

اهداف ویژه: دانشجو پس از گذراندن این درس قادر خواهد بود:

- کالبدشناسی و فیزیولوژی گوش و شنوایی را شرح دهد.
- کمیات مهم صدا از قبیل طول موج، فرکانس، پریود، سرعت صوت، فشار، توان و شدت صوت را توضیح و تعریف نماید.
- روابط مهم فیزیکی در میحث صوت و کاربرد آنها را بداند و تفسیر نماید.
- ردیف شنوایی و آستانه شنوایی و دردناکی را تعریف و بیان نماید.
- خواص فیزیکی و فیزیولوژیکی صدا را بداند و توضیح دهد.
- بلندی و تراز بلندی صدا را تعریف و کاربرد آنها را بداند
- روابط مهم کمیات لگاریتمی(تراز) صوت مانند تراز فشار، تراز شدت و تراز توان صوت را دانسته و کاربرد آنها را بیان نماید.
- جمع دسیبل ها یا جمع ترازهای صوتی را دانسته و روش های مختلف و نکات مهم در جمع ترازها و کاربرد آن را بداند و توضیح دهد
- تفاضل و تفریق دسیبل ها را دانسته و روش های مختلف و نکات مهم در تفاضل و تفریق دسیبل ها و کاربرد آن را بداند و توضیح دهد
- مفهوم میانگین و متوسط دسیبل ها را بیان، روش های مختلف انجام و کاربرد آن را توضیح دهد.
- انتشار صوت از منابع نقطه ای، خطی و سطحی در محیط و عوامل موثر بر آنرا توضیح دهد.
- انواع منابع صدا را نام ببرد و تفاوت آنها را بیان نماید
- دستگاه های مختلف اندازه گیری صدا در محیط کار را بشناسد و کاربرد آنها را بداند و آنها را توضیح دهد.
- راههای مختلف اندازه گیری و ارزشیابی صدا در محیط کار را فهرست و آنها را توضیح دهد.
- راههای عمومی کنترل صدا را در محیط کار بیان توضیح دهد.

گوش انسان شامل سه قسمت گوش خارجی<sup>۱</sup>، میانی<sup>۲</sup> و داخلی<sup>۳</sup> است. گوش خارجی متشکل از لاله گوش<sup>۴</sup> و مجرای شنوایی خارجی<sup>۵</sup> است. لاله گوش از غضروف، بافت ارتجاعی و پوست تشکیل شده است. مجرای شنوایی خارجی در پرده صماخ<sup>۶</sup> خاتمه یافته به عبارتی دیگر، پرده صماخ منفذ شنوایی خارجی را از گوش میانی جدا می‌سازد. نیمه بیرونی مجرای گوش<sup>۷</sup> از جنس غضروف و نیمه درونی آن از جنس استخوان است. ولی در شیرخواران کل مجرا حالت غضروفي دارد. در افراد بالغ طول مجرای شنوایی خارجی حدود ۲۴ میلی‌متر است. پرده صماخ از دو لایه اپی‌تلیومی سنگفرشی (لایه بیرونی) و مکعبی (لایه درونی) تشکیل شده است و همانند دیافراگم بلندگو به شکل مخروط است. در انسان لاله گوش نقش ناچیزی در افزایش حساسیت شنوایی دارد. بنابراین عدم وجود لاله گوش، با کاهش قابل توجه شنوایی همراه نیست. در حالی که مسدود شدن منفذ مجرای شنوایی خارجی تأثیر شدیدی بر شنوایی خارجی اعمال می‌نماید.

با توجه به اینکه زمان و شدت امواج صوتی دریافتی توسط گوش چپ و راست اندکی متفاوت می‌باشد بنابراین افراد طبیعی می‌توانند جهت صدا را تشخیص دهند. بنابراین یکی از مشکلات ناشنوایی یک طرفه<sup>۸</sup>، ناتوانی بیمار از تعیین محل منبع صوتی است. در صورتی که مجرای شنوایی یک فرد شنوایی طبیعی کاملاً مسدود شود کاهش حاصله در شنوایی عموماً بیش از ۴۰ دسیبل نخواهد بود. با این وجود فرد قادر است اصوات با بلندی کم و متوسط را بشنود.

زمانی که امواج صوتی از پردخ صماخ عبور می‌کنند بخشی از آن از طریق زنجیره استخوانچه‌ها وارد پنجره بیضی شکل و بخشی دیگر مستقیماً وارد پنجره گرد می‌شود و امواج صوتی وارده به پنجره بیضی نسبت به امواج وارده به پنجره گرد و سپس حلزون گوش بیشتر بوده و سهم بیشتری در عملکرد شنوایی دارا هستند. از هم گسیختگی استخوانچه‌ها باعث کاهش شدت شنوایی اصوات دریافتی خواهد شد.

گوش میانی یا حفره تمپانیک یک فضای مستطیل شکل است که توسط غشای مخاطی مفروش است قسمتی که مستقیماً در پشت پرده صماخ قرار دارد را مزوتمپان و قسمت بالایی پرده صماخ<sup>۹</sup> را اپی تمپان یا آتیک<sup>۱۰</sup> می‌نامند. بخش کوچکتری از گوش میانی که در زیر سطح دماغه<sup>۱۱</sup> و پنجره گرد<sup>۱۲</sup> قرار دارد بنام هیپوتمپان نام دارد. تمامی دیواره‌های گوش میانی بجز دیواره جانبی آن استخوانی هستند. گوش میانی سه استخوانچه به نام‌های چکشی<sup>۱۳</sup>، سندان<sup>۱۴</sup> و رکابی<sup>۱۵</sup> تشکیل شده است. دسته و زواید کوتاه استخوان چکشی در لایه‌های پردخ صماخ فرو می‌روند. سر استخوان چکشی با تنه استخوان سندان<sup>۱۶</sup> مفصل می‌شود. استخوان سندان<sup>۱۷</sup> دارای دو پایه بلند و کوتاه می‌باشد. دو عضله بنام عضله کشنده پرده<sup>۱۸</sup> و عضله رکابی<sup>۱۹</sup> به زنجیره استخوانچه‌های اتصال پیدا می‌کند. اعتقاد بر این است که عضله رکابی، گوش داخلی را در برابر صداهای بلند ناگهانی (از طریق جلوگیری از حرکات غیر طبیعی در پایه استخوان رکابی) محافظت می‌کند. شیبور استاش درست در بالای صفحه کف بیینی، گوش میانی را به دیواره جانبی فازوفارنکس مرتبط می‌سازد. عملکرد شیبور استاش فراهم آوردن معبری از فازوفارنکس به گوش است تا فشار در دو طرف پرده صماخ یکسان باشد. در صورتی که فشار مجرای گوش خارجی بیشتر از فشار گوش میانی باشد پرده گوش به قسمت داخل جابجا می‌شود و بالعکس.

<sup>۱</sup> Outer ear

<sup>۲</sup> Middle ear

<sup>۳</sup> Inner ear

<sup>۴</sup> Auricle

<sup>۵</sup> External auditory chanal

<sup>۶</sup> tympanic membrane

<sup>۷</sup> Ear canal

<sup>۸</sup> monaural

<sup>۹</sup> Drum

<sup>۱۰</sup> Attic

<sup>۱۱</sup> Promontory

<sup>۱۲</sup> round window

<sup>۱۳</sup> Hammer

<sup>۱۴</sup> Stirrup

<sup>۱۵</sup> Anvil

<sup>۱۶</sup> Tensor tympani muscle

<sup>۱۷</sup> stapedius muscle

انتقال فشار صوت از يك محیط گازی (هوا) به يك محیط مایع (مایع آندولنف) منجر به کاهش شدید انرژی خواهد شد. برای جلوگیری از این اتلاف انرژی، گوش میانی به عنوان يك مبدل مکانیکی عمل می‌کند و این مکانیسم با کمک دو سیستم اهرمی و نسبت هیدرولیکی جبران می‌شود. چون دسته استخوان چکشی مقداری بلندتر از زائده استخوان سندان است. بنابراین بخشی از اتلاف انرژی جبران می‌شود. بطوری که تنها ۳ دسیبل از ۳۰ دسیبل انرژی صوتی تلف شده در هنگام انتقال صوت به محیط مایع جبران می‌شود. ولی نقش مهمتر را نسبت سطح وسیع پرده صماخ به پایه استخوان رکابی ایفا می‌نماید. بطوری که این میزان حدود ۱۵ به ۱ است. بنابراین با این مکانیسم حدود ۲۷-۲۵ دسیبل از ۳۰ دسیبل تلف شده در هنگام عبور امواج صوتی از هوا به مایع جبران می‌نماید.

عضلات رکابی و کشنده پرده صماخ و گوش میانی نقش محافظت کننده در مقابل امواج صوتی طولانی مدت دارند. بطوری که تا ۱۰ دسیبل از این طریق کاهش شدت پیدا می‌کند. این امر گوش داخلی را در برابر صداهای شدید مثل اصوات بالای ۱۰۰ دسیبل محافظت می‌نماید. امواج صوتی که از طریق پرده صماخ و زنجیره استخوانچه‌ها به پنجره بیضی شکل منتقل می‌شوند با ارتعاش و تکان خوردن پایه استخوان رکابی در پنجره بیضی شکل، فشار صوت مستقیماً به پری لنف گوش داخلی منتقل می‌شود با جابجایی شدن پری لنف، غشای پایه‌ای تغییر شکل می‌یابد و موج ایجاد شده از قاعده حلزون به رأس حلزون<sup>۱</sup> پیش می‌رود. جابجایی غشای پایه‌ای موجب حرکت اندام کرتی و سلول‌های مودار می‌شود و در نتیجه يك حرکت برشی بین مژده‌های سلول‌های مودار<sup>۲</sup> و غشای تکتوریال موجود در روی آنها بوجود می‌آید. این حرکت سبب بوجود آمدن دپلاریزاسیون شده و این خود عصب حلزونی را فعال می‌کند. بنابراین انرژی مکانیکی حاصله از حرکت پایه استخوان رکابی تبدیل به يك ایمپالس الکتریکی می‌شود. سلول‌های مودار نسبت به عواملی مانند فقدان اکسیژن، مسمومیت دارویی و آسیب مکانیکی مانند تروماهای صوتی آسیب‌پذیر هستند.

### سر و صدا

صوت و صدا: تفاوت بین صوت و سر و صدا<sup>۳</sup> ذهنی<sup>۴</sup> است. صوت<sup>۵</sup> معمولاً به چیزهایی که خوشایند<sup>۶</sup> (موسیقی) و یا مفید<sup>۷</sup> (گفتگو) باشد، تلقی می‌شود در حالی که سر و صدا<sup>۸</sup> به چیزهای ناخوایسته<sup>۹</sup>، نامطلوب و ناخوشایند<sup>۱۰</sup> مانند صدای برش چوب و فلز، دستگاه تراش و ریسندهی و بافندگی و غیره گفته می‌شود.

### فیزیک صوت

صوت از ارتعاش سریع مکانیکی محیط‌های کشسان<sup>۱۱</sup> و اجسام (جامد و مایع و گاز) بوجود می‌آید. ایجاد صوت در هوا ناشی از کم و زیاد شدن متناوب فشار جوی است. وقتی يك جسم نوسان می‌کند ذرات محیط که در جهت پیشرفت جسم واقع شده‌اند به همدیگر نزدیک می‌شوند. در نتیجه سبب تراکم و ازدیاد فشار (بیش از فشار معمولی جو) در آن ناحیه می‌گردند. این ازدیاد فشار، ذرات اطراف جسم نوسان کننده را رانده و از آن دور می‌کند در اثر برخوردهای پی در پی ذرات متحرک به ذرات دیگر، فشار ایجاد شده بوسیله تراکم اولیه تا مسافت زیادی منتقل می‌شود. وقتی يك منطقه متراکم از جسم نوسان کننده دور می‌شود، جسم در جهت مخالف به حرکت در می‌آید و این بار سبب کاهش فشار (کمتر از فشار معمولی جو) و رقیق‌تر شدن شدت محیط می‌شود در اثر تغییر جهت حرکت نوسان کننده تراکم دیگری ایجاد می‌شود که ناحیه با فشار کم را به جلو می‌راند تکرار عمل فوق باعث انتشار و انتقال متناوب فشار و یا جابجایی ذرات در هوا و در نتیجه ایجاد صوت می‌گردد. تعداد تراکم و کاهش فشارهای متوالی (فرکانس صوت) برابر با تعداد نوسان منبع نوسان کننده است ولی دامنه این تغییرات فشار معمولاً با افزایش فاصله از منبع کاهش می‌یابد.

ارتعاشات صوتی از نوع ارتعاشات مکانیکی طول می‌باشد. ارتعاشات مکانیکی از تغییر مکان قسمتی از يك محیط کشسان نسبت به وضع عادی‌اش ناشی می‌شوند و این امر موجب نوسان آن قسمت حول وضعیت تعادل می‌شود. به علت خاصیت کشسانی محیط، این تغییر شکل یا آشفتگی از لایه‌ای به لایه دیگر منتقل می‌شود و به این ترتیب موج در محیط پیش می‌رود. در

<sup>۱</sup> Helicotrema

<sup>۲</sup> Hair cells

<sup>۳</sup> noise

<sup>۴</sup> subjective

<sup>۵</sup> sound

<sup>۶</sup> pleasant

<sup>۷</sup> useful

<sup>۸</sup> Noise

<sup>۹</sup> unwanted

<sup>۱۰</sup> unpleasent

<sup>۱۱</sup> Elastic

تأليف : دکتر ابوالفضل برخورداری

نتیجه تغییرات متناوب ایجاد شده در هوای داخل مجرای گوش، پرده گوش به ارتعاش درآمده و پس از طی مراحل، صوت احساس می شود بدیهی است این تغییرات نیز به نوبه خود توسط به ارتعاش درآمدن تارهای صوتی یا منبع صوتی دیگری بوجود می آید. معادله موج صوتی يك معادله نوسانی است. یعنی تغییر مکان ذره در زمان  $t$  از وضعیت تعادلش ( $x$ ) بصورت معادله نوسانی  $y = r \sin \omega t$  نشان داده می شود. ولی معمولاً در يك موج صوتی بجای تغییر مکان های واقعی ذرات حامل موج، تغییرات فشار موج را در نظر می گیرند. بنابراین معادله موج بجای اینکه برحسب تغییر مکان نوشته شود برحسب تغییر فشار نشان داده می شود:

$$P(t) = P_0 \sin(\omega t - \varphi) = P_0 \sin(\omega t - kx)$$

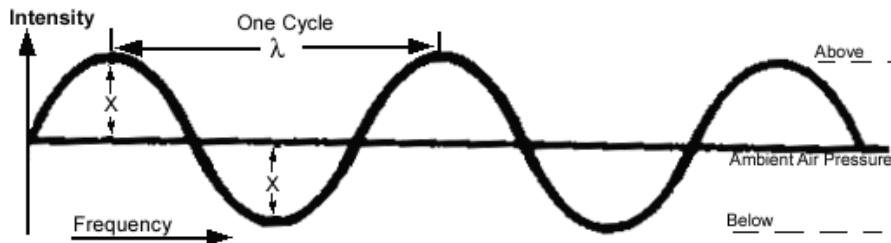
$P$  = دامنه فشار صوت برحسب نیوتن بر مترمربع یا پاسکال  
 $t$  = زمان برحسب ثانیه

$$\omega = \text{فرکانس زاویه ای برحسب رادیان بر ثانیه} \quad (\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f)$$

$$\varphi = \text{اختلاف فاز برحسب رادیان} \quad (\varphi = kx)$$

$$k = \text{ضریب انتشار یا عدد موجی برحسب رادیان بر متر} \quad (k = \frac{\varphi}{x})$$

معادله فوق را می توان به صورت شکل ۱ نشان داد:



شکل ۱

از نظر الگوی زمانی، صوت می تواند به صورتهای مختلف ذیل ایجاد شود :  
 ممتد: اصواتی هستند که برای مدت طولانی در يك سطح ثابت تولید می شوند مثل سرو صدای يك زنگ مداوم یا سرو صدای يك موتور

نوسانی: اصواتی که تغییرات نوسانی داشته باشند مثل سر و صدای ترافیک  
 متناوب: اصواتی که در فواصل ایجاد صدا قطع گردند مثل سرو صدای زنگ تلفن، بلند شدن هواپیما  
 ضربه ای: اصوات بلندی که به طور ناگهانی به گوش رسیده و بعد از آن هیچ صدای بی به گوش نرسد مثل صدای شلیک گلوله یا ضربه دستگاه پرس

مشخصات صوت یا صدا

اصوات ارتعاشات طولی هستند که با فرکانس، دامنه نوسان و فاز<sup>۱</sup> مشخص می شوند. فرکانس<sup>۲</sup> صوت عبارت است از تعداد سیکل های کامل انقباض (متراکم شدن) و انبساط مولکول های هوا در واحد زمان که توسط منبع صوت یا صدا تولید می شوند. واحد فرکانس صوت هرتز (Hz) می باشد و طبق تعریف عبارت است از تعداد سیکل های کامل که در مدت يك ثانیه اتفاق می افتد. همچنین می توان گفت که فرکانس تعداد دفعاتی است در ثانیه که پرده گوش نوسان می کند. صوت يك پدیده موجی پریودیک است که می تواند برحسب طول موج<sup>۳</sup> آن مشخص و شناسایی شود. طول موج يك صوت عبارت است از مسافت طی

<sup>۱</sup> phase

<sup>۲</sup> frequency

<sup>۳</sup> wave length

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

شده در يك سيكل كامل انقباض و انبساط مولكولهاي هوا. در شكل ۱ طول موج فاصله خطي بين مقادير قله يا پيك فشار<sup>۱</sup> مي باشد. از نظر رياضي<sup>۲</sup> طول موج در رابطه با فرکانس و سرعت انتشار موج<sup>۳</sup> مي باشد. در منحنی فوق فاصله بين دو ماكزيمم يا مينيمم فشار را طول موج  $\lambda$  مي نامند که واحد آن بر حسب متر مي باشد. بين فرکانس و طول موج رابطه  $C = f \cdot \lambda$  برقرار است. مدت زماني که لازم است تا يك پريود و نوسان کامل<sup>۴</sup> انجام شود دوره تناوب<sup>۵</sup> مي نامند واحد تناوب ثانيه و به صورت رابطه زیر بيان مي شود.

$$T = \frac{1}{f} S$$

دامنه نوسان يا ارتفاع موج، شدت نوسان را بر حسب ضعيف يا قوي بودن مشخص مي کند. صوت داراي سه خاصيت فيزيكي و فيزيولوژيكي مهم است. شدت، تواتر و شکل ارتعاشات از مهمترين خواص فيزيكي صوت مي باشند. اصوات را مي توان با اين سه صفت از يکديگر تشخيص و متمايز نمود. بلندي، ارتفاع و طنين از خواص فيزيولوژيكي صوت مي باشند. بايد توجه داشت که خواص فيزيولوژيكي ويژگي هايي هستند که گوش آنها را احساس مي کند و به ترتيب متناظر با خواص فيزيكي صوت يعني شدت، تواتر و شکل ارتعاشات مي باشند. شدت صوت يك کميت فيزيكي است که ارتباطي با حساسيت گوش ندارد ولي بلندي صوت کميتي است فيزيولوژيكي که هم به انرژي و هم به حساسيت گوش بستگي دارد. شدت صوت خود به چهار عامل زیر بستگي دارد:

- ۱- نسبت مستقيم با مجذور فرکانس
  - ۲- نسبت مستقيم با مجذور دامنه ارتعاشات
  - ۳- نسبت مستقيم با وزن مخصوص محيط ناقل<sup>۶</sup>
  - ۴- نسبت عكس مجذور فاصله منبع تا شنونده
- بين شدت صوت و شدت فيزيولوژيك صوت (احساس صوت يا بلندي) رابطه ساده و مشخصي وجود ندارد. ولي تجربه نشان مي دهد که هر دو در يك جهت تغيير مي کنند يعني با افزايش شدت فيزيكي صوت، احساس صوت نيز شدت مي يابد اصواتي که شدتشان يکسان ولي تواترشان مختلف است معمولاً با بلندي متفاوت احساس مي شوند. ارتفاع يك صوت<sup>۷</sup>، درک ذهني شنيداري از فرکانس آن صوت است که بستگي به فرکانس صوت، شکل موج، تعداد هارمونيك ها و تراز كلي فشار صوت دارد. در صورتي که دو صوت داراي ارتفاع و شدت يکساني باشند مي توان با استفاده از طنين صوت آنها را از يکديگر متمايز ساخت.

#### ردیف شنوایی

تمام ارتعاشات مکانیکی بوسیله گوش انسان قابل دریافت و درک نیست و باید دامنه و فرکانس آن در ناحیه معینی باشد، تا شنیده شوند. این ناحیه را ردیف شنوایی<sup>۸</sup> می نامند و در افراد مختلف نیز متغیر است و بستگی به سن، جنس، کاهش احتمالی شنوایی، شرایط فيزيولوژي و غيره دارد. گستره فرکانسي<sup>۹</sup> قابل شنیدن<sup>۱۰</sup> توسط گوش انسان بر حسب سن و کیفیت آن متغیر مي باشد و این گستره<sup>۱۱</sup> براي يك فرد جوان با شنوایی طبيعي حدود ۲۰ هرتز تا ۲۰۰۰۰ هرتز (در بعضی از کتب ۱۷ تا ۲۰۰۰۰) و بویژه ۴۰۰۰-۱۰۰۰ هرتز حساس مي باشد. فرکانس هاي مهمي که در مکالمه مفهوم است بين ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز قرار دارد. اصوات کمتر از ۲۰ هرتز را امواج مادون صوت<sup>۱۲</sup> و امواج بالاتر از ۲۰۰۰۰ هرتز را امواج ماوراء صوت<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> peak valves of pressure

<sup>۲</sup> mathematically

<sup>۳</sup> wave propagation speed

<sup>۴</sup> complete cycle

<sup>۵</sup> period

<sup>۶</sup> - محیطی که صوت در آن منتشر می شود کم و بیش انرژی صوتی را جذب می کند و آن قسمت از انرژی صوتی که جذب می شود به گرما تبدیل می شود محیط هایی که زیاد جاذب انرژی هستند عملاً صوت را خفه می کنند. توانایی جذب یک محیط برای امواج صوتی انتخابی است یعنی انرژی که در واحد زمان در ضخامت معینی از محیط مورد نظر جذب می شود بستگی به تواتر صوت دارد

<sup>۷</sup> pitch

<sup>۸</sup> Hearing loss

<sup>۹</sup> frequency range

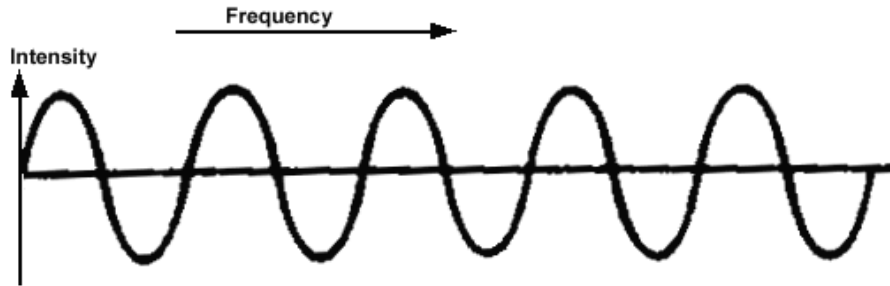
<sup>۱۰</sup> audible

<sup>۱۱</sup> audible spectrum

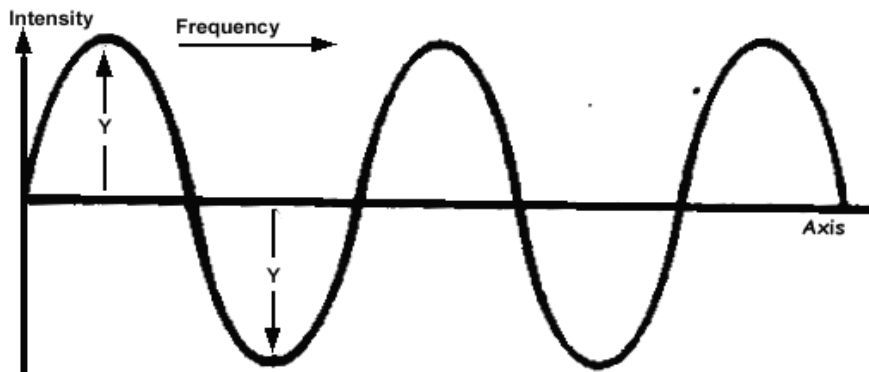
<sup>۱۲</sup> infrasonic waves

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

می‌نامند که این امواج توسط گوش انسان قابل شنیدن نمی‌باشند. گستره شنوایی بسیاری از حیوانات از انسان بیشتر است. برای مثال گوش خفاش دارای وسیع‌ترین رنج بوده و گستره آن حدود ۱۰۰۰۰۰ هرتز و یا بیشتر می‌باشد. همانطور که بیان شد ارتفاع صوت بستگی به فرکانس صوت دارد لذا هرچه فرکانس صوت بیشتر باشد نسبت به دیگری صدای آن زیر (شکل ۲) و در صورتی که فرکانس آن کمتر باشد صدای بم (شکل ۳) نامیده می‌شود. باید در نظر داشت که ارتفاع صوت یک کیفیت فیزیولوژیکی و احساسی است در صورتی که توانر یک کمیت فیزیکی است. لذا این دو یکی نیستند، ولی احساس ارتفاع با توانر بستگی دارد.



شکل ۲: صدا با فرکانس بالا (صدای زیر)



شکل ۳: صدا با فرکانس پایین (صدای بم)

صوت ممکن است از یک فرکانس منفرد<sup>۱</sup> مانند طنین یک دیپازون تشکیل شود و یا ترکیبی از فرکانس‌های مختلف باشد که از منبع صدا تولید شده است در این صورت صدا از یک سری فرکانس‌های مرتبط و نزدیک به هم بوجود می‌آیند که این سری می‌تواند به عنوان باند فرکانس<sup>۲</sup> توصیف شود. برای شناسایی هر باند فرکانسی خاص کافی است پایین ترین و بالاترین فرکانس موجود در گستره فرکانس را شناسایی نماییم.

#### سرعت صوت

یکی دیگر از کمیات در مطالعه صدا، سرعت صوت<sup>۴</sup> می‌باشد. سرعت صوت کمیتی ذاتی است و مربوط به عامل صوت می‌باشد. در مبحث سرعت معمولاً یکی سرعت مولکول‌ها و دیگری سرعت انتشار مطرح می‌شود. سرعت صوت در اجسام و محیط‌های مختلف متفاوت می‌باشد. بطور کلی سرعت صوت در اجسام جامد بیشتر از مایعات و در مایعات بیشتر از هوا و گاز می‌باشد. با توجه به اینکه ورود صوت به عضو شنوایی از طریق هوا می‌باشد لذا این محیط انتشار یعنی هوا از اهمیت خاصی برخوردار است. سرعت انتشار امواج صوتی را سلریته صوت<sup>۵</sup> می‌گویند و در بعضی از کتب تحت عنوان سرعت صوت آمده است. و مقدار آن به خواص محیط انتشار یعنی چگالی و الاستیسیته آن بستگی دارد. با توجه به رابطه ۲ ملاحظه می‌شود که سرعت به دما، فشار، جرم حجمی، جرم مولکولی، اتمیسیته و چگالی بستگی دارد و مستقل از فرکانس و دامنه فشار صوت

<sup>۱</sup> ultrasonic waves

<sup>۲</sup> single frequency

<sup>۳</sup> frequency Band

<sup>۴</sup> Spead of sound

<sup>۵</sup> Spead of sound= celerity

<sup>۶</sup> speed of sound

یا جابجایی امواج صوتی است. سرعت صوت در هر محیط مادی<sup>۱</sup> در درجه اول بستگی به خود محیط و در درجه دوم به درجه حرارت محیط ناقل دارد. در این قسمت جزییات بیشتری از تأثیر درجه حرارت بر روی سرعت موج صوتی<sup>۲</sup> در هوا و گازهای خروجی<sup>۳</sup> و رایج در توربین گازی<sup>۴</sup> بحث خواهد شد. سرعت صوت در محیط مایع از رابطه کلی موج بشرح ذیل تبعیت می‌کند. درجه کشسانی محیط توسط ضریبی مانند مدول کشسانی مشخص می‌شود.

$$C = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad m/s$$

بطوری که : B = ضریب الاستیسیته یا مدول الاستیکی کششی یا بالک<sup>۵</sup> و  $\rho$  = دانسیته یا چگالی محیط<sup>۶</sup> می باشد  
 سرعت انتشار امواج طولی از جمله صوت در یک محیط بستگی به خاصیت کشسانی (الاستیک) و چگالی (دانسیته) آن محیط دارد. در گازهای کامل خاصیت الاستیک بستگی به خواص ترمودینامیکی گاز (یعنی تغییرات فشار و حجم گاز با دما) در ناحیه‌ای که حرکت ارتعاشی منتشر می‌شود دارد سرعت صوت در گازهای کامل از رابطه زیر که به فرمول لاپلاس معروف است محاسبه می‌شود.

$$C = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}}$$

بطوری که : P = فشار گاز و  $\rho$  = جرم حجمی گاز و  $\gamma$  = نسبت ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت به ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت (نسبت حرارت مخصوص<sup>۷</sup> در فشار مخصوص<sup>۸</sup> به حرارت مخصوص در حجم مخصوص<sup>۹</sup>) می‌باشد. از نظر کیفی، مدول الاستیکی کششی یا بالک بیانگر میزان فشردگی و سختی و یا میزان صلب بودن مواد می‌باشد. بنابراین از رابطه<sup>۳</sup> به راحتی استنباط می‌شود که مواد سخت<sup>۱۰</sup> مانند استیل یا آب، صوت را سریعتر از هوا منتقل و هدایت<sup>۱۱</sup> می‌نمایند. در صورتی که محیط انتشار گاز کامل باشد با توجه به قوانین گاز کامل<sup>۱۲</sup> و انتقال حرارت آدیاباتیک، رابطه فوق ساده شده و برای اکثر گازها قابل استفاده می‌باشد.

$$C = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad m/s$$

بطوری که:

R = ثابت گاز<sup>۱۳</sup> و برابر با ۸۳۱۷ مترمربع. درجه کلون بر ثانیه ( $k/s$  مترمربع) یا ۸/۳۱۷ ژول بر مول. درجه کلون  
 $(mol \cdot k / \text{ژول})$ . و M = وزن مولکولی گاز برحسب گرم بر مول (برابر با  $۲۹ \times ۱۰^{-۳}$  کیلوگرم بر مول) و T = درجه حرارت برحسب درجه کلون

مقدار گاما برای گازهایی که اتمیسیته آنها یکی باشد (یعنی مولکولهای آنها دارای تعداد اتمهای مساوی هستند) مانند آرگن و نئون برابر ۱/۶۷، گازهای دو اتمی مانند اکسیژن، ازت برابر ۱/۴۴ و برای گازهای سه اتمی مانند  $CO_2$  و  $NO_2$  برابر با ۱/۳۳ می‌باشد. بنابراین سرعت صوت تقریباً مستقل<sup>۱۴</sup> از فشار هوای بیرونی<sup>۱۵</sup> ولی وابسته به ریشه دوم<sup>۱</sup> درجه حرارت مطلق دارد.

<sup>۱</sup> medium

<sup>۲</sup> wave velocity

<sup>۳</sup> exhaust gases

<sup>۴</sup> gas turbine

<sup>۵</sup> elastic bulk modulus

<sup>۶</sup> density

<sup>۷</sup> Specific heat

<sup>۸</sup> Specific pressure

<sup>۹</sup> Specific volume

<sup>۱۰</sup> hard materials

<sup>۱۱</sup> Conduct

<sup>۱۲</sup> ideal gas laws

<sup>۱۳</sup> gas constant

<sup>۱۴</sup> independent

<sup>۱۵</sup> ambient pressure

دارد. همانطوری که از فرمول فوق مشخص است سرعت صوت در گازها بستگی به دما (T)، جرم مولکولی، جرم حجمی گاز و اثر اتمیسیته گاز دارد. به طوری که سرعت صوت در یک گاز نسبت معکوس با جذر جرم مولکولی گاز دارد بنابراین هر چه گاز سبکتر باشد سرعت صوت در آن بیشتر است. در رابطه با تأثیر اتمیسیته گاز باید گفت که هر چه اتمیسیته گاز بیشتر باشد سرعت صوت نیز بیشتر است. سرعت صوت در مایعات و جامدات معمولاً بیشتر از سرعت صوت در گازها است. جدول شماره ۱ سرعت صوت در اجسام مختلف از جمله چند گاز و مایع و جامد را نشان می‌دهد.

رابطه  $C = \lambda \cdot f$  یکی از روابط بنیادی مربوط به اکوستیک می‌باشد در این رابطه سرعت صوت بر حسب متر بر ثانیه (در سیستم متریک) و یا فوت بر ثانیه (در سیستم انگلیسی) می‌باشد.

$$C = \lambda_m \cdot f \quad m/s$$

$$C = \lambda_{(ft)} \cdot f \quad ft/s$$

سرعت بر حسب متر بر ثانیه	نوع ماده
۲۵۸	CO <sub>۲</sub>
۱۲۶۹	H <sub>۲</sub>
۱۴۳۵	آب در دمای معمولی
۱۲۱۳	الکل
۱۱۶۶	بنزین
۵۱۰۴	آلومینیم
۵۱۳۰	آهن
۵۵۰۰	شیشه
۳۵۶۰	مس
۴۹۷۳	نیکل

جدول شماره ۱: سرعت صوت در مایعات و جامدات و گازهای مختلف

با توجه به اینکه سروکار ما عمدتاً با هوا در فشار اتمسفریک<sup>۲</sup> می‌باشد بنابراین سرعت صوت در یک گاز معین با جذر دمای مطلق گاز متناسب است بطوری که سرعت صوت را می‌توان از رابطه زیر حساب نمود.

$$v = v_0 + 0.61T$$

$$v = 331 + 0.61T$$

$v$  = سرعت بر حسب متر بر ثانیه و  $T$  = دما بر حسب درجه سانتیگراد

این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش هر یک درجه سانتیگراد، سرعت صوت در هوا تقریباً ۰/۶۱ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. روابط ذیل سرعت صوت را بر حسب درجه رانکلین (R) و کلوین (T) نشان می‌دهد

$$C = 49.03\sqrt{R} \quad ft/s \quad R = 459.7 + F$$

$$C = 20.05\sqrt{T} \quad m/s \quad T = 273.2 + C$$

مثال: سرعت صوت در هوا با درجه حرارت ۱۰۰۰ درجه فارنهایت چقدر است؟  
با توجه به رابطه ..... سرعت صوت برابر است با ۱۸۷۳ فوت بر ثانیه است.

$$C = 49.03\sqrt{459.7 + 1000} \quad ft/s$$

$$= 1873C$$

مثال: سرعت صوت در هوای صفر درجه سانتیگراد چقدر است؟  
با جایگزینی  $\gamma = 1/40$  و  $M = 29$  گرم بر مول ( $29 \times 10^{-3}$  کیلوگرم بر مول) به رابطه زیر می‌رسیم.

$$v = \sqrt{\frac{1.40 \times 8.314 \times 273}{29 \times 10^{-3}}}$$

مثال: در صورتی که دمای هوای محیط ۷۰ درجه فارنهایت (۲۱/۱ درجه سانتیگراد) باشد طول موج صوت را در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز در درجه حرارت فوق محاسبه نمایید.

<sup>۱</sup> square root

<sup>۲</sup> atmospheric pressure



تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

$$C = 49.03\sqrt{459.7 + 70}$$

$$C = 49.03\sqrt{529.7}$$

$$C = 1128 \frac{ft}{s}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1128}{1000} = 1.128 ft$$

$$C = 20.05\sqrt{237.2 + 21.1}$$

$$C = 20.05\sqrt{294.3} = 344 m/s$$

$$\lambda = \frac{344}{1000} = 0.344 m$$

مثال: در صورتی که سرعت صوت در استیل برابر با ۱۷۰۰۰ فوت بر ثانیه (۵۱۸۲ متر بر ثانیه) باشد طول موج صوت در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز چقدر است؟ آنرا با هوا مقایسه کنید.

$$\lambda = \frac{17000}{1000} = 17 ft$$

$$\lambda = \frac{5182}{1000} = 5.182 m$$

$$\frac{\lambda(steel)}{\lambda(air)} = \frac{17 ft}{1.128} = 15.1$$

پس طول موج صوت در استیل ۱۵/۱ برابر هوا است.  
مثال: سرعت صوت در هوای ۲۰ درجه سانتیگراد چقدر است؟

$$v = 331 + 0.61 \times 20$$

متر بر ثانیه

$$v = 343$$

تمرین: سرعت صوت در گاز هیدروژن و ازت در دمای صفر درجه سانتیگراد چقدر است.

تمرین: سرعت صوت در گاز هیدروژن و ازت در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد به دست آورید؟ آنرا با سرعت صوت در گاز هیدروژن مقایسه نمایید. سرعت صوت در گازهای فوق با افزایش دما چه تغییری می‌یابد؟

تمرین: سرعت صوت را در دمای ۷۰ درجه فارنهایت (۲۱/۱ درجه سانتیگراد) در هر دو دستگاه متریک و انگلیسی محاسبه نمایید.

تمرین: سرعت صوت در دو گاز هیدروژن و اکسیژن را با یکدیگر مقایسه کنید.

امپدانس صوت

برای توضیح مشخصات محیط بخصوص از نظر خاصیت جذب و انتقال صوت امپدانس صوتی آن محیط را در نظر می‌گیرند امپدانس کمیتی است که مقاومت شاره یا محیط مادی را نسبت به انتشار موج صوتی نشان می‌دهد.

$$Z = \frac{P}{V}$$

$P$  = فشار صوت برحسب پاسکال،  $V$  = سرعت ذره برحسب متر بر ثانیه و  $Z$  = امپدانس صوتی برحسب MKS rays می‌باشد. در صورتی که موج صوتی در میدان آزاد منتشر شود  $Z$  برابر با  $\rho_0 C$  می‌باشد چون داریم:

$$V = \frac{P}{\rho_0 C}$$

$$Z = \frac{P}{P/\rho_0 C} = \rho_0 C$$

در این رابطه  $\rho = \rho_c$  چگالی محیط بر حسب کیلوگرم بر مترمربع و  $C = C_c$  سرعت صوت بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد.  
در هوا حاصل ضرب چگالی محیط در سرعت یعنی  $\rho c$  را امپدانس ویژه می‌نامند. امپدانس ویژه صوت در ۲۲ درجه سانتیگراد و فشار ۷۶۰ میلیمتر جیوه برابر MKS rayls ۴۰۷ است. واحد امپدانس در دستگاه CGS و MKS یکی است. منتهی در هر دستگاه باید MKS rayls یا CGS rayls مشخص شود. امپدانس صوت خاصیت محیط را نسبت به پذیرش یا عدم پذیرش صوت نشان می‌دهد. اگر امپدانس صوتی هوا ( $\rho_1 C_1$ ) با امپدانس صوتی محیط دوم ( $\rho_2 C_2$ ) خیلی تفاوت داشته باشد موج جذب نمی‌شود. بلکه منعکس می‌شود ولی اگر امپدانس صوتی دو محیط به یکدیگر نزدیک باشند موج جذب می‌شود. یعنی اگر  $\rho_1 C_1 = \rho_2 C_2$  باشد موج صوتی جذب می‌شود. برای کنترل صدا باید بازتابها را حذف نمود بر همین اساس باید از اجسامی استفاده نمود که مراحل جذب صورت گیرد.

### کمیات فیزیکی و لگاریتمی (تراز)

برای بیان اندازه‌گیری صوت معمولاً از کمیات فیزیکی (فشار، شدت و توان) و کمیات لگاریتمی یا تراز (مانند تراز فشار، تراز شدت و تراز توان صوت) استفاده می‌شود. باید توجه داشت که خواص فیزیولوژیکی (مانند بلندی، ارتفاع و طنین صوت) ویژگی‌هایی هستند که گوش انسان آنها را احساس می‌کند و از نظر فیزیکی به ترتیب مترادف با شدت، فرکانس و شکل ارتعاشات می‌باشند. شدت فیزیولوژیکی و یا به عبارتی بلندی صوت عاملی برای تمایز دو صوت از یکدیگر می‌باشد. جزییات بیشتر در قسمت مربوط به بلندی و تراز بلندی بحث خواهد شد. ارتفاع صوت بستگی به فرکانس صوت دارد. لذا ارتفاع صوت یک کیفیت فیزیولوژیکی و احساسی است در صورتی که فرکانس یک کمیت فیزیکی است. بنابراین فرکانس و ارتفاع یکی نیستند ولی احساس ارتفاع به توان بستگی دارد. در صورتی که دو صوت دارای ارتفاع و شدت یکسانی باشند می‌توان با ویژگی طنین آنها را متمایز ساخت. حال در این بخش جزییات بیشتری راجع به کمیات فیزیکی و تراز مورد بحث قرار خواهد گرفت.

### فشار صوت

یکی از کمیاتی که در مبحث صوت بیشتر در مورد صوت حائز اهمیت است فشار صوت<sup>۱</sup> است. وقتی که تعادل فشار به هم می‌خورد چون عامل برهم زننده، صوت بوده است لذا فشار بوجود آمده را فشار صوت می‌نامند. فشار صوت در هر نقطه، نیروی وارده بر واحد سطح بوسیله امواج صوتی می‌باشد. تغییرات فشار در محیطی که در آن تعادل فشار به هم خورده است را فشار صوت می‌نامند و مقدار آن جزیی است از فشار متعارف شاره. در هوا، فشار صوت ناشی از ازدیاد و کاهش متناوب فشار جوی است. واحد فشار صوت در سیستم متریک (MKS) پاسکال (Pa) یا نیوتن بر مترمربع ( $N/m^2$ ) و در سیستم انگلیسی (CGS) میکرو بار ( $\mu Bar$ ) یا دین بر سانتیمتر مربع ( $Dyne/cm^2$ ) می‌باشد.

$$1 \mu Bar = 1 dyne / cm^2$$

$$1 \mu Bar = 0.1 N / m^2$$

$$1 Bar = 10^5 N / m^2$$

$$1 N / m^2 = 10 \mu Bar$$

اصوات در محیط معمولاً دارای دامنه‌های فشار متغیر با زمان می‌باشند از این رو سه مقدار برای فشار صوت یعنی فشار میانگین<sup>۲</sup>، فشار ماکزیمم<sup>۳</sup> و فشار مؤثر<sup>۴</sup> پیشنهاد شده است. با توجه به تغییرات زیاد دامنه فشار صوت در زمان تداوم آن معمولاً در روابط مربوط به فشار صوت از فشار مؤثر استفاده می‌شود. از طرفی گوش انسان نیز لگاریتمی از مربعات فشار را درک می‌کند لذا از نظر فیزیولوژیکی مربعات فشار اهمیت دارد. در این حالت بر اساس انتگرال زمانی تغییرات فشار، می‌توان الگویی از ریشه مجموع مربعات فشار اندازه‌گیری شده را محاسبه نمود. بنابراین مقدار rms هر کمیت (مانند فشار صوت) مساوی با میانگین ریشه دوم مربعات همه مقادیر اندازه‌گیری شده آن کمیت می‌باشد. گرچه فشار میانگین (میانگین حسابی مقادیر لحظه‌ای فشار مطلق در طول زمان اندازه‌گیری یا زمان انتشار صوت) و بویژه فشار ماکزیمم یا پیک (حداکثر دامنه فشار در دوره اندازه‌گیری صوت) نیز ممکن است در ارزیابی‌ها مدنظر قرار گیرد. ارتباط بین فشار مؤثر و فشار ماکزیمم (در صورتی که کمان سینوسی ۴۵ درجه در نظر بگیریم) در رابطه زیر نشان داده شده است.

$$P_{rms} = \frac{P_{max}}{\sqrt{2}} = 0.707 P_{max}$$

<sup>۱</sup> sound pressure

<sup>۲</sup> average sound pressure

<sup>۳</sup> peak pressure

<sup>۴</sup> effective or root mean squar

$$P_{rms} = \frac{P_0}{\sqrt{2}} = 0.707P_0 \quad \text{و یا}$$

در این رابطه  $P_0$  همان فشار بیک یا ماکزیمم می باشد. این موضوع را می توان در رابطه زیر مشاهده نمود.

$$P_{rms}^2 = I \times \rho C = \frac{W}{4\pi r^2} \times \rho C$$

همانطور که بعداً در مبحث انتشار صوت<sup>۱</sup> اشاره خواهد شد. توان صوت و فشار صوت در ارتباط با یکدیگر خواهند بود. از طرفی فشار صوت به راحتی توسط دستگاه ساده ای قابل اندازه گیری است. در حالی که توان منبع صوتی بطور مستقیم قابل اندازه گیری نمی باشد.

از نظر دامنه فشار، حداکثر فشار صوت قابل تحمل حدود ۲۰۰ میکروبار است که به آن آستانه دردناکی<sup>۲</sup> می گویند. حداقل فشار صوت قابل درک حدود ۰/۰۰۰۲ میکروبار می باشد که آستانه شنوایی<sup>۳</sup> نام دارد. بنابراین می توان گفت که بین شدت صوت و ارتفاع فرکانس صوت ارتباطی وجود دارد. بطوری که برای یک فرکانس معین اگر شدت صوت از یک حد معین کمتر باشد آن صوت دیگر شنیده نمی شود و اگر شدت آن به حد بالایی برسد در گوش ناراحتی و درد ایجاد می کند و بالعکس چنانچه شدت صوت در حد معین ولی تعداد ارتعاش از حدودی کمتر یا بیشتر باشد شنیده نخواهد شد. آستانه شنوایی یا کمترین مقدار انرژی مکانیکی صوتی که بتواند احساس شنوایی کند در فرکانسهای مختلف متفاوت می باشد. بطوری که در فرکانسهای بالاتر و پایین تر از فرکانسهای مکالمه انرژی خیلی بیشتری لازم است تا گوش قادر به درک اصوات شود برای مثال گوش طبیعی برای شنیدن صوتی با فرکانس ۲۵۰ هرتز حداقل احتیاج به تراز فشار صوتی ۳۰ دسی بل دارد حال آنکه در فرکانس ۱۶۰۰۰ هرتز، تراز فشار صوتی موردنیاز ۴۵ دسی بل خواهد بود.

توان صوت

مقدار انرژی صوتی که در واحد زمان بوسیله منبع تولید می شود. توان صوتی<sup>۴</sup> منبع نامیده می شود. واحد توان وات (W) می باشد. توان صدا یکی از ویژگی های منبع صوت بوده و مستقل از محیط انتشار است. کمترین توان صوتی که می تواند گوش یک فرد جوان و سالم را تحریک نماید برابر ۱۰<sup>-۱۲</sup> وات است این میزان را توان رفرنس یا مبنا یا آستانه درک توان صوت می نامند. برای مثال توان صوت موقع نجوا کردن برابر با ۱۰<sup>-۷</sup> وات، مکالمه معمولی ۱۰<sup>-۵</sup> وات، فریاد زدن متوسط ۱۰<sup>-۳</sup> وات، بوق قطار ۱۰<sup>-۱</sup> وات، موتور هواپیما ۱۰ وات و موشک ۳ × ۱۰<sup>۷</sup> وات می باشد. معمولاً منبعی با توان ۱۰۰ وات، تراز فشار صوت بالاتری نسبت به منبع ۲۵ وات تولید می کند. فشار صوت وابسته به توان منبع صوتی می باشد و بسته به اینکه در چه فاصله ای از منبع صوتی قرار داشته باشیم مقدار آن متفاوت است. معمولاً گوش توان صوتی حداکثر ۱۰۰ وات را می تواند بدون احساس درد تحمل نماید.

شدت صوت

شدت صوت<sup>۵</sup> عبارت از مقدار انرژی صوتی که در واحد زمان از واحد سطحی که عمود بر امتداد انتشار امواج صوت است می گذرد. به عبارت دیگر، می توان گفت که شدت صوت برابر توان صوت منبعی است که از واحد سطح می گذرد. از نقطه نظر احساس صدا، شدت مقدار انرژی صوتی است که در واحد زمان به پرده گوش می رسد. حال هر چه شدت صوت بیشتر باشد احساس صدا نیز شدیدتر خواهد بود. واحد شدت صوت وات بر مترمربع (W/m<sup>۲</sup>) در دستگاه MKS و ارگ بر سانتیمتر مربع باشد (erg/cm<sup>۲</sup>) در دستگاه CGS<sup>۶</sup> می باشد. کمترین شدت صوتی که می تواند برای گوش انسان قابل درک باشد برابر با ۱۰<sup>-۱۲</sup> وات بر مترمربع یا ۱۰<sup>-۱۶</sup> وات بر سانتیمتر مربع می باشد. این میزان را شدت رفرنس یا مبنا یا آستانه درک شدت صوت می نامند. بیشترین شدت صوتی که گوش انسان قادر به تحمل آن می باشد برابر با ۱۰۰ وات بر مترمربع است. زمانی که امواج صوتی از جسم نوسان کننده (منبع صوت) دور می شود به حرکت خود ادامه داده تا بوسیله هوا یا اجسام جذب یا منعکس شوند. اگر مسئله جذب هوا نباشد تمام انرژی صوتی که بوسیله منبع ساطع می گردد از سطح بسته ای که منبع را کاملاً احاطه کرده می گذرد. این سطح را می توان یک کره فرضی هوا در نظر گرفت. مقدار انرژی که در واحد زمان از تمام سطح بسته می گذرد مساوی توان صوتی منبع و آن مقدار انرژی که در واحد زمان از سطحی معادل واحد می گذرد مساوی شدت

<sup>۱</sup> sound propagation

<sup>۲</sup> painful threshold

<sup>۳</sup> hearing threshold

<sup>۴</sup> sound power

<sup>۵</sup> sound intensity

<sup>۶</sup> - واحد شدت صوت در دستگاه CGS برابر است با erg/cm<sup>۲</sup>.s (ارگ بر سانتیمتر مربع. ثانیه)

صوت خواهد بود. شدت صوت در يك میدان آزاد<sup>۱</sup> که مانعی برای پیشرفت امواج صوتی در تمام جهات وجود ندارد<sup>۲</sup> در تمامی نقاط روی يك سطح که به فاصله مساوی از منبع قرار دارند یکسان است. در این حالت صوت در سطح يك فضای کروی منتشر می‌شود اگر شعاع کره<sup>۳</sup> را واحد در نظر بگیریم. در این صورت:

$$I = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{W}{12.57r^2}$$

در این رابطه S برابر با سطح کره  $4\pi r^2$  است و I شدت صدا که به فاصله تا منبع بستگی دارد (عکس مجذور فاصله).  
مثال: در صورتی که توان منبع صوتی برابر با ۲ وات باشد شدت صوت در فاصله ۱۰ و ۲۰ متری چقدر است؟

$$I = \frac{2}{12.5 \times (10)^2} = 0.0016 \quad (\text{وات بر مترمربع در فاصله ۱۰ متری})$$

$$I = \frac{2}{12.5 \times (20)^2} = 0.0004 \quad (\text{وات بر مترمربع در فاصله ۲۰ متری})$$

تمرین: در صورتی که توان منبع صوتی برابر با ۱۰۰۰ وات باشد شدت صوت در فاصله ۱۰ و ۲۰ متری چقدر است؟  
در يك فضای باز می‌توان گفت که شدت صوت با فشار صوت رابطه‌ای دارد به عبارتی در يك میدان آزاد برای امواج پیش‌رونده ثابت می‌شود که مقدار متوسط شدت صوت به صورت زیر است:

$$I_{ave} = \frac{P_{rms}^2}{\rho c} \quad \text{وات بر متر مربع } w/m^2$$

بطوری که  $P_{rms}$  فشار صوت مؤثر<sup>۴</sup> برحسب پاسکال. و  $\rho c$  امپدانس صوتی<sup>۵</sup> محیط ناقل صدا برحسب MKS Rayls است.  
 $W =$  توان صوتی منبع برحسب وات،  $I =$  شدت برحسب وات بر مترمربع و  $S =$  سطح بر حسب مترمربع می‌باشد.  
در صورتی که سطح به صورت کره باشد رابطه فوق را می‌توان به صورت شدت  $\times$  سطح = توان و یا رابطه زیر نوشت:

$$W = I \times S$$

$$W = I \times 4\pi r^2$$

$I =$  متوسط شدت صوت در نقطه‌ای به فاصله r (شعاع کره) از منبع صوتی با توان W.  
همانطور که در رابطه فوق مشخص است شدت صوت با توان صوتی منبع نسبت مستقیم و با فاصله نسبت عکس مجذور دارد.  
در حالت فوق با فرض نقطه‌ای بودن منبع صوت، توزیع انرژی صوتی در فضا یکنواخت است ولی در صنعت ما عملاً با منابع خطی سروکار داریم. در این صورت توزیع انرژی از منابع خطی بصورت استوانه خواهد بود. لذا شدت صوت برابر است با:

$$I = \frac{W}{2\pi r h}$$

در این حالت شدت صوت با فاصله نسبت عکس دارد. همچنین بین فشار مؤثر و شدت صوت رابطه‌ای برقرار است. یعنی در يك میدان آزاد برای امواج پیش‌رونده ثابت می‌شود که شدت متوسط صوت عبارت است از:

$$I = \frac{P_{rms}^2}{\rho c} = \frac{(0.707 P_{max})^2}{\rho c}$$

در این رابطه  $P_{rms} =$  فشار مؤثر صوت،  $\rho =$  چگالی هوا و  $c =$  سرعت صوت در هوا می‌باشد.

با توجه به روابط فوق، رابطه بین توان صوت يك منبع با شدت صوت و فشار صوت در يك نقطه معین بشرح زیر می‌باشد:

$$W = I \times S$$

$$W = \frac{P_{rms}^2}{\rho c} \times S$$

$$W = \frac{S}{\rho c} (0.707 P_{max}^2)$$

مثال: در صورتی که دامنه يك موج سینوسی برابر با ۱۰ پاسکال باشد شدت صوت چقدر است؟

<sup>۱</sup> Free field

<sup>۲</sup> free space

<sup>۳</sup> radius of sphere

<sup>۴</sup> root mean square

<sup>۵</sup> sound impedance

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

$$P_{rms} = \frac{P_0}{\sqrt{2}} = 0.707 P_0$$

$$P_{rms} = 0.707 \times 10$$

$$P_{rms} = 7.0 \quad \text{پاسکال}$$

از طرفی امپدانس صوتی هوا در سطح دریا<sup>۱</sup> و دمای ۲۲ درجه سانتیگراد برابر ۴۱۵ می‌باشد. بنابراین با جایگزینی مقادیر فوق در رابطه فوق داریم:

$$I = \frac{(7.07)^2}{415} = 0.120 \quad \text{وات بر متر مربع}$$

واحد اندازه‌گیری شدت صوت:

اساس مقیاس سنجش شدت فیزیکی صوت متکی بر قانون (وبر) و تطبیق آن بر کیفیت فیزیولوژیک شنوایی است. مطابق قانون وبر، شدت احساس برحسب تصاعد حسابی و شدت عامل محرک برحسب تصاعد هندسی تغییر می‌کند. به عبارت ریاضی شدت احساس فیزیولوژیک متناسب با لگاریتم شدت محرک تغییر می‌کند. اگر شدت فیزیولوژیک یک احساس را که بوسیله شدت محرک  $I_1$  تولید می‌شود با حرف  $S_1$  نمایش دهیم و شدت محرک را از  $I_1$  به  $I_2$  افزایش دهیم شدت احساس نیز به  $S_2$  افزایش می‌یابد. لذا می‌توان بین چهار کمیت فوق رابطه زیر را نشان داد:

$$S_2 - S_1 = K \log \frac{I_2}{I_1}$$

$K =$  ضریبی است که برحسب واحد سنجش تغییر می‌کند. اگر  $K = 1$  یعنی برابر واحد و لگاریتم اعشاری باشد فرمول با مینای واحدی بنام بل خواهد بود. شدت صفر این واحد را آستانه مطلق شنوایی می‌گویند که برابر با  $10^{-16}$  وات بر سانتیمتر مربع ( $W/cm^2$ ) انتخاب کرده‌اند به عبارتی صوتی که با شدت  $10^{-16}$  وات بر سانتیمتر مربع به گوش برسد احساس صفر می‌کند. حال اگر شدت احساس برابر یک بل باشد شدت انرژی ارتعاشی برابر با  $10^{-10}$  وات بر سانتیمتر مربع خواهد بود. چون  $S_1 = 1$  می‌باشد. بنابراین احساس صوت یک بل،  $10$  برابر احساس صفر خواهد بود. یعنی

$$I_2 = 10 \times 10^{-16} = 10^{-10} \quad W/cm^2$$

$$\log \frac{I_2}{I_1} = 1 \quad \text{و} \quad \frac{I_2}{I_1} = 10$$

تمرین: در صورتی که احساس صوت ۳ بل باشد شدت صوت را محاسبه نمایید.

$$\log \frac{I_2}{I_1} = 3 \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = 1000 \Rightarrow I_2 = I_1 \times 1000 = 10^{-13} W / Cm^2$$

با توجه به اینکه بل، واحد بزرگی برای سنجش شدت احساس صوت است لذا می‌توان برای انتخاب یک مقیاس مناسب و عملی برای اندازه‌گیری صوت دو مسئله زیر را مورد توجه قرار داد.

(۱) فشار صوتی ۲۰۰ میکروبار (حد دردناک) حدود یک میلیون برابر بزرگتر از کمترین فشار صوتی قابل درک یعنی  $0.0002$  میکروبار بوسیله گوش طبیعی است.

(۲) عکس‌العمل غیرخطی گوش نسبت به شدت صوت اعمال شده لگاریتمی است.

لذا با انتخاب واحدی بنام دسیبل هر دو شکل فوق حل می‌شود. بنابراین فرمول مذکور بصورت زیر خواهد بود:

$$S_2 - S_1 = 10 \log \frac{I_2}{I_1}$$

بنابراین اگر شدت فیزیکی صوت  $10$  برابر قویتر از آستانه مطلق باشد (یعنی اگر  $\frac{I_2}{I_1} = 10$  باشد) در این صورت شدت احساس صوت  $10$  دسیبل قویتر می‌شود.

$$S_2 - S_1 = 10 \log_{10} 10 = 10 \times 1 = 10dB$$

تمرین: اگر شدت فیزیکی صوت  $1000$  برابر قویتر از آستانه مطلق باشد شدت احساس صوت چقدر خواهد بود؟

$$S_2 - S_1 = 10 \log_{10} 1000 \Rightarrow S_2 - S_1 = 30dB$$

<sup>۱</sup> Sea level

تمرین: در صورتی که شدت احساس صوت ۱ دسیبل باشد شدت صوت چقدر است؟

$$S_2 - S_1 = 1\text{dB} \Rightarrow 10 \log_{10} x = 1 \Rightarrow x = 1.26$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{I_2}{10^{-16}} = 1.26 \Rightarrow I_2 = 1.26 \times 10^{-16} \text{ W / Cm}^2$$

بنابراین چنانچه شدت صوت ۱۰ برابر شود صوت به اندازه ۱ بل، شدیدتر به نظر می‌رسد. ۰/۱ بل را دسیبل می‌گویند. هر دسیبل نشانه آن است که شدت صوت ۱/۲۶ برابر بیشتر شده است. به عبارتی دیگر، چنانچه شدت صوت  $10^{-16} \times 1/26$  وات بر سانتیمتر مربع باشد، شدت احساس صوت یک دسیبل خواهد بود و این حداقل تغییرات در شدت صوت می‌باشد که گوش انسان قادر به درک آن است. بر اساس موارد فوق رابطه بین شدت صوت و شدت احساس صوت را می‌توان بصورت اشل زیر نمایش داد: دسیبل واحدی است بدون دیمانسیون است که معمولاً برای بیان خارج قسمت یک کمیت مورد اندازه‌گیری به کمیتی که به عنوان مبنا (reference) انتخاب می‌شود بکار می‌رود. بنابراین با بکار بردن دسیبل، مقیاس اندازه‌گیری فشرده شده و همچنین با مشخصات عکس‌العمل گوش مطابقت می‌کند. با استفاده از واحد دسیبل کمیات فیزیکی شدت، فشار و توان صوت به صورت تراز (Level) اندازه‌گیری و محاسبه می‌شود. کلمه تراز این مطلب را تأکید می‌کند که کمیت اندازه‌گیری شده بیش از کمیت انتخابی به عنوان مبنا است. بنابراین تراز هر کمیت اندازه‌گیری شده، تنها در صورتی مفهوم است که مبناي آن مشخص باشد.

#### تراز فشار صوت

همانطور که قبلاً بیان شد گوش انسان به دامنه بسیار وسیع انرژی صوتی یعنی از ۰/۰۰۰۰۲ میکروبار (۰/۰۰۰۰۲ پاسکال یا نیوتن بر مترمربع) تا ۲۰۰۰ میکروبار (۲۰۰ پاسکال یا نیوتن بر مترمربع) حساس است. بنابراین یک اشل لگاریتمی برای نمایش شدت صدا در نظر گرفته شده است. در این اشل لازم است که یک تراز مبنا به عنوان تراز فشار صوت<sup>۱</sup> در نظر گرفته شود. این تراز مبنا را ضعیف‌ترین صوتی انتخاب کرده‌اند که یک مرد جوان سالم می‌تواند بشنود. این تراز منطبق است بر تغییر فشاری مساوی ۰/۰۰۰۰۲ میکروبار (۰/۰۰۰۰۲ پاسکال یا نیوتن بر مترمربع) بر پرده گوش. یک بار مساوی است با فشار یک جو استاندارد (فشار جو در سطح دریا و دمای صفر درجه سانتیگراد که تقریباً معادل ۷۶ سانتیمتر جیوه است). طبق تعریف این فشار معادل با صفر دسیبل است. برای فشارهای دیگر می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود.

$$\text{تراز فشار صوت} = 20 \log \frac{P}{P_{ref}}$$

$$SPL_{(dB)} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}}$$

در این رابطه SPL برابر با تراز فشار صوت بر حسب دسیبل، P = مقدار فشار مؤثر اندازه‌گیری شده موردنظر بر حسب میکروبار یا پاسکال و P<sub>ref</sub> = فشار مبنا که برابر ۰/۰۰۰۰۲ میکروبار یا ۰/۰۰۰۰۲ پاسکال انتخاب می‌شود. همانطوری که در فرمول ملاحظه می‌شود یک فشار مبنا انتخاب گردیده است. فشار مبنا را ضعیف‌ترین صوتی انتخاب کرده‌اند که یک مرد جوان سالم می‌تواند بشنود این فشار منطبق است با تغییر فشاری مساوی ۰/۰۰۰۰۲ میکروبار در پرده گوش. طبق تعریف، این فشار معادل است با صفر دسیبل. در این اشل دسیبل طوری تعریف شده است که هر ۲۰ دسیبل افزایش در فشار، معادل است با ۱۰ برابر شدن تغییر فشار در پرده گوش به عبارتی اگر فشار صوت ده برابر شود تراز فشار صوت به اندازه ۲۰ دسیبل افزایش خواهد یافت.

تمرین: با توجه به رابطه فوق، تراز فشار صوت معادل با فشار را در محدوده فشار از ۰/۰۰۰۰۲ تا ۲۰۰ میکروبار محاسبه و در جدول زیر کامل نمایید. در صورتی که فشار صوت در هر دفعه ۱۰ برابر فشار صوت قبلی باشد با توجه به اطلاعات حاصله از دو ستون فشار صوت و تراز فشار صوت چه نتیجه‌ای می‌گیرید.

تراز فشار صوت (دسیبل)	فشار صوت (پاسکال یا نیوتن بر مترمربع)	فشار صوت (میکروبار)
۰	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۲
	۲۰۰	۲۰۰۰

<sup>۱</sup> - Sound pressure level

تمرین: در صورتی که فشار صوت ۲/۵، ۰/۳، ۰/۱ و ۲/۹۷ پاسکال باشد تراز فشار صوت آنها به ترتیب چقدر است؟

$$LP = 20 \log \frac{2.5}{2 \times 10^{-5}} = 20 \log 12.5 \times 10^4 = 20 \log 12.5 + \log 10^4 = 20 (1.096 + 4) = 101.9 \text{ dB}$$

$$LP = 20 \log \frac{0.3}{2 \times 10^{-5}}$$

ردیف فشار صوت از ۰/۰۰۰۲ تا ۲۰۰۰ میکروبار (معادل با صفر تا ۱۴۰ دسیبل) می‌باشد که به وسیله گوش قابل درک است. در این اشل، صفر دسیبل را در اصطلاح آستانه شنوایی<sup>۱</sup> می‌نامند و این تراز مترادف با یک تغییر فشار ۰/۰۰۰۲ میکروبار است از طرفی ۱۴۰ دسیبل را آستانه دردناکی<sup>۲</sup> می‌نامند و این زمانی است که احساس شنوایی عملاً دردناک می‌شود و احتمالاً ممکن است پارگی پرده گوش را به همراه داشته باشد. این تراز مترادف با یک تغییر فشار ۲۰۰۰ میکروبار می‌باشد. تمرین: در صورتی که فشار صوت ۲۰ میکرو بار باشد تراز فشار صوت را محاسبه نمایید.

$$SPL = 20 \log \frac{20}{0.0002} = 20 \log 10^5 \Rightarrow SPL = 20 \times 5 = 10 \text{ dB}$$

تمرین: در صورتی که فشار صوت برابر با فشار صوت آستانه باشد تراز فشار صوت چقدر است. حال چنانچه فشار صوت ۱۰<sup>۶</sup> برابر فشار آستانه باشد تراز فشار صوت چقدر است؟

تمرین: در صورتی که فشار صوت برابر با فشار آستانه باشد تراز فشار صوت چقدر است؟

$$SPL = 20 \log \frac{P}{P_0} = 20 \log 1 = 20 \times 0 = 0 \text{ dB}$$

تمرین: در صورتی که فشار صوت ۱۰، ۱۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰<sup>۶</sup> برابر فشار آستانه باشد تراز فشار صوت چقدر است؟

$$SPL(1) = 20 \log 10 = 20 \text{ dB}$$

$$SPL(2) = 20 \log 100 = 40 \text{ dB}$$

$$SPL(3) = 20 \log 1000 = 60 \text{ dB}$$

$$SPL(4) = 20 \log 106 = 120 \text{ dB}$$

تمرین: در صورتی که فشار صوت ۲۰ برابر فشار آستانه باشد. تراز فشار صوت چقدر است؟

$$SPL = 20 \log 20 = 20 \log 2 \times 10 = 20 (\log 2 + \log 10)$$

$$= 20 \times 0.3 + 20 \times 1 = 6 + 20 = 26 \text{ dB}$$

تراز شدت صوت

با توجه به طیف وسیع تغییرات در شدت صوت، می‌توان تراز شدت صوت<sup>۳</sup> طبق رابطه زیر تعریف نمود.

$$LI = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_{ref}} \right)$$

و در بعضی کتب به صورت  $SIL_{(dB)} = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{ref}}$  آمده است. در این رابطه SIL تراز شدت صوت بر حسب دسیبل، I = شدت صوت اندازه‌گیری شده بر حسب وات بر مترمربع و  $I_{ref}$  = شدت مبنا می‌باشد. شدت مبنا برابر ۱۰<sup>-۱۶</sup> وات بر سانتیمتر مربع انتخاب می‌شود که در مورد امواج تخت و کروی، در هوا و در فشار و دمای متعارفی منطبق بر فشار مبنا ۰/۰۰۰۲ میکروبار است.

تمرین: در صورتی که شدت صوت برابر با شدت آستانه باشد تراز شدت صوت چقدر است؟ حال چنانچه شدت صوت ۱۰<sup>۴</sup> برابر شدت آستانه باشد تراز شدت صوت چقدر است؟

تمرین: تراز شدت صوت را برای کلیه مقادیر شدت صدا از ۱۰<sup>-۱۶</sup> وات بر سانتیمتر مربع (۱۰<sup>-۱۲</sup> وات بر مترمربع) تا ۱۰<sup>-۲</sup> وات بر سانتیمتر مربع (۱۰<sup>۲</sup> وات بر مترمربع) را در جدول زیر (جدول شماره ۲) نشان دهید. در صورتی که شدت صوت در هر دفعه ۱۰ برابر شدت صوت قبلی باشد) با توجه به اطلاعات حاصله از دستون شدت و تراز شدت صوت چه نتیجه‌ای می‌گیرید.

<sup>۱</sup> hearing threshold

<sup>۲</sup> painful threshold

<sup>۳</sup> - Sound Intensity level

شدت صوت برحسب		شدت احساس صوت بر حسب دسیبل
وات $W/m^2$ بر مترمربع	وات $W/cm^2$ بر سانتیمتر مربع	
$10^{-12}$	$10^{-16}$	۰
$10^{-2}$	$10^{-2}$	۱۴۰

جدول شماره ۴: مقادیر شدت صدا و تراز شدت صوت معادل آن در محدوده آستانه شنوایی و دردناکی

مثال: در صورتی که شدت صوت ۱۰۰ برابر شدت آستانه باشد تراز شدت صوت چقدر است؟

مثال: در صورتی که شدت صوت ۱۰، ۱۰۰۰ و  $10^{12}$  برابر شدت آستانه باشد. تراز شدت چقدر است؟

$$SIL = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log 1000 = 10 \times 3 = 30dB$$

برای شدت ۱۰ برابر آستانه

$$SIL = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log 10 = 10 \times 1 = 10dB$$

برای شدت  $10^{12}$  برابر آستانه

$$SIL(2) = 10 \log_{10}^{12} = 10 \times 12 = 120dB$$

تمرین: در صورتی که شدت صوت دو برابر شدت آستانه باشد تراز شدت صوت چقدر است؟

تمرین: در صورتی که شدت صوت پنج برابر شدت آستانه باشد تراز شدت صوت چقدر است؟

تمرین: در صورتی که شدت صوت سه برابر شدت آستانه باشد تراز شدت صوت چقدر است؟

تراز توان صوت

با توجه به طیف وسیع تغییرات توان و به منظور فشرده نمودن این طیف، مهندسين اکوستيك يك اشل لگاریتمی<sup>۱</sup> ابداع نمودند بطوری که تراز توان صوت<sup>۲</sup> به شرح رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$Lw = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{W_{ref}} \right) \text{ دسیبل} \quad PWL_{(dB)} = 10 \log_{10} \frac{W}{W_{ref}}$$

در این رابطه  $PWL$  ( $L_w$ ) یا تراز توان صوت برحسب دسیبل،  $W$  = توان صوت اندازه گیری شده برحسب وات و  $W_{ref}$  = توان مبنا می‌باشد. توان مبنا برابر با  $10^{-12}$  وات در نظر گرفته شده است. از رابطه فوق می‌توان مقدار توان را بدست آورد:

$$W = W_{ref} \text{ anti log } \left( \frac{Lw}{10} \right) \quad W = W_{ref} \times 10^{\frac{Lw}{10}}$$

مثال: تراز توان صوت يك سیرن کوچک که توان صوت آن ۰/۱ وات است تعیین کنید.

$$Lw = 10 \log \frac{0.1}{10^{-12}} = 10 \log 10^{11} \quad Lw = 110dB$$

مثال: در صورتی که تراز توان صوت يك ماشین ۱۲۵ دسیبل باشد توان صوت ماشین را تعیین کنید.

$$W = 10^{-12} \times (10^{\frac{125}{10}}) = 3.2 \text{ وات}$$

<sup>۱</sup> logarithmic scale

<sup>۲</sup> Sound power level



تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

مثال: در صورتی که تراز فشار صوت منبعی با فرکانس ۴۴۰ هرتز و در فاصله ۱۰ متری برابر با ۵۴ دسیبل باشد به فرض توزیع کروی انرژی صوتی مطلوب است تراز توان صوت منبع. ضمناً تراز فشار صوت منبع در فاصله ۲۰ متری نیز محاسبه نمایید.

چون توان صوت مجهول است بنابراین طبق رابطه زیر داریم:

$$W = I \times 4\pi r^2$$

چون شدت صوت نیز مجهول است داریم:

$$I = \frac{P_{rm}^2}{\rho C}$$

از طرفی فشار صوت با توجه به تراز فشار صوت محاسبه می‌کنیم:

$$P_{rm} = \text{anti log} \left( \frac{Lp - 94}{20} \right)$$

$$P_{rm} = \text{anti log} \frac{54 - 94}{20} = \text{anti log}(-2) = 10^{-2}$$

فشار موثر (پاسکال)

$$I = \frac{(10^{-2})^2}{415} = 2.4 \times 10^{-7}$$

شدت منبع (وات بر مترمربع)

$$W = 2.4 \times 10^{-7} \times 2.5 \times (10)^2 = 30.16 \times 10^{-5}$$

توان منبع (وات)

$$L_w = 10 \log_{10} \frac{20.16 \times 10^{-5}}{10^{-12}} = 10 \log_{10}^{30.6} + 10 \log_{10} 10^7 = 14.8 + 70 = 84.8$$

حال تراز فشار صوت در فاصله ۲۰ متری برابر است با:

$$L_p = 20 \log_{10} P + 94$$

$$P_{rm} = \sqrt{\rho C I} = \sqrt{415 \times \frac{30.16 \times 10^{-5}}{12.5 \times (20)^2}} = \sqrt{415 \times 6 \times 10^{-8}} = 49.9 \times 10^{-4}$$

پاسکال

$$L_p = 20 \log_{10} (49.9 \times 10^{-4}) + 94$$

$$L_p = 48$$

تراز فشار صوت در فاصله ۲۰ متری بر حسب دسیبل

روابط بین توان، فشار، شدت صوت و تراز توان صوت می‌توان بشرح ذیل خلاصه نمود:

$$W = I \times 4\pi r^2$$

$$I = \frac{P_{rms}^2}{\rho C}$$

$$L_w = 10 \log W + 120 = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{rms}^2}{\rho C} \times 4\pi r^2 \right) + 120$$

$$P_{rms} = \text{anti log} \frac{Lp - 94}{20} = 10^{\frac{Lp - 94}{20}}$$

$$P_{rms} = \frac{P_0}{\sqrt{2}}$$

با توجه به تنوع منابع صدا در صنعت می‌توان توان صوت را در آنها برآورد نمود. عمده منابع صدای رایج در جدول زیر لیست شده اند. سایر منابع صدا مانند چکش‌های بادی (air hammers)، نوار نقاله (Conveyors)، اره، ماشین‌های جوشکاری (Welding machines)، Cranes، Lathes و غیره که عمدتاً بعنوان تجهیزات ساختمانی استفاده می‌شوند بعنوان منابع صدا تلقی نمی‌شوند.

جدول .....: انواع منابع صدا در محیط‌های صنعتی

نمونه	طبقه بندی منبع صدا
کوره	فرآیند احتراق
چکش و پانچ	فرآیند ....
موتور و ژنراتور	وسیله الکترومکانیک

تهویه، جت و هوای ورودی قطارهای دیزلی کانالها، لوله، والو کمپرسور، فن، پمپ شاف	جریان گاز اتصال فلز به فلز حرکت مایعات در داخل فضاها حرکت سطوح فلزی در تماس با مایعات قسمت چرخنده نامتعادل
-------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

برآورد توان صوت منبع الکتریکی و مکانیکی  
برای برآورد توان صوت منبع الکتریکی و مکانیکی می توان از رابطه زیر استفاده نمود

$$F_n = \frac{P}{P_m}$$

بطوریکه:

$P =$  توان صوت ماشین بر حسب وات

$P_m =$  توان ماشین بر حسب وات

$F_n =$  ضریب تبدیل توان صوت (بدون واحد)

ضریب تبدیل برای منابع رایج صوت در جدول زیر داده شده است. گر چه این روش ساده ترین و کم دقت ترین می باشد ولی زمانی که هیچ اطلاعی از منبع صوت نداشته باشیم می تواند مفید باشد.

فاکتور تبدیل $F_n$			منبع صدا
حد بالا	حد متوسط	حد پایین	
$1 \times 10^{-1}$	$5/3 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-7}$	کمپرسور هوا (۱۰۰-۱ اسب بخار)
$1/5 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^{-7}$	$1/5 \times 10^{-8}$	قطار دیزلی
$1 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-7}$	بلندگو
$2/5 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	موتورهای دیزلی
$3 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-8}$	موتورهای الکتریکی (۲۰۰ دور در دقیقه)
$5 \times 10^{-5}$	$1/4 \times 10^{-5}$	$3/5 \times 10^{-6}$	پمپ باد بیش از ۱۶۰۰ دور در دقیقه
$1/6 \times 10^{-5}$	$4/4 \times 10^{-6}$	$1/1 \times 10^{-6}$	پمپ با دور کمتر از ۱۶۰۰
$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	توربین های گازی

مثال: در صورتی که موتور الکتریکی ۱۰۰ اسب بخار با ۱۲۰۰ دور در دقیقه کار کند تراز توان صوت موتور را برای حالت متوسط تخمین بزنید.

جواب: با استفاده از جدول فوق  $F_n = 1 \times 10^{-7}$  می باشد. از طرفی ۱۰۰ اسب بخار برابر با  $746 \times 100$  یعنی ۷۴۶۰۰ وات می باشد. بنابراین

$$P = F_n \cdot P_m = 1 \times 10^{-7} \times 74600$$

$$P = 7.46 \times 10^{-3}$$

حال تراز توان صوت این موتور برابر است با:

$$L_w = 10 \log \frac{P}{P_{ref}} = 10 \log \frac{7.46 \times 10^{-3}}{10^{-12}} = 99 \text{ dB}$$

برای تخمین توان صوت منابع صوت مانند فن Fan یا دمنده Blower می توان از روش زیر استفاده نمود. گراهام روشی را بدین منظور برای فن های سانتریفوژی (Centrifugal) و محوری Axial پیشنهاد نمود. برآورد تراز توان صوت در چهار اکتاو باند ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ (در شرایط عملکرد واقعی) می توان بصورت رابطه زیر بیان نمود:

$$L_w = 10 \log F_r + 20 \log P_s + K_f$$

PS = فشار استاتیک بر حسب اینچ آب یا سانتیمتر آب

Kf = ثابت تراز توان صوت که عدد آن بر حسب نوع فن و سیستم واحد متفاوت است و می توان آن را از جدول بدست آورد.

Fr = میزان حجم هوا بر حسب فوت مکعب بر دقیقه یا متر مکعب بر ثانیه

فرکانس Blade passage frequency (Bf) را می توان از رابطه زیر بر حسب هرتز بدست آورد.

$$B_f = \frac{(N) \times (rpm)}{60}$$

نوع فن	Kf در سیستم انگلیسی	Kf در سیستم فریک
	۴۷	۷۲
	۵۹	۳۴
	۶۷	۴۲
	۷۷	۵۲

در صورتی که  $B_f$  محاسبه شده در محدوده ۴ فرکانس اکتاو باند ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ قرار نگیرد باید ۳ دسیبل به تراز توان صوت برآوردی اضافه نمود.

مثال: در صورتی فن سانتریفوژی ۳/۷ اسب بخار جریان هوایی برابر با ۶۰۰۰ فوت مکعب در دقیقه در فشار استاتیک ۱/۵ اینچ آب تولید کند و تعداد پره های فن ۵۰ و دور آن ۱۲۰۰ در دقیقه باشد مطلوب است:  
الف) فرکانس  $B_f$  ..... را محاسبه کنید.  
ب) تراز توان صوت فن را در فرکانس ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ برآورد نمایید.

$$B_f = \frac{N}{60} = \frac{50 \times 1200}{60} = 1000 \text{ Hz}$$

$$L_w = 10 \log F_r + 20 \log P_s + K_f$$

$$L_w = 10 \log 6000 + 20 \log 1.5 + 47$$

$$L_w = 75 \text{ dB}$$

مسئله: در صورتی که فن محودار لوله ای ۳ اسب بخار و با فشار استاتیکی ۳ سانتیمتر آب جریان هوایی معادل ۴ متر مکعب بر ثانیه جابجا نمایند و تعداد پره های آن ۴۰ و دور در دقیقه آن ۱۲۰۰ باشد مطلوب است:  
الف) فرکانس پره ها

ب) تراز توان صوت فن در فرکانس ۴ اکتاو ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز

برای تعیین و برآورد تراز توان صوت فن می توان از نمودارهای مربوط به هر فن برحسب مورد نیز استفاده نمود.

برای برآورد حداکثر تراز توان صوت فن های induced draft fan می توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$L_w = 10 \log hp + 10 \log P_s + K_{fd}$$

بطوریکه:

$Hp$  = توان فن برحسب اسب بخار (۷۵۰-۷۵۰۰ اسب بخار)

$P_s$  = فشار استاتیک برحسب اینچ آب (۸۰-۵۰ اینچ آب) یا سانتیمتر آب (۲۰۰-۱۲۵ سانتیمتر)

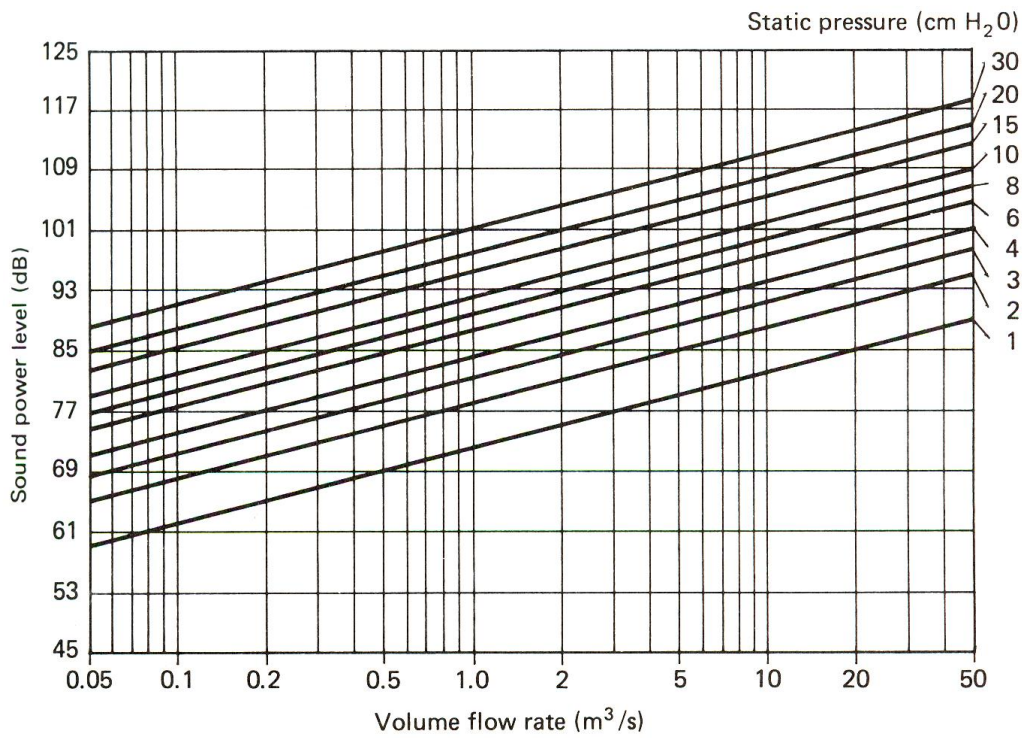
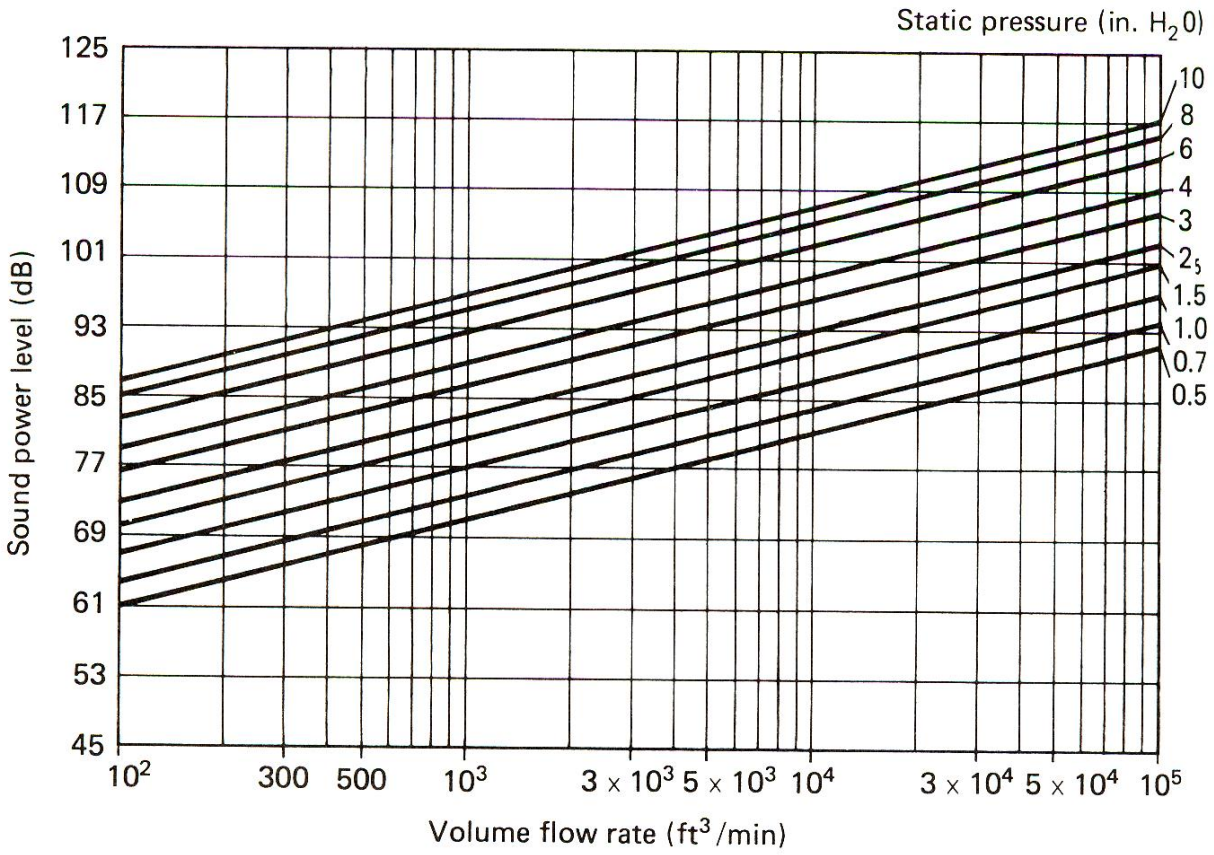
$K_{fd}$  = ثابت فن برای سیستم انگلیسی برابر با ۹۰ و سیستم فریک برابر با ۸۶ دسیبل می باشد.

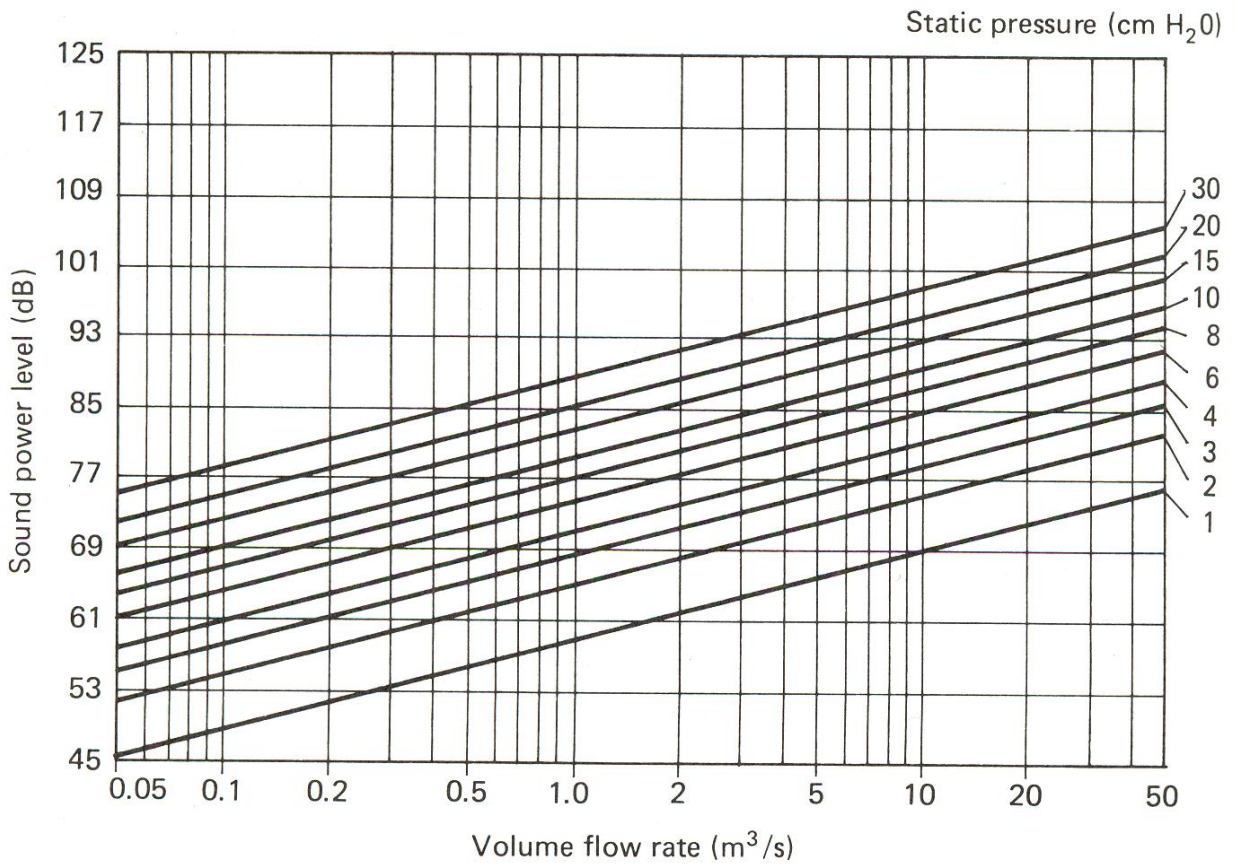
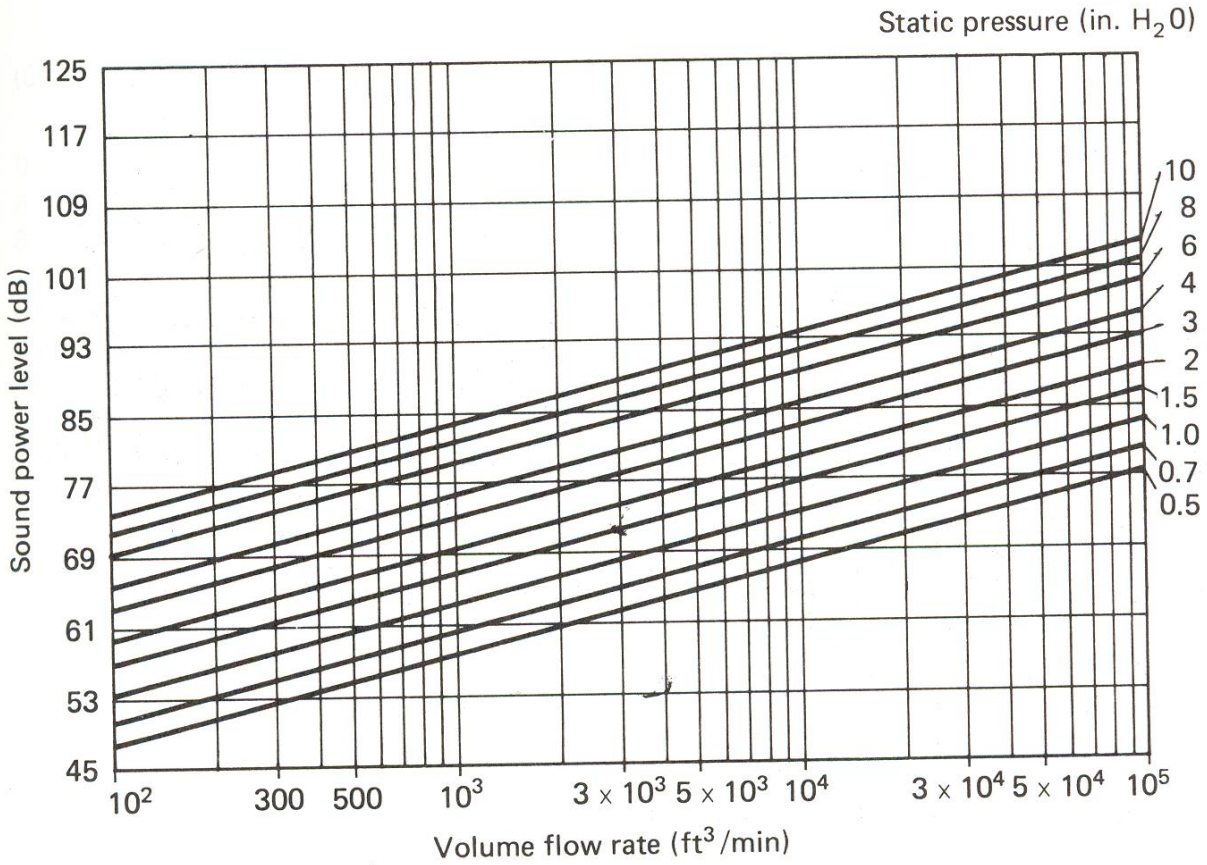
مثال: در صورتی که فن ..... ۱۲ پره با ۱۲۵۰ اسب بخار و دور در دقیقه و با فشار استاتیک ۶۵ اینچ آب حجم هوایی برابر با ۲۵۴۰ فوت مکعب در دقیقه جابجا نماید  $B_f$  و  $L_w$  را محاسبه نمایید.

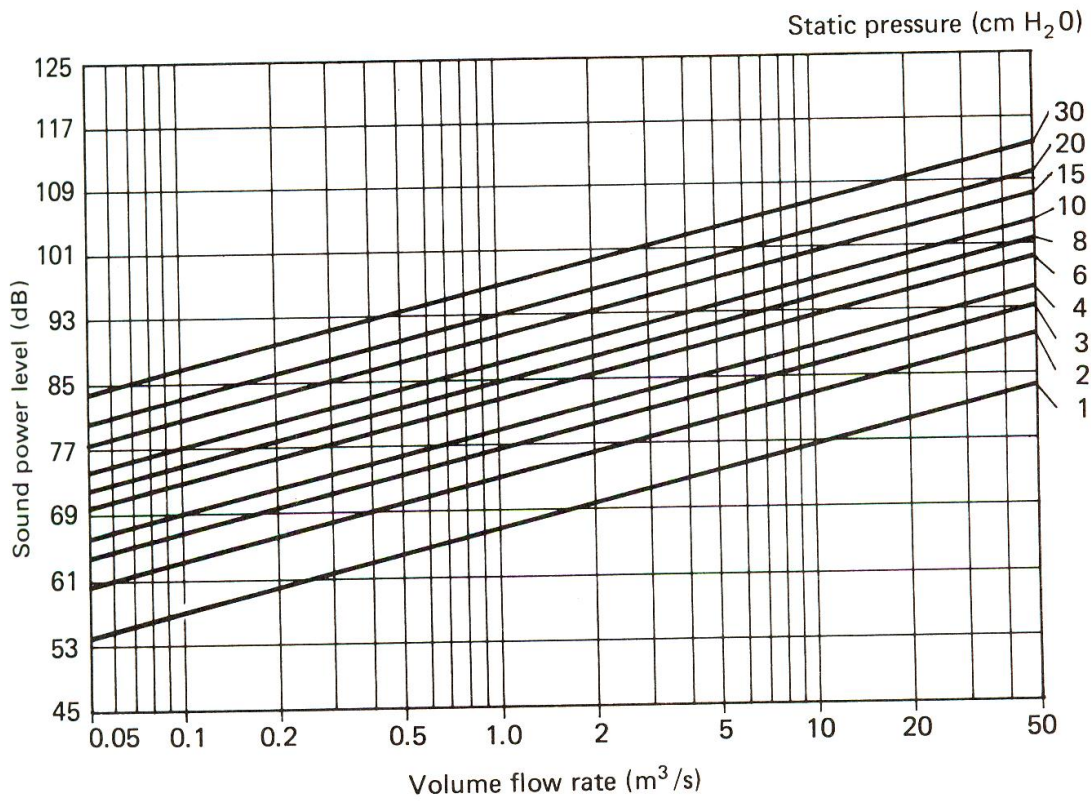
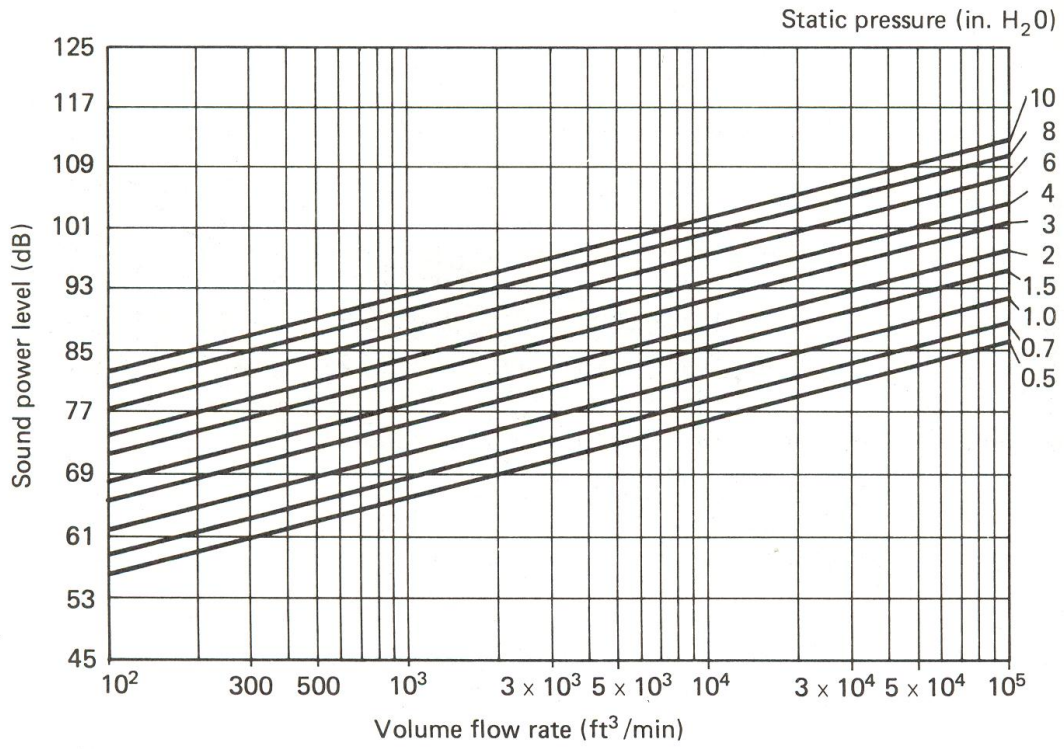
$$B_f = \frac{12 \times 1200}{60} = 240 \quad \text{هرتز}$$

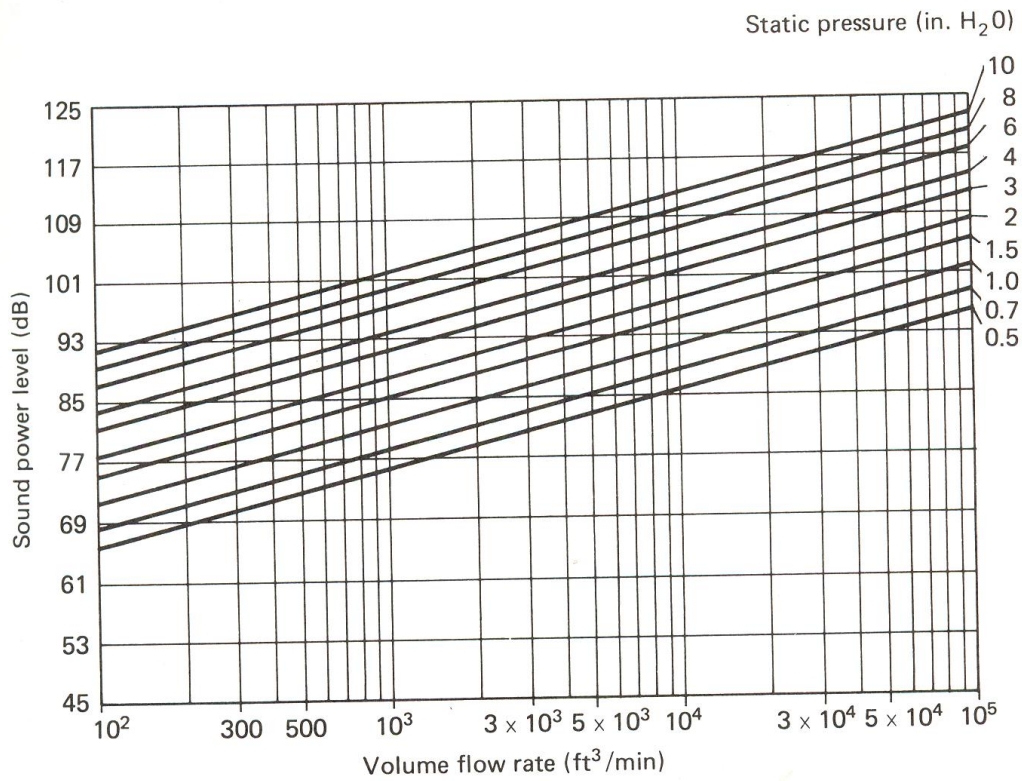
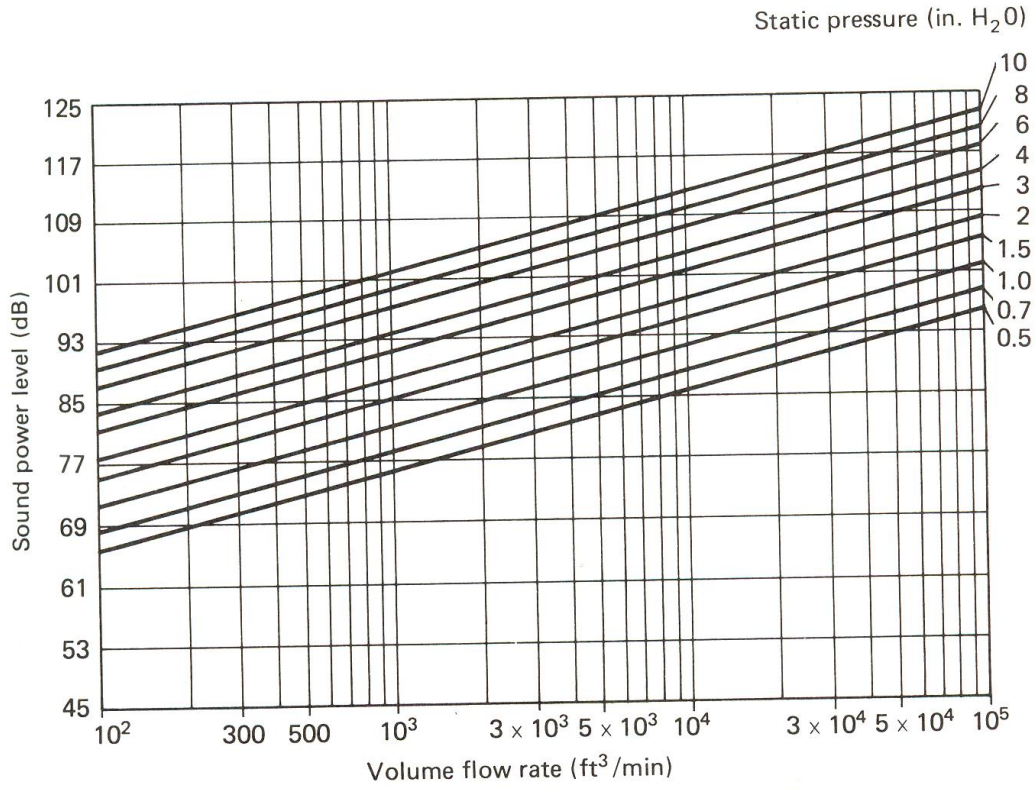
$$L_w = 10 \log 1250 + 10 \log 65 + 90 = 139 \quad \text{دسیبل}$$

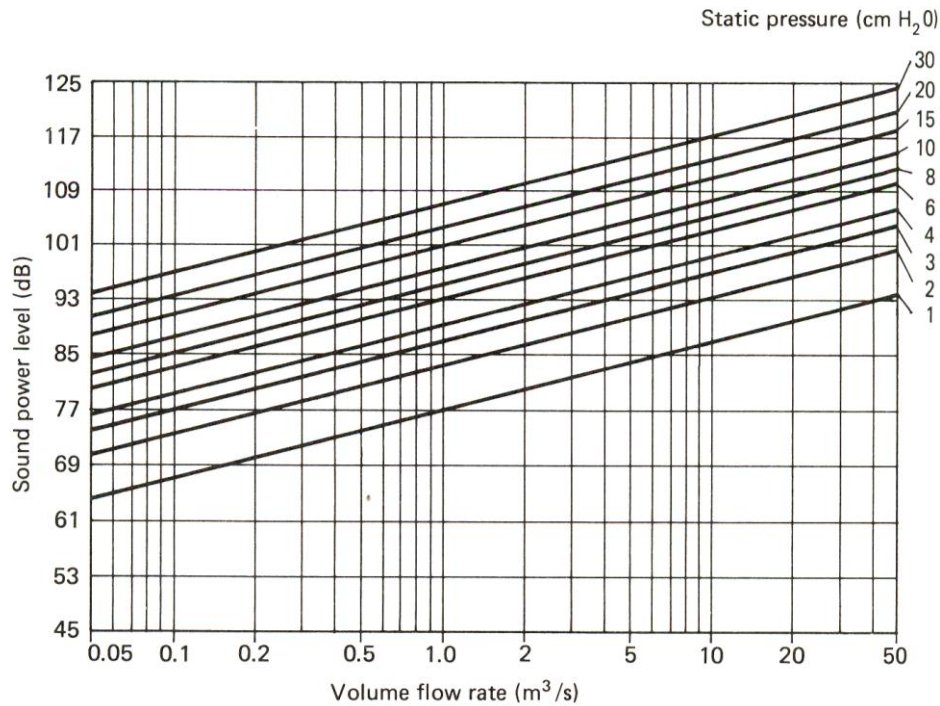
مسئله: در صورتی که فن ..... ۹ پره با ۱۵۰۰ اسب بخار و دور در دقیقه حجم هوایی برابر با ۵۰ متر مکعب در ثانیه با فشار استاتیک ۱۲۰ سانتیمتر آب جابجا نماید  $B_f$  و  $L_w$  را محاسبه نمایید.











#### برآورد تراز توان صوت موتورهای الکتریکی

منشاء صدا در موتورهای الکتریکی عوامل متعددی مانند پدیده عدم تعادل چرخشی rotational unbalance و واکنش ستاره - چرخش rotor-star interaction، فرکانس ارتعاش طبیعی ساختمان موتور، حرکت هوا و محفظه های مقاوم هوا می باشد. تقویت صدا عمدتاً ناشی از عملکرد سرعت، اندازه و توزیع فرکانس و ساختار (ساختار) می باشد. استانداردهای ملی و بین المللی برای نشر صدا noise emission از ماشین الکتریکی چرخنده مانند BS 4999, IEC 34-9, ISO-R 1680 پیشنهاد شده اند. برای برآورد تراز کلی توان صوت موتور الکتریکی در چهار اکتاو باند ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ هرتز می توان توسط رابطه زیر بدست آورد.

$$L_w = 20 \log h_p + 15 \log(rpm) + K_m$$

دسیبل

بطوریکه:

hp = قدرت موتور بر حسب اسب بخار (۳۰۰-۱ اسب بخار)

rpm = سرعت موتور (دور در دقیقه)

Km = ثابت موتور (۱۳ دسیبل)

مثال: موتور الکتریکی با قدرت ۱۰۰ اسب بخار با ۱۲۰۰ دور در دقیقه کار می کند. تراز توان صوت موتور را برای فرکانس ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ برآورد نمایید.

$$L_w = 20 \log 100 + 15 \log 1200 + 13 = 99$$

مسئله: در صورتی که قدرت و سرعت موتور الکتریکی به ترتیب ۳۰۰ اسب بخار و ۲۴۰۰ دور در دقیقه باشد تراز توان صوت موتور را برآورد نمایید.

#### Pump noise تخمین صدای پمپ

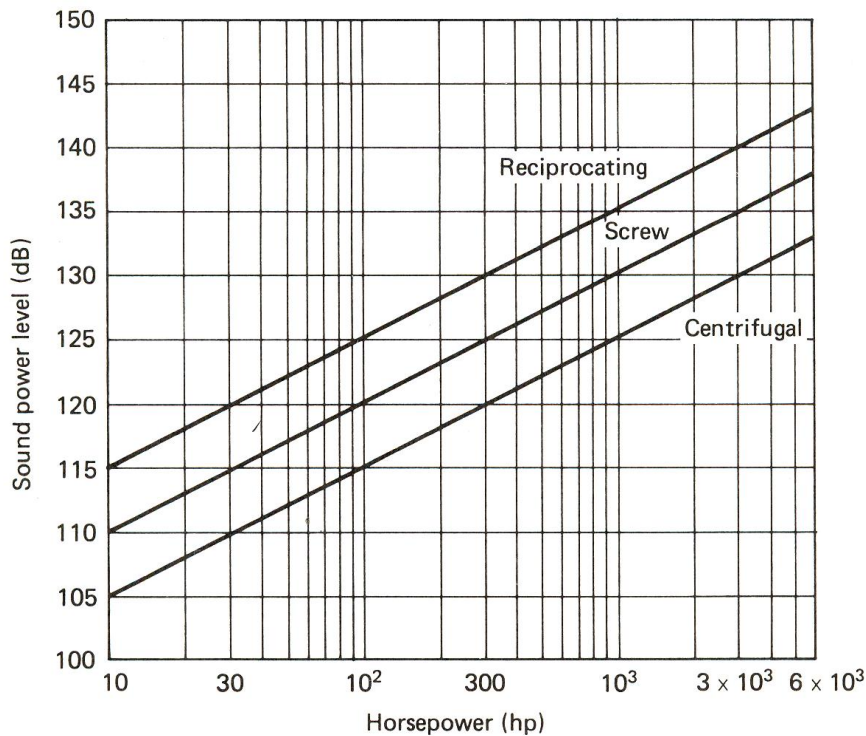
بطور کلی منشاء صدای پمپ منابع هیدرولیکی و مکانیکی hydraulic and mechanical sources از قبیل Cavitation، شناورهای فشاری در مایع (Pressure fluctuations in the fluids)، تماس قسمت های مکانیکی، عدم تعادل، مقاومت، misalignment و موارد مشابه می باشد. گر چه منابع هیدرولیکی اغلب تولید کننده های صدا می باشند. ولی عواملی چون عدم کارکرد در سرعت و فشار مورد نظر، میزان فشار بالا، فشار داخلی کمتر از جو و دما بالاتر از ۴۹ درجه سانتیگراد همگی می توانند صدای اضافی در پمپ ایجاد نمایند.



صدای تولیدی توسط پمپ ها معمولاً به دو صورت صدای discrete tones و صدای با باند پهن می باشد. برای برآورد تراز توان صوت پمپ در چهار اکتاو باند ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ می توان از رابطه زیر استفاده نمود.

$$L_w = 10 \log h_p + K_p$$

$K_p$  = ثابت پمپ بطوری که برای پمپ های سانتریفوژی ۹۰ دسیبل ، پمپ های مارپیچی screw ۱۰۰ دسیبل و پمپ های reciprocating برابر ۱۰۵ دسیبل می باشد. (در صورتی سرعت پمپ کمتر از ۱۶۰۰ دور در دقیقه باشد ۵ دسیبل از اعداد فوق کسر شود) براساس رابطه فوق می توان تراز توان صوت پمپ های سانتریفوژی و سایر را روی توان پمپ و با استفاده از نمودار های مربوطه تعیین نمود. برای برآورد تراز توان صوت در هر یک از چهار فرکانس ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰ و ۴۰۰۰ کافی است ۶ دسیبل از تراز توان صوت برآورد شده از رابطه فوق کسر نمود.



نمودار : نمودار تخمین تراز توان صوت پمپ های سانتریفوژی و مارپیچی با دور ۱۶۰۰ در دقیقه و بیشتر

مثال: پمپ پیچشی با قدرت ۱۰۰ اسب بخار با دور ۲۴۰۰ کار می کند. مطلوب است:

الف) برآورد تراز توان صوت در چهار اکتاو باند ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز

ب) برآورد تراز توان صوت در هر یک از فرکانس های ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰ و ۴۰۰۰ هرتز

حل:

الف) چون پمپ از نوع پیچشی می باشد بنابراین  $K_p = 100$  بنابراین داریم:

$$L_w = 10 \log h_p + K_p$$

$$L_w = 10 \log 100 + 100 = 120 \text{ dB}$$

برای برآورد تراز توان صوت در هر یک از چهار فرکانس باید ۶ دسیبل از تراز برآورد شده فوق کسر نمود یعنی:

$$L_{w0} = L_w - 6$$

$$L_{w0} = 120 - 6 = 114$$

مسئله: تراز توان صوت پمپ ..... با قدرت ۱۵۰ اسب و ۱۲۰۰ دور در دقیقه را در چهار فرکانس ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ و همچنین در هر یک از فرکانس ها برآورد نمایید.

برآورد صدای کمپرسور های بادی Air compressor

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

کمپرسورها با عنوان یکی از منابع مهم صدا در صنایع مختلف برای افزایش فشار گاز استفاده شده و معمولاً توسط توربین یا موتور راه اندازی می شوند. Diehi معتقد است که منبع اصلی صدا در کمپرسورهای بادی پرتابل موتور driving engine می باشد نه خود کمپرسور. از طرفی دومین عامل صدا در کمپرسورها فن خنک کننده می باشد. کمپرسورهای reciprocating عمدتاً صدای بسیار قوی با فرکانس پایین تولید می کنند گر چه خصوصیات صدا تابع سرعت و تعداد سیلندرها در کمپرسور می باشد در خصوص فن ها ، فرکانس عبور پره ها در بعضی از کمپرسور به عنوان عامل مهم فرکانس محسوب می شود. بطوری که در ماشین های نوع دیفیوزر که تحت عنوان blade-rate component نام دارند فرکانس عبور اهمیت اول را دارا است. برای تعیین این فرکانس از رابطه زیر استفاده می شود:

$$F_{BRC} = \frac{N_r \times N_s}{K_{BRC}} \times \frac{rpm}{60}$$

بطوری که :

$F_{BRC}$  = فرکانس عامل چرخش پره

$Nr$  = تعداد پره های چرخنده

$Ns$  = تعداد .....

$K_{BRC}$  = بزرگترین مضرب مشترک  $Nr$  و  $Ns$  (در صورتی که بزرگترین مضرب مشترک نتوان گرفت  $K_{BRC}$  برابر با ۱ خواهد بود)

مثال:  $F_{BRC}$  کمپرسور دیفیوزر با  $Nr = 8$  و  $Ns = 12$  که با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه کار می کند محاسبه نمایید.

$$F_{BRC} = \frac{8 \times 12}{4} \times \frac{6000}{60} = 2400 Hz$$

مثال: در صورتی که در مثال فوق  $Nr$  و  $Ns$  به ترتیب ۷ و ۱۲ باشد ،  $F_{BRC}$  چقدر است؟

$$F_{BRC} = \frac{7 \times 12}{1} \times \frac{6000}{60} = 8400 Hz$$

در این مثال مشاهده می شود که  $F_{BRC}$  خارج از فرکانس موردنظر قرار گرفته است در این صورت افزایش چند دسیبلی صدا را نسبت به تراز توان صوت در فرکانس اکتاوباند خواهیم داشت. برای برآورد تراز توان صوت در چهار اکتاو باند فرکانس ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ در کمپرسورهای سانتریفوزی و ..... می توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$L_w = 10 \log h_p + K_c$$

$K_c$  = ثابت کمپرسور بادی که برابر ۸۶ دسیبلی می باشد. (با قدرت ۱۰۰-۱ اسب)

برای برآورد تراز توان صوت در هر یک از فرکانس ها باید ۶ دسیبلی از  $L_w$  محاسبه شده کسر نمود.

همچنین می توان تراز توان صوت کمپرسورها را از روی نمودار زیر نیز بدست آورد.

نمودار برآورد تراز توان صوت کمپرسورهای بادی

مثال: در صورتی که کمپرسور بادی از نوع ..... با قدرت ۵۵ اسب داشته باشیم تراز توان صوت در فرکانس چهار اکتاو باند ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ و هر یک از فرکانس ها محاسبه نمایید.  
تراز توان صوت برای چهار فرکانس اکتاوباند عبارت است از:

$$L_w = 10 \log h_p + K_c$$

$$L_w = 10 \log 55 + 86 = 103$$

$$L_{w0} = L_w - 6$$

تراز توان صوت در هر یک از فرکانس ها باید ۶ دسیبلی از  $L_w$  محاسبه شده کسر نمود.

$$L_{w0} = 103 - 6 = 97 \text{ dB}$$

مسئله: برابر توان صوت را در چهار فرکانس اکتاو باند برای پمپ سانتریفوزی با قدرت ۴۰ اسب برآورد نمایید.

صدای تولیدی توسط تجهیزات ساختمانی

در بعضی مواقع لازم است تا تراز توان صوت تجهیزات ساختمانی را قبل خرید آن و یا انتخاب نوع آن تخمین زد. به همین ترتیب قبل از ساختمان سازی تخمین صدای تولیدی خوب و مناسب است. این امر با برآورد تراز توان صوت قطعات تجهیزات مورد استفاده عملی است به همین منظور لیست تجهیزات ساختمان (مانند کمپرسور هوا، برج خنک کننده، پمپ و ...) و ساختمان سازی مانند دستگاه سیمان ساز، لودر، تراکتور، گریدر و ... در جدول شماره ..... داده شده است. تراز توان صوت کلی ارائه شده در جدول برای چهار اکتاو باند ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ می باشد. لذا مقادیر ارائه شده می تواند مفید واقع شود.

جدول .....: برآورد تراز توان صوت تجهیزات مورد استفاده در ساختمان و ساختمان سازی

تراز توان صوت			تجهیزات
حد بالا	حد متوسط	حد پایین	
الف) تجهیزات ساختمان			
۱۱۵	۱۰۰	۸۵	۱- کمپرسور هوا
۱۰۰	۸۰	۶۵	۲- دیگ بخار
۱۰۵	۱۰۰	۹۰	۳- تقطیر هوا
۱۲۰	۱۱۰	۹۵	۴- برج خنک کننده
۱۰۵	۸۰	۵۵	۵- پمپ
ب) وسایل ساختمان سازی			
۱۲۵	۱۱۵	۱۱۰	۱- دستگاه سیمان مخلوط کن
۱۲۰	۱۱۵	۱۱۰	۲- پمپ سیمان

چون همانطور که در نمودار شبکه های وزنی A و B و C و پاسخ فرکانس ملاحظه می شود تراز صوت در شبکه A و تراز فشار صوت ترکیبی چهار فرکانس تقریباً نزدیک به هم می باشند. از طرفی با توجه به تراز توان صوت می توان میزان تراز فشار صوت را برآورد نماییم. در صورتی که انتشار صوت این تجهیزات بصورت آزاد و ضریب جهت یک فرض شود تراز فشار صوت در سیستم انگلیسی بصورت زیر خواهد بود.

$$L_p = L_w - 10 \log(4\pi r^2) + 10$$

همچنین در سیستم متریک تراز فشار صوت عبارت از رابطه زیر خواهد بود:

$$L_p = L_w - 10 \log 4\pi r^2$$

در روابط فوق، r فاصله از منبع برحسب فوت و متر به ترتیب خواهد بود. در جدول شماره ..... تراز صوت برحسب dBA در فاصله ۵۰ فوت از منبع برای بعضی از تجهیزات ساختمانی سازی آمده است (مقادیر داده شده برابر با مقادیر تراز فشار صوت محاسبه شده  $L_p$  می باشد) در صورتی که فاصله r در رابطه اول دو برابر یعنی ۱۰۰ فوت شود تراز فشار صوت به اندازه ۶ دسیبل کمتر خواهد شد.

جدول .....: تراز توان صوت تخمینی برای تجهیزات ساختمانی سازی در فضای باز

تراز صوت برحسب dBA و در فاصله ۵۰ فوت از منبع صوت			تجهیزات
حد بالا	حد متوسط	حد پایین	

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

مثال: تراز فشار صوت متوسط دستگاه Paver را در چهار اکتاو باند ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ در فاصله ۷۵ فوت از منبع را با فرض ضریب جهت یک ( $Q=1$ ) برآورد نمایید. در صورتی که فاصله از منبع دو برابر شود تراز فشار صوت چقدر است؟  
حل: تراز توان دستگاه در حد متوسط برابر با ۱۲۰ دسیبل می باشد. حال تراز فشار صوت برابر است با:

$$L_p = 120 - 10 \log[4\pi \times (75)^2] + 10$$

$$L_p = 82 - 6 = 75 \text{ dB}$$

مسئله: دستگاه مخلوط کن سیمان در حال کار کردن می باشد. تراز فشار صوت را برحسب dBA در فاصله ۲۰۰ فوتی از آن در چهار اکتاو باند ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ هرترز تخمین بزنید. (با فرض اینکه  $Q=1$  باشد)

صدای وسایل مورد استفاده در منزل

تراز توان صوت برای تعدادی از وسایل مورد استفاده در منزل در جدول ..... آمده است. مقادیر داده شده برای چهار اکتاو باند ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ هرترز می باشد. در اکثر موارد تراز صوت دستگاه برحسب dBA تقریباً معادل با تراز فشار صوت محاسبه شده  $L_p$  براساس تراز توان صوت تخمینی می باشد.

جدول .....: تراز توان صوت تخمینی بعضی از وسایل مورد استفاده در منزل

تراز توان صوت برحسب دسیبل			تجهیزات
حد بالا	حد متوسط	حد پایین	
۸۰	۷۰	۵۵	دستگاه تهویه مطبوع
۷۵	۷۰	۵۵	خشک کن لباس
۸۵	۷۰	۵۵	لباشویی
۸۵	۷۵	۶۰	ظرفشویی
۸۰	۷۰	۵۵	ریش تراش برقی
۸۰	۶۵	۴۵	فن

جمع دسیبل‌ها یا جمع ترازهای صوتی

در اکثر صنایع، ممکن است بیش از یک منبع صدا را وجود داشته باشد لذا صدا به علت منابع صوتی مختلف و یا در فرکانس‌های مختلف منتشر می‌شود. برای مثال در یک کارخانه بافندگی ممکن است ۵۰ دستگاه بافنده با تراز فشار یکسان (مثلاً هر دستگاه ۹۰ دسیبل) و یا حتی متفاوت وجود داشته باشد. بنابراین موج صوتی که به گوش کارگر می‌رسد. حاصل و نتیجه انتشار صوت ۵۰ دستگاه بافنده است. بنابراین زمانی که شما تراز صوت کلی را در هر ایستگاه اندازه‌گیری می‌کنید. این تراز نتیجه اثر فشار صوت ۵۰ دستگاه بافنده می‌باشد. ولی این به معنای جمع جبری ترازها به لحاظ ماهیت لگاریتمی صوت نمی‌باشد. بنابراین محاسبه تراز فشار صوت تجمعی<sup>۱</sup> و در بعضی موارد تراز توان صوت تجمعی ضروری است. با توجه به ماهیت لگاریتمی دسیبل، نمی‌توان جمع جبری<sup>۲</sup> برای ترازها انجام داد. برای مثال در صورتی که تراز فشار صوت دستگاهی ۷۰ دسیبل باشد و دستگاه مشابه دیگری با تراز فشار مشابه یعنی ۷۰ دسیبل روشن شود جمع تراز دو دستگاه برابر ۱۴۰ دسیبل نخواهد شد. چون این تراز تقریباً برابر تراز فشار صوت یک جت بو پی‌نگ ۷۴۷ در فاصله چند متری از آن می‌باشد. برای جمع ترازها<sup>۳</sup> می‌توان از سه روش محاسبه و روش نمودار و روش جدول استفاده نمود.

۱- روش محاسبه: با توجه به رابطه زیر داریم:

$$L_p = 10 \log \left( \frac{P}{P_{ref}} \right)^2$$

$$\left( \frac{P}{P_{ref}} \right)^2 = \text{anti log} \left( \frac{L_p}{10} \right) = 10^{\frac{L_p}{10}}$$

<sup>۱</sup> Cumulative sound pressure level

<sup>۲</sup> algebraically

<sup>۳</sup> Combining decibels

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

حال چنانچه تراز فشار صوت N دستگاه برابر با  $Lp_1, Lp_2, Lp_3, \dots$  و  $Lp_n$  باشد بنابراین جمع جبري کل میانگین مربعات برابر است با:

$$\frac{P_1^2 + P_2^2 + \dots + P_n^2}{P_{ref}^2} = \sum_{i=1}^n 10^{\left(\frac{Lp_i}{10}\right)}$$

بنابراین فرمول جمع ترازها و دسیبلها به شرح زیر می باشد:

$$LP_t = 10 \log \left[ \sum_{i=1}^n 10^{\frac{LP_i}{10}} \right] dB = 10 \log \left[ 10^{\frac{LP_1}{10}} + 10^{\frac{LP_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{LP_n}{10}} \right] \quad \text{دسیبل}$$

بطوري که :  $LP_t =$  تراز کلي فشار صوت برحسب دسیبل و  $Lp_i =$  تراز فشار صوت هر دستگاه یا تراز فشار صوت در يك فرکانس خاص دستگاه برحسب دسیبل می باشد

مثال: در صورتی تراز فشار صوت سه دستگاه به ترتیب ۹۰، ۹۵ و ۸۸ دسیبل باشد تراز فشار صوت کلي را تعیین کنید:

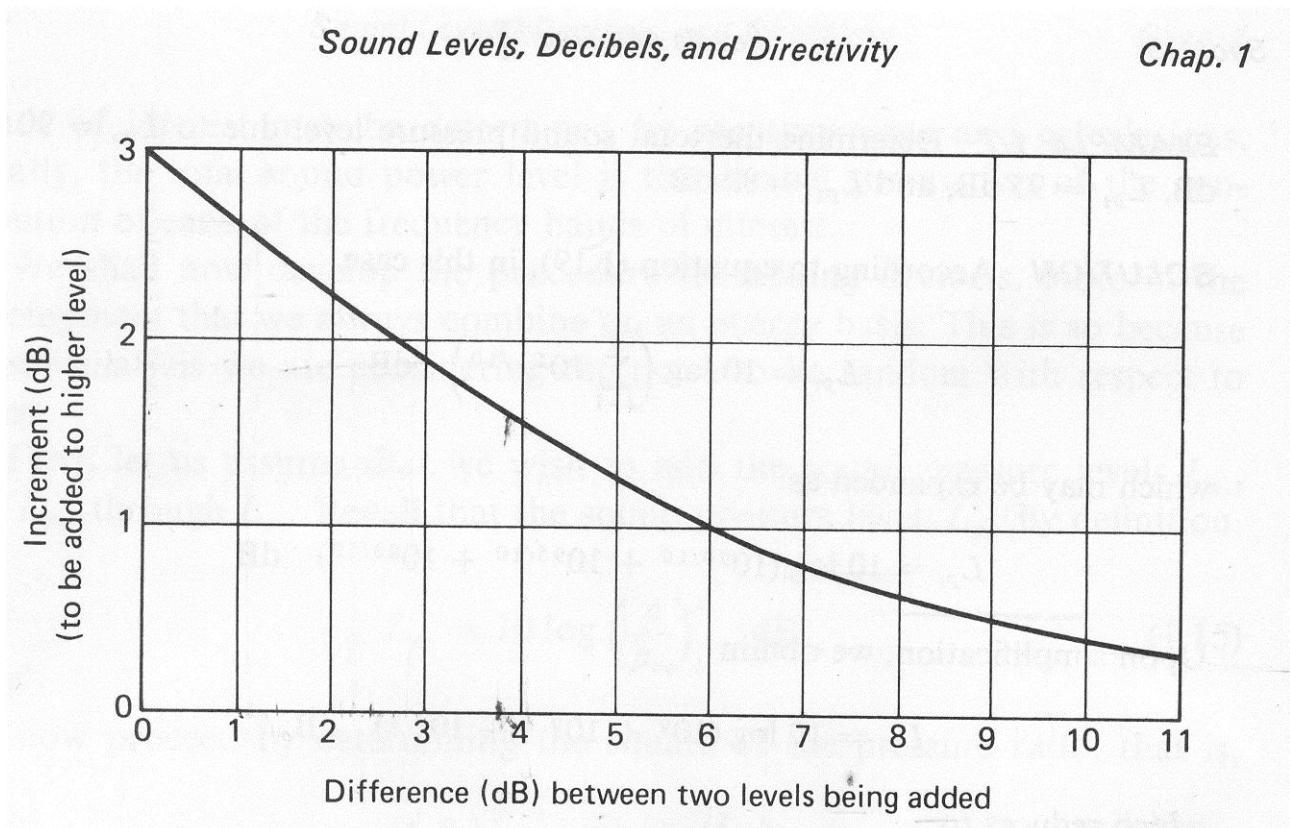
$$LP_t = 10 \log \left[ \sum_{i=1}^3 10^{\frac{LP_i}{10}} \right] dB$$

$$LP_t = 10 \log (10^{\frac{90}{10}} + 10^{\frac{95}{10}} + 10^{\frac{88}{10}}) \Rightarrow LP_t = 96.8 dB$$

تمرین: در صورتی که تراز صوت سه دستگاه به ترتیب ۱۰۰، ۱۰۳ و ۱۰۶ دسیبل باشد تراز توان صوت کلي را حساب کنید.

تمرین: در صورتی که ۱۰ ماشین بافندگی که تراز فشار صوت هر کدام ۱۰۰ دسیبل است بطور همزمان کار کنند تراز فشار صوت کلي آنها چقدر است؟

۲- روش نمودار یا چارت: علاوه بر روش محاسبه فوق، تراز کلي صدا را می توان از روی نمودار و جدول نیز بدست آورد. جمع دسیبلها را می توان به سهولت از منحنی زیر به دست آورد:



نمودار ۵: جمع دسیبلها

برای استفاده از نمودار ابتدا تفاضل دو تراز را بدست آورده و تراز را روی محور افقی مشخص کنیم. سپس از عدد مربوطه خطی به موازات محور  $y$  ها رسم تا منحنی را قطع نماید. از محل تقاطع، خطی به موازات محور  $x$  ها رسم تا محور  $y$  را قطع

کند. عدد را قرائت نموده و به تراز بزرگتر جمع نمایید. عدد حاصله برابر با تراز کلی صدا خواهد بود. روش استفاده از نمودار فوق به شرح زیر می باشد:

(الف) ابتدا اختلاف بین دو تراز را بدست می آوریم.

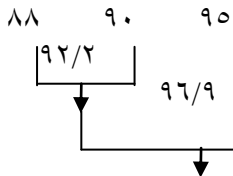
(ب) عدد حاصله از بند الف را روی محور افقی، نمودار مشخص می کنیم.

(ج) از محل عدد مشخص شده روی محور افقی خطی عمود می کنیم تا منحنی را قطع کند. و از محل تقاطع به محور عمودی وصل می کنیم. در محل تقاطع، عدد را قرائت می کنیم.

(د) عدد قرائت شده روی محور عمودی به تراز بالاتر جمع می کنیم عدد حاصله جمع دو تراز خواهد بود.

مثال: در صورتی که تراز فشار صوت سه دستگاه به ترتیب ۸۸، ۹۰ و ۹۵ دسیبل باشد از روی چارت فوق جمع دسیبل را تعیین کنید.

حل:



با توجه به موارد دستورالعمل:

(الف)  $90 - 88 = 2 \text{ dB}$

(ب) عدد ۲ روی محور افقی مشخص می کنیم.  $Z$  - از عدد ۲ خطی به منحنی وصل می کنیم و از این نقطه به محور  $y$  ها عمود می کنیم. عدد حاصله روی محور عمودی برابر ۲/۲ خواهد بود. بنابراین جمع دو تراز فوق برابر با  $92/2 = 90 + 2/2$  خواهد بود. مجدداً عدد ۹۲/۲ را با ۹۵ مقایسه می کنیم.  $95 - 92/2 = 2/8 \text{ dB}$

با توجه به اختلاف دو دسیبل یعنی ۲/۸، عددی که باید به تراز بالایی اضافه شود ۱/۹ می باشد. بنابراین جمع این دو تراز برابر است با:  $95 + 1/9 = 96/9 \text{ dB}$ . بنابراین حاصل جمع سه تراز فوق عدد ۹۶/۹ خواهد بود.

۳- روش جدول: کاربرد جدول نیز از نظر اصول، مشابه نمودار می باشد. بدین صورت که تفاضل دو تراز را حساب کرده و عدد مربوطه را در ستون سمت چپ جدول پیدا می کنیم. بعد در همان سطر و در سمت راست (ستون دوم) عدد را می خوانیم. این عدد باید به تراز بزرگتر جمع نمود تا تراز کلی صدا بدست آید (جدول زیر).

اختلاف بین دو تراز	عددی که باید به تراز بالاتر جمع کرد
۰	۳
۱	۲/۶
۲	۲/۲
۳	۱/۸
۴	۱/۴
۵	۱/۲
۶	۱
۷	۰/۸
۸	۰/۶
۹	۰/۵
۱۰	۰/۴
۱۳	۰/۲
۱۶	۰/۱

نکات مهم در جمع ترازها

در صورتی که  $N$  دستگاه دارای تراز فشار صوت یکسان باشند و همگی باهم روشن باشند تراز کلی دستگاه از رابطه  $L_{Pt} = \log N + L_{Pi}$  بدست می آید. در این رابطه  $N$  برابر تعداد دستگاه با تراز یکسان می باشند. برای مثال اگر ۱۰ دستگاه با تراز فشار صوت ۸۰ دسیبل داشته باشیم تراز کلی برابر با  $90 = 80 + 10 \log 10$  دسیبل می شود.

- در صورتی که تعداد دستگاه بیش از ۲ دستگاه یا تراز فشار صوت متفاوت باشد در روش نمودار و جدول ابتدا تراز کلی صدای دستگاه ۱ و ۲ از راه نمودار بدست می آوریم جواب حاصله را با دستگاه شماره ۳ و به همین منوال تا دستگاه شماره  $N$  محاسبات را در چند مرحله انجام می دهیم.

- زمانی که دو دستگاه دارای تراز فشار یکسان باشند بیشترین تاثیر از نظر افزایش صوت وجود خواهد داشت. در این حالت ۳ دسیبل به تراز فشار صوت دستگاه اضافه می شود.

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

- در صورتی که تفاضل تراز فشار صوت دو دستگاه ۱۲ دسیبل و بیشتر باشد صدای دستگاه ضعیف‌تر هیچ تاثیر افزایشی بر صدای دستگاه قویتر نخواهد داشت. به عبارتی، روشن یا خاموش بودن منبع با تراز پایین‌تر از نظر انتشار صوت در محیط یکسان بوده و تفاوتی نمی‌کند.  
- با توجه به کفایت دقت ۰/۵ دسیبل، می‌توان گفت که مرز اثر افزایش تراز صدای دو دستگاه ۹ دسیبل می‌باشد.  
- در صورتی که تفاضل تراز فشار صوت دو دستگاه ۴ و ۶ دسیبل باشد در این صورت ۱/۵ و ۱ دسیبل به ترتیب به تراز بالاتر اضافه می‌شود.

- تراز توان صوت کلی نیز از رابطه  $L_{wt} = 10 \log \left( \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{wi}}{10}} \right)$  بدست می‌آید.

تفاضل و تفریق دسیبل‌ها

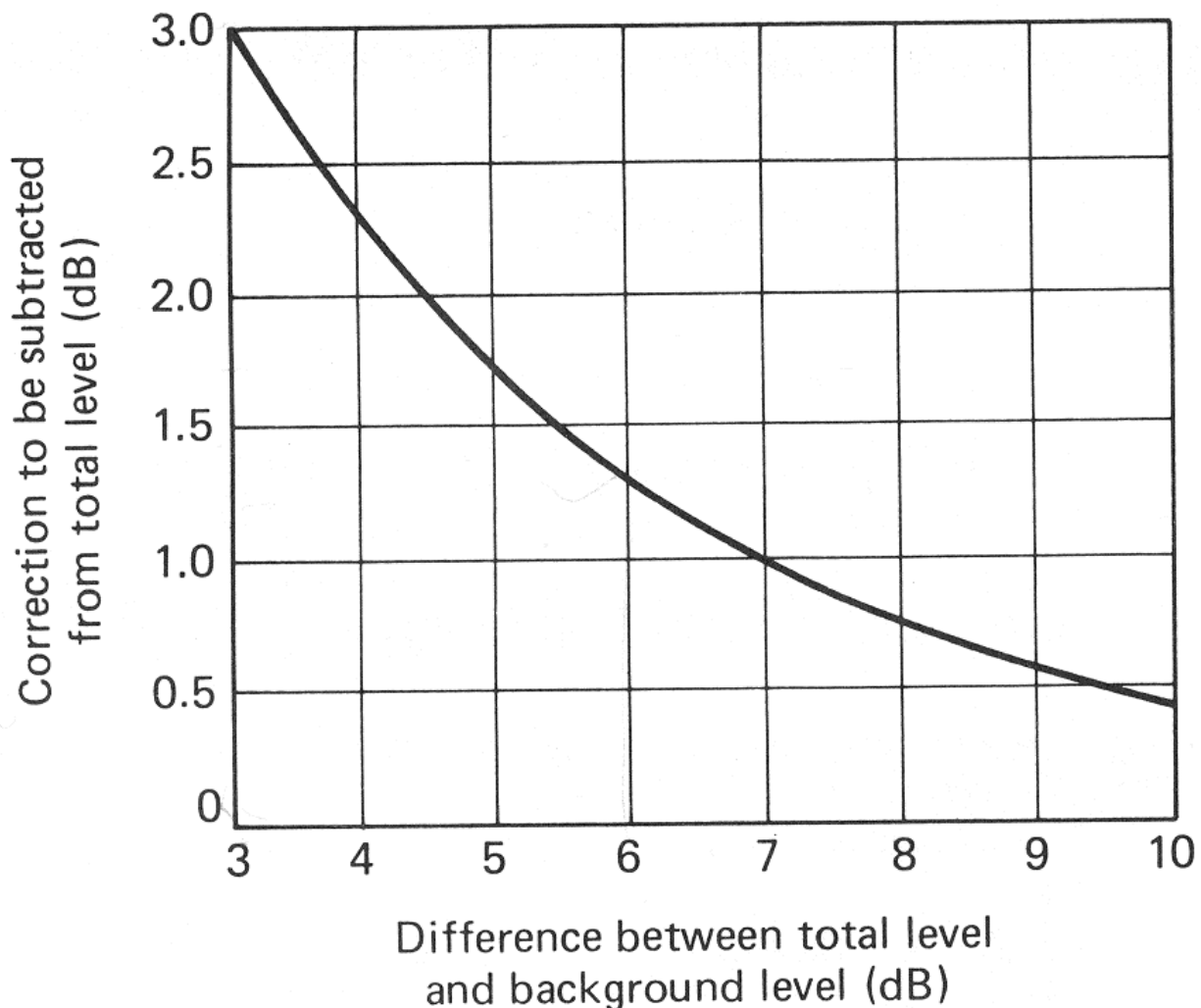
فرمول تفریق دو دسیبل به شرح زیر می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان تفاضل دو دسیبل را تعیین کرد:

$$LP_A = 10 \log(10^{\frac{LP_t}{10}} - 10^{\frac{LP_B}{10}}) dB$$

تمرین: در صورتی که تراز فشار ماشینی موقع کار کردن ۹۴ دسیبل و موقع خاموش بودن دستگاه ۸۵ دسیبل باشد تراز فشار صوت دستگاه را تعیین کنید.

$$LP_A = 10 \log(10^{\frac{94}{10}} - 10^{\frac{85}{10}}) \Rightarrow LP_t = 93.4 dB$$

تفریق دسیبل‌ها را می‌توان از روی نمودار زیر نیز بدست آورد:



نمودار ۶: تفریق دسیبل‌ها

$$\bar{L}_P = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{Lp/10} \right) dB$$

تمرین: در صورتی که تراز فشار صوت به ترتیب برابر ۹۶، ۹۰، ۱۰۰، ۹۷ دسیبل باشد تراز متوسط را تعیین نمایید.

$$\bar{L}_P = 10 \log \left[ \frac{1}{4} (10^{96/10} + 10^{100/10} + 10^{90/10} + 10^{97/10}) \right] \Rightarrow \bar{L}_P = 97 dB$$

متوسط تراز فشار صوت به صورت تقریبی

برای تعیین تراز فشار صوت به صورت تقریبی ابتدا اختلاف بین دو نقطه اندازه‌گیری شده را می‌سنجیم. بسته به اینکه این اختلاف چقدر باشد از فرمول تقریبی به شرح زیر استفاده می‌شود:

۱- در صورتی که تراز فشار صوت حداکثر و حداقل مساوی و یا کمتر از ۵ دسیبل  $LPi_{max} - LPi_{min} \leq 5 dB$  باشد فرمول

$$\bar{L}_P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LPi$$

شده مربوطه می‌باشد

۲- در صورتی که اختلاف تراز فشار صوت اندازه‌گیری شده حداکثر و حداقل بزرگتر از ۵ دسیبل و کوچکتر یا مساوی ۱۰ دسیبل باشد یعنی:  $5 < LPi_{max} - LPi_{min} \leq 10$  از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$\bar{L}_P = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LPi \right) + 1 dB$$

مثال: در صورتی که تراز فشار صوت اندازه‌گیری شده به ترتیب ۹۹، ۸۹، ۹۰ و ۹۴ دسیبل باشد مقدار متوسط تراز را به دو روش محاسبه و تقریبی تعیین نمایید؟

در این مثال  $LPi_{max} = 99$  و  $LPi_{min} = 89$  می‌باشد بنابراین:

$$LPi_{max} - LPi_{min} = 99 - 89 = 10 dB$$

$$\bar{L}_P = \left[ \frac{1}{4} (94 + 89 + 99 + 90) \right] + 1 = 94 dB$$

$$\bar{L}_P = 10 \log \left[ \frac{1}{4} (10^{94/10} + 10^{99/10} + 10^{90/10} + 10^{89/10}) \right] \Rightarrow \bar{L}_P = 94.9 dB$$

تراز معادل صوت

باتوجه به اینکه کارگر در طول شیفت در معرض ترازهای مختلف قرار دارد بنابراین لازم است تراز معادل<sup>۱</sup> مواجهه کارگر را برای یک دوره زمانی محاسبه نمود در صورتی که تراز صوت برای یک شیفت ۸ ساعته محاسبه شود به آن تراز معادل مواجهه ۸ ساعته می‌گویند بنابراین یکی از موارد کاربرد تراز معادل، مقایسه آن با مقادیر مجاز مواجهه ۸ ساعته می‌باشد برای محاسبه تراز معادل از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$\bar{L}_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{Tr} \sum_{i=1}^n Ti \times 10^{Lpi/10} \right) dB$$

به طوری که :

$\bar{L}_{eq}$  : تراز معادل مواجهه بر حسب دسیبل

Ti : طول زمان مواجهه [ام بر حسب ساعت

Tr: زمان مرجع ( معمولاً ۸ ساعت )

LPi: تراز فشار صوت مواجهه I ام بر حسب دسیبل.

<sup>۱</sup> equivalent level



## بلندي صدا

گرچه مشخصات فیزیکی صدا مانند فرکانس، فشار صوت را می‌توان با دستگاه‌های مخصوص اندازه‌گیری نمود. ولی در بررسی و ارزشیابی سروصدا فقط نمی‌توان به اندازه‌گیری فیزیکی متکی بود. زیرا اصوات با فشار معین برای شنونده‌های مختلف به یک میزان بلند به نظر نمی‌رسند تاکنون دستگاهی که احساس شنوایی یا میزان تراز بلندي صدا<sup>۱</sup> را اندازه‌گیری کند بطور کامل وجود ندارد ولی برای بررسی هم از راه محاسبه و هم از طریق تجربی این عمل انجام گرفته است. بلندي صدا يك کمیتی است از اثر و احساس شنوایی در شنونده. در تراز فشار ثابت بلندي صدا با تغییر فرکانس تغییر می‌کند. برای تعیین تراز بلندي صدا از يك دسته منحنی به نام منحنی‌های تراز بلندي که از نظر بین‌المللی استاندارد شده است استفاده می‌شود (منحنی شماره ۱).

واحد تراز بلندي فون<sup>۲</sup> می‌باشد که واحدی بدون دیمانسیون است و عبارت است از بلندي صدایی برابر با بلندي يك صوت ساده با فرکانس ۱۰۰۰ هرتز می‌باشد. بنابراین فون حساسیت گوش را در فرکانس‌های مختلف نسبت به فرکانس ۱۰۰۰ هرتز و براساس تراز فشار نشان می‌دهد. همانطوری که از منحنی مشاهده می‌شود صدایی با فرکانس ۱۰۰۰ هرتز و تراز فشار صوت ۸۰ دسیبل (تراز بلندي ۸۰ فون) بطور متوسط معادل صداهای زیر است:

- صداهایی با فرکانس ۴۰۰ هرتز و تراز فشار صوت ۷۵ دسیبل

- صدایی با فرکانس ۶۰ هرتز و تراز فشار صوت ۹۰ دسیبل

- صدایی با فرکانس ۵۰۰ هرتز و تراز فشار صوت ۷۰ دسیبل

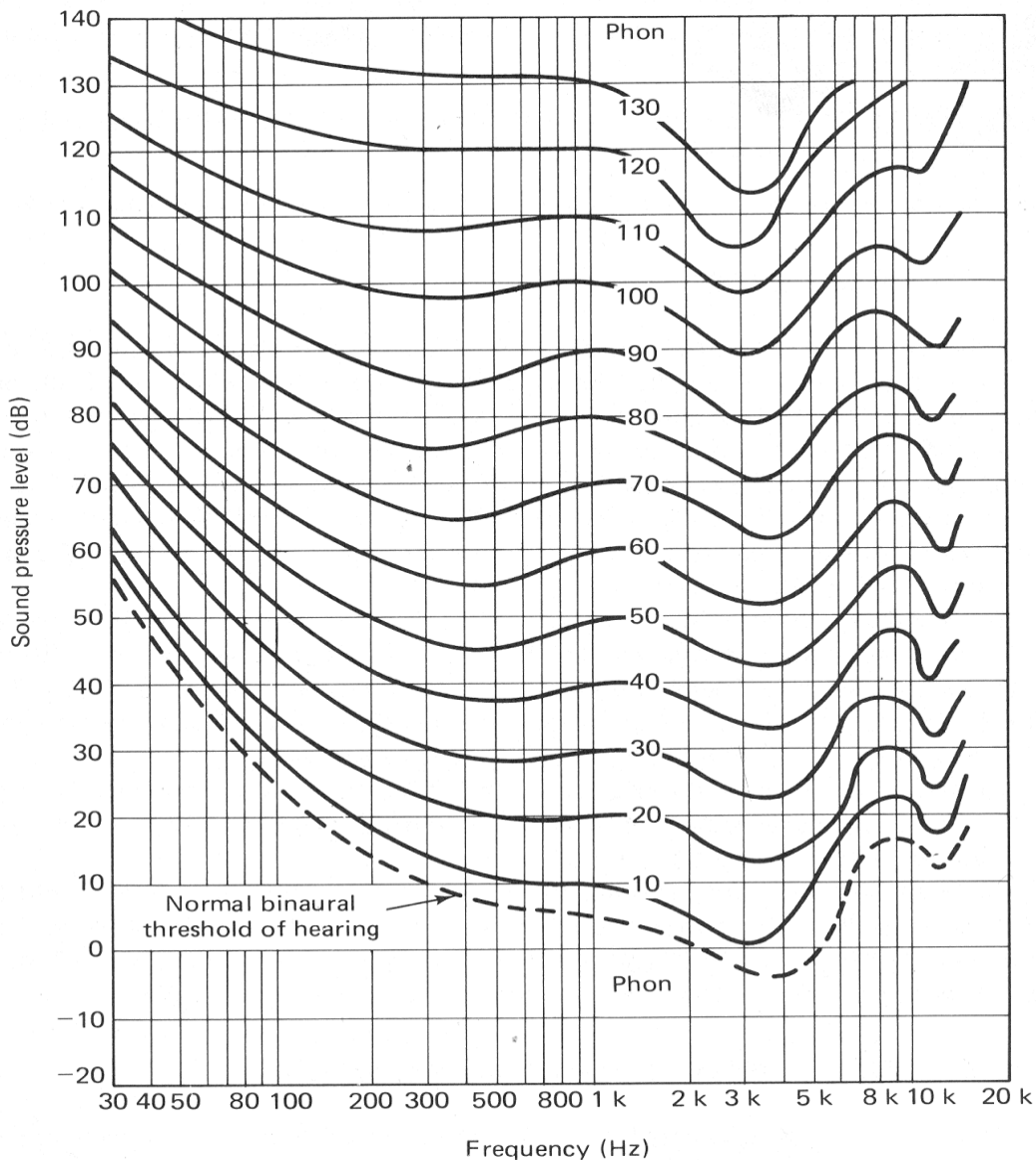
با توجه به اینکه منحنی بلندي برای مقایسه اصوات ساده می‌باشد لذا برای صدای صنعت (که معمولاً به صورت ساده نمی‌باشد بلکه در يك باند پهن گسترده است) به جای فرکانس‌های ساده از آکتاوباندهای صدا استفاده می‌شود. در این سیستم از کمیتی تحت عنوان اندیس بلندي<sup>۳</sup> استفاده می‌شود که واحد آن سون<sup>۴</sup> می‌باشد. مطابق تعریف «سون بلندي صوتی است معادل صوتی با فرکانس ۱۰۰۰ هرتز که تراز بلندي آن ۴۰ فون است».

<sup>۱</sup> sound loudness

<sup>۲</sup> phone

<sup>۳</sup> Loudness Inden

<sup>۴</sup> Sone



منحنی شماره ۱: منحنی مربوط به بلندی صوت

برای محاسبه تراز بلندی با استفاده از منحنی‌های شماره ۲ طبق مراحل زیر عمل می‌کنیم.

۱- صدای محیط و یا منبع صدا را با استفاده از دستگاه تجزیه کننده آنالیز کرده و تراز فشار صوت را برای هر فرکانس اندازه‌گیری و اطلاعات آن را در جدول زیر قرار دهید. فرض کنید نتایج تراز فشار صوت در فرکانس‌های مختلف براساس آنالیز صدا به شرح جدول زیر باشد. برای سهولت می‌توان جدول ذیل تهیه و پس از آنالیز صدا اطلاعات را به شرح مراحل فوق در جدول ذیل تکمیل نمود

	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
فرکانس مرکزی (هرتز)	۸۰۰	۴۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰	۲۵	۱۲	۶۳	
تراز فشار صوت (SPL)									
اندیس بلندی (S)									$\sum s =$

۲- اندیس بلندی را از محل تقاطع عدد مربوط به فرکانس (روی محور افقی) و تراز فشار صوت (از روی محور عمودی) بدست می‌آوریم. بنابراین ابتدا اندیس بلندی را برای فرکانس ۶۳ و تراز فشار صوت ۵۶ دسیبل بدست آوریم و عدد حاصله را در سطر سوم جدول فوق که مربوط به اندیس بلندی است می‌نویسیم. (ستون شماره ۱ زیر فرکانس ۶۳ و تراز فشار صوت ۵۶ دسیبل). این عمل را برای سایر فرکانسها و تراز فشار صوت متناظر با آنها انجام داده و اندیس بلندی فرکانس را تعیین می‌کنیم.

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

۳- مجموع اندیس بلندی یعنی  $\sum S$  را محاسبه می‌کنیم و عدد را در ستون ۹ و در مقابل سطر مربوط به اندیس بلندی می‌نویسیم.

۴- بزرگترین اندیس بلندی یعنی  $S_m$  را از بین تمام اندیس‌ها مشخص می‌کنیم.

۵- با توجه به رابطه  $S_t = S_m + f(\sum s - S_m)$ ، سون کلی را محاسبه می‌کنیم. در این رابطه،  $S_m$  بزرگترین اندیس بلندی،  $\sum S$  مجموع اندیس‌های بلندی و  $f$  ضریب ثابت است و برحسب اینکه دستگاه تجزیه کننده اکتاو باند،  $\frac{1}{2}$  یا  $\frac{1}{3}$  اکتاو باشد عدد  $f$  به ترتیب برابر با  $\frac{0}{3}$ ،  $\frac{0}{2}$  و  $\frac{0}{15}$  می‌باشد.

۶- بعد از محاسبه سون کلی ( $S_t$ ) تراز بلندی را با استفاده از رابطه زیر و یا از طریق نمودار می‌که در سمت راست شکل موجود است محاسبه یا تعیین می‌کنیم.

$$P = 33/2 \log S_t + 40$$

مسئله: تراز فشار صوت دستگاهی با صوت پیچیده و مرکب اندازه گیری و اطلاعات آن بشرح جدول زیر می‌باشد. بلندی و تراز بلندی صوت را محاسبه کنید.

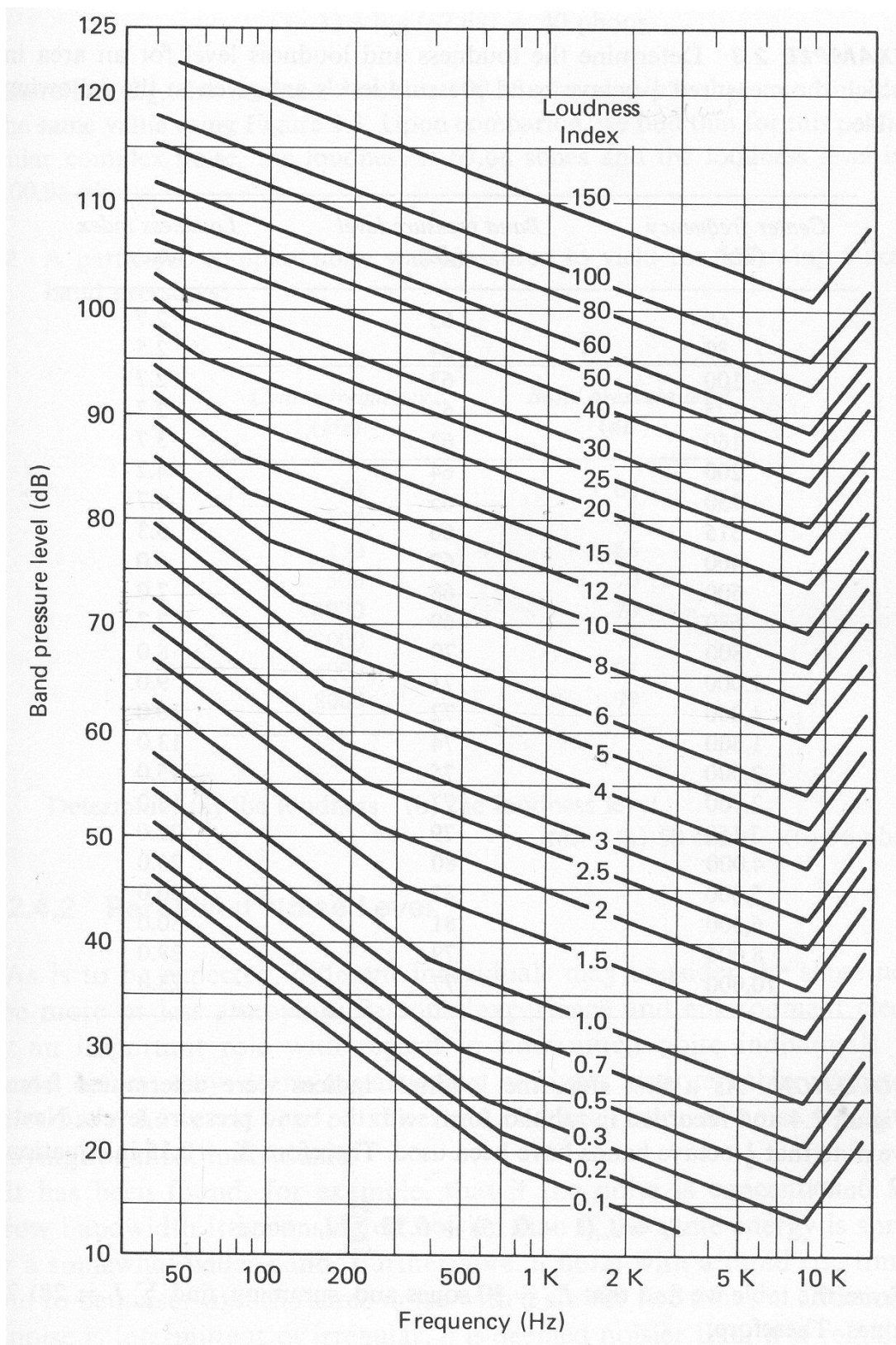
	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
فرکانس مرکزی (هرتز)	۸۰۰۰	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۱۲۰	۶۳	
تراز فشار صوت (SPL)	۷۹	۸۱	۷۶	۷۳	۷۰	۶۵	۶۳	۶۶	
اندیس بلندی (S)									$\sum s =$

مسئله: در صورتی که تراز فشار صوت اندازه گیری شده در  $\frac{1}{3}$  اکتاو باند به شرح جدول ذیل باشد بلندی صوت و تراز بلندی را تعیین نمایید.

فرکانس	تراز فشار صوت	اندیس بلندی
۶۳	۶۵	
۸۰	۶۴	
۱۰۰	۶۳	
۱۲۵	۶۲	
۱۶۰	۶۳	
۲۰۰	۶۴	
۲۵۰	۶۵	
۳۱۵	۶۶	
۴۰۰	۶۷	
۵۰۰	۶۸	
۶۳۰	۶۹	
۸۰۰	۷۰	
۱۰۰۰	۷۱	
۱۲۵۰	۷۲	
۱۶۰۰	۷۴	
۲۰۰۰	۷۵	
۲۵۰۰	۷۷	
۳۱۵۰	۷۹	

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

	۸۰	۴۰۰۰
	۸۲	۵۰۰۰
	۸۱	۶۳۰۰
	۷۹	۸۰۰۰
	۷۷	۱۰۰۰
		.



منحنی شماره ۲: منحنی مربوط به تراز بلندی صوت

تراز صدای درک شده

افراد مختلف برحسب انتظار ممکن است صدای یکسانی را کمتر یا بیشتر از حد آزاردهنده تلقی نمایند. مشخص شده است که صداهای با باند باریک پرصدا تر از صدای با باند پهن بنظر می رسند بعلاوه صدای با افزایش سریع زمانی پرصدا تر از صدای مشابه ولی با زمان افزایش کندتر بنظر می رسند. همچنین صدای منقطع یا نامنظم پرصدا تر از صدای یکنواخت بنظر می رسند صدای با فرکانس بالا (تقریباً ۱۵۰۰ هرتز و بالاتر) نیز پرصدا تر از صدای با فرکانس پایین ولی با بلندی یکسان می باشند.

واحد پرصدايي Noisiness نوی  $noy$  می باشد و طبق تعریف یک نوی عبارت از صدای درک شده در باند فرکانس ۹۱۰ الی ۱۰۹۰ هرتز و با فرکانس مرکزی ۱۰۰۰ هرتز با حداکثر تراز فشارصوت ۴۰ دسیبل می باشد. برای راحتی و در عمل پرصدايي را تحت عنوان تراز صدای درک شده و برحسب دسیبل بیان می کنند. (PNLdB). تراز صدای درک شده ابتدا برحسب صدای کلی  $total\ noisiness$  محاسبه شده و سپس برحسب PNdB تصحیح می شود روش کار مشابه تعیین بلندی صدا برحسب سون و تبدیل آن به تراز بلندی برحسب فون می باشد. برای تعیین صدای درک شده کلی از فرمول زیر استفاده می شود.

$$PN = N_m(1 - K) + K \sum_{i=1}^n N_i$$

بطوری که:

PN = صدای درک شده کلی برحسب نوی

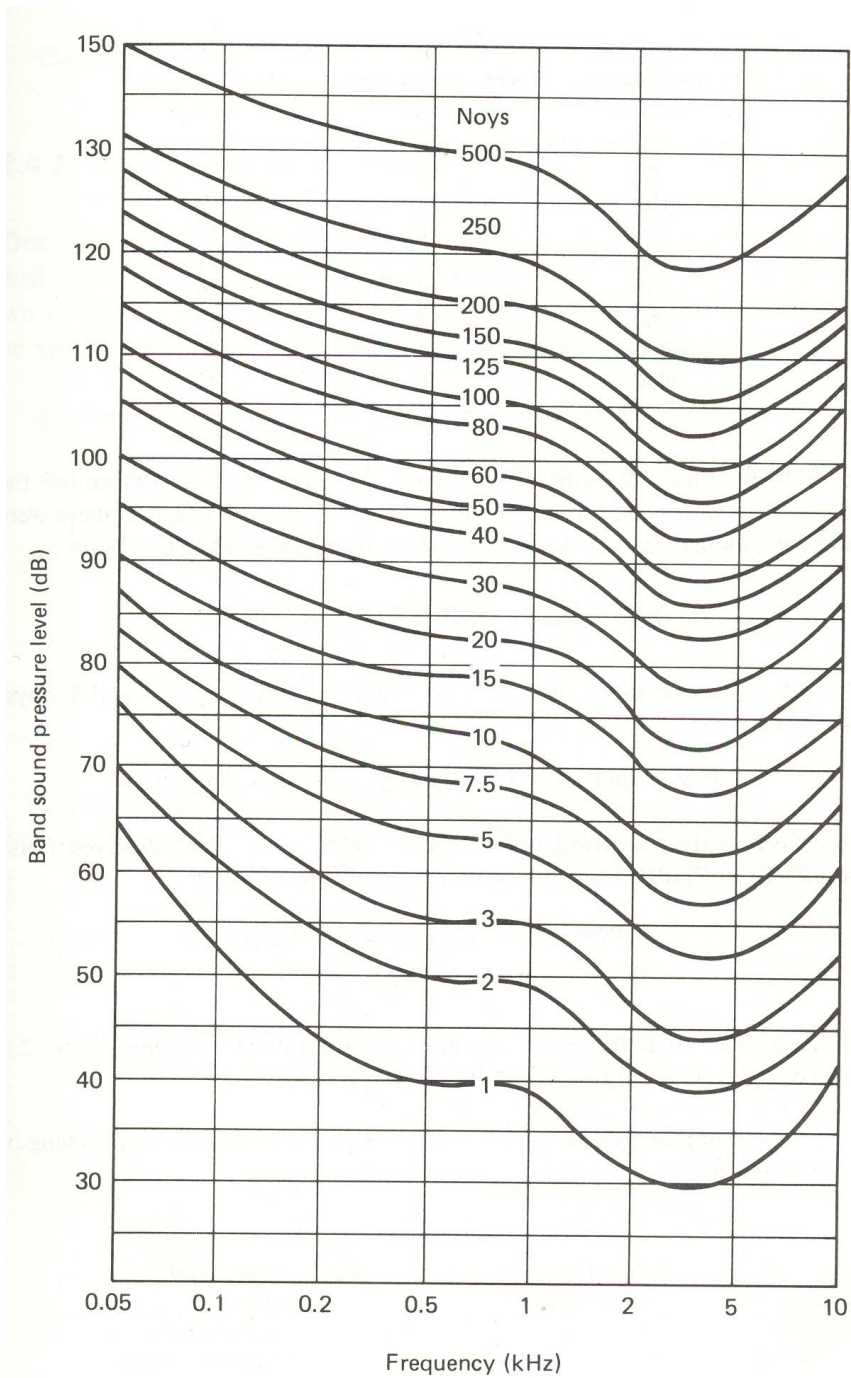
Nm = ماکزیم صدای درک شده در باند فرکانسی اندازه گیری شده.

Ni = صدای درک شده در هر فرکانس

$K =$  ضریب مربوط به شبکه انتخاب شده (برای اکتاو باند  $k = 0/3$ ، برای  $2/2$  اکتاو باند  $k = 0/2$  و برای  $3/1$  اکتاو باند  $k = 0/1$ )

برای محاسبه صدای درک شده ابتدا باید فاکتور پرصدايي را با استفاده از نمودار ..... برای باند فرکانسی اندازه گیری شده تعیین نمود. برای مثال در فرکانس ۵۰۰ هرتز و تراز فشارصوت ۴۰ دسیبل Ni برابر با ۱ نوی خواهد شد. برای راحتی می توان جدول زیر از قبل تهیه و با استفاده از نمودار مربوطه مقادیر را برحسب فرکانس و تراز فشارصوت تکمیل نمود. (جدول زیر برای باند فرکانسی یک اکتاو می باشد)

	۸۰۰۰	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۱۲۵	۶۳	فرکانس مرکزی
	۸۸	۸۱	۸۶	۸۵	۸۴	۸۲	۷۷	۷۵	تراز فشارصوت
$\sum Ni =$	۴۲	۳۶	۴۲	۲۶	۲۱	۱۷	۸	۳	صدای درک شده
$Nm =$									



نمودار .....: نمودار مربوط به صدای درک شده

پس از محاسبه صدای کلی درک شده PN برحسب نوی می توان تراز صدای درک شده یا PNL را با استفاده از فرمول زیر بدست آورد.

$$PNL = 33,3 \log + 40 (PNdB)$$

بطوری که :

PNL = تراز صدا درک شده برحسب PNdB  
 PN = صدای درک شده برحسب نوی

جدول تبدیل تراز بلندی (برحسب فون) به بلندی صدا (برحسب سون)

Table 3.7 Conversion of Loudness Level in Phons to Loudness in Sones<sup>a</sup>

Phons	Sones									
	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9
40	1	1.07	1.15	1.23	1.32	1.41	1.51	1.62	1.74	1.87
50	2	2.14	2.30	2.46	2.64	2.83	3.03	3.25	3.48	3.73
60	4	4.29	4.59	4.92	5.28	5.66	6.06	6.50	6.96	7.46
70	8	8.57	9.20	9.85	10.6	11.3	12.1	13.0	13.9	14.9
80	16	17.1	18.4	19.7	21.1	22.6	24.3	26.0	27.9	29.9
90	32	34.3	36.8	39.4	42.2	45.3	48.5	52.0	55.7	59.7
100	64	68.6	73.5	78.8	84.4	90.5	97.0	104	111	119
110	128	137	147	158	169	181	194	208	223	239
120	256	274	294	315	338	362	388	416	446	478
130	512	549	588	630	676	724	776	832	891	955

<sup>a</sup>To find the number of sones corresponding to 76 phons, find the intercept of 70 phons and +6. The correct value is 12.1 sones.

همچنین برای تبدیل PN به PNL می توان از نمودار ..... نیز استفاده نمود.

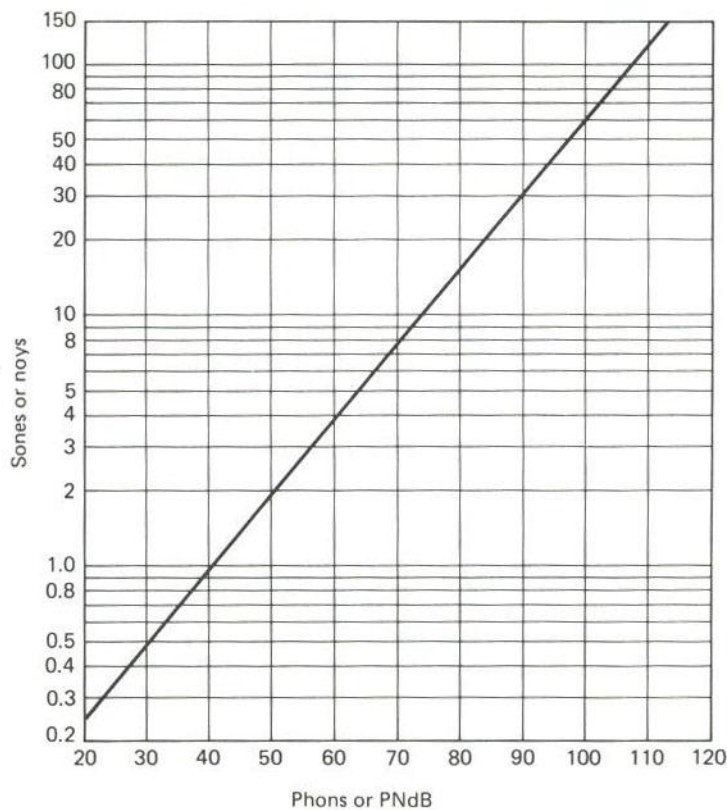


FIGURE 2.3 Relationship between loudness (sones) and loudness level (phons) or between perceived noise (noys) and perceived noise level (PNdB)

نمودار ..... : نمودار تبدیل بلندی (سون) به تراز بلندی (فون) یا تبدیل PN (نوی) به PNL (PNdB)

مثال: در صورتی که تراز فشار صوت در باند فرکانسی ۱ اکتاو باند بشرح جدول زیر باشد مطلوب است PN و PNL:



	۸۰۰۰	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۱۲۵	۶۳	فرکانس مرکزی
	۸۸	۸۱	۸۶	۸۵	۸۴	۸۲	۷۷	۷۵	تراز فشار صوت
$\sum Ni =$	۴۲	۳۶	۴۲	۲۶	۲۱	۱۷	۸	۳	صدای درک شده
$Nm =$									

جواب: ابتدا صدای درک شده را برای هر فرکانس و تراز فشار صوت مربوطه با استفاده از نمودار ..... مشخص و مقادیر مربوطه را در سطر سوم جدول تکمیل کرده، سپس کلیه مقادیر را جمع می کنیم ( $\sum Ni = 195$ ) و همچنین بزرگترین صدای درک شده را از میان اعداد موجود در سطر سوم جدول ( $Nm=42$ ) مشخص می کنیم حال می توان PN را با استفاده از رابطه زیر بدست آورد. ضریب  $k$  با توجه به باند فرکانسی اکتاو باند برابر با  $0.3$  است.

$$PN = 42(1 - 0.3) + 0.3(195) = 87.9 \approx 88 \text{noys}$$

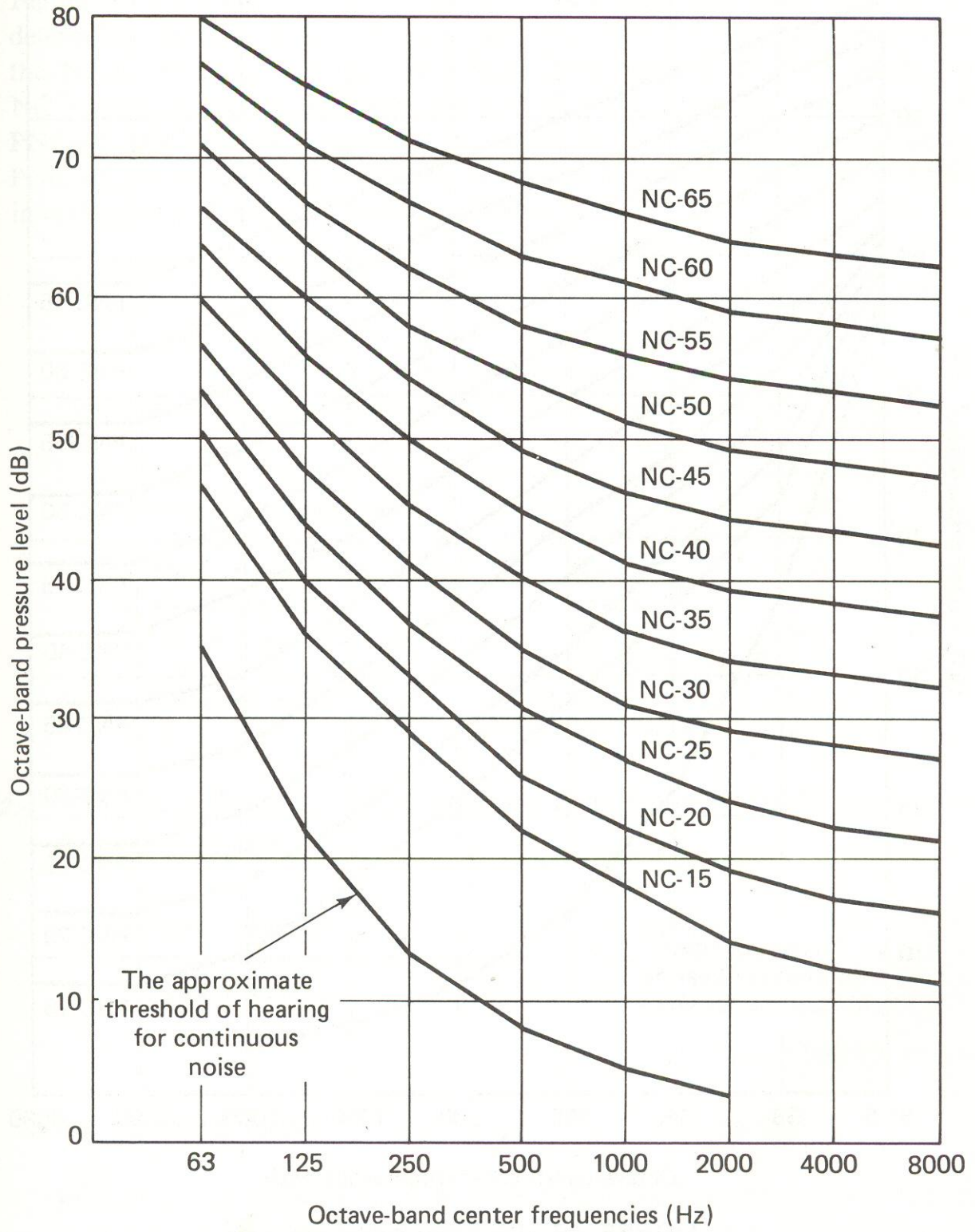
میزان PNL نیز با توجه به رابطه مربوطه برابر با  $PNL = 33.3 \log 88 + 40 = 104.75 \text{ PNdB}$  خواهد بود

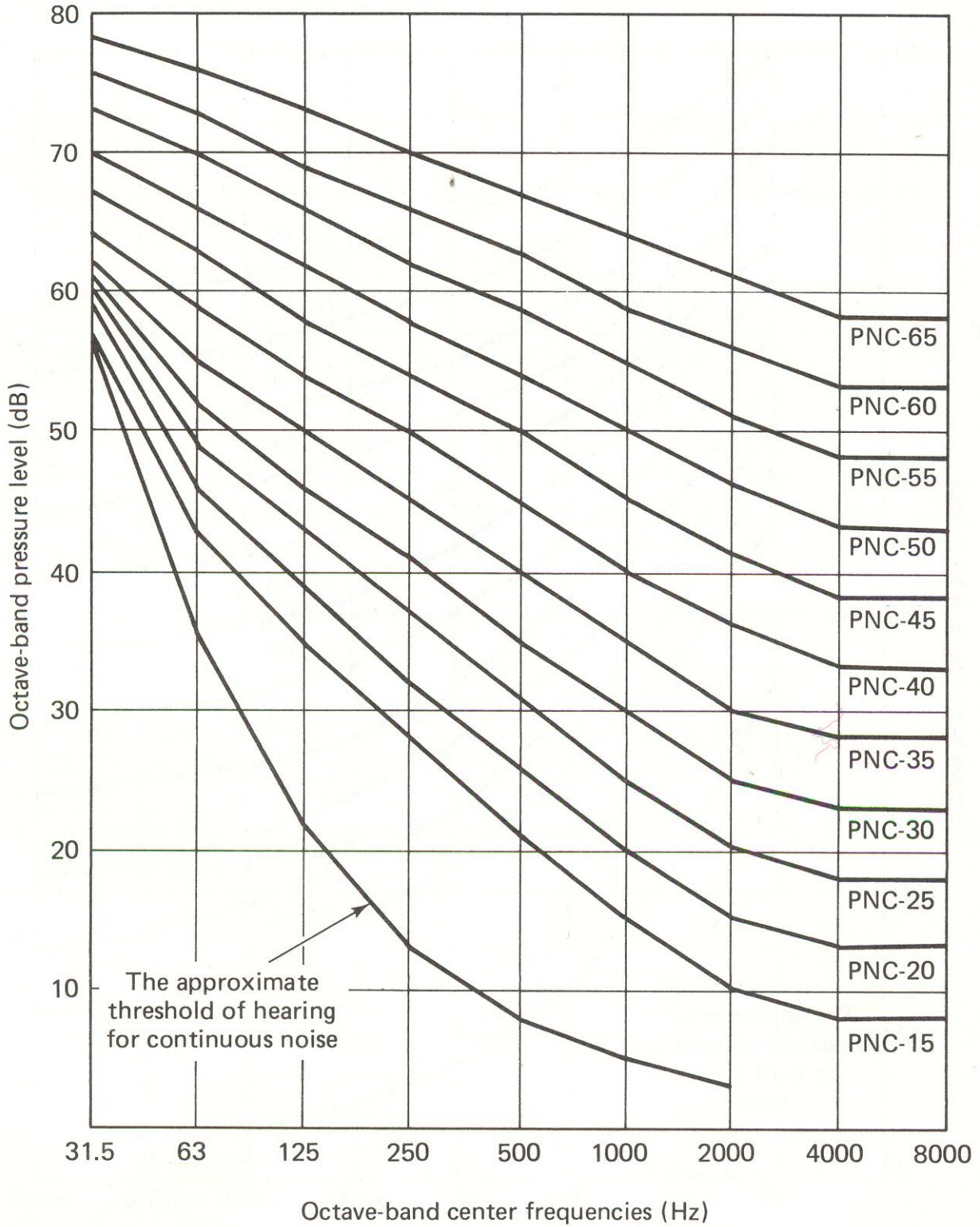
مسئله: در صورتی تراز فشار صوت اندازه گیری شده در باند ۱ اکتاو باند بشرح ذیل باشد صدای درک شده و تراز صدای درک را محاسبه نمایید.

	۸۰۰۰	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۱۲۵	۶۳	فرکانس مرکزی
	۷۸	۸۱	۸۶	۸۸	۸۰	۷۵	۷۳	۷۶	تراز فشار صوت
$\sum Ni =$									صدای درک شده
$Nm =$									

#### منحنی های مربوط به معیار صدا Noise- criteria curves

یکی از روشهای تعیین صدای زمینه در اتاق استفاده از منحنی های مربوط به معیار صدا (NC) می باشد. این روش در سال ۱۹۵۷ ابداع گردید. هر یک از منحنی ها حداکثر تراز فشار صوت اکتاو باند را برای رتبه بندی معیار صدای داده شده (NC) مشخص می نماید. در صورتی که تراز فشار صوت برای باند فرکانسی اکتاو باند مشخص باشد با داشتن فرکانس و تراز فشار صوت مربوطه محل تقاطع روی یکی از منحنی های NC قرار می گیرد حال با داشتن کلیه نقاط فرکانسی و تراز فشار صوت مربوطه مجموعه ای از NC خواهیم داشت که یکی از آنها بالاترین است این منحنی بالاترین نقطه highest penetration نفوذ را تعیین خواهد نمود. بعداً با توجه به بعضی نواقص و مشکلات منحنی های NC در سال ۱۹۷۱ اصلاح و منحنی های جدید تحت عنوان معیار صدای ترجیح داده شده (Preferred noise-criteria) PNC پیشنهاد گردید. گر چه این منحنی ها با منحنی های NC تفاوت دارد ولی کاربرد آن کاملاً مشابه است.





مثال: در صورتی تراز فشار صوت اندازه گیری شده در یک اتاق بشرح ذیل باشد رتبه بندی NC و PNC را برای آن تعیین نمایید.

فرکانس مرکزی	۶۳	۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۸۰۰۰
تراز فشار صوت	۴۱	۴۵	۴۸	۵۰	۴۶	۴۲	۴۰	۳۸
NC			-۴۵ NC					
PNC							PNC-۴۵	

در صورتی که تراز فشار صوت را برای کلیه نقاط فرکانس باند و محل قرارگیری آن روی منحنی های NC مشخص نماییم نقطه بالاترین نفوذ، رتبه بندی در هر مورد را تعیین خواهد نمود. همانطور که ملاحظه می شود طیف فرکانس بر روی منحنی NC-۴۵ در فرکانس ۵۰۰ هرتز نفوذ و متمرکز می شود و به اندازه ۱ دسیبل آن را افزایش می دهد. بنابراین رتبه بندی حاصله NC-۴۶ خواهد بود. به همین ترتیب تمرکز فرکانس بر روی PNC-۴۵ در فرکانس ۴۰۰۰ می باشد و میزان آن به اندازه ۲ دسیبل افزایش می دهد. بنابراین رتبه بندی حاصله PNC-۴۷ خواهد بود.

طیف معیار صدای توصیه شده برای صدای زمینه یکنواخت در داخل کارگاه در جدول زیر آمده است.  
جدول -. طیف معیار صدای توصیه شده برای صدای زمینه یکنواخت داخل کارگاه

منحنی NC	منحنی PNC	
۲۵-۳۵	۲۵-۴۰	اتاق خواب
۳۵-۴۵	۳۰-۴۰	اتاق نشیمن
۳۰-۳۵	۳۰-۴۰	اداره یا کلاس
۱۵-۲۰	۱۰-۲۰	استودیو ضبط
۳۵-۵۰	۳۵-۴۵	رستوران و فروشگاه
۴۰-۴۵	۴۰-۵۰	آزمایشگاه
۴۵-۶۰	۴۵-۵۵	اتاق کامپیوتر

مسئله: در صورتی که تراز فشار صوت اندازه گیری شده در طیف فرکانس اکتاو باند بشرح زیر باشد رتبه بندی NC و PNC را تعیین نمایید.

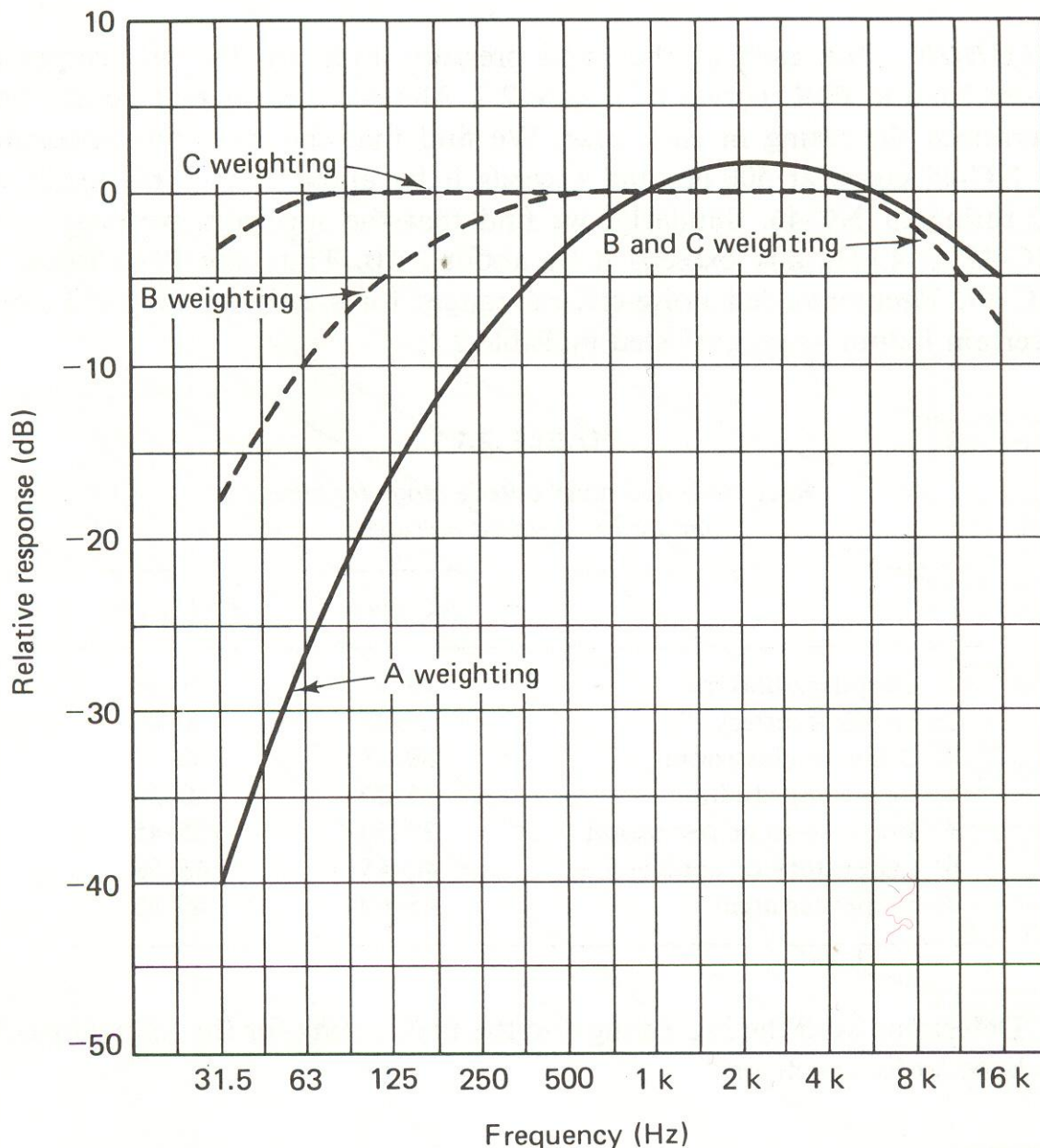
فرکانس مرکزی	۶۳	۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۸۰۰۰
تراز فشار صوت	۵۰	۵۱	۴۸	۴۶	۵۰	۵۳	۵۷	۵۲
NC								
PNC								

#### تراز صدا و مقیاس وزنی فرکانس

تراز صدا عبارت از تراز فشار صوتی است که براساس منحنی شبکه خاصی شبکه بندی شده اند. منحنی های شبکه و تراز صدای مربوطه به منظور ارزیابی بهتر ذهنی صدا بر روی گوش انسان توسعه و ارائه شده اند. تاکنون دهها مقیاسهای وزنی فرکانس ارائه شده است. بدین منظور سه شبکه A و B و C معرفی شده اند. شبکه A برای صداهای کمتر از ۵۵ دسیبل، شبکه B برای صداهای ۸۵-۵۵ دسیبل و شبکه C برای ترازهای بالاتر از ۸۵ بودند. ولی در حال حاضر مقیاس وزنی ذیل برای صدای صنعت و اجتماعات کاربرد دارد. این مقیاس براساس تعریف عبارت از تصحیحات تراز فشار صوت براساس انرژی

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

فرکانس می باشد. تصحیحات لازم برای شبکه های وزنی A و C در هر یک از فرکانس مرکزی یک سوم اکتاوباند در بیناب ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز در جدول داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود تصحیحات شبکه A در فرکانس کمتر از ۱۰۰۰ هرتز بطور مشخص افزایش می یابد در حالیکه در شبکه C این تصحیح نسبتاً در محدوده فرکانس ۱۰۰۰۰-۵۰۰۰ یکنواخت می باشد. از نظر آماری شبکه وزنی A پاسخ فرکانس گوش انسان به صدا می باشد. لذا حساسیت گوش انسان به فرکانس های کمتر از ۱۰۰۰ هرتز کمتر است. بعلاوه مطالعات اخیر نشان می دهد که میزان افت شنوایی از شبکه وزنی A پیروی می کند. بطوری که فرد می تواند صدای با فرکانس پایین و با تراز بالا را مدت طولانی تحمل نماید. دستگاههای اندازه گیری صدا با شبکه های الکترونیکی توانایی انتخاب آسان این شبکه ها را دارند. در حال حاضر شبکه A برای اندازه گیری میزان پاسخ گوش انسان به صدا اعم از آسیب شنوایی و آزار شنوایی بکار می رود و بصورت dBA نوشته می شود و برای شبکه B و C به ترتیب واحدهای dBb و dBc بکار می روند. در هنگام مشکلات کاهش شنوایی اغلب لازم است تا تراز فشار صوت محاسبه شده اکتاوباند یا یک سوم اکتاوباند را به تراز فشار صوت کلی برحسب dBA تبدیل نمود. پاسخ فرکانس و تبدیل دسیبل به پاسخ یکنواخت و یا بالعکس در نمودار ..... و جدول ..... داده شده است.



نمودار .....: پاسخ فرکانس برای شبکه های A، B و C

*Sound level conversion chart from flat response to A, B, and C weightings*

<i>Frequency (Hz)</i>	<i>A weighting (dB)</i>	<i>B weighting (dB)</i>	<i>C weighting (dB)</i>
10	-70.4	-38.2	-14.3
12.5	-63.4	-33.2	-11.2
16	-56.7	-28.5	-8.5
20	-50.5	-24.2	-6.2
25	-44.7	-20.4	-4.4
31.5	-39.4	-17.1	-3.0
40	-34.6	-14.2	-2.0
50	-30.2	-11.6	-1.3
63	-26.2	-9.3	-0.8
80	-22.5	-7.4	-0.5
100	-19.1	-5.6	-0.3
125	-16.1	-4.2	-0.2
160	-13.4	-3.0	-0.1
200	-10.9	-2.0	0
250	-8.6	-1.3	0
315	-6.6	-0.8	0
400	-4.8	-0.5	0
500	-3.2	-0.3	0
630	-1.9	-0.1	0
800	-0.8	0	0
1,000	0	0	0
1,250	+0.6	0	0
1,600	+1.0	0	-0.1
2,000	+1.2	-0.1	-0.2
2,500	+1.3	-0.2	-0.3
3,150	+1.2	-0.4	-0.5
4,000	+1.0	-0.7	-0.8
5,000	+0.5	-1.2	-1.3
6,300	-0.1	-1.9	-2.0
8,000	-1.1	-2.9	-3.0
10,000	-2.5	-4.3	-4.4
12,500	-4.3	-6.1	-6.2
16,000	-6.6	-8.4	-8.5
20,000	-9.3	-11.1	-11.2

جدول تبدیل تراز صدا از پاسخ یکنواخت به شبکه های A، B و C

مثال: تراز فشار صوت اکتاو باندهای یک فن سانتریفیوژی در فاصله ۳ متری اندازه و در سطر اول جدول زیر داده شده است. مطلوب است:

الف) تصحیحات شبکه وزنی A و C  
ب) تراز صدای کلی در شبکه های A و C را محاسبه و مقایسه نمایید.

فرکانس مرکزی اکتاو باند	۶۳	۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۸۰۰۰	تراز کلی صدا
تراز فشار صوت در فاصله ۳ متری	۹۱	۹۵	۱۰۱	۱۰۰	۹۶	۹۰	۸۴	۷۵	-
تصحیح شبکه C	-/۸	-/۲	۰	۰	۰	-/۲	-/۸	-/۳	
معادل شبکه C	۹۰/۲	۹۴/۸	۱۰۱	۱۰۰	۹۶	۸۹/۸	۸۳/۲	۷۲	۱۰۵
تصحیح شبکه A	-۲۶/۲	-۱۶/۱	-۸/۲	-۳/۲	۰	۱/۲	۱	-۱/۱	
معادل شبکه A	۶۴/۸	۷۸/۹	۹۲/۴	۹۶/۸	۹۶	۹۱/۲	۸۵	۷۳/۹	۱۰۱

همانطور که در جدول مشاهده می شود تراز فشار صوت در شبکه A و C به ترتیب ۱۰۵ و ۱۰۱ دسیبل است لذا با مقایسه این دو ملاحظه می شود که تراز کلی صدا در شبکه A به میزان ۴ دسیبل کمتر از شبکه C است. لذا به استثناء فرکانس ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ تراز کلی صدا در شبکه A همیشه کمتر از شبکه C است و این ارتباط هم برای صدای صنعت و هم صدای اجتماعات صادق است.

مثال: در صورتی که تراز فشار صوت اندازه گیری در باند فرکانس اکتاو باند بشرح زیر باشد تراز کلی صدا در شبکه A را تعیین نمایید.

فرکانس مرکزی	۳۱/۵	۶۳	۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۸۰۰۰	۱۶۰۰۰
تراز فشار صوت dB	۷۴	۶۶	۷۱	۶۱	۶۰	۷۵	۸۲	۸۰	۸۷	۹۰
تبدیل به dBA	-۳۹/۴	-۲۶/۲	-۱۶/۱	-۸/۶	-۳/۲	۰	+۱/۲	+۱	-۱/۱	-۶/۶
dB -dBA	۳۴/۶	۳۹/۸	۵۴/۹	۵۲/۴	۵۶/۸	۷۵	۸۳/۲	۸۱	۸۵/۹	۸۳/۴

جواب: ابتدا با استفاده از جدول ..... تبدیل دسیبل را برای فرکانسهای داده شده در شبکه A (dBA) مشخص و در سطر سوم جدول و سپس س اختلاف بین اعداد مربوط به ترازهای پاسخ یکنواخت با تراز فشار صوت از شبکه A (dBA) را در سطر چهارم جدول تکمیل می کنیم. برای مثال برای فرکانس ۳۱/۵ این اختلاف برابر با  $۳۹/۴ = ۷۴ - ۳۹/۴$  خواهد بود. بعد با استفاده از رابطه زیر تراز کلی صدا را بدست می آوریم.

$$L_t = 10 \log \left( \sum_{i=1}^{10} 10^{L_{p_i}/10} \right)$$

$$L_t = 10 \log \left[ 10^{34.6/10} + 10^{39.8/10} + 10^{54.9/10} + 10^{52.4/10} + 10^{56.8/10} + 10^{75/10} + 10^{83.2/10} + 10^{81/10} + 10^{85.9/10} + 10^{83.4/10} \right]$$

$$L_t = 89.9 \text{ dBA}$$

مسئله: در صورتی که تراز فشار صوت در فرکانس مرکزی اکتاو باند بشرح زیر باشد تراز کلی صدا را برای شبکه A تعیین نمایید.

فرکانس مرکزی	۳۱/۵	۶۳	۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۸۰۰۰	۱۶۰۰۰
تراز فشار صوت	۷۹	۷۶	۸۴	۸۴	۹۲	۹۰	۹۶	۹۸	۸۱	۷۶
تبدیل به dBA										

تراز تداخل مکالمه

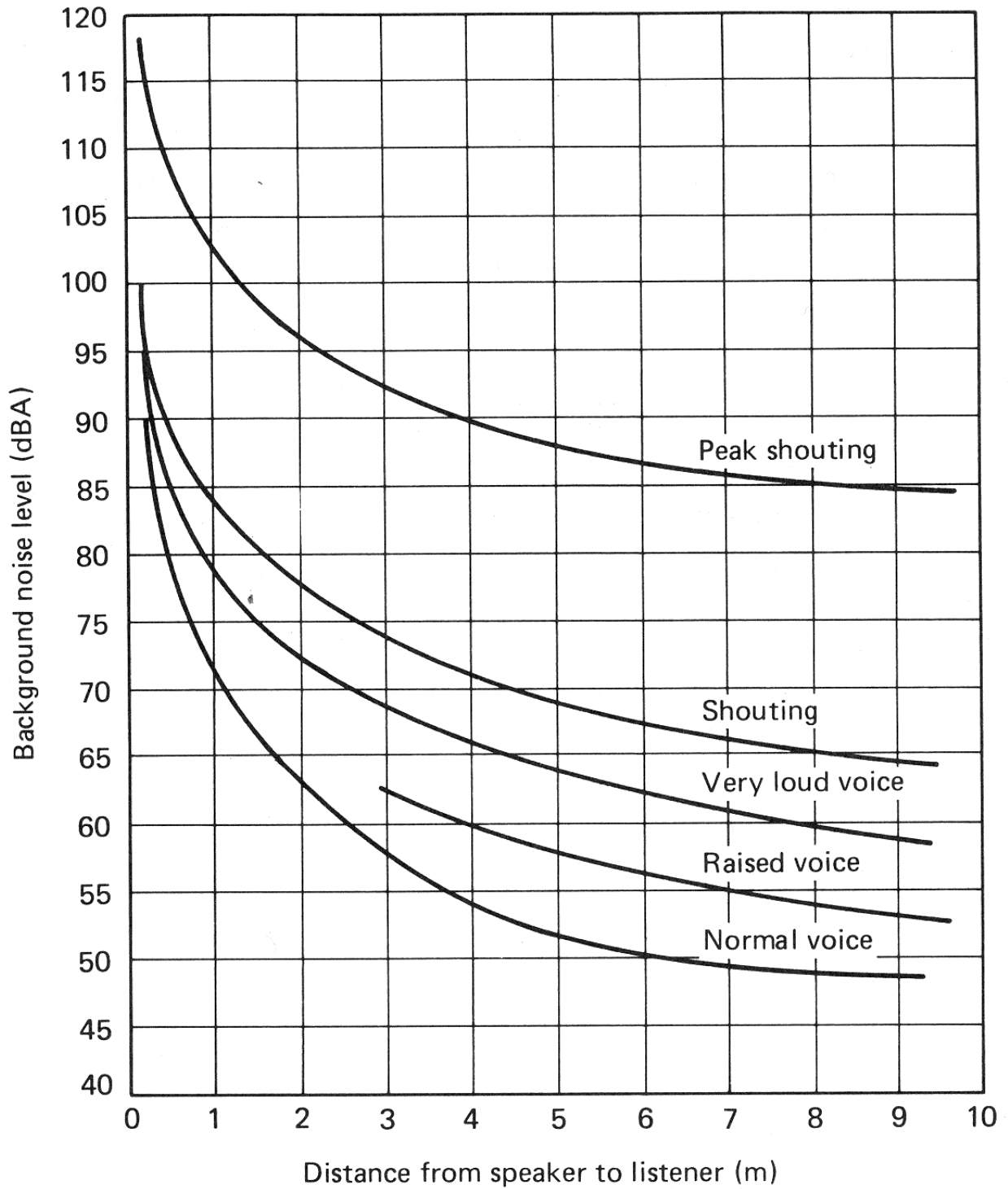
در بعضی موارد ممکن است صدای محیط کار به سیستم شنوایی آسیب نزنند ولی با مکالمه تداخل پیدا کند و این امر باعث می شود که فرد نتواند دستورات و پیام را به سهولت بشنود. تداخل سر و صدا با مکالمه زمانی اتفاق می افتد که یکی از دو صوت همزمان موجب عدم درک صوت دیگر شود. تداخل در ارتباطات در محیط کار موجب عدم شنیدن علایم خطر شده لذا

ممکن است منجر به ایجاد حادثه شود. اولین معیاری که برای این منظور به کار رفت معیار و شاخص طرز گفتار می‌باشد ولی کاربرد آن مشکل می‌باشد. لذا تراز تداخل مکالمه<sup>۱</sup> جایگزین ساده تری برای شاخص طرز گفتار می‌باشد. تراز تداخل مکالمه با در نظر گرفتن باندهای اکتاوی که حاوی تمام فرکانس‌های مکالمه یعنی ۶۰۰-۳۰۰، ۱۲۰۰-۶۰۰ و ۲۴۰۰-۱۲۰۰ سیکل در ثانیه باشد منظور گردید و برای سنجش آن معیاری تعریف گردید بطوری که میانگین حسابی تراز فشار صوت در سه فرکانس ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ هرتز محاسبه و جواب را به عنوان تراز تداخل مکالمه تعریف می‌نمایند. سپس باتوجه به عدد تراز تداخل مکالمه و فاصله بین شنونده و گوینده و با استفاده از منحنی‌های زیر می‌توان شدت و ضعف صدای شنونده برای انتقال پیام را مشخص نمود. در حال حاضر سازمان استاندارد ملی آمریکا میانگین حسابی تراز فشار صوت در چهار فرکانس ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ را برای تعیین تراز تداخل مکالمه توصیه می‌نماید. علاوه بر اثرات سوء بر سیستم شنوایی، صدا ممکن است به عنوان یک استرسور عمومی باعث افزایش فشار خون، افزایش میزان قلب، افزایش تعداد تنفس، تاثیر در سوخت و ساز قند و چربی، افزایش حرکات روده، زخم معده، بروز مشکلات قلبی عروقی، تحریک اعصاب و مشکلات روحی و روانی خفیف مانند بی‌حوصلگی، اضطراب، زودرنجی، سردرد و بی‌خوابی، بی‌دقتی در فعالیت‌های فکری و مغزی گردد. خستگی روحی و روانی، افزایش خطا و حرارت ناشی از کار از دیگر عوارض صدا می‌توان نام برد.

---

<sup>۱</sup> Speech Interference level





منحنی های مربوط به تعیین تراز تداخل مکالمه

انتشار صوت در محیط

اصولاً موقعی که کنترل صدا مد نظر باشد نحوه انتشار صوت<sup>۱</sup> از منبع صوتی مهم است. صوت در محیط‌های مادی مختلف قابل انتشار می‌باشد ولی نحوه انتشار صوت به عوامل متعددی مانند مشخصات منبع صوت، فاصله از منبع، وجود یا عدم وجود سطوح بازتابی و زاویه انتشار بستگی دارد. برای بیان تاثیر سطوح بازتابی در میدان انتشار صوت، ضریبی به نام ضریب جهت تعریف می‌شود. ضریب جهت<sup>۲</sup> تابعی از تعداد سطوح بازتابی مجاور منبع صوتی می‌باشد. ضریب جهت از ۱ (میدان آزاد) تا ۸ (سه سطح بازتابی) متغیر است (شکل زیر).

Sound Propagation

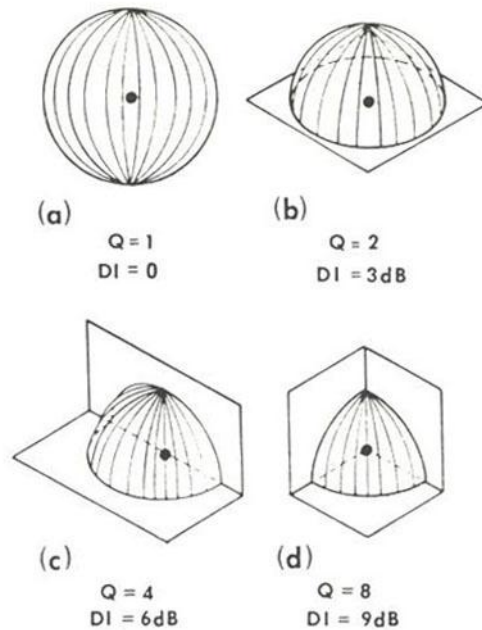


Figure 4.5 Examples of reflecting planes which strongly influence the radiation patterns of sound sources.

اگر میدان انتشار از نوع میدان آزاد باشد یعنی برای منبع صوت هیچگونه سطح بازتابی وجود ندارد به عبارتی مانعی برای پیش رفتن امواج صوتی در جهات مختلف وجود ندارد. همچنین در صورتی که سطوح بازتابی با جذب صوتی تقریباً کامل وجود داشته باشد باز میدان انتشار از نوع میدان آزاد تلقی می‌شود. در صنعت شرایط میدان آزاد به ندرت وجود دارد ولی در فضاهای باز و آزاد (مثل هواپیمایی که در فضا در حال پرواز است) و یا در محیط‌ها و اماکن خیلی بزرگ یافت می‌شود.

در میدان آزاد، شدت صوت به نسبت عکس مجذور فاصله کاهش می‌یابد. یعنی اگر شدت صوت در فاصله  $r_1$  برابر با  $I_1$  باشد

شدت صوت در فاصله  $r_2$  برابر با  $\frac{I_1}{r^2}$  می‌باشد به عبارتی  $I_2 = \frac{I_1}{r^2}$  است. در صورتی که میدان آزاد باشد ضریب جهت (Q)

برابر ۱ می‌باشد. بنابراین رابطه  $I = \frac{WQ}{4\pi r^2}$  بصورت  $I = \frac{W}{4\pi r^2}$  درمی‌آید.

مثال: منبع صوتی کوچکی با تراز توان ۱۱۰ دسیبل در فضای باز بصورت آزاد آویزان شده است. تراز فشار صوت در فاصله ۲۰ متر از منبع چقدر است؟

حل:

$$L_p = L_w - 20 \log r - 11$$

$$L_p = 110 - 20 \log 20 - 11 = 73 \text{ dB}$$

<sup>۱</sup> sound propagation

<sup>۲</sup> Directivity factor

در صورتی که فاصله  $r$  بر حسب فوت باشد فرمول به شکل زیر خواهد بود:

$$L_p = L_w - 20 \log r - 0.5$$

باید توجه داشت استفاده از روابط فوق مشروط به جهت دار نبودن صدا ( $Q=1$ )، انتشار یکنواخت و آزاد صوت می باشد. در صورتی که تراز فشار صوت در فاصله  $r_1$  برابر با  $L_{p1}$  و در فاصله  $r_2$  برابر با  $L_{p2}$  باشد در این صورت داریم:

$$L_{p1} = L_w - 20 \log r_1 - 11$$

$$L_{p2} = L_w - 20 \log r_2 - 11$$

حال چنانچه دو رابطه فوق را از یکدیگر تفریق نماییم با توجه به یکسانی تراز توان صوت منبع خواهیم داشت:

$$L_{p1} - L_{p2} = 20 \log \frac{r_2}{r_1} \quad \& \quad L_{p2} = L_{p1} - 20 \log \frac{r_2}{r_1}$$

مثال: در صورتی که تراز فشار صوت در فاصله ۵ فوتی از منبع برابر با ۹۸ دسیبل باشد تراز فشار صوت در فاصله ۲۰ فوتی چقدر است؟

مثال: یک منبع صوت با تراز توان ۱۰۰ دسیبل در میدان آزاد انتشار می نماید. تراز فشار صوت منبع در فاصله ۱۰ متری و تحت زاویه ۳۰ درجه برابر با ۷۵ دسیبل می باشد. شاخص جهت را محاسبه نمایید.

در صورت جهت دار بودن صدا تراز فشار صوت برابر با رابطه زیر خواهد بود.

$$L_p = L_w + DI_\theta - 20 \log r - 11$$

$$DI_\theta = L_{p,\theta} - L_{p,ref}$$

$$L_p = L_w + (L_{p,\theta} - L_{p,ref}) - 20 \log r - 11$$

وجود سطوح بازتابی فاکتور مهم دیگری است که می تواند شدیداً بر روی جهت انتشار صوت در منبع نقطه ای تاثیر بگذارد.

با افزایش فاصله از منبع صوتی، تراز فشار صوت نیز کاهش می یابد ولی میزان کاهش تراز فشار صوت تابع نوع منبع صوتی می باشد یعنی بر حسب اینکه منبع صوت نقطه ای یا خطی باشد میزان کاهش تراز فشار صوت متفاوت است. در صورتی که منبع نقطه ای باشد به عبارتی توزیع انرژی صوتی بصورت کروی باشد در این صورت به ازای دو برابر شدن فاصله از منبع، تراز فشار صوت به اندازه ۶ دسیبل کاهش می یابد. در این حالت رابطه زیر برقرار است:

$$LP_2 = LP_1 - 20 \log \frac{r_2}{r_1}$$

تمرین: با توجه به روابط  $I = \frac{P^2}{\rho C}$  و  $I = \frac{W}{4\pi r^2}$  رابطه فوق را بدست آورید.

در صورتی که توان منبع صوتی معلوم باشد می توان تراز فشار صوت را در فواصل مختلف از منبع صوتی طبق رابطه  $LP = LW + 10 \log Q - 20 \log r - 11$  بدست آورد. در این رابطه  $LW$  تراز توان،  $LP$  تراز فشار صوت بر حسب دسیبل و  $r$  فاصله از منبع بر حسب متر می باشد. با توجه به این که ضریب جهت ( $Q$ ) در میدان آزاد برابر ۱ است لذا  $10 \log 1 = 0$  می باشد بنابراین رابطه فوق بصورت  $LP = LW - 20 \log r - 11$  در می آید.

در صورتی که در مجاورت منبع فقط یک سطح بازتابی وجود داشته باشد (مانند دستگاه چمن زنی که در وسط زمین فوتبالی قرار گرفته است) در این صورت انتشار صوت در  $\frac{1}{2}$  کره و  $Q = 2$  می باشد. در این صورت رابطه بین تراز فشار صوت و تراز توان صوت برابر است با:

$$LP = LW + 10 \log 2 - 20 \log r - 11 = LW - 20 \log r - 8$$

همچنین رابطه بین شدت و توان صوت بصورت  $I = \frac{2W}{4\pi r^2} = \frac{W}{2\pi r^2}$  در می آید. در صورتی که در مجاورت منبع دو

سطح بازتابی وجود داشته باشد در این صورت انتشار صوت در  $\frac{1}{4}$  کره و  $Q = 4$  می باشد. در این حالت رابطه بین شدت

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

صوت و توان صوت یعنی  $I = \frac{WQ}{4\pi r^2}$  بصورت  $I = \frac{4W}{4\pi r^2} = \frac{W}{\pi r^2}$  درمی آید. همچنین بین تراز فشار صوت و تراز توان صوت رابطه زیر برقرار می شود.

$$LP = LW + 10 \log \epsilon - 20 \log r - 11 = LW - 20 \log r - 5$$

اندیس جهت

معمولاً صوت در اطراف منبع و تحت زوایای مختلف دارای ترازهای مختلف می باشد. بنابراین تراز فشار صوت در فواصل مساوی از منبع ولی با زوایای مختلف ممکن است یکسان نباشد. برای بیان این تغییرات از اندیس جهت<sup>۱</sup> (DI) استفاده و بصورت رابطه زیر بیان می شود.

$$DI = LP_{r, \theta} - LP_{ref}$$

بطوری که  $DI =$  اندیس جهت برحسب دسیبل و  $LP_{r, \theta} =$  تراز فشار صوت در فاصله  $r$  و تحت زاویه  $\theta$  برحسب دسیبل و  $LP_{r, f} =$  تراز فشار صوت در مرجع (در فاصله  $r$  و نقطه مرجع) برحسب دسیبل  
بین اندیس جهت (DI) و ضریب جهت (Q) رابطه زیر برقرار است.

$$DI = 10 \log Q \quad \text{یا} \quad Q = 10^{\frac{DI}{10}}$$

تمرین: اندیس جهت را برای چهار حالت فوق یعنی میدان آزاد، یک سطح بازتابی، دو سطح بازتابی و سه سطح بازتابی بدست آورید:

تمرین: در صورتی که در مجاورت منبع صوت یک سطح بازتابی، دو سطح بازتابی و سه سطح بازتابی باشد رابطه بین شدت صوت و توان صوت برای سه حالت فوق بدست آورید.

تمرین: رابطه بین تراز فشار صوت و تراز توان صوت برای سه حالت زیر یعنی یک سطح بازتابی، دو سطح بازتابی و سه سطح بازتابی بدست آورید. حال چنانچه تراز توان منبع ۹۸ دسیبل باشد تراز فشار صوت را در فاصله ۵ متری از منبع در چهار حالت فوق بدست آورید.

مثال: تراز توان صوت منبعی (LW) برابر ۱۱۰ دسیبل است. حال چنانچه تراز فشار صوت در فاصله ۲۰ متری و در میدان آزاد و تحت زاویه ۴۵ درجه برابر  $(LP_{20, 45})$  ۷۶ دسیبل باشد اندیس جهت چقدر است؟  
ابتدا باید  $LP_{ref}$  را بدست آوریم.

$$DI = LP_{r, \theta} - LP_{ref}$$

$$LP_{ref} = LW - 20 \log r - 11$$

$$LP_{ref} = 110 - 20 \log 20 - 11 = 73 \text{ dB}$$

$$DI = 76 - 73 = 3 \text{ dB}$$

انتشار صوت از منابع خطی و سطحی

عملاً در محیط کار دستگاهها بصورت طولی و در یک یا چند ردیف قرار گرفته اند. حال اگر منابع در یک ردیف قرار گرفته باشند انتشار صوت بصورت خطی است. اگر منابع خطی در چند ردیف قرار گرفته باشند انتشار صوت بصورت سطحی است. منابع خطی به دو دسته منابع خطی پیوسته (مانند مجاری تهویه) و منابع خطی ناپیوسته (مانند دستگاههای نساجی) که به فاصله ولی در یک خط نصب شده اند.

در منابع خطی پیوسته شدت صوت برابر با  $I = \frac{W}{2\pi rh}$  می باشد و با دو برابر شدن فاصله از منبع صوتی، تراز فشار

صوت ۳ دسیبل کاهش می یابد. تراز فشار صوت در فواصل مختلف از منبع صوتی از رابطه  $LP_2 = LP_1 - 10 \log \frac{r_2}{r_1}$  بدست می آید.

<sup>۱</sup> Directivity index

تمرین: با توجه به رابطه  $I = \frac{W}{2\pi rh}$  و  $I = \frac{P^2}{\rho c}$  رابطه فوق را بدست آورید.

در منابع خطی ناپیوسته با دو برابر شدن فاصله از منبع صوتی، تراز فشار صوت بین ۳ و ۶ دسیبل برحسب حالات زیر کاهش خواهد یافت. اگر فاصله منابع صدا از یکدیگر برابر با  $b$  باشد حال دو حالت اتفاق می‌افتد.

۱- اگر فاصله کارگر تا منبع صوتی مساوی یا کمتر از  $\frac{b}{\pi}$  باشد در اینصورت کاهش تراز فشار صوت شبیه به منابع نقطه‌ای می‌باشد. یعنی با دو برابر شدن فاصله، تراز فشار صوت ۶ دسیبل کاهش می‌یابد.

۲- اگر فاصله کارگر تا منبع صوتی بیش از  $\frac{b}{\pi}$  باشد در اینصورت کاهش تراز فشار صوت مانند منابع خطی پیوسته می‌باشد. یعنی با دو برابر شدن فاصله، تراز فشار صوت به اندازه ۳ دسیبل کاهش خواهد یافت.

تمرین: در صورتی که تراز فشار صوت دستگاه بافندگی در فاصله ۵ متری برابر با ۱۰۰ دسیبل و فاصله بین دستگاه ۲ متر باشد مطلوب است تراز فشار صوت در فاصله ۱۰ متری.

$$\frac{b}{\pi} = \frac{2}{3.14} = 0.63m$$

چون فاصله فرد از دستگاه (۵ متر) بیش از  $\frac{b}{\pi} = 0.63$  است بنابراین کاهش تراز فشار صوت مانند منابع خطی پیوسته است. یعنی تراز فشار صوت در فاصله ۲۰ متری برابر با ۹۷ دسیبل خواهد شد.

$$LP_2 = LP_1 - 10 \log \frac{r_2}{r_1}$$

$$LP_2 = 100 - 10 \log \frac{10}{5} \Rightarrow 100 - 10 \log 2 \Rightarrow 100 - 3 = 97dB$$

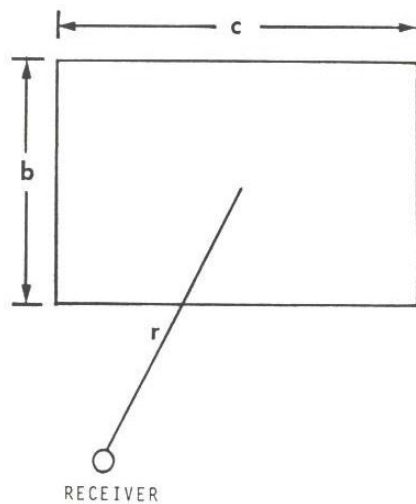


Figure 4.9 Finite plane source.

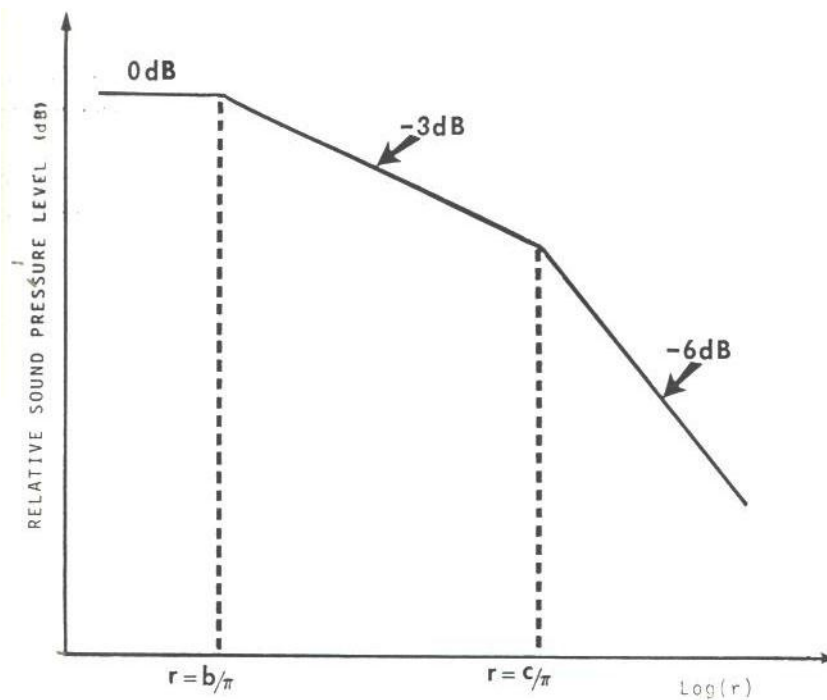


Figure 4.10 Sound level divergence from a finite plane source.

در بعضی از منابع، توزیع صدا کروی نمی باشد. برای مثال صدای بلندگو و یا در حالت پیچیده تر صدای صنعت بطور یکنواخت در همه جهات منتشر نمی شود بلکه در یک فضای سه بعدی Three-dimensional space منتشر می شود. بنابراین بطور قطع لازم است ویژگی های مربوط به جهت صدای منبع صوت برآورد گردد که این امر بطور مستقیم از طریق برآورد ضریب جهت (Q) و یا بوسیله محاسبه تقریبی شاخص جهت (DI) Directivity index انجام می شود.

$$Q = \frac{I_{\theta}}{I} = \frac{P_{\theta}^2}{P^2}$$

$\bar{I}$ : متوسط شدت صوت در سطح کروی و در فاصله  $r_1$  برحسب وات بر مترمربع

$\bar{P}$ : متوسط فشار (rms) صوت در سطح کروی و در فاصله  $r_1$  برحسب پاسکال

با توجه به اینکه معمولاً تراز فشارصوت اندازه گیری می کنیم بنابراین بجای شدت از فشارصوت یا تراز فشارصوت استفاده می کنیم. بنابراین به منظور اندازه گیری معتبر فاصله شعاعی radial distance از منبع صدا حداقل باید دو برابر

بزرگترین ابعاد منبع باشد. حال برای بدست آوردن  $\bar{L}_P$  مراحل ذیل را انجام می دهیم:

چند وجهی polyhedron مورد استفاده را انتخاب و فاصله از منبع صدا را مشخص نمایید.

کرویت های نرمال شده نقاط مرکزی هر وجه را از روی جدول مشخص و عدد مربوطه را در فاصله ضرب نمایید.

تراز فشارصوت (تراز فشارصوت متوسط را با استفاده از رابطه زیر) را در نقاط مرکزی هر وجه برحسب دسیبل اندازه گیری نمایید.

$$\bar{L}_P = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum 10^{L_{pi}/10} \right)$$

برای تعیین  $\bar{L}_P$  در سایر فرکانس های موردنظر موارد فوق را تکرار نمایید.

مثال ۱: کورد x, y, z موقعیت های میکروفون موردنیاز برای اندازه گیری در فاصله ۱۲ فوتی از منبع صوت را با استفاده از ۸ وجهی را برای تخمین کره تعیین نمایید.

حل: با استفاده از جدول شماره ..... جهات x, y, z نرمال شده برای ۸ وجهی بدست آورید. بعد هر یک از آنها را در عدد ۱۲ ضرب نمایید تا مقادیر کورد موردنظر را بدست آورید.

موقعیت	X (فوت)	Y (فوت)	Z (فوت)
۱	۰	۹/۸۴	۶/۹۶

-۶/۹۶	۹/۸۴	۰	۲
۶/۹۶	۰	۹/۸۴	۳
-۶/۹۶	۰	۹/۸۴	۴
۶/۹۶	-۹/۸۴	۰	۵
-۶/۹۶	-۹/۸۴	۰	۶
۶/۹۶	۰	-۹/۸۴	۷
-۶/۹۶	۰	-۹/۸۴	۸

مثال ۲: فرض کنید که تراز فشار صوت اندازه گیری در هر یک از موقعیت های مثال ۱ در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز اکتاو باند برابر با  $LP_1=95$  ،  $LP_2=90$  ،  $LP_3=94$  ،  $LP_4=94$  ،  $LP_5=90$  ،  $LP_6=93$  ،  $LP_7=90$  و  $LP_8=89$  دسیبل بوده است. شاخص جهت (DI) و ضریب جهت (Q) برای هر یک از ۸ جهت مرتبط به تراز فشار صوت اندازه گیری شده را بدست آورید.

حل:

$$LP_i = 10 \log \left[ \frac{1}{8} \left( 10^{\frac{95}{10}} + 10^{\frac{90}{10}} + 10^{\frac{94}{10}} + 10^{\frac{94}{10}} + 10^{\frac{90}{10}} + 10^{\frac{93}{10}} + 10^{\frac{90}{10}} + 10^{\frac{89}{10}} \right) \right]$$

$$LP_i = 92.4 \text{ dB}$$

از آنجا که حداکثر تغییرات عبارت از:  $LP_{\max} - LP_{\min} = 95 - 89 = 6 \text{ dB}$  می باشد. حال با استفاده از روش تقریب می توان متوسط تراز فشار صوت را با استفاده از رابطه زیر بدست آورد.

$$\bar{L}_p = \left( \frac{1}{n} \sum LP_i \right) + 1 \text{ dB}$$

$$\bar{L}_p = \frac{1}{8} (95 + 90 + 94 + 94 + 90 + 93 + 90 + 89) + 1 = 92.9 \text{ dB}$$

همانطور که ملاحظه می شود بین روش تقریبی و دقیق فقط ۰/۵ دسیبل تفاوت وجود دارد در ادامه مسئله ما  $\bar{L}_p$  را برابر با ۹۲ دسیبل می گیریم حال چنانچه DI و Q را با استفاده از روابط مربوطه حساب کنیم نتایج طبق جدول ذیل خواهد بود.

$$DI = L_p - \bar{L}_p$$

$$Q = 10^{\left( \frac{LP_i - \bar{L}_p}{10} \right)}$$

موقعیت	DI	Q
۱	+۳	۲
۲	-۲	۰/۶۳
۳	+۲	۱/۵۸
۴	+۲	۱/۵۸
۵	-۲	۰/۶۳
۶	+۱	۱/۲۶
۷	-۲	۰/۶۳
۸	-۳	۰/۵۰

تمرین:

در مطالعه انجام شده بر روی وسیله ای در فضای ..... تصمیم گرفته شد تا ۱۲ اندازه گیری در فاصله ۱۵ فوتی از منبع در فرکانس ۲۰۰۰ هرتز انجام شود. نتایج اندازه گیری بشرح ذیل می باشند:

$LP_1=87$  ،  $LP_2=90$  ،  $LP_3=92$  ،  $LP_4=88$  ،  $LP_5=91$  ،  $LP_6=90$  ،  $LP_7=93$  ،  $LP_8=87$  ،  $LP_9=91$  ،  $LP_{10}=90$  ،  $LP_{11}=92$  و  $LP_{12}=91$

الف) متوسط تراز فشار صوت را در فاصله ۱۵ فوت از منبع بدست آورید. (جواب ۹۱ دسیبل)  
ب) DI و Q را در موقعیت های ۲ و ۷ تعیین نمایید.

اندازه گیری در فضای نیمه کروی anechoic hemispherical space  
مراحل:

-۱  
-۲  
-۳

۴- در موارد خاصی که نقطه میانی در نیم صفحه perimeter نیمکره قرار می گیرد ۳ دسیبل از تراز کلی صدا تفریق کنید.

۵- متوسط تراز فشار صوت را مشابه حالت کروی محاسبه نمایید ولی چون اندازه گیری در فضای نیمکره انجام شده است ۳ دسیبل از آن کم نمایید.

$$\bar{L}_P = \left[ 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{P_i}/10} \right) \right] - 3dB$$

مثال ۱: منبع صوتی را در نظر بگیرید که بر روی کف بتونی قرار گرفته است. نقاط کورد x و y و z را با استفاده از ۱۰ نقطه در نیمکره را تعیین نمایید. مفروض به اینکه تراز فشار صوت در فاصله ۱۵ فوتی از منبع اندازه گیری شده باشد.  
حل: با استفاده از جدول شماره ..... و با ضرب کردن مقادیر نرمال شده در عدد ۱۲ کورد ..... مورد نیاز بدست خواهد آمد. (جدول زیر)

Z (فوت)	Y (فوت)	X (فوت)	نقاط
۱۵	۰	۰	۱
/۹۵ ۴	/۹۵ ۱۳	۱/۹۵	۲
/۹۵ ۴	/۷۰ ۸	/۲۵ ۱۱	۳
/۹۵ ۴	/۷۰ -۸	/۲۵ ۱۱	۴
/۹۵ ۴	/۹۵ -۱۳	۱/۹۵	۵
/۹۵ ۴	/۴۰ ۵	/۰۵ -۱۳	۶
/۹۵ ۴	/۴۰ -۵	/۰۵ -۱۳	۷
/۲۵ ۱۱	/۷۰ ۸	۴/۹۵ -	۸
/۲۵ ۱۱	۰	/۰۵ ۱۰	۹
/۲۵ ۱۱	/۷۰ -۸	۴/۹۵ -	۱۰

مثال ۲: در صورتی که تراز فشار صوت در نقاط موردنظر در مثال فوق بشرح ذیل اندازه گیری شده باشند ضریب جهت Q را در جهت اندازه گیری مربوط به  $L_{p5}$  را تعیین نمایید.

$LP_1=94$  ،  $LP_2=96$  ،  $LP_3=93$  ،  $LP_4=98$  ،  $LP_5=105$  ،  $LP_6=102$  ،  $LP_7=98$  ،  $LP_8=96$  ،  $LP_9=94$  ،  $LP_{10}=91$  دسیبل .

حل:

ابتدا  $\bar{L}_P$  را برای نیمکره بدست می آوریم.

$$\bar{L}_P = 10 \log \left[ \frac{1}{10} \left( 10^{9.4} + 10^{9.6} + 10^{9.3} + 10^{9.8} + 10^{10.5} + 10^{10.5} + 10^{10.2} + 10^{9.8} + 10^9 + 10^{9.1} \right) \right]$$

$$L_{P_i} = 95dB$$

$$DI = L_{P5} - \bar{L}_P$$

$$DI_5 = 105 - 96 = 9dB$$

$$Q = 10^{DI_5/10} = 10^{9/10} = 7.94$$



مسئله:

ماشینی در یک محفظه بزرگ anech با انعکاس کف قرار گرفته است. یک array نیمکره، ۱۰ نقطه ای به منظور تعیین متوسط تراز فشار صوت بکار گرفته شده است. در صورتی  $\bar{L}_P$  در نقاط مختلف به شرح  $LP_1=95$ ،  $LP_2=93$ ،  $LP_3=91$ ،  $LP_4=92$ ،  $LP_5=90$ ،  $LP_6=93$ ،  $LP_7=91$ ،  $LP_8=89$ ،  $LP_9=90$ ،  $LP_{10}=91$  بوده است.  
 الف) متوسط تراز فشار صوت چقدر است؟  
 ب) فاکتور جهت Q در جهت  $LP_1$  چقدر است؟  
 ج) فاکتور جهت Q در جهت  $LP_3$  چقدر است؟

۴- موانع صوتی: همانطور که در شکل ... نشان داده شده است موانع صوتی هم برای محیط های داخل کارگاه و هم محیط زیست کاربرد دارد. امواج صوتی پس از برخورد به قسمت فوقانی موانع صوتی پراکنده شده و در پشت مانع منطقه سایه ایجاد می کند. بخش دیگری از امواج صوتی پس از برخورد به مانع بازتاب نموده و بخش دیگر بدون برخورد به مانع به فضا منتشر می شود. بنابراین فردی که در پشت مانع قرار دارد صدا را با شدت کمتری می شنود که این امر به علت خاصیت پراکندگی صوت می باشد. بنابراین قسمت سایه (که صوت شنیده نمی شود) برای مهندسین کنترل صدا حائز اهمیت است. لذا بکارگیری روشهای تجزیه و تحلیل جهت برآورد میزان کاهش صدا در موانع صوتی مهم است. چون قرار گرفتن اپراتور در منطقه سایه باعث می شود که امواج صوتی اصلاً شنیده نشود. بنابراین استفاده از موانع صوتی هم در محیط های صنعتی و هم در محیط زیست (مانند منازل کنار راه آهن) عملی است برای محاسبه میزان کاهش صدا ۱ می توان از فرمول، نمودار و جدول استفاده نمود.

الف) استفاده از فرمول

میزان کاهش صدا Ab در موانع صوتی با استفاده از رابطه زیر عملی است:

$$Ab = 20 \log \left( \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \right) + 5$$

بطوری که:

N = عدد فرنل و tanh برابر با تانژانت هیپربولیک می باشد.

$$N = \frac{2\delta}{\lambda}$$

$$\delta = \sqrt{S^2 + h^2} - S + \sqrt{R^2 + h^2} - R$$

$\delta$  = اختلاف بین مسیر پراکنده شده diffracted path از مسیر مستقیم direct path می باشد.

S = فاصله بین منبع صوت تا مانع صوتی برحسب متر و در خط بینایی

R = فاصله بین دریافت کننده صوت (اپراتور) از مانع صوتی برحسب متر و در خط بینایی

h = ارتفاع موثر مانع (ارتفاع مانع از خط بینایی به بالا) برحسب متر

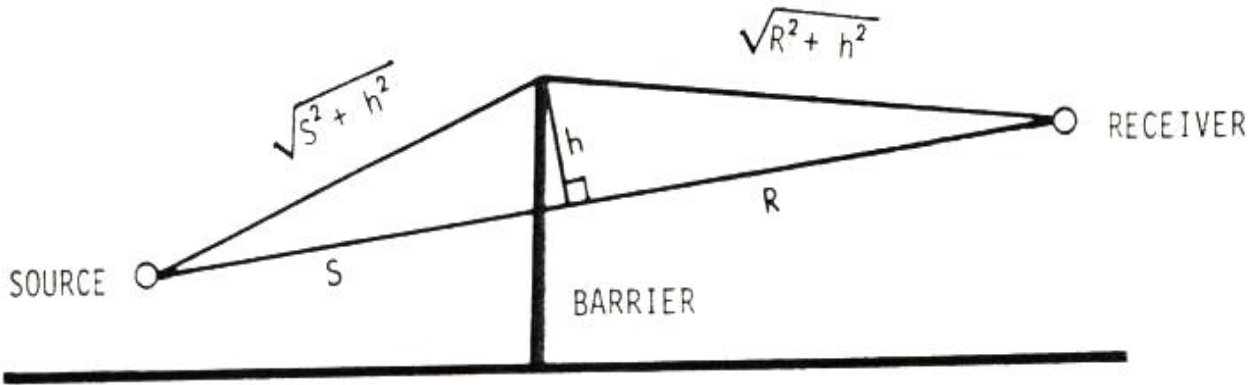


Figure 4.11 Partial barrier and relevant parameters to determine attenuation.

تصویر شماره .....: مانع صوتی و پارامترهای مرتبط جهت تعیین میزان کاهش صدا

(ب) استفاده از نمودار:

در نمودار ..... محور افقی مربوط به عدد فرنل و محور عمودی میزان کاهش صدا برای دو منبع نقطه ای و خطی می باشد برای تعیین میزان کاهش ابتدا عدد فرنل بدست آمده را روی محور افقی مشخص می کنیم سپس از این نقطه به نمودار مربوط به نوع منبع (منبع نقطه ای یا خطی برحسب مورد) وصل می کنیم از محل تقاطع خطی به محور عمودی وصل می کنیم و عدد حاصله را قرائت می کنیم این عدد میزان کاهش صدا را نشان می دهد.

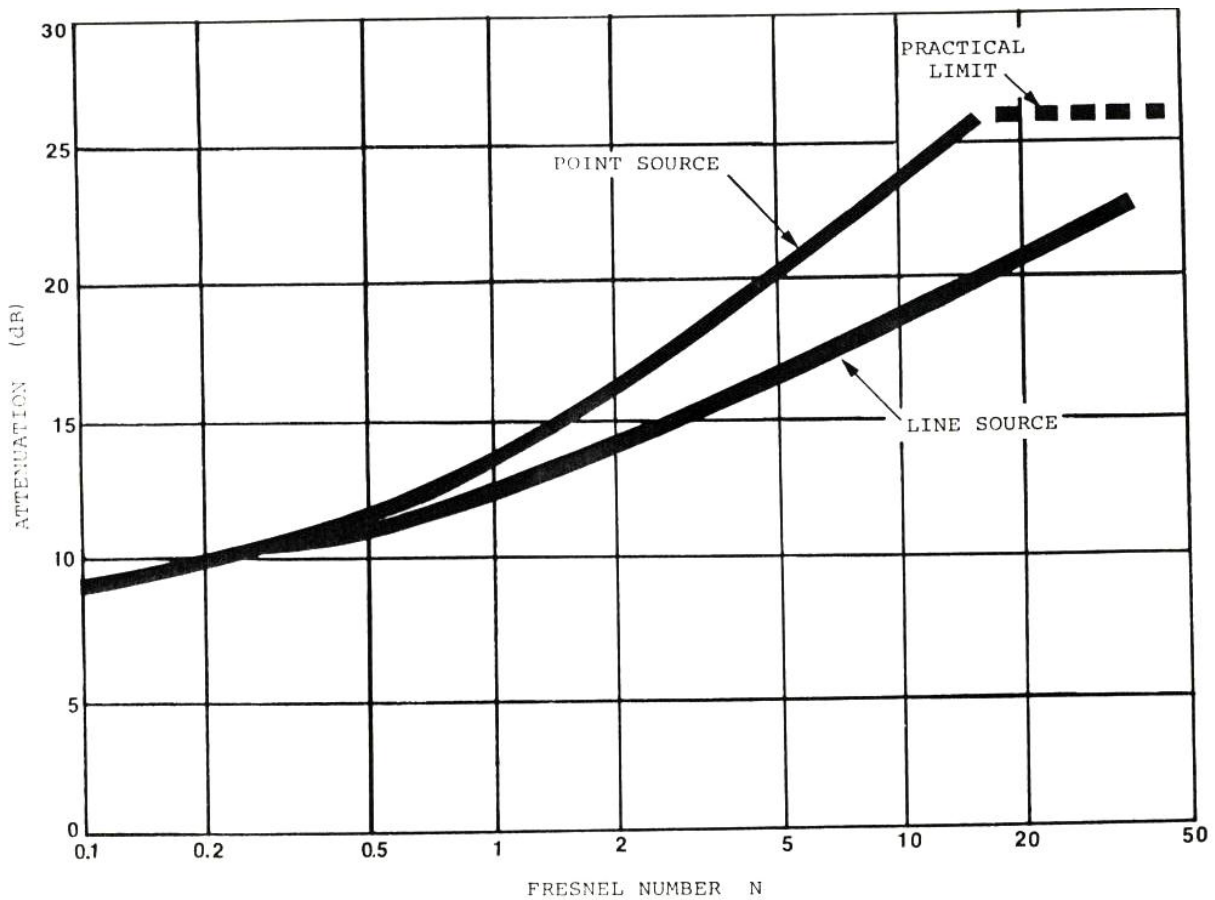


Figure 4.12 Attenuation due to a partial barrier for point and line sources.

نمودار شماره .....: نمودار مربوط به کاهش صدا در موانع صوتی برای منابع نقطه ای و خطی (ج) استفاده از جدول:

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

در جدول شماره ..... اطلاعات مربوط به طول موج محاسبه شده برای هر یک از فرکانس های مرکزی اکتاو باند بر حسب فوت ، عدد فرنل و میزان کاهش صدا  $A_b$  به ترتیب در سطر اول، دوم و سوم جدول آمده است. حال با دانستن طول موج و عدد فرنل می توان میزان کاهش صدا را بدست آورد. برای مثال چنانچه طول موج صوت ۱/۱ فوت و عدد فرنل ۳/۱ باشد میزان کاهش صوت به علت مانع صوتی برابر با ۱۷ دسیبل خواهد بود.

Table 4.1 Computation Table

	Octave Band Center Frequencies (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1. $\lambda_{cf}$ (ft) $c = 1100$ ft/s	17.5	8.7	4.4	2.2	1.1	0.55	0.27	0.14
2. $N_{cf}$ = Fresnel number	0.2	0.4	0.8	1.5	3.1	6.2	12.4	24.7
3. Attenuation $A_b$ at inspection station (dB)	9	11	13	15	17	22	24	26

جدول .....:: تعیین میزان کاهش صدا در مانع صوتی  
 مثال: یک مانع صوتی به ارتفاع ۸ فوت در فاصله ۳ فوتی از یک دستگاه پرس قرار گرفته است. (مطابق شکل ....) میزان کاهش صدا را در محل قرارگیری کارگر (ایستگاه بازرسی) که به فاصله ۱۰ فوتی از مانع قرار گرفته است را محاسبه نمایید.

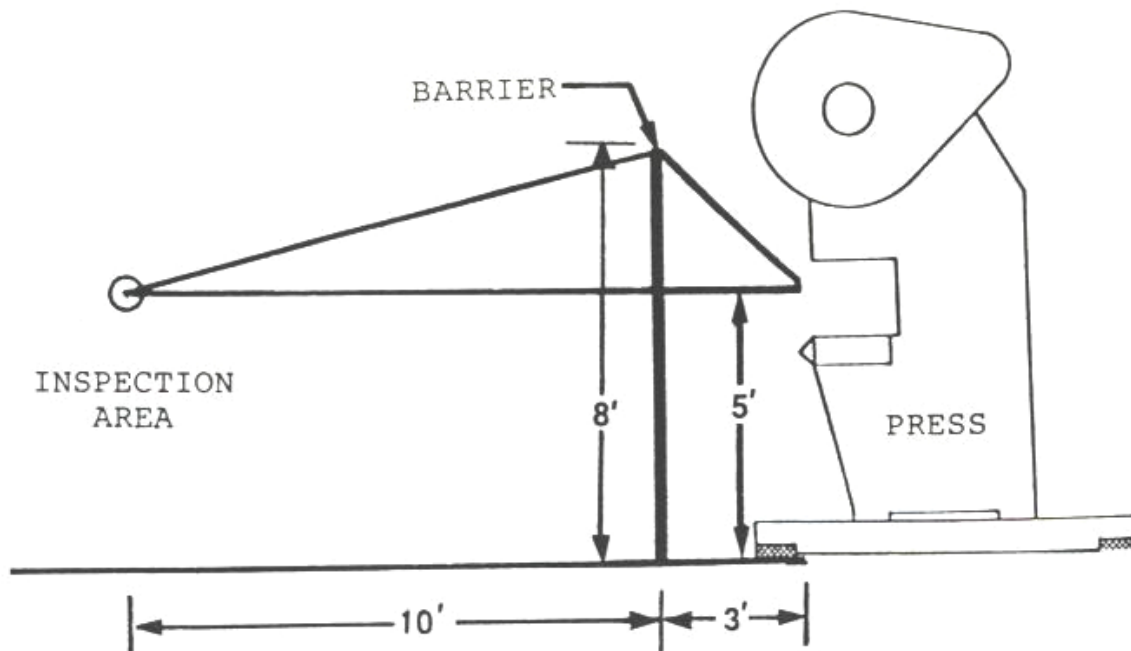


Figure 4.13 Press and inspection area and partial barrier.

شکل .....: محل قرارگیری دستگاه پرس، منطقه بازرسی و مانع صوتی

حل: اگر ارتفاع خط بینایی  $h$  فوت فرض شود بنابراین ارتفاع موثر  $h$  برابر است با:

$$h = 8 - 5 = 3$$

حال با داشتن  $S = 3$  و  $R = 10$  فوت محاسبه را انجام می دهیم.

$$\delta = \sqrt{3^2 + 3^2} - 3 + \sqrt{10^2 + 3^2} - 10$$

$$\delta = 1.7f$$

حال عدد فرنل را برای کلیه فرکانس های مرکزی اکتاو باند بدست می آوریم:

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} = \frac{2 \times 1.7}{17.5} = 0.2$$

$$N = \frac{2 \times 1.7}{8.7} = 0.4$$

چنانچه عدد فرنل را برای فرکانس ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ بدست آوریم جواب به ترتیب برابر با ۰/۸، ۱/۵، ۳/۱، ۶/۲، ۱۲/۴ و ۲۴/۷ خواهد بود.

بعد از محاسبه کاهش صوت (Ab) برای کلیه فرکانس ها ملاحظه می شود که میزان کاهش در منطقه بازرسی از ۹ تا ۲۶ دسیبل می باشد. لذا نقطه قابل توجه این است که بازدهی و کارایی مانع صوتی در فرکانس های بالاتر بیشتر از فرکانس های پایین می باشد. چون میزان کاهش صدا در فرکانس ۸۰۰۰ (۲۶ دسیبل) بیشتر از فرکانس ۶۳ هرتز (۹ دسیبل) می باشد. باید تاکید نمود که میزان کاهش صدای محاسبه شده در رابطه فوق برای منابع نقطه ای با مانع نیمه اینفینیت می باشد لذا در عمل میزان کارایی موانع صوتی مقداری کمتر است و این موضوع برای صدای داخل کارگاه که موانع صوتی finite بوده و منبع صدا نیز نقطه ای نمی باشد صادق تر است. از طرف دیگر امواج صوتی منبع معمولاً از طریق بازتاب دیوارها، سقف و تجهیزات جنبی نیز به کارگر خواهد رسید لذا کارایی موانع صوتی به دلایل فوق کاهش خواهد یافت.

در صورت دخیل نمودن تاثیر موانع صوتی در رابطه شماره ..... می توان تراز فشار صوت را برای منبع نقطه ای بشرح زیر بیان نمود.

$$L_p = L_w + DI - 2 \cdot \log r - A_b - 11$$

نتایج نشان می دهد که کاهش صدا برای منابع خطی ۱ تا ۵ دسیبل کمتر از منابع نقطه ای است. این اختلاف به عنوان عامل عدد فرنل در نمودار ..... نشان داده شده است. همانطور که در نمودار ملاحظه می شود میزان کاهش صدا در منابع نقطه ای و خطی برای فرکانس های پایین که عدد فرنل کوچک است تقریباً یکسان است ولی چنانچه عدد فرنل بالاتر از ۱۰ باشد میزان کاهش در منابع خطی حدود ۵ دسیبل کمتر از منابع نقطه ای است.

مثال: در صورتی که در مثال قبل ناحیه مرده دستگاه پرس منبع خطی فرض شود میزان کاهش صدا را در فرکانس ۱۰۰۰ و ۸۰۰۰ محاسبه نمایید.

حل: با توجه به جدول ..... عدد فرنل برای فرکانس های ۱۰۰۰ و ۸۰۰۰ به ترتیب ۳/۱ و ۲۴/۷ می باشد. حال با استفاده از نمودار ..... میزان کاهش صدا برای منبع خطی به ترتیب برای اعداد فرنل فوق ۱۵ و ۲۱ دسیبل خواهد شد. با توجه به مقایسه نتایج بدست آمده برای منبع خطی نسبت به منبع نقطه ای ملاحظه می شود که میزان کاهش برای منبع خطی ۲ تا ۵ دسیبل کمتر از منبع نقطه ای است.

#### ۵- انتشار صوت در محیط های باز

یک سوال عمده در رابطه با کنترل صدا این است که اگر منبع صدا در نقطه A باشد تراز صوت در نقطه B چقدر است؟ برای پاسخ به این سوال ابتدا باید درک صحیحی از خواص اصلی انتشار صوت داشته باشیم. برای روشن شدن موضوع باید تاثیر سطوح بازتابی در محیط و همچنین موانع صوتی را بدانیم در این قسمت به منابع صوت نقطه ای، خطی و سطحی و همچنین موانع صوتی اشاره خواهد شد. انتشار صوت در خارج از کارگاه در فواصل بیش از چند صد فوت (یا متر) بطور قابل ملاحظه ای تحت تاثیر شرایط جوی و پوشش سطحی بشرح ذیل قرار می گیرد:

#### ۵-۱- جذب توسط هوا (Atmospheric absorption)

انرژی صوت طی فرایندهای مولکولی متنوعی تحت عنوان جذب صوت توسط هوا به تدریج به حرارت تبدیل می شود. این فرآیند جذب بستگی به درجه حرارت و رطوبت هوا دارد. کاهش صدا به علت جو (Aa) را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$A_b = \frac{a \times d}{100} \text{ dB}$$

بطوری که:

a = ضریب کاهش جو برحسب دسیبل به ازای هر ۱۰۰ متر  
d = فاصله بین منبع صوت و دریافت کننده برحسب متر

همانطور که بیان شد میزان کاهش بستگی به درجه حرارت و رطوبت نسبی دارد. جدول شماره ..... ضریب کاهش را برای طیف وسیعی از درجه حرارت و رطوبت نسبی داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود ضریب کاهش با افزایش فرکانس بطور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.

جدول .....: ضریب کاهش صدا در هوا در فشار جو یک استاندارد برحسب دسیبل به ازاء ۱۰۰ متر

فرکانس						رطوبت نسبی	درجه حرارت برحسب درجه سانتیگراد
۴۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۱۲۵		
					۰/۰۶	۲۰	۳۰
					۰/۰۳	۵۰	
					۰/۰۲	۹۰	
					۰/۰۷	۲۰	۲۰
					۰/۰۴	۵۰	
					۰/۰۲	۹۰	
					۰/۰۶	۲۰	۱۰
					۰/۰۴	۵۰	
					۰/۰۳	۹۰	
					۰/۰۵	۲۰	۰
					۰/۰۴	۵۰	
					۰/۰۳	۹۰	

مثال: تراز صدای فن بزرگ در فاصله ۵۰ متری ۱۱۰ دسیبل در فرکانس ۵۰۰ هرتز و ۹۰ دسیبل در فرکانس ۴۰۰۰ هرتز می باشد. تراز صدا را در فاصله ۵۰۰ متری از منبع را در یک شب تابستانی با درجه حرارت ۲۰ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد چقدر است؟

حل: ابتدا تراز فشار صوت را در فاصله ۵۰۰ متر بدون تاثیر درجه حرارت و رطوبت در دو فرکانس محاسبه می کنیم.

$$LP_2 = LP_1 - 20 \log \frac{r_2}{r_1}$$

$$LP_2 = 110 - 20 \log \frac{500}{50}$$

$$LP_2 = 110 - 20 = 90dB \quad \text{در فرکانس ۵۰۰ هرتز}$$

$$LP_2 = 90 - 20 \log 10$$

$$LP_2 = 90 - 20 = 70dB \quad \text{در فرکانس ۴۰۰۰ هرتز}$$

حال تاثیر درجه حرارت و رطوبت را برای دو فرکانس بدست می آوریم:

$$Aa = \frac{a \times b}{100}$$

$$Aa = \frac{0.28 \times (500 - 50)}{100} = 1.3dB \quad \text{برای فرکانس ۵۰۰ هرتز}$$

$$Aa = \frac{2.8 \times (500 - 50)}{100} = 13dB \quad \text{برای فرکانس ۴۰۰۰ هرتز}$$

همانطور که ملاحظه می شود با افزایش فرکانس، جذب صوت در هوا بطور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. چون در فرکانس ۵۰۰ هرتز کاهش صوت ۱/۳ دسیبل ولی برای فرکانس ۴۰۰۰ هرتز برابر با ۱۳ دسیبل می باشد. در مرحله بعد تاثیر باید توام شرایط جوی و فاصله را بدست آوریم.

$$LP_{\dots Hz} = 90 - 1.3 = 88.7 \text{ dB} \quad \text{برای فرکانس ۵۰۰ هرتز}$$

$$LP_{\dots Hz} = 70 - 13 = 57 \text{ dB} \quad \text{برای فرکانس ۴۰۰۰ هرتز}$$

## ۵-۲- تاثیر باد در کاهش صدا

باد و جهت آن دومین تاثیر در انتشار صوت را داراست در صورتی که سرعت باد بین ۶ تا ۲۰ نات knots باشد تاثیر آن در مقایسه با سرعت حدود ۷۰۰ نات قابل صرف نظر می باشد.

## ۵-۳- تاثیر زمین در کاهش صدا : در مطالعات مختلف میزان کاهش صدا در فواصل زیاد به علت زمین مشاهده شده است

که این کاهش برحسب نوع پوشش مانند چمن grass، shrub و درختان متفاوت است علیهذا گرچه اطلاعات موجود به عنوان یک راهنما قابل استفاده است ولی اختلاف نظرهای زیادی نیز بین محققین وجود دارد.

میزان کاهش صدا  $A_t$  برای درختان مختلف به ازای هر ۱۰۰ متر طبق رابطه زیر خواهد بود:

$$A_t = F^{\frac{1}{3}}$$

بطوری که:  $F$  = فرکانس مرکزی اکتاو باند

همچنین فرمول فوق را می توان به صورت نمودار ..... برای درختان با برگ و همچنین درختان بی برگ در زمستان نشان داد.

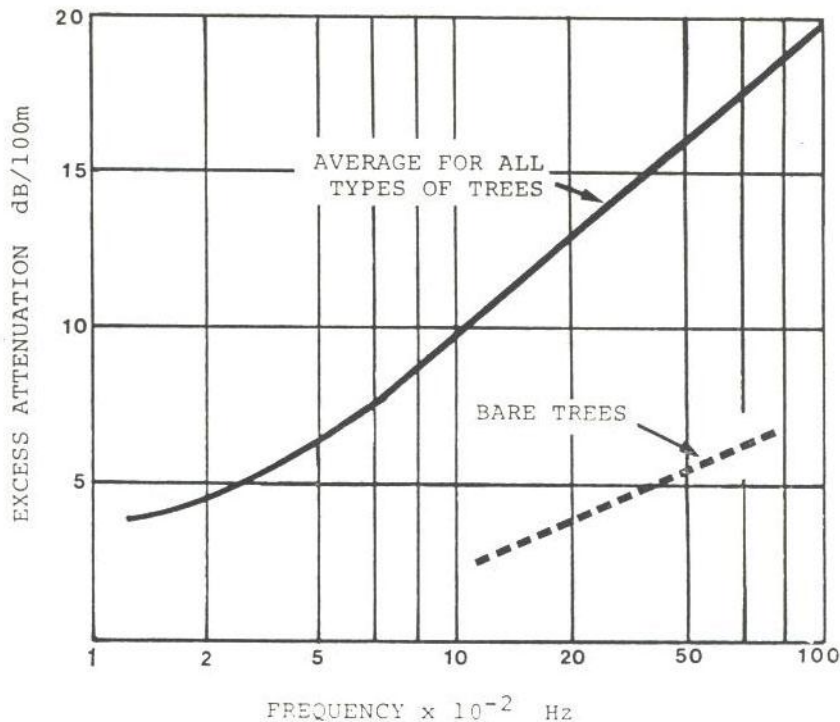


Figure 4.14 Excess attenuation  $A_t$  for sound propagation through trees.

نمودار ..... : نمودار کاهش صدا برای انواع مختلف درختان و درختان بی برگ

مثال: در صورتی که در کنار یک بزرگراه درختانی به عمق ۲۰۰ متر وجود داشته باشد میزان کاهش صدا را برای فرکانس های ۱۲۵، ۱۰۰۰ و ۴۰۰۰ هرتز محاسبه نمایید. میزان کاهش در فصل زمستان چقدر است؟

حل: میزان کاهش در فرکانس ۱۲۵ به ازای هر ۱۰۰ متر برابر است با

$$A_t = 125^{\frac{1}{3}} = 5 \text{ dB}/100\text{m}$$

بنابراین میزان کاهش برای ۲۰۰ متر برابر با  $10 = 5 \times 2$  دسیبل خواهد شد. حال میزان کاهش برای فرکانس ۱۰۰۰

برابر با  $A_t = 1000^{\frac{1}{3}} = 10$  دسیبل به ازای ۱۰۰ متر و ۲۰ دسیبل ( $10 \times 2$ ) برای ۲۰۰ متر خواهد شد و این کاهش برای ۴۰۰۰ هرتز برابر با  $15.9/9$  دسیبل و برای ۲۰۰ متر برابر با  $31/8 = 15.9/9 \times 2$  دسیبل خواهد بود.

$$A_t = 4000^{\frac{1}{3}} = 15.9 \text{ dB}/100\text{m}$$

در فصل زمستان که درختان بی برگ هستند میزان کاهش صدا با توجه به نمودار برای فرکانس ۱۲۵ ناچیز بود. ولی برای فرکانس ۱۰۰۰ و ۴۰۰۰ هرتز به ترتیب ۶ و ۱۰ دسیبل می باشد. همانطور که ملاحظه می شود برگ درختان نقش اصلی در کاهش صدا ایفا می نمایند. از طرفی چنانچه عمق درختکاری به ۱۵ متر کاهش یابد، میزان کاهش صدا ناچیز خواهد بود به عبارتی می توان گفت این عمق درخت فقط دید افراد به بزرگراه را کاهش خواهد داد و تاثیری در کاهش صدا نخواهد داشت.

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

$$\bar{A}g = 18\log(f) - 31dB/100m$$

بطوری که  $f =$  فرکانس صوت

همانطور که ملاحظه می شود میزان کاهش صدا توسط درختچه و بوته بطور قابل ملاحظه ای در فرکانس های بالا بیشتر از فرکانس های پایین می باشد.

مثال: در صورتی که مزرعه ذرت به عمق ۵۰ متر داشته باشیم میزان کاهش صدا در فرکانس های ۱۲۵، ۱۰۰۰ و ۴۰۰۰ هرتز را محاسبه نمایید.

$$\bar{A}g = 1.8\log 125 - 3.1 = 6.7dB/100m$$

دسیبل به ازای ۱۰۰ متر

حال میزان کاهش صدا برای ۵۰ متر برابر است با:  $0.5 \times 6.7 = 3.4dB$   
میزان کاهش صدا در فرکانس ۱۰۰۰ برابر است با:

$$\bar{A}g = 1.8\log 1000 - 3.1 = 23dB/100m$$

حال میزان کاهش صدا برای ۵۰ متر برابر است با:  $23 \times 0.5 = 11.5dB$   
و در نهایت میزان کاهش صدا برای فرکانس ۴۰۰۰ هرتز برابر است با:

$$\bar{A}g = 1.8\log 4000 - 3.1$$

$$Ag = 33.8dB/100m$$

و برای ۵۰ متر برابر است با:  $0.5 \times 33.8 = 16.9dB$

همانطور که مثال نشان می دهد واضح است که برای کاهش قابل ملاحظه صدا باید محدوده بزرگی از بوته و درختچه موجود باشد و این موضوع برای کلیه درختان و زمین ودرختچه صادق است و کاهش صدا زمانی ارزش خواهد داشت که حداقل عمق جنگل و یا درختکاری و مزارع ۱۰۰ متر باشد و این مهم می تواند در مناطق صنعتی بویژه محل مولدهای برق گازی، نیروگاههای برق و مناطق صنعتی پتروشیمی و محل آزمایش قطعات سفینه فضایی بکار گرفت.

## انواع صدا

در زندگی روزمره و صنعت شما با وسایل و دستگاههای متفاوتی آشنا هستید که به نحوی از انحاء منبع تولید صدا هستند. ولی نوع صدا از نظر تولید، تغییرات دامنه صوت، فرکانس و توزیع انرژی و انتشار با یکدیگر یکسان نیستند. صدای صنعت جزء اصوات نامنظمی هستند که ناخوشایند و ناخواسته می‌باشند و معمولاً رابطه مشخصی بین دامنه فشار، فرکانس و طول موج آنها وجود ندارد (برعکس اصوات موسیقی). بنابراین می‌توان آنها را اصوات مختلط غیردوره‌ای نیز نامید.

اصوات از نظر توزیع انرژی به دو دسته اصوات با باند باریک و اصوات با باند پهن تقسیم می‌شوند. در صورتی که حداکثر انرژی صوتی (فشار صوتی) در یک محدوده و طیف محدود از فرکانس منتشر شود در این صورت صوت از نوع باند باریک است. در حالی که اگر انرژی صوتی در یک طیف وسیع فرکانسی توزیع و منتشر شود صوت از نوع باند پهن می‌باشد. صدای دستگاههای مخلوط کن، موتورهای درون سوز، آسیاب و... همگی از این نوع هستند.

از نظر تغییرات دامنه و زمان تداوم، می‌توان صدا را به دو طبقه بندی کلی اصوات پیوسته و اصوات ضربه‌ای و کوبه‌ای تقسیم بندی نمود. ویژگی اصوات پیوسته این است که در طول زمان انتشار خود وقفه ندارند. این اصوات خود به سه زیر گروه اصوات یکنواخت، اصوات متغیر با زمان و اصوات منقطع یا نوبتی تقسیم می‌شوند. تغییرات تراز فشار در صوت یکنواخت جز بی بوده و اغلب کمتر از ۵ دسیبل می‌باشد. در حالیکه تغییرات تراز فشار صوت در اصوات متغیر با زمان بین ۱۵-۵ دسیبل و در اصوات منقطع بیش از ۱۵ دسیبل در طول زمان است.

در بعضی کتب اصوات ضربه‌ای و کوبه‌ای تحت عنوان نویز ایمپالس متناوب و تکراری نیز ذکر شده است. این گونه صداها پس از قطع ضربه اول، عیناً ضربه یا پالس بعدی تکرار می‌شود. موج فشار صوت در هر ضربه در کسری از زمان (معمولاً کمتر از ۰/۵ ثانیه) شروع و خاتمه می‌یابد. صدای ضربه‌ای مانند صدای شلیک خمپاره، توپ و قبضه تفنگ می‌باشد. زمان اوج گیری موج فشار کوتاه ولی دامنه فشار بسیار بزرگ می‌باشد. بطوری که در نقطه پیک خود ممکن است به ۱۹۰ دسیبل نیز برسد. در حالی که در صدای کوبه‌ای (مانند صدای ناشی از پرس‌های ضربه‌ای، ابزارهای بادی و غیره) زمان اوج‌گیری موج فشار کوتاه ولی دامنه فشار بر حسب وضعیت منبع تولید صوت متغیر بوده و معمولاً بیش از ۲۰ دسیبل از صدای زمینه بالاتر است. دامنه صوت کوبه‌ای در نقطه پیک ممکن است به ۱۴۰ دسیبل نیز برسد. ضمناً زمان تداوم در صوت کوبه‌ای بیشتر از صدای ضربه‌ای است.



در هنگام بررسی مسائل فوق از روش عمومی بهداشت حرفه‌ای می‌توان پیروی نمود که این امر مستلزم بکار بردن مراحل زیر است:

- ۱- بررسی و شناسایی<sup>۱</sup>
- ۲- اندازه‌گیری<sup>۲</sup>
- ۳- ارزشیابی<sup>۳</sup>
- ۴- کنترل<sup>۴</sup>

در مرحله اول یعنی بررسی و شناسایی باید به عوامل انسانی و محیطی توجه نمود.

## ۲- اندازه‌گیری<sup>۵</sup>

اندازه‌گیری صدا یکی از مراحل مهم بررسی صدا در محیط کار می‌باشند. اندازه‌گیری صدا و بررسی مشکلات ناشی از تماس با سروصدا بیش از ۹۰ دسی‌بل به ترتیب به عهده مهندسی بهداشت حرفه‌ای و متخصص طب‌کار می‌باشد. در اندازه‌گیری سروصدا معمولاً عوامل ذیل مدنظر قرار می‌گیرند:

الف) شدت صدا: که بصورت تراز فشار صوت اندازه‌گیری می‌شود. گرچه این دو اصطلاح باهم فرق دارند. ولی در این مبحث از اختلاف آنها چشم پوشی می‌شود. تراز فشار صوت توسط دستگاهی به نام ترازسنج صوت<sup>۶</sup> اندازه‌گیری می‌شود. امروزه انواع مختلف ترازسنج صوت از ساده تا بسیار پیچیده و مجهز در بازار موجود می‌باشند. ولی همه دستگاهها قادرند تراز کلی فشار را برای تمام فرکانس‌ها از حدود ۲۰ دسیبل تا حدود ۱۴۰ دسیبل اندازه‌گیری نمایند. اغلب ترازسنج‌های صوت از سه شبکه<sup>۷</sup> حساس به فرکانس یعنی شبکه A، B و C تشکیل شده‌اند. معمولاً اهداف متعددی در اندازه‌گیری صدا مدنظر قرار می‌گیرد. لذا بسته به نوع هدف، دستگاه اندازه‌گیری مناسب و روش مطلوب و بهینه انتخاب خواهد شد. همانطور که قبلاً بیان شد دستگاههای اندازه‌گیری زیادی توسط شرکت‌های سازنده طراحی و ساخته شده‌اند. در صورتی که بازرسی ساده مد نظر باشد یک دستگاه ترازسنج صوت که بتواند تراز فشارصوت را در شبکه Lin اندازه‌گیری نماید کافی است ولی چنانچه بنا بر هدف بخواهیم تراز فشار صوت را با دقت ۱-۰/۵ دسیبل اندازه‌گیری نماییم باید دستگاهی انتخاب کنیم که علاوه بر توانایی فوق امکان اندازه‌گیری در شبکه‌های توزین فرکانس A و C وجود داشته باشد. در صورتی که بخواهیم تجزیه صدا را انجام دهیم باید از صداسنج دقیق با شبکه‌های C و Lin که مجهز به آنالیزور صدا باشد استفاده نماییم. در صورتی که اندازه‌گیری صورت محدود به اندازه‌گیری تراز صوت با دستگاه ترازسنج صوت است و دسترسی به دستگاه تجزیه‌کننده صدا ندارید پیشنهاد می‌شود که از دو شبکه A و C اندازه‌گیری انجام شود زیرا با در دست داشتن اعداد حاصل از دو شبکه از یک محل خاصی در مورد توزیع فرکانس در آن محل قضاوت گردد بطوریکه اگر تراز صوت در هر دو مورد برابر بود احتمالاً صورت بیشتر در فرکانس‌های بیشتر از ۶۰۰ هرتز متمرکز است ولی چنانچه تراز صوت در شبکه C حدود چند دسیبل بیشتر از تراز صوت در شبکه A باشد معلوم می‌شود که صوت بیشتر در فرکانس کمتر از ۶۰۰ هرتز متمرکز است حال هرچه این اختلاف بیشتر باشد بیانگر این است که صورت مربوط در فرکانس در پایین‌تر متمرکز بوده در عبارتی صوت از نوع ۴۰ می‌باشد بطور کلی اختلاف تراز صوت شبکه‌های A و C ( $LP_C - LP_A$ ) بر حسب دسیبل را اندیس هارمونیک می‌نامند. شبکه A به فرکانس‌های پایین کمتر حساس است ولی شبکه C تنها شبکه‌ای است که تراز فشار صوت واقعی را نشان می‌دهد شبکه Lin در مواقعی کاربرد دارد که بخواهیم برای تجزیه فرکانس‌ها گراف رسم کنیم در صورتی که تراز صوت در دو شبکه A و C یکسان باشد مشخص می‌شود که فرکانس صوت ۱۰۰۰ هرتز می‌باشد (شکل -). پس از انتخاب دستگاه مناسب باید اطمینان حاصل شود عددی که دستگاه به شما نشان می‌دهد صحیح و دقیق است. برای این منظور لازم است دستگاه ترازسنج را با وسیله‌ای استاندارد کالیبره نمود. دستگاه مربوطه که کالیبراتور نام دارد صدای مشخصی (تراز فشار صوت ۱۱۰ دسیبل) را در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز تولید می‌کند. حال چنانچه کالیبراتور بر روی میکروفون ترازسنج صوت نصب و دستگاه را روشن کنیم ترازسنج صوت باید عدد ۱۱۰ دسیبل در شبکه A نشان دهد در غیر این صورت لازم است با استفاده از یک پیچ گوشتی مخصوص پیچ مربوط به کالیبراسیون در جهت مناسب چرخاند تا دقیقاً ۱۱۰ دسیبل توسط دستگاه نشان داده شود. حال برحسب هدف و با آماده شدن دستگاه مرحله بعد یعنی اندازه‌گیری را انجام می‌دهیم. گرچه اهداف اندازه‌گیری به عنوان مهمترین عامل تعیین روش بررسی متعدد است ولی مهمترین اهداف اندازه‌گیری به شرح ذیل می‌باشند.

### ۱- تعیین منابع اصلی تولید صدا در کارگاه

در مبحث جمع ترازها به این نکته پی بردید که اثر ترکیبی ترازها بر روی بالاترین تراز فشار صوت موجود است برای مثال چنانچه ۱۰ دستگاه بافندگی با تراز فشار صوت یکسان ۹۰ دسیبل در یک کارگاه وجود داشته باشد. حال چنانچه هر ۱۰

<sup>۱</sup> anticipation

<sup>۲</sup> measurement

<sup>۳</sup> assessment

<sup>۴</sup> Control

<sup>۵</sup> measurement

<sup>۶</sup> sound level meter

<sup>۷</sup> weighting

دستگاه باهم روشن باشند تراز فشار صوت کارگاه حدود یکصد دسیبل خواهد شد. حال چنانچه یکی از دستگاهها مثلاً پس از تعمیر ناقص، نصب نامناسب و غیره تراز آن به ۱۰۰ دسیبل افزایش پیدا کند حال تراز فشار صوت کارگاه یا به عبارتی ۱۰ دستگاه بافندگی به حدود ۱۱۰ دسیبل افزایش خواهد یافت. به عبارتی، عیب يك دستگاه می‌تواند به اندازه ۱۰ دسیبل تراز فشار صوت کارگاه را افزایش دهد. بنابراین یکی از اهداف اندازه‌گیری این است که منبع اصلی صدا را مانند آنچه در مبحث روش تفاضل ترازهای فشار صوت بیان شد، شناسایی نمود.

### ۲- تعیین تراز فشار صوت يك دستگاه مشخص

تراز فشار صوت يك دستگاه ممکن است در فواصل مختلف از دستگاه و یا در زمان‌های مختلف شیفت کار متفاوت باشد. در حالت اول تراز فشار صوت در فواصل مختلف اندازه‌گیری و سپس با استفاده از رابطه مربوطه، تراز فشار صوت متوسط  $\bar{LP}$  را محاسبه می‌کنیم. در حالت دوم، تراز فشار صوت را در زمان‌های مختلف شیفت اندازه‌گیری و به روش فوق  $\bar{LP}$  را محاسبه می‌کنیم.

### ۳- تعیین میزان مواجهه کارگر

برای تعیین حدود مواجهه کارگر، لازم است تراز فشار صوت را در ناحیه شنوایی کارگر و در مقیاس A در محل‌های توقف یا تردد کارگر اندازه‌گیری نمود. همچنین مدت زمان مواجهه هر کارگر در مکان‌های مختلف می‌باشد. در صورتی که محل استقرار کارگر در طول شیفت ثابت و تراز فشار صوت در زمان‌های مختلف شیفت نیز یکنواخت باشد، تراز فشار صوت اندازه‌گیری شده در محل استقرار کارگر نماینده میزان مواجهه او می‌باشد ولی در صورتی تراز فشار صوت (با فرض ثابت بودن موقعیت کارگر) در زمان‌های مختلف شیفت متغیر باشد و یا تراز فشار صوت در اطراف دستگاه متفاوت بوده و کارگر در موقعیت‌های مختلف تردد و یا حضور دارد متوسط تراز فشار صوت را محاسبه می‌کنیم (طبق آنچه در قسمت ۲ بیان شد) و سپس با احتساب مدت زمان مواجهه در زمان‌ها و مکان‌های مختلف، ارزیابی می‌کنیم. در این خصوص چنانچه مدت زمان تماس کارگر معین باشد مقادیر اندازه‌گیری شده در هر مواجهه و زمان مربوطه را داریم و با استفاده از رابطه

$$\bar{L}_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{T_r} \sum_{i=1}^n T_i \times 10^{L_{pi}/10} \right) \text{dB}$$

تراز معادل ۸ ساعته برای کارگر محاسبه می‌کنیم. ولی در صورتی که مدت زمان

مواجهه نامعین و تراز فشار صوت در زمان‌های مختلف نیز متغیر باشد بهترین راه اندازه‌گیری استفاده از دستگاه دزیمر صدا می‌باشد. مزیت دزیمری این است که دستگاه دزیمر در تمام طول شیفت همراه کارگر می‌باشد. بطوری که در ابتدای شیفت دستگاه روشن و پس از پایان شیفت خاموش می‌شود. در این صورت کلیه تغییرات تراز فشار صوت در زمان و مکان‌های مختلف لحاظ و مواجهه واقعی کارگر و به عبارتی دز دریافتی صدا را نشان می‌دهد (دقت شود دستگاه کالیبره شده و میکروفون در ناحیه شنوایی کارگر نصب شود).

### ۴- تعیین تاثیر صدای زمینه<sup>۱</sup>

با توجه به تاثیر صدای زمینه لازم است میزان تاثیر آن را مشخص نماییم. برای این منظور ابتدا دستگاه را خاموش کرده و تراز صدای زمینه را اندازه‌گیری و یادداشت می‌کنیم. سپس دستگاه را روشن کرده و تراز صدای کلی یا جمع‌ی را اندازه‌گیری و یادداشت می‌کنیم. حال در صورتی که اختلاف تراز صدای زمینه و صدای کلی بیش از ۱۰ دسیبل یا بیشتر باشد یعنی تاثیر صدای زمینه ناچیز می‌باشد

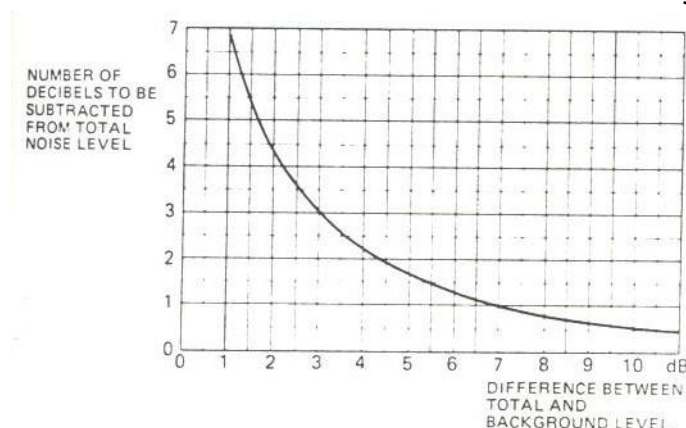
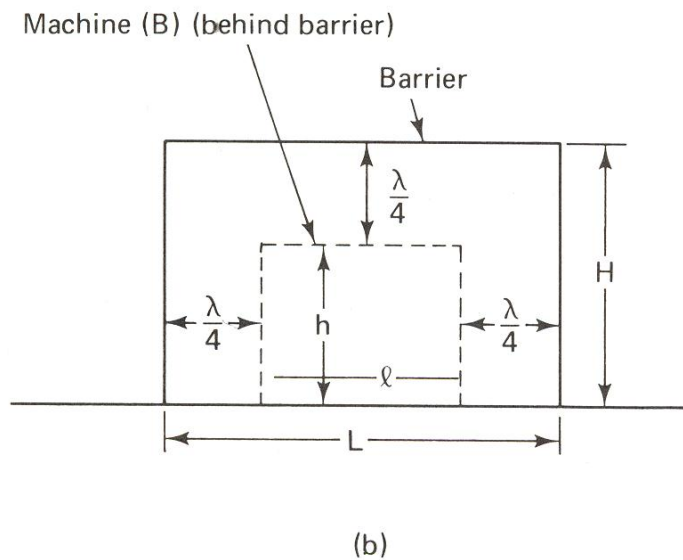
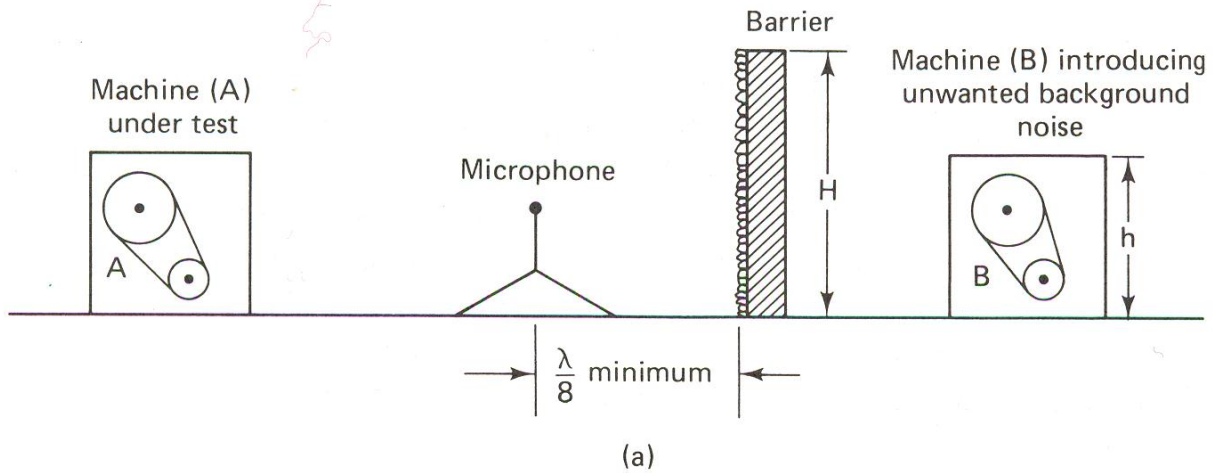


Figure 5.9 Corrections for background noise. (From Ref. 3.)

<sup>۱</sup> ambient or background noise



### ۵- تعیین محدوده خطر در کارگاه

برای تعیین محدوده‌های خطر لازم است تراز فشار صوت را در نقاط مختلف کارگاه اندازه‌گیری و تعیین نمود. برای این منظور معمولاً از روش‌های مختلف مانند روش تهیه نقش ناحیه بندی صوتی و روش تهیه نقشه خطوط هم‌تراز استفاده می‌شود.

در روش تهیه نقشه ناحیه بندی ابتدا باید کارگاه را به نواحی شطرنجی با ابعاد مساوی تقسیم بندی نمود. اندازه ابعاد نواحی بسته به مساحت کارگاه و امکانات متفاوت است ولی هر چه ابعاد کوچکتر باشد دقت کار بالاتر است از نظر عملی کارگاه‌هایی با مساحت تا پنجاه مترمربع به نواحی با ابعاد یک متر، تا یکصد مترمربع را به نواحی با ابعاد ۲ متر و مساحت بیشتر از صد مترمربع را با ابعاد ۵ متر تقسیم بندی می‌کنند. سپس مرکز هر مربع ایجاد شده در شطرنج یک ایستگاه اندازه‌گیری می‌باشد. بعد از اندازه‌گیری تراز فشار صوت در مقیاس A و نوشتن اعداد در هر ایستگاه و با توجه به سه محدوده قراردادی به روش زیر عمل می‌کنیم:

در صورتی که تراز فشار صوت کمتر از ۶۵ دسیبل ( $SPL < 65$ ) باشد محدوده ایمن<sup>۱</sup> نام دارد. در این صورت مربع مربوطه را با رنگ سفید یا سبز و یا با کد S مشخص می‌کنیم.

در صورتی که تراز فشار صوت بیشتر از ۶۵ و کمتر یا مساوی ۸۵ دسیبل ( $65 < SPL \leq 85$ ) باشد محدوده احتیاط<sup>۲</sup> نام دارد لذا مربع مربوطه را با رنگ زرد یا با کد C مشخص می‌کنیم.

<sup>۱</sup> Safe

<sup>۲</sup> Caution

در صورتی که تراز فشار صوت بیشتر از ۸۵ دسیبل ( $SPL > 85$ ) باشد محدوده خطر<sup>۱</sup> نام دارد. در این صورت مربع مربوطه را با رنگ قرمز یا کد D مشخص می‌کنیم.

با تهیه نقشه فوق نواحی ایمن، احتیاط و خطر بصورت هاشور رنگی یا کد مشخص می‌شود. توجه متخصصین بهداشت حرفه‌ای باید به منطقه خطر معطوف شود تا با محدود نمودن محل توقف و تردد کارگران در نواحی خطر میزان مواجهه کارگر کاهش و کنترل گردد.

تمرین: در صورتی که ابعاد کارگاهی  $100 \times 50$  متر باشد نقشه ساده ناحیه بندی شده را ترسیم نموده و نقاط اندازه‌گیری را مشخص نمایید. (مقیاس: نیم سانتیمتر = یک متر)

روش تهیه نقشه صوتی<sup>۲</sup> همانند روش فوق می‌باشد. با این تفاوت که نتایج اندازه‌گیری بجای نشان دادن با رنگ یا کد توسط خطوط هم تراز (ایزوسونیک) به هم وصل می‌شوند. برای مثال کلیه نقاطی که تراز فشار صوت آنها ۸۵ دسیبل است به هم وصل می‌شوند. به همین ترتیب سایر نقاط با تراز یکسان نیز به هم وصل شده و منحنی ایزوسونیک یا نقشه صوتی رسم می‌شود. ۶- اندازه‌گیری تراز کلی صدا در کارگاه

با توجه به همگن نبودن توزیع انتشار صوت در کارگاه و همچنین با توجه به ماهیت لگاریتمی تراز فشار صوت، اندازه‌گیری یک تراز فشار صوت بیانگر و معرف صدای کارگاه نیست بنابراین نمی‌توان تراز فشار صوت را در هر ایستگاه اندازه‌گیری و نشان داد. ولی برای اعلام تراز فشار صوت هر کارگاه باید حداکثر<sup>۳</sup> و حداقل<sup>۴</sup> تراز فشار صوت را نشان داد. برای مثال بگوییم تراز فشار صوت بین  $80-90 dB_A$  است.

#### ۷- آنالیز یا تجزیه صدا

همانطور که قبلاً بیان شد تجزیه صدا به منظور بررسی توزیع فرکانس صوت در اکتاو باندهای مختلف طراحی شده‌اند. به عبارتی با استفاده از دستگاه آنالیزور می‌توان تراز فشار صوت را در فرکانس‌های مختلف اندازه‌گیری نمود. آنالیز صدا ممکن است به منظور تعیین تراز بلندی صدا انجام شود. همانطور که قبلاً بیان شد برای تعیین اندیس بلندی ابتدا باید تراز فشار صوت را در هر فرکانس داشته باشیم تا بتوانیم از روی نمودار ... اندیس بلندی را از محل تلاقی دو پارامتر فوق تعیین نماییم. یکی دیگر از اهداف آنالیز صدا، کنترل صدا می‌باشد. یکی از راههای کنترل صدا استفاده از انواع جاذب صوتی است. همانطور که می‌دانید که جذب صوت توسط مواد مختلف انتخابی است یعنی هر ماده جاذب بیشتری ضریب جذب را در یک فرکانس مشخصی دارد. برای مثال بیشترین ضریب جذب پشم شیشه با ضخامت ۲ اینچ در فرکانس ۵۰۰ هرتز می‌باشد در حالی که ضریب جذب فوم پلی‌ارتان با ضخامت ۰/۵ اینچ در فرکانس ۴۰۰۰ است. حال وقتی می‌خواهیم از مواد جاذب برای کنترل صدا استفاده کنیم ابتدا باید صدا را تجزیه کرد تا تراز فشار صوت را در فرکانس‌های مختلف بدست آوریم و بعد مشخص کنیم در چه فرکانسی تراز فشار صوت بالاتر است و بر این اساس ماده جاذب را انتخاب کنیم.

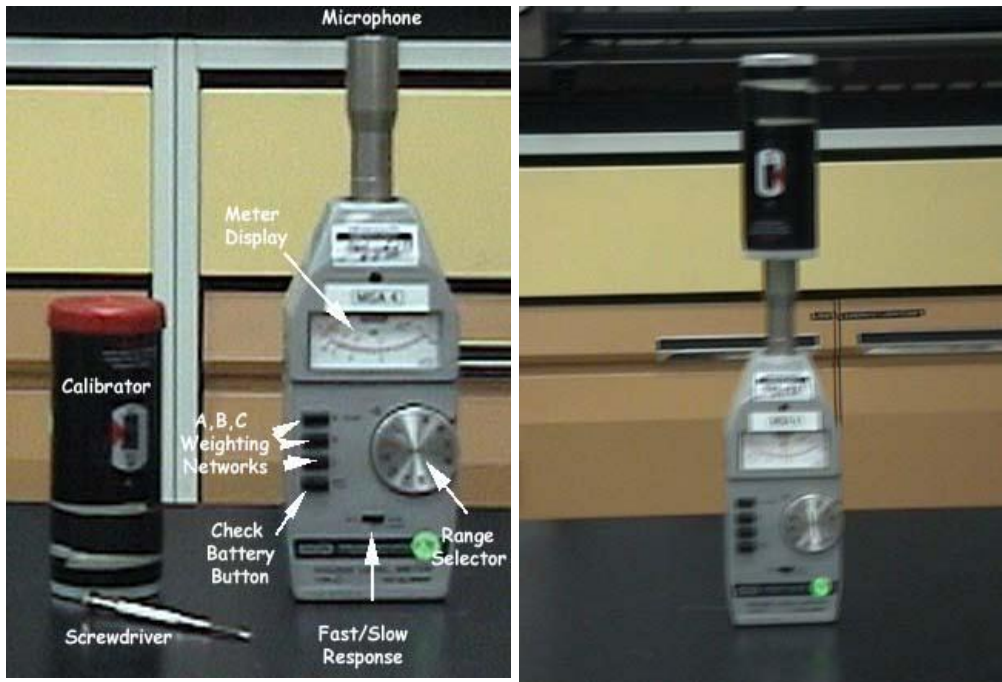
<sup>۱</sup> Danger

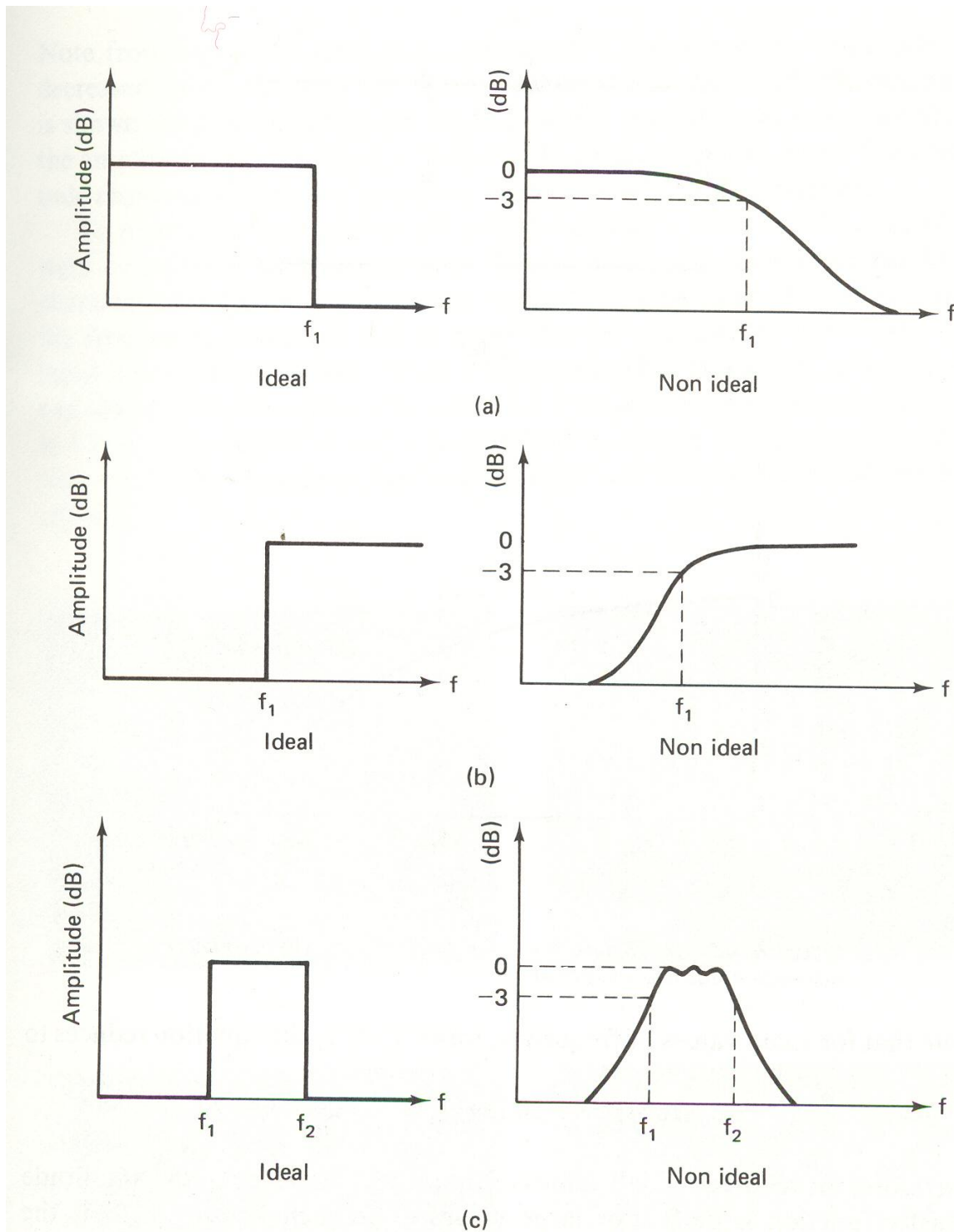
<sup>۲</sup> Isononic or Noise mapping

<sup>۳</sup> maximum

<sup>۴</sup> minimum

تألیف : دکتر ابو الفضل برخورداری





(ب) توزیع فرکانس

همانطور که قبلاً ذکر گردید توزیع شدت صوت نسبت به فرکانس را به اختصار توزیع فرکانس اطلاق می‌شود. نحوه کار دستگاه شنوایی طوری است که بین فرکانس‌های مختلف صوت تمیز قائل می‌شود. بنابراین توزیع فرکانس عبارت از توزیع شدت صوت نسبت به فرکانس می‌باشد. در این رابطه حداکثر حساسیت گوش انسان به فرکانس مکالمه<sup>۱</sup> یعنی اصوات با فرکانس ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ هرتز می‌باشد. حال هرچه فرکانس صوت از ۱۰۰۰ هرتز کمتر و از ۳۰۰۰ هرتز بیشتر شود آن صوت باید دارای انرژی خیلی بالاتری باشد تا گوش قادر به درک آن باشد. برای مثال، گوش طبیعی برای شنیدن صوتی با فرکانس ۲۵۰ هرتز احتیاج به حداقل تراز فشار صوت ۳۰ دسیبل دارد حال آنکه در فرکانس‌های ۱۲۵۰، ۶۲/۵، ۳۱/۵ و ۱۶۰۰۰ هرتز تراز فشار صوتی مورد نیاز به ترتیب ۴۰، ۶۰، ۷۰ و ۴۵ دسیبل خواهد بود. توزیع فرکانس را در اکتاو باندها نشان می‌دهند.

<sup>۱</sup> speech frequency

عمومی‌ترین باند فرکانس مورد استفاده اکتاو باند می‌باشد. یک اکتاو باند همیشه توسط یک فرکانس منفرد که در مرکز هندسی آن قرار گرفته است مشخص می‌شود به عبارتی فرکانس مرکزی<sup>۱</sup> برای هر اکتاو باند برابر میانگین هندسی<sup>۲</sup> فرکانس‌های بالایی و پایینی است. دومین خصوصیت مهم اکتاو باند، گستره فرکانسی یا پهنای باند<sup>۳</sup> آن می‌باشد. توزیع فرکانس را می‌توان با بکار بردن شبکه‌ها در یک تراز سنج صوت نشان داد. برای مثال دسیبل A در اشل تعریف شده که بیشترین عکس‌العمل را در فرکانس‌های بالا (بالتر از ۶۰۰ هرتز) از خود نشان می‌دهد. بنابراین برای صدای با باند پهن یعنی صدایی که تراز فشار صوت در فرکانس‌های وسیعی توزیع شده، تجزیه صدا در اکتاو باندها اطلاعاتی قیمتی بدست می‌دهد بطوری که بدون استفاده از این توزیع، ممکن است بعضی اقدامات انجام گیرد که بی‌فایده باشد و یا برعکس آن دسته از اقداماتی که ضروری است انجام نشود. توزیع فرکانس اکتاو باند توسط یک تجزیه کننده<sup>۴</sup> اکتاو باند اندازه‌گیری می‌شود. این دستگاه در واقع مکمل تراز سنج صوت است و اغلب به صورت یک دستگاه واحد ساخته و عرضه می‌شود. در صورت تجزیه صدا، ملاحظه می‌شود که مشخصات صدای دستگاه‌های مختلف با یکدیگر متفاوت‌اند.

از نظر ریاضی، پهنای باند عبارت از اختلاف فرکانس حد بالایی<sup>۵</sup> و حد پایینی باند<sup>۶</sup> می‌باشد در صورتی که حد بالایی با  $f_{n+1}$  و حد پایینی با  $f_n$  نمایش داده شود. در این صورت پهنای باند (BW) برابر است با:

$$BW = f_{n+1} - f_n$$

حد بالایی، حد پایینی فرکانس باند و فرکانس مرکزی برای اکتاو باند<sup>۷</sup> و  $\frac{1}{3}$  اکتاو باند<sup>۸</sup> توسط انستیتوی ملی استاندارد آمریکا<sup>۹</sup> ارائه شده است.

مثال: در جدول فوق در صورتی که حد بالایی و پایینی باند در ردیف شماره ۵ به ترتیب ۱۴۱۴ و ۷۰۷ هرتز باشد پهنای باند برابر است با:

$$BW = 1414 - 707 = 707 \text{ (هرتز)}$$

برای سری کلی اکتاو باند خصوصیات و روابط زیر وجود دارد.  
الف: نسبت فرکانس حد بالایی به حد پایینی برابر با  $2^n$  می‌باشد یعنی:

$$\frac{f_{up}}{f_{low}} = 2^n$$

در صورتی که  $n = 1$  باشد در این صورت نسبت حد بالایی به حد پایینی فرکانس برابر با ۲ می‌شود. یعنی  $f_{up} = 2f_{low}$

تجزیه کننده صدای با باند باریک

در صورتی که  $n = \frac{1}{2}$  باشد در این صورت نسبت حد بالایی به حد پایینی فرکانس برابر  $\sqrt{2}$  یا ریشه دوم<sup>۱۰</sup> عدد ۲

$$f_{up} = \sqrt{2} f_{low} \text{ یعنی}$$

در صورتی که  $n = \frac{1}{3}$  باشد در این صورت نسبت حد بالایی به حد پایینی فرکانس برابر  $2^{\frac{1}{3}}$  یا ریشه سوم<sup>۱</sup> عدد ۲ یعنی

$$f_{up} = \sqrt[3]{2} f_{low} = 1.26 f_{low} \text{ یعنی مساوی } 1/26$$

<sup>۱</sup> central frequency

<sup>۲</sup> geometrical mean

<sup>۳</sup> Band widths

<sup>۴</sup> Analyser

<sup>۵</sup> upper band

<sup>۶</sup> lower band limit frequency

<sup>۷</sup> octave band

<sup>۸</sup> one-third octave band

<sup>۹</sup> American National Standards Institute

<sup>۱۰</sup> square root

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

البته توضیح این نکته ضروری است که در  $\frac{1}{3}$  اکتاو باند، در بعضی موارد نسبت دو باند متوالی دقیقاً عدد  $1/26$  (به علت گرد نمودن<sup>۲</sup> نمی‌شود).  
(ب) هر باند یک فرکانس مرکزی دارد و مقدار آن برابر است با:

$$f_c = \sqrt{f_{low} \cdot f_{up}} = \sqrt{f_{low} \cdot 2f_{low}} = \sqrt{2}f_{low}$$

فرکانس مرکزی هر باند برابر با میانگین هندسی<sup>۳</sup> فرکانس‌های بالایی و پایینی است.

مثال: در صورتی که حد بالایی و پایینی برای اکتاو باند کامل به ترتیب ۲۸۲۸ و ۱۴۱۴ هرتز باشد فرکانس مرکزی چقدر است؟

$$f_c = \sqrt{2}f_{low} = \sqrt{2} \times 1414 = 2000 \text{ Hz}$$

خلاصه: در اکتاو باند کامل خصوصیات زیر وجود دارد:

- هر باند دارای پهنای باند خاصی می‌باشد بطوری که فرکانس حدپایینی همیشه نصف فرکانس حدبالایی باند است.
- فرکانس مرکزی هر باند میانگین هندسی فرکانس‌های حد بالایی و پایینی است.
- فرکانس مرکزی نصف فرکانس مرکزی پهنای باند بعدی و دو برابر فرکانس مرکزی پهنای باند قبلی خواهد بود.
- فرکانس حد بالایی دو برابر فرکانس حد پایینی است.
- فرکانس مرکزی  $\sqrt{2}$  برابر فرکانس حد پایینی و  $0.707$  برابر فرکانس حد بالایی است.
- فرکانس حد مرکزی برای آنالیز صوت اهمیت بالایی دارد.
- فرکانس‌های مرکزی عبارتند از  $31/5$ ،  $63$ ،  $125$ ،  $250$ ،  $500$ ،  $1000$ ،  $2000$ ،  $4000$ ،  $8000$  و  $16000$ .

بطور کلی ویژگی‌های  $\frac{1}{n}$  اکتاو باند در رابطه زیر نشان داده شده است.

$$\frac{f_{up}}{f_{low}} = 2^{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{2}$$

حال فرکانس حد بالایی برابر  $f_{up} = \sqrt[n]{2}f_{low}$ ، فرکانس حد پایینی برابر با  $f_{low} = \frac{1}{\sqrt[n]{2}}f_{up}$  و فرکانس مرکزی برابر با

$$f_c = \sqrt{f_{up} \cdot f_{low}} \text{ است}$$

$$f_c = \sqrt{\sqrt[n]{2}f_{low} \cdot \frac{1}{\sqrt[n]{2}}f_{low}} = (2^{\frac{1}{n}})^{\frac{1}{n}} f_{low} = 2^{\left(\frac{1}{n^2}\right)} f_{low}$$

روابط زیر خصوصیات  $\frac{1}{2}$  اکتاو باند (تیم اکتاو باند) استاندارد را نشان می‌دهد.

$$\frac{f_{up}}{f_{low}} = 2^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2}$$

$$f_{up} = \sqrt{2}f_{low} \quad \text{و یا} \quad f_{low} = 0.707f_{up}$$

$$f_c = \sqrt{f_{up} \cdot f_{low}} = \sqrt{\sqrt{2}f_{low} \cdot f_{low}} = \sqrt[4]{2}f_{low}$$

همانطور که ملاحظه می‌شود در  $\frac{1}{2}$  اکتاو باند، فرکانس حد بالایی هر باند  $\sqrt{2}$  برابر فرکانس حد پایین خواهد بود و فرکانس

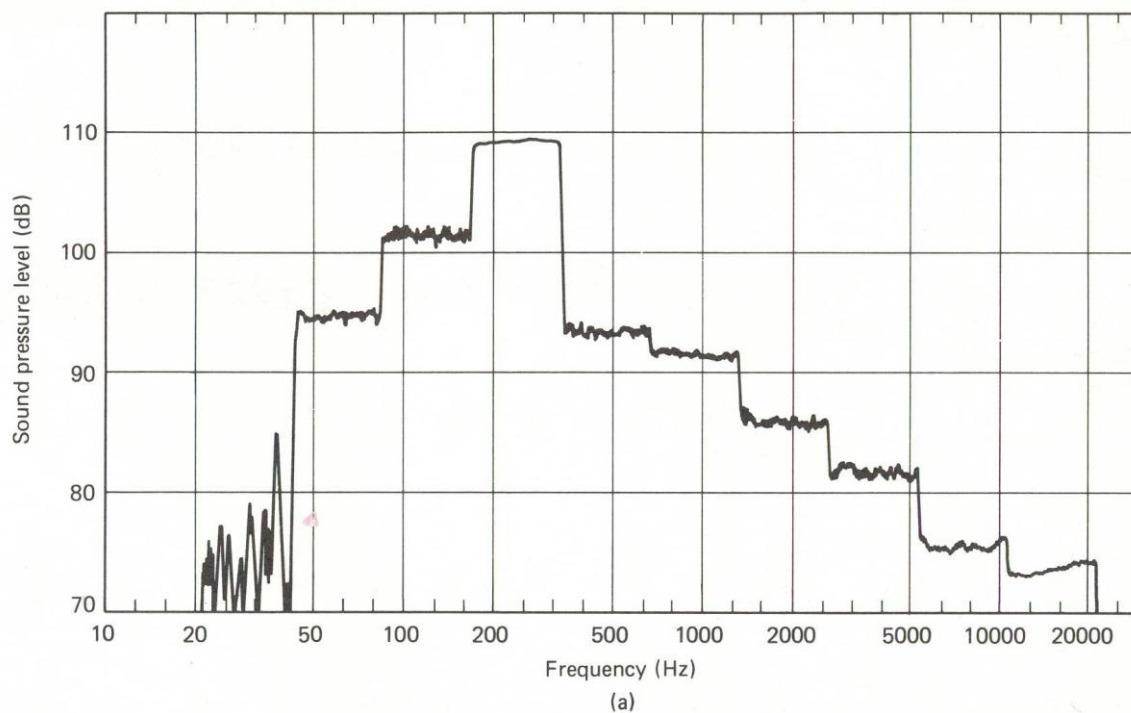
حد پایینی همیشه  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  برابر (برابر  $0.707$ ) فرکانس حد بالایی است. از طرفی فرکانس مرکزی نیز  $\sqrt[4]{2}$  برابر و یا  $2^{\frac{1}{4}}$  برابر فرکانس حد پایینی است.

<sup>۱</sup> cube root

<sup>۲</sup> rounding off

<sup>۳</sup> geometrical mean





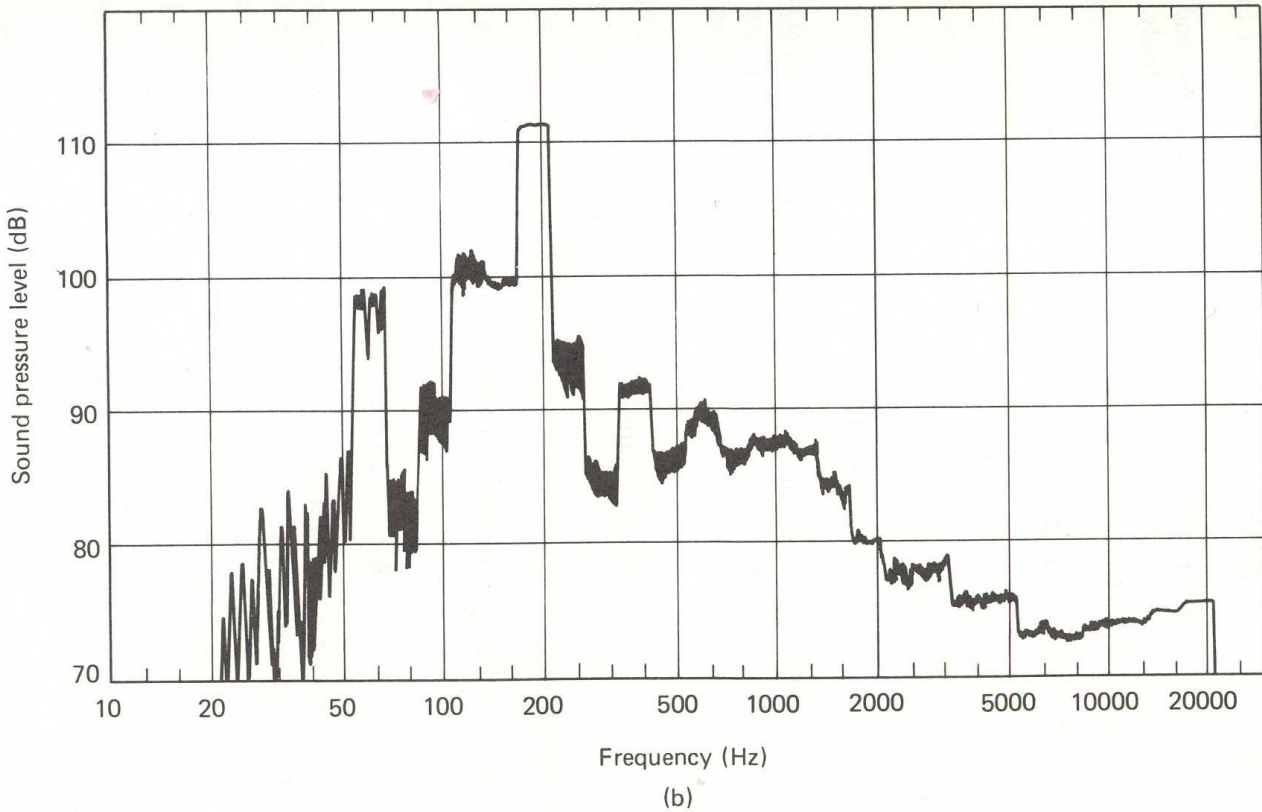
در  $\frac{1}{3}$  اکتاو باند استاندارد  $n = \frac{1}{3}$  می‌باشد. رابطه بین حد بالایی و پایینی فرکانس برابر است با:

$$f_{up} = 2^{\frac{1}{3}} \times f_{low} = \sqrt[3]{2} f_{low} = 1.26 f_{low}$$

حال برای فرکانس مرکزی داریم:

$$f_c = \sqrt{f_{up} \cdot f_{low}} = \sqrt{1.26 \cdot f_{low} \cdot f_{low}} = \sqrt{1.26} f_{low}$$

$$f_c = \sqrt{1.26} \times f_{low}$$



تمرین: خلاصه خصوصیات در  $\frac{1}{2}$  اکتاو باند و  $\frac{1}{3}$  اکتاو باند را بنویسید.

مثال: فرکانس حد بالایی و پایینی  $\frac{1}{2}$  اکتاو باند استاندارد با فرکانس مرکزی ۳۵۴ هرتز چقدر است؟

$$f_c = \sqrt[4]{2} f_{low}$$

$$f_{low} = \frac{f_c}{\sqrt[4]{2}}$$

بنابراین با جایگزینی مقدار عددی فرکانس مرکزی داریم:

$$f_{low} = \frac{354}{\sqrt[4]{2}} = \frac{355}{1.189} = 297.7$$

حال با داشتن حدپایینی فرکانس و با توجه به رابطه داریم:

$$f_{up} = \sqrt{2} f_{low} = \sqrt{2} \times 297.7 = 421$$

مثال: در صورتی که فرکانس حد پایینی در  $\frac{1}{3}$  اکتاو باند استاندارد برابر با ۱۱۲۳ هرتز باشد فرکانس مرکزی چقدر است؟

$$f_c = \sqrt{1.26} \times f_{low}$$

حال با جایگزینی مقدار فرکانس حدپایینی داریم:

$$f_c = \sqrt{1.26} \times 1122$$

مسئله: فرکانس حد بالایی و پایینی اکتاو باند روی مقیاس شبکه A که تراز فشار صوت تنظیم شده ندارد چقدر است؟  
حل: تنها اکتاو باندهای که تراز شدت صوت تنظیم شده ندارد اکتاو باند ۱۰۰۰ هرتز است. بنابراین:

$$f_c = \sqrt{2} f_{low}$$

فرکانس حد پایینی

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

$$f_{low} = \frac{f_c}{\sqrt{2}} = 0.707 f_c = 0.707 \times 1000 = 707$$

فرکانس حد بالایی

$$f_{up} = 2f_{low} = 2 \times 707 = 1414 Hz$$

مثال: فرکانس مرکزی يك اکتاو باند استاندارد در صورتی که فرکانس حد پایینی ۲۸۲۸ کیلوهرتز باشد محاسبه نمایید.

$$f_c = \sqrt{f_{up} \cdot f_{low}}$$

از طرفی فرکانس حد بالایی طبق رابطه برابر است با:

$$f_{up} = 2f_{low}$$

بنابراین از ادغام روابط فوق و جایگزین نمودن مقدار فرکانس حد پایینی داریم:

$$f_c = \sqrt{2f_{low} \cdot f_{low}} = \sqrt{2} f_{low}$$

$$f_c = \sqrt{2} \times 2828 = 3999.4 \cong 4000 Hz$$

(ج) مدت زمان تماس:

کار دائم در محیط پر صدا به مراتب زیان آورتر از کاری است که بطور پیاپی با فواصل استراحت انجام شود. به همین جهت برای ۸ ساعت کار در روز حداکثر مجاز تراز شدت صوت ۹۰ دسی بل می باشد. باید توجه داشت که از این جهت افزایش در شدت صوت باید ساعت کار در روز به نصف تقلیل یابد. بطور مثال حداکثر ساعت مجاز کار در محیط با تراز شدت صوت ۹۵ دسی بل ۴ ساعت و ۱۰۰ دسی بل ۲ ساعت می باشد. اثر تداوم سرو صدا به حدی است که حتی يك صوت خالص با شدت ضعیفی معادل ۵۰ دسی بل اگر مدت زیادی روی گوش اثر کند باعث ناشنوایی در بعضی فرکانسها می گردد، در حقیقت مثل این است که صدمات ناشی از سرو صدا در طول زمان روی هم انباشته می شود. مدت زمان تماس را نمی شود به آسانی ارزشیابی نمود. در گذشته رسم بر این بود که مدت زمانهایی را که يك کارگر در محیطهای پرسروصدا می گذراند با دقت ثبت می کردند. کاری که بسیار وقتگیر بود ولی اخیراً وسیله ای به نام ناظر بر سر و صدای فردی در بازار موجود است. نوعی از این وسیله مستقیماً مدت زمانی را که کارگر در يك محیط پرسروصدا با تراز کلي بیش از ۸۵، ۹۵، ۱۰۵ دسیبل تماس داشته است ثبت می کند. نوعی دیگر از این وسیله متوسط تراز فشار صوتی که يك کارگر در يك زمان معین در معرض آن بوده است را نشان می دهد. این وسیله که دزیمتر فردی نام دارد سبک و جمع جور است و کارگر به آسانی می تواند آنرا در تمام طول مدت کار روزانه با خود حمل کند. در صورتی که کارگر در ساعات مختلف شیفته کار در معرض سر و صدا با ترازهای مختلف باشد می توان از فرمول زیر نیز استفاده کرد.

$$\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \dots + \frac{C_n}{T_n} \leq 1$$

C = زمان تماس کارگر و T = زمان تماس مجاز

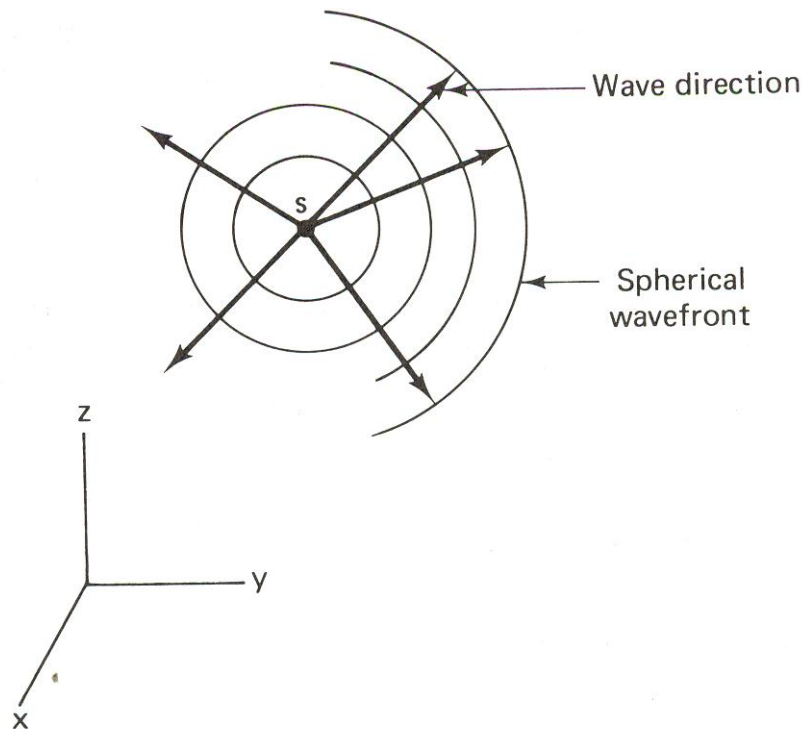
مثال: اگر شخصی در شیفته کاری خود (۸ ساعت) مدت ۵ ساعت آن در تراز ۹۰ دسیبل و ۱ ساعت آن ۱۰۰ دسیبل و ۲ ساعت آن ۷۰ دسیبل قرار داشته باشد در مجموع آیا فرد با صدای بیش از حد مجاز قرار دارد یا خیر؟  
جواب: با توجه به جدول استاندارد دو زمان تماس مجاز برای ترازهای ۹۰، ۱۰۰ و ۷۰ دسیبل به ترتیب برابر است با ۸ ساعت، ۲ ساعت و بی نهایت<sup>۱</sup> باشد.

<sup>۱</sup> - در صورتی که تراز فشار صوت کمتر از ۸۵ دسیبل باشد T مربوط را بی نهایت قرار می دهیم.

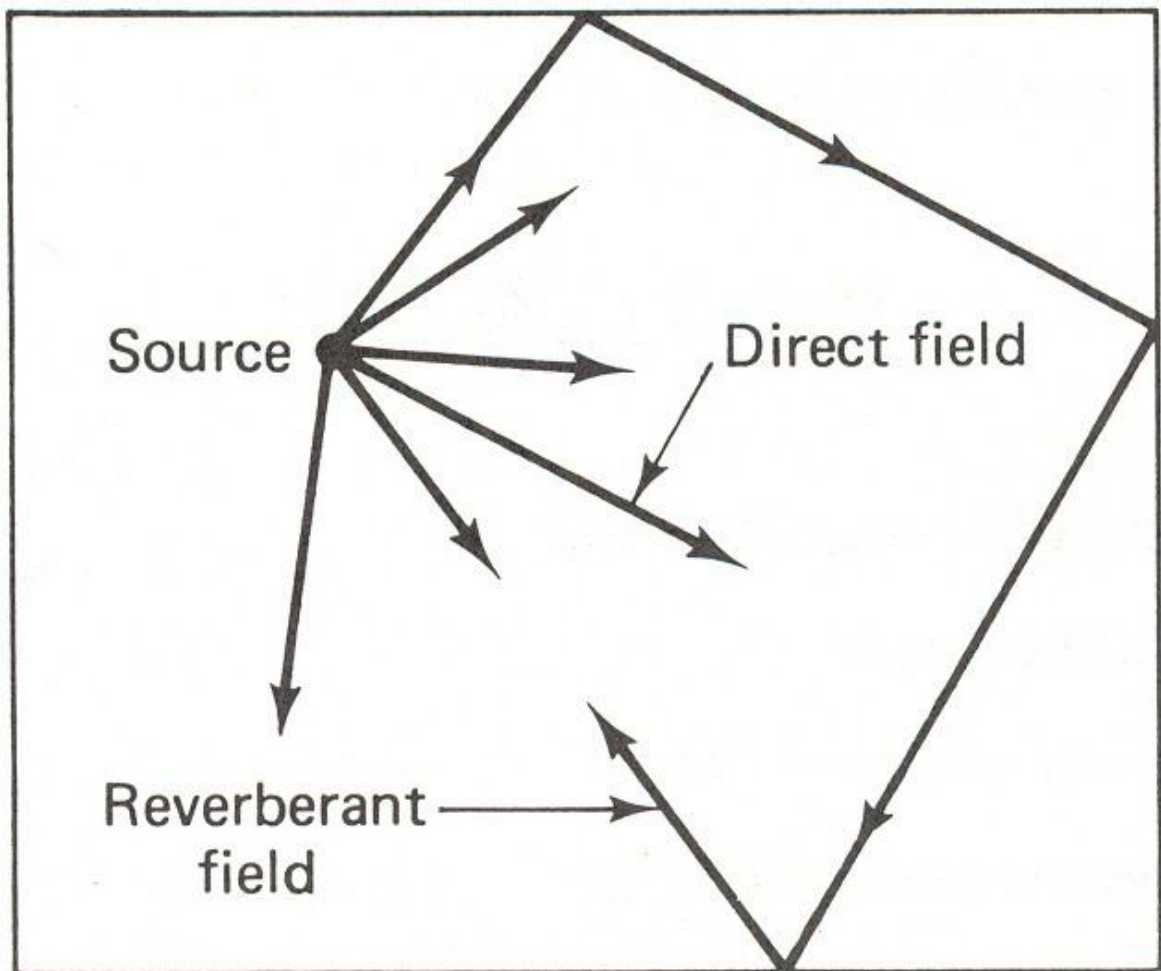
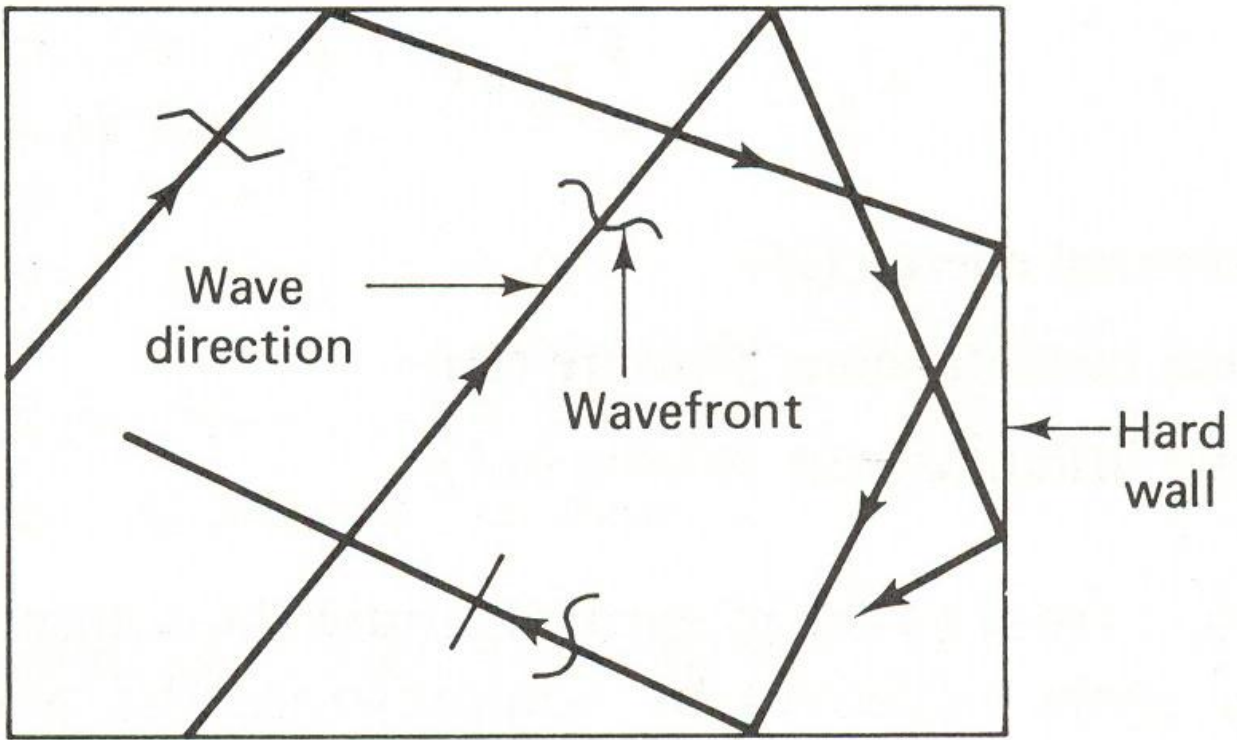
### اتاق اکوستیک<sup>۱</sup>

در محیط های صنعتی<sup>۲</sup> و حتی منزل و اداره می توان رفتار صدا را تاحدی با استفاده از دانش محدود درخصوص منبع صوت و خصوصیات اتاق<sup>۳</sup> را بصورت تقریبی برآورد نمود. در این فصل راجع به توسعه<sup>۴</sup> و ...<sup>۵</sup> تراز فشار صوت، تراز توان صوت، زمان بازآویی و سایر روابط بحث خواهد شد. بعنوان نقطه شروع<sup>۶</sup>، معادلات مربوط به فشار و سرعت موج صوتی انتخاب شده اند سپس رابطه بین انرژی و دانسیته<sup>۷</sup> در محیط های مستقیم<sup>۸</sup> و بازآو<sup>۹</sup> به منظور توسعه معادلات مطرح و روابط کاربردی و موردنظر نیز از روابط اولیه مشتق گردیده اند.

بطور کلی دو میدان صدا شامل میدان مستقیم و میدان بازآوا (سطوح انعکاسی متعدد<sup>۱۰</sup>) در فضای یک اتاق موجود هستند. همانطور که در شکل ۶-۱ ملاحظه می شود در میدان مستقیم فقط وابسته به فاصله و منبع می باشد. لذا متاثر از ابعاد و خصوصیات بازتاب اتاق نمی باشند ولی محیط های بازآوا بالعکس تحت تاثیر شدید ابعاد و سطوح بازتابی اتاق قرار دارند (شکل ۶-۲) در تصویر ۶-۳ همزمان هر دو محیط مستقیم و بازآوا موجود می باشند.



- <sup>۱</sup> - Room acoustics
- <sup>۲</sup> - Industrial plant
- <sup>۳</sup> - room characteristics
- <sup>۴</sup> - development
- <sup>۵</sup> - derivations
- <sup>۶</sup> - starting point
- <sup>۷</sup> - Energy - density
- <sup>۸</sup> - direct field
- <sup>۹</sup> - reverberant field
- <sup>۱۰</sup> - multiple reflected



تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

همانطور که می دانید انرژی به دو دسته انرژی پتانسیل<sup>۱</sup> و انرژی جنبشی<sup>۲</sup> تقسیم می شود. در بخش های بعدی رابطه بین دانسیته انرژی و منبع صوت در محیط اکوستیکی مورد نیاز می باشد.

انرژی پتانسیل

برای سادگی موج سینوسی پیشرونده ای در هوا را نظربگیرید. با توجه به اینکه پیشرفت موج اکوستیکی بوسیله انقباض<sup>۳</sup> و انبساط<sup>۴</sup> بیان می شود. انقباض در حقیقت ذخیره انرژی پتانسیل می باشد انرژی ذخیره شده یا کار انجام شده ترمودینامیک اولیه می باشد.

$$E_p = -\int P_t dV^2$$

بطوریکه :

$$EP = \text{انرژی پتانسیل برحسب ژول}$$

$$Pt = \text{فشار ثابت کلی}^5$$

$$V' = \text{حجم ثابت کلی}^6$$

علامت منفی در جلوی انتگرال ضروری است چون موقعی که حجم به علت فشار کمتر می شود (منفی می شود) انرژی پتانسیل مثبت است.

انرژی جنبشی

انرژی جنبشی حجم کلی گاز برحسب ژول بصورت زیر می باشد.

$$E_K = \left(\frac{1}{2} P_0 V^2\right) V$$

رابطه انرژی جنبشی در گاز مطابق با رابطه مشابه آن در مکانیک است.

$$E_K = \frac{1}{2} mv^2$$

بطوری که :

$$M : \text{جرم جسم برحسب کیلوگرم}$$

دانسیته انرژی کلی

دانسیته انرژی کلی برحسب ژول برابر با مجموع انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی می باشد. یعنی:

$$E = EP + EK$$

حال با جایگزینی معادل آنها در رابطه فوق داریم:

$$E = V(\rho_0 v^2 + \frac{P_0}{c} v)$$

حال در راستای اهداف اتاق اکوستیکی می بایست متوسط دانسیته انرژی ثابت را که برابر با نسبت انرژی ثابت کلی (E) به حجم است را بدست آوریم. بنابراین داریم:

$$\delta' = \frac{E}{V} = \frac{V(\rho_0 v^2 + \frac{P_0}{c} v)}{V} = \rho_0 v^2 + \frac{P_0}{c} v$$

برحسب ژول بر مترمکعب (J/m<sup>۳</sup>)

در صورتی که متوسط زمانی  $\delta'$  مدنظر باشد در این صورت بجای مقادیر ثابت باید انتگرال آنرا گرفت. لذا داریم:

$$\delta = \frac{1}{T} \int_0^T \delta' dt$$

حال با در نظر گرفتن سرعت ذره<sup>۷</sup> (v) برای موج سینوسی داریم:  
برحسب متر بر ثانیه

$$V = V_0 \cos(\omega t - kz)$$

<sup>۱</sup> - potential energy

<sup>۲</sup> - kinetic energy

<sup>۳</sup> - compression

<sup>۴</sup> - rarification

<sup>۵</sup> - total in stantaneous pressure

<sup>۶</sup> - total in stantaneous volume

<sup>۷</sup> - particle velocity

بطوری که:

$$V = \text{سرعت ذره}$$

$$V_0 = \text{سرعت ماکزیمم ذره}$$

$$\omega = \text{سرعت زاویه ای}^1$$

$$k = \text{ثابت فاز}^2$$

حال با جایگزین کردن مقادیر بر یا برحسب ژول بر مترمکعب خواهیم داشت:

$$\delta = \frac{1}{2} \rho_0 v_0^2$$

با توجه به اینکه طراحی اکثر دستگاههای اندازه گیری بر مبنای اندازه گیری فشار موثر (rms) می باشد بنابراین باید  $\delta$  را بر اساس فشار موثر بیان نمود. برای این منظور باید جذر<sup>۳</sup> رابطه موج سطحی<sup>۴</sup> را گرفت یعنی:

$$v_0 = \frac{p\sqrt{2}}{\rho_0 c}$$

بطوری که:

$$\rho_0 c = \text{امپدانس ویژه صوت}^5$$

امپدانس صوت عبارت از نسبت فشار دینامیکی به سرعت ذره در محیط می باشد. بنابراین با جایگزینی رابطه فوق در رابطه قبلی داریم:

$$\delta = \frac{1}{2} \rho_0 v_0^2 = \frac{1}{2} \rho_0 \left( \frac{p\sqrt{2}}{\rho_0 c} \right)^2$$

$$\delta = \frac{1}{2} \left( \frac{2P^2 \rho_0}{\rho_0^2 c^2} \right)$$

$$\delta = \frac{P^2}{\rho_0 c^2} \quad \text{ژول بر مترمکعب}$$

$$P^2 = \delta \rho_0 c^2 \quad \text{و یا برحسب پاسکال به توان}$$

دو رابطه فوق از مفیدترین روابط مربوط به متوسط زمانی و فضایی دانسیته انرژی به فشار موثر و مدول بالک  $\rho_0 c^2$  می باشند. حال می توان تراز فشار صوت را برحسب دانسیته انرژی نیز بیان نمود. با توجه به رابطه اصلی تراز فشار صوت

$$L_p = 10 \log \left( \frac{P^2}{P_{ref}^2} \right)$$

با جایگزین نمودن  $P^2$  داریم:

$$L_p = 10 \log \left( \frac{\rho_0 c^2 \delta}{P_{ref}^2} \right)$$

مثال: در صورتی که فشار موثر صوت ۰/۱ پاسکال و امپدانس ویژه صوت برابر با ۴۰۷ mks rayls و سرعت صوت برابر با ۳۴۴ متر بر ثانیه باشد متوسط دانسیته انرژی را تعیین نمایید.

<sup>۱</sup> - angular frequency

<sup>۲</sup> - phase constant

<sup>۳</sup> - taking advantage

<sup>۴</sup> - plane-wave relationship

<sup>۵</sup> - acoustic characteristic impedance

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

$$\delta = \frac{P^2}{\rho_0 c^2} = \frac{P^2}{(\rho_0 c)(c)}$$

$$\delta = \frac{(0.1)^2}{(407)(344)} = 7.14 \times 10^{-8} J/m^3$$

مسئله:

در صورتی که سرعت ذره در دمای هوای اتاق برابر با  $3-10 \times 5/58$  متر بر ثانیه و دانسیته استاتیک گاز و سرعت صوت به ترتیب  $1/18$  کیلوگرم بر مترمکعب و  $344$  متر بر ثانیه باشد فشار موثر و تراز فشار صوت چقدر است؟

$$\rho_0 = 1/18 \text{ کیلوگرم بر مترمکعب} \quad \rho_0 = 344 \text{ متر بر ثانیه} \quad c = 344 \text{ متر بر ثانیه}$$

$$P = LP \quad P = P$$

$$P^2 = \delta \rho_0 c^2$$

$$P^2 = \left( \frac{1}{2} \rho_0 v_0^2 \right) (\rho_0 c^2)$$

$$P^2 = \frac{1}{2} \times 1.18 \times (5.58 \times 10^{-3})^2 (1.18 \times 344 \times 344)$$

$$P = 1.18 \times 344 \times 5.58 \times 10^{-3} \sqrt{0.5}$$

$$L_p = 20 \log \frac{P}{2 \times 10^{-5}}$$

دانسیته انرژی به عنوان عامل اتاق

سوال اساسی اینجاست که چنانچه منبع صوت مستمر در اتاقی داشته باشیم عامل تعیین کننده فشار صوت چیست؟ جواب به این سوال آسان است چون فشار صوت عبارت از انرژی صوتی منتشر شده از منبع و یا به عبارتی انرژی صوتی جذب شده توسط سطوح اتاق و یا محتویات اتاق است. بنابراین فشار صوت در اتاق بدون جذب<sup>۱</sup> و بدون نشست<sup>۲</sup> تا زمانی که منبع صوت کار می کند بطور مستمر افزایش می یابد. نظریه سابین<sup>۳</sup> بر اساس ایجاد و زوال انرژی صوتی در یک اتاق با نشست و جذب صوت می باشد. در این تئوری فرضیه انرژی همگن<sup>۴</sup> (صوت کاملاً پخش شده و دیفیوز<sup>۵</sup>) و جذب مستمر و یکنواخت<sup>۶</sup> توسط سطوح اتاق<sup>۷</sup> هستند. بر اساس این فرضیه، میزان افزایش انرژی در اتاق برابر با اختلاف بین انرژی منتشر شده توسط منبع و میزان جذب انرژی توسط سطوح اتاق می باشد یعنی:

$$V \frac{d\delta'}{dt} = W - W_s$$

بطوری که:

$$V = \text{حجم اتاق بر حسب مترمکعب}$$

$$\delta' = \text{متوسط دانسیته انرژی در حجم ثابت بر حسب ژول بر مترمکعب}$$

$$W = \text{توان منبع صوت بر حسب وات}$$

$$W_s = \text{توان جذب شده توسط اتاق بر حسب وات}$$

برای تعیین توان جذبی توسط اتاق ( $W_s$ ) باید رابطه  $\frac{dE_s}{dt}$  را در ضریب جذب متوسط ( $\bar{a}$ ) ضرب نمود.

$$\bar{a} \times \frac{dE_s}{dt} = dW_s = \frac{\delta \bar{a} c}{4} ds$$

حال برای کل اتاق به شرح ذیل خواهد بود:

<sup>۱</sup> - no absorption

<sup>۲</sup> - no leaks

<sup>۳</sup> - Sabine's theory

<sup>۴</sup> - homogeneous energy

<sup>۵</sup> - Completely diffuse sound

<sup>۶</sup> - Continious and uniform absorption

<sup>۷</sup> - intrinsic



تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

$$W_s = \int_s dw_s = \frac{\delta \bar{a}c}{4} \int_s ds$$

$$W_s = \frac{\bar{a}cs\delta'}{4}$$

بطوریکه:

$S =$  کل مساحت سطوح اتاق بر حسب مترمربع یا فوت مربع

$$V \frac{d\delta'}{dt} = W - W_s$$

در صورتی که بجای  $WS$  در رابطه معادل آن قرار دهیم داریم:

$$V \frac{d\delta'}{dt} = W - \frac{\bar{a}cs\delta'}{4}$$

در صورتی که طرفین بر  $V$  تقسیم کنیم داریم:

$$\frac{d\delta'}{dt} + \frac{\bar{a}cs}{4V} \delta' = \frac{W}{V}$$

$$\delta' = \frac{4W}{\bar{a}cs} [1 - e^{-(\bar{a}cs/4V)t}]$$

در صورتی که متوسط دانسیته انرژی - فضا خیلی بزرگ شود نما به سمت صفر میل خواهد کرد و متوسط دانسیته انرژی در اتاق عبارت خواهد بود از:

$$\delta = \frac{4W}{\bar{a}cs}$$

رابطه فوق متوسط دانسیته انرژی زمان - فضا در حالت یکنواخت<sup>۱</sup> برای حجم کل اتاق بیان می کند.

مسئله ۱: در صورتی ابعاد اتاق  $40 \times 40$  فوت  $(12/19 \times 12/19)$  متر و ارتفاع  $20$  فوت  $(6/0.8)$  متر باشد:  
الف) اگر توان منبع پس از  $0.5$  ثانیه از شروع کار برابر با دو وات و ضریب جذب متوسط  $0.5$  و سرعت صوت برابر با  $344$  متر بر ثانیه یا  $1128$  فوت بر ثانیه باشد. دانسیته انرژی اتاق را تعیین نمایید.  
ب) دانسیته انرژی متوسط حالت یکنواخت چقدر است؟  
ج) دو دانسیته محاسبه شده را مقایسه نمایید.

حل:

الف) برای محاسبه متوسط دانسیته انرژی زمان - فضا در اتاق از رابطه زیر استفاده می شود:

$$\delta = \frac{P^2}{\rho_0 c^2} = \frac{P^2}{477 \times 344}$$

$$\delta = \frac{4W}{\bar{a}cs} = \frac{4 \times 2}{0.5 \times 344 \times [(40 \times 40) + (40 \times 40) + (4 \times 20 \times 40)]}$$

مسئله ۲: در صورتی که اتاقی به ابعاد  $20 \times 20$  متر و ارتفاع  $7$  متر و ضریب جذب متوسط اتاق  $0.6$  و فشار صوت بازوا  $1/5$  پاسکال باشد توان منبع صوت را تعیین نمایید. امپدانس ویژه صوت  $407$  mks rayls و سرعت صوت  $344$  متر بر ثانیه می باشد؟

$$\delta = \frac{(1.5)^2}{407 \times 344}$$

$$W = \frac{\delta \bar{a}cs}{4} = \frac{(1.5)^2 \times 0.06 \times 344 \times [(20 \times 20) + (20 \times 20) + (4 \times 20 \times 7)]}{4 \times 407 \times 344}$$

<sup>۱</sup> - steady-state time- and space-average energy density

انرژی مستقیم و بازآوا

جذب هوا نیز بطور مستقیم متناسب با متوسط مسیر آزاد<sup>۱</sup> موج صوتی در اتاق می باشد و مطابق رابطه زیر می باشد:

$$r = \frac{4V}{S}$$

$V =$  حجم اتاق

$S =$  مساحت سطوح (متر یا فوت)

متوسط مسیر آزاد طی شده برابر با متوسط فاصله ای است که موج صوتی بین بازتابهای پی در پی طی می کند. نحوه

دستیابی به رابطه فوق بعداً بحث خواهد شد. ضریب جذب افزایشی متوسط<sup>۲</sup>  $(\bar{a}_{ex})$  به علت جذب هوا در اتاق نیز عبارت است از:

$$\bar{a}_{ex} = k \frac{4V}{S}$$

$K =$  ثابت تعیین شده بصورت تجربی در دستگاه انگلیسی و متریک به ترتیب برحسب  $ft^{-1}$  و  $m^{-1}$  ضریب  $k$  برحسب رطوبت، درجه حرارت و فرکانس در جدول شماره ..... داده شده است.

جدول ..... مقادیر تقریبی ضریب  $k$  در دستگاه انگلیسی و متریک

لذا می توان نوشت:

$$\bar{a}' = \bar{a} + \bar{a}_{ex}$$

$$\bar{a}' = \bar{a} + k \frac{4V}{S} \quad \text{و یا}$$

$$k \frac{4V}{S}$$

با استفاده از  $\bar{a}'$  می توان ثابت اتاق<sup>۳</sup>  $(R)$  و زمان بازآوایی یا زمان واخنش<sup>۴</sup>  $(T)$  را تعیین نمود. در صورتی که  $\bar{a}'$  بیشتر از  $0.4$  باشد. می توان  $\bar{a}$  را بجای  $\bar{a}'$  استفاده نمود.

اغلب ضروری است تا تراز فشار صوت را در محیط های مستقیم و بازآوا تعیین نمود. در صورت استفاده از مواد جاذب در سطوح اتاق نسبت بازآوایی (واخنش) به فشار کلی کاهش خواهد یافت. در صورتی که طرفین رابطه متوسط دانسیته انرژی را در  $V$  ضرب کنیم انرژی کلی اتاق را برحسب ژول بدست خواهیم آورد.

$$\delta V = \frac{4WV}{\bar{a}cs}$$

در صورتی که طول و عرض و ارتفاع اتاق به ترتیب  $1, w$  و  $h$  برحسب متر باشد و طول برابر با عرض  $(w=1)$  و ارتفاع نصف طول اتاق  $(h=0.5)$  باشد حجم و مساحت اتاق برابر است با:

$$V = l \times w \times h$$

$$V = l \times l \times 0.5l = 0.5l^3 \quad m^3$$

$$S = 2(l \times l) + 4(0.5l \times l) = 4l^2 \quad m^2$$

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

اگر حجم کره برابر با مترمکعب باشد. حال می خواهیم شعاع کره  $(r)$  را با حجم  $V=0.5L^3$  بدست آوریم.

برای این منظور بهتر است شعاع کره را بجای طول  $L$  برحسب مساحت  $S$  و حجم  $V$  بدست آوریم. حال چنانچه رابطه  $V$  و  $S$  را با هم ترکیب کنیم داریم:

$$V = 0.5L^3$$

$$S = 4L^2$$

$$\frac{V}{S} = \frac{0.5L^3}{4L^2}$$

<sup>۱</sup> - Mean free path

<sup>۲</sup> - average excess absorption

<sup>۳</sup> - room constant

<sup>۴</sup> - reverberation time

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

$$\frac{8V}{S} = L \quad \text{یا} \quad \frac{V}{S} = \frac{L}{8}$$

$$V = \frac{L \times S}{8}$$

$$\frac{4\pi r^3}{3} = \frac{L \times 4L^2}{8}$$

$$\frac{4\pi r^3}{3} = \frac{L^3}{2}$$

$$r = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{\frac{1}{3}} L$$

در صورتی که بجای L معادل آن  $\frac{8V}{S}$  قرار دهیم داریم:

$$r = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{8V}{S}\right)$$

و با ساده کردن رابطه فوق خواهیم داشت:

$$r = \frac{4V}{S}$$

همانطور که قبلاً بیان شد r را متوسط مسیر آزاد می نامند. بنابراین r برابر با شعاع کره ای است که برای محاسبه انرژی مستقیم از آن استفاده می کنیم. در صورتی که ابعاد اتاق تغییر کند حجم و مساحت نیز تغییر خواهد کرد. در صورتی که r برابر با  $0.62(V)^{\frac{1}{3}}$  انتخاب شود در این صورت حجم اتاق و کره یکسان خواهد شد ولی رابطه قبلی که ارتباط حجم و مساحت سطوح اتاق را بیان می کند بیشتر ضروری و لازم است.

مسئله: در صورتی که حجم کره با اتاقی به ابعاد  $10 \times 10 \times 5$  متر و ارتفاع 5 متر یکسان باشد شعاع کره چقدر است؟

$$r = \frac{4V}{S}$$

$$V = 10 \times 10 \times 5 = 500m^3$$

$$S = (2 \times 10 \times 10) + (4 \times 10 \times 5) = 400m^2$$

$$r = \frac{4 \times 500}{400} = 5m$$

دانشیته انرژی در موج کروی پیشرونده

با توجه به لزوم اندازه گیری تراز فشار صوت در فواصل مختلف از منبع می توان رابطه ای برای دانشیته انرژی مستقیم به عنوان عامل فاصله از منبع بدست آورد. قبلاً رابطه بین شدت صوت و فشار صوت توضیح داده شد.

$$I = \frac{P^2}{\rho_0 c}$$

از طرفی دانشیته انرژی مستقیم  $\delta d$  برابر است با:

$$\delta d = \frac{P^2}{\rho_0 c^2} = \frac{P^2}{(\rho_0 c)(c)}$$

در صورتی که بجای  $\frac{P^2}{\rho_0 c}$  معادل آن I قرار دهیم داریم: برحسب ژول بر مترمربع

$$\delta d = \frac{I}{c}$$

یا وات بر مترمربع

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

$$I = \delta dc$$

از طرفی رابطه بین شدت صوت و توان برابر است با:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}$$

حال اگر در رابطه دانسیته انرژی مستقیم بجای I معادل آن قرار دهیم داریم:  
برحسب ژول بر مترمکعب

$$\delta d = \frac{W}{4\pi r^2 c}$$

در صورتی که بخواهیم مجموع دانسیته انرژی را در محیط های مستقیم و بازآوا بدست آوریم. باید دانسیته انرژی بازآوا  
برحسب ژول بر مترمکعب نیز بدست آوریم بنابراین داریم:

$$\delta r = \frac{4W}{CR}$$

حال با جمع نمودن دانسیته انرژی مستقیم و بازآوا می توانیم مجموع دانسیته انرژی را به فرض نقطه ای بودن منبع بدست  
آوریم: برحسب ژول بر مترمکعب

$$\delta = \delta_d + \delta_r$$

$$\delta = \frac{W}{4\pi r^2 c} + \frac{4W}{CR}$$

مسئله: در صورتی که توان منبع صوت ۲ وات باشد دانسیته انرژی را در فاصله ۱۵ فوت از منبع را در اتاق به ابعاد  
۱۲×۲۰×۲۵ فوت و با ضریب جذب متوسط ۰/۰۲ بدست آورید.

$$\delta = \frac{W}{4\pi r^2 c} + \frac{4W}{CR}$$

$$R = \frac{\bar{a}S}{1-\bar{a}}$$

$$S = (25 \times 20 \times 2) + (25 \times 12 \times 2) + (20 \times 12 \times 2) = 2080$$

$$R = \frac{0.02 \times 2080}{1 - 0.02} = 520$$

$$\delta = \frac{2}{4\pi \times (15)^2 (1128)} + \frac{4 \times 2}{1128 \times 520}$$

$$\delta = 6.27 \times 10^{-7} + 1.36 \times 10^{-5}$$

$$\delta = 1.43 \times 10^{-5}$$

در اکثر مواقع منابع صوت از نوع ایزوتروپیک<sup>۱</sup> نمی باشند بنابراین لازم است  $\delta d$  را برحسب نوع منبع تغییر داد در این  
صورت به ضریب جهت (Q) نیاز داریم. بنابراین دانسیته انرژی تحت زاویه  $\theta$  برابر خواهد بود با:

$$\delta_\theta = \frac{WQ}{4\pi r^2}$$

لذا مجموع دانسیته انرژی برابر خواهد بود با:

$$\delta = \frac{WQ}{4\pi r^2 c} + \frac{4W}{CR}$$

مسئله: در صورتی که ضریب جهت در زاویه  $\theta$  در منبع صوت با توزیع غیرکروی برابر با ۲/۵ و تراز توان صوت  
۱۲۲ دسیبل باشد دانسیته انرژی در زاویه  $\theta$  و در فاصله ۲۵ متر از منبع چقدر است؟

<sup>۱</sup> - isotropic sources

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

$$\delta_{\theta} = \frac{WQ}{4\pi r^2 c}$$

$$W = W_{ref} \times 10^{Lw/10} \Rightarrow W = 10^{-12} \times 10^{122/10} \Rightarrow W = 1.59w$$

$$\delta_{\theta} = \frac{1.59 \times 2.5}{4\pi \times 25 \times 25 \times 344} = 1.47 \times 10^{-6} J/m^3$$

تعیین تراز فشار صوت برحسب دسیبل در فواصل مختلف از منبع برحسب دانسیته انرژی ضروری است. دانسیته انرژی  $(\delta)$  به عنوان عامل فاصله  $(r)$  پایه ای برای تعیین تراز فشار صوت و تراز توان صوت می باشد. همانطور که بیان شد دانسیته انرژی و مجموع دانسیته انرژی برابر است با:

$$\delta = \frac{P^2}{\rho_0 c^2}$$

$$\delta = \frac{WQ}{4\pi r^2 c} + \frac{4W}{CR}$$

با جایگزین نمودن  $\frac{P^2}{\rho_0 c^2}$  بجای  $(\delta)$  در رابطه فوق داریم:

$$\frac{P^2}{\rho_0 c^2} = \frac{WQ}{4\pi r^2 c} + \frac{4W}{CR}$$

در صورتی که رابطه را ساده نماییم داریم:

$$P^2 = W\rho_0 c \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$P^2 =$  میانگین مربع فشار در هر نقطه از اتاق برحسب  $Pa^2$  از طرفی تراز فشار صوت برابر است با:

$$Lp = 10 \log \left( \frac{P}{P_{ref}} \right)^2$$

$$Lp = 10 \log P^2 - 20 \log (2 \times 10^{-5})$$

حال اگر بجای  $P^2$  معادل آنرا قرار دهیم داریم:

$$Lp = 10 \log (W\rho_0 c) \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) - 20 \log (2 \times 10^{-5})$$

$$Lp = 10 \log W + 10 \log (\rho_0 c) + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) - 20 \log 2 \times 10^{-5}$$

از طرفی رابطه تراز توان صوت برابر است با:

$$Lw = 10 \log \frac{W}{W_{ref}} = 10 \log w - 10 \log 10^{-12}$$

$$Lw = 10 \log w + 120$$

$$10 \log w = Lw - 120 \text{ و یا}$$

حال اگر در رابطه قبلی بجای  $10 \log w$  معادل آن یعنی  $Lw - 120$  قرار دهیم داریم:

$$Lp = Lw - 120 + 10 \log \rho_0 c + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) - 20 \log 2 \times 10^{-5}$$

در صورتی که امپدانس ویژه صدا در ۲۲ درجه سانتیگراد و ۷۵۱ میلیمتر جیوه برابر با MKS Rayls ۴۱۷ باشد داریم:

$$Lp = Lw + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

رابطه فوق تراز فشار صوت در دستگاه متریک یا MKS می باشد. در صورتی که واحد  $r$  و  $R$  فوت مربع باشد رابطه تراز فشار صوت در دستگاه انگلیسی به شرح ذیل خواهد بود:

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

$$Lp = Lw + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) + 10$$

بنابراین برای تعیین وضعیت جذب صوت و تاثیر آن بر کنترل صدا ابتدا کمیتی بنام ثابت جذب اتاق R را باید محاسبه نمود.

$$R = \frac{S\bar{a}}{1-a}$$

S = سطح کلی اتاق m<sup>2</sup>

S $\bar{a}$  = سطح موثر جاذب (سایین مترمربع یا سایین فوت مربع)

نکات:

هر چه سطح جاذب بزرگتر باشد، R بزرگتر خواهد بود و هر چه R بزرگتر باشد مطلوب تر است.

$$Lp = Lw + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$$Lp = Lw + 10 \log \frac{4}{R}$$

$\frac{Q}{4\pi r^2}$

عملاً  $\frac{Q}{4\pi r^2}$  به علت بزرگ بودن R و با فاصله زیاد از منبع ناچیز می شود.

L<sub>p</sub> = تراز فشار صوت dB

L<sub>w</sub> = تراز توان منبع

Q = ضریب جهت

r = فاصله از منبع صوتی m

L<sub>p</sub> = L<sub>w</sub> + 6 - 10 log R

اگر بخواهیم تراز توان صوت را بدست آوریم داریم:

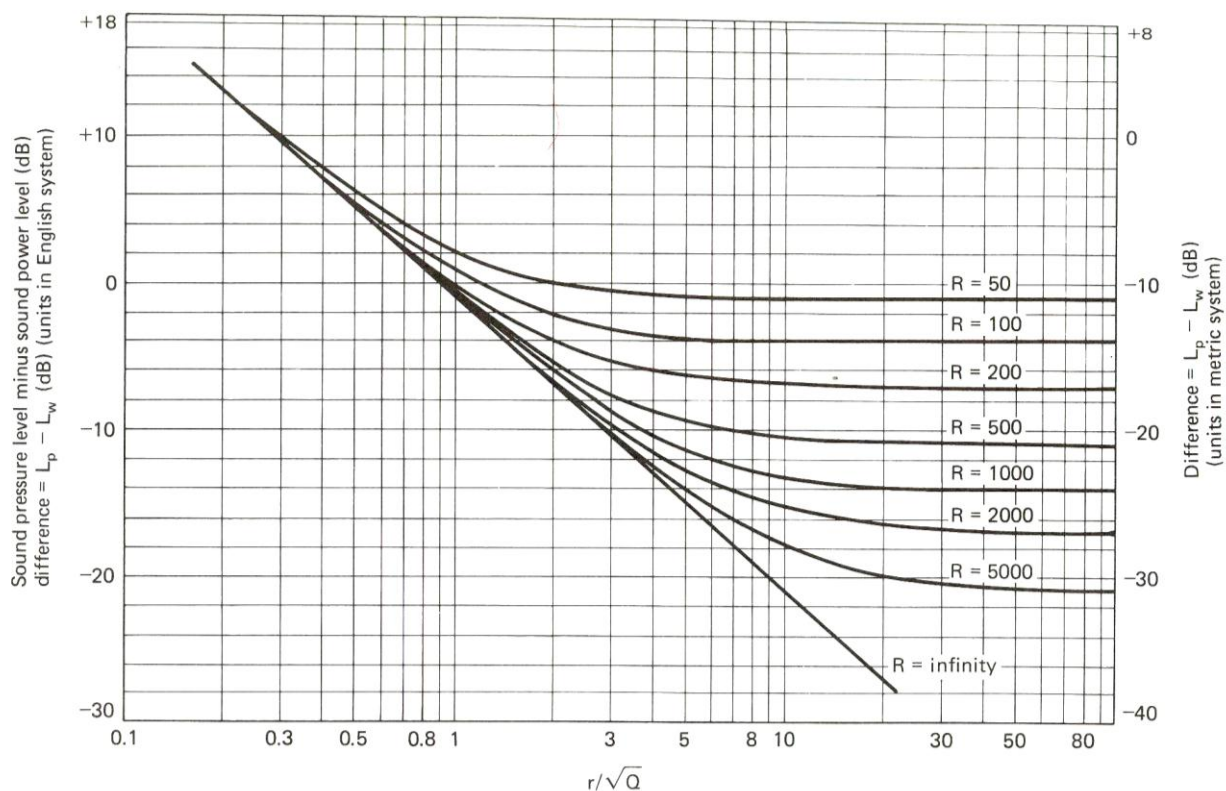
$$Lw = Lp - 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) - 10$$

اختلاف بین تراز فشار صوت و تراز توان صوت برای منبع صوت با توزیع کروی (Q=1) برابر است با:

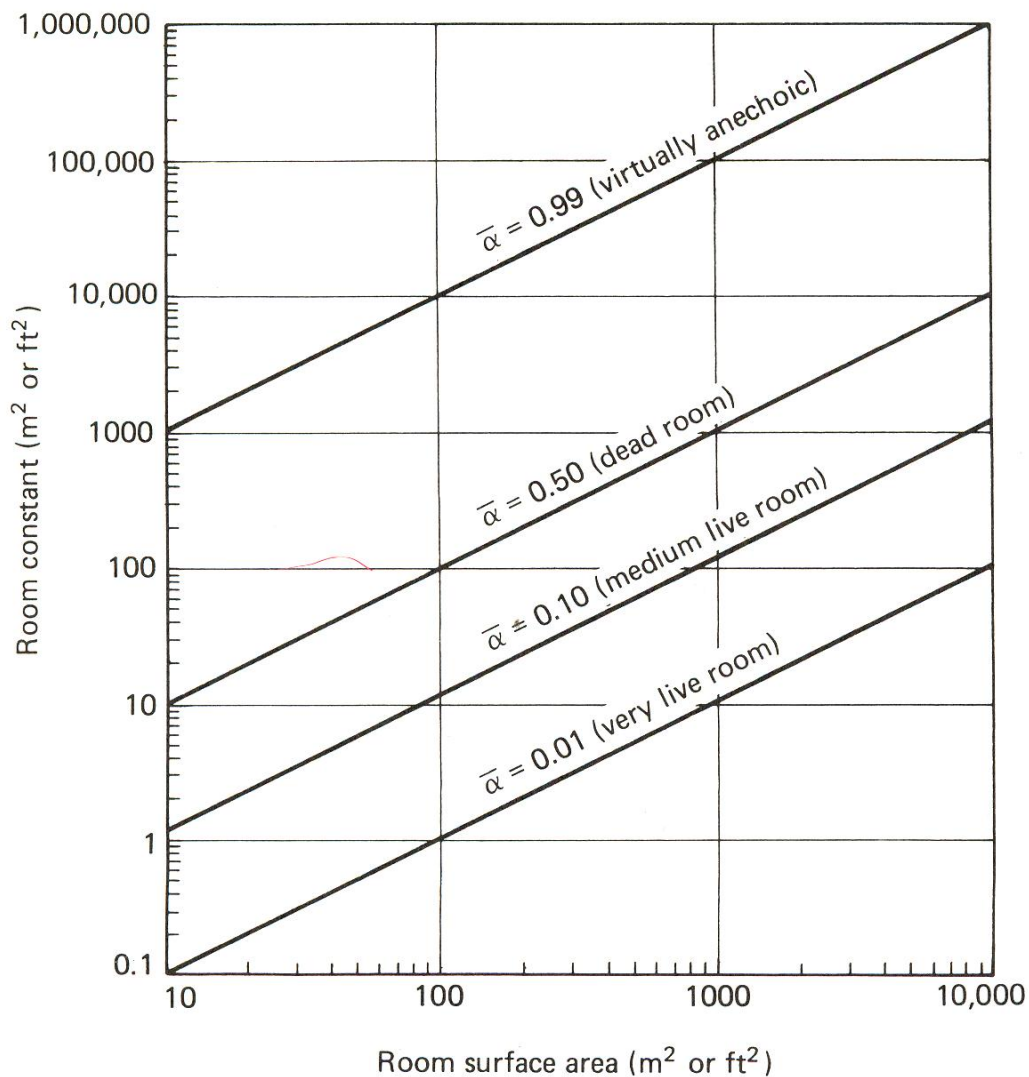
$$Lp = Lw + 10 \log \left( \frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) + 10$$

همچنین می توان تفاوت این دو تراز یعنی L<sub>p</sub>-L<sub>w</sub> را از روی نمودار ..... بدست آورد. در این نمودار محور افقی فاصله از منبع صوت (فوت یا متر) و محور عمودی L<sub>p</sub>-L<sub>w</sub> خواهد بود. منحنی های داخل نمودار ثابت اتاق های مختلف را نشان می دهد.

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

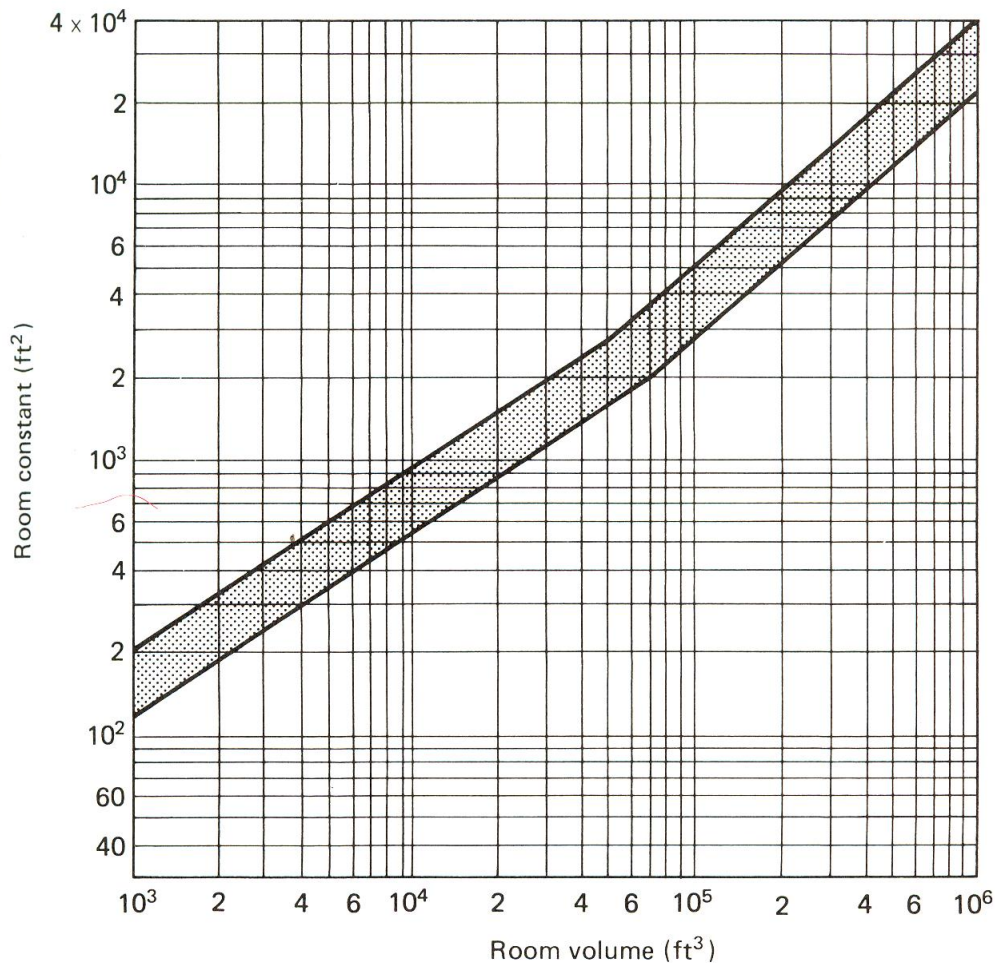


نمودار .....: نمودار تعیین  $L_p - L_w$  برحسب فاصله از منبع و ثابت اتاق  
همچنین برای برآورد ثابت اتاق می توان از نمودار ..... استفاده کرد. با داشتن مساحت سطوح اتاق و ضریب جذب متوسط می توان  $R$  را تعیین نمود.



نمودار ثابت اتاق بر حسب ضریب جذب متوسط و مساحت سطوح اتاق





مسئله: در صورتی که منبع صوت با توزیع غیرکروی با تراز توان صوت ۱۲۰ دسیبل در اتاقی با ثابت اتاق  $R = ۵۰۰$  فوت مربع باشد مطلوب است:  
 الف) تراز فشار صوت در فاصله ۱۰ فوت از منبع  
 ب) اگر میدان آزاد باشد تراز فشار صوت در فاصله ۱۰ فوت از منبع.

حل:

الف) از روی نمودار .....  $L_p - L_w = -۱۰/۴$  dB خواهد بود از طرفی با توجه به  $L_w = ۱۲۰$  dB داریم:

$$L_p = L_w - ۱۰/۴ \text{ dB} = ۱۲۰ - ۱۰/۴ = ۱۰۹/۶ \text{ dB}$$

ب) به فرض میدان آزاد از روی نمودار فوق  $L_p - L_w = ۲۱$  dB است. حال تراز فشار صوت در فاصله ۱۰ فوتی از منبع و با  $L_w = ۱۲۰$  dB برابر است با:

$$L_p = ۱۲۰ - ۲۱ = ۹۹ \text{ dB}$$

بنابراین تراز فشار صوت در میدان آزاد ۱۱ دسیبل از توزیع غیرکروی کمتر است.

مسئله: در صورتی که توان منبع ۱ وات و ثابت اتاق ۱۰۲۵ فوت مربع باشد و انرژی صوت در منبع بصورت یکنواخت در زاویه فضایی  $۲\pi$  رادیان منتشر شود دانسیته انرژی در فاصله ۱۵ فوتی از منبع چقدر است؟ (سرعت برابر ۱۱۲۸ فوت بر ثانیه می باشد)

$$\delta_\theta = \frac{WQ}{4\pi r^2 c}$$

$$\delta_\theta = \frac{1 \times 1}{4\pi \times 15 \times 15 \times 1128}$$

مسئله: در صورتی که ضریب جذب متوسط اتاق ۰/۳ باشد مطلوب است ثابت اتاق در حالات زیر:

الف) اگر ابعاد اتاق  $۴۰ \times ۴۰ \times ۲۰$  فوت باشد.

ب) اگر ابعاد اتاق  $۱۵ \times ۳۰ \times ۱۵$  فوت باشد.

حل: الف)

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

$$R = \frac{\bar{a}S}{1-\bar{a}}$$

$$S = (40 \times 40 \times 2) + (40 \times 20 \times 2) \Rightarrow S = 3200 + 3200 = 6400m^2$$

$$R = \frac{0.3 \times 6400}{1-0.3} = \frac{1920}{0.7} = 27.45$$

(ب)

$$S = (15 \times 30 \times 2) + (30 \times 15 \times 2) + (15 \times 15 \times 2)$$

$$S = 900 + 900 + 450 = 2250$$

$$R = \frac{\bar{a}s}{1-\bar{a}} = \frac{0.3 \times 2250}{1-0.3}$$

مسئله ۳: در صورتی که منبع صوت با توزیع غیرکروی یا توان ۲ وات در یک اتاق با ضریب جذب متوسط ۰/۲ و ابعاد ۱۵ × ۲۰ × ۲۰ فوت باشد. مطلوب است تراز فشار صوت در فاصله ۲۰ فوتی از منبع؟

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) + 10$$

$$L_w = 10 \log W + 120$$

$$L_w = 10 \log 2 + 120 = 123dB$$

$$R = \frac{\bar{a}S}{1-\bar{a}}$$

$$R = \frac{[(20 \times 20 \times 2) + (20 \times 15 \times 4)] \times 0.2}{1-0.2} \Rightarrow \frac{2000 \times 0.2}{1-0.2} = \frac{400}{0.8} = 500$$

$$L_p = 123 + 10 \log \left( \frac{2}{4\pi(20 \times 20)} + \frac{4}{500} \right) \Rightarrow L_p = 112dB$$

پدیده جذب صدا و ضریب جذب<sup>۱</sup>

جذب صوت در مواد مختلف انتخابی و ثابت است لذا هر ماده ای از نظر جذب انرژی در کل باند فرکانسی و نیز در فرکانس ضریب جذب مخصوص دارد. ضریب جذب صوت هر ماده عبارت است از نسبت انرژی صوتی جذب شده به

$$a = \frac{E_a}{E_i}$$

ضریب جذب آمار:  $E_a$  انرژی صوتی اولیه (شدت یا فشار) انرژی صوتی جذب شده توسط سطوح اتاق به انرژی صوتی برخوردی<sup>۲</sup> در محیط کاملاً پخش شده است. ضریب جذب تعدادی از مصالح ساختمانی متداول در جدول شماره ..... آمده است. ضریب جذب صفر به معنی انعکاس تمام صوت و ضریب جذب صد یعنی جذب کامل صوت است ضریب جذب با افزایش ضخامت تقریباً بصورت خطی افزایش می یابد میزان جذب بستگی به نوع ماده جاذب، ضخامت ماده جاذب و کل سطح ماده جاذب دارد. اکثر ضریب جذب مواد بر مبنای میزان نابودی و زوال انرژی صوتی در اتاق باز آوی می باشد. این ضریب تحت عنوان ضریب جذب سابین<sup>۳</sup> نام دارد. در بعضی موارد ضریب جذب آماری با ضریب جذب سابین حدود ۲۰-۳۰ درصد اختلاف وجود دارد ولی در رابطه با صدای صنعت و آژیه ضریب جذب بکار می رود و معادلات مربوطه عمدتاً از ضریب جذب آماری گرفته شده اند. با توجه به اینکه مواد و مصالح مورد استفاده در سطوح اتاق متفاوت می باشند لذا باید در ضریب جذب متوسط<sup>۴</sup> ( $\bar{a}$ ) اتاق استفاده نمود.

جدول .....: ضریب جذب مواد و مصالح ساختمانی متداول

<sup>۱</sup> - absorption coefficient

<sup>۲</sup> - Statistical absorption coefficient

<sup>۳</sup> - acoustical energy incident

<sup>۴</sup> - Sabin absorption coefficient

<sup>۵</sup> - average absorption coefficient

باید توجه داشت که تراز فشار صوت محاسبه شده فوق بدون احتساب جذب صوت توسط هوا و کاهش ناشی از آن خواهد بود. چون صوت هنگام عبور از هوا و یا هر محیط مادی دیگر<sup>۱</sup> کاهش خواهد یافت و این کاهش در مسافت های طولانی بخصوص در محیط های باز حائز اهمیت است. براساس مطالعات Beranek میزان کاهش اضافی ناشی از هوا در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد (۶۸ درجه فارنهایت) از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$A_{ex} = 7.4 \left( \frac{f^2 r}{\Phi} \right) 10^{-8} \text{ dB}$$

بطوری که :

$A_{ex}$  = میزان کاهش اضافی برحسب دسیبل  
 $f$  = میانگین فرکانس برحسب هرتز  
 $r$  = فاصله بین منبع و دریافت کننده صوت برحسب متر  
 $\Phi$  = رطوبت نسبی برحسب درصد

مثال: در صورتی که منبع صوتی با توزیع کروی در محیط خارج با تراز توان صوت ۱۲۰ دسیبل و فرکانس ۲۰۰۰ هرتز قرار گرفته باشد، تراز فشار صوت در فاصله ۲۵۰۰ فوتی یا ۷۶۲ متر از منبع در هوای ۲۰ درجه سانتیگراد و با رطوبت نسبی ۶۵٪ چقدر است؟

$$Lp_0 = Lw + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} + 10$$

$$Lp_0 = 120 + 10 \log \frac{1}{4\pi \times (2500)^2} + 10$$

$$Lp_0 = 51 \text{ dB}$$

بدون احتساب کاهش ناشی از دما و رطوبت

حال میزان کاهش اضافی ناشی از هوا برابر است با:

$$A_{ex} = 7.4 \left( \frac{(2000)^2 (762)}{65} \right) 10^{-8} = 3.47$$

$$Lp = Lp_0 - A_{ex}$$

$$Lp = 51 - 3.47 = 47.53 \approx 48 \text{ dB}$$

همانطور که قبلاً بیان شد تراز فشار صوت بدست آمده باید به شبکه وزنی A (dBA) محاسبه و تبدیل شود برای این منظور مراحل زیر باید انجام شود.

<sup>۱</sup> - medium

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

- ۱- تراز توان صوت را در فاصله مورد نظر از منبع در فرکانس های مختلف اکتوباند (۳۱/۵، ۶۳، ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ هرتز) بدست آورید.
- ۲- تراز فشار صوت را با استفاده از رابطه ..... برای کلیه فرکانس ها بدست آورید.
- ۳- تراز فشار صوت را برای شبکه A (LPA) در همه فرکانس ها با استفاده از جدول ..... تبدیل نمایید.
- ۴- مجموع تراز فشار صوت در شبکه A را برای کلیه فرکانس ها با استفاده از رابطه Lpt (تراز فشار صوت کلی) بدست آورید.

مثال: در صورتی که تراز توان صوت ماشینی در فرکانس ۲۰۰۰ هرتز و در اتاقی با ضریب جهت ۲ و ثابت ۵۵۰ فوت مربع برابر ۱۲۰ دسیبل باشد تراز فشار صوت در شبکه A (dBA) در فاصله ۱۵ فوت از منبع چقدر است؟  
حل:

$$Lp = 120 + 10 \log \left[ \frac{2}{4\pi(15)^2} + \frac{4}{550} \right] + 10$$

$$Lp = 109 \text{ dB}$$

حال با استفاده از جدول ..... برای تبدیل تراز فوق به LPA برای فرکانس ۲۰۰۰ باید ۱/۲ را به عدد فوق اضافه نمود.

$$LpA = Lp + 1,2$$

$$LpA = 109 + 1,2 = 110 \text{ dBA}$$

مسئله: در صورتی که تراز توان صوت منبعی با توزیع کروی در فاصله ۲۰ فوتی در فرکانس ۱۲۵ هرتز ۱۲۰ دسیبل، ۲۵۰ هرتز ۱۲۲ دسیبل، ۵۰۰ هرتز ۱۲۱ دسیبل و ۱۰۰۰ هرتز ۱۱۹ دسیبل باشد، تراز فشار صوت در شبکه A (LPA) در اتاق با ثابت ۶۲۵ فوت مربع چقدر است؟

$$Lw = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^4 Lwi/10$$

$$Lw = 10 \log \left[ \frac{1}{4} \left( 10^{\frac{125}{10}} + 10^{\frac{122}{10}} + 10^{\frac{121}{10}} + 10^{\frac{119}{10}} \right) \right]$$

$$Lp = Lw + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) + 10$$

$$Lp_1 = 120 + 10 \log \left( \frac{1}{4\pi(20)^2} + \frac{4}{625} \right) + 10 = \text{در فرکانس ۱۲۵}$$

$$Lp_2 = 122 + 10 \log \left( \frac{1}{4\pi(20)^2} + \frac{4}{625} \right) + 10 = \text{در فرکانس ۲۵۰}$$

$$Lp_3 = 121 + 10 \log \left( \frac{1}{4\pi(20)^2} + \frac{4}{625} \right) + 10 = \text{در فرکانس ۵۰۰}$$

$$Lp_4 = 119 + 10 \log \left( \frac{1}{4\pi(20)^2} + \frac{4}{625} \right) + 10 = \text{در فرکانس ۱۰۰۰}$$

$$Lp_A = Lp_1 + (-1,6,1) \quad \text{تراز فشار صوت شبکه A برای فرکانس ۱۲۵}$$

$$Lp_A = Lp_2 - 1,6 \quad \text{تراز فشار صوت شبکه A برای فرکانس ۲۵۰}$$

$$Lp_A = Lp_3 - 3,2 \quad \text{تراز فشار صوت شبکه A برای فرکانس ۵۰۰}$$

$$Lp_A = Lp_4 + 0 \quad \text{تراز فشار صوت شبکه A برای فرکانس ۱۰۰۰}$$

$$Lp_t = 10 \log \left( 10^{\frac{Lp_1A}{10}} + 10^{\frac{Lp_2A}{10}} + 10^{\frac{Lp_3A}{10}} + 10^{\frac{Lp_4A}{10}} \right)$$

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

در صورتی که تراز فشار صوت در فرکانس های مختلف اکتاو باند داشته باشیم و بخواهیم تراز توان صوت در کلیه باندها حساب کنیم ابتدا باید تراز فشار صوت متوسط  $\bar{L}_p$  را با استفاده از روابط مربوطه محاسبه و سپس  $L_w$  را توسط رابطه زیر بدست آورد.

$$L_w = \bar{L}_p - 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) - 10$$

در صورتی که توزیع انرژی بصورت کروی<sup>۱</sup> و منبع صوت در فضای باز و محفظه<sup>۲</sup>.... باشد رابطه فوق به شکل زیر خواهد بود.

$$L_w = \bar{L}_p - 10 \log \left( \frac{1}{4\pi r^2} \right) - 10$$

$$L_w = \bar{L}_p + 10 \log(4\pi r^2) - 10$$

بطوری که :

$\bar{L}_p$ : تراز فشار صوت متوسط

r: فاصله از منبع برحسب فوت که  $\bar{L}_p$  اندازه گیری شده است.

تعیین مرحله به مرحله تراز توان صوت به شرح ذیل خواهد بود:

۱- تراز فشار صوت را در هر یک از فرکانس ها بدست آورید

۲-  $\bar{L}_p$  را با استفاده از فرمول زیر برای منابع با توزیع کروی و نیمه کروی به ترتیب محاسبه نمایید.

$$\bar{L}_p = 10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{pi}/10} \right] \quad \text{کروی}$$

$$\bar{L}_p = 10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{pi}/10} \right] - 3 \quad \text{نیمه کروی}$$

۳- ثابت اتاق را محاسبه نمایید.

۴- تراز توان صوت را محاسبه نمایید.

همچنین می توان تراز توان صوت را برای تراز فشار صوت های مختلف با استفاده از رابطه زیر بدست آورد. ( $L_{wi}$ )

$$L_{wi} = L_{pi} - 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) - 10$$

سپس تراز توان صوت متوسط را با استفاده از فرمول زیر محاسبه نمود:

$$\bar{L}_w = 10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{wi}/10} \right]$$

مثال : در صورتی که تراز فشار صوت منبعی در فاصله ۲۵ فوتی برابر ۱۰ دسیبل و ضریب جهت ۲/۵ باشد تراز توان صوت و توان منبع با فرض ثابت اتاق برابر با ۱۰۲۵ فوت مربع محاسبه نمایید.

$$L_w = 110 - 10 \log \left( \frac{2.5}{4\pi(20)^2} + \frac{4}{1025} \right) - 10$$

$$L_w = 123.75 \approx 124dB$$

در صورتی که بخواهیم توان منبع را بدست آوریم داریم:

$$W = W_{ref} \times 10^{L_w/10}$$

$$W = 10^{-12} \times 10^{124/10}$$

$$W = 10^{-12} \times 10^{12.4}$$

$$W = 10^{-12} \times 10^{12} \times 10^{0.4} = 10^{0.4} = 3.1$$

<sup>۱</sup> - spherically radiating point source

<sup>۲</sup> - anechoic chamber

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

در اغلب موارد تعیین مقدار موثر ثابت اتاق در محیط های صنعتی برای یک ماشین و دستگاه خاص مشکل می باشد. در این گونه موارد برای تعیین تراز توان صوت دستگاه باید منبع صوت کالیبره شده داشته باشیم.

ابتدا متوسط تراز فشار صوت دستگاه ( $\bar{Lp}$ ) در فاصله مشخص شده تعیین می شود. سپس منبع صوت رفرنس (کالیبره شده) در محل ماشین قرار می دهیم و متوسط تراز فشار صوت ( $Lpx$ ) را در همان فاصله قبلی و سایر شرایط مشابه اندازه گیری می کنیم. در صورتی که تراز توان صوت دستگاه و ماشین مبنا به ترتیب  $Lwx$  و  $Lws$  باشد (به فرض  $Q=1$  برای هر دو دستگاه اصلی و دستگاه رفرنس) داریم:

$$Lw_x = Lp_x - 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r_x^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$$Lw_s = \bar{Lp}_s - 10 \log \left( \frac{1}{4\pi r_s^2} + \frac{4}{R} \right)$$

بطوری که:  $r_x = r_s = r$ . و  $r$  = فاصله از منبع  
حال اگر دو رابطه فوق را از هم کم کنیم داریم:

$$Lw_x - Lw_s = \bar{Lp}_x - \bar{Lp}_s$$

و یا

$$Lw_x = Lw_s + (\bar{Lp}_x - \bar{Lp}_s)$$

بطوری که :

$Lwx$  = تراز توان صوت دستگاه اصلی

$Lws$  = تراز توان صوت دستگاه رفرنس (کالیبره شده)

$\bar{Lp}_x$  = تراز فشار صوت دستگاه اصلی در فاصله  $r$ .

$\bar{Lp}_s$  = تراز فشار صوت دستگاه رفرنس در فاصله  $r$ .

مثال: به منظور تعیین تراز توان صوت دستگاهی از یک منبع رفرنس با تراز توان ۹۰ دسیبل در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز استفاده گردید. بطوری که متوسط تراز فشار صوت منبع رفرنس در فاصله ۶ متری برابر با ۷۱ دسیبل بود. در حالی که متوسط تراز فشار صوت دستگاه اصلی در فاصله ۶ متری ۸۰ دسیبل است. تراز توان صوت دستگاه در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز چقدر است؟

$$Lw_x = 90 + (80 - 71) = 99dB$$

زمان بازآوایی (یا زمان واخنش)

در صورتی که صوت منتشر شده از منبع پس از برخورد با سطوح، بازتاب های مکرر و متوالی داشته باشد در این صورت بازآوایی اکوستیکی خواهیم داشت لذا در صورتی که میدان پخش شده باشد یعنی بازتاب های صوتی بطور کامل در محیط وجود داشته باشد ضریب جذب کم می باشد برای مثال چنانچه منبع صوت در اتاقی با دیوار، سقف و کف سخت و بدون نشئی قرار دهیم در این صورت انرژی صوت قبل از جذب به دفعات بازتاب خواهد داشت. اگر بازتاب سطوح کامل فرض شود تراز فشار صوت از نظر تئوری به مقدار بسیار زیادی افزایش خواهد یافت. در صورتی که رابطه قبلی تراز فشار صوت را بنویسیم داریم:

$$Lp = Lw + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

ثابت اتاق نیز برابر است با:

$$R = \frac{\bar{a}S}{1 - \bar{a}}$$

در صورتی که ضریب جذب متوسط  $\bar{a}$  کم باشد یعنی  $\bar{a} \rightarrow 0$  به سمت صفر میل می کند (در این صورت ثابت اتاق  $R \rightarrow 0$  نیز به سمت صفر میل می کند) در این صورت داریم:

<sup>۱</sup> - approaches zero

\* ولی در فاصله  $R=5000$  در فاصله ۳۰ فوت به فاصله حد می رسد.

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

$$Lp = Lw + 10 \log \infty$$

$$Lp = \infty dB$$

مفهوم فیزیکی آن این است که اگر جاذب صوت در محیط وجود نداشته باشد تراز فشار صوت به علت بازتاب های پی در پی افزایش خواهد یافت. از طرف دیگر چنانچه R کوچک شود کسر  $\frac{4}{R}$  بزرگ خواهد شد. لذا در محیط های باز آو

$$\frac{4}{R} \geq \frac{Q}{4\pi r^2}$$

صرف نظر کرد لذا رابطه ما به شکل زیر تغییر خواهد یافت:

$$Lp = Lw + 10 \log \frac{4}{R}$$

یا

$$Lp = Lw + 10 \log 4 - 10 \log R$$

$$Lp = Lw - 10 \log R + 6dB$$

در سیستم انگلیسی فرمول به صورت زیر خواهد بود:

$$Lp = Lw - 10 \log R + 6 + 10$$

$$Lp = Lw - 10 \log R + 16dB$$

مفهوم فیزیکی روابط فوق این است که در محیط هایی که فاقد جاذب صوت باشند وابستگی تراز فشار صوت به فاصله از بین می رود و فقط به ثابت اتاق (R) بستگی پیدا خواهد کرد.

هرچه R بزرگتر شود ضریب جذب بزرگتر شده و تراز فشار صوت کاهش پیدا می کند اگر این امر برای مقادیر مختلف بدست آوریم نتیجه می شود که در یک میدان پخش شده با افزایش فاصله، اختلاف بین تراز فشار صوت و تراز توان صوت (Lp-Lw) کاهش پیدا می کند و در یک فاصله مشخص به یک مقدار حد می رسد در نمودار ..... ملاحظه می شود که در تمام نمودارها با افزایش فاصله یک کاهش دارند و هر کدام در یک فاصله معینی به مقدار حد می رسند (فاصله حد وقتی است که نمودار بصورت خط درآمده است) هر چه بازتابهای صوتی در محیط بیشتر باشد یعنی R کوچکتر باشد در این صورت Lp-Lw در فاصله کمتری به فاصله حد می رسد برای مثال اگر R=50 باشد تقریباً در فاصله 30 فوت به فاصله حد می رسد. لذا هر چه بازتابهای صوتی بیشتر باشد (R کوچکتر باشد) اثر فاصله سریعتر از بین می رود.

مثال: ماشینی با ضریب جهت یک و تراز توان صوت 120 دسیبل در فرکانس 2000 هرتز در اتاق کوچکی با ثابت اتاق 9/29 مترمربع (100 فوت مربع) در حال کار است.

الف) تراز فشار صوت در این میدان باز آو چقدر است؟

ب) در چه فاصله ای از ماشین تراز فشار صوت به اندازه یک دسیبل افزایش خواهد یافت؟

$$Lp = 120 - 10 \log 9.29 + 6 \Rightarrow Lp = 116dB$$

حل: الف)

ب) برای تعیین فاصله با استفاده از رابطه زیر محاسبه را انجام می دهیم.

$$Lp = Lw + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$$r = \left\{ \frac{Q}{4\pi \left[ 10^{(Lp-Lw)/10} - \frac{4}{R} \right]} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

حال r بر حسب متر عبارت خواهد بود از:

چون می خواهیم تراز فشار صوت یک واحد بیشتر باشد پس  $Lp = 116 + 1$  یعنی 117 دسیبل خواهد شد. بنابراین:

$$r = \left\{ \frac{1}{4\pi \left[ 10^{(117-120)/10} - \frac{4}{9.29} \right]} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$r = 1.06 \text{ متر}$$

یا  $\Gamma = 3/48$  فوت

بنابراین در صورتی که فاصله کارگر از ماشین به اندازه  $1/0.6$  متر بیشتر شود تراز فشار صوت به اندازه یک دسیبل کاهش خواهد یافت و بالعکس

مثال: سه دستگاه بافندگی در یک کارگاه به طول و عرض و ارتفاع ۶ و ۶ و ۳ متر در یک ردیف به فاصله ۱ متر کنار دیوار چیده شده اند فاصله کارگر ۳ متر از ماشین وسط در حالت نشسته می باشد توان هر منبع  $W = 0.1$  است.  
 الف) SPL را در حالتی که جذب صوت حداقل باشد.  
 ب) SPL را در حالتی که ضریب جذب  $0.7$  و دیوارها  $0.6$  باشد.  
 ج) میزان فرکانس SPL محاسبه کنید.

مراحل حل :

تراز توان را محاسبه می کنیم.

حجم کارگاه را محاسبه می کنیم.

ثابت جذب اتاق (R) را برای جذب حداقل  $\alpha = 0.1$  بدست می آوریم.

را با توجه به ثابت جذب اتاق (R) و جذب حداقل بالا محاسبه می کنیم

تراز فشار صوت  $SPL_1$  را با توجه به به ثابت جذب اتاق (R) و جذب حداقل و فاصله کارگر از هر دستگاه بطور جداگانه از رابطه زیر بدست می آوریم.

$$Lp = Lw + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

با توجه به  $SPL_1$  محاسبه شده ،  $LP_{T1}$  را با توجه به تعداد دستگاه و محل استقرار کارگر و با استفاده از فرمول جمع دسیبل ها محاسبه می کنیم.

$$Lp_t = 10 \log \sum 10^{Lp_i/10}$$

تراز فشار صوت  $SPL_2$  را با توجه به ضریب جذب مواد جاذب و ثابت جذب اتاق جدید محاسبه می کنیم.

$LP_{T2}$  را با توجه به  $SPL_2$  مجدد محاسبه می کنیم.

شاخص NA یعنی Noise absorptive با استفاده از  $NA = LPT_1 - LPT_2$

مثال: در صورتی که اتاقی به ابعاد  $40 \times 70$  فوت و ارتفاع ۱۲ فوت و ضریب جذب کف، دیوار و سقف به ترتیب  $0.1$ ،  $0.7$  و  $0.7$  باشد ضریب جذب متوسط اتاق را در فرکانس ۱۰۰۰ تعیین نمایید.

مساحت کف:  $S_1 = 40 \times 70 = 2800$  فوت مربع

مساحت دیوارها:  $S_2 = 2 \times (40 \times 12) + 2 \times (70 \times 12) = 220 \times 12 = 2640$  فوت مربع

مساحت سقف:  $S_3 = 40 \times 70 = 2800$  فوت مربع

$$\bar{a} = \frac{S_1 \times a_1 + S_2 \times a_2 + S_3 \times a_3}{S_1 + S_2 + S_3} = \frac{(2800 \times 0.1) + (2640 \times 0.2) + (2800 \times 0.7)}{2800 + 2640 + 2800} = 0.34$$

بنابراین زمان باز آوایی مربوط به بازتاب های متوالی صوت در محیط می باشد. همانطور که بیان شد چنانچه منبع صوتی در محیط کوچکی با سقف، دیوار و کف محدود باشد در این صورت هم موج های مستقیم و هم بازتاب های صوتی داریم (شکل ...). تا جایی که میدان پخش شده خواهیم داشت براساس تعریف سابقین زمان باز آوا یا زمان واخنش مدت زمانی است که لازم است تراز فشار صوت به میزان ۶۰ دسیبل کاهش و یا اینکه مقدار فشار صوت به میزان  $10^{-1}$  کمتر از مقدار اصلی آن باشد. رابطه زیر دانسیته انرژی براساس زمان را نشان می دهد.

$$\frac{d\delta'}{dt} + \frac{\bar{a}cs}{4v} \delta' = \frac{W}{V}$$

در صورتی که ماشین خاموش باشد دانسیته انرژی به شکل زیر خواهد بود:

$$\frac{d\delta'}{dt} + \frac{\bar{a}cs}{4v} \delta' = 0$$



تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

در زمان  $t = 0$  مقدار  $\delta'$  برابر با  $\frac{4W}{\bar{a}cs}$  و دانسیته انرژی برابر است با  $\delta' = \frac{4W}{\bar{a}cs} e^{-(\bar{a}cs/4v) \times t}$  خواهد شد. همانطور که مشخص است با گذشت زمان دانسیته انرژی کاهش خواهد یافت. میزان دانسیته انرژی زوال یافته در اتاق بوسیله جذب انرژی در اتاق تعیین می شود لذا زمان بازآوایی یا واختنش ممکن است براساس رابطه فوق تعریف زمان واختنش بشرح ذیل حاصل شود.

$$\frac{4W}{\bar{a}cs} \times 10^{-6} = \frac{4W}{\bar{a}cs} e^{-(\bar{a}cs/4v) \times T}$$

زمانی که زمان تناوب T میزان دانسیته انرژی به  $10^{-6}$  مقدار اصلی آن برسد مقدار آن به 60 دسیبل کاهش خواهد یافت بطور قراردادی مدت زمان کاهش صدا در یک محیط به اندازه 60 dB را زمان بازآوایی یا واختنش می نامند لذا رابطه فوق به رابطه زیر ساده خواهد شد.

$$e^{-(\bar{a}cs/4v) \times T} = 10^{-6}$$

$$L_n(10^6) = \frac{\bar{a}cs}{4V} T$$

$$T = \frac{4V}{\bar{a}cs} L_n(10^6)$$

با توجه به اینکه ضریب جذب  $\bar{a}$  برای همه سطوح یکسان نمی باشد. بنابراین :

$$A = \bar{a}S = a_1S_1 + a_2S_2 + \dots + a_nS_n$$

فوت مربع (سایین) یا مترمربع (سایین متریک)

$$A = \sum_{i=1}^n a_i S_i$$

در صورتی که ضریب جذب کلی برابر با 1 سایین شود می توان گفت که 1 سایین مشابه یک پنجره باز به مساحت یک فوت مربع عمل می کند.

بطوری که :

$a_i$  = ضریب جذب

$S_i$  = مساحت سطوح اتاق

$A$  = جذب کلی اتاق

در صورتی که در رابطه فوق بجای  $\bar{a}S'$  معادل آن یعنی A قرار دهیم داریم:

$$T = \frac{4L_n(10^6)}{C} \times \frac{V}{A}$$

در صورت حل رابطه فوق زمان بازآوایی برحسب ثانیه در دستگاه متریک ( $C = 344$  متر بر ثانیه) و انگلیسی (فوت بر ثانیه) به ترتیب برابر خواهد بود با:

$$T = 0.161 \left( \frac{V}{A} \right)$$

در دستگاه متریک

$$T = 0.049 \left( \frac{V}{A} \right)$$

در دستگاه انگلیسی

لازم به ذکر است که در اتاق کوچک جذب هوا مد نظر نمی باشد ولی در اتاق های بزرگ میزان جذب هوا نیز حائز اهمیت است. در اتاق هایی که طول (L) و عرض (W) با هم برابر و ارتفاع سقف (h) نیز نصف عرض اتاق و ضریب جذب برابر

$\frac{1}{8}$

با 8 باشد بازآوایی برابر است با:

$$T = 0,02$$

الف) در صورتی که ابعاد اتاق برحسب متر باشد

L

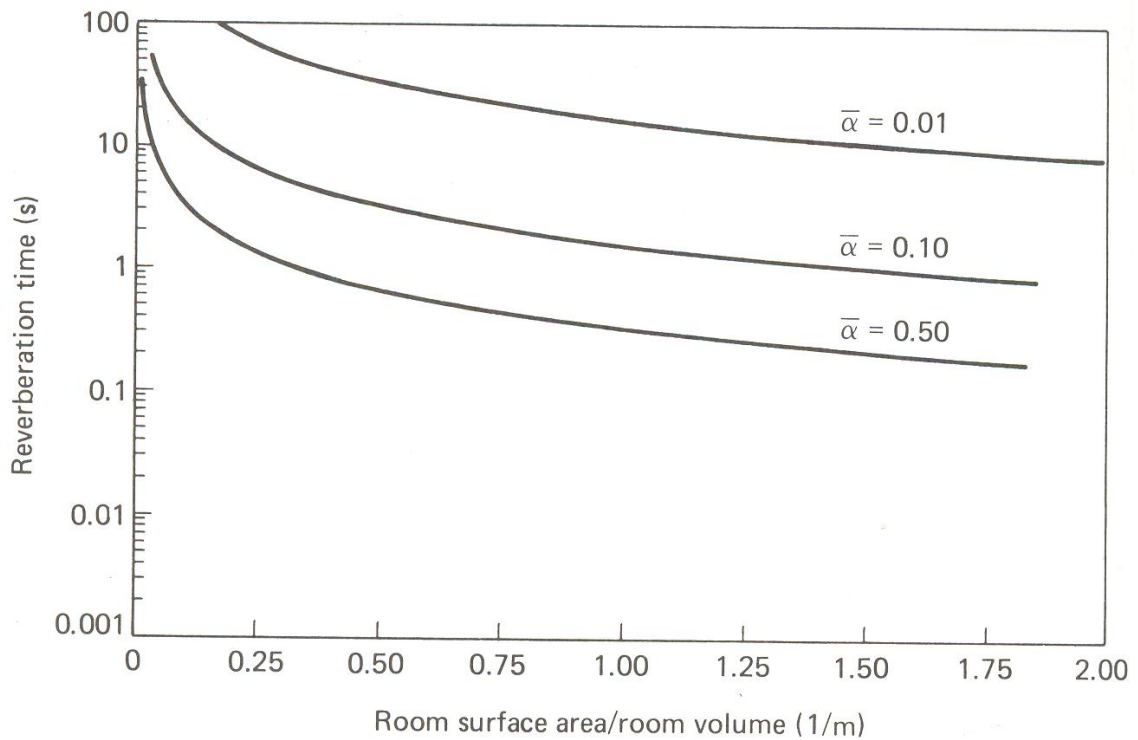
$$T = 0,006 L$$

ب) در صورتی که ابعاد اتاق برحسب فوت باشد

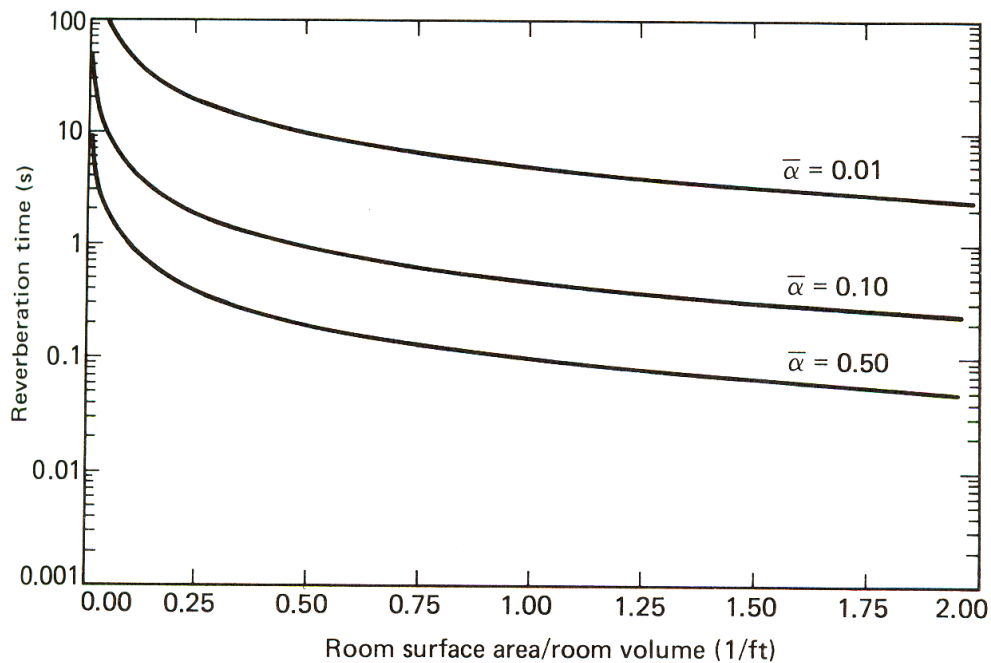
در صورتی که ضریب جذب برابر با یک ( $\bar{a} = 1$ ) باشد مقدار واقعی زمان واختنش برابر با صفر خواهد بود ولی مقدار

پیش بینی شده آن طبق فرمول برابر با  $T = 0,03$  خواهد شد.

همچنین برای بدست آورد T می توان از نمودارهای ..... و ..... در دستگاه متریک و انگلیسی به ترتیب استفاده نمود.



نمودار ..... مقدار زمان واخنش برحسب ضریب جذب و نسبت مساحت سطوح اتاق به حجم اتاق در سیستم متریک



نمودار ..... مقدار زمان واخنش برحسب ضریب جذب و نسبت مساحت سطوح اتاق به حجم اتاق در سیستم انگلیسی

در صورتی که ضریب جذب بالا باشد و رابطه دقیق تر و صحیح تر مدنظر باشد از روابط زیر استفاده می کنیم:

$$T = 0.161 \frac{V}{S[-\ln(1-\bar{a})]}$$

در دستگاه متریک برحسب ثانیه

$$T = 0.049 \frac{V}{S[-\ln(1-\bar{a})]}$$

در دستگاه انگلیسی برحسب ثانیه

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

مثال: در صورتی که ابعاد اتاق  $20 \times 15 \times 12$  فوت و ضریب جذب متوسط  $0.2$  باشد زمان بازآوایی چقدر است؟

$$T = 0.049 \frac{V}{A}$$

$$V = 20 \times 15 \times 12 = 360$$

$$S = (20 \times 15 \times 2) + (20 \times 12 \times 2) + (15 \times 12 \times 2) = 1440$$

$$A = S\bar{a} = 1440 \times 0.2 = 288$$

$$T = 0.049 \frac{3600}{288} = 0.6$$

مسئله: در صورتی که ابعاد اتاقی  $20 \times 20 \times 12$  فوت و ضریب جذب متوسط آن  $0.3$  باشد چه مدت زمانی طول می کشد تا دانسیته انرژی به  $40$  دسیبل کاهش یابد.

مسئله: در صورتی که دیوارهای اتاقی به ابعاد  $4 \times 5$  فوت توسط مواد اکوستیکی پوشیده شوند و ضریب جذب  $0.3$  باشد. ضریب جذب کلی چقدر است؟

$$A = S\bar{a}$$

$$A = 20 \times 0.3 = 6$$

یعنی مواد جاذب به مساحت  $20$  فوت مربع مانند یک پنجره ای باز با مساحت  $6$  فوت مربع عمل می کند. می توان از جذب هوا در فرکانس کمتر از  $1000$  هرتز بجز در اتاق های بسیار بزرگ صرف نظر نمود. ولی در محیط های بزرگ و در تواترهای بالاتر از  $1000$  هرتز جذب توسط هوا نیز مطرح است چون امواج صوتی باید مسیر طولانی تری را طی کرده تا به سطح بعدی برای بازتاب برسد. در این صورت از رابطه زیر باید استفاده نمود:

$$T = \frac{0.049V}{A + 4mV}$$

در دستگاه متر بک

$$T = \frac{0.161V}{A + 4mV}$$

در دستگاه انگلیسی

بطوری که:

$m$  = ضریب جذب هوا که بستگی به رطوبت نسبی و فرکانس دارد.

رطوبت نسبی در اکثر محیط های صنعتی بین  $40$  تا  $90$  درصد متغیر است لذا ضریب جذب هوا در فرکانس های بالا و رطوبت نسبی های مختلف در جدول زیر داده شده است.

جدول: ضریب جذب هوا بر حسب فرکانس و رطوبت نسبی

۸۰۰۰	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۱۲۵	فرکانس مرکزی
/۵	/۴	/۳	/۲۵	/۲	/۱۵	/۱	$\bar{a}$

می باشد.

مثال: ابعاد یک محیط صنعتی  $18 \times 100 \times 100$  فوت می باشد. متوسط ضریب جذب در فرکانس های اکتاو باند بشرح ذیل

بیناب زمان واختمش را در محیط حساب کنید.

چون وسایل و دستگاه در اتاق وجود ندارند پس حجم برابر است با:

$$V = 100 \times 100 \times 18$$

$$V = 180000$$

$$S = (100 \times 100 \times 2) + (100 \times 18 \times 4)$$

$$S = 20000 + 7200 = 27200$$

$$T_{125} = \frac{0.049 \times 180000}{27200 \times 0.1} = 3.2S$$

$$T_{250} = \frac{0.049 \times 180000}{27200 \times 0.15} = 2.16S$$

$$T_{500} = \frac{0.049 \times 180000}{27200 \times 0.2} = 1.6S$$

$$T_{1000} = \frac{0.049 \times 180000}{27200 \times 0.25} =$$

تعیین ثابت اتاق<sup>۱</sup> با استفاده از زمان بازآوایی<sup>۲</sup>

هدف: کنترل انعکاس صوتی سطوح داخلی یک کارگاه با استفاده از روکش یا دیواره جذب بر روی سطوح اصلی است.

برای محاسبه ضریب جذب متوسط از رابطه زیر استفاده می شود:

$$R = \frac{\bar{a}S}{1 - \bar{a}}$$

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n s_i a_i}{\sum_{i=1}^n s_i} = \frac{s_1 a_1 + s_2 a_2 + \dots + s_n a_n}{s_1 + s_2 + \dots + s_n}$$

بطوریکه:

$s_i$  = مساحت هر یک از سطوح برحسب مترمربع یا فوت مربع

$a_i$  = ضریب جذب هر یک از سطوح

نکته مهم این است که ضریب جذب و ضریب جذب متوسط وابسته به فرکانس می باشند و این موضوع در مواد لیست شده

در جدول فوق مشهود است. در صورتی که ابعاد اتاق بزرگ باشد بهتر است جذب هوا<sup>۳</sup> را در فرکانس های بالاتر (۲۰۰۰ هرتز و بالاتر) مد نظر قرار داد. چون هر چه ابعاد اتاق بزرگتر باشد مسیر انتشار<sup>۴</sup> بین بازتابها نیز بزرگتر خواهد شد.

$$R = \frac{AS}{S - A}$$

$$A = 0.161 \left( \frac{V}{T} \right) \quad \text{برحسب متر مربع}$$

$$A = 0.049 \left( \frac{V}{T} \right) \quad \text{برحسب فوت مربع}$$

در صورتی که رابطه  $R = \frac{AS}{S - A}$  بجای A معادل آن قرار دهیم در صورت حل رابطه زمان بازآوایی برحسب ثانیه در

دستگاه متریک (c = ۳۴۴ متر بر ثانیه) و انگلیسی (فوت بر ثانیه) به ترتیب برابر خواهد بود با:

<sup>۱</sup> - Room constant

\* ولی در فاصله R = ۵۰۰۰ در فاصله ۳۰ فوت به فاصله حد می رسد.

<sup>۲</sup> - Reverberation time

\* ولی در فاصله R = ۵۰۰۰ در فاصله ۳۰ فوت به فاصله حد می رسد.

<sup>۳</sup> - atmospheric absorption

<sup>۴</sup> - propagation path

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

$$R = \frac{S}{\frac{TS}{0.161V} - 1}$$

ثابت اتاق بر حسب متر مربع

$$R = \frac{S}{\frac{TS}{0.049V} - 1}$$

ثابت اتاق بر حسب فوت مربع

مثال: در صورتی که ابعاد اتاق  $3 \times 15 \times 20$  متر و زمان بازآوایی ۲ ثانیه باشد ثابت اتاق چقدر است؟

مراحل محاسبه کاهش صدا در روش بازآوایی صوتی و حجم اتاق بعد از نصب جاذب سطحی:

الف) محاسبه زمان بازآوایی قبل و بعد از نصب جاذب سطحی

ب) تعیین میزان کاهش ناشی از نصب جاذب با توجه به حجم کارگاه.

-) با توجه به بازتاب های مکرر صوت در سطوح داخلی، فاصله از منبع اهمیت خود را از دست می دهد.

د) محاسبه SPL قبل و بعد از نصب جاذب

$$SPL = Lw - 10 \log V + 10 \log RT + 14$$

انواع جاذب های صوتی

جاذب صفحه ای ساده Membrane absorber

جاذب صفحه ای سوراخ دار Dissipative

جاذب محفظه ای یا حفره ای Cavity absorber

جاذب های صفحه ای: شامل یک لایه سبک با چگالی کم و حتی الامکان متخلخل است مانند نئوپان، تخته های چوبی چندلا، پلی اورتان (پونولیت)

هر ماده ای دارای ضریب جذب کلی Noise Reduction Coefficient (NRC) است.

$$NRC = \frac{a_{250} + a_{500} + S_{1000} + a_{2000}}{4}$$

جاذب های صفحه ای ساده دارای فرکانس حد است فرکانس حد یعنی اینکه ماده در این فرکانس بیشترین جذب را دارد.

برای محاسبه فرکانس حد برای جاذب سطحی ساده از رابطه زیر استفاده نمود

$$F_{(Hz)} = \frac{60}{\sqrt{md}}$$

m = چگالی سطحی  $\text{Kg/m}^2$

d = ضخامت کلاف زیرین یا صفحه تا دیوار (m)

جاذب صفحه ای سوراخ دار (Acoustic tile)

برای محاسبه فرکانس حد برای جاذب صفحه ای سوراخ دار از رابطه زیر استفاده نمود

$$F_{(Hz)} = \frac{3500 \times a}{d^2}$$

a = قطر سوراخ cm

b = فاصله دو سوراخ cm

فرکانس حد به چه عاملی بستگی دارد؟

برای انتخاب این نوع تایل می توان با داشتن a و b مشخص نمود.

جاذب های هلم هولتز

برای فرکانس های پایین و باند باریک مناسب و برای مکان های عمومی کاربرد دارد.

$$F_{(Hz)} = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{VL}}$$

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

$C =$  سرعت صوت که در ۲۰ درجه سانتیگراد برابر با برابر با ۳۴۴ متر بر ثانیه است

$A =$  سطح مقطع گردن محفظه (cm<sup>۲</sup>)

$L =$  طول گردن محفظه (m)

$V =$  حجم محفظه (m<sup>۳</sup>)

$$F_{(Hz)} = 128\sqrt{HB}$$

$H =$  ارتفاع شکاف

$B =$  عرض شکاف

نحوه بکارگیری جاذب های سطحی با استفاده از نسبت سطح موثر جاذب میزان کاهش بطور تقریبی قبل و بعد از نصب محاسبه می شود محاسبات ساده بوده و تاثیر جاذب سطحی را می توان از رابطه زیر تعیین نمود.

$$NA = 10 \log \left[ 1 + \frac{S\bar{a}_a}{S\bar{a}_b} \right]$$

مثال: ابعاد کارگاهی ۳×۶×۹ متر می باشد جنس دیوار و کف سیمان با ضریب جذب ۰/۰۱ و سقف از جنس گچ با ۰/۰۴ =  $\alpha$  در فرکانس ۱۰۰۰ می باشد. اگر سقف را با تایل اکوستیک با  $\alpha = ۰/۸$  بپوشانیم. NA چقدر است؟ (NA = ۱۱/۳ dB)

### ایزولاسیون Isolation

استفاده از دیواره ایزولان به منظور جلوگیری از انتقال صوت است لذا به آنها مانع های صوتی می گویند. تمام مواد دارای مقاومت در برابر صوت هستند که این خصوصیت تحت عنوان امیدانس صوتی یا اکوستیک نام دارد. ایزولاسیون صوتی هر دیواره تابعی از ضریب عبور یا ضریب انتقال Transmission coefficient صوت است. ضریب انتقال صوت (t) نسبت انرژی عبوری به برخوردی است.

انرژی عبوری

t =

انرژی برخوردی

در صورتی که دیواره و مانع دارای چند لایه باشد و هر لایه از جنس مختلف باشد باید ضریب انتقال متوسط  $t$  را حساب نمود.

$$\bar{t} = \frac{\sum S_i t_i}{S}$$

میزان افت SPL در اثر عبور از دیواره، نسبت عکس با لگاریتم ضریب انتقال یا عبور دارد.

$$TL = 10 \log \frac{1}{t}$$

شاخص افت انتقال

افت انتقال در فرکانس های پایین کمتر از فرکانس بالا است هر چه ضریب انتقال بزرگتر شود شاخص افت (TL) کمتر خواهد شد و برعکس. افت انتقال صوت در حالت برخورد عمود بر دیواره (صفر درجه) حداکثر و در زاویه ۹۰ درجه افت انتقال حداقل است. (طبقات فوقانی صدای بیشتری تا پائینی دریافت می کنند)

$$TL = 10 \log \frac{1}{a}$$

هر چه ضریب جذب مصالح بیشتر باشد ، TL کمتر است لذا ازبست با  $\alpha = ۰/۰۲$  افت انتقال آن بسیار بیشتر از پلی اورتان با  $a = ۰/۹۸$  است.

$$a = 0.0001 \Rightarrow TL = 40dB$$

$$a = 0.10 \Rightarrow TL = 10dB$$

$$a = 0.001 \Rightarrow TL = 30dB$$

$$a = 0.10 \Rightarrow TL = 0.5dB$$

هر چه جرم و چگالی ماده بخصوص چگالی سطحی مواد (Kg/m<sup>۲</sup>) بیشتر باشد افت انتقال در آنها بیشتر است. لذا نفوذپذیری صدا کمتر خواهد بود. بر همین اساس هر ماده یک شاخص افت انتقال معین و مشخصی دارد

مثال: برای ماده واحد TL را در هر اکتاو باند چگونه تغییر می کند.

$$TL = 20 \log FW - 47.5$$

این شاخص برابر است با SPL قبل و بعد از دیوار (SPL<sup>۱</sup> - SPL<sup>۲</sup>)

میزان افت انتقال دیوار در فرکانس های مختلف یکسان نمی باشد. با افزایش فرکانس افت انتقال افزایش می یابد.

با افزایش ضخامت دیوار، افت انتقال نیز بصورت لگاریتمی افزایش می یابد.  
هر چه یکدستی و یک شکلی ماده *uniformity* بیشتر باشد میزان انرژی عمودی کمتر و یا افت انتقال بیشتر خواهد بود.

### فنریت Stiffness

با توجه به اثرات فرکانس و جرم می توان گفت که ارتباط بین افت انتقال با فرکانس از نوع ارتباط خطی و حتی لگاریتمی نیست بلکه سه ناحیه می توان تعریف کرد:

### الف) ناحیه تشدید یا اثر فنریت Stiffness Region

اگر فرکانس صوت با فرکانس دیوار نزدیک باشد افت انتقال محدود و در نوسان است.

این پدیده مربوط به فرکانس های پایین صوتی است لذا عبور صوت از دیوار راحت است.

ب) ناحیه چگالی یا ناحیه اثر جرم: افت انتقال با یک شیب ملایم معادل 60dB افزایش به ازای افزایش فرکانس یک اکتاو باند است.

### ج) ناحیه همزمانی فرکانس یا ناحیه اثر انطباق فرکانس Critical Freq Reg

اگر طول موج صوت برخوردی با طول موج ارتعاشی یا خمشی دیوار برابر باشد یک افت نسبی در منحنی افت انتقال بوجود می آید و در یک نقطه به حداقل می رسد. ناحیه شکست را ناحیه انطباق یا همزمانی فرکانس و نقطه حداقل را فرکانس بحرانی می نامند.

$$CF = \frac{Ca^2 \rightarrow (m/s)}{1.8 \times Cb \times t \times Sina_i}$$

برای کاستن از اثر فنریت و همزمانی فرکانس می توان از میراکننده مناسب *Damping* استفاده کرد. برای ناحیه اول یعنی فنریت می توان از یک لایه کم وزن و نرم مانند فوم استفاده کرد. برای ناحیه دوم یعنی همزمانی می توان از یک لایه پراکننده داخلی مانند سرب استفاده کرد.

تاثیر مشخصات اتاق بر میزان عبور

معمولاً اتاق کنترل در موارد زیر کاربرد دارد:

الف) کنترل اتاق به اتاق (مثلاً کارگاه و دفتر) و تاثیر مانع صوتی در کنترل صدا

$$TL = SPL_1 - SPL_2 + 10 \log \frac{S}{R \& A}$$

$$SPL_2 = SPL_1 - TL + 10 \log S - 10 \log A$$

$$SPL_2 = SPL_1 - TL + 10 \log S - 10 \log R \quad R = \frac{S\bar{a}}{1 - \bar{a}}$$

$$NR = SPL_1 - SPL_2$$

مثال: کارگاه با  $V = 300m^3$  و  $R = 2s$  ،  $Lw = 90dB$  ،  $TL = 20dB$  و  $S = 9m^2$  و ابعاد اتاق کنترل  $3 \times 3 \times 3$  ، جذب متوسط سطوح داخلی دفتر  $a = 0.8$  مطلوب است  $NR$ ؟

در صورتی که  $a = 0.2$  بشود چه تغییری در  $NR$  ایجاد می شود؟

$$SPL_1 = Lw - 10 \log V + 10 \log RT + 14$$

ب) کنترل اتاق به محیط بیرون

هدف کاهش  $SPL$  برای ساکنین خارج کارگاه است.

$$SPL_2 = SPL_1 - TL + 10 \log S + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} \right) - 6$$

$Q$  همواره 2 فرض می شود.

$r$  = فاصله از دیواره مانع (m)

مسئله: در یک کارگاه بسته بندی مواد غذایی، دیواری با کاهش کلی 40 دسیبل در فرکانس 500 هرتز دو قسمت کارگاه را از هم جدا می کند. پنجره ای با کاهش 20 دسیبل در فرکانس 500 هرتز در دیوار تعبیه شده است. بطوری که مساحت آن 10 درصد مساحت دیوار می باشد. ضریب کاهش ترکیبی دیوار و پنجره را در فرکانس 500 هرتز محاسبه نمایید. چه نتیجه گیری می کنید؟

$$\bar{t} = \frac{S_1}{S} t_1 + \frac{S_2}{S} t_2 \Rightarrow \bar{t} = 0.1t_1 + 0.9t_2$$

$$TL_1 = 10 \log \frac{1}{t_1} \Rightarrow 20 = 10 \log \frac{1}{t_1} \Rightarrow \frac{1}{t_1} = 100 \Rightarrow t_1 = 0.01$$

$$TL_2 = 10 \log \frac{1}{t_2} \Rightarrow 40 = 10 \log \frac{1}{t_2} \Rightarrow \frac{1}{t_2} = 10000 \Rightarrow t_2 = 0.0001$$

$$\bar{t} = 0.1t_1 + 0.9t_2 \Rightarrow \bar{t} = 0.1 \times 0.01 + 0.9 \times 0.0001 \Rightarrow \bar{t} = 0.00109$$

$$TL_{composition} = 10 \log \frac{1}{\bar{t}} \Rightarrow TL_c = 10 \log \frac{1}{0.00109} = 29.6dB$$

نتیجه گیری کلی این است که مساحت کوچکی با افت نسبتاً پایین صدا شدیداً می تواند کارایی اکوستیکی مانع با کیفیت بالا را کاهش دهد چون همانطور که ملاحظه شد مساحت پنجره ۱۰ درصد مساحت کل دیوار بود ولی افت کلی صدا را از ۴۰ دسیبل به حدود ۲۹ دسیبل کاهش داد.

### کنترل صدا

بطور کلی کنترل صدا شامل کنترل مهندسی، جلوگیری از انتقال صدا و کنترل اداری می باشد.

۱- کنترل مهندسی: در محیط هایی که شدت صوت از ۹۰ دسی بل تجاوز می کند موثرترین و مهمترین روش کنترل در برنامه حفاظت شنوایی، رعایت اصول کنترل مهندسی یعنی کاهش صدا در منبع تولید است. برای طراحی کنترل های مهندسی از اطلاعات جمع آوری شده در طی بررسی صدا استفاده می شود. مهمترین راهکارهای پیشنهادی توسط طراحان مهندسی عبارتند از:

- ۱- ۱- کنترل در منبع و طراحی صحیح دستگاه در زمان ساخت
- ۱- ۲- نصب صحیح دستگاه و کنترل ارتعاش با فونداسیون مناسب
- ۱- ۳- محصور کردن دستگاههای پر سر و صدا
- ۱- ۴- نگهداری صحیح دستگاه
- ۱- ۵- تعمیر و سرویس به موقع دستگاه

۱- ۶- تغییر فرآیند و تغییر در اجزاء و کار دستگاه: گاهی اوقات با تغییر در برخی از فرآیندها مانند موارد ذیل می توان میزان سر و صدا را در حد قابل توجهی کاهش داد

- جوش دادن بجای پرچ کاری
- استفاده از پرس به جای کار با چکش
- استفاده از سیستم هیدرولیک به جای پنوماتیک
- محکم کردن صفحات و قطعات دستگاههای پر سرو صدا
- پوشاندن رویه صفحات تشدید کننده با بعضی از ترکیبات خاص
- تغییر در اجزاء و کار دستگاه
- جایگزین کردن واگن های برقی به جای واگن های دیزلی یا

۲- جلوگیری از انتقال صدا و کنترل در مسیر انتشار صوت: بطور کلی کنترل مهندسی بهترین روش کاهش تولید سروصدا می باشند ولی به علت هزینه بالا و یا به علت عدم وجود تکنولوژی لازم همیشه در دسترس نبوده و مورد استفاده کارفرمایان نمی باشد. مهمترین راههای پیشنهادی عبارتند از:

- ۲- ۱- افزایش فاصله بین منبع تولید صدا و افراد
- ۲- ۲- قرار دادن مانع بین منبع تولید صدا و افراد
- ۲- ۳- قرار دادن ماشین روی پایه عایق
- ۲- ۴- قرار دادن منبع در داخل محفظه و محوطه بسته
- ۲- ۵- طراحی اتاقک ایزوله
- ۲- ۶- استفاده از جاذب های صوتی
- ۲- ۶- اتاقک ضد صدا برای کاربر
- ۲- ۷- استفاده از مواد جاذب صدا در دیوار و سقف کارگاه
- ۲- ۸- نصب صدا خفه کن در دستگاهها
- ۲- ۹- نصب دستگاههای کاهنده صدا روی دستگاه



۱۰-۲- مجزا نمودن منابع اصلی صدا از سایر منابع

۱۱-۲- جداسازی بخش های پرسروصدا از سایر بخش های کارگاه

۱۲-۲- محصور کردن کارگران

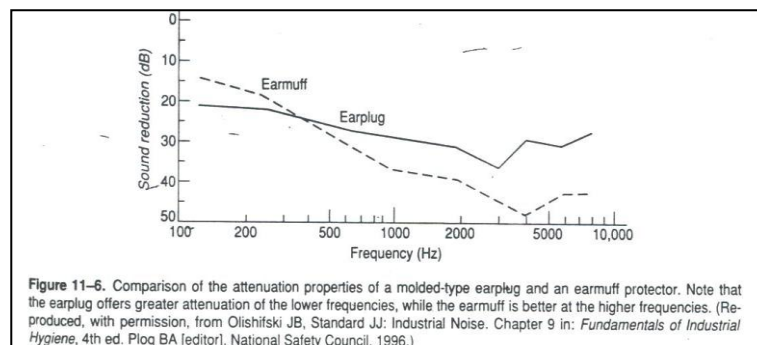
۱۳-۲- دفاع صوتی Active noise control: کنترل صدا با صدا با استفاده از اصوات غیر هم فاز در برابر منابع تولید صدا

### کنترل اداری

در صورتی که اقدامات کنترل مهندسی به علت مشکلات اقتصادی و یا دلایل دیگر عملی نباشد، لازم است برای کاهش تماس کارگر با سر و صدای محیط کار، اقدامات کنترل اداری با همکاری مدیریت صنعتی ذیل بکار گرفت:

- خرید دستگاههای جدید مناسب
- ممانعت از خرید و نصب ماشین آلات پرسروصدا در کارخانه
- انتخاب کارگر مناسب
- چرخشی کردن کارها
- کاهش مدت زمان تماس کارگر با سروصدای بیش از حد مجاز با ایجاد شیفت در گردش و تناوب کار
- تعیین نقاطی از کارگاه که تراز صوت کمتر از سایر نقاط است
- انجام معاینات قبل از استخدام ادواری به منظور شناسایی افراد حساس و مستعد به ناشنوایی شغلی
- در صورت لزوم تغییر محل کارگر به یک محیط با سروصدای کمتر از حد مجاز
- استفاده از گوشی حفاظتی

گوشی‌های داخل گوش یا پلاک گوش<sup>۱</sup> معمولاً در مقابل اصوات، فرکانس‌های پایین و گوشی‌های محافظ<sup>۲</sup> در مقابل اصوات با فرکانس‌های بالا قدرت حفاظتی بیشتری دارند. برای تعیین میزان حفاظت گوشی از NRR استفاده می‌شود. معمولاً در کاتالوگ هر گوشی، عدد NRR مشخص شده است. اگر از عدد NRR مشخص شده بر روی گوشی ۷ واحد کم کنیم عدد بدست آمده بیانگر قدرت کاهش صدا توسط گوشی مربوط خواهد بود. برای مثال چنانچه NRR گوشی ۲۳ باشد میزان کاهش صدا ۱۶ دسیبل در شبکه A خواهد بود.



میزان کاهش صدای محیط کار NRR توسط Ear plug و Ear muff چیست؟

- هر وسیله حفاظتی شنوایی قابلیت محدودی برای کاهش سروصدا دارد که با NRR مشخص می‌شود
- Ear plug در محیط‌های با فرکانس‌های پایین قدرت حفاظتی بیشتری دارند
- Ear muff در محیط‌های با فرکانس‌های بالا قدرت حفاظتی بیشتری دارند

<sup>۱</sup> Ear plug

<sup>۲</sup> Ear Muff

### چگونگی محاسبه NRR

از عدد NRR مشخص شده بر روی وسیله حفاظت فردی ۷ تا کم می‌کنیم؛ عدد بدست آمده قدرت کاهش شنوایی وسیله حفاظت فردی خواهد بود. به عنوان مثال اگر عدد NRR گوشی ۲۱ باشد، میزان کاهش شنوایی این دستگاه ۱۴ خواهد بود (در شبکه وزنی A).

محاسبه میزان نقص عضو از نظر شنوایی (Impairment):

- میانگین سطح آستانه شنوایی در فرکانس های ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ برای هر کدام یک از گوشی ها محاسبه گردد
- عدد ۲۵ از عدد بدست آمده کم شود
- حاصل در ۱/۵ ضرب گردد
- عدد بدست آمده میزان نقص عضو یک گوش می‌باشد
- برای ارزیابی آسیب دو طرفه باید درصد کوچکتر (گوش سالمتر و با شنوایی بهتر) را در عدد ۵ ضرب کرده و حاصل بدست آمده را با درصد بزرگتر (گوش با شنوایی کمتر) جمع می‌نماییم و سپس عدد بدست آمده را تقسیم بر عدد ۶ می‌نماییم؛ حاصل بدست آمده درصد کاهش شنوایی هر دو گوش می‌باشد.
- مثال: آستانه شنوایی گوش‌های گارگری به شرح ذیل می‌باشد؛ درصد از کارافتادگی هر یک از گوش‌ها را ابتدا بطور جداگانه و سپس درصد از کارافتادگی هر دو گوش را به‌صورت توأم محاسبه نمایید.

فرکانس	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰
آستانه شنوایی در گوش راست	۱۵	۲۵	۴۵	۵۵
آستانه شنوایی در گوش چپ	۳۰	۴۵	۶۰	۸۵

چگونگی محاسبه میزان از کارافتادگی (خفیف) به‌شرح ذیل می‌باشد:

گوش راست =  $\frac{15 + 25 + 45 + 55}{4} = 35 \rightarrow 35 - 25 = 10$

$10 \times 1/5 = 2 = 20\%$  ← درصد نقص عضو گوش راست ۱۵ درصد می‌باشد

---

گوش چپ =  $\frac{30 + 45 + 60 + 85}{4} = 55 \rightarrow 55 - 25 = 30$

$30 \times 1/5 = 6 = 60\%$  ← درصد نقص عضو گوش چپ ۴۵ درصد می‌باشد

---

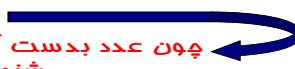
درصد از کارافتادگی هر دو گوش =  $\begin{cases} 15\% \times 5 = 75 \\ 45\% \times 1 = 45 \end{cases}$

درصد نقص عضو هر دو گوش ۲۰ درصد می‌باشد  $\frac{75 + 45}{4} = 20\%$

مثال دیگری از کاهش شنوایی شدید


فرکانس	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰
آستانه شنوایی در گوش راست	۸۰	۹۰	۱۰۰	۱۱۰
آستانه شنوایی در گوش چپ	۷۵	۸۰	۹۰	۹۵


چگونگی محاسبه میزان از کارافتادگی (شدید) به شرح ذیل می‌باشد:

گوش راست =  $\frac{۸۰ + ۹۰ + ۱۰۰ + ۱۱۰}{۴} = ۹۵$  


چون عدد بدست آمده بیش از ۹۲ درصدی بل است ، درصد کاهش  
شنوایی در گوش راست ۱۰۰٪ میباشد


---

گوش چپ =  $\frac{۷۵ + ۸۰ + ۹۰ + ۹۵}{۴} = ۸۵$    $۸۵ - ۲۵ = ۶۰$

درصد نقص عضو گوش چپ ۹۰ درصد می باشد   $۶۰ * \% ۱/۵ = \% ۹۰$

---

گوش =  $\begin{cases} \% ۹۰ * ۵ = ۴۵۰ \\ \% ۱۰۰ * ۱ = ۱۰۰ \end{cases}$  

درصد نقص عضو هر دو گوش ۹۲ درصد می باشد   $\frac{۴۵۰ + ۱۰۰}{۴} = \% ۹۲$

- ۱- در صورتی که شدت فیزیکی صوت دو برابر قویتر از آستانه مطلق باشد شدت احساس صوت چقدر خواهد بود؟  
 الف) ۲۰ دسیبل (ب) ۳ دسیبل (ج) ۱۰ دسیبل (د) ۱۰۰ دسیبل  
 ۲- کدامیک از روابط زیر در رابطه با فشار مؤثر و ماکزیمم صحیح است؟

$$\text{الف) } P_{rms} = \frac{P_{max}}{2} \quad \text{ب) } P_{rms} = \sqrt{2}P_{max} \quad \text{ج) } P_{max} = \sqrt{2}P_{rms} \quad \text{د) } P_{max} = \frac{P_{rms}}{2}$$

- ۳- کدام یک از روابط زیر در طیف فرکانسی اکتاو باند صحیح است؟

الف) فرکانس میانی  $\times \sqrt{2} =$  حد پایینی

ب) فرکانس میانی  $\times \frac{\sqrt{2}}{2} =$  حد پایینی

ج) فرکانس میانی  $\times \frac{1}{2} =$  حد پایینی  
 د) فرکانس میانی  $\times 2 =$  حد پایینی

- ۴- در صورتی که شدت فیزیکی صوت ۱۰۰ برابر قویتر از آستانه مطلق ( $10^{-16} \text{ W/cm}^2$ ) باشد شدت احساس صوت چقدر خواهد بود؟

الف) ۲۰ (ب) ۴۰ (ج) ۱۰ (د) ۱۰۰

- ۵- در صورتی که توان صوتی ۰/۱ وات باشد تراز شدت صوت را در فاصله ۱۰ متری از یک منبع یکنواختی که در میدان آزاد قرار گرفته است چقدر است؟

الف) ۷۰ (ب) ۷۹ (ج) ۹۹ (د) ۱۰۹

- ۶- سه‌ماشینی در یک کارخانه نصب گردیده‌اند در صورتی که تراز فشار صوت دستگاه‌های شماره ۱ و ۲ هر کدام ۹۰ dB و دستگاه شماره ۳ برابر ۹۳ dB باشد. SPL کل، زمانی که هر سه دستگاه با هم کار کنند چقدر است؟

الف) ۹۴ (ب) ۱۸۰ (ج) ۱۰۰ (د) ۹۶

- ۷- واحد تراز بلندی صوت کدام است؟

الف) سون (ب) دسیبل (ج) فون (د) میکروبار

- ۸- در صورتی که تغییرات تراز فشار صوت کمتر از یک ثانیه صورت گیرد صوت از چه نوعی است؟

الف) متغیر (ب) یکنواخت (ج) منقطع (د) کوبه‌ای

- ۹- در صورتی که تراز فشار صوت ۵ ایستگاه به ترتیب ۸۰، ۷۸، ۸۴، ۸۲ و ۸۱ دسیبل باشد تراز فشار صوت متوسط بطور تقریب چقدر است؟

الف) ۸۱ (ب) ۸۲ (ج) بیش از ۸۴ دسیبل (د) ۹۰

- ۱۰- افت شنوایی کارگرانی که در معرض سروصدا هستند ابتدا از چه فرکانسی شروع می‌شود؟

الف) ۱۰۰۰ (ب) ۱۶ (ج) ۴۰۰۰ (د) ۱۰۰۰-۳۵۰۰ هرتز

- ۱۱- در چه فرکانسی صوت برای شنیده شدن، انرژی کمتری نیاز دارد؟

الف) کمتر از ۱۰۰۰ هرتز (ب) بالاتر از ۴۰۰۰

ج) ۱۰۰۰-۴۰۰۰ (د) در همه فرکانس‌ها یکسان است

- ۱۲- آستانه شنوایی در انسان از نظر فرکانس، فشار صوت و شدت به ترتیب برابر است با:

الف)  $0.001 \text{ W/cm}^2 - 20 \mu\text{Bar} - 20000 \text{ Hz}$

ب)  $10^{-16} \text{ W/cm}^2 - 0.002 \mu\text{Bar} - 20 \text{ Hz}$

ج)  $10^{-16} \text{ W/cm}^2 - 0.0002 \mu\text{Bar} - 20000 \text{ Hz}$

د)  $0.001 \text{ W/cm}^2 - 20 \mu\text{Bar} - 20 \text{ Hz}$

- ۱۳- هر دسیبل نشانه آن است که:

الف) شدت صوت دو برابر شده است

ب) شدت صوت ده برابر شده است.

ج) شدت صوت ۱/۲۶ برابر شده است

د) شدت صوت بیست برابر شده است.

- ۱۴- نیوتن بر مترمربع واحد کدامیک از کمیات زیر است؟

الف) شدت صوت (ب) توان صوت (ج) فشار صوت (د) تراز بلندی صوت

- ۱۵- در صورتی که تراز فشار صوت ۸۰ dB باشد فشار صوت آن برابر است با:

الف) ۲۰ میکروبار (ب) ۲ میکروبار (ج) ۰/۲ میکروبار (د) ۰/۰۲ میکروبار

- ۱۶- بلندی صوت به کدامیک از کمیات زیر بستگی دارد؟

الف) فرکانس	ب) تراز فشار صوت
ج) مدت زمان تماس	د) الف و ب
الف) $10 \log 3$	ب) ۱
	ج) ۲
	د) ۴

۱۷- در صورتی که اندیس جهت برابر با ۳dB باشد ضریب جهت آن برابر است با:

- ۱- علاوه بر خصوصیات فوق، عوامل دیگری نیز می تواند بر شنوایی افراد در معرض تاثیر داشته باشد که عبارتند از :  
محیط کار: سروصدا در هوای باز قابل تحمل تر از سروصدا در محیط بسته است چراکه در يك محیط بسته بویژه اگر جدارها و سطوح منعکس کننده صوت باشند اثر سروصدا تشدید می شود و پدیده رزونانس بوجود می آید. شدت صوت در یک محیط بسته آسیب رسان تر از همان میزان شدت صوت در محیط باز می باشد.
- ۲- ریتم: يك صدای مداوم و یکنواخت با فرکانس و شدت برابر کم خطرتر از يك صدای منقطع و غیر یکنواخت می باشد
- ۳- خصوصیات فردی که در کاهش شنوایی شغلی بسیار موثر است عبارتند از :  
سن: هرچه سن بالاتر رود حساسیت و شکنندگی گوش بیشتر می شود بگونه ای که تماس با سر و صدا در افراد مسن کاهش شنوایی را خیلی سریعتر ایجاد می کند  
بیماری های قبلی گوش: در صورتی که کارگر سابقه مثبت مواردی مانند تردد و به هم ریختگی استخوان های گوش بیماری های عفونی مانند اوریون سرخجه منتزیت و یا مصرف داروهای سمی برای گوش را داشته باشد و همزمان تماس با سر و صدای بیش از حد مجاز هم داشته باشد منجر به ایجاد و یا تشدید ناشنوایی خواهد شد.

حساسیت فردی: بعضی از افراد علی رغم مدت کوتاه سروصدا دچار کاهش شنوایی ناشی از تماس با سر و صدا می‌شوند که عمدتاً بالا بودن حساسیت گوش این افراد است تنها راه شناخت افراد حساس انجام اودیومتری دوره ای و مقایسه عنوان آنها از نظر میزان دقت شنوایی توسط متخصص طب کار می‌باشد.

#### اثرات صدا

یکی از عوامل اصلی در ایجاد اوتیت میانی و اوتیت سروز انسداد شیپور استنش در اثر ادم و التهاب می‌باشد. گوش داخلی متشکل از گیرنده‌های عضو انتهایی می‌باشد. حلزون<sup>۱</sup> در عملکرد شنوایی و لایبرنت<sup>۲</sup> در تعادل نقش دارند. وجود هر گونه سد و مانعی بین حلزون و لایبرنت می‌تواند عملکرد شنوایی و تعادل را تحت تاثیر قرار دهد. ساختمان حلزون مانند صدف حلزون به دور خود پیچ می‌خورد و دو و نیم پیچ را به دور خود تشکیل می‌دهد. حلزون از سه قسمت اسکالا تمپانی و سنبیولی، اسکالا تمپانی و مجرای حلزونی تشکیل شده است. دو قسمت اول با پنجره‌های گرد و بیضی شکل<sup>۳</sup> در ارتباط بوده و حاوی پری لنف می‌باشد. قسمت سوم حاوی آندولف است. دیواره غشایی که اعضای انتهایی ظریف شنوایی بر روی آن قرار می‌گیرند غشای پایه‌ای<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. عضو انتهایی عصبی برای شنوایی، عضو کورتی<sup>۵</sup> نام دارد و بر روی غشای قاعده‌ای قرار می‌گیرد و در طول حلزون امتداد می‌یابد. تقریباً ۳۰۰۰۰ سلول مودار در اپی‌تلیوم عصبی وجود دارند. هنگامی که این سلولها تحت تاثیر صدا که یک نیروی مکانیکی است قرار می‌گیرد می‌تواند مشکلات و اثرات متعددی را بر روی بدن ایجاد نماید که مهمترین آنها عبارتند از:

۱- صدمه و آسیب به دستگاه شنوایی (صدمات گوشی): گر چه صدا به عنوان یکی از عوامل اصلی ناشنوایی شغلی محسوب می‌شود ولی عوامل دیگری مانند انفجار و ضربه و تروما، سقوط از ارتفاع، سوختگی ناشی از مواد شیمیایی و تماس با مواد شیمیایی، از هم گسیختگی زنجیره استخوانی و باروتروما نیز می‌توانند منجر به ناشنوایی شغلی گردند. تماس با مواد شیمیایی صنعتی نیز ممکن است عامل سمی برای گوش باشد، مواد شیمیایی ممکن است عامل سمی برای گوش باشد که عمدتاً به حلزون صدمه می‌رسانند، بیشتر این مواد با بطور مستقیم و یا از طریق تخریب مکانیسم های هموستاتیک حلزون به سلولهای مویی آسیب می‌زنند، در موارد زیادی کاهش شنوایی حاصل از اتوتوکسیکها بدنبال استفاده از داروها مثل آنتی‌بیوتیک آمینو گلیکوزید(جنتامایسین)، دیورتیکها لوپ (فورسماید)، عوامل ضد سرطان، (سیس پلاتین) و سالیسیلات (آسپرین) رخ می‌دهد. در صنایع با سروصدا بالا، کارگرانی که با داروهای اتوتوکسیک درمان می‌شوند در ریسک بالاتری قرار دارند چون اثر این دو باهم ترکیب شده و کاهش شنوایی بیشتری را برای کارگر ایجاد می‌کند. کاهش شنوایی ممکن است به علت تماس با مواد اتوتوکسیک در محیط کار ایجاد شود فلزات سنگین مثل آرسینک، کبالت، سرب، لیتیوم، جیوه و توریوم اثرات اتوتوکسیک دارند، دیگر مواد شیمیایی اتوتوکسیک شامل سیانید، بنزن، آنیلین، برومات پتاسیم، کربن دی سولفید، مونوکسید کربن، تتراکلرید کربن و حلالهای صنعتی مانند استیرن و تولوئن می‌باشند.

در حال حاضر مقالات متعددی اثرات تشدید صدای با عوامل شیمیایی بخصوص تولوئن، متیل ها، دی سولفید کربن و منواکسید کربن در آسیب رسانی به سیستم شنوایی را مورد بررسی قرار داده اند. هنگامی که این سلولهای شنوایی تحت تاثیر صدا قرار می‌گیرد دچار خمیدگی یا تغییر شکل می‌شوند و به پالس الکتریکی - شیمیایی تبدیل می‌شود. آزمایشات انجام شده بر روی حیوانات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که اصوات با فرکانس بالا (صوت زیر) سبب تحریک بخش قاعده‌ای حلزون و اصوات با فرکانس پایین (صوت بم) سبب تحریک انتهای رأسی حلزون می‌شوند. اصوات با فرکانسهای ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ هرتز می‌تواند دماغه را که نزدیکترین قسمت حلزون به گوش میانی می‌باشد تحریک نماید لذا اکثر آسیب‌های ناشی از صدا در فرکانس ۴۰۰۰ هرتز به همین علت ایجاد می‌شود. ایمپالس‌های عصبی تحریک شده توسط سلولهای مودار حلزون، از طریق سلولهای گانگلیونی سیر می‌کنند این سلولها دارای آکسونهایی هستند که قسمت حلزونی عصب جمجمه‌ای هشتم را تشکیل می‌دهند. عصب جمجمه‌ای هشتم از طریق منفذ شنوایی داخلی از استخوان گیجگاهی خارج شده و وارد پل مغزی<sup>۶</sup> می‌شود. صدمات دستگاه شنوایی شامل افت شنوایی ناشی از صدا<sup>۷</sup> (اعم از افت موقت و افت دائم شنوایی)، ضربه صوتی<sup>۸</sup> و وزوز گوش<sup>۹</sup> می‌باشند. افت موقت شنوایی زمانی اتفاق می‌افتد که تراز فشار صوت حداقل ۶۵ دسیبل بوده و فرد بصورت اتفاقی و یا کوتاه مدت در معرض آن قرار گیرد. اصوات بم معمولاً کمتر افت موقت شنوایی ایجاد می‌کنند. ولی اصوات با فرکانس ۶۰۰۰-۲۰۰۰ هرتز معمولاً

<sup>۱</sup> Cochlea

<sup>۲</sup> Labyrinth

<sup>۳</sup> Oval window

<sup>۴</sup> basilar membrane

<sup>۵</sup> organ of corti

<sup>۶</sup> pons

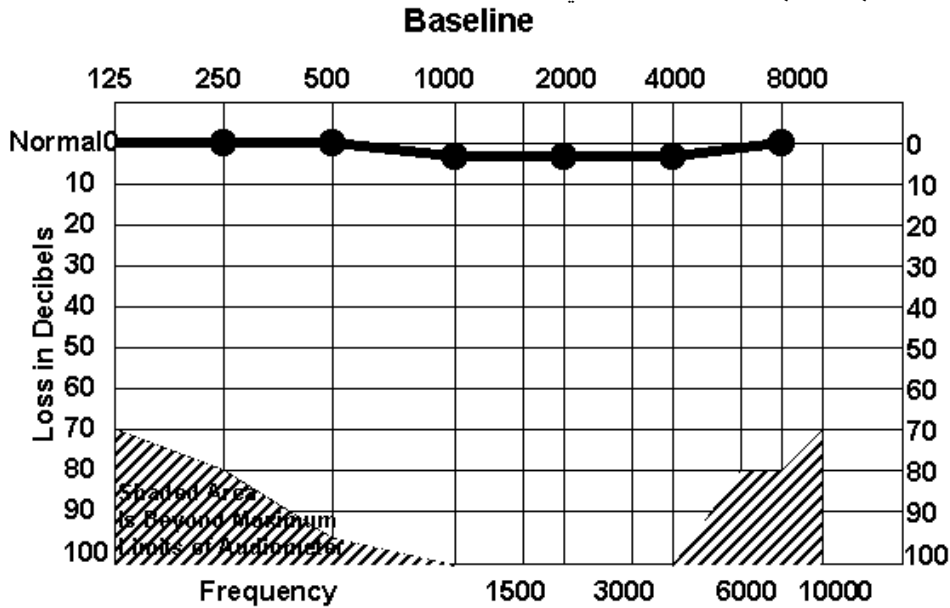
<sup>۷</sup> Noise induced Hearing loss

<sup>۸</sup> Acoustic trauma

<sup>۹</sup> Tinnitus

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

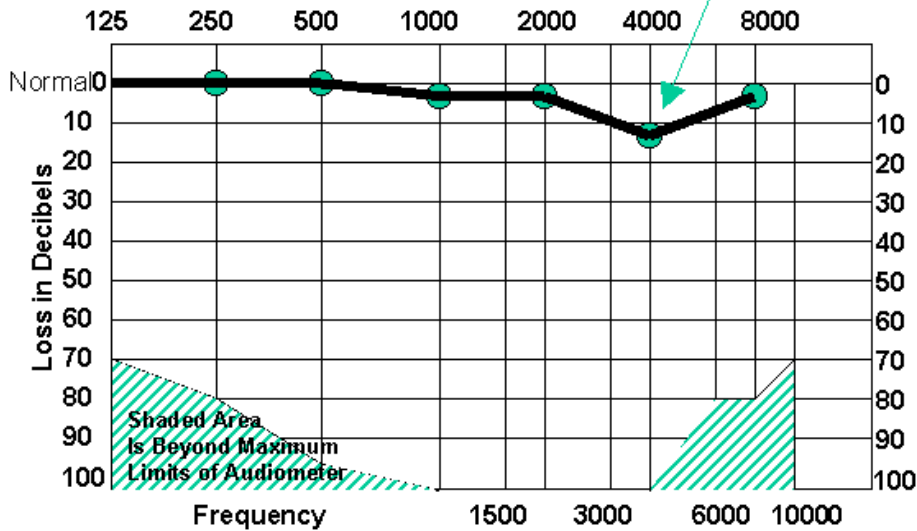
بیشترین اثر را دارند. بدیهی است آستانه شنوایی فرد پس از تماس افزایش و شنوایی فرد به علت خستگی کاهش می‌یابد ولی پس از قطع تماس، گوش فرد پس از چندین ساعت بهبود می‌یابد.



منحنی شنوایی در یک فرد طبیعی

در صورت تکرار تماس با صدا، افت شنوایی دائمی می‌گردد در افت دائم شنوایی سلول‌های شنوایی اندام کرتی آسیب می‌بینند و در صورت پیشرفته شدن معمولاً قابل درمان نمی‌باشند. افت دائم شنوایی ناشی از صدا از فرکانس ۴۰۰۰ هرتز شروع می‌شود و میزان افت برحسب مشخصات فردی و محیطی مانند سن، نژاد، تغذیه، سابقه کار، اعتیاد به سیگار، وجود بخارات آلی مانند تولوئن در محیط، نوع صدا، شدت صدا و میزان مواجهه کارگر متفاوت است.

### NOTCH (Hearing Loss at 4000 Hz)



منحنی شنوایی در یک کارگر در معرض صدا

باتوجه به اینکه فرکانس ۴۰۰۰ هرتز خارج از محدوده فرکانس مکالمه می‌باشد، بنابراین کارگر در ابتدا از کاهش شنوایی خود آگاه نمی‌شود ولی با گذشت زمان کاهش شنوایی به فرکانس‌های قبل و بعد از ۴۰۰۰ هرتز نیز سرایت می‌کند. لذا زمانی که محدوده فرکانس مقاله را درگیر نمود فرد متوجه اختلال و ضایعه شنوایی خود خواهد شد. ضربه صوتی معمولاً در اثر تروما و تماس با صدای مربوط به انفجار بوجود می‌آید. در صورت وجود ضربه صوتی فرد ممکن است دچار پارگی پرده گوش گردد. یکی دیگر از اثرات صدا و زوز گوش می‌باشد این عارضه معمولاً در یک یا هر دو گوش وجود داشته و فرد ممکن است اصوات بم (وزوز فرکانس پایین) و یا اصوات زیر (وزوز فرکانس بالا) را در گوش خود احساس کند.

علامت اولیه کاهش شنوایی شغلی

✓ اشکال در فهم کلمات صحبت شده در یک محیط پرسر صدا

✓ نیاز به نگاه کردن یا نزدیک کردن گوش به شخصی که صحبت می‌کند (برای فهم کلمات)

✓ از گنگ و مبهم شدن صحبت همکاران شاکي است

✓ احساس صدای زنگ یا وزوز در گوش

✓ شنیدن صدای محیط کار در خواب

#### علائم بیماری

کار در محیط با سرو صدای بیش از حد مجاز و در روزهای آغاز کار، برای کارگر ناراحت کننده است در صورتی که در پایان همان روز شنوایی کارگر توسط دستگاه شنوایی سنج انداز مگیری شود تقریباً حدود ۴۰ دسی بل در فرکانس ۴۰۰۰ هرتز کاهش نشان می‌دهد، علاوه بر این کارگر از وزوز گوش نیز ناراحت است، پس از مدتی کارگر عادت کرده و در صورتی که کار در محیط پر سرو صدا را ادامه دهد به تدریج دچار ناشنوایی شغلی خواهد شد. در اکثر موارد کارگر از افت شنوایی خود خبر ندارد ولی به تدریج با پیشرفت بیماری، کارگر دیگر نمی‌تواند مکالمه دوستان خود را درک کند و در این مرحله بیماری، ناشنوایی اجتماعی نامیده می‌شود. علت عدم آگاهی کارگر از افت شنوایی خود در اوایل کار، افت شنوایی در فرکانس‌های حدود ۴۰۰۰ هرتز می‌باشد و فرکانس‌های مکالمه روزمره یعنی ۵۰۰ الی ۲۰۰۰ هرتز درگیر نمی‌باشد. از علائم دیگر شنیدن صدای محیط کار در خواب می‌باشد. این افراد از اینکه شب‌ها نیز همانند صدای محیط کار خود را می‌شنوند ناراحت هستند. تشخیص ناشنوایی شغلی به عهده متخصص طب کار می‌باشد که سریع‌ترین و صحیح‌ترین وسیله تشخیص آن نیز آزمایش شنوایی سنجی (اودیومتری) می‌باشد.

از دیگر اثرات شنوایی سروصدا بر شنوایی شامل وزوز گوش و سرگیجه می‌باشد. وزوز گوش (شنیدن صدای زنگ در گوش) معمولاً بلافاصله پس از تماس با سرو صدا ظاهر می‌شود و ممکن است باتماس مستقیم نمایان‌تر شود، افت شنوایی ناشی از سروصدا بطور شایع همراه با تینیتوس (Tinnitus) است، اکثر بیماران یک صدای شبیه زنگ زدن با فرکانس بالا را شرح می‌دهند و یا گاهی اصوات شنیده شده تون پایین‌تری دارند مثل وزوز کردن، فوت کردن، حتی می‌تواند صدای شنیده شده به شکل تیک تیک یا ترکیدن حباب باشد، این احساس ممکن است متناوب یا مداوم باشد و معمولاً با تماس بیشتر با صدا بدتر می‌شود، اغلب فرکانس تینیتوس مطابق با فرکانس افت شنوایی دیده شده روی اودیوگرام است و از نظر بلندی و شدت در حدود ۵ دسی بل بالاتر از آستانه شنوایی است. وزوز گوش نیز می‌تواند مشکلات ویژه‌ای داشته باشد که اغلب با سروصدا و یا استرس در محیط کار بدتر می‌شود که معمولاً در آخر هفته و طی تعطیلات کاهش می‌یابد. وزوز گوش نیز منجر به افزایش غیبت از کار می‌شود. بین وزوز گوش و حوادث در محیط کار ارتباط واضحی وجود دارد. بنابراین برای افرادی که وزوز گوش عذاب دهنده دارند نیز محافظت گوش در محیط پر سروصدای بالای ۸۵ دسی بل توصیه می‌شود. سرگیجه تنها بعد از تماس با مقادیر بسیار زیاد سروصدا ایجاد می‌شود. سرگیجه موقتی و دائمی ممکن است پس از مواجهه با انفجار سلاح‌های جنگی رخ دهد و بطور معمول در مواجهه با سروصدای صنایع ایجاد نمی‌شود.

#### کاهش شنوایی ناشی از سروصدا

کاهش شنوایی ناشی از سروصدا دوطرفه و قرینه است و با کاهش شنوایی در فرکانس‌های بالا همراه است. منتهای وقتی فرد به طور مزمز در معرض سروصدا باشد کاهش شنوایی به تدریج فرکانس‌های پایین را نیز در برمی‌گیرد، از همان اول که شخص در محیط پر سرو صدا قرار می‌گیرد از صدا کردن گوش، احساس گرفتگی گوش، خستگی روانی و جسمانی و احساس ناراحتی عمومی شکایت دارد این ناراحتی‌ها معمولاً در پایان روز بیشتر محسوس بوده و با استراحت از بین می‌رود و در ایام تعطیل نیز محسوس نیست. به تدریج شخص با این وضع تطابق پیدا کرده و دیگر احساس ناراحتی نمی‌کند که به آن مرحله عادت یا مرحله اختفا می‌گویند این مرحله شخص از کاهش شنوایی خود بی‌خبر می‌باشد و این کاهش شنوایی به تدریج در ۳ مرحله سیر می‌کند.

#### مراحل کاهش شنوایی

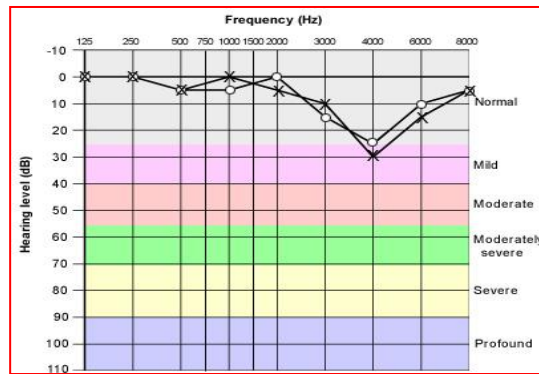
مرحله اول اختفای کامل: نقصان شنوایی در فرکانس‌های ۴۰۰۰ متمرکز می‌باشد، وزوز گوش بطور متناوب وجود دارد، درک صداها حتی بطور درگوشی خیلی جزئی تغییر یافته است.

مرحله دوم مشکل در فهم صداها درگوشی: نقصان شنوایی در فرکانس‌های ۴۰۰۰ افزایش یافته و به فرکانس‌های مجاور گسترش پیدا کرده که ممکن است به فرکانس‌های ۱۰۰۰ نیز برسد، صداها بلند در محیط‌های پر سرو صدا به طرز بدی درک می‌شود و در گوش کردن به موسیقی نیز شخص دچار مشکل می‌شود.

مرحله سوم احساس ناراحتی در اجتماع: در این مرحله ناشنوایی واضح می‌باشد، شخص حتی در مورد صداها بلند در خواست تکرار گفته‌ها را میکند که باعث ناراحتی برای او می‌شود بطور استثنایی ممکن است سرگیجه نیز وجود داشته باشد

نمونه‌ای از تست شنوایی سنجی که در آن کاهش شنوایی در فرکانس ۴۰۰۰ هرتز دیده می‌شود





منحنی شنوایی هوایی گوش راست و چپ کارگر در معرض صدا  
تصویری از سلول‌های مویی شکل که در اثر تماس با سر و صدای بیش از حد مجاز به مرور زمان از بین می‌رود طبیعی (سمت راست) و غیر طبیعی (سمت چپ)



سلول‌های مویی طبیعی

تقسیم بندی اثر سر و صدا بر شنوایی  
اثر سروصدا بر شنوایی به سه دسته تقسیم می‌شود:

تغییر گذاری آستانه شنوایی پس از مواجهه با سروصدا به صورت کوتاه مدت آستانه شنوایی تغییر می‌کند و پس از قطع تماس با سرو صدا، آستانه شنوایی به حالت اول بر می‌گردد

تغییر دائم آستانه شنوایی

تغییر شنوایی که به طور دائم در سراسر زندگی فرد باقی می‌ماند و با قطع تماس کارگر با سروصدا نیز بهبود نمی‌یابد.

ضربه آکوستیک

تماس ناگهانی با صدای با شدت بسیار بالا مانند موارد انفجار و تیر اندازی باتوپ و غیره که در آنها علاوه بر صوت، امواج ضربه‌ای حاصل از جابجایی هوا نیز بوجود می‌آید که می‌تواند بر گوش داخلی اثر کند و باعث ناشنوایی در فرکانس‌های زیر شود. در چنین مواردی این امواج ضربه‌ای ممکن است باعث پارگی پرده گوش و جابجا شدن استخوانچه‌های گوش میانی (آسیب گوش میانی) و در نتیجه ایجاد یک ناشنوایی هدایتی گردد که معمولاً پیش‌آگهی خوبی داشته و به سمت بهبودی سیر می‌کند، اما در مواردی که ضربه‌ها صوتی مکرر باشد، صدمه به گوش داخلی نیز وارد خواهد آمد و سلول‌های شنوایی آسیب خواهند دید که در ۹۰٪ موارد ایجاد ناشنوایی می‌کند که در بعضی از موارد با سرگیجه نیز همراه است. نظامیان بیشترین در صد افراد در معرض این خطر را تشکیل می‌دهند و گوش تواماً در معرض تهاجم دو عامل خطر یعنی صوت و امواج ضربه‌ای قرار می‌گیرد. صداهای ضربه‌ای Noise impact با شدت بیش از ۱۴۰ دسی بل ممکن است باعث افت شنوایی آنی و غیر قابل برگشت شود.

گوش داخلی به وسیله رفلکس اکوستیک از اثرات صدای ممتد محافظت می‌شود، این رفلکس وقتی شروع می‌شود که گوش در معرض صدای بلندتر از ۹۰ دسی بل قرار گیرد (انقباض عضلات تنسور تیمپانی و استاپدیوس در گوش میانی باعث سختی و سفتی سیستم هدایتی و مقاومت در برابر ورود صوت می‌شود). این رفلکس حفاظتی تاخیری است و ظرف ۱۵ تا ۲۵ میلی ثانیه بعد از صوت شروع می‌شود که بستگی به شدت صوت دارد، صداهای منقطع با شدت بالای ۱۴۰ دسی بل ممکن است باعث رفلکس اکوستیک را فعال نمایند به داخل حلازون نفوذ می‌کنند و باعث آسیب سلول‌های شنوایی در گوش داخلی می‌شوند.

کیفیت سیر ناشنوایی

سیر عارضه در رابطه با حساسیت افراد متفاوت است. بعضی از افراد مقاومت نشان می‌دهند و ناشنوایی آنها از مرحله یک یا دو تجاوز نمی‌کند بعضی دیگر برعکس مقاومتی ندارند و ناشنوایی آنها به سهولت و در ظرف چند ماه به طرف وخامت سیر کرده و وضع مزاحم و مشکلی بوجود می‌آورد، اگر این افراد از محیط پر سروصدا دور شوند ناشنوایی آنها در هر مرحله‌ای

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

که هست تثبیت شده و دیگر پیشرفت نمی‌کند؛ البته همانطوری که اشاره شد بهبودی نیز نمی‌یابد ولی امکان دارد به علت از بین رفتن خستگی حاصل از سروصدا شخص احساس راحتی و آسایش بیشتری نماید.

توجهات خاص شنوایی در بعضی مشاغل مثل پرواز (خلیانی)، نیروهای مسلح، پلیس، نیروی دریایی، رانندگی و غواصی لازم است. پیرگوشی که در فرکانس‌های بالا اتفاق می‌افتد اثر جمعی بر کاهش شنوایی ناشی از سروصدا دارد.

#### تشخیص

کاهش شنوایی وابسته به سروصدا نوعی از کاهش شنوایی است که جمعی و همیشه از نوع حسی عصبی می‌باشد که برای ماهها تا سالها بعد از تماس با سروصدای خطرناک پیشرفت می‌کند و هر دو گوش را به طور یکسان درگیر می‌کند و عمدتاً در اودیوگرام فرکانس‌های بالا و به خصوص فرکانس ۴۰۰۰ را درگیر می‌سازد. بهترین روش تشخیص افت شنوایی ناشی از سروصدا تلفیقی از سه روش اودیوگرام، شرح حال کامل شغلی و معاینه فیزیکی می‌باشد.

تست‌های شنوایی یک بخش بسیار مهمی در تشخیص است، برای اینکه این تست‌ها به‌درستی و دقت انجام شود باید از اتاق‌های مناسب جهت آزمایش استفاده شود؛ اودیوگرام صوت خالص، تست درک گفتار و تست تمیز گفتار، همگی مورد نیاز می‌باشند (SDS، SRT، PTA).

از هر کارگر در رابطه با معاینات قبلی خصوصاً تست‌های شنوایی قبلی باید سوال شود. نکته مهم اینکه برای انجام اودیومتری تشخیصی باید کارگر حداقل ۱۶ ساعت قبل از تست با سروصدا تماس نداشته باشد.

اگر تست‌های شنوایی کاهش شنوایی حسی عصبی را نشان دهند، یک شرح حال دقیق از پیشرفت کاهش شنوایی در بررسی علت آن بسیار کمک‌کننده می‌باشد، در بیشتر موارد با یک شرح حال دقیق و با کمک تست‌های اودیومتری می‌توان از علل کاهش شنوایی مطلع شد، در بعضی موارد کاهش شنوایی کارگر قبل از استخدام وی وجود داشته ولی کارگر از آن مطلع نمی‌باشد و در موارد دیگری ممکن است کاهش شنوایی کارگر به علت غیر شغلی مثل بیماری‌های عفونی، داروهای توکسیک، تروما ایجاد شده باشد یا بخشی از کاهش شنوایی بدون تماس با سروصدای صنعتی ناشی از شلیک گلوله یا انفجار خمپاره و یا موشک بوده باشد که در موارد فوق شرح حال کامل به همراه اودیوگرام قبل از استخدام، برای تشخیص نهایی بسیار کمک‌کننده می‌باشد، قبل از رسیدن به نتایج راجع به ارتباط بین کاهش شنوایی فرد و تماس با سروصدا، پزشک باید معاینه کامل گوش، حلق و بینی را بطور کامل انجام دهد.

معاینه گوش باید شامل موارد ذیل باشد:

- گوش خارجی از نظر اسکارها یا اختلال عملکرد
- معاینات اتوسکوپیک پرده تمپان برای تشخیص هرگونه اختلال در آن
- معاینه بینی، گلو و نازوفارنکس برای تشخیص هرگونه اختلال در آنها
- رفلکس‌های چشمی
- مشاهده نیستاگوس
- بررسی اودیوگرام

باید توجه داشت علی‌رغم انجام موارد فوق (اودیوگرام، شرح حال و معاینه)، یکسری از موارد دیگری نیز وجود دارد که نیاز به بررسی سایر علل (به غیر از سروصدا) را ایجاد می‌کند که عبارتند از:

کاهش شنوایی هدایتی که به علت تماس ممتد با صدا ایجاد نشده باشد ممکن است ریشه شغلی داشته باشد ولی در بعضی موارد در نتیجه صدمات تروماتیک به گوش خارجی، پرده صماخ یا گوش داخلی ایجاد می‌شود.

همراهی هر دو نوع کاهش شنوایی حسی عصبی و هدایتی با هم، نشان می‌دهد که تنها علت کاهش شنوایی تماس با سروصدا نمی‌باشد.

پاسخگویی متناقض در تست‌های شنوایی احتمالاً ناشی از تمارض یا کاهش شنوایی فانکشنال می‌باشد.

کاهش شنوایی قطعی در یک گوش با شنوایی نرمال در گوش دیگر، کاهش شنوایی شغلی را رد می‌کند.

بخشی از کاهش شنوایی در افراد مسن به علت پیرگوشی و تماس با سروصدا است که کل جمعیت را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

#### تشخیص افتراقی کاهش شنوایی شغلی

پیرگوشی (Presbycusis): معمولاً کاهش شنوایی یک حالت تدریجی پیشرونده و قرینه در فرکانس‌های بالا (عمدتاً ۸۰۰۰) از نوع حس عصبی در سن بالا و همراه با تخریب تدریجی در تست تمیز گفتار (SDS) است.

تألیف : دکتر ابوالفضل برخورداری

کاهش شنوایی ارثی (Hereditary Hearing impairment) (HHI): با یک تاریخچه فامیلی و وقوع در سنین پایین قابل تشخیص است.

اختلالات متابولیک: کاهش شنوایی پیشرونده ممکن است با دیابت ملیتوس (افزایش قند خون)، عملکرد غیرطبیعی تیروئید، بیماری‌های خود ایمنی، افزایش تری گلیسرید (چربی) و کلسترول خون همراه شود.

بیماری‌های عفونی: مننژیت، اوربیت، سرخجه، سیفلیس مادرزادی و اکتسابی، لایم، دیفتیری، سرخک، مخملک ممکن است باعث کاهش شنوایی از نوع حسی عصبی شوند

بیماری‌های سیستم عصبی مرکزی CNS: تومورهای Cp Angle خصوصاً اکوستیک نورینوما باعث کاهش شنوایی حسی عصبی پیشرونده و یک‌طرفه می‌شوند در حالی‌که افت شنوایی ناشی از تماس با سروصدا معمولاً دوطرفه است.

افت شنوایی با علت تمارض (فانکشنال): عمدتاً در این افت شنوایی افراد با یک هدف ثانویه ادعای ناشنوایی دارند که به وسیله تکنیک‌های ادیومتری، معمولاً تشخیص داده می‌شود.

کاهش شنوایی و ادیومتری

کاهش شنوایی معمولاً به‌صورت نسبی و کامل می‌باشد در صورتی که ناشنوایی کامل یا نزدیک به کامل (بیش از ۹۰-۸۵ دسیبل زیر حد طبیعی) باشد می‌توان ناشنوایی را برای فرد اطلاق نمود. از نظر عملی، زمانی که کاهش شنوایی هر دو گوش معادل یا بیشتر از ۳۰ دسیبل در فرکانس مکالمه یا گفتاری (فرکانس‌های ۳۰۰۰-۵۰۰۰ هرتز) باشد تأثیرپذیری اجتماعی در اثر کاهش شنوایی آغاز می‌شود. بطورکلی سه نوع کاهش شنوایی وجود دارند که عبارتند از: کاهش حسی - عصبی شنوایی<sup>۱</sup> کاهش انتقالی شنوایی<sup>۲</sup> و کاهش شنوایی مرکب<sup>۳</sup>.

کاهش حسی - عصبی که به کاهش درکی<sup>۴</sup> نیز معروف است و در اثر بیماری‌های حلزون، عصب جمجمه‌ای هشتم و یا مغز رخ می‌دهد. علت این بیماری‌ها می‌تواند عفونت (سرخچه دوران بارداری)، کروما (صداهاى شدید)، مواد سمی، بیماری‌های دژنراتیو و یا ناهنجاری‌های مادرزادی باشد. اوربیت به عنوان یکی از علل شایع ناشنوایی یک طرفه می‌تواند سلول‌های مویی حلزون را تخریب کند. کاهش شنوایی انتقالی در بیماران مبتلا به اختلالات گوش خارجی یا میانی مانند اوتیت میانی و پارگی پرده صماخ رخ می‌دهد. ولی با استفاده از سمعک می‌توان بخشی از ناشنوایی انتقالی را کاهش داد.

معمولاً برای سنجش میزان شنوایی از آزمون‌های شنوایی مختلف مانند بررسی صداهاى نجوایی یا گفتاری، آزمون‌های دیپازونی<sup>۵</sup> و شنوایی سنجی<sup>۶</sup> استفاده می‌شود.

در روش نجوایی فرد باید در فاصله ۳ فوتی بیمار بایستد و صدای خود را به طرف گوش فرد جهت بدهد شدت صدای نجوا از ۲۰ دسیبل (نجوای ضعیف) تا نجوای بلند (۵۰ دسیبل) متغیر است.

سنجش کمی شنوایی با استفاده از یک دستگاه شنوایی سنج با صدای خالص امکان‌پذیر است. در این دستگاه فرکانس و شدت صداهاى خالص تولید شده قابل تغییر است. با رسم کردن مقادیر مربوط به شدت در برابر مقادیر فرکانس، نموداری حاصل می‌شود که از روی این نمودار می‌توان وضعیت شنوایی فرد را مشخص نمود.

بطورکلی در آزمون‌های استاندارد، هفت فرکانس صوتی از ۲۵۰ تا ۸۰۰۰ هرتز مورد آزمایش قرار می‌گیرند. ابتدا فرکانسی عرضه می‌شود که از بلندی کافی برای شنیده شدن واضح توسط بیمار برخوردار باشد. با آزمایش کردن گوش افراد طبیعی می‌توان سطح مرجع صفر در دستگاه شنوایی سنج سالم، بدست آورد. این سطح متوسط شدت صوتی است که توسط یک گوش طبیعی قابل تشخیص است. اگر فردی قادر به شنیدن یک فرکانس مشخص در منهای ۱۰ دسیبل (۱۰-) باشد این امر بدین معنا است که وی می‌تواند فرکانس مذکور را بهتر از یک فرد میانگین بشنود. اگر آستانه گوش از ۲۵ دسیبل بالای صفر بیشتر نباشد شنوایی فرد به عنوان یک شنوایی طبیعی در نظر گرفته می‌شود. شنوایی گوش انسان در حوالی فرکانس ۱۰۰۰ هرتز از بیشترین میزان تیزی<sup>۷</sup> برخوردار است.

در اکثریت قریب به اتفاق موارد کاهش شنوایی مربوط به انواع غیر ارثی کاهش شنوایی مانند پیرگوشی، کاهش شغلی شنوایی یا کاهش شنوایی در اثر صدا، تروما، سمیت داروها و علل متابولیک تماس با صداهاى بیش از حد مجاز در طول ماهها

<sup>۱</sup> Sensori-neural hearing loss

<sup>۲</sup> conductive hearing loss

<sup>۳</sup> mixed hearing loss

<sup>۴</sup> perceptive

<sup>۵</sup> tuning forks

<sup>۶</sup> audiometry

<sup>۷</sup> acuity

و سالها باعث آسیب به حلزون می‌شود. در مراحل آغازین، کاهش شنوایی در فرکانس معادل یا نزدیک ۴۰۰۰ هرتز رخ می‌دهد. با گذشت زمان، آسیب در هر دو جهت فرکانس‌های پایین‌تر و بالاتر گسترش پیدا می‌کند. فرکانس پایین در ابتدا کمترین درگیری را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که کارگر قبل از آگاهی به کاهش شنوایی خود آسیب قابل توجهی رخ داده است زیرا تا هنگامی که کاهش شنوایی به بیش از ۳۰ دسیبل در فرکانس مکالمه نرسد درک کلام<sup>۱</sup> دچار اختلال جدی نمی‌شود. کاهش شنوایی ناشی از صدا ممکن است موقتی و یا دائمی باشد. در مرحله اول حساسیت گوش فرد به علت مواجه شدن با صدا کاهش یافته و به عبارتی آستانه شنوایی افزایش می‌یابد. چنانچه صدا به سطح قبلی خود برگردد.

#### ایجاد ناراحتی در اجتماعات

در اینجا نیز اندازه‌گیری فرکانس در اکتاو باند انجام می‌شود معیارهای صدای اجتماعات با عکس‌العمل‌های اجتماعی منتظره در شکل‌های زیر آمده است. از این اشکال می‌توان عکس‌العمل افراد حساس را بدست آورد. مثلاً صدای کوره از فاصله‌ای در شب باعث می‌شود که مردم عملاً به آن عکس‌العمل بدهند (عکس‌العمل احتمالی تهدیدآمیز).

#### درمان

درمان طبی یا جراحی که بتواند اثرات کاهش شنوایی شغلی را برگرداند وجود ندارد. بعد از انجام معاینات اتولوژیک و انجام تست های اودیومتریک، پزشک باید بیمار را از نتایج تماس مداوم با سروصدای زیاد و شدید آگاه نماید و به منظور کاهش آسیب شنوایی او را به اجتناب از تماس بیشتر با سروصدا ترغیب نماید.

#### تقویت کننده‌های شنوایی

تقویت کننده‌های شنوایی باید دقیق و متناسب باشند تا نیازهای افراد باتوجه به فرکانس مورد نیاز برطرف گردد. در کاهش شنوایی هر دوگوش معمولاً تقویت کننده دوطرفه بازتوانی و رضایت بیشتری را فراهم می‌کند البته استفاده از این وسایل کمکی به تصمیم بیمار بستگی دارد. یک معیار مطلوب و عملی برای ارجاع فرد به متخصص جهت ارزیابی استفاده از وسایل کمک شنوایی SRT یا بین تر از ۲۵ دسی بل و یا SDS کمتر از ۸۰ درصد ( زمانی که کلمات در سطح نرمال ۵۰ دسی بل از آستانه شنوایی سنجش شوند) می‌باشد. بیماران با افت شنوایی در فرکانس‌های بالا که شنوایی نسبتاً نرمال در فرکانس‌های پایین دارند سمعک بیشترین کمک را به آنها می‌کند که کاهش شنوایی مشخص در فرکانس ۲۰۰۰ هرتز در PTA دارند. باید توجه داشت که قبل از تجویز سمعک ارزیابی کامل روی بیمار صورت گیرد و در صورتیکه که وسیله کمک شنوایی تجویز شد، بهتر است که آن را به مدت کوتاهی بصورت آزمایشی در اختیارش قرار گیرد. رضایت بیمار جهت استفاده از این وسایل به مواردی مانند زیبایی، توانایی قراردادن در گوش، دسترسی آسان برای کنترل و ارزان بودن آن بستگی دارد، کلاس‌های بازتوانی شنوایی به منظور افزایش توانایی بیمار برای درک گفتار باید تشکیل شوند که معمولاً مفید می‌باشد. در رابطه با تینیتوس باید توجه داشت که تقریباً هیچ درمانی برای آن وجود ندارد، در صورتیکه گوش داخلی آسیب شدید پیدا نکرده باشد و زوز گوش به تدریج کاهش می‌یابد اگر چه درجه خفیفی از آن باقی می‌ماند و خصوصاً زمانی آشکار می‌گردد که بیمار در اتاق یا محیط ساکتی قرار گیرد؛ در بیماران با تینیتوس شدید باید زوز گوش توسط موزیک یا انواع صداهای دیگر ماسکه شود که امروزه وسایل کمک شنوایی ماسکه کننده جهت این افراد طراحی شده است. در نهایت در صورتیکه بیماران با تینیتوس دچار افسردگی شوند باید آنها را به روانپزشک ارجاع داد.

#### پروگنوز (پیش آگهی)

اگر بیمار از محل پر سروصدا خارج شود کاهش شنوایی ناشی از سروصدا در وی ثابت خواهد ماند، در غیر اینصورت کاهش شنوایی ادامه یافته و در موارد شدید کری کامل رخ می‌دهد. پروگنوز علاوه بر محافظت شنوایی، به فاکتورهای دیگری نیز بستگی دارد که سن یکی از آن فاکتورهاست، به عنوان مثال با مسن‌تر شدن بیمار، پیرگوشی، به افت شنوایی مرتبط با سروصدا افزوده می‌شود، وجود یا عدم وجود مواد اتوتوکسیک (مواد سمی برای گوش) مانند آمینو گلیکوزها در محل کار و استفاده صحیح و به جا از وسایل حفاظت شنوایی از دیگر فاکتورهای موثر بر پیش آگهی این بیماری می‌باشند

<sup>۱</sup> Speech reception