

یک مدل تجربی برای برآورد زمان بازآوایی^۱ در اماکن آموزشی

مریم فرهادیان	محسن علی آبادی	رستم گلمحمدی	آرزو سارانی ملاک*
استادیار	استاد	استاد	کارشناسی ارشد
دانشگاه علوم پزشکی همدان	دانشگاه علوم پزشکی همدان	دانشگاه علوم پزشکی همدان، دانشکده بهداشت	دانشگاه علوم پزشکی همدان
m.farhadian@umsha.a c.ir	mohsen.aliabadi@umsha.ac. ir	golmohamadi@umsha.ac .ir	saranimalak1393@gmail .com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶

چکیده

بازتابش صوتی از سطوح داخلی اماکن بسته سبب تشدید صدای منابع می‌گردد. بازتابش صوتی در برخی موارد مفید و اغلب اجتناب‌ناپذیر است. تعیین دقیق میزان تأثیر و کنترل بازتابش‌های مزاحم همواره یکی از موضوعات مهم علم آکوستیک بوده است. اغلب محیط‌های آموزشی و اداری موجود دارای زمان بازآوایی بلند بوده و سبب تشدید صدا به صورت مزاحم می‌گردند. هدف این تحقیق ارائه یک مدل تجربی برای برآورد زمان بازآوایی است.

در این مقاله متغیرهای مؤثر بر زمان بازآوایی و مقادیر واقعی آن در محیط‌های آموزشی یک سایت دانشگاهی اندازه‌گیری و مدل‌های محاسباتی موجود برای برآورد زمان بازآوایی مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته است. براساس یک روش منطقی با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از محیط‌های واقعی، یک مدل تجربی توسعه یافته ارائه شده است. متوسط ضریب جذب صوتی سطوح داخلی در محیط‌های مورد بررسی 0.01 ± 0.04 و زمان بازآوایی اندازه‌گیری شده 0.28 ± 0.78 S بوده است. نتایج نشان داد که ۹ مدل محاسباتی متداول برای برآورد زمان بازآوایی محیط پژوهش مقادیر غیرقابل قبول و بالاتر را برای شاخص مذکور داشته‌اند.

در این تحقیق بر مبنای تحلیل رگرسیون و توسعه مدل سابین^۲ معادله تجربی جدید ارائه شده است که نتایج پیش‌بینی زمان بازآوایی آن در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده و با خطای کمتر از $P=0.001$ ، ضریب تعیین $R^2=0.58$ و خطای جذر میانگین مربعات $RMSD = 0.18$ S اعتبارسنجی شده است.

واژگان کلیدی: بازتابش صوتی، سابین، زمان بازآوایی، مدل‌سازی

۱. مقدمه

آکوستیک، دانش ماهیت و رفتار امواج صوتی است و با منابع صدا و انتشار آن در فضای آزاد و فضاهای بسته سروکار دارد. افراد بخش عمده زندگی خود را در اتاق‌های بسته، دفاتر، کارگاه‌ها یا کارخانه‌ها، یا در خانه‌هایشان می‌گذرانند. در محیط‌های آموزشی، شرایط آکوستیکی مناسب برای آسایش و کارایی ضروری است. شرایط آکوستیکی ضعیف زمانی که حضور فرد به مدت طولانی در اتاق فعالیت داشته باشد، علاوه بر اختلال در آسایش صوتی می‌تواند سبب اثرات نامطلوب شناختی و ذهنی در افراد شده و به تدریج می‌تواند کارایی شغلی آنان را کاهش دهد. از آنجایی که تبادل شفاهی اطلاعات یا فرایندهای یادگیری در محیط‌های بسته آموزشی انجام می‌شود، لازم است این محیط‌ها طراحی آکوستیکی مطلوبی داشته باشند [۱،۲].

کیفیت بازتابش صدا نقش مهمی را در کیفیت آکوستیک اتاق ایفا می‌کند و یکی از معیارهای اصلی ارزیابی کیفیت آکوستیک فضاهای بسته است [۳]. بازتاب‌ها، بسته به سطوح جذبی و فرکانسی مدت زمانی طول خواهد کشید تا توسط سطوح جذب شوند، این پدیده را تحت اصطلاحی به‌عنوان زمان بازآوایی می‌نامند. زمان بازآوایی پرکاربردترین و معروف‌ترین شاخص آکوستیک اتاق است که از نظر اندازه‌گیری و کاربرد دارای سابقه طولانی است [۴] در دستورالعمل‌های آکوستیکی بعد از تعیین شاخص تراز فشار صوت این شاخص با توجه به اهمیت آسایش صوتی و ارتباط گفتاری در کلاس‌های درس و اتاق‌های اداری مورد تاکید قرار گرفته است [۲،۵].

زمان بازآوایی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های صوتی [۶]، بیان‌کننده میزان بازتابش سطوح در محیط‌های بسته است، و طبق تعریف، مدت زمانی است که چگالی انرژی صدا در محدوده فضا پس از قطع شدن صدای منبع ۶۰ دسی‌بل کاهش می‌یابد. زمان بازآوایی معمولاً براساس استاندارد ایزو ۲-۳۳۸۲:۲۰۰۸ اندازه‌گیری می‌شود [۷]. از جمله روش‌های برآورد

زمان بازآوایی می‌توان به مدل‌های محاسباتی تجربی و مدل‌های محاسباتی ریاضی مانند روش ردیابی تابش^۳، مدل المان محدود^۴ و حتی روش‌های مبتنی هوش مصنوعی اشاره کرد [۸]. از جمله مدل‌های محاسباتی تجربی می‌توان به مدل‌های ساین، ایرینگ^۵، میلینگتون^۶، فیزتوری^۷، پوژول^۸، آرا و پوچاد^۹، هیرما و هاجسون^{۱۰}، کوتروف^{۱۱} و نوبائر^{۱۲} اشاره نمود [۲،۹].

آکوستیک اتاق زمانی که افراد در تالارهای کنفرانس، سالن‌های موسیقی، مساجد و کلیساها تجمع می‌نمایند اثر خود را نشان می‌دهد. اطلاعات کمی درباره طراحی فنی فضای داخلی براساس رفتار آکوستیکی تا آغاز قرن بیستم وجود داشته است. والاس کلمنت ساین^{۱۳} در سال ۱۹۲۲ مطالعات آزمایشی گسترده‌ای درباره ویژگی‌های آکوستیکی اتاق، از جمله تالار سمفونی بوستون انجام داد [۱]. ساین در تئوری انتشار صدا پدیده بازتابش را توصیف کرده و براساس نتایج تحقیقاتش رابطه تجربی زمان بازآوایی را ارائه نمود [۱۰]. زمان بازآوایی براساس نظریه ساین هنوز هم استفاده می‌شود، این فرمول ساده است، اما محدودیت‌های بسیاری دارد. در بیشتر اتاق‌های مورد استفاده به دلیل شکل هندسی نامنظم اتاق و ضریب جذب متفاوت سطوح، انتشار صوت به‌صورت یکنواخت نیست. این فرمول برای اتاق‌های صامت نتایج کاملاً اشتباهی ارائه می‌دهد، در اینجا انتظار می‌رود که زمان بازآوایی نزدیک به صفر محاسبه شود، اما عددی متفاوتی به‌دست می‌آید. فرمول ساین برای اتاق‌هایی با متوسط ضریب جذب صوت کمتر از ۰/۲ که جذب به‌صورت یکنواخت توزیع شده طراحی شده است. ایرینگ در سال ۱۹۳۰ [۱۱] و میلینگتون در سال ۱۹۳۲ برای پیش‌بینی زمان بازآوایی براساس فرضیه‌های مشابه روابطی را ارائه دادند [۱۲]. فرمول ساین دارای اهمیت تاریخی است که با توسعه علم تحولات زیادی در آن ایجاد شده تا محدودیت‌های این فرمول کاهش پیدا کنند. بسیاری از معادلات تجربی برای اتاق‌های مستطیلی فرموله شده‌اند.

فیزتوری، ۱۹۵۹ اولین کسی بود که کارهایش ارائه شد [۱۳].
، سپس پوژول، ۱۹۷۵ و همچنین نوبائر، ۲۰۰۱، آرا و پوچاد،
۲۰۰۵ و دیگران نیز به ترتیب نتایج خود را منتشر نمودند.
فیزتوری میانگین حسابی زمان بازآوایی را در سه جهت عمود
محاسبه کرده است. از سوی دیگر فرمول آرا و پوچاد به
میانگین هندسی توجه کرده است [۱۴]. هر دو معادله ساده
هستند اما در اتاق‌های پیچیده‌تر کارایی ندارند [۱۵، ۱۶].
نووسویت^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۵ عنوان کردند که در
بسیاری از شرایط عملی، فرض پراکندگی میدان صوتی مورد
نیاز برای استفاده از نظریه سایین انجام نشده است. آنها تفاوت
بین اندازه‌گیری واقعی و روابط نظری شناخته شده مانند سایین،
ایرینگ، میلینگتون، کوتروف، فیزتوری، آرا و پوچاد، نوبائر و
پوژول تفاوت بسیار زیادی را مشاهده کردند [۱۵]. در نهایت
آنها پیشنهاد کردند که برای اتاق‌هایی با ضریب جذب متوسط
سطوح کمتر از ۰/۲ و بالاتر از ۰/۲ جداگانه تحقیق انجام شود
[۱۷]. علی‌آبادی و همکاران در سال ۲۰۱۴ زمان بازآوایی را
به‌عنوان کمیت آکوستیک ویژه در ۳۰ کارگاه گلدوزی براساس
ایزو ۲-۳۳۸۲ اندازه‌گیری و بیان کردند که شباهت بین مقادیر
زمان بازآوایی محاسبه شده با فرمول سایین و مقادیر
اندازه‌گیری نسبتاً ضعیف بود [۱۸]. نوبائر و همکاران در سال
۲۰۰۱ فرمول‌های شناخته شده زمان بازآوایی را مرور کرده و
نشان دادند که زمان بازآوایی را نمی‌توان با دقت در مواردی
که پخش صدا یکنواخت نبوده پیش‌بینی کرد [۱۹]. نتایج
حاصل از مقایسه میانگین مقادیر زمان بازآوایی اندازه‌گیری
شده با نتایج به‌دست آمده از روابط تجربی نشانگر این مسئله
است که روابط تجربی با توجه به شرایط مرزی بسیار
محدودکننده‌ای که دارند، در اغلب شرایط واقعی قابل اعتماد
نیستند. مطالعات نشان داده که روابط تجربی در محیط‌های
کاری با متوسط ضریب جذب سطوح کمتر از ۰/۲ نمی‌توانند
زمان بازآوایی را با دقت قابل قبول برآورد نمایند [۲، ۹]. این
درحالی است که اغلب اماکن اداری و آموزشی دارای متوسط

ضریب جذب صوتی کمتر از ۰/۱ هستند. نویسندگان این مقاله
تلاش نموده‌اند تا براساس مبانی آکوستیک و توسعه روابط
تجربی موجود یک مدل تجربی برای برآورد محاسباتی زمان
بازآوایی در محیط‌های واقعی اداری و آموزشی با متوسط
ضریب جذب سطوح کمتر از ۰/۱ ارائه نمایند.

۲. روش کار

محیط پژوهش شامل ۲۷ اتاق اداری و ۲۵ کلاس درس بدون
حضور کارکنان و دانشجوین بوده است. اندازه‌گیری توسط
دستگاه اندازه‌گیری زمان بازآوایی^{۱۵} ساخت کمپانی بسوا^{۱۶}
انجام گردیده است. در این مطالعه با توجه به تجهیزات
اندازه‌گیری موجود و نرم‌افزار و سخت‌افزار آن، روش صدای
منقطع و سطح بازرسی، مطابق با استاندارد ایزو ۲-۳۳۸۲:۲۰۰۸
جهت اندازه‌گیری زمان بازآوایی استفاده شده است. منبع صدا
مورد استفاده در این روش یک منبع کروی تمام جهتی بوده و
ارتفاع مرکز آکوستیکی منبع ۱/۵ متر از کف اتاق بوده است.
بلندگو در کلاس‌های درس و اتاق‌های اداری در مرکز اتاق و
موقعیت‌های میکروفن در هر موقعیت بلندگو دو بار بوده و
جهت آن به طول محیط مورد نظر بوده است. در سطح
اندازه‌گیری نوع بازرسی تعداد موقعیت‌های مکانی اندازه‌گیری
۲ مورد توصیه شده، که در هر موقعیت مکانی اندازه‌گیری،
موقعیت قرارگیری منبع صدا یک و موقعیت‌های میکروفن
حداقل ۲ مورد توصیه شده است. در هر موقعیت قرارگیری
میکروفن نیز حداقل یک‌بار اندازه‌گیری توصیه شده است.
محدوده فرکانسی نیز از ۱۲۵ الی ۴۰۰۰ هرتز است.

شاخص زمان بازآوایی به‌دست آمده مطابق با مقررات ملی
ساختمان زمان بازآوایی در فرکانس‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰
هرتز میانگین‌گیری شده است تا برای معرفی شرایط
آکوستیکی هر مکان از آن استفاده شود [۲۰]. زمان بازآوایی
هر مکان مورد بررسی ابتدا براساس روابط مدل‌های تجربی
متداول سایین، ایرینگ، میلینگتون، فیزتوری، پوژول، آرا و

پوچاد، هیرما و هاجسون، کوتروف و نوبائر محاسبه شده و سپس با استفاده از فنون تحلیل آماری داده‌ها و ابداعاتی در روابط موجود، یک مدل محاسباتی تجربی برای مکان‌های

مورد بررسی و با نتایج اندازه‌گیری شده در محیط پژوهش مقایسه گردید که در این مقاله ارائه شده است.



شکل ۱. یک نمونه اتاق کار مورد پژوهش

۳. نتایج

نتایج نشان داد که کلاس‌های درس و اتاق‌های اداری محیط پژوهش ساختار آکوستیکی مشابه داشته‌اند، به طوری که متوسط ضریب جذب صوتی کلاس‌های درس و اتاق‌های اداری

$\overline{NRC} = 0.04 \pm 0.01$ بوده است، لذا در این مقاله داده‌های آنها را باهم ترکیب شده است، در جدول ۱ نتایج توصیف آماری خصوصیات آکوستیکی ترکیب ۲۷ اتاق اداری و ۲۵ کلاس با متوسط ضریب جذب صوتی کمتر از ۰/۱ ارائه شده است.

جدول ۱. نتایج خصوصیات آکوستیکی و برآورد RT توسط مدل‌های تجربی متداول در کلاس‌های درس و اتاق‌های اداری

متغیرها	نحوه نمایش	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
حجم	V	m ³	۳۳/۲۵	۳۳۲/۶۴	۱۱۹/۹۹	۵۳/۳۶
مساحت کل سطوح داخلی	S	m ²	۵۸/۱۴	۳۴۱/۵۲	۱۴۸/۹	۷۹/۹۱
متوسط ضریب جذب صوتی	\bar{NRC}	-	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۱
شاخص جذب اتاق خالی	Sabine	Sabine	۲/۲۲	۱۳/۰۵	۶/۰۴	۳/۲۱
زمان بازآوایی اندازه‌گیری شده	RT	S	۰/۲۶	۱/۴۳	۰/۷۸	۰/۲۸
نتایج برآورد زمان بازآوایی توسط مدل‌های موجود	Sabine	S	۲/۰۴	۴/۲	۲/۹۷	۰/۵۷
	Eyring	S	۲	۴/۱۳	۲/۹۱	۰/۵۶
	Millington	S	۲	۴/۱۳	۲/۹۱	۰/۵۶
	Fitzory	S	۲/۲۴	۲/۲۴	۵/۷۴	۳/۴۹
	Arnu-a-Puchads	S	۲/۵۴	۱۱/۶۴	۴/۸۱	۱/۷۵
	Pujolle	S	۲/۲۸	۶/۴۹	۳/۷۱	۱/۰۹
	Heerema-Hodgson	S	۴/۹۵	۸/۸۷	۷/۳۵	۰/۹
	Kuttruff	S	۲/۰۲	۴/۱۷	۲/۹۳	۰/۵۶
	Neubauer	S	۲/۶۱	۴/۷۱	۳/۵	۰/۵۳

اندازه‌گیری شده و مقادیر زمان بازآوایی محاسباتی از طریق روابط تجربی فوق در کلاس‌های درس و اتاق‌های اداری که همگی دارای متوسط ضریب جذب کمتر از ۰/۱ بوده‌اند، اغلب کمتر از ۰/۰۵ بوده است و به این ترتیب ضریب تعیین بین این مقادیر کمتر از ۰/۲۵ و ضعیف بوده است.

نتایج جدول ۱ نشان داد که مقادیر میانگین تمام زمان‌های بازآوایی محاسباتی از طریق مدل‌های سابین، ایربینگ، میلینگتون، فیزتوری، پوژول، آرا و پوچاد، هیرما و هاجسون، کوتروف و نوبائر نسبت به مقادیر زمان بازآوایی اندازه‌گیری شده بیش برآورد داشته‌اند. تحلیل نتایج همچنین نشان داد که ضریب همبستگی پیرسون^{۱۷} بین مقادیر زمان بازآوایی

جدول ۲. تعیین بین مقادیر زمان بازآوایی اندازه‌گیری شده و مقادیر زمان بازآوایی محاسباتی از طریق روابط تجربی متداول در کلاس‌های درس و

اتاق‌های اداری با متوسط ضریب جذب کمتر از ۰/۱

مدل محاسباتی	Sabine	Eyring	Millington	Fitzory	Ara-puchade	Pujolle	Heerma & Hodgson	Kuttruff	Neubauer
ضریب همبستگی پیرسون (R)	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۴	۰/۴۹	۰/۶	-۰/۱۲	۰/۴۷	۰/۵۲
ضریب تعیین (R ²)	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۲۴	۰/۳۶	۰/۰۱	۰/۲۲	۰/۲۷

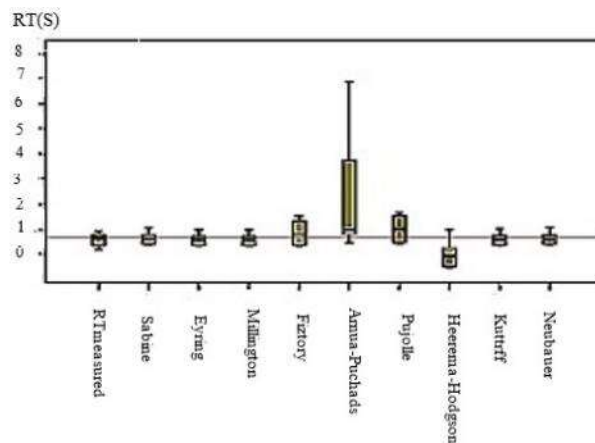
در این تحقیق تعدادی از کلاس‌ها و اتاق‌های اداری دارای متوسط ضریب جذب صوتی سطوح داخلی بالاتر از ۰/۱ بودند و برای مقایسه مدل طراحی شده تحلیل محاسباتی و آماری مشابهی بر روی داده‌های آنها نیز صورت گرفت. در اینجا به دلیل مشابهت ضریب جذب صوتی سطوح داخلی، مقادیر متغیرهای ۳ اتاق اداری و ۵ کلاس درس با هم تلفیق و تحلیل گردید.

در جدول ۳ نتایج توصیفی خصوصیات آکوستیکی اتاق‌های مذکور را به همراه برآورد شاخص زمان بازآوایی توسط مدل‌های تجربی متداول آورده شده است. شکل ۲ نیز نمودار جعبه‌ای زمان بازآوایی اندازه‌گیری شده RT_{60} و زمان‌های بازآوایی محاسباتی مدل‌های تجربی در کلاس‌های درس و اتاق‌های اداری با متوسط ضریب جذب صوتی بالاتر از ۰/۱ را نشان می‌دهد.

جدول ۳. خصوصیات آکوستیکی اتاق اداری و کلاس‌های درس با ضریب جذب صوتی بالاتر از ۰/۱ و برآورد شاخص RT با مدل‌های تجربی

متداول

متغیرها	نحوه نمایش	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
حجم	V	m ³	۳۸/۴	۵۵۴/۴	۲۶۹/۲	۲۰۲/۶
مساحت کل سطوح داخلی	S	m ²	۶۸/۸	۵۶۸/۴	۲۷۲/۹	۱۹۱/۵
متوسط ضریب جذب صوتی	\overline{NRC}	-	۰/۱۴	۰/۲۷	۰/۲۲	۰/۰۴
شاخص جذب صوتی اتاق خالی	Sabin	Sabin	۵/۳	۱۵۳/۵	۶۰/۰	۷/۷
زمان بازآوایی اندازه‌گیری شده	RT	S	۰/۱۹	۰/۹۳	۰/۵۳	۰/۲۴
مدل محاسباتی زمان بازآوایی	Sabin	S	۰/۳۷	۱/۰۶	۰/۶۴	۰/۲۴
	Eyring	S	۰/۳۳	۰/۹۸	۰/۵۷	۰/۲۳
	Millington	S	۰/۳۳	۰/۹۸	۰/۵۷	۰/۲۳
	Fitzory	S	۰/۳۴	۱/۵۳	۰/۵۶	۰/۵۳
	Arnu-Puchads	S	۰/۴۶	۶/۸۸	۲/۳	۲/۲۹
	Pujolle	S	۰/۴۲	۱/۶۵	۱/۰۲	۰/۵۲
	Heerema-Hodgson	S	-۰/۵۲	۱	-۰/۰۰۹	۰/۵۳
	Kuttrff	S	۰/۳۵	۱/۰۱	۰/۶	۰/۲۴
	Neubauer	S	۰/۳۸	۱/۰۸	۰/۶۳	۰/۲۵



شکل ۲. نمودار جعبه‌ای زمان بازآوایی اندازه‌گیری شده RT60 و زمان‌های بازآوایی محاسباتی مدل‌های تجربی در کلاس‌های درس و اتاق‌های اداری با ضریب جذب صوتی بالاتر از ۰/۱

زمان بازآوایی اندازه‌گیری شده محاسباتی توسط روابط پیشگفتار برای این وضعیت اغلب مقادیر بالایی را نشان می‌دهد که در جدول ۴ آمده است و حاکی از معتبر بودن این روابط برای مکان‌های با ضریب جذب صوتی بالاتر از ۰/۱ بوده است.

نتایج نشان داد که مقادیر میانگین زمان‌های بازآوایی محاسباتی از طریق اغلب مدل‌های تجربی متداول با مقادیر زمان بازآوایی اندازه‌گیری شده برای اتاق‌های اداری با ضریب جذب صوتی بالاتر از ۰/۱ نتایج مشابهی را ارائه می‌دهند که میانگین آنها به نتایج زمان بازآوایی اندازه‌گیری شده نزدیک است. ضریب همبستگی پیرسون و ضریب تعیین بین مقادیر

جدول ۴. ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر زمان بازآوایی اندازه‌گیری شده و محاسباتی از طریق مدل‌های متداول در کلاس‌های درس و اتاق‌های اداری با متوسط ضریب جذب بالاتر از ۰/۱

مدل محاسباتی	Sabine	Eyring	Millington	Fiztory	Arau-puchade	Pujolle	Heerema & Hodgson	Kuttruff	Neubauer
ضریب همبستگی پیرسون (R)	۰/۹۳	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۷	-۰/۵۷	۰/۹	۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۹۲
ضریب تعیین (R ²)	۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۴۹	۰/۳۲	۰/۸۱	۰/۸۳	۰/۸۶	۰/۸۵

زمان بازآوایی و اصلاح بیش برآزش مدل‌های موجود، ابتدا پراکنش بین متغیرهای مهم در تعیین شاخص مذکور مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان با توسعه یکی از مدل‌های متداول به مدل نهایی دست یافت.

با توجه به مشخص شدن این واقعیت که مدل‌های تجربی موجود تنها برای مکان‌های با $NRC > 0.1$ اعتبار دارد، داده‌های مربوط به این مکان‌ها در تدوین مدل نهایی حذف شد. برای دستیابی به یک مدل با اعتبار کافی جهت پیش‌بینی

جدول ۵. مقایسه پراکندگی نتایج اندازه‌گیری و پیش‌بینی زمان بازآوایی صوت را توسط مدل ۱ در آزمون مقایسه میانگین‌ها^{۱۹}

معیار	تعداد نمونه	میانگین (S)	انحراف معیار	خطای معیار
زمان بازآوایی اندازه‌گیری شده	۵۲	۰/۷۷۸	۰/۲۷۶	۰/۰۳۸
زمان بازآوایی مدل ۱	۵۲	۰/۷۸۰	۰/۲۰۸	۰/۰۲۹

برای دستیابی به نتایج بهتر، مقرر شد که روی بهبود و توسعه مدل سابین تمرکز شود. رابطه تجربی سابین به صورت زیر است:

$$RT_{\text{sabine}} = \frac{0.16V}{S\bar{\alpha}} \quad (2)$$

در این مرحله از عبارت $\frac{1}{S\bar{\alpha}}$ یا همان $\frac{1}{\text{SNRC}}$ به عنوان یک متغیر و حجم نیز به عنوان متغیر دیگر استفاده شده است. برازش مدل توسط تحلیل رگرسیون چندگانه مجدد برای بررسی ارتباط بین زمان بازآوایی اندازه‌گیری شده رابطه زیر را ارائه داد که دارای ضریب تعیین برابر با ۰/۵۷۸ بوده و نتایج بهتری نسبت به مدل قبلی داشته است و به علاوه علامت جبری عبارت‌های درون معادله با انتظار رفتار آنها در پیش‌بینی زمان بازآوایی همخوانی عینی‌تری دارد. شکل ۴ نمودار پراکنش بین مقادیر پیش‌بینی مدل نهایی ۲ و زمان بازآوایی اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. این مدل با خطای کمتر از $P=0.001$ ، ضریب تعیین $R^2=0.578$ و خطای جذر میانگین مربعات $\text{RMSD} = 0.177 S$ اعتبارسنجی شده است.

$$RT_{60} = 1.139 + 0.000275 V - \frac{1.823}{\text{SNRC}} \quad (3)$$

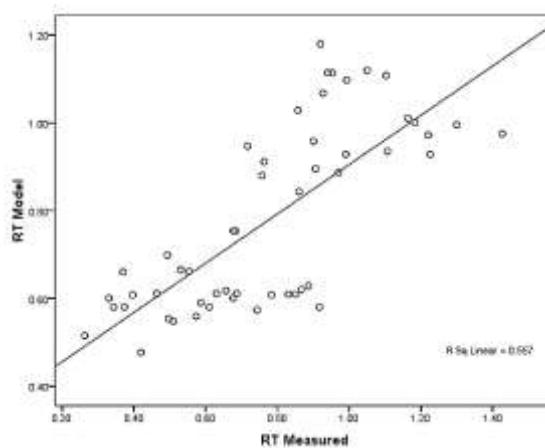
(for $33 > V > 333 \text{ m}^3$)

برازش مدل توسط تحلیل رگرسیون چندگانه برای بررسی ارتباط بین زمان بازآوایی اندازه‌گیری شده در ترکیب داده‌های اتاق‌های اداری و کلاس‌های درس و متغیرهای حجم، و شاخص سابین ($\overline{\text{SNRC}}$) به رابطه زیر منتج گردید که دارای ضریب تعیین ۰/۵۵۷ بود:

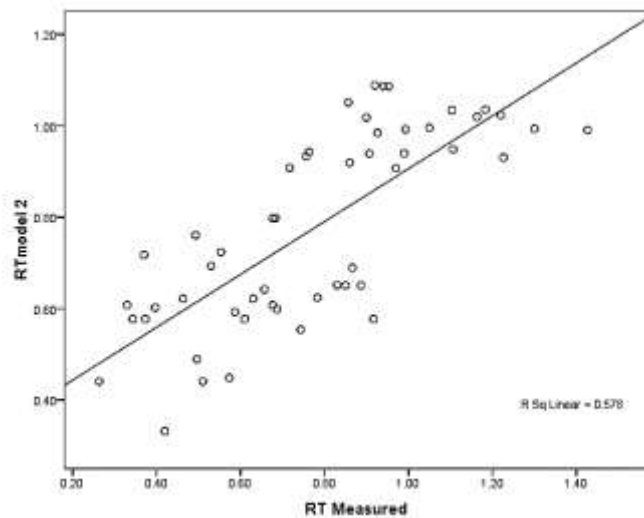
$$RT_{60} = 0.326 + 0.115 \overline{\text{SNRC}} - 0.002 V \quad (1)$$

(for $33 > V > 333 \text{ m}^3$)

شکل ۳ نمودار پراکنش بین مقادیر پیش‌بینی مدل فوق و زمان بازآوایی اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. این مدل با خطای کمتر از $P=0.001$ ، ضریب تعیین $R^2=0.557$ و خطای جذر میانگین مربعات $\text{RMSD} = 0.181 S$ اعتبارسنجی شده است. لازم به ذکر است که خطای جذر میانگین مربعات $(\text{RMSD})^{18}$ شامل متوسط جذر تفاضل‌های مقدار واقعی اندازه‌گیری شده و مقدار پیش‌بینی شده زمان بازآوایی توسط مدل است. جدول ۵ مقایسه پراکندگی نتایج اندازه‌گیری و پیش‌بینی زمان بازآوایی صوت را توسط این مدل نشان می‌دهد.



شکل ۳. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده زمان باز آوایی و مقدار پیش‌بینی مدل ۱



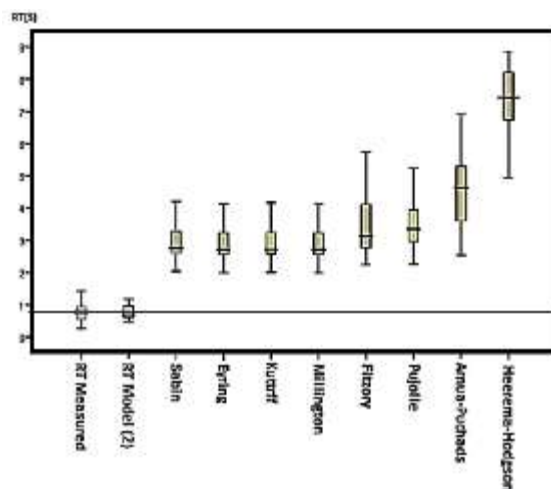
شکل ۴. مقایسه مقادیر اندازه گیری شده زمان باز آوایی و مقدار پیش بینی مدل نهایی ۲

جدول ۶. مقایسه پراکندگی نتایج اندازه گیری و پیش بینی زمان باز آوایی صوت را توسط مدل نهایی (۲) در آزمون مقایسه میانگین ها

معیار	تعداد نمونه	میانگین (S)	انحراف معیار	خطای معیار
زمان باز آوایی اندازه گیری شده	۵۲	۰/۷۷۸	۰/۲۷۶	۰/۰۲۸
زمان باز آوایی مدل ۲	۵۲	۰/۷۷۷	۰/۲۱۰	۰/۰۲۹

مطالعه با حجم بین ۳۳ تا ۳۳۳ مترمکعب و ضریب جذب صوتی کمتر از ۰/۱ است.

شکل ۵ نمودار مقایسه ای جعبه ای بین مقادیر پیش بینی شده زمان باز آوایی اندازه گیری شده، مدل نهایی پیشنهادی و سایر مدل های تجربی متداول برای اتاق های اداری و آموزشی مورد



شکل ۵. نمودار جعبه ای زمان باز آوایی اندازه گیری شده RT_{0} و زمان های باز آوایی محاسباتی از طریق مدل های محاسباتی تجربی کلاس های درس و اتاق های اداری در مقایسه با مدل نهایی ۲ و مقدار اندازه گیری شده

۴. بحث

با توجه به نتایج اندازه‌گیری زمان بازآوایی و محاسبات زمان بازآوایی براساس مدل‌های تجربی سابین، ایرینگ، میلینگتون، فیزتوری، پوژول، آرا و پوچاد، هیرما و هاجسون، کوتروف و نوبائر، مشاهده شد که نتایج تمام مدل‌های تجربی در کلاس‌های درس و اتاق‌های اداری با ضریب جذب پایین (کمتر از ۰/۱) بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بوده است. هرچند محققین اطلاع کافی از شرایط تحقق مدل‌های متداول داشته‌اند اما ارائه یک مدل کاربردی برای مکان‌های واقعی که اغلب دارای ضریب جذب کمتر از ۰/۱ هستند بسیار ضروری بوده است. دلایل بیش برآورد این مدل‌ها برای اماکن مذکور متفاوت و متنوع است، سابین، با فرض اینکه محیط بسته از نظر آکوستیکی به صورت میدان انتشاری کامل است، دیوارها هم‌جنس بوده و شکل محیط به صورت مکعب منظم و با یک منبع صوتی مشخص باشد مدل خود را توسعه داده است [۱۵]، [۱۶]، در صورتی که در بیشتر فضاهای بسته این شرایط به ندرت محیا می‌باشد. فیزتوری مدل خود را برای اتاق‌های مستطیلی که دیوارهای روبرو ضرایب جذب مشابهی دارند [۱۶] و آرا و پوچاد در محیط‌های مستطیلی با ضریب جذب متوسط متفاوت سطوح رابطه خود را ارائه کرده است [۲۱].

پوژول برای پیش‌بینی زمان بازآوایی از میانگین فاصله میدان آزاد l_m که نشان‌دهنده میانگین فاصله عبوری موج بین دو بازتاب است، استفاده کرده است. هیرما و هاجسون در محیط‌های صنعتی از فرضیه انتشار صدا (به‌ویژه رابطه ایرینگ) برای محاسبه زمان بازآوایی برای اتاق بدون تجهیزات استفاده کردند [۱۴]. کوتروف برای محیط‌هایی با دیوارهای دارای بازتاب و ضریب جذب غیریکنواخت سطوح محیط رابطه‌ای را ارائه نموده [۱۶، ۲۲].

نوبائر رابطه اصلاح شده فیزتوری-کوتروف را برای برآورد زمان بازآوایی در محیط‌هایی با ضریب جذب صوتی غیریکنواخت ارائه داد. او در این رابطه فرض می‌کند که در اتاق‌های واقعی

جذب اصلی در سقف و کف و یا هر دو این‌ها صورت می‌گیرد [۲۲].

پاوادا^{۲۰} و همکاران در بررسی‌هایشان به این نکته اشاره نموده‌اند زمانی که ضریب جذب سطوح پایین باشد، مقادیر زمان بازآوایی اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی شده از طریق فرمول‌های تجربی تفاوت بسیاری دارند [۴].

نووسویت و همکاران زمان بازآوایی را اندازه‌گیری و با فرمول‌های سابین، ایرینگ، میلینگتون، فیزتوری، پوژول، آرا و پوچاد، کوتروف و نوبائر محاسبه کرده‌اند، نتایج مطالعات این نویسنده نیز نشان داد که تفاوت بسیار زیادی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسباتی از طریق فرمول‌ها وجود داشته است [۱۵].

علی‌آبادی و همکاران نیز در مطالعات خود مشاهده کردند که شباهت بین مقادیر زمان بازآوایی محاسبه‌شده با فرمول سابین و مقادیر اندازه‌گیری زمان بازآوایی مطابق با استاندارد ایزو ۲-۳۳۸۲:۲۰۰۸ نسبتاً کم بوده است [۱۸].

نوبائر و همکاران فرمول‌های شناخته‌شده زمان بازآوایی را مرور کرده و نشان دادند که زمان بازآوایی را نمی‌توان با دقت در مواردی که پخش صدا یکنواخت نبوده پیش‌بینی کرد [۱۹]. مدلی که در این مقاله ارائه شده است دارای ساختاری مشابه مدل سابین بوده و بر مبنای دو متغیر اصلی شامل شاخص سابین و حجم اتاق مبتنی است با این تفاوت که بیش برآورد مدل مذکور از طریق تحلیل رگرسیونی اصلاح‌گرفته است.

مدل رگرسیونی دیگری که در این مقاله معرفی شده است بر مبنای متغیرهای متوسط ضریب جذب سطوح داخلی، حجم و مساحت سطوح داخلی اتاق برازش‌گرفته است که مدل نهایی دارای ضریب تعیین ۰/۵۸ در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده شاخص RT_{60} هستند.

۵. نتیجه‌گیری

برای بررسی عملکرد مدل‌های محاسباتی متداول در کلاس‌ها و اتاق‌های اداری با ضریب جذب بالاتر از ۰/۱، با متغیرهای ورودی مربوط به ۸ مکان پیشگفت به محاسبات این مدل‌ها وارد گردید.

نتایج به‌دست آمده، همگرایی بالایی را با نتایج اندازه‌گیری شاخص RT_{60} نشان داده و ضریب همبستگی بین این دو کمیت اغلب بالاتر از ۰/۹ بوده است. لذا می‌توان گفت که مدل‌های محاسباتی تجربی متداول برای مکان‌هایی با ضریب جذب صوتی بالاتر از ۰/۱ مناسب است، اما طبق نتایج این تحقیق برای اماکن با متوسط ضریب جذب صوتی کمتر از ۰/۱ کارایی نداشته و مدل نهایی ارائه شده در این مقاله می‌تواند جایگزین مناسب برای برآورد شاخص زمان بازآوایی این‌گونه اتاق‌ها با محدوده حجم بین ۳۳ تا ۳۳۳ مترمکعب باشد.

۷. مأخذ

با توجه به نتایج این تحقیق و برخی محدودیت‌های آن، پیشنهاد می‌گردد با توجه به اهمیت موضوع کنترل بازتابش‌های صوتی در محیط‌های داخلی و تأثیر آن بر آسایش صوتی، مطالعات بیشتری برای جامعه آماری بزرگ‌تر و در ساختمان‌های مختلف در این زمینه صورت گیرد و سایرین تجهیزات متداول نیز در مدل لحاظ گردد تا مدل‌های محاسباتی مناسب‌تری برای برآورد زمان بازآوایی این‌گونه مکان‌ها ارائه گردد.

۶. تشکر و قدردانی

این تحقیق به شماره ۹۷۰۲۱۸۷۸۵ در دانشگاه علوم پزشکی همدان به ثبت رسیده است و نویسندگان مقاله لازم می‌دانند مراتب قدردانی و تشکر خود را از معاونت محترم تحقیقات و فناوری دانشگاه و دانشکده بهداشت که شرایط لازم برای انجام این تحقیق را فراهم آوردند اعلام نمایند.

- [1] Barron, Randall F. *Industrial noise control and acoustics*. CRC Press, 2002.
- [2] Yadav, Saurabh, Gaurav Sharma, Sarthak Nag, and Arpan Gupta, "Reverberation time improvement of lecture auditorium: A case study", *Noise & Vibration Worldwide*, 2018, Vol.49, no.1, pp.14-19.
- [3] Meissner, Mirosław, "Influence of wall absorption on low-frequency dependence of reverberation time in room of irregular shape", *Applied Acoustics*, 2008, Vol.69, no.7, pp.583-590.
- [4] Prawda, Karolina, Sebastian J. Schlecht, and Vesa Välimäki, "Evaluation of reverberation time models with variable acoustics", In *Proceedings of the 17th Sound and Music Computing Conference*, 2020, pp.24-26.
- [5] Cabrera, Densil, Jianyang Xun, and Martin Guski, "Calculating reverberation time from impulse responses: A comparison of software implementations", *Acoustics Australia*, 2016, Vol.44, pp.369-378.
- [6] Pérez-López, Andrés, Archontis Politis, and Emilia Gómez, "Blind reverberation time estimation from ambisonic recordings", In *2020 IEEE 22nd International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP)*, IEEE, 2020, pp.1-6.
- [7] Granseth, Hallvard Andreas, "Sound Field Analysis of Rooms with Ceiling Absorbers", Master's thesis, NTNU, 2015.
- [8] Rindel, Jens Holger, "The use of computer modeling in room acoustics", *Journal of vibroengineering*, 2000, Vol.3, no.4, pp.219-224.
- [9] T. Nezami, "Study of the effects of room internal surfaces characteristics on noise pollution in open-plan offices (case study: Banks of hamadan city)", Hamadan University of Medical Science, 2015.
- [10] Ciaburro, Giuseppe, and Gino Iannace, "Acoustic characterization of rooms using reverberation time estimation based on supervised learning algorithm", *Applied Sciences*, 2021, Vol.11, no.4 pp.1661.

- [11] Eyring, Carl F., "Reverberation time in "dead" rooms", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1930, Vol.1, no.2A, pp.217-241.
- [12] Millington, G., "A modified formula for reverberation", *The Journal of the Acoustical society of America*, 1932, Vol.4, no.1A, pp.69-82.
- [13] Nannariello, Joseph, and Fergus Fricke, "The prediction of reverberation time using neural network analysis," *Applied Acoustics*, 1999, Vol.58, no.3, pp.305-325.
- [14] Heerema, Nelson, and Murray Hodgson, "Empirical models for predicting noise levels, reverberation times and fitting densities in industrial workrooms", *Applied Acoustics*, 1999, Vol.57, no.1, pp.51-60.
- [15] Nowoświat, Artur, and Marcelina Olechowska, "Investigation studies on the application of reverberation time", *Archives of acoustics*, 2015, Vol.41, no.1, pp.15-26.
- [16] Ducourneau, Joël, and V. Planeau, "The average absorption coefficient for enclosed spaces with non uniformly distributed absorption", *Applied Acoustics*, 2003, Vol.64, no.9, pp.845-862.
- [17] Nowoświat, Artur, Marcelina Olechowska, and Jan Ślusarek, "Prediction of reverberation time using the residual minimization method", *Applied Acoustics*, 2016, Vol.106, pp.42-50.
- [18] Aliabadi, Mohsen, Rostam Golmohammadi, and Muharram Mansoorizadeh, "Objective approach for analysis of noise source characteristics and acoustic conditions in noisy computerized embroidery workrooms", *Environmental monitoring and assessment*, 2014, Vol.186, pp.1855-1864.
- [19] Neubauer, R., and B. Kostek, "Prediction of the reverberation time in rectangular rooms with non-uniformly distributed sound absorption", *Archives of Acoustics*, 2001, Vol.26, no.3.
- [20] National Building Regulatory Office, Acoustics and sound Control, Iran: Road, Housing and Urban Development Research Center, 2017.
- [21] Arau-Puchades, Higiní, "An improved reverberation formula", *Acta Acustica united with Acustica*, 1988, Vol.65, no.4, pp.163-180.
- [22] Heinrich Kuttruff, "Room acoustics", Boca Raton, CRC Press, Sixth edition, 2017.
- [23] Neubauer, Reinhard O., and Büro Neubauer VDI., "Prediction of reverberation time in rectangular rooms with non uniformly distributed absorption using a new formula", *Acustica*, 2000.

پی نوشت:

1. Reverberation Time (RT)
2. Sabine Model
3. ODEON
4. FEM
5. Eyring
6. Millington
7. Fitzory
8. Pujolle
9. Arau-puchade
10. Heerma & Hodgson
11. Kuttruff
12. Neubauer
13. Wallace Clement Sabine
14. Nowoświat
15. VA-Lab
16. BSWA
17. Pearson Correlation Coefficient
18. Root Mean Square Difference (RMSE)
19. One-Sample T test
20. Pawada