



## الگوریتم طراحی سایلنسر تهویه به منظور کاهش آلودگی صوتی در سامانه‌های تهویه مطبوع

علی فائزبان<sup>۱\*</sup>، هاشم احمدی تیغ‌چی<sup>۲</sup>، محمدمهدی پارسا<sup>۳</sup>

۱. گروه طراحی ماشین آلات صنایع غذایی، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

۲. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳. واحد تحقیق و توسعه، شرکت دانش بنیان صنعت پروژه توس، مشهد، ایران

\*نویسنده مسئول: a.faezian@rifst.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

### چکیده

میزان صدا و طیف فرکانسی آن در تجهیزات تهویه مطبوع یکی از عوامل کلیدی در تامین آسایش کاربران به شمار می‌آید. راهکارهای کنترل آلودگی صوتی به دو دسته کنترل در منبع و کنترل در مسیر انتشار تقسیم می‌شوند که بسته به شرایط موجود، محدودیت‌های اجرایی و هزینه‌ها قابل اجرا هستند. همچنین در مراحل ساخت ساختمان و نصب سامانه‌های تهویه مطبوع، باید ملاحظات رعایت شود که به کاهش میزان انتشار و انتقال صدا کمک نماید. استفاده از تجهیزاتی مانند سایلنسرها، پوشش‌های آکوستیکی، اتاق‌های عایق صوت و لرزه‌گیرها نیازمند طراحی دقیق برای دستیابی به عملکرد مناسب است. در این مقاله، پس از مروری بر راهکارهای کاهش صدا به طراحی سایلنسرهای تهویه پرداخته شده است. در این نوع سایلنسر طول و تعداد صفحات جاذب صوت، فاصله بین صفحات و ضخامت آن‌ها به نحوی محاسبه گردیده‌اند که بهترین عملکرد آکوستیکی و هیدرودینامیکی حاصل گردد. الگوریتم محاسباتی ارائه شده در این پژوهش قادر است طراحی بهینه سایلنسر تهویه را مشخص کند که کاهش حداکثری صدا را در فرکانس‌های مورد نظر، همراه با کمترین افت فشار جریان هوا امکان‌پذیر سازد.

**کلمات کلیدی:** سایلنسر، تهویه مطبوع، اجزا آکوستیکی، کاهش صدا، تلفات عبور.

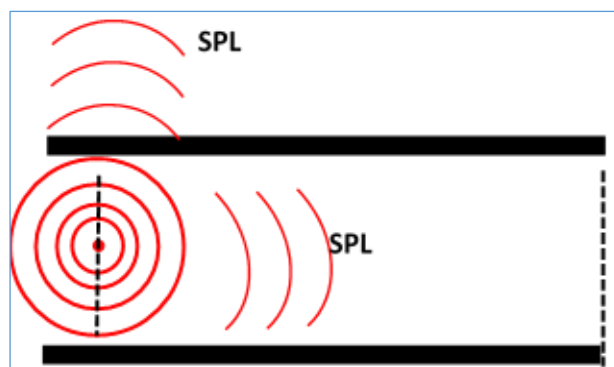
### مقدمه

استفاده از تاسیسات تهویه مطبوع در ساختمان‌های مسکونی یا اداری برای بهبود آسایش افراد ساکن در آن واحد ضروری می‌باشد، اما در برخی مواقع این سامانه‌ها ممکن است آلودگی صوتی برای ساکنین ایجاد کنند. بر اساس استانداردها، تراز فشار صوت مجاز در ساعات شب برای واحدهای مسکونی ۴۳ دسی‌بل و برای محیط‌های اداری ۶۵ دسی‌بل تعیین شده است [۱، ۲]. اصلی‌ترین منشأ صدا در این سامانه‌ها معمولاً فن‌های دمنده یا مکنده می‌باشند و کانال‌های انتقال هوا نیز نقش مهمی در انتشار و انتقال صدا دارند. در صورتی که طراحی کانال‌ها اصولی انجام نگیرد، تغییرات در سطح مقطع کانال‌ها، انشعاب‌ها و دریچه‌ها نه تنها صدا را انتقال می‌دهند، بلکه خود به عنوان عامل تولید صدا نیز عمل می‌کنند. همچنین، اگر سرعت جریان هوا در مسیرها و مقاطع از حد مجاز تجاوز کند، صدای تولید شده بسیار محسوس خواهد بود. گاهی اوقات، کانال‌های سامانه تهویه مطبوع علاوه بر صدای ناشی از عملکرد خود، آلودگی صوتی از منابع بیرونی نظیر رفت‌وآمد خودروها در بزرگراه یا خیابان‌های مجاور را نیز به داخل واحدهای مسکونی یا اداری منتقل می‌کنند. در دیگ آب گرم نیز علاوه بر صدایی که توسط فن دمنده تولید می‌شود مشعل، پمپ آب گرم و اگزوز گازهای احتراق هم به عنوان منابع آلودگی صوتی به شمار می‌روند. صدای تولید شده در منابع آلودگی صوتی تجهیزات تهویه مطبوع، مانند فن‌ها، از طریق جریان هوا درون کانال با سرعت صوت منتشر می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، صدا از منبع به دریافت‌کننده از طریق سازه<sup>۱</sup> یا هوا<sup>۲</sup> یا ترکیبی از هر دو منتقل می‌شود. به همین دلیل، اگر پارامترهای آکوستیکی در مرحله اولیه طراحی ساختمان و سامانه تهویه

<sup>1</sup> Structural Borne

<sup>2</sup> Air Borne

مطبوع لحاظ شوند، هزینه کاهش آلودگی صوتی به مراتب کمتر خواهد بود نسبت به زمانی که این اقدامات پس از اتمام ساخت‌وساز و نصب سامانه انجام شوند.



شکل ۱: انتقال صدا از طریق سازه یا هوا از محل منبع تولید تا دریافت کننده

کنترل آلودگی صوتی سیستم‌های تهویه مطبوع از جنبه‌های صنعتی و تجاری روش‌های متنوعی دارد. پژوهش‌های متعددی برای بهبود مواد اولیه و تجهیزات این سیستم‌ها به منظور کاهش آلودگی صوتی انجام شده است. به عنوان مثال، کاهش صدای تولیدی فن‌ها بدون کاهش عملکرد آیرودینامیکی آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. در این راستا، تحقیقات متعددی از جمله پژوهش مهدی یادگاری [۳] بر روی فن‌های جریان محوری صورت گرفته، که در آن نقش لبه فرار، فاصله میان قاب فن و پره‌ها و بهره‌گیری از حفره‌های آکوستیکی به عنوان راهکارهای کارآمد مورد بررسی قرار گرفتند. صدای تولید شده در منابع آلودگی صوتی تجهیزات تهویه مطبوع، مانند فن‌ها، از طریق جریان هوا درون کانال با سرعت صوت منتشر می‌شود.

در این پژوهش، راهکارهایی برای کاهش صدای تولیدی اجزای مختلف سیستم تهویه مطبوع ارائه می‌شود. همچنین مزایای هر راهکار توضیح داده خواهد شد. سپس به استفاده از سایلنسرها برای کاهش صدای تجهیزات تهویه مطبوع پرداخته می‌شود. در انتها به طور خاص به الگوریتم طراحی سایلنسر تهویه پرداخته می‌شود به طوری که نمونه محاسبات و نتایج طراحی برای این راهکار کاهش صدا آورده شده است تا طراحان بتوانند ملاحظات صوتی و همچنین افت فشار را در محاسبات خود برای طراحی مناسب در نظرگیرند.

### آلودگی صوتی در تهویه مطبوع و راهکارهای کنترل آن

در این بخش به مسیره‌های انتقال و انتشار صدا از منابع ایجاد آلودگی صوتی در سیستم‌های تهویه مطبوع پرداخته می‌شود و همچنین راهکارهای کاهش صدا نیز در این سامانه‌ها ارائه می‌شود. مروری بر این راهکارها برای ایجاد دیدگاه مناسب در طراحی تهویه مطبوع مفید می‌باشد و در انتها برای کاهش منابع ناخواسته صدا به طراحی سایلنسر پرداخته می‌شود.

#### مسیره‌های اصلی انتقال صدا

دیوارها، پنجره‌ها، دریچه‌ها، درها، درزها و ساختار کلی ساختمان مسیری برای انتقال صدا از منبع صوت به ناحیه دریافت‌کننده ایجاد می‌کنند. پیش از هر اقدامی برای اجرای راهکارهای کاهش نویز، باید تمامی منافذ و درزهای ساختمان (حداقل در محدوده موردنظر) بسته شوند؛ زیرا که عدم توجه به این مساله ممکن است اثربخشی هرگونه اقدام کاهش نویزی را به حداقل برساند. روش‌هایی که در این زمینه توصیه می‌شوند، از نظر عملیاتی امکان‌پذیر هستند و با توجه به شرایط محیطی، هزینه‌ها و تاثیرات اجرای هر راهکار، یک یا چند مورد انتخاب و اجرا می‌شوند.

#### حداقل نمودن تغییر سطح مقطع در مجراها

یکی از عوامل اصلی تولید نویز، وجود موانع یا تغییرات شدید در سطح مقطع جریان هوا است. بنابراین خودداری از ایجاد چنین شرایطی می‌تواند سطح نویز را کاهش دهد.



### انتخاب تجهیز ظرفیت بیشتر

دستگاه‌هایی که ظرفیت آن‌ها بالاتر از نیاز واقعی است، معمولاً هزینه بیشتری دارند. با این حال، در برخی شرایط، انتخاب دستگاهی با ظرفیت بالاتر می‌تواند از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد.

### افزایش ضخامت جداره کانال یا لوله

بخش قابل توجهی از نویز جریان ممکن است از طریق دیواره لوله یا کانال به اطراف منتقل شود. در چنین مواردی، انتخاب جداره با رده یا ضخامت بالاتر می‌تواند باعث کاهش انتقال صدا شود.

### کاهش طول مسیر لوله یا کانال

صداهایی که از جداره لوله یا کانال منتشر می‌شوند، با سطح پیرامونی یا طول آن‌ها رابطه مستقیم دارند. با کوتاه‌تر کردن طول لوله یا کانال می‌توان میزان انتشار و شدت نویز را کاهش داد.

### فاصله بیشتر هدر از افراد دریافت کننده صدا

از آنجا که هدر سطح قابل توجهی برای انتشار صوت دارد، قرار دادن آن در مکانی دورتر از گیرنده‌های صوتی می‌تواند باعث کاهش صدای رسیده به آنها شود.

### استفاده از اتصال تی به جای زانویی ۹۰ درجه در هدرها

دو روش معمول برای اتصال لوله‌ها به یکدیگر یا اتصال به هدر عبارتند از اتصال تی با انتهای کور و اتصال خم ۹۰ درجه. استفاده از اتصال تی با انتهای کور به جای خم ۹۰ درجه یا نوع‌های مشابه، می‌تواند باعث شکل‌گیری المانی حجمی (انتهای بسته تی شکل) شود که نقش یک عنصر آکوستیکی را ایفا کرده و به کاهش نویز کمک می‌کند.

### ایجاد فاصله از منبع

فاصله بین منبع صوت و شنونده نیز نقش مهمی در کاهش صدا دارد. اگر منبع صوت، خطی باشد و انتشار آن به شکل استوانه‌ای صورت گیرد، با دو برابر شدن فاصله از منبع صوت، تراز فشار صوت حدود ۳ دسی‌بل کاهش می‌یابد. در صورتی که منبع صوت نقطه‌ای بوده و انتشار آن کروی باشد، با دو برابر شدن فاصله این کاهش به حدود ۶ دسی‌بل می‌رسد.

### رعایت حداکثر سرعت مجاز در طراحی کانال‌ها

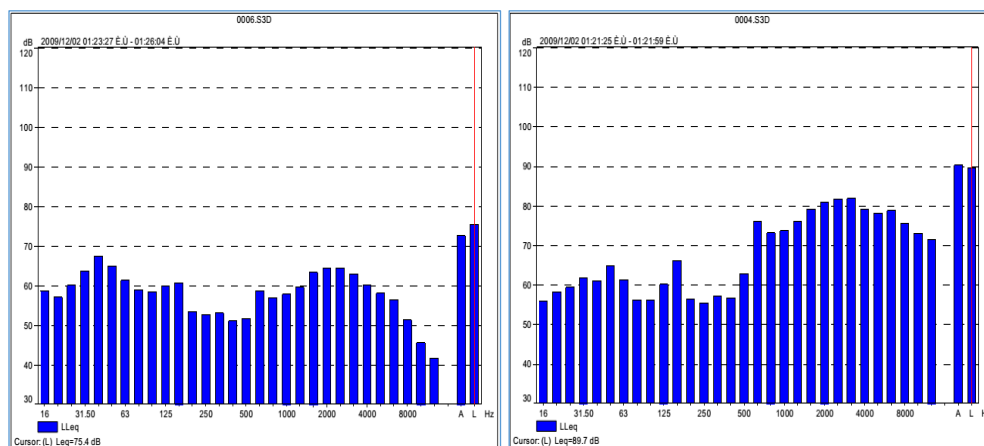
کانال‌ها علاوه بر اینکه یکی از عوامل اصلی انتشار نویز جریان هوا هستند، خود نیز نویز تولید می‌کنند. به همین دلیل، حداکثر سرعت مجاز جریان هوا در کانال‌ها ۴ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

### پنجره‌ها و مجراهای تهویه

جایابی مناسب پنجره‌ها، مجاری تهویه و هواکش‌ها تأثیر قابل توجهی بر سطح صدای انتقال یافته دارد. بزرگ بودن دریچه‌ها می‌تواند تأثیر جذب دیوارها را کاهش داده یا حتی خنثی کند. در بررسی موردی اندازه‌گیری‌های صوتی انجام شده روی ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری مطابق شکل (۲) نشان می‌دهد که وجود فاصله هوایی ۵۰ سانتی‌متری بین سقف و دیوار، تراز فشار صوت را از ۹۰ دسی‌بل به ۷۵ دسی‌بل کاهش خواهد داد. این تفاوت نمایانگر نقش موثر فاصله هوایی بر کنترل صوت است. توصیه می‌گردد که دریچه‌ها بر روی دیواره‌هایی نصب شوند که به سمت مناطق حساس مثل ساختمان‌های مسکونی نباشند و یا بر روی سقف تعبیه شده و توسط کانال‌هایی به ارتفاع بالاتر منتقل شوند. در صورت عدم امکان تغییر مکان دریچه‌ها، استفاده از مجاری تهویه حاوی مواد جاذب صوت می‌تواند تا حد زیادی عبور صدا را کاهش دهد. همچنین استفاده از هواکش‌های بادی به جای دریچه‌های ساده تأثیر مطلوبی بر کاهش صدا دارد.

### درب‌ها

درب‌هایی با ورق فولادی ۲ میلی‌متری عموماً دارای کلاس عبور صوتی حدود ۳۵ دسی‌بل هستند که کمتر از دیوارهای آجری ۳۵ سانتی‌متری است. افزایش تعداد یا مساحت درها می‌تواند باعث کاهش کیفیت عملکرد کاهش صوتی شود.



شکل ۲: مقایسه طیف تراز فشار صوتی در فاصله یک متری پشت دیوار در وجه دارای فاصله هوایی (تصویر راست) و سمت بسته ساختمان (تصویر چپ) [۴]

استفاده از جاذب‌های صوتی در سطح داخلی درب‌ها یا کاهش ابعاد دریچه‌های روی آن‌ها می‌تواند عملکرد صوتی را بهبود بخشد. همچنین وجود درزها بین چارچوب و درب نقش مهمی در نفوذ صدا ایفا می‌کند [۵-۸]؛ دریچه‌های ساده بر روی درب‌ها باعث کاهش چشمگیر عملکرد صوتی می‌شوند. این مشکل را می‌توان با استفاده از دریچه‌های آکوستیک یا کاهش سطح دریچه‌ها (پوشش بخشی از آنها) تا حدی برطرف کرد. همچنین استفاده از هواکش‌های بادی به جای دریچه هوا میزان صدای عبوری را کاهش می‌دهد.

#### درزها

درزها و منافذ هوایی عملکرد صوتی ساختمان را محدود می‌کنند. با استفاده از نوارهای لاستیکی درزگیر و یا چسب‌های درزگیری می‌توان این منافذ را پوشاند و انتقال صدای آن را کاهش داد. فاصله هوایی، فضای خالی میان درها و دیوارها و عدم استفاده از دریچه‌های تهویه مناسب یا جای‌گذاری نادرست آنها نیز موجب تضعیف عملکرد راهکارهای آکوستیکی می‌شوند. به همین دلیل، استفاده از درزگیرها و سازوکارهای مناسب برای اتصال دیوارها و لولاها ضروری است تا فضای خالی به حداقل ممکن کاهش یابد.

#### لرزش تجهیزات و متعلقات

انتقال ارتعاشات ناشی از پمپ، کمپرسور و لوله‌های موتورخانه به فونداسیون و سازه ساختمان نیز یکی دیگر از منابع صدا است. برای جلوگیری از انتقال ارتعاشات، از اتصال لرزه‌گیر در مسیر لوله‌ها و همچنین از عایق‌های ارتعاشی در محل تکیه‌گاه استفاده می‌شود. نوع و اندازه لرزه‌گیر به تعداد پایه‌های شاسی، فاصله آنها، و وزن تقریبی دستگاه بستگی دارد.

#### ساخت و نصب سایلنسر

برای کاهش صدای تولید شده توسط منابع نویز مانند فن‌های دمنده یا مکنده، نصب سایلنسر در ورودی یا خروجی منبع نویز مؤثر خواهد بود. سایلنسرها در سه نوع مکانیکی عکس‌العملی<sup>۱</sup>، جذبی<sup>۲</sup> و ترکیبی وجود دارند [۶-۱۰]. در نوع عکس‌العملی، بخشی از انرژی امواج صوتی از طریق تغییرات هندسی در مسیر جریان، با انعکاس و تداخل کاهش می‌یابد. در سایلنسرهای جذبی، امواج صوتی با سطوح جاذب برخورد کرده و بخشی از انرژی صوتی به گرما تبدیل می‌شود. این دو نوع سایلنسر در فرکانس‌های متفاوتی باعث کاهش انرژی صوتی می‌شوند. بنابراین، ترکیب این دو نوع سایلنسر می‌تواند در محدوده وسیع‌تری از طیف فرکانسی، نویز را کاهش دهد.

<sup>1</sup> Reactive

<sup>2</sup> Absorptive



یکی از ویژگی‌های مهم سایلنسرها، میزان افت فشار آنها است. مسئله اصلی برای مصرف‌کنندگان این تجهیزات، تاثیر افت فشار بر عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع است. طراحی بهینه سایلنسرها بر اساس سه عامل مهم شامل افت فشار، میزان کاهش صدا و هزینه انجام می‌شود.

#### اتاق عایق صوت

در مواقعی که کاهش صدا در منبع تولید یا در مسیر فرآیند امکان‌پذیر نباشد، استفاده از اتاقک‌های آکوستیک یکی از رایج‌ترین روش‌های کنترل نویز و حذف صدای مزاحم صنعتی به شمار می‌رود. با وجود دشواری در پیش‌بینی عملکرد نهایی این اتاقک‌ها، کاربردهای آن بسیار متنوع و گسترده است. برای جلوگیری از آسیب دیدن مواد جاذب صوت در دیوارهای این اتاقک‌ها، تمهیداتی جهت ممانعت از نفوذ آب ناشی از بارش یا شستشو ارایه می‌شود. همچنین برای جلوگیری از ورود گرد و خاک یا آلودگی به دیوارها، از پوشش‌های مناسب استفاده می‌شود. علاوه بر این، امکان جایگزینی مواد جاذب قدیمی با مواد جدید و سالم نیز فراهم می‌گردد.

#### پوشش آکوستیکی

یکی دیگر از راهکارهای افزایش جذب و تضعیف نویز در ساختار تجهیزات یا کانال‌ها، استفاده از پوشش‌های آکوستیکی است. پوشش آکوستیکی از راهکارهایی است که سبب کاهش صدا در مسیر انتقال صدا می‌شود. این روش نیز هنگامی کاربرد دارد که منبع نویز قابل اصلاح نباشد و استهلاک امواج صدا در مسیر انتقال باید صورت پذیرد. این پوشش‌ها می‌توانند به صورت جداگانه در اطراف بدنه لوله یا تجهیزات قرار گیرند یا به عنوان بخشی از ساختار داخلی بدنه عمل کنند. پوشش خارجی این لایه‌ها ممکن است از جنس فلزی سخت یا پارچه انعطاف‌پذیر باشد. همچنین، لایه داخلی بدنه ممکن است شامل حفره‌های آکوستیکی، مواد جاذب یا ترکیبی از این عناصر باشد.

#### به کارگیری مواد جاذب صوت

پانل‌های عایق صوتی نیز گزینه‌هایی کارآمد برای برخورداری از عملکرد آکوستیکی مناسب در دیوارها هستند. استفاده از پانل‌های سبک‌تر با کارایی صوتی بالا که استانداردهای ایمنی، بهداشتی، محیط زیستی و عدم اشتعال‌پذیری را رعایت می‌کنند، گزینه‌ای ایده‌آل برای به کارگیری در سقف و دیوارها محسوب می‌شود. در کنار این تدابیر، باید حتی‌الامکان از قرار دادن سطوح بازتاب دهنده صوت در مجاورت منابع صوتی اجتناب شود. زیرا اگر منبع صوت نزدیک یک سطح بازتاب دهنده مثل زمین یا یک دیوار صاف و سخت نصب گردد، حداقل موجب افزایش ۳ دسی‌بل به شدت صدای اصلی خواهد شد. همچنین اگر منابع صوتی در نزدیکی دو یا سه سطح بازتاب دهنده قرار گیرند، بسته به تعداد سطوح به ترتیب ۶ و ۹ دسی‌بل به صدای اولیه اضافه می‌شود. در مواردی نیز نیازی نیست تمام دیوارها و سقف ساختمان با پانل‌های آکوستیکی پوشانده شوند. استفاده از سپرهای جذب صدای با ضریب بالا در اطراف منبع صوت، برای رساندن نویز به سطح قابل قبول کفایت کرده و روشی اقتصادی‌تر به شمار می‌رود.

#### طراحی سایلنسر تهویه

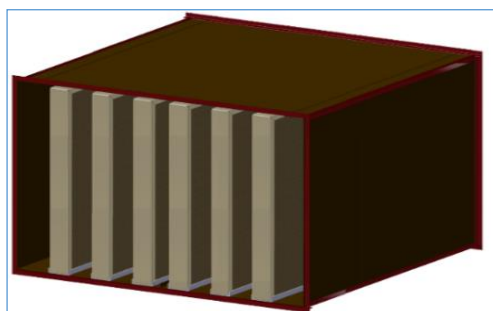
از میان راهکارهای آکوستیکی برای کنترل و کاهش صدا در سامانه‌های تهویه مطبوع، سه روش اصلی شامل استفاده از سایلنسر تهویه، اتاق آکوستیکی و لرزه‌گیر نیازمند محاسبات و طراحی مهندسی هستند. سایر روش‌ها بیشتر بر انتخاب مناسب مواد، تجهیزات و اجرای صحیح تاکید دارند. در این پژوهش، به بررسی طراحی سایلنسر تهویه پرداخته می‌شود.

#### محاسبات آکوستیکی و افت فشار

در سایلنسرهای تهویه، مطابق طرحواره ارایه شده در شکل (۳)، بافل‌ها یا صفحات جذب صدا به صورت موازی و به شکل صاف یا هشتی کنار هم قرار می‌گیرند [۱۱ و ۱۲]. با توجه به نرخ جریان هوا و سرعت مجاز در سایلنسر، سطح مقطع لازم برای آن محاسبه می‌شود. در مرحله طراحی، طول و تعداد صفحات جذب صدا، فاصله میان آنها و ضخامتشان برای دستیابی به



کاهش صدای مورد نظر تعیین می‌شود. همچنین افت فشار مجاز نیز یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی این نوع سایلنسرها به شمار می‌رود.



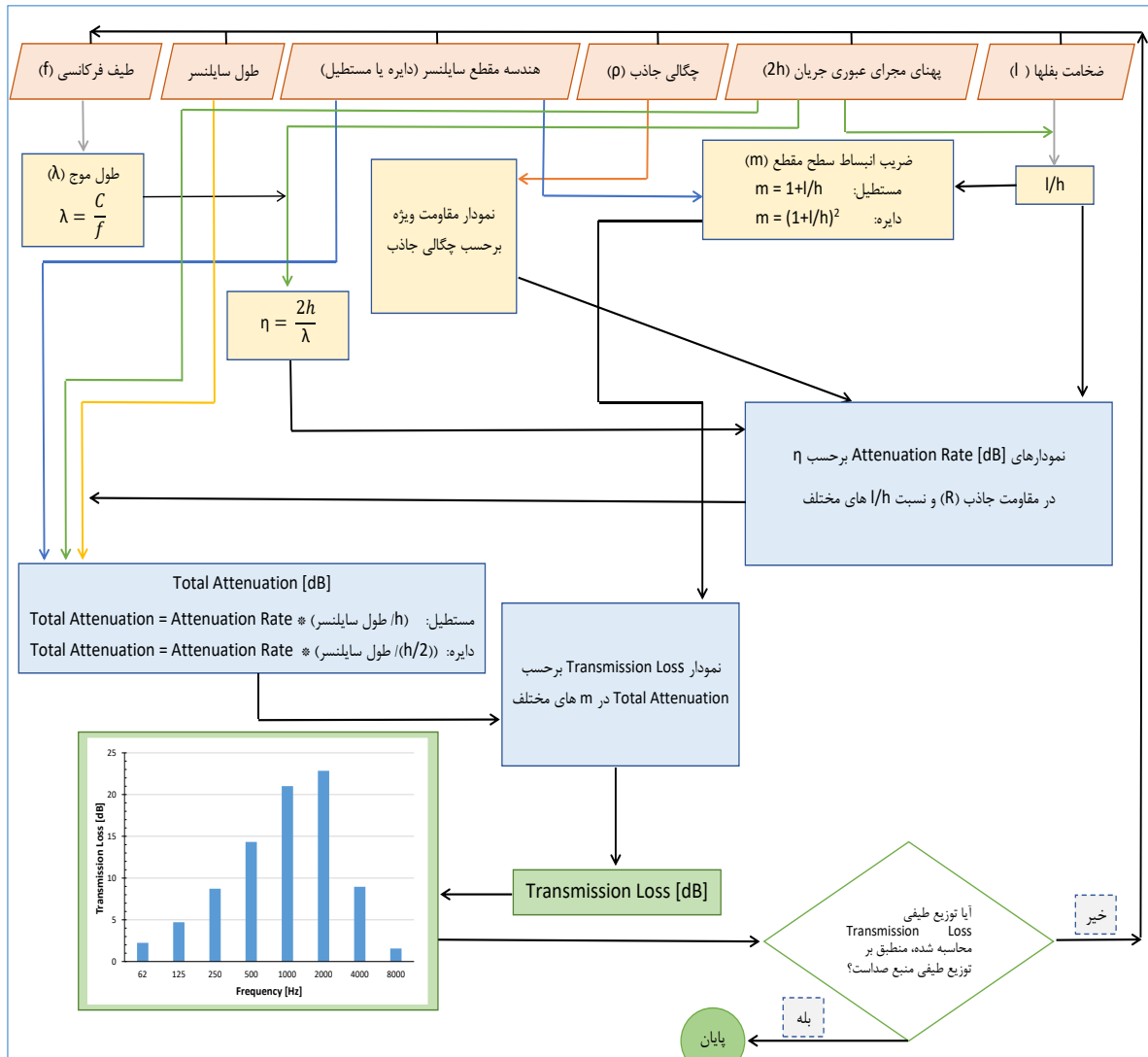
شکل ۳: طرحواره سایلنسر تهویه

برای محاسبه عمق سایلنسر، ضخامت بافل‌ها و فاصله میان آنها از برنامه‌هایی با الگوریتم‌های محاسباتی باید استفاده شود که ورودی‌های لازم آن در شکل (۴) ذکر شده است. الگوریتم محاسباتی سایلنسر تهویه در شکل (۵) ارائه شده است که مسیر طراحی سایلنسر را گام به گام مشخص می‌کند تا بهترین عملکرد آکوستیکی فراهم گردد. همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده داده‌های ورودی برنامه محاسباتی عمق، ضخامت، فاصله بین بافل‌ها و شکل مقطع سایلنسر تهویه و چگالی ماده جاذب صدا می‌باشد. در فرآیند طراحی سایلنسر اگر مقطع سایلنسر مستطیل باشد، مد ۱ و اگر دایره‌ای باشد مد ۲ انتخاب می‌شود. به دلیل اینکه محاسبات در یک فرکانس خاص انجام می‌شود هشت فرکانس اصلی (اکتاو) ۶۲، ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰، ۸۰۰۰ در برنامه معرفی شدند و محاسبات در این هشت فرکانس تکرار و ذخیره می‌شود. مقدار میرایی در واحد طول سایلنسر مطابق شکل (۵) تابع نسبت فاصله هوایی بین دو بافل به طول موج (یا فرکانس) صدا می‌باشد.

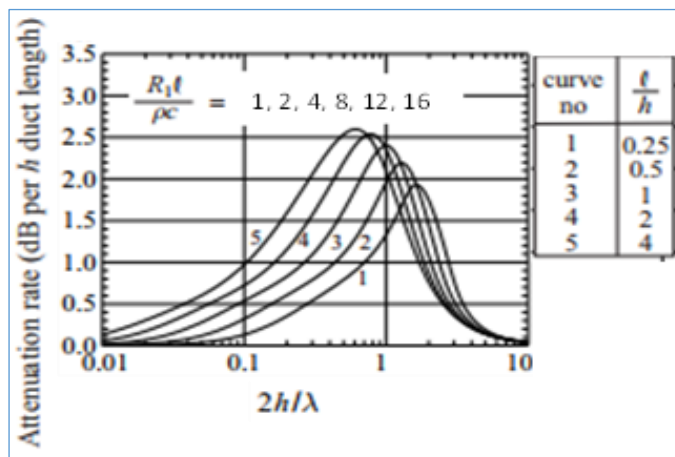
Length=? [m]	1.50	
Passage Height (2h)=? [m]	0.10 & 0.2	
Baffle Thickness (l) [m]	0.10 & 0.2	
Density (ρ) of Rock Wool=? [kg/m³]	80.00	
Rectangular = 1	1	
Circular = 2		

شکل ۴: اطلاعات ورودی برنامه محاسبه تلفات عبور سایلنسر تهویه

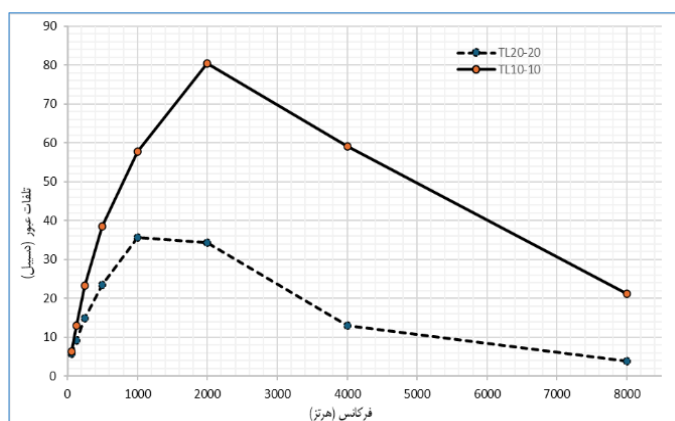
شکل (۶) مقدار میرایی برای نسبت فاصله هوایی به طول موج برای سایلنسر با طول واحد را نشان می‌دهد. نمودار نمونه شامل چند منحنی است که هر منحنی مربوط به یک نسبت ضخامت به فاصله هوایی بافل‌ها  $l/h$  می‌باشد. هر نمودار نیز مربوط به نسبت‌های  $\frac{R_1 l}{\rho C}$  با مقدار ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ می‌باشد که  $R_1$  مقاومت ماده جاذب،  $l$  ضخامت بافل،  $\rho$  چگالی سیال عامل (هوا) و  $C$  سرعت صوت در سیال می‌باشند. مقاومت جاذب صوت نیز تابع چگالی آن می‌باشد [۱۳ و ۱۴]. منحنی‌های شکل (۶) در برنامه محاسباتی به صورت معادلات توانی تعریف شدند و مقادیر بین و بیرون آنها نیز با میان‌یابی یا برون‌یابی محاسبه می‌شود. بنابراین نرخ میرایی صدا که در اینجا همان اتلاف عبور طبیعی می‌باشد بر واحد عمق سایلنسر بدست می‌آید. در شکل (۷)، نمونه‌ای از خروجی محاسبات برای دو حالت مختلف ضخامت صفحات جاذب و فاصله هوایی بین آنها به ترتیب ۲۰ و ۲۰ سانتی‌متر و نیز ۱۰ و ۱۰ سانتی‌متر نمایش داده شده است.



شکل ۵: الگوریتم طراحی سایلنسر تهویه



شکل ۶: مقدار میرایی در واحد طول سایلنسر برحسب نسبت فاصله هوایی بین دو بافل به طول موج (یا فرکانس) صدا



شکل ۷: توزیع طیفی (در فرکانس‌های اکتا) اتلاف عبور سایلنسر تهویه

افت فشار در محفظه سایلنسر  $\Delta P_{total}$  از مجموع افت فشار در ورودی داکت (کانال)  $\Delta P_{entrance}$ ، خروجی داکت  $\Delta P_{exit}$  و در طول مسیر داکت  $\Delta P_{duct}$  به علت اصطکاک به دست می‌آید [۱۵].

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{entrance} + \Delta P_{exit} + \Delta P_{duct} = (k_{entr} + k_{exit} + k_{duct})\rho \frac{V^2}{2} = k_{total}\rho \frac{V^2}{2} \quad (1)$$

در رابطه فوق که مربوط به طراحی از دیدگاه افت فشار است، پارامترهایی مانند ضریب افت فشار در ورودی و خروجی، طول مسیر سایلنسر، چگالی و سرعت هوا لحاظ شده و بر این اساس افت فشار کل در سایلنسر مشخص می‌شود.

### نتیجه‌گیری

در صورتی که در همان مراحل اولیه طراحی ساختمان و سامانه تهویه مطبوع، پارامترهای آکوستیکی نیز مدنظر قرار گیرند، هزینه‌ها به‌طور چشمگیری کاهش خواهند یافت. این موضوع در مقایسه با شرایطی که پس از ساخت ساختمان و نصب تجهیزات بخواهند اصلاحاتی انجام دهند بسیار به‌صرفه‌تر خواهد بود. هر چند راهکارهای ارائه شده در این مقاله امکان‌پذیر هستند، اما انتخاب نهایی راهکار یا راهکارهای اجرایی بر اساس شرایط موجود، هزینه‌ها و اثرات جانبی صورت می‌گیرد. در نهایت، در طراحی آکوستیکی هر سامانه تاسیساتی لازم است بهینه‌ترین راهکارها برگزیده شوند. همچنین با بهره‌گیری از الگوریتم‌های محاسباتی مناسب، امکان طراحی انواع سایلنسرها از جمله سایلنسر تهویه در حالت بهینه فراهم می‌شود تا علاوه بر عملکرد مناسب آکوستیکی، کارایی هیدرودینامیکی مطلوب نیز تضمین شود.

### فهرست علائم

علائم انگلیسی	
$C$	سرعت صوت ( $ms^{-1}$ )
$l$	ضخامت بافل (m)
$h$	فصله هوایی (m)
$p$	فشار ( $kgm^{-1}s^{-2}$ )
$k$	ضریب افت فشار
$V$	سرعت ( $ms^{-1}$ )
$R_1$	مقاومت جاذب
$TL$	تلفات عبور (dB)
علائم یونانی	
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\Delta$	تغییرات





## مراجع

- [1] Haghayegh, M., (2023). Evaluation of measurable environmental components affecting mental health in apartment housing, based on comparative comparison through brain wave recording, PhD Thesis, Azad University of Shiraz, Shiraz. (in Persian)
- [2] Regulations for preventing noise pollution, Environmental Protection Organization, (2011). Approval letter of the Supreme Council of Environmental Protection, article 13. (in Persian)
- [3] Yadegari, M., (2023). Aerodynamic noise reduction of axial flow fan with passive flow control method, PhD Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran. (in Persian)
- [4] Faezian, A., (1996). Compilation of standards and guidelines for the design of town gas pressure reduction stations with acoustic considerations, Report by Sanat Prozheh Toos Company, R&D of NIGC, Mashad. (in Persian)
- [5] Faezian, A., Razavi, S. M. R., Omidvar, A., Bayani, S., (2012). Studying, designing and manufacturing suitable silencers in order to reduce the noise of gas pressure reduction stations and providing operational and executive solutions, Ferdowsi University of Mashhad, R&D of NIGC, Mashad. (in Persian)
- [6] Barron, R.F., (2003). Industrial Noise Control and Acoustics, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- [7] Graham, W., (1981). Handbook for industrial noise control (NASA SP), Legacy CDMS.
- [8] Alton Everest, F., Ken, C., (2009). Master Handbook of Acoustics, 5th Edition, McGraw Hill Professional.
- [9] ASTM E413, (2022). Classification for Rating Sound Insulation, American National Standards Institute.
- [10] Norton, M.P., Karczub, D.G., (2003). Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers, Cambridge University Press.
- [11] Ver, J. L., Beranek, L. L., (2006). Noise and Vibration Control Engineering Principles and Applications, 2nd Edition, John Wiley & Sons.
- [12] Crocker, M. J., (1998). Handbook of acoustics, John Wiley & Sons.
- [13] Bell, L. H., Bell, D. H., (1994). Industrial Noise Control : Fundamentals and Applications, CRC Press, 2ed edition, Taylor & Francis Group.
- [14] BIES, D.A., HANSEN, C.H., HOWARD, C.Q., (2018). Engineering noise control.[SI].
- [15] Munson, B., Young, D. F., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., (2009). Fundamentals of Fluid Mechanics, 6th edition, John Wiley & Sons.