

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



جمهوری اسلامی ایران
وزارت راه و شهرسازی

بررسی عملکرد آکوستیکی پنجره‌های دوجداره

مجریان:

محمدجعفر هدایتی - سمیه امینی نسب

همکاران:

زینب سهرابی کیا

آزاده رئیسیان

حمیدرضا امیدظهير

شماره نشر: گ- ۸۴۶

چاپ اول: ۱۳۹۷

سرشناسه
عنوان و نام پدیدآور
مشخصات نشر
مشخصات ظاهری
فروست
شابک
وضعیت فهرست نویسی
یادداشت
موضوع
موضوع
موضوع
موضوع
موضوع
موضوع
موضوع
موضوع
شناسه افزوده
شناسه افزوده
شناسه افزوده
شناسه افزوده
شناسه افزوده
رده بندی کنگره
رده بندی دیویی
شماره کتابشناسی ملی

هدایتی، محمدجعفر، ۱۳۳۵
بررسی عملکرد آکوستیکی پنجره‌های دوجداره/ مجریان محمدجعفر هدایتی، سمیه امینی نسب؛ همکاران زینب سهرابی کیا، آزاده رئیس‌یان، حمیدرضا امیدظہیر.
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۸.
ح، ۱۲۸ ص
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، شماره نشر: گ- ۸۴۶
۳-۲۲۲-۱۱۳-۶۰۰-۹۷۸
فیبا
کتابنامه: ص. ۱۲۶
پنجره‌های فلزی -- طرح و ساختمان
Metal windows -- Design and construction
شیشه‌های دوجداره آب‌بندی‌شده
Sealed double glazing
صوت‌شناسی ساختمانی
Architectural acoustics
صدا -- عایق‌سازی
Soundproofing
امینی نسب، سمیه، ۱۳۶۳
سهرابی کیا، زینب، ۱۳۶۴
رئیس‌یان، آزاده، ۱۳۵۵
امیدظہیر، حمیدرضا، ۱۳۶۲
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
Road, Housing and Urban Development Research Center
TH۲۲۷۸
۶۹۰/۱۸۲۲
۵۸۶۲۳۴۷



نام کتاب: بررسی عملکرد آکوستیکی پنجره‌های دوجداره
مجریان: محمدجعفر هدایتی، سمیه امینی نسب
همکاران: زینب سهرابی کیا، آزاده رئیس‌یان، حمیدرضا امیدظہیر
شماره نشر: گ- ۸۴۶
ناشر: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
نوبت چاپ: اول
تیراژ: ۲۰۰ جلد
قطع: وزیری
لیتوگرافی، چاپ و صحافی: اداره انتشارات و چاپ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
قیمت: ۱۹۰۰۰۰ ریال
شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۱۱۳-۲۲۲-۳

ISBN: 978-600-113-222-3

مسئولیت صحت دیدگاه‌های علمی بر عهده نگارندگان محترم می‌باشد.
کلیه حقوق چاپ و انتشار اثر برای مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی محفوظ است.

نشانی ناشر: تهران، بزرگراه شیخ فضل ... نوری، روبروی فاز ۲ شهرک فرهنگیان، خیابان نارگل، خیابان شهید علی مروی، خیابان حکمت صندوق پستی: ۱۳۱۴۵-۱۶۹۶ تلفن: ۸۸۲۵۵۹۴۲-۶ دورنگار: ۸۸۳۸۴۱۳۲
پست الکترونیکی: pub@bhrc.ac.ir فروش الکترونیکی: http://pub.bhrc.ac.ir



قدردانی و تشکر

در پیشرفت مراحل اجرایی و تهیه گزارش این پروژه از جناب آقای دکتر کاری و سرکار خانم مهندس پیراسته که با راهنمایی‌ها و تجربیات ارزشمند خود ما را یاری کردند سپاسگزاری و قدردانی می‌گردد.

سخن مرکز

در عصر حاضر انجام تحقیقات کاربردی و هدفمند، یکی از ارکان پیشرفت علمی و توسعه کشورها است. تلاش برای ساختن ایرانی آباد، ایجاب می‌کند که در تمام زمینه‌ها و به‌ویژه در مسایل ساخت و ساز و فعالیت‌های عمرانی با تدوین آیین‌نامه‌ها و استانداردها و انتشار اطلاعات و مدارک فنی، در راه تأمین نیازهای اطلاعاتی جامعه گام برداشته شود.

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی برای دستیابی به اهداف فوق از طریق هماهنگ نمودن، متمرکز ساختن، اجرای برنامه‌های مطالعاتی و تحقیقاتی در مورد ساختمان، مسکن، مصالح، روش‌های ساختمان‌سازی و تهیه ضوابط مربوط به آن‌ها و انجام راهنمایی‌های لازم در اجرای برنامه‌های خانه‌سازی و تولیدات ساختمانی متناسب با احتیاجات کشور فعالیت می‌نماید.

از جمله این فعالیت‌ها، تحقیقات کاربردی بر روی مسایل آکوستیکی ساختمان به‌منظور تأمین آسایش صوتی ساکنان می‌باشد. دانش آکوستیک در ساختمان، عمدتاً به کنترل صداهای ناخواسته در حدقابل قبول و تأمین شرایط آکوستیک داخلی مناسب به‌منظور صدارسانی مطلوب در فضاهای داخلی ساختمان‌ها می‌پردازد و بدین منظور خواص مصالح و اجزای ساختمانی از نظر آکوستیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

امید است مجموعه حاضر تحت عنوان " بررسی عملکرد آکوستیکی پنجره‌های دوجداره " که نمایی از فعالیت‌های پژوهشی و انتشاراتی مرکز است، سهم اندکی در خدمت به جامعه علمی و فنی کشور داشته باشد.

محمد شکرچی‌زاده

رئیس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول- کلیات پژوهش.....
۱	۱-۱- اصطلاحات و تعاریف.....
۱	۱-۱-۱- پنجره.....
۱	۱-۲-۱- بازشوی پنجره (لنگه متحرک).....
۲	۱-۳-۱- شیشه.....
۴	۱-۴-۱- پروفیل.....
۵	۱-۵-۱- قاب.....
۵	۱-۶-۱- لنگه.....
۵	۱-۷-۱- فاصله‌گذار.....
۵	۱-۸-۱- یراق‌آلات.....
۵	۱-۹-۱- صدا.....
۶	۱-۱۰-۱- نوفه‌زمینه.....
۶	۱-۱۱-۱- تراگیل صدای هوابرد.....
۶	۱-۱۲-۱- ضریب تراگیل صدا.....
۷	۱-۱۳-۱- تراز صدا، L.....
۸	۱-۱۴-۱- زمان واختمش، T.....
۸	۱-۱۵-۱- شاخص کاهش صدا، R.....
۸	۱-۱۶-۱- شاخص کاهش صدای وزن یافته، R_w
۱۰	۱-۱۷-۱- جداکننده ساده.....
۱۱	۱-۱۸-۱- جداکننده مرکب.....
۱۱	۲-۱- انواع پنجره.....



- ۱۱ عملکرد ۱-۲-۱
- ۱۶ نوع پروفیل ۲-۲-۱
- ۱۸ شیشه‌کاری ۳-۲-۱
- ۲۱ **فصل دوم- مبانی نظری و روش آزمون**
- ۲۱ جداکننده تک‌جداره ۱-۲
- ۲۴ قانون جرم ۱-۱-۲
- ۲۶ جداکننده‌های بزرگ- خمش و برش ۲-۱-۲
- ۲۸ جداکننده‌های نازک- امواج خمشی و اثر انطباق ۳-۱-۲
- ۳۲ جداکننده‌های ضخیم ۴-۱-۲
- ۳۷ جداکننده‌های محدود- ملاحظات تشدید و سختی ۵-۱-۲
- ۳۹ طراحی جداکننده‌های تک‌جداره ۶-۱-۲
- ۴۱ لمینیت کردن نقطه‌ای ۷-۱-۲
- ۴۲ جداکننده دوجداره آزاد ۲-۲
- ۴۷ عایق‌بندی فاصله هوایی ۱-۲-۲
- ۴۹ تکنیک‌های طراحی جداکننده دوجداره ۲-۲-۲
- ۵۲ استفاده از گاز در جداکننده‌های دوجداره ۳-۲
- ۵۶ نرم افزار INSUL ۴-۲
- ۶۲ بررسی افت صوتی نمونه‌های شیشه و پنجره در آزمایشگاه ۵-۲
- ۶۲ آزمایشگاه آکوستیک مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی ۱-۵-۲
- ۶۳ تجهیزات اندازه‌گیری ۲-۵-۲
- ۶۸ روش اندازه‌گیری شاخص کاهش صدای پنجره و شیشه در آزمایشگاه ۳-۵-۲
- ۷۹ **فصل سوم- یافته‌های پژوهش**
- ۸۰ شیشه‌های تک‌جداره ۱-۳
- ۸۰ شیشه‌های تک‌جداره ساده ۱-۱-۳
- ۸۴ شیشه‌های تک‌جداره لمینیت ۲-۱-۳



۹۴	شیشه‌های دوجداره	۲-۳
۹۵	شیشه‌های دوجداره ساده	۱-۲-۳
۱۰۳	شیشه‌های دوجداره لمینیت	۲-۲-۳
۱۱۰	بررسی اثر تغییر اندازه شیشه در صدابندی هوابرد	۳-۲-۳
۱۱۲	پنجره دوجداره	۳-۳
۱۱۹	بررسی تأثیر صدابندی بر نوفه زمینه با استفاده از نرم افزار INSUL	۴-۳
۱۲۳	فصل چهارم- نتیجه‌گیری	
۱۲۷	منابع	

پیشگفتار مجری

یکی از معضلات بسیار جدی در زندگی شهرنشینی مسأله آلودگی صوتی و نفوذ آن به داخل ساختمان‌هاست. با توجه به الزامات مبحث هجدهم مقررات ملی ساختمان برای نمای ساختمان‌ها با کاربری‌های مختلف و تلاش برای دستیابی به حداقل شاخص کاهش صدای تعیین شده در این مبحث، همچنان مسأله ضعف صدابندی نما باقی است. علت اصلی این امر پایین بودن افت صوتی پنجره‌هاست. امروزه فناوری‌های متعددی مطرح شده و برای نقاط ضعفی که شرح داده شد، راه‌حل‌های مناسبی ارائه گردیده است. عایق‌بندی صوتی پنجره، به مصالح انتخاب شده برای چارچوب و نیز ساختار و ضخامت آن، نوع شیشه‌کاری، نوع و ضخامت شیشه و نحوه نصب اجزاء بستگی دارد. لذا در طراحی پنجره باید به گونه‌ای عمل شود که بدون لطمه به کارکرد و زیبایی آن، صدابندی مورد نیاز جهت فراهم ساختن آسایش ساکنین ساختمان نیز تأمین گردد. عدم رعایت مقررات فنی در اجرای ساختمان و به صورت خاص در و پنجره‌های آن نیز موجب ایجاد محیطی آزاردهنده می‌شود. در این پروژه ضمن ارائه روش‌های محاسباتی برای تعیین افت صوتی، مقدار واقعی شاخص کاهش صدای تعداد زیادی شیشه و پنجره تولید کارخانجات داخلی و متداول در کشور مورد آزمون قرار گرفته است، تا با مقایسه و بررسی آنها امکان ارائه راهکارهای مناسب در این زمینه فراهم شود.

چکیده

یکی از مشکلات متداول در ساختمان‌ها به‌خصوص مکان‌هایی که نزدیک به جاده‌های شلوغ، خطوط راه آهن، فرودگاه‌ها و واحدهای صنعتی هستند، ورود نوفه به داخل آن‌ها است. در میان قسمت‌های مختلف ساختمان مانند دیوار، سقف و... که مانعی در برابر نوفه محسوب می‌شوند، پنجره‌ها ضعیف‌ترین عملکرد را در زمینه صدابندی ساختمان‌ها دارند. به‌منظور کاهش مؤثر ورود نوفه بیرونی به داخل یک ساختمان و متعاقباً حفظ آرامش ساکنین، توجه ویژه نسبت به ساختار پنجره‌ها ضروری است. در این پژوهش عملکرد آکوستیکی پنجره‌های دوجداره با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری و محاسباتی با نرم‌افزار، بررسی و تحقیق شده است. بدین منظور مبانی نظری افت صدا از طریق جداکننده و نحوه عملکرد نمودار افت تراگیسل صدا از یک جداکننده تک‌جداره و دوجداره در بازه بسامدی مورد نظر مطالعه شده است. رفتار موج صدا هنگام برخورد با یک جداکننده در بسامدهای مختلف و نیز نسبت به نوع آن جداکننده (ضخامت، جنس و تعداد جدارها) متفاوت است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که افت تراگیسل صدا در ناحیه انطباق به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

در مرحله اندازه‌گیری به بررسی صدابندی شیشه‌های تک‌جداره و دوجداره (ساده و لمینیت) پرداخته شده است. انواع مختلف شیشه‌های دوجداره از نظر ضخامت، میزان فاصله بین دو شیشه و نوع گاز پرکننده این فاصله مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، صدابندی تعدادی از پنجره‌های دوجداره ساخت کشور نیز اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضخامت شیشه‌ها، استفاده از شیشه‌هایی با ضخامت متفاوت و افزایش فاصله بین دو شیشه در سیستم‌های دوجداره، لمینیت کردن یک یا هر دو شیشه به‌ویژه استفاده از لمینیت آکوستیکی و نیز نحوه صحیح نصب، باعث بهبود صدابندی می‌شود.

هم‌چنین در این پژوهش صدابندی انواع شیشه‌ها با نرم‌افزار INSUL مورد مطالعه قرار گرفته است. تطبیق نسبتاً خوب نتایج حاصل از اندازه‌گیری و محاسبات با نرم‌افزار نشان می‌دهد که در موارد لازم می‌توان از این نرم‌افزار به منظور پیش‌بینی افت صوتی



شیشه‌ها استفاده کرد. با استفاده از این نرم‌افزار تأثیر ترکیب‌های مختلفی از یک دیوار مرکب که در آن از شیشه تک‌جداره، پنجره با شیشه لمینیت و پنجره دوجداره استفاده شده است، بر صدابندی و میزان نوفه زمینه یک فضا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از نرم‌افزار نشان می‌دهد که استفاده از یک پنجره دوجداره و لمینیت در بهبود صدابندی یک دیوار مرکب بسیار مؤثر است.

فصل اول

کلیات پژوهش

۱-۱- اصطلاحات و تعاریف

اصطلاحات و تعاریف مرتبط با پنجره و واژه‌های تخصصی آکوستیکی که در این تحقیق به کار برده شده است، در بندهای زیر توضیح داده می‌شود:

۱-۱-۱- پنجره^۱

پنجره بخشی از نمای ساختمان است که شیشه‌ای بوده و می‌تواند وسیله تبادل نور و هوا گردد. جنس قاب آن ممکن است از چوب، فلز و یا پلیمر باشد.

۱-۱-۲- بازشوآی پنجره (لنگه متحرک)

بخشی از پنجره است که در داخل قاب اصلی قابل حرکت باشد. مساحت سطح بازشوای پنجره، برابر است با سطح ظاهری که از داخل دیده می‌شود. مساحت بازشوای پنجره از روی ابعادی که برای تعیین طول اتصالات به کار می‌روند قابل محاسبه است.

1 Window
2 Sash

۱-۱-۳- شیشه^۱

شیشه محصولی معدنی از یک ترکیب مذاب است که بدون آن‌که متبلور شود، سرد و صلب می‌گردد. از انواع شیشه‌های مورد استفاده در صنعت ساختمان می‌توان به شیشه‌های فلوت^۲، سکوریت^۳، تابکاری شده^۴، حرارت‌دیده^۵، پوشش‌دار^۶، لمینیت یا لایه‌دار اشاره نمود.

- شیشه فلوت: شیشه بدون موج و کاملاً صاف است که در فرآیند تولید، پس از بیرون آمدن شیشه از کوره به منظور مسطح نمودن و ضخامت‌سازی، شیشه بر روی حوضچه مذاب قلع شناور می‌گردد.

- شیشه سکوریت: در این حالت، شیشه مجدداً تا حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده و بعد به‌طور ناگهانی و تحت شرایط خاص و کنترل شده‌ای سرد می‌شود. این عمل باعث افزایش مقاومت شیشه (حدود ۳ الی ۵ برابر) در مقابل ضربه و نیز شوک‌های حرارتی می‌گردد. این شیشه‌ها در صورت شکستن، به ذرات ریز و مکعب شکل تقسیم می‌شوند که آسیب‌رسان نیستند. در ساختمان‌سازی، برای سازه‌های بدون قاب مانند در ورودی و نیز هر مکانی که در صورت شکسته شدن شیشه، احتمال آسیب‌دیدگی وجود دارد، از شیشه سکوریت استفاده می‌شود. شیشه سکوریت قابلیت برش و یا فرم‌دهی ندارد. تمامی فرایندها مانند برش، سوراخ کردن و... باید قبل از سکوریت کردن شیشه انجام گیرد.

- شیشه تابکاری شده: شیشه‌ای است که در حین خروج از خط تولید به آهستگی سرد می‌شود و در نتیجه تنش‌های داخلی باقیمانده آن به حداقل رسانده می‌شود.

1 Glass
2 Float
3 Security
4 Annealed
5 Toughened
6 Coated

- شیشه حرارت دیده: این نوع شیشه با گرم و سرد کردن سریع، پیش تنش گذاری^۱ می‌شود. سرد کردن سریع سبب ایجاد لایه سطحی تحت تنش فشاری^۲ شده و در نتیجه دو برابر یا بیشتر از شیشه‌های تابکاری شده مقاوم هستند.

- شیشه پوشش دار: شیشه‌ای پوشش کاری شده که پوشش آن طوری طراحی شده است که بخش عمده نور مرئی از آن عبور کند، اما مانع عبور نور فرابنفش و فرسرخ شود؛ این پوشش بخشی از گرمای تولید شده در داخل ساختمان را باز می‌تاباند، به طوری که گرما از ساختمان خارج نمی‌شود و در طول زمستان در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌شود. یکی از مهم‌ترین کاربردهای شیشه‌های پوشش دار، کنترل ورود و خروج انرژی خورشیدی در ساختمان است.

از انواع شیشه‌های پوشش دار می‌توان به شیشه‌های بازتابنده^۳ و شیشه‌های کم‌گسیل^۴ اشاره نمود. پوشش اصلی این شیشه‌ها لایه‌های بسیار نازکی از فلز است که بر سطح شیشه اعمال می‌شود. بسته به نوع فلزی که بر سطح شیشه می‌نشیند این شیشه‌ها قادرند تا از ورود برخی از طیف‌های نور خورشید در طول موج مشخص جلوگیری کرده و مقدار زیادی از انرژی خورشیدی را جذب کنند. از این رو در معرض خطر ناشی از شوک‌های حرارتی و شکستن قرار دارند. برای پرهیز از این مشکل می‌توان از نوع سکوریت شده این شیشه‌ها استفاده کرد تا مقاومت حرارتی آن‌ها افزایش یابد.

- شیشه لمینیت: شیشه لمینیت از دو جام شیشه و یک لایه میانی تشکیل شده که تحت حرارت و فشار زیاد به یکدیگر متصل می‌شوند. این شیشه‌ها، علاوه بر تأمین ایمنی، عملکرد آکوستیکی بهتری نسبت به شیشه‌های فلوت با همان ضخامت را دارند. از انواع لایه‌های میانی مورد استفاده در این شیشه‌ها، می‌توان لایه‌های طلقی از جمله پلی‌وینیل بوتیرال^۵ (PVB) و اتیلن وینیل استات^۶ (EVA) و لایه‌های رزینی را نام برد.

1 Quenched

2 Compressively- stressed

3 Reflex

4 Low-E

5 Poly Vinyl Butiral

6 Ethylene Vinyl Acetate

طلق EVA به صورت شفاف، سفید و یا در رنگ‌های مختلف تولید می‌شود. نکته حائز اهمیت این است که این لمینیت‌ها هیچ مزیتی از نظر آکوستیکی نسبت به لمینیت‌های PVB ندارند به غیر از این که EVA در مقابل رطوبت مقاوم‌تر از PVB است لذا برای مناطق حساس به رطوبت از این نوع لمینیت استفاده می‌شود.

برای تأمین مشخصه‌های آکوستیکی بیشتر، از لمینیت‌های رزینی نیز استفاده می‌شود. لایه رزینی در فاصله بین دو شیشه قرار گرفته و عملکرد آکوستیکی را بهبود می‌بخشد، اما محدودیت‌هایی نیز دارد. مهمترین نقص این محصول، ایجاد حباب‌هایی با گذشت زمان است که از لحاظ بصری ایجاد مشکل می‌کند.

آخرین پیشرفت در لمینیت‌های آکوستیکی، یک ماده ترکیبی است که عملکرد آکوستیکی آن برتر و بهتر از عملکرد لمینیت‌های رزینی است و تمام ویژگی‌ها و مزایای لمینیت‌های PVB را نیز داراست. این محصول، PVB آکوستیکی نام دارد و بهبود عملکرد آکوستیکی آن به دلیل وجود لایه آکوستیکی بین دو لایه PVB است. این لایه، PVB اصلاح شده‌ای است که تراکسیل صدا را کاهش می‌دهد. آزمایش‌های مربوط به شبیه‌سازی باران و تگرگ برای این محصول انجام شده است و نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر افزایش صدابندی هوابرد، PVB آکوستیکی در به حداقل رساندن نوفه کوبه‌ای نیز بسیار موفق بوده است. این شیشه بسیار ایمن بوده و برای بام و دهلیز^۱ ایده‌آل می‌باشد.

۱-۱-۴- پروفیل^۲

به قطعات با مقطع ثابت گفته می‌شود که با توجه به جنس و استحکام آن‌ها، کاربرد بسیاری در صنایع دارند. پروفیل‌ها در حالت کلی به دو دسته توپر و توخالی طبقه‌بندی می‌شوند.

۱-۱-۵- قاب^۱

قسمتی از ساختار پنجره است که لنگه‌های پنجره اعم از ثابت یا بازشو در آن مستقر می‌شوند. قاب نباید تحت تأثیر بار دیوار و پوشش قرارگیرد.

۱-۱-۶- لنگه^۲

قسمتی از پنجره است که در قاب مستقر می‌گردد و ممکن است متحرک و یا ثابت باشد.

۱-۱-۷- فاصله‌گذار^۳

قطعه‌ای در پنجره‌های چندجداره می‌باشد که عملکرد اصلی آن ایجاد و ثابت نگه داشتن فاصله بین جام‌های شیشه است.

۱-۱-۸- یراق آلات^۴

یراق آلات، شامل همه بخش‌های مکانیکی پنجره می‌شود که باز و بسته شدن پنجره را کنترل نموده و مونتاژ، نصب و استفاده را عملی می‌سازد که شامل لولا، قفل، دستگیره، شب‌بند، بلبرینگ، وسایل هوابندی و ... می‌باشد.

۱-۱-۹- صدا^۵

صدا موج مکانیکی طولی است که در گازها، مایعات و جامدات منتشر می‌شود. گستره بسامدی امواج صوتی قابل شنیدن، بین ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز است. به تعبیر ساده‌تر، صدا را می‌توان به صورت حرکات موجی در یک فراگیر کشسان و یا به‌عنوان محرک حس شنوایی تعریف کرد.

1 Frame
2 Leaf
3 Spacer
4 Hard ware
5 Sound

۱-۱-۱۰- نوفه زمينه^۱

نوفه زمينه به صداهاي ناخواسته موجود در يك فضا گفته مي‌شود. نوفه زمينه مي‌تواند از منابع خارجي مانند نوفه ترافيك و نوفه ناشي از ساختمان‌هاي مجاور و هم‌چنين منابع داخلي مانند نوفه ناشي از سيستم‌هاي تاسيسات مكانيكي و الكتريكي از قبيل تهويه، آبرساني و آسانسور سرچشمه بگيرد.

۱-۱-۱۱- تراگسيل صدای هوابرد^۲

هرگاه جداکننده‌اي به وسيله امواج صوتي هوابرد به ارتعاش درآيد، نحوه انتقال يافتن صدای اوليه به فضای مورد نظر را تراگسيل صدای هوابرد از طريق آن جداکننده گویند، مانند صدای ناشی از ترافیک که به داخل ساختمان انتقال می‌یابد.

۱-۱-۱۲- ضريب تراگسيل صدا^۳

هنگاميکه موج صوتي با يك جداکننده برخورد مي‌کند، بخشي از انرژي از طريق جداکننده تراگسيل مي‌شود (شکل ۱-۲). نسبت شدت موج تراگسيل شده (I_T) به شدت موج فرودي (I_i)، ضريب تراگسيل جداکننده (τ) نامیده می‌شود و از معادله (۱-۱) به دست می‌آید:

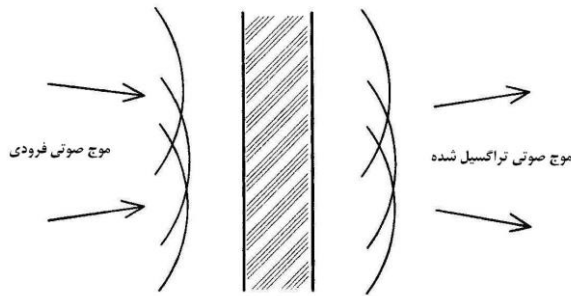
(۱-۱)

$$\tau = \frac{I_T}{I_i}$$

1 Background noise

2 Airborne sound transmission

3 Sound transmission coefficient



شکل ۱-۱ تراکسیل صدا از یک جداکننده

۱-۱-۱۳- تراز صدا، L

تراز صدا برحسب دسی‌بل بر اساس یکی از دو معادله (۲-۱) یا (۳-۱) مشخص می‌گردد که مقدار آن‌ها در عمل با یکدیگر برابر است:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ dB} \quad (2-1)$$

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB} \quad (3-1)$$

که در آن:

L_I : تراز شدت صدا، برحسب دسی‌بل؛

L_p : تراز فشار صدا، برحسب دسی‌بل؛

I_0 : شدت مؤثر صدای مبنا که مقدار آن برابر است با 10^{-12} وات بر مترمربع؛

I : شدت مؤثر صدای مورد نظر، برحسب وات بر مترمربع؛

p_0 : فشار مؤثر صدای مبنا که مقدار آن برابر است با 2×10^{-5} نیوتن بر مترمربع (پاسکال)؛

p : فشار صدای مؤثر مورد نظر، برحسب نیوتن بر مترمربع (پاسکال).

۱-۱-۱۴- زمان واخنش^۱، T

زمان واخنش در یک فضای بسته، مدت زمانی است که پس از قطع کردن منبع صدا، تراز فشار صدا ۶۰ دسی‌بل افت کند. این کمیت برحسب ثانیه بیان می‌شود.

۱-۱-۱۵- شاخص کاهش صدا^۲، R

این شاخص بیانگر میزان صدابندی جداکننده در برابر صدای هوابرد است. شاخص دیگری که برای بیان صدابندی جداکننده در برابر صدای هوابرد به کار می‌رود، براساس استاندارد ASTM E90، افت تراگسیل^۳ (TL) است که مقدار آن از نظر عددی برابر با R است. شاخص کاهش صدا یا افت تراگسیل صدا از معادله (۱-۴) برحسب دسی‌بل تعیین می‌شوند:

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad \text{dB} \quad (1-4)$$

که در آن:

W_1 : توان صدای فرودی بر روی جداکننده تحت آزمون؛

W_2 : توان صدای تراگسیل شده از طریق آزمون؛

τ : ضریب تراگسیل جداکننده.

۱-۱-۱۶- شاخص کاهش صدای وزن یافته^۴، R_w

شاخص کاهش صدای وزن یافته، کمیتی تک‌عددی برای درجه‌بندی صدابندی جداکننده در برابر صدای هوابرد است که بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌های شاخص کاهش صدا در بسامد بندهای یک‌سوم هنگامی به دست می‌آید. مقدار این کمیت، برابر است با مقدار نمودار مبنا در بسامد ۵۰۰ هرتز، پس از لغزاندن آن به روشی که در استاندارد ملی ایران

1 Reverberatin time

2 Sound reduction index

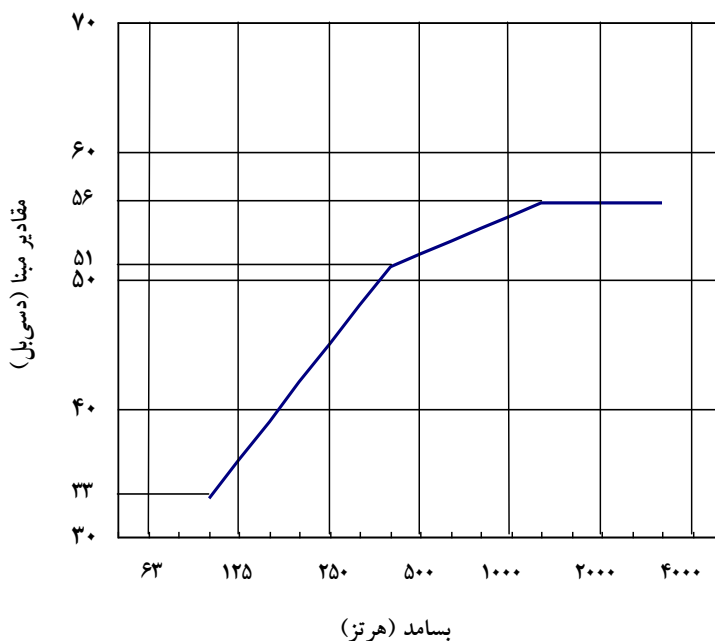
3 Transmission loss

4 Weighted sound reduction index

۱-۸۸۳۴ مشخص شده است. مقادیر مبنا برای صدای هوابرد در جدول ۱-۱ و نمودار شکل ۱-۲ ارائه شده است.

جدول ۱-۱ مقادیر مبنا برای صدای هوابرد

مقادیر مبنا به دسی بل		بسامد به هرتز
بندهای یک‌هنگامی	بندهای یک‌سوم‌هنگامی	
۳۶	۳۳	۱۰۰
	۳۶	۱۲۵
	۳۹	۱۶۰
۴۵	۴۲	۲۰۰
	۴۵	۲۵۰
	۴۸	۳۱۵
۵۲	۵۱	۴۰۰
	۵۲	۵۰۰
	۵۳	۶۳۰
۵۵	۵۴	۸۰۰
	۵۵	۱۰۰۰
	۵۶	۱۲۵۰
۵۶	۵۶	۱۶۰۰
	۵۶	۲۰۰۰
	۵۶	۲۵۰۰
	۵۶	۳۱۵۰



شکل ۲-۱ نمودار مقادیر مینا برای صدای هوابرد، در بندهای یک‌سوم هنگامی

شاخص تک‌عددی دیگری که برای بیان صدابندی جداکننده در برابر صدای هوابرد به کار می‌رود، بر اساس استاندارد ASTM E413، درجه تراگسیل صدا،^۱ STC است که مقدار آن از نظر عددی تقریباً برابر با R_w است.

۱-۱-۱۷- جداکننده ساده^۲

جداکننده ساده به جداکننده‌ای گفته می‌شود که چگالی آن در تمام نقاط سطح (چگالی سطحی یا جرم واحد سطح) یکسان است ولی می‌تواند در مقطع، از یک یا چند لایه تشکیل شده باشد. به عنوان مثال دیوار دوجداره نیز جداکننده ساده محسوب می‌شود.

1 Sound Transmission Class
2 Simple Partition

۱-۱-۱۸- جداکننده مرکب^۱

جداکننده مرکب به جداکننده‌ای گفته می‌شود که سطح آن از چند جداکننده ساده تشکیل شده باشد. مانند پوسته خارجی ساختمان که ترکیبی از دیوار، در و پنجره است.

۱-۲- انواع پنجره

پنجره‌ها براساس نحوه عملکرد، نوع پروفیل به‌کار رفته و نوع شیشه از لحاظ تعداد جدارها (شیشه‌کاری^۲) به دسته‌های مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند که در بندهای زیر به آن‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۲-۱- عملکرد

۱-۲-۱-۱- ثابت

پنجره ثابت یکی از پرکاربردترین و مناسب‌ترین انواع پنجره‌ها می‌باشد که به دلیل ثابت بودن در آن از یراق آلات استفاده کمتری می‌شود و در مقایسه با دیگر انواع پنجره‌ها صدای کمتری را انتقال می‌دهد. همچنین به خاطر ثابت بودن، عایقی در برابر سرما و گرما و مانعی در برابر گرد و خاک محسوب می‌شود و در تمامی مدل‌های ترکیبی پنجره استفاده می‌گردد. در شکل ۱-۳، نمونه‌ای از پنجره ثابت نشان داده شده است.

1 Multiple Partition

2 Glazing



شکل ۳-۱ پنجره ثابت

۱-۲-۱-۲- بازشو

در برخی موارد برای کارایی بیشتر پنجره، لازم است قسمت‌هایی از آن به صورت بازشو باشد. پنجره‌های بازشو در انواع مختلفی از قبیل کشویی، لولایی و یا محوری طراحی و ساخته می‌شوند.

- **پنجره بازشوی محوری:** عبارت است از پنجره‌ای که در آن محور لولا داخل لنگه بازشو است و به دو نوع محوری افقی و محوری عمودی، تقسیم می‌شود. این پنجره‌ها به صورت ۱۸۰ درجه روی لنگه می‌چرخند و دسترسی آسانی را به نمای خارجی پنجره به وجود می‌آورند. نمونه‌ای از این پنجره‌ها در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.

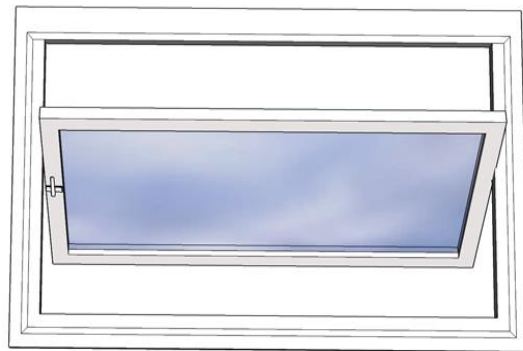
- **پنجره بازشوی لولایی:** پنجره‌ای است که در آن محور لولا روی یکی از یال‌های محیطی لنگه بازشو قرار گرفته باشد. از انواع پنجره‌های لولایی تک‌حالتی می‌توان به

فصل اول- کلیات پژوهش ۱۳/

پنجره‌های لولا کنار، لولا پایین و لولا بالا اشاره کرد. این نوع پنجره از کنار به کمک لولاها به داخل و یا بیرون باز می‌شود و به تهویه مناسب هوا کمک می‌کند. امروزه به منظور سهولت کاربرد و استفاده بهینه، در برخی موارد بازشوهای پنجره‌ها علاوه بر تک حالت به صورت دو حالت نیز تولید می‌شوند. یراق‌آلات و دستگیره‌های نصب شده بر روی این سیستم در دو حالت چرخش ۹۰ درجه و ۱۸۰ درجه، دو نوع بازشو را ایجاد می‌کنند. در حالت اول (۹۰ درجه) پنجره مانند یک پنجره لولایی ساده به طور کامل باز می‌شود و در حالت دوم (۱۸۰ درجه) پنجره از بالا تا زاویه‌ای مشخص که بستگی به یراق‌آلات مصرفی دارد، فقط بری تهویه هوا باز می‌شود. نمونه‌ای از پنجره لولایی دو حالتی در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. در این سیستم با قرار گرفتن دستگیره در وضعیت بسته، به‌طور همزمان لنگه بازشو از چهار طرف قفل می‌شود و حداکثر عایق‌بندی را به‌وجود می‌آورد.



(ب)



(الف)

شکل ۱-۴ پنجره محوری (الف) افقی و (ب) عمودی



شکل ۱-۵ پنجره لولایی دوحالته

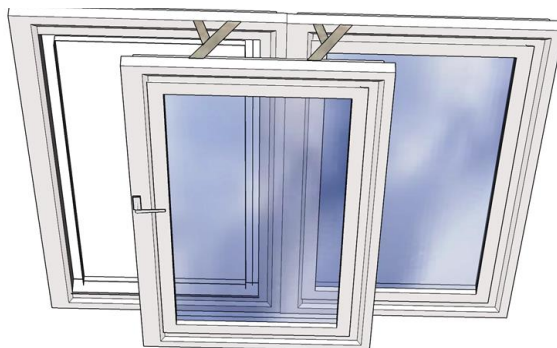
- پنجره بازشوی کشویی: عبارت است از پنجره‌هایی که حرکت لنگه متحرک آن در امتداد یکی از یال‌های لنگه متحرک باشد. از انواع این پنجره می‌توان کشویی عمودی، کشویی افقی و فولکس واگنی را نام برد. نمونه‌ای از این پنجره‌ها در شکل ۱-۶ نشان داده شده است.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱-۶ پنجره کشویی. (الف) افقی، (ب) عمودی و (ج) فولکس واگنی

باید توجه داشت که استفاده از پنجره کشویی به دلیل هوابندی نامناسب نسبت به انواع دیگر بازشوها، محدودتر است. البته در صورت استفاده از نوع فولکس واگنی این پنجره‌ها، مشکل هوابندی تا حدی کاهش می‌یابد.

۱-۲-۲- نوع پروفیل

پروفیل پنجره می‌تواند از مواد مختلفی مانند چوب، فلز، پلیمر و یا ترکیبات آن‌ها ساخته شود. زیبایی پروفیل، تنوع طرح‌ها، گوناگونی، کیفیت رنگ‌ها، سبکی وزن، انواع یراق آلات، نفوذپذیری در مقابل عوامل جوی مانند باد و باران، عدم تبادل سرما و گرما، مقاومت در مقابل عبور صدا، سادگی در نصب و نگهداری آسان، از عوامل موثر در انتخاب یک نوع پروفیل می‌باشد.

۱-۲-۲-۱- چوبی

انواع پنجره‌های چوبی با ضخامت‌های مختلف و قابلیت نصب انواع یراق بازشو در گذشته نه چندان دور، از محبوبیت خاصی برخوردار بودند و هنوز هم در ساختمان‌های خاص و با ویژگی‌های خاص معماری مورد توجه طراحان ساختمان هستند. پوشش‌های رزینی خاص از چوب در برابر عوامل طبیعی مانند باد، باران و آتش تا اندازه بسیار زیادی محافظت می‌نماید.

مزایای اصلی پنجره‌های چوبی سبکی، مشخصات مکانیکی مناسب، سهولت اجرا، ضریب هدایت حرارت کم، سادگی کار با آن و پایداری مصالح است. سطح چارچوب در اثر اشعه فرابنفش، خشک شدن، باران و ... در معرض فرسایش دائمی است. چوبی برای ساخت پنجره مناسب است که به حد کافی سخت باشد و ظرفیت جذب رطوبت پایین را داشته باشد. در پنجره‌های چوبی پروفیل‌های استاندارد مشخص و ثابتی وجود ندارد.

۱-۲-۲-۱- فلزی

فلزات ضریب هدایت حرارتی بالایی دارند. فولاد ۲۵۰ برابر چوب و آلومینیوم چهار برابر فولاد هدایت کننده حرارت است. طیف وسیعی از تولیدات برای هر دو پنجره آلومینیومی و فولادی موجود است و ابعاد پروفیل به‌طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت است.

- پنجره‌های فولادی: این پنجره‌ها مقاومت خمشی و پیچشی بالایی دارند. بزرگترین عیب پنجره‌های فولادی مسئله خوردگی است که می‌توان با رنگ یا گالوانیزه کردن با آن مقابله کرد.

- پنجره‌های آلومینیومی: پروفیل‌های آلومینیومی دارای مزایای متعددی نسبت به پروفیل‌های فولادی هستند که می‌توان به سبکی، مقاومت بسیار خوب در برابر عوامل جوی، امکان تولید مقاطعی با دقت بالا، یکنواختی پروفیل، امکان کاربرد رنگ‌های مختلف و روکش‌های متنوع به صورت لمینیت اشاره کرد. نقطه ضعف‌های اصلی پروفیل‌های آلومینیوم قابلیت محدود در شکل‌دهی و ضریب هدایت بسیار زیاد (حتی بیش از فولاد) است. برای بهبود عایق‌بندی حرارتی پنجره‌های آلومینیومی از تیغه‌های پلی‌آمید استفاده می‌شود که به این پنجره‌ها به اصطلاح حرارت شکن^۱ گفته می‌شود.

۱-۲-۳- پلیمری

با توجه به رشد روزافزون کاربرد پلیمر در صنعت ساختمان، از دهه نود قرن بیستم کاربرد پی‌وی‌سی به صورت گسترده، الیاف شیشه‌ای^۲ به صورت محدود و دیگر مصالح تلفیقی در ساخت پنجره‌های ساختمانی مطرح شد. دلیل اصلی این رویکرد هزینه اندک مواد اولیه و مشخصات برتر این پلیمر از دیدگاه حرارت می‌باشد.

از متداولترین پروفیل‌های پلیمری می‌توان به پروفیل‌های^۳ UPVC اشاره نمود. این پروفیل‌ها، پلیمر حرارت دیده هستند که در فرآیند تولید به وسیله اکسترودر^۴ به اشکال، فرم‌ها و مقاطع متفاوت تولید می‌شود. از خصوصیات بارز این پروفیل‌ها استحکام، سبکی، مقاومت در برابر آتش، پایداری نسبت به سائیدگی و خوردگی و ... است.

1 Thermal break

2 Fiber glass

3 Unplasticized poly vinyl chlorid

4 Extruder



۱-۲-۳- شیشه کاری

امروزه استفاده از پنجره تک‌جداره، دوجداره و سه‌جداره متداول است. همچنین یکی دیگر از انواع ساختارهای مورد استفاده در صنعت ساختمان، سیستم‌های دوپنجره‌ای است.

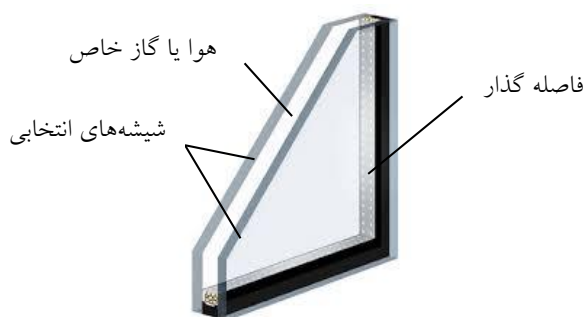
۱-۲-۳-۱- پنجره تک‌جداره

این پنجره از یک جام شیشه و قاب تشکیل شده است. از آن‌جا که معمولاً در ساختمان‌ها شیشه تک‌جداره با ضخامت کم به کار می‌رود، این پنجره‌ها به ندرت می‌توانند صدابندی قابل قبولی داشته باشند. بدین جهت عواملی که در بهبود صدابندی این پنجره مؤثر است باید در طراحی مدنظر قرار گیرد. قابلیت یک پنجره در کاهش نوفه به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. به‌عنوان مثال مسدود کردن کلیه منافذ و درزها در بهبود صدابندی پنجره‌ها بسیار مؤثر است. همچنین با زیاد شدن ضخامت جدار میزان صدابندی افزایش می‌یابد اما سعی می‌شود که ضخامت کل شیشه تا حد امکان کم باشد تا با این کار میزان مواد مصرفی و هزینه مربوط به آن محدود شود. علاوه بر این استفاده از لمینیت نیز می‌تواند صدابندی این نوع پنجره را افزایش دهد اما از آن جایی که پنجره‌های تک‌جداره عایق حرارتی مناسبی نیستند، روش مؤثرتر این است که شیشه اضافی به‌عنوان لایه دوم در پنجره دوجداره به کار برده شود تا الزامات مربوط به انرژی هم در نظر گرفته شود.

۱-۲-۳-۲- پنجره دوجداره

این پنجره از دو جام شیشه، یک فاصله‌گذار و قاب تشکیل شده است. شیشه دوجداره می‌تواند دو جام شیشه ساده یا لمینیت باشد که معمولاً به موازات یکدیگر قرار گرفته اند و لبه‌ها یا درزهای آن‌ها هوابندی شده است. شمایی از شیشه دوجداره در شکل ۱-۷ نشان داده شده است. ارزان‌ترین راه تقویت صدابندی شیشه دوجداره در درجه اول، افزایش فاصله هوایی است. راه دوم (پرهزینه‌تر) برای افت بیشتر صدا، استفاده از شیشه‌های ضخیم‌تر است. اختلاف ضخامت جام‌های شیشه‌ای در موارد گوناگونی برای

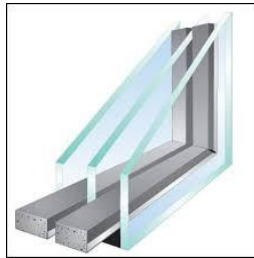
جلوگیری از اثرات نامطلوب مانند انطباق و در نتیجه برای دستیابی به صدابندی بهینه به کار برده می‌شود. گام سوم استفاده از شیشه لمینیت برای یکی از جام‌های شیشه است. آخرین گام استفاده از لمینیت برای هر دو شیشه است.



شکل ۱-۷ شمایی از شیشه دوجداره

۱-۲-۳- پنجره سه‌جداره

این پنجره از سه جام شیشه، دو فاصله‌گذار و قاب تشکیل شده است. سیستم پنجره سه‌جداره در صورتی می‌تواند برای صدابندی مفید باشد که مجموع فواصل هوایی در آن بیش از فاصله هوایی در شیشه دوجداره باشد. در غیر این صورت، افزودن شیشه به یک سیستم دوجداره بدون افزایش فاصله هوایی، نه تنها بهبودی در صدابندی ایجاد نمی‌کند، بلکه در بسامدهای پایین، به علت وجود دو بسامد تشدید، ممکن است از پنجره دوجداره نیز عملکردی ضعیف‌تری داشته باشد. شمایی از شیشه سه‌جداره در شکل ۱-۸ نشان داده شده است.



شکل ۸-۱ شمایی از شیشه سه‌جداره

۱-۲-۳-۴- سیستم دوپنجره‌ای^۱

سیستم دوپنجره‌ای شامل دوپنجره کاملاً مستقل است که با فاصله‌ای از یکدیگر نصب می‌شوند. سیستم دوپنجره‌ای به دو صورت ثابت و بازشو موجود می‌باشد. این پنجره‌ها علاوه بر تأمین عملکرد حرارتی مزایای دیگری هم می‌توانند داشته باشند که شامل اثر بسیار بالا در کاهش نوفه است. در این حالت جنبه اقتصادی نادیده گرفته می‌شود.



پنجره اولیه

فاصله هوایی

پنجره ثانویه

شکل ۹-۱ نمایی از سیستم دوپنجره‌ای

فصل دوم

روش آزمون مبانی نظری

از آن جا که رفتار موج صدا در برخورد با یک جداکننده در گستره‌های مختلف بسامدی متفاوت است، برای دستیابی به تحلیلی صحیح از عملکرد صدابندی پنجره‌ها، در این بخش تئوری برخورد امواج صدا با جداکننده‌ها بررسی شده است. در ابتدا جداکننده‌های تک‌جداره بررسی شده و در مرحله بعد به بررسی رفتار موج صدا در برابر جداکننده‌های دوجداره پرداخته شده است. اثر متغیرهایی مانند جرم و فاصله بین دو شیشه بر روی افت صدا را می‌توان از این تئوری به‌دست آورد. مطالعه این تئوری، اطلاعاتی در مورد پدیده‌های فیزیکی که در افت صوتی جدار نقش تعیین کننده‌ای دارند، فراهم می‌آورد.

۱-۲- جداکننده تک‌جداره

زمانی که یک موج صوتی با یک جداکننده صلب آزاد برخورد می‌کند، مطابق شکل ۱-۲ پس از ایجاد آشفتگی^۱ در جداکننده به سمت دیگر آن منتقل می‌شود. فشار عمودی کل که بر جداکننده وارد می‌شود به صورت زیر خواهد بود:

$$\Delta p = p_i + p_r - p_t \quad (1-2)$$

سرعت یک جداکننده با استفاده از قانون نیوتن با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta p = m_s \frac{du_p}{dt} = m_s(j\omega u_p) \quad (2-2)$$

لازم به ذکر است که پاگیری^۱ عمودی جداکننده، $j\omega m_s$ ، در این حالت، تنها ناشی از جرم آن است.

اگر موج تخت با زاویه θ به سطح برخورد کرده و به طور آینه‌ای بازتاب یابد:

$$\mathbf{u}_i = \frac{jk \cos \theta}{j\omega \rho_0} \mathbf{p}_i = \frac{\cos \theta}{\rho_0 c_0} \mathbf{p}_i \quad (3-2)$$

$$\mathbf{u}_r = -\frac{\cos \theta}{\rho_0 c_0} \mathbf{p}_r \quad \text{و} \quad \mathbf{u}_t = \frac{\cos \theta}{\rho_0 c_0} \mathbf{p}_t$$

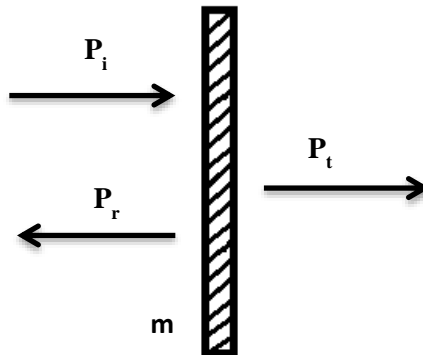
با جایگذاری معادلات ۳-۲ در معادله ۲-۲ به معادله زیر خواهیم رسید که بیانگر تعادل نیرو در دو طرف جداکننده است.

$$\frac{\rho_0 c_0 \mathbf{u}_i}{\cos \theta} - \frac{\rho_0 c_0 \mathbf{u}_r}{\cos \theta} = \frac{\rho_0 c_0 \mathbf{u}_t}{\cos \theta} + m_s(j\omega \mathbf{u}_t) \quad (4-2)$$

سرعت ذرات در هر دو طرف صفحه برابر با سرعت صفحه است:

$$\mathbf{u}_i + \mathbf{u}_r = \mathbf{u}_t = \mathbf{u}_p \quad (5-2)$$

با جایگذاری این معادلات در معادله (۲-۲) و با حذف عبارت \mathbf{u}_r نسبت فشارهای عبوری به برخوردی طبق معادله (۶-۲) به دست می‌آید:



شکل ۱-۲ فشار وارد بر صفحه دارای جرم m در واحد سطح

با قرار دادن این روابط در رابطه ۲-۲ برای حذف u_r ، نسبت فشار منتقل شده به فشار فرودی را خواهیم داشت:

$$\frac{p_t}{p_i} = \frac{1}{1 + \frac{j\omega m_s \cos \theta}{2\rho_0 c_0}} = \frac{1}{1 + \frac{z_n \cos \theta}{2\rho_0 c_0}} \quad (6-2)$$

اگر از رابطه پاگیری نرمال شده^۱، $\xi_n = \frac{z_n}{\rho_0 c_0}$ استفاده کنیم و همچنین ضریب تراگیسیل را به صورت توان عبوری به توان فرودی تعریف کنیم، آن‌گاه مجذور معادله ۶-۲ به صورت زیر خواهد بود:

$$\tau_\theta = \left[\frac{p_t}{p_i} \right]^2 = \frac{1}{\left| 1 + \frac{\xi_n \cos \theta}{2} \right|^2} \quad (7-2)$$

که در آن τ_θ ضریب تراگیسیل یا بخشی از انرژی فرودی انتقال یافته از جداکننده به صورت تابعی از زاویه θ می‌باشد. اگر از معکوس معادله ۷-۲ لگاریتم گرفته و در عدد ۱۰ ضرب کنیم به معادله افت تراگیسیل از یک جداکننده برای یک موج تخت فرودی تحت زاویه θ می‌رسیم. افت تراگیسیل تعمیم یافته به صورت زیر خواهد بود:

$$TL = 10 \log \left| 1 + \frac{\xi_n \cos \theta}{2} \right|^2 \quad (8-2)$$

1 Normalized impedance

۲-۱-۱- قانون جرم

در دیوارهای نازک یا پوسته‌های سنگین در محدوده بسامد پایین، تقریب جرم نرم (غیرصلب) برای پاگیری نرمال شده جداکننده به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\xi_n = \frac{Z_n}{\rho_0 c_0} \cong \frac{j\omega m_s}{\rho_0 c_0} \quad (9-2)$$

در این حالت جداکننده به صورت یک جرم عمل می‌کند که در راستای عمود حرکت کرده و سختی خمشی به عنوان یک عامل محسوب نمی‌شود. با استفاده از این پاگیری و یادآوری این نکته که مربع یک عدد موهومی برابر با مجموع مربعات بخش‌های حقیقی و مجازی است می‌توان ضریب تراگسیل را به صورت زیر نوشت:

$$\tau_\theta = \left[1 + \left(\frac{\omega m_s \cos \theta}{2\rho_0 c_0} \right)^2 \right]^{-1} \quad (10-2)$$

که در آن

τ_θ : ضرایب تراگسیل یا بخشی از انرژی فرودی انتقال یافته از جداکننده به صورت

تابعی از زاویه فرودی θ ؛

ω : بسامد زاویه‌ای (رادیان بر ثانیه)؛

m_s : چگالی سطحی جرم (کیلوگرم بر متر مربع)؛

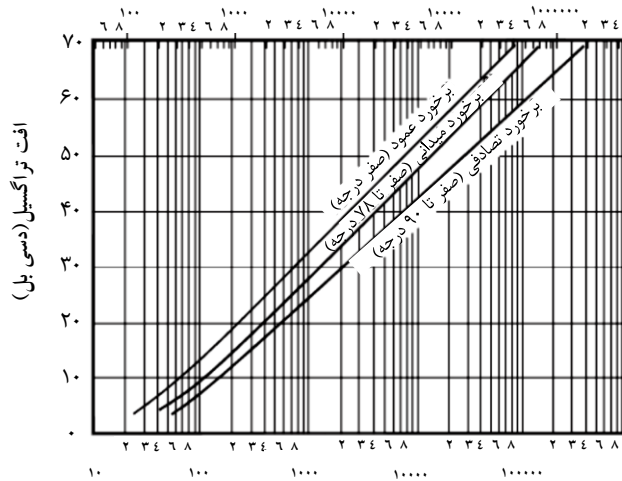
ρ_0 : چگالی هوا؛

c_0 : سرعت صوت در هوا (۳۴۴ متر بر ثانیه).

نمودار رفتار افت تراگسیل قانون جرم به صورت تابعی از زاویه فرودی موج صوتی در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.

$$TL(\theta) = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega m_s \cos \theta}{2\rho_0 c_0} \right)^2 \right] \quad (11-2)$$

FM = حاصلضرب بسامد در جرم سطحی ($\text{Hz} \cdot \text{Kg}/\text{m}^2$)



FW = حاصلضرب بسامد در وزن سطحی ($\text{Hz} \cdot \text{lb}/\text{ft}^2$)

محاسبات برای بسامدهایی که کاملاً زیر بسامد انطباق هستند، ($f < 0.5 f_0$) انجام شده است. فرض بر این است که میدان فرودی میدان صدایی است که در آن امکان برخورد همه زوایای زیر ۷۸ درجه فراهم است.

شکل ۲-۲ افت تراگیسل صدا برای جداکننده‌ها (برانک، ۱۹۷۱)

برای اکثر مواد پایداری نرمال شده جرم بسیار بزرگتر از مقدار سمت راست کرشه در معادله فوق است. زمانی که میدان صوتی فرودی پخش‌نا باشد، احتمال گسیل صدا از تمامی جهت‌ها یکسان است. ضریب تراگیسل موج فرودی پخش‌نا با استفاده از رابطه (۱۱-۲) بدست می‌آید (در تمام زوایای برخورد تا حد θ_{\max}).

$$\tau = \frac{\int_0^{\theta_{\max}} \tau_{\theta} \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_0^{\theta_{\max}} \cos \theta \sin \theta d\theta} \quad (12-2)$$

علت استفاده از این رهیافت این است که براساس معادله ۲-۱۱ افت تراگیسل برای زاویه عمود برابر صفر می‌شود. اما اگر زاویه حد برابر با ۹۰ درجه باشد، به نتیجه‌ای می‌رسیم که در عمل اتفاق نمی‌افتد. بنابراین به صورت استاندارد یک زاویه بیشینه را انتخاب می‌کنیم که بهترین انطباق را با مقادیر اندازه‌گیری دارد. چنین چیزی در زاویه

۷۸ درجه بدست می‌آید و همان چیزی است که به عنوان میدان فرودی برای افت تراگسیل مطرح است.

$$TL = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega m_s}{3.6 \rho_0 c_0} \right)^2 \right] \quad (13-2)$$

$$TL = 20 \log(fm_s) - K_{TL} \quad (14-2)$$

که در آن

f : بسامد (هرتز)؛

K_{TL} : ثابت عددی برابر با ۴۷٫۳ دسی‌بل.

از آن جایی که افت تراگسیل در یک بسامد، تنها به جرم سطحی جداکننده بستگی دارد، رابطه ۲-۱۴ به عنوان قانون جرم شناخته شده است. افت عبور به ازای دو برابر شدن جرم سطحی یا بسامد ۶ دسی‌بل افزایش می‌یابد. تحت شرایط فرود تصادفی، انتگرال‌گیری بر روی زاویه فرودی منجر به یک جرم مؤثر می‌شود که به اندازه عاملی برابر با ۱٫۸ از جرم اصلی کمتر است. مقایسه روابط ۲-۱۱ و ۲-۱۳ نشان می‌دهد که این مقدار معادل با تفاوت بین فرود تصادفی و فرود عمودی به اندازه ۵ دسی‌بل است:

$$TL \cong \Delta L_{TL}(\theta = 0) - 5 \quad (15-2)$$

شکل ۲-۳ نمودار مربوط به مقایسه مقادیر اندازه‌گیری افت تراگسیل میدان پخش را با مقادیر محاسبه شده برای یک جداکننده با صفحه سخت ۳ میلی‌متری نشان می‌دهد. در این بازه بسامدی تطبیق خوبی برای جداکننده نازک دیده می‌شود.

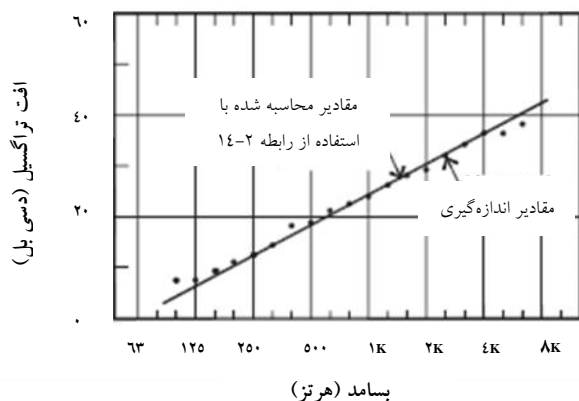
۲-۱-۲- جداکننده‌های بزرگ-خمش و برش

جداکننده‌هایی که اندازه آنها نسبت به طول موج بزرگ است نسبت به فشار وارد شده تنها مانند یک جسم غیرصلب عمل نمی‌کنند و مانند یک صفحه عمل می‌کنند که می‌تواند خم شود یا برش پیدا کند و به همین دلیل پاگیری آن‌ها پیچیده‌تر از آن چیزی

است

که قبلاً فرض شد. هنگامی که احتمال برش یا خمشی بوجود می‌آید، دو مکانیزم انتقال بیشتر شبیه به مقاومت‌ها در یک مدار الکتریکی عمل می‌کنند.

طبق رابطه (۱۶-۲)، پاگیری ترکیبی (برشی و خمشی) جداکننده از نظر حسابی مانند دو



شکل ۳-۲ افق تراگسیل از یک تخته ۳ میلی‌متری (شارپ^۱، ۱۹۷۳)

مقاومت موازی عمل می‌کند که با پاگیری جرم به صورت سری قرار گرفته‌اند:

$$z \cong j\omega m_s + \frac{Z_B Z_S}{Z_B + Z_S} \quad (16-2)$$

برای یک صفحه همسانگرد^۱، پاگیری خمشی با رابطه زیر داده می‌شود:

$$Z_B \cong -\frac{j\omega^3 B}{C_0^4} \sin^4 \theta \quad (17-2)$$

و پاگیری برشی طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Z_S = -j \frac{G h \omega \sin^2 \theta}{C_0^2} \quad (18-2)$$

که در آن

$$B = \frac{E h^3}{12(1-\sigma^2)}$$

سختی خمشی (نیوتن بر متر)؛

$$G = \frac{E}{2(1+\sigma)}$$

مدول برشی (نیوتن بر متر مربع)؛

E	: مدول یانگ یا ثابت کشسانی (نیوتن بر متر مربع)؛
σ	: ثابت پواسون؛
h	: ضخامت جداکننده (متر).

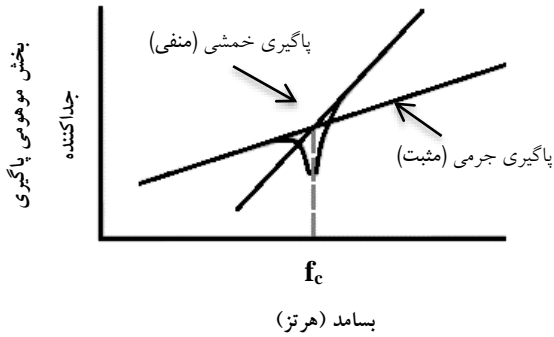
۲-۱-۳- جداکننده‌های نازک- امواج خمشی و اثر انطباق

در معادله ۲-۱۶ پاگیری از سه جمله موهومی تشکیل شده است: جرم داخلی، سختی خمشی و پاگیری برشی. در بسامدهای پایین، جمله مربوط به جرم غالب است؛ در بسامدهای بالا ترکیب خمش و برش مجموع پاگیری را تعیین می‌کند. در جداکننده‌های نازک خمش بر برش غالب است و در نتیجه بیشتر انرژی به این حالت گرایش دارد. بنابراین پاگیری جداکننده به صورت زیر خواهد بود.

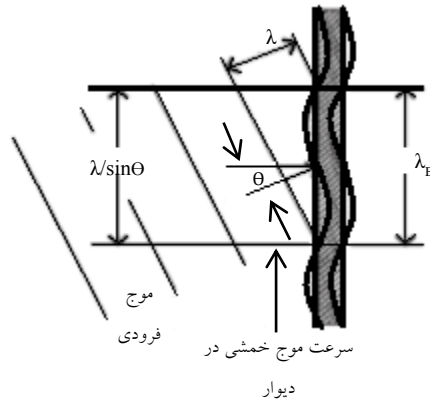
$$z \cong j\omega m_s - \frac{j\omega^3 B}{c_0^4} \sin^4 \theta \quad (19-2)$$

در یک بسامد خاص که بسامد انطباق نامیده می‌شود، دو پاگیری جرمی و خمشی یکی می‌شود و مقدار Z صفر می‌شود. شکل ۲-۴ نقطه تقاطع این وضعیت را نشان می‌دهد. سرعت امواج خمشی در یک جداکننده تابع بسامد است. در بسامد انطباق سرعت امواج خمشی برابر با سرعت حرکت صدای هوا در طول جداکننده است. طبق شکل ۲-۵ از آنجا که در این بسامد بیشینه و کمینه فشار از نظر فضایی بر هم منطبق می‌شوند، انرژی به سادگی از هوا به جداکننده و از جداکننده به هوا منتقل می‌شود. بسامدی که در آن انطباق رخ می‌دهد با زاویه فرودی تغییر کرده و با برابر صفر قرار دادن معادله ۲-۱۹ بدست می‌آید.

$$f_{co}(\theta) = \frac{c_0^2}{2\pi \sin^2 \theta} \sqrt{\frac{m_s}{B}} \quad (20-2)$$



شکل ۲-۴ بخش موهومی پاگیری جداکننده نازک، $(\theta = \pi/2)$. نشان‌دهنده اثر انطباق



شکل ۲-۵ اثر انطباق

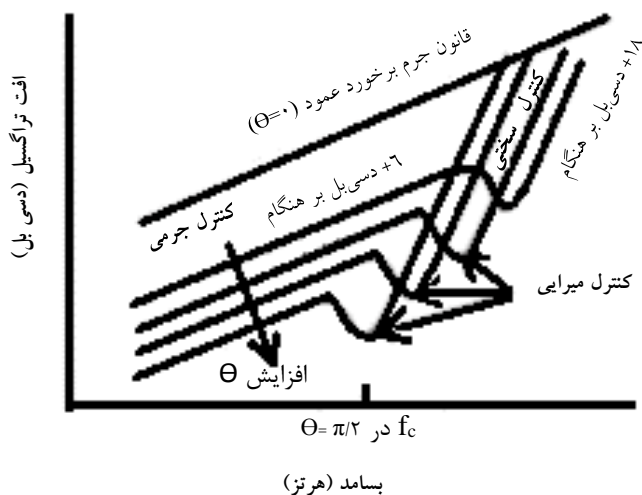
در فرود عمود بسامد انطباق بینهایت است، بنابراین هیچ اثری ندارد. مقدار کمینه بسامد تطبیق در برخورد مماسی اتفاق می‌افتد و بسامد بحرانی نامیده می‌شود:

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m_s}{B}} = \frac{c_0^2}{2\pi h} \sqrt{\frac{12(1 - \sigma^2)\rho_m}{E}} \quad (2-21)$$

که در آن ρ_m چگالی حجمی ماده جداکننده (کیلوگرم بر متر مکعب) است.

رابطه این دو بسامد به صورت زیر است:

$$f_{co}(\theta) = \frac{f_c}{\sin^2\theta} \quad (2-22)$$



شکل ۲-۶ افت تراگسیل میدان مستقیم جداکننده تک‌جداره نسبت به بسامد، برای زوایای

مختلف برخورد

که نشان می‌دهد اثر انطباق همواره در بالای بسامد بحرانی اتفاق می‌افتد. شکل ۲-۶ نمونه‌هایی را نشان می‌دهد که در آن‌ها مکان دره انطباق با زاویه برخورد تغییر می‌کند. در بسامدهای بالای بسامد انطباق، پاگیری خمشی به طور قابل ملاحظه‌ای غالب می‌شود و افت تراگسیل به شکل زیر در می‌آید:

$$TL(\theta) \cong 10 \log \left[1 + \frac{BK^4 \sin^4 \theta \cos \theta}{2p_0 c_0 \omega} \right] \quad (2-23)$$

افت تراگسیل خمشی در این ناحیه توسط سختی کنترل می‌شود و یک شیب ۱۸ دسی‌بلی در هر هنگام و به همان اندازه یک وابستگی قوی به زاویه دارد. در بسامد بحرانی، افت تراگسیل به علت اینکه میرایی داخلی وجود دارد به صفر نمی‌رسد. از لحاظ نظری، یک سختی خمشی مختلط $\vec{B} = B(1 + j\eta)$ با جمله میراکننده η وجود دارد که مقداری کمتر از یک دارد معرفی می‌شود.

از آنجا که در ناحیه انطباق پاگیری خمشی و جرمی یکدیگر را خنثی می‌کنند، فقط عبارت مربوط به میرایی باقی می‌ماند که با استفاده از معادله ۲-۲۱، می‌توان معادله ۲-۲۳ را به صورت یک جمله لختی با یک ضریب میرایی نوشت:

$$TL(\theta) \cong 10 \log \left(1 + \frac{\eta \omega_{c0} m_s \cos\theta}{2 p_0 c_0} \right)^2 \quad (2-24)$$

در ناحیه انطباق، افت تراگیسل به صورت قانون جرم میدان - مستقیم به‌علاوه جمله $20 \log \eta$ بیان می‌شود. همچنین، شکل ۲-۶ مکان‌هایی را نشان می‌دهد که در آنها میرایی داخلی اهمیت دارد.

افت تراگیسل میدان - پخشا به طور معمول توسط انتگرال‌گیری از افت تراگیسل میدان مستقیم بر روی تمام زوایای فرود مشخص انجام می‌شود. انتگرال‌گیری در ناحیه انطباق به‌علت کاربرد معادلات مختلف وابسته به زاویه و بسامد مشکل است. اگرچه بسامد انطباق با زاویه برخورد تغییر می‌کند اما هم‌چنان، افت تراگیسل میدان - پخشا یک کمینه در بسامد بحرانی دارد، زیرا مسیر غالب آن مسیری است که کمترین افت را دارد. محققین زیادی روابط تقریبی برای استفاده در این ناحیه را بیان کرده‌اند. فاهی^۱ رابطه‌ای برای افت عبور در نقطه انطباق میدان- پخشا ارائه داده است که به صورت ترکیب قانون جرم با فرود عمودی می‌باشد و یک جمله میرایی که به پهنای بند وابسته است را دارد.

$$TL(f = f_c) \cong 20 \log \left(\frac{\omega_c m_s}{2 p_0 c_0} \right) + 10 \log \left\{ \frac{2\eta}{\pi} \left(\frac{\Delta f}{f_c} \right) \right\} \quad (2-25)$$

که در آن

Δf : پهنای بند(هرتز)، معمولاً یک هنگامی و یک سوم هنگامی؛

f_c : بسامد بحرانی (هرتز)؛

η : ضریب میرایی ($\eta < 1$).

زمانی که افت تراگسیل دقیقاً زیر ناحیه انطباق محاسبه می‌شود، یک خط بین مقدار قانون جرم برخورد میدانی در $\frac{f_c}{p}$ و افت عبور بسامد بحرانی از معادله ۲-۲۵ کشیده می‌شود. بالای بسامد انطباق، معادله ۲-۲۳ یک افزایش ۱۸ دسی‌بلی در هنگام را برای زاویه فرودی داده شده پیش‌بینی می‌کند. از اندازه‌گیری اطلاعات میدان پخشا شبیه بدست می‌آید که حدوداً نصف مقدار بدست آمده توسط شارپ است. علت این امر انتقال مکان دره انطباق با تغییر زاویه است. کرمر^۱ معادله تقریبی میدان پخشا برای استفاده در بسامدهای بالای بسامد انطباق را بدست آورده که ترکیبی از قانون جرم برخورد عمود و یک جمله میرایی وابسته به بسامد است.

$$TL(f > f_c) \cong 20 \log \left(\frac{\omega m_s}{2 p_0 c_0} \right) + 10 \log \left\{ \frac{2\eta}{\pi} \left(\frac{f}{f_c} - 1 \right) \right\} \quad (26-2)$$

معادله ۲-۲۵ برای بسامدهای بالای بسامد انطباق افت تراگسیلی را نشان می‌دهد که در آن افزایش ۹ دسی‌بل در هنگام برای یک جداکننده منفرد اتفاق می‌افتد که با مقادیر اندازه‌گیری شده منطبق است. جدول ۲-۱ و شکل ۲-۷ مجموعه‌ای از خصوصیات ماده، حاصلضرب بسامد بحرانی و ضخامت جداکننده به همراه ضرایب میرایی برای استفاده در این معادله‌ها را نشان می‌دهد.

شکل ۲-۸ نمودار افت تراگسیل‌های اندازه‌گیری شده برای یک دیوار با ساخت و ساز خشک^۲ ۱۶ میلی‌متری را نشان می‌دهد که در حدود ۲۵۰۰ هرتز، یک دره انطباق دارد و هم چنین اطلاعات بدست آمده از معادلات ۲-۲۶ و ۲-۲۷ نیز در این شکل نشان داده شده‌اند.

۲-۱-۴- جداکننده‌های ضخیم

در مواردی که ضخامت جداکننده افزایش می‌یابد، پاگیری ترکیبی جداکننده که در تئوری جداکننده نازک استفاده شد دیگر صحیح نیست. در بسامدهای بالا یک موج برشی هم به وجود می‌آید و در یک جداکننده ضخیم منتشر می‌شود. زمانی که پاگیری

1 Cremer
2 Dry wall

فصل دوم- روش آزمون میانی نظری/۳۳

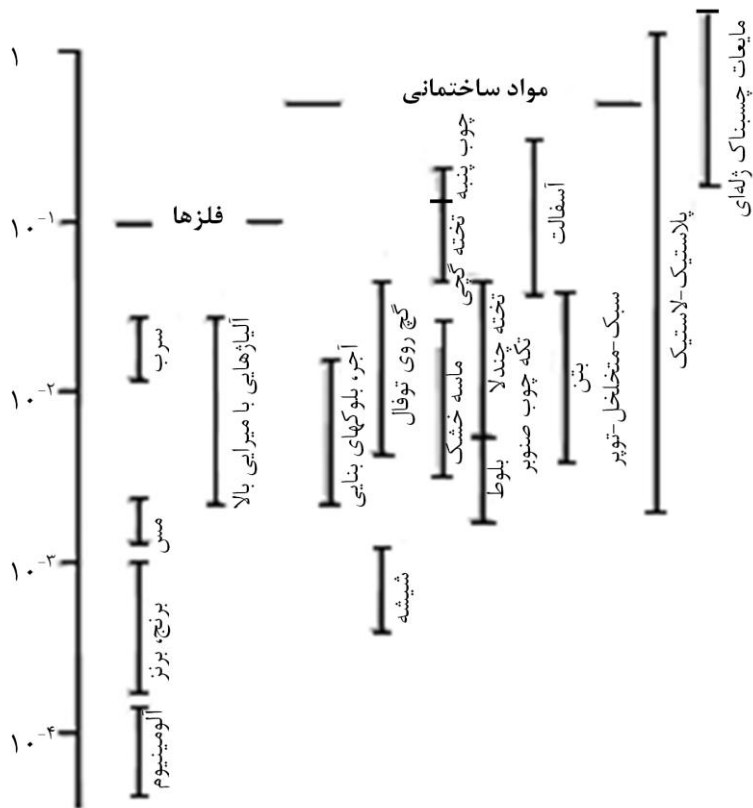
ایجاد شده توسط موج برشی کمتر از خمشی است، آمود تراگسیل غالب مربوط به برش خواهد بود. پآگیری ترکیبی با استفاده از معادله ۲-۱۸ بدست خواهد آمد. نقطه تقاطع میان خمش و برش زمانی اتفاق می افتد که ضخامت صفحه برابر با طول موج در صفحه است. زمانی که جداکننده ضخیم تر از یک طول موج شود، برش همان طور که در شکل ۲-۹ نشان داده شده غالب خواهد بود. بسامد حد برشی به صورت زیر است:

$$f_s = \frac{c_0^2(1 - \sigma)}{59h^2f_c} \quad (2-27)$$

جدول ۲-۱ حاصلضرب ضخامت صفحه و بسامد بحرانی در هوای ۲۰ °C

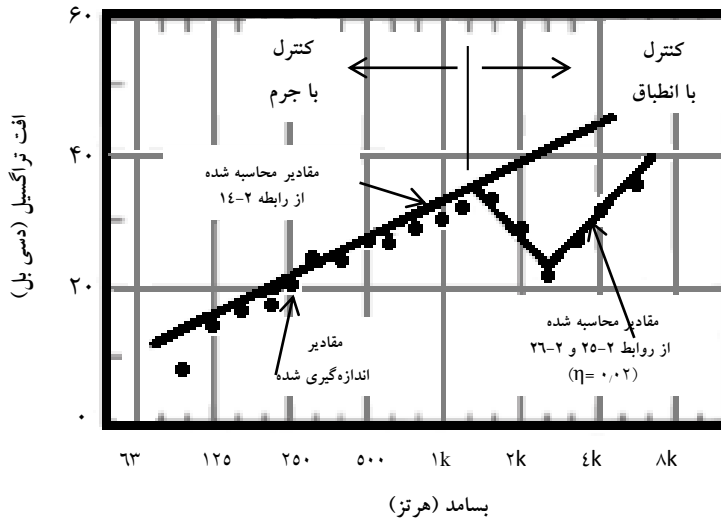
hf_c (ft/s)	hf_c (m/s)	نوع ماده
۴۱	۱۲٫۴	فولاد
۳۹	۱۲٫۰	آلومینیوم
۵۸	۱۷٫۸	برنج
۵۴	۱۶٫۳	مس
۴۲	۱۲٫۷	شیشه یا شن
گچ		
۱۲۵	۳۸	تخته گچی
۷۵	۲۳	تخته نئوپان
۶۶	۲۰	تخته چندلا یا آجر
۵۶	۱۷	سیمان آزیست
بتن		
۶۲	۱۹	سنگین
۱۰۸	۳۳	متخلخل
۱۱۲	۳۴	سبک
۱۸۰	۵۵	سرب

توجه کنید که تغییرات تا ۱۰٪ غیرعادی نیست.

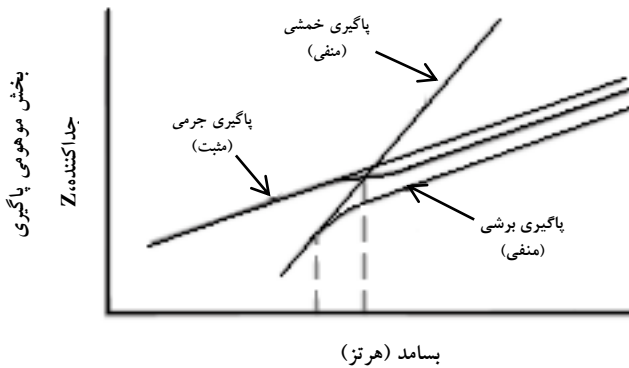


بازه متداول فاکتور اتلاف مواد تحت فشار کم نزدیک به دمای اتاق در بسامدهای شنیداری

شکل ۷-۲ مقادیر ضرایب افت مواد (برانک، ۱۹۹۲)



شکل ۲-۸ افست تراگیسیل یک تخته گچی به ضخامت ۱۶ میلی متر

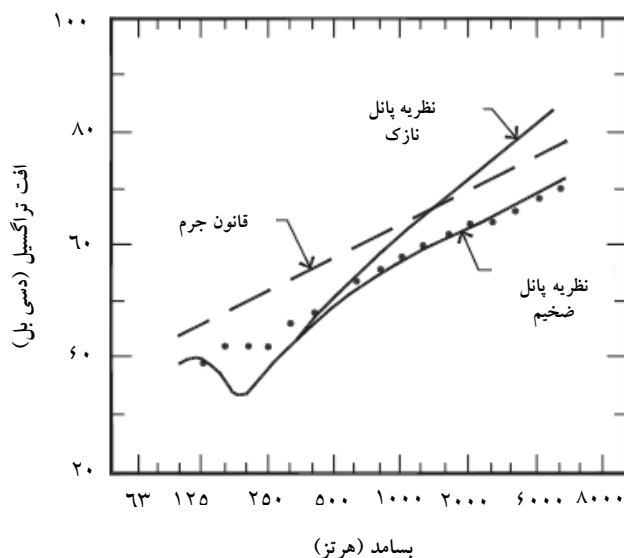


شکل ۲-۹ پاگیری تراگیسیل جداکننده های ضخیم

زمانی که بسامد برشی زیر ناحیه بسامد بحرانی قرار می گیرد، چیزی که می تواند در جداکننده های ضخیم مانند تخته های بتنی و آجر یا دیوارهای ساخته شده از مصالح ساختمانی اتفاق بیفتد، هیچ دره انطباقی وجود نخواهد داشت و مکانیزم برش، افست عبور را کمتر می کند حتی زیر آن چیزی که از ملاحظات قانون جرم خالص انتظار



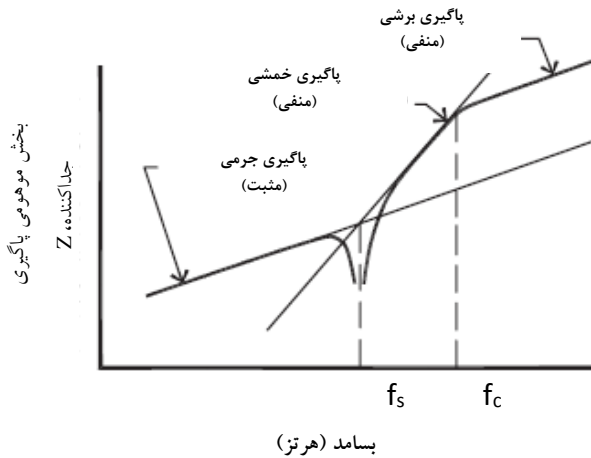
می‌رود. چنین چیزی همان طور که در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده بسیار اهمیت دارد. در این شکل این پدیده در بسامدی حدود ۲۰۰ هرتز برای تخته بتنی ۱۵ سانتی‌متری رخ می‌دهد. در صورتی که از مقدار افت عبور طبق قانون جرم میدان پخشا ۶ دسی‌بل کم کنیم به تخمین خوبی از افت عبور بالای این نقطه می‌رسیم. برای ساختارهای بتنی یا آجر سخت این موضوع معادل این فرضیه است که نصف جرم واقعی در نظر گرفته شود.



مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده افت عبور برای یک پانل بتنی (۱۵۰ mm) با مقادیر پیش‌بینی شده از تئوری پانل نازک و ضخیم

شکل ۲-۱۰ افت تراگسیل یک جداکننده بتنی به ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر

اگر بسامد برش بزرگتر از بسامد انطباق باشد، پایداری موج برشی حتی از پایداری خمشی هم کمتر می شود. در بسامدهایی که به قدر کافی بالا هستند، همه مواد ضخیم



بخش موهومی پایداری یک جداکننده نازک برای فرود مماس ($\Theta=\pi/2$) که اثر انطباق را نشان می دهد. بسامد برشی از بسامد بحرانی بیشتر است.

شکل ۲-۱۱ بخش موهومی پایداری تراگیل (شارپ، ۱۹۷۳)

به نظر می رسند. پایداری موج برشی^۱، شیب خط افت تراگیل را در بسامد بالای برشی - خمشی به ۶ دسی بل بر هنگام محدود می کند. شکل ۲-۱۱ مثالی از این موضوع نشان می دهد. از آنجایی که انطباق در مواد با ساختار سبک مانند صفحه فلزی، تخته گچی یا پانل های نازک چوبی نسبتاً در بسامد بالا اتفاق می افتد (مثلاً بالای ۲۰۰۰ هرتز).

۲-۱-۵- جداکننده های محدود- ملاحظات تشدید و سختی

در مورد یک جداکننده با اندازه محدود، یک جمله اضافی باید به پایداری در بسامدهای خیلی پایین برای در نظر گرفتن تشدیدهای خمشی اضافه کرد. این جمله توسط شارپ و لیسسا^۲ ارائه شد.

1 Shearing wave

2 Leissa

$$Z_p = -j \frac{K_p}{\omega} \quad (28-2)$$

که

$$K_p = \pi^4 B \left[\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right]^2 \quad (29-2)$$

a و b ابعاد جداکننده هستند. در این محدوده بسامدی، پاگیری کل، مجموع پاگیری جداکننده و پاگیری جرمی است. زمانی که هر دو جمله برابر باشند، بسامد تشدید جداکننده طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f_p = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B}{m_s} \left[\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right]} \quad (30-2)$$

نوفاً برای یک جداکننده مانند دیوار که به اندازه کافی بزرگ است، تشدید بسیار کم و از مرتبه ۱۰ هرتز یا کمتر است. مثلاً تشدید یک تخته گچی 3×2 متری در حدود ۵ هرتز است. توجه کنید که معادله ۲-۳۰ بر مبنای بسامد تشدید پایه جداکننده است. آمودهای بالاتر هم برای جداکننده وجود دارد اما به علت میرایی، به‌ندرت در افت تراگسیل تأثیرگذارند. همچنین از آنجائی که در معادله ۲-۲۸ بسامد در منخرج ظاهر می‌شود، بنابراین در بسامدهای زیر بسامد تشدید جداکننده، با کاهش بسامد افت تراگسیل به میزان ۶ دسی‌بل در هر هنگام افزایش می‌یابد. شارپ یک رابطه تقریبی برای این ناحیه داده است:

$$TL \cong 20 \log(f m_s) - K_{TL} + 40 \log\left(\frac{f_p}{f}\right), \quad f < f_p \quad (31-2)$$

برای کمترین بسامد تشدید جداکننده

۲-۱-۶- طراحی جداکننده‌های تک‌جداره

برای جداکننده‌های تک‌جداره افت تراگیسل تحت تأثیر چهار عامل است: اندازه، سختی، جرم و میرایی. ژوزه و لامورا^۱ یک فرمول مفهومی نسبتاً پیچیده برای ناحیه زیر بسامد بحرانی ارائه کرده‌اند که هر چهار پارامتر را در بر می‌گیرد.

$$TL = 20 \log \left(\frac{\omega m_s}{2 p_0 c_0} \right) - 10 \log \left[\frac{3}{2} + \ln \left(\frac{2\omega}{\Delta\omega} \right) \right] + \frac{16 c_0^2}{\eta \omega_c} \frac{1}{(\omega \omega_c)^{\frac{1}{2}}} \left(\frac{a^2 + b^2}{a^2 b^2} \right) \left[1 + \frac{2\omega}{\omega_c} + 3 \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \right] \quad (۲-۳۲)$$

برای اندازه‌های متداول جداکننده در ناحیه قانون جرم معادله ۲-۳۲ تقریباً همان نتایج معادله ۲-۱۴ را می‌دهد. در بسامدهای بالای بسامد بحرانی معادله ۲-۲۵ یا ۲-۲۶ را می‌توان برای پیش‌بینی افت تراگیسل استفاده کرد. برای جداکننده‌های ضخیم، قانون جرم تا نقطه‌ای که برش غالب می‌شود، معتبر است. بالای این نقطه قانون جرم منهای ۶ دسی‌بل تخمین خوبی را ارائه خواهد داد.

می‌توان افت تراگیسل برای یک جداکننده نازک را به پنج بازه بسامدی که در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده تقسیم‌بندی کرد. در بسامدهای خیلی پایین افت تراگیسل با سختی کنترل می‌شود. هر چه سختی خمشی بزرگتر باشد و هر چه دهانه ساختار^۲ کوچک‌تر باشد، میزان افت تراگیسل بیشتر است. این ملاحظات در مشکلات افت تراگیسل بسامد پایین در ساختارهای دهانه بزرگ‌تر^۳ به ویژه در ساختار چوب با وزن سبک جایی که سختی خمشی خیلی بزرگ نیست اهمیت می‌یابند.

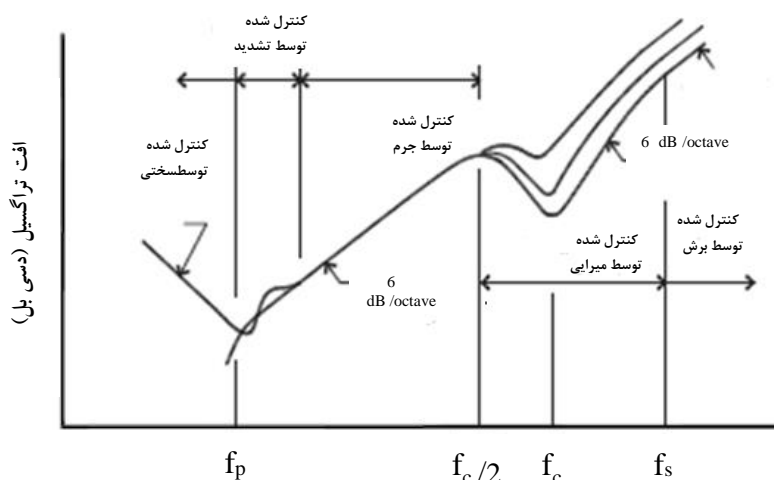
در بسامدهای بالای آمود پایه جداکننده، افت تراگیسل یک جداکننده نازک عمدتاً تابعی از جرمش است. تکنیک‌هایی را می‌توان برای افزایش جرم داخلی جداکننده به کار برد. به‌طور مثال جداکننده‌های تخته گچی با لایه‌ای از سرب برای کاربردهای خاص در دسترس هستند. اضافه کردن جرم به این صورت باعث افزایش وزن جداکننده بدون افزایش سختی آن می‌شود. برای اضافه کردن مواد، نیاز نیست که تمام جداکننده پوشانده شود. اما این مواد باید در فواصل منظم بر روی سطح قرار گیرند.

1 Josse and Lamure

2 Span

3 long span

در ناحیه اطراف انطباق، میرایی عمق دره را کنترل می‌کند. تکنیک‌های گوناگونی را می‌توان برای افزایش افت تراگسیل به کار برد. در جداکننده‌های چند جداره، می‌توان از یک لایه میانی رزین به ضخامت ۰٫۷ تا ۱٫۴ میلی‌متر برای افزایش میرایی استفاده کرد. این نوع محصولات، شیشه لمینیت یا گاهی اوقات شیشه آکوستیکی نامیده می‌شوند. با استفاده از جام‌های شیشه‌ای لمینیت به ضخامت ۶ میلی‌متر در قاب‌هایی با کیفیت بالا، پنجره‌های آکوستیکی نسبتاً خوبی با میزان STC تا حدود ۳۴ دسی‌بل خواهیم داشت. ترکیباتی در حال حاضر وجود دارند که میرایی خوبی دارند. این محصولات به صورت لایه‌ای از چسب تولید می‌شوند که علاوه بر اضافه کردن جرم، میرایی را نیز افزایش می‌دهند. این محصولات در ابتدا برای اصلاح جداکننده‌های نازک فلزی نصب شده بر روی تجهیزات ارتعاشی استفاده می‌شدند.



بسامد (هرتز)

شکل ۲-۱۲ منحنی افت تراگسیل میدان پخشای یک جداکننده نازک

۲-۱-۷- لمینیت کردن نقطه‌ای

لمینیت کردن نقطه‌ای تکنیکی برای افزایش افت تراگسیل در ناحیه انطباق است. در این ناحیه ضخیم نکردن جداکننده اهمیت دارد، چرا که باعث کاهش بسامد بحرانی می‌شود. در صورتی که جرم با افزایش لایه زیاد شود، باعث کاهش افت تراگسیل در بازه بسامدی مورد نظر می‌شود. یک راه برای دستیابی به ترکیبی از جرم بالا و سختی کم، لایه‌دار کردن جداکننده‌ها با هم با استفاده از اتصال‌های نقطه‌ای در فواصل منظم است. در بسامدهای پایین جداکننده‌ها به صورت تکی عمل می‌کنند و سختی خمشی کل آن‌ها به شدت افزایش می‌یابد. در بسامدهای بالا اثر برش ناشی از اتصال باعث کاهش سختی خمشی تا حد سختی یک جداکننده تک‌جداره می‌شود. بدین ترتیب جداکننده‌ها به صورت منفرد عمل می‌کنند و بسامد بحرانی بالا خواهد ماند، همان چیزی که یک جداکننده تک‌جداره در خمش خود دارد.

زمانی که از تکنیک لایه‌دار کردن نقطه‌ای استفاده می‌شود، بسامدی که از آن به بعد جداکننده‌ها به صورت جداگانه عمل می‌کنند با فاصله بین نقطه‌ها تعیین می‌شود. این جداشدگی زمانی اتفاق می‌افتد که طول موج خمشی برابر با فاصله بین نقاط باشد. طول موج یک جداکننده در بسامد f توسط شارپ به صورت زیر بیان شده است:

$$\lambda_B = \frac{C_0}{\sqrt{ff_c}} \quad (2-33)$$

از آن‌جا که در بسامدهای پایین طول موج خمشی بسیار بزرگ‌تر از فاصله بین دو اتصال می‌باشد، بسامد بحرانی مربوط به کل جداکننده است. اگر دو لایه که مواد یکسانی دارند به هم متصل شوند، بسامد انطباق هر صفحه حدود دو برابر بسامد کل جداکننده خواهد بود. بسامدی که در آن دو لایه به صورت جدا عمل خواهند کرد با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f_d = \frac{2c_0^2}{a^2 f_c} \quad (2-34)$$

که در آن a فاصله بین اتصال‌ها و f_c بسامد بحرانی یک صفحه منفرد است. به طور مثال در صورتی که دو پانل تخته گچی به ضخامت‌های $12,5 \text{ mm}$ که دارای بسامد انطباق در 300 هرتز هستند را به یکدیگر با فواصل 60 سانتی‌متری متصل کنیم از بسامد 210 هرتز به بالا به صورت جداگانه عمل خواهند کرد. این بسامد به خوبی زیر بسامد انطباق جداکننده مرکب قرار می‌گیرد که حدود 1500 هرتز است.

۲-۲- جداکننده دوجداره آزاد

در این بخش افت تراگسیل برای یک سیستم دوجداره مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور ابتدا جداکننده‌هایی با اندازه نامحدود در نظر گرفته می‌شود که از نظر ساختاری به جایی متصل نیستند. در این مطالعه ابتدا کاری که لاندن^۱ در سال 1950 و بعد از او شارپ در سال 1973 انجام داد بررسی می‌شود. فرض بر این است که فاصله هوایی با عایق ورقه‌ای^۲ پر شده که باعث میرایی حرکت موج موازی با دیوار می‌شود، در نتیجه ما بیشتر بر حرکت موج داخلی عمود بر سطح متمرکز می‌شویم. فاصله هوایی بین جداکننده‌ها در هر بسامد مانند یک فنر عمل می‌کند که در نتیجه تشدید جرم- فنر- جرم اتفاق می‌افتد.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3.6p_0c_0^2}{m'd}} \quad (35-2)$$

که در آن

$$m' = \frac{2m_1m_2}{m_1+m_2} \quad \text{جرم مؤثر بر واحد سطح ساختار (کیلوگرم بر متر مربع)؛}$$

d : فاصله بین جداکننده‌ها (متر).

در بسامدهای بالای تشدید جرم- هوا- جرم اثر فاصله هوایی افت تراگسیل را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. در حقیقت برای N جداکننده جدا از هم به طور نظری افت تراگسیل به میزان $(2N-1)6$ دسی‌بل در هر هنگام افزایش می‌یابد. در بسامدهای بالا، ساختارهای متشکل از جداکننده‌های چندجداره با فاصله هوایی داخلی، می‌توانند

فصل دوم- روش آزمون میانی نظری ۴۳

افزایش قابل توجهی در افت تراگسیل نسبت به یک جداکننده منفرد، ایجاد کنند. هرچند این موضوع به ندرت در مورد دیوارهایی با بیش از سه جدار صادق است. به طور کلی، ساختارهایی متشکل از تعداد زیادی جداکننده قابل استفاده نیستند. یک موج تخت که با یک سیستم دوجداره برخورد می‌کند پاگیری نزدیک‌ترین پانل، فاصله هوایی، پانل دوم و نهایتاً پاگیری هوای آن طرف پانل را می‌بیند. ضریب تراگسیل توسط لاندن به صورت زیر ارائه شده است.

$$\tau_{\theta} = [1 + (\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2) + \mathbf{x}_1\mathbf{x}_2(1 - e^{-j\sigma})]^{-2} \quad (۳۶-۲)$$

که در آن $\mathbf{x} = \frac{Z_n \cos \theta}{2p_0 c_0}$ ، $K = \frac{2\pi f}{c_0}$ (m⁻¹) عدد موج و $\sigma = 2Kd \cos \theta$ است.

ساختارهایی که از پانل‌های چندجداره با فاصله هوایی بین آنها تشکیل شده‌اند می‌توانند در بسامدهای بالا افت تراگسیل را به میزان قابل توجهی نسبت به پانل‌های تکی افزایش دهند.

در بسامد زیر بسامد بحرانی پاگیری جداکننده برابر با راکتانس جرمش است و برای یک میدان پخش، افت تراگسیل یک سیستم پانل دوجداره ایده‌آل با اندازه محدود، تنها از جفت شدگی فنر- هوا طبق رابطه زیر بدست می‌آید.

$$TL \cong 10 \log \left\{ 1 + \left[\frac{\omega M}{3.6 p_0 c_0} - \frac{\omega^2 m_1 m_2}{(3.6 p_0 c_0)^2} (1 - e^{-2jkd}) \right]^2 \right\} \quad (۳۷-۲)$$

که در آن

M : جرم واحد سطح کل ساختار؛

m : جرم واحد سطح جداکننده تکی.

در بسامدهای پایین، زیر بسامد تشدید جرم- هوا- جرم فاصله پانل‌ها نسبت به طول موج کوچک است در نتیجه جمله سمت راست رابطه ۳۶-۲ به صفر می‌رسد و افت عبور را می‌توان طبق رابطه زیر تخمین زد:

$$TL \cong 10 \log \left\{ 1 + \left[\frac{\omega M}{3.6 p_0 c_0} \right]^2 \right\} \quad (۳۸-۲)$$

که دقیقاً همان قانون جرم برای جداکننده مرکب است.

$$TL \cong 20 \log(fm) - K_{TL} \quad f < f_0 \quad (39-2)$$

در بسامدهای بالای f_0 اما همچنان زیر نقطه‌ای که طول موج قابل مقایسه با فاصله جداکننده‌ها باشد، جمله سمت راست معادله ۲-۳۷ غالب می‌شود. در این ناحیه همچنان طول موج بزرگتر از فاصله جداکننده‌ها است، در نتیجه $2kd$ کوچک است و $e^{-2jkd} \cong 1 - 2jkd$ افت تراگیسل طبق رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$TL \cong 20 \log \left[\frac{\omega^2 m_1 m_2}{(3.6 p_0 c_0)^2} 2Kd \right] \quad (40-2)$$

که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$TL \cong TL_1 + TL_2 + 20 \log(2Kd) \quad f_0 < f < f_1 \quad (41-2)$$

که TL_1 و TL_2 قانون جرم افت تراگیسل برای هر یک از دو جداکننده است. هر کدام از جملات در معادله (۲-۴۱) در هر هنگام ۶ دسی‌بل افزایش می‌یابند در نتیجه افت تراگیسل کلی بین جداکننده‌ها در این گستره بسامدی ۱۸ دسی‌بل در هر هنگام افزایش می‌یابد. همچنین افت صوتی به ازای هر دو برابر شدن فاصله بین پانل‌ها، ۶ دسی‌بل افزایش می‌یابد. در بسامدهای بالاتر از این، آمودهای تشدیدی در فاصله هوایی بین جداکننده‌ها پایدار و مجموعه‌ای از تشدیدهای لوله یک سر بسته، عمود بر سطح، با بسامد زیر ایجاد می‌شود.

$$f_n = \frac{nc_0}{2d} \quad \text{برای } n = 1, 2, 3 \dots \quad (42-2)$$

این موضوع به انتقال انرژی صدا بین جداکننده‌ها کمک کرده و نتیجه آن همانطور که در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است، یک مجموعه از دره‌ها در افت تراگیسل جداکننده دوجداره خواهد بود. به علت میرایی ایجاد شده ناشی از عایق‌بندی ورقه‌ای، معمولاً این

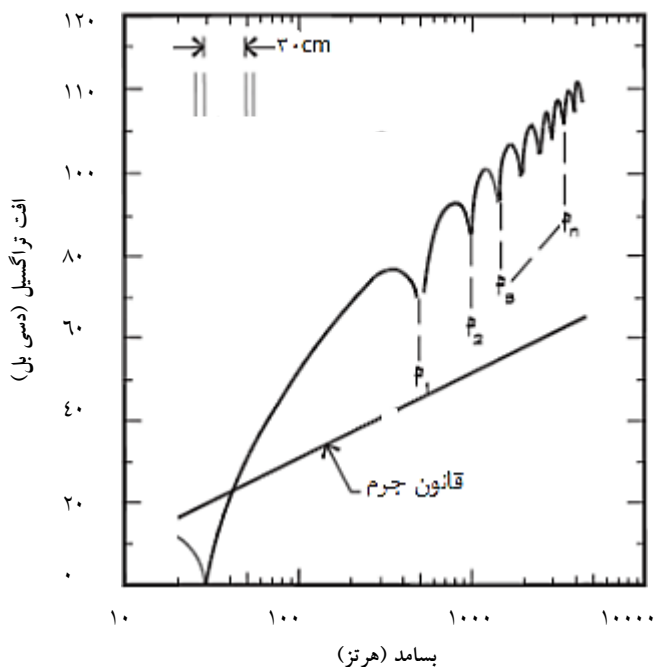
الگو را در اندازه‌گیری‌های واقعی افت تراگسیل که در بندهای یک سوم هنگامی انجام می‌شود نمی‌بینیم. عایق ورقه‌ای شیب منحنی افت عبور را در این ناحیه از ۱۸ دسی‌بل بر هنگام به ۱۲ دسی‌بل بر هنگام هموار و مسطح می‌کند.

$$TL \cong TL_1 + TL_2 + 6 \quad f_1 < f \quad (۴۳-۲)$$

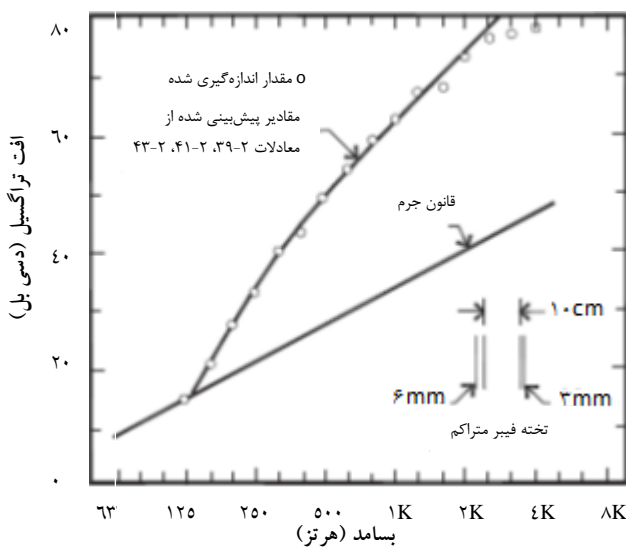
رفتار افت تراگسیل بالای بسامد محدود کننده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f_1 = \frac{c_0}{2\pi d} = \frac{f_1}{\pi} \quad (۴۴-۲)$$

بسامد متقاطع که از مساوی قرار دادن روابط ۲-۴۱ و ۲-۴۳ بدست می‌آید، برابر با اولین بسامد تشدید فاصله هوایی تقسیم بر π است. روابط ۲-۳۹، ۲-۴۱ و ۲-۴۳ افت تراگسیل یک سیستم جداکننده دوجداره را در سه ناحیه بسامدی نشان می‌دهد که با بسامدهای معادلات ۲-۳۵ و ۲-۴۴ جدا می‌شوند. اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط شارپ نشان می‌دهد که توافق قابل قبولی میان نتایج نظری و اندازه‌گیری برای هر دو ناحیه جرم-راکتانس (شکل ۲-۱۴) و ناحیه بحرانی (شکل ۲-۱۵) وجود دارد. مقادیر افت تراگسیل جداکننده در ناحیه بحرانی به جای پیشگویی‌های ساده قانون جرم استفاده شده است.



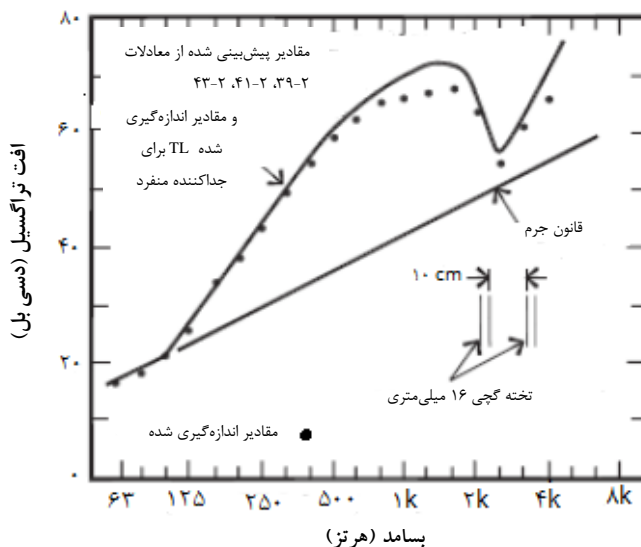
شکل ۲-۱۳ نمودار تئوری افت تراگیسیل یک جداکننده دوجداره ایده‌آل (شارپ، ۱۹۷۳)



شکل ۲-۱۴ مقادیر افت تراگیسیل اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برای یک جداکننده دوجداره جدا از هم (شارپ، ۱۹۷۳)

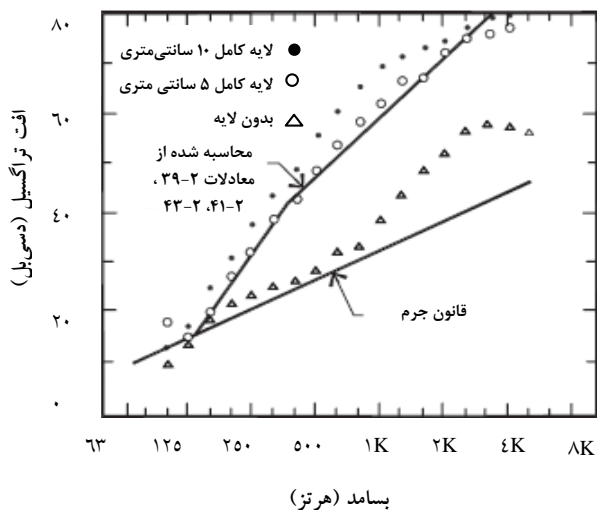
۲-۲-۱- عایق بندی فاصله هوایی

در نظریه مورد بررسی فرض بر این است که موج در فاصله هوایی به خوبی میرا می‌شود. زمانی که هیچ ماده جذب‌کننده‌ای بین جداکننده‌ها وجود ندارد، تشدیدهای فاصله هوایی تقریباً به همان صورتی که یک جفت‌شدگی مکانیکی اتفاق می‌افتد، به انتقال صدا از یک سمت به سمت دیگر کمک می‌کند. اضافه کردن مواد میراکننده مانند عایق ورقه‌ای از جنس الیاف شیشه‌ای این آمودها را تضعیف می‌کند. شکل ۲-۱۶ اثرات یک سیستم جداکننده دوجداره کاملاً جداسازی شده را با و بدون عایق ورقه‌ای نشان می‌دهد. جداکننده‌های مورد استفاده تخته‌های ۶ میلی‌متری و ۳ میلی‌متری هستند، در نتیجه بسامدهای انطباق بالاتر از محدوده بسامدی مورد بررسی قرار می‌گیرند. در بسامد زیر اولین تشدید فاصله هوایی (۱۱۰۰ هرتز)، جداکننده‌ها طوری با تشدیدهای فاصله هوایی جفت می‌شوند که افت تراگسیل از قانون جرم تبعیت می‌کند. در بسامدهای بالای اولین تشدید، فاز با عمق فاصله هوایی تغییر می‌کند و جفت‌شدگی ضعیف‌تر می‌شود. زمانی که عایق ۵۰ میلی‌متری در فاصله هوایی قرار می‌گیرد، دیوار مانند یک سیستم جداکننده دوجداره عمل می‌کند. با استفاده از عایق ۱۰۰ میلی‌متری، جرم عایق قابل مقایسه با جرم جداکننده است و افت تراگسیل از آنچه که توسط این نظریه پیش‌بینی شده بیشتر است.



مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده افت تراگسیل دو لایه تخته گچی ۱۶ میلی‌متری با فاصله هوایی که شامل ناحیه انطباق می‌شود

شکل ۲-۱۵ مقادیر افت تراگسیل، شامل بخش انطباق برای یک جداکننده دوجداره (شارپ، ۱۹۷۳)



ساختار شامل یک تخته فیبرمترکم ۶ و ۳ میلی‌متری با فاصله هوایی ۱۶ سانتی‌متری است

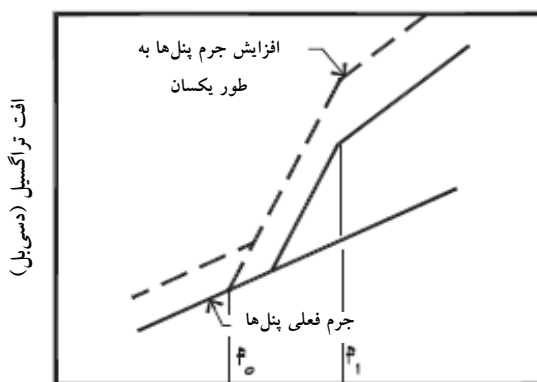
شکل ۲-۱۶ افت تراگسیل یک ساختار دوجداره جداسازی شده با و بدون لایه میانی عایق

(شارپ، ۱۹۷۳)

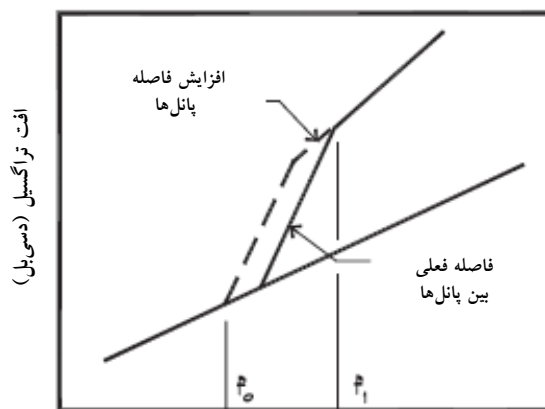
۲-۲-۲- تکنیک‌های طراحی جداکننده دوجداره

در بسامدهای زیر بسامد تشدید جرم- هوا- جرم، دیوار دوجداره مانند یک واحد منفرد عمل می‌کند و سختی و جرم مهم‌ترین سهم را در افت تراکسیل دارند. بالای تشدید جرم - هوا - جرم، هم جرم و هم فاصله هوایی همان‌طور که در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده اهمیت دارند.

به علت تشدید جرم- هوا- جرم کمینه مشخصی از فاصله هوایی لازم است تا ساختار دوجداره به طور قابل توجهی از یک جداکننده تک‌جداره بهتر عمل کند.



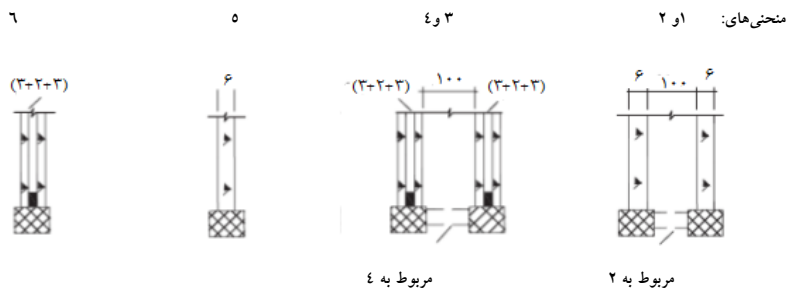
بسامد (هرتز)



بسامد (هرتز)

شکل ۲-۱۷ تأثیر جرم و فاصله بر روی افت تراکسیل ساختار جداکننده دوجداره ایده‌آل

شکل ۲-۱۸ مجموعه‌ای از آزمایش‌های افت تراگیسل که توسط وینوکر^۱ انجام شده است را برای یک شیشه تک‌جداره و وضعیت‌های مختلف پنجره دوجداره نشان می‌دهد.

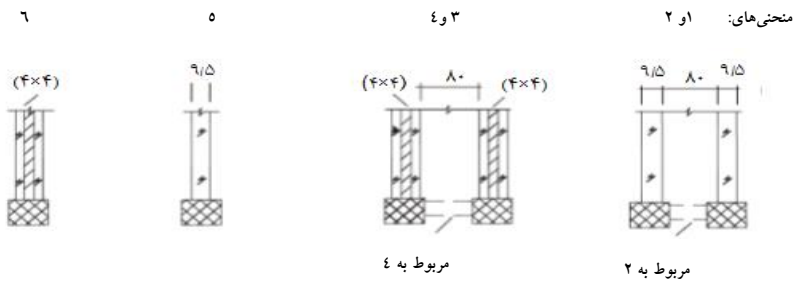
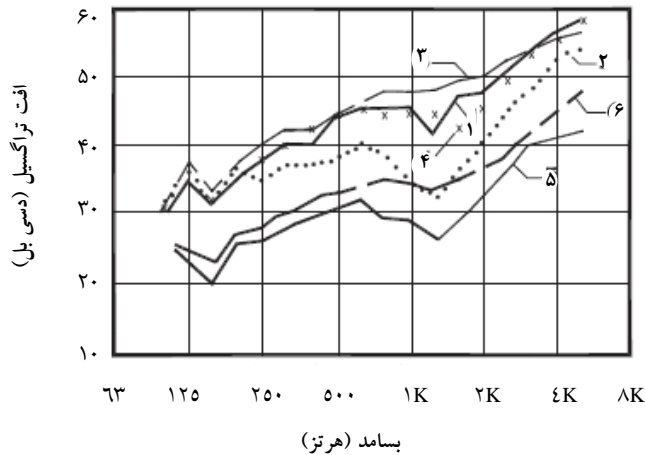


منحنی‌های ۱ و ۲ مربوط به جداکننده‌های جدا از هم هستند. منحنی‌های ۳ و ۴ مربوط به واحدهایی با قاب‌های بهم پیوسته هستند.

شکل ۲-۱۸ افت تراگیسل انواع گوناگون شیشه‌های دوجداره (وینوکر، ۱۹۹۶)

دره بزرگ در حدود بسامد ۷۰۰ هرتز برای منحنی شماره ۶ به بسامد تشدید جرم - هوا - جرم مربوط است. منحنی‌های شماره ۲ و ۴ اثرات جفت شدگی مکانیکی را در

اتصال مستقیم بین قابهای پنجره نشان می‌دهد. عمل پل زدن یک اتصال کوتاه در طول فاصله هوایی اصلی ایجاد می‌کند و اهمیت اثرات انطباق را افزایش می‌دهد. دیگر آزمایش‌های انجام شده توسط وینوکر با استفاده از شیشه ساده و لمینیت به ضخامت ۳ میلی‌متر، در شکل ۲-۱۹ به طور مختصر آورده شده است.



منحنی‌های ۱ و ۳ مربوط به جداکننده‌های جدا از هم هستند. منحنی‌های ۲ و ۴ مربوط به واحدهایی با قاب‌های بهم پیوسته هستند. ۴x۴ یک کد توصیفی برای شیشه لمینیت است.

شکل ۲-۱۹ آزمون‌های افت تراگیسل بر روی پنجره‌هایی با شیشه دوجداره لمینیت (وینوکر، ۱۹۹۶)

وینوکر آزمایش‌های دیگری بر روی شیشه ساده و لمینیت به ضخامت ۳ میلی‌متر انجام داد که در شکل ۲-۱۹ به طور مختصر آورده شده است.

نتایج نشان داده است که درجه تراگسیل صدا (STC) برابر با ۳۴ دسی بل برای دو جام شیشه‌ای لمینیت شده به دست می‌آید و تا زمانی که فاصله هوایی در پنجره دوجداره از ۲۵ میلی‌متر فراتر نرود نتیجه بهتر از این حاصل نخواهد شد. می‌توان نتیجه گرفت که تمام پنجره‌های دوجداره از پنجره‌های تک‌جداره، حتی زمانی که ضخامت کلی شیشه یکی باشد، بهتر عمل نمی‌کنند. هنگامی که فاصله هوایی بین جداکننده‌ها کم است، یک ساختار دوجداره حتی می‌تواند افت تراگسیل کمتری نسبت به دو جداکننده منفرد به هم چسبیده داشته باشد. این موضوع علت عدم کارایی پنجره با شیشه‌های نازک را که گاهی به عنوان پنجره‌های حرارتی محسوب می‌شوند، در فراهم آوردن افت قابل قبول نوفه، بیان می‌کند. در آزمایش‌های وینوکر، جام‌های شیشه‌ای با یک لایه ضخیم PVB به ضخامت‌های ۰٫۷ یا ۱٫۴ میلی‌متر به هم لمینیت شدند. دره انطباق برای یک جام لمینیت شده (منحنی ۶) به طور قابل ملاحظه‌ای از جام‌های شیشه‌ای ساده (منحنی ۵) یا دوجداره (منحنی ۲) که در آن امکان پل زدن ساختاری وجود دارد، کمتر است.

۲-۳- استفاده از گاز در جداکننده‌های دوجداره

تاکنون فرض شده است که فاصله هوایی شیشه دوجداره با هوا پر شده است. استفاده از یک گاز سنگین‌تر برای پرکردن فاصله میان دو جدار کیفیت صدابندی پنجره دوجداره را تغییر می‌دهد. این امر موجب بهبود صدابندی در گستره بسامدهای میانی (۴۰۰ تا ۱۴۰۰ هرتز) می‌شود اما صدابندی را در ناحیه تشدید کاهش خواهد داد. اثر استفاده از گاز سنگین در صدابندی را می‌توان به صورت تأثیر سختی گاز بر حرکت جرم- فنر بیان کرد.

سختی یک فضای پر شده از گاز را می‌توان با ثابت فنر در سیستم جرم- فنر مقایسه کرد. این پارامتر (سختی) با زاویه‌دار شدن جهت برخورد افزایش می‌یابد. در برخورد صدا تحت زوایای مختلف با یک صفحه می‌توان تعادل دینامیکی را با استفاده از مؤلفه‌های عمود بر صفحه موج تعیین کرد. بنابراین سختی گاز بین دو جدار به زاویه

فرودی بستگی دارد و این سختی با بیشتر شدن زاویه افزایش می‌یابد. سختی با معادله زیر بیان می‌شود:

$$S = S(\theta) = S_0 \frac{1}{1 - \left(\frac{C_G}{C_A}\right)^2 \sin^2 \theta} \quad (۴۵-۲)$$

$$S_0 = \frac{\rho_G C_G^2}{h}$$

که در آن θ زاویه برخورد، C_G سرعت صوت در گاز پرکننده، C_A سرعت صوت در هوا و ρ_G چگالی گاز است.

با افزایش چگالی، سرعت صوت هم افزایش می‌یابد. مخرج در معادله بالا نشان می‌دهد که برای زاویه عمود $S(\theta) = S_0$ است. متغیر S_0 برای $\theta = 0^\circ$ را می‌توان مستقیماً از بسامد تشدید جرم - فنر به دست آورد. برای برخوردهای زاویه‌دار سختی در امتداد زاویه برخورد افزایش می‌یابد. در نتیجه امواج در برخوردهای زاویه‌دار بهتر منتقل می‌شوند. معادله بالا میزان بستگی ویژگی‌های سختی هوا و گاز سنگین را به زاویه برخورد مشخص می‌کند. واضح است که این وابستگی در مورد هوا بیشتر از یک گاز سنگین است.

حرکت جرم - فنر صفحات شیشه‌ای و لایه هوا، با سختی گاز بین جدارها کنترل می‌شود. از آن جایی که سختی این گاز وابسته به زاویه برخورد است، تشدید جرم- فنر هم طبق معادله زیر وابسته به این زاویه خواهد شد:

$$\omega_0 = \sqrt{S(\theta) \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (۴۶-۲)$$

در این حالت (استفاده از یک گاز سنگین مانند SF₆ به جای هوا) علاوه بر این که وابستگی سختی به زاویه برخورد کمتر است، وابستگی بسامد تشدید هم به زاویه برخورد کمتر می‌شود. بدین ترتیب بسامدهای تشدید برای زوایای گوناگون بسیار به هم نزدیک خواهند بود و در نتیجه دره ایجاد شده در منحنی افت صدا برای زوایای گوناگون برخورد در ناحیه تشدید پهنای کمی دارد. در حالتی که فاصله بین دو جدار

با هوا پر شده باشد، بسامد تشدید به میزان بیشتری به زاویه برخورد بستگی دارد. در نتیجه در فواصلی که از هوا استفاده می‌شود، زوایای گوناگون برخورد پهنای دره تشدید را افزایش می‌دهد. به طور کلی در شیشه دوجداره زمانی که از گاز سنگین به جای هوا استفاده شود تشدید در بسامد پایین‌تری اتفاق می‌افتد. به علاوه منحنی صدابندی در این بسامد به علت متمرکز شدن زوایای گوناگون برخورد، عمق بیشتری می‌یابد. همچنین در این حالت در بسامدهای بالاتر از بسامد تشدید، افزایش صدابندی نسبت به حالتی که از هوا پر شده است، از بسامدهای پایین‌تری شروع می‌شود. بدین ترتیب استفاده از یک گاز سنگین‌تر عملکرد صدابندی را در گستره بسامد میانی تقویت می‌کند. می‌توان تأثیر استفاده از گاز سنگین بر روی صدابندی را می‌توان با در نظر گرفتن اینکه چه اتفاقی در بازه تشدید و تقریباً دو هنگام بالاتر از آن رخ می‌دهد، بیان کرد. در بسامدهای بالاتر، دیگر اثرات (به خصوص انطباق) ظاهر می‌شوند که با تئوری‌های بیان شده در این بخش قابل بررسی نیستند.

می‌توان نتیجه گرفت که بهبود صدابندی به سرعت صوت درون فاصله هوایی بستگی دارد. اگرچه استفاده از یک گاز سنگین‌تر با سرعت صوت کمتر باعث تقویت عملکرد صدابندی می‌شود، اما باید توجه داشت که امکان ایجاد این تقویت‌ها نیز محدود است. به نظر نمی‌رسد که استفاده از گازی سنگین‌تر از SF_6 فایده بیشتری داشته باشد. سرعت صوت در هوا 340 متر بر ثانیه و در هگزا فلئور سولفور 149 متر بر ثانیه است. در صورتی که فاصله بین دو جدار، با گازی مانند C_4F_8 پر شود (گازی که از SF_6 نیز سنگین‌تر است)، با این‌که سرعت صوت کاهش می‌یابد (107 متر بر ثانیه) اما بهبود چندانی در صدابندی ایجاد نمی‌شود. به علاوه باید توجه شود که C_4F_8 نیز یک گاز گلخانه‌ای است، بنابراین نمی‌توان آن را به عنوان جایگزینی برای SF_6 در نظر گرفت. پرکردن فاصله بین دو جدار با آرگون، گازی که از هوا سنگین‌تر است، گرچه عایق‌بندی حرارتی را بهبود می‌بخشد اما اثر چندانی بر صدابندی ندارد.

در مجموع براساس داده‌های تجربی می‌توان نتیجه گرفت: که پر کردن شیشه دوجداره با SF₆ به جای هوا تغییرات زیر را ایجاد می‌کند. این نتایج بر مبنای اطلاعات تجربی است.

۱- تشدید جرم - فنر، f_0 ، در بسامد پایین‌تری اتفاق می‌افتد. عمق تشدید هم بیشتر می‌شود.

۲- در گستره بسامدی بالای بسامد تشدید عملکرد صدابندی افزایش می‌یابد. این افزایش نیز به ترکیب گاز بستگی دارد. استفاده از درصد بیشتر SF₆ باعث بهبود صدابندی می‌شود.

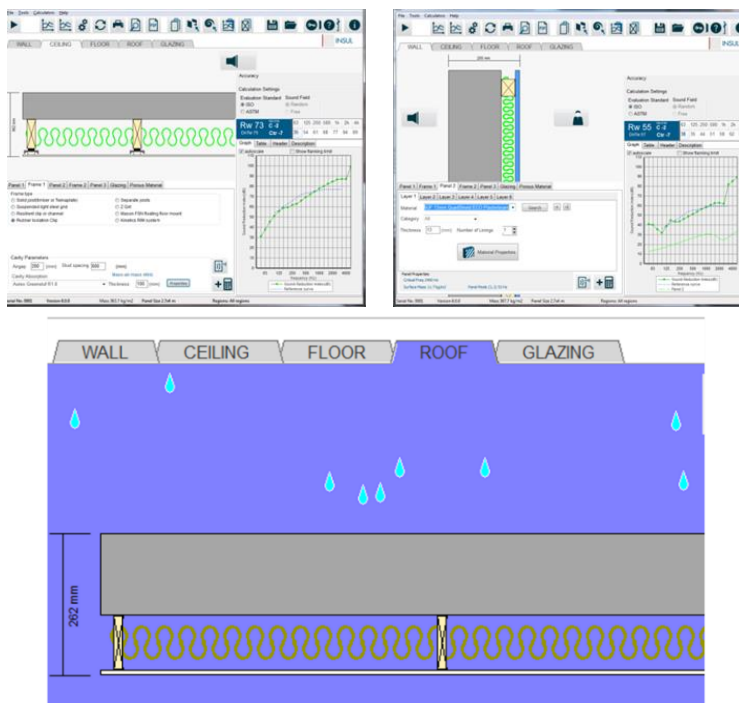
۳- در بسامدهای بالاتر هیچ تفاوت ظاهری بین انواع گوناگون دوجداره، وجود ندارد. بنابراین استفاده از SF₆ هیچ اثری بر صدابندی در ناحیه اطراف و بالای بسامد بحرانی نمی‌گذارد. در بسامد بحرانی منحنی افت مربوط به پنجره دوجداره که از گاز سنگین پر شده بر منحنی صدابندی پنجره دوجداره که از هوا پر شده منطبق می‌گردد. افت صدابندی اطراف بسامد تشدید معمولاً به دلیل افزایش صدابندی که در ناحیه بسامد میانی و یا بالایی رخ می‌دهد، خنثی می‌شود.

نکته حائز اهمیت در بهبود صدابندی یک جداکننده این است که ابتدا باید بررسی شود که صدابندی در برابر چه نوفه‌ای مورد نظر است. به همین دلیل علاوه بر توجه به منحنی صدابندی یک جداکننده مانند شیشه دوجداره نیاز است که منحنی نوفه نیز مورد تحلیل قرار گیرد. به عنوان مثال نوفه ناشی از حمل و نقل ریلی در بسامدهای پایین نسبت به نوفه ناشی از ترافیک جاده تراز کمتری دارد. از آن جا که استفاده از گازهای سنگین صدابندی را در بسامدهای میانی تقویت می‌کند، در نتیجه تأثیر استفاده از آن بر نوفه حمل و نقل ریلی بیش از جاده‌ای است. به همین دلیل برای یک شیشه دوجداره که از گاز سنگین پر شده افزایش مقدار تک عددی صدابندی در نواحی حومه راه آهن بیش از جاده خواهد بود. بنابراین منحنی نوفه نشان می‌دهد که آیا نیاز به استفاده از گاز SF₆ وجود دارد یا خیر.



۲-۴- نرم افزار INSUL

نرم افزار INSUL برنامه‌ای برای پیش‌بینی افت صوتی دیوارها، کف‌ها، سقف‌ها و شیشه‌هاست. همچنین برای تعیین صدای کوبه‌ای و نوفه ناشی از بارش باران بر روی بام کاربرد دارد. این برنامه تخمین خوبی از صدابندی هوابرد (R یا TL) و کوبه‌ای (L_n) در بندهای یک سوم هنگامی و شاخص‌های تک‌عددی آن‌ها (STC یا R_w) و درجه‌بندی کوبه‌ای (IIC یا L_{nw})، برای استفاده در محاسبات انتقال نوفه و نیز طراحی‌های آکوستیکی ارائه می‌دهد.



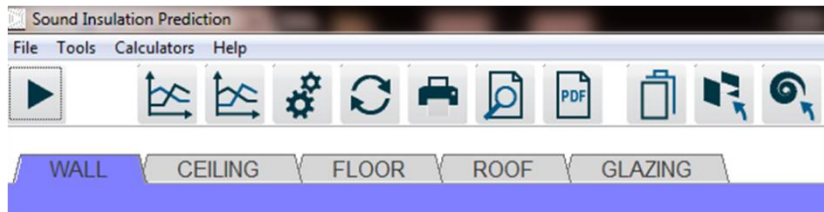
شکل ۲-۲۰ الف) نمونه‌ای از اندازه‌گیری انجام شده با نرم افزار INSUL و ب) شمایی از اندازه‌گیری نوفه باران

از این نرم افزار می‌توان برای سنجش مواد جدید و سیستم‌ها و یا برای ارزیابی اثر ایجاد تغییر در طراحی فضای مورد نظر استفاده کرد. اساس مدل سازی در این نرم

افزار، اطلاعات به دست آمده از مطالعات انجام شده توسط ریندل^۱ و دیگران است. برای جداکننده‌های پیچیده‌تر از کارهای شارپ، کرمر^۲ و دیگران استفاده شده است. برنامه INSUL می‌تواند اثرات مربوط به اندازه‌های محدود که در پیش‌بینی عملکرد نمونه‌های کوچک مانند پنجره‌ها اهمیت دارد و نیز پیش‌بینی عملکرد دیگر عوامل در بسامدهای پایین را در نظر گیرد. اما باید توجه داشت که مانند دیگر ابزارهای شبیه‌سازی، INSUL هم نمی‌تواند جایگزین اندازه‌گیری باشد. با این وجود مقایسه‌های انجام شده با نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد که این نرم‌افزار برای اکثر ساختارها پیش‌بینی‌های قابل اعتمادی (تا حدود ۳dB تفاوت) دارد.

این برنامه از حدود ۱۵ سال پیش در دسترس قرار گرفت و به مرور پیشرفت‌هایی در آن حاصل شد. جدیدترین نسخه این نرم‌افزار در جولای ۲۰۱۴ و با نام نسخه ۸ وارد بازار شده است.

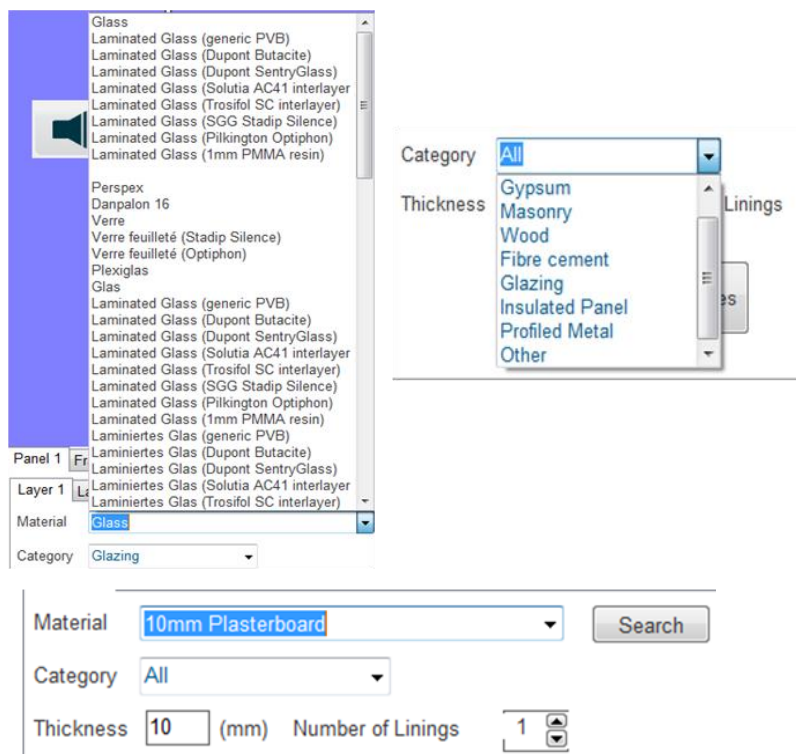
از قابلیت‌های این نرم‌افزار اندازه‌گیری پارامترهای عنوان شده برای جداکننده‌های چندجداره نیز می‌باشد. برای شروع به کار با این نرم‌افزار ابتدا باید نوع ساختار را مطابق شکل ۲-۲۱ از یکی از حالت‌های دیوار، سقف، کف، بام و شیشه تعیین کرد.



شکل ۲-۲۱ شمایی از انتخاب نوع ساختار در نرم‌افزار INSUL

بعد از تعیین نوع ساختار نیاز است که نوع ماده به کار رفته نیز تعیین شود. در INSUL بیش از ۵۰۰ نوع ماده مختلف برای ساختارهای متفاوت وجود دارد. این مواد به ۸ گروه مختلف دسته بندی شده‌اند (شکل ۲-۲۲). این ۸ گروه شامل گچ، سازه‌های بنایی،

چوب، الیاف سیمان، شیشه، پانل نصب شده، پروفیل فلزی و دیگر مواد هستند. در هر گروه انواع مختلفی از آن ماده وجود دارد. به عنوان مثال گروه شیشه شامل شیشه‌های معمولی و شیشه‌های لایه دار (لمینیت) با لایه‌های مختلف می‌باشد. همچنین ضخامت هر ماده را می‌توان بر حسب میلی‌متر تعیین کرد.

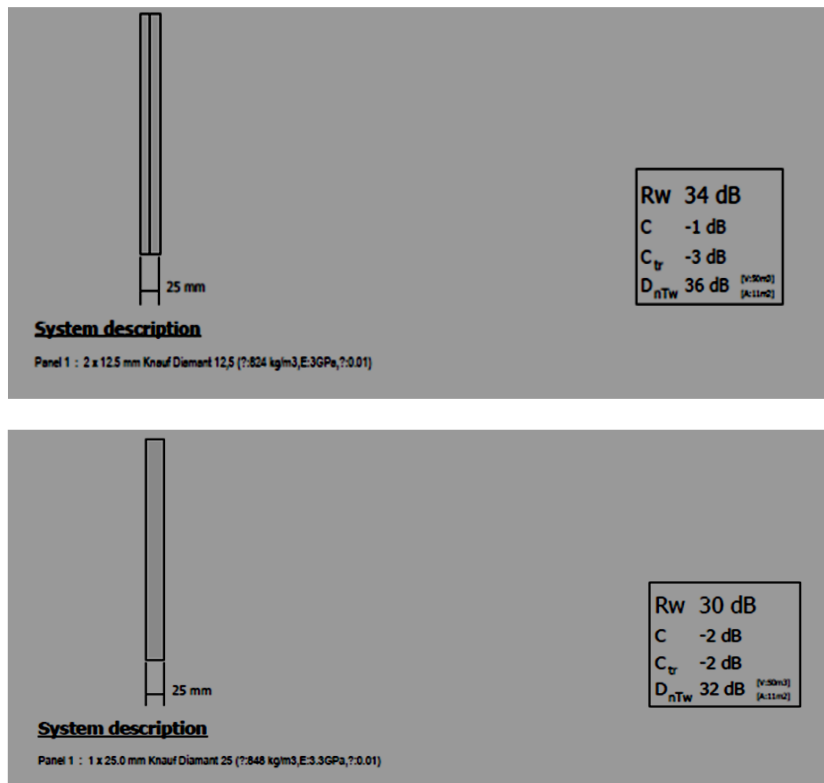


شکل ۲-۲۲ انتخاب مواد و ضخامت لایه‌ها در INSUL

این امکان در نرم‌افزار وجود دارد که بتوان هر ماده را به صورت چند لایه (تا ۲۰ لایه) در کنار هم تعریف کرد. زمانی که چند لایه از یک ماده به یکدیگر وصل شوند معمولاً به صورت یک تک لایه با ضخامت افزایش یافته عمل نمی‌کنند و این موضوع در میزان افت ناشی از این جداکننده اثر گذار است. برای مثال مطابق شکل ۲-۲۳ دو لایه تخته گچی ۱۲/۵ میلی‌متری عملکرد یکسانی مانند یک لایه ۲۵ میلی‌متری ندارند. در

فصل دوم- روش آزمون میانی نظری/ ۵۹

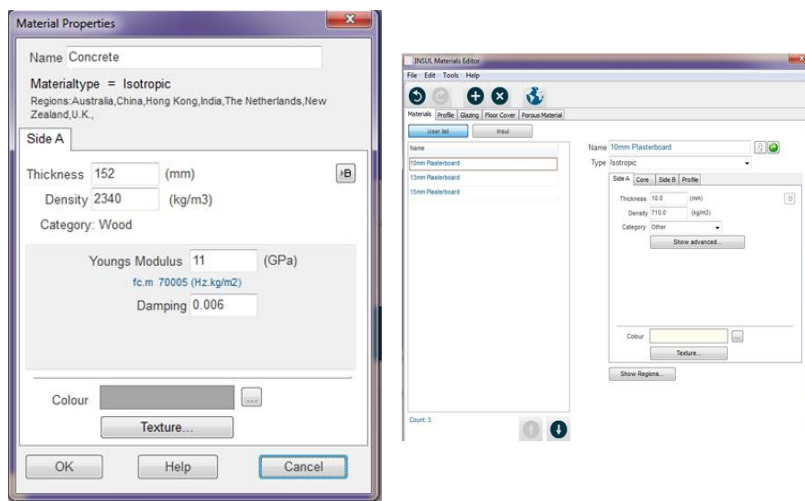
بسامدهای پایین افت عبور هر دو پانل به علت جرم یکسان، برابر است. از طرفی بسامد انطباق دو لایه تخته گچی ۱۲/۵ میلی متری و یک لایه تخته گچی ۱۲/۵ میلی متری یکی است، اما بسامد انطباق تخته گچی ۲۵ میلی متری نصف بسامد انطباق ۱۲/۵ میلی متری است. همچنین در این نرم افزار می توان جداکننده ای تعریف کرد که شامل چند ماده مختلف و هر کدام دارای چند لایه باشند.



شکل ۲-۲۳: نمونه ای از اندازه گیری انجام شده برای تخته گچی به ضخامت های مختلف

یکی از قابلیت های این نرم افزار تعریف موادی به غیر از آنچه که در بانک اطلاعاتی INSUL وجود دارد می باشد. مطابق شکل ۲-۲۴ برای مدل سازی ماده جدید سه پارامتر نیاز است: چگالی ماده، حاصلضرب بسامد بحرانی در جرم سطحی (f_c.m) و میرایی داخلی جداکننده. چگالی را می توان از اندازه گیری مستقیم یا از داده های کارخانه

به دست آورد. پارامتر $f_{c,m}$ از آزمایش مستقیم افت صوتی بر روی ضخامت خاصی از ماده و یا به روش محاسبه از طریق مدول کشسانی ماده تعیین می‌شود. سازندگان مواد مختلف هم اطلاعاتی در مورد مدول کشسانی مواد برای محاسبه استحکام و خمش آن‌ها دارند.



شکل ۲-۲۴ تعریف ماده جدید در نرم افزار INSUL

در جدول‌های ۲-۲ و ۲-۳ مقادیر چگالی، مدول یانگ و میرایی برای انواع شیشه و لمینیت موجود در نرم‌افزار INSUL به همراه شاخص کاهش صدای مربوط به آن‌ها برای ضخامت ۱۰ میلی‌متر آورده شده است.

با توجه به هدف این پروژه و با ذکر این نکته که تنها شیشه‌های لمینیت در صداپندی شیشه‌ها اثر دارند انواع لمینیت‌هایی که در این نرم‌افزار آمده است، بیان شده و برخی از مهمترین انواع آن توضیح داده شده است:

- Generic PVB
- 1mm PMMA resin
- PVB 0.38
- Solutia AC41 interlayer
- Trosifol SC interlayer

- Dupont Sentry glass: این ماده نسبت به مواد لمینیت رایج پنج برابر مستحکم تر و تا ۱۰۰ برابر نرم تر است. این نوع لمینیت در برابر طوفان و انفجار مقاومت خوبی دارد. علاوه بر استحکام این شیشه‌ها شفافیت قابل ملاحظه خود را تا سال‌ها بعد نیز حفظ می‌کنند.
- Dupont Butacite: نوعی PVB آکوستیکی محسوب می‌شود که بیش از Dupont Sentry glass به افت صدا کمک می‌کند.
- SGG stadip silence: این نوع لمینیت که دارای عملکرد آکوستیکی بسیار خوبی است از یک لایه پلاستیکی کاملاً شفاف تشکیل شده است که قابلیت جذب صدا را دارد و تراز صدای عبوری از شیشه را کاهش می‌دهد.
- Pilkington Optiphon: یک لمینیت آکوستیکی با کیفیت بالاست که میزان افت صدای قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌کند بدون آن که بر عبور نور یا عملکرد کوبه‌ای آن اثر تخریبی داشته باشد.
- Optiphon: یک نوع شیشه لمینیت کنترل کننده نوفه است با یک لایه PVB خاص آکوستیکی موجب بهبود عملکرد افت صوتی می‌شود که ضمن ایجاد شیشه‌های نازک‌تر و سبک‌تر، این شیشه‌ها می‌توانند جایگزینی برای سیستم‌های دوپنجره‌ای باشند.
- Sekisui S-LEC acoustic: لایه نازک میانی برای کنترل صدا است که به طور چشمگیری عملکرد افت صوتی را افزایش می‌دهد. این نوع از لمینیت شامل سه لایه نازک است که دو لایه بیرونی معمولی و یک لایه داخلی باشد.



جدول ۲-۲ مقادیر چگالی، مدول یانگ و میرایی برای انواع شیشه به ضخامت ۱۰mm موجود در

نرم افزار INSUL

R _w	میرایی	مدول یانگ	چگالی	نوع شیشه
۳۳	۰٫۰۲۰	۵۲٫۲۲	۲۴۳۰	Glass, Verre, Glas, Szklo, Virio
۳۰	۰٫۰۱۸	۵٫۰۵۸	۱۱۷۰	Perspex, Lucite, Plexiglas 2, Acryglas
۳۰	۰٫۰۳۰	۴٫۹۵۶	۱۱۳۰	Plexiglas 1, Pleksi
۳۳	۰٫۰۲۰	۵۵٫۴۳۶	۲۴۳۰	Vetro

جدول ۳-۲ مقادیر چگالی، مدول یانگ و میرایی برای انواع شیشه لمینیت به ضخامت ۱۰mm

موجود در نرم افزار INSUL

R _w	میرایی	مدول یانگ	چگالی	نوع لمینیت
۳۵/۳۶	۰٫۰۲۰	۴۶	۲۴۳۰	generic PVB, Dupont Butacite, Solutia AC41 interlayer, Trosifol SC interlayer, SGG Stadip Silence, Pilkington Optiphon, 1 mm PMMA resin
۳۵	۰٫۰۲۲	۴۶	۲۴۳۰	Dupont SentryGlass

۲-۵- بررسی افت صوتی نمونه‌های شیشه و پنجره در آزمایشگاه

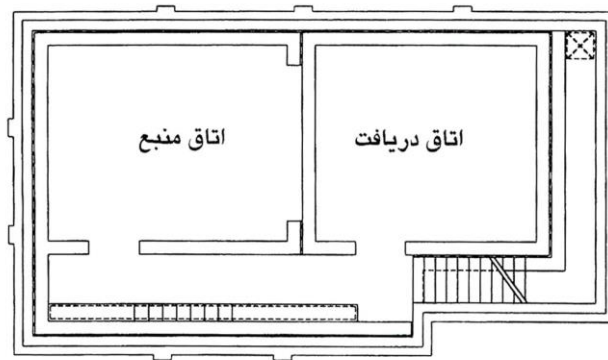
۲-۵-۱- آزمایشگاه آکوستیک مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

در بخش آکوستیک مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، آزمایشگاهی بر اساس استاندارد ملی ایران ۸۵۶۸-۱ (استاندارد بین‌المللی ISO 140-1) ساخته شده است که در آن می‌توان درباره مسائل آکوستیکی ساختمان، پژوهش و سنجش نمود. بخشی از این آزمایشگاه به سنجش صدابندی جدارها در مقابل صدای هوابرد اختصاص دارد (شکل ۲-۲۵). مشخصات این آزمایشگاه به شرح زیر است:

الف: حجم اتاق منبع ۹۸ مترمکعب؛

ب: حجم اتاق دریافت ۱۰۰ مترمکعب؛

ج: سطح باز شو بین دو اتاق برای نصب شیشه و پنجره مورد آزمایش ۱٫۸ مترمربع.



شکل ۲-۲۵ پلان آزمایشگاه صدابندی بخش آکوستیک مرکز تحقیقات راه، مسکن، شهرسازی

۲-۵-۲- تجهیزات اندازه گیری

دستگاه‌هایی که برای آزمایش صدابندی جدار (شیشه و پنجره) در مقابل صدای هوا برد به کار برده می‌شوند، باید بر اساس استانداردهای IEC ساخته شوند. در آزمایشگاه آکوستیک این مرکز، دستگاه‌هایی که بدین منظور مورد استفاده قرار گرفته، شامل موارد زیر است و در بندهای بعدی توضیح داده می‌شود:

- بلندگو (منع تولید صدای هوا برد)؛
- میکروفون (دریافت کننده)؛
- دستگاه تحلیل گر صدا برای اندازه‌گیری تراز صدا و زمان واخنش در اتاق‌های آزمون؛
- پایه دوار برای میکروفون‌ها (جهت میانگین‌گیری مکانی)؛
- کالیبراتور (برای کالیبره کردن سیستم اندازه‌گیری).

۲-۵-۲-۱- سیستم پالس مدل C ۳۵۶۰

سیستم اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیلگر پالس (شکل ۲-۲۶) با قابلیت اتصال به کامپیوتر و نصب نرم‌افزارهای مختلف آکوستیکی و قفل سخت‌افزاری مربوطه و در ضمن قابل حمل بودن، امکان انجام انواع اندازه‌گیری‌های آکوستیکی آزمایشگاهی و میدانی را فراهم می‌نماید. اندازه‌گیری زمان واخنش، تراز صدا، صدابندی هوا برد دیوار، در، پنجره و شیشه، صدابندی کوبه‌ای سقف‌ها و ضریب جذب مطابق با استانداردهای ISO140



در مورد روش‌های اندازه‌گیری صدابندی در ساختمان‌ها و اجزای ساختمانی و ISO 354 در مورد اندازه‌گیری ضریب جذب صدا در اتاق واخنش از جمله آزمایش‌هایی هستند که با این دستگاه انجام می‌شوند. با اتصال دستگاه پالس به کامپیوتر می‌توان تمامی اطلاعات اندازه‌گیری شده را به صورت جدول و نمودار در اختیار داشت و برای تجزیه و تحلیل‌های بعدی به کار برد.



شکل ۲-۲۶ سیستم پالس مدل ۳۵۶۰۰

۲-۲-۵-۲- منابع تولید صدا

- بلندگوی دوازده وجهی مدل Nor276 به همراه تقویت‌کننده مدل Nor280

این بلندگو ساخت شرکت Norsonic نروژ، دارای توان بالا و همه‌جهتی است و کلیه الزامات ارائه شده در استانداردهای ISO 140-3 مربوط به اندازه‌گیری آزمایشگاهی صدابندی هوابرد جدارها، ISO 140-4، اندازه‌گیری میدانی صدابندی هوابرد جدارها و ISO 3382، اندازه‌گیری زمان واخنش را برآورده می‌کند. تراز توان خروجی آن، ۱۲۰ دسی‌بل بر مبنای توان یک پیکو وات برای نوفه صورتی است. این بلندگو می‌تواند به مدت یک ساعت به‌طور پیوسته در بالاترین توان خود کار کند. تقویت‌کننده توان مدل Nor 280 دارای مولد نوفه داخلی است و همراه با بلندگوی ۱۲ وجهی Nor 276 تراز توان صدا به میزان ۱۲۰ دسی‌بل در گستره بسامدی ۵۰ تا ۵۰۰۰ هرتز منتشر می‌کند (شکل ۲-۲۷).



شکل ۲-۲۷ بلندگوی دوازده وجهی مدل Nor276 همراه با تقویت کننده توان مدل Nor280

- منبع صدای تمام جهتی مدل ۴۲۹۶ (OmniPower Omnidirectional Sound Source) به همراه تقویت کننده توان (Power Amplifier Type 2716C) 4296



شکل ۲-۲۸ منبع صدای تمام جهتی مدل ۴۲۹۶ به همراه تقویت کننده توان (Amplifier Type 2716C Power)

این بلندگو ساخت شرکت B&K دانمارک، دارای توان بالا و همه جهتی است و کلیه الزامات ارائه شده در استانداردهای ISO 140-3 مربوط به اندازه گیری آزمایشگاهی صدابندی هوابرد جدارها، ISO 140-4، اندازه گیری میدانی صدابندی هوابرد جدارها و ISO 3382، اندازه گیری زمان واخنش را برآورده می کند.



- منبع صدا مدل ۴۲۲۴ (Sound Source Type 4224)

این منبع صدا ساخت شرکت B&K دانمارک و برای اندازه‌گیری‌های آکوستیکی طرح‌ریزی گردیده و دارای یک بلندگو با کیفیت مناسب، تقویت‌کننده توان صوتی و مولد نوفه است (شکل ۲-۲۸). این منبع با نیروی باتری توان ۱۱۵ دسی‌بل و با نیروی برق توان ۱۱۸ دسی‌بل در گستره بسامدی ۱۰۰ هرتز تا ۴۰۰۰ هرتز را تولید می‌کند. هم‌چنین تقویت‌کننده توان و مولد نوفه صورتی است (شکل ۲-۲۹).



شکل ۲-۲۹ منبع صدا مدل ۴۲۲۴

۲-۵-۳- میکروفون

میکروفون به‌کار رفته در این اندازه‌گیری‌ها میکروفون نیم اینچ میدان آزاد مدل 4190-L-001 است که با پیش‌تقویت‌کننده مدل 2669-L سیستم دریافت‌کننده را تشکیل می‌دهد (شکل ۲-۳۰).

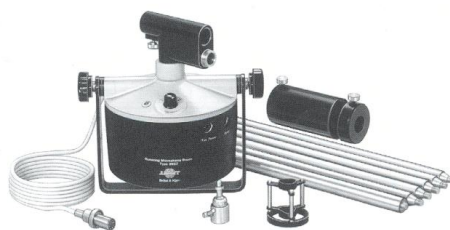
این میکروفون برای اندازه‌گیری‌های دقیق آکوستیکی به‌کار می‌رود و مطابق با مشخصات کلاس یک استاندارد IEC 61672 است.



شکل ۲-۳۰ میکروفون ۱/۲ اینچ مدل 4190-L-001

۲-۵-۲-۴- پایه دوار میکروفون مدل ۳۹۲۳

این دستگاه به‌عنوان تکمیل‌کننده وسایل اندازه‌گیری‌های آکوستیک ساختمانی و توان صوتی طرح‌ریزی شده است که در هنگام آزمایش بر روی یک سه‌پایه نصب می‌گردد (شکل ۲-۳۱). این دستگاه دارای بازویی است که می‌توان طول آن را از ۵۰ تا ۲۰۰ سانتیمتر تغییر داد. موتور آن شامل مدار تغذیه و جک‌های ورودی و خروجی است. زمان گردش بازو به دور خود ۱۶، ۳۲ و ۶۴ ثانیه انتخاب شده است که سطح چرخش بازو را به‌وسیله یک کلاج دنده‌ای در بندهای ده درجه‌ای می‌توان تنظیم کرد.



شکل ۲-۳۱ میکروفون پایه دوار مدل ۳۹۲۳

۲-۵-۲-۵- کالیبراتور تراز صدا مدل ۴۲۳۱

این دستگاه به‌منظور کالیبره کردن ترازسنج صدا و سایر دستگاه‌های اندازه‌گیری آکوستیکی طرح‌ریزی شده است (شکل ۲-۳۲). تراز فشار صوتی کالیبراسیون در بسامد ۱۰۰۰ هرتز، ۹۴ دسی‌بل بر مبنای فشار 2×10^{-5} نیوتون بر مترمربع است.



شکل ۲-۳۲ کالیبراتور تراز صدا مدل ۴۲۳۱



۲-۵-۳- روش اندازه‌گیری شاخص کاهش صدای پنجره و شیشه در آزمایشگاه

۲-۵-۳-۱- نصب پنجره و شیشه

برای انجام آزمایش‌های این پروژه مطابق با استاندارد ملی ایران ۳-۸۵۶۸ از یک دیوار پرکننده با صدابندی بالا بین دو اتاق منبع و دریافت استفاده شده است تا صدای انتقال یافته از طریق این دیوار جداکننده در مقایسه با صدای انتقال یافته از طریق آزمون قابل صرف نظر باشد. مقدار شاخص کاهش صدای وزن یافته این دیوار ۵۳ دسی‌بل اندازه‌گیری شده است. مقطع این دیوار در شکل ۲-۳۳ و مراحل ساخت آن در شکل ۲-۳۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳۳ دیوار دوجداره برای نصب نمونه‌های شیشه و پنجره



شکل ۲-۳۴ مراحل ساخت دیوار دوجداره بین دو اتاق منبع و دریافت

نمونه‌های پنجره در ابعاد 148×123 سانتی‌متر درون دیوار پرکننده نصب می‌گردد. به منظور اطمینان از نصب درست و درزبندی مناسب، ابتدا قاب پنجره در بازشو قرار داده شده و سپس شیشه‌ها در آن جا داده می‌شوند. سپس پیرامون آن ابتدا توسط فوم پلی‌یورتان و سپس توسط چسب سیلیکون درزبندی می‌شود. نسبت عمق تورفتگی دهانه در دو طرف پنجره مطابق با استاندارد، تقریباً ۲ به ۱ است. به منظور تثبیت شرایط محیطی، آزمون‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق آزمون نگه داری می‌شوند و اندازه‌گیری پس از سپری شدن این مدت انجام می‌پذیرد. پنجره پیش از آزمون حداقل ۵ مرتبه باز و بسته می‌شود. نمونه‌ای از مراحل نصب یک پنجره دوجداره درون بازشوی آزمون، در تصاویر شکل ۲-۳۵ نشان داده است.



نصب قاب در بازشوی آزمون



پیچ کردن قاب پنجره به دیوار



استفاده از فیلر برای رگلاژ پنجره



جاگذاری شیشه‌ها درون قاب پنجره



تکمیل مراحل نصب



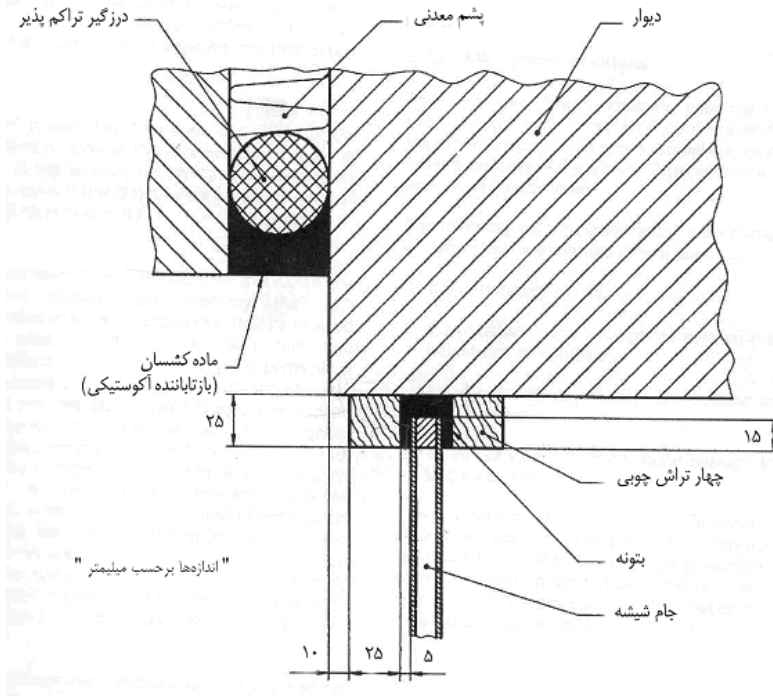
درزبندی پیرامون پنجره با چسب سیلیکون

شکل ۲-۳۵ مراحل نصب پنجره در بازشوی آزمون

مطابق با پیوست الف استاندارد ملی ایران ۳-۸۵۶۸ نمونه‌های شیشه در ابعاد 124×149 سانتیمتر درون بازشوی آزمون به ابعاد 125×150 سانتیمتر در یک دیوار پرکننده دوجداره با صدابندی بالا نصب شده‌اند. برای ثابت نگه‌داشتن آزمون، از دو چهارتراش چوبی (25 میلی‌متر \times 25 میلی‌متر) استفاده شده است و پیرامون شیشه ابتدا توسط فوم و سپس کلیه درزها توسط چسب سیلیکون درزبندی گردیده است. نسبت عمق

فصل دوم- روش آزمون میانی نظری ۷۱

تورفتگی دهانه در دو طرف شیشه مطابق با استاندارد، تقریباً ۲ به ۱ است. طرح شماتیکی از طریقه نصب شیشه درون بازشوی آزمون در شکل ۲-۳۶ و مراحل نصب واقعی آن در تصاویر شکل ۲-۳۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳۶ طرح شماتیک از نصب جام شیشه



تزریق فوم در پیرامون چهارتراش چوبی برای درزبندی



تزریق فوم در پیرامون شیشه برای درزبندی



نصب چهارتراش دوم در طرف دیگر شیشه



درزبندی نهایی پیرامون شیشه با چسب سیلیکون

شکل ۲-۳۷ مراحل نصب جام شیشه در بازشوی آزمون

همان گونه که در شکل ۲-۳۸ مشاهده می شود، براساس استاندارد، بازشوی نصب شیشه به صورت نامتقارن در دیوار دوجداره قرار گرفته است.



شکل ۲-۳۸ اندازه گیری تراز صدا در دو اتاق برای محاسبه صدابندی شیشه

۲-۳-۵-۲- اندازه گیری تراز صدای میانگین در اتاق منبع و دریافت

براساس استاندارد ملی ایران ۳-۸۵۶۸ (استاندارد بین المللی ISO 140-3) نوفه یکنواخت درگستره بسامدی موردنظر و دارای بیناب پیوسته در اتاق منبع، تولید و توسط میکروفون با پایه دوار اندازه گیری می گردد (L_1). همین نوفه پس از تولید، در اتاق دریافت اندازه گیری می گردد (L_2).

در این اندازه گیری ها حداقل فواصل زیر رعایت شده است:

۰٫۷ متر بین موقعیت های میکروفون؛

۰٫۷ متر بین موقعیت میکروفون و مرزهای اتاق یا پخشگرها؛

۱٫۰ متر بین موقعیت میکروفون و منبع صدا؛

۱٫۰ متر بین موقعیت میکروفون و جدار مورد آزمون؛

۰٫۵ متر فاصله منبع صدا از کلیه سطوح اتاق.

شعاع جاروب میکروفون پایه دوار، ۱۰۰ سانتیمتر با زاویه ۳۰ حداقل ۱۰ درجه نسبت به سطح افق و مدت زمان میانگین‌گیری ۳۰ ثانیه بوده است. صدا در اتاق دریافت در بسامدهای مورد اندازه‌گیری حداقل ۱۵ دسی‌بل بیشتر از نوفه زمینه است. پیش از انجام دادن هر آزمون، سیستم اندازه‌گیری به وسیله دستگاه کالیبراتور تنظیم می‌شود. اندازه‌گیری‌ها در گستره بسامد مرکزی بندهای یک‌سوم هنگامی برحسب هر تراز انجام شده است.

۱۰۰	۱۲۵	۱۶۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۱۵
۴۰۰	۵۰۰	۶۳۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۲۵۰
۱۶۰۰	۲۰۰۰	۲۵۰۰	۳۱۵۰	۴۰۰۰	۵۰۰۰

۲-۳-۳-۳- روش اندازه‌گیری زمان واخنش در اتاق دریافت

روش اندازه‌گیری زمان واخنش در اتاق دریافت بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۱۰۹۴۵ (ISO 354) انجام می‌گیرد که علاوه بر نکاتی که در بند ۳-۳-۱ بیان شده، نکات زیر نیز در آن رعایت گردیده است:

الف- زمان واخنش بر اساس تنزل یافتن صدا بین ۵- تا ۳۵- دسی‌بل نسبت به تراز صدای پخش شده در اتاق دریافت، مورد محاسبه قرار گرفته است.

ب- زمان واخنش در سه نقطه اندازه‌گیری شده و مقدار میانگین، مبنای محاسبه سطح معادل جذب کننده صدا می‌باشد.

ج- منبع نوفه، نوفه تصادفی است که هنگام پخش، تراز آن باید حداقل ۴۰ دسی‌بل بیشتر از نوفه زمینه باشد.

۲-۳-۳-۴- روش محاسبه شاخص کاهش صدای جدار در آزمایشگاه

با اندازه‌گیری تراز صدا در دو اتاق آزمون و زمان واخنش و با وارد نمودن حجم اتاق و سطح بازشوی درون دیوار، دستگاه تجزیه و تحلیل‌گر آکوستیک ساختمانی، شاخص کاهش صدا را محاسبه و نتایج را در هر بسامد نشان می‌دهد. شاخص کاهش صدا (R) یا افت صوتی (TL) در هر بسامد با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$TL \text{ یا } R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (2-28)$$

که در آن :

L_1 : تراز میانگین صدا در اتاق منبع، به دسی بل؛

L_2 : تراز میانگین صدا در اتاق دریافت، به دسی بل؛

A : سطح معادل جذب کننده در اتاق دریافت، به مترمربع؛

S : سطح پنجره مورد آزمایش، به مترمربع.

۲-۵-۳-۵-۲ درجه بندی صدابندی جدار در مقابل صدای هواپرد

برای مشخص نمودن صدابندی یک جدار در مقابل صدای هواپرد به وسیله یک عدد تنها که گویای صدابندی جدار باشد نمودار افت صوتی جدار را درجه بندی می نماید. برای این درجه بندی از سوی مؤسسه استاندارد جهانی (ISO 717-1) روشی تدوین گردیده است که نمودار شاخص کاهش صدای اندازه گیری شده را با نمودار مبنا مقایسه و ارزیابی می کنند. این نمودار بر اساس مقادیر مندرج در جدول ۱-۱ و نمودار شکل ۳-۱ نمایش داده شده است.

برای مقایسه، نمودار مبنا را در بندهای یک دسی بل به سوی نمودار اندازه گیری شده باید آن چنان لغزاند تا شرایط زیر برقرار گردد:

الف: میانگین انحراف ناخواسته که از تقسیم مجموع انحراف های ناخواسته بر مجموع تعداد بسامدهای مورد اندازه گیری بدست می آید، بزرگ تر از یک و کمتر از دو دسی بل باشد. انحراف ناخواسته به انحرافات گفته می شود که مقادیر اندازه گیری شده شاخص کاهش صدا کمتر از مقادیر نمودار مبنا باشد.

ب: حداکثر انحراف ناخواسته نباید بیشتر از هشت دسی بل برای هر بسامد مرکزی بندهای یک سوم هنگامی باشد.

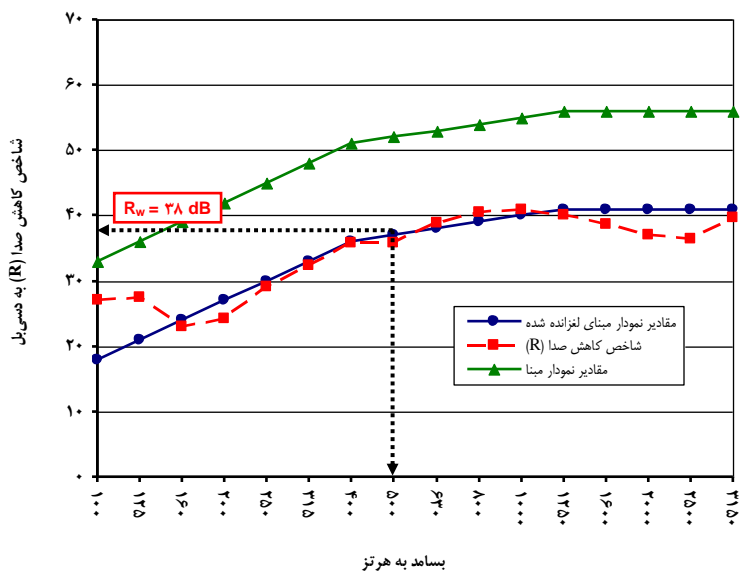
مقدار عددی نمودار مبنای لغزنده شده در بسامد ۵۰۰ هرتز برحسب دسی بل به عنوان شاخص کاهش صدای وزن یافته (R_w) برای آن جدار می باشد.

به‌عنوان مثال مقادیر شاخص کاهش صدای یک نمونه پنجره UPVC با شیشه دوجداره ۶-۱۲-۴ در جدول ۳-۲ و نمودار آن در شکل ۲-۳۹ ارائه شده است.

جدول ۳-۲ نتایج اندازه‌گیری صدابندی هوابرد برای یک نمونه پنجره UPVC

با شیشه دوجداره ۶-۱۲-۴

مقادیر نمودار مبنای لغزانده شده به دسی‌بل	مقادیر مبنای صدای هوابرد به دسی‌بل	شاخص کاهش صدا به دسی‌بل (R)	بسامد مرکزی بندهای یک‌سوم هنگامی به هرتز
۱۹	۳۳	۲۷٫۰	۱۰۰
۲۲	۳۶	۲۷٫۴	۱۲۵
۲۵	۳۹	۲۳٫۱	۱۶۰
۲۸	۴۲	۲۴٫۱	۲۰۰
۳۱	۴۵	۲۹٫۰	۲۵۰
۳۴	۴۸	۳۲٫۳	۳۱۵
۳۷	۵۱	۳۵٫۹	۴۰۰
۳۸	۵۲	۳۵٫۸	۵۰۰
۳۹	۵۳	۳۸٫۸	۶۳۰
۴۰	۵۴	۴۰٫۵	۸۰۰
۴۱	۵۵	۴۱٫۰	۱۰۰۰
۴۲	۵۶	۴۰٫۱	۱۲۵۰
۴۲	۵۶	۳۸٫۶	۱۶۰۰
۴۲	۵۶	۳۷٫۱	۲۰۰۰
۴۲	۵۶	۳۶٫۳	۲۵۰۰
۴۲	۵۶	۳۹٫۶	۳۱۵۰
-	-	۴۱٫۴	۴۰۰۰
-	-	۴۴٫۸	۵۰۰۰
$R_W = 38 \text{ dB}$			شاخص کاهش صدای وزن‌یافته به دسی‌بل



شکل ۲-۳۹ نمودار شاخص کاهش صدا برای یک نمونه پنجره UPVC با شیشه

دوجداره ۴-۱۲-۶

فصل سوم

یافته‌های پژوهش

به منظور بررسی نحوه عملکرد آکوستیکی شیشه‌ها و پنجره‌ها، آزمون‌هایی در آزمایشگاه صدا‌بندی بخش آکوستیک مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی بر روی شیشه‌های تک‌جداره ساده و لمینیت، شیشه‌های دوجداره ساده و لمینیت و نیز بر روی پنجره‌های دوجداره انجام شده است. تمامی شیشه‌های مورد آزمون از نوع فلوت و لمینیت مورد استفاده از نوع PVB می‌باشند. در این پژوهش به منظور سهولت نمایش نوع آزمون، اطلاعات مربوط به آزمون‌ها برحسب میلی‌متر و بر مبنای ضخامت شیشه‌ها، لایه لمینیت و فاصله بین شیشه‌ها (در واحدهای دوجداره)، با استفاده از یک کد ساده توصیفی مشخص شده است. به عنوان مثال در این کد شیشه ۶ میلی‌متری که در وسط آن یک لایه لمینیت به ضخامت ۰٫۳۸ میلی‌متر استفاده شده به صورت $۳+۰٫۳۸+۳$ و در صورتی که لایه لمینیت مورد استفاده لمینیت آکوستیکی باشد به صورت $۳+۰٫۳۸*+۳$ نشان داده شده است. همچنین در ساختارهای دوجداره، به عنوان مثال دو شیشه به ضخامت‌های ۴ و ۶ میلی‌متر که فاصله هوایی بین آن‌ها ۱۲ میلی‌متر است به صورت ۶-۱۲-۴ نشان داده شده است.

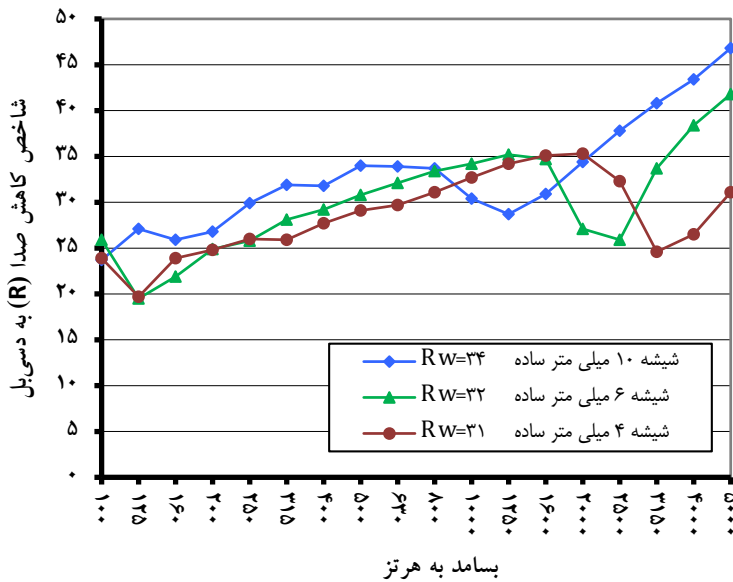
۱-۳- شیشه‌های تک‌جداره

۱-۱-۳- شیشه‌های تک‌جداره ساده

برای بررسی نحوه عملکرد آکوستیکی شیشه‌های تک‌جداره ساده، آزمون افت صوتی بر روی شیشه‌هایی به ضخامت‌های ۴، ۶ و ۱۰ میلی‌متر انجام شده است. نتایج مربوط به این اندازه‌گیری‌ها در جدول ۱-۳ و نمودارهای شکل ۱-۳ ارائه شده است.

جدول ۱-۳ مقادیر صدابندی شیشه‌های تک‌جداره ساده

شاخص کاهش صدا به دسی بل (R)			بسامد مرکزی بندهای یک سوم هنگامی (هرتز)
۱۰ mm	۶ mm	۴ mm	
۲۳٫۷	۲۵٫۹	۲۳٫۹	۱۰۰
۲۷٫۱	۱۹٫۵	۱۹٫۷	۱۲۵
۲۵٫۹	۲۱٫۹	۲۳٫۹	۱۶۰
۲۶٫۸	۲۴٫۹	۲۴٫۸	۲۰۰
۲۹٫۹	۲۵٫۸	۲۶٫۰	۲۵۰
۳۱٫۹	۲۸٫۱	۲۵٫۹	۳۱۵
۳۱٫۸	۲۹٫۲	۲۷٫۷	۴۰۰
۳۴٫۰	۳۰٫۸	۲۹٫۱	۵۰۰
۳۳٫۹	۳۲٫۱	۲۹٫۷	۶۳۰
۳۳٫۷	۳۳٫۴	۳۱٫۱	۸۰۰
۳۰٫۴	۳۴٫۲	۳۲٫۷	۱۰۰۰
۲۸٫۷	۳۵٫۲	۳۴٫۲	۱۲۵۰
۳۰٫۹	۳۴٫۷	۳۵٫۱	۱۶۰۰
۳۴٫۴	۲۷٫۱	۳۵٫۳	۲۰۰۰
۳۷٫۸	۲۵٫۹	۳۲٫۳	۲۵۰۰
۴۰٫۸	۳۳٫۷	۲۴٫۶	۳۱۵۰
۴۳٫۴	۳۸٫۴	۲۶٫۵	۴۰۰۰
۴۶٫۸	۴۱٫۸	۳۱٫۱	۵۰۰۰
۳۴	۳۲	۳۱	شاخص کاهش صدای وزن‌یافته بر حسب دسی بل، R_w



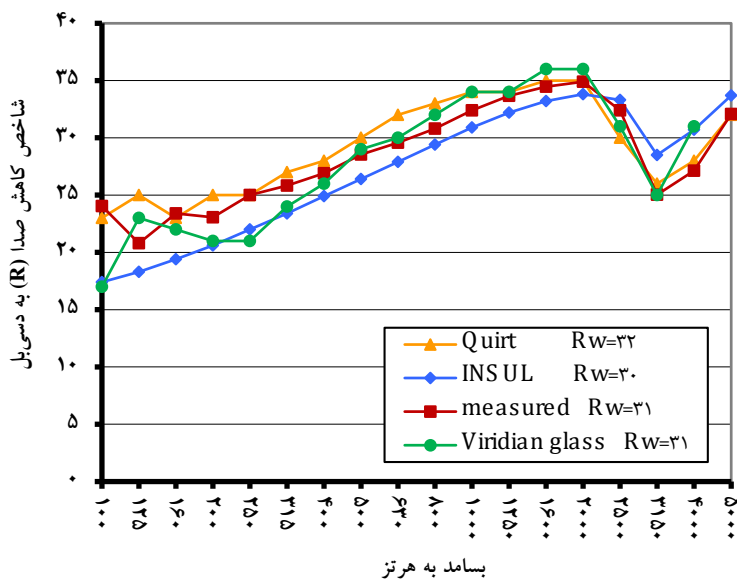
شکل ۳-۱ مقایسه نمودارهای افت صوتی شیشه تک جداره ساده با ضخامت‌های مختلف

بررسی نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت شیشه‌ها، افت صوتی افزایش پیدا می‌کند. همچنین ملاحظه می‌شود که افزایش ضخامت، عمق دره را در بسامد بحرانی کاهش می‌دهد. این کاهش به دلیل افزایش جرم و در نتیجه آن، افزایش میرایی در ناحیه انطباق است. نتیجه دیگری که از مقایسه نمودارهای افت صوتی شیشه با ضخامت‌های مختلف بدست می‌آید این است که بسامد بحرانی با افزایش ضخامت به سمت بسامدهای پایین‌تر جابه‌جا می‌شود. این موضوع ناشی از این واقعیت است که با افزایش ضخامت، سختی خمشی افزایش یافته و مطابق با معادله ۲-۲۰، با افزایش سختی خمشی، بسامد انطباق کاهش می‌یابد.

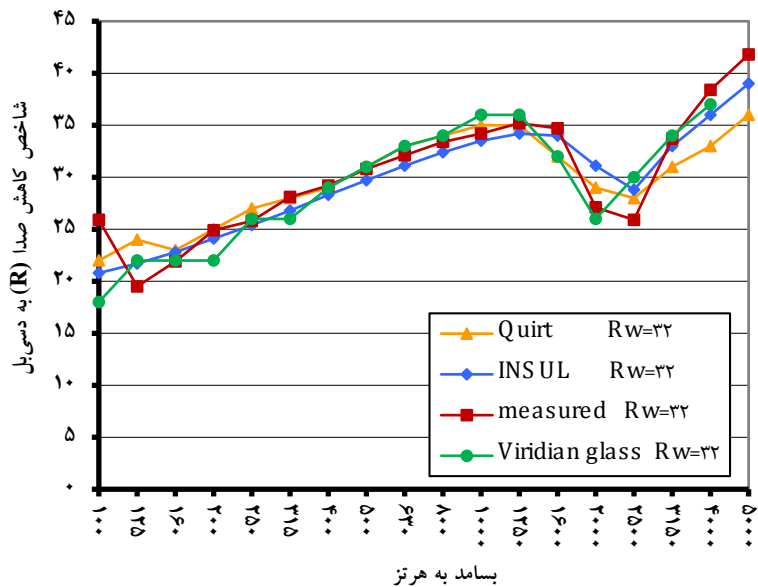
نتایج به دست آمده از آزمون‌های انجام شده بر روی شیشه‌های تک‌جداره ساده، با نتایج آزمایشگاهی در دیگر تحقیقات و همچنین برنامه نرم‌افزاری INSUL مقایسه شده است. این مقایسه در نمودارهای شکل ۳-۲ تا ۳-۴ به ترتیب برای شیشه‌های ساده با ضخامت‌های ۴، ۶ و ۱۰ میلی‌متری نشان داده شده است. برای هر سه نمونه روند نمودارها تطبیق نسبتاً خوبی دارند. در شیشه ۴ میلی‌متری بسامد انطباق در تمام



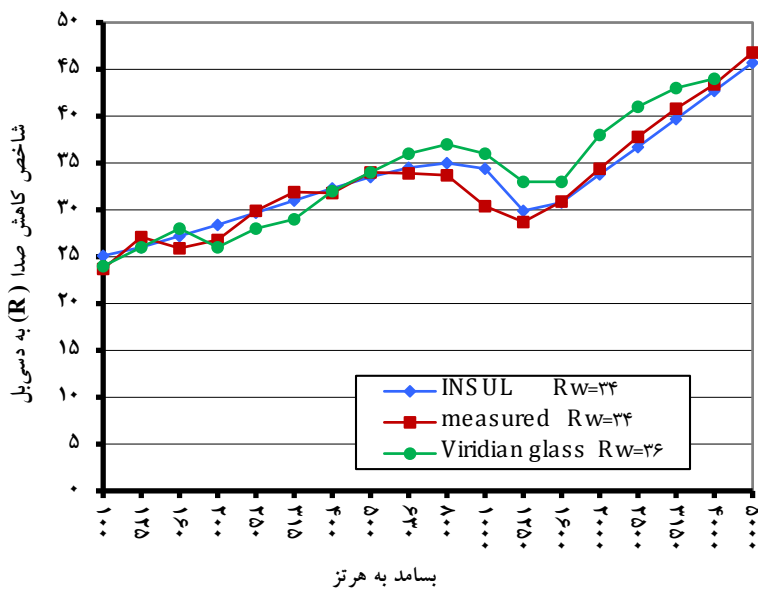
نمودارها برابر با ۳۱۵۰ هرتز است. مقدار شاخص کاهش صدا در این بسامد در آزمون انجام شده برابر با ۲۵ دسی‌بل به دست آمده است که این مقدار در آزمایش‌های انجام شده توسط Qirt و Viridian glass به ترتیب برابر با ۲۶ و ۲۵ دسی‌بل است. به همین صورت در شیشه ۶ میلی‌متری مشاهده می‌شود که به جز نتایج Viridian glass، بسامد انطباق اندازه‌گیری شده و محاسبه شده با نرم‌افزار INSUL در ۲۵۰۰ هرتز رخ می‌دهد. در مورد شیشه ۱۰ میلی‌متری نیز مشاهده می‌شود که بسامد انطباق محاسبه شده با نرم‌افزار INSUL و اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه آکوستیک برابر با ۱۲۵۰ هرتز است.



شکل ۳-۲ مقایسه نتایج تجربی و INSUL برای شیشه تک جداره ساده به ضخامت ۴ میلی‌متر



شکل ۳-۳ مقایسه نتایج تجربی و INSUL برای شیشه تک جداره ساده به ضخامت ۶ میلی‌متر



شکل ۳-۴ مقایسه نتایج تجربی و INSUL برای شیشه تک جداره ساده به ضخامت ۱۰ میلی‌متر

به طور کلی باید توجه داشت که عوامل گوناگونی در اندازه‌گیری افت صوتی هوابرد یک جداکننده نقش دارند. در صورتی که هر کدام از آن‌ها تغییری داشته باشند ممکن است نتایج نیز تا حدودی تغییر یابند. به همین دلیل اندکی تفاوت در نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مختلف و نیز در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی قابل انتظار است.

این عوامل را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

(۱) در بسامدهای پایین، تراگسیل صدا به شدت تحت تأثیر تشدیدهای جداکننده است و بسامدهای این تشدید به ابعاد آن وابسته است.

(۲) وابستگی اثرات میرایی و پراش به مواد و نحوه درزبندی، تأثیر زیادی بر تراگسیل صدا در کل بازه بسامدی می‌گذارد.

(۳) از آن جایی که نتایج موجود هم برای پنجره‌های بازشو و هم ثابت می‌باشد، باید توجه داشت که درزهای اطراف قسمت‌های بازشو می‌تواند بر مشخصه‌های تراگسیل صدا تأثیر بگذارد.

(۴) نوع آزمایشگاه و هندسه‌های مختلف اتاق‌ها بر روی جفت‌شدگی^۱ از میدان صدای واخشی در اتاق منبع تا نمونه و از نمونه تا میدان واخشی در اتاق دریافت اثر می‌گذارد. همچنین اندازه و مکان پخشگر در اتاق‌ها و مکان منبع نوفه و میکروفون‌ها بر این جفت‌شدگی تأثیرگذار است.

۳-۱-۲- شیشه‌های تک‌جداره لمینیت

باید توجه داشت که شیشه‌های فلوت ساده عملکرد آکوستیکی ضعیفی دارند، بخصوص وقتی که با دیوارهای صلب مقایسه می‌شوند. با توجه به قانون جرم استفاده از جدارهای ضخیم عملکرد آکوستیکی را بهبود می‌بخشد اما اشکال این موضوع این است که وزن و ضخامت شیشه‌ها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

برای جلوگیری از این مشکل در شیشه‌های فلوت ساده، می‌توان از شیشه‌های لمینیت استفاده کرد. در این نوع شیشه‌ها در میان دو جام شیشه، یک لایه میانی کشسان وجود دارد. این لایه میانی می‌تواند یک یا چند لایه PVB، لایه رزین اکریلیک و ... باشد.

با استفاده از لایه میانی حرکت جام شیشه‌ای تغییر می‌کند. دو جام شیشه‌ای طوری توسط لایه میانی به هم متصل می‌شوند که دیگر مانند یک صفحه شیشه‌ای تکی حرکت نمی‌کنند. مجموع جام‌ها به عنوان دو صفحه متصل به هم حرکت می‌کنند که هر کدام نصف ضخامت کل را دارند و دیگر مانند یک صفحه تکی با ضخامت قبلی نیستند. این کاهش ضخامت (تقسیم یک جام به دو جام)، بسامد بحرانی را به سمت بسامدهای بالاتر جابه‌جا می‌کند. به علاوه عمق دره انطباق طبق این حقیقت که لایه میانی می‌تواند حرکت صفحات را میرا کند، کاهش می‌یابد.

بنابراین نتیجه دو وجهی خواهد بود: بسامد بحرانی بالاتر می‌رود و منجر می‌شود که بازه انطباق هم به سمت بسامدهای بالاتر جابه‌جا شود. همچنین میرایی ناشی از لایه میانی باعث می‌شود اثر تخریبی انطباق بر افت صدا کاهش یابد. میزان بهبود صدابندی زمانی که از شیشه لمینیت استفاده می‌شود، نسبت به شیشه ساده به نوع لایه میانی بستگی دارد.

استفاده از یک لایه PVB به عنوان لایه کشسان میانی در شیشه‌های لمینیت نسبت به شیشه‌های ساده باعث می‌شود صدابندی در بازه انطباق کمتر افت کند. بدین ترتیب صدابندی در بازه انطباق بیشتر خواهد شد، بهبود در این ناحیه می‌تواند باعث یک بهبود کلی در صدابندی شود.

اگر از رزین آکلریک به عنوان لایه میانی استفاده شود، پدیده انطباق در بسامدهای بالاتر رخ می‌دهد. همچنین صدابندی در بسامدهای پایین‌تر هم تا حدی افزایش می‌یابد.

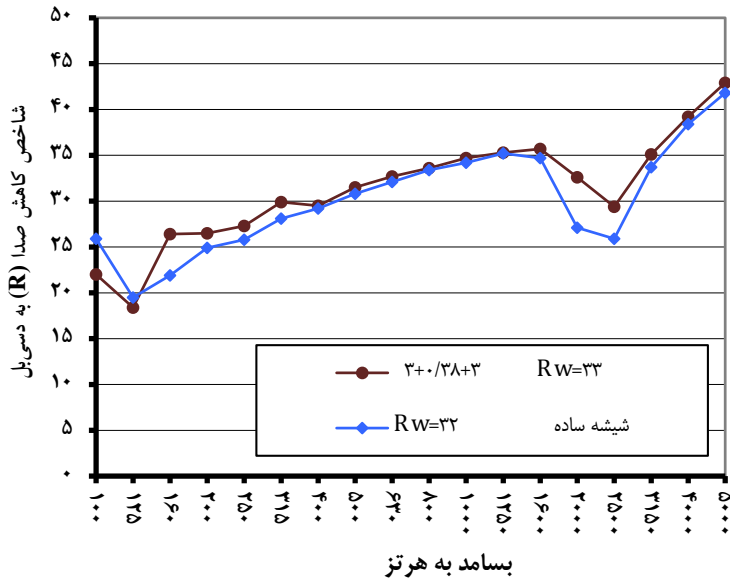
برای بررسی اثر لمینیت کردن، شیشه لمینیت با ضخامت‌های متفاوت (هم در خصوص جام‌های شیشه و هم لایه لمینیت میان آن‌ها) مورد آزمون قرار گرفت. مقادیر افت صوتی شیشه‌های تک‌جداره لمینیت به ضخامت ۶، ۸ و ۱۲ میلی‌متر با یک لایه میانی PVB به ضخامت ۰/۳۸ در جدول ۳-۲ نشان داده شده است.



جدول ۲-۳ مقادیر صدابندی شیشه‌های تک جداره لمینیت

شاخص کاهش صدا به دسی بل (R)			بسامد مرکزی بندهای یک سوم هنگامی (هرتز)
(۶+۰٫۳۸+۶)	(۴+۰٫۳۸+۴)	(۳+۰٫۳۸+۳)	
۲۴٫۵	۲۳٫۵	۲۲٫۰	۱۰۰
۲۹٫۳	۲۵٫۰	۱۸٫۴	۱۲۵
۳۰٫۹	۲۶٫۳	۲۶٫۴	۱۶۰
۳۱٫۵	۲۶٫۴	۲۶٫۵	۲۰۰
۳۲٫۲	۲۸٫۳	۲۷٫۳	۲۵۰
۳۴٫۲	۳۰٫۳	۲۹٫۹	۳۱۵
۳۳٫۸	۳۱٫۱	۲۹٫۵	۴۰۰
۳۵٫۶	۳۲٫۵	۳۱٫۵	۵۰۰
۳۵٫۲	۳۳٫۹	۳۲٫۷	۶۳۰
۳۲٫۸	۳۳٫۴	۳۳٫۶	۸۰۰
۳۱٫۷	۳۴٫۷	۳۴٫۶	۱۰۰۰
۳۱٫۵	۳۳٫۵	۳۵٫۳	۱۲۵۰
۳۵٫۶	۳۰٫۴	۳۵٫۷	۱۶۰۰
۳۸٫۸	۳۰٫۸	۳۲٫۶	۲۰۰۰
۴۲٫۵	۳۵٫۵	۲۹٫۴	۲۵۰۰
۴۵٫۵	۳۹٫۵	۳۵٫۱	۳۱۵۰
۴۹٫۳	۴۲٫۶	۳۹٫۲	۴۰۰۰
۵۱٫۹	۴۸٫۴	۴۲٫۹	۵۰۰۰
۳۶	۳۴	۳۳	شاخص کاهش صدای وزن یافته بر حسب دسی بل، R _w

در شکل ۳-۵ نمودار افت صوتی شیشه تک‌جداره ۶ میلی‌متری ساده و لمینیت با هم مقایسه شده‌اند.



شکل ۳-۵ مقایسه نمودار افت صوتی شیشه تک‌جداره لمینیت و ساده به ضخامت ۶ میلی‌متر

همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۳-۵ دیده می‌شود و طبق آنچه پیش از این نیز ذکر شد، به طور کلی لمینیت کردن شیشه با استفاده از لایه PVB باعث بهبود صدابندی در تمام گستره بسامدی می‌شود. این بهبود در ناحیه انطباق چشمگیرتر است ولی تأثیری در جابجایی بسامد انطباق ندارد.

در بررسی‌های بعدی تأثیر افزایش ضخامت شیشه‌های لمینیت مورد مطالعه قرار گرفت. در شکل ۳-۶ نمودارهای مربوط به این اندازه‌گیری‌ها نشان داده شده است. همچنین در جداول ۳-۳ و ۳-۴ مقادیر افت صوتی شیشه‌های لمینیت به ضخامت ۱۶، ۱۸ و ۲۰ میلی‌متر با لایه‌های میانی به ضخامت ۱/۱۴ و ۱/۵۲ میلی‌متر و در شکل‌های ۳-۷ تا ۳-۸ نیز نمودارهای مربوط به این اندازه‌گیری‌ها نشان داده شده است. همانند نتایجی که از



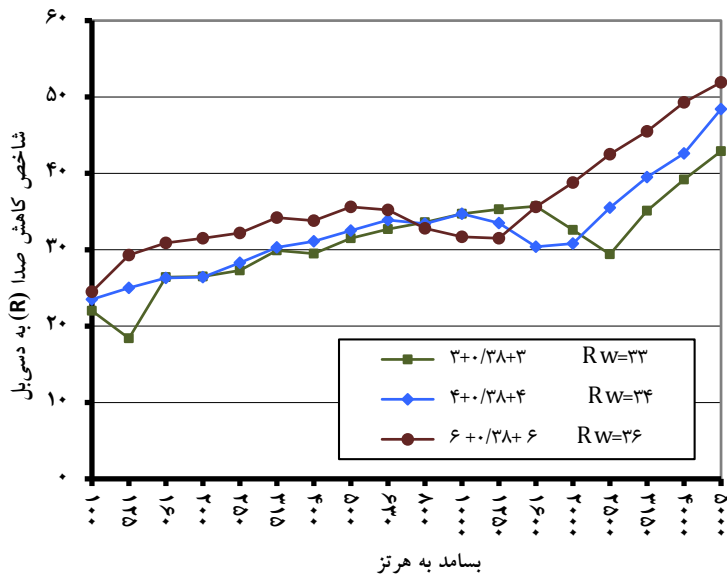
شیشه‌های تک‌جداره ساده به‌دست آمد، با افزایش ضخامت شیشه‌های تک‌جداره لمینیت، صدابندی افزایش می‌یابد.

جدول ۳-۳ مقادیر صدابندی شیشه‌های تک‌جداره لمینیت

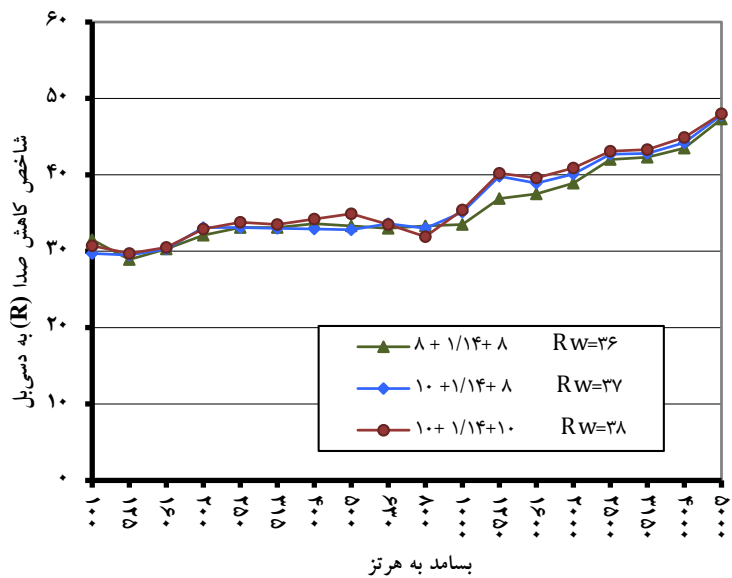
شاخص کاهش صدا به دسی بل (R)			بسامه مرکزی بندهای
(۸+۱,۵۲+۸)	(۱۰+۱,۱۴+۱۰)	(۸+۱,۱۴+۸)	یک سوم هنگامی (هرتز)
۲۸,۰	۳۰,۷	۳۱,۵	۱۰۰
۲۸,۵	۲۹,۷	۲۸,۹	۱۲۵
۳۱,۰	۳۰,۵	۳۰,۳	۱۶۰
۳۳,۱	۳۲,۹	۳۲,۱	۲۰۰
۳۳,۵	۳۳,۸	۳۳,۱	۲۵۰
۳۳,۳	۳۳,۵	۳۳,۱	۳۱۵
۳۳,۱	۳۴,۲	۳۳,۶	۴۰۰
۳۳,۰	۳۴,۹	۳۳,۳	۵۰۰
۳۳,۰	۳۳,۵	۳۳,۰	۶۳۰
۳۲,۴	۳۱,۹	۳۳,۳	۸۰۰
۳۳,۸	۳۵,۴	۳۳,۵	۱۰۰۰
۳۷,۲	۴۰,۲	۳۶,۹	۱۲۵۰
۳۷,۸	۳۹,۶	۳۷,۵	۱۶۰۰
۳۹,۰	۴۰,۹	۳۸,۹	۲۰۰۰
۴۱,۸	۴۳,۱	۴۲,۰	۲۵۰۰
۴۲,۴	۴۳,۳	۴۲,۳	۳۱۵۰
۴۴,۴	۴۴,۹	۴۳,۵	۴۰۰۰
۴۷,۱	۴۸,۰	۴۷,۳	۵۰۰۰
۳۶	۳۸	۳۶	شاخص کاهش صدای وزن‌یافته بر حسب دسی بل، R_w

جدول ۳-۴ مقادیر صدابندی شیشه‌های تک جداره لمینیت

شاخص کاهش صدا به دسی بل (R)		بسامد مرکزی بندهای یک سوم هنگامی (هرتز)
(۱۰+ ۱/۱۴+ ۸)	(۱۰+ ۱/۵۲+ ۱۰)	
۲۹٫۷	۳۰٫۳	۱۰۰
۲۹٫۵	۲۹٫۹	۱۲۵
۳۰٫۳	۳۰٫۴	۱۶۰
۳۳٫۱	۳۳٫۰	۲۰۰
۳۳٫۱	۳۴٫۵	۲۵۰
۳۳٫۰	۳۳٫۰	۳۱۵
۳۲٫۹	۳۳٫۴	۴۰۰
۳۲٫۸	۳۴٫۱	۵۰۰
۳۳٫۶	۳۴٫۴	۶۳۰
۳۳٫۰	۳۴٫۷	۸۰۰
۳۵٫۱	۳۷٫۶	۱۰۰۰
۳۹٫۸	۴۰٫۷	۱۲۵۰
۳۸٫۹	۳۹٫۵	۱۶۰۰
۴۰٫۱	۴۰٫۳	۲۰۰۰
۴۲٫۷	۴۳٫۰	۲۵۰۰
۴۲٫۸	۴۳٫۱	۳۱۵۰
۴۴٫۲	۴۴٫۶	۴۰۰۰
۴۷٫۸	۴۷٫۷	۵۰۰۰
۳۷	۳۸	شاخص کاهش صدای وزن یافته بر حسب دسی بل، R_w



شکل ۳-۶ مقایسه نمودار افت صوتی شیشه تک‌جداره لمینیت با ضخامت‌های مختلف



شکل ۳-۷ مقایسه نمودار افت صوتی شیشه تک‌جداره لمینیت با ضخامت‌های مختلف

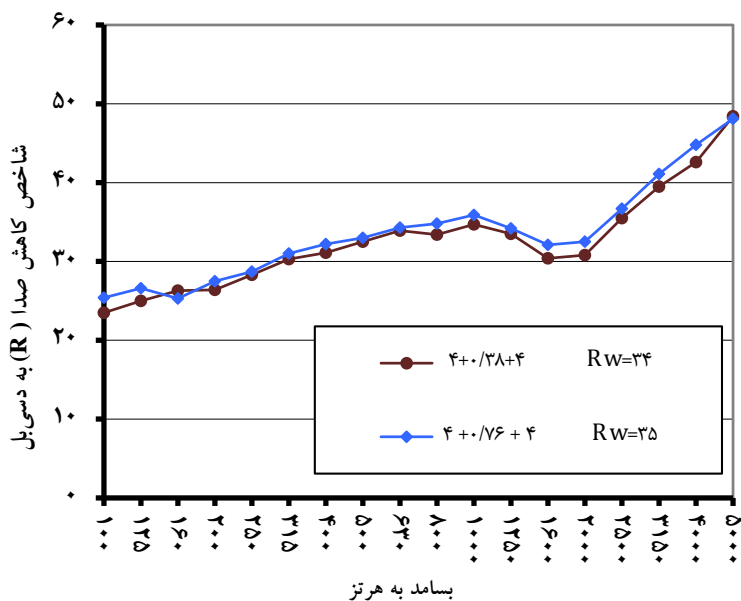


جدول ۳-۵ مقادیر صدابندی شیشه‌های تک جداره لمینیت

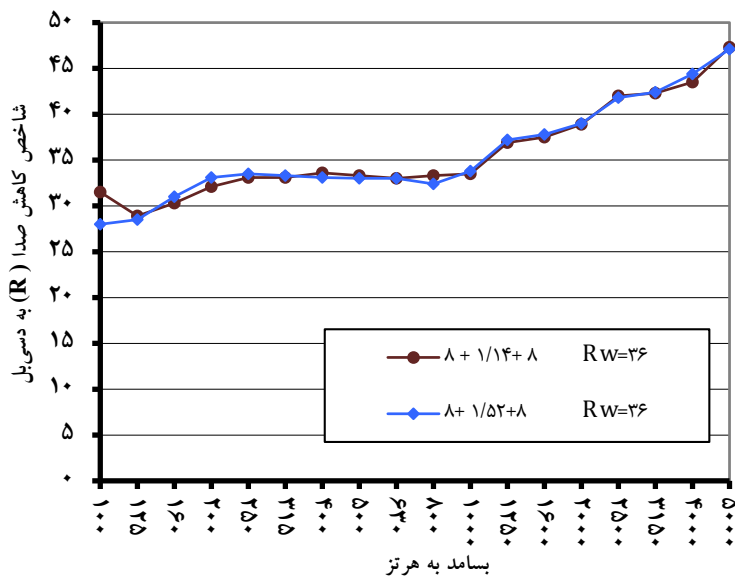
شاخص کاهش صدا به دسی بل (R)		بسامد مرکزی بندهای یک سوم هنگامی (هرتز)
($4+38+0$)	($4+76+0$)	
۲۳٫۵	۲۵٫۴	۱۰۰
۲۵٫۰	۲۶٫۶	۱۲۵
۲۶٫۳	۲۵٫۳	۱۶۰
۲۶٫۴	۲۷٫۵	۲۰۰
۲۸٫۳	۲۸٫۷	۲۵۰
۳۰٫۳	۳۱٫۰	۳۱۵
۳۱٫۱	۳۲٫۲	۴۰۰
۳۲٫۵	۳۳٫۰	۵۰۰
۳۳٫۹	۳۴٫۳	۶۳۰
۳۳٫۴	۳۴٫۸	۸۰۰
۳۴٫۷	۳۵٫۹	۱۰۰۰
۳۳٫۵	۳۴٫۲	۱۲۵۰
۳۰٫۴	۳۲٫۱	۱۶۰۰
۳۰٫۸	۳۲٫۵	۲۰۰۰
۳۵٫۵	۳۶٫۷	۲۵۰۰
۳۹٫۵	۴۱٫۱	۳۱۵۰
۴۲٫۶	۴۴٫۸	۴۰۰۰
۴۸٫۴	۴۸٫۱	۵۰۰۰
۳۴	۳۵	شاخص کاهش صدای وزن یافته بر حسب دسی بل، R_w



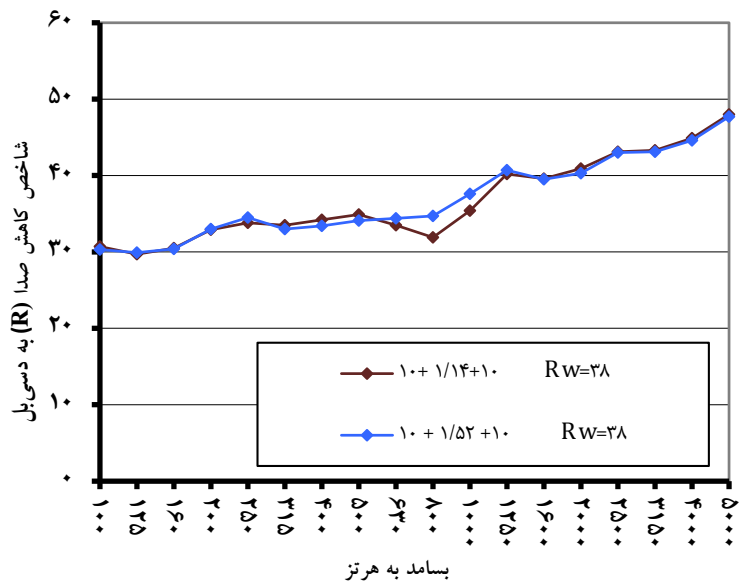
برای بررسی اثر ضخامت لایه میانی بر صدابندی، آزمون‌هایی بر روی شیشه ۸ میلی‌متری با لایه میانی ۰/۳۸ میلی‌متر و ۰/۷۶ میلی‌متر و شیشه‌های ۱۶ و ۲۰ میلی‌متری با لایه میانی ۱/۱۴ میلی‌متر و ۱/۵۲ میلی‌متر انجام شد. نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها در جداول ۳-۳ تا ۳-۵ و در نمودارهای شکل ۳-۸ تا ۳-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۸ مقایسه نمودار افت صوتی شیشه تک جداره لمینت با ضخامت‌های مختلف لایه



شکل ۳-۹: مقایسه نمودار افت صوتی شیشه تک جداره لمینت با ضخامت‌های مختلف لایه



شکل ۳-۱۰: مقایسه نمودار افت صوتی شیشه تک جداره لمینت با ضخامت‌های مختلف لایه



طبق نمودارهای شکل‌های ۳-۸ تا ۳-۱۰ ملاحظه می‌شود که استفاده از چند لایه میانی PVB باعث بهبود صدابندی در ناحیه انطباق می‌شود. همچنین با استفاده از نرم‌افزار INSUL تأثیر استفاده از لایه‌های بیشتر لمینیت مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج اندازه‌گیری و محاسباتی نشان داد که استفاده از لایه لمینیت همواره به بهبود صدابندی کمک نمی‌کند. بدین معنا که با افزایش تعداد لایه‌های لمینیت تا حد مشخصی، صدابندی افزایش می‌یابد اما با بیشتر شدن تعداد لایه‌های لمینیت ممکن است مقدار صدابندی ثابت بماند تا این‌که مجدداً با افزایش تعداد بیشتر لایه‌ها این بهبود صدابندی حاصل شود. البته باید مسائل اقتصادی را نیز مدنظر قرار داد.

جدول ۳-۶ مقادیر شاخص کاهش صدای وزن یافته شیشه تک‌جداره لمینیت

								تعداد لایه‌های لمینیت
۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ضخامت شیشه (میلی‌متر)
۳۴	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۲	
۳۶	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۴	۳۴	۸
۳۷	۳۷	۳۷	۳۶	۳۶	۳۶	۳۶	۳۵	۱۰
۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۳۹	۳۹	۳۹	۳۸	۱۶
۴۲	۴۱	۴۱	۴۱	۴۱	۴۱	۴۰	۳۹	۲۰

۳-۲- شیشه‌های دوجداره

از آن جایی که پنجره تک‌جداره عایق حرارتی مناسبی نیست، رایج‌ترین پیشنهاد اضافه کردن جدار دوم برای افزایش عملکرد آکوستیکی است، اما اثرات پیچیده انطباق باعث بالا رفتن عملکرد فقط در حد مرزی و بسیار کم می‌شود مگر اینکه پانل‌ها با ضخامت‌های به حد کافی متفاوت (حداقل ۳۰٪) باشند.

ارزان‌ترین راه تقویت صدابندی شیشه دوجداره در درجه اول، افزایش فاصله هوایی است. راه دوم (پرهزینه‌تر) برای افت بهتر صدا، استفاده از شیشه‌های ضخیم‌تر است. اختلاف ضخامت جام‌های شیشه‌ای در موارد گوناگونی برای جلوگیری از اثرات نامطلوب مانند انطباق و در نتیجه برای دستیابی به صدابندی بهینه به کار برده می‌شود. گام سوم، استفاده از شیشه لمینیت برای یکی از جام‌های شیشه است. آخرین گام استفاده از لمینیت برای هر دو شیشه است.

۳-۲-۱- شیشه دوجداره ساده

برای بررسی صدابندی شیشه‌های دوجداره، چند مورد آزمون بر روی شیشه دوجداره ساده که ضخامت شیشه‌ها و نیز فاصله هوایی بین آن‌ها متفاوت بود، انجام شد. نتایج مربوط به این اندازه‌گیری‌ها در جداول ۳-۷ تا ۳-۱۰ و نمودارهای شکل ۳-۱۱ تا ۳-۱۴ نشان داده شده است.



جدول ۳-۷ مقادیر صدابندی شیشه‌های دوجداره ساده

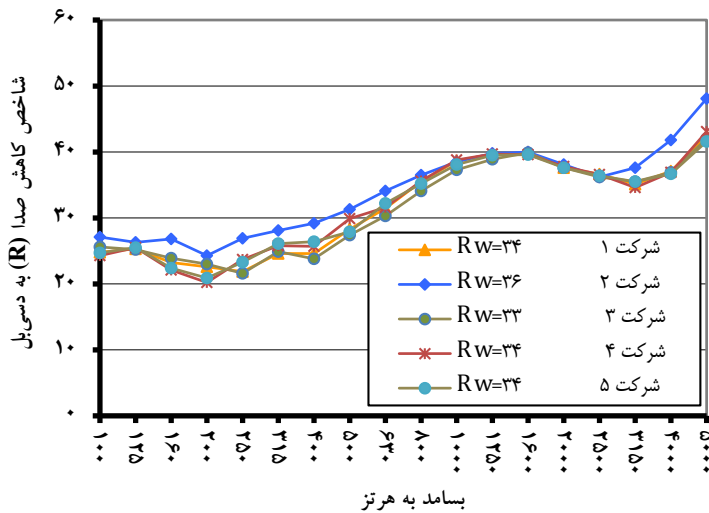
شاخص کاهش صدا به دسی بل (R)			بسامد مرکزی بندهای یک سوم هنگامی (هرتز)
(۶-۱۰-۴)	(۴-۱۲-۴)	(۴-۱۰-۴)	
۲۷٫۴	۲۶٫۲	۲۵٫۵	۱۰۰
۲۴٫۸	۲۵٫۲	۲۶٫۷	۱۲۵
۲۸٫۴	۲۸٫۲	۲۷٫۷	۱۶۰
۲۴٫۸	۲۳٫۷	۲۴٫۷	۲۰۰
۲۸٫۴	۲۱٫۲	۲۲٫۱	۲۵۰
۲۵٫۳	۲۳٫۲	۲۳٫۹	۳۱۵
۲۵٫۷	۲۵٫۱	۲۶٫۰	۴۰۰
۲۷٫۲	۲۷٫۴	۲۹٫۹	۵۰۰
۲۸٫۹	۳۰٫۸	۲۹٫۴	۶۳۰
۳۰٫۵	۳۳٫۹	۳۱٫۷	۸۰۰
۳۲٫۳	۳۵٫۵	۳۳٫۹	۱۰۰۰
۳۴٫۲	۳۸٫۳	۳۶٫۹	۱۲۵۰
۳۷٫۳	۳۹٫۸	۳۸٫۶	۱۶۰۰
۳۹٫۳	۳۹٫۸	۳۹٫۷	۲۰۰۰
۳۸٫۸	۳۶٫۸	۳۷٫۶	۲۵۰۰
۳۸٫۱	۲۸٫۹	۲۹٫۳	۳۱۵۰
۳۶٫۱	۳۴٫۲	۳۴٫۳	۴۰۰۰
۳۸٫۵	۴۱٫۷	۴۱٫۱	۵۰۰۰
۳۳	۳۲	۳۲	شاخص کاهش صدای وزن یافته بر حسب دسی بل، R_w

برای شیشه دوجداره ۶-۱۲-۴ میلی متری که توسط شرکت‌های مختلف در کشور ساخته شده است، آزمون افت صوتی انجام شد. مطابق جدول ۳-۸ و نمودارهای شکل ۳-۱۱ مشاهده می‌شود که برای اکثر این شیشه‌ها مقدار شاخص کاهش صدا برابر با ۳۴ دسی‌بل است اما تفاوت اندکی در نتایج به دلایل مختلف از جمله نحوه درزبندی و نصب صحیح دیده می‌شود.



جدول ۳-۸- مقادیر صدابندی شیشه دوجداره ساده (۶-۱۲-۴) تولیدی شرکت‌های مختلف در کشور

شاخص کاهش صدا به دسی‌بل (R)					بسامد مرکزی بندهای یک سوم هنگامی (هرتز)
شرکت ۵	شرکت ۴	شرکت ۳	شرکت ۲	شرکت ۱	
۲۴٫۷	۲۴٫۳	۲۵٫۶	۲۷٫۱	۲۶٫۷	۱۰۰
۲۵٫۵	۲۵٫۵	۲۵٫۲	۲۶٫۳	۲۹٫۱	۱۲۵
۲۲٫۴	۲۲٫۱	۲۳٫۹	۲۶٫۸	۲۳٫۲	۱۶۰
۲۰٫۹	۲۰٫۲	۲۳٫۰	۲۴٫۳	۲۱٫۱	۲۰۰
۲۳٫۳	۲۳٫۷	۲۱٫۶	۲۶٫۹	۲۳٫۰	۲۵۰
۲۶٫۱	۲۵٫۸	۲۴٫۹	۲۸٫۱	۲۵٫۴	۳۱۵
۲۶٫۴	۲۵٫۷	۲۳٫۸	۲۹٫۲	۲۷٫۱	۴۰۰
۲۷٫۹	۲۹٫۹	۲۷٫۴	۳۱٫۳	۲۸٫۵	۵۰۰
۳۲٫۲	۳۱٫۶	۳۰٫۳	۳۴٫۱	۳۲٫۱	۶۳۰
۳۵٫۲	۳۵٫۶	۳۴٫۱	۳۶٫۵	۳۴٫۳	۸۰۰
۳۸٫۱	۳۸٫۸	۳۷٫۳	۳۸٫۵	۳۸٫۳	۱۰۰۰
۳۹٫۵	۳۹٫۷	۳۸٫۹	۳۹٫۸	۴۰٫۶	۱۲۵۰
۳۹٫۶	۳۹٫۶	۳۹٫۹	۴۰٫۰	۴۰٫۸	۱۶۰۰
۳۷٫۶	۳۷٫۸	۳۷٫۶	۳۸٫۱	۳۸٫۶	۲۰۰۰
۳۶٫۴	۳۶٫۶	۳۶٫۲	۳۶٫۲	۳۷٫۲	۲۵۰۰
۳۵٫۵	۳۴٫۶	۳۵٫۵	۳۷٫۶	۳۶٫۸	۳۱۵۰
۳۶٫۷	۳۶٫۹	۳۶٫۹	۴۱٫۸	۳۹٫۵	۴۰۰۰
۴۱٫۶	۴۳٫۱	۴۲٫۰	۴۸٫۱	۴۱٫۹	۵۰۰۰
۳۴	۳۴	۳۳	۳۶	۳۴	شاخص کاهش صدای وزن یافته بر حسب دسی‌بل، Rw



شکل ۱۱-۳ مقایسه نمودار افت صوتی شیشه دوجداره ساده ۶-۱۲-۴ برای شرکت‌های مختلف



جدول ۳-۹ مقادیر صدابندی شیشه دوجداره ساده

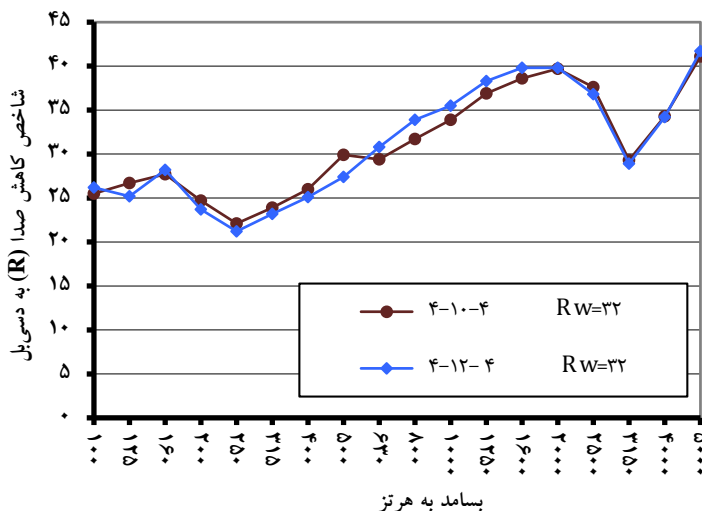
شاخص کاهش صدا به دسی بل (R)			بسامد مرکزی بندهای یک سوم هنگامی (هرتز)
(۴-۲۲-۶)	(۴-۲۲-۱۰)	(۴-۸-۶)	
۲۴٫۲	۲۶٫۵	۲۴٫۰	۱۰۰
۲۴٫۰	۲۵٫۵	۲۶٫۲	۱۲۵
۲۱٫۲	۲۶٫۲	۳۰٫۴	۱۶۰
۲۳٫۳	۲۲٫۶	۲۶٫۰	۲۰۰
۲۸٫۷	۳۱٫۱	۲۶٫۹	۲۵۰
۲۷٫۰	۳۰٫۵	۲۴٫۴	۳۱۵
۳۱٫۵	۳۳٫۶	۲۷٫۹	۴۰۰
۳۳٫۴	۳۴٫۷	۳۰٫۱	۵۰۰
۳۴٫۵	۳۶٫۰	۳۱٫۸	۶۳۰
۳۷٫۶	۳۷٫۲	۳۴٫۴	۸۰۰
۴۱٫۲	۳۸٫۹	۳۶٫۷	۱۰۰۰
۴۲٫۹	۳۸٫۶	۳۸٫۷	۱۲۵۰
۴۳٫۲	۳۹٫۹	۳۸٫۹	۱۶۰۰
۴۰٫۲	۴۲٫۸	۳۷٫۴	۲۰۰۰
۳۹٫۲	۴۳٫۵	۳۵٫۳	۲۵۰۰
۳۹٫۱	۴۰٫۹	۳۸٫۸	۳۱۵۰
۴۴٫۲	۴۴٫۵	۴۱٫۹	۴۰۰۰
۴۵٫۵	۴۵٫۲	۴۶٫۲	۵۰۰۰
۳۷	۳۸	۳۴	شاخص کاهش صدای وزن یافته بر حسب دسی بل، R_w



فصل سوم- یافته‌های پژوهش / ۱۰۱

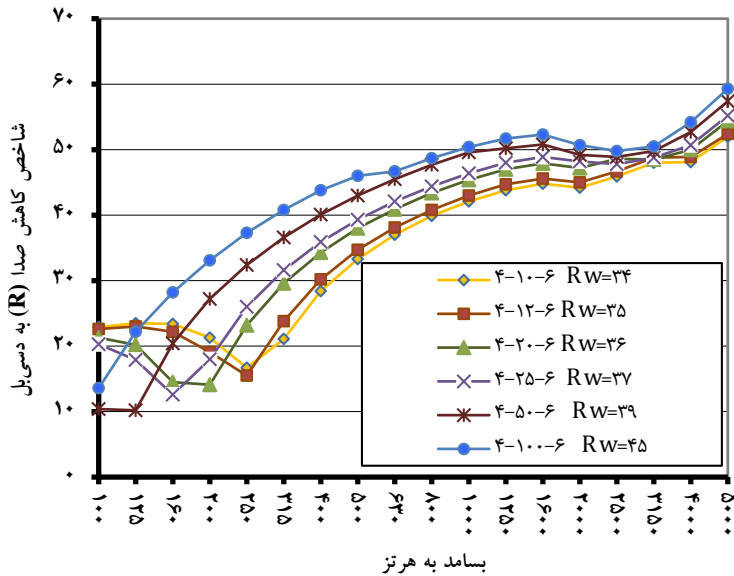
جدول ۳-۱۰ مقادیر صدابندی شیشه دوجداره ساده

شاخص کاهش صدا به دسی بل (R)			بسامد مرکزی بندهای یک سوم هنگامی (هرتز)
(۴-۸-۴)	(۸-۲۰-۱۲)	(۸-۱۲-۶)	
۲۵,۴	۳۳,۴	۳۰,۴	۱۰۰
۲۴,۴	۳۳,۶	۲۹,۷	۱۲۵
۲۷,۵	۳۰,۴	۲۲,۸	۱۶۰
۲۴,۹	۳۱,۹	۲۳,۶	۲۰۰
۲۴,۴	۳۴,۱	۲۵,۴	۲۵۰
۲۴,۵	۳۴,۶	۲۶,۳	۳۱۵
۲۵,۴	۳۴,۲	۲۹,۶	۴۰۰
۲۸,۴	۳۶,۳	۳۲,۷	۵۰۰
۲۸,۳	۳۶,۸	۳۴,۹	۶۳۰
۳۱,۷	۳۶,۷	۳۸,۰	۸۰۰
۳۳,۷	۳۷,۳	۳۸,۹	۱۰۰۰
۳۶,۵	۳۵,۱	۳۷,۸	۱۲۵۰
۳۸,۶	۳۶,۱	۳۵,۲	۱۶۰۰
۳۹,۵	۳۸,۳	۳۳,۹	۲۰۰۰
۳۷,۳	۴۳,۷	۳۵,۹	۲۵۰۰
۲۹,۱	۴۷,۳	۴۰,۸	۳۱۵۰
۳۴,۴	۴۹,۵	۴۴,۹	۴۰۰۰
۴۱,۰	۴۹,۷	۴۶,۷	۵۰۰۰
۳۲	۳۸	۳۵	شاخص کاهش صدای وزن یافته بر حسب دسی بل، R_w



شکل ۳-۱۲ مقایسه نمودار افت صوتی شیشه دوجداره ساده با فاصله هوایی مختلف

مطابق با شکل ۳-۱۲، مشاهده می‌شود که با افزایش ۲ میلی‌متری فاصله هوایی بهبود چندانی در افت صوتی حاصل نشده است. برای فواصل هوایی بیشتر، این موضوع با نرم‌افزار INSUL مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۳-۱۳ مقایسه‌ای از نمودار افت صوتی شیشه دوجداره ساده با فاصله‌های هوایی مختلف که با استفاده از نرم‌افزار INSUL بدست آمده، نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۳ مقایسه نمودار افت صوتی شیشه دوجداره ساده با فاصله هوایی مختلف با استفاده

از نرم افزار INSUL

طبق شکل ۳-۱۵ افزایش فاصله هوایی تا قبل از ۵۰ میلی متر تنها اندکی باعث بهبود صدابندی می شود. به طوری که با دو برابر کردن فاصله هوایی تنها ۲ دسی بل افزایش صدابندی خواهیم داشت. اما بعد از این فاصله با افزایش فاصله هوایی شاخص کاهش صدا تا ۶ دسی بل افزایش خواهد یافت.

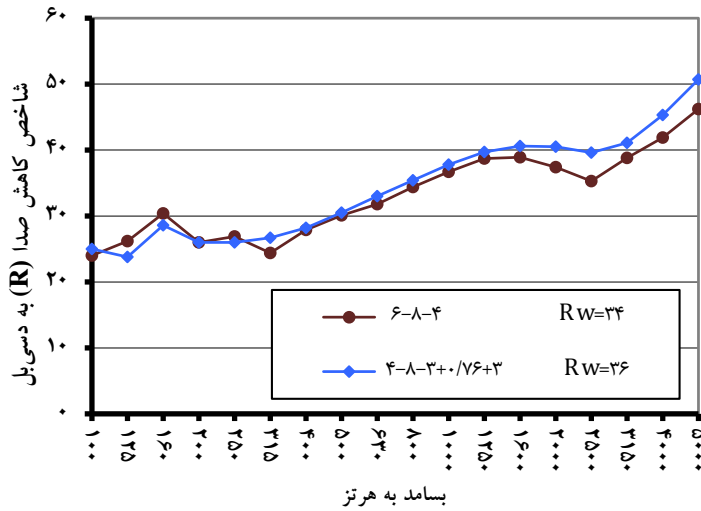
۳-۲-۲- شیشه دوجداره لمینیت

یکی دیگر از بررسی‌های انجام شده بر روی شیشه‌های دوجداره، مطالعه اثر لمینیت کردن یک یا هر دو جام شیشه بر افت صوتی است. نتایج مربوط به آزمون‌های شیشه های یک طرف لمینیت شده در جدول‌های ۳-۱۱ تا ۳-۱۳ و نمودارهای شکل ۳-۱۴ و ۳-۱۵ و نتایج شیشه دو طرف لمینیت شده در جدول ۳-۱۴ و نمودارهای شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است.



جدول ۳-۱۱: مقادیر صدابندی شیشه دوجداره لمینیت

شاخص کاهش صدا به دسی بل (R)			بسامد مرکزی
$(6-12-4+0,76^*+0,76+4)$	$(6-12-4+0,76+4)$	$(3+0,38+3-8-4)$	بندهای یک سوم هنگامی (هرتز)
۲۸,۶	۲۸,۲	۲۵,۰	۱۰۰
۳۰,۰	۲۹,۸	۲۳,۸	۱۲۵
۲۴,۷	۲۴,۰	۲۸,۶	۱۶۰
۲۴,۵	۲۵,۴	۲۶,۰	۲۰۰
۲۹,۰	۲۶,۸	۲۶,۰	۲۵۰
۳۰,۹	۲۸,۹	۲۶,۷	۳۱۵
۳۲,۸	۳۲,۹	۲۸,۲	۴۰۰
۳۶,۰	۳۴,۹	۳۰,۵	۵۰۰
۳۷,۶	۳۷,۷	۳۳,۰	۶۳۰
۴۰,۱	۴۰,۱	۳۵,۴	۸۰۰
۴۲,۳	۴۱,۹	۳۷,۸	۱۰۰۰
۴۲,۸	۴۱,۳	۳۹,۷	۱۲۵۰
۴۳,۴	۴۰,۲	۴۰,۶	۱۶۰۰
۴۱,۶	۳۸,۵	۴۰,۵	۲۰۰۰
۴۱,۸	۴۱,۴	۳۹,۶	۲۵۰۰
۴۵,۶	۴۶,۲	۴۱,۱	۳۱۵۰
۴۹,۶	۴۹,۴	۴۵,۳	۴۰۰۰
۴۹,۷	۵۰,۴	۵۰,۷	۵۰۰۰
۳۹	۳۸	۳۶	شاخص کاهش صدای وزن یافته بر حسب دسی بل، R_w



شکل ۳-۱۴ مقایسه نمودار افت صوتی شیشه دوجداره ساده و لمینیت

ملاحظه می‌شود که با لمینیت کردن یکی از جدارهای شیشه افت صوتی بهبود یافته و عمق دره انطباق نیز به علت افزایش میرایی (به واسطه لایه لمینیت) کاهش می‌یابد.



جدول ۳-۱۲ مقادیر صدابندی شیشه دوجداره لمینیت

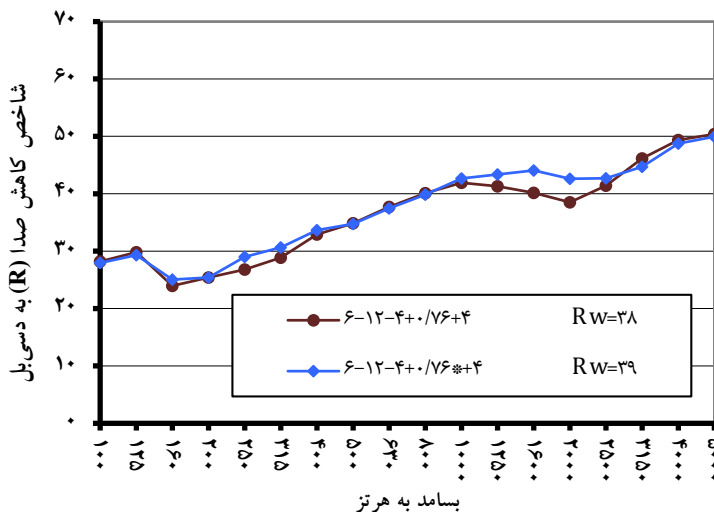
شاخص کاهش صدا به دسی بل (R)			بسامد مرکزی
(۶+۷۶*۰/۶-۱۲-۸)	(۵+۷۶*۰/۶-۱۲-۶)	(۴+۷۶*۰/۶-۱۲-۶)	بندهای یک سوم هنگامی (هرتز)
۳۲٫۷	۲۸٫۳	۲۸٫۰	۱۰۰
۳۰٫۷	۳۰٫۷	۲۹٫۳	۱۲۵
۲۴٫۴	۲۵٫۷	۲۵٫۱	۱۶۰
۲۹٫۵	۲۴٫۶	۲۵٫۴	۲۰۰
۳۱٫۹	۳۰٫۴	۲۹٫۰	۲۵۰
۳۳٫۷	۳۰٫۱	۳۰٫۷	۳۱۵
۳۴٫۷	۳۳٫۱	۳۳٫۷	۴۰۰
۳۷٫۶	۳۴٫۲	۳۴٫۸	۵۰۰
۴۰٫۰	۳۵٫۸	۳۷٫۵	۶۳۰
۴۲٫۰	۳۷٫۸	۳۹٫۹	۸۰۰
۴۳٫۸	۳۹٫۲	۴۲٫۷	۱۰۰۰
۴۲٫۷	۳۸٫۸	۴۳٫۴	۱۲۵۰
۴۱٫۶	۳۸٫۴	۴۴٫۱	۱۶۰۰
۴۳٫۱	۳۸٫۹	۴۲٫۶	۲۰۰۰
۴۶٫۴	۴۲٫۰	۴۲٫۷	۲۵۰۰
۴۹٫۱	۴۵٫۲	۴۴٫۷	۳۱۵۰
۵۰٫۱	۴۸٫۳	۴۸٫۸	۴۰۰۰
۵۰٫۷	۴۹٫۲	۵۰٫۰	۵۰۰۰
۴۱	۳۸	۳۹	شاخص کاهش صدای وزن یافته بر حسب دسی بل، R_w

جدول ۳-۱۳ مقادیر صدابندی شیشه دوجداره لمینیت

(R) شاخص کاهش صدا به دسی‌بل		بسامد مرکزی بندهای یک سوم هنگامی به هرتز
(۳+۳۸+۰-۱۲-۴)	(۶+۷۶+۰-۱۲-۶)	
۲۶,۵	۳۲,۱	۱۰۰
۲۵,۱	۳۰,۷	۱۲۵
۲۷,۰	۲۸,۵	۱۶۰
۲۴,۴	۲۸,۶	۲۰۰
۲۵,۸	۳۰,۲	۲۵۰
۲۸,۲	۳۱,۰	۳۱۵
۲۹,۳	۳۲,۴	۴۰۰
۳۱,۶	۳۴,۵	۵۰۰
۳۵,۳	۳۶,۱	۶۳۰
۳۸,۰	۳۷,۳	۸۰۰
۳۹,۲	۳۸,۴	۱۰۰۰
۴۰,۹	۳۹,۹	۱۲۵۰
۴۱,۶	۴۲,۱	۱۶۰۰
۴۱,۹	۴۲,۲	۲۰۰۰
۳۹,۸	۴۳,۶	۲۵۰۰
۳۹,۹	۴۶,۸	۳۱۵۰
۴۵,۴	۴۹,۱	۴۰۰۰
۵۱,۴	۴۹,۷	۵۰۰۰
۳۷	۳۹	شاخص کاهش صدای وزن یافته بر حسب دسی‌بل R _w



در بررسی اثر لمینیت کردن شیشه‌ها بر صدابندی شیشه دوجداره، استفاده از لایه لمینیت آکوستیکی نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج این مطالعه و مقایسه آن با لمینیت ساده در نمودار شکل ۳-۱۵ و جدول ۳-۱۲ قابل مشاهده است. استفاده از لمینیت آکوستیکی عمق دره انطباق را بیش از لمینیت ساده کاهش می‌دهد.

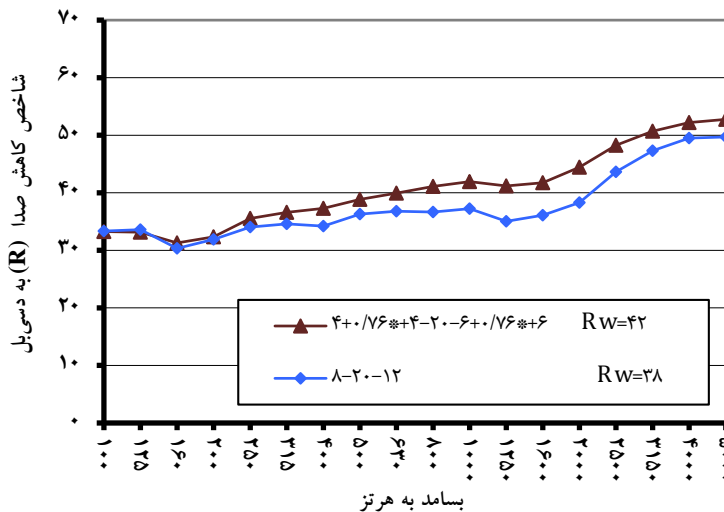


شکل ۳-۱۵ مقایسه نمودار افت صوتی شیشه دوجداره لمینیت ساده و آکوستیکی



جدول ۳-۱۴ مقادیر صدابندی شیشه دوجداره لمینیت

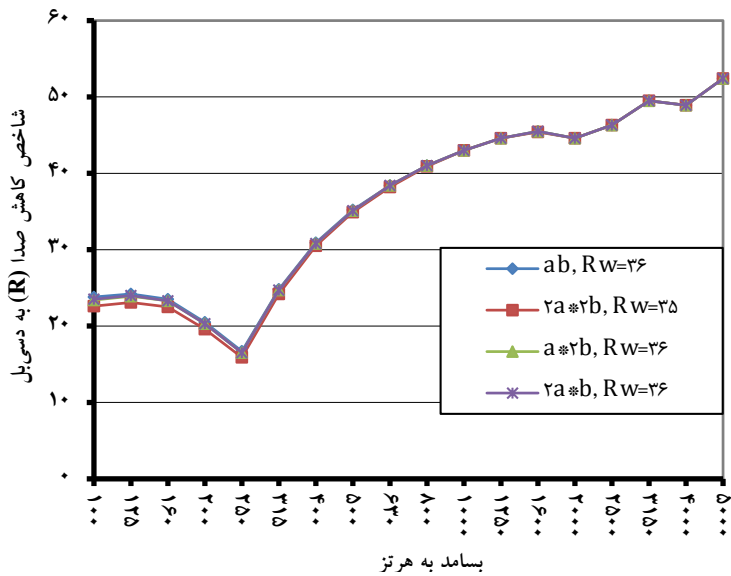
شاخص کاهش صدا به دسی بل (R)		بسامد مرکزی بندهای یک سوم هنگامی (هرتز)
$(\epsilon+1,02+6-12-\epsilon+1,02+6)$	$(6+0,76^*+6-20-\epsilon+0,76^*+\epsilon)$	
۳۲,۷	۳۳,۳	۱۰۰
۳۲,۶	۳۳,۲	۱۲۵
۳۱,۳	۳۱,۳	۱۶۰
۲۸,۶	۳۲,۴	۲۰۰
۳۰,۸	۳۵,۶	۲۵۰
۳۱,۱	۳۶,۶	۳۱۵
۳۵,۲	۳۷,۳	۴۰۰
۳۷,۶	۳۸,۹	۵۰۰
۳۸,۷	۴۰,۰	۶۳۰
۳۹,۸	۴۱,۱	۸۰۰
۳۹,۵	۴۲,۰	۱۰۰۰
۳۹,۴	۴۱,۲	۱۲۵۰
۴۱,۱	۴۱,۸	۱۶۰۰
۴۴,۷	۴۴,۵	۲۰۰۰
۴۷,۹	۴۸,۳	۲۵۰۰
۵۰,۳	۵۰,۷	۳۱۵۰
۵۲,۱	۵۲,۲	۴۰۰۰
۵۲,۸	۵۲,۸	۵۰۰۰
۴۰	۴۲	شاخص کاهش صدای وزن یافته بر حسب دسی بل، R_w



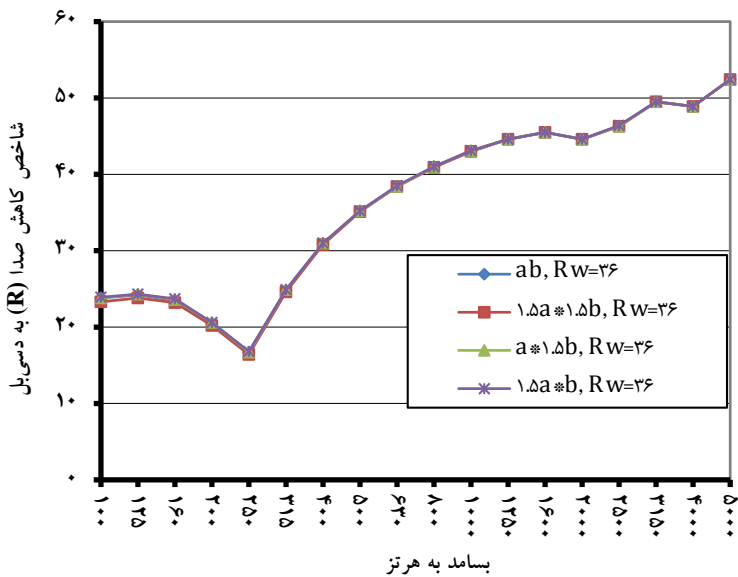
شکل ۳-۱۶ مقایسه نمودار افت صوتی شیشه دوجداره ساده و دو طرف لمینیت

۳-۲-۳- بررسی اثر تغییر اندازه شیشه در صدابندی هوابرد

از آنجایی که امکان انجام آزمایش‌های افت صوتی در آزمایشگاه برای شیشه با ابعاد متفاوت در بازه زمانی مورد نظر وجود نداشت لذا بررسی این اثر با استفاده از روش شبیه‌سازی انجام شد. در شکل‌های ۳-۱۷ و ۳-۱۸ نمودارهای افت صدای هوابرد برای شیشه‌های با ضخامت یکسان و سطوح متفاوت رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد که ۱٫۵ و ۲ برابر کردن هر دو یا یکی از سطوح شیشه، تأثیر چندانی بر افت صوتی آن ندارد و دو برابر کردن هر کدام از سطوح شیشه صدابندی هوابرد تنها یک دسی‌بل افزایش یافته است.



شکل ۳-۱۷ اثر تغییر سطوح شیشه بر صدابندی



شکل ۳-۱۸ اثر تغییر سطوح شیشه بر صدابندی

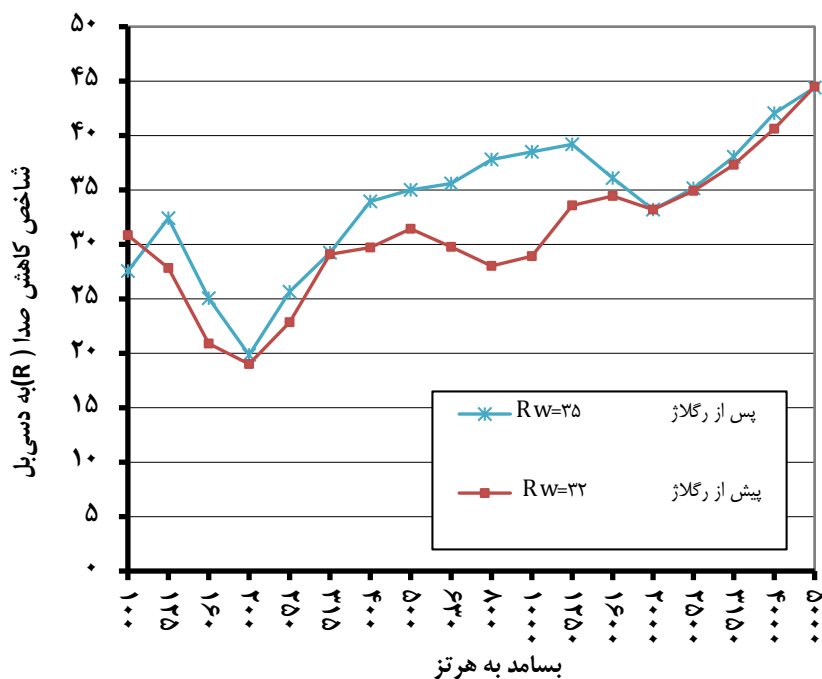
۳-۳- پنجره دوجداره

برای به کار بردن شیشه‌ها در فضاهاى گوناگون عمدتاً نیاز به یک قاب نگهدارنده وجود دارد. مجموعه این قاب و شیشه همان پنجره است. همان‌طور که بیان شد قاب با جنس‌های گوناگونی از جمله چوب، آلومینیوم، UPVC و ... در دسترس است. در این بخش به بررسی افت صوتی پنجره‌های دوجداره با قاب UPVC پرداخته شده است تا علاوه بر بررسی شرایط واقعی، اثر قاب نیز در عملکرد افت صوتی هوا برد تحقیق شود (جداول ۳-۱۵ و ۳-۱۶ و شکل‌های ۳-۱۹ تا ۳-۲۲). شایان ذکر است که جنس قاب معمولاً تأثیر چندانی بر خصوصیات افت نوفه نمی‌گذارد اما اثر چفت و بست و نصب صحیح و نیز رگلاژ آن یک عامل اثرگذار در میزان افت صوتی است.



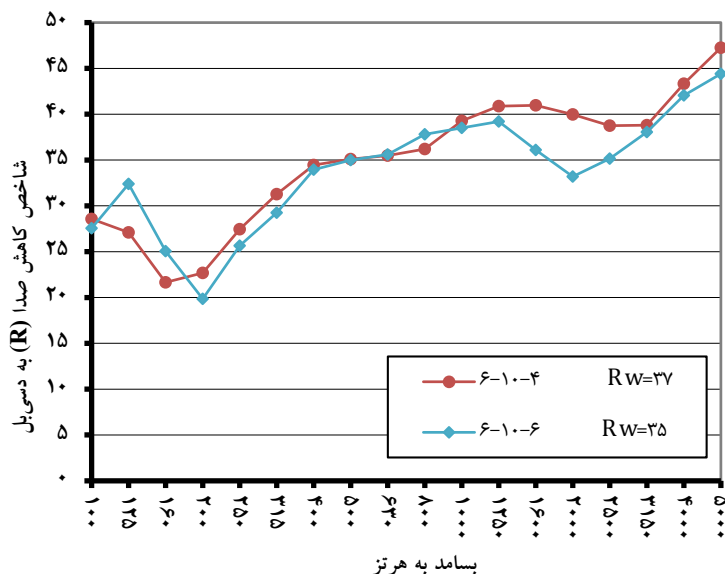
جدول ۳-۱۵: مقادیر صدابندی پنجره دوجداره ساده

شاخص کاهش صدا به دسی بل (R)			بسامد مرکزی بندهای یک سوم هنگامی (هرتز)
(۶-۱۰-۶) پیش از رگلاژ	(۶-۱۰-۶) پس از رگلاژ	(۶-۱۰-۶) ع	
۳۰٫۹	۲۷٫۶	۲۶٫۷	۱۰۰
۲۷٫۸	۳۲٫۴	۲۷٫۲	۱۲۵
۲۰٫۹	۲۵٫۱	۲۳٫۵	۱۶۰
۱۹٫۰	۱۹٫۹	۲۱٫۹	۲۰۰
۲۲٫۹	۲۵٫۷	۲۷٫۷	۲۵۰
۲۹٫۱	۲۹٫۳	۳۰٫۴	۳۱۵
۲۹٫۷	۳۴٫۰	۳۳٫۹	۴۰۰
۳۱٫۴	۳۵٫۰	۳۵٫۰	۵۰۰
۲۹٫۸	۳۵٫۶	۳۵٫۳	۶۳۰
۲۸٫۰	۳۷٫۸	۳۶٫۱	۸۰۰
۲۸٫۹	۳۸٫۵	۳۹٫۱	۱۰۰۰
۳۳٫۶	۳۹٫۲	۴۰٫۹	۱۲۵۰
۳۴٫۵	۳۶٫۱	۴۰٫۸	۱۶۰۰
۳۳٫۲	۳۳٫۲	۴۰٫۰	۲۰۰۰
۳۴٫۹	۳۵٫۲	۳۸٫۷	۲۵۰۰
۳۷٫۳	۳۸٫۱	۳۹٫۰	۳۱۵۰
۴۰٫۶	۴۲٫۱	۴۳٫۸	۴۰۰۰
۴۴٫۵	۴۴٫۱	۴۷٫۴	۵۰۰۰
۳۲	۳۵	۳۷	شاخص کاهش صدای وزن یافته بر حسب دسی بل، R _w



شکل ۳-۱۹ مقایسه نمودار افت صوتی پنجره دوجداره ساده (۶-۱۰-۶) پیش و پس از رگلاژ

اثر اختلاف ضخامت جام‌های شیشه در پنجره‌های ۶-۱۰-۴ و ۶-۱۰-۶ بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که به دلیل متفاوت بودن بسامد بحرانی دو جام، صدابندی افزایش می‌یابد. نتایج در جدول ۳-۱۵ و نمودارهای شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است. همچنین در ناحیه تشدید و نیز در ناحیه انطباق مشاهده می‌شود که استفاده از شیشه‌هایی با ضخامت‌های متفاوت مطلوب‌تر است. علت این امر ناشی از آن است که با این کار بسامد تشدید دو لایه با هم یکی نمی‌شوند و در نتیجه افت بیشتری در ناحیه انطباق اتفاق می‌افتد. به علاوه این کار باعث صرفه جویی در هزینه نیز می‌شود.



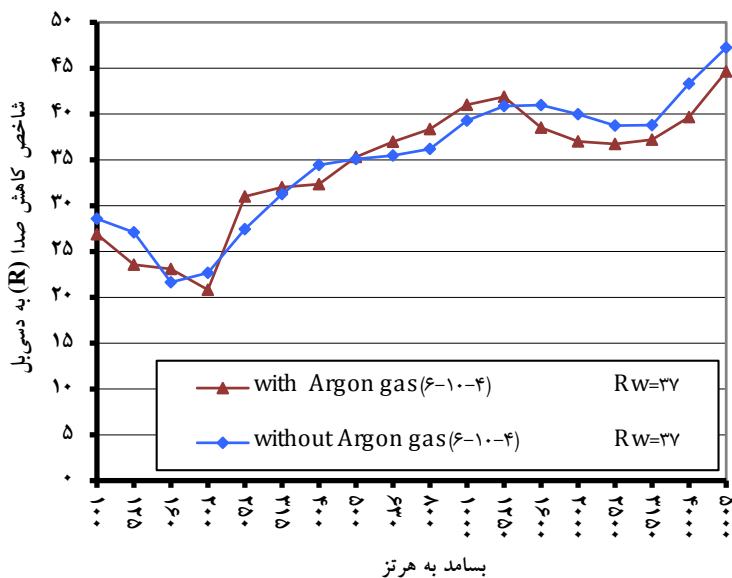
شکل ۳-۲۰ مقایسه نمودار افت صوتی پنجره دوجداره ساده با ضخامت‌های مختلف جام

همانطور که قبلاً در تئوری گازها نیز بیان شد گاز آرگون با این که برای عایق حرارتی مناسب می باشد اما تأثیری بر افت صوتی ندارد. نتایج این بررسی در جدول ۳-۱۶ و نمودار شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است.



جدول ۳-۱۶ مقادیر صدابندی شیشه دوجداره با و بدون گاز آرگون

شاخص کاهش صدا به دسی بل (R)		بسامد مرکزی بندهای یک سوم هنگامی (هرتز)
(۶-۱۰-۴) بدون گاز آرگون	(۶-۱۰-۴) با گاز پرکننده آرگون	
۲۶٫۹	۲۸٫۶	۱۰۰
۲۳٫۶	۲۷٫۱	۱۲۵
۲۳٫۱	۲۱٫۷	۱۶۰
۲۰٫۸	۲۲٫۷	۲۰۰
۳۱٫۰	۲۷٫۵	۲۵۰
۳۲٫۰	۳۱٫۳	۳۱۵
۳۲٫۳	۳۴٫۵	۴۰۰
۳۵٫۳	۳۵٫۱	۵۰۰
۳۷٫۰	۳۵٫۵	۶۳۰
۳۸٫۴	۳۶٫۲	۸۰۰
۴۱٫۰	۳۹٫۳	۱۰۰۰
۴۱٫۹	۴۰٫۹	۱۲۵۰
۳۸٫۵	۴۱٫۰	۱۶۰۰
۳۷٫۰	۴۰٫۰	۲۰۰۰
۳۶٫۷	۳۸٫۸	۲۵۰۰
۳۷٫۲	۳۸٫۸	۳۱۵۰
۳۹٫۷	۴۳٫۳	۴۰۰۰
۴۴٫۶	۴۷٫۳	۵۰۰۰
۳۷	۳۷	شاخص کاهش صدای وزن یافته بر حسب دسی بل، R_w



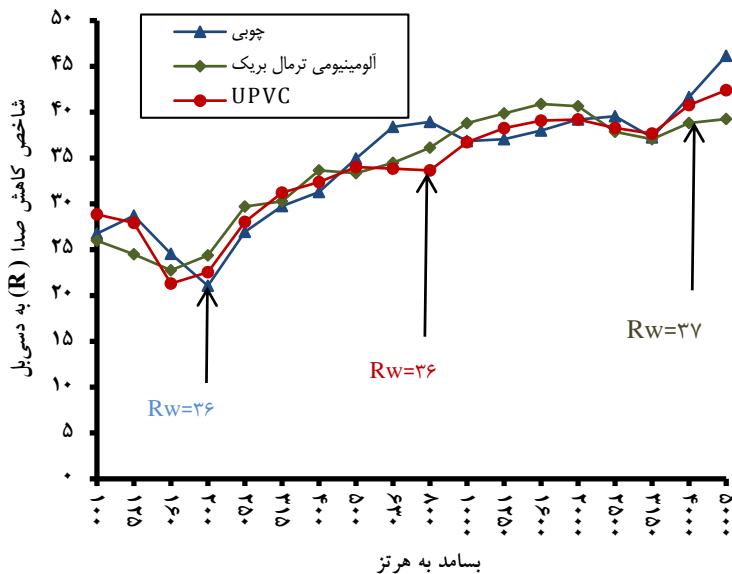
شکل ۳-۲۱ مقایسه نمودار افت صوتی پنجره دوجداره ساده با و بدون گاز آرگون

اثر قاب بر صدابندی پنجره‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که پیش از این نیز ذکر شد جنس قاب تأثیر چندانی بر صدابندی نخواهد داشت. نتایج این آزمون‌ها در جدول ۳-۱۷ و نمودارهای شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است.



جدول ۳-۱۷ مقادیر صدابندی پنجره دوجداره ساده (۶-۱۲-۴) با گاز پرکننده آرگون

شاخص کاهش صدا به دسی بل (R)			بسامد مرکزی بندهای یک سوم هنگامی (هرتز)
UPVC	چوبی	ترمال بریک	
۲۷,۱	۲۶,۶	۲۶,۰	۱۰۰
۲۶,۳	۲۸,۷	۲۴,۵	۱۲۵
۲۶,۸	۲۴,۶	۲۲,۸	۱۶۰
۲۴,۳	۲۱,۱	۲۴,۴	۲۰۰
۲۶,۹	۲۷,۰	۲۹,۷	۲۵۰
۲۸,۱	۲۹,۸	۳۰,۳	۳۱۵
۲۹,۲	۳۱,۳	۳۳,۷	۴۰۰
۳۱,۳	۳۵,۰	۳۳,۴	۵۰۰
۳۴,۱	۳۸,۴	۳۴,۵	۶۳۰
۳۶,۵	۳۹,۰	۳۶,۱	۸۰۰
۳۸,۵	۳۶,۹	۳۸,۸	۱۰۰۰
۳۹,۸	۳۷,۱	۳۹,۹	۱۲۵۰
۴۰,۰	۳۸,۰	۴۰,۹	۱۶۰۰
۳۸,۱	۳۹,۲	۴۰,۷	۲۰۰۰
۳۶,۲	۳۹,۶	۳۷,۹	۲۵۰۰
۳۷,۶	۳۷,۳	۳۷,۱	۳۱۵۰
۴۱,۸	۴۱,۷	۳۸,۸	۴۰۰۰
۴۸,۱	۴۶,۲	۳۹,۳	۵۰۰۰
۳۶	۳۶	۳۷	شاخص کاهش صدای وزن یافته بر حسب دسی بل، R _w



شکل ۳-۲۲ مقایسه نمودار افت صوتی پنجره دوجداره ساده (۶-۱۲-۴) با قابهای مختلف

۳-۴- بررسی تأثیر صدابندی بر نوفه زمینه با استفاده از نرم افزار INSUL (مطالعه موردی)

نکته حائز اهمیت در تقویت صدابندی یک جداکننده این است که ابتدا بررسی شود که قرار است در برابر چه نوع نوفه‌ای عایق بندی صورت گیرد. به همین دلیل علاوه بر توجه به منحنی صدابندی یک جداکننده مانند شیشه دوجداره نیاز است که منحنی نوفه محیط نیز مورد تحلیل قرار گیرد. به عنوان مثال نوفه ناشی از حمل و نقل ریلی در بسامدهای پایین نسبت به نوفه ناشی از ترافیک جاده‌ای تراز کمتری دارد.

یکی از قابلیت‌های نرم‌افزار INSUL اندازه‌گیری تراز صدای زمینه یک فضا بر اساس استاندارد EN 12354-3 می‌باشد. بدین منظور نیاز است که اطلاعات مربوط به مقادیر حجم و زمان واخنش فضای مورد بررسی، تراز صدای برخورد کننده با نما، میزان افت صدا و نیز شکل نمای مورد نظر در نرم‌افزار وارد شود.

در این مطالعه ابتدا تراز نوفه زمینه و زمان واخنش در یک سالن به حجم ۷۴۰ مترمکعب اندازه‌گیری شد. مقدار تراز کلی نوفه زمینه در این فضا برابر با ۴۳ dBA

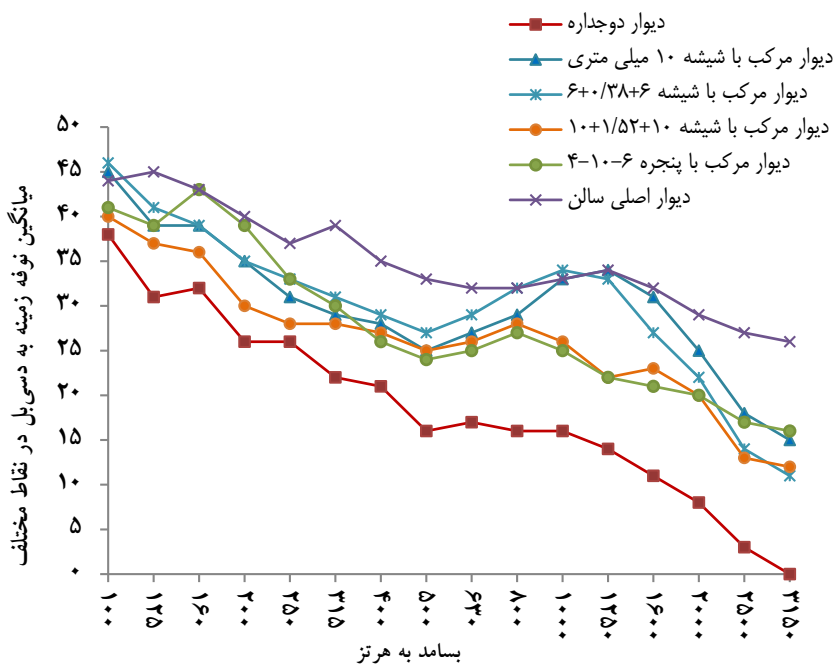
بدست آمد. مقادیر این اندازه‌گیری‌ها در جدول ۳-۱۸ نشان داده شده است. همچنین تراز صدای یک بزرگراه اندازه‌گیری و از آن به عنوان تراز صدای برخورد کننده با نما (در اینجا نمای مرکب متشکل از دیوار و پنجره)، استفاده شد. سطح فضای مورد مطالعه ۶۲ مترمربع و شامل ۱۲ مترمربع ساختار شیشه‌ای و ۵۰ مترمربع دیوار پایه است. در ابتدا فرض شد که کل نما از یک دیوار دوجداره با $R_w = 53 \text{ dB}$ تشکیل شده است. سپس با قرار دادن مقادیر افت صدای ساختارهای شیشه‌ای مختلف شامل شیشه تک‌جداره ۱۰ میلی‌متری، شیشه لمینیت ۶+۰٫۳۸+۶ میلی‌متری، شیشه لمینیت ۱۰+۱٫۵۲+۱۰ میلی‌متری و نیز یک پنجره دوجداره ۴-۱۰-۶ میلی‌متری در نرم‌افزار INSUL برای نمای مرکب با همان دیوار پایه، مقدار نوفه زمینه این فضا در حالت‌های مختلف بدست آمد. در شکل ۳-۲۳ نوفه زمینه فضای مورد نظر و تأثیر استفاده از ساختارهای مختلف شیشه با مقادیر متفاوت صدابندی نشان داده شده است.



فصل سوم- یافته‌های پژوهش / ۱۲۱

جدول ۳-۱۸ مقادیر تراز نوفه زمينه و زمان واخس اندازه‌گیری شده در سالن

بسامد (هرتر)	تراز نوفه زمينه (دسی‌بل)	زمان واخس (ثانیه)
۱۰۰	۴۴	۲٫۲
۱۲۵	۴۵	۴٫۴
۱۶۰	۴۳	۱٫۶
۲۰۰	۴۰	۱٫۲
۲۵۰	۳۷	۱٫۰
۳۱۵	۳۹	۱٫۰
۴۰۰	۳۵	۱٫۳
۵۰۰	۳۳	۱٫۱
۶۳۰	۳۲	۱٫۰
۸۰۰	۳۲	۱٫۱
۱۰۰۰	۳۳	۱٫۰
۱۲۵۰	۳۴	۱٫۰
۱۶۰۰	۳۲	۱٫۰
۲۰۰۰	۲۹	۱٫۱
۲۵۰۰	۲۷	۱٫۱
۳۱۵۰	۲۶	۱٫۰
۴۰۰۰	۲۲	۱٫۰
۵۰۰۰	۱۸	۰٫۹



شکل ۳-۲۳: مقایسه طیف نوفه زمینه سالن در شرایط مختلف دیوار نما

مشاهده می‌شود که استفاده از دیوار مرکب در دو حالتی که از پنجره دوجداره ۶-۱۰-۴ و شیشه لمینیت ۱۰+۱/۵۲+۱۰ استفاده شده شرایط نوفه زمینه سالن را بهبود بخشیده است. ضمن اینکه شیشه لمینیت ۲۰ میلی‌متری در بسامدهای بم از پنجره دوجداره که ضخامت کل آن ۲۰ میلی‌متر است، بهتر عمل می‌کند.

فصل چهارم

نتیجه گیری

در این پژوهش به منظور بررسی عملکرد آکوستیکی ساختار شیشه و پنجره، میزان افت صوتی آن‌ها اندازه‌گیری شد. هم‌چنین بررسی‌هایی در مورد مقدار شاخص کاهش صدای هوابرد در شیشه‌های مختلف با استفاده از نرم افزار INSUL انجام شد.

نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

از آنجایی که پنجره ساختاری است متشکل از شیشه و قاب احاطه کننده آن، می‌توان عوامل مؤثر در صدابندی پنجره را در این دو بخش بررسی کرد.

قاب:

- نتایج نشان داد که جنس قاب تأثیر چندانی بر صدابندی ندارد.
- یکی از عوامل بسیار مهم در صدابندی پنجره‌ها که باید مورد توجه قرار گیرد، شرایط نصب و نحوه درزبندی پنجره است. نتایج نشان داد در صورتی که نصب یک پنجره به درستی انجام نشود، شاخص کاهش صدا تا چند دسی‌بل کاهش خواهد یافت.
- کیفیت یراق‌آلات نیز بر صدابندی پنجره‌ها تأثیر می‌گذارد. آزمون‌ها نشان داد که کاهش کیفیت یراق‌آلات در یک پنجره، شاخص کاهش صدا را چندین دسی‌بل کاهش می‌دهد.



شیشه:

- یکی از پارامترهایی که صدابندی شیشه را افزایش می‌دهد، افزایش ضخامت آن است. این تأثیر در مقدار تک عددی صدابندی کاملاً مشهود است اما در بررسی نموداری باید توجه داشت که با افزایش ضخامت دره انطباق به سمت بسامدهای پایین‌تر جابه‌جا خواهد شد. بنابراین انتخاب ضخامت مناسب برای شیشه باید با در نظر گرفتن این نکته انجام پذیرد که کدام بسامد یا گستره بسامدی حائز اهمیت بیشتری است.
- لمینیت کردن شیشه‌ها از جمله مؤثرترین عوامل در بالا بردن میزان افت صوتی پنجره است. عمل لایه‌دار کردن شیشه باعث افزایش میرایی صدا و بهبود صدابندی در ناحیه انطباق می‌شود. در نتیجه صدابندی شیشه‌های لمینیت نسبت به شیشه معمولی افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که افزایش تعداد لایه‌های لمینیت تا حدی در بهبود صدابندی مؤثر است. به طوری که گاهی ممکن است با افزایش تعداد لایه‌ها، مقدار شاخص کاهش صدای هوابرد تغییری نکند تا این‌که تعداد لایه‌ها مجدداً افزایش یابد.
- یکی از انواع لمینیت که امروزه به منظور بهبود صدابندی شیشه‌ها استفاده می‌شود و نسبت به لمینیت‌های معمولی دارای کشسانی بیشتری می‌باشد، PVB آکوستیکی است.
- بررسی‌ها نشان داد که تغییر ابعاد شیشه‌ها تأثیر چندانی بر صدابندی ندارد. این نتایج از نرم‌افزار INSUL به دست آمد و مشخص شد که با دو برابر کردن طول و عرض یک شیشه، شاخص کاهش صدا تنها ۱ دسی‌بل کاهش پیدا خواهد کرد. ضمن این‌که تغییرات در منحنی صدابندی تنها در بسامدهای بم اتفاق خواهد افتاد.
- یکی از راه‌های افزایش صدابندی پنجره‌ها استفاده از شیشه‌های دوجداره است. دلیل اصلی استفاده از پنجره دوجداره، بهبود عملکرد حرارتی آن‌هاست؛ اما در

صورتی که فاصله هوایی این شیشه‌ها به میزان قابل توجهی افزایش یابد، افزایش صدابندی مقدار قابل ملاحظه‌ای خواهد بود.

- در شیشه‌های دوجداره نیز لمینیت کردن شیشه‌ها عاملی مؤثر در بهبود صدابندی است.

- پرکردن فاصله بین دو جام شیشه با آرگون، گازی که از هوا سنگین‌تر است، گرچه عایق‌بندی حرارتی را بهبود می‌بخشد اما اثر چندانی بر صدابندی ندارد. اگرچه استفاده از یک گاز سنگین‌تر که سرعت صوت در آن کمتر است باعث بهبود عملکرد صدابندی می‌شود، اما باید توجه داشت که به علت محدود شدن این تقویت به یک بازه بسامدی خاص، بهبود صدابندی توسط این شیشه‌ها تنها در برابر نوفه‌های خاصی خواهد بود. به نظر نمی‌رسد که استفاده از گازهای سنگین‌تر مانند SF_6 فایده بیشتری داشته باشد به علاوه باید توجه شود که SF_6 نیز یک گاز گلخانه‌ای است، بنابراین نمی‌توان آن را به عنوان جایگزینی برای آرگون در نظر گرفت.

- یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر صدابندی ساختارهای دوجداره استفاده از شیشه‌هایی با ضخامت متفاوت است. این تأثیر به علت اختلاف بسامدهای بحرانی دو جام شیشه است.

منابع

۱. رضا شاطریان، اصول طراحی ساخت پنجره، ۱۳۸۳.
۲. مهندس ژاله طالبی، طراحی گشودگی‌های نما(پنجره‌ها)، ۱۳۸۸.
۳. مینا مکانیک، عایق صوتی و کاربرد آن در طراحی پنجره، ۱۳۵۹.
۴. استاندارد ۷۵۶ "ویژگیهای در و پنجره آلومینیومی".
۵. استاندارد ۶۹۰۹ "درها و پنجره‌ها- پنجره‌های دریچه‌دار- نفوذ پذیری در برابر جریان هوا- روش آزمون".
6. Long M. Elsevier Academic Press, 2006, Architectural Acoustics.
7. Antonio J. B. Tadeu, Diogo M. R. Mateus, 62, 2001, Sound transmission through single, double and triple glazing Experimental evaluation, Applied Acoustics.
8. www. Adelaide city council.com/ environment, Noise Technical Fact Sheet.
9. www. English- heritage. Org .UK, Secondary glazing for windows.
10. Test report summary and expert statement, Airborne sound insulation of building elements, [http://www.fenestra.do/wp-content/uploads/2011/09/Sound insulation_IDEAL2000_ITF_certificate.pdf](http://www.fenestra.do/wp-content/uploads/2011/09/Sound_insulation_IDEAL2000_ITF_certificate.pdf) .
11. Chong Fan, Sound insulation for glass and panel.
12. Randall F. Barron; " Industrial noise control and acoustics"; Marcel Dekker, 2003
13. ISO 140-3: Acoustics – Measurement of Sound insulation in buildings and of building elements- Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements.
14. ISO 717-1: Acoustics – Rating of Sound insulation in buildings and of building elements- Part 1: Airborne Sound insulation
15. Ben H. Sharp, A Study of Techniques to Increase the Sound Insulation of Building Elements. WR 73-5. El Segundo, CA: Wyle Laboratories, June, 1973.
16. L.L Beranek, ed., Noise and Vibration Control. Cambridge, MA: Courtesy Leo L. Beranek, 1971.
17. Frank Fahy, Sound and Structural Vibration, Radiation, Transmission and Response. London, England: Academic Press an imprint of Elsevier Science, 1985.

18. Roman Y. Vinokur, "Evaluating Sound-Transmission Effects in Multi-Layer Partitions." Bay Village, OH: Sound and Vibration Magazine, 1996.

Abstract

Noise intrusion into the buildings is a common problem if you live close to busy roads, railway lines, under flights paths or near industrial units, and windows tend to be the weakest point of sound insulation in the home. Unlike walls and ceilings, which block and absorb sound waves, windows (glass) allow more sound vibrations to pass through and enter the home. To effectively lower the amount of external noise that enters a building and subsequently maintain the amenity of an inner city residence, particular attention to the construction detail of the windows is required.

In this investigation the acoustical performance of double glazing windows are investigated by means of experimental and calculating methods. The fundamental theories of sound insulation of a partition and the behavior of sound insulation curves in the frequency range of interest, was investigated. At different frequencies sound waves behave differently passing a partition. Moreover the type of the partition (thickness, type of the material and the number of panels) effects on the sound transmission behavior.

Sound transmission of single and double glazing windows with normal and laminated glasses was measured in the laboratory. Further investigations were done on the effect of the thickness of the glasses, the space between two glasses in double glazing systems and the type of the spacer gas. The results show that increasing the thickness of glasses and the use of glasses with different thickness, the spacer and also laminating one or both glasses especially with acoustical laminating layer in double glazing systems, can increase the sound insulation of windows. The acoustic seal around the frame and installation method are also very important.

In this work the sound insulation of different glasses was calculated by INSUL software. The results were in good agreement with experimental tests. As well as the effect of using a compound wall in which different windows (single glass, laminated glass, double glazing, ...) were installed on it, was investigated with INSUL. In this stage the results show that using a double glazing window in which the glasses are laminated can improve the sound insulation of compound wall very well.



Road, Housing & Urban Development Research Center

Investigation on acoustical behavior of double glazing windows

By:

Mohammad Jafar Hedayati

Somayeh Amininasab

Zeinab Sohrabikia

Azadeh Raissian

Hamid Reza Omidzahir

**Research Report
BHRC Publication No. 846**