دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده معماری و شهرسازی

عنوان پایان‌نامه:

فضای اجرای موسیقی ایرانی

(پژوهشی جهت ارائه ضوابط طراحی)

استادان راهنما:

دکتر خسرو مولانا

دکتر هادی ندیمی

استاد مشاور موسیقی:

مجیـــد کیـــــانی

نگارش:

الهــه ثابتی

پایان‌نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته معماری

تابستان ۱۳۸۴

پیوست ۱

طراحی شنودسراها*

فهرست مطالب صفحه

۱. ملاحظات شنیداری ۱۳۳
۱/۱. صدا و شنوایی انسان ۱۳۴
۱/۱/۱. صدا ۱۳۴
۱/۱/۲. صدای انسان ۱۳۴
۱/۱/۳. صدای موسیقی ۱۳۴
۱/۱/۴. شنوایی انسان ۱۳۵
۱/۲. نوفه و مهار آن ۱۳۸
۱/۲/۱. تعریف نوفه ۱۳۸
۱/۲/۲. برسنج نوفه ۱۳۹
۱/۲/۳. منابع نوفه و روش‌های حذف آن ۱۴۳
۱/۲/۳/۱. نوفه‌های خارجی ۱۴۳
۱/۲/۳/۲. نوفه‌های داخلی ۱۴۵
۱/۲/۳/۳. نوفه سیستم‌های تهویه ۱۴۵
۱/۳. صدارسانی خواسته ۱۴۸
۱/۳/۱. تأمین کمیت مناسب صدا ۱۴۹
۱/۳/۱/۱. صدای مستقیم ۱۵۰
۱/۳/۱/۲. صدای واخنشی (بازتابی) ۱۵۰
۱/۳/۱/۲/۱. انتشار و انعکاس صدا ۱۵۱
۱/۳/۱/۳. طراحی هندسی شنودسرا ۱۵۲
۱/۳/۱/۳/۱. کاربری ۱۵۳
۱/۳/۱/۳/۲. تعداد شنوندگان و ابعاد تقریبی فضا ۱۵۳
۱/۳/۱/۳/۳. تراکم شنوندگان ۱۵۳
۱/۳/۱/۳/۴. محل قرارگیری شنوندگان و منبع صدا ۱۵۳
۱/۳/۱/۳/۵. فرم و محل منعکس‌کننده‌ها ۱۵۴

* این پیوست به صورت یک بخش آموزشی ارائه شده است. در متن اصلی پروژه نیز از این مباحث استفاده شده است.

۱/۳/۱/۴. مسائل آکوستیکی شکل هندسی شنودسراها ۱۵۵
۱/۳/۱/۴/۱. آمودهای یک فضا ۱۵۵
۱/۳/۱/۵. پخشایی ۱۵۸
۱/۳/۱/۶. پژواک و مهار آن ۱۵۹
۱/۳/۲. تأمین کیفیت مناسب صدا ۱۶۱
۱/۳/۲/۱. زمان واخنش ۱۶۱
۱/۳/۲/۱/۱. اثرات واخنش در فضا ۱۶۳
۱/۳/۲/۱/۲. زمان واخنش بهینه ۱۶۴
۱/۳/۲/۱/۳. حجم شنودسرا ۱۶۶
۱/۳/۲/۱/۴. مقادیر پیشنهادی برای زمان واخنش ۱۶۷
۱/۳/۲/۱/۵. تغییر دادن زمان واخنش ۱۶۹
۱/۳/۲/۲. نسبت شدت صدای مستقیم به شدت صدای واخنشی ۱۶۹
۱/۳/۲/۳. زمان تأخیر اولیه ۱۶۹
۱/۳/۲/۴. مصالح ساختمانی ۱۷۰
۱/۳/۲/۴/۱. مشخصات صندلی‌های شنودسرا از نظر آکوستیکی ۱۷۱
۱/۳/۳. صفات ذهنی کیفیت آکوستیک فضا ۱۷۲
۱/۳/۴. وسایل الکتروآکوستیکی ۱۷۹
۱/۳/۵. اندازه‌گیری پس از اجرا ۱۸۰
۱/۳/۶. طراحی فضای باز یا نیمه‌باز بر اساس اصول آکوستیک ۱۸۱
۱/۳/۶/۱. محل نوازندگان ۱۸۱
۱/۳/۶/۲. محل شنوندگان ۱۸۲
۲. ملاحظات دیداری ۱۸۳
۲/۱. دید انسان ۱۸۳
۲/۲. چیدن صندلی‌ها ۱۸۵
۲/۳. شیب کف ۱۸۷
۲/۳/۱. ترسیم شیب کف در مقطع ۱۸۸
۲/۴. بالکن‌ها ۱۸۹
۲/۵. انواع شنودسراها (از نظر نحوه نشستن افراد) ۱۸۹
۳. ملاحظات غیر دیداری و شنیداری ۱۹۲
۳/۱. تأسیسات مکانیکی ۱۹۲

۴. نمونه تالارها ۱۹۵
۴/۱. نمونه شماره ۱، وین، اتریش، GROSSER MUSIKVEREINSSAAL ۱۹۶
۴/۲. نمونه شماره ۲، آمستردام، هلند، CONCERTGEBOUW ۱۹۸
۴/۳. نمونه شماره ۳، گوتنبرگ، سوئد، CONSERTHUS ۲۰۰
۴/۴. نمونه شماره ۴، اشتوتگارت، آلمان، LIEDERHALLE, GROSSER SAAL ۲۰۱
۴/۵. نمونه شماره ۵، بُن، آلمان، BEETHOVENHALLE ۲۰۳
۴/۶. نمونه شماره ۶، پاریس، فرانسه، THEATRE NATIONAL DE L'OPERA ۲۰۵
۴/۷. نمونه شماره ۷، سالزبورگ، اتریش، NEUES FESTSPIELHAU ۲۰۷
۴/۸. نمونه شماره ۸، برلین، آلمان، BENJAMIN FRANKLIN KONGRESSHALLE ۲۰۸
۴/۹. نمونه شماره ۹، نیویورک، آمریکا، GRACE RAINEY ROGERS AUDITORIUM ۲۰۹
۴/۱۰. نمونه شماره ۱۰، شیکاگو، آمریکا، ARIE CROWN ۲۱۰
۴/۱۱. جمع‌بندی ۲۱۱

پیوست ۱، طراحی شنودسراها

در هنگام بررسی منابع مختلف، مطالبی مربوط به طراحی شنودسراها جمع‌آوری شد که ارتباط مستقیم با ضوابط طراحی فضا برای اجرای موسیقی ایرانی نداشت. اما دانستن آنها به خواندن متن اصلی کمک می‌کرد. علاوه بر این مطالب مربوط به طراحی شنودسراها (خصوصاً از نظر آکوستیکی) به صورت منسجم در بین پایان‌نامه‌های دانشکده وجود نداشت. بنابراین این مطالب که بیشتر جنبه آموزشی دارند، در این پیوست ارائه می‌گردند.

مباحث مربوط به طراحی شنودسراها در چهار بخش کلی ارائه شده‌اند:

۱. ملاحظات شنیداری (آکوستیکی)، که مباحث اصلی را تشکیل می‌دهند.
۲. ملاحظات دیداری، که اشاره‌ای کلی به مباحث آن شده است.
۳. ملاحظات غیر دیداری و شنیداری، که در اینجا فهرست آنها (جز در قسمت تأسیسات) ذکر می‌شود. مسلماً پرداختن به هر کدام از این موضوعات کار جداگانه‌ای می‌طلبد.
۴. نمونه تالارها، که ۱۰ نمونه از تالارهای موفق دنیا همراه با مشخصات فنی معرفی شده‌اند.

۱. ملاحظات شنیداری (آکوستیکی)

«آکوستیک علمی است که به کمیت و کیفیت امواج مادی (در اینجا: امواج صوتی منتشره در هوا) می‌پردازد. اهداف طراحی آکوستیکی نیز حفظ محیط از نوفه داخلی و خارجی و طراحی برای صدای خواسته است.» [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۲۲]

«قدم اول در ایجاد فضایی مطلوب از نظر آکوستیک، آماده کردن زمینه‌ای نسبتاً آرام است که از مزاحمت صداهای اضافی و ناخواسته (مثل ترافیک، تهویه داخلی، همهمه افراد در فضاهای مجاور و...) تا حد معینی عاری باشد و مانع تمرکز بر فعالیت اصلی فضا نگردد. مهار نوفه، گام اول در خلق فضایی مطلوب برای هر عملکردی، به‌ویژه عملکردهایی است که با صدا سروکار دارند.

قدم دوم، تنظیم یا هماهنگ کردن فضا با نحوه شنود صداست. اگر فضا، به هدف رساندن صدای یک منبع (فردی در حال سخن گفتن یا اجرای موسیقی) به جمعی از مردم شکل گرفته، باید کالبد فضا، به جهت دادن و رساندن صدا کمک کند و صدا را با کمیت و کیفیت قابل قبولی به همه افراد برساند.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۱۰۴]

*«برای این کار باید ابتدا با شناخت کاربری فضا و تعداد استفاده‌کنندگان از آن، نیازهای عملکردی ـ صوتی فضای موردبحث را در نظر گرفته و **طرح هندسی** آن را شکل بخشید. سپس به طرح جزئیات فضا پرداخته، **زمان واخنش** مطلوب برای فعالیت موردنظر را (متناسب با حجم فضا) تأمین کرد که می‌بایست با رعایت **پخشایی** در فضا همراه باشد.»* [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۱۹۲]

در ادامه به توضیح بیشتر درباره این مطالب پرداخته می‌شود.

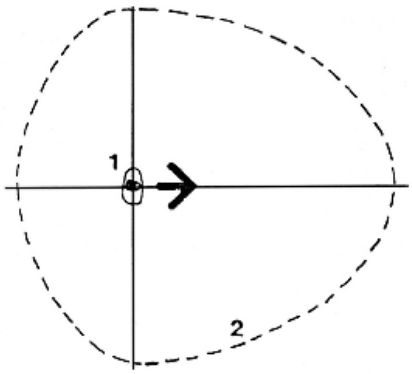
۱/۱. صدا و شنوایی انسان

۱/۱/۱. صدا

صدا موجی مکانیکی است که در اثر تغییرات فشار در هوا ایجاد می‌شود. فراسنج‌های تمایز صداهای مختلف از هم بسامد، شدت و بیناب (نشان‌دهنده بسامد و شدت امواج سینوسی تشکیل‌دهنده صدای اصلی) هستند.

۱/۱/۲. صدای انسان

«صدای انسان، در اثر ارتعاش تارهای صوتی، به وسیله هوایی که از ریه‌ها خارج می‌شود، به وجود می‌آید. هرچند که یک فرد در حال سخن گفتن، معمولاً به عنوان یک منبع نقطه‌ای و همه‌جهته فرض می‌شود، اما بخش اعظم انرژی صوتی فرد، به سمت جلو منتشر می‌گردد و بیناب صدای فرد سخن‌گو (تناسب بین اجزاء تشکیل‌دهنده صدا) تا ۴۵ درجه از هر طرف، ثابت (یعنی معادل بیناب صدایی است که درست از روبروی او دریافت می‌شود) و تا ۷۰ درجه از هر طرف، تقریباً مشابه آن و قابل قبول است.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۳۳، مرجع اصلی: دکتر خسرو مولانا]



نمودار ۱/۱/۲/۱، نقاط هم‌فشار (و در نتیجه هم‌تراز) در اطراف فرد سخنگو (۱) سخنگو، (۲) نقاط هم‌تراز در اطراف فرد [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۳۳]

«تراز صدای انسان در گوش افراد مختلف (به‌ویژه میان زنان و مردان) متفاوت است. اما حد متوسط آن در ۵۰۰ هرتز ۶۸ dB (در فاصله یک متری دهان) است که سخن‌گویی با صدای عادی به‌شمار می‌رود. در همین فاصله، تراز کمتر از ۶۰ dB صدای آرام و در حدود ۷۵ dB صدای بلند تلقی می‌گردد.» [بوبان، ص ۱۹۷ و ۲۳۳]

۱/۱/۳. صدای موسیقی

در تعریف، نغمه (یا نغمه خالص) صدایی است که حاوی یک نوسان سینوسی با بسامد مشخص است. همچنین **نغمه موسیقایی** صدایی مرکب از امواج سینوسی است که بسامدشان مضاربی صحیح از یک بسامد پایه است که هماهنگ‌های آن پایه نامیده می‌شوند. صدای همه آلات موسیقی چنین است.

«اغلب صداهای اطراف ما (مانند ترافیک و...) امواجی مرکبند که اجزاء آنها با هم متناسب نیستند و اثری که بر گوش انسان می‌گذارند، خوشایند و دلپذیر نیست.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۲۹]

«می‌توان سازهای مختلف را، با توجه به گستره‌های صوتی آنها، در چند گروه دسته‌بندی کرد:

۱. سازهایی با صدای زیر (Soprano) (که بم‌ترین بسامد آنها در حدود ۲۲۰ هرتز است.) مانند: دوتار، نی، کمانچه، قیچک، ویلن و فلوت.

۲. سازهایی با صدای نسبتاً بم (Alto & Bariton) (که بم‌ترین بسامدشان در حدود ۱۱۰ هرتز است) مانند: تار، عود، قانون، سنتور، قیچک آلتو و ویلن آلتو.

۳. سازهایی با صدای بم (Bass) (که بم‌ترین بسامدشان پایین‌تر از ۱۰۰ هرتز و تا حدود ۵۵ هرتز است) مانند: ویلنسل، هارپ و هورن.

۴. سازهایی با صدای بسیار بم (Double Bass) (که بم‌ترین بسامدشان به حدود ۲۷ هرتز می‌رسد) مانند: پیانو، کنترباس و توبا.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۱۶]

«گستره بسامدی سازهای ایرانی از ۸۷ هرتز (در قانون) تا ۱۵۶۸ هرتز (در نی) یعنی به‌طور متوسط از حدود ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز است.» [شیرودی، ۱۳۷۴، ص ۲۳]

در صورتی‌که موسیقی به صورت گروهی اجرا شود، برای یکی شدن صداها باید نحوه نشستن طوری باشد که تعادل در شدت و بسامد سازها ایجاد شود.

۱/۱/۴. شنوایی انسان

«حدود شنوایی انسان از ۱۶ تا ۱۶۰۰۰ هرتز است (صداهای کمتر از این حد شنیده نمی‌شوند اما به‌صورت لرزه احساس می‌شوند). ذهن انسان از احساس گوش نسبت به این صداها، مشخصاتی دریافت و تحلیل می‌کند که با کمیت‌های فیزیکی مرتبطند اما منطبق نیستند. زیرا برداشت و تحلیل انسان در آن دخیل شده است. به همین جهت آنها را کمیت‌های فیزیک‌روانی [*] *می‌نامند.*

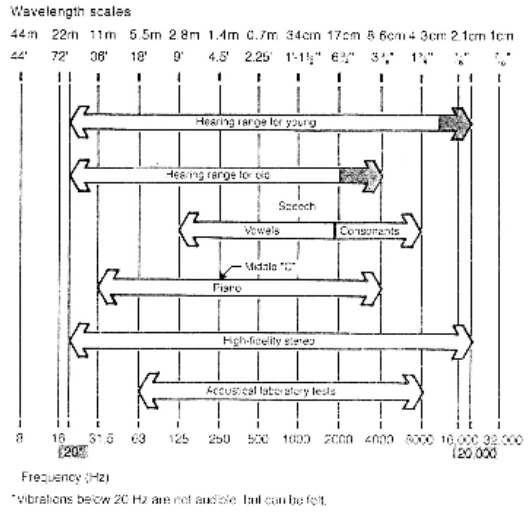
سه مشخصه اصلی صدا در ذهن انسان نیز سه کمیت فیزیک روانی هستند: بلندی، نواک و شیوش.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۳۱]

---

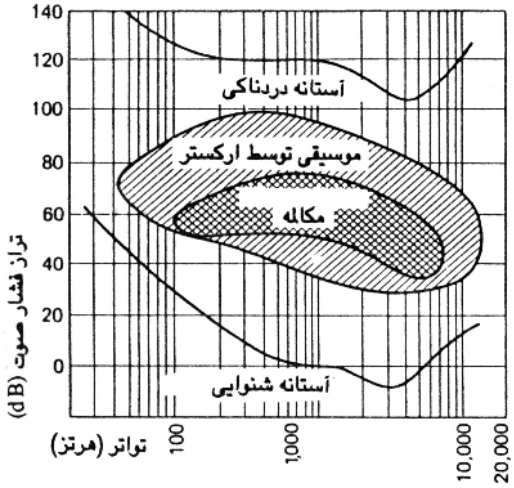
[*] *«به طور کلی، فیزیک روانی که آکوستیک روانی شاخه‌ای از آن است، علمی است که روابط موجود بین احساس انسان و فراسنج‌های عوامل فیزیکی نافذ را مورد نقد و بررسی قرار می‌دهد ـ همانند عوامل فیزیکی، حس‌های مختلف انسان نیز دارای فراسنج‌هایی می‌باشند که در هر مورد یکی از آنها جنبه کمیتی دارد ـ مثلاً، وقتی مقدار نور زیاد می‌شود، انسان احساس روشنایی بیشتر می‌کند ـ مقدار نور به وضعیت فیزیکی خارج از وجود انسان بستگی دارد، ولی وقوع روشنایی فقط در داخل وجود انسان امکان‌پذیر است ـ مقدار نور یا به عبارت فنی «درخشش» (Luminance) یک فراسنج فیزیکی و «روشنایی» (Brightness) فراسنجی «فیزیک روانی» می‌باشد ولی هر دو جنبه کمیتی دارند. چیزی که در اصل یک محدوده مطلوب را تعیین می‌کند، قرار گرفتن مقدار فراسنج‌های فیزیکی روانی در یک محدوده خاص می‌باشد.»* [مولانا، جزوه نور و صدا در محیط زیست، ص ۲]

۱. بلندی: که با مشخصه فیزیکی شدت مرتبط است و به میزان احساس گوش از شدت صدا بستگی دارد. گوش انسان صداهای هم‌شدت و با بسامدهای متفاوت را با بلندی‌های یکسان درک نمی‌کند و بلندی آن در بسامدهای حدود ۳۰۰۰ هرتز بیشتر می‌شود.

حداقل شدت لازم صدا برای شنوایی (که در بسامدهای مختلف متفاوت است)، آستانه مطلق شنوایی و بالاترین شدت آن، آستانه ناراحتی (مرحله ناراحتی شنوایی) نامیده می‌شود. محدوده بین این دو آستانه **گستره پویایی شنوایی انسان** است که در حدود ۱۲۰ dB است.



نمودار ۱/۱/۴/۱، طول‌موج و بسامد امواج در گستره شنوایی [Watson، 1997، ص ۱۰۴]



نمودار ۱/۱/۴/۲، گستره شنوایی انسان [استِین، ۱۳۷۸، ص۳۵]

«برای سنجش بلندی صدا، از تراز صدا استفاده می‌شود و چنانچه شنوایی انسان و نحوه بهادادن به بسامدهای بم و زیر را در تراز صدا اهمیت دهیم، تراز وزن‌یافته صدا به‌دست می‌آید که ساده‌ترین روش شبیه‌سازی یک دستگاه به سیستم شنوایی انسان است و با سه علامت dB_A (برای صداهای آهسته)، dB_B (برای صداهای متوسط)، dB_C (برای صداهای بلند) نمایش داده می‌شود. می‌توان تراز صداهای کمتر از ۴۰ dB_A را «خیلی آهسته»، بین ۴۰ تا ۶۰ dB_A «آهسته»، ۶۰ تا ۸۰ dB_B «بلند»، و ۸۰ تا ۱۰۰ dB_C «خیلی بلند» قلمداد کرد. صداهای بالاتر از ۱۰۰ dB_C «بسیار بلند» شمرده می‌شود.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۳۱]

رابطه تقریبی موجود بین ترازهای ذهنی برای بلندی صدا و تراز میانگین فشار صدا را اینچنین نیز می‌توان بیان نمود: *«خیلی آهسته: ۴۵ dB، آهسته: ۵۵ dB، معمولی: ۶۵ dB، بلند: ۷۵ dB، خیلی بلند: ۸۵ dB خاصیت این ارقام این است که هر "پله" تفاوت در احساس بلندی شنوایی را می‌توان کم‌وبیش با ۱۰ dB اختلاف در تراز صدا مرتبط دانست.»* [دکتر خسرو مولانا]

«انسان به علت خصوصیات خاص شنوایی‌اش کیفیت صداها را بر اساس احساس درونی که به او دست می‌دهد (مبحث فیزیک روانی) دسته‌بندی می‌نماید. به‌طور مثال کیفیت درک تراز صداها را با خصوصیات ضعیف، آهسته، معمولی، بلند، خیلی بلند و نظایر آن بیان می‌نماید که هرکدام از این احساس‌ها را یک پله احساس می‌نامند. تجربیات به عمل آمده نشان داده است که محدوده تغییر پله احساسی برای تراز یک صدا حدود ۱۰dB است. یعنی اگر یک صدای مشخص در فرد احساس بلندی خاصی را ایجاد نماید، و تراز این صدا ۱۰dB کاهش یا افزایش پیدا کند، تعبیر و بیان او از این صدا به اندازه یک درجه بالاتر یا پایین‌تر می‌رود.» [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۰۵، مرجع اصلی: دکتر خسرو مولانا]

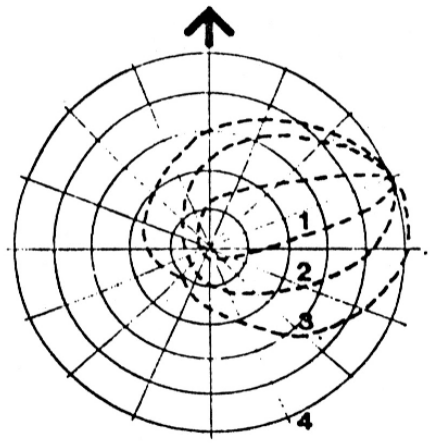
سرچشمه صدا	فاصله	تراز فشار صدا (d_B)	احساس شنوایی
هواپیما	۵ متر	۱۳۰ (C)	غیر قابل تحمل
پتک مکانیکی	۱ متر	۱۲۰ (C)	غیر قابل تحمل
آهنگری منبع آب	ــ	۱۱۰ (C)	غیر قابل تحمل
بوق اتومبیل	۵ متر	۱۰۰ (C)	خیلی بلند
کامیون	۵ متر	۹۰ (C)	خیلی بلند
موزیک از رادیو	ــ	۸۰ (B)	خیلی بلند
گفتگوی چند نفر	۱ متر	۷۰ (B)	بلند
موتور اتومبیل	۱۰ متر	۶۰ (B)	بلند
نهر و رودخانه آرام	ــ	۵۰ (A)	آهسته
منطقه مسکونی آرام	ــ	۴۰ (A)	آهسته
باغ در منطقه آرام	ــ	۳۰ (A)	خیلی آهسته
تک‌تک ساعت مچی	ــ	۲۰ (A)	خیلی آهسته
ــ	ــ	۱۰ (A)	غیر قابل شنیدن
آرامش مطلق	ــ	۰ (A)	غیر قابل شنیدن

جدول ۱/۱/۴/۱
مقایسه بلندی صداهای محیط زندگی [لیاقتی، ۱۳۶۷، ص ۸]

۲. نواک: «که با مشخصه فیزیکی بسامد مرتبط است و مشخص‌کننده زیر و بمی صدایی است که گوش حس می‌کند. هر چه بسامد بالاتر رود، صدا زیرتر و هر چه بسامد پایین‌تر باید، صدا بم‌تر می‌شود. نواک و حرکت آن است که اساس آفرینش موسیقی است.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۳۱]

۳.« شیوش: که با مشخصه‌های فیزیکی بیناب و پوش صدا مرتبط است و همان خصلتی است که سبب تشخیص دو صدای هم‌شدت و هم‌بسامد، از دو منبع متفاوت می‌شود (مثل صدای یک نت ثابت که به وسیله سنتور یا تار تولید شود). پوش و بیناب متفاوت دو صدایی که از دو منبع مختلف تولید شده باشند، احساس رنگ و طنین متفاوت را در ذهن ایجاد می‌کنند که شیوش نامیده می‌شود.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۳۱]

«گوش انسان علاوه بر حساسیت متفاوت نسبت به بسامدهای مختلف، در جهات مختلف نیز شنوایی مختلف دارد. یعنی شنوایی گوش دارای «جهت‌وری» است و این جهت‌وری در بسامدهای مختلف فرق دارد. در بسامدهای بم (زیر ۲۰۰ هرتز) گوش همه‌جهته عمل می‌کند.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۳۱]



نمودار ۱/۱/۴/۳، جهت‌وری شنوایی انسان (گوش راست)
برای بسامدهای: (۱) ۵۰۰۰ هرتز، (۲) ۵۰۰ هرتز،
(۳) ۲۵۰۰ هرتز، (۴) ۲۰۰ هرتز [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۳۲]

یکی دیگر از خصوصیات شنوایی انسان زمان جمع‌بندی شنوایی است. *«گوش انسان یک **ثابت زمانی** یا نوعی **زمان جمع‌بندی** دارد. یعنی صداهایی که در یک پنجره زمانی معین به گوش می‌رسند با یکدیگر جمع شده و پیوسته به‌نظر خواهند رسید. این پنجره زمانی **مدت جمع‌بندی شنوایی** نام دارد که افراد مختلف ارقامی بین ۵۰ تا ۱۰۰ میلی ثانیه را برای آن ملاک عمل قرار می‌دهند (حدود ۰/۰۵ ثانیه).»* [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۰۸]

۱/۲. نوفه و مهار آن

آنچه در این قسمت عنوان می‌گردد، جهت آشنایی عمومی خواننده با نوفه و روش‌های کلی مهار آن در ساختمان است. برای اطلاعات بیشتر در این زمینه (اعداد و ارقام مربوطه و محاسبات مربوط به مهار نوفه) که در حیطه تخصص آکوستیک ساختمانی قرار می‌گیرد، می‌توان به انواع کتاب‌های آکوستیکی، بخش‌های مربوط به کاهش نوفه (Noise Reduction) مراجعه کرد.

۱/۲/۱. تعریف نوفه

«صداهای ناخواسته و لرزه‌های موجود نوفه نامیده می‌شوند.» [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۲۳]

«نوفه موجود دو اثر متفاوت ولی درهم آمیخته شده، از خود به‌جا می‌گذارد. اول اینکه وجودش به تنهایی انسان را ناراحت می‌کند و دوم اینکه وضوح صدای «خواسته» مثل گفتار را مخدوش می‌سازد.» [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۸]

«فعالیت شخص نیز در این تلقی اثرگذار است. مثلاً برای یک بیمار در حال استراحت ممکن است حتی صدای موسیقی مزاحم و ناخواسته باشد. در حالی که در یک سالن اجرای موسیقی، همه

مردم به هدف شنیدن موسیقی جمع می‌شوند. صداهای صنعتی و صداهای ناشی از وسایل حمل‌ونقل و امثال آن نیز در هر حالت و در هر فعالیت، ناخواسته و مزاحم تلقی می‌شوند.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۳۳]

«میزان مزاحمت یا آزار نوفه، بسته به عملکرد فضا، پشتوانه‌های فرهنگی و عادات اجتماعی افراد متفاوت است. به طور کلی اگر نوفه مکرر (با فواصل زمانی کوتاه) باشد آزاردهنده‌تر از نوفه گاه‌به‌گاه است. همچنین، آزار نوفه در بسامدهای بالاتر (با صدای زیرتر) از نوفه بم بیشتر است، و نیز نوفه‌ای که منبع مکانیکی داشته باشد (صدای ماشین‌آلات و امثال آن) آزاردهنده‌تر از نوفه طبیعی (باد و باران و...) خواهد بود.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۱۸۲ و ۱۸۳]

۱/۲/۲. برسنج نوفه

*«کلیه نوفه‌های موجود در فضا در نهایت صداهایی ناخواسته به وجود می‌آورند. از دیدگاه شنونده‌ای که در داخل فضا قرار دارد، منشاء این صداهای مختلف حائز اهمیت نیست، بلکه درجه مزاحمتی که جمیع آنها برای او به‌وجود می‌آورند، نقش اصلی را ایفا می‌کند. به این دلیل معیار یا ضابطه‌ای که در طرح‌های مربوط به نوفه یک فضا مبنای کار قرار می‌گیرند بر این اصل استوارند که حاصل جمع کلیه نوفه‌هایی که در نهایت امر در فضا وجود خواهند داشت از یک حد بخصوصی تجاوز نکند. رقم یا ارقامی که این حد و حدود را تعیین می‌کند «**برسنج نوفه**» نام دارد و کم و کیف آن به کاربرد فضای موردنظر بستگی دارد.»* [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۲۵]

«اگر صدایی از لحاظ شدت هم‌تراز نوفه (یا پایین‌تر از آن) باشد، عملاً در آن گم شده، شنیده نخواهد شد. پس اگر نوفه را به حدی پایین بیاوریم که حذف‌شده تلقی گردد، آستانه شنوایی بسیار پایین آمده، صداهای درون بدن مانند گردش خون و تپش قلب را خواهیم شنید، که در طول زمان غیرقابل تحمل خواهد بود. پس حذف نوفه نیز، علاوه بر هزینه سنگین، شرایط نامطلوبی را ایجاد خواهد کرد. به همین دلیل تراز نوفه حتی برای آرام‌ترین فضاها، علاوه بر حداکثر مجاز، حداقل نیز دارد.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۱۸۳]

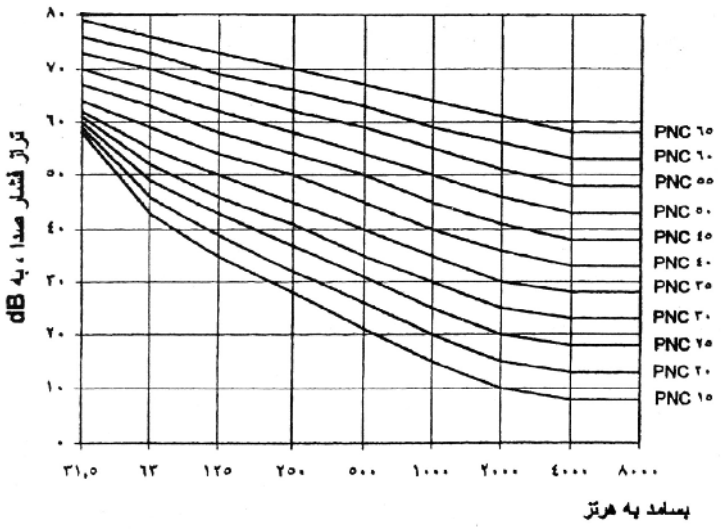
«برسنج نوفه به عوامل زیر وابسته است:

۱. *عوامل فیزیک‌روانی (وابسته به عامل ۱)*
۲. *عوامل فرهنگی و اکتسابی* *
۳. *کاربری فضا: هرچه فعالیت داخل فضا از نظر شنوایی حساس‌تر باشد، مثلاً فضایی که تأثر در آن نمایش داده می‌شود، به زمینه آرام‌تری نیاز داریم.*
۴. *امکانات مالی جامعه موردنظر.»* [مکانیک و مولانا(الف)، ۱۳۷۹، ص ۱۳]

---

* *«مثال: نوفه در مدارس تهران در حدی است که در نمونه مشابه خارجی آن باعث تعطیلی مدرسه می‌شود. اما به دلیل فرهنگ شنودی و بضاعت مالی جامعه هنوز دایرند و تعطیل شدن آنها جایز نیست.»* [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۲۶ با تلخیص]

«یکی از راه‌های تعریف محدوده کمترین تا بیشترین تراز صدای نوفه قابل قبول در هر فضا با عملکرد مشخص (برسنج نوفه)، تراز نوفه قابل قبول به تفکیک بندهای بسامدی، یا «برسنج ترجیحی نوفه» (PNC) است. اما چون در عمل، مقایسه دو بیناب کار ساده‌ای نیست و دردسر آفرین خواهد بود، در اغلب موارد به جای PNC از شاخص تک‌عددی که معادل dB_A آن بیناب است، استفاده می‌کنند. در اغلب مواقع همین شاخص تک‌عددی پاسخگوست. در موارد خاص می‌توان به نمودارهای PNC مراجعه کرد.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۳۶]



نمودار ۱/۲/۲/۱، نمودارهای برسنج ترجیحی نوفه [مکانیک و مولانا(ب)، ۱۳۷۹، ص ۲۲]

جدول ۱/۲/۲/۱، مقادیر تراز فشار صدا مربوط به نمودارهای برسنج ترجیحی نوفه، PNC [مکانیک و مولانا(ب)، ۱۳۷۹، ص۲۲]

شماره نمودارهای PNC	تراز فشار صدا در بند یک هنگامی (dB)								
	بسامدهای مرکزی (Hz)								
	۳۱/۵	۶۳	۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۸۰۰۰
PNC -۱۵	۵۸	۴۳	۳۵	۲۸	۲۱	۱۵	۱۰	۸	۸
PNC -۲۰	۵۹	۴۶	۳۹	۳۲	۲۶	۲۰	۱۵	۱۳	۱۳
PNC -۲۵	۶۰	۴۹	۴۳	۳۷	۳۱	۲۵	۲۰	۱۸	۱۸
PNC -۳۰	۶۱	۵۲	۴۶	۴۱	۳۵	۳۰	۲۵	۲۳	۲۳
PNC -۳۵	۶۲	۵۵	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۸	۲۸
PNC -۴۰	۶۴	۵۹	۵۴	۵۰	۴۵	۴۰	۳۶	۳۳	۳۳
PNC -۴۵	۶۷	۶۳	۵۸	۵۴	۵۰	۴۵	۴۱	۳۸	۳۸
PNC -۵۰	۷۰	۶۶	۶۲	۵۸	۵۴	۵۰	۴۶	۴۳	۴۳
PNC -۵۵	۷۳	۷۰	۶۶	۶۲	۵۹	۵۵	۵۱	۴۸	۴۸
PNC -۶۰	۷۶	۷۳	۶۹	۶۶	۶۳	۵۹	۵۶	۵۳	۵۳
PNC -۶۵	۷۹	۷۶	۷۳	۷۰	۶۷	۶۴	۶۱	۵۸	۵۸

جدول ۱/۲/۲/۲، برسنج نوفه صوتی مناسب برای فضاها و اماکن گوناگون. این ارقام عمدتاً از مراجع مختلف اروپایی و آمریکای جمع‌آوری، میانگین‌گیری و هماهنگ شده‌اند و لذا باید به عنوان رهنمودهایی ابتدایی در ایران مورد استفاده قرار گیرند. [مکانیک و مولانا[ب]، ۱۳۷۹، ص ۴۴ و ۴۵]

ردیف	کیفیت نوع فعالیت از لحاظ شنوایی					برسنج نوفه		مثال‌های خاص از اماکن مربوط
	مکالمه تلفنی	گفتگویا پخش کردن برنامه‌های ضبط شده	سخنرانی کنفرانس	تئاتر	موسیقی زنده	PNC	معادل dBA	
۱				عالی	خیلی خوب	۱۰ تا ۲۰	۲۱ تا ۳۰	تالارهای موسیقی و اپرا.سالن‌های بزرگ تئاتربدون تقویت صدا. استودیوهای زنده ضبط رادیوئی (میکروفون دور).کلیساهای بزرگ
	اقتصادی نیست	**********						
۲			عالی	خیلی خوب	خوب	۱۵ تا ۲۵	۲۵ تا ۳۴	استودیوهای مرده ضبط رادیوئی و تلویزیونی (میکروفون نزدیک). سالن‌های تئاتر (۵۰۰ نفره) بدون تقویت صدا.سالنهای بزرگ دادگاهها بدون تقویت صدا.
۳		عالی	خیلی خوب	خوب	نسبتاً خوب	۲۰ تا ۳۰	۳۰ تا ۳۸	شنودسراهای کوچک‌موسیقی. آزمایشگاههای ارزیابی‌کیفی صدا. سالن‌های‌تئاترکوچک‌بدون تقویت صدا.سالن‌های سخنرانی (۲۰۰ نفره)بدون تقویت صدا. کلیساهای‌کوچک.مساجد متوسط بدون‌تقویت صدا.
۴	عالی	خیلی خوب	خوب	نسبتاً خوب	متوسط	۲۵ تا ۳۵	۳۴ تا ۴۲	اتاقهای تمرین موسیقی و پخش برنامه‌های ضبط شده. اتاقهای بزرگ کنفرانس (۵۰ نفره)بدون تقویت صدا. دفاترکار خصوصی. سالنهای سینما.بیمارستانها.هتلها. آپارتمانهای مسکونی.اتاق خواب. برد مفیدگفتار معمولی تا حدود ۱۰ متر شرایط مناسب برای استراحت کردن.
۵	خیلی خوب	خوب	نسبتاً خوب	متوسط		۳۰ تا ۴۰	۳۸ تا ۴۷	اتاقهای‌کوچک‌کنفرانس. کلاس درس کتابخانه.دفاترکارنیمه خصوصی سالن‌پذیرایی‌واتاق نشیمن (استفاده از رادیو و تلویزیون)در اماکن مسکونی. برد مفیدگفتارمعمولی تا حدود ۴ متر.

ادامه جدول ۱/۲/۲/۲ از صفحه قبل

ردیف	کیفیت نوع فعالیت از لحاظ شنوایی: مکالمه تلفنی	گفتگو یا پخش کردن برنامه‌های ضبط شده	سخنرانی کنفرانس	تئاتر	موسیقی زنده	برسنج نوفه: PNC	معادل dBA	مثال‌های خاص از اماکن مربوط
۶	خوب	نسبتاً خوب	متوسط			۳۵ تا ۴۵	۴۲ تا ۵۲	دفاترکار بزرگ.سالن‌های‌استقبال و پذیرائی عمومی. مغازه. انبار. قهوه‌خانه. رستوران.
۷	نسبتاً خوب	متوسط	قدری مشکل			۴۰ تا ۵۰	۴۷ تا ۵۶	اتاقهای نقشه‌کشی‌و مهندسی ظریف (مثلاً الکترونیک). آزمایشگاهها.هال ورودی هتل‌ها. اتاقهای عمومی منشیگری. برد مفیدگفتار معمولی در حدود یک تا دو متر و گفتار بلند در حدود ۲ تا ۴ متر.
۸	متوسط	قدری مشکل			مناسب نیست ********	۴۵ تا ۵۵	۵۲ تا ۶۱	آشپزخانه. کارگاههای تعمیرات سبک.اتاقهای کامپیوتر. اتاق فتوکپی.برای‌گفتگوبین بیش‌ازدو سه نفر مناسب نیست.
۹	قدری مشکل					۵۰ تا ۶۰	۵۶ تا ۶۶	گاراژ اتاقهای کنترل فنی در کارخانه‌ها.کارگاههای فنی. اتاقکهای‌تلفن عمومی
۱۰	برای هیچ نوع صدای خواسته‌ای مناسب نیست **********					۶۰ تا ۷۵	۶۶ تا ۸۰	اماکنی‌که‌گفتگو و مکالمه تلفنی در آنها لازم نیست بدون اینکه نوفه موجودحتی امکان صدمه زدن به شنوائی ساکنان را داشته باشد. این پر نوفه‌ترین شرایط زیست محیطی و قابل قبولی در نظرگرفته می‌شود که انسان می‌تواند تا ۸ ساعت در آن حضور داشته باشد.

۱/۲/۳. منابع نوفه و روش‌های حذف آن

«قبل از هر کار برای کاهش و یا حذف نوفه، مکان‌یابی قسمت‌هایی از سایت که دورتر از نوفه‌های محیطی هستند، و قرار گرفتن فضاهای نیازمند سکوت در این قسمت‌ها، جدا کردن فضاهای شلوغ و ساکت، مانع قرار دادن فضاهای بی‌اهمیت برای فضاهای نیازمند سکوت در برابر نوفه‌های خارج، از کارهایی هستند که در حین طراحی باید انجام شوند. با رعایت این اصول انجام مراحل زیر راحت‌تر و اصولی‌تر خواهد بود:

۱. *مشخص کردن منابع نوفه و فاصله آنها تا فضای موردنظر.*
۲. *مشخص کردن شدت نوفه تولیدشده توسط این منابع.*
۳. *نحوه نفوذ نوفه به فضای موردنظر.*
۴. *مشخص کردن میزان نوفه قابل قبول (برسنج نوفه).*
۵. *بررسی روش‌هایی برای کاهش شدت نوفه واردشده به فضای موردنظر به میزان نوفه قابل قبول آن مکان.»* [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۸۸ و ۸۹]

*«نوفه در تالارها سه **منبع** دارد (که معمولاً از راه درها و کانال‌های هوا وارد می‌شوند):*

۱. *نوفه‌های انتقال‌یافته از خارج از فضا (مانند نوفه وسایل ترابری خیابان‌های مجاور):*
   - *۱/۱. نوفه‌های هوابرد*
   - *۱/۲. نوفه‌های پیکره‌ای*
۲. *نوفه‌های تولید شده در داخل فضا (مانند همهمه افراد در فضاهای مجاور تالار)*
۳. *نوفه سیستم‌های تهویه»* [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۲۴]

۱/۲/۳/۱. نوفه‌های خارجی:

*«برای اینکه یک صدای خارجی، مثل نوفه ترافیک یا صدای یک ژنراتور برق اضطراری، بتواند وارد فضایی بسته شود، شرط لازم این است که حداقل یکی از جدارهای فضای موردنظر به ارتعاش درآید تا این ارتعاش به نوبه خود، هوای داخلی فضا را به نوسان درآورد. چنانچه موجی که در هوا منتشر شده، مثل صدای ترافیک، مستقیماً جدار مورد بحث، مثل پنجره مشرف به خیابان یک اتاق خواب، را به ارتعاش درآورده باشد، در آن صورت، نوفه ترافیکی که به داخل اتاق نفوذ کرده است را «**هوابرد**» تلقی می‌کنیم. اما، سازه ساختمان موردنظر از طریق زمین، با کف خیابان ارتباط دارد و لذا، امواج تولیدشده توسط وسایل نقلیه می‌توانند از طریق زمین و سازه ساختمان نیز جدارهای اتاق خواب مثالی را به ارتعاش درآورند. نوفه‌ای که از این طریق وارد فضا می‌شود «**پیکره‌ای**» نام دارد و معمولاً در مواردی مشکل‌آفرین می‌شود که منبع صدای اولیه، مثل ژنراتورهای برق اضطراری و دستگاه‌های هواساز، در یکی از فضاهای داخلی ساختمان نصب شده‌اند.*

نوفه‌های هوابرد دیگر نوفه باران، تگرگ، هواپیما و به‌ویژه هلیکوپتر است. انرژی این منابع با شدت زیاد و بیشتر در بسامدهای بم ـ نقطه ضعف صدابندی ساختمان‌ها ـ است. رفع این مشکل در مراحل پس از اجرا خیلی سخت می‌شود. سقف یکپارچه شنودسراها به دلیل وسعت و یکپارچگی، انتقال نوفه هواپیما به داخل را آسان می‌کند. علاوه براین به خاطر بلندی سقف، معمولاً سقف این فضاها مستقل و در تماس با فضای باز است و این انتقال آسان‌تر نیز می‌شود. برای حل این مشکل باید سقف کاذبی در زیر سقف‌های اصلی که معمولاً خرپا هستند، پیش‌بینی کرد تا صدابندی سقف را تأمین کند. (این سقف کاذب در داخل مورد نیاز صدارسانی آکوستیکی نیز هست.)» [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۲۸]

*«نحوه مقابله کردن با این دو نوع نوفه ـ یعنی: هوابرد و پیکره‌ای ـ روش‌هایی متفاوت و در برخی موارد متضاد دارند. به عنوان مثال، جداری که از نفوذ کردن یک نوفه هوابرد به داخل فضای موردنظر خوب جلوگیری می‌کند، ممکن است نوفه‌های پیکره‌ای را به راحتی به داخل فضا منتقل سازد. ...بالا بودن سرعت حرکت صدا در یک ماده مخصوص، و به‌ویژه در مواد سخت مثل آهن و بتن مسلح، که در سازه ساختمان‌ها به‌کار می‌روند، به این معناست که این نوع مصالح، صدا و لذا، نوفه‌های پیکره‌ای را خوب منتقل می‌کنند. پی‌آمد این قضیه هم این است که به کار بردن این قبیل مصالح و به‌ویژه اسکلت‌های فلزی در ساختمان بیمارستان‌ها و مدارس به عنوان مثال که باید از سکوت نسبی بیشتری برخوردار باشند به معنای دعوت کردن نوفه به فضاهای داخلی ساختمان است. البته ناگفته نماند که زمین این قبیل ساختمان‌ها باید حامل نوفه قابل ملاحظه‌ای باشد تا سازه مذکور آن را به فضاهای داخلی ساختمان منتقل کند. کم و کیف این موضوع به توانایی زمین منطقه در منتقل کردن کردن امواج آکوستیکی به محل ساختمان مربوط می‌شود و چنانچه رگه‌های سختی در زمین وجود داشته باشد، امواجی که در فواصل دوردست تولید می‌شوند با سرعت زیاد و ممانعت نسبتاً کمی از طریق این‌گون رگه‌های سخت به محل ساختمان می‌رسند. بنابراین «**ارتعاش‌سنجی**» زمین ساختمان، به‌ویژه در ساختمان‌هایی که آرامش صوتی یکی از خصیصه‌های مهم آنها به حساب می‌آید، مثل بیمارستان‌ها، مدارس، مراکز استودیویی و تأتر، کاریست که باید در مراحل اولیه طراحی انجام شود.»* [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۲۴ و ۱۲۵]

«نوفه بیرون ساختمان از نازک‌ترین جدار آن که پنجره باشد به داخل نفوذ می‌نماید و راه پیشگیری از آن فقط با بسته نگهداشتن پنجره و در صورت لزوم دوجداره کردن آن میسر است. بنابراین بهتر است برای برای صدابندی بیشتر در شنودسراها از نصب پنجره خودداری شود. زیرا بهترین پنجره صدابند بیش از ۴۰ دسی‌بل صدابندی نمی‌کند، درحالی‌که یک دیوار تیغه‌ای ۱۲ سانتیمتری به وزن سطحی ۲۴۰ کیلوگرم در مترمربع ۴۶ دسی‌بل صدابندی دارد.» [لیاقتی، ۱۳۶۷، ص ۳۰]

۱/۲/۳/۲. نوفه‌های داخلی:

«برای کاهش نوفه داخلی، یکی از راه‌ها تضعیف نوفه از طریق شرایط آکوستیک داخلی است. اما کم کردن مقدار صدای مستقیم همیشه امکان‌پذیر نیست. بنابراین تنها راه این است که شدت صدای غیرمستقیمی را که همهمه در راهرو تولید می‌کند، کم کنیم. این کار با بالا بردن ثابت آکوستیکی فضا ممکن می‌شود و در عمل با نصب کردن جذب‌کننده‌های مناسب روی سطوح راهروها برای جذب کردن قسمت‌های نافذ بیناب صدای همهمه، می‌توانیم ثابت آکوستیکی آن فضا را در حد موردنظر تنظیم کنیم.» [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۳۷ و ۳۸]

«راه دیگر برای ایزوله کردن شنودسرا، استفاده از راهروها، کمدها و فضاهای دیگر صداگیر در اطراف شنودسراست. عدم اشغال بالای سالن، توپر بودن درها، چارچوب داشتن تمام محیط آنها و نداشتن شبکه تهویه بر روی آنها و نیز عدم استفاده از درهای کشویی و گردان، از سایر تمهیدات کم کردن نوفه هستند.» [شیرودی، ۱۳۷۴، ص ۱۵۵]

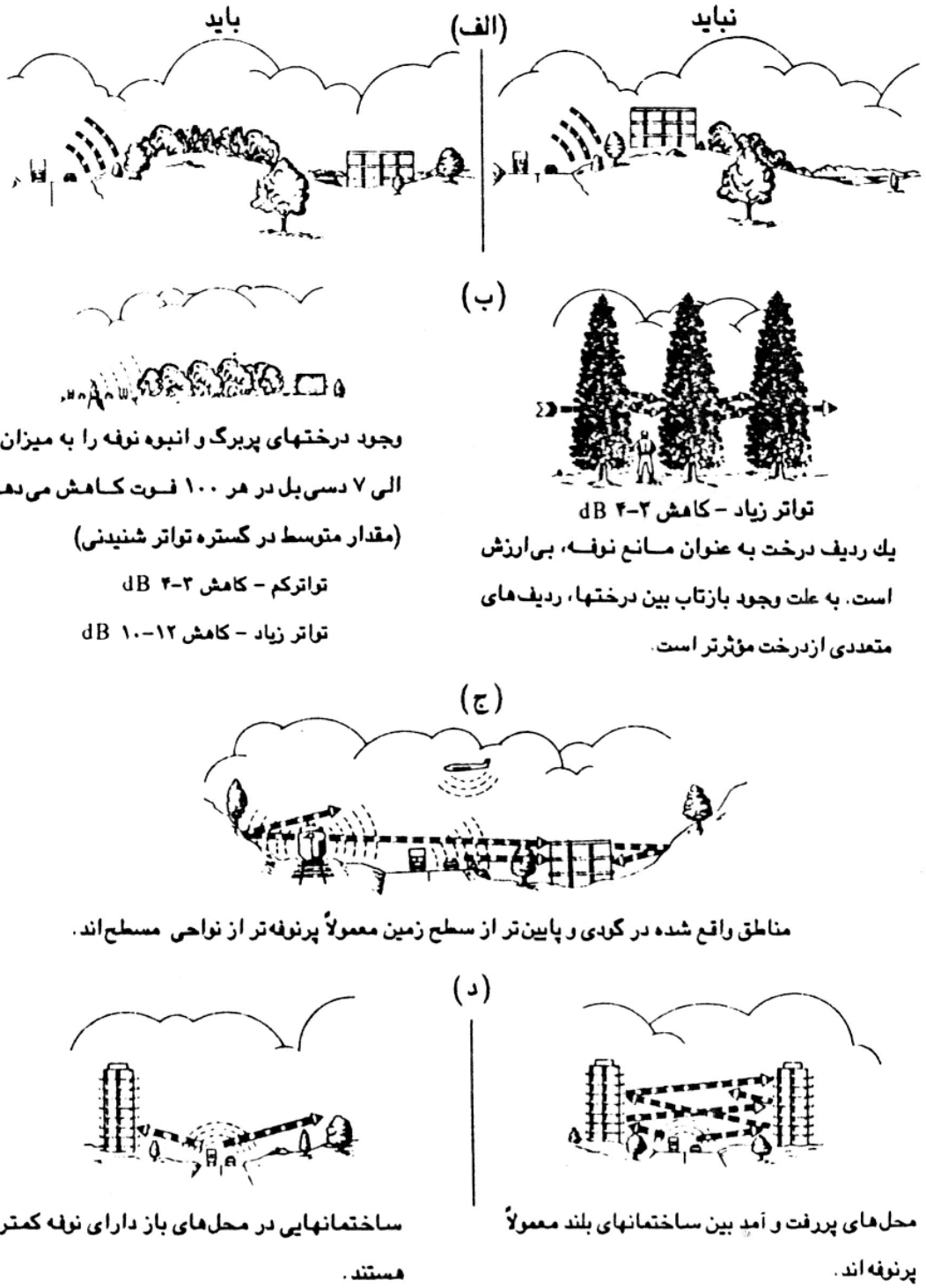
«وسایل شنودی که در داخل یک ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند مثل سیستم تلفن، تجهیزات صدارسانی الکتروآکوستیکی در سالن‌های سخنرانی، وسایل شنودی ضبط و پخش صدا در سالن‌های تأتر و تالارهای موسیقی و به‌ویژه کابل‌های ارتباطی آنها با یکدیگر، حکم آنتن رادیو را دارند و لذا، میدان‌های الکترومغناطیسی که در اطراف آنها وجود دارند ولتاژهایی را در آنها القا می‌کنند که ناخواسته‌اند و نوعی نوفه به حساب می‌آیند. این نوفه در نهایت از بلندگوها خارج شده و به صورت صدایی ناخواسته شنیده می‌شود. بنابراین لازم است اقداماتی در جهت مهارکردن مقدار آن در حدی قابل قبول به عمل آید. یکی از این اقدامات، به طراحی سیستم ارتباطی این قبیل وسایل با یکدیگر مربوط می‌شود که باید با سایر نیازهای برقی سالن هماهنگ شود.» [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۲۹ و ۱۳۰]

۱/۲/۳/۳. نوفه سیستم‌های تهویه:

«سیستم تهویه در اکثریت قریب به اتفاق شنودسراها، مثل سالن‌های تأتر، سخنرانی، سینما و... مهمترین منبع نوفه آنها را تشکیل می‌دهد. عملکرد صوتی شنودسراها و خصوصاً تالارهای موسیقی و سالن‌های تأتر، محیط بسیار ساکتی را می‌طلبد. از طرف دیگر حجم و گنجایش این قبیل سالن‌ها زیاد است و لذا، به دستگاه‌های هواساز پرقدرت نیاز دارند که معمولاً نوفه نسبتاً بیشتری را تولید می‌کنند. پیامد این ترکیب نامیمون این است که کاهش نوفه لازمی که باید تأمین کنیم رقم چشمگیری را پیدا می‌کند و اگر این موضوع در مراحل طراحی ساختمان مورد توجه قرار نگیرد، مخارج اصلاح آن در مراحل بعدی کار آنقدر زیاد خواهد بود که اغلب کارفرمایان ترجیح خواهند داد تا این مشکل صوتی را به تحمل شنوندگان موجود در سالن واگذار کنند. (تحمل نوفه، یا تحمل دما و تهویه نامناسب از

طرف شنوندگان، که دلیل آن نوفه زیاد سیستم تهویه هنگام اجرای برنامه و در نتیجه خاموش کردن آن است.)» [*] [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۲۹ و ۱۳۰]

نمودار ۱/۲/۳/۱، (الف) استفاده از موانع طبیعی نوفه، (ب) اثربخشی نواحی پردرخت به‌عنوان موانع نوفه، کاهش نوفه بر اثر وجود درخت‌ها، (ج) مثالی از یک محل نامناسب ساختمان، (د) محل‌های ساختمان در نزدیکی شریان‌های ترافیک و ساختمان‌های دیگر. [استین، ۱۳۷۸، ص ۱۸۹]



[*] برای اطلاع بیشتر، ر.ک. پیوست ۱، بخش ۳/۱. تأسیسات مکانیکی

جدول ۱/۲/۳/۲، روش‌های توصیه‌شده برای کاهش نوفه [استِین، ۱۳۷۸، ص ۱۱۴ و ۱۱۵]

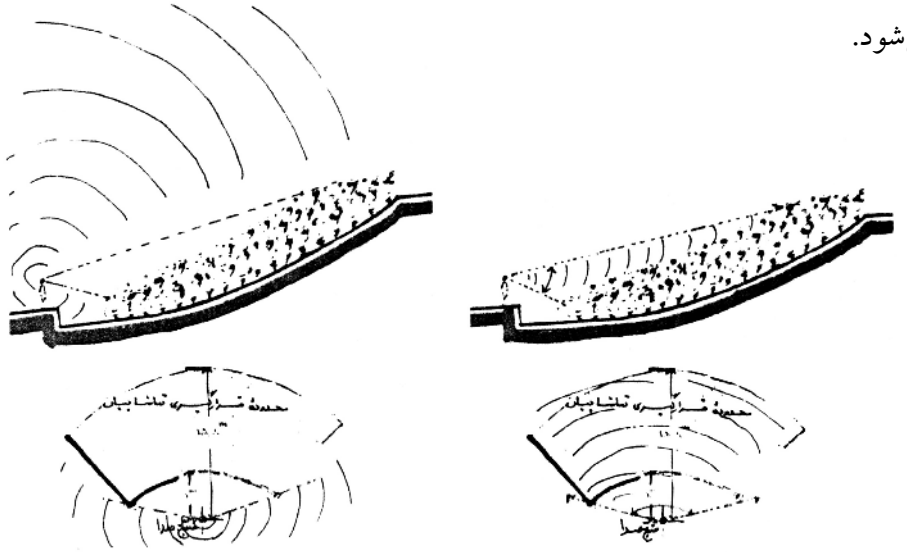
ویژگی‌های ماده	کاشی آکوستیکی	واحدهای آکوستیکی با روکش فلزی	پلاستر آکوستیکی	صفحه آکوستیکی
اندازه و شکل	کاشی‌های مربعی به اندازه ۱۲×۱۲ اینچ، و بعضی ها تا اندازه ۹۶×۴۸ اینچ. پوشش سقف، ۸×۲ فوت به ضخامت های ۳/۸ و ۳/۴ اینچ.	۲۴×۱۲ اینچ تا ۱۲۰×۲۴ اینچ. ضخامت توسط لایه های آکوستیکی کنترل می‌شود. پشم معدنی پیچیده شده در کاغذ یا برش یا رول فایبرگلاس (شیشه لیفی). ضخامت کلی ۲ الی ۳ اینچ (۵ الی ۷/۵ سانتیمتر)	ماده‌ای شبیه به پلاستر با رشته‌های (fibrous) مخصوص یا توده‌ای ازذرات بخصوص	اندازه‌ها و ضخامت‌ها متناسب با نیازهای ساختمان است. (کف و بام) ۱ تا $\frac{1}{2}$ ۲ اینچ برای دیوار
سطح	انواع مختلف سطوح بافته شده، سوراخدار تراشیده شده (حجاری شده) با روکش سفید رنگ شده، وینیل و شیشه.	پرداخت شده با لعاب، معمولاً به رنگ سفید، ولی در سایر رنگها و حتی سوراخدار هم موجود است	پارچه سفید با رگه‌های ریز، ولی ممکن است با اسپری رنگ شود	Shredded whool یا طرح صاف
روش نصب	چسبان، میخ کوبیده، نصب شده روی چوب در شبکه‌های فلزی قراردادن	روی پایه های فلزی نصب یا روی پایه چوبی میخ شود و یا روی یك سیستم معلق فلزی آویزان شود	مالیدنی یا اسپری کردن	برطبق طرح ساختمانی (فقط برای کف و پوشش سقف) چسبان یاتوسط وسایل مکانیکی روی دیوارنصب شود
کاربرد در محل اصلی	تمام کاربردهای داخلی، به کاربرد مخصوص آن در محیط‌های با رطوبت زیاد دقت کنید	تمام کاربردهای داخلی ، به کاربرد مخصوص آن در محیط‌های با رطوبت زیاد دقت کنید	اکثر کاربردهای داخلی، بخصوص برای سطوح باانحناء مفید است. درمحیط‌های با رطوبت زیاد قابل استفاده نیست .	درصورت لزوم برای کف و بام، سطوح دیواردراکثر فضاهای داخلی
مزایا	تهیه و تأمین گسترده وسیعی از پرداخت کردن در واحدهای با جذب زیاد، کاشیهای فیبر معدنی قابل اشتغال نیستند. در قسمتهایی قرار می‌گیرند که می توان آن را در بالای پلنوم قرار داد.	غیرآتش‌زا، براحتی نگهداری می‌شوند. قابل شستشو و رنگ‌آمیزی، واحدهای جایگزین با نوع اصلی تطبیق می‌شود. به سهولت در پلنوم قرار می‌گیرد.	نصب آن سریع و ارزان است و براحتی روی سطوح منحنی و نامنظم نصب می‌شود. با تاروپود ظریف، غیرآتش‌زا، می توان با مواد ضدآتش استفاده کرد.	به صورت ترکیبی از عایق حرارتی و جالب صوتی استفاده می‌شود.
محدودیت‌ها	سبب عبور صدا از دیوار جداکننده (پارتیشن) می‌شود مگراینکه برای آن فاکتور تضعیف زیادی انتخاب شده باشد	سبب عبور صدا از دیوار جداگرمی‌شود مگر اینکه به پشت آن لایه‌های غیرقابل نفوذ نصب شود	به سهولت از بین می رود. به هنگام تعمیر به سختی قابل شدن است. بیشتر برای تواتر بالا مناسب است به هنگام استفاده ایجاد گرد و غبار می‌کند	برای محیط های مرطوب مناسب نیست
ویژگی‌های ماده	جاذب صدا	مفروش کردن	تزئینات	
اندازه و شکل	به اندازه‌های ۲×۱۲×۱۲ اینچ تا ۴۸×۲۴ اینچ یافت می‌شود. موانع فایبرگلاس با پوشش پلاستیکی	به تناسب با هر اندازه‌ای روی کف یا دیوار قرار می‌گیرد	پارچه‌هایی که از نظر آکوستیکی شفاف هستند، از مخمل مات گرفته تا فایبر گلاس شفاف و نیمه‌شفاف	
سطح	به اندازه‌های ۱۲×۱۲ اینچ با سطوح صاف یا بزر، موانع در وینیل پیچیده شده است	بریده یا به صورت حلقه و یا ترکیبی از هر دو برای اینکه پُرزدار شود	مخمل نما (زیر)	
روش نصب	واحدها را با استفاده از بستهای مخصوص دیوار، به صورت آویزان و یا چسبان باید به کار برد. موانع با حفاظ سیمی به کارمی روند	با پونز (در مورد کف فقط) یا چسبان	مطابق بانوع کار و ازنظر زیبایی ظاهری	
مزایا	دارای حداکثر قابلیت انعاف. جذب صوت در واحدهای آویخته بدون نیاز به کاهش نور اضافه می‌شود	تأمین جذب نسبی در تواتر زیاد و متوسط و ظاهر لوکس	تأمین میزان نسبی جذب کلی صدا و ظاهری گوش	
محدودیت ها	برای هر استفاده‌ای باید جداگانه طراحی کرد	جذب آکوستیکی، با اوتفاع پرز، صفحه و و چگالی رشته و الیاف افزایش می‌یابد.	جذب آکوستیکی با درصد چگالی پارچه، و آن هوایی که در پشت است افزایش می‌یابد.	

۱/۳. صدارسانی خواسته

آنچه در این قسمت عنوان می‌گردد، جهت آشنایی عمومی خواننده با مباحث صدارسانی خواسته است. برای اطلاعات بیشتر در این زمینه که در حیطه تخصص آکوستیک ساختمانی است، می‌توان به انواع کتاب‌های آکوستیکی، بخش‌های مربوط به آکوستیک داخلی (Room Acoustics) مراجعه کرد.

در طراحی شنودسراها، مرحله بعد از کنترل نوفه (صدای ناخواسته)، رساندن صدای خواسته با **کمیت** و **کیفیت** کافی به کلیه شنوندگان است. یعنی هدف اصلی رساندن صدا با کمیت مناسب و با استفاده از صداهای منتشرشده در جهت‌های ناخواسته به تمام نقاط سالن و با کیفیت مطلوب (نمودار زمان واخنش و شدت صدای واخنشی یکسان در نقاط مختلف فضا) است.

این کاری است که تحت عنوان «**صدارسانی زنده**» و عاری از کمک‌های الکتروآکوستیکی شناخته می‌شود.



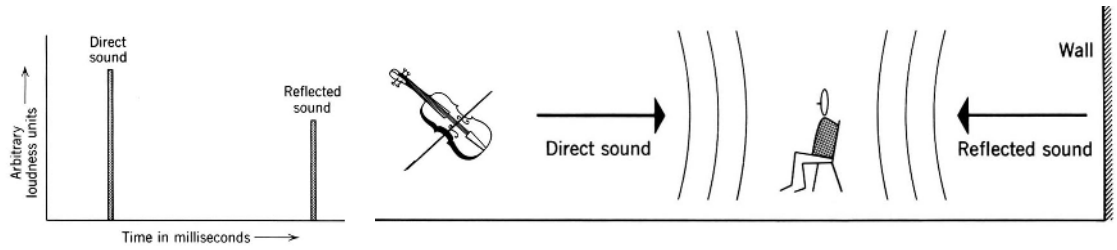
نمودار ۱/۳/۱، راست: بخشی از صدای منبع که مستقیماً دریافت می‌شود. چپ: بخش قابل توجهی از صدای منبع، به جهات خالی از شنونده پراکنده می‌شود. هدف از صدارسانی خواسته هدایت این بخش از صدا به‌سمت شنوندگان است. [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۱۹۹]

در مبحث قبلی نحوه مشخص کردن تراز نوفه قابل قبول و چگونگی مهار آن را بررسی کردیم، اکنون به بررسی میزان صدای خواسته می‌پردازیم.

«میزان تراز صدای خواسته (تراز صدا) در هر مکان به دو عامل بستگی دارد:

۱. صدای مستقیم: صدایی که مستقیماً از منبع تولید شده و به مکان موردنظر می‌رسد.

۲. صدای واخنشی: صدایی که به صورت انعکاسی به مکان موردنظر می‌رسد که البته این صدا حاصل‌جمع انعکاس‌هاست و نحوه توزیع آن در سالن، با توجه به هدف اصلی که تأمین تراز صدای کم و بیش یکسان و قابل شنیدن برای کلیه شنوندگان به‌گونه‌ای که تمام آنان صدای موردنظر را با بلندی یکسان دریافت کنند، بسیار مهم خواهد بود.» [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۰۲ و ۱۰۳]



نمودار ۱/۳/۲، صدای مستقیم و صدای منعکس‌شده از دیوار (با تأخیر)، و نمودار تراز صدای آنها

[Beranek، 1962، ص ۲۶]

«در یک فضای بسته، چنانچه منبع صدا انرژی خود را به صورتی یکنواخت در جهات مختلف پخش کند، شدت صدا، I در داخل فضا برابر خواهد بود با:

$$I = I_D + I_R = W\left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right)$$

I: شدت صدا در یک نقطه بخصوص از فضا.

$I_D = \frac{W}{4\pi r^2}$: شدت صدای مستقیم، یعنی صدایی که مستقیماً از منبع به نقطه موردنظر می‌رسد.

$I_R = \frac{4W}{R}$: شدت صدای غیرمستقیم یا «واخنشی»، مجموع صداهایی که پس از انعکاس به نقطه موردنظر می‌رسند.

W: توان صوتی منبع همه‌جهته.

r: فاصله نقطه موردنظر یا محل شنونده از منبع صدا.

$R = \frac{\bar{\alpha}S}{1-\bar{\alpha}}$: ثابت آکوستیکی فضا، که با شکل فضا رابطه‌ای ندارد و به شرایط آکوستیک داخلی آن بستگی دارد.

($\bar{\alpha}$: ضریب جذب میانگین فضا، S : مجموع سطوح آکوستیکی فضا).» [مولانا، درس آکوستیک داخلی]

۱/۳/۱. تأمین کمیت مناسب صدا

«هدف این است که تغییرات لحظه‌ای و «طبیعی» بلندی صدا به‌صورتی «یکسان» توسط شنوندگان مختلف دریافت شود. به عبارتی دیگر، ما می‌خواهیم تغییراتی که r و R در شدت صدا، I به وجود می‌آورند به حداقل ممکن برسد تا I فقط به‌صورت تابعی از W در نقاط مختلف سالن تغییر کند. تحقق بخشیدن به این امر به طراحی برای کاربری خاص مربوط می‌شود.» [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۳۰]

«برای این منظور ابتدا باید تراز صدای خواسته خیلی بیشتر از تراز نوفه موجود باشد. این اختلاف از دو طریق به‌دست می‌آید:

۱. *پایین آوردن میزان تراز نوفه موجود در مکان، که در واقع رعایت برسنج نوفه است.*

۲. *رساندن تراز صدای خواسته در حد مناسب.»* [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۰۲]

۱/۳/۱/۱. صدای مستقیم

«بخشی از انرژی تولیدشده توسط منبع صوتی، به‌صورت مستقیم به گوش شنونده می رسد (در کوتاه‌ترین فاصله بین شنونده و منبع صدا که در واقع همان خط راست بین آن دو است). اما باید به این نکته توجه نمود که با هر دو برابر شدن فاصله شنونده از منبع صوتی نقطه‌ای همه‌جهته در فضای باز، میزان تراز صدا ۶dB افت پیدا خواهد کرد. این افت فقط در مورد صدای مستقیم صدق می‌کند. بنابراین در یک شنودسرا تراز صدایی که به گوش شنوندگان در مکان‌های مختلف می‌رسد متفاوت خواهد بود. به همین دلیل برای ایجاد یکنواختی نسبی در بلندی صدا در نقاط مختلف فضا، باید فضا را به شکلی طرح کنیم که نزدیکترین و دورترین نقطه نسبت به منبع صدا، در یک پله احساسی قرار گیرد (حدود ۱۰ دسی‌بل تغییر).» [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۰۲ تا ۱۰۵]

«صدای مستقیم جهت و اطلاعات اصلی صدا را برای ما تعیین می‌کند. در فضای بسته نباید مانعی بر سر راه صدای مستقیم (خصوصاً در بسامدهای زیر که جهت‌وری بیشتری دارند) قرار داد.» [مولانا، درس آکوستیک داخلی]

۱/۳/۱/۲. صدای واخنشی (بازتابی)

«قدم بعدی توزیع یکنواخت مقداری از انرژی صوتی تولیدشده منبع است که به‌صورت مستقیم به سمت شنوندگان نمی‌رود و باید با استفاده از منعکس‌کننده‌هایی تا حد امکان آن را به‌صورت یکنواخت به سمت شنوندگان هدایت کرد (صدای واخنشی).» [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۰۸]

«صدای واخنشی نقش تقویت‌کننده صدای مستقیم را دارد و بدن و لطف صدا را ایجاد می‌کند.» [مولانا، درس آکوستیک داخلی]

«صداهای واخنشی را می‌توان به دو گروه تقسیم‌بندی کرد:

۱. *آنهایی که بعد از یک‌بار انعکاس به گوش شنونده می‌رسند.*
۲. *انعکاس‌هایی که بیش از یک بار از سطح یا منعکس‌کننده‌ای انعکاس یافته‌اند.*

اگر در فضا فرض بر این باشد که کلیه منعکس‌کننده‌ها و سطوح دارای ضریب جذب یکسان باشند، که در عمل نیز سعی می‌کنیم به آن برسیم، پیامد آن است که انعکاس‌های گروه اول از شدت نسبی بیشتری برخوردار خواهد بود. بنابراین این گروه از انعکاس‌ها در تعیین شدت کل صدا در یک نقطه بخصوص از سالن نقش مؤثرتری را ایفا خواهند کرد.

علاوه بر اینها، زمانی که این صداها به گوش شنونده می‌رسند نیز دارای اهمیت است. آن دسته از انعکاس‌های صدا که در حول مدت زمان جمع‌بندی شنوایی پس از فرارسیدن صدای مستقیم به گوش شنونده می‌رسند عملاً با صدای مستقیم جمع‌شده و در تعیین کردن بلندی صداهای نهایی نقش اصلی را ایفا می‌کنند. این موضوع معمولاً شامل ۳-۲ انعکاس می‌شود که به آنها «انعکاس‌های اولیه» می‌گویند. بنابراین برای صدارسانی مناسب در یک سالن علاوه بر توجه به صدای مستقیم می‌بایست به

انعکاس‌های اولیه به معنی فوق‌الذکر نیز توجه نمود. زمان و شدت این انعکاس‌ها وابستگی شدید به شکل هندسی سطح منعکس‌کننده (که لزوماً جداره فضا نیست) و جنس آن دارد. البته باید توجه کرد که این سطوح قسمت‌های وسط بیناب صدا را به خوبی منعکس کنند چون قسمت‌های عمده انرژی در آن حوزه نهفته است.» [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۰۸ تا ۱۰۹ با تلخیص]

«در کل می‌توان چنین جمع‌بندی کرد:

۱. *هر انعکاس بیان‌کننده مقدار کمی از انرژی پخش‌شده توسط منبع تولید صداست.*

۲. *هر سطح منعکس‌کننده باید مقداری از انرژی صوتی را که انعکاس می‌دهد به صورت یکنواخت در جهت شنوندگان پخش کند.*

۳. *مرتبه زمانی انعکاس‌های مرتبه اول که از سطوح مختلف به شنونده می‌رسند باید به گونه‌ای باشد که در محدوده ۰/۰۵ ثانیه قرار گیرند تا صدای درک‌شده برای شنونده حداکثر شدت را داشته، ایجاد پژواک نکند.»* [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۰۹]

«این نکات بیان‌کننده این واقعیت هستند که: ۱. محدودیت توان صوتی منبع، ۲. افتی که صدا هنگام انتقال از مکانی به مکان دیگر دچار می‌شود و ۳. محدودیت‌های شنوایی انسان، باعث می‌شوند که ابعاد آن بخش از فضا که می‌خواهیم صدارسانی زنده داشته باشیم، هرچند بر اساس اصول آکوستیکی بنیان نهاده شده باشند، محدود است.

بنابراین در صورتی که بخواهیم کلیه شنوندگان در یک شنودسرا از صدارسانی زنده (که برای کلیه آنان دارای بلندی مناسبی است) برخوردار گردند، می‌بایست ابعاد فضا را بر اساس این محدودیت‌ها طراحی کرد و یا در صورت نیاز به ابعاد بزرگتر، بخشی از شنودسرا را به صورت زنده، و سایر قسمت‌ها را با استفاده از ابزار الکتروآکوستیکی صدارسانی نمود.» [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۱۰]

۱/۳/۱/۲/۱. انتشار و انعکاس صدا

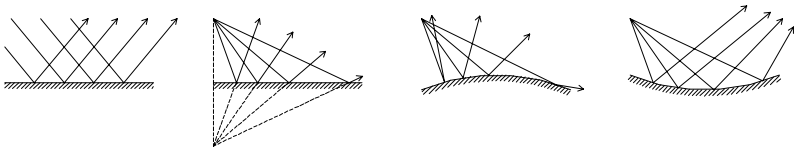
«در این مرحله، برای بررسی وضعیت انعکاس‌های صدا در طرح هندسی، به سبب اشکالات بی‌شمار و پیچیدگی مسائل مربوط به انتشار صدا در فضای سرپوشیده (شنودسراها) ناچار به استفاده از روش‌های ساده‌شده مانند فرضیه پرتو صدا و انتشار خطی امواج آکوستیکی هستیم. بدیهی است که این فرضیه حقیقت فیزیکی ندارد. آکوستیک هندسی را نمی‌توان در همه‌جا به‌کار برد و استفاده از آن حاوی محدودیت‌هایی است که خصوصاً موارد زیرین حائز اهمیت است:

۱. *ابعاد مکان موردنظر باید در مقابل طول‌موج صدای به‌کار برده شده به حد کفایت بزرگ باشد. ابعاد سطوح بازتابنده نیز باید چند برابر طول‌موج موردنظر باشد. چنانچه این شرط رعایت نگردد، به علت بروز پدیده خمش، انتشار صوت از حالت خطی خارج شده و دیگر قوانین آکوستیک*

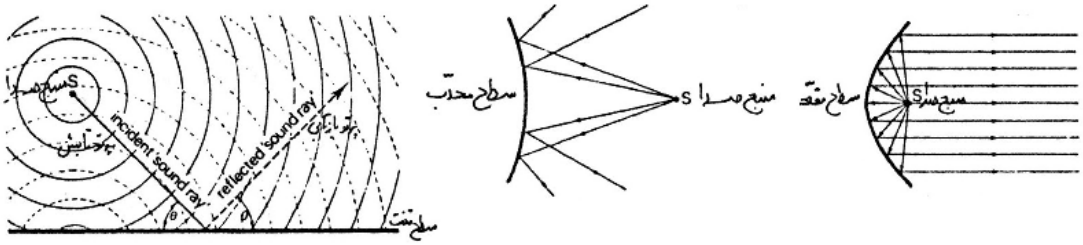
هندسی در آن صادق نخواهد بود. به بیان دیگر می‌توان گفت که آکوستیک هندسی برای بسامدهای پایین و تالارهای کوچک صحت ندارد.

۲. امپدانس آکوستیکی فراگیره میدان (هوا) و سطوح بازتابنده (دیوارها) باید تفاوت زیادی با یکدیگر داشته باشند. زیرا در غیر این صورت به‌جای بازتاب ساده، ترکیبی از بازتاب و تباهی انرژی (جذب شدن) به‌وجود می‌آید.

با رعایت این دو شرط می‌توان قانون آکوستیک هندسی را بدین صورت بیان نمود که پرتوهای صوتی برخورنده و پرتوهای صوتی بازتابنده هر دو در یک سطح قرار دارند و زاویه تابش با زاویه بازتاب برابر است.» [فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۹۸ و ۹۹]



نمودار ۱/۳/۱/۲/۱/۱، قانون بازتاب آکوستیک هندسی [فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۹۹]



نمودار ۱/۳/۱/۲/۱/۲، بازتاب موج صوتی از سطوح تخت، محدب و مقعر [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۴۱]

«برای پخش یکنواخت صدا در دیوارهای مسطح می‌توان از پخشگرها استفاده کرد. پخشگرها سه نوعند:

۱. قطعاتی از کره

۲. قطعاتی از استوانه

۳. پخشگرهای مسطح با ابعاد گوناگون و فاصله‌های متغیر از دیوارها

به‌کار بردن پخش‌کننده در کلیه استودیوها و تالارهای مکعب‌شکل و موزون از بدیهیات و اصول اساسی است و در استودیوها و تالارهای ناموزون نیز استفاده از پخش‌کننده‌ها توصیه می‌گردد.» [لیاقتی، ۱۳۶۷، ص ۶۱ و ۶۲]

۱/۳/۱/۳. طراحی هندسی شنودسرا

«عملکرد فرم هندسی در واقع پخش صدای منبع صوتی (صدای خواسته) با کمیتی یکنواخت بین کلیه شنوندگان است. نکاتی که فرم هندسی شنودسرا متأثر از آنهاست عبارتند از: کاربری، تعداد افراد استفاده‌کننده و ابعاد تقریبی فضا، تراکم افراد، نحوه قرارگیری منبع صوتی، شنوندگان و منعکس‌کننده‌ها در فضا.» [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۱۰]

۱/۳/۱/۳/۱. کاربری

«در طراحی فضاهای اجرای موسیقی، نوع موسیقی (شدت صدای تولیدشده، گستره بسامدی تولیدشده و زمان واخنشی که لازم است تا این نوع موسیقی واضح به گوش رسد) در شکل‌گیری فرم هندسی نقش مهمی دارد.» [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۱۱]

۱/۳/۱/۳/۲. تعداد شنوندگان و ابعاد تقریبی فضا:

«اولین موضوع در طراحی یک شنودسرا که باید به‌طور قطعی تصمیم‌گیری شود، تعداد کل ظرفیت صندلی‌هاست که ابعاد وحجم فضا به آن وابسته است. به طور ایده‌آل، یک شنودسرا نباید از تعداد استفاده‌کنندگان پرظرفیت‌تر باشد چون هیچ برنامه‌ای در فضای نیمه‌خالی خوب نخواهد بود و کوچک درنظر گرفتن فضا نیمی از مسائل را حل می‌کند. ضمن اینکه هرچه ابعاد شنودسرا بزرگتر می‌شود، مشکلات آکوستیکی نیز بیشتر می‌شود. مشکلات آکوستیکی در شنودسراهایی با ظرفیت بیش از ۳۰۰-۲۰۰ نفر پیش می‌آید.» [شیرودی، ۱۳۷۴، ص ۱۳۴]

۱/۳/۱/۳/۳. تراکم شنوندگان:

«تماشاچیان اساسی‌ترین عنصر جذب صدا هستند. میزان جذب تماشاچی به‌طور ساده به تعداد نفرات بستگی ندارد بلکه تماشاچیان متناسب با سطح زمینی که اشغال کرده‌اند به علاوه قسمتی از راهروها که دور آنها هستند (با عرض بیش از ۱۰۵ سانتیمتر)، صدا را جذب می‌کنند. بنابراین فضای صندلی‌ها عامل مهمی است که باید به حداقل برسد، البته با در نظر گرفتن استانداردهای راحتی و ایمنی. بدین ترتیب اگر تراکم صندلی‌ها کم شود ناچار باید حجم سالن را زیادتر گرفت.

سرانه سطح شنودسرا برای هر نفر از ۰/۴۶ تا ۰/۷۲ مترمربع یا متوسط حدود ۰/۶ مترمربع است. مقدار بیش از ۰/۶۵ مترمربع برای هر نفر از نظر استاندارد، راحتی بیشتری به دست می‌دهد و حتی حدود ۰/۵۹ تا ۰/۶۱ برای اکثر مردم کافی است.» [شیرودی، ۱۳۷۴، ص ۱۳۴ و ۱۳۵]

۱/۳/۱/۳/۴. محل قرارگیری شنوندگان و منبع صدا:

«محور اصلی شکل‌دهنده طرح در یک سالن اجرای موسیقی موقعیت نسبی اجراکننده و شنوندگان است.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۱۹۳]

«این محل با توجه به اختلاف تراز صدا در حدود ۱۰dB و ایجاد مسیر صوتی مناسب بین منبع و شنونده که با میدان دید خوب همراه است، طراحی می‌شود. تنوع در تنظیم صندلی‌ها، علاوه بر این که می‌تواند کارایی فضا را تغییر دهد، بر هندسه آن نیز تأثیر می‌گذارد.» [*] [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۲۳]

«در طراحی و مشخص کردن فاصله ردیف صندلی‌ها از منبع باید به دو نکته توجه کرد:

۱. رسیدن صدا به صندلی‌های عقب باید مورد توجه قرار گیرد.

---

[*] برای مشاهده انواع فرم تالارها و چیدمان صندلی‌ها، ر.ک. پیوست ۱، بخش ۲. ملاحظات دیداری

۲. *افت صوتی بر اثر دور شدن از منبع صدا، ما را از دور کردن ردیف اول از منبع محدود می‌سازد.»* [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۰۷]

۱/۳/۱/۳/۵. فرم و محل منعکس‌کننده‌ها:

«هدف اصلی سطوح منعکس‌کننده، هدایت و توزیع یکنواخت آن بخشی از انرژی منبع صوتی است که در جهت شنوندگان پخش نشده است. نحوه قرارگیری منعکس‌کننده‌ها امری تجربی است که با آزمون و خطا حاصل می‌شود، اما رعایت چند نکته اصلی در قرارگیری آنها حائز اهمیت است:

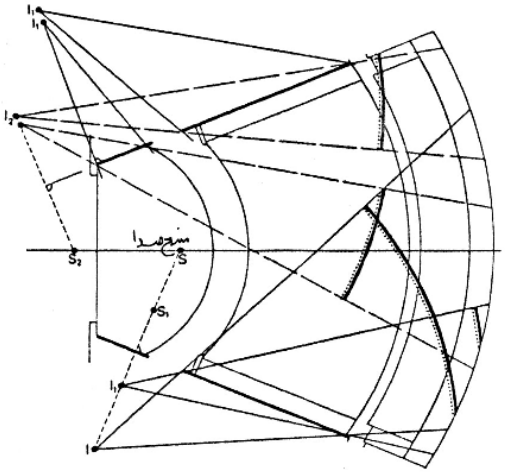
الف ـ هر شنونده حداقل دو پرتو صوتی از منعکس‌کننده‌های جانبی دریافت کند.

ب ـ هیچ شنونده‌ای پرتوهای اولیه واخنشی از پشت سر دریافت نکند.

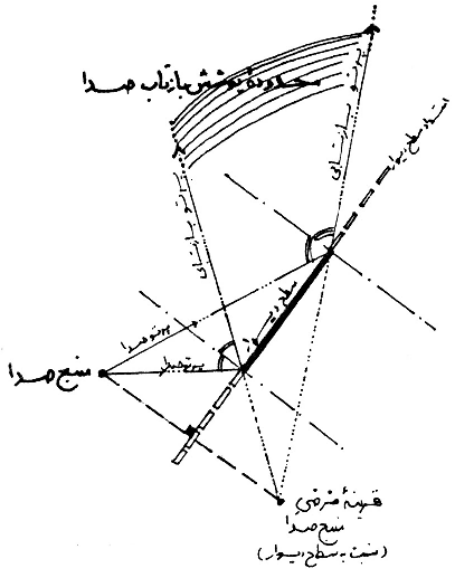
پ ـ بخش عمده‌ای از صدای تولیدشده که به سمت بالا و در جهت جلو انتشار یافته است به‌وسیله منعکس‌کننده‌های سقف به سمت شنوندگان انتشار یابد.» [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۲۴ و ۱۲۵]

ت ـ از به‌وجودآمدن پژواک جلوگیری شود. برای این منظور باید سعی شود که حتی‌المقدور بازتاب از سطوح انتهایی سالن صورت نگیرد. برای منعکس نشدن صدا از سطوح انتهایی باید یا سطح این سطوح را کم کرد و یا از مواد جذب‌کننده روی این سطوح استفاده کرد.

ث ـ *«دکور پشت صحنه نباید جذب‌کننده صدا باشد. صدایی که به پشت منتشر می‌شود، باید منعکس شود تا ابتدا افراد روی صحنه و سپس شنوندگان، انعکاس را درست بشنوند. برای این منظور لازم است عمق صحنه از ۸/۵ متر بیشتر نباشد تا پژواک ایجاد نشود.»* [مولانا، درس آکوستیک داخلی]



نمودار ۱/۳/۱/۳/۵/۱ (راست)، روش یافتن محدوده بازتاب صدا از روی یک دیوار مسطح [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۱۹۹]



نمودار ۱/۳/۱/۳/۵/۲ (چپ)، روش دستیابی به محدوده بازتاب صدا توسط جدار (در پلان و مقطع)، [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۴۲]

۱/۳/۱/۴. مسائل آکوستیکی شکل هندسی شنودسراها

[تقسیم‌بندی با استفاده از حق‌دوست، ۱۳۷۷، ص ۲۲۹ تا ۲۴۱]

۱. فرم مستطیلی: فرم مستطیل گاهی با گوشه‌ای گرد بیشترین استفاده را در سالن‌های دارای وسعت محدود دارد و برای موسیقی مجلسی (غربی) مطلوب است.

«مهمترین مسأله در تعیین این فرم نسبت طول، عرض و ارتفاع است. ابعاد تالار باید به صورتی باشند که حتی‌الامکان آمودها (امواج ویژه) یکنواخت پخش گردند که این مستلزم اجتناب از ابعاد صحیح است. دقت در رسیدن صدای مستقیم به همه شنوندگان نیز مهم است.» [فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۱۳۰]

«لبّ رهنمود در رابطه با شکل کلی فضاهای مکعبی این است که هر چقدر طول آن بیشتر از عرضش در نظر گرفته شود، رساندن صدای مستقیم به عقب آن دردسر بیشتری به وجود می‌آورد. از طرف دیگر، اگر ارتفاع آن خیلی بیشتر و یا خیلی کمتر از نصف عرض آن باشد، رساندن انعکاس‌های اولیه به نقاط مختلف سالن مشکل‌تر می‌شود. یعنی اگر سالن را مکعب مستطیل فرض کنیم، نسبت ابعاد آن به یکدیگر تقریباً $1:1:\frac{1}{2}$ *خواهند بود. اما چنین ترکیبی از دیدگاه آمودهای سالن یکی از بدترین حالات ممکن است.»* [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۳۷]

۱/۳/۱/۴/۱. آمودهای یک فضا

«بسامدهایی که در آن تداخل سازنده است، ***آمودهای یک اتاق*** *نام دارند. در بسامدهای بین آمودها تداخل مخرب است، یعنی انعکاس‌ها به مؤثرترین نحوه ممکن شدت یکدیگر را خنثی می‌کنند و در نتیجه شدت این قسمت بیناب تضعیف می‌شود. این تغییر ماهیت در صورت افراطی بودن اثرات سوء به همراه دارد.»* [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۳۸]

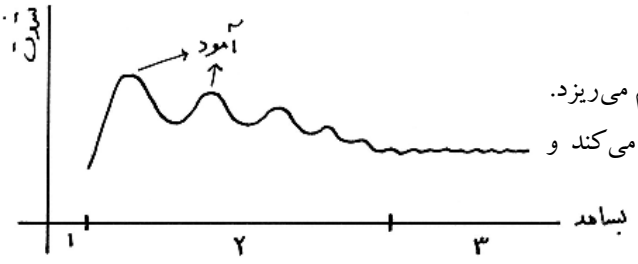
«بسامد صداهایی که در یک مکعب مستطیل آمود (امواج ساکن) ایجاد می‌نمایند، از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$f_o = \frac{c}{2}\sqrt{(\frac{n_x}{L_x})^2 + (\frac{n_y}{L_y})^2 + (\frac{n_z}{L_z})^2}$$

که L_x *و* L_y *و* L_z *طول و عرض و ارتفاع مکعب و* n_x *و* n_y *و* n_z *اعداد صحیح صفر تا بی‌نهایت هستند. بسامدهایی که دو مقدار از این سه مقدار در آنها صفر باشد، از اهمیت بیشتری برخوردارند.*

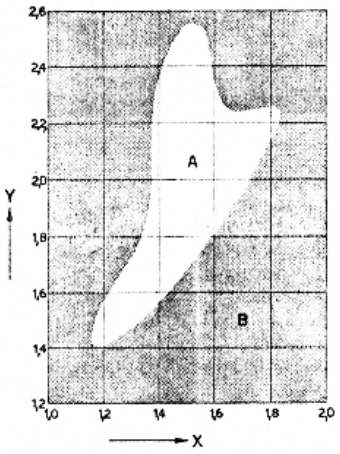
برای اجتناب از انتخاب ابعادی که باعث بروز آمود می‌شوند، به‌ویژه برای بسامدهای موسیقی، نسبت ابعاد باید از طریق محاسبه کنترل گردد.» [لیاقتی، ۱۳۶۷، ص ۵۵ و ۵۶]

نمودار ۱/۳/۱/۴/۱/۱، آمودهای تشکیل‌شونده در یک اتاق:
محدوده ۱: اتاق مناسب این صداها نیست.
محدوده ۲: اتاق شدت و بیناب این صداها را به‌هم می‌ریزد.
محدوده ۳: اتاق تقریباً همه صداها را تقویت می‌کند و بیناب را به‌هم نمی‌زند.
[مولانا، درس آکوستیک داخلی]

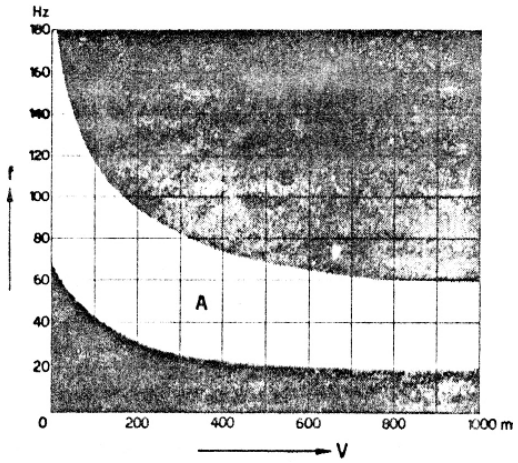


«هرچه نسبت ابعاد به عدد صحیح نزدیک شوند، آمودهای هم‌بسامد بیشتر می‌شوند. بدترین وضع ممکن اتاق مکعب است که در آن بیناب صدا بیشترین تغییرات ممکن را تجربه می‌کند. در مرحله بعد اتاقی با نسبت ابعاد $\frac{۱}{۲}$:۱:۱ است. بنابراین بهتر است به جای استفاده از ارقام مشکل‌گشا، مفاهیم پایه و زیربنایی را ملاک عمل قرار دهیم. به عنوان مثال اگر زمین اجازه دهد، با خارج ساختن فرم شنودسرا از یک مکعب مستطیل، هم می‌توان نیازهای صدارسانی را تأمین نمود و هم اثر سوء آمودها را حتی‌المقدور خنثی ساخت.» [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۳۸ و ۳۹]

«با بررسی آمودها و رعایت قواره‌های معماری می‌توان ابعاد تالار مستطیل شکل را، با داشتن حجم آن، از روی نمودار به‌دست آورد. اگر ارتفاع تالار را مبنا قرار دهیم، عرض تالار از ۱/۲ تا ۱/۸ برابر ارتفاع، و طول آن از ۱/۴ تا ۲/۵ برابر ارتفاع می‌تواند انتخاب شود، که باید حاصلضرب این سه عدد برابر حجم، و حاصلضرب طول در عرض برابر سطح موردنظر نیز باشد. برای تعیین ارتفاع تالار می‌توان با توجه به اندازه‌های صندلی‌ها که برای کارهای گوناگون تالار انتخاب می‌گردد، و با احتساب ٪۲۰ برای راهروها، سطح تالار را به‌دست آورد و از تقسیم حجم بر سطح، ارتفاع مشخص می‌گردد.» [لیاقتی، ۱۳۶۷، ص ۳۹]



نمودار ۱/۳/۱/۴/۱/۲، نغمات خاص (آمود) در یک تالار با دیوارهای موازی به ابعاد X:Y:۱. A: ابعاد متناسب، B: ابعاد نامتناسب (امکان تطابق دو نغمه خاص بر یکدیگر)، [فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۱۳۱]



نمودار ۱/۳/۱/۴/۱/۳، حوزه صدق ابعاد تعیین‌شده در نمودار قبل،
A: متناسب، B: نامتناسب
[فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۱۳۲]

این بررسی‌های گفته‌شده (آمودهای فضا) برای تالارهای به شکل مکعب مستطیل گویاست. در اینجا به سایر فرم‌های تالارها و مشخصات آنها اشاره می‌شود.

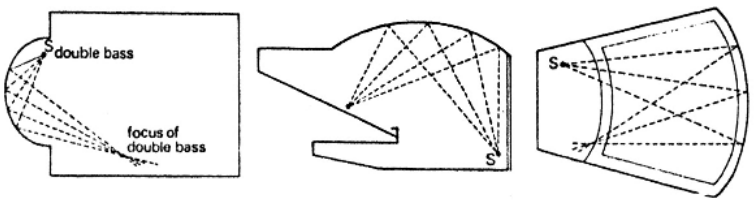
۲. فرم بادبزنی: *«فرم ذوزنقه و بادبزنی برای شنودسراهای بزرگتر بهتر است چون دید بهتری را از هرجا تأمین می‌کند. ولی اگر دقت کنیم، در این حالت اشکالی که می‌تواند به وجود آید برای مشاهده کار ارکستر است که برای بعضی ممکن است دلیل آمدن به سالن و استفاده از آن باشد.*

وجود راه نزدیک و آزاد صوتی از سرچشمه ایجاب می‌کند که تالار به جای مستطیل، ذوزنقه باشد. با بررسی سطح قابل استفاده و مرکز ثقل فرم‌های مختلف، معلوم می‌شود که بهتر است حداکثر سطح قابل استفاده با حداقل فاصله مرکزثقل توأم باشد و در صورت گنجایش بیشتر و فاصله بیش از حد مجاز مرکزثقل، می‌توان از بالکن یا گالری استفاده نمود. استفاده از شکل لوزی نیز به دلیل بازتاب‌های نامطلوب بی‌اشکال نیست.» [فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۱۳۳]

۳. *«فرم مدور: فرم دایره در پلان تالار، از آنجایی که توجه به مرکز را بیش از هر فرم دیگری فراهم می‌کند، در وهله اول درست و مطلوب به‌نظر می‌رسد. ولی از لحاظ آکوستیکی تمرکز انعکاس‌های صوتی در مرکز آن بسیار زیاد است، و از این رو مطلوب نمی‌باشد.»* [حق‌دوست، ۱۳۷۷، ص ۲۳۰ و ۲۴۱]

«برای جلوگیری از تجمع انرژی در یک نقطه و پخش یکنواخت انرژی صوتی باید از ساختن سطوح گود به‌ویژه در سقف و دیوار پشت تالار خودداری کرد.» [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۳۶]

«البته سطوح گود با شعاع انحناء کوچک چندان اشکال ایجاد نمی‌کنند ولی سطوح گود با شعاع انحناء بزرگ، حتی بزرگتر از ابعاد تالار، ممکن است ایجاد پژواک کند که از وضوح گفتار کم می‌کند. برای سازهای کوبه‌ای نیز ممکن است باعث اختلال در نظم و ریتم ارکستر گردد.» [فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۱۳۶]

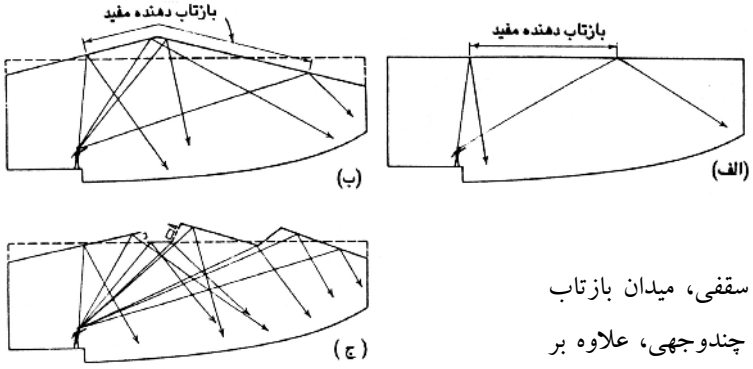


نمودار ۱/۳/۱/۴/۲، تمرکز ناخوشایند انعکاس‌ها در نقطه‌ای از تالار به‌سبب وجود سطوح مقعر [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۴۸]

۴. فرم نامنظم: طراحی فرم تالار (جداره‌ها و سقف) به صورت نامنظم می‌تواند از وقوع امواج ایستا جلوگیری، و پخشایی بهتری فراهم کند.

« سطوح (داخلی تالار) را می‌توان ناموزون و ناهموار نمود به طوری که ابعاد این ناهمواری‌ها از حدود متر کمتر نباشد. اگر ناهمواری دیوارها ابعادی در حدود سانتیمتر داشته باشند هیچ اثر مطلوبی در این زمینه نخواهند داشت. ایجاد عدم یکنواختی در فرم و سطوح تالار برحسب تجربه و محاسبه

قابل تعیین است. مثلاً اگر سقف و دیوارهای یک تالار موازی با کف و با یکدیگر نباشد، تا حدی شرط فرم غیرهندسی حاصل می‌گردد، ولی این همواره کفایت نمی‌نماید. این ناهمواری و عدم یکنواختی را می‌توان به‌وسیله مصالح جذب‌کننده نیز ایجاد کرد.» [فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۱۰۸]



نمودار ۱/۳/۱/۴/۱،
(الف) سقف مسطح (ب) دو پانل سقفی، میدان بازتاب مفید را افزایش می‌دهد (ج) سقف چندوجهی، علاوه بر پخشایی بیشتر، استفاده از نور و بلندگو را باهم امکان‌پذیر می‌نماید. [استین، ۱۳۷۸، ص ۶۹]

۱/۳/۱/۵. پخشایی

«طبق تعریف، فضایی همگن و دارای پخشایی نامیده می‌شود که در آن، امواج منعکس‌شده از سطوح داخلی فاقد جهت و اختلاف فاز مشخصی با یکدیگر بوده و اتفاقاتی توزیع شده باشند، به گونه‌ای که به نظر برسد این انعکاس‌ها منشاء و منبع مشخصی ندارند.

ایجاد فضایی همگن یک آرمان است و در واقعیت به طور کامل به‌دست نمی‌آید. اما فضا باید دارای حدی از پخشایی باشد که در نقاط مختلف آن، اختلاف فاحشی حس نشود. در غیر این صورت، صدای واخنشی در نقاط مختلف یکسان نخواهد بود و رابطه زمان واخنش نیز صدق نخواهد کرد.

یکی از راه‌های دستیابی به فضایی نسبتاً همگن این است که سطوح منعکس‌کننده و سطوح جذب‌کننده، با عملکردهای بسامدی مختلف، به صورت یکنواخت در سطوح توزیع شوند تا از جهت‌وری انعکاس‌ها جلوگیری گردد. همچنین باید در فضاهایی که دارای دیوارهای موازی هستند (خصوصاً در فضاهای کوچک) به آمودها، دقت شود و از تشدید برخی بسامدها و تضعیف نسبی سایر بسامدها جلوگیری گردد.» [بوبان، ۱۳۷۸ ص ۲۴۷ تا ۲۴۹]

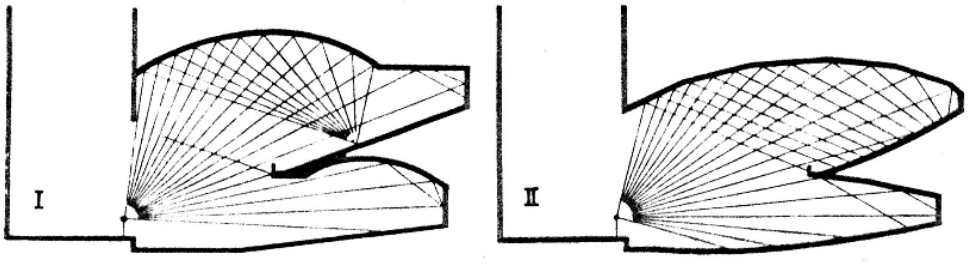
«برای محاسبه و تعیین تئوری ضریب پخشایی و ابعاد سطوح پخش‌کننده‌ها فرمول‌های تجربی مختلفی ارائه شده است ولی اغلب تجربیات مهندسان آکوستیک در این مورد ملاک عمل قرار می‌گیرد. آنچه در اینجا مهم است، نکاتی است که در طراحی فرم تالارها باید موردنظر داشت تا تالار دارای شرایط پخشایی باشد:

۱. تالارهایی با فرم هندسی موزون (مکعب و نظایر آن) که دارای دیوارهای متوازی و مسطحی باشند خطر وجود عدم پخشایی را زیاد می‌کنند.

۲. برای داشتن پخش یکنواخت، جذب‌کننده‌ها باید در تمام سطوح تالار به‌طور یکنواخت قرار گیرند و این امر به‌سادگی امکان‌پذیر نیست زیرا جذب‌کننده‌هایی که اجباراً در فضای موردنظر قرار دارند مثل شنوندگان و صندلی‌های درون سالن، بسامدهای وسط و بالا را جذب می‌کنند و نسبت به سقف کاذب که جذب‌کننده عمده بسامدهای پایین و بم است، پخشایی سالن را دچار اشکال می‌کند و باید به تعادلی در قرارگیری سطوح جذب‌کننده رسید. به‌طور مثال در کف از سطوح صیقلی مانند سنگ و موزاییک و پارکت استفاده کرد و در بالای دیوارها و نزدیک سقف جذب‌کننده‌هایی برای بسامدهای وسط و بالا نصب کرد.» [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۳۶ و ۱۳۷]

«طرح سقف کاذب نیز در پخشایی صدا در سطح تالار تأثیر به‌سزایی دارد. زیرا آنچنان‌که در شکل نیز مشخص است، چنانچه فرم سقف کاذب نامتناسب باشد، کانون صوتی ایجاد می‌گردد (شکل ۱ از نمودار ۱/۳/۱/۵/۱) که با تغییر دادن شیب و فرم آن (شکل ۲ از نمودار ۱/۳/۱/۵/۱) می‌توان از تجمع انرژی صوتی در یک نقطه پیشگیری به عمل آورد و صدا را در سطح تالار به‌طور یکنواخت پخش نمود.

شیب و ابعاد سقف کاذب را می‌توان چنین به‌دست آورد که هر شعاع صوتی که به قطعه‌ای از سقف کاذب برخورد نماید، باید طوری بازتاب شود که نخستین پرتو آن به ردیفی که در آن تراز صدای مسقیم در حدود ۱۰ دسی‌بل بیش از نوفه زمینه است برسد و بقیه پرتوهای صوتی نیز به موازات آن تا آخرین ردیف بازتاب شوند. شیب کف تالار نیز باید آنچنان طرح گردد که صدای مستقیم و بی‌مانع به همه ردیف‌ها برسد.» [لیاقتی، ۱۳۶۷، ص ۵۸]



نمودار ۱/۳/۱/۵/۱، ۱.سقف شکسته که بازتاب‌های یکنواخت به‌وجود می‌آورد.
۲. سقف گود که ایجاد بازتاب‌های نامتناسب در یک نقطه می‌نماید. [فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۱۳۵]

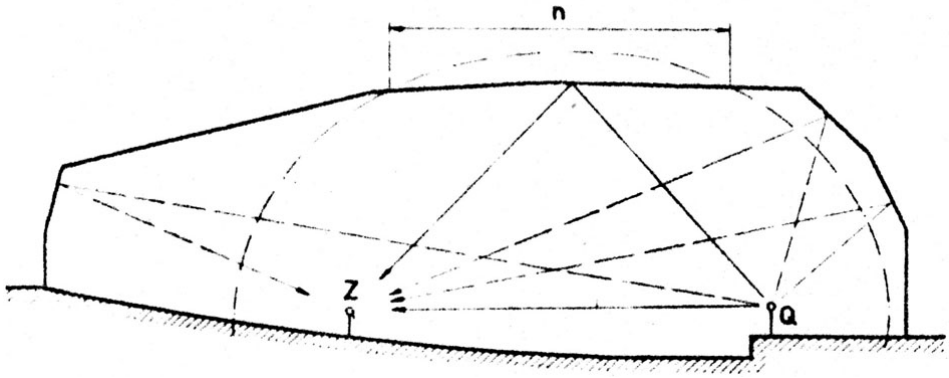
۱/۳/۱/۶. پژواک و مهار آن

*«اگر فاصله زمانی دو صدا از مدت زمان جمع‌بندی شنوایی تجاوز کند، صداها گسسته و جدا از هم شنیده خواهند شد. وقتی این گسستگی به یک صدای مستقیم و انعکاس آن و یا دو انعکاس پی در پی آن مربوط می‌شود، پدیده را **پژواک** می‌نامیم و وقوع آن در امور آکوستیکی همیشه ناخواسته*

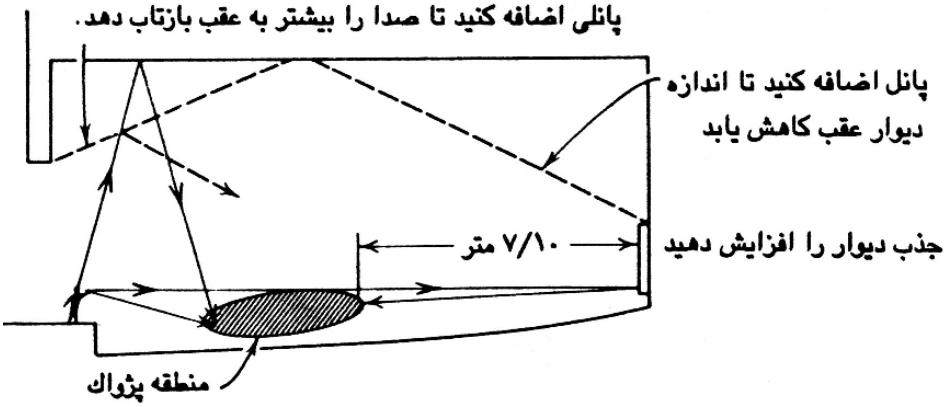
است چون ماهیت صدا را مخل ساخته، وضوح را از بین می‌برد. اگر اختلاف مسیر پیموده‌شده توسط دو صدای پی در پی حداقل ۱۷ متر باشد، پژواک می‌تواند رخ دهد. این اختلاف فاصله‌ها در فضاهای بزرگ رخ می‌دهد.

وقتی شرایط فراهم می‌شوند، مهار کردن پژواک بدون اینکه لطمه چندانی به سایر نیازهای آکوستیکی شنودسرا وارد شود، و بدتر از آن تحت ضابطه درآوردن کمیت قابل قبول این پدیده، کار دشواری است. اگر بدانیم انعکاس‌های پژواک‌ساز کدامند، و در چه مسیرهایی حرکت می‌کنند، می‌توان با قراردادن جذب‌کننده‌های صوتی بر سر راه آنها پژواک را از بین برد. اما این کار به مورد بستگی دارد و اجرایی کردن اندازه‌گیری‌های آکوستیکی به این منظور مسائل و مشکلاتی به وجود می‌آورد.» [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۴۱ و ۴۲]

*«یکی از مؤثرترین روش‌هایی که در مهار کردن این پدیده ناخواسته (پژواک) نقش ایفا می‌کند، **خنثی ساختن شرایط هندسی** است که بالقوه پژواک‌سازند.»* [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۳۲]



نمودار ۱/۳/۱/۶/۱، اختلاف راه بین دو صوت مستقیم و بازتاب. فقط قسمت n که به‌وسیله بیضی قطع گردیده است، بازتابهای متناسب می‌دهد. [فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۱۳۷] (Z و Q شنونده و منبع صدا هستند که کانون‌های بیضی را تشکیل می‌دهند. مجموع مسیر صدای مستقیم و بازتاب در نقاط روی بیضی ۱۷ متر و داخل آن کمتر از ۱۷ متر است. این مقدار در نقاط خارج از بیضی بیشتر از ۱۷ متر می‌شود که می‌تواند ایجاد پژواک کند.)



نمودار ۱/۳/۱/۶/۲، دلایل ایجاد پژواک و راه‌حل حذف آن [استِین، ۱۳۷۸، ص ۷۱]

۱/۳/۲. تأمین کیفیت مناسب صدا

از فراسنج‌های مهم در تعیین کیفیت صدا در یک شنودسرا، «زمان واخنش»، «نسبت شدت صدای مستقیم به صدای واخنشی» و «زمان تأخیر اولیه» هستند که در این قسمت بررسی می‌شوند.

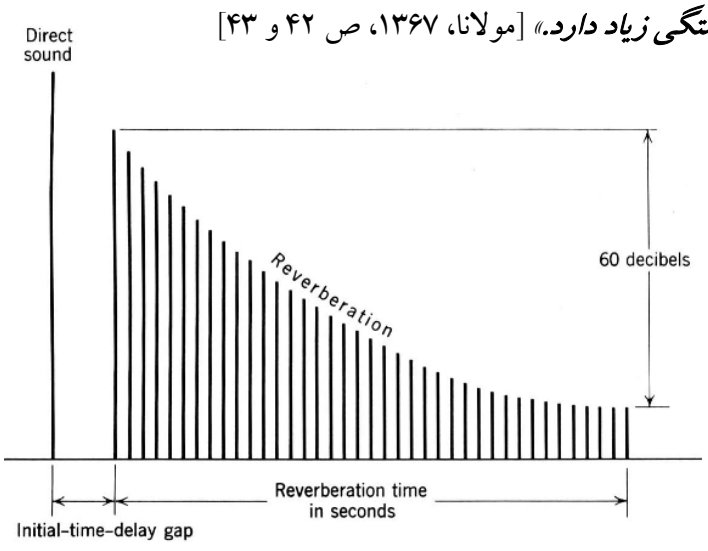
۱/۳/۲/۱. زمان واخنش

«زمانی که لازم است تا پس از قطع منبع صدا تراز فشار صدا ۶۰ دسی‌بل افت کند، زمان واخنش نامیده می‌شود.» [مکانیک و مولانا[ب]، ۱۳۷۹، ص ۱۴]

«انسان که قرن‌ها در فضای بسته زندگی کرده، به دنباله‌دار بودن صدا (پدیده واخنش) عادت کرده و بدون آن، احساس نامطلوبی خواهد داشت.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۴۵] *«به دلیل زندگی انسان در فضاهای بسته که واخنش جزء لاینفک آن بوده، صدا در فضای بسته‌ای که واخنش ندارد برای انسان «غیر طبیعی»، «مرده»، «خشک» و «بی‌روح» است.»* [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۴۳]

«هر جزء یا بخش از کلمات یا صداهایی که در یک فضا پخش می‌شوند، انعکاس‌های متوالی و متعدد خود را به‌همراه خواهند داشت و شنونده پس از شنیدن صدای مستقیم، «قطاری» از این انعکاس‌ها را دریافت می‌کند که دنباله‌ای میرا برای صدای اصلی هستند. انعکاس‌هایی که از تأخیر نسبی بیشتری برخوردارند، باید مسیر طولانی‌تری را پیموده باشند و در نتیجه دفعات برخورد بیشتری با سطوح داخلی سالن داشته‌اند. مضافاً، چون در هر برخورد با سطوح اتاق، قسمتی از انرژی آن جذب می‌شود، لذا انعکاس‌هایی که به ترتیب به گوش شنونده می‌رسند تدریجاً از شدت نسبی کمتری برخوردار خواهند بود.

اگر فاصله زمانی موجود بین هر جفت انعکاس مجاور کمتر از مدت جمع‌بندی شنوایی باشد، که معمولاً همین‌طور است، با قدری تأمل روشن می‌شود که گوش انسان صدای مستقیم و تمام انعکاس‌های آن را به‌صورتی پیوسته و یکپارچه خواهد شنید. کم و کیف این پدیده صرفاً به خود فضا مربوط می‌شود. در واقع ***صدایی که در یک فضا می‌شنویم نه تنها به خصوصیات خود منبع صدا، بلکه به شرایط آکوستیکی آن فضا نیز وابستگی زیاد دارد.»*** [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۴۲ و ۴۳]



نمودار ۱/۳/۲/۱/۱، نمودار میراشدن صدا برای گوش انسان: در این نمودار صدای مستقیم، صداهای واخنشی، زمان تأخیر اولیه و زمان واخنش برای یک فضا نشان داده شده‌اند.
[Beranek، 1962، ص ۲۸]

«فرمول زمان واخنش (به شرط وجود پخشایی) $T = \frac{0.16V}{4mV - S.Ln(1-\alpha)}$ است که در آن:

V: حجم آکوستیکی فضا یعنی کل حجمی که امواج صوتی در آن تحرک دارند،

S: سطح آکوستیکی فضا یعنی حاصل جمع سطوحی که امواج واقعاً از آن منعکس می‌شوند،

Ln: لگاریتم در پایه نپر،

α: ضریب جذب میانگین سطوح مختلف اتاق (با وابستگی زیاد به جنس سطوح و بسامد امواج دارد)،

m: ضریب جذب مسافتی امواج صوتی توسط هوا، است (مقدار این فراسنج در بسامدهای زیر ۱۰۰۰ هرتز ناچیز است و می‌توان آن را نادیده گرفت).» [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۳۵]

«مقصود از زمان واخنش به‌صورتی کلی و بدون ذکر کردن بسامدی خاص، مقدار آن در بند بسامدی ۵۰۰ هرتز یا در نزدیکی‌های آن است.» [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۴۶]

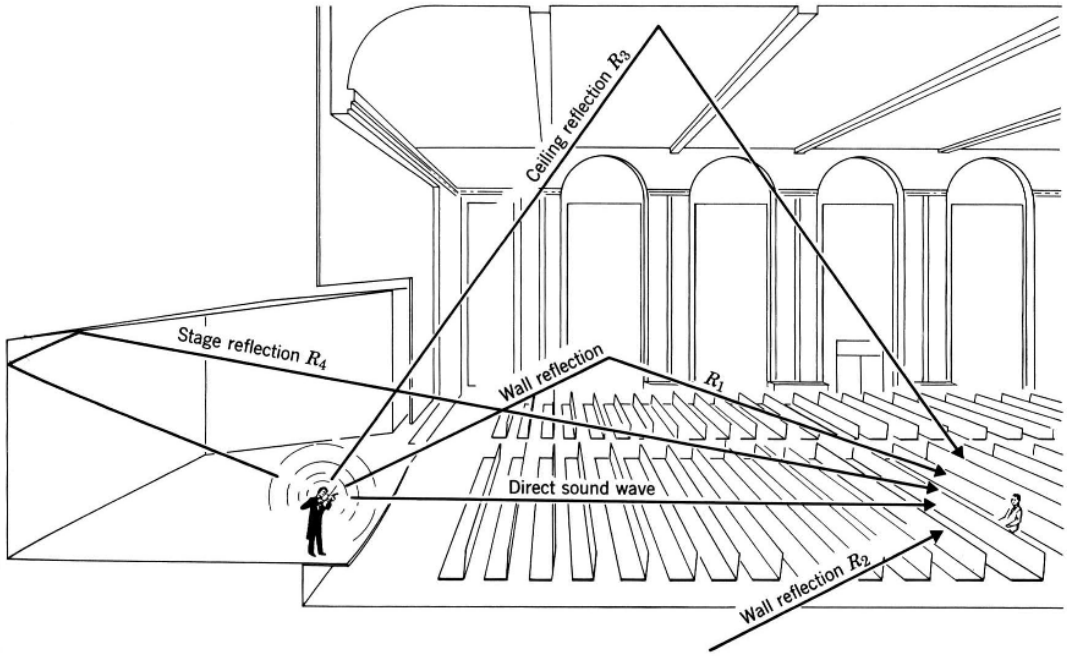
«فرمول ساده‌تری نیز برای محاسبه زمان واخنش وجود دارد: $T = 0.16\frac{V}{A}$ که در آن $A = \sum S_n.a_n$.

روابط زیر بین واخنش و مشخصات ساختمانی فضا وجود دارد:

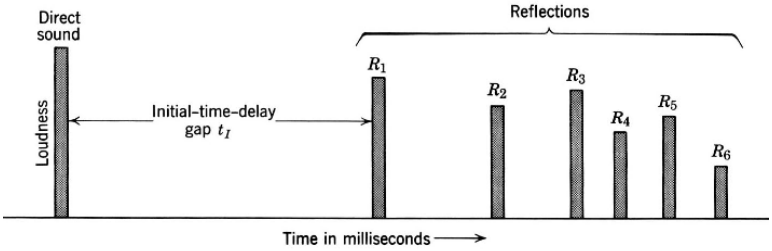
۱. واخنش با محل قرارگرفتن سرچشمه صدا در فضا وابستگی ندارد.

۲. تأثیر سطوح جذب‌کننده صوت در واخنش ارتباطی با محل قرارگرفتن آنها در فضا ندارد.

[فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۱۰۱ و ۱۰۲]



نمودار ۱/۳/۲/۱/۲، تصویر صدای مستقیم و صدای واخنشی در یک شنودسرا [Beranek، 1962، ص ۲۸]



نمودار ۱/۳/۲/۱/۳، ترازهای صدای مستقیم و صدای واخنشی در یک شنودسرا [Beranek، 1962، ص ۲۸]

۱/۳/۲/۱/۱. اثرات واخنش در فضا

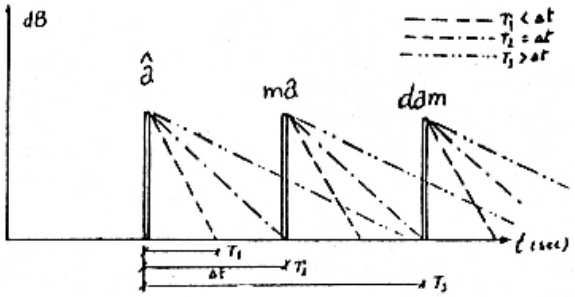
«واخنش یا دنباله‌های به‌هم چسبیده صدا دو اثر متمایز در ذهن انسان باقی می‌گذارد. اثر اول این است که هر یک از اجزای صدای اصلی «طول عمر» بیشتری پیدا می‌کنند و یا به عبارتی دیگر، برای مدت زمان بیشتری در فضای موردنظر دوام می‌آورند. هرچه این زمان بیشتر باشد (به‌طور طبیعی با بزرگتر شدن حجم فضا)، چشم‌انداز بزرگتری به فضا می‌دهد. اثر دوم این است که بلندی صدای هر یک از این اجزاءو در نتیجه، بلندی کلی صدا نیز بیشتر می‌شود.» [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۳۲]

«در واقع زمان واخنش حجم فضا را نمی‌رساند، بلکه وضعیت نسبی انعکاس‌های دریافت‌شده از آن این کار را می‌کند. منتها چون زمان واخنش تنها شاخص نسبتاً ساده‌ای است که می‌توان توسط آن وضعیت‌های واخنشی متفاوتی را از یکدیگر متمایز ساخت. بنابراین همین شاخص به‌صورتی عمومی و «همه فن حریف» مورد استفاده قرار گرفته است، عملی که به نوبه خود دردسر و سوءتفاهم‌های گوناگونی را به دنبال داشته است. بنابراین بر حسب انتظار تجربی انسان، هر چقدر حجم یک فضا بیشتر می‌شود، زمان واخنش آن نیز باید طویل‌تر باشد و این چیزی است که در اکثر ضوابط آکوستیک داخلی دیده می‌شود. اگر حجم واقعی فضا با حجم آن از نظر احساس شنوایی هماهنگ باشد، فضا را «زنده» می‌گوییم.» [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۴۴ و ۴۵]

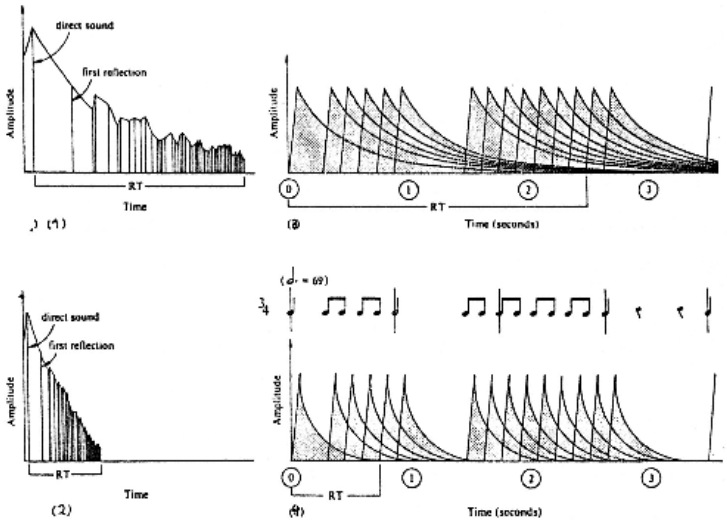
«پدیده واخنش در واقع به این معناست که فضای بسته، سبب تغییر در پوش و بیناب صدا می‌شود. زیرا میزان انرژی منعکس شده از جدارها، مقدار تأخیر زمانی انعکاس‌ها نسبت به صدای مستقیم و تراز نسبی صدای واخنش در بسامدهای مختلف، به ویژگی‌های کالبدی فضای بسته مربوط، و از منبع صدا مستقل است و اگر فضایی تغییر اساسی در پوش و بیناب صدا ایجاد کند، شیوش آن را عوض کرده و در نتیجه در یک کمیت فیزیک روانی پایه صدا دخل و تصرف کرده است که این دخل و تصرف، در محدوده‌ای معین قابل قبول خواهد بود.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۴۴]

«واخنش یک شنودسرا، در واضح شنیدن گفتار و یا به‌طور کلی در جدا شنیدن اجزاء صدا نقشی تعیین‌کننده دارد، ...به عبارت دیگر واخنش زیاد می‌تواند شمردگی گفتار یا گسستگی طبیعی اجزاء صدای اصلی را مخدوش سازد. بنابراین واخنش باید از یک حد مطلوب یا بهینه‌ای برخوردار باشد تا از یک طرف شمردگی و وضوح صدا خدشه‌دار نشود و از طرف دیگر غیرطبیعی، خشک، بی‌روح و مرده به نظر نرسد.» [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۴۳]

«گفتار و موسیقی از یک رشته هجا (کلمات یک بخشی) یا ضرب تشکیل شده‌اند که اگر تند ادا شوند فاصله آنها در گفتار به یک پنجم ثانیه می‌رسد. اگر در بین فاصله زمانی دو هجا واخنش هجای یکم پایان یافته باشد، هجای دوم بدون آلودگی با سیلاب یکم به گوش می‌رسد. ولی اگر مدت واخنش بیش از فاصله زمانی دو هجا باشد، چون بخشی از سیلاب دوم با باقیمانده یکم پوشش می‌گردد، بنابراین از خلوص و وضوح آن می‌کاهد تا حدی که در واخنش طولانی ممکن است نزدیک به تمامی سیلاب دوم با واخنش سیلاب یکم پوشش گردد.» [لیاقتی، ۱۳۶۷، ص ۳۴ و ۳۵]



نمودار ۱/۳/۲/۱/۱/۱، نمایش یک کلمه سه‌بخشی و تأثیرواخنش بر پوشش بخش‌ها بر روی هم [لیاقتی، ۱۳۶۷، ص ۲۵]



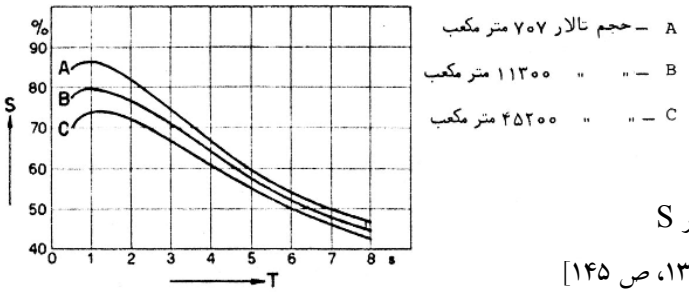
نمودار ۱/۳/۲/۱/۱/۲، نمودارهای زمان واخنش در دو فضای: (۱) بزرگ و (۲) کوچک و ترکیب صدای حاصل از یک جمله موسیقی ثابت در فضا [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۴۶]

۱/۳/۲/۱/۲. زمان واخنش بهینه

«واخنش که شاخص مهم کیفیت آکوستیک هر فضا شمرده می‌شود، در عمل تعیین‌کننده میزان پاسخگویی فضای موردنظر به عملکرد آن است. بنابراین زمان واخنش برای هر عملکرد، محدوده‌ای بهینه خواهد داشت که از یک‌سو، وضوح و روشنی مطلب مخدوش نگردد و از سوی دیگر لطف آن از دست نرود (صدای خشک و بدون دنباله، خالی از لطف است).» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۴۴ و ۲۴۵]

«در سالن سخنرانی، هرچه واخنش بزرگتر باشد، وضوح کمتر خواهد بود و این با توجه به پدیده واخنش امری بدیهی است. همچنین اگر واخنش از حد متناسب نیز کمتر باشد، باز وضوح کمتر

می‌شود زیرا چگالی انرژی کم می‌شود. بنابراین برای هر سالن سخنرانی فقط یک واخنش متناسب حجم وجود دارد که در آن وضوح حداکثر است.» [فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۱۴۵]



نمودار ۱/۳/۲/۱/۲/۱، وابستگی وضوح گفتار S
به مدت زمان واخنش T [فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۱۴۵]

«زمان واخنش بهینه کم‌وبیش با استفاده از فرمول $T=\frac{۱}{۳}LogV$ *قابل محاسبه است.»* [مکانیک و مولانا(ب)، ۱۳۷۹، ص ۴۶]

«در طراحی سالن‌های کنفرانس و سخنرانی معیار سنجش برای میزان واخنش بهینه، وضوح صداست. اما در طراحی تالارهای موسیقی هیچ‌گونه کمیت مشخصی جز احساس و نظر شنوندگان و موسیقی‌دان‌ها وجود ندارد. بنابراین در مورد به‌دست آوردن زمان واخنش بهینه باید از نتایج تجربیات طراحی‌های تالارهای معتبر جهانی استفاده کرد. نتایج این بررسی‌ها و آزمایش‌ها نیز مقادیر دقیقی برای محاسبه و طرح تالارها به‌دست نمی‌دهد و با استفاده از روش‌های آماری منحنی‌های زمان واخنش مناسب برای تالارها با حجم‌های مختلف ترسیم شده است.» [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۳۳ و ۱۳۴]

«زمان واخنش بهینه در یک شنودسرا به این عوامل بستگی دارد:

۱. کاربری آکوستیکی شنودسرا و حجم آن که زمان واخنش برای کاربری‌های آکوستیکی مختلف (مثل گفتار یا موسیقی) متفاوت است.

«در گفتار بر خلاف موسیقی خود صدا جنبه‌ای «الهام‌بخش» ندارد. صدای گفتار صرفاً وسیله‌ای است برای منتقل کردن اطلاعات، و اگر این وسیله بیش از حد دستکاری شود، از قدرت رسانایی آن کاسته می‌شود. در موسیقی که به زمان واخنش بیشتری نیاز دارد، مسأله فرق می‌کند. چون در اینجا نقش و نگار و ترکیب کلی خود صداست که الهام و احساس موردنظر را در شنونده القاء می‌کند و اگر بخواهیم جزئیات مکانیکی قضیه را بیش از حد لازم نمایان سازیم، از لطف و صفایی که جو حاکم باید داشته باشد، کاسته می‌شود. (مانند منقطع و تیز بودن صدای سازهای بادی در موسیقی نظامی که معمولاً در فضای باز و عاری از هرگونه واخنش قابل ملاحظه اجرا می‌شود و لحن کلی صدا کاملاً خشک، بی‌روح و مکانیکی است. برعکس این مسأله در فضاهای بزرگ مثل مساجد یا کلیساهاست که به دلیل مصالح سخت و حجم زیاد، زمان واخنش طولانی دارند. بنابراین افرادی که در این فضاها سخنرانی می‌کنند باید شمرده و آرام صحبت کنند به‌طوری که این مسأله حتی بر سبک گویش افراد حرفه‌ای در این فضاها اثر می‌گذارد.)» [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۴۵، باتلخیص]

۲. *ویژگی‌های بسامدی که احساس انسان از زمان واخنش به تغییرات آن در تمام گستره بسامدی بستگی دارد.»* [مکانیک و مولانا(ب)، ۱۳۷۹، ص ۱۶ و ۱۷]

از آنجا که ساختار صوتی یک صدای بخصوص، مثل گفتار، در بسامدهای مختلف فرق می‌کند، بنابراین شاخصی که باید ملاک عمل قرار داده شود «**نمودار زمان واخنش**» فضا در بسامدهای مختلف است. یعنی قید کنیم که در هر بند بسامدی چه زمان واخنشی بهینه تلقی می‌شود.

«برای مثال در موسیقی که به واخنش بیشتری نسبت به گفتار نیاز دارد، معمولاً قدری ازدیاد نسبی در واخنش بسامدهای بم (برای تقویت واکه‌های گفتار و لطف بیشتر در موسیقی) و مقدار کمتری کاهش نسبی در واخنش بسامدهای زیر وضعیت بهینه و مطلوب‌تری به وجود می‌آورد.» [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۴۶]

«برای اینکه بدانیم هرکدام از انواع موسیقی به چه نوع تالار برای اجرا (از لحاظ اندازه) نیاز دارد، اجرای موسیقی را به دو نوع کلی تندرونده و کندرونده تقسیم می‌کنیم:

۱. *اجرای **تندرونده:** در این نوع اجرا تأکید اصلی در اجرای ظرایف است تا فرم کلی. تحریرهای سریع و تأکید بر جزئیات و ظرایف نواختن، از اصول کلی آن است، مانند تکنوازی در موسیقی غربی و موسیقی ملی، موسیقی سنتی (دستگاهی) و موسیقی نواحی.*

۲. *اجرای **کندرونده:** در این نوع اجرا فرم کلی اهمیت بیشتری دارد و تحریرهای بلند و برای مدت طولانی نواخته می‌شود. مانند موسیقی کلیسا، موسیقی آوازی کرال (اپرا)، موسیقی‌های ارکسترال.*

این نوع تقسیم‌بندی ما را از لحاظ تعیین اندازه فضای اجرا برای هر نوع موسیقی راهنمایی می‌کند. زیرا برای شنیدن ظرایف و جزئیات در اجرای تندرونده نیاز به زمان واخنش پایین داریم تا صداها تفکیک‌پذیری لازم را داشته باشند و اجزاء موسیقی واضح شنیده شود. در اجرای کندرونده به تالارهای با زمان واخنش زیاد و فضای اجرای بزرگتر نیاز است.» [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۱۵]

«صداهایی که اجزاء آنها با سرعت نسبتاً زیادی یکدیگر را دنبال می‌کنند و در ضمن منفک شنیدن این اجزاء هم مدنظرند (مثل گفتار) واخنش کمتری را می‌طلبند.» [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۴۵]

۱/۳/۲/۱/۳. حجم شنودسرا

حجم یک شنودسرا با توجه به عملکرد و ظرفیت آن تعیین می‌گردد و عامل مهمی در تعیین زمان واخنش و زنده‌بودن یک شنودسراست. شنودسراهای کوچک مشکلات آکوستیکی کمتری دارند. چون در آنها شنونده و نوازنده نزدیک‌ترند و بنابراین بلندی صدا بیشتر، و برای اجرای تکنوازی راحت‌تر است. بنابراین لازم است قبل از طراحی دقت کافی در انتخاب ظرفیت و حجم شنودسرا اعمال شود.

«ضمناً با بزرگ کردن حجم، سطوح فضا و در نتیجه جذب کلی بزرگتر می‌شود. توان سرچشمه صدا ثابت است، بنابراین چگالی انرژی در فضا کاهش می‌یابد. چگالی انرژی باید بیش از آستانه شنوایی شنوندگان و به مقدار کافی باشد. ضمناً بیش از حد نیز نباشد که موجب آزار شنوندگان گردد.» [فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۱۲۹]

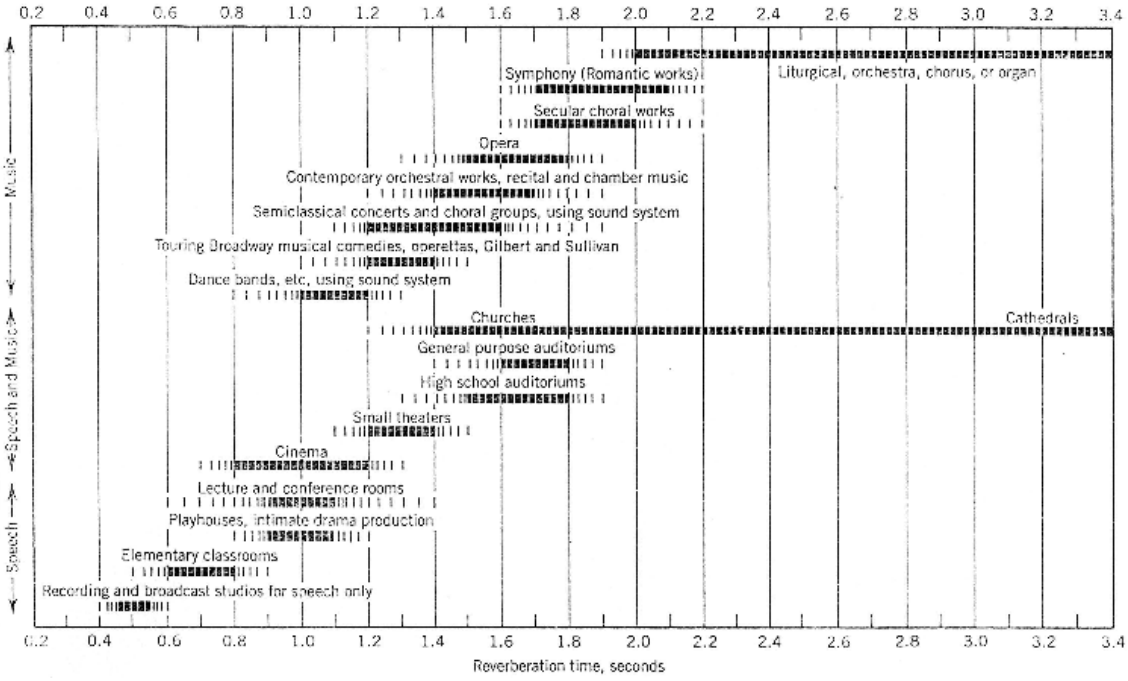
اگر تعداد شنوندگان تعیین نشده باشد، و دست طراح در تعیین ابعاد باز باشد حداکثر حجم شنودسرا بر حسب عملکرد آن (بدون نیاز به وسایل الکتروآکوستیک) مطابق جدول روبرو است. در صورتی که حجم بیشتری لازم باشد، بهتر است از وسایل الکتروآکوستیک استفاده شود. در این صورت حجم شنودسرا دلخواه خواهد بود.

مورد استفاده تالار برای	حداکثر حجم (مترمکعب)
سخنرانی (غیرحرفه‌ای)	۳۰۰۰
سخنرانی (حرفه‌ای)	۶۰۰۰
ساز و آواز تنها	۱۰۰۰۰
ارکستر سمفونی و اپرا	۲۰۰۰۰
آواز دسته‌جمعی (کر)	۵۰۰۰۰

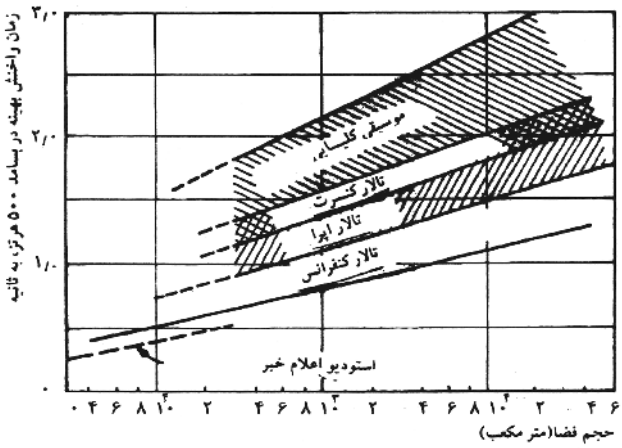
جدول ۱/۳/۲/۱/۳/۱، حداکثر حجم شنودسرا بر حسب عملکرد [لیاقتی، ۱۳۶۷، ص ۳۹]

۱/۳/۲/۱/۴. مقادیر پیشنهادی برای زمان واخنش

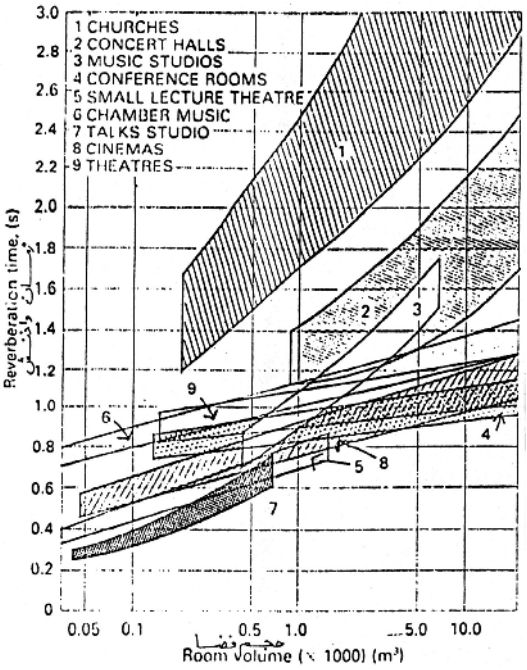
در منابع مختلف، زمان واخنش‌های متفاوتی برای انواع موسیقی، سخنرانی و... پیشنهاد شده است که تعدادی از آنها در زیر خواهد آمد:



نمودار ۱/۳/۲/۱/۴/۱، زمان واخنش بهینه در بسامد ۱۰۰۰–۵۰۰ هرتز برای کاربری‌های مختلف [Cavanaugh، 1999]



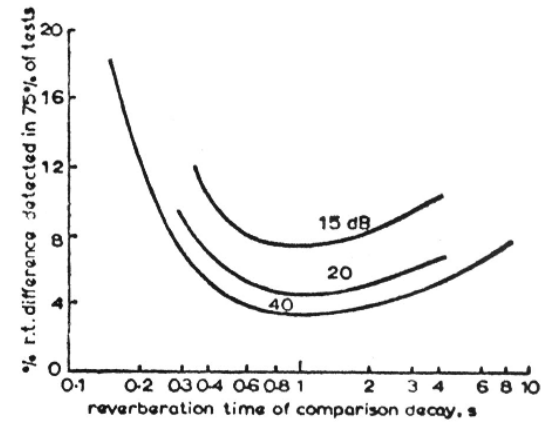
نمودار ۱/۳/۲/۱/۴/۲، نمودارهای وابستگی زمان واخنش بهینه به حجم سالن‌ها برای کاربری‌های مختلف.
[مکانیک و مولانا[ب]، ۱۳۷۹، ص ۱۶]



نمودار ۱/۳/۲/۱/۴/۳، نمودار زمان واخنش بهینه برای فضاهای مختلف به تناسب حجم آنها

(۱) کلیساها
(۲) سالن‌های اجرای موسیقی
(۳) استودیوهای موسیقی
(۴) سالن‌های بزرگ کنفرانس
(۵) فضاهای کوچک سخنرانی
(۶) فضاهای کوچک برای موسیقی مجلسی
(۷) استودیوهای مصاحبه و مناظره
(۸) سینماها
(۹) سالن‌های اجرای نمایش

[بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۴۸]



نمودار ۱/۳/۲/۱/۴/۴، درصد تغییرات قابل تشخیص در زمان واخنش [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۵۳]

۱/۳/۲/۱/۵. تغییر دادن زمان واخنش

*«با بررسی رابطه زمان واخنش ($T = ۰/۱۶V/A$) می‌توان دریافت که برای **کم کردن زمان واخنش** سه امکان متفاوت وجود دارد:*

۱. تغییر دادن حجم: با سقف کاذب یا دیوار متحرک که با هزینه زیاد و کم شدن ظرفیت تالار همراه است.

۲. تغییر دادن سطوح: با تغییر شکل به دیوارها و سقف که همانند حجم اشکالات اجرایی دارد.

۳. تغییر در ضریب جذب: تغییر در پوشش‌های درونی تالار که آسان‌تر و ارزان‌تراست. مانند به کاربردن پانل‌های لولایی (دو طرف متفاوت)، دیوارهای کشویی، پرده،... که تا حدود ٪۴۰ بر جذب تأثیر دارد و ٪۶۰ جذب مربوط به مردم و صندلی‌هاست.» [لیاقتی، ۱۳۶۷، ص ۶۶]

۱/۳/۲/۲. نسبت شدت صدای مستقیم به شدت صدای واخنشی

فراسنج دیگری که همانند زمان واخنش بر کیفیت صدا در تالار تأثیر دارد، نسبت شدت صدای مستقیم به شدت صدای واخنشی است.

«هرچه شدت صدای مستقیم بیشتر باشد، وضوح صدا بیشتر و هرچه شدت صدای واخنشی بیشتر باشد، صدا لطف بیشتری خواهد داشت (البته تا حدی افزایش صدای واخنشی). بنابراین لطف و وضوح در مقابل همند. این فراسنج با دو نسبت زیر (که در واقع یک نسبت هستند)، سنجیده می‌شود:

$$L = \frac{I_R}{I_D} = و\ K = \frac{I_D}{I_R} = \frac{R}{16\pi r^2}$$ *(R: ثابت آکوستیکی فضا، r: فاصله از منبع صدا)*

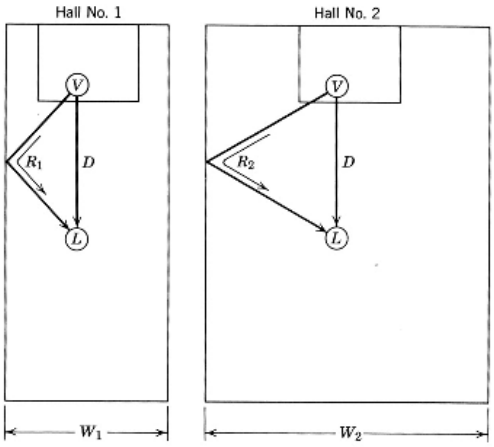
این نسبت‌ها نمایانگر میزان لطف یا وضوح صدا در فضا هستند. L افزایش تراز صدا در فضای بسته نسبت به فضای باز را نیز نشان می‌دهد. برای فضاهای نیازمند وضوح مثل سالن‌های سخنرانی، K باید بزرگتر مساوی ۰/۲ باشد و برای فضاهایی با عملکرد موسیقی که لطف در آنها مهمتر از وضوح است، L در حدود ۸ (برای موسیقی کلاسیک) مناسب است و اگر از حدود ۱۷-۱۶ بیشتر شود، وضوح موسیقی از بین می‌رود.» [مولانا، درس آکوستیک داخلی]

۱/۳/۲/۳. زمان تأخیر اولیه

فاصله زمانی بین صدای مستقیم و اولین انعکاس در فضا **زمان تأخیر اولیه** نامیده می‌شود.

«آنچه گوش انسان از زمان تأخیر اولیه برداشت می‌کند، حدود تقریبی ابعاد فضاست. به‌این معنی که هرچه ابعاد فضا کوچکتر باشد، زمان تأخیر اولیه کوچکتر شده، صمیمیت بیشتری حس می‌شود. هرچه حجم بیشتر باشد، فاصله افراد تا دیوارها و سقف زیاد شده، زمان تأخیر اولیه کم می‌شود و صمیمیت تالار نیز کم می‌شود. در تالارهای باریک‌تر به دلیل اینکه انعکاس اولیه زودتر به

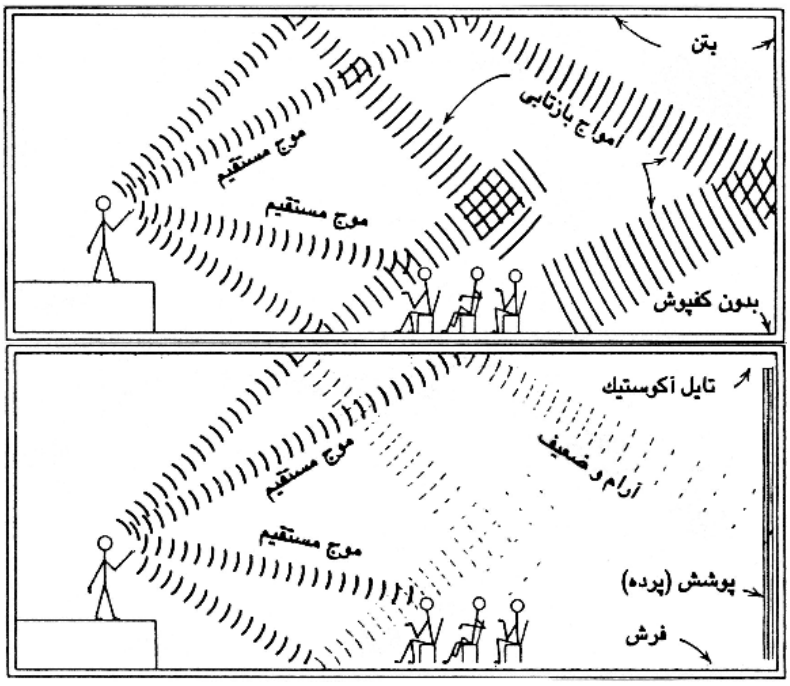
گوش شنونده می‌رسد، زمان تأخیر اولیه کوچکتر می‌شود. در تالارهای پهن‌تر این مقدار مخصوصاً برای شنوندگانی که در وسط تالار نشسته‌اند، بیشتر می‌شود.» [Beranek، 1962، ص **۳۹۶** و **۳۹۷**، با تلخیص]



نمودار ۱/۳/۲/۳/۱، تأثیر پهنای فضا بر اضافه‌شدن اختاف مسیر صدای مستقیم و انعکاس اول. در تالار شماره ۱ (چپ) این اختلاف مسیر و در نتیجه زمان تأخیر اولیه کمتر است.
[Beranek، 1962، ص ۳۹۷]

۱/۳/۲/۴. مصالح ساختمانی

از آنجا که نوع، مقدار و مکان مصالح مختلف در فضای داخلی، نقش اساسی در تعیین خصوصیات کمی و کیفی صدا دارند، در این قسمت مصالح به طور کوتاه مورد بحث قرار می‌گیرند.*



نمودار ۱/۳/۲/۴/۱، (الف) در فضای معمولی بدون جاذب صوت و (ب) صدای واخنشی قسمت اعظم صدای موجود در اتاق را شامل می‌شود. این بازتاب‌ها با نصب جاذب روی دیوار و سقف به مقدار زیادی حذف می‌شوند. این کار بر روی صدای مستقیم تأثیری ندارد. [استِین، ۱۳۷۸، ص ۹۶]

* به‌طور کلی در برخورد با اجسام، سه حالت برای صوت پیش می‌آید: جذب، انعکاس و عبور.

برای انتخاب مصالح داخلی یک شنودسرا چند نکته قابل ذکر است:

۱. *«مقدار صداهای زیری که توسط انسان‌ها و هوای موجود در سالن‌های بزرگ جذب می‌شود آن‌قدر زیاد است که در اکثر موارد ما نباید جذب‌کننده مشابه و اضافه دیگری داخل سالن کنیم.»* [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۳۳]

۲. *«ضریب جذب مصالح جذب‌کننده صدا مقدار مشخص و ثابت هر جسم نیست، بلکه از شرایط به‌کار بردن آن در فضا از قبیل زاویه تابشی پرتو آکوستیکی، توزیع فشار در فضا و نظایر آن، تبعیت می‌نماید. علاوه بر آن نوع بسامدهای تشدیدشده و فرم تالار و همچنین محل نصب مصالح جذب‌کننده می‌تواند در ضریب جذب مؤثر باشد.»* [*] [فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۱۰۹]

۳. نوع پرداخت، تزئین، رنگ‌کاری و کارهای مشابه، بر میزان جذب مواد جاذب صوت تأثیر می‌گذارد.

۱/۳/۲/۴/۱. مشخصات صندلی‌های شنودسرا از نظر آکوستیکی:

«زمان واخنش وابستگی زیادی به ضریب جذب میانگین در فضا دارد. از طرف دیگر انسان‌ها بسامدهای وسط و خصوصاً بالای صدا را خیلی خوب جذب می‌کنند. یعنی مقدار α وابستگی شدیدی به تعداد تماشاچی حاضر خواهد داشت. بنابراین اگر حواسمان جمع نباشد، زمان واخنش به استقبالی که ملت از یک برنامه می‌کنند نیز وابسته خواهد شد. این مشکل فقط یک راه‌حل اصولی دارد و آن این است که صندلی‌ها را طوری بسازیم که ضریب جذب آنها در دو حالت خالی و اشغال‌شده در هر بند بسامدی بخصوص یکسان باشد (با فرض یکسان بودن سبک لباس پوشیدن افراد در فصول مختلف که به دلیل یکسان نبودن آن ناچار به میانگین‌گیری هستیم).» [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۵۰]

«مشخصات آکوستیکی یک صندلی وابستگی زیادی به مواد و مصالح تشکیل‌دهنده آن دارد و لذا، مشخصات یک صندلی به احتمال زیاد، نمایانگر مشخصات آکوستیکی صندلی دیگری که در ظاهر شباهت زیادی با آن دارد، نیست. بنابراین استخراج عدد از روی منابع خارجی کارساز نیست. ضمن اینکه صندلی آزمایش‌شده تا به حال در کشور ساخته نشده است.» [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۳۳]

---

[*] برای مشاهده خصوصیات و انواع جاذب‌های صوت و جداول ضریب جذب مصالح مختلف، ر.ک. فورر و لالوبر، ۱۳۷۹، ص ۱۱۱ تا ۱۱۴ و نویفرت، ۱۳۷۷، ص ۳۹۷ و استین، ۱۳۷۸، ص ۹۷ و ۹۸.

۱/۳/۳. صفات ذهنی کیفیت آکوستیک فضا

در هر فضا، صفاتی آکوستیکی وجود دارد که ذهن انسان از مجموعه شرایط صوتی هر فضا درک و تحلیل می‌کند. این صفات قابل اندازه‌گیری نیستند و مانند بلندی، نواک و شیوش با کمیت‌های فیزیکی مرتبطند اما با آنها فرق دارند. با مجموع این صفات، ذهن انسان کیفیت یک فضای آکوستیک را ارزیابی می‌کند. پس بهتر است در طراحی فضا برای موسیقی، تا حد ممکن تناسب نوع موسیقی (یا کلام) را با این صفات حفظ و ارائه کنیم. در واقع با این کار به ارائه بهتر موسیقی کمک می‌کنیم. بنابراین تعیین میزان هرکدام از این صفات در فضا را نوع موسیقی تعیین می‌کند.

مهمترین این صفات که برای موسیقی غربی ذکر شده‌اند، از این قرارند:

*۱. «**صمیمیت یا حضور** (Intimacy/Presence): صمیمیت آکوستیکی یکی از ویژگی‌های مطلوب و مهمترین عامل در تالار است و برای فضایی صادق است که شنونده در آن (از صدایی که می‌شنود) احساس عظمت نکند و به عبارت دیگر تخمین ذهنی شنونده از ابعاد فضا (که از روی تأخیر انعکاس‌ها نسبت به صدای مستقیم انجام می‌شود) کوچک باشد. صمیمیت آکوستیکی باید در هماهنگی با صمیمیت بصری باشد (منظور از حجم بصری تراکم و نزدیکی افراد، نزدیکی به نوازندگان و... است که هرچه بیشتر باشد، انتظار ما زمان واخنش بیشتر در فضاست). می‌توان از این صفت، برای تالارهای موسیقی مجلسی (و موسیقی ایرانی) که صمیمیت در آنها لازم به نظر می‌رسد، بهره برد. هر نوع موسیقی درجه خاصی از صمیمیت آکوستیکی لازم دارد که اگر این تناسب وجود نداشته باشد، کمبود آکوستیکی حس می‌شود. این صفت به فاصله صدای اصلی و اولین انعکاس (زمان تأخیر اولیه) بستگی دارد.*

برای موسیقی ارکستری قرن هیجدهم زمان تأخیر اولیه کوچک، برای موسیقی ارکستری اواخر قرن نوزدهم زمان تأخیر اولیه متوسط و برای کلیساهای جامع زمان تأخیر اولیه بزرگ لازم است.

*۲. **زنده بودن** (Liveness): به فضایی اطلاق می‌شود که واخنش دارد (خشک یا مرده نیست). مسلماً هر فضای موسیقایی به درجه‌ای از زنده بودن نیاز دارد که حد آن را وضوح تعیین می‌کند و به همین دلیل به نوع موسیقی بستگی دارد. یک تالار زنده به ویژه در بسامدهای میانی و بالا (در بندهای بسامدی بالای ۵۰۰) ، زمان واخنش نسبتاً طولانی دارد که موجب تُن پر و قوی می‌شود. برعکس، اگر تالار نسبت به ظرفیت شنوندگان حجم کوچکی داشته باشد و دارای محیطی به‌شدت جاذب صوت باشد، گفته می‌شود مرده یا خشک است. یک تالار خشک زمان واخنش کوتاهی دارد، و موسیقی در آن ناموزون و یکنواخت می‌شود. ارتفاع زیاد فضا نیز تأثیر منفی بر زنده بودن دارد.*

*به نظر می‌رسد که می‌توان چشم‌انداز آکوستیکی فضا را ترکیبی از دو صفت صمیمیت و زنده بودن دانست. «چشم‌انداز آکوستیکی به مشخصه صوتی و متمایزی گویند که یک فضا به صدایی که در آن پخش می‌شود القاء می‌کند و لذا با مشاهده کردن آن فضا، انسان انتظار دارد که آن مشخصه صوتی را نیز در صدای آن بشنود. **انعکاس‌ها اولیه** و **واخنش فضا** نقش اصلی را در تعیین‌کردن این خصوصیت ایفا می‌کنند. به عنوان مثال صدای فردی که در یک تالار حرف می‌زند باید از واخنش قابل ملاحظه‌ای برخوردار باشد. درغیراین‌صورت غیرطبیعی به‌نظر خواهد رسید.» [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۹۵، بخش واژه‌نامه صدا]*

*۳. **گرمی** (Warmth): توسط صداهای بم ایجاد می‌شود و زنده بودن و پُری آنهاست. حذف بسامدهای بم، صدا را پوک و شکننده جلوه می‌دهد. در نتیجه میزان گرمی صدا در یک فضا، با واخنش نسبی بسامدهای بم به زیر نسبت مستقیم دارد. (اگر این نسبت خیلی بزرگ شود، مجموع صدا غرش‌گونه و در زمان طولانی آزاردهنده خواهد شد). این خصوصیت نسبت عکس با وضوح در تالار دارد.*

پایین آمدن زمان واخنش در بسامدهای زیر صدا را «نرم» می‌کند و در ضمن اجازه می‌دهد تا ریزه‌کاری‌های نسبتاً سریع و مورد نیاز موسیقی در آن حوزه بسامدی انجام‌پذیر شود. از طرف دیگر، این قسمت‌های بم یک صدا هستند که به آن «حرارت»، «حجم» و «وزن» می‌دهند و وقتی زمان واخنش در این بسامدها بالا می‌رود، این خصوصیات نیز بالنسبه بیشتر شده، صدا «ابهت»، «تسلط» و «تفوق» خاصی پیدا می‌کند. (مثل نغمات بم ارگ بادی در کلیسا و موسیقی کلیسا که حرکت‌های سریع صوتی در آن وجود ندارد.)

این صفت با توجه به نوع موسیقی تعیین می‌شود و بستگی به مصالح نهایی سطوح داخلی دارد. در موسیقی ارکسترسمفونی زمان واخنش در بندهای بسامدی ۶۷، ۱۲۵ و ۲۵۰ نباید کمتر از ۱/۶ ثانیه باشد تا به فضا نسبت گرمی بدهیم.

*۴. **بلندی** (Loudness): بلندی برای دو گروه صدا مطرح است: صدای مستقیم و صدای واخنشی.*

***۴/۱. بلندی صدای مستقیم** (Loudness of the direct sound): با فاصله بین شنونده و منبع صدا رابطه عکس دارد. بلندی صدای مستقیم سبب وضوح بیشتر و راحتی شنوایی برای شنوندگان می‌شود (و با توجه به بلندی صدای موسیقی حساب می‌شود که در بخش رساندن کمیت صدا توضیح داده شده است).*

در فضای باز به دلیل اینکه زمان واخنش تقریباً صفر است، فقط بلندی صدای مستقیم، و درنتیجه فاصله شنوندگان تا منبع صدا، مسأله اصلی طراحی است.

۴/۲. بلندی صدای واخنشی (Loudness of the reverberant sound): بلندی صداهای انعکاسی است که با زمان واخنش رابطه مستقیم و با حجم رابطه معکوس دارد.

۴/۳. نسبت بلندی صدای مستقیم به بلندی صدای واخنشی، یکی از فراسنج‌هایی است که بیش از بلندی صدای مستقیم یا واخنشی، در طراحی تالارها مورد استفاده است.

۵. **وضوح یا روشنی** (Clarity/Definition): درجه تفکیک صداهای جداگانه است که دو نوع افقی (برای صداهای متوالی) و عمودی برای صداهای همزمان دارد و به نسبت صداهای مستقیم و واخنشی بستگی دارد. بسته به سرعت درونی کلام یا موسیقی، درجه‌ای از آن مطلوب خواهد بود.

زمانی که مقدار قابل توجهی بازتاب‌های کوتاه‌مدت فراهم شده و فضا حجم نسبتاً کوچک با زمان واخنش نسبتاً کوتاه داشته باشد و همچنین شنوندگان به‌اندازه کافی به منبع صوتی نزدیک باشند، وضوح خوب اتفاق می‌افتد. وضوح و پُری تن به‌طور طبیعی نسبت معکوس دارند.

وضوح به این عوامل بستگی دارد: بلندی صدای مستقیم، زمان تأخیر اولیه کم، بلندی صدای واخنشی خیلی زیاد نباشد که صدای مستقیم را بپوشاند و نداشتن پژواک.

در موسیقی مجلسی و ایرانی، به دلیل تندرونده بودن موسیقی و داشتن ظرایف زیاد، به وضوح زیاد و پُری کم احتیاج است.

۶. **درخشندگی** (Brilliance): به صدای روشن و غنی (از لحاظ هماهنگ‌های بسامدی) اطلاق می‌شود و این بستگی به برجستگی بسامدهای زیر در زمینه بسامدهای بم و کندی محو شدن بسامدهای زیر دارد. این صفت مجموعاً از صفات «صمیمیت» (ایجاد با زمان تأخیر اولیه کم)، «زنده بودن» (ایجاد با زمان واخنش در بندهای بسامدی ۵۰۰ به بالا)، «وضوح» و بالا بودن بلندی صدای مستقیم ناشی می‌شود. («زنده بودن»، واخنش و در نتیجه کندی محوشدن را تأمین می‌کند و «صمیمیت» و «وضوح» سبب برجستگی بسامدهای زیر می‌شوند.) برای آنکه فضایی صوتی «درخشنده» باشد، باید زمان واخنش آن در بسامدهای مختلف با یکدیگر متناسب بوده و بازتاب‌های اولیه، فاصله کمی با صدای مستقیم داشته باشند.

۷. **پخشایی** (Diffusion): به توزیع یکنواخت جاذب‌ها و منعکس‌کننده‌ها در بسامدهای مختلف بستگی دارد. اگر امواج صدای منعکس‌شده از هر راستا تقریباً با مقادیر مساوی به گوش شنونده برسد، نتیجه آن پخشایی مطلوب است. زمان واخنش نسبتاً طویل و دیوار و سطوح نامنظم، پخشایش را تا حد ویژگی‌های فضای آکوستیکی مطلوب ارتقاء می‌دهد. این خصیصه در تالارهای کنسرت بیشتر از اپراخانه‌ها مورد نیاز است. (در بخش قبلی توضیح بیشتر درباره پخشایی وجود دارد).

۸. **تعادل و ترکیب** (Balance and Blend): تعادل بیشتر به آرایش ارکستر بستگی دارد و فضا باید پاسخگوی نیاز آنها باشد. ترکیب آمیختن صدای سازها به طوری است که هماهنگ شنیده شوند. تعادل و ترکیب به طراحی صحنه (انعکاس صدا از صحنه: از دیوارهای کناری، عقب و سقف صحنه و از دیوارها و سقف تالار در نزدیکی صحنه) مربوط می‌شود. صحنه‌های خیلی عمیق یا خیلی پهن از این نظر (برای اجرای گروهیِ موسیقی) مشکل ایجاد می‌کنند.

۹. **وحدت صدا** (Ensemble): راحتی شنوایی از سوی اجراکنندگان است. این عامل بیشتر به قطعه موسیقی بستگی دارد تا طراحی دیوارهای منعکس‌کننده اطراف. مسائل طراحی صحنه در آن همانند تعادل و ترکیب است.

۱۰. **حاضرجوابی** (Attack): وابسته به چگونگی بازگشت اولین انعکاس از سمت صحنه به گوش نوازنده است و با صمیمیت (زمان تأخیر اولیه)، زنده بودن (زمان واخنش)، پخشایی (رساندن صدای کافی به انتهای تالار) و نداشتن پژواک تعریف می‌شود. مسلماً تالاری که صفات مثبت ذکرشده را داشته باشد، خودبه‌خود این صفت را نیز خواهد داشت.

۱۱. **بافت** (Texture): وابسته به الگوی توالی به گوش رسیدن انعکاس‌های صدا (تأثیری ذهنی) است. شاخص آن تعداد انعکاس‌های متوالی تا ۱۰ دسی‌بل کمتر از صدای مستقیم است. از آنجا که بافت به تعداد انعکاس‌ها در مدت زمانی معین بستگی دارد، دقت در طراحی سطوح دیوارها، سقف، بالکن‌ها و صحنه می‌تواند بافت خوبی ایجاد کند.این تعداد در تالارهای مستطیل و کم‌عرض بیشتر است.

برای موسیقی ارکستری تعداد ۵ انعکاس یا بیشتر در ۷۰ میلی‌ثانیه اول خیلی خوب است.

۱۲. **رهایی از موانع آکوستیکی** (Freedom from Echo, Noise, Distortion,...): کیفیت آکوستیکی فضایی بسیار مهم دیگر آزادی کامل از موانع آکوستیکی مانند پژواک، نوفه، تمرکز صوت، اعوجاج (واپیچش)، تمرکز و عدم یکدستی صداست. (در مورد این مسائل در بخش‌های قبلی توضیح داده شده است). برطرف کردن پژواک، واپیچش، تمرکز و عدم یکدستی صدا در تالار با طراحی درستِ صفات مثبت، حل‌شده خواهند بود. برطرف کردن نوفه، به دلیل ارتباط زیاد با خارج تالار، راه‌حل‌های خاص خود را دارد.

*۱۳. **گستره پویایی** (Dynamic Range): گستره بین ضعیف‌ترین تا بلندترین صدا در اجرا که فضا باید به تناسب درست به آن پاسخ بدهد. بالاترین حد آن به قوی‌ترین صدای موسیقی و پایین‌ترین حد آن به میزان نوفه زمینه بستگی دارد.*

*۱۴. **کیفیت تنال** (Tonal Quality): حفظ زیبایی صدا در فضا*

*۱۵. **یکدست بودن** (Uniformity): غنی بودن صدا در تمام نقاط فضا، عدم یکدستی صدا برای مثال می‌تواند در انتهای بالکن‌های عمیق که انعکاس صدا به‌طور مناسب به آنجا نمی‌رسد، ایجاد شود.*

*۱۶. **پُری صدا** (Fullness of Tone): ارتباط مستقیم با واخنش در فضا، بلندی صدا نسبت به نوفه زمینه و نسبت بلندی صدای منعکس شده به صدای مستقیم دارد. اگر زمان واخنش در تمامی محدوده بسامد شنوایی کنترل شده باشد، پُری صدا قابل‌توجه خواهد بود. پُری بیش از حد تن صدا را نامفهوم و غیر قابل شنیدن می‌نماید. این صفت با توجه به سرعت موسیقی تعریف می‌شود.*

*۱۷. **تمبر و زنگ صدا** (Timber and Tone colour): شاخص تمایز صدای سازها از هم که باید در فضا مخدوش نشود.*

تمبر و زنگ صوت باید در همه جای تالار یکسان باشد. کم و زیاد شدن جاذب‌ها باعث می‌شود صدای سازها عوض شود یا قسمت زیر و بم آنها شدتش کم شود و صدا به قسمتی از تالار نرسد.» [Beranek، 1962 ـ بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۵۰ و ۲۵۱ ـ شیرودی، ۱۳۷۴، ص ۱۴۲ ـ حق‌دوست، ۱۳۷۷، ص۲۲۴ و ۲۲۵]

با توجه به آنچه که درباره صفات آکوستیکی فضا گفته شد، می‌توان گفت برخی از آنها برای موسیقی ایرانی (مخصوصاً انواع تکنوازی و اجراهای گروهی کوچک آن) مناسبند و صفاتی که مربوط به آرایش ارکستر و مسائل اجراهای گروه‌های بزرگ هستند،کاربرد ندارند. اما از آنجا که *«بسیاری از این صفات نامعلوم و در دست تحقیق هستند»* [گفته‌های شفاهی دکتر مولانا]، در اینجا اشاره‌ای به چگونگی تأثیر طرح معماری بر ایجاد این صفات آکوستیکی برای نوع خاصی از موسیقی (که نگارنده استخراج کرده است) می گردد.

بنابراین این صفات مورد بررسی قرار می‌گیرند: *صمیمیت یا حضور، زنده بودن، گرمی (لطف)، نسبت بلندی صدای مستقیم به واخنشی، پخشایی، وضوح یا روشنی، درخشندگی، حاضرجوابی، بافت، پُری صدا و رهایی از موانع آکوستیکی.*

صفت پخشایی برای طراحی فضای اجرای همه انواع موسیقی لازم است. رهایی از موانع آکوستیکی (نوفه، پژواک و تمرکز) نیز همانند پخشایی در تمام تالارها مورد نیاز هستند. بنابراین در اینجا سایر صفات بررسی شده‌اند.

در میان این صفات، برخی وابسته به صفات دیگر و برخی مستقل هستند. صفات مستقل به نوع موسیقی (روحیات اجرای آن موسیقی به‌طور کلی، سرعت و ریزه‌کاری‌های آن موسیقی، گستره بسامدی و نیز بلندی صدای سازهای آن) وابسته هستند. صفات مستقل از این قرارند: *صمیمیت یا حضور، زنده بودن، گرمی، نسبت بلندی صدای مستقیم به واخنشی.*

در ادامه با توجه به صفات مذکور، سه جدول خواهد آمد:

۱. جدول ارتباط صفات ذهنی مستقل و وابسته کیفیت آکوستیک فضا.
۲. جدول ارتباط مشخصه‌های آکوستیک معماری و صفات مستقل کیفیت آکوستیک فضا.
۳. جدول ارتباط عوامل پدیدآورنده معماری و مشخصه‌های آکوستیکی.

هدف از این دسته‌بندی کمک کردن به طراحان معمار برای شناخت نحوه تأثیرگذاری معماری بر آکوستیک داخلی، با توجه به نوع موسیقی مفروض، است. در صورتی که صفات لازم برای نوع خاصی از موسیقی مشخص گردد، با توجه به جدول شماره ۱ نوع و اهمیت صفات مستقل مورد بررسی، در جدول شماره ۲ خصوصیات آکوستیکی موردنیاز و در جدول شماره ۳ نیازهای طراحی معماری این فضا، به‌طور کلی مشخص خواهد شد.

(در جدول‌ها ▲ علامت رابطه مستقیم و ▼ علامت رابطه معکوس است.)

جدول ۴/۴/۱/۲/۴، رابطه صفات ذهنی مستقل و وابسته کیفیت آکوستیک فضا

صفات مستقل / صفات وابسته	صمیمیت	زنده بودن	گرمی	نسبت بلندی صدای مستقیم به واخنشی
وضوح یا روشنی *	▲		▼	▲
درخشندگی	▲	▲	▼	▲
حاضرجوابی	▲	▲		
بافت	▲			▼
پُری صدا		▲	▲	▼

* در موسیقی ایرانی به دلایل ذکرشده، وضوح یا روشنی افقی (در طول زمان) مورد بررسی است.

جدول ۴/۴/۱/۲/۵، رابطه مشخصه‌های آکوستیکی و صفات مستقل کیفیت آکوستیک فضا

مشخصه‌های آکوستیکی / صفات مستقل	زمان واخنش		زمان تأخیر اولیه	نسبت $\frac{T_{500-1000}}{V}$	نمودار انعکاس (داشتن انعکاس‌های متوالی)
	بسامد بالا	بسامد پایین			
صمیمیت			▼		▲
زنده بودن	▲				
گرمی		▲			
نسبت بلندی صدای مستقیم به واخنشی	▼	▼		▼	▼

جدول ۴/۴/۱/۲/۶، رابطه عوامل پدیدآورنده معماری و مشخصه‌های آکوستیکی

عوامل معماری / مشخصه‌های آکوستیک معماری	حجم فضا	هندسه			مصالح	
		نسبت ابعاد (باریکی)	نامنظمی سطوح	فاصله تا منبع صدا	جذب‌کننده بسامد بالا	جذب‌کننده بسامد پایین
زمان واخنش	▲		▲		▼	▼
زمان تأخیر اولیه	▼	▲				
نسبت $\frac{T_{500-1000}}{V}$					▼	▼
نمودار انعکاس (داشتن انعکاس‌های متوالی)	▼	▲	▲	▼	▼	▼

۱/۳/۴. وسایل الکتروآکوستیکی

وسایل الکتروآکوستیک وسایلی هستند که در صدارسانی مصنوعی به‌کار می‌روند (مانند میکروفن و بلندگو). استفاده صحیح از این وسایل در مواقعی است که صدارسانی زنده امکان‌پذیر نباشد (مثلاً در شنودسراهای بزرگ). *«بر اساس تجربه سالنی با حداکثر ۳۰۰ صندلی برای صدارسانی زنده مناسب دانسته شده است.»* [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۱۹۳]

«تأمین تراز صدای کم و بیش یکسان برای همه شنوندگان در سالن، از طریق تنظیم فرم هندسی و شرایط آکوستیک داخلی امکان‌پذیر است چون نتیجه‌ای که از این طریق به‌دست می‌آید با عملکرد «طبیعی» فضای موردنظر سازگار است و لذا، از پایداری و طول عمر مفید زیادی برخوردار است و در ضمن، به تعمیرات و نگهداری چندانی هم نیاز ندارد. این نوع طراحی تحت عنوان صدارسانی «طبیعی» یا «زنده» و عاری از کمک‌های الکتروآکوستیکی شناخته می‌شود. اما به دلیل محدود بودن توان صوتی منبع، این طرح‌ها به تعداد شنوندگان وابسته می‌شوند. بنابراین گنجایش زیاد در سالن باعث می‌شود دو راه انتخاب کنیم: ۱. طراحی سالن به طوری که فقط بخش خاصی از صندلی‌ها وضعیت مطلوب داشته باشند. ۲. فقدان بلندی صدا در نقاط «کور» سالن را با توسل به صدارسانی الکتروآکوستیکی جبران کنیم.

از آنجا که در کشور ما استفاده از وسایل الکتروآکوستیک (مانند بلندگو، میکروفن و...) به صورت صحیح و حساب‌شده نیست، اکثر قریب به اتفاق شنودسراها، که خود آنها نیز معمولاً طرح آکوستیکی ندارند، دچار مشکل صدارسانی زنده و مصنوعی هستند. بنابراین از آنجا که معمولاً نواقص و مشکلات اساسی دارند، نیاز به اصلاح آکوستیکی و الکتروآکوستیکی پیدا می‌کنند و روش‌های متفاوت اصلاح آنها هزینه طراحی، اندازه‌گیری و محاسبه را بالا می‌برد. قیمت وسایل الکتروآکوستیکی مورد نیاز نیز در این موارد زیاد خواهد بود. سیستم باقی‌مانده نیز به تعمیر و نگهداری نیاز دارد و لذا هر چه پیچیده‌تر باشد، مخارج درازمدت آن بیشتر می‌شود. ضمن اینکه با وجود این همه هزینه، وضع به وجودآمده نمی‌تواند همتای طبیعی خود را تحویل دهد. بنابراین عقل حکم می‌کند که انسان به دنبال طرح‌های صدارسانی طبیعی بوده و فقط در شرایط ناچاری، کمبودهای موجود و شناخته‌شده را با توسل به یک سیستم الکتروآکوستیکی نسبتاً کوچک جبران کند.» [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۳۶ و ۱۳۷، با تلخیص]

«با این حال، در صورت صدارسانی زنده در یک شنودسرا هم ممکن است فعالیت‌های شنودی‌ای که نیازمند وسایل الکتروآکوستیک هستند (با منظور تأتر و موسیقی) انجام شود. این فعالیت‌ها را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد:

۱. پخش صداهای متنوع و موردنظر در داخل سالن،...

۲. *ضبط کردن صداهایی که در داخل سالن تولید می‌شوند برای مصارف آتی،...»* [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۳۱]

«استفاده دیگر سیستم‌های الکتروآکوستیک در شنودسراها به منظور اضافه کردن زمان واخنش است.» [مولانا، درس آکوستیک داخلی]

در استفاده از وسایل الکتروآکوستیکی *«شنونده نباید متوجه شود که بخشی از صدایی که می‌شنود، تقویت شده است. اگر صدای بلندگو همزمان با صدای اصلی به شنونده نرسد، تفاوت سرعت انتقال صوت به‌وسیله برق و انتقال طبیعی آن باعث می‌شود که شنونده نخست صدای بلندگو را بشنود و حس کند که صدا در اصل از بلندگو است و در واقع صدا و تصویر را از یک نقطه دریافت نکند. در این حالت باید در انتقال الکتریکی صوت تأخیر ایجاد کرد تا چنین حالتی ایجاد نشود، چون از نظر روانی حالت صحیحی نیست. در صورت ایجاد تأخیر، صدای بلندگو مانند یک انعکاس عمل می‌کند، با این تفاوت که شدت آن، بر خلاف انعکاس‌های طبیعی، از شدت صدای مستقیم بیشتر است.»* [مولانا، درس آکوستیک داخلی]

به‌طور کلی سیستم الکتروآکوستیکی یک شنودسرا، وابسته به همان فضاست، نگهداری آن مشکل است، نباید دستکاری شود و نیاز به افراد متخصص دارد. در صورت نبودن چنین شرایطی بهتر است شنودسراها برای صدارسانی زنده طراحی شوند.

۱/۳/۵. اندازه‌گیری پس از اجرا

«در طراحی آکوستیکی یک فضا، اندازه‌گیری کردن شرایط نهایی یک وضعیت موردنظر (پس از اجرا) تنها راهی است که می‌توان به تحقق یافتن آن پی برد و انجام دادن مانورهای ریاضی گوناگون انسان را لزوماً به مقصد نمی‌رساند (مشابه نقش آزمایش‌های پزشکی در تشخیص بیماری).» [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۲۶]

«فراسنج‌های مهم سنجش وضعیت آکوستیکی یک سالن زمان واخنش و تراز نوفه هستند. زمان واخنش کمیتی است که می‌توان با آن وضعیت آکوستیکی یک سالن را کنترل کرد. برسنج نوفه و واخنش به مسائل فیزیک‌روانی مربوطند. بنابراین علاوه بر اندازه‌گیری آکوستیکی آنها، احساس شنونده‌ها از این دو فراسنج صوتی با نظرخواهی و پرسشنامه اندازه‌گیری می‌شود.

اگر نوفه زمینه بالا باشد و زمان واخنش هم زیاد باشد، وضوح گفتار در سالن مخدوش می‌شود و برای شنوندگان ایجاد خستگی می‌کند. این دو عامل را می‌توان به صورت ترکیبی بررسی کرد، اما بررسی جدای آنها کار را ساده‌تر می‌کند.» [مکانیک و مولانا[ب]، ۱۳۷۹، ص ۳۳ تا ۳۵]

۱/۳/۶. طراحی فضای باز یا نیمه‌باز بر اساس اصول آکوستیک

اجرای موسیقی در فضای باز یا نیمه‌باز یکی از علاقه‌های برخی نوازندگان است که در صورت وجود شرایط مناسب (مثل نبودن نوفه و شرایط مناسب آب‌وهوایی) ممکن است بر اجرا در فضای بسته ترجیح داده شود. از آنجا که در فضای باز صدای واخنشی وجود ندارد، اجرای موسیقی در فضای باز یا نیمه‌باز برای تعداد افراد زیاد نیازمند استفاده از وسایل الکتروآکوستیک است. برای رساندن صدا به تعداد افراد کمتر از فضای بسته می‌توان از تمهیداتی مانند سطوح منعکس کننده صدا به‌سمت شنوندگان در فضایی محدود استفاده نمود که در اینجا عنوان می گردند.

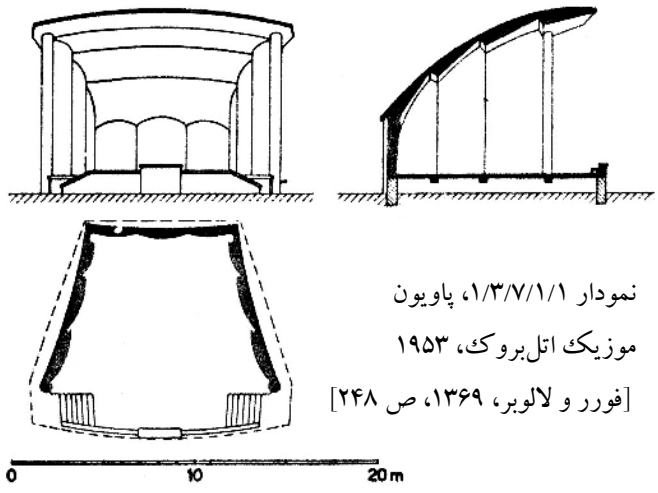
۱/۳/۶/۱. محل نوازندگان

«در فضای باز به علت نبودن بازتاب‌های متناسب، اجرای موسیقی توأم با اشکالات فراوانی است که در صورت وجود فضای مسقف (پاویون)، این اشکالات نیز به علت سرپوشیده شدن محل ارکستر برطرف می‌گردد.

برای مطالعه در فرم ساختمان و ابعاد این فضای نیمه‌باز اطلاعات اجمالی درباره آکوستیک هندسی (ترسیمی) کفایت می‌نماید و احتیاج به بررسی عمیق‌تری ندارد. در صورت لزوم بررسی در میدان صدا نیز ممکن است.

به‌طور کلی می‌توان گفت که (ساختمان) این فضا یک منعکس‌کننده است که سرچشمه صدا معمولاً در کانون آن قرار نگرفته بلکه در داخل آن متفرق است. از این رو صدای سازهایی که به کانون منعکس‌کننده برای جهات مختلف مقابل آن نزدیک‌تر باشند قوی‌تر و بقیه ضعیف‌تر به گوش می‌رسد و در نتیجه پخشایی (صدا) به‌هم خورده در شنوایی و طبیعی بودن صدای موسیقی تأثیر نامطلوبی می‌نماید. از این رو بهتر است که داخل این فضای نیمه‌باز با سطوح برجسته ساخته شود تا پخشایی (صدا) ازدیاد یابد و این عیب مرتفع گردد و با این تدبیر شنوایی در داخل پاویون نیز بهتر گردد.

در شکل روبرو یک فضای نیمه‌باز برای ارکستر که در سال ۱۹۵۳ در لوکزامبورگ بنا گردیده است، به طور نمونه نمایش داده شده است. زاویه سقف و دیوارهای جانبی این پاویون به طرف سطحی که توسط تماشاگران اشغال می‌گردد تعیین گردیده است و مساحت آن نیز



نمودار ۱/۳/۷/۱/۱، پاویون موزیک اتل‌بروک، ۱۹۵۳
[فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۲۴۸]

متناسب با تعداد اعضاء ارکستر می‌باشد. سقف این پاویون را برای جلوگیری از ارتفاع نامناسب به سه قسمت تقسیم نموده‌اند که ضمناً قسمت‌های مختلف آن و همچنین برجستگی‌های دیوارهای جانبی و عقبی در پخشا نمودن میدان آکوستیکی سهم بسزایی دارند. تأثیر فضای فوق در شنوایی خوب و رسایی صدای ارکستر قابل ملاحظه می‌باشد.» [فورر و لالوبر، ۱۳۶۹، ص ۲۴۸ و ۲۴۹]

۱/۳/۶/۲. محل شنوندگان

«صوت (در فضای کاملاً باز) با هر بار دو برابر شدن مسافت طی‌شده، شدتش ٪۲۵ می‌شود. این کاهش در یک شنودسرای روباز مقدار بیشتری دارد، چرا که صوت به هنگام عبور از بالای سر افراد، توسط جمعیت جذب می‌شود. ازاین‌رو رومیان قدیم با آگاهی از این مهم، ردیف‌های پلکانی شنوندگان را طوری می‌چیدند که شنوندگان تا حد ممکن به اجراکنندگان نزدیک بوده و صدا به راحتی در مسیر دید شنوندگان به گوش آنها برسد.» [ریخته‌گرمشهد، ۱۳۸۰، ص ۱۲۰]

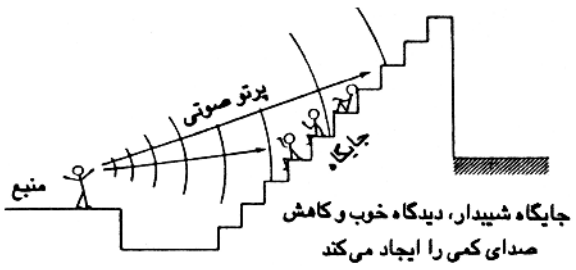
«به‌طورکلی راه‌های عملی برای بهبود وضع آکوستیکی شنودسراهای روباز را می‌توان اینچنین بیان نمود:

۱. با کم کردن صداهای مزاحم محیط اطراف (نوفه): با انتخاب محل مناسب برای سایت، که به دور از اغتشاشات باشد و همچنین استفاده از دیوارها یا حائل‌هایی که جلوی صدا را بگیرند، می‌توان نوفه محیط را کم نمود.

نمودار ۱/۳/۷/۲/۱، ایجاد سایه صوتی به واسطه وجود مانع
[بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۴۱]

۲. با تدارک دیدن امکانات مناسب برای اجراکنندگان [بخش ۱/۳/۷/۱]. *همچنین می‌توان با استفاده از وسایل الکتروآکوستیک، صوت را به صورت مناسب پخش نمود.*

۳. با در نظر گرفتن دید مناسب و صدای خوب برای شنوندگان: با پله‌پله کردن ردیف‌ها و کم‌کردن فاصله بین شنوندگان و اجراکنندگان و گاهی با بلندگوها، می‌توان مسیر صدا و دید را به‌طور مستقیم طراحی کرد.» [ریخته‌گرمشهد، ۱۳۸۰، ص ۱۲۱]



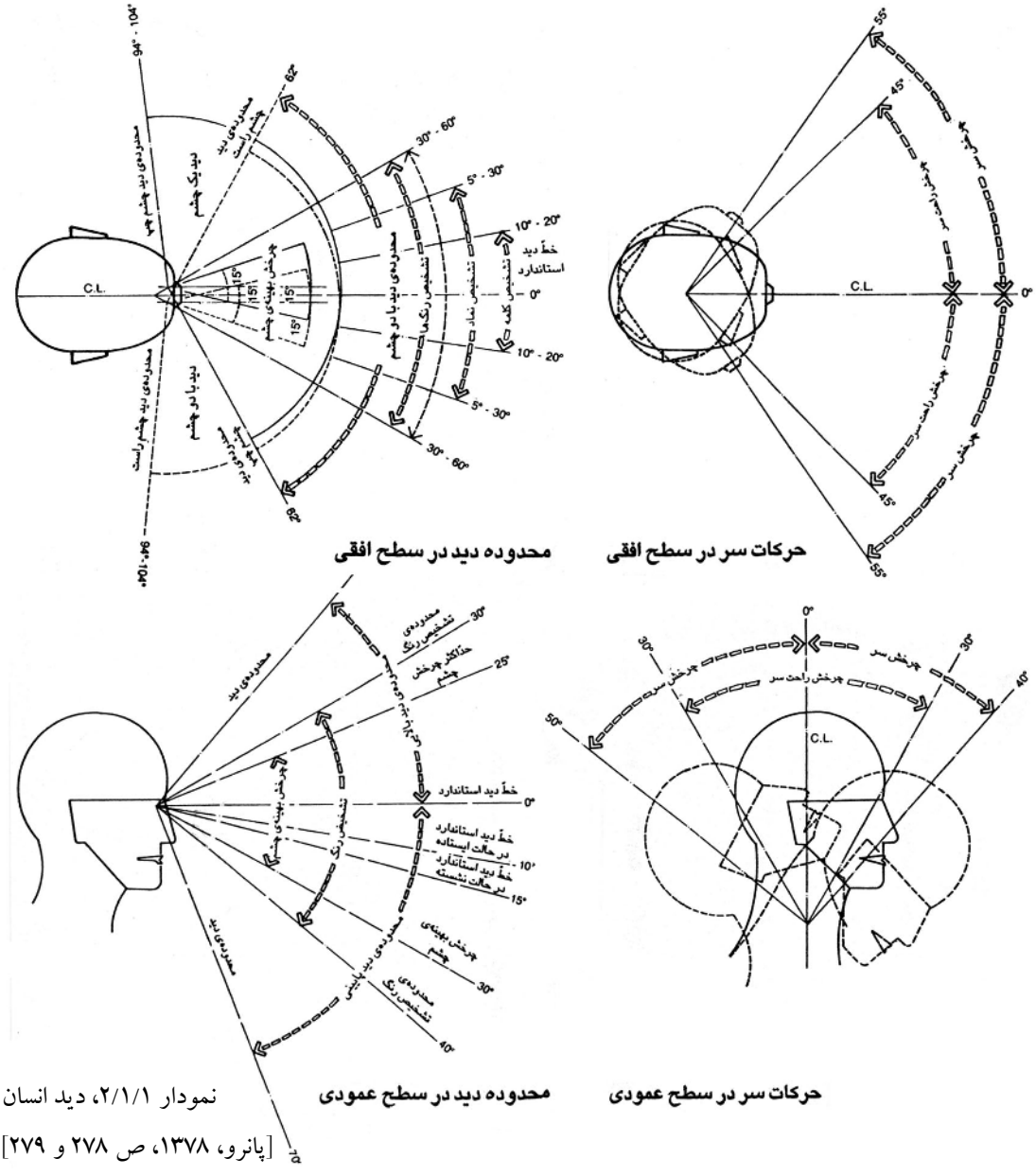
نمودار ۱/۳/۷/۲/۲، جایگاه شیبدار
[استین، ۱۳۷۸، ص ۶۷]

۲. ملاحظات دیداری

یکی از عوامل مهم در نحوه تجمع افرادی که به منظوری خاص (مانند شنیدن موسیقی) در یک فضا گردهم می‌آیند، دید آنها به موضوع موردنظر (مانند نوازندگان) است. بنابراین ملاحظات دیداری در تعیین کردن شکل داخل شنودسرا دخالت دارند. *«برای مثال در طراحی سالن تأتر، فاصله تماشاچیان از صحنه نباید زیاد شود ولی در سالن سینما امکان‌پذیراست. در عوض افزایش زاویه دید نسبت به محور سالن، در تأتر راحت‌تر صورت می‌گیرد.»* [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۳۰]

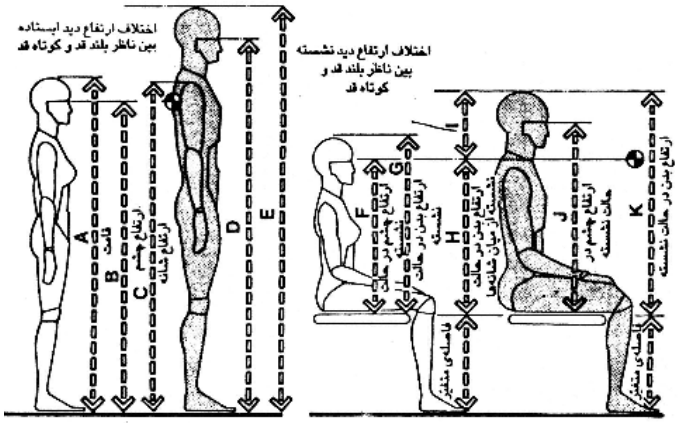
۲/۱. دید انسان

اولین قدم در این راه، شناخت فیزیک دید انسان، مانند ابعاد بدن و یا دامنه حرکات سر و میدان‌های دید در سطوح افقی و عمودی، است:



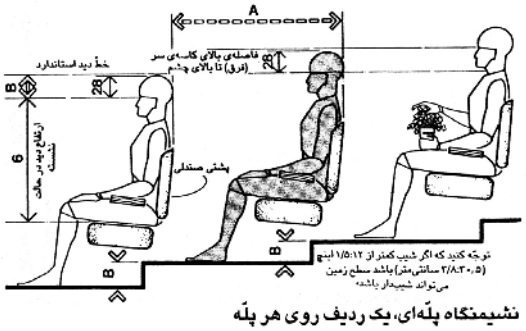
نمودار ۲/۱/۱، دید انسان
[پانرو، ۱۳۷۸، ص ۲۷۸ و ۲۷۹]

	سانتی‌متر
A	۱۴۹/۹
B	۱۴۳
C	۱۴۶/۸
D	۱۷۴/۲
E	۱۸۴/۹
F	۷۱/۴
G	۷۵/۲
H	۶۹/۳
I	۲۳/۶
J	۸۶/۱
K	۹۳

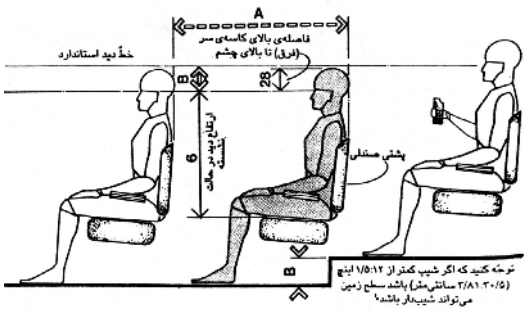


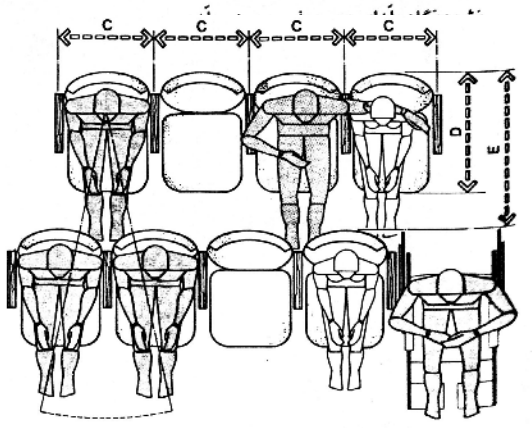
اندام‌سنجی مقایسه‌ای برای ناظران نشسته و ایستاده

نمودار ۲/۱/۲، اندام‌سنجی ناظران نشسته و ایستاده [پانرو، ۱۳۷۸، ص ۲۸۶]



نشیمنگاه پله‌ای، یک ردیف روی هر پله

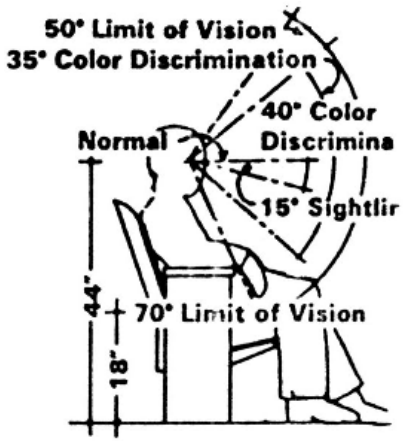


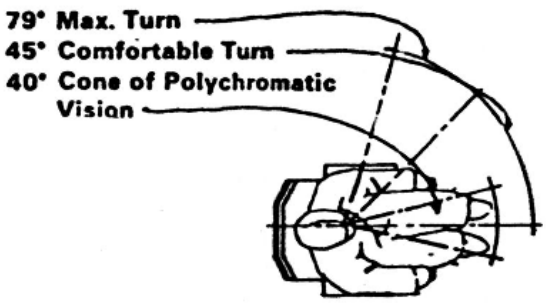


نشیمنگاه نامنظم (ناهماهنگ)

	سانتی‌متر
A	۱۰۱/۶
B	۱۲/۷
C	۵۰/۸–۶۶
D	۶۸/۶–۷۶/۲
E	۸۶/۴–۱۰۶/۷

نمودار ۲/۱/۳، ابعاد صندلی‌ها [پانرو، ۱۳۷۸، ص ۲۸۷]





نمودار ۲/۱/۴، زوایای دیدافقی [ایزدی، ۱۳۷۹، ص۱۵۱] نمودار ۲/۱/۵، زوایای دیدعمودی [ایزدی، ۱۳۷۹، ص۱۵۲]

۲/۲. چیدن صندلی‌ها

یکی از مسائل مهم در شکل دادن به نحوه نشستن افراد، ظرفیت تالار است. البته در فضایی که برای اجرای موسیقی طرح می‌شود، حجم فضای بسته با ملاحظات صوتی بیشتر ارتباط پیدا می‌کند، اما در نظر گرفتن دید خوب به نوازنده(ها) نیز برای افراد ضروری است.*

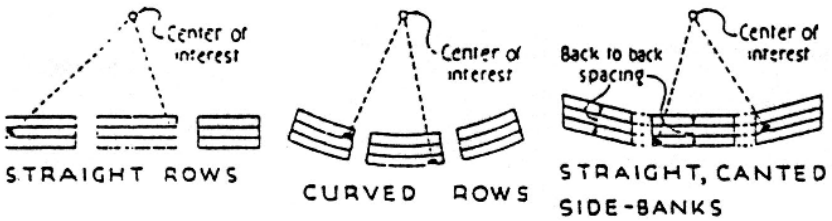
در شروع کار طراحی باید نوع صندلی مشخص شود. صندلی‌ها را معمولاً در ردیف‌های خطی، منحنی یا زاویه‌ای می‌چینند. با امتحان کردن سایر ترتیب‌های چیدن صندلی، می‌توان به بهترین وجه مرکز شعاع ردیف‌های صندلی را تعیین نمود. شعاع کوچک باعث می‌شود که همه تماشاگران بتوانند به‌صورت رو به مرکز صحنه بنشینند اما باید فضای کافی برای حرکت افراد در بین صندلی‌ها در نظر گرفته شود.

جدول۲/۲/۲، جدول فاصله و تعداد صندلی‌ها در هر ردیف تالار [شیرودی، ۱۳۷۴]

حداکثر تعداد صندلی (عرض ۵۰ سانتیمتر) در هر ردیف		حداکثر فاصله صندلی از راهرو (سانتیمتر)	حداقل فاصله عبور بین صندلی‌ها (سانتیمتر)
راهرو در یک طرف	راهرو در دو طرف		
۷	۱۴	۳۰۰	۳۰
۸	۱۶	۳۵۰	۳۲/۵
۹	۱۸	۴۰۰	۳۵
۱۰	۲۰	۴۵۰	۳۷/۵
۱۱	۲۲	۵۰۰	۴۰

«برای ایجاد دید رضایت‌بخش برای تماشاچیان پلان و مقطع باید محدودیت‌هایی داشته باشد:

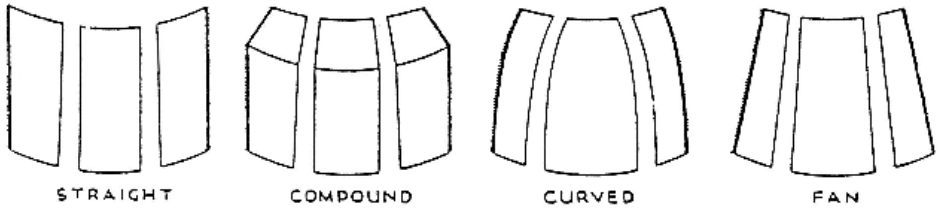
۱. شنوندگان تمام صندلی‌ها از نظر بصری با جهت‌گیری خود با برنامه (نوازنده) مربوط می‌شوند. این باعث می‌شود که در حالت ایده‌آل صندلی‌ها قوسی‌شکل قرار گیرند و لزوماً نباید مرکز شعاع مرکز پرده باشد، گرچه این حالت ایده‌آل است.



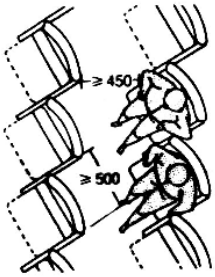
نمودار ۲/۲/۱، انواع حالات چیدن صندلی [شیرودی، ۱۳۷۴، ص ۱۱۰]

* برای مشاهده ابعاد و اندازه‌های قرارگیری صندلی‌های شنودسرا نسبت به هم، ر.ک. نویفرت ۱۳۷۷ و لیاقتی، ۱۳۶۷ و پانرو، ۱۳۷۸.

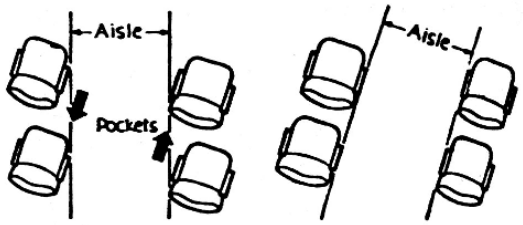
۲. برای منظور دیدن، راهروهای شعاعی بهترین هستند و با راهروهای قوسی کارآیی کمی کاهش می‌یابد. اگر راهرو در وسط قرار گیرد، مطلوب‌ترین صندلی‌ها را از بین می‌برد. راهروها باید به‌طور عمود با ردیف‌ها و صندلی‌ها برخورد کند تا ایجاد گوشه بین صندلی‌های دو ردیف نشود.



نمودار ۲/۲/۲، انواع راهروها [شیرودی، ۱۳۷۴، ص ۱۱۰]



نمودار ۲/۲/۳، صندلی‌های تاشو و زاویه‌دارمحلی برای گذاشتن آرنج [نویفرت، ۱۳۷۷، ص ۳۵۱]



نمودار ۲/۲/۴، جهت راهروها [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۵۴]

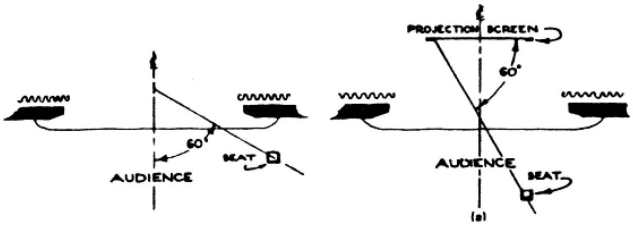
۳. برای تعیین عمق فضا:

۳/۱. چشم معمولی انسان می‌تواند تغییر مکانی به اندازه یک دقیقه قوسی را تشخیص دهد. این به معنی یک فاصله ۰/۴۵ سانتیمتر در فاصله ۱۵ متری است، بنابراین جزئیات چهره نوازندگان در فواصل بیش از ۱۵ متر دیده نمی‌شود (و به همین ترتیب جزئیات چهره شنوندگان برای نوازنده).

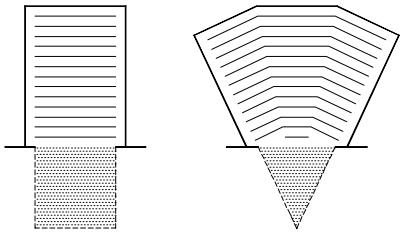
۳/۲. اگر مسائل اقتصادی وجود نداشته باشد، عمق ماکزیمم ۱۵ متری از صحنه برای آخرین ردیف‌ها مطلوب است و اگر ناچار به تجاوز از این حد باشیم بهتر است از ۲۲/۵ متر تجاوز نکنیم.» [شیرودی، ۱۳۷۴، ص ۱۱۷ و ۱۱۸]

۴. «برای انتخاب محل صندلی‌ها، نقاط نزدیک به محل اتصال دو جدار را نباید برای شنیدن صدا مورد استفاده قرار داد، چون تغییراتی که این‌گونه نقاط در مقایسه با محل صندلی‌های وسط سالن در بیناب صدا به‌وجود می‌آورند، بیش از حد قابل قبول است. در عمل توصیه می‌شود که نزدیکترین صندلی‌ها حداقل یک متر و ترجیحاً ۱/۵ متر از کناره‌های کف سالن فاصله داشته باشند. این مطلب به محل تلاقی سه جداره نیز مربوط می‌شود. بنابراین بهتر است که گوشه‌ترین صندلی‌ها حداقل ۱/۵ متر و ترجیحاً ۲ متر از گوشه‌های سالن فاصله داشته باشند.» [مولانا، ۱۳۶۷، ص ۴۰ و ۴۱]

از آنجایی که در ردیف‌های انتهایی کیفیت دید افت می‌کند، لذا به نظر می‌رسد که با پهن‌تر کردن صحنه و ردیف‌های جلو بتوان عده بیشتری را نزدیک به صحنه جمع نمود. اما عرض زیاد مشکلات سازه‌ای را افزایش داده، هزینه را بالا می‌برد و تعداد صندلی‌ها بین دو راهروی عبوری در تالار را افزایش می‌دهد که سبب مزاحمت سایر تماشاچیان به هنگام عبور فرد دیگر می‌شود. با کم شدن عمق فضا پیش‌بینی بالکن و تأمین زوایای دید مناسب برای آن با مشکل مواجه شده و نهایتاً منجر به پایین آمدن ظرفیت تالار می‌شود. با عرض زیاد صحنه تماشاچیان در گوشه‌های جلوی تالار عمق کمتری از صحنه می‌بینند.» [شیرودی، ۱۳۷۴، ص ۹۸]



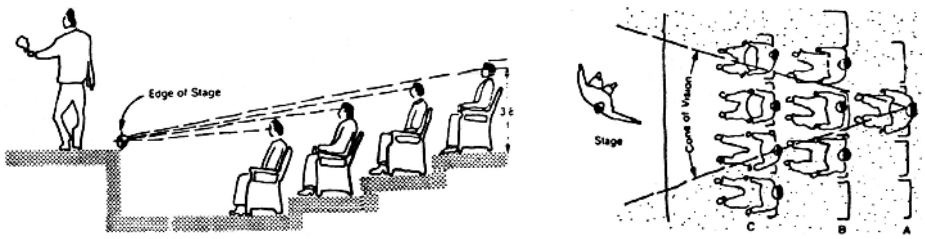
نمودار ۲/۲/۵، زاویه افقی خط وسط صحنه با ردیف‌های کناری [ایزدی، ۱۳۷۹،ص ۱۵۱]



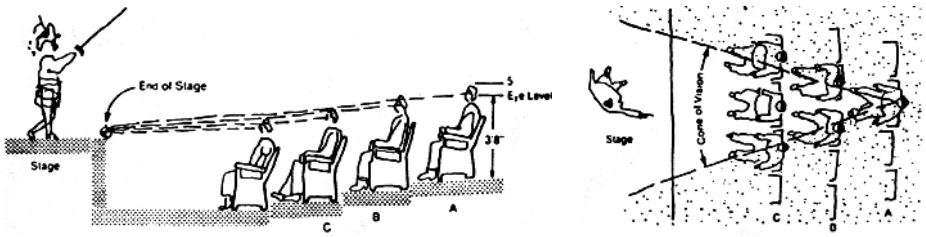
نمودار ۲/۲/۶، مناطق قابل دید صحنه با توجه به چیدن صندلی‌ها [شیرودی، ۱۳۷۴، ص ۹۹]

۲/۳. شیب کف

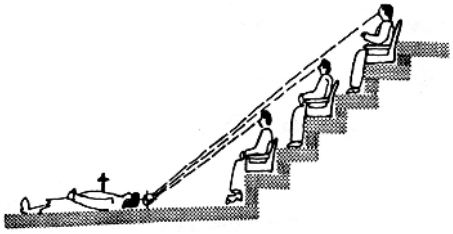
صندلی‌ها باید به‌گونه‌ای طراحی شود که خط دید یک تماشاچی، درست از بالا و میان سر تماشاچیان جلو عبور کند. به این منظور کف فضا ترجیحاً باید شیبدار باشد. در این صورت طریقه چیدن صندلی‌ها یا پشت‌سر یکدیگر بوده و یا به‌صورت یک در میان است، یعنی ناظر از بین سر دو نفر جلویی خود صحنه را می‌بیند. این روش چیدن صندلی بهترین حالت بوده و شیب کف را کاهش می‌دهد. در صورتی که صندلی‌ها پشت سر یکدیگر قرار گیرند، هر ناظر سر تماشاچی جلویی را مقابل خود خواهد دید و از این‌رو اختلاف سطح دو ردیف صندلی باید بیشتر باشد.



نمودار ۲/۲/۷/۱، قرارگیری صندلی‌ها به‌صورت پشت هم شیب را افزایش می‌دهد.



نمودار ۲/۲/۷/۲، قرارگیری صندلی‌ها به‌صورت یکی‌درمیان پشت هم شیب را کاهش می‌دهد.



نمودار ۲/۲/۷/۳، شیب زیاد امکان دید را افزایش داده، سکوی صحنه را از بین می‌برد. [ایزدی، ص ۱۵۲ و ۱۵۳]

شیب کف علاوه بر نحوه دید، با مشخصه‌های آکوستیکی فضا نیز مرتبط است. به‌خاطر داشتن دید مناسب و کم شدن توان صدا در فواصل دورتر، باید ردیف‌ها نسبت به ردیف جلویشان قدری بلندتر باشند. خط دید مناسب خطی است که هیچ مانعی آن را قطع نکند و برای بهتر دیدن صحنه تماشاچی مجبور نباشد که سر را بچرخاند یا به جلو خم شود.

۲/۳/۱. ترسیم شیب کف در مقطع

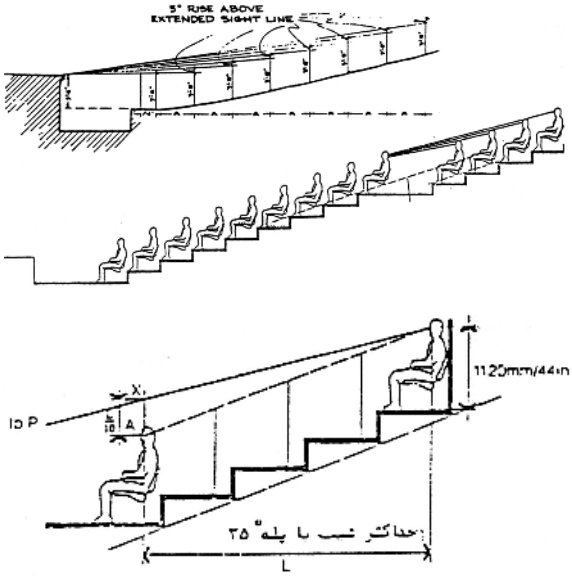
۱. «یک خط دید از وضعیت چشم به لبه پایینی صحنه می‌کشیم و آن را تا پشت وضعیت چشم برای ردیف اول امتداد می‌دهیم، فضای افقی را برای صندلی در نظر می‌گیریم (پشت به پشت) و خطوط عمودی در نقاطی که بدین ترتیب تعیین می‌شود رسم می‌کنیم.

۲. یک نقطه ۱۲/۵ سانتیمتر (فاصله چشم تا بالای سر) بالای تقاطع خط دید و خط عمودی بعدی تعیین می‌کنیم.

۳. این وضعیت چشم در ردیف دوم است.

با تکرار این کار شیب زمین ترسیم می‌شود. جایی که شیب به حدود ٪۱۲/۵ برسد در زیر صندلی‌ها سکو احتیاج است و راهروها پلکانی می‌شود. در بالکن‌ها خطوط دید از عقب به جلو چیده می‌شوند، چون تغییر شیب بالکن خطرناک است.

به‌طور معمول اختلاف ارتفاع دو ردیف پشت هم را در صورت پشت هم چیدن صندلی‌ها ۱۰ سانتیمتر و در صورت یکی در میان پشت هم چیدن صندلی‌ها ۷/۵ سانتیمتر در نظر می‌گیرند.» [شیرودی، ۱۳۷۴، ص ۱۱۹]

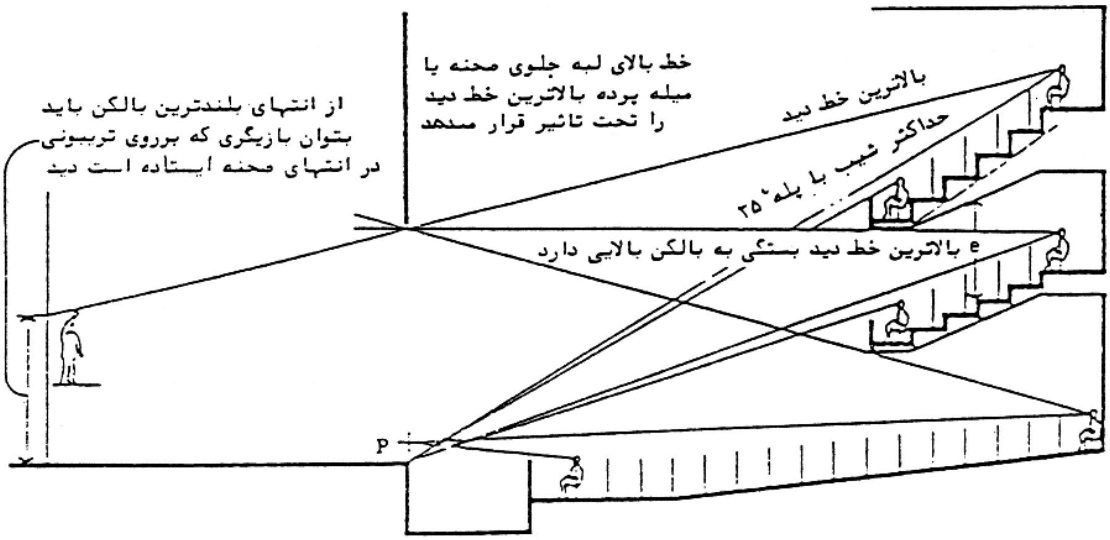


نمودار ۲/۳/۱/۱، روش ترسیم شیب کف در همکف و بالکن [شیرودی، ۱۳۷۴، ص ۱۱۹]

۲/۴. بالکن‌ها

یکی از راه‌های زیاد کردن ظرفیت فضا و استفاده بیشتر از فضا و نیز کاهش فاصله ماکزیمم از صحنه، به‌کار بردن نیم‌طبقه یا بالکن است. اما باید توجه داشت که زیر سقف بالکن‌ها دید افراد طبقه پایین را محدود نکند. تنظیم صدا در این فضاها یکی از مشکلات اساسی است.

«در بالکن‌ها بیشینه زاویه دید از بالکن به صحنه ۳۰ درجه است.» [شیرودی، ۱۳۷۴، ص ۱۰۷]



نمودار ۲/۴/۱، خطوط دید قائم [شیرودی، ۱۳۷۴، ص۱۰۴]

۲/۵. انواع شنودسراها (از نظر نحوه نشستن افراد)

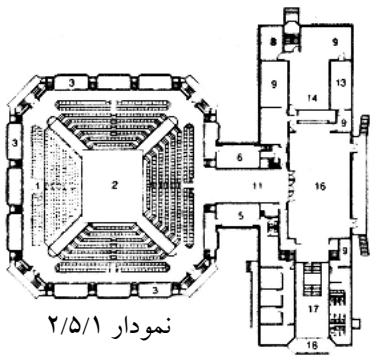
«به‌طور کلی سالن‌های کنسرت به دو دسته قابل تقسیم هستند:

۱. سالن‌های کنسرت بدون اتاق صحنه: ساده‌ترین نوع سالن که برای کنسرت طراحی شده و یک صحنه دائمی دارد. بین تماشاچی و صحنه تقسیم‌بندی فضایی وجود ندارد. بعضی نمونه‌های مورد قبول موسیقیدانان از این نوع سالن است. برای برنامه‌های تکنوازی یا گروه‌های کوچک، پانل‌های سخت چوبی با ارتفاع حدود ۳ تا ۴/۵ متر باید در پشت اجراکنندگان برای جلوگیری از ایجاد پژواک و افزایش وضوح قرار گیرد. ساخت دقیق این پانل‌ها جلوی اعوجاج صدا را خواهد گرفت.

۲. سالن‌های کنسرت با اتاق صحنه: اکثر آنها دارای فضای جلوی صحنه بین ۱۸ تا ۳۶ متر عرض هستند و ۲ تا ۶ هزار نفر ظرفیت دارند. به واسطه قرار گرفتن ارکستر در پشت فضای جلوی صحنه، معمولاً این سالن‌ها کیفیت خوبی ندارند.» [شیرودی، ۱۳۷۴، ص ۱۴۷ و ۱۵۱]

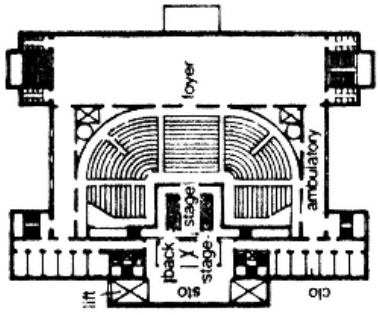
نحوه چیدن افراد شنونده یا تماشاگر در اطراف اجراکنندگان یک برنامه، به چند حالت ممکن است: [با استفاده از مطالب: ایزدی، ۱۳۷۹ ـ تشرفی، ۱۳۸۱ ـ حق‌دوست، ۱۳۷۷ ـ شکوفی مقیمیان، ۱۳۷۱ ـ شیرودی، ۱۳۷۴ ـ نویفرت، ۱۳۷۷]

۱. ۳۶۰ درجه (مرکزی، جزیره‌ای): این سالن نسبت به سایر سالن‌ها بیشترین گنجایش را دارد. هنرمندان و حضار در یک محل هستند و حضار بیشتری فاصله کم با صحنه دارند اما برخی افراد در پشت اجراکنندگان قرار می‌گیرند. ورود به صحنه از زیر صحنه یا از میان تماشاچیان، شبیه سیرک است. این سالن پرده صحنه، دکور، پشت صحنه و... ندارد. در حالت یک طبقه می‌تواند حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ نفر ظرفیت داشته باشد.



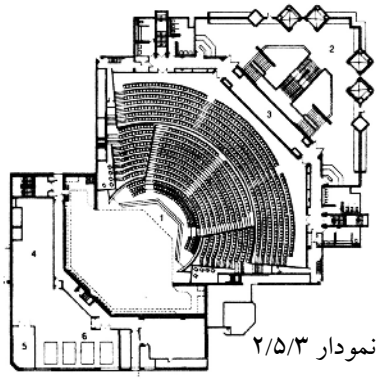
نمودار ۲/۵/۱

۲. از ۱۸۰ تا ۳۶۰ درجه: برای مثال محصور کردن صحنه با زاویه ۱۸۰ درجه مانند تأتر روم باستان و محصور کردن صحنه با زاویه ۲۲۰ـ۲۱۰ درجه مانند تأتر یونانی که معمولاً در فضای باز است. نوع دیگر آن صحنه open thrust است که در آن حضار از سه طرف صحنه را احاطه می‌کنند.



نمودار ۲/۵/۲

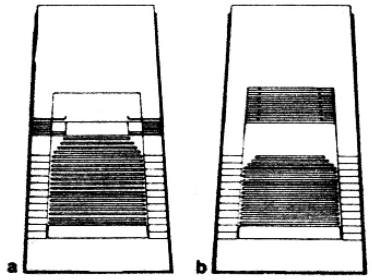
۳. کمتر از ۱۸۰ درجه: از انواع متداول آن محصور کردن صحنه با زاویه ۱۳۵ درجه (بادبزنی پهن)، و زاویه ۱۱۰ درجه برای سالن است که باعث نزدیکی مرکزثقل تماشاگران به صحنه و صدارسانی بهتر می‌شود. نوع دیگر آن محصور کردن صحنه با زاویه ۹۰ درجه است.



نمودار ۲/۵/۳

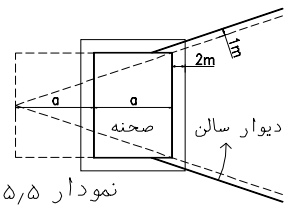
۴. صفر درجه (صحنه در انتها، صحنه قاب‌عکسی، ایتالیایی، صحنه proscenium): در این سالن می‌توان تجهیزات را از دید تماشاچی پنهان کرد (قاب صحنه وسایل و تجهیزات صحنه را می‌پوشاند). اما در زاویه دید محدودیت هندسی دارد و بیشتر تماشاچی‌ها نزدیک صحنه نیستند.

در این سالن پهنای سالن به پهنای صحنه بستگی دارد. معمول‌ترین نوع صحنه است که ممکن است به صورت شبه‌جزیره‌ای وارد تماشاگران شود. در این سالن‌ها به دلیل



نمودار ۲/۵/۴، صحنه متقاطع و صحنه قاب‌عکسی

جدایی دو قسمت سالن، ارتباط صمیمی وجود ندارد. با این حال امروزه این نوع صحنه با انعطاف‌پذیری در ارتفاع و پهنا، و با پانل‌های الحاقی به صحنه، رواج بیشتری دارد.

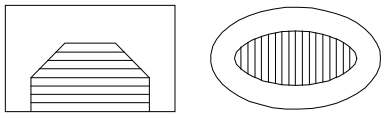


نمودار ۲/۵/۵

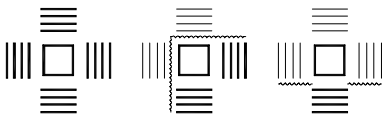
یکی از راه‌های پیدا کردن دیوارها در حالت صحنه قاب‌عکسی، برای اینکه دید همه افراد نسبتاً خوب باشد (نمودار ۲/۵/۵):

۵. صحنه متقاطع: قرار دادن افراد در دو جهت مقابل هم از صحنه که امروزه کاربرد چندانی ندارد (مربوط به طبقات اجتماعی قرن ۱۶ انگلیس برمی‌گردد.)

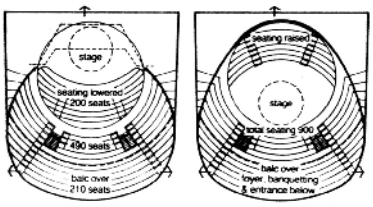
۶. صحنه فضایی (صحنه با پوشش دورتادور، صحنه پرگاری): صحنه کمی در اطراف حضار ادامه دارد و باعث یکی شدن تماشاچیان می‌شود. این حالت باعث عدم دید بعضی صندلی‌ها به کناره‌ها می‌شود.


نمودار ۲/۵/۶، صحنه فضایی

۷. صحنه آزاد (متغیر): در این سالن امکان تغییر صحنه و سن به فرم‌های مختلف وجود دارد اما به خاطر خصوصیات آکوستیک، بیشتر مناسب تأتر است تا موسیقی.

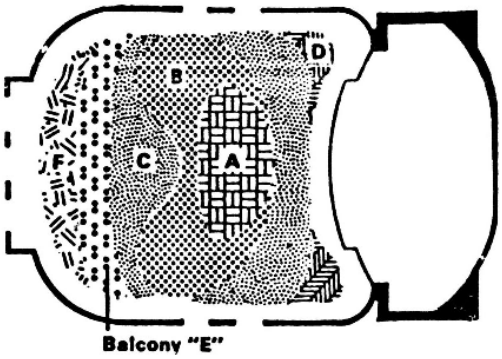

نمودار ۲/۵/۷، صحنه آزاد

۸. صحنه دوار: صحنه با چرخش قابل تغییر بین حالت‌های چپ و راست است.

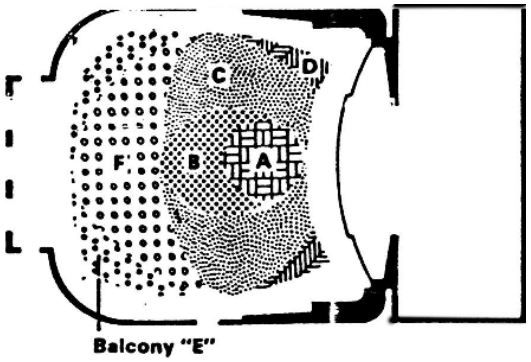


نمودار ۲/۵/۸

در انتها برای مقایسه کیفیت‌های دیداری و شنیداری یک شنودسرا، دو نمودار ارائه می‌گردد:



نمودار ۲/۵/۹



نمودار ۲/۵/۱۰

دسته‌بندی موقعیت‌ها در شنودسرا بر اساس: کیفیت شنیداری و کیفیت دیداری [ایزدی، ۱۳۷۹، ص ۱۵۱]

۳. ملاحظات غیر دیداری و شنیداری

در طراحی شنودسراها غبر از مسائل دیداری و شنیداری، عوامل مهم دیگری نیز وجود دارند که بر آسایش و ایمنی افراد تأثیر می‌گذارند. به دلیل اینکه پرداختن به این مسائل مطالعات خاص و خارج از حیطه این پروژه را طلب می‌کرد، به ذکر چند نمونه از این عوامل و نیز اشاره مختصری به تأسیسات مکانیکی در این میان (به دلیل ارتباط مستقیمی که با طراحی آکوستیکی دارد) می‌شود:

۱. فراهم کردن تهویه و دمای مناسب در فضای داخلی (تأسیسان مکانیکی)
۲. رعایت نکات ایمنی (مانند آتش‌سوزی)
۳. طراحی فضا برای معلولین
۴. تعبیه تجهیزات داخل شنودسرا (مانند میز نور و میز صدا در اتاق نور و اتاق فرمان صدا)
۵. طراحی فضاهای جانبی شنودسرا (مانند فضاهای پشت‌صحنه، فضای انتظار و مشابه آنها)

۳/۱. تأسیسات مکانیکی

آنچه در انتخاب تأسیسات مکانیکی شنودسرا مهم است، رعایت میزان نوفه است. انتخاب نوع تأسیسات در زمان طراحی، و با توجه به امکانات موجود است.

«سیستم تهویه یک فضا نوفه‌ای تولید می‌کند که منشاء هوابرد آن داخلی به حساب می‌آید. چون، هوایی که وارد فضا می‌شود، صداهای ناخواسته‌ای را نیز به همراه دارد. تراز این نوفه توسط سه عامل تعیین می‌گردد:

۱. مقدار نوفه‌ای که موتورخانه سیستم تهویه وارد کانال‌های تهویه می‌کند. بنابراین هر چقدر خود وسایل هوارسانی ساکت‌تر عمل نمایند، مخارجی که باید مصرف کاهش نوفه آنها بشود نیز کمتر خواهد بود.

۲. ساختار کانال‌ها و صافی‌های آکوستیکی که باید هوا را به فضای موردنظر برسانند ولی، نوفه موجود را در حدی قابل قبول کاهش دهند. این‌گونه صافی‌های آکوستیکی معمولاً فضای قابل ملاحظه‌ای را اشغال می‌کنند.

۳. ساختار دریچه‌هایی که هوا از طریق آنها وارد فضا شده و یا از آن خارج می‌شود.

نوفه سیستم تهویه می‌تواند به صورت پیکره‌ای هم وارد فضا شود. (در صورتی اتاق هواساز در مجاورت فضای موردنظر باشد. البته امروزه با روش‌های لرزه‌بندی این مشکل قابل حل، ولی بسیار هزینه‌بر است.) بنابراین بهتر است محل مناسب‌تری برای اتاق دستگاه‌های هواساز در مراحل طراحی ساختمان پیش‌بینی کنیم.» [مولانا، ۱۳۸۲، ص ۱۲۶ و ۱۲۷]

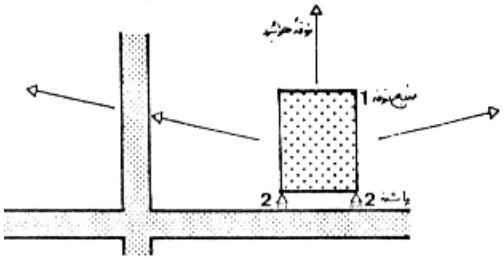
«به طور خلاصه نوفه تأسیسات لوله‌کشی و تهویه را می‌بایست در دو مرحله خاموش ساخت:

۱. در منبع نوفه

۱/۱. از دستگاه‌هایی با نوفه کمتر استفاده کرد. (در مورد پمپ‌ها، کمپرسورها، مبدل‌های حرارتی و...)

۱/۲. با استفاده از عناصر الاستیک و قابل انعطاف در محل قرارگیری دستگاه‌ها، از اتصال آن به سازه ساختمان و در نتیجه از انتشار آن جلوگیری کرد.

۱/۳. سیستم‌ها را (برای جریان هوا و آب) به گونه‌ای طراحی کرد که جریان به ملایمت و آرامی انجام گیرد و از ایجاد لرزش در لوله‌ها و کانال‌ها جلوگیری شود.



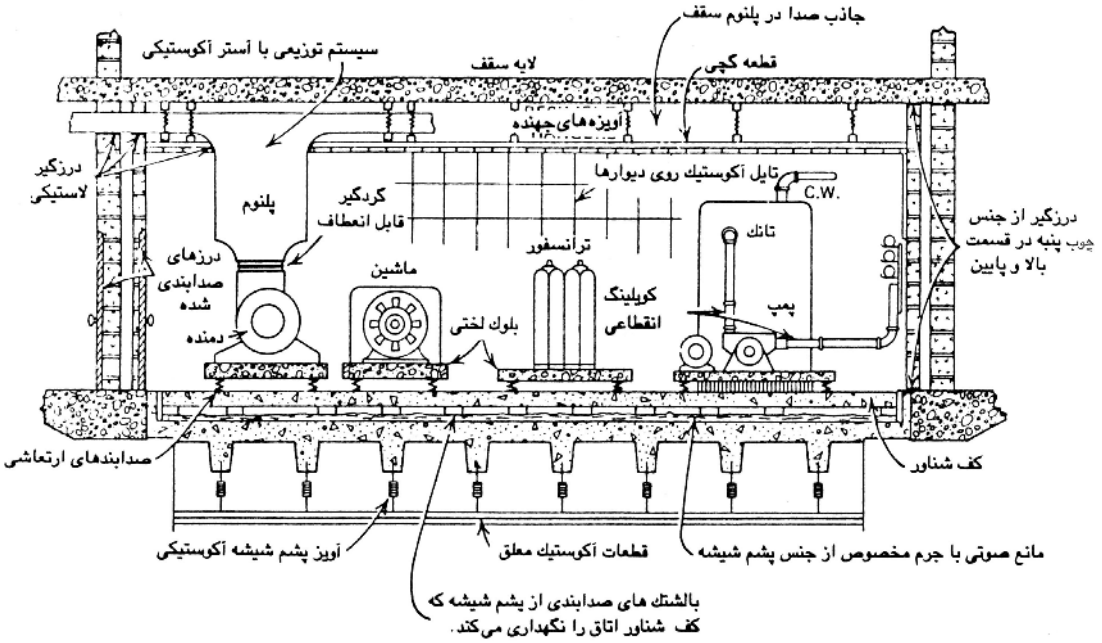
نمودار ۳/۱/۱، مهار نوفه پیکره‌ای در منبع:

a. منبع نوفه (دستگاه مبدل یا امثال آن)

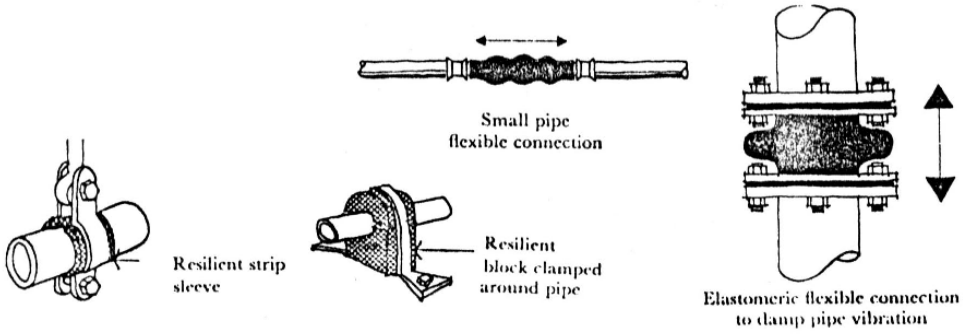
b. پاشنه از مصالح نرم و الاستیک (جذب‌کننده‌ها;

[بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۲۱]

نمودار ۳/۱/۲، صدابندی یک اتاق تجهیزات مکانیکی [استِین، ۱۳۷۸، ص ۱۶۶]



نمودار ۳/۱/۴، نحوه اتصال لوله به کالبد ساختمان، نحوه اتصال لوله به لوله [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۲۱]



۲. ***در مسیر انتقال آن*** *(ممکن است با وجود نوفه اندک منبع، در مسیر لوله یا کانال تشدید شده، منتقل شود).*

۲/۱. با استفاده از مصالح الاستیک، از اتصال کانال‌ها و لوله‌ها به کالبد ساختمان و نیز از انتقال نوفه در طول مسیر لوله یا کانال جلوگیری کرد.

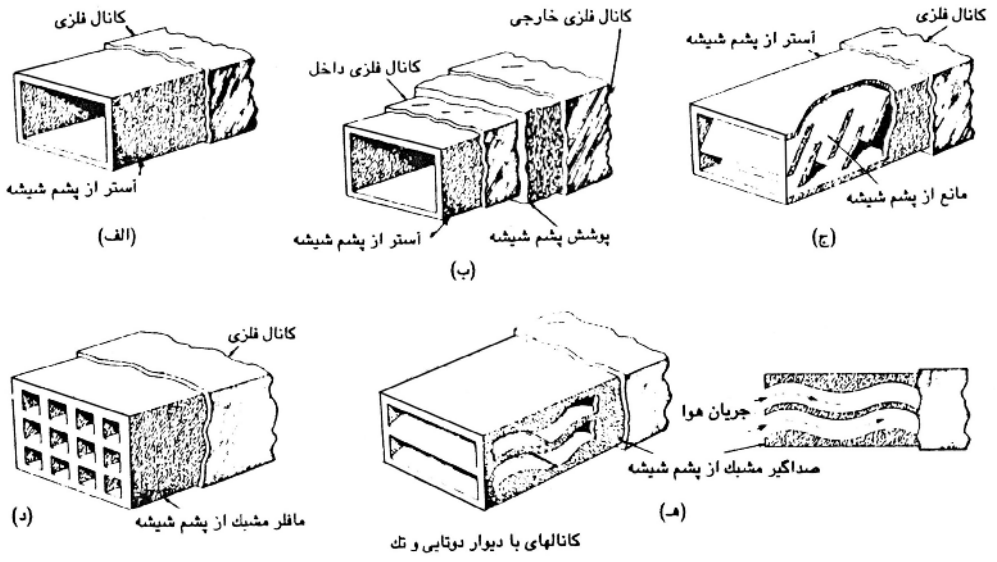
۲/۲. کانال‌ها و لوله‌های مجاور را حتی‌الامکان از یکدیگر جدا کرد.

۲/۳. اگر کانال‌ها جاذب صدا نداشته باشند، در اتاق‌های مجاور فاصله دهانه آنها نباید کم باشد، چون صدای اتاق‌ها به هم منتقل می‌شود (و تمام اقدامات عایق‌بندی و... در اتاق‌ها بی‌نتیجه می‌شود).

۲/۴. داخل کانال‌ها را با ماده جاذب صدا آستر کرد که در این صورت برحسب بزرگی و کوچکی مقطع کانال و جنس مصالح جذب‌کننده به‌کاررفته یک تا سه دسی‌بل در هر متر تراز نوفه افت می‌نماید (افت صدا تابع بسامد است). برای هر خم نود درجه (زانویی) ۳ تا ۶ دسی‌بل افت اضافه به‌وجود می‌آید. در موارد ضروری و خاص از وسایل خاص (صداخفه‌کن) استفاده می‌شود.» [بوبان، ۱۳۷۸، ص ۲۲۰ و لیاقتی، ۱۳۶۷، ص ۸۸]

«پوشش عایق خارجی کانال‌های تهویه هیچ‌گونه تأثیر قابل توجهی در افت نوفه ندارد و برای رسیدن به نتیجه باید کانال‌های تهویه را از طرف داخل پوشش نمود که برای پوشش داخلی کانال‌ها مصالح ویژه از سوی کارخانجات تخصصی ساخته می‌شود که شرایط زیر را دارد:

۱. *در برابر عبور هوا مقاوم است و الیاف آن جدا نمی‌شود.*
۲. *رطوبت جذب نمی‌کند و عرق نمی‌کند.*
۳. *بوی نامطلوب ایجاد نمی‌نماید.*
۴. *ضریب جذب آن با ضخامت حداقل ۲ اینچ نزدیک به یک است.»* [لیاقتی، ۱۳۶۷، ص ۹۱]



نمودار ۳/۱/۵، روش‌های کاهش نوفه در کانال‌ها [استِین، ۱۳۷۸، ص ۱۷۰]

▫ منابع فارسی

۱. استِین، بنجامین و دیگران. ۱۳۷۸. **مبانی آکوستیک در ساختمان**. ترجمه پروین نصیری. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه ک_۲۰۱. تهران. ترجمه بخش نهم از کتاب:
Mechanical and Electrical Equipment for Buildings. Benjamin Stein ,John S.Reynolds and William J.McGuinness. 7th edition. New York. Wiley and Sons. 1986.

۲. ایزدی، ندا. ۱۳۷۹. **خانه موسیقی تهران**. پایان‌نامه دانشکده هنرهای زیبا، دانشگاه تهران.

۳. بوبان، نگار. ۱۳۷۸. **هنرستان عالی موسیقی**. پایان‌نامه دانشکده هنرهای زیبا، دانشگاه تهران.

٤. پانرو، جولیوس و زلینگ، مارتین. ۱۳۷۸. **ابعاد انسانی و فضاهای داخلی ـ کتاب مرجع استانداردهای طراحی**. ترجمه محمد احمدی‌نژاد. نشر خاک. تهران.

۵. تشرفی، علی. ۱۳۸۱. **مجموعه تالار شهر سمنان**. پایان‌نامه دانشکده هنرهای زیبا، دانشگاه تهران.

٦. حق‌دوست، غلامرضا. ۱۳۷۷. **خانه موسیقی ایران**. پایان‌نامه دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی.

۷. ریخته‌گرمشهد، هومن. ۱۳۸۰. **تأتر ملی ـ تهران**. پایان‌نامه دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی.

۸. شکوفی‌مقیمیان، مریم. ۱۳۷۱. **تئوری طراحی سالن‌های نمایش**. پایان‌نامه دانشکده هنرهای زیبا، دانشگاه تهران.

۹. شیرودی، حمیدرضا. ۱۳۷٤. **تالار موسیقی شهر شیراز**. پایان‌نامه دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی.

۱۰. فورر، ویلی و لالوبر، آنسلم. ۱۳٦۹. **آکوستیک در معماری، گفتار دوم: آکوستیک در تالار**. ترجمه غلامعلی لیاقتی. انتشارات دانشگاه شهید بهشتی. چاپ سوم. تهران.

۱۱. لیاقتی، غلامعلی. ۱۳٦۷. **نور و صدا، درس تنظیم شرایط محیطی (۲)**. گروه ساختمان دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی.

۱۲. **مقررات ملی ساختمان ـ مبحث هیجدهم ـ عایق‌بندی و تنظیم صدا**. ۱۳۷۹. دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان ـ معاونت نظام مهندسی و اجرای ساختمان ـ وزارت مسکن و شهرسازی، انتشارات مدیریت، تهران.

۱۳. مکانیک، مینا و مولانا، خسرو(الف). ۱۳۷۹. **بررسی آکوستیکی مدارس**. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه گ_۳۲۹. تهران.

۱٤.مکانیک، مینا و مولانا، خسرو(ب). ۱۳۷۹. **بررسی وضعیت آکوستیکی سالن‌های سخنرانی**. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه گ-۳۳۲. تهران.

۱۵.مولانا، خسرو. ۱۳۸۲. **ملاحظات آکوستیکی در طراحی یک فضا**. نشریه صفه، شماره ۳٦ (بهار و تابستان ۱۳۸۲). دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی. تهران.

۱٦.مولانا، خسرو. **درس آکوستیک داخلی و وسایل شنودی**. گروه موسیقی دانشکده هنرهای زیبا، دانشگاه تهران.

۱۷.مولانا، خسرو. **ضوابط طراحی و مفاهیم پایه آکوستیکی و شنودی مربوط به سالن‌های سینما**. ۱۳٦۷. بنیاد فارابی (تحت نظارت شرکت مهندسین مشاور نقش)، تهران.

۱۸.مولانا، خسرو. **نور و صدا در محیط زیست، درس تنظیم شرایط محیطی (۲)**. گروه معماری دانشکده هنرهای زیبا، دانشگاه تهران.

۱۹.نویفرت، ارنست. ۱۳۷۷. **نویفرت ـ اطلاعات معماری**. ترجمه هدایت موتابی. انتشارات آزاده. تهران.

▫ منابع انگلیسی

1. Beranek, Leo L. 1962. **Music, Acoustics & Architecture**. John Wiley & Sons, Inc. New York, London.
2. Cavanaugh, William.J. & Wilkes, Joseph.A. 1999. **Architectural Acoustics, principles and practice**. John Wiley and Sons, Inc. NewYork, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto.
3. Watson, Donald & Crosbie, Michael.J. & Callender, John Hancock. 1997. **TIME.SAVER Standards for Architectural Design DATA** (Seventh edition). McGraw-Hill.