جمهوری اسلامی ایران

وزارت نفت

ادارهٔ کل بهداشت، ایمنی، محیط زیست و پدافند غیرعامل

راهنمای کنترل مهندسی صدا در صنعت نفت

MOP-HSED-GI-107(1)

محل درج مهر اعتبار		

فرم مشخصات سند :

عنوان سند: راهنمای کنترل مهندسی صدا در صنعت نفت			
شناسه سند: MOP-HSED-GL-107			
تاریخ	شماره ویرایش	تعداد صفحات	شرح
۱۳۹۹/۰۲/۱۴	صفر	۸۳	بررسی و اظهار نظر
۱۳۹۹/۰۶/۱۶	یک	۸۰	ابلاغ جهت اجرا

جدول اصلاحیه

شماره اصلاحیه	تاریخ	شماره بخش/بخش‌های تغییریافته	شماره صفحه/صفحات

محل درج مهر اعتبار		

فهرست

۱. هدف ۷
۲. دامنه کاربرد و محدوده تأثیر ۷
۳. مسئولیت‌ها و ضمانت اجرا ۷
۴. الزامات و مستندات مرجع ۹
۵. تعاریف ۱۰
۶. اقدامات ۱۲
۶-۱- سلسله مراتب کنترل صدا ۱۲
۶-۱-۱- حذف ۱۴
۶-۱-۲- جایگزینی ۱۴
۶-۱-۳- کنترل‌های مهندسی ۱۵
۶-۱-۴- کنترل اداری ۱۸
۶-۱-۵- تجهیزات حفاظت فردی ۱۸
۶-۱-۶- شاخص اولویت‌بندی کنترل صدا ۱۹
۶-۲- منابع اصلی سروصدا ۲۲
۶-۲-۱- سروصدای فن ها ۲۳
۶-۲-۱-۱ فنهای سانتریفیوژی ۲۳
۶-۲-۱-۲- فن‌های محوری ۲۴
۶-۲-۲- سروصدای دمنده‌ها ۲۶
۶-۲-۳ سروصدای جت-گاز ۲۹
۶-۲-۳-۱-جت‌های گاز ۳۰
۶-۲-۳-۲-سروصدای ناشی از برخورد جتگازها با سطوح سخت ۳۳
۶-۲-۴ سروصدای جریان گازی در لوله‌ها و کانال‌ها ۳۵
۶-۲-۵- سروصدای پمپ‌ها ۳۹
۶-۲-۶- تجهیزات احتراقی ۴۰
۶-۲-۶-۱-سروصدای کوره و مشعل ۴۰
۶-۲-۶-۲- بویلرها ۴۱
۶-۲-۶-۳- فلر ۴۲
۶-۲-۷- ساختارها و تجهیزات مرتعش ۴۳
۶-۲-۸- تجهیزات عملیات حفاری ۴۴
۶-۲-۹- سفر با هلیکوپتر ۴۴

۶-۳- کلیات کنترل‌های فنی و مهندسی صدا ۴۷

۶-۳-۱- محفظه‌های آکوستیک ۴۷

۶-۳-۱-۱-انواع محفظه‌های آکوستیک ۴۸

۶-۳-۱-۲-نشتی‌های آکوستیکی ۵۰

۶-۳-۲-روش ساده طراحی محفظه ۵۰

۶-۳-۳-موانع آکوستیکی ۵۱

۶-۳-۳-۱-موانع در فضاهای باز ۵۲

۶-۳-۳-۲-موانع در فضاهای بسته ۵۳

۶-۳-۴-سایلنسرها ۵۴

۶-۳-۴-۱-مافلر واکنشی ۵۵

۶-۳-۴-۲-مافلرهای اتلافی ۵۷

۶-۳-۵-محفظه‌های پلنوم ۵۸

۶-۳-۶-مواد آکوستیک ۶۰

۶-۳-۶-۱-مواد جاذب ۶۰

۶-۳-۶-۲-مواد مانع/ عایق ۶۳

۶-۳-۶-۳ مواد میراکننده ۶۸

۶-۳-۷-کنترل صدا در ساختمان‌های اداری ۷۰

۶-۳-۷-۱-اصلاح آکوستیکی ۷۰

۶-۳-۷-۲-جداسازی صدا ۷۴

۶-۳-۷-۳-تجهیزات مکانیکی ۷۹

منابع و مآخذ ۸۰

فهرست جداول

جدول ۱ برخی از اقدامات کنترل مهندسی ۱۷
جدول ۲ برخی از اقدامات کنترل‌های اداری ۱۸
جدول ۳ فاکتورهای وزنی متناظر تراز معادل، بر مبنای اثر دوز و قاعده ۳ دسیبل ۲۰
جدول ۴ مهم‌ترین منابع تولید صدا در صنعت نفت ۲۲
جدول ۵ راهنمای طراحی کنترل صدا برای مهم‌ترین منابع صدا در صنعت نفت ۴۵
جدول ۶ ضرایب جذب آماری برخی از مواد جاذب ۶۲
جدول ۷ افت انتقال برخی از مواد رایج مورداستفاده برای محفظه‌های آکوستیکی و موانع جداسازی ۶۷
جدول ۸ ضرایب جذب هوا براساس فرکانس و رطوبت هوا ۷۳
جدول ۹ افت انتقال استاندارد در فرکانس‌های مرکزی ۷۶
جدول ۱۰ کیفیت شنوایی برای مقادیر مختلف کلاس انتقال صوت دیوار ۷۶

فهرست اشکال

شکل ۱. سلسله مراتب (استراتژی) کنترل صدا ۱۴
شکل ۲. مثال هایی از فن های سانتریفیوژی ۲۴
شکل ۳. عنصرهای کنترل صدا برای فن سانتریفیوژی ۲۴
شکل ۴. نمونه ای از فن محوری پره ای تسمه ای ۲۵
شکل ۵. نمای بخش مثبت دوار ۲۶
شکل ۶. دمنده جابجایی مثبت دوار با سایلنسرهای نصب شده ۲۸
شکل ۷. جت گاز نشان‌دهنده مناطق اختلاط و منابع صدا ۳۱
شکل ۸. الگوی جهت‌گیری رایج برای یک جت گاز کوچک مادون صوت (با سرعت کمتر از سرعت صوت) ۳۲
شکل ۹. ترازهای صدای اندازه گیری شده در فاصله تقریباً ۱ متری یک جت گاز (با قطر۱/۸ اینچ) در هوای آزاد و هنگام برخورد روی یک سطح سخت ۳۴
شکل ۱۰. روش هایی برای کاهش صدای جت برخوردی ۳۴
شکل ۱۱. شماتیک سیستم کاهش فشار نشان‌دهنده صفحات انبساطی ۳۶
شکل ۱۲. شماتیک دیفیوزر درون‌خطی برای کاهش صدای آئرودینامیکی در کنترل شیرها ۳۷
شکل ۱۳. سایلنسر درون‌خطی به همراه عملکرد آکوستیکی ۳۸
شکل ۱۴. عایق‌کاری لوله با مواد پایه ۳۹
شکل ۱۵. پلنوم‌های اصلاح‌شده آکوستیکی برای کنترل صدای کوره‌ها و مشعل ها ۴۱
شکل ۱۶. تصویر دو فلر محصورشده ۴۳
شکل ۱۷. محفظه یک دستگاه پرس خودکار ۴۷
شکل ۱۸. اثر نشتی های صوتی بر پتانسیل کاهش صدا برای دیوارها ۵۰

شکل ۱۹. مانع و ابعاد آن ۵۲
شکل ۲۰. مانع در فضاهای بسته ۵۳
شکل ۲۱. مانع با لبه ساده ۵۴
شکل ۲۲. انواع مافلر شاخه کناری ۵۵
شکل ۲۳. اشکال مافلرهای انبساطی ۵۶
شکل ۲۴. مافلرهای دو محفظه‌ای: (الف) لوله اتصال خارجی، (ب) لوله اتصال داخلی ۵۷
شکل ۲۵. انواع مافلرهای اتلافی ۵۸
شکل ۲۶. ترکیب یک محفظه پلنوم ۵۹
شکل ۲۷. پلنوم دو محفظه‌ای ۵۹
شکل ۲۸. مثالی از کاربرد فوم جاذب به همراه فیلم پلاستیکی و چسب ۶۲
شکل ۲۹. پاسخ فرکانسی (افت انتقال) پانل های هموژن ۶۴
شکل ۳۰. لایه‌های روکش شده با مواد میراکننده ۶۹
شکل ۳۱. لمینت لایه محدود چوبی با استفاده از مواد میراکننده، با دامنه عملکرد آکوستیکی ۵ تا ۱۵ دسیبل ۶۹
شکل ۳۲. زمان های بازآوایی توصیه شده در فرکانس ۵۰۰ هرتز ۷۱
شکل ۳۳. نمودار انتخاب فاکتورهای اصلاح طیفی برای زمان های بازآوایی مطلوب ۷۲
شکل ۳۴. مسیرهای رایج انتقال صدای هوابرد در ساختمان ها ۷۴
شکل ۳۵. الف) درب های دوبل ، ب) قفل آکوستیکی ۷۸

۱. هدف

ارائـه راهنمـایی در راسـتای طـرح پیشـنهادات کـاربردی مـرتبط بـا اقـدامات کنترلـی فنـی و مهندسـی صدا در محیط‌های کاری صنعت نفت به‌منظور تأمین:

- حفاظت شنوایی کارکنان صنعت نفت
- کاهش تداخل در مکالمه و کار، جلوگیری از خطاهای انسانی متأثر از صدا و تداخل یا وقفه احتمالی در کار
- ایجاد آسایش برای کارکنان، افزایش دقت و بالا بردن راندمان کار
- جلوگیری از آزار و برهم خوردن آسایش ساکنین در منازل اطراف سایت

جلوگیری از ایجاد خسارت در تجهیزات در اثر اتلاف انرژی به‌صورت صدا که نهایتاً منجر به استهلاک سازه و تجهیزات خواهد شد.

این راهنما به‌منظور آشنایی با سلسله مراتب (استراتژی) کنترل صدا، مکانیسم‌های تولید صدا در تجهیزات موجود در صنعت نفت و کنترل‌های مهندسی صدا (به‌صورت کلی) تدوین شده است و می‌تواند توانایی کارشناسان را در انتخاب استراتژی کنترل صدا در طول عمر یک فرآیند و اجرای نقش نظارتی خود بر پروژه‌های کنترلی برون‌سپاری شده را ایجاد کند.

با توجه به عنوان راهنما توصیه می شود هدف با نگاه کلان و سازمانی بر کنترل های مهندسی صدا در فاز طراحی و ساخت تا مرحله بهره برداری و نگهداشت تدوین شود در این صورت حمایت مدیران و همکاری مدیریت های اجرایی نظیر مدیریت مهندسی و طرح ها نیز ضروری و اجتناب ناپذیر خواهد بود.)

۲. دامنه کاربرد و محدوده تأثیر

دامنه کاربرد این راهنما شامل تمامی شرکت‌های اصلی، فرعی/تابعه، مدیریت‌های مستقل ستادی، تاسیسات عملیاتی، طرح ها و پروژه های وزارت نفت و همچنین شرکت‌های واگذار شده به بخش غیر دولتی صنعت نفت می‌باشد.

۳. مسئولیت‌ها و ضمانت اجرا

اداره کل HSE و پدافند غیرعامل وزارت نفت

نظارت عالیه بر اجرای راهنمای مذکور در شرکت‌های زیرمجموعه و بازنگری و به‌روزرسانی این راهنما را بر عهده دارد.

مدیران ارشد شرکت‌ها/ مناطق/طرح‌ها

در راستای طرح و اجرای اقدامات کنترل مهندسی صدا، از اجرایی شدن مفاد راهنما از طریق تأمین منابع موردنیاز برای اجرایی نمودن طرح‌های کنترلی مذکور حمایت نمایند.

مدیران HSE چهار شرکت اصلی

از اثربخشی اقدامات کنترل مهندسی صدا در شرکت‌ها/ طرح‌ها و مناطق زیرمجموعه اطمینان حاصل نمایند.

روسای بهداشت‌کار/صنعتی شرکت‌های اصلی

ضمن شناسایی مخاطرات بهداشتی و منابع انتشار صدا ، از اثربخشی اقدامات کنترلی شرکت‌ها/ طرح‌ها/ مناطق زیرمجموعه و پایش آن اطمینان حاصل نماید.

روسای HSE شرکت‌ها/ مناطق/طرح‌ها

نسبت به ارائه پیشنهادات و طرح‌های کنترلی و اصلاحی اقدام و پس از تعیین متولی اجرا، بر حسن اجرای کار نظارت نمایند. همچنین ضمن تسریع و پیگیری در اجرای طرح ذی‌ربط، از اثربخشی طرح، پس از اجرا اطمینان حاصل نمایند.

روسا و کارشناسان بهداشت صنعتی شرکت‌ها/ مناطق/طرح‌ها

در راستای حفاظت شنوایی کارکنان شرکت، نسبت به تدوین و اجرای برنامه کنترل فنی و مهندسی صدای بالاتر از حد مجاز به شرح ذیل اقدام نمایند.

- شناسایی منابع صدای شرکت/ طرح/ منطقه
- ارزیابی ریسک مخاطرات شناسایی‌شده
- طرح‌ریزی جهت کنترل منابع آلودگی صدا
- ارائه پیشنهادات کاربردی کنترل مهندسی، بررسی هزینه- فایده و مشارکت با واحدهای خدمات مهندسی در انجام طرح‌های کنترلی
- اطمینان از اثربخشی اقدامات کنترلی طرح‌ریزی و اجراشده و پایش مستمر آن
- تسریع و پیگیری در اجرای طرح ذیربط

واحدهای مهندسی شرکت‌ها/ مناطق/ طرح‌ها

- تدوین برنامه کنترل صدا بر اساس ارزیابی‌های انجام‌شده (طراحی سیستم‌های کنترل صدا مبتنی بر نتایج پایش و ارزیابی)
- هماهنگی با مدیریت/ واحدهای HSE جهت تائید و اجرای طرح‌های کنترلی
- اجرای طرح‌های کنترلی و انجام بازرسی‌های دوره‌ای (نظارت بر فرایند اجرایی طرح‌های کنترلی)

مدیریت طرح‌ها و پروژه‌ها در شرکت‌ها/ مناطق/ طرح‌ها

- هماهنگی با مدیریت/ واحدهایHSE جهت تائید و اجرای طرح‌های کنترلی
- برنامه‌ریزی و در نظر گرفتن تمهیدات لازم جهت کنترل صدا در کلیه ساختمان‌ها و تجهیزات فرایندی

۴. الزامات و مستندات مرجع

۴-۱- راهنمای استقرار و توسعه نظام مدیریت بهداشت، ایمنی و محیط زیست در صنعت نفت، ابلاغ شده طی نامه شماره ۱/۲۸-۳۸۴۳ مورخه ۸۱/۰۱/۲۴

۴-۲- راهنمای ارزیابی سیستم مدیریت بهداشت و شاخص‌های عملکردی، ابلاغی اداره کل HSE و پدافند غیرعامل وزارت نفت به شماره MOP-HSED-Gl-100

۴-۳- راهنمای تدوین استراتژی ارزیابی و مدیریت مواجهات شغلی کارکنان با عوامل زیان آور محیط کار، ابلاغی اداره کل HSE و پدافند غیرعامل وزارت نفت به شماره MOP-HSED-Gl-102

۵. تعاریف

منابع انتشار: فرآیند یا تجهیزات یا عملیاتی که عامل زیان‌آور صدا از آنجا به محیط کار منتشر می‌شود.

حد مجاز مواجهه شغلی با صدا[1]: مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی با صدا، به مقادیری اشاره دارد که اگر تقریباً کلیه شاغلین سالم، روزانه و به‌طور مکرر در مواجهه با این مقادیر قرار گیرند، آثار نامطلوب در توانایی شنیداری و درک محاوره طبیعی آنان ظاهر نگردد. مقادیر حد مجاز مواجهه شغلی به عنوان راهنما برای کنترل مواجهه با صدا مورد استفاده قرار می‌گیرند و با توجه به حساسیت متفاوت افراد نباید به عنوان مرز حقیقی بین حد ایمنی و خطر تلقی گردد. بر اساس حدود مجاز مواجهه شغلی کشوری، حد مجاز مواجهه شغلی با صدا بر مبنای تراز معادل فشار صوت، برای ۸ ساعت کار روزانه برابر ۸۵ دسیبل (شبکه A) می‌باشد.

حد آسایش صوتی: برای شاغلینی که در محیط‌های صنعتی یا مشاغل دیگر، دارای فعالیت فکری می‌باشند، مانند اپراتورهای اتاق کنترل و سایر مشاغل دفتری، هر چند حدود مجاز مواجهه شغلی با صدا، برای پیشگیری از عوارض شنوایی برای آن‌ها به‌تمامی مرجعیت دارد و رعایت آن اجباری می‌باشد، لیکن با توجه به فعالیت فکری آنان، برای تأمین آسایش صوتی، سلامت روحی– روانی و حفظ عملکرد ذهنی آنان، بر اساس حدود مجاز مواجهه شغلی، حد آسایش صوتی برای ۸ ساعت کار روزانه برابر با ۷۰ دسیبل (شبکه **A**) در حین انجام فعالیت شغلی تعیین‌شده است.

حد مراقبت/اقدام[2]: منظور مقادیری است که مراقبت‌های پیشگیرانه و احتیاطی از جمله، برنامه حفاظت شنوایی[3]در مواجهه با عامل زیان‌آور صدا شروع گردد. این مراقبت شامل تدابیر مدیریتی، پزشکی، فنی و حفاظت فردی می‌باشد تا از صدمات ناشی از مواجهه افراد حساس و مواجهه‌های توأم با عوامل تشدیدکننده جلوگیری شود. بر اساس حدود مجاز مواجهه شغلی، حد مراقبت شغلی با صدا بر مبنای تراز معادل فشار صوت، برای ۸ ساعت کار روزانه برابر با ۸۲ دسیبل (شبکه A) تعیین شده است.

[1] Occupational Exposure Limits (OEL)
[2] Action limit
[3] Hearing Conservation Program(HCP)

سایلنسر[1]:یک عنصر مهم در کنترل صدا برای کاهش صدای خروجی از ماشین‌آلات، سروصدای فن و دیگر منابع دارای جریان گاز می‌باشد. سایلنسر یک عنصر در کانال جریان قرار دارد که به‌منظور کاهش صدای منتقل‌شده در امتداد کانال عمل می‌کند و درعین‌حال اجازه می‌دهد که گاز از درون کانال آزادانه جریان یابد.

مافلر[2]: نوعی از سایلنسرهای غیرفعال از نوع واکنشی را گویند، مکانسیم اصلی تضعیف صدای عبوری از درون این مافلرها، انعکاس انرژی صوتی به سمت منبع (رو به عقب) است.

دیفیوزر[3]: به وسیله‌ای گفته می‌شود که برعکس نازل عمل می‌کند؛ یعنی با کاهش سرعت سیال، فشار آن را بالا می‌برد.

[1] Silencers
[2] Mufflers
3 Diffuser

۶. اقدامات

به‌منظور حفظ و ارتقاء سلامت جسمی و روانی نیروی انسانی به‌عنوان مهم‌ترین سرمایه در ایجاد توسعه پایدار و همچنین جلوگیری از خسارات وارده به تجهیزات در اثر عدم به‌کارگیری صحیح و اتلاف انرژی، هزینه تعمیر یا جایگزینی و تعویض قطعات و ماشین‌آلات در اثر استهلاک و از دست رفتن زمان تولید می‌توان با اجرای اقدامات کنترل صدای ذکر شده در این راهنما بر اساس سلسله‌مراتب ذیل، گام مؤثری در جهت کنترل این عامل زیان‌آور برداشت.

۱-سازمان می‌بایست پس از شناسایی نقاط و منابع صدای بالاتر از حد مجاز بر اساس سلسله مراتب کنترل صدا، اقدامات کنترلی جهت اصلاح و کنترل صدای محیط کار تدوین و اجرا نماید.

۲-اقدامات مهندسی کنترل صدا حتی‌الامکان می‌بایست در مرحله طراحی اجرا گردد.

۳-ارزیابی‌های پیش از خرید و پیش از ساخت تأسیسات و تجهیزات بایستی شامل ارزیابی دقیق و روشنی از رعایت الزامات بهداشتی بوده و بر طراحی به عنوان بهترین اقدام پیشگیرانه جهت کنترل عوامل زیان‌آور صدا، کاهش ریسک و اثرات نامطلوب تأکید نماید.

۴-در فاز طراحی و ساخت‌وساز بایستی ضمانت‌های لازم جهت برآورده‌سازی مقادیر استاندارد اخذ گردد.

۵-در فاز بهره‌برداری پس از اجرای اقدامات کنترلی، می‌بایست به‌منظور بررسی کارایی این اقدامات، اندازه‌گیری و ارزشیابی مجدد از عامل زیان‌آور صدا انجام یابد.

۶-طراحی و اجرای تمامی اقدامات کنترلی صدای محیط کار می‌بایست با هماهنگی و تائید مدیریت/ امور HSE هر شرکت/طرح و بر اساس نظرات مهندسی روسا/ مسئولین بهداشت حرفه‌ای/ صنعتی مدیریت‌ها/ ادارات HSE انجام یابد.

۷- در فاز بهره‌برداری مهندسی روسا/ مسئولین بهداشت حرفه‌ای/ صنعتی مدیریت ها/ ادارات HSE شرکت علاوه بر پیگیری انجام اقدامات مهندسی جهت کنترل صدا، باید از روش‌های کنترل مدیریتی (با هماهنگی مدیریت‌های ذی‌ربط از جمله منابع‌انسانی و تصمیمات متخذه در کمیته‌های سلامت) و حفاظت فردی مناسب به عنوان اقدامات جانبی نیز استفاده نماید.

۶-۱-سلسله مراتب کنترل صدا

برای تعیین چگونگی اجرای راهکارهای کنترلی منطقی و مؤثر می‌بایست از یک سلسله مراتب کنترلی استفاده می‌شود. همان‌طوری که در شکل ۱ نشان داده شده است، سلسله مراتب به‌کارگیری اقدامات کنترل صدا به ترتیب

عبارت‌اند از حذف[۱] (حذف فیزیکی خطر)، جایگزینی[۲] (جایگزینی خطر)، کنترل‌های مهندسی[۳] (جداسازی[۴] افراد از خطر)، کنترل‌های اداری[۵] (تغییر روش کار کردن افراد) و تجهیزات حفاظت فردی[۶] (حفاظت از کارکنان با تجهیزات حفاظت فردی) می‌باشد.

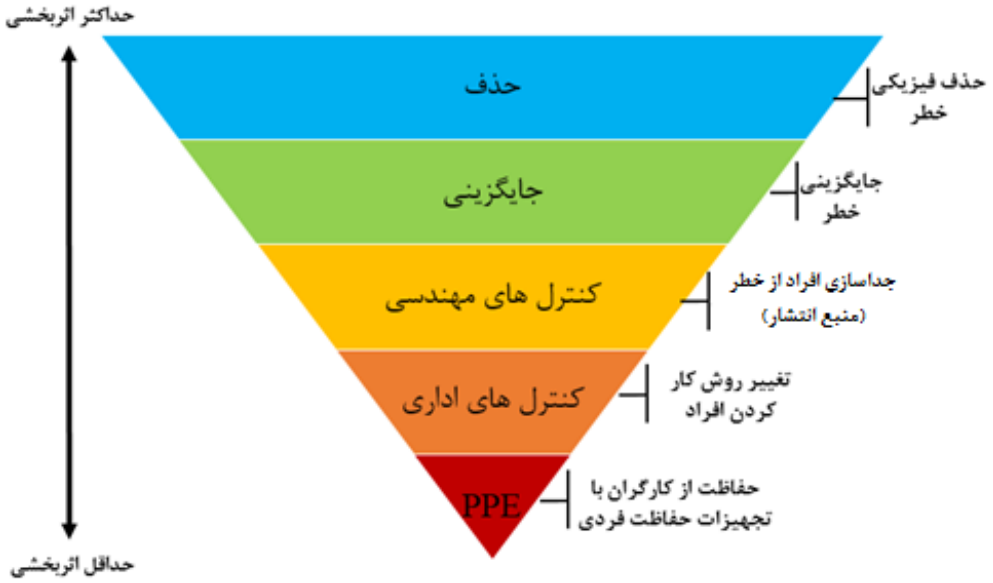
بر اساس شکل شماره ۱ اثربخشی سلسله مراتب روش‌های کنترلی از پایین به بالا بیشتر می‌شود و پیروی از این سلسله مراتب به طور معمول به استقرار سیستم‌های ذاتاً ایمن[۷] منجر می‌شود، به‌طوری‌که ریسک بیماری یا آسیب به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. این در حالی است که سازمانNIOSH، روشی تحت عنوان پیشگیری از طریق طراحی[۸] برای جلوگیری و کاهش آسیب‌های شغلی، بیماری‌ها و مرگ‌ومیر، از طریق به‌کارگیری ملاحظات پیشگیری در تمام طراحی‌های تأثیرگذار بر کارگران را در دستور کار دارد؛ بنابراین سلسله مراتب کنترل‌ها یک استراتژی پیشگیری از طریق طراحی می‌باشد.

حذف و جایگزینی درحالی‌که مؤثرترین استراتژی در کاهش خطرات می‌باشد، اما اجرای آن در یک فرآیند موجود نیز دشوارترین می‌باشد، چراکه این استراتژی نیازمند تغییرات اساسی در تجهیزات و روش‌های کاری می‌باشد؛ اما درصورتی‌که فرآیند در مرحله طراحی یا توسعه باشد، حذف و جایگزینی خطرات، ممکن است ارزان و آسان باشد.

کنترل‌های اداری و تجهیزات حفاظت فردی نیز معمولاً در فرآیندهای موجود که خطرات به‌صورت خاص کنترل نشده‌اند، به‌عنوان یک برنامه نسبتاً ارزان مورد استفاده قرار می‌گیرند و در دراز مدت می‌تواند بسیار پرهزینه بوده و نسبت به سایر اقدامات اثربخشی کمتری دارند و نیازمند تلاش قابل‌توجه از سوی کارکنان می‌باشد.

---

[1] Elimination
[2] Substitution
[3] Engineering Controls
[4] Isolation
[5] Administrative Controls
[6] Personal Protective Equipment
[7] Inherently Safer Systems
[8] Prevention through Design (PtD)



شکل ۱. سلسله مراتب (استراتژی) کنترل صدا

۶-۱-۱-حذف

فرآیندی است که منابع صدا را از بین می‌برد و به‌عنوان مؤثرترین راه بهتر است همیشه هنگام معرفی یک فرآیند جدید، انتخاب تجهیزات جدید و طراحی چیدمان ایستگاه‌های کاری در نظر گرفته شود. مثال‌هایی از حذف صدا عبارت‌اند از پرهیز از استفاده از فرآیندها یا ماشین‌آلات پرسروصدا، حذف برخوردهای بین اجسام یا سطوح سخت، برون‌سپاری فرآیندهای پرسروصدا و دور کردن فعالیت‌های پرسروصدا از سایر فعالیت‌ها، برنامه‌ریزی قبلی و معرفی یک سیاست مناسب خرید یا اجاره/کرایه برای کاهش میزان صدا در محیط کار.

بر این اساس می‌بایست قبل از خرید ماشین‌آلات جدید، تراز صدای آن‌ها در نظر گرفته شود و این اطلاعات از تولیدکنندگان یا تأمین‌کننده فرآیند یا ماشین‌آلات کسب گردد.

۶-۱-۲-جایگزینی

استراتژی جایگزینی، فرآیند جایگزین کردن ماشین‌آلات یا تجهیزات پر سر و صدا با گزینه‌های کم‌صدا می‌باشد. انجام این کار به شکل‌های متفاوت می‌تواند کارکنان در معرض صدا را محافظت کند، برای مثال، استفاده از جوش به‌جای استفاده از پرچ و استفاده از فرآیندهای هیدرولیکی برای خم کردن قطعات نسبت به چکش‌کاری صدای کمتری تولید می‌کند. همچنین به‌جای استفاده از هوای جت برای برطرف کردن آلودگی از یک بخش تولید،

برس‌های دوار می‌تواند مورداستفاده قرار گیرند و به منظور کاهش صدا، یک فن سانتریفیوژی[1] می‌تواند جایگزین یک فن نوع ملخی[2] شود.

آنچه صنعت نفت می‌تواند انجام دهد:

به‌منظور دست‌یابی به اهداف استراتژی حذف در سلسله مراتب کنترل صدا در صنعت نفت، در فاز طراحی و قبل از ساخت تأسیسات جدید، ضروری است اقدامات ذیل در ارتباط با به‌کارگیری تجهیزات دارای تراز صدای پایین انجام پذیرد (لازم به یادآوری است که در موارد برون‌سپاری فاز طراحی و ساخت تأسیسات جدید، به‌کارگیری اقدامات کنترل صدا، می‌بایست به شرح پیمان ضمیمه گردد).

- ارزیابی تراز صدای منتشره از تجهیزات مورد نظر، با استفاده از اطلاعات مربوط به تراز صدای منتشره از سوی تولیدکننده یا برآورد آن با توجه به مشخصات فنی این تجهیزات (فصول ۱۱تا ۱۳ منبع شماره ۲ و فصل ۵ منبع شماره ۳)، به‌منظور انطباق با الزامات استاندارد صدا در محیط‌های کاری.
- ارزیابی اثر افزایشی تراز صدای منتشره از هر یک از تجهیزات مختلف در هنگام به‌کارگیری هم‌زمان این تجهیزات بر تراز کلی صدا.
- به‌کارگیری سایر استراتژی‌های کنترل صدا (کنترل‌های مهندسی) قبل از استقرار تجهیزات (با در نظر گرفتن صدای منتشره به صورت منفرد و هم‌زمان تجهیزات مختلف) درصورتی‌که به‌کارگیری/خرید تجهیزات با تراز صدای استاندارد به هر دلیل امکان‌پذیر نباشد.

توجه: ضروری است به‌منظور رعایت الزامات مربوط به سلسله مراتب کنترل صدا و الزامات آکوستیکی، خرید تجهیزات جدید، طراحی و ساخت تأسیسات جدید، ساخت‌وساز در تأسیسات موجود، جایگزینی و انجام تعمیرات اساسی تجهیزات، به تائید بهداشت حرفه‌ای/ صنعتی ادارات HSE شرکت برسد.

۶-۱-۳-کنترل‌های مهندسی

کنترل‌های مهندسی، کارکنان را با جداسازی افراد از خطر (منبع انتشار) یا با قرار دادن یک مانع بین دریافت‌کننده (فرد) و خطر، حفاظت می‌کنند (برای مثال استفاده از پرده‌ها، موانع، محفظه‌ها و مواد آکوستیک) و نسبت به اقدامات اداری و تجهیزات حفاظت فردی[3] در کنترل مواجهات در محیط کار موفق‌تر می‌باشند، چرا که آن‌ها برای حذف خطر در منبع، قبل از تماس با فرد، طراحی می‌شوند. هزینه اولیه کنترل‌های مهندسی می‌تواند

[1] Centrifugal
[2] Propeller
[3] Personal Protective Equipment (PPE)

بالاتر از هزینه اقدامات کنترلی اداری یا تجهیزات حفاظت فردی باشد، اما در دراز مدت، هزینه‌های عملیاتی اغلب پایین‌تر می‌باشند و در برخی موارد، می‌توانند منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌ها شود. رویکردهای کنترل مهندسی می‌توانند در سه موقعیت منبع صدا، مسیر انتقال صدا و دریافت‌کننده (فرد) به اجرا درآیند.

الف- کنترل‌های مهندسی در منبع

معمولاً به عنوان بهترین استراتژی کنترل صدا در نظر گرفته می‌شوند. صدا در منبع ممکن است به دلیل مشکلاتی ازجمله فرسودگی تجهیزات ایجاد شود یا ممکن است در برخی موارد صدای تولیدشده از یک منبع، صرفاً ناشی از یک بخش آن سیستم باشد که با کنترل آن (از طریق ایجاد حفاظ آکوستیک)، می‌توان به‌طور قابل‌توجهی صدای کل منبع را کاهش داد. همچنین کنترل مهندسی صدا در منابع، می‌تواند از طریق محصور کردن منابع صدا در داخل یک محفظه[1] آکوستیک (محصور کردن کامل[2] یا جزئی[3] منابع صدا) یا استفاده از مافلرها[4] یا سایلنسرها[5] (برای کنترل سروصدای خروجی از موتورها، فن‌ها و توربین‌ها) حاصل آید.

ب- کنترل‌های مهندسی در مسیر انتقال صدا

هنگامی‌که کنترل‌های مهندسی در منبع، به‌صورت عملیاتی یا ازنظر اقتصادی امکان‌پذیر نباشد، اصلاح مسیر انتشار صدا، از طریق ایجاد موانع[6] بین منبع و دریافت‌کننده (فرد) یا از طریق اصلاح آکوستیکی مسیر (با به‌کارگیری مواد جاذب آکوستیکی در سطوح) گزینه مناسبی خواهد بود. در منابع تولیدکننده صدا مستقر در محیط‌های بیرونی، یک اقدام ساده برای کنترل صدا، قرار دادن این منابع در فاصله‌ای دور نسبت به موقعیت دریافت‌کننده (فرد) خواهد بود (یا به عبارتی‌دیگر، طولانی کردن مسیر انتقال صدا). به عنوان مثال، کاهش تراز صدای ناشی از وسایل نقلیه یا فرآیندهای پرسروصدا (مانند محل استقرار دیزل ژنراتورها) در مجاورت کمپ‌های مسکونی، ساختمان‌های اداری یا بهداشتی و درمانی، با استفاده از نصب موانع آکوستیکی در طول مسیر تردد وسایل نقلیه یا در موقعیت فرآیندهای پرسروصدا قابل دستیابی می‌باشد.

به عنوان یک قاعده کلی می‌توان گفت زمانی که میزان صدای انتقالی مستقیم از منبع به دریافت‌کننده (فرد) نسبت به صدای انتقالی غیرمستقیم (از طریق انعکاسات سطوح محیط کار) به دریافت‌کننده کمتر باشد، اصلاح

---

[1] Enclosures
[2] Fully
[3] Partially
[4] Mufflers
[5] Silencers
[6] Barriers

مسیر انتشار صدا از طریق ایجاد موانع بین منبع و فرد، برای کاهش صدا در موقعیت دریافت‌کننده (فرد)، در محیط‌های داخلی مؤثر نخواهد بود. در این حالت، می‌توان سطح صدا را از طریق اصلاح آکوستیکی مسیر انتشار با به‌کارگیری مواد جاذب آکوستیکی در سطوح، کاهش داد. بنابراین می‌توان گفت که ضریب جذب صوتی سطوح (نسبت انرژی آکوستیکی جذب‌شده به انرژی آکوستیکی برخوردی بر سطوح مواد)، یکی از عوامل مؤثر در کاهش/ افزایش سطح صدای تولیدشده توسط منابع صدا در داخل محیط‌های سربسته/ ساختمان می‌باشد. به‌طوری‌که استفاده از مواد جاذب صدا در سطوح داخلی، می‌تواند تراز صدا را به‌طور قابل‌توجهی (تا پنج دسیبل) کاهش دهد، اگرچه این رویکرد از میزان انرژی که فرد به‌صورت مستقیم دریافت می‌کند نمی‌کاهد (برای کسب اطلاعات بیشتر به بخش ۶-۳-۶، مواد آکوستیک مراجعه شود).

پ- کنترل مهندسی در موقعیت دریافت‌کننده (فرد)

به عنوان یک استراتژی بسیار مؤثر، می‌تواند از طریق محصور کردن فرد در یک محفظه/اتاقک پرسنلی آکوستیک حاصل شود، به‌طوری‌که پرداختن به تهویه مطبوع در این اتاقک‌ها به‌منظور فراهم نمودن آسایش افراد به‌ویژه در مناطق گرم و مرطوب، حائز اهمیت بالایی می‌باشد. در ادامه در جدول ۱، به برخی از اقدامات کنترل مهندسی صدا پرداخته‌شده است.

جدول ۱. برخی از اقدامات کنترل مهندسی

جداسازی ناحیه پرسروصدا از دیگر فضاهای کاری با استفاده از یک پارتیشن کاهش‌دهنده صدا
محصور کردن ماشین‌آلات پرسروصدا با مواد جاذب صدا
جلوگیری از تماس سطوح فلزی با یکدیگر با استفاده از ضربه‌گیرهای پلاستیکی[1]
استفاده از روکش‌های جاذب بر روی سطوح برای کاهش صدای ناشی از سقوط یا برخورد اشیاء
استفاده از مواد جاذب صدا بر روی دیوارها، سقف و کف به‌منظور کاهش تراز صدای ناشی از بازآوایی[2] (همچنین در سطوح سخت انعکاس‌دهنده تجهیزات)
استفاده از تسمه‌های نوار نقاله بجای غلطک‌ها
استفاده از سایلنسرهای آکوستیکی در ورودی و خروجی سیستم‌ها
استفاده از اتصالات لاستیکی برای جداسازی منبع ارتعاشی صدا، از سطوحی که روی آن نصب‌شده است
برنامه تعمیر و نگه‌داری منظم تجهیزات مانند تعمیر و تعویض قسمت‌های چرخنده شل/ لق، یاتاقان و چرخ‌دنده‌های فرسوده (در صورت انجام منظم در کاهش انتشار صدا بسیار مؤثر می‌باشد)

[1] Plastic Bumpers
[2] Reverberation

توجه:

۱- پدیده بازآوایی را تجمع تدریجی سروصدای انعکاس یافته[1] در یک محیط بسته می‌نامند و بهترین مثال آن را می‌توان در استخرهای سرپوشیده جایی که صدا ایجادشده برای مدتی ادامه می‌یابد.

۲- تراز و مشخصه‌های فرکانسی صدا در منابع از مهم‌ترین عوامل تعیین ویژگی‌های (ضخامت، شکل و افت انتقال صدا) محفظه‌ها/ اتاقک‌ها، موانع، مافلرها/سایلنسرها و دیگر راه‌کارهای مهندسی کنترل صدا می‌باشد.

۶-۱-۴-کنترل اداری

روشی است برای سازماندهی کار، به‌طور مثال با کاهش تعداد کارگران یا کاهش مدت‌زمان مواجهه با صدا. کنترل‌های اداری می‌بایست زمانی استفاده شوند که کاهش مواجهه با صدا از طریق حذف، جایگزینی یا اقدامات کنترل مهندسی صدا، امکان‌پذیر نباشد.

جدول ۲. برخی از اقدامات کنترل‌های اداری

شناسایی، تعیین و اطلاع‌رسانی مناطقی که باید از وسایل حفاظت شنوایی استفاده شود.
محدود کردن مدت‌زمان فعالیت در نواحی پرسروصدا با استفاده از طراحی شغل و چرخش شغل.[2]
برنامه‌ریزی مناسب جهت سپری کردن زمان‌های استراحت در نواحی دور از محیط کار پرسروصدا.
ارائه اطلاعات کافی، دستورالعمل‌ها و آموزش به کارگران برای استفاده درست از تجهیزات کاری.

۶-۱-۵-تجهیزات حفاظت فردی

این روش آخرین مرحله در سلسله مراتب کنترل می‌باشد و می‌بایست به‌عنوان آخرین راهکار بعد از تلاش‌های انجام‌شده در جهت حذف، جایگزینی، کنترل مهندسی و اقدامات اداری مورد استفاده قرار گیرد. بااین‌حال، در برخی از شرایط که امکان انجام این اقدامات وجود ندارد (مانند افرادی که با هلیکوپتر به مناطق کاری منتقل می‌شوند یا کارکنان شاغل در پارکینگ و پایانه‌های هوایی)، استفاده از محافظ‌های شنوایی می‌تواند تنها ابزار عملی محدود کردن مواجهه کارکنان با سروصدا باشد. کارگران زمانی که در معرض سروصدای مساوی یا بیشتر از ۸۵ دسیبل (شبکه A)، به‌عنوان میانگین زمانی ۸ ساعته می‌باشند، الزامی است که از محافظ‌های شنوایی استفاده کنند.

[1] Reflected Noise
[2] Job Rotation

همچنین افراد در معرض هرگونه تراز صدای ضربه‌ای/کوبه‌ای بالاتر از ۱۴۰ دسیبل (شبکه A) یا تراز صدای مداوم بالاتر از ۱۰۰ دسیبل (شبکه A)، می‌بایست از حفاظت شنوایی مضاعف استفاده کنند (مانند استفاده هم‌زمان از حفاظ‌های رو گوشی[1] و حفاظ‌های توگوشی[2]).

وسایل حفاظت شنوایی می‌بایست دارای الزاماتی از جمله توانایی کاهش مواجهه به سطوح ایمن (نرخ کاهش صدا[3]متناسب با ویژگی‌های صدای مورد مواجهه)، سازگاری با سایر لوازم حفاظت فردی مورداستفاده، راحتی استفاده و مورد پذیرش قرار گرفتن از سوی کارکنان، متناسب بودن با دما و رطوبت محیط کار و توانایی فراهم نمودن ارتباط مناسب و نیازهای شنوایی (توانایی شنیدن صداهای هشدار) باشند. اگر حفاظت تأمین‌شده توسط وسایل حفاظت شنوایی خیلی زیاد باشد، برقراری ارتباط دشوار و منجر به فعالیت افراد در انزوا می‌شود.

توجه: به‌منظور کسب اطلاعات بیشتر در خصوص انتخاب، استفاده، مراقبت و نگهداشت محافظ‌های شنوایی به استاندارد BS 458، BS 352-1 (حفاظ‌های روگوشی)، BS 352-2 (حفاظ‌های توگوشی)، BS 352-3 (گوشی‌های حفاظتی متصل به کلاه ایمنی صنعتی) مراجعه شود.

۶-۱-۶-شاخص اولویت‌بندی کنترل صدا[4]

جهت رتبه‌بندی واحدها/ کارگاه‌ها از نظر آلودگی صدا، شاخص اولویت‌بندی کنترل صدا ارائه گردیده است. در تدوین این شاخص با توجه به نتایج اندازه‌گیری صدا در هر کارگاه، با لحاظ نمودن ۳ شاخص، تعداد کارکنان در معرض، ساعت مواجهه روزانه و تراز معادل فشار صوت، یک معادله محاسباتی تدوین شده است تا بتوان با کمک آن کارگاه‌ها را از نظر آلودگی صدا رتبه‌بندی نمود. در این روش، محدوده‌های مقادیر تراز معادل مواجهه فشار صوت به فاکتور وزنی تبدیل‌شده‌اند. فاکتورهای وزنی بر مبنای اثر دوز و قاعده ۳ دسیبل (شبکه A)، تنظیم‌شده‌اند که افزایش آن‌ها به صورت تصاعد هندسی متناظر با تراز فشار صوت افزایش می‌یابد. معیار تبدیل تراز معادل به فاکتور وزنی در جدول ۳ آمده است.

اطلاعات مربوط به تعداد افراد در معرض مستقر در هر ناحیه یا کارگاه موردبررسی نیز جمع‌آوری می‌گردد. در این روش برای آن دسته از افرادی که در ایستگاه ثابتی مشغول به کار نبودند و در طی شیفت کاری خود در چندین ایستگاه که ناحیه‌های متفاوتی از گستره تراز فشار صوت تعیین‌شده را در برمی‌گیرد تحرک داشته باشند، میانگینی

---

[1] Ear plug
[2] Ear Muff
[3] Noise Reduction Rate (NRR)
[4] Noise Control Priority Index(NCPI)

از فاکتورهای وزنی متناظر با تراز فشار صوت ایستگاه‌های کاری که در آن فعالیت می‌کنند لحاظ می‌گردد. به عنوان‌مثال اگر فردی در واحد پخت، سه اپراتور مسئول رسیدگی به ۱۷ دستگاه در خط تولید بوده و توقف آن‌ها در ۷ ایستگاه باشد، میانگینی حسابی از فاکتورهای وزنی برای هر اپراتور موردنظر که متناظر با تراز فشار صوت هفت ایستگاه کاری است لحاظ می‌گردد.

جدول ۳. فاکتورهای وزنی متناظر تراز معادل، بر مبنای اثر دوز و قاعده ۳ دسیبل

گستره تراز فشار صوت دسیبل(A)		فاکتور وزنی[1]	گستره تراز فشار صوت دسیبل(A)		فاکتور وزنی
حد بالا	حد پایین		حد بالا	حد پایین	
۶۵/۵	۶۲/۵	۰/۰۰۷۸	۸۹/۵	۸۶/۵	۲
۶۸/۵	۶۵/۵	۰/۰۱۵۶	۹۲/۵	۸۹/۵	۴
۷۱/۵	۶۸/۵	۰/۰۳۱۲	۹۵/۵	۹۲/۵	۸
۷۴/۵	۷۱/۵	۰/۰۶۲۵	۹۸/۵	۹۵/۵	۱۶
۷۷/۵	۷۴/۵	۰/۱۲۵	۱۰۱/۵	۹۸/۵	۳۲
۸۰/۵	۷۷/۵	۰/۲۵	۱۰۴/۵	۱۰۱/۵	۶۴
۸۳/۵	۸۰/۵	۰/۵	۱۰۷/۵	۱۰۴/۵	۱۲۸
۸۶/۵	۸۳/۵	۱	۱۱۰/۵	۱۰۷/۵	۲۵۶

پس از دریافت اطلاعات مورد نیاز، شاخص اولویت‌بندی کنترل با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد. با محاسبه شاخص مذکور برای تمامی واحدها می‌توان واحدهای مختلف یک کارگاه را رتبه‌بندی نمود. واحد با شاخص بزرگ‌تر نشان‌دهنده خطر بالاتر آلودگی صوتی بوده و نیازمند ضرورت در اجرای راهکار کنترلی می‌باشد.[2]

رابطه ۱: شاخص اولویت کنترل صدا

[1] w_i (Weight factor)

[2] برای کسب اطلاعات بیشتر به کتاب مهندسی صدا و ارتعاش دکتر رستم گل‌محمدی مراجعه شود.

$$\mathrm{NCPI} = \frac{\sum_{1}^{n} w_i \cdot p_i \cdot t_i}{\sum PT}$$

NCPI: شاخص اولویت کنترل صدا

W_i: فاکتور وزنی متناظر با تراز فشار صوت

P_i: تعداد افراد در معرض مستقر در هر کارگاه یا ناحیه

t_i: زمان مواجهه افراد برحسب ساعت

P: مجموع تعداد افراد در کل واحدهای خط تولید هر کارگاه/ ناحیه

T: مجموع زمان مواجهه افراد برحسب ساعت

۶-۲-منابع اصلی سروصدا

به‌طور خلاصه، سروصدا را می‌توان بر اساس "منابع تولید صدا یا مکانیسم‌های تولید صدا" تقسیم‌بندی کرد. با تشخیص این موضوع، کارشناس می‌تواند یک رویکرد سیستماتیک برای کنترل صدا به کار گیرد. ازآنجایی‌که امکان پرداختن به همه منابع صدا وجود ندارد، در ادامه مکانیسم‌های پایه ایجاد صدا در منابع مهم موجود در صنعت نفت (جدول ۴) ارائه و روش‌های کنترل صدا در این منابع بیان می‌شود.

جدول ۴ . مهم‌ترین منابع تولید صدا در صنعت نفت

ردیف	منبع صدا	
۱	سروصدای ناشی از فن‌ها	فن‌های سانتریفیوژی[1]
		فن‌های محوری[2]
۲	سروصدای ناشی از دمنده‌ها[3]	
۳	سروصدای ناشی از جت-گاز[4]	جت‌های گاز
		سروصدای ناشی از برخورد[5] جت گازها با سطوح سخت
۴	سروصدای جریان گازی در لوله‌ها و کانال‌ها[6]	
۵	سروصدای ناشی پمپ‌ها	
۶	سروصدای کوره و مشعل[7]	
۷	توربین‌ها	
۸	کمپرسورهای هوا	
۹	موتورهای دیزل	
۱۰	بویلرها	
۱۱	فلر	
۱۲	سازه‌ها و تجهیزات مرتعش	
۱۳	تجهیزات عملیات حفاری	
۱۴	سفر با هلیکوپتر	

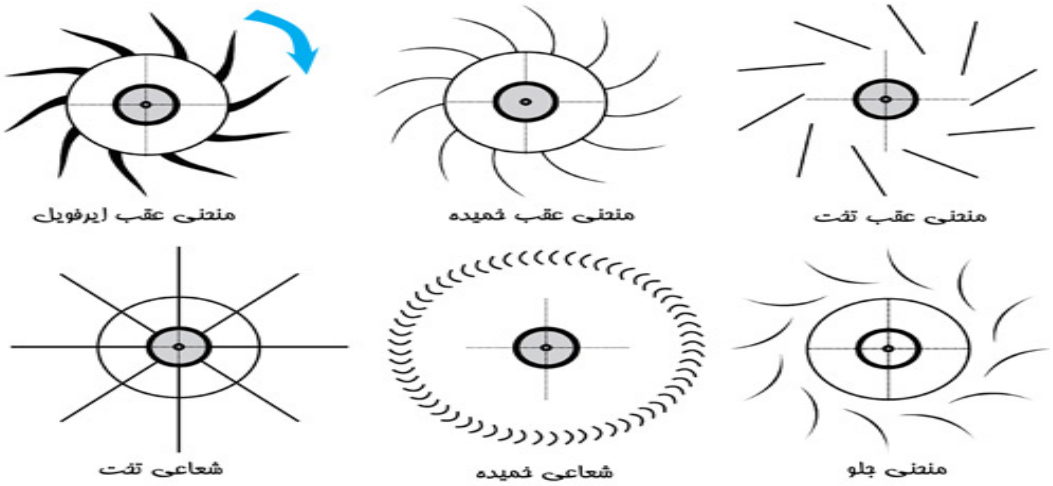
[1] Centrifugal Fans
[2] Axial fans
[3] Blowers
[4] Gas-Jet Noise
[5] Impingement
[6] Gaseous Flow Noise in Pipes or Ducts
[7] Furance and Burner Noise

۶-۲-۱-سروصدای فن‌ها[1]

یافتن یک یا چند فن یا دمنده در یک مجتمع صنعتی یا تولیدی دور از انتظار نیست. فن‌هایی که در اینجا مورد بحث قرار می‌گیرند، آن‌هایی هستند که برای جابجایی حجم بزرگی از هوا برای تهویه، جمع‌آوری گردوغبار یا میست روغن، عملیات خشک‌کردن و ... استفاده می‌شوند. این فن‌ها با سرعت نسبتاً کم و فشار استاتیک کم کار می‌کنند. اکثریت فن‌ها را می‌توان به سانتریفیوژ یا محوری طبقه‌بندی کرد.

۶-۲-۱-۱ فن‌های سانتریفیوژی

دو نوع اصلی فن سانتریفیوژی شامل پروانه رو به عقب[2] یا جلو[3] و شعاعی[4] می‌باشد (شکل ۲). صدای ایجادشده در داخل هر یک از فن‌ها، از دو جزء تشکیل‌شده است "صدای آئرودینامیک پهن باند" ناشی از ورتکس[5] تیغه‌های فن (گردابه به چرخش دایره‌ای بخشی از سیال حول یک محور ثابت گفته می‌شود) و "صدای با فرکانس مشخص[6] " ایجاد شده هنگام عبور تیغه‌ها از نقطه برش[7] مارپیچ[8] و نوسان فشار در نتیجه جابجایی هوا و/یا لیفت آئرودینامیک (درصورتی‌که تیغه دوکی‌شکل[9] باشد).

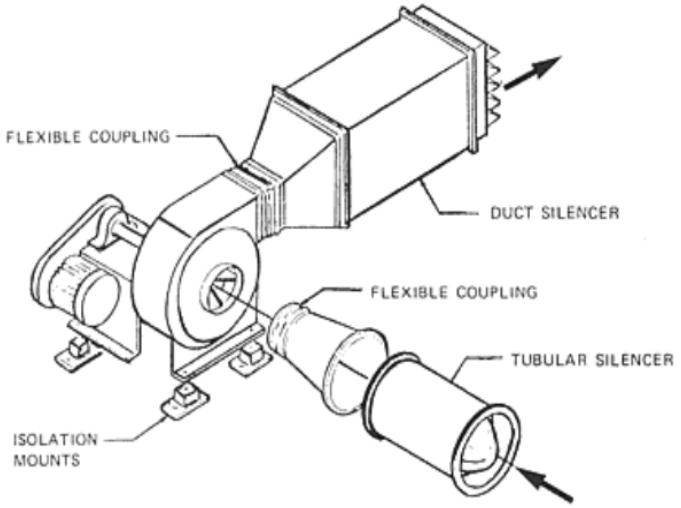


[1] Fans Noise
[2] Backward
[3] Forward
[4] Radial
[5] Vortex
[6] Discrete Frequency Noise
[7] Cutoff Point
[8] Scroll
[9] Airfoil

شکل ۲. مثال هایی از فن های سانتریفیوژی

-کنترل صدا در فن‌های سانتریفیوژ

فن‌های سانتریفیوژی اساساً تجهیزات فشار پایین با جریان حجمی بالا می‌باشند؛ بنابراین رویکرد اساسی استفاده از سایلنسرهای جذبی[۱]، موازی[۲] یا بافل‌های دایره‌ای[۳] می‌باشد. به‌طوری‌که این نوع سایلنسرها دارای کاهش فرکانس بالای خوب و حداقل افت فشار آئرودینامیکی می‌باشند. در شکل ۳، یک سایلنسر لوله‌ای در قسمت ورودی و یک سایلنسر بافل موازی در قسمت خروجی فن نصب شده است. اتصال‌دهنده‌های انعطاف‌پذیر[۴] و مواد عایق ارتعاش برای جدا کردن مکانیکی فن از سیستم کانال و کف، می‌بایست استفاده شود.



شکل ۳. عنصرهای کنترل صدا برای فن سانتریفیوژی

۶-۲-۱-۲- فن‌های محوری

فن‌های محوری را به محوری پره‌ای[۵]، محوری لوله‌ای[۶] و پره ملخی[۷] تقسیم‌بندی می‌کنند. فن‌های محوری در فشارهای بالاتر نسبت به فن‌های سانتریفیوژ کار می‌کنند. کاربردهای رایج این فن‌ها شامل: گرمایش، تهویه و

[1] Absorptive
[2] Parallel
[3] Circular Baffle
[4] Flexible Coupling
[5] Vane
[6] Tube
[7] Propeller

سیستم‌های تهویه مطبوع و ... می‌باشد. به علت تعداد تیغه‌ها (معمولاً ۸ تا ۳۰) و سرعت‌های دورانی نسبتاً بالا، سروصدای فن‌های محوری به‌طورکلی بیشتر می‌باشد.

-کنترل صدا در فن‌های محوری

ازآنجایی‌که فن‌های محوری در کانال‌های با هندسه استوانه‌ای نصب می‌شوند، یک رویکرد پایه برای کنترل صدا استفاده از سایلنسر جذبی لوله‌ای نصب شده در ورودی و خروجی می‌باشد. فن می‌بایست از کانال‌کشی‌ها، کف، سقف یا سکوها با استفاده از اتصال‌دهنده‌های انعطاف‌پذیر و مواد عایق ارتعاش جدا شود. ازآنجایی‌که فن‌های محوری دارای سرعت‌های چرخش بالاتری نسبت به فن‌های سانتریفیوژی می‌باشند، بنابراین، جداسازی ارتعاش آسان‌تری دارند. شکل ۴ نمونه‌ای از فن محوری[1] پره‌ای تسمه‌ای را نشان می‌دهد.

شکل ۴. نمونه ای از فن محوری پره ای تسمه ای[2]

نکات مهم در انتخاب سایلنسر با توجه به محدودیت‌های آئرودینامیکی (افت فشار) را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

1 Axial fan
2 Belt-driven

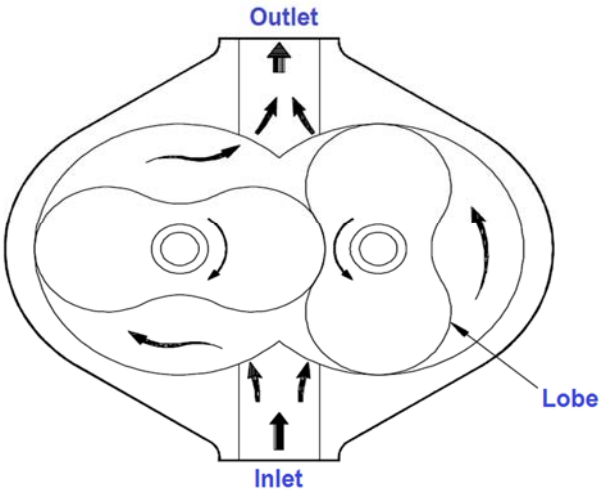
- جریان حجمی یا سرعت دهانه[1] را محاسبه و با مشخصات افت فشار سازنده سایلنسر مقایسه کنید.
- به عنوان یک قانون سرانگشتی، اندازه سطح مقطع سایلنسر، می‌بایست ۱/۲۵ تا ۱/۵ برابر سطح مقطع کانال فن باشد.

۶-۲-۲-سروصدای دمنده‌ها[2]

تولیدکنندگان تمایزی بین فن‌ها و دمنده‌ها قائل نمی‌باشند؛ اما در صنعت اصطلاح دمنده به تجهیزاتی که فشار هوای بالاتری ایجاد می‌کند و یک جهت هوا را منتشر می‌نماید و مورداستفاده برای انتقال مواد/ محصولات (پودر، غلات و...) اطلاق می‌شود، به‌طوری‌که دو نوع عمده وجود دارد:

الف- فن‌های سانتریفیوژی با سرعت‌های عملیاتی بالا (به‌طوری‌که اصول کنترل صدا در آن‌ها مشابه فن‌های سانتریفیوژی می‌باشد)

ب- دمنده‌های جابجایی مثبت دوار[3]



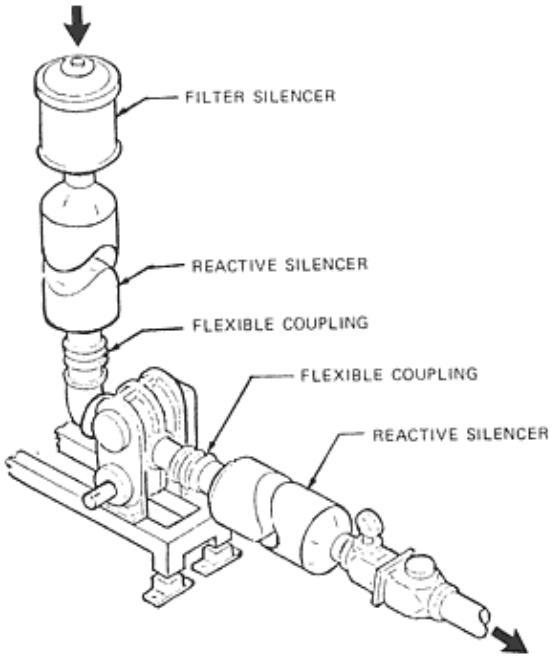
شکل ۵. نمای بخش مثبت دوار

1 Face velocity
[2] Blowers Noise
[3] Rotary Positive Displacement Blowers

بر اساس شکل ۵، به‌محض عبور هر پروانه از ورودی دمنده، حجم محدودی از هوا یا گاز را به دام می‌اندازد و آن را تا خروجی دمنده حمل می‌کند. این سیکل با هر بار دوران کامل شفت ۴ بار تکرار می‌شود؛ بنابراین مشخصه صدا در دمنده‌ها غالباً دوره‌ای با صدای مشخص در فرکانس فشرده‌سازی و هارمونیک‌های منظم وابسته به آن می‌باشد. پالس‌های فشار این دمنده‌ها بسیار شدید است و اندازه‌گیری‌های تراز صدای نزدیک ورودی و خروجی اغلب بیشتر از ۱۴۰ دسیبل گزارش شده است.

-کنترل صدای دمنده‌ها

از آنجایی‌که سروصدای دمنده‌ها غالباً دارای فرکانس پایین و مشخص است، سایلنسرهای واکنشی نوع اتاقکی، مؤثر خواهند بود. در اکثر تأسیسات، یک سایلنسر برای ورودی و خروجی نیاز خواهد بود (شکل ۶). علاوه بر آن، یک فیلتر ورودی ممکن است نیاز باشد.



شکل ۶. دمنده جابجایی مثبت دوار با سایلنسرهای نصب شده

سایلنسر واکنشی طراحی‌شده برای دمنده، افت فشار تقریبی برابر چند اینچ آب را خواهد داشت که در برابر فشار استاتیک اغلب دمنده‌ها (۱۰ تا ۲۰ پوند بر اینچ مربع[1]) معمولاً ناچیز می‌باشد. همچنین جداسازی ارتعاش بین دمنده و لوله‌ها و بین موتور دمنده و کف یا سکو بسیار مهم می‌باشد. جداسازی بین دمنده و کانال‌ها[2] با استفاده از یک اتصال‌دهنده انعطاف‌پذیر تقویت‌شده فشار بالا در فاصله ۳ تا ۵ برابر قطر از دمنده، به بهترین وجه حاصل می‌شود. اگرچه به دلیل پایین بودن افت انتقال[3] اتصال‌دهنده‌های انعطاف‌پذیر، به عنوان یک نشتی آکوستیکی مهم

[1] PSI
[2] Duct
[3] Transmission Loss (TL)

در نظر گرفته می‌شوند، بااین‌حال این مشکل را می‌توان با پوشاندن ناحیه اتصال با استفاده از ترکیب ۱ اینچ فوم پلی‌اورتان[۱] و ماده وینیل با دانسیته بالا (۱ پوند بر فوت مربع) برطرف نمود.

درنهایت، حتی با کلیه اقدامات کاهش صدا، همان‌طور که بیان شد، ترازهای صدا در مجاورت دمنده، احتمالاً دارای دامنه ۸۵ تا ۹۵ دسیبل (شبکه A) خواهد بود. این تراز صدا در نتیجه صدای مکانیکی مربوط به چرخ‌دنده‌ها و یاتاقان‌ها و صدای منتقل‌شده از دمنده از طریق محفظه آن می‌باشد؛ بنابراین برای تأسیسات مهم حساس به صدا، می‌بایست توجه جدی به محصور کردن دمنده‌ها معطوف گردد. دمنده‌ها به‌طورمعمول نیازمند پایش و نگه‌داری کمی می‌باشند، محفظه از نوع اتاقک بهترین گزینه می‌باشد، به‌ویژه زمانی که چندین دمنده باید به‌طور مشابه محصور شوند.

لازم‌به‌ذکر است که تولیدکنندگان برجسته فن و دمنده عضو یا مشمول سیاست‌های انجمن تهویه[۲] یا انجمن مهندسی تهویه و سیستم‌های سرمایش و گرمایش آمریکا[۳] می‌باشند. به‌طوری‌که در این دو سازمان، تکنیک‌های اندازه‌گیری صدا برای فن‌ها و دمنده‌ها به‌طور سخت‌گیرانه‌ای توسط استاندارد کنترل می‌شود.

۶-۲-۳-سروصدای جت-گاز[۴]

یکی از مشکل‌سازترین و شاید رایج‌ترین منبع صدا در محیط‌های صنعتی جت-گاز می‌باشد. این مکانیسم اصلی صدا، اغلب به صدای آئرودینامیکی اشاره دارد و برخی از مثال‌های آن شامل نازل‌های تخلیه فشار هوا[۵] شیرهای[۶] بخار، دریچه تخلیه[۷] کنترل پنوماتیک، مشعل‌های گاز یا نفتی و ... می‌باشد. به‌طوری‌که تراز فشار صدا در فاصله یک متر از نازل تخلیه فشار هوا با قطر یک‌چهارم اینچ دارای دامنه ۱۰۵ تا ۱۰۷ دسیبل (شبکه A) می‌باشد. در ادامه مکانیسم پایه تولید سروصدا در این منابع شامل جت‌های گاز و برخورد جت گازها با سطوح سخت ارائه و روش‌های متناظر پیشنهادی کنترل صدا بیان می‌شود.

---

۱ Polyurethane Foam

2 Air Moving and Conditioning Association (AMCA)

3 American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE)

4 Gas-Jet Noise

5 Blow off Nozzles

6Valve

7 Vent

۶-۲-۳-۱-جت‌های گاز[1]

ساده‌ترین شکل یک جت‌گاز، جریان هوا با سرعت بالا، از خروجی یک مخزن از طریق یک نازل می‌باشد (شکل۸). حداکثر سرعت جت گاز تابعی از اختلاف فشار بین فشار مخزن (p_r[2]) و فشار محیط بیرون(p_a[3])، می‌باشد، به‌طوری‌که با افزایش نسبت p_r/p_a، بین مخزن و محیط، سرعت گاز در نازل تخلیه افزایش می‌یابد. زمانی که نسبت فشار به تقریباً ۱/۹ برسد، سرعت جریان نازل به‌سرعت صوت می‌رسد (رابطه ۲) و افزایش بیشتر این نسبت تغییر معناداری را در افزایش سرعت جریان ندارد؛ بنابراین با رسیدن به این نسبت فشار بحرانی (۱/۹)، گفته می‌شود نازل کیپ/ مسدود شده[4] است.

پدیده خفگی جریان[5] شرایطی است که دبی جرمی یک سیال تراکم‌پذیر را در عبور از نازل یا اوریفیس، با محدودیت مواجه می‌کند و در حالتی که عدد ماخ[6] برابر یک است رخ می‌دهد. به‌طوری‌که در دینامیک سیالات عدد ماخ، به‌صورت نسبت سرعت سیال به‌سرعت صوت در آن محیط تعریف می‌شود (رابطه ۲)؛ بنابراین، عدد ماخ کمتر از یک، سرعت مادون‌صوت[7] و بیشتر از آن، سرعت ماوراءصوت[8] را نشان می‌دهد.

رابطه (۲)
$$M = \frac{u}{c}$$

در این رابطه:

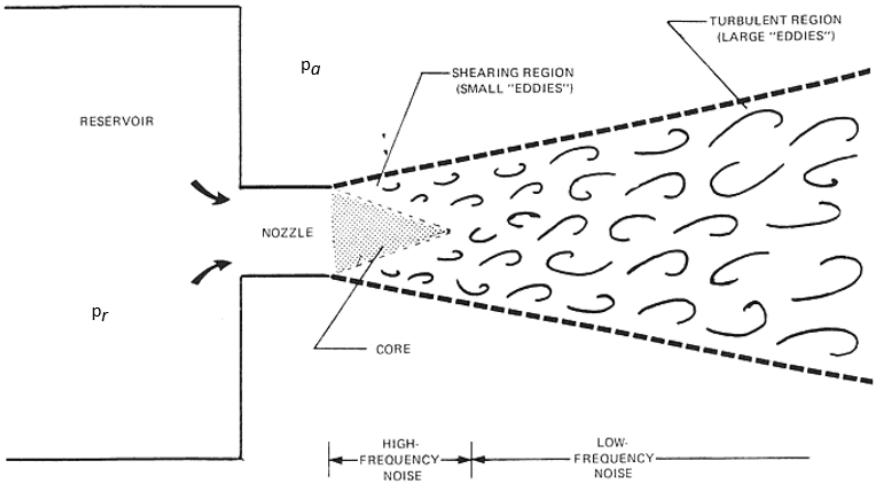
M: عدد ماخ (بدون واحد)،

U: سرعت جریان سیال،

C: سرعت صوت در سیال موردنظر می‌باشد.

---

[1] Gas Jets
2 Reservoir Pressure
3 Ambient Pressure
[4] Choked
[5] Choked Flow
[6] Mach Number(M)
[7] Subsonic
[8] Supersonic



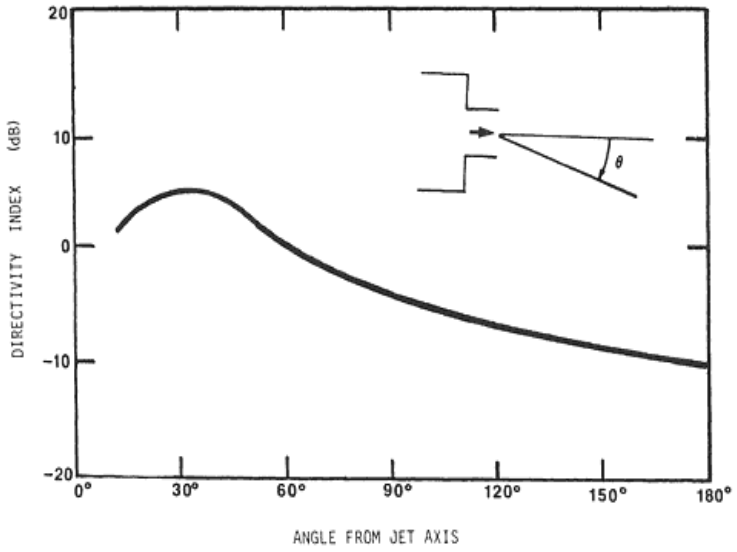
شکل ۷. جت گاز نشان‌دهنده مناطق اختلاط و منابع صدا

در نتیجه ایجاد نوسان فشار ناشی از تلاطم[۱] و فشارهای برشی به علت تقابل گاز سرعت بالا با گاز محیطی، جریان‌های گردابی[۲] تشکیل و باعث ایجاد صدای با فرکانس بالا در نزدیک نازل در ناحیه برشی[۳] و صدای با فرکانس پایین‌تر در پایین دست جریان در ناحیه تلاطم[۴] ایجاد می‌شوند؛ بنابراین مشخصه طیفی صدای جت گاز، به‌طورکلی پهن باند[۵] می‌باشد.

جت گاز را معمولاً می‌توان یک منبع نقطه‌ای با جهت‌گیری ویژه در نظر گرفت (شکل ۸) و تراز فشار صوت کلی آن را در هر نقطه از فضا می‌توان با استفاده از روش‌های انتشار صوت محاسبه کرد. با توجه به شکل ۸، ترازهای پیک[۶] معمولاً در دامنه زاویه ۱۵° تا ۴۵° از خروجی جت رخ می‌دهند. تراز فشار صوت نسبی ارائه‌شده در شکل ۸، می‌تواند به عنوان عبارت شاخص جهت[۷]، در نظر گرفت و می‌بایست همیشه در عمل به آن توجه کرد.

---

۱ Turbulence
2 Eddies
۳ Shearing Region
4 Turbulence Region
5 Broadband
6 Peak
7 Directivity Index (DI_θ)



شکل ۸. الگوی جهت‌گیری رایج برای یک جت گاز کوچک مادون صوت (با سرعت کمتر از سرعت صوت)

- کنترل صدا در جت گازها

برای جت گازهای با درجه حرارت، سرعت و تلاطم بالا مانند موتورهای جت یا توربین‌های گاز، اقدامات کنترل صدای مهندسی پیچیده‌ای نیاز است. این ماشین‌آلات به افت فشارهای بالادست و پایین‌دست جریان و شیب سرعت به‌شدت حساس می‌باشند؛ بنابراین رویکرد کنترلی می‌بایست محدودیت‌های آئرودینامیکی دقیق را در نظر بگیرد. با این‌حال رویکرد اصلی کنترل صدا استفاده از سایلنسرهای جذبی می‌باشد. اصول پایه کنترل صدا، به ترتیب اثربخشی به شرح زیر می‌باشد:

- افزودن نازل‌های اضافی، به منظور کاهش سرعت و حفظ نیروی جت
- نصب دیفیوزرهای آرام‌تر[۱] (با صدای کمتر)

با انجام اقدامات فوق، کاهش صدا از کاهش سرعت جت ناشی می‌شود و توان آکوستیکی صدای تابشی در جت گازها، با توان ششم تا هشتم متوسط سرعت جریان نازل رابطه مستقیم دارد. به‌این‌ترتیب کاهش سرعت جریان هوا می‌بایست اولین ملاحظه در هر برنامه کاهش صدا باشد؛ اما اغلب تنها محدودیت موجود در این استراتژی، حفظ نیروی جت هوا[۲] می‌باشد. نیروی جت[۳]، به شکل زیر بیان می‌شود:

---

[۱] Install Quieter Diffuser

[2] Air-Jet Thrust

[3] T_j

رابطه (۳)

$$T_j(lb)=\frac{w'V}{g}$$

w': وزن نرخ جریان (lb/s)،

g: شتاب ناشی از ثقل (ft/s^2)،

V: سرعت متوسط جت (ft/s).

با توجه به رابطه (۳)، درصورتی‌که میزان جریان افزایش و سرعت جت کاهش یابد، نیرو (T_j) می‌تواند حفظ شود. افزایش سطح خروجی نازل و نزدیک‌تر کردن نازل به محل خروج نیز باعث کاهش قابل‌توجه سرعت می‌شود. همین‌طور افزودن دو یا چند نازل نیز باعث کاهش سرعت جت هوا و کاهش تراز صدای مربوطه می‌شود. بر اساس تجربه نصف کردن فاصله بین قطعات و نازل یا اضافه کردن یک نازل، باعث کاهش ۳۰ درصد سرعت هوا (با حفظ نیرو) و کاهش کلی تراز صدا (۸ تا ۱۰ دسیبل) می‌شود.

یادآوری: نازل[1] وسیله‌ای است که با کاهش فشار سیال، سرعت آن را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، دیفیوزر به وسیله‌ای گفته می‌شود که برعکس نازل عمل می‌کند؛ یعنی با کاهش سرعت سیال، فشار آن را بالا می‌برد.

۶-۲-۳-۲-سروصدای ناشی از برخورد[2] جت‌گازها با سطوح سخت

یکی دیگر از منابع مرتبط با جت‌گاز، سروصدای ناشی از برخورد می‌باشد. شکل ۹، ترازهای اوکتاو باند یک جت هوا در هوای آزاد و هنگام برخورد بر روی یک سطح فلز سخت را نشان داده است. به‌طوری‌که تراز صدا به‌ویژه در فرکانس‌های بالا افزایش می‌یابد. زمانی که جت‌گاز بر روی یک سطح برخورد می‌کند، نیروهای ناپایدار اضافی ایجاد می‌شوند. این نوسانات فشار شکل دوقطبی‌های آئرودینامیکی به خود می‌گیرند که می‌تواند به عنوان یک جفت منبع با دامنه یکسان با فاصله‌ای کم و نوسان با یک اختلاف فاز زاویه‌ای (180°)، توصیف شود.

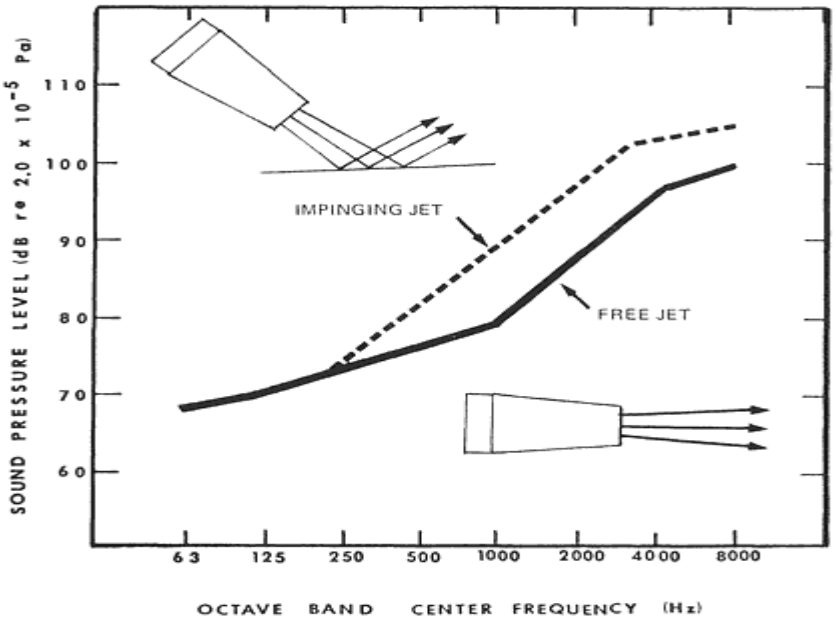
- کنترل صدای برخورد جت گازها با سطوح سخت

تخمین دامنه و مشخصه طیفی این مکانیسم صدا بسیار دشوار است. بااین‌حال توان صدای تابشی جت‌های مادون صوت به توان پنجم یا ششم سرعت جریان بستگی دارد، بنابراین حتی کاهش‌های ناچیز سرعت جریان، باعث کاهش صدای ناشی از برخورد می‌شود.

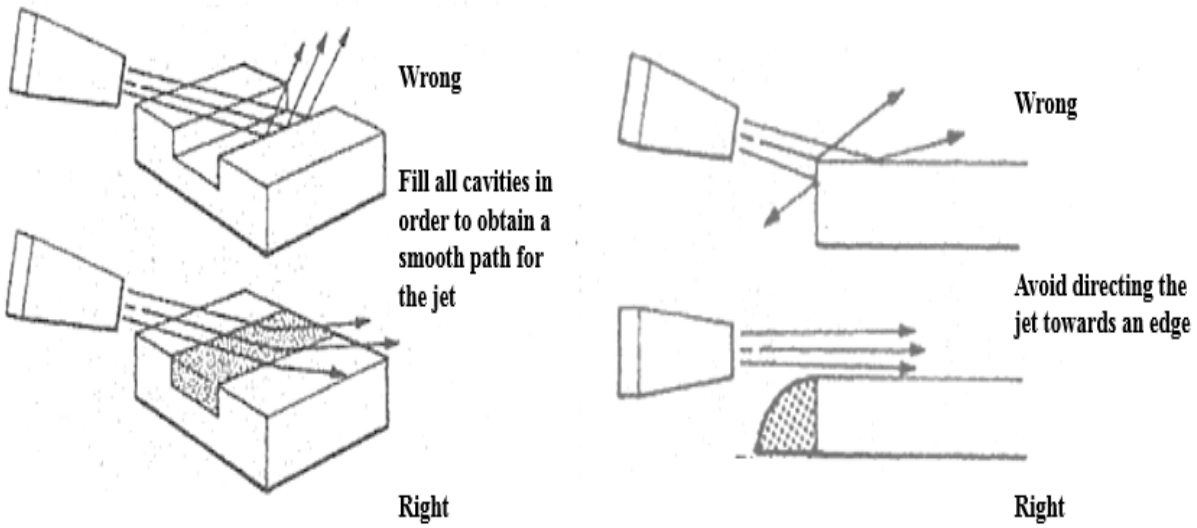
---

[1] Nozzle

[2] Impingement



شکل ۹. ترازهای صدای اندازه گیری شده در فاصله تقریباً ۱ متری یک جت گاز (با قطر۱/۸ اینچ) در هوای آزاد و هنگام برخورد روی یک سطح سخت



شکل ۱۰. روش هایی برای کاهش صدای جت برخوردی

بر اساس تجربه، هنگام برخورد جریان‌های جت روی لبه تیز یا محیط دارای ناپیوستگی، صدای اضافی ایجاد می‌شود، به‌طوری‌که در برخی موارد به صداهای شبیه به سوت[1] منتج خواهد شد. اجزاء پریودیک و همچنین صدای ناشی از برخورد، می‌تواند با کاهش آشفتگی جریان ایجادشده هنگام جاری شدن جت بر روی یک حفره یا مانع را به حداقل رساند، به‌طوری‌که در شکل ۱۰، روش‌هایی برای کاهش صدای جت برخوردی با سطوح سخت نمایش داده شده است.

۶-۲-۴-سروصدای جریان گازی در لوله‌ها و کانال‌ها[2]

سرعت گاز یا جریان در لوله‌ها و کانال‌ها در دامنه خیلی پایین مادون صوت می‌باشد. بااین‌حال درجایی که (صنایع شیمیایی، پتروشیمی و تولید برق) شیرها[3] یا درچه‌های خروجی[4] برای تنظیم فشار گاز بالا یا جریان‌ها به کار می‌رود، ترازهای صدای بسیار بالا (۱۳۰ تا ۱۴۰ دسیبل، در پایین‌دست جریان) رایج می‌باشد. در اکثر موارد، افت فشار در میان یک شیر تنظیم‌کننده/ کنترل‌کننده برای مسدود/ کیپ نمودن جریان در خروجی کافی می‌باشد. به‌این‌ترتیب جریان جت گاز دارای سرعت صوت یا نزدیک سرعت صوت می‌باشد و صدای آئرودینامیکی شدت بالای متناظر ایجاد می‌کند و از طریق دیوارهای لوله به محیط مجاور انتقال می‌یابد و به پایین‌دست جریان با کاهشی بسیار کم یا بدون کاهش هدایت می‌شود. پیش‌بینی دامنه صدای آئرودینامیکی در لوله‌ها به علت مکانیسم پیچیده و عدم قطعیت‌های موجود، مانند افت انتقال صدای سیال در لوله‌ها یا کانال‌ها، بسیار مشکل می‌باشد.

لازم به ذکر است که ناحیه اصلی تولید صدا، منطقه اختلاط آشفتگی بلافاصله در پایین‌دست جریان شیر می‌باشد. درحالی‌که اگر لوله پایین‌دست جریان دارای دیواری ضعیف/ سبک‌وزن (رده[5] ۴۰ یا کمتر) باشد، ترازهای کلی صدای یک شیر بخار مسدود شده، در فاصله ۱ متری لوله، در دامنه ۱۱۰ تا ۱۲۰ دسیبل (شبکه A) خواهد بود. برای لوله با دیوار سنگین (رده ۸۰ یا بیشتر)، ترازها معمولاً ۶ تا ۱۰ دسیبل کمتر می‌باشد. ازآنجایی‌که شیرها دارای محفظه‌های فلزی نسبتاً ضخیمی هستند، سیستم لوله‌کشی در پایین‌دست جریان، معمولاً منبع اولیه صدای

---

[1] Whistlelike
[2] Gaseous Flow Noise in Pipes or Ducts
[3] Valve
[4] Vent
[5] سازمان استاندارد آمریکا (ANSI)برای مشخص کردن ضخامت جداره لوله‌ها یا رده‌بندی لوله‌ها بر اساس ضخامت یا مقاومت آن در برابر فشار سیال، از یک پارامتری به نام Schedule Number (Sch. No) استفاده می‌کند که در ایران با اصطلاح‌هایی چون عدد اسکجول یا اسکجوئل شناخته می‌شود.

تابشی می‌باشد. به‌این‌ترتیب انتشار صدا از ویژگی‌های یک منبع خطی[1] تبعیت می‌کند (برای مثال ۳ دسیبل به ازای دو برابر شدن فاصله).

- کنترل سروصدای جریان گازی در لوله‌ها و کانال‌ها

سه رویکرد اساسی به‌منظور کاهش صدای ناشی از جریان گازی در لوله‌ها و کانال‌ها به‌ویژه در نواحی شیر کنترل به‌شرح زیر وجود دارد:

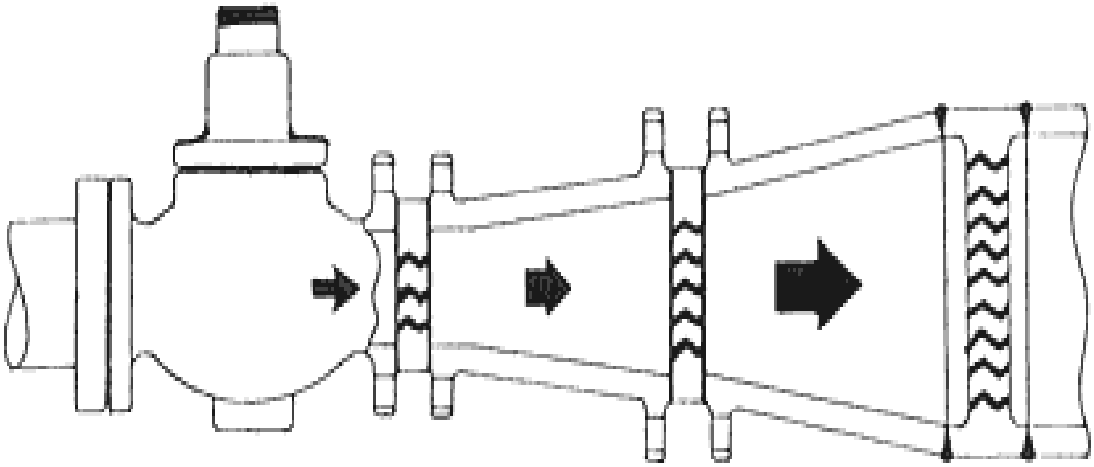
الف) تغییر دینامیک جریان

ب) قرار دادن یک سایلنسر درون‌خطی[2] به‌منظور جذب انرژی آکوستیکی

پ) افزایش افت انتقال [3] دیوارهای لوله

الف) تغییر دینامیک جریان

از بین سه رویکرد بیان شده، تغییر دینامیک جریان، یک رویکرد کاهش صدا در منبع می‌باشد و بنابراین در اولویت راه‌کارهای کنترلی قرار دارد. تغییر دینامیک به کاهش سرعت جریان از طریق کاهش چندمرحله‌ای فشار یا دیفیوژن جت اولیه اشاره دارد، به‌طوری‌که می‌توان از دیفیوزرهای صفحه‌ای انبساطی[4] در جهت کاهش سرعت جریان دست‌یافت. شکل ۱۲، تصویری از کاهش چندمرحله‌ای فشار با استفاده از صفحات انبساطی می‌باشد.

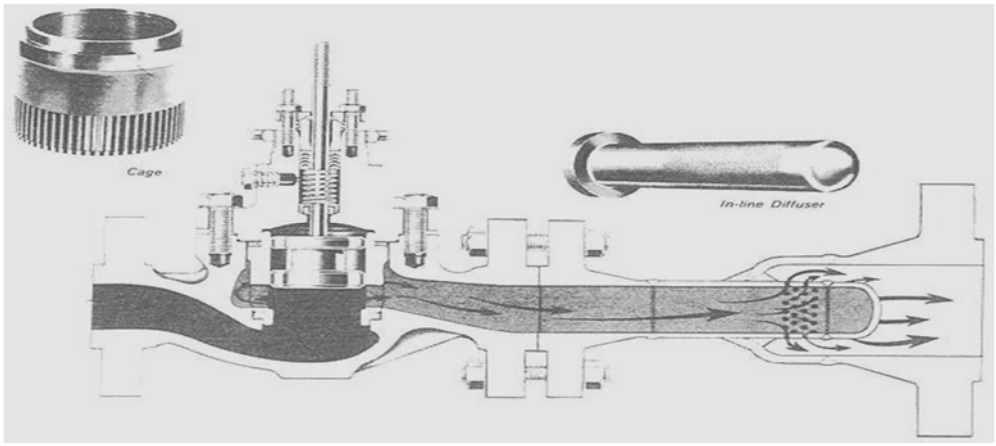


شکل ۱۱. شماتیک سیستم کاهش فشار نشان‌دهنده صفحات انبساطی

[1] Line Source
[2] In-line silencer
[3] Transmission Loss (TL)
[4] Expansion Plates-Diffusers

به‌طوری‌که سرعت جریان گاز به‌صورت متوالی در هر محفظه انبساطی کاهش می‌یابد، همچنین صفحات به عنوان یک دیفیوزر باعث کاهش اختلاط آشفتگی می‌شوند. با استفاده از یک ترکیب سه‌صفحه‌ای (شکل ۱۱)، کاهش تراز صدا تا ۲۰ دسیبل گزارش‌شده است. بااین‌حال هر محفظه فشار برگشتی را به همراه دارد که اغلب نامطلوب بوده و می‌تواند یک فاکتور محدودکننده باشد.

رویکرد دیگر اما مشابه، استفاده از دیفیوزرها برای کاهش صدای جریان، در شکل ۱۲، نشان داده‌شده است، به‌طوری‌که نصب اریفیس در بدنه شیر با تبدیل جریان به جت‌های کوچک‌تر، کاهش صدایی به میزان ۱۰ تا ۱۸ دسیبل ایجاد می‌نماید.

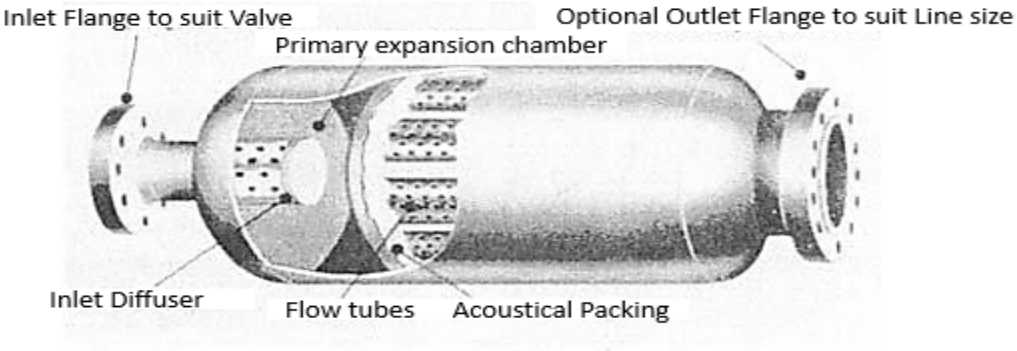


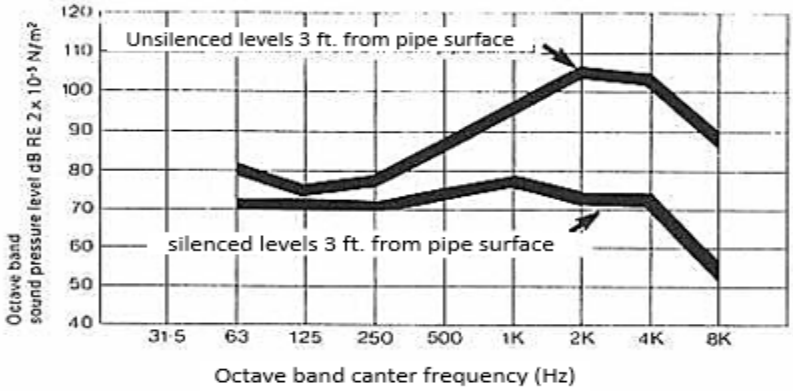
شکل ۱۲. شماتیک دیفیوزر درون‌خطی برای کاهش صدای آئرودینامیکی در کنترل شیرها

ب) قرار دادن یک سایلنسر درون‌خطی به‌منظور جذب انرژی آکوستیکی

مهم‌ترین محدودیت طراحی سایلنسر درون‌خطی، به عنوان دومین رویکرد کنترل سروصدای جریان گازی در لوله‌ها و کانال‌ها، افت فشار می‌باشد. مدیای جذب‌کننده در این سایلنسرها (که در پشت ورق‌های فلزی سوراخ‌دار قرار می‌گیرند)، می‌تواند فایبرگلاس یا پشم فلز باشد (شکل ۱۳). دستورالعمل نصب سایلنسر درون‌خطی را می‌توان به‌طور خلاصه به‌شرح زیر بیان کرد:

- سایلنسر درون‌خطی نباید نزدیک‌تر از ۳ یا ۴ برابر قطر لوله از شیر تخلیه نصب شود.
- اصلاح لوله (همان‌طوری‌که در ادامه بیان می‌شود) بین شیر و سایلنسر باید در نظر گرفته شود، چراکه سایلنسر تنها صدای پایین‌دست جریان خود را کاهش خواهد داد.





شکل ۱۳. سایلنسر درون‌خطی به همراه عملکرد آکوستیکی

پ) افزایش افت انتقال[1] دیوارهای لوله

دو رویکرد اساسی برای افزایش افت انتقال دیوارهای لوله یا داکت وجود دارد:

۱) افزایش ضخامت دیوار لوله

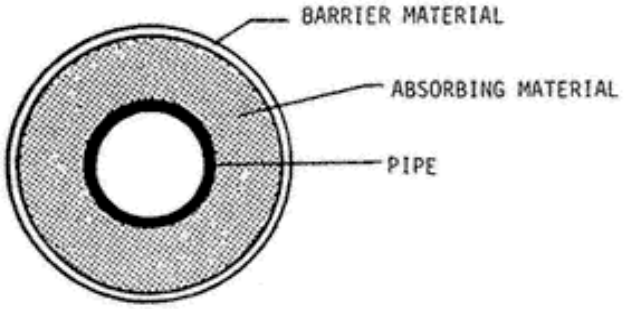
این رویکرد می‌بایست با توجه به برآورد تراز و مشخصه‌های فرکانسی فشار صوت انتشاریافته از لوله‌ها و یا داکت‌ها مورد توجه قرار گیرد و همچنین رعایت الزامات فنی و اقتصادی مربوط به این رویکرد حائز اهمیت می‌باشد.

۲) پوشاندن یا عایق‌کاری آکوستیکی[2]

برای نواحی ویژه حساس به صدا، ممکن است اصلاح مسیر صدا ضروری باشد و برای لوله‌ها این کار با پوشاندن یا عایق کردن آن‌ها انجام می‌شود. شماتیک مؤثر عایق‌کاری در شکل ۱۴، نشان داده‌شده است، به‌طوری‌که لازم

[1] Transmission Loss (TL)
[2] Pipe Acoustical Wrapping or lagging

است ابتدا لایه‌ای از مواد آکوستیک باکیفیت و جاذب صدا مانند فایبرگلاس، پشم معدنی یا فوم پلی‌اورتان به دور لوله پیچیده شود، سپس این لایه جاذب با ورق سرب، ماده وینیل با دانسیته بالا یا ورق فلزی پوشانده شود.



شکل ۱۴. عایق‌کاری لوله با مواد پایه

✓ **می‌بایست در نصب عایق و پوشاندن لوله‌ها موارد زیر در نظر گرفته شود:**

۱- از هرگونه اتصال مکانیکی بین دیوار لوله و لایه بیرونی عایق جلوگیری شود.

۲- تمام لبه‌ها و محل‌های اتصال آب‌بندی شوند.

۳- از مواد ویژه مانند فایبرگلاس یا پشم معدنی برای کاربردهای با دمای بالا استفاده شود.

۴- از تجمع چگالش در لوله‌های سرد که باعث کاهش عملکرد عایق می‌شود، جلوگیری شود.

یکی از معایب عایق‌کاری به عنوان تنها اقدام کنترل صدا، این است که ممکن است طول زیادی از لوله نیازمند عایق‌کاری باشد؛ بنابراین، توصیه می‌شود که استفاده از مراحل چندگانه کاهش فشار یا دیفیوزرها در ترکیب با سایلنسرهای درون‌خطی در اولویت اقدامات کنترلی باشند و در صورت لزوم کاهش بیشتر صدا، از عایق‌کاری لوله‌ها استفاده شود.

۶-۲-۵-سروصدای پمپ‌ها[1]

پمپ‌های استاندارد در سرعت و ظرفیت اسمی خود، منابع صدای شدیدی به شمار نمی‌روند. صدای ناشی از پمپ‌ها شامل منابع هیدرولیکی و مکانیکی می‌باشد، به‌طوری‌که این منابع صدا شامل کاویتاسیون[2]، نوسانات فشار سیال،

---

[1] Pump Noise

[2] Cavitation:(حباب‌زایی/ خوردگی حبابی/ حفره‌سازی/ خلاءزایی) پدیده‌ای است که در آن کاهش فشار باعث تبخیر موضعی مایع و ایجاد حباب می‌شود. در این پدیده که معمولاً در مایعات با حرکت متلاطم به دلیل اختلاف فشار در مایع رخ می‌دهد، فشار موضعی کم‌تر از فشار بخار مایع می‌شود. این امر باعث می‌شود تا مثلاً آب که در شرایط متعارف در ۱۰۰ درجه سانتیگراد شکل گازی پیدا می‌کند، در دماهایی پایین‌تر زودتر به‌صورت گاز درآید. حباب‌های گازی ایجادشده زمانی که دوباره به منطقه پرفشارتر وارد می‌شوند معمولاً منفجر می‌شوند. این ترکیدن حباب‌ها شوکی موج مانند ایجاد می‌کند که صدادار است و می‌تواند از طریق خوردگی حبابی به پروانه‌های پمپ آسیب برساند.

برخورد سطوح جامد و عدم تعادل دینامیکی روتور[1] می‌باشد. منابع هیدرولیکی به‌طورمعمول تولیدکننده‌های صدای مهم‌تری می‌باشند. در یک پمپ صدا ممکن است، از طریق هوای اطراف یا از طریق لوله‌کشی و ساختارهای حمایتی انتشار یابد.

- **اقدامات کاهش صدا**

صدای پیکری[2] ناشی از پمپ را می‌توان با استفاده از جداسازی مناسب ارتعاش پمپ به سطوح ناچیز کاهش داد (همان‌طور در مورد فن‌ها این موضوع صدق می‌کند). یکی از مؤثرترین اقدامات کاهش صدا، محصور کردن کامل[3] پمپ می‌باشد.

۶-۲-۶-تجهیزات احتراقی[4]

۶-۲-۶-۱-سروصدای کوره و مشعل[5]

سروصدای ناشی از کوره‌ها، سوزاننده‌ها و تجهیزات احتراقی مشابه در اثر فعل و انفعالات پیچیده مربوط به جریان با سرعت‌بالا، اختلاط آشفتگی جریان و احتراق می‌باشد، به‌طوری‌که ویژگی طیفی و ترازهای صدا با شکل کوره و سوزاننده و روش سوخت‌رسانی متفاوت می‌باشد، به‌طوری‌که با افزایش میزان سوزانندگی، انتشار صدا از مشعل‌های گازسوز بالاتر از مشعل‌های نفت‌سوز می‌باشد. ترازهای صدای پیک به‌طورکلی دارای مشخصه فرکانس پایین می‌باشند (معمولاً زیر ۱۰۰۰ هرتز) و از نظر ذهنی اغلب به عنوان غرش[6] از آن یاد می‌شود.

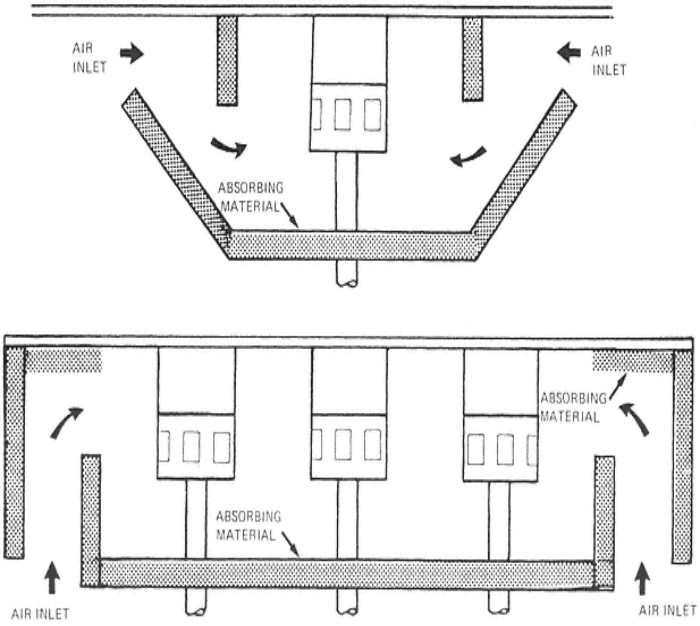
- کنترل صدا در کوره و مشعل

سرعت جریان در شعله مهم‌ترین پارامتر می‌باشد و سایر پارامترها از جمله نرخ جریان جرمی، انبساط حجمی، نسبت هوا به مخلوط سوخت و ... دارای اهمیت کمتری هستند. به‌طور خلاصه، کاهش صدای سوزاننده (کاهش در منبع) معمولاً با کاهش کارایی آن همراه می‌باشد که معمولاً قابل‌قبول نمی‌باشد. بااین‌حال هنگامی‌که کنترل شعله ضعیف باشد، ترازهای صدای بالایی به وجود می‌آیند و با تنظیم صحیح شعله این شرایط قابل رفع خواهد بود.

---

[1] Rotor
[2] Structure-Borne Noise
[3] Totally Enclose
[4] Combustion Equipment
[5] Furance and Burner Noise
[6] Roar

در سال‌های اخیر کاهش صدا در کوره‌های با جریان طبیعی[1] با استفاده از سایلنسرهای جداگانه در مشعل‌ها و اتاقک‌های پلنوم[2] قابل حصول بوده است، درحالی‌که انتشار صدا ناشی از کوره‌های با جریان اجباری[3] با استفاده از سایلنسرهای فن[4] می‌تواند کاهش یابد؛ بنابراین به نظر می‌رسد که پلنوم‌های اصلاح‌شده آکوستیکی مؤثر و کاربردی می‌باشند (شکل ۱۵). به‌طوری‌که با استفاده از مواد با قابلیت بالای جذب صدا، دالانی از بافل‌های موازی و سطوح آستر شده ایجاد می‌شود و پلنوم‌ها در اصل تله‌های صدا می‌باشند و می‌توانند به کاهش صدا کمک نمایند.



شکل ۱۵. پلنوم‌های اصلاح‌شده آکوستیکی برای کنترل صدای کوره‌ها و مشعل ها

۶-۲-۶-۲- بویلرها[5]

صدای فرکانس پایین ناشی از آشفتگی جریان مشعل در داخل بویلرها ایجاد می‌شود، مگر این‌که دیوارهای ساختار بویلرها به‌طور آکوستیک عایق شده باشند، در غیر این صورت ارتعاشات و انتشار صدای مربوطه می‌تواند در محیط کار به وجود آید. فن‌های دمنده برای انجام‌وظیفه بویلر اغلب بزرگ بوده و منابع صدای فرکانس پایین

[1] Natural draught furnaces
[2] Plenum chambers
[3] Forced draught furnaces
[4] Fan silencers
[5] Boilers

می‌باشند؛ بنابراین استفاده از سایلنسرها ممکن است ضروری باشد. همچنین گاز دودکش می‌تواند یک منبع مهم صدای فرکانس پایین باشد.

۶-۲-۶-۳- فلر[1]

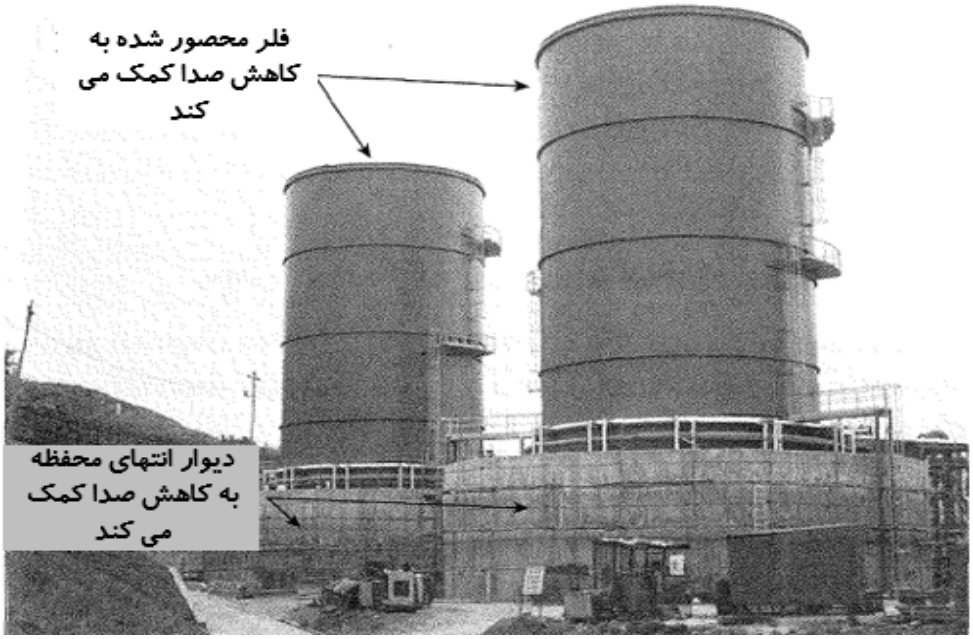
ماهیت و توان عملیاتی یک فرآیند و نوع رأس (نوک)[2] فلر می‌توانند اثر مهمی بر انتشار صدا از فلرها داشته باشند. با این وجود از آن‌جایی‌که فلرها از نواحی کاری فاصله دارند، معمولاً به عنوان یک مشکل تلقی نمی‌شوند، اما می‌توانند منابع صدای حائز اهمیتی برای جامعه به شمار آیند. منابع صوتی زیر به‌صورت جداگانه می‌توانند در صدای کلی منتشرشده از فلرها سهیم باشند.

- فرآیند احتراق
- جت گاز و سروصدای جریان گازهای آزادشده
- تجهیزات کنترل‌کننده دود
- پیلوت مشعل‌ها
- شیرها (گاز و بخار) و لوله‌کشی متصل شده

-کنترل صدا در فلرها

دو منبع اصلی سروصدا در فلرها، سروصدای احتراق و جت گاز می‌باشند. اگرچه کاهش میزان اختلاط هوا و سوخت می‌تواند سطح صدای احتراق را کاهش دهد، بااین‌حال این تکنیک کاهش صدا منجر به کاهش عملکرد بدون دود[3]، افزایش تشعشع حرارتی و طول شعله می‌شود. در چنین مواردی فلرهای محصور[4] می‌توانند یک‌راه حل مناسب باشند. به‌طوری‌که شعله فلر به‌منظور کاهش سروصدا و تشعشع حرارتی به‌طور کامل محصور می‌شود (شکل ۱۶). این نوع فلرها می‌توانند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای انتشار صدا را کاهش دهند.

[1] Flares
[2] Flare tip
[3] Smokeless Prformance
[4] Enclosed Flares



شکل ۱۶. تصویر دو فلر محصورشده

همچنین یکی دیگر از رویکردهای کاهش صدای ناشی از فلرها، استفاده از فلرهای با سیستم بازیافت گاز [1]، می‌باشد، اگرچه هدف اولیه توسعه استفاده از سیستم بازیافت گاز، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی (کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای) و همچنین جنبه‌های اقتصادی بازیافت گاز می‌باشد، اما این سیستم‌ها کاهش صدا را به‌صورت توأم با جنبه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی به همراه دارند و می‌توانند جایگزین فلرهای موجود شوند.

۶-۲-۷-ساختارها و تجهیزات مرتعش[2]

انتشار صدای هوابرد می‌تواند ناشی از ماشین مرتعش یا ارتعاش ثانویه القاء شده در صفحات و ساختارها باشد. ارتعاش ناشی از ماشین به‌طور طبیعی با زمان افزایش می‌یابد و خط‌مشی تعمیرات دقیق یک فاکتور مهم در کاهش انتشار چنین صدایی می‌باشد.

[1] Flare Gas Recovery System (FGRS)
[2] Vibrating Equipment and Structures

۶-۲-۸-تجهیزات عملیات حفاری[1]

یکی از بزرگ‌ترین منابع صدا در عملیات حفاری، دمنده‌های مکانیکی در موتورهای دیزل موجود در نیروگاه برق دکل[2] می‌باشد. در دکل‌های دریایی صدای ناشی از موتورهای اصلی[3] در طول عملیات حفاری می‌تواند هم ثابت و هم بیش از حد باشد. در صورت قابلیت اجرا، سپرها یا پرده‌های آکوستیکی می‌بایست استفاده شود و در صورت غیرقابل اجرا بودن کنترل آکوستیکی، وسایل حفاظت شنوایی می‌بایست مورداستفاده قرار گیرند.

۶-۲-۹-سفر با هلیکوپتر[4]

ترازهای صدا در گوش محافظت نشده در طول سفر با هلیکوپتر اغلب می‌تواند فراتر از ۹۰ دسیبل (شبکه A) باشد. در طول یک ساعت پرواز در چنین تراز صدایی، یک مسافر ۵۰٪ دوز صدای روزانه مجاز را دریافت خواهد کرد؛ بنابراین هرگونه مواجهه بالای ۸۵ دسیبل (A) در طول آن روز اضافی خواهد بود؛ بنابراین در طول سفر با هلیکوپتر، اگر تراز صدای کابین بالای ۸۵ دسیبل (A) باشد، استفاده از تجهیزات حفاظت شنوایی ضروری است.

[1] Drilling Operations Equipment
[2] Rig Power Plant
[3] Prime Movers
[4] Helicopter Travel

جدول ۵ راهنمای طراحی کنترل صدا برای مهم‌ترین منابع صدا در صنعت نفت

ردیف	تجهیزات	منبع صدا	کنترل صدا
۱	فن‌ها	ورودی و خروجی هوا	فن‌های سانتریفیوژ- سایلنسرهای جذبی یا موازی یا بافل‌های دایره‌ای
			فن‌های محوری- سایلنسرهای جذبی لوله‌ای
		اتصالات مکانیکی فن با سیستم کانال	اتصال‌دهنده‌های انعطاف‌پذیر
		اتصالات مکانیکی فن با کف	جداسازی مناسب ارتعاش
۲	دمنده‌ها	ورودی و خروجی هوا	سایلنسرهای واکنشی
		اتصالات مکانیکی دمنده با لوله‌ها	اتصال‌دهنده‌های انعطاف‌پذیر
		اتصالات مکانیکی موتور با کف	جداسازی مناسب ارتعاش
		در صورت بالا بودن صدای منتشره بعد از اقدامات کنترلی	محفظه‌های آکوستیک
۳	جت‌های گاز	آشفتگی جریان سیال خروجی	سایلنسرهای جذبی در خروجی افزودن نازل‌های اضافی نصب دیفیوزرهای آرام‌تر جلوگیری از برخورد جت گاز به سطوح سخت
۴	لوله‌کشی	دیوار لوله	دیوارهای ضخیم‌تر، عایق‌کاری، زانویی‌های صاف[1]
		شیرها	کاهش سرعت، کاهش فشار مرحله‌ای[2]، کنترل کاویتاسیون، سایلنسرهای درون‌خطی
۵	دریچه‌های خروجی	ورودی هوا[3]	سایلنسر
		گاز خروجی	سایلنسر
		لوله‌کشی	عایق‌کاری
۶	پمپ‌ها	عدم تعادل دینامیکی موتور و اتصالات مکانیکی با کف	بررسی موتورها و توربین‌ها جداسازی مناسب ارتعاش
		جریان سیال	کنترل کاویتاسیون
		در صورت بالا بودن صدای منتشره بعد از اقدامات کنترلی	محفظه‌های آکوستیک
۷	کوره‌ها	فن‌ها	سایلنسرها و عایق‌کاری
		پانل‌ها	سایلنسرها و عایق‌کاری
		کانال‌کشی	عایق‌کاری
۸	بویلرها	مشعل‌ها	عایق کردن مسیرهای ورود هوا

[1] Smooth bends
[2] Stepwise
[3] Air intake

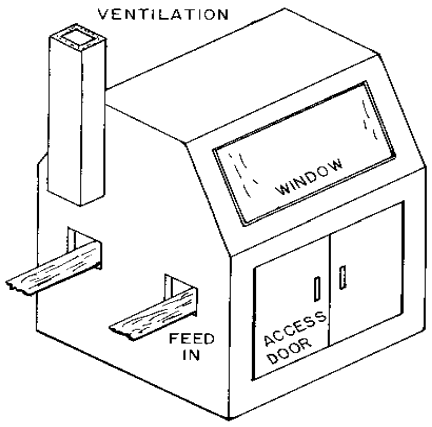
ردیف	تجهیزات	منبع صدا	کنترل صدا
۹	فلرها	هدر فلر[1]	عایق‌کاری
		مشعل‌ها	مشعل‌های با صدای کم
		جت‌های گاز	جت‌های بیشتر، عملیات مرحله‌ای
		بخار	بخار پایین‌تر از حد بحرانی[2]، اجتناب از بخار اضافی
		تزریق[3]	
		در صورت کاهش عملکرد فلر با اقدامات بالا	محصور کردن می‌تواند یک‌راه حل مناسب باشند.
۱۰	خنک‌کننده‌های پره‌ای هوا	مجرای ورودی[4]	زنگوله‌ای شکل[5]
		تیغه‌های فن	هاب بزرگ، RPM پایین، تیغه‌های آئروفویل زیاد[6]
۱۱	کمپرسور	لوله‌کشی، داخل-خارج	سایلنسرهای درون‌خطی
		اینترکولرها	عایق‌کاری
		غلاف	محفظه‌های جزئی یا کامل[7]
۱۲	چرخ‌دنده‌ها	مش بندی چرخ‌دنده[8]	محفظه‌ها، عایق‌کاری، تغییر ویژگی‌های مش
۱۳	موتورهای الکتریکی	فن	تیغه‌های منحنی[9] و آئروفویل
		سرعت	RPM پایین‌تر
		مغناطیس[10]	محفظه
۱۴	توربین‌های بخار	لوله‌های بخار	عایق‌کاری
		جیغ کشیدن[11]	آب‌بندی نشتی[12]، محفظه، عایق‌کاری
		خروجی‌ها	سایلنسرها

[1] Flare header
[2] Subcritical steam
[3] Injection
[4] Intake
[5] Bell-shaped
[6] Aerofoil blades
[7] Partial or full enclosure
[8] Gear meshing
[9] Curved blades
[10] Magnetic
[11] Screech
[12] Leakage sealing

۶-۳-کلیات کنترل‌های فنی و مهندسی صدا

۶-۳-۱-محفظه‌های آکوستیک[1]

اگرچه یک محفظه در ابتدا از سوی مهندسین کارخانه، کارکنان تعمیر و نگه‌داری و سایر اپراتورها به دلیل ایجاد مزاحمت‌های مربوطه ازجمله کاهش قابلیت دید، کاهش قابلیت دسترسی و تعمیر و نگه‌داری اضافه‌شده، مقبولیت مناسب را ندارد؛ اما این محدودیت‌ها ذاتی نبوده و با یک طراحی خوب، محفظه می‌تواند ویژگی‌هایی ازجمله کنترل آلودگی‌های هوا (مانند میست و دود) را فراهم کند. در مواردی که با استفاده از پوشش با مواد آکوستیکی جاذب، نمی‌توان تراز صوت را به‌اندازه کافی کاهش داد، به‌ویژه هنگامی‌که میدان مستقیم[2] بر میدان بازآوا[3] در موقعیت دریافت‌کننده غالب باشد و زمانی که به کاهش تراز صوت بیشتر از ۱۰ دسیبل نیاز باشد، عملی‌ترین راه کنترل صدای یک منبع، ایجاد یک محفظه بر روی آن منبع می‌باشد، به‌طوری‌که می‌توان به ۳۰ تا ۲۰ دسیبل کاهش تراز صدا با استفاده از یک محفظه کامل دست پیدا کرد. اگرچه حتی دست‌یابی به کاهش صدای بالاتر از ۵۰ دسیبل، با استفاده از یک محفظه با عایق سازی ویژه امکان‌پذیر می‌باشد. به‌طورکلی، تنها عیب ذاتی محفظه‌ها صرف‌نظر از دسترسی به ماشین‌آلات، هزینه اولیه آن است. در صورت نیاز به قابلیت دسترسی به ماشین، جهت تزریق مواد، انجام تنظیمات و ...، می‌بایست از یک محفظه جزئی استفاده شود و به طراحی دریچه‌های محفظه باید به‌دقت توجه شود (شکل ۱۷).



شکل ۱۷. محفظه یک دستگاه پرس خودکار

[1] Acoustic Enclosures
[2] Direct Field
[3] Reverberant Field

۶-۳-۱-۱-انواع محفظه‌های آکوستیک

الف- محفظه‌های آکوستیک کوچک[1]

یک محفظه آکوستیک در صورتی کوچک تلقی می‌شود که طول‌موج خمشی دیوار محفظه در مقایسه با بزرگ‌ترین بعد پانل، بزرگ باشد و اگر طول‌موج صوت داخل محفظه در مقایسه با بزرگ‌ترین بعد داخلی محفظه، بزرگ باشد. طول‌موج خمشی، تابعی از فرکانس می‌باشد (رابطه ۴):

رابطه (۴)
$$\lambda_b = \left[\frac{\pi c_L h}{\sqrt{3}\times f}\right]^{1/2}$$

c_L: سرعت امواج طولی در مواد دیوار محفظه (رابطه ۵)

h : ضخامت دیوار محفظه.

رابطه (۵)
$$c_L = \left[\frac{E}{\rho_w\left(1-\sigma^2\right)}\right]^{1/2}$$

ρ_w : دانسیته

E : مدول یانگ (معیاری برای صلبیت مواد جامد می‌باشد برحسب گیگا پاسکال/GPa)

σ: ضریب پواسون مواد پانل می‌باشد

مقادیر مربوط به پارامترهای رابطه (۵) در کتب رفرنس برای مواد آکوستیک موجود می‌باشند (پیوست C، منبع شماره ۳).

برای اهداف کاربردی، درصورتی‌که شرط زیر (رابطه ۶) برقرار باشد، محفظه از نوع کوچک خواهد بود:

رابطه (۶)
$$\frac{L_{\max}}{\lambda} = \frac{fL_{\max}}{c} \le 0.1$$

$L_{\max}$: بزرگ‌ترین بعد داخلی محفظه

c : سرعت صوت هوای داخل محفظه

[1] Small Acoustic Enclosures

در محفظه‌های آکوستیک کوچک، ازآنجایی‌که فضای هوا و دیوارهای محفظه به‌طور آکوستیکی جفت شده‌اند، در این مورد جذب سطحی و افت انتقال دیوار اثر ناچیزی بر عملکرد محفظه دارند، بنابراین مهم‌ترین فاکتور، فنریت/ سختی[1] دیوارهای محفظه می‌باشد.

ب- محفظه‌های آکوستیک بزرگ[2]

یک محفظه زمانی بزرگ در نظر گرفته می‌شود که شرط زیر (رابطه ۷) برقرار باشد:

رابطه (۷) $\frac{fV_o^{1/3}}{c} \geq 1$

V_o: حجم هوای درون محفظه

f : فرکانس صوت در محفظه

c : سرعت صوت در هوای داخل محفظه

مسیرهایی که ممکن است صدای منبع از طریق آن‌ها به فضای بیرون محفظه انتقال یابد شامل موارد زیر می‌باشد:

الف) از طریق دیوارهای محفظه

ب) از طریق روزنه/دریچه‌ها در دیوارهای محفظه

پ) از طریق تکیه‌گاه‌های جامد ساختاری.

مقدار صوت منتقل‌شده از طریق دیوارهای محفظه تابعی از ضریب انتقال توان صوت (a_t[3]) دیوارها می‌باشد. همچنین مقدار صوت نشتی از طریق روزنه/ دریچه‌ها در محفظه نیز برحسب ضریب انتقال توان صوت معادل قابل‌بیان است. به‌منظور اثربخشی محفظه در کنترل صدا، با استفاده از جداسازی ارتعاش مناسب، انتقال صوت از طریق تکیه‌گاه‌های جامد می‌بایست به سهم ناچیزی کاهش یابد. این مهم است که بخش زیادی از انرژی آکوستیکی تابش شده از منبع داخل محفظه، در داخل محفظه اتلاف می‌شود؛ اما سدکردن انتقال صوت از طریق دیوارهای محفظه به همان اندازه مهم می‌باشد. برای دست‌یابی به این شرط، دیوارهای محفظه معمولاً از یک ماده کامپوزیتی با لایه داخلی دارای ضریب جذب سطحی بزرگ و دیگر لایه یا لایه‌ها با افت انتقال بزرگ یا ضریب انتقال توان صوت کوچک، ساخته می‌شوند.

---

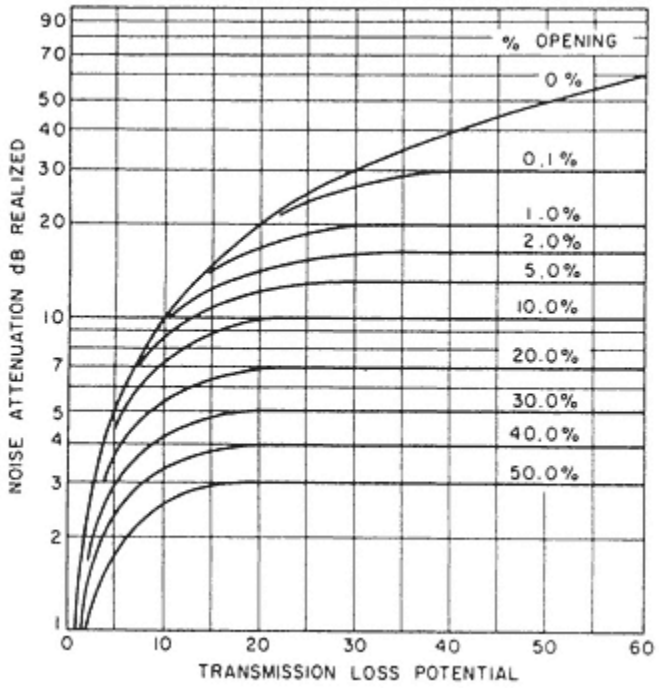
[1] فنریت (Stiffness) یا سختی (Rigidity) یک خصوصیت از مواد می‌باشد که به‌موجب آن ماده در برابر نیروی اعمال‌شده به‌منظور تغیر شکل آن مقاومت می‌کند.

[2] Large Acoustic Enclosures

[3] Transmission Coefficient

۶-۳-۱-۲-نشتی‌های آکوستیکی[1]

فاکتور محدودکننده عملکرد آکوستیکی محفظه‌ها، اغلب تعداد و اندازه نشتی‌های آکوستیکی می‌باشد. شکل ۱۸ یک چارت برای محاسبه اثر یک نشتی آکوستیکی می‌باشد، به‌طوری‌که یک محفظه با پتانسیل افت انتقال ۴۵ دسیبل، در صورت داشتن یک روزنه به‌اندازه ۱ درصد سطح محفظه، افت انتقال آن به ۲۰ دسیبل کاهش می‌یابد، همچنین درصورتی‌که روزنه برابر با ۱۰ درصد باشد، افت انتقال به تنها ۱۰ دسیبل کاهش می‌یابد؛ بنابراین در طراحی می‌بایست دقت زیادی برای به حداقل رساندن نشتی‌های آکوستیکی معطوف گردد.



شکل ۱۸. اثر نشتی های صوتی بر پتانسیل کاهش صدا برای دیوارها

۶-۳-۲-روش ساده طراحی محفظه[2]

محفظه می‌تواند به‌صورت جزئی بخش‌هایی از منبع یا محل موردحفاظت را شامل شده و یا به‌طور کامل منبع صدا یا محل موردحفاظت را در بر گیرد. میزان کاهش صدا ناشی از نصب محفظه و طراحی بستگی به ابعاد و جنس

[1] Acoustical Leaks
[2] Enclosure

محفظه، ابعاد ماشین‌آلات، تعداد افراد شاغل در داخل محفظه، نصب دیوارها و تجهیزات بر روی آن (درب، تهویه، کلید و ...) دارد.

افت الحاقی ناشی از نصب محفظه کامل (IL[1]) به متوسط ضریب جذب و متوسط ضریب انتقال دیواره‌های محفظه بستگی دارد و با استفاده از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$IL=Lp_0-Lp_2$$

$$IL=10\log\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\tau}}$$

$$\bar{\tau}\le\bar{\alpha}\le 1$$

رابطه (۸)

Lp_0: تراز فشار صوت در محل موردنظر بدون محفظه (dB)

Lp_2: تراز فشار صوت در محل موردنظر (حالت قبل) با محفظه (dB)

$\bar{\alpha}$: متوسط ضریب جذب فضای زیر محفظه

$\bar{\tau}$: متوسط ضریب انتقال دیواره و سقف محفظه، بدون کف.

نکته: لازم به ذکر است، در صورتی‌که هدف از طراحی محفظه برای یک منبع صدا، محصور کردن دستگاه/ تجهیز به منظور جلوگیری از انتقال صدا به بیرون باشد، ضریب انتقال دیواره‌های محفظه در اولویت اول و ضریب جذب دیواره‌های محفظه در اولویت دوم می‌باشد، اما در صورتی‌که محفظه برای حفاظت پرسنل طراحی شود، اولویت‌ها عکس حالت قبل می‌باشد. در نهایت افت الحاقی محفظه می‌بایست در حدی باشد که صدا را به حد مجاز کاهش دهد.

۶-۳-۳-موانع آکوستیکی[2]

موانع آکوستیکی معمولاً برای کنترل صدا در فضاهای باز، مانند کاهش صدای اتوبان به مناطق اطراف، پست‌های ترانسفورماتور و دستگاه‌های ساخت‌وساز ساختمانی استفاده می‌شوند. همچنین موانع برای کاهش صدا در فضاهای داخلی مانند ادارات، مدارس و ماشین‌هایی که نمی‌توان به‌طور کامل محصور شوند، به کار می‌روند. کاربرد داخلی موانع زمانی که میدان صوت مستقیم در محل دریافت‌کننده غالب باشد، مؤثر هستند. اگرچه سطح جذب موانع تا

[1] Insertion Loss (IL)
[2] Acoustic Barriers

حدی میدان بازآوا را کاهش می‌دهد، اما عموماً موانع برای کاهش صدای با فرکانس بالا مؤثرتر از فرکانس پایین عمل می‌کنند. صوت با مانع از سه طریق تعامل دارد:

الف) انعکاس از سطح مانع

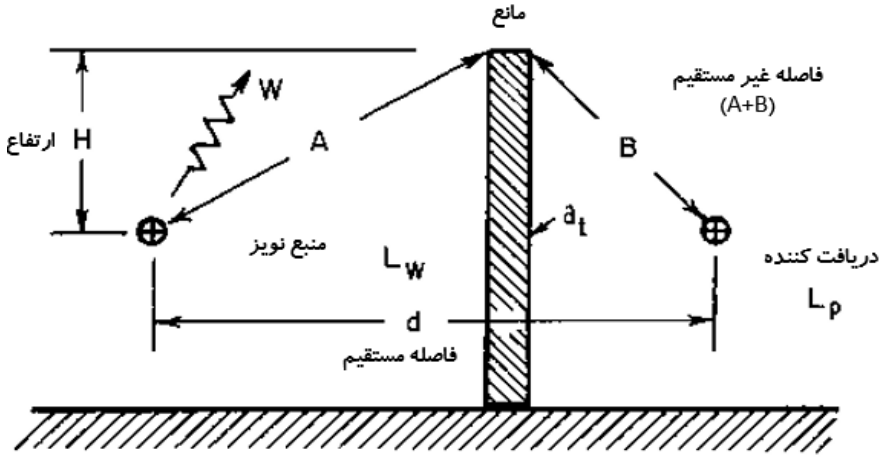
ب) انتقال مستقیم از مانع

پ) پراش از بالای مانع.

به‌منظور اثربخشی مانع در سدکردن صوت، مانع می‌بایست دارای کاهش انتقال بالایی باشد. همچنین مانع باید دارای پوشش جذبی برای کاربردهای داخلی باشد.

۶-۳-۳-۱-موانع در فضاهای باز[1]

برای کنترل مؤثر صدا، مانع باید به حد کافی فشرده باشد، به‌طوری‌که صوت انتقالی مستقیم از میان مانع در مقایسه با صوت انتقالی از بالا و اطراف مانع ناچیز باشد (شکل ۱۹). مانع عمدتاً برای کاهش صدای مستقیم بین گیرنده و منبع صدا قرار می‌گیرد، با نصب مانع در فضای پشت آن، سایه و نیم‌سایه با توجه به فرکانس صوت تشکیل می‌شود. موانع با توجه به جنس و طراحی لبه آن تقسیم‌بندی می‌شوند.

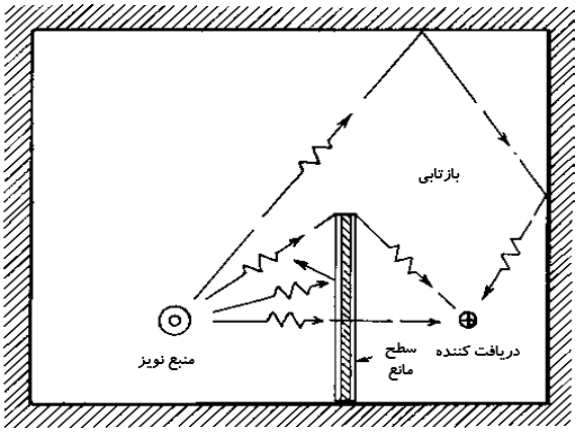


شکل ۱۹. مانع و ابعاد آن

[1]Barriers Located Outdoors

۶-۳-۳-۲-موانع در فضاهای بسته[1]

زمانی که مانعی در فضای داخل قرار بگیرد، در وهله اول بر میدان صوت مستقیم اثر می‌گذارد، بااین‌وجود باید میدان صوت بازتابی را با استفاده از جذب سطحی در دو طرف مانع نیز تحت تأثیر قرار گیرد (شکل ۲۰). مانع در کاربردهای داخلی، زمانی بیشترین اثربخشی در جهت کاهش صدا را دارد که میدان صوت مستقیم بسیار بزرگتر از میدان صوت بازتابی باشد، یا به‌عبارتی‌دیگر، میزان انعکاسات در محیط کار زیاد نباشد که اثربخشی مانع را مورد پرسش قرار دهد.



شکل ۲۰. مانع در فضاهای بسته

محاسبه افت الحاقی تقریبی مانع[2]

با توجه به شکل (۲۱) و فرض اینکه $D > R \geq H$، می‌توان از رابطه ۹، برای محاسبه افت الحاقی تقریبی ناشی از مانع استفاده نمود.

رابطه (۹)
$$IL \approx 10\log\left(\frac{10H^2}{\lambda R}\right)dB$$

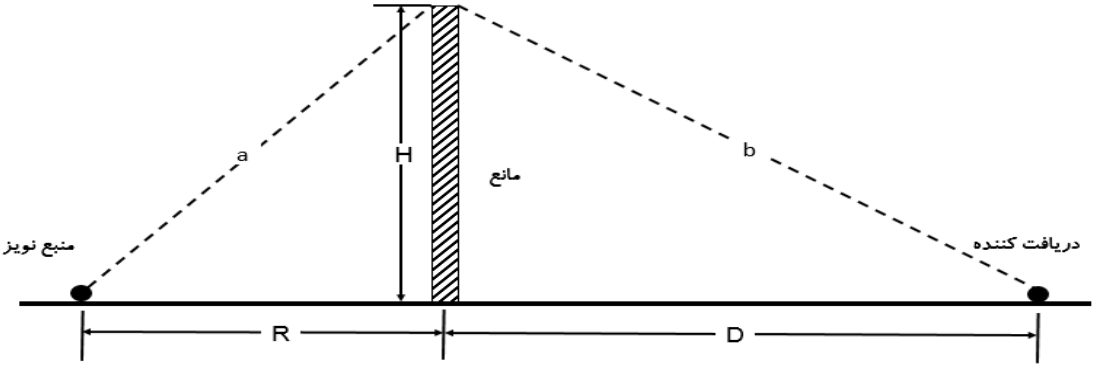
IL : (افت الحاقی ناشی از نصب مانع)

H : ارتفاع مانع (m یا ft)

[1]Barriers Located Indoors
[2]Insertion Loss approximation for Barrier

λ: طول‌موج صوت (m یا ft)

R: فاصله بین منبع با مانع (m یا ft).



شکل ۲۱. مانع با لبه ساده

۶-۳-۴-سایلنسرها[1]

سایلنسر یک عنصر مهم در کنترل صدا برای کاهش صدای خروجی از ماشین‌آلات، سروصدای فن و دیگر منابع دارای جریان گاز می‌باشد. به‌طورکلی یک سایلنسر را می‌توان به عنوان یک عنصر در کانال جریان قرار دارد که به‌منظور کاهش صدای منتقل‌شده در امتداد کانال عمل می‌کند و درعین‌حال اجازه می‌دهد که گاز از درون کانال آزادانه جریان یابد. سایلنسر ممکن است غیرفعال[2] باشد که در آن به دلیل انعکاس و جذب انرژی صوتی (در درون آن)، صدا تضعیف می‌شود. سایلنسر فعال[3] سایلنسری است که در آن سروصدا توسط تکنیک‌های الکترونیکی پیش‌خور۴ و پس‌خور۵ خنثی می‌شود. در ادامه چندین نوع از سایلنسرهای غیرفعال را که مافلر[6] نیز نامیده می‌شوند، به‌طور خلاصه بررسی‌شده‌اند.

سایلنسرهای غیرفعال ممکن است از نوع واکنشی[7] و یا اتلافی[8] باشند. در ادامه دو نوع سایلنسر واکنشی شامل مافلر شاخه کناری (محفظه تشدیدگر) و مافلر محفظه انبساطی که مکانسیم اصلی تضعیف صدای عبوری از درون

[1]Silencers
[2] Passive
[3] Active
[4] Feedforward
[5] Feedback
[6] Muffler
[7] Reactive
[8] Dissipative

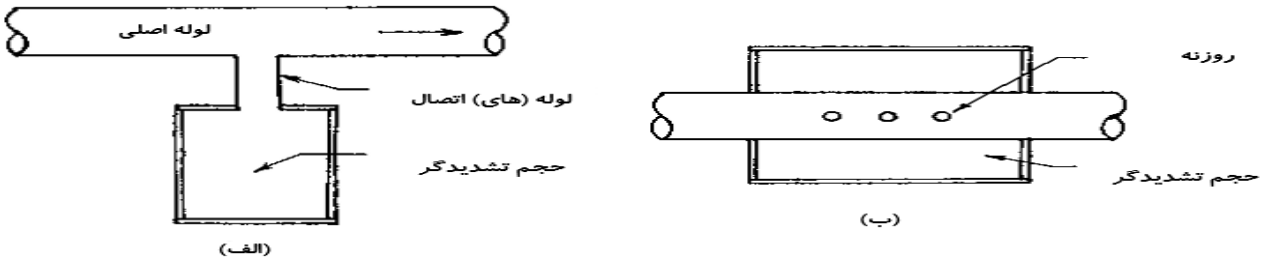
این مافلرها انعکاس انرژی صوتی به سمت منبع (رو به عقب) است و مافلر غیرفعال اتلافی و همچنین محفظه‌های پلنوم (معمولاً در گروه مافلرهای اتلافی طبقه‌بندی می‌شود) که مکانیسم اصلی تضعیف انرژی صوتی در آن جذب انرژی صوتی توسط پوشش (آستر) درون محفظه است، به‌طور مختصر شرح داده‌شده‌اند.

۶-۳-۴-۱-مافلر واکنشی

مافلرهای واکنشی شامل دو نوع مافلر شاخه کناری و مافلر محفظه انبساطی می‌باشند:

الف- مافلرهای شاخه کناری[1]

مافلر شاخه کناری یک نوع سایلنسر است که برای کاهش انتشار صدا در یک بازه فرکانسی محدود از یک سیستم مکانیکی استفاده می‌شود. مافلر شاخه کناری از یک تشدیدگر هلمهولتز[2] متصل به لوله اصلی که صوت از طریق آن منتقل می‌شود، تشکیل‌شده است. این سایلنسر عمدتاً با منعکس کردن انرژی صوتی رو به عقب به سمت منبع، انتقال صوتی را کاهش می‌دهد؛ بنابراین به عنوان سایلنسر واکنشی طبقه‌بندی می‌شود. همچنین مقداری از انرژی در درون عنصر مقاومت صوتی این سایلنسر اتلاف می‌شود (شکل ۲۲، الف و ب).



(ب) تشدیدگر متصل شده از طریق روزنه‌ها (الف) تشدیدگر متصل به یک یا چند لوله

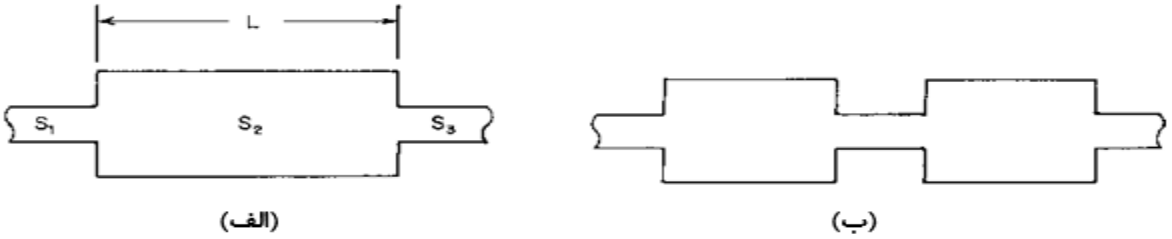
شکل ۲۲. انواع مافلر شاخه کناری

ب- مافلرهای محفظه انبساطی[3]

مافلر محفظه انبساطی، یک مافلر از نوع واکنشی است، زیرا کاهش انتقال صدا درون آن‌ها از طریق انعکاس انرژی وارده رو به عقب (به سمت منبع) حاصل می‌آید. در کل اتلاف انرژی در داخل این مافلر ناچیز است. مافلر محفظه انبساطی از یک یا چند محفظه (حجم‌های انبساطی) تشکیل می‌شود که به عنوان تشدیدکننده در انتقال

[1] Side-Branch Mufflers
[2] Helmholtz Resonator
[3] Expansion Chamber Mufflers

انرژی صوتی در طول لوله اصلی ایجاد اختلال می‌نماید. برخی از شکل‌های مافلر محفظه انبساطی در شکل ۲۳، نشان داده‌شده‌اند.



(الف) حجم انبساطی دوتایی **(ب) حجم انبساطی تک**

شکل ۲۳. اشکال مافلرهای انبساطی

افت انتقال مافلر دو محفظه‌ای عموماً بزرگ‌تر از مافلر تک محفظه‌ای می‌باشد. بااین‌حال، محدوده فرکانس پایینی وجود دارد که در آن افت انتقال نسبتاً کوچک است. این ناحیه در مافلر دو محفظه‌ای به دلیل تشدید بین لوله اتصال و محفظه‌های انبساطی پدیدار می‌شود. زمانی که طول لوله اتصال بلندتر ساخته می‌شود، پهنای این باند گذر فرکانس پایین کوچک‌تر می‌شود. فرکانس بالای این باند گذر[1] (فرکانس قطع یا فرکانس بالایی باند گذر، که در آن افت انتقال مافلر نسبتا کم می‌باشد و باید تلاش گردد که فرکانس مورد نظر برای کنترل، بالای این فرکانس قرار گیرد) را می‌توان از رابطه (۱۰) زیر محاسبه کرد:

رابطه (۱۰)

$$f_c = \frac{c}{2\pi\left[mL_1L_2 + L_2(L_2 - L_1)/3\right]^{1/2}}$$

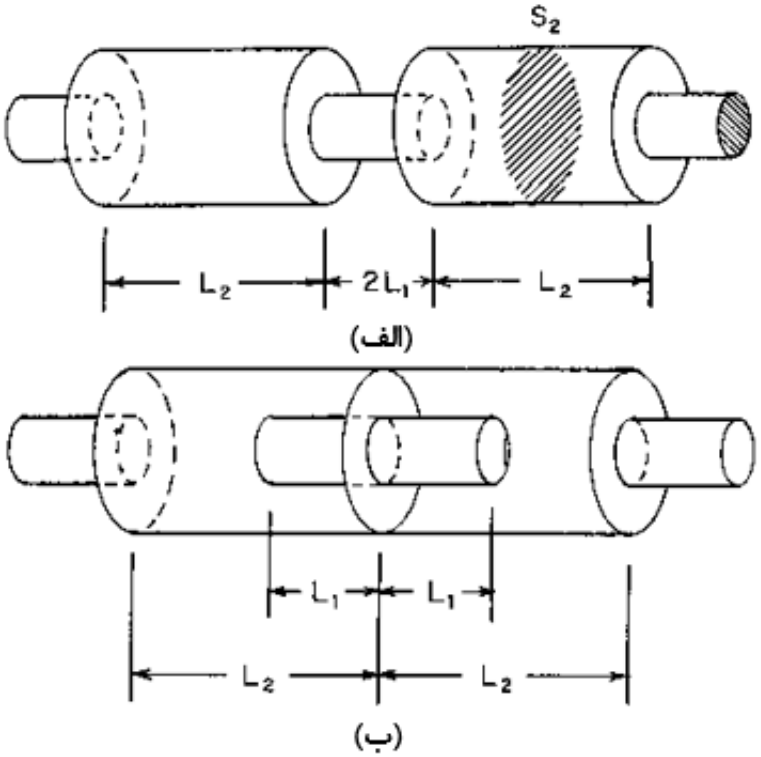
L_1: نصف طول لوله اتصال

L_2: طول یک محفظه انبساطی

m: نسبت مساحت سطح مقطع محفظه به لوله ورودی

c: سرعت صوت می‌باشد. (شکل ۲۴).

[1] Cut-off Frequency



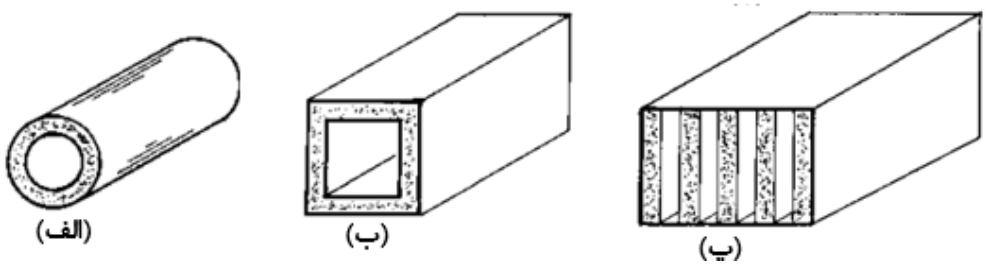
شکل ۲۴. مافلرهای دو محفظه‌ای: (الف) لوله اتصال خارجی، (ب) لوله اتصال داخلی

طول لوله اتصال باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که فرکانس عملیاتی اصلی مافلر بالاتر از فرکانس قطع (f_c)، قرار گیرد. با افزایش طول لوله اتصال، افت انتقال حداکثر در اولین باند بالاتر از باند گذر افزایش می‌یابد.

۶-۳-۴-۲-مافلرهای اتلافی[1]

مافلرها یا سایلنسرهای اتلافی با مافلرهای واکنشی متفاوت‌اند، از این نظر که کاهش صدا در مافلر اتلافی عمدتاً از طریق تضعیف انرژی صوتی در درون آستر یا دیگر عناصر موجود در داخل مافلر حاصل می‌شود. همچنین مافلر اتلافی ممکن است بخشی از انرژی صوتی را رو به عقب به سمت منبع منعکس کند، مانند عمل مافلر واکنشی. برخی از اشکال مافلرهای اتلافی در شکل (۲۵) نشان داده‌شده است.

[1] Dissipative Mufflers



(پ) محفظه از نوع تیغه‌ای (ب) محفظه دارای پوشش مستطیلی (الف) محفظه دارای پوشش دایره‌ای

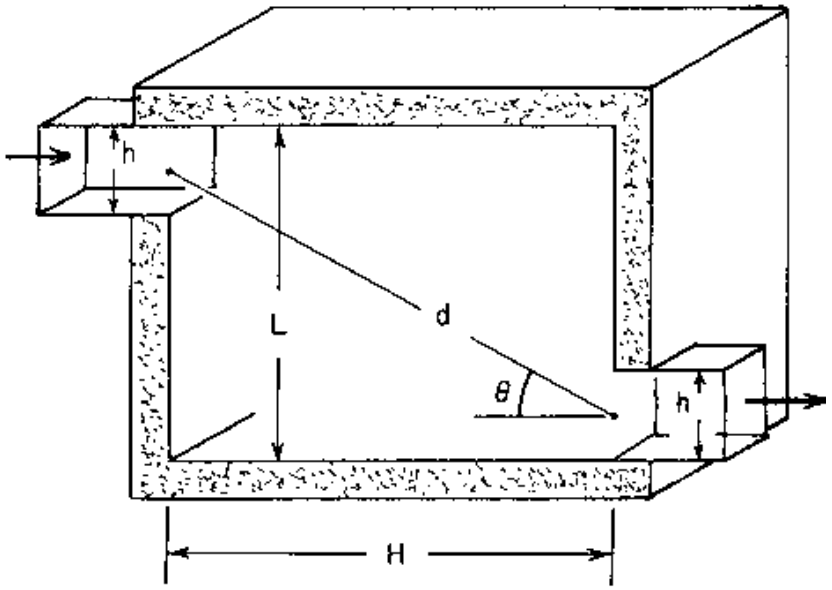
شکل ۲۵. انواع مافلرهای اتلافی

مافلرهای اتلافی معمولاً ویژگی کاهش صدای باند پهن را دارند. پیک‌ها و دره‌های تیز در منحنی‌های افت انتقال که برای مافلرهای واکنشی یافت می‌شود، معمولاً برای مافلرهای اتلافی وجود ندارند. به دلیل این مشخصه، مافلرهای اتلافی برای حل مسائل کنترل صدا که شامل طیف‌های صدای پیوسته ازجمله صدای فن، صدای ورودی و خروجی از توربین‌های گاز و صدای ناشی از روزنه‌های دسترسی در محفظه‌های آکوستیک سودمند می‌باشند.

۶-۳-۵-محفظه‌های پلنوم[1]

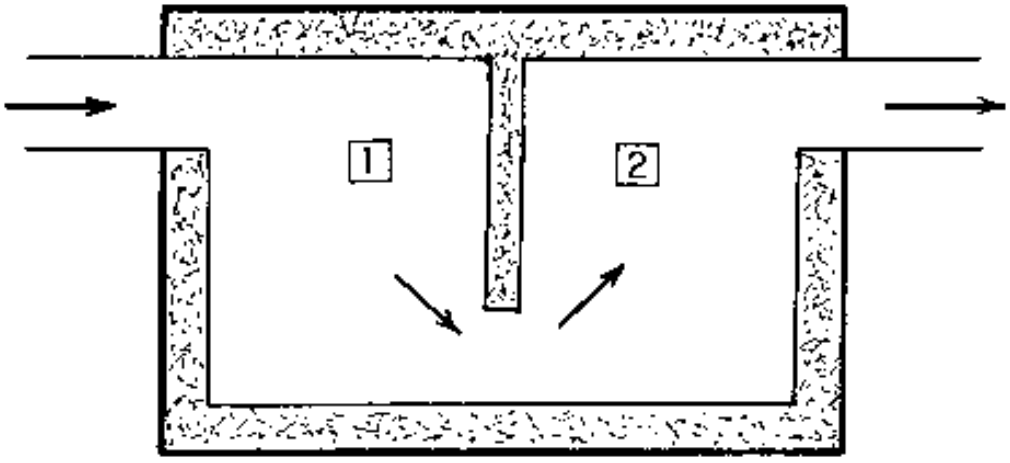
محفظه پلنوم مشابه سایلنسر اتلافی می‌باشد، اما شبیه به یک اتاق کوچکی است که منبع صدا بر روی یک دیوار آن قرار دارد. ابعاد محفظه پلنوم معمولاً بزرگ‌تر از طول‌موج صوت در حال تضعیف است. علاوه بر این، معمولاً ورودی و خروجی محفظه پلنوم روی محور یکسانی قرار داده نمی‌شوند، به‌طوری‌که این حالت اغلب در سایلنسرها اتلافی صدق می‌کند. یکی از کاربردهای محفظه پلنوم، ملایم نمودن نوسانات جریان و توزیع ضعیف سرعت جریان پس از یک فن یا دمنده در یک سیستم توزیع هوا می‌باشد، علاوه بر اینکه باعث کاهش صدای ایجادشده توسط فن یا دمنده می‌شود. محفظه‌های پلنوم برای طول‌موج‌های کوچک‌تر از ابعاد محفظه عملکرد خوبی دارند (شکل ۲۶).

[1] Plenum Chambers



شکل ۲۶. ترکیب یک محفظه پلنوم

پلنوم دو محفظه‌ای که در شکل (۲۷) نشان داده شده است را می‌توان برای کاهش اثر انتقال صوت مستقیم[1] مورداستفاده قرارداد.



شکل ۲۷. پلنوم دو محفظه‌ای

[1] Direct Sound Transmission

۶-۳-۶-مواد آکوستیک

مواد آکوستیک را می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم‌بندی نمود: مواد جاذب[۱]، مواد مانع/ عایق[۲] و مواد میراکننده[۳].

۶-۳-۶-۱-مواد جاذب

مواد جاذب به‌طورکلی دارای ماهیت مقاوم، فیبری، متخلخل و در موارد خاصی تشدیدکننده‌های واکنشی[۴] می‌باشند. نمونه‌های کلاسیک این مواد عبارت‌اند از فایبرگلاس[۵]، پشم‌های معدنی[۶]، نمد[۷] و فوم‌های نوع پلی‌یورتان[۸]. همچنین رزناتورها شامل بلوک‌های توخالی، فلزهای لانه‌زنبوری و ... می‌باشند. جذب واقعی انرژی آکوستیکی در مواد متخلخل و فیبری در اثر تبدیل انرژی‌های آئرودینامیکی به ترمودینامیکی رخ می‌دهد. به زبان ساده‌تر انرژی آکوستیکی در داخل این مواد به گرما تبدیل می‌شود.

پارامتری که بهترین شکل، جذب مواد را توصیف می‌کند ضریب جذب[۹] (α) نام دارد. ضریب جذب مواد به‌صورت نسبت انرژی آکوستیکی جذب‌شده توسط مواد (W_{abs}) به انرژی آکوستیکی برخوردی بر سطوح مواد (W_{in}) تعریف می‌شود (رابطه-۱۱)، معمولاً به‌صورت یک عدد اعشار بین صفر و یک بیان می‌شود. ضریب جذب به‌صورت دینامیکی وابسته به زاویه برخورد جبهه موج صوت و تابعی از فرکانس امواج صوتی می‌باشد. ضریب جذب مواد توسط لوله امپدانس[۱۰] و اتاق بازآوا[۱۱] اندازه‌گیری می‌شود.

رابطه (۱۱)- شکل ریاضی ضریب جذب

$$\alpha=\frac{W_{abs}}{W_{in}}$$

آگاهی از ضریب جذب مواد و همچنین آگاهی از مشخصات فرکانسی منابع صدا در جهت انطباق هر چه بیشتر این دو در هنگام انتخاب مواد جاذب برای اهداف کنترلی یکی از مهم‌ترین اصول می‌باشد. به‌منظور محاسبه ضریب جذب متوسط یک اتاق (هر مکانی دیگر) از رابطه ۱۲ استفاده می‌شود.

---

[1] Absorbing Materials
[2] Barrier Materials
[3] Damping Materials
[۴] Reactive Resonators
[5] Fibrous Glass
[6] Mineral Wools
[7] Felt
[8] Polyurethane-type Foams
[9] Absorption Coefficient
[۱۰] Impedance Tube
[11] Reverberation Room

رابطه (۱۲)- شکل ریاضی ضریب جذب متوسط

$$\overline{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i \alpha_i}{\sum S}$$

S_i: مساحت هر جاذب (m^2 یا ft^2)

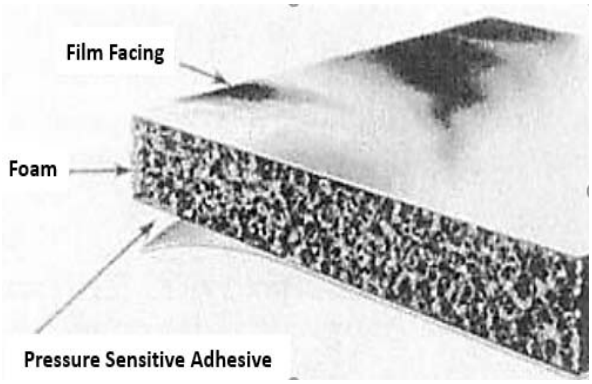
α_i: ضریب جذب هر سطح جاذب

صورت کسر در رابطه ۱۲، سطح جذبی یا سابین[1] (برحسب مترمربع یا فوت مربع) نام دارد.

غالباً، عملکرد مواد جاذب به‌صورت یک امتیاز واحد تحت عنوان ضریب کاهش صدا (NRC[2]) ارائه می‌شود. NRC تنها یک متوسط یا معدل حسابی ضرایب جذب در فرکانس‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز می‌باشد. این پارامتر بیشتر اوقات در آکوستیک معماری و به‌ویژه در طراحی و انتخاب سقف‌های معلق برای کنترل بازتاب استفاده می‌شود.

- **کاربرد مواد جاذب**

یکی از رایج‌ترین کاربرد این مواد، کاهش بازتاب صدای ایجادشده در محفظه‌های ماشین‌آلات می‌باشد، به‌طوری‌که این مواد به‌طورمعمول روی دیوارهای محفظه‌ها یا داخل آن نصب می‌شوند. برای سهولت نصب این مواد به دیوارها، بر روی یک‌طرف این مواد از چسب حساس به فشار استفاده می‌شود. همچنین برای جلوگیری از جذب روغن، حلال‌ها و ...، یک فیلم پلاستیکی نازک (۱ یا ۲ میلی‌متر) روی یک سطح این مواد بکار می‌رود (اگرچه این ماده پلاستیکی سبک‌وزن، جذب فرکانس‌های بالا راکمی کاهش می‌دهد اما عملکرد را در محدوده فرکانس پایین بهبود می‌بخشد).



[1] Sabin
[2] Noise Reduction Coefficient (NRC)

شکل ۲۸. مثالی از کاربرد فوم جاذب به همراه فیلم پلاستیکی و چسب

در جدول ۶، ضرایب جذب برای برخی از مواد جاذب در ضخامت‌های مختلف ارائه‌شده است (همچنین دانسیته مواد جاذب نیز در میزان ضریب جذب پارامتر مهم و مؤثری می‌باشد، به‌طوری‌که در این جدول ذکر نشده است).

جدول ۶ ضرایب جذب آماری برخی از مواد جاذب

مواد	ضخامت اینچ	فرکانس‌های مرکزی اوکتاوباند (هرتز)					
		۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰
فوم پلی اورتان سلول باز	$1\frac{1}{2}$	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۶۶	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۲
	$1\frac{3}{4}$	۰/۱۰	۰/۲۵	۰/۵۲	۰/۸۹	۰/۹۹	۰/۹۵
	۲	۰/۱۶	۰/۲۵	۰/۵۷	۰/۸۲	۰/۸۶	۰/۸۶
	$2\frac{1}{4}$	۰/۲۳	۰/۴۱	۰/۷۵	۰/۹۳	۰/۸۵	۰/۷۷
فایبرگلاس قالبی	۱	۰/۱۸	۰/۳۴	۰/۷۹	۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۹۰
	$1\frac{1}{2}$	۰/۲۵	۰/۴۹	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۱	۰/۸۵
	۲	۰/۳۳	۰/۶۷	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۴	۰/۹۰

توجه: به‌منظور آگاهی از ضرایب جذب سایر مواد تجاری موجود می‌توان به مراجع Randall F. Barron; 2003 و Lewis H. Bell; 1994 مراجعه نمود.

یادآوری: اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی مواد آکوستیک در حالت برخورد عمود، مطابق با استانداردهای ISO 10534-1 و ISO 10534-2 با استفاده از لوله امپدانس و روش‌های تابع تبدیل و موج ایستاده انجام می‌شود (در هر دو روش از یک لوله امپدانس استفاده می‌شود که به یک سر آن منبع تولید صدا متصل است و نمونه آزمون به سر دیگر لوله نصب می‌شود). به‌طوری‌که روش تابع انتقال دارای صحت بیشتری می‌باشد. اگرچه در عمل موج صوتی در زوایای مختلفی به مواد آکوستیک برخورد می‌کند و نیاز است که ضریب جذب صوتی واقعی (ضریب جذب آماری یا تصادفی) مواد اندازه‌گیری شود، بنابراین بر اساس استاندارد ISO 354، روش اتاق بازآوا برای این منظور استفاده می‌شود و از سطح اطمینان بالاتری برخوردار می‌باشد، اگرچه نیاز به اتاق بازآوا و تجهیزات مربوطه و اندازه بزرگی از نمونه‌ها (۱۰ تا ۱۲ مترمربع) می‌باشد.

۶-۳-۶-۲-مواد مانع/ عایق

داشتن دانسیته[1] بالا یک ویژگی رایج مشترک مواد مانع/ عایق مؤثر می‌باشد. مؤثرترین مواد مانع/ عایق دارای درجه بالایی از میرایی داخلی می‌باشند، به‌طوری‌که از نظر کیفی تحت عنوان نرمی[2] (نرم بودن نه سفت و سخت بودن) توصیف می‌شود. ورق سرب بهترین مثال از یک ماده عایق/مانع چگال نرم می‌باشد.

پارامتری که جداسازی یا توانایی توقف صدا توسط یک دیوار یا پانل را توصیف می‌کند، ضریب انتقال[3] (τ) می‌باشد. ضریب انتقال به‌صورت نسبت توان صدای منتقل‌شده (W_t) از میان یک پارتیشن به توان صدای برخوردی (W_i)، تعریف می‌شود. ضریب انتقال در زوایایی مختلف برخورد امواج صوتی می‌تواند مقادیر متفاوتی داشته باشد، به‌طوری‌که در حالت برخورد موج صوتی با زاویه صفر درجه به دیوار، ضریب انتقال دارای حداکثر مقدار خواهد بود.

رابطه (۱۳)-شکل ریاضی ضریب انتقال

$$\tau=\frac{W_t}{W_i}$$

به دلیل وابستگی شدید ضریب انتقال به زاویه برخورد و به‌منظور بیان مفهوم انتقال صدا در یک شکل کاربردی، یک اصطلاح لگاریتمی تحت عنوان افت انتقال به‌صورت زیر تعریف‌شده است:

رابطه (۱۴)-محاسبه افت انتقال با استفاده از ضریب انتقال

$$TL\ (dB)=10Log\frac{1}{\tau}$$

به‌طوری‌که در این رابطه، τ ضریب انتقال میانگین در همه زوایای برخورد می‌باشد. همچنین درصورتی‌که بخواهیم از یک دیواره که دارای چندین لایه با ضرایب انتقال متفاوت باشد استفاده کنیم، متوسط ضریب انتقال دیواره به‌صورت زیر بیان می‌شود.

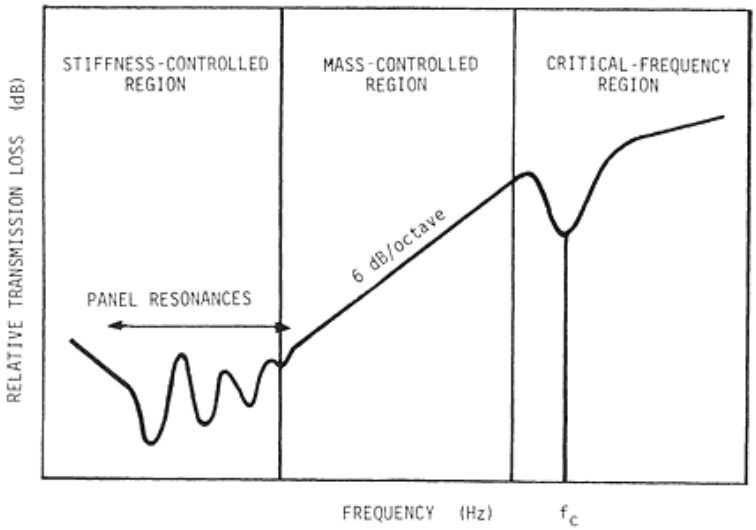
رابطه (۱۵)-شکل ریاضی ضریب جذب متوسط

$$\bar{\tau}=\frac{\sum_{i=1}^{n}S_i\tau_i}{\sum S}$$

[1] Dense
[2] Limpness
[3] Transmission Coefficient

- **کاربرد مواد عایق**

همان‌طوری که در شکل ۲۹ نشان داده‌شده است، افت انتقال برای یک پانل/ دیوار هموژن در همه فرکانس‌ها یکسان نبوده و دارای سه ناحیه رفتاری شامل ناحیه تشدید یا اثر فنریت[1]، ناحیه کنترل جرم[2] و ناحیه فرکانس بحرانی[3] می‌باشد و می‌بایست در کاربرد این مواد برای اهداف کنترلی مدنظر قرار گیرد.



شکل ۲۹. پاسخ فرکانسی (افت انتقال) پانل های هموژن

ناحیه تشدید یا اثر فنریت: در فرکانس‌های پایین، افت انتقال درنتیجه وجود رزونانس (تشدید) ارتعاش طبیعی دیوار (فرکانس تشدید)، دارای نوساناتی خواهد بود، به‌طوری‌که این حالت زمانی رخ می‌دهد که فرکانس صدا و فرکانس طبیعی پانل/ دیوار نزدیک هم باشند. در هرکدام از این فرکانس‌های تشدید، پانل تقریباً نسبت به صدا شفاف می‌باشد (افت انتقال به صفر نزدیک می‌شود)، البته درصورتی‌که میراکنندگی داخلی در مواد پانل قرار نداشته باشد. موادی مانند فولاد میراکنندگی بسیار کمی دارند و هنگام اصابت ضربه تا مدت طولانی، دچار ارتعاش می‌شوند، اما موادی لاستیک و سرب دارای میراکنندگی داخلی بالایی می‌باشند و خیلی سریع باعث زوال صدا می‌شوند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن میرایی، اثربخشی مانع قابل افزایش می‌باشد.

[1] Stiffness-Controlled Region
[2] Mass Controlled Region
[3] Critical Frequency Region

ناحیه کنترل جرم: در این ناحیه، انتقال تنها به‌وسیله جرم/ چگالی سطحی مشخص می‌شود، به‌طوری‌که رابطه (۱۶) زیر در این ناحیه کاربرد دارد.

رابطه (۱۶)- رابطه کاربردی $TL= 20\log (f) + 20\log (W) - C$

TL: (افت انتقال)

f : فرکانس (هرتز).

W: دانسیته سطحی ($lb/ft^2/in$ یا $kg/m^2/cm$).

C: اگر دانسیته سطحی بر اساس $lb/ft^2/in$ باشد C= ۳۳

اگر دانسیته سطحی بر اساس $kg/m^2/cm$ باشد C= ۴۷

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در ناحیه جرم، (۱) به ازای افزایش یک اوکتاوباند فرکانس، افت انتقال با نرخ ۶ دسیبل افزایش می‌یابد و (۲) به ازای دو برابر کردن چگالی سطحی افت انتقال با نرخ ۶ دسیبل افزایش می‌یابد. همان‌طوری که در مورد مواد جاذب بیان شد، عملکرد آکوستیکی مواد مانع/ عایق به‌طورکلی با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد؛ بنابراین بر اساس این مطالب است که اغلب شنیده می‌شود که کنترل صدای فرکانس پایین، مشکل‌تر می‌باشد. اگرچه، عملکرد ناحیه جرم با استفاده از پانل‌های چندلایه با حفره‌های هوا یا در ترکیب با مواد جاذب قابل‌افزایش است.

ناحیه فرکانس بحرانی: در فرکانس‌های بالاتر (بالاتر از ناحیه جرم)، در ناحیه فرکانس بحرانی، یک اثر تشدیدی دیگر ظاهر می‌شود که افت انتقال مواد مانع/ عایق را به پایین‌تر از پیش‌بینی‌های ناحیه جرم کاهش می‌دهد. درواقع شرایط انطباق (برابری طول‌موج‌ها) زمانی که طول‌موج صدای برخوردی با طول‌موج خمشی مواد مانع/ عایق برابر شود، رخ می‌دهد و امواج صوت برخوردی و امواج خمشی در پانل یکدیگر را تقویت می‌کنند. انطباق ابتدا در برخورد عمود (زاویه برخورد ۹۰ درجه) رخ می‌دهد، اگرچه انطباق در دامنه‌ای از فرکانس‌ها و زوایای برخورد ایجاد می‌شود و این نقطه متناظر است با گذار از ناحیه جرم به ناحیه فرکانس بحرانی. به‌هرحال در مواد آکوستیکی رایج، فرکانس بحرانی (فرکانس انطباق موج) را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود:

رابطه (۱۷) معادله محاسبه فرکانس بحرانی $f_c = \dfrac{\sqrt{3}c^2}{\pi c_L h}$

f_c: فرکانس بحرانی (Hz)

c: سرعت صوت در هوا (m/s)

c_L: سرعت صوت در پانل/دیوار (m/s)

h: ضخامت پانل/دیوار (m).

می‌توان نتیجه گرفت که در ناحیه فرکانس بحرانی: (۱) فرکانس‌های انطباق باضخامت پانل رابطه معکوس دارند، (۲) انطباق در مواد مختلف در فرکانس‌های مختلف رخ می‌دهد، چراکه سرعت صوت به نوع مواد بستگی دارد و (۳) پایین‌ترین فرکانسی که در آن انطباق رخ می‌دهد در برخورد عمود یا زاویه برخورد ۹۰ درجه می‌باشد که به آن فرکانس بحرانی می‌گویند.

با توجه به مباحث کلی مطرح‌شده در خصوص مانع/ عایق‌ها، می‌توان گفت که خصوصیات مواد مانع/ عایق صوت توسط جرم، فنریت/ سختی و میرایی کنترل می‌شود. برای استفاده از این مواد در اهداف کنترلی، بسته به مشخصات فرکانسی صدای موردنظر، می‌بایست هر سه ناحیه را موردتوجه قرارداد، به‌طوری‌که فرکانس‌های غالب برای کنترل را از نظر مجاورت با فرکانس‌های رزونانس/ تشدید در ناحیه ۱ و فرکانس بحرانی در ناحیه ۳ مورد بررسی قرار دهیم، چرا که در صورت عدم بررسی امکان دارد فرکانس‌های موردنظر برای کنترل با فرکانس‌های رزونانس و بحرانی مطابقت داشته و اهداف عملکردی طرح کنترلی محقق نشود. در جدول ۷، افت انتقال برخی از مواد مانع/ عایق در ضخامت‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۷ افت انتقال برخی از مواد رایج مورداستفاده برای محفظه های آکوستیکی و موانع جداسازی

مواد	ضخامت (اینچ)	دانسیته سطحی (lb/ft^2)	فرکانس (هرتز)						
			۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۸۰۰۰
سرب	$\frac{۱}{۳۲}$	۲	۲۲	۲۴	۲۹	۳۳	۴۰	۴۳	۴۹
	$\frac{۱}{۶۴}$	۱	۱۹	۲۰	۲۴	۲۷	۳۳	۳۹	۴۳
استیل	(گیج[۱] ۱۸) ۰/۰۴	۱	۱۵	۱۹	۳۱	۳۲	۳۵	۴۸	۵۳
	(گیج ۱۸) ۰/۰۵۲	۲/۵	۲۱	۳۰	۳۴	۳۷	۴۰	۴۷	۵۲
بتن	۴	۴۸	۲۹	۳۵	۳۷	۴۳	۴۴	۵۰	۵۵
	۶	۳۶	۳۳	۳۴	۳۵	۳۸	۴۶	۵۲	۵۵

یادآوری، به‌منظور آگاهی از افت انتقال سایر مواد تجاری موجود می‌توان به مراجع Randall F. Barron; 2003 و Lewis H. Bell; 1994 مراجعه نمود.

[۱] Gauge (یک واحد رایج برای اندازه گیری ضخامت ورق های فلزی)

۶-۳-۶-۳ مواد میراکننده

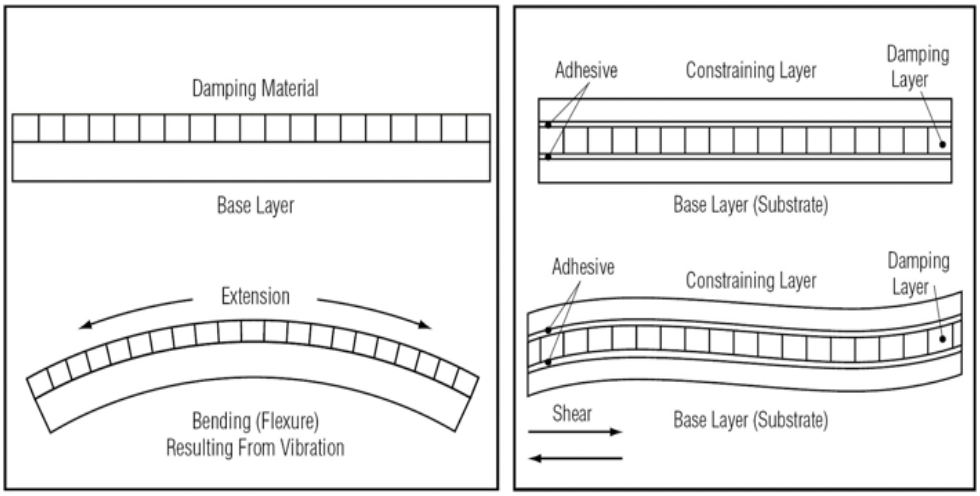
مواد میراکننده به‌طورمعمول پوشش‌های نسبتاً نازک از پلاستیک‌های پلیمری، فلزی، اپوکسی یا چسب می‌باشند که می‌توانند به پنل‌های فلزی، چرخ‌دنده‌ها، قطعات ماشین‌آلات و ... چسبیده (لمینت) شوند. با به‌کارگیری این پوشش‌ها، صدای زنگ[۱] مانند ناشی از ضربه به یک ورقه فلزی، دچار خفگی خواهد شد. میرایی برای توصیف اتلاف انرژی مکانیکی مربوط به ارتعاش (تبدیل این انرژی حرکتی به گرما) مورداستفاده قرار می‌گیرد. قابلیت کاهش صدا در پی کاربرد مواد میراکننده، به این دلیل است که به‌محض اینکه انرژی مکانیکی دچار اتلاف می‌شود، به شکل صوت هوابرد یا ساختاری منتشر نمی‌شود. برای مثال اگر یک زنگ را لمس کنید، تراز صدا (مربوط به انرژی مکانیکی ناشی از ارتعاش زنگ) درنتیجه میرایی ایجادشده توسط انگشتان به‌شدت دچار زوال می‌شود (به گرما تبدیل می‌شود). به‌طور خلاصه، مواد میراکننده یک روش مؤثر برای کاهش دامنه ارتعاش مکانیکی می‌باشند.

- **کاربردهای عملی مواد میراکننده در کنترل صدا:**

میرایی خارجی می‌تواند به سه روش اصلی بکار گرفته شود،

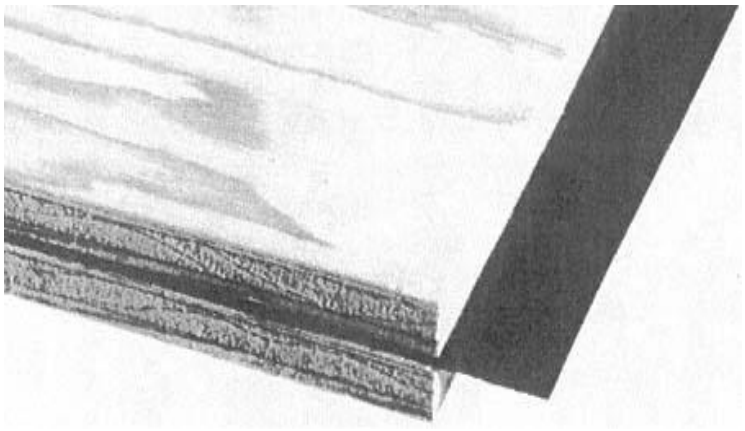
۱. بکار بردن روکشی از مواد میراکننده (لایه آزاد) با فاکتور افت بالا به‌طور مستقیم روی سطح (چسباندن این مواد روی یک سازه).
۲. بکار بردن ورق‌های فلزی که روکشی از مواد میراکننده به آن‌ها الحاق[۲] شده است (شکل ۳۰)، مانند استفاده از این پانل‌ها در دیوار کابین‌ها، درها، پارتیشن‌ها و ...
۳. به کار بردن لمینت‌های لایه محدود[۳] (شکل ۳۱) به‌طوری‌که در این حالت لایه‌هایی از ورق فلزی با استفاده از یک ماده ویسکوالاستیک باهم پیوند داده می‌شوند، مانند اتاقک‌های ماشین‌آلات، قیف سیکلون[۴]، صفحه روغن در موتورهای دیزل و ...

[۱] Ring
[۲] Constrained Layer Damping
[۳] Constrained-Layer Laminates
[۴] Cyclone Hoppers



شکل ۳۰. لایه‌های روکش شده با مواد میراکننده

کارایی مواد میراکننده به پارامترهایی ازجمله ضخامت، دما (کارایی ایده‌آل در یک دامنه دمایی محدود)، باندینگ (پیوند مناسب با ساختار موردنظر) و موقعیت استفاده (کاربرد در نواحی با پیک دامنه جابجایی) وابسته می‌باشد.



شکل ۳۱. لمینت لایه محدود چوبی با استفاده از مواد میراکننده، با دامنه عملکرد آکوستیکی ۵ تا ۱۵ دسیبل

یادآوری: با وجودی‌که از مواد جاذب برای کاهش بازتاب داخلی صدا، مواد مانع/ عایق برای تأمین جداسازی آکوستیکی و مواد میراکننده برای افزایش افت انتقال مواد مانع/ عایق استفاده می‌شود، اما باید توجه داشت که در اکثر اقدامات کنترل صدا، به‌کارگیری یک نوع ماده به‌تنهایی ایده‌آل نیست و باید ترکیبی از آن‌ها مورداستفاده قرار گیرد.

۶-۳-۷-کنترل صدا در ساختمان‌های اداری

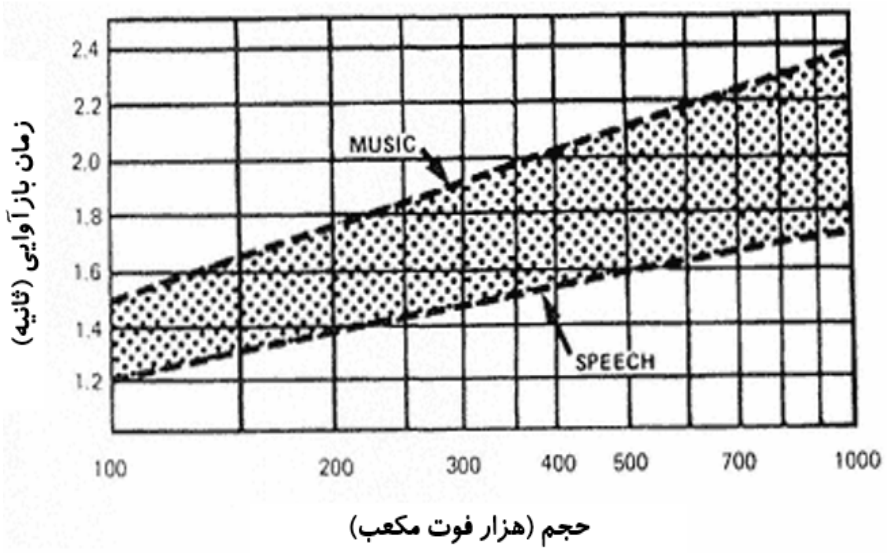
اقدامات کنترل صدا در ساختمان‌ها در اوایل قرن نوزدهم به سبب اهمیت شرایط شنیداری مناسب در کلیساها، تئاترها، سالن‌های کنسرت و تالارهای کنفرانس آغاز شد. علاوه براین، حفظ حریم خصوصی و شرایط آرام در آپارتمان‌ها، ادارات، رستوران‌ها، ساختمان‌های تجاری و به‌طور هم‌زمان رشد سریع استفاده از تهویه مطبوع و پدیدار شدن مشکلات ناشی از آن، برافزایش درک عموم جامعه از صدا و اهمیت کنترل آن در ساختمان‌های اداری افزوده است. اگرچه این موضوع دارای دامنه وسیعی می‌باشد، اما می‌توان آن را در سه حوزه مورد بررسی قرارداد:

- **اصلاح آکوستیکی** (با شکل‌دهی فضاها و کنترل بازتاب برای بهترین شرایط ممکن شنیداری، سروکار دارد).
- **جداسازی صدا** (بر کاهش صدا در طراحی ساختار ساختمان و کاهش انتقال صدا از طریق دیوارها، کف، سقف و درب‌ها تمرکز دارد).
- **تجهیزات مکانیکی** (به تجهیزات ایجاد صدای هوابرد و پیکری می‌پردازد).

۶-۳-۷-۱-اصلاح آکوستیکی

هنگامی‌که صدا از یک اتاق دارای سطوح با قابلیت انعکاس بالا سرچشمه می‌گیرد، بازتاب[1] رخ می‌دهد. علاوه بر این خاصیت جمع‌پذیری امواج منعکس‌شده، یک میدان صدای انتشاری[2] ایجاد خواهد نمود. حال اگر منبع سروصدا، صدای انسانی باشد، برهم‌کنش ایجادشده، به‌طور چشمگیری باعث تداخل در قابلیت فهم گفتار شده و ممکن است ارتباط/ مکالمه تقریباً با مشکل مواجه شود. برای اهداف طراحی و جلوگیری از ایجاد انعکاسات بیش‌ازحد، لازم است میزان انعکاسات را کاهش دهیم و پارامتر مهمی را که در این مورد می‌توان به کار گرفت، زمان بازآوایی می‌باشد، به‌طوری‌که برای مکان‌های مختلف با کاربری‌های متفاوت، زمان بازآوایی می‌بایست در یک دامنه نرمال قرار گیرد تا بتوان از مشکلات ناشی از انعکاسات جلوگیری نمود. در شکل ۳۲، نموداری به‌منظور انتخاب زمان‌های بازآوایی برای اتاق‌ها یا سالن‌ها تا حجم یک‌میلیون فوت مکعب نشان داده‌شده است. به‌طوری‌که با توجه به حجم و کاربرد اتاق (موسیقی، گفتار یا ترکیبی از این دو)، نمودار زمان بازآوایی مطلوب در فرکانس ۵۰۰ هرتز را به‌منظور اطمینان از شرایط آکوستیکی مناسب ارائه می‌دهد.

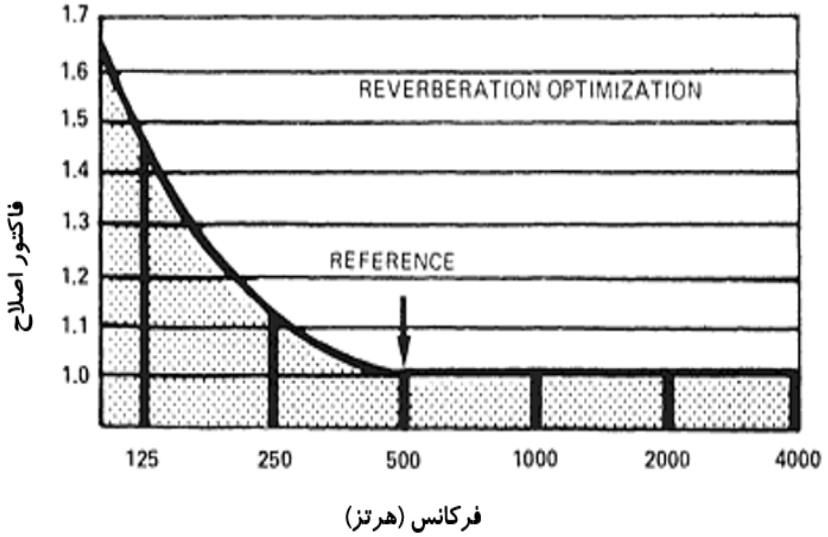
[1] Reverberant
[2] Diffuse Sound Field



شکل ۳۲. زمان های بازآوایی توصیه شده در فرکانس ۵۰۰ هرتز

اگر سالن منحصراً برای کنسرت‌های موسیقی می‌باشد، مقادیر بالای دامنه می‌بایست به عنوان معیار طراحی مورداستفاده قرار گیرد، درصورتی‌که سالن منحصراً برای سخنرانی می‌باشد، مقادیر پایین‌تر دامنه انتخاب می‌شوند و درصورتی‌که سالن برای تلفیقی از موسیقی و سخنرانی مدنظر باشد، آنگاه مقادیر میانه انتخاب می‌شوند.

شکل ۳۲، صرفاً زمان بازآوایی مطلوب در ۵۰۰ هرتز را ارائه می‌دهد. به‌منظور بهبود بیشتر کیفیت شنیداری اتاق، با استفاده از شکل ۳۴، می‌توان بهینه‌سازی طیفی (در سایر فرکانس‌ها) را به طراحی سیستم اضافه نمود. به‌طوری‌که ابتدا با استفاده از شکل ۳۲، زمان بازآوایی مطلوب تعیین می‌شود، سپس با استفاده از شکل ۳۳، برای ارتقاء کیفیت شنیداری اتاق، زمان بازآوایی در فرکانس‌های ۲۵۰ و ۱۲۵ هرتز به‌وسیله یک فاکتور تقریبی نسبت به زمان بازآوایی در ۵۰۰ هرتز به دست می‌آید. برای مثال با توجه به شکل ۳۲، اگر برای یک اتاق با حجم ۲۰۰۰۰۰ فوت مکعب و با کاربری سخنرانی، زمان بازآوایی مطلوب برابر با تقریباً ۱/۴ ثانیه به دست آید، به‌منظور ارتقاء کیفیت شنیداری اتاق، زمان بازآوایی در فرکانس‌های ۱۲۵ و ۲۵۰ هرتز با توجه به فاکتور اصلاح به‌دست‌آمده از شکل ۳۳ (به ترتیب برابر با ۱/۴۵ و ۱/۱۵)، به ترتیب برابر با ($T_{۱۲۵}$=۱/۱۵×۱/۴=۱/۶۱) و ($T_{۲۵۰}$=۱/۴۵×۱/۴=۲/۰۳) به دست خواهد آمد.



شکل ۳۳. نمودار انتخاب فاکتورهای اصلاح طیفی برای زمان های بازآوایی مطلوب

به‌طور خلاصه، طراحان معتقدند که مقدار کمی بیشتر بودن زمان بازآوایی در فرکانس‌های پایین به بهبود کیفیت شنیداری کمک خواهد نمود. همچنین توجه شود که فاکتور اصلاح برای فرکانس‌های بالاتر از ۵۰۰ هرتز، عدد یک می‌باشد.

الف- زمان بازآوایی (RT[1])

زمان بازآوایی، به‌صورت زمان موردنیاز برای کاهش میانگین تراز فشار صوت به میزان ۶۰ دسیبل تعریف می‌شود (کاهش فشار صوت به یک‌هزارم مقدار اولیه خود)، به‌طوری‌که RT، به‌صورت T_{60} نیز بیان می‌شود. زمان بازآوایی به ابعاد اتاق و جذب کلی سطوح و هوا بستگی دارد. در ادامه روابط محاسبه این پارامتر در مقیاس متریک بیان‌شده است (رابطه ۱۸).

رابطه (۱۸) معادله محاسبه زمان بازآوایی در مقیاس متریک $RT=\frac{0.161\times V}{A+4mV}=\frac{0.161\times V}{S\bar{\alpha}_{sab}+4mV}$

V، حجم اتاق (m^3)

$\bar{\alpha}$، میانگین ضریب جذب اتاق (m^2) که با استفاده از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود.

m، ضریب جذب هوا که با استفاده از جدول ۸ به دست می‌آید.

$S\bar{\alpha}_{sab}$، سطح جذبی یا سابین (برحسب سابین مترمربع) می‌باشد.

[1] Reverberation Time (RT)

رابطه (۱۹) معادله محاسبه ضریب جذب متوسط اتاق

$$\bar{\alpha}=\frac{S_1(\alpha_1)+S_2(\alpha_2)+...+S_n(\alpha_n)}{S}$$

$\alpha_1, \alpha_2 ..., \alpha_n$، ضرایب جذب سطوح مختلف در اتاق (بدون واحد).

$S_1, S_2, ..., S_n$، مساحت سطوح مختلف در اتاق (m^2).

لازم به‌ذکر است که ضریب جذب اشیاء (مانند صندلی، پرده، فرش و ...)، افراد و واحدهای فضایی می‌بایست در محاسبه میانگین ضریب جذب ($\bar{\alpha}$) در نظر گرفته شود (مقادیر جذب این موارد در ضمیمه F، کتاب منبع ذکرشده است Bell. 2004).

جدول ۸ ضرایب جذب هوا براساس فرکانس و رطوبت هوا

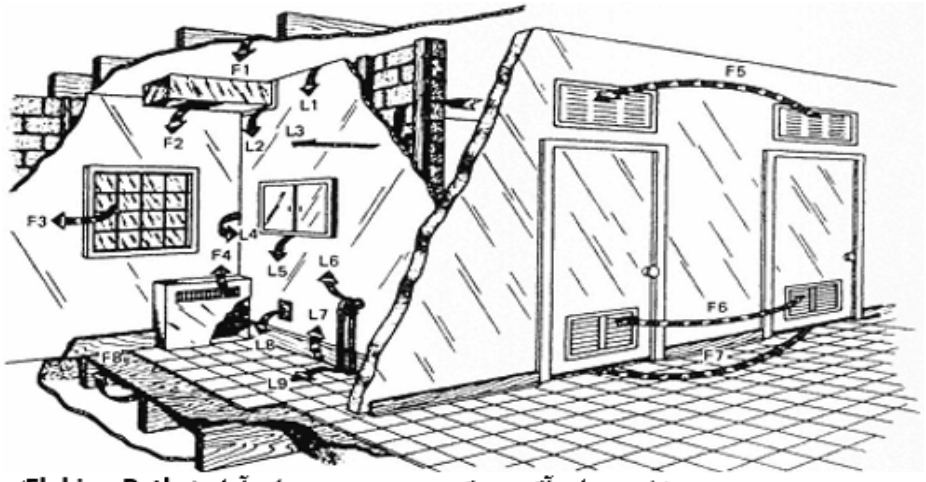
فرکانس مرکزی اوکتاوباند هرتز	رطوبت نسبی (درصد)			
	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰
۲۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۵
۴۰۰۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲
۸۰۰۰	۰/۰۱۴	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵

ب-خلاصه اصلاح آکوستیکی

با توجه به روابط بیان‌شده، ابتدا ضریب جذب متوسط اتاق (سطوح و اشیاء/افراد) با استفاده از رابطه (۱۹) محاسبه، سپس با استفاده از رابطه (۱۸) مقدار پارامتر RT محاسبه خواهد شد. مقادیر پارامتر RT را با مقادیر توصیه‌شده در شکل ۳۲ (فرکانس ۵۰۰ هرتز) و مقادیر توصیه‌شده در شکل ۳۴ (فرکانس‌های ۱۲۵ و ۲۵۰ هرتز)، برای کاربری مکان موردنظر/طراحی تطبیق می‌دهیم. درصورتی‌که مقادیر به‌دست‌آمده RT بیشتر از مقادیر RT توصیه‌شده باشد، لازم است در جهت کاهش و حداکثر تطابق با مقادیر توصیه‌شده، از مواد جاذب در سطوح مختلف استفاده شود.

۶-۳-۷-۲-جداسازی صدا

انتقال صدا در سازه‌های ساختمانی درنتیجه انتقال هوابرد صدا از طریق مسیرهای آزاد یا انتقال پیکری[۱] از طریق دیوارها، کف، سقف می‌باشد، بنابراین جداسازی صدا در ساختمان‌ها، اساساً بر کنترل انتقال صدا از طریق دیوارها، کف، سقف و روزنه‌ها متمرکز می‌باشد. در شکل ۳۴، مثال‌های رایجی از مسیرهای انتقال صدا نشان داده‌شده است.



مسیرهای آزاد (Flaking Paths)	نشتی های آکوستیکی
F1: پلنوم های باز	L1: درزگیری ضعیف- سقف
F2: مجراهای کانال	L2: نفوذ ناشی از کانال
F3: پنجره	L3: اتصالات ضعیف
F4: یونیت های گرمایش	L4: درزگیری ضعیف- دیوارها
F5: دریچه های باز	L5: کابینت ها
F6: دربهای لوورد	L6: نفوذ ناشی از دیوار
F7: درب های برش خورده از پایین	L7: درزگیری ضعیف- کف
F8: طبقات پایین	L8: خروجی ها-کلید، پریز و .. L9: نفوذ ناشی از کف

شکل ۳۴. مسیرهای رایج انتقال صدای هوابرد در ساختمان ها

[۱] Structure-Borne

❖ رویکردهای اساسی برای کنترل انتقال صدای هوابرد به‌شرط زیر می‌باشند:

۱- انتخاب سازه‌هایی که میزان انتقال صدا را کاهش می‌دهند.

۲- حذف مسیرهای مستقیم انتقال هوا.

۳- استفاده از مواد جاذب صدا در بین فضای هوایی آزاد سازه‌ها.

اغلب ترکیبی از این اقدامات برای دست‌یابی به کنترل انتقال صدا بین اتاق‌ها ضروری می‌باشد. به علت تماس مستقیم سطوح سازه با تجهیزات مکانیکی، انرژی ارتعاش به سایر قسمت‌های ساختمان انتقال می‌یابد. همچنین صدای پیکری می‌تواند ناشی از منابعی مانند صدای ناشی از قدم زدن[۱]، سقوط اشیاء، به هم کوبیدن درب‌ها[۲]، یا لرزش ناشی از سیستم‌ها و تجهیزات مکانیکی باشد. رویکردهای اساسی برای کنترل انتقال صدای پیکری به‌شرح زیر می‌باشند:

۱- افزایش افت انتقال دیوار، سقف یا کف.

۲- جداسازی ارتعاش تجهیزات.

۳- استفاده از سازه‌های مونتاژ شده ناپیوسته.

الف- کلاس انتقال صوت[۳]:

سازمان بین‌المللی استاندارد به‌منظور استاندارد نمودن افت انتقال مصالح در فرکانس‌های مختلف، یک منحنی استاندارد، با نام کلاس انتقال صوت (STC)، بر مبنای محدوده فرکانس مکالمه، ارائه کرده است. این منحنی افت انتقال مناسب به ازای فرکانس را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که در این منحنی، افت انتقال دیواره تا فرکانس ۴۰۰ هرتز و در بازه فرکانسی ۴۰۰ تا ۱۲۵۰ هرتز، به ازای هر اوکتاوباند افزایش فرکانس، به ترتیب ۹ و ۳ دسی‌بل افزایش می‌یابد و در فرکانس‌های بالاتر از ۱۲۵۰ هرتز افت انتقال ثابت می‌باشد. مقادیر افت انتقال استاندارد در فرکانس‌های مرکزی در جدول ۹ نشان داده‌شده است. به‌طور خلاصه، STC یک شاخص تک عددی می‌باشد که عملکرد جداسازی مانع (معمولاً دیوار) را ارزیابی می‌کند.

---

[1] Footfalls

[2] Doors slamming

[۳] Sound Transmission Class (STC)

جدول ۹. افت انتقال استاندارد در فرکانس‌های مرکزی

فرکانس مرکزی اوکتاوباند (هرتز)	۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰
افت انتقال (دسیبل)	۳۶	۴۵	۵۲	۵۵	۵۶	۵۶

مقدار STC برای یک دیواره، با تطبیق مجموعه افت‌های انتقال اندازه‌گیری شده (در ۱۶ فرکانس) با منحنی-های استاندارد تشریح شده در استاندارد ASTM-E413 (طبقه‌بندی برای تعیین کلاس انتقال صوت)، تعیین می‌شود. به‌منظور آگاهی از ارزش نسبی STC، در جدول ۱۰، کیفیت شنوایی در پشت یک دیوار با مقادیر مختلف STC ارائه‌شده است. لازم به‌ذکر است برای داشتن هرگونه حریم خصوصی، مانند دفاتر اداری، دیوارهای آپارتمان، دیوارهای خارجی و ... یک STC برابر یا بیشتر از ۴۵ موردنیاز می‌باشد.

جدول ۱۰. کیفیت شنوایی برای مقادیر مختلف کلاس انتقال صوت دیوار

کلاس انتقال صوت (STC)	کیفیت شنوایی
۲۵	مکالمه طبیعی به راحتی و روشنی قابل‌درک می‌باشد.
۳۰	مکالمه با صدای بلند را می‌توان نسبتاً خوب درک کرد، مکالمه طبیعی قابل شنیدن است اما درک نمی شود.
۳۵	صدای بلند قابل شنیدن است اما قابل فهم نیست.
۴۲	مکالمه بلند به عنوان یک زمزمه قابل شنیدن می‌باشد.
۴۵	مکالمه بلند قابل شنیدن نمی‌باشد.
۵۰	صداهای خیلی بلند مانند آلات موسیقی یا استریو به صورت ضعیفی شنیده می‌شوند.

ب-دیوارها

کارایی جداسازی صدا در یک دیوار، سقف یا کف، به‌منظور اطمینان از تأمین سطح بالایی از جداسازی آکوستیکی در درجه اول به موارد زیر بستگی دارد:

۱- دانسیته سطحی سازه

۲- اضافه کردن مواد انعطاف‌پذیر

۳- اضافه کردن مواد جاذب صدا بین عناصر دیوار مانع

۴- کیفیت کار با توجه دقیق برای حذف مسیرهای آزاد عبور هوا (با استفاده از پلاستر و رنگ).

ج- سقف و کف

انتقال صدای هوابرد همیشه یکی از ملاحظات طراحی سازه‌های سقف و کف می‌باشد و رویکردهای اساسی جداسازی مشابه رویکردهای مربوط به دیوارها می‌باشد. بااین‌حال مسئله کنترل انتقال صدای ضربه‌ای پیکری، معمولاً مشکل‌تر می‌باشد. به‌طوری‌که سازه‌های رایج مقاومت آکوستیکی کمی در برابر صدای ضربه‌ای مانند قدم برداشتن تأمین می‌نمایند؛ بنابراین در مواردی که حساسیت به ایجاد صدای ضربه‌ای وجود دارد، می‌بایست به طراحی توجه ویژه‌ای معطوف گردد.

برای اهداف طراحی و ارزیابی، چندین روش آزمایشگاهی به‌منظور ارزیابی عملکرد جداسازی آکوستیکی سیستم‌های سقف و کف گسترش‌یافته است. متداول‌ترین این روش‌ها، استفاده از یک دستگاه ضربه‌زن استاندارد می‌باشد که با استفاده از چکش‌های کوچک ضربات متوالی بر روی نمونه وارد می‌کند و با اندازه‌گیری ضربات انتقال‌یافته در آن‌سوی نمونه موردبررسی، یک امتیاز تک عددی بنام کلاس عایق ضربه (IIC[1]) محاسبه می‌شود. روش IIC مشابه روش تعیین STC می‌باشد. برای کسب جزئیات بیشتر می‌توان به روش استاندارد (ANSI/ASTM E492) مراجعه نمود. برای سیستم‌های سقف و کف باکیفیت بالا، مانند STC، IIC می‌بایست بالاتر از ۴۰ باشد.

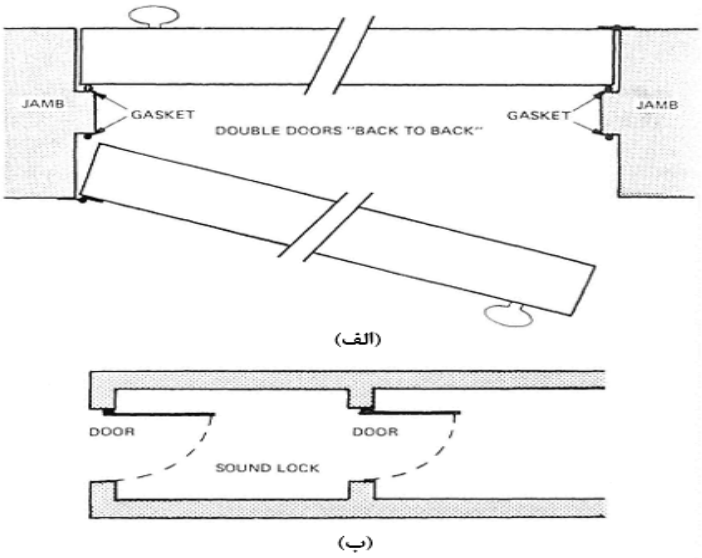
د- درب‌ها

درب و پنجره‌ها اغلب ضعیف‌ترین نقش را در جداسازی آکوستیکی ساختمان‌ها ایفا می‌کنند. به‌طور خاص استفاده از درب‌های دارای برش در قسمت پایین به‌منظور جابجایی هوا، قرار گرفتن فرش و ...، می‌تواند منجر به افت شدید در اثربخشی طراحی جداسازی آکوستیکی شود. با توجه به سازه درب، به‌طورکلی درب‌های با هسته جامد (تو پر) نسبت به درب‌های با هسته توخالی، موانع صدای بهتری می‌باشند. همچنین به عنوان یک روش عملی برای ارتقاء عملکرد آکوستیکی یک درب، می‌توان یک یا چندلایه ورق سربی در سطوح داخلی آن قرارداد. علاوه بر این، پر کردن حفره درب‌های توخالی با مواد جاذب، می‌تواند عملکرد جداسازی را بهبود ببخشد. با انجام این اقدامات، جداسازی صوت تا مقدار STC برابر با ۴۲ قابل‌افزایش می‌باشد.

[1] Impact Insulation Class (IIC)

اثربخشی درزگیری[1] درب‌ها، نگرانی اولیه برای تأمین یک جداسازی مناسب می‌باشد، بنابراین لازم است در هنگام نصب، از اشکال مختلف واشر[2] برای درزگیری چارچوب درب، پایه‌ها و ... استفاده شود. اگرچه درزگیری با استفاده از واشر می‌تواند در کاهش انتقال صدای پیکری نقش بسزایی داشته باشد.

در صورت نیاز به حداکثر جداسازی صدا، درب‌های دوبل پشت‌به‌پشت[3] با واشر، می‌تواند موردتوجه قرار گیرد (شکل ۳۵-الف). همچنین در صورت نیاز به جداسازی آکوستیکی بالا، رویکرد دیگر تحت عنوان قفل صدا[4] می‌تواند موردتوجه قرار گیرد (شکل ۳۵-ب).



شکل ۳۵. الف) درب های دوبل ، ب) قفل آکوستیکی

برای تأسیساتی که دارای ترازهای صدای بسیار بالایی میباشند.

لازم به ذکر است که درب‌های کشویی به دلیل عدم توانایی در ایجاد یک درزبندی آکوستیکی محکم، بندرت می‌توانند جداسازی اثربخشی را فراهم کنند.

ه- پنجره‌ها

[1] Seal
[2] Gasket
[3] Double Doors Back to Back
[4] Sound Lock

همانند درب‌ها، در مورد پنجره‌ها درزگیری آکوستیکی، دارای اهمیت زیادی می‌باشد و اقدامات مشابهی برای این منظور انجام می‌شود. میانگین کاهش صدا در یک‌لایه شیشه معمولی باضخامت یک‌چهارم اینچ، به‌ندرت به بیش از ۲۰ دسی‌بل می‌رسد. بااین‌حال، با اضافه کردن یک‌لایه دیگر و ایجاد فاصله ۲ تا ۳ اینچی بین دولایه، معمولاً کاهش صدا ۶ تا ۸ دسی‌بل افزایش می‌یابد. اگرچه امروزه برای دست‌یابی به افت انتقال بیشتر، فضای ایجادشده بین دولایه شیشه (در پنجره‌های دوجداره) را با گازهای بی‌اثر مختلف پر می‌کنند. همچنین هنگام استفاده از دولایه شیشه، بهتر است آن‌ها به‌صورت موازی نصب نشوند (بلکه دارای مقدار کمی انحراف باشند) تا ایجاد امواج ایستاده بین دولایه، به حداقل برسد.

و- خلاصه اصلاح جداسازی

جداسازی مؤثر صوت در ساختمان‌ها نیازمند توجه دقیق در جزئیات طراحی ساخت‌وساز می‌باشد. در اینجا به‌طور مختصر تنها رهنمودهای پایه طراحی ارائه‌شده است. بااین‌حال جنبه‌های مشترکی در همه ساختمان‌ها وجود دارد که برای اثربخشی جداسازی آکوستیکی می‌بایست موردتوجه قرار گیرد. برای مثال، قرارگیری پشت‌به‌پشت خروجی‌های الکتریکی یا کابینت/قفسه‌ها می‌تواند به‌طور کامل عملکرد آکوستیکی یک دیوار که به‌طور مناسب طراحی و ساخته‌شده است را از بین ببرد. علاوه بر این آرایش نادرست اتاق‌ها می‌تواند بر مشکلات جداسازی صدا بیافزاید.

۶-۳-۷-۳-تجهیزات مکانیکی

تجهیزات مکانیکی مرتبط با تهویه مطبوع، سرمایش، گرمایش و ... می‌توانند صدای هوابرد و همچنین صدای پیکری زیادی تولید کنند. به‌طوری‌که در بیشتر موارد، سروصدا در منبع ذاتی بوده و نمی‌تواند به میزان قابل‌توجه و کافی کاهش یابد؛ بنابراین اصلاح مسیر سروصدا، تنها رویکرد موجود برای کنترل آن می‌باشد.

منشأ سروصدای ناشی از یک اتاق مکانیکی، منابعی مانند موتورها، فن‌ها، پمپ‌ها و ... می‌باشند که در این راهنما به برخی از راهکارهای کنترل سروصدا در این منابع اشاره‌شده است. بدون تردید، کنترل سروصدا در سیستم‌های دارای حرکت هوا، نیازمند استفاده از سایلنسر، اصلاح کانال و کنترل سرعت جریان می‌باشد. همچنین کلیه تجهیزات چرخشی، لوله‌کشی و ... می‌بایست از جداسازی ارتعاشی کافی برخوردار باشند. در تأسیسات بزرگ مانند آپارتمان‌ها، بیمارستان‌ها، هتل‌ها و ساختمان‌های اداری، تجهیزات مکانیکی اغلب در یک اتاق جداگانه قرار می‌گیرند. در صورت امکان، یک مکان دور از نواحی حساس به صدا به این اتاق اختصاص داده می‌شود که زیرزمین

به دلایل روشن، بهترین و بعدازآن سقف مناسب‌ترین مکان می‌باشد، اگرچه مکان‌های در امتداد یک دیوار خارجی نیز مناسب می‌باشند.

منابع و مآخذ:

۱- حدود مجاز مواجهه شغلی مرکز سلامت محیط و کار وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی

2- Lewis H. Bell, Douglas H. Bell. Industrial noise control: fundamentals and applications. Second Ed, U.S.A. 1994.

3- Randall F. Barron, Industrial Noise Control and Acoustics. Louisiana Tech University Ruston, Louisiana, U.S.A. 2003.

4- SHELL Safety and Health Committee, Noise Guide. 1991.

5- OSHA’s Noise standard(29 CFR 1910.95)

6- ISO 17624:2004(EN),Acoustics Guidelines for noise control