ارزیابی الگوهای برآورد برای زمان ری‌وربریشن صوتی در محیط‌های آموزشی و اداری

آرزو سارانی ملاک[۱]، رستم گلمحمدی*[۱]، محسن علی‌آبادی[۱]، مریم فرهادیان[۲]

۱. گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان

۲. گروه مهندسی آمار زیستی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان

چکیده

آلودگی نوفه یکی از آزاردهنده‌ترین عوامل در محیط‌های آموزشی و اداری محسوب می‌شود. در این محیط‌ها که فرایندهای یادگیری و فعالیت‌های فکری انجام می‌شوند، طراحی مو است. این مقاله به ارزیابی زمان ری‌وربریشن به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم در توصیف ویژگی‌های صوتی اتاق پرداخته است. در این مطالعه، زمان ری‌وربریشن مطابق با استاندارد ایزو ۳۳۸۲-۲:۲۰۰۸ اندازه‌گیری‌شد. و به‌طور متناظر این شاخص براساس الگوهای تجربی در ۲۵ اتاق درس و ۲۵ اتاق اداری محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری‌شده مقایسه گردیده است. میانگین مقادیر زمان‌های ری‌وربریشن اندازه‌گیری‌شده در کلاس‌های درس و اتاق‌های اداری به ترتیب ۰٫۹۹ و ۰٫۵۸ ثانیه است. در ۳۶ درصد از کلاس‌های درس مقادیر زمان ری‌وربریشن بالاتر از میزان توصیه شده بود. اما، مقدار زمان ری‌وربریشن اندازه‌گیری‌شده در همه اتاق‌های اداری کم‌تر از میزان توصیه بوده است. میانگین تمام زمان‌های ری‌وربریشن محاسباتی‌شده نوسط الگوها بیش‌تر از مقادیر زمان ری‌وربریشن اندازه‌گیری‌شده بود. هم‌چنین، نتایج نشان دادند که الگوهای پیش‌بینی زمان ری‌وربریشن در متوسط ضریب‌جذب سطوح کم‌تر از ۰٫۱ برای مکان‌های مورد بررسی دارای اعتبار نمی‌باشند.

کلیدواژه‌ها: زمان ری‌وربریشن، آلودگی نوفه، اتاق درس، اتاق اداری.

۱. مقدمه

آلودگی نوفه یکی از آزاردهنده‌ترین عوامل در محیط کار محسوب می‌شود. در محیط‌های اداری آلودگی نوفه می‌تواند باعث ناراحتی افراد و محدود نمودن کارایی آن‌ها شود [۱]، در مکان‌های آموزشی نیز باعث خستگی ذهنی دانشجویان، اختلال در توجه، عدم‌تمرکز و افت یادگیری می‌شود [۲]. در محیط‌های بسته آموزشی، که محل تبادل شفاهی اطلاعات یا فرایندهای یادگیری هستند، طراحی صوتی مطلوب مورد نیاز می‌باشد [۳]. تراز صدای محیط‌های بسته، وابسته به توان صوتی منابع و بازتابش از سطوح است. در نتیجه به‌دلیل سطوح بازتابشی متعدد و کمبود سطوح جذبی، اتاق‌های کار آسایش صوتی کافی را ندارند. یکی از روش‌های متداول کنترل صدا در محیط‌های بسته، کاهش بازتابش‌های صدا از طریق نصب مصالح جاذب است. صدا را می‌توان با استفاده از مواد صوتی مناسب یا با قراردادن سطوح جاذب صوتی در اتاق‌های کار، کاهش داد. کارشناسان علوم صوتی قبل از طراحی برای اصلاح اتاق‌های کار پر صدا به دنبال یک شاخص صوتی مناسب هستند. یکی از شاخص‌های مهم توصیف ویژگی‌های صوتی اتاق، زمان ری‌وربریشن[۱] می‌باشد. مداخلات صوتی برای بهبود آسایش صوتی، مستلزم صرف هزینه و دارای محدودیت‌های اجرایی است، لذا پیش‌بینی زمان روربریشن در تغییرات صوتی اتاق برای رسیدن به شرایط مطلوب صوتی ضروری است [۴]. از نظر فیزیکی، زمان ری‌وربریشن ($RT_{۶۰}$) مدت‌زمانی است که چگالی انرژی صدا در یک محدوده بسته پس از قطع‌شدن صدای منبع، ۶۰ دسی‌بل کاهش یابد. این شاخص بیان‌کننده میزان بازتابش‌ها از یک‌سو و قابلیت جذب صوتی سطوح داخلی از سوی دیگر در محیط‌های بسته می‌باشد. هر چه زمان ری‌وربریشن (به ثانیه) کوتاه‌تر باشد نشان‌دهنده جذب صوتی بهتر محیط است. بنابراین از این

* نویسنده پاسخگو: golmohamadi@umsha.ac.ir

[1] RT_{60}; Reverberation Time

شاخص برای تعیین مطلوبیت صوتی محیط نیز استفاده می‌شود. دلایل متعددی برای اندازه‌گیری زمان ری‌وربریشن وجود دارد. از جمله این دلایل می‌توان به این نکته که فشار صوتی منتشرشده از منابع صوتی و نیز قابلیت فهم گفتار و درک حریم خصوصی در یک اتاق به‌شدت وابسته به زمان ری‌وربریشن می‌باشد، اشاره کرد. اهمیت صوتی اتاق در محیط‌های کاری، محیط‌های نمایش و موسیقی، تالارهای سخنرانی و مکان‌های مذهبی، که جمعیت در آن‌ها حضور دارند، کاملاً مورد توجه می‌باشد. زمان ری‌وربریشن را می‌توان براساس استاندارد ایزو ۳۳۸۲-۲:۲۰۰۸ توسط تجهیزات مخصوص اندازه‌گیری نمود [۵]. علاوه بر الگوهای محاسباتی تجربی، الگوهای محاسباتی ریاضی مانند روش مبتنی بر ردیابی امواج، روش عنصر متناهی و حتی روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای پیش‌بینی زمان ری‌وربریشن ارائه شده‌اند [۶].

والاس کلمنت سابین[1] در سال ۱۹۲۲ مطالعات آزمایشی گسترده‌ای درباره‌ی ویژگی‌های صوتی اتاق، از جمله تالار سمفونی بوستون انجام داد [۷]. او یک الگوی آماری مبتنی بر نظریه آماری نظریه انتشار صدا توسعه داد. این الگو دارای فرض‌هایی از جمله موارد زیر می‌باشد: الف) محیط مورد نظر باید از نظر صوتی به‌صورت میدان انتشاری کامل باشد، که در این صورت چگالی انرژی صوتی در هر نقطه‌ای در داخل اتاق یکسان است. ب) دیوارها هم‌جنس باشند تا میزان انرژی صوتی بازتابی سطوح در تمامی جهات یکسان باشد. ج) شکل محیط به‌صورت مکعب منظم و با یک منبع صوتی مشخص باشد.

براساس این نظریه انرژی صوتی در یک محیط بسته، پس از خاموش کردن منبع صوتی به‌صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند که مقدار آن ثابت است و به عنوان زمان ری‌وربریشن تعریف می‌شود.

زمان ری‌وربریشن براساس نظریه سابین[2] که هنوز هم استفاده می‌شود، دارای یک رابطه ساده است اما محدودیت‌های بسیاری دارد. در بیش‌تر اتاق‌های متداول به‌دلیل شکل هندسی نامنظم اتاق و ضریب جذب متنوع سطوح، انتشار امواج صوتی به‌صورت یکنواخت نیست [۸-۹]. سابین در نظریه انتشار صدا پدیده بازتابش را توصیف کرده و هم‌چنین براساس نتایج تحقیقاتش در سال ۱۹۲۲ رابطه تجربی زمان ری‌وربریشن (۱) را ارائه داده است:

$$RT_{Sabine} = \frac{0.16\,V}{S\,\bar{\alpha}} \qquad (۱)$$

$$\bar{\alpha}_{Sabine} = \frac{1}{S}\sum_{i=1}^{n}\alpha_i S_i \qquad (۲)$$

RT_{Sabine}: زمان ری‌وربریشن برحسب ثانیه، V: حجم اتاق برحسب مترمکعب، S: مساحت کل سطوح داخلی اتاق برحسب متر مربع و $\bar{\alpha}$: ضریب جذب صوتی متوسط سطوح داخلی اتاق در بسامدهای ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ است.

در سال ۱۹۳۰ اِیرینگ[3] رابطه اصلاح‌شده‌ای (۳) را برای پیش‌بینی زمان ری‌وربریشن ارائه داد. این رابطه برای ضرایب جذب نسبتاً بالا قابل استفاده می‌باشد:

$$RT_{Eyring} = \frac{0.16\,V}{S\,\bar{\alpha}_{Eyring}} \qquad (۳)$$

$$\bar{\alpha}_{Eyring} = -\ln(1-\bar{\alpha}) \qquad (۴)$$

در سال ۱۹۳۲ میلینگتن[4] برای پیش‌بینی زمان ری‌وربریشن براساس الگوهای مشابه و با استفاده از رابطه اِیرینگ، رابطه (۵) را ارائه داد. این رابطه برای ضرایب جذب در حدود ۱ و در شرایطی که ضرایب جذب سطوح یکنواخت نیستند پیشنهاد شده است:

$$RT_{Millington} = \frac{0.16\,V}{S\,\bar{\alpha}_{MIL}} = \frac{0.16\,V}{\sum S_i \ln\left(\frac{1}{1-\alpha_i}\right)} \qquad (۵)$$

$$\bar{\alpha}_{Millington} = -\frac{1}{S}\sum S_i \ln(1-\alpha_i) \qquad (۶)$$

یکی از معایب الگوی مذکور این است که وقتی ضریب جذب بالا باشد، زمان ری‌وربریشن را نزدیک صفر نشان می‌دهد.

در سال ۱۹۵۹ فیتزروی[5] رابطه (۷) را برای پیش‌بینی زمان ری‌وربریشن در اتاق‌های مستطیلی که دیوارهای روبرو ضرایب جذب مشابهی دارند، ارائه کرده است. در این معادله نیز از معادله اِیرینگ استفاده شده است.

[1] Wallace Clement Sabine
[2] Sabine
[3] Eyring
[4] Millington
[5] Fitzroy

$$RT_{Fitzroy} = \frac{-0.16\,V}{S^2}\left[\frac{S_x}{\ln(1-\alpha_x)} + \frac{S_y}{\ln(1-\alpha_y)} + \frac{S_z}{\ln(1-\alpha_z)}\right] \quad (7)$$

در این رابطه: S_x ، S_y و S_z مساحت دو دیواره روبرو برحسب مترمربع و α_x، α_y و α_z متوسط ضریب جذب دو دیواره روبرو در بسامدهای ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ می‌باشند. آراو- پوچادِز[1] در سال ۱۹۸۸ برای پیش‌بینی زمان ری‌وربریشن در محیط‌های مستطیلی با ضریب جذب متوسط متفاوت سطوح، رابطه (۸) را ارائه کرده است. در این رابطه میانگین ضریب جذب متوسط را براساس رابطه اِیرینگ برای دیوارهای موازی در نظر گرفته است:

$$RT_{Arua} = \left[\frac{0.16\,V}{-S.\ln(1-\alpha_x)}\right]^{S_x/S} \times \left[\frac{0.16\,V}{-S.\ln(1-\alpha_y)}\right]^{S_y/S} \times \left[\frac{0.16\,V}{-S.\ln(1-\alpha_z)}\right]^{S_z/S} \quad (8)$$

پُژوله[2] در سال ۱۹۷۵ برای پیش‌بینی زمان ری‌وربریشن؛ میانگین فاصله میدان آزاد l_m، که نشان‌دهنده میانگین فاصله عبوری موج بین دو بازتاب است، را پیشنهاد داد:

$$l_m = \frac{4\,V}{S} \quad (9)$$

$$l_m = \frac{1}{6}\times\left(\sqrt{L^2+l^2}+\sqrt{L^2+h^2}+\sqrt{h^2+l^2}\right) \quad (10)$$

$$l_m = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\times\left(L^2\times l^2 + L^2\times h^2 + h^2\times l^2\right)^{0.25} \quad (11)$$

$$RT_{Pujolle} = \frac{0.04\,l_m}{\bar{\alpha}_{Eyring}} = \frac{0.04\,l_m}{-\ln(1-\bar{\alpha}_i)} \quad (12)$$

در سال ۱۹۹۹ میلادی برای پیش‌بینی زمان ری‌وربریشن در محیط‌های صنعتی رابطه تجربی (۱۲) توسط هِرما و هُدگسان[3] ارائه گردید. آن‌ها از نظریه انتشار صدا (به‌ویژه معادله اِیرینگ) در محاسبه زمان ری‌وربریشن برای اتاق بدون تجهیزات استفاده نموده‌اند [۱۰]:

$$RT_{Heerema\&\,Hodgson} = C_{t0} + C_{t1}\cdot\frac{V}{S} + C_{t2}\cdot\frac{1}{\bar{\alpha}} \quad (13)$$

کوتروف[4] برای محیط‌هایی با دیوارهای دارای بازتاب و ضریب جذب غیریکنواخت سطوح محیط، رابطه (۱۳) را ارائه نمود. او رابطه اِیرینگ را از طریق واریانس γ^2 میانگین فاصله آزاد اصلاح کرده است. مقدار γ^2 برای محیط‌های مستطیلی شکل برابر با ۰/۴ می‌باشد:

$$RT_{Kuttruff} = \frac{0.16\,V}{S\,\alpha''} \quad (14)$$

ضریب جذب متوسط اصلاح‌شده α'' برابر است با:

$$\alpha'' = -\ln(1-\bar{\alpha}).\left[1+\frac{\gamma^2}{2}\ln(1-\bar{\alpha})\right] \quad (15)$$

اما برای محیط‌هایی با ضریب جذب متوسط کم‌تر از ۰/۳ ضریب جذب متوسط اصلاح‌شده به شکل زیر می‌باشد [۹، ۱۱]:

$$\alpha'' \approx \bar{\alpha} + \frac{\bar{\alpha}^2}{2}(1-\gamma^2) \quad (16)$$

نِیوبارِ[5] رابطه اصلاح‌شده فیتزروی- کوتروف، رابطه (۱۷)، را برای برآورد زمان ری‌وربریشن در محیط‌هایی با ضریب جذب صوتی غیریکنواخت ارائه داده است. او فرض می‌کند که در اتاق‌های واقعی جذب اصلی در سقف، کف و یا هر دو صورت می‌گیرد [۱۲]:

$$RT_{Neubauer} = \left(\frac{0.32\,V}{S^2}\right)\times\left(\frac{h(l+w)}{\bar{\alpha}^*_{ww}} + \frac{l\,w}{\bar{\alpha}^*_{cf}}\right) \quad (17)$$

$$\bar{\alpha}^*_{ww} = -\ln(1-\bar{\alpha}) + \left[\frac{\rho_{ww}(\rho_{ww}-\bar{\rho})\times S^2_{ww}}{(\bar{\rho}\times S)^2}\right] \quad (18)$$

$$\bar{\alpha}^*_{cf} = -\ln(1-\bar{\alpha}) + \left[\frac{\rho_{cf}(\rho_{cf}-\bar{\rho})\times S^2_{cf}}{(\bar{\rho}\times S)^2}\right] \quad (19)$$

در این رابطه $\rho = (1-\alpha)$، ضریب بازتاب؛ S_{cf}، مساحت سطوح سقف- کف و S_{ww}، مساحت سطوح دیوارهای محیط هستند.

هدف از انجام این پژوهش مقایسه نتایج زمان ری‌وربریشن اندازه‌گیری‌شده در کلاس‌های درس و اتاق‌های اداری با حدود استانداردهای داخلی و هم‌چنین مقایسه مقدار واقعی زمان ری‌وربریشن با نتایج الگوهای تجربی اِیرینگ، میلینگتن، فیتزروی، پُژوله، آراو- پوچادِز، هِرما و هُدگسان، کوتروف و نِیوبارِ می‌باشد.

[1] Arau-Puchades
[2] Pujolle
[3] Heerema & Hodgson
[4] Kuttruff
[5] Neubauer

۲. مواد و روش‌ها

این مطالعه توصیفی- تحلیلی در سال ۱۳۹۷ در ۲۵ اتاق درس و ۲۵ اتاق اداری پردیس آموزشی دانشگاه علوم پزشکی همدان انجام شده است.

۲-۱. اندازه‌گیری زمان ری‌وربریشن مطابق با استاندارد ایزو ۳۳۸۲-۲:۲۰۰۸ در کلاس‌ها و اتاق‌های اداری

اندازه‌گیری در غیاب کارکنان و دانشجویان انجام‌شده است. زمان ری‌وربریشن در موقعیت‌های مختلف یک اتاق یکسان نیست، بنابراین معمولاً در مکان‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری توسط دستگاه اندازه‌گیری زمان ری‌وربریشن وی‌اِی-لَب[1] ساخت شرکت بی‌اِس‌دابلیواِی[2] انجام شده است. در این مطالعه با توجه به تجهیزات اندازه‌گیری موجود و نرم‌افزار و سخت‌افزار آن، روش صدای منقطع و سطح بازرسی، جهت اندازه‌گیری زمان ری‌وربریشن استفاده شده است. در سطح اندازه‌گیری نوع بازرسی تعداد موقعیت‌های مکانی اندازه‌گیری دو مورد توصیه شده، که در هر موقعیت مکانی اندازه‌گیری، موقعیت قرارگیری منبع صدا یک و موقعیت‌های میکروفن حداقل دو مورد توصیه شده‌اند. در هر موقعیت قرارگیری میکروفن نیز حداقل یک‌بار اندازه‌گیری توصیه شده است. محدوده بسامدی نیز از ۱۲۵ الی ۴۰۰۰ هرتز می‌باشد. موقعیت‌های منبع وابسته به حجم و ابعاد محیط و با رعایت استانداردها تعیین شده‌اند. مقررات ملی ساختمان حدود توصیه شده زمان ری‌وربریشن را در کلاس‌های درس ۱ ثانیه و در اتاق‌های اداری ۱٫۲ ثانیه تعیین کرده است. استاندارد اِی‌اِن‌اِس‌آی/اِی‌اِس‌اِی اِس ۱۲٫۶۰[3] حدود توصیه شده زمان ری‌وربریشن را برای کلاس‌های درس با حجم کم‌تر از ۲۸۳ مترمکعب برابر با ۰٫۶ ثانیه و با حجم ۲۸۳ تا ۵۶۶ برابر با ۰٫۷ ثانیه تعیین کرده است [۱۳]. استاندارد ایزو ۱۱۶۹۰-۱:۱۹۹۶ حدود توصیه شده زمان ری‌وربریشن را برای محیط‌های کاری با حجم کم‌تر از ۲۰۰ برابر با ۰٫۸-۰٫۵ و حجم ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر با ۱٫۳-۰٫۸ تعیین کرده است [۱۴]. زمان ری‌وربریشن اندازه‌گیری‌شده مطابق با استاندارد ملی ساختمان ایران در سه بسامد ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ میانگین‌گیری شده است [۱۵].

۲-۲. برآورد محاسباتی توسط الگوهای موجود

زمان ری‌وربریشن هر مکان مورد بررسی براساس الگوهای سابین، اِیرینگ، میلینگتن، فیتزروی، پُژوله، آراو- پوچادِز، هِرِما و هُدگسان، کوتروف و نِیوباِر محاسبه شده‌اند.
ویژگی صوتی مؤثر از جمله متوسط ضریب جذب سطوح ($\bar{\alpha}$) از طریق رابطه (۲۰) محاسبه شده است. جنس و مساحت سطوح داخلی اتاق‌ها با دقت ثبت شده و ضریب جذب صدای آن‌ها از منابع معتبر تعیین گردیده است [۱۶- ۱۷].

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{S} \qquad (۲۰)$$

S، مساحت کل سطوح داخلی هر اتاق و S_i مساحت هر جزء و α_i ضریب جذب صوتی هر جزء آن است.
با تعیین ضریب جذب صوتی در هر باند بسامدی، میانگین اعداد در باندهای بسامدی ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ هرتز محاسبه و به‌عنوان شاخص جذب صوتی اتاق (اِن‌آرسی)[4] در محاسبات آورده شده‌اند.

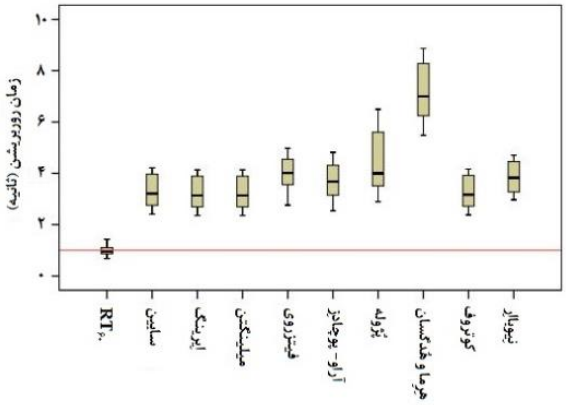
۳. یافته‌ها

زمان ری‌وربریشن در ۲۵ اتاق درس مطابق با استاندارد ایزو ۳۳۸۲-۲:۲۰۰۸ اندازه‌گیری شده است. بیش‌ترین زمان ری‌وربریشن ۱٫۴۳ ثانیه و کم‌ترین زمان ری‌وربریشن ۰٫۱۹ ثانیه بوده است که میانگین آن‌ها برابر با ۰٫۹۹ ثانیه می‌باشد. از ۲۵ کلاس ۳۶ درصد آن‌ها مقادیر زمان ری‌وربریشن بالاتر از مقدار استاندارد داشته‌اند. در جدول ۱ نتایج توصیف آماری خصوصیات صوتی کلاس‌های درس با متوسط ضریب جذب کم‌تر از ۰٫۱ ارائه شده است.
همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، مقادیر میانگین تمام زمان‌های ری‌وربریشن محاسباتی از طریق الگوهای سابین، اِیرینگ، میلینگتن، فیتزروی، پُژوله، آراو- پوچادِز، هِرِما و هُدگسان، کوتروف و نِیوباِر نسبت به مقادیر زمان ری‌وربریشن اندازه‌گیری‌شده مطابق با استاندارد ایزو ۳۳۸۲-۲:۲۰۰۸ دچار بیش‌برازش[5] شده‌اند، به این مفهوم

[1] VA-Lab
[2] BSWA
[3] ANSI/ASA S12.60
[4] NRC; Noise Reduction Coefficient
[5] Overestimate

جدول ۱ آمار توصیفی خصوصیات صوتی کلاس‌های درس.

متغیرها	نماد	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
حجم	V	مترمکعب	۷۵٫۹	۳۳۲٫۶۴	۱۸۸٫۲۵	۷۷٫۳
مساحت کل سطوح داخلی	S	مترمربع	۱۱۲	۳۴۱٫۵۲	۲۱۳٫۹	۶۹٫۲۷
ضریب متوسط جذب	$\overline{NRC}$	-	۰٫۰۳	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۱
زمان ری‌وربریشن اندازه‌گیری‌شده	RT	ثانیه	۰٫۶۸	۱٫۴۳	۰٫۹۹	۰٫۱۹



شکل ۱ نمودار جعبه‌ای زمان ری‌وربریشن اندازه‌گیری‌شده $RT_{۶۰}$ و زمان‌های ری‌وربریشن محاسباتی از طریق الگوهای سابین، اِیرینگ، میلینگتن، فیتزروی، پُژوله، آراو- پوچادِز، هِرِما و هُدگسان، کوتروف و نِیوبااِر در کلاس‌های درس.

جدول ۲ آمار توصیفی خصوصیات صوتی اتاق‌های اداری.

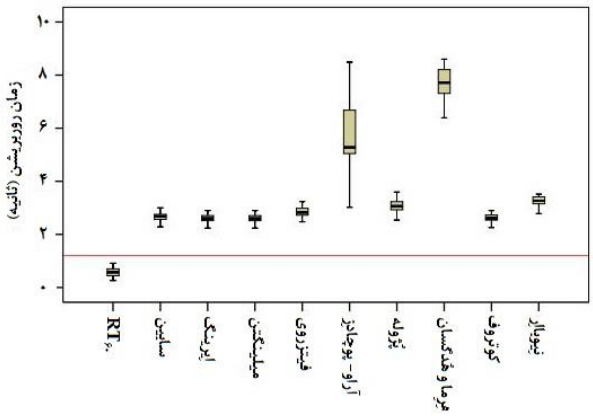
متغیرها	نماد	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
حجم	V	مترمکعب	۴۴٫۵۵	۹۶٫۵۳	۵۸٫۵۳	۱۰٫۹۹
مساحت کل سطوح داخلی	S	مترمربع	۵۸٫۱۴	۱۳۱٫۱	۹۰٫۷	۱۵٫۵۶
ضریب متوسط جذب	$\overline{NRC}$	-	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۱
زمان ری‌وربریشن اندازه‌گیری‌شده	RT	ثانیه	۰٫۲۶	۰٫۹۲	۰٫۵۸	۰٫۱۹

که مقادیر پیش‌بینی بزرگ‌تر از مقادیر واقعی برآورد شده هستند. زمان ری‌وربریشن در ۲۵ اتاق اداری مطابق با استاندارد ایزو ۳۳۸۲-۲:۲۰۰۸ اندازه‌گیری شده است. بیش‌ترین زمان ری‌وربریشن ۰٫۹۲ ثانیه و کم‌ترین زمان ری‌وربریشن ۰٫۲۶ ثانیه بوده است که میانگین آن‌ها برابر با ۰٫۵۸ ثانیه می‌باشد. مقادیر زمان ری‌وربریشن اندازه‌گیری‌شده در همه اتاق‌های اداری کم‌تر از مقدار توصیه شده می‌باشد. در جدول ۲ نتایج توصیف آماری خصوصیات صوتی اتاق‌های اداری با ضریب جذب متوسط کم‌تر از ۰٫۱ ارائه شده است.

نتایج مربوط به شکل ۲ نشان داد که مقادیر میانگین تمام زمان‌های ری‌وربریشن محاسباتی از طریق الگوهای سابین، اِیرینگ، میلینگتن، فیتزروی، پُژوله، آراو- پوچادِز، هِرِما و هُدگسان، کوتروف و نِیوبااِر نسبت به مقادیر زمان ری‌وربریشن اندازه‌گیری‌شده مطابق با استاندارد ایزو ۳۳۸۲-۲:۲۰۰۸ دچار بیش‌برازش شده‌اند، به این مفهوم که مقادیر پیش‌بینی بزرگ‌تر از مقادیر واقعی برآورد شده هستند.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

زمان ری‌وربریشن پرکاربردترین و معروف‌ترین شاخص صوتی اتاق است، که از نظر اندازه‌گیری و کاربرد دارای



شکل ۲ نمودار جعبه‌ای زمان ری‌وربریشن اندازه‌گیری‌شده RT_{60} و زمان‌های ری‌وربریشن محاسباتی از طریق الگوهای سابین، اِیرینگ، میلینگتن، فیتزروی، پُژوله، آراو- پوچادِز، هِرِما و هُدگسان، کوتروف و نِیوبارِ در اتاق‌های اداری.

سابقه طولانی می‌باشد [۱۸]. در دستورالعمل‌های صوتی بعد از تعیین شاخص تراز فشار صدا، این شاخص با توجه به اهمیت آسایش صوتی و ارتباط گفتاری در کلاس‌های درس و اتاق‌های اداری مورد تأکید قرار گرفته است. شرایط صوتی ضعیف در زمانی‌که افراد به مدت طولانی در اتاق حضور داشته باشند، باعث اختلال در آسایش صوتی و نیز می‌تواند سبب اثرات نامطلوب شناختی و ذهنی در افراد شده و به‌تدریج کارایی حافظه آنان را کاهش دهد. شرایط ضعیف برای گوش دادن که ناشی از زمان بازتاب طولانی می‌باشد، حافظه و یادگیری را مختل می‌کند [۱۹]. در این مطالعه میانگین زمان ری‌وربریشن در کلاس‌های درس ۰/۹۹ ثانیه بوده است، حدود توصیه‌شده زمان ری‌وربریشن همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود با خط مشخص می‌باشد که از این ۲۵ کلاس در ۳۶ درصد آن‌ها مقادیر زمان ری‌وربریشن بالاتر از مقدار توصیه‌شده بوده است. آگیولار و همکاران در سال ۲۰۱۵ زمان ری‌وربریشن را در ۲۶ اتاق درس براساس استاندارد ایزو ۳۳۸۲ و روش انتگرال پاسخ ضربه با انفجار یک بادکنک به‌عنوان منبع صدا اندازه‌گیری کرده‌اند.

زمان ری‌وربریشن کلاس‌های درس از ۰/۹۵ تا ۲/۳۱ ثانیه متغیر بوده است، زمان ری‌وربریشن متوسط ۱/۵۱ ثانیه و زمان ری‌وربریشن ۴۶ درصد از کلاس‌ها بالاتر از میانگین بوده‌اند که با نتایج مطالعه حاضر هم‌خوانی دارند. در این مطالعه نیز ضریب جذب پایین سطوح داخلی دلیل اصلی مقادیر بالای زمان ری‌وربریشن در کلاس‌های درس می‌باشد [۲۰]. حدود توصیه‌شده زمان ری‌وربریشن همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود با خط مشخص می‌باشد، مقدار زمان ری‌وربریشن اندازه‌گیری‌شده در همه اتاق‌های اداری کم‌تر از مقدار توصیه‌شده می‌باشد.

زمان ری‌وربریشن براساس نظریه سابین که هنوز هم معتبر شناخته می‌شود، دارای یک رابطه ساده است و محدودیت‌های بسیاری در کاربرد دارد. در بیش‌تر اتاق‌های مورد بررسی به‌دلیل شکل هندسی نامنظم اتاق و ضریب جذب متفاوت سطوح، انتشار امواج صوتی به‌صورت یکنواخت نیست لذا کاربرد رابطه فوق را دچار مشکل می‌نماید. نتایج این مطالعه نشان داد که رابطه سابین برای اتاق‌هایی با ضریب جذب کم‌تر از ۰/۱ که ضریب جذب صدا به‌صورت یکنواخت توزیع نشده است خطای غیرقابل اغماض دارد. معادلات ساده در اتاق‌های پیچیده‌تر کارایی چندانی ندارند [۸- ۹]. نتایج حاصل از مقایسه میانگین مقادیر زمان ری‌وربریشن اندازه‌گیری‌شده با نتایج به‌دست‌آمده از الگوهای تجربی دیگر نشانگر این موضوع است که الگوهای تجربی در تمام شرایط قابل اعتماد نیستند و الگوهای تجربی در محیط‌های کاری با متوسط ضریب جذب سطوح کم‌تر از ۰/۲ برای برآورد زمان ری‌وربریشن مناسب نیستند [۱۶، ۱۹]. در این پژوهش نتایج محاسبه زمان ری‌وربریشن در کلاس‌های درس و اتاق‌های اداری براساس الگوهای تجربی اِیرینگ، میلینگتن، فیتزروی، پُژوله، آراو- پوچادِز، هِرِما و هُدگسان، کوتروف و نِیوبارِ بیش از مقادیر اندازه‌گیری‌شده بوده است. نوواثویت و همکاران در سال ۲۰۱۷ نیز زمان ری‌وربریشن را اندازه‌گیری و محاسبه‌شده با الگوهای

سابین، اِیرینگ، میلینگتن، فیتزروی، پُژوله، آراو- پوچادِز، هِرِما و هُدگسان، کوتروف و نِیوبالِر را در یک اتاق مکعبی مقایسه کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که تفاوت بسیار زیادی بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مقادیر محاسباتی از طریق الگوها وجود دارد که با نتایج این تحقیق هم‌خوانی دارند [۸]. براساس نتایج این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که الگوهای تجربی پیش‌بینی زمان ری‌وربریشن در متوسط ضریب‌های جذب سطوح (اِن‌آرسی) کم‌تر از ۰/۱، که اتفاقاً اغلب محیط‌های متداول اداری و آموزشی را شامل می‌شوند، به‌دلیل بیش‌برازش، قابلیت استفاده ندارند و تلاش محققین تاکنون برای اصلاح ساختار محاسباتی این الگوها رضایت‌بخش نبوده است. پیشنهاد می‌گردد با توجه به اهمیت موضوع کنترل بازتابش‌های صوتی در محیط‌های داخلی کلاس‌ها و اتاق‌های اداری و تاثیر آن بر آسایش صوتی مطالعات بیش‌تری در این زمینه صورت گیرد و الگوهای محاسباتی مناسبی برای برآورد زمان ری‌وربریشن این‌گونه مکان‌ها تدوین گردد.

فهرست منابع

[1] B. Rasmussen, T.C. García, “Acoustic regulations for offices–comparison between selected countries in Europe,” 48th International Congress and Exposition on Noise Control EngineeringInter-Noise, pp. 1-10, 2019.

[2] R. Golmohammadi, F. Ghorbani, H. Mahjub, Z. Daneshmehr, “Study of school noise in the capital city of Tehran-Iran,” Journal of Environmental Health Science & Engineering, vol. 7, no. 4, pp. 365-70, 2010.

[3] A. Gramez, F. Boubenider, “Acoustic comfort evaluation for a conference room: A case study,” Applied Acoustics, vol. 118, pp. 39-49, 2017.

[4] M. Aliabadi, R. Golmohammadi, A. Ohadi, M. Mansoorizadeh, H. Khotanlou, M.S. Sarrafzadeh, “Development of an empirical acoustic model for predicting reverberation time in typical industrial workrooms using artificial neural networks,” Acta Acustica united with Acustica, vol. 100, no. 6, pp. 1090-7, 2014.

[5] ISO E. 3382-2, “Acoustics measurements of room acoustics parameters,” International Standard, Part 2:3382-2, 2008.

[6] J.H. Rindel, “The use of computer modeling in room acoustics,” Journal of Vibroengineering, vol. 3, no. 4, pp. 219-2, 2000.

[7] R.F. Barron, “Industrial Noise Control and Acoustics,” CRC Press, 2002.

[8] A. Nowoświat, M. Olechowska “Investigation studies on the application of reverberation time,” Archives of Acoustics, vol. 41, no. 1, pp. 15-26, 2016.

[9] J. Ducourneau, V. Planeau, “The average absorption coefficient for enclosed spaces with non uniformly distributed absorption,” Applied Acoustics, vol. 64, no. 9, pp. 845-62, 2003.

[10] N. Heerema, M. Hodgson, “Empirical models for predicting noise levels, reverberation times and fitting densities in industrial workrooms,” Applied Acoustics, vol. 57, no. 1, pp. 51-60, 1999.

[11] H. Kuttruff “Room Acoustics,” CRC Press, 2016.

[12] R.O. Neubauer, B.N. VDI “Prediction of reverberation time in rectangular rooms with non uniformly distributed absorption using a new formula,” Acustica, 2000.

[13] American National Standard Institute, “Acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools, Part 1: Permanent schools,” Acoustical Society of America, 2010.

[14] ISO 11690-1:1996, “Acoustics–recommended practice for the design of low-noise workplaces containing machinery–part 1: Noise control strategies,” German Version EN ISO 11690-1: 1996.

[15] National Building Regulatory Office, Acoustics and sound Control, Iran: Road, Housing and Urban Development Research Center, 2017.

[16] 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.

[17] M. Aliabadi, R. Golmohammadi, M. Mansoorizadeh, “Objective approach for analysis of noise source characteristics and acoustic conditions in noisy computerized embroidery workrooms,” Environmental Monitoring and Assessment, vol. 186, no. 3, pp. 1855-6, 2014.

[18] D. Cabrera, J. Xun, M. Guski “Calculating reverberation time from impulse responses: A comparison of software implementations,” Acoustics Australia, vol. 44, no. 2, pp. 369-7, 2016.

[19] S. Yadav, G. Sharma, S. Nag, A. Gupta “Reverberation time improvement of lecture auditorium: A case study,” Noise &

Vibration Worldwide, vol. 49, no. 1, pp. 14-9, 2018.

[20] J.R. Aguilar, L.M. Tilano, "Measurement of classroom acoustic parameters in the public schools of medellin," International Journal of Acoustics and Vibration, vol. 24, no. 1, pp. 50-5, 2019.

Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, Vol. 7, No. 2, 2020

Evaluation of estimation models for acoustic reverberation time in educational and office environments

A. Sarani Malak[1], R. Golmohamadi[*1], M. Aliabadi[1], M. Farhadian[2]

1. Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences
2. Department of Biostatistics, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences

Abstract

Noise pollution is considered as one of the most annoying factors in educational and office environments. In these environments where learning processes and intellectual activities are ongoing, an effective acoustic design is necessary. The aim of this paper is to assess the reverberation time as one of the important indicators in describing the acoustic characteristics of rooms. In this study, the reverberation time was measured in accordance with ISO 3382-2: 2008. This indicator was calculated based on experimental models for number of classrooms and offices. The calculated values were compared to that of measured corresponding ones. The mean values of reverberation times measured in classroom and office rooms were 0.99 and 0.58 seconds, respectively. In 36% of the classrooms, the amount of reverberation time was higher than the recommended amount. But, the amount of reverberation time measured in all office rooms was less than the recommended amount. The mean of all the reverberation times calculated by the models were greater than the amounts of measured reverberation time. The results also showed that the theoretical models for predicting reverberation time were not valid for the understudy places with the mean absorption coefficients of less than 0.1.

Keywords: Reverberation time, Noise pollution, Classroom, Office room.

pp. 10-17 (In Persian)

[*] Corresponding author E-mail: golmohamadi@umsha.ac.ir