اصلاحات آکوستیکی سالن‌های کنسرت و استودیوهای موسیقی، با استفاده از پنل‌های تشدیدگر

هیربد حسینی
کارشناس ارشد، مهندسی پزشکی، دانشگاه آزاد، واحد علوم و تحقیقات
hirbod.hosseini@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۷

چکیده

امروزه با توجه به گسترش موسیقی و نبود سالن‌های استاندارد اجرای زنده در داخل کشور، اصلاحات آکوستیکی و بالانس کردن فرکانس‌های شنیداری در سالن‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. از این‌رو می‌توان با ابتکاری خاص، با کمک جعبه‌های تشدیدگری که از تشدیدگر ساخته شده توسط هرمان لودویگ فرناند فون هلمهولتز، دانشمند و فیزیک‌دان آلمانی الهام گرفته شده، در روند اصلاحات آکوستیکی بهره برد. هدف از ارائه این مقاله، آموزش ساخت پنل‌هایی است که، قادر باشند با جذب انرژی آکوستیکی در اثر تشدید در فرکانس‌های مشخص، به بهبود وضعیت آکوستیکی اتاق و یا سالن کمک کنند. در این مقاله خواهیم آموخت که چگونه هلمهولتز در روند اصلاح آکوستیکی مؤثر واقع می‌شود.

واژگان کلیدی: هلمهولتز، آکوستیک، اصلاح آکوستیک، آکوستیک سالن‌های کنسرت، ترمیم آکوستیک سالن کنسرت، اصلاح آکوستیک استودیوهای موسیقی، پنل آکوستیک

۱. مقدمه

یکی از مشکلات سالن‌های کنسرت در هنگام پخش موسیقی، یکنواخت نبودن فرکانس‌ها، در نقاط مختلف سالن است. به عبارت دیگر، توزیع انرژی صوتی در سالن یکنواخت نیست. مشکل دیگری که مخاطبین کنسرت‌ها را آزرده خاطر می‌کند، بالانس[۱] نبودن حجم صدای برخی از سازها، در محل نشستن آنها است. یکی از روش‌های ساده، محاسبه مودهای اتاق[۲] یا امواج ایستاده در اتاق است. پس قبل از هر چیز باید دید که امواج ایستاده[۳] چیست؟

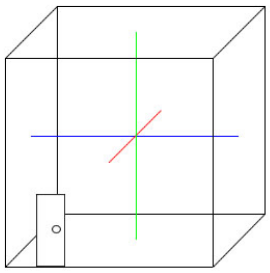
وقتی که در یک اتاق از یک منبع صوتی مانند یک بلندگو امواج صوتی ساطع می‌شود، مجموعه‌ای از تشدیدها[۴] در این اتاق اتفاق می‌افتد، به این مجموعه از تشدیدها، مودهای اتاق یا امواج ایستاده گفته می‌شود.

معمولا در اکثر اتاق‌ها تشدیدهای اساسی[۵] در منطقه ۲۰ هرتز تا ۲۰۰ هرتز اتفاق می‌افتند. این تشدیدها بر روی فرکانس‌های بازه پایین[۶] و فرکانس‌های بازه میانی پایین[۷] در اتاق تأثیر می‌گذارند، به همین دلیل یکی از بزرگ‌ترین موانع در شنیدن صحیح فرکانس‌های پایین در اتاق، مودها

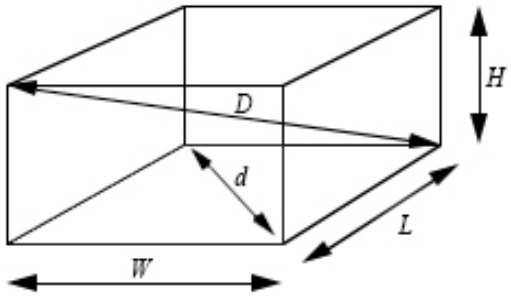
یا امواج ایستاده هستند. نقاط تشدید در اتاق در جاهای مختلف اتفاق می‌افتند و برای هر فرکانس نیز نقاط تغییر می‌کند، اما روی دیوارها و شرایط مرزی معمولا بالاترین فشار صوت وجود دارد.

مودهای محوری[۸]

ساده‌ترین مسیر حرکت موج، حرکت بین دو سطح مخالف در اتاق است.



شکل ۱. مودهای محوری



شکل ۲. ابعاد اتاق

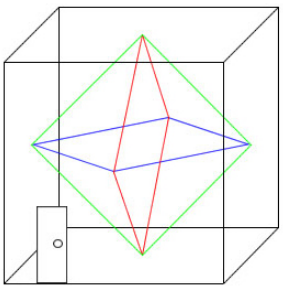
می‌توانیم فرکانس اساسی برای این اثر را با استفاده از فرمول زیر محاسبه کنیم:

$$f = \frac{c}{w} \qquad (۱)$$

که در آن f فرکانس c سرعت صوت و w فاصله دو سطح از یکدیگر است.

مودهای مماسی[۹]

هر مسیر بسته که متشکل از چهار سطح که شامل مودهای مماسی است.

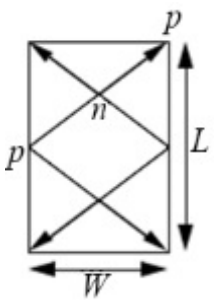


شکل ۳. مودهای مماسی

با توجه به شکل ۲ خواهیم داشت :

$$d = \sqrt{L^2 + W^2} \qquad (۲)$$

در این حالت می‌توان مانند شکل ۳ مودهای مماسی بیشتری داشت:



شکل ۴. مودهای مماسی

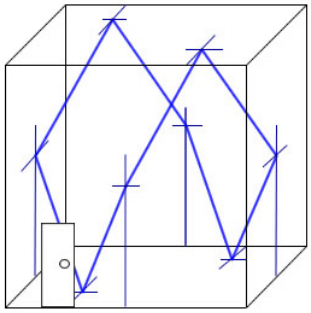
در این حالت داریم:

$$pp = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + W^2} \qquad (۳)$$

فاصله pp از ریشه مربع‌های عرض و نیمی از طول محاسبه می‌شود. به همین ترتیب، می‌توان مودهای مماسی دیگری در نظر گرفت که شامل یک سوم طول، و نصف عرض باشد.

مودهای مورب [10]

مودهایی که تمام شش سطح را شامل می‌شود، مودهای مورب نامیده می‌شود.



شکل ۵. مودهای مورب

با توجه به شکل ۲ خواهیم داشت :

$$D = \sqrt{L^2 + W^2 + H^2} \qquad (۴)$$

در این حالت نیز می‌توان مودهای مورب بیشتری مانند مودهای مماسی نمایش داد.

در حالت کلی برای به‌دست آوردن مودهای طبیعی می‌توان از فرمول زیر استفاده کرد:

$$f = \frac{c}{2}\sqrt{(\frac{p}{L})^2 + (\frac{q}{W})^2 + (\frac{r}{H})^2} \qquad (۵)$$

در این حالت می‌توان مقادیر r، q، p که تعداد نوسانات طبیعی است را از جدول ۱ در حالت‌های مختلف، در نظر گرفت:

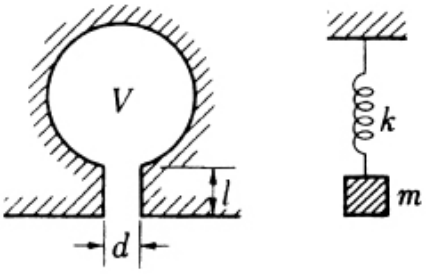
جدول ۱. مقادیر p ،q ،r

r	q	p
0	0	1
0	1	0
1	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0
1	1	1
0	0	2
0	1	2

به همین ترتیب ما می‌توانیم به مقدار زیادی از مودهای اتاق با افزایش r، q، p حتی تا ۴، ۴، ۴ دست پیدا کنیم. باید توجه داشت در مواردی که دو عدد از سه عدد موج صفر هستند، فرمول همان فرکانس‌هایی را که در مودهای محوری دیده شود، نشان می‌دهد و یا در مواردی که یک عدد از سه عدد موج صفر باشد، از فرمول همان فرکانس‌هایی که در مودهای مماسی دیده شود، به دست می‌آید.

۲. تشدیدگر [11] هلمهولتز

هوا در یک حفره، که ابعاد آن در مقایسه با طول موج کوچک است، مانند یک فنر عمل می‌کند. هنگامی‌که حفره، یک دریچه کوچک به هوای بیرون دارد، هوا در گردن حفره به عنوان یک جرم واحد، مانند جرمی که توسط یک فنر پشتیبانی می‌شود حرکت می‌کند و در نتیجه یک تشدیدگر ساده که در شکل زیر نشان داده شده است را شکل می‌دهد. درست مانند یک بطری که بر لبه آن می‌دمید، تا صدای سوت از آن بیرون بیاید. این تشدیدگر، رزوناتور هلمهولتز نامیده می‌شود.



شکل۶. تشدیدگر ساده

در این تشدیدگر که در شکل ۶ نشان داده شده است، فرکانس تشدید طبق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$f = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{G}{V}} \qquad (۶)$$

که در آن f فرکانس تشدید، c سرعت صوت ، G ضریب هدایت هوا (که به شکل زیر تعیین می‌شود) و V حجم حفره می‌باشد.

همین‌طور :

$$G = \frac{s}{l_e} \quad (۷)$$

که در آن s سطح باز و l_e طول مؤثر گردن حفره است.
جایی‌که هوا در گردن حفره به عنوان یک جرم واحد، حرکت می‌کند، مقداری هوا در عقب و جلوی آن به منظور جابه‌جایی به آن اضافه می‌شود، بنابراین به جای طول واقعی l از l_e استفاده می‌شود که در آن: $l + \delta = l_e$ در این معادله δ مقدار اصلاح انتهایی نامیده می‌شود. در نتیجه:

$$f = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{s}{V(\ l + \delta)}} \quad (۸)$$

در مورد سوراخ دایره‌ای که قطر آن d است:

$$\delta \approx 0.8\ d$$

هنگامی‌که صدا در فرکانس تشدید، تشدیدگر را تحت تأثیر قرار می‌دهد، هوا در گردن حفره به شدت ارتعاش می‌یابد، بنابراین در اینجا صدا با از دست دادن چسبندگی جذب شده و به گرما تبدیل می‌شود.
چنین تشدیدگری تنها برای محدوده‌ی محدودی از فرکانس‌ها کار می‌کند و نزدیک به فرکانس تشدید عمل می‌کند. در نتیجه، از این جاذب نمی‌توان به عنوان یک جاذب عمومی استفاده کرد، اما برای جذب یک فرکانس خاص با توجه به مودهای طبیعی اتاق مناسب است.
لرزش ایجاد شده در اینجا به دلیل تنش وارده بر هوا است. در زمان دمیدن داخل بطری، فشار داخل را افزایش می‌دهید، فشار داخلی میل به سمت حالت تعادل خود، یعنی تعادل با فشار محیط دارد، در نتیجه با اعمال فشار بر دهنه بطری، به سرعت هوا را به سمت بیرون می‌رانید.
در محفظه‌های بلندگو اغلب از رزوناتور هلمهولتز در ساخت محفظه استفاده می‌کنند تا پاسخ فرکانس پایین را افزایش دهند.

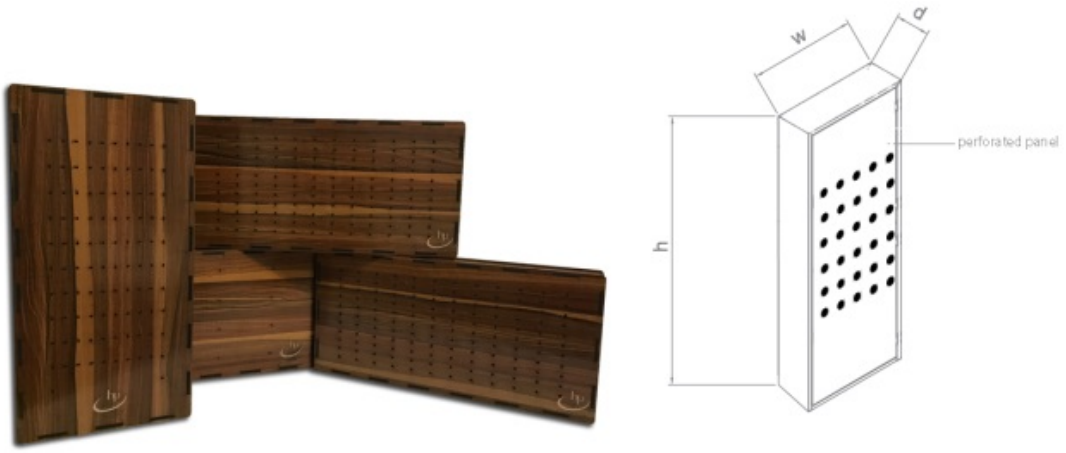
بیس ترپ[۱۲]

بیس ترپ‌ها یا تله‌های باس جذب کننده‌های انرژی صوتی هستند که برای تعدیل فرکانس پایین در اتاق طراحی و استفاده می‌شوند. آنها معمولا در استودیوهای ضبط، سینماها، سالن‌های کنسرت و یا سایر اتاق‌های ساخته شده برای ارائه یک محیط شنیداری مناسب استفاده می‌شوند. این تله‌ها با تبدیل انرژی صوتی به گرما از طریق اصطکاک عمل می‌کنند.

۳. ساختن پنل تشدیدگر هلمهولتز

در این قسمت، ساخت یک بیس ترپ که ساخت آن آسان است را نشان می‌دهیم. برای رسیدن به نتیجه ایده‌آل، ابتدا باید دقیقا بدانید که با کدام فرکانس‌ها مشکل دارید و پس از آن شما باید این تله‌های فرکانسی[۱۳] را دقیقا بر اساس فرکانس مورد نظر طراحی کنید.
مزیت این تله‌ها این است که با داشتن تنها چند سانتی‌متر عمق قادر به جذب فرکانس‌های پائین می‌باشند. با این حال، باید در نظر داشته باشید که این تله‌های تنظیم شده[۱۴] بر اساس فرکانس مورد نظر طراحی شده است و به‌طور معمول برای کاهش تشدید در این فرکانس بر روی دیوارها استفاده می‌شود.
در محدوده صوتی یک اتاق، راه‌هایی برای غلبه بر مسائل و رسیدن به صدای خوب وجود دارد. معمولا فرکانس‌های زیر ۲۵۰ هرتز چالش برانگیز هستند. برای جذب این فرکانس‌ها از پنل‌های تشدیدگر سوراخ‌دار استفاده خواهیم کرد.

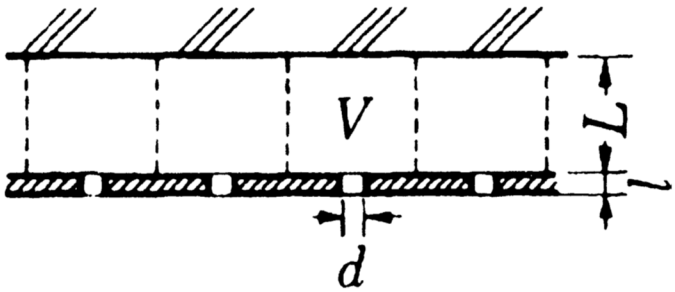
پنل تشدیدگر در شکل ۷، از نظر فیزیکی، جعبه‌ای است که یک طرف آن شکاف‌هایی دارد و هوا می‌تواند به داخل و خارج از آن حرکت کند. پنج طرف دیگر جعبه کاملا بسته و بدون شکاف هستند. شما یک جعبه مهر و موم شش طرفه را می‌سازید و تعدادی سوراخ را در یک طرف ایجاد می‌کنید، این همان تشدیدگر است.



شکل ۷. پنل تشدیدگر هلمهولتز

اگر پنلی دارید که مساحت آن ۱۰۰ سانتی‌متر مربع است و مساحت سوراخ‌ها در آن ۱ سانتی‌متر ، پس ۱٪ پنل شکاف‌دار و ۹۹٪ آن بسته خواهد بود.

برای محاسبه فرکانس در جعبه‌های سوراخ‌دار (که این سوراخ‌ها همگی به شکل دایره هستند)، به ترتیب زیر عمل می‌کنیم:



شکل ۸. ساختمان جاذب سوراخ دار

با در نظر گرفتن پنل فوق در شکل ۸، اگر n سوراخ که مساحت هر کدام s می‌باشد را در نظر بگیریم:

$$P_S = ns \qquad (۱۰)$$

حجم حفره در واحد سطح را L و حجم در هر سوراخ به شکل زیر به‌دست می‌آید:

$$V = \frac{L}{n} \qquad (۱۱)$$

اگر ابعاد پنل H و W باشند:

$$P = \frac{ns}{W \times H} \qquad (۱۲)$$

$$P = \frac{P_S}{P_T} \qquad (۹)$$

که در آن:

P_S : مساحت سوراخ‌ها

P_T : مساحت کل پنل

با قرار دادن این مقادیر در معادله به‌دست آمده در بخش ۲، معادلات زیر به‌دست می‌آید:

$$f = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{P}{L(\ l+\delta)}} \qquad (۱۳)$$

$$f = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{ns}{LWH(\ l+\delta)}} \qquad (۱۴)$$

در مورد سوراخ دایره‌ای که قطر آن d است:

$$\delta \approx 0.8\, d$$

حال با در دست داشتن معادله فوق و همین‌طور محاسبه مودهای اتاق می‌توان پنل‌هایی با ابعاد، تعداد و قطر سوراخ مشخصی تولید کرد، تا بتوان فرکانس مربوطه که جزو امواج ایستاده اتاق است را تعدیل نمود.

برای روشن‌تر شدن مطلب به ذکر یک مثال می‌پردازیم:

پنلی با ابعاد ۶۰ در ۱۲۰ سانتی‌متر، ضخامت ۸ میلی‌متر، فاصله هوایی ۳۰ میلی‌متر در پشت، به تعداد ۱۰۰ سوراخ با قطر ۲ میلی‌متر دارد، فرکانس جذب آن به شکل زیر محاسبه می‌شود:

از معادله ۱۴ داریم:

$$f = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{ns}{LWH(\ l+\delta)}}$$

$$s = \pi \times 1 \times 10^{-6} = 3.14 \times 10^{-6}$$

$$f = \frac{343.2}{2\pi}\sqrt{\frac{100 \times 3.14 \times 10^{-6}}{0.03 \times 0.72(\ 8 + 2 \times 0.8) \times 10^{-3}}}$$

$$f = \frac{343.2}{6.28}\sqrt{\frac{3.14}{2.0736}}$$

$$f \approx 67\ \text{Hz}$$

پس این پنل با این ابعاد برای جذب فرکانس ۶۷ مناسب است.

٤. نمونه‌های اجرا شده

در این بخش تصاویری از نمونه‌های اجرا شده که در اتاق‌های مختلف نصب شده‌اند عرضه می‌شود.

شکل ۹. نمونه اجرا شده در استودیو

شکل ۱۰. نمونه ساخته شده

شکل ۱۱. نمونه ساخته شده

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا با روش محاسبه مودهای اتاق آشنا شدیم، در مباحث بعدی طریقه ساخت پنل‌های سوراخ‌دار هلمهولتز را فرا گرفتیم و در انتها به نحوه بر طرف کردن تشدیدها در اتاق توسط این پنل‌ها پی بردیم. با در نظر گرفتن روش عملی ارائه شده در این مقاله برای برطرف کردن مشکلات سالن‌های کنسرت، می‌توان تشدیدهای ایجاد شده در سالن را تا حد قابل قبولی تعدیل کرد، تا با تعدیل این فرکانس‌های اضافه، بالانس مناسبی در سالن ایجاد شود.

در نتیجه این روش، روشی کاربردی و مفید در روند اصلاح آکوستیک سالن‌های کنسرت و استودیوهای موسیقی می‌باشد.

٦. مآخذ

[1] Pohlmann, K. C., Everest, F. A., "*Master handbook of acoustics*",*6th ed* ., 2015.

[2] Hiebert, E., "*The Helmholtz legacy in physiological acoustics*", Springer International Publishing, 2014.

[3] Kuttruff, H., "*Acoustics: an introduction",* CRC Press, 2006

[4] Maekawa, Z., Rindel, J. H., Lord, P., "*Environmental and architectural acoustics", 2nd ed.,* CRC Press, 2011

پی‌نوشت:

1. Balance
2. Room Modes
3. standing wave
4. resonances
5. fundamental resonances
6. low-frequency
7. low-mid-frequency
8. axial modes
9. tangential modes
10. oblique modes
11. resonator
12. Bass trap
13. Traps
14. Tuned Traps