در مقادیر زمان واخنش		عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی
- فرم و ابعاد وسیع گنبد پوشش‌دهنده سقف، سبب شده که الگوی منظمی در تضعیف یا تشدید صدا در طول فرکانس‌ها و در شدت‌های مختلف مشاهده نشود. - ویترین‌های شیشه‌ای نیز در نامنظم بودن نمودارها مؤثر است	فرم	گنبد کلان‌مقیاس، بر خلاف گنبدهای خردمقیاس که به مثابه کاواک عمل می‌کنند، خود عاملی برای پژواک به شمار می‌رود.
	پوسته	شیشه با انعکاس سبب بی‌نظمی در مقادیر زمان واخنش در طیف فرکانسی می‌شود.
	موانع صوتی	ثابت
	منبع صوتی	در شدت مختلف صدا، بی‌نظمی در رفتار هم تغییر می‌کند.

زمان واخنش در تیمچه مظفریه

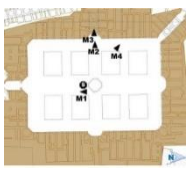
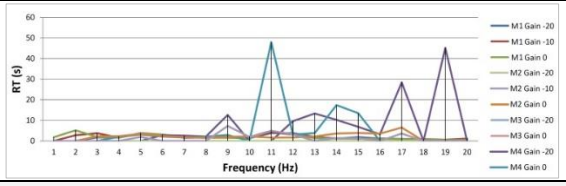
نقاط استقرار بلندگو و صوت‌سنج	نمودار مقادیر زمان واخنش به تفکیک فرکانس
	

تحلیل عوامل مؤثر در مقادیر زمان واخنش		عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی
- در شدت پایین (M_1G-20 و M_2G-20)، گنبد مرکز تیمچه قادر به حذف انعکاس‌های سطوح شیشه‌ای بوده و زمان واخنش صفر است. ولی در حالتی که شدت صدا بالاست (M_1G0 و M_2G0)، حفرات پوسته افقی نمی‌تواند اثر حجم بازگشت‌های صوتی از سطوح شیشه‌ای را تضعیف کند. - به علت پوشش سهم قابل توجهی از سطح جداره با شیشه، مقادیر زمان واخنش زیاد بوده و پدیده طنین اتفاق می‌افتد.	فرم	حبس امواج صوتی توسط گنبدهای خردمقیاس وکاهش زمان واخنش
	پوسته	سطوح وسیع شیشه‌ای شیشه با انعکاس سبب تشدید امواج صوتی و ایجاد طنین در فضا می‌شود.
	موانع صوتی	ثابت
	منبع صوتی	در شدت بالا، کالبد تیمچه قادر به حذف پژواک حاصله از سطوح شیشه‌ای نیست. اما در شدت پایین می‌تواند زمان واخنش را به صفر برساند.

جدول 6- نمودارهای زمان واخنش در سراها، موقعیت سنجش در پلان و عوامل اثرگذار در اندازه زمان واخنش

Tab. 6- Charts of Reverberation Time in the Sarâs, measurement position in the plan and factors influencing the amount of Reverberation Time

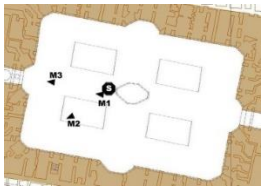
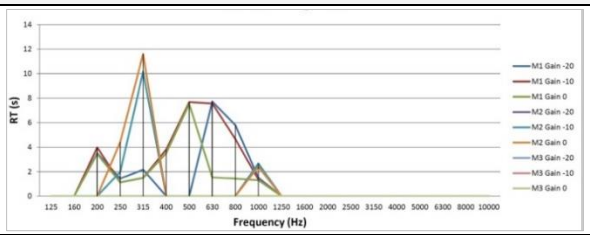
زمان واخنش در سرای امیر

نقاط استقرار بلندگو و صوت‌سنج	نمودار مقادیر زمان واخنش به تفکیک فرکانس
	

تحلیل عوامل مؤثر در مقادیر زمان واخنش	عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی

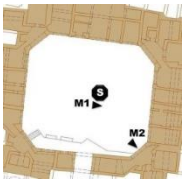
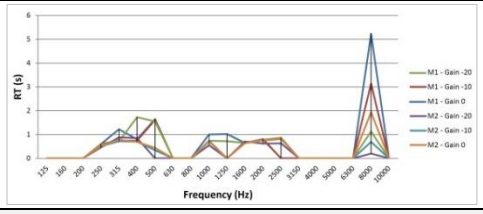
- درختان تنومند تبریزی (شکل 5) با پخشایش نامنظم امواج صوتی رفتاری مشابه با حبس صوتی ایفا کرده و باعث کاهش زمان واخنش می‌شوند؛ M_1G0 ، M_1G-10 ، M_1G-20. - زمانی که صوت‌سنجی در نزدیکی جداره انجام می‌شود، تأثیر شیشه‌های به‌کاررفته در جداره در تشدید برخی فرکانس‌ها مشهود است؛ M_4G0 ، M_4G-20. به طور کلی شیشه سبب بی‌نظمی در الگوی مقادیر زمان واخنش در طیف فرکانسی می‌شود. - نیم‌گنبدی (شکل 5) که نقطه ابتدایی دالان متصل‌کننده سرای امیر به راسته‌بازار امیر است، سبب حبس امواج صوتی، در نتیجه کاهش زمان واخنش و پژواک می‌شود؛ M_2G0 ، M_2G-10 ، M_2G-20 و M_3G0 ، M_3G-10 ، M_3G-20.	فرم	دالان منتهی به سرا و نیم‌گنبد ورودی آن، با حبس امواج صوتی زمان واخنش را به شدت کم می‌کند.
	پوسته	سطوح وسیع شیشه‌ای شیشه با انعکاس سبب تشدید امواج صوتی و بی‌نظمی در الگوی مقادیر زمان واخنش در طیف فرکانسی می‌شود.
	موانع صوتی	درختان با پخشایش نامنظم امواج صوتی باعث کاهش زمان واخنش می‌شوند.
	منبع صوتی	ثابت

زمان واخنش در سرای حاج حسینقلی میانی

نقاط استقرار بلندگو و صوت‌سنج	نمودار مقادیر زمان واخنش به تفکیک فرکانس
	

تحلیل عوامل مؤثر در مقادیر زمان واخنش		عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی
- در حوزه بالافصل از منبع صوتی، صداهای بم و نسبتا بم (فرکانس‌های بالای 1250 هرتز) هیچ‌گونه اثر پژواکی در فضا ندارند؛ M_1G0 ، M_1G-10 ، M_1G-20. - با وجود طراحی کاملا منظم سرا و جداره‌ها، وجود موانع صوتی متعدد، باعث بروز الگوهای نامنظم در طول زمان واخنش می‌شود. - در شدت صدای بالا، شیشه‌ها به علت اثر انعکاسی بالایی که دارند، سبب تشدید برخی از فرکانس‌ها می‌شوند؛ M_1G0، M_1G-10، M_2G0، M_2G-10. - در شدت صدای پایین، درختان با اثر پخشایش امواج صوت سبب از بین رفتن اثر تشدید پنجره‌های شیشه‌ای می‌شوند؛ M_1G-20، M_2G-20. - گنبد ورودی به سرا از سمت دالان، با حبس امواج صوتی، زمان واخنش را در هر شدت و در تمامی فرکانس‌ها به صفر می‌رساند؛ M_3G0 ، M_3G-10 ، M_3G-20.	فرم	دالان منتهی به سرا و نیم‌گنبد ورودی آن، با حبس امواج صوتی زمان واخنش را به شدت کم می‌کند.
	پوسته	سطوح وسیع شیشه‌ای شیشه با انعکاس سبب تشدید امواج صوتی و بی‌نظمی در الگوی مقادیر زمان واخنش در طیف فرکانسی می‌شود.
	موانع صوتی	درختان با پخشایش نامنظم امواج صوتی باعث کاهش زمان واخنش می‌شود دکه نگهبانی با سطح شیشه‌ای سبب انعکاس صوت و تشدید صدا می‌شود.
	منبع صوتی	در شدت صدای بالا، اثرگذاری سطوح شیشه‌ای در افزایش پژواک مشهود است.

زمان واخنش در سرای میرزا محمد

نقاط استقرار بلندگو و صوت‌سنج	نمودار مقادیر زمان واخنش به تفکیک فرکانس
	

تحلیل عوامل مؤثر در مقادیر زمان واخنش		عوامل مؤثر بر رفتار آکوستیکی
- شیشه‌های حجرات تنها عاملی هستند که می‌توانند سبب تشدید صدا شوند. - چند درخت با تاج کم‌حجم و اجناس انبار شده در مرکز سرا (شکل 6) نقش جذب‌کننده امواج صوتی را ایفا کرده و در حذف برخی فرکانس‌ها مؤثر هستند. - ابعاد کاواک موجود در کنج سرای میرزا محمد (شکل 7) به اندازه‌ای نیست که بتواند اثر شیشه‌های وسیع موجود در پوسته سرا را خنثی کرده و اثر چشم‌گیری در حذف فرکانس‌ها ایفا نماید؛ M_2G0 ، M_2G-10 ، M_2G-20.	فرم	کاواک کنج قادر به حبس کافی صوت و کاهش پژواک نیست.
	پوسته	سطوح وسیع شیشه‌ای شیشه با انعکاس سبب تشدید امواج صوتی و بی‌نظمی در الگوی مقادیر زمان واخنش در طیف فرکانسی می‌شود.
	موانع صوتی	درختان و منسوجات انبارشده در سرا در کاهش زمان واخنش در برخی فرکانس‌ها مؤثرند.
	منبع صوتی	در شدت صدای بالا، اثرگذاری سطوح شیشه‌ای در افزایش پژواک مشهود است.

بررسی مقادیر زمان واخنش در سه سرای امیر، حاج حسینقلی و میرزامحمد، روشن‌کننده تأثیر سه عامل کلیدی در میزان پژواک سراهاست؛ موانع صوتی، سطوح بازتاب دهنده صوت و نقش انکارناپذیر حفرات. موانع صوتی بسته به فرم، جنش و ابعاد خود می‌توانند نقش‌ها متفاوتی ایفا کنند. اجناس الیافی انبارشده سبب جذب صدا ، درختان باعث پراکندگی امواج صوتی و سطوح شیشه‌ای یا فلزی موجب انعکاس صوت می‌شوند. در جدول 7 مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در رفتار آکوستیکی فضاهای بازار تبریز قابل مشاهده است که بر اساس مدل مفهومی از روابط ساختاری بین مؤلفه‌های مؤثر در اندازه زمان واخنش (شکل 1) سنجیده شده است.

مراد از حفرات موجود در سراها، نیم‌گنبدهایی واقع در مدخل دالان‌های منتهی به راسته‌بازارها در سرای امیر و حاج حسینقلی و نیم‌گنبدهای کنج‌های سرای میرزامحمد است. این نیم‌گنبدها به مثابه کاواک عمل کرده و با حبس امواج صوتی نقش انکارناپذیری در کاهش طنین فضا ایفا می‌کنند. البته این تأثیرگذاری وابسته ابعاد و فرم نیم‌گنبدها نیز است؛ زیرا مشاهده می‌شود نیم‌گنبدهای سرای امیر و حاج حسینقلی تأثیر شدیدتری در کاهش زمان واخنش دارند؛ به‌طوری که مقادیر آن را در تمامی فرکانس‌ها به صفر ثانیه می‌رساند.

.

شکل 5- درختان تنومند در سرای امیر و نیم‌گنبد ورودی به دالان

Fig. 5- Huge trees in the Amir's Sarâ and the entrance dome to the Dalan

شکل 6 و7- درختان سرای میرزامحمد، اجناس انبارشده و کاواک واقع در کنج سرا

Fig. 6&7- The trees of Mirza Mohammad Sarâ, the stored goods and the cavity located in the corner of Sarâ

جدول 7- مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در رفتار آکوستیکی فضاهای بازار تبریز

Tab. 7- The most important influencing factors in the acoustical behavior of spaces of Tabriz Bazaar spaces

نوع رفتار در مقابل امواج صوتی																
بازتاب				پراکندگی				حبس				جذب				
فرم	پوسته	موانع صوتی	منبع صوتی	فرم	پوسته	موانع صوتی	منبع صوتی	فرم	پوسته	موانع صوتی	منبع صوتی	فرم	پوسته	موانع صوتی	منبع صوتی	عامل تأثیرگذار
- سطوح شیشه‌ای به کار رفته در جداره		- ونترن‌های برآمده شیشه‌ای - کیوسک نگهبانی فلزی		- شکستگی ظریف در پوسته جداره‌ها		- شکستگی‌های ظریف حاصل از مصالح جداره‌ها (آجر یا بندکشی گچی)		- درختان [در سراها]				- حفرات خُرد مقیاس - گنبدهای کوچو پوشش‌دهنده سقف و نیم-گنبدهای ورودی فضاها				- الیاف و منسوجات (کالاهای انبارشده)	
الحاقات به فضا				متعلق به کالبد اصیل فضا												

با این‌که مقادیر زمان واخنش در سه سرای مورد مطالعه رابطه مستقیم با حجم آنها دارد، اما در هر اندازه‌گیری در هر یک از سراها تأثیری که جنس مصالح و فرم کالبدی بر مقدار زمان واخنش می‌گذارد، بسیار مشهود است.

بر اساس تحلیل داده‌های برداشت‌شده، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در رفتار آکوستیکی فضاهای بازار تبریز را می‌توان در قالب جدول 6 جمع‌بندی کرد.

4– نتیجه‌گیری

پیشتر نیز گفته شد که هدف پژوهش حاضر، شناسایی مؤلفه‌های کالبدی مؤثر بر رفتار آکوستیکی بازار تبریز بر اساس اندازه‌گیری زمان واخنش و تطبیق یافته‌های آن با علوم بالادستی بوده است. در این راستا مقادیر زمان واخنش در موقعیت‌های مختلف اندازه‌گیری شده که مقایسه آن مقادیر در شرایط مختلف و تطبیق با واقعیات علمی حوزه آکوستیک منجر به شناسایی عوامل مؤثر در رفتار آکوستیکی فضاهای بازار تبریز شده است. این عوامل در جدول 6 به تفکیک نوع رفتار و شاخصه تأثیرگذار بیان شده است.

نتایج پژوهش حاکی از آن است که کالبد اصیل بازار تبریز تداعی کننده یک محیط همگن در معماری است که فرم سقف، مصالح و بند آجر در یکنواختی آن اثرگذار بوده و موجب این رفتار آکوستیکی خاص شده است. شاخص‌های مشخص‌شده در اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که رفتار آکوستیکی فضا و پاسخ فرکانسی که در محیط ایجاد شده است، حاکی از بهینگی آکوستیکی کالبد بازار تبریز است. در واقع کالبد بازار تبریز به گونه‌ای است که سبب استحاله انرژی صوتی شده و با افزایش یا کاهش شدت تراز صدا، رفتار بهینه‌ای بروز می‌دهد که این امر با عنوان «پایداری آکوستیکی» نام‌گذاری می‌شود. کالبد بازار تبریز بدون نیاز به تجهیزات و مداخلات آکوستیکی قادر است آسایش شنوایی قابل قبولی را ایجاد نماید. در واقع عملکرد فضاهای بازار تبریز در مواجهه با امواج صوتی به گونه‌ای است که با افزایش فشار صوت، به دلیل زمان واخنش بهینه، میزان صدا ثابت می‌ماند. این مسأله در نتیجه خصیصه‌های کالبدی بازار اتفاق می‌افتد. در واقع با افزایش شدت صدا به علت زمان واخنش پایین، فشار صوتی پایدار است. به بیانی دیگر، کالبد بازار تبریز به لحاظ ایجاد محیط صوتی مطلوب، خودکفاست. لیکن الحاقاتی که در سال‌های اخیر به کالبد بازار تبریز تحمیل شده است، سبب شده این خودکفایی تحت تأثیر سوء قرار گیرد. در حالی که در آن بخش از فضاهای بازار که واجد کمترین الحاقات بوده و بیشتر به فرم اصیل خود نزدیک هستند، مانند راسته‌بازار سراجان، پایداری آکوستیکی مشهود است. مقایسه مقادیر زمان واخنش زمانی که الحاقات فضا در حداقل میزان خود هستند، با مقادیر استاندارد، مبین این مسأله است.

مهم‌ترین عوامل مؤثر در پایداری آکوستیکی بازار تبریز در سه دسته فرم، پوسته و موانع صوتی قابل بررسی است. این سه شاخصه خود برگرفته و مستخرج از واقعیات علمی است که در جدول 1 مورد مداقه قرار گرفته‌اند.

فرم: مهم‌ترین عامل کاهنده زمان واخنش که وابسته به فرم است، کاواک‌های موجود در کالبد بازار تبریز است. حفراتی که به مثابه کاواک عمل کرده و با حبس امواج صوتی، پژواک در فضا را به شدت کاهش می‌دهند. این حفرات در بخش 3 به تفصیل معرفی شده‌اند.

پوسته: پوسته‌های کالبد اصیل بازار تبریز به واسطه شکستگی‌ها سبب پراکندگی امواج صوتی و کاهش زمان واخنش می‌شوند. این شکستگی‌ها در مقیاس کلان در مورد فرم طاق‌نما و طاق و تویزه‌ها و همچنین در خردمقیاس در مورد مصالح به کار رفته مصداق دارند. آجر با بندکشی گچی می‌تواند به عنوان مصالحی کارا برای کم‌کردن طنین در فضا به کار برده شود.

موانع صوتی: درختان در سراها و منسوجات در فضاهای داخلی بازار تبریز، به عنوان منابعی که کاهنده زمان واخنش هستند، شناسایی شده‌اند. درختان با پخشایش نامنظم امواج صوتی رفتاری مشابه حبس بروز داده و سبب کاهش پژواک می‌شوند. منسوجات نیز به واسطه ضریب جذب بالا، با جذب صدا، زمان واخنش فضا را کم می‌کند.

یافته‌های پژوهش نشان داد که خصوصیات اصیل کالبد بازار تبریز در راستای کاهش زمان واخنش و به تبع آن

کم کردن پژواک فضا عمل می‌کند؛ اما رفتار عناصر الحاقی جدید کاملا برعکس بوده و سبب تشدید امواج صوتی در فضاهای بازار می‌شود. در واقع کالبد اصیل بازار تبریز به گونه‌ای شکل گرفته که پژواک صدا در آن کم باشد، میزان همهمه حاصل از گفتار و فعالیت انسانی حداقل باشد، شدت صدا در آن افزایش پیدا نکند و بالتبع آسایش صوتی قابل قبولی داشته باشد. یافته‌ها نشان می‌دهد زمانی که شدت صدا بیشتر است، زمان واخنش مقدار کمتر است. در واقع فرم بازار به گونه‌ای طراحی شده که با شدت یافتن سر وصدای محیط، میرایی امواج صوتی سریع‌تر اتفاق افتد. به عبارتی دیگر، مؤلفه وضوح[16] در بازار تبریز پایدار است و این پایداری سبب می‌شود با افزایش شدت صدا، از بین رفتن امواج صوتی با سرعت بیشتری انجام شود و در نتیجه از ایجاد همهمه و افزایش تراز فشار صوت در فضا جلوگیری شود. لذا می‌توان اذعان کرد ویژگی‌های کالبدی بازار تبریز به شکلی است که به لحاظ آکوستیکی پایدار است. «پایداری آکوستیکی» بدین مفهوم مطرح می‌شود که فیزیک بازار بدون استفاده از تجهیزات و ابزار آکوستیکی برای کنترل امواج صوتی، قادر است با اتکا به ویژگی‌های ذاتی خود کیفیت مطلوب شنیداری را ایجاد کرده و آسایش صوتی مقبولی را فراهم آورد.

بنابراین می‌توان اذعان کرد الگوی طراحی بازار تبریز، به لحاظ ویژگی‌های فرمی، مصالح و عناصر حاضر در فضا می‌تواند به عنوان الگویی بهینه در طراحی فضاهایی که از نظر آکوستیکی پایدار هستند، مورد توجه قرار گیرد. پرواضح است با توسعه مطالعات در این حوزه پژوهشی جدید، می‌توان ضوابطی برای طراحی فضاهای واجد پایداری آکوستیکی وضع نمود؛ فضاهایی که بدون نیاز به تجهیزات و مداخلات آکوستیکی، رفتار مناسبی از خود نشان داده و محیط شنیداری مطلوبی برای انسان ایجاد می‌نمایند.

محیط بازار تبریز ترکیبی هنرمندانه از فضاهای متباینی است که شامل گونه‌های فضایی مختلف و فضاهای باز و بسته، ایستا و پویا است. در کنار هم قرار گرفتن این گونه‌های متنوع، به لحاظ کیفیت‌های فضایی نیز محیط قابل قبولی را ارائه می‌کند. پایداری آکوستیکی کالبد اصیل بازار نیز در پژوهش حاضر مورد اثبات قرار گرفت. لذا می‌توان از الگوی محیطی بازار تبریز برای طراحی فضاهای تجاری جدید بهره‌مند شد.

علاوه بر بررسی پایداری آکوستیکی بازار تبریز، از بررسی رفتار آکوستیکی آن مفاهیم دیگری نیز قابل استخراج است که در زیر بدان‌ها پرداخته می‌شود. واضح است این مفاهیم به عنوان فرائضی برای تحقیقات آتی در این حوزه جدید مطالعاتی مطرح شده و برای تعمیم‌پذیری علمی نیازمند گسترش مطالعاتی هستند.

- **فضاهای همگن:** فضاهای همگن آن دسته از فضاها، به ویژه مسیرها، هستند که مشابه راسته‌بازاراها از لحاظ ویژگی‌های کالبدی، از جمله ابعاد و تناسبت هندسی، فرم و مصالح تشکیل‌دهنده جداره‌های محصور کننده، همچنین بافت شهری پیرامونی و منابع صوتی دارای ویژگی‌های یکسانی هستند. این عوامل سبب می‌شود در طول آن مسیرها، در سکانس‌های مختلف رفتار آکوستیکی یکسانی بروز پیدا کند. می‌توان به صورت تعمدی با طراحی عناصر دگرگون، افزایش یا کاهش محصوریت فضایی، انقطاع در پیوستگی فضایی و ایجاد تغییر در محور طراحی، فرم و مصالح محصورکننده این تجانس صوتی را بر هم زد.

- **ارجحیت فرم بر اندازه فضا در اثرگذاری بر زمان واخنش:** این مفهوم، برتری اثرگذاری فرم فضا نسبت به حجم آن را در مقادیر زمان واخنش و به طور کلی، رفتار آکوستیکی فضاها بیان می‌کند. در واقع در ارزیابی‌های مربوط به رفتار آکوستیکی فضاها، مطالعه فرم‌های تشکیل‌دهنده کالبد و جسم مکان‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. این مسأله در مورد نقش حفرات و کاواک‌ها بارزتر است که در کالبد معماری و شهرسازی دوران اسلامی بیشتر مشاهده می‌شود.

پی‌نوشت

[1] در پارازیت نیز از این واقعیت فیزیکی (امواج متقابل) استفاده می‌شود.

[2] Irritability
[3] Neurasthenia Syndrome
[4] Diffusion
[5] Scattering
[6] Refracting

[7] Absorption

[8] معادله سابین برای محاسبه زمان واخنش (National Building Regulations Office, 2017):

$$T = \frac{0.16\,V}{4mT + A}$$

معادله ایرینگ برای محاسبه زمان واخنش (National Building Regulations Office, 2017):

$$T = \frac{0.16V}{4mV - S\ln(1-\alpha)}$$

در دو رابطه فوق؛ T: زمان واخنش بر حسب ثانیه / S: مجموعه سطوح اتاق بر حسب مترمربع / V: حجم فضا بر حسب مترمکعب / A: سطح معادل

[9] BAS001 Omnidirectional Source

[10] Amplifier

[11] Gain

[12] Calibrator

[13] Calibration

[14] فرمول سابین در محاسبه زمان واخنش صدا: $T=V/\Sigma\alpha S$

T زمان واخنش، V حجم فضا، α ضریب جذب و S مساحت سطوح تشکیل‌دهنده فضا می‌باشد (Kinsler, Frey, Coppens, & Sanders, 1999).

[15] Wallace Clement Sabine

[16] Clarity

منابع

Ariza-Villaverde, A. B., Jiménez-Hornero, F. J., & De Ravé, E. G. (2014). Influence of urban morphology on total noise pollution: Multifractal description. Science of The Total Environment, 472, 1-8 .

Badino, E., Manca, R., Shtrepi, L., Calleri, C., & Astolfi, A. (2019). Effect of façade shape and acoustic cladding on reduction of leisure noise levels in a street canyon. Building and Environment, 157, 242-256 .

Bora, Z. (2014). Understanding soundscape in public spaces: a case study in Akköprü Metro Station, Ankara. Bilkent University .

Bouzir, T. A. K., & Zemmouri, N. (2017). Effect of urban morphology on road noise distribution. Energy Procedia, 119, 376-385 .

Can, A., Fortin, N., & Picaut, J. (2015). Accounting for the effect of diffuse reflections and fittings within street canyons, on the sound propagation predicted by ray tracing codes. Applied Acoustics, 96, 83-93 .

de la Prida, D., Pedrero, A., Navacerrada, M. Á., & Díaz, C. (2019). Relationship between the geometric profile of the city and the subjective perception of urban soundscapes. Applied Acoustics, 149, 74-84 .

Dong, X., Wu, Y., Chen, X., Li, H., Cao, B., Zhang, X., . . . Li, X. (2021). Effect of thermal, acoustic, and lighting environment in underground space on human comfort and work efficiency: A review. Science of The Total Environment, 147537 .

Ghaffari, A. (2013). Improving the acoustic conditions in mosques with an analytical approach of speech clarity in Tabriz mosques of the Qajar period with the approach of the effect of bricks and brick decorations on quality of Reverberation Time. PhD Dissertation. Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran [In Persian].

Ghiabaklou, Z. (2018). Fundamentals of Building Physics 1: Acoustic. ACECR Publications, Tehran, Iran [In Persian].

Gramez, A., Ouis, D., & Belhamel, F. (2021). In-situ investigation of the acoustical performance in collective social dwellings. Applied Acoustics, 180, 108124 .

Hao, Y., & Kang, J. (2014). Influence of mesoscale urban morphology on the spatial noise attenuation of flyover aircrafts. Applied Acoustics, 84, 73-82 .

Hao, Y., Kang, J., & Krijnders, J. D. (2015). Integrated effects of urban morphology on birdsong loudness and visibility of green areas. Landscape and Urban Planning, 137, 149-162 .

Herranz-Pascual, K., García, I., Diez, I., Santander, A., & Aspuru, I. (2017). Analysis of field data to describe the effect of context (Acoustic and Non-Acoustic Factors) on urban soundscapes. Applied Sciences, 7(2), 173 .

Hong, J. Y., & Jeon, J. Y. (2017). Exploring spatial relationships among soundscape variables in urban areas: A spatial statistical modelling approach. Landscape and Urban Planning, 157, 352-364 .

Hornikx, M. (2009). Numerical modelling of sound propagation to closed urban courtyards: Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden.

Hornikx, M. (2016). Ten questions concerning computational urban acoustics. Building and Environment, 106, 409-421 .

Sanchez, G. M. E., Van Renterghem, T., Thomas, P., & Botteldooren, D. (2016). The effect of street canyon design on traffic noise exposure along roads. Building and Environment, 97, 96-110 .

Setyowati, E., Hardiman, G., & Purwanto, P. (2019). Tailoring Acoustic Performances of Resin Reinforced Biomass Fiber-Based Panel with Single and Multiple Tailed Cavity Inclusions for Interior Work. Fibers, 7(10), 85 .

Tang, S., Ho ,C., & Tso, T. (2014). Insertion losses of balconies on a building facade and the underlying wave interactions. The Journal of the Acoustical Society of America, 136(1), 213-225 .

Tong, Y., Tang, S., & Yeung, M. (2011). Full scale model investigation on the acoustical protection of a balcony-like facade device (L). The Journal of the Acoustical Society of America, 130(2), 673-676 .

Trinite, B., & Astolfi, A. (2021). The impact of sound field amplification systems on speech perception of pupils with and without language disorders in natural conditions. Applied Acoustics, 175, 107824
.
Wang, B., & Kang, J. (2011). Effects of urban morphology on the traffic noise distribution through noise mapping: A comparative study between UK and China. Applied Acoustics . .568-556 ,(8)72

Yang, H.-S., Kang, J., & Kim, M.-J. (2017). An experimental study on the acoustic characteristics of outdoor spaces surrounded by multi-residential buildings. Applied Acoustics, 127, 147-159 .

Ye, K., Luo, H., Zhong, H., & Kang, J. (2021 .(Physiological and psychological influence of multi-media in urban business districts. Sustainable Cities and Society, 103546 .

Zhang, X., Ba, M., Kang, J., & Meng, Q. (2018). Effect of soundscape dimensions on acoustic comfort in urban open public spaces. Applied Acoustics, 133, 73-81 .

Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (1999). Fundamentals of acoustics. Fundamentals of Acoustics, 4th Edition, by Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, pp. 560. ISBN 0-471-84789-5. Wiley-VCH, December 1999., 560 .

Liu, F., & Kang, J. (2018). Relationship between street scale and subjective assessment of audio-visual environment comfort based on 3D virtual reality and dual-channel acoustic tests. Building and Environment, 129, 35-45 .

Liu, J., Kang, J., Behm, H., & Luo, T. (2014a). Effects of landscape on soundscape perception: Soundwalks in city parks. Landscape and Urban Planning, 123, 30-40 .

Liu, J., Kang, J., Behm, H., & Luo, T. (2014b). Landscape spatial pattern indices and soundscape perception in a multi-functional urban area, Germany. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 22(3), 208-218 .

Long, M. (2005). Architectural acoustics: Elsevier.

Maristany, A., López, M. R., & Rivera, C. A. (2016). Soundscape quality analysis by fuzzy logic: A field study in Cordoba, Argentina. Applied Acoustics, 111, 106-115 .

Morillas, J. B., Escobar, V. G., & Gozalo, G. R. (2013). Noise source analyses in the acoustical environment of the medieval centre of Cáceres (Spain). Applied Acoustics, 74(4), 526-534 .

National Building Regulations Office. (2017). The eighteenth topic of Iran's national building regulations; Insulation and sound regulation. Road, Housing and Urban Development Research Center. Tehran, Iran [In Persian].

Park ,S., Moges, K. A., & Pyo, S. (2021). Experimental study on the sound absorption performance of surface-perforated mortar. Construction and Building Materials, 307, 124824 .

Salomons, E. M., & Pont, M. B. (2012). Urban traffic noise and the relation to urban density, form, and traffic elasticity. Landscape and Urban Planning, 108(1), 2-16 .