

# موج‌های صوتی



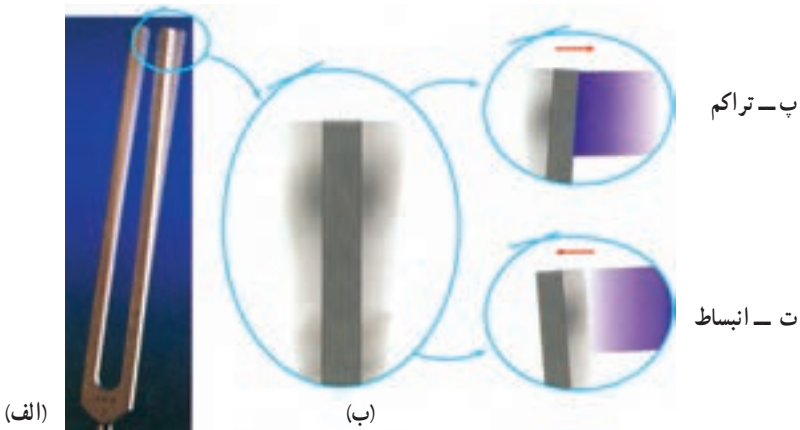
## فصل

## صوت

### ۱-۵- موج صوتی

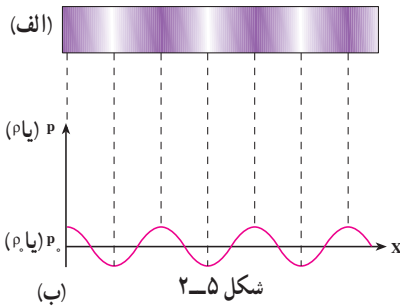
یکی از مهم ترین موج هایی که ما در زندگی روزمره با آن سروکار داریم موج صوتی است. برای مثال، از طریق این موج ها با یکدیگر گفت و گو می کنیم، با به صدا در آوردن بوق ماشین، به عابری که از خیابان عبور می کند هشدار می دهیم و ...

برای اینکه بدانیم موج های صوتی چگونه ایجاد می شوند فرایند تولید صوت به وسیله یک دیافازون را تشریح می کنیم. یک دیافازون را مطابق شکل ۱-۵ الف و ب در نظر بگیرید. قبل از ارتعاش دیافازون هوای مجاور آن در حال تعادل است و فشار و چگالی آن در همه جا ثابت و به ترتیب برابر  $P_0$  و  $\rho_0$  است. اکنون دیافازون را مرتعش می کنیم. هنگامی که شاخه آن مطابق شکل ۱-۵ ب به طرف راست حرکت می کند، لایه هوای مجاور خود را متراکم می کند و چگالی و فشار آن را نسبت به حالت تعادل افزایش می دهد که این لایه متراکم نیز به نوبه خود لایه مجاورش را متراکم می کند.



شکل ۱-۵

به این ترتیب یک آشفتگی یا تب ایجاد می شود که در آن فشار و چگالی بیشتر از حالت تعادل است. این تب تراکمی (پرفشار) در هوا منتشر می شود. هنگامی که شاخه دیافازون برمی گردد، همان طور که در شکل ۱-۵ ت می بینید، لایه هوای مجاور آن منبسط می شود و چگالی و فشار این لایه نسبت به حالت تعادل کاهش می یابد. این لایه انبساط یافته نیز به صورت یک تب انبساطی (کم فشار) در هوا منتشر

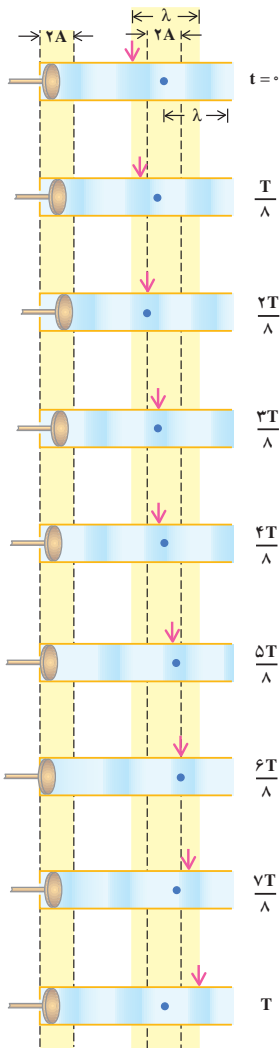


می‌شود. بنابراین هنگامی که دیافراگم مرتعش می‌شود تپ‌های متوالی تراکمی و انبساطی (شکل ۲-۵) در هوا منتشر می‌کند. نمودار تغییرات فشار (چگالی) برحسب فاصله در یک لحظه از زمان در شکل ۲-۵ ب نشان داده شده است.

در مورد انتشار موج در طناب یا سطح آب دیدیم که آشفستگی یا تپ به صورت برجستگی و یا فرورفتگی بود. اما در حالت انتشار صوت در هوا، آشفستگی یا تپ به صورت لایه‌های تراکمی و انبساطی یا لایه‌های پرفشار و کم‌فشار است. همچنین دیدیم که هنگام انتشار موج در محیط ذره‌های محیط منتقل نمی‌شوند، بلکه حول نقطه تعادل خود حرکت نوسانی انجام می‌دهند؛ مثلاً، در شکل ۳-۴ دیدیم که اگر به یک نقطه از محیط نگاه کنیم، این نقطه (که با رنگ قرمز نشان داده شده است) در حین انتشار موج حول حالت تعادل خود نوسان می‌کند، ولی اگر به یک نقطه از موج که با پیکان مشخص شده است نگاه کنیم، این نقطه با سرعت ثابت در محیط حرکت می‌کند.

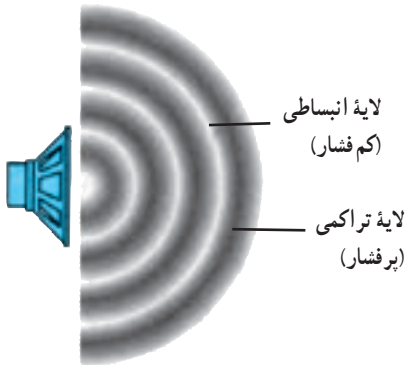
در انتشار صوت نیز ذره‌های هوا منتقل نمی‌شوند بلکه حول نقطه تعادل خود نوسان می‌کنند. لایه‌های تراکمی و انبساطی نیز در اثر این نوسان‌ها به وجود می‌آید.

در شکل ۳-۵ انتشار یک موج صوتی در یک لوله، در بازه‌های زمانی  $\frac{T}{8}$ ، نشان داده شده است. در این شکل یکی از ذره‌های هوا (محیط) با رنگ آبی مشخص شده است. این نقطه، در حین انتشار موج پس از یک نوسان کامل به محل اولیه خود برمی‌گردد. در حالی که اگر یک نقطه از موج را مثلاً در ناحیه متراکم که در شکل ۳-۵ با پیکان مشخص شده است در نظر بگیریم، می‌بینیم که با سرعت ثابت در هوا حرکت می‌کند، چون در انتشار صوت ذره‌های هوا در راستای انتشار نوسان می‌کنند. این موج‌ها طولی‌اند.



شکل ۳-۵

مثال‌هایی از انتشار صوت در مایع‌ها و جامدها ذکر کنید.



شکل ۴-۵

هر جسم مرتعش در هوا، خود یک چشمه تولید موج‌های صوتی است. چشمه صوت ممکن است به سادگی یک دیابازون و یا به پیچیدگی حنجره انسان باشد. در هنگام صحبت در اثر ارتعاش تارهای صوتی در حنجره امواج صوتی در هوا ایجاد می‌شوند.

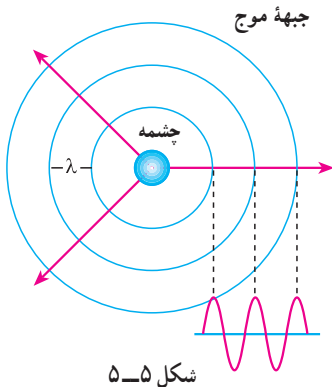
هنگامی که یک چشمه صوت مرتعش می‌شود، صوت ایجاد شده در تمام جهت‌ها منتشر می‌شود.

لایه‌های تراکمی (پرفشار) و انبساطی (کم فشار) یک موج صوتی که از یک بلندگوی کوچک در هوا منتشر می‌شوند، در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.

## پرسش ۱-۵

مثال‌هایی ذکر کنید که نشان دهد امواج صوتی در هوا در تمام جهت‌ها منتشر

می‌شوند.



شکل ۵-۵

اگر یک چشمه صوت، صوت را به طور یکنواخت در تمام جهت‌ها گسیل کند، صوت به صورت موج کروی در فضا منتشر می‌شود. جبهه‌های موج این امواج به صورت کره‌هایی به مرکز چشمه صوت در شکل ۵-۵ نشان داده شده‌اند. جبهه‌های موج در این شکل نقاط پرفشار را نشان می‌دهند.

## حدود شنوایی انسان

انسان نمی‌تواند هر موج صوتی با هر بسامدی را بشنود بلکه تنها می‌تواند موج‌هایی را که بسامد آنها بین  $20$  تا  $20,000$  هرتز است، بشنود. بعضی حیوان‌ها مانند سگ‌ها گستره وسیع‌تری از بسامدها ( $15$  تا  $50,000$  هرتز) را می‌شنوند. خفاش‌ها تا بسامد  $100,000$  هرتز را نیز می‌شنوند. موج‌های صوتی با بسامد پایین‌تر از  $20$  Hz را فرصوت و بالاتر از  $20,000$  Hz را فراصوت می‌نامند. موج‌های فراصوت کاربردهای فراوانی در پزشکی و صنعت دارند.

## ۲-۵- سرعت صوت

در فصل چهارم دیدیم که سرعت انتشار موج در یک محیط (طناب) به ویژگی‌های محیط انتشار موج (کشش طناب و جرم واحد طول آن) بستگی دارد، سرعت صوت نیز به ویژگی‌های فیزیکی محیطی که صوت در آن منتشر می‌شود وابسته است. صوت علاوه بر گازها در مایعات و جامدات نیز منتشر می‌شود. سرعت انتشار صوت در مواد مختلف در جدول ۱-۵ داده شده است. چنان‌که می‌بینید هرچه ماده متراکم‌تر باشد، سرعت انتشار صوت در آن بیشتر است؛ زیرا در ماده متراکم، مولکول‌ها به یکدیگر نزدیک‌ترند و تب ایجاد شده می‌تواند در زمان کمتری به نقطه مجاور خود منتقل شود.

### جدول ۱-۵- سرعت صوت در ماده‌های مختلف\*

سرعت (m/s)	دما ( $^{\circ}\text{C}$ )		
۳۱۶	۰	اکسیژن	گازها
۳۳۱	۰	هوا	
۳۴۳	۲۰	هوا	
۳۳۴	۰	نیتروژن	
۹۶۵	۰	هلیوم	
۱۴۵۰	۲۵	جیوه	مایع‌ها
۱۴۹۸	۲۵	آب	
۱۵۳۱	۲۵	آب دریا	
۲۱۰۰	-	سرب	جامدها
۳۰۰۰	-	طلا	
۵۰۰۰-۶۰۰۰	-	آهن	
۵۰۰۰-۶۰۰۰	-	شیشه	

\* در مواردی که تغییر سرعت با دما قابل ملاحظه نیست، دمای مربوط به اندازه‌گیری در جدول ذکر نشده است.

می‌توان نشان داد که سرعت انتشار صوت در گازها از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad (1-5)$$

که در آن  $T$  دمای گاز برحسب کلوین،  $R$  ثابت عمومی گازها و  $M$  جرم مولکولی گاز است.  $\gamma$  نیز ضریب اتمیسیته گاز نام دارد که برای گازهای مختلف در جدول ۲-۵ داده شده است.

جدول ۲-۵- ظرفیت گرمایی مولی در حجم و فشار ثابت  $\gamma$  و  $M$

M g/mol	$\gamma$	گاز	
۴	۱/۶۷	He	تک اتمی
۴۰	۱/۶۷	Ar	
۲	۱/۴۱	H <sub>۲</sub>	دو اتمی
۲۸	۱/۴۰	N <sub>۲</sub>	
۳۲	۱/۳۹	O <sub>۲</sub>	

### مثال ۱-۵

سرعت انتشار صوت را در هوا و در دمای ۲۷°C به دست آورید (برای هوا،  $M = ۲۹ \text{ g}$ )

$$(R = ۸/۳ \text{ J/mol} \cdot \text{K} \text{ و } \gamma = ۱/۴)$$

پاسخ

با استفاده از رابطه ۱-۵ داریم:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} = \sqrt{\frac{۱/۴(۸/۳)(۲۷۳ + ۲۷)}{۲۹ \times ۱۰^{-۳}}} \approx ۳۴۷ \text{ m/s}$$

با استفاده از اطلاعات جدول ۲-۵ سرعت صوت را در گازهای اکسیژن، نیتروژن و هلیوم در دمای صفر درجه سلسیوس محاسبه و نتیجه به دست آمده را با مقادیر جدول ۱-۵ مقایسه کنید.

### کاربرد موج های صوتی

برای تعیین محل جسم هایی که زیر آب قرار دارند، از بازتاب موج های صوتی استفاده می شود. این روش که به نام روش پژواک تپ معروف است کاربردهای پزشکی نیز دارد.

اساس این روش آن است که یک موج صوتی را به عمق آب می فرستند و با یک آشکارساز، بازتاب یا پژواک آن را اندکی بعد دریافت می کنند. سپس زمان رفت و برگشت موج را به دقت اندازه می گیرند و از روی آن فاصله جسمی را که موج را بازتابانده است تعیین می کنند. (سرعت صوت در آب مشخص است) با این روش عمق دریاها، محل صخره های زیر آب، محل کشتی های غرق شده، زیر دریایی ها و حتی محل تجمع گروهی از ماهی ها را که باهم حرکت می کنند می توان تعیین کرد.

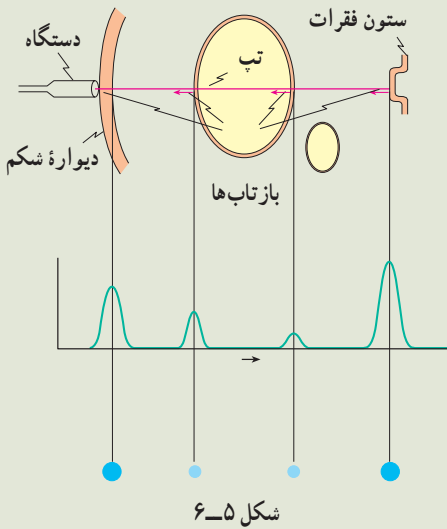
با این روش می توان ساختار داخلی زمین را نیز مشخص کرد. برای این منظور یک انفجار زیرزمینی ایجاد می کنند و با آشکارسازی بازتاب موج های تولید شده در اثر انفجار می توان ساختار نواحی مختلف زمین را تعیین کرد. این روش در اکتشاف نفت و موادمعدنی به کار می رود.

در کاربردهای بالا اغلب از بسامدهای بیش از  $20 \text{ kHz}$  که در ناحیه فراصوتی قرار دارد استفاده می شود؛ زیرا این موج ها علاوه بر این که قابل شنیدن نیستند دارای طول موج کوتاه اند و اجسام با ابعاد کوچک را می توان با استفاده از آنها آشکار کرد. در پزشکی هم از این موج ها برای از بین بردن بافت های ناخواسته و یا اجسام نامطلوب در بدن (مانند غده ها و یا سنگ های کلیه) استفاده می شود. این موج ها بر روی ماده ناخواسته متمرکز می شوند؛ برای مثال، تابش متمرکز این موج ها بر روی سنگ کلیه

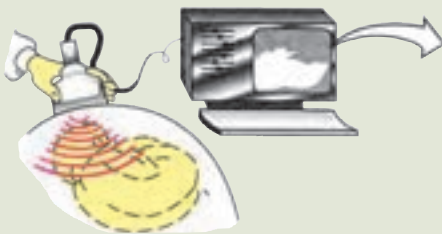
باعث می‌شود که سنگ به پاره‌های کوچک شکسته شده و به تدریج از بدن دفع گردند. بدون این که احتیاجی به عمل جراحی باشد.

از موج‌های فراصوتی همچنین در تشخیص بیماری نیز استفاده می‌شود. بدین ترتیب که یک تپ فراصوتی به داخل بدن بیمار فرستاده می‌شود. این تپ از مرزها و فصل مشترک‌های بین اعضای داخل بدن بازتاب می‌یابد که با آشکارسازی آن می‌توان اطلاع لازم را در مورد بیماری عضو مورد نظر کسب کرد. این روش برای تشخیص محل غده‌ها و سایر عوامل غیرعادی در بدن، عملکرد قلب و دریچه‌های آن، وضعیت جنین، سنگ کلیه و غیره به کار می‌رود.

روش کار به این ترتیب است که با دستگاه خاصی مانند بلندگو، تپ الکتریکی را به ارتعاش‌های مکانیکی تبدیل می‌کنند و به این وسیله یک تپ صوتی ایجاد می‌شود. بخشی



از این تپ از فصل مشترک بافت‌های مختلف در بدن بازتابیده می‌شود (شکل ۵-۶). آشکارسازی تپ‌های بازتابیده، با همان دستگاه صورت می‌گیرد که موج‌های صوتی را به تپ‌های الکتریکی تبدیل می‌کند. تپ‌ها را می‌توان روی یک مونیتور مشاهده کرد (شکل ۵-۷). تصویر یک جنین که با استفاده از فراصوت تهیه شده نیز در این شکل نشان داده شده است.





## ۵-۳- لوله‌های صوتی

پیش از این دیدیم که وقتی یک موج عرضی در طنابی که یک انتهای آن ثابت است ایجاد می‌کنیم، این موج از انتهای ثابت بازتابیده می‌شود و از برهم نهی موج‌های فرودی و بازتابی موج ایستاده تشکیل می‌شود. همچنین، در انتهای ثابت که جابه‌جایی طناب صفر است گره تشکیل می‌شود، ولی اگر انتهای طناب آزاد باشد در آنجا شکم ایجاد می‌شود.

با موج‌های طولی نیز می‌توان موج ایستاده تشکیل داد. این موج را می‌توان در یک فنر و یا یک ستون هوا (مثلاً هوای داخل یک لوله) ایجاد کرد. در این بخش، چگونگی ایجاد موج‌های ایستاده را در ستون هوای داخل یک لوله مورد بررسی قرار می‌دهیم. چنین لوله‌ای را لوله صوتی می‌نامند.

هنگامی که در دهانه لوله صوتی، هوا می‌دمیم، در هوای داخل آن، موج صوتی منتشر می‌شود. این موج از دو انتهای لوله بازتابیده می‌شود و از برهم نهی موج‌های فرودی و بازتابیده، موج ایستاده تشکیل می‌شود. حال اگر انتهای لوله بسته باشد، چون مولکول‌های هوا نمی‌توانند در این انتها نوسان طولی داشته باشند بنابراین در انتهای بسته گره ایجاد می‌شود. اگر، برعکس، انتهای لوله باز باشد مولکول‌ها می‌توانند آزادانه در آن نوسان کنند و در صورتی که قطر لوله در مقایسه با طول موج صوت کوچک باشد، در این انتها شکم تشکیل می‌شود. بسته به این که یک انتهای لوله صوتی باز و انتهای دیگر بسته و یا این که هر دو انتهای آن باز باشد، دو حالت متفاوت به وجود می‌آید که به بررسی آنها می‌پردازیم:

**الف) یک انتهای لوله باز و انتهای دیگر آن بسته است.** در این حالت در انتهای باز شکم و در انتهای بسته گره تشکیل می‌شود. در ساده‌ترین حالت، مطابق شکل ۵-۸ الف فقط یک گره و شکم در داخل لوله تشکیل می‌شود (در این شکل موج‌های صوتی داخل لوله برای سهولت نمایش به صورت موج‌های عرضی نشان داده شده‌اند. بیشینه دامنه در این شکل حالتی را نشان می‌دهد که در آن جابه‌جایی ذرات لایه هوا بیشینه است) در این حالت طول لوله،  $L$ ، با فاصله گره تا شکم برابر است یعنی:

$$L = \frac{\lambda_1}{4} \quad (2-5)$$

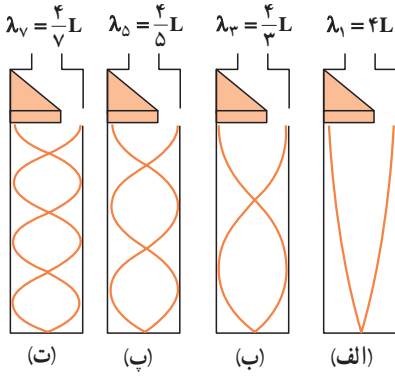
و یا طول موج صوت برابر است با:

$$\lambda_1 = 4L \quad (3-5)$$

اگر سرعت صوت در داخل لوله  $v$  باشد، بسامد این صوت،  $f_1$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L} \quad (4-5)$$

موج ایستاده ایجاد شده در این حالت، کمترین بسامد را دارد و صوت اصلی نامیده می‌شود. مضرب‌های درست این صوت را هماهنگ‌های صوت اصلی می‌نامند. همان‌طور که در تار مرتعش دیدیم، این هماهنگ‌ها هنگامی ایجاد می‌شوند که مطابق شکل ۵-۸ ب، پ، ... تعداد بیشتری گره و شکم



شکل ۵-۸

در لوله تشکیل می‌شود یعنی ممکن است در داخل لوله دوگره، سه گره، ... n گره تشکیل شود. در این صورت، همان گونه که در این شکل می‌بینید، طول لوله به ترتیب برابر است با  $\frac{3}{4}\lambda_3$ ،  $\frac{5}{4}\lambda_5$ ، ...،  $\frac{\lambda_{2n-1}}{4}(2n-1)$  و در حالی که n گره در داخل لوله صوتی تشکیل می‌شود، طول موج مربوط به  $2n-1$  امین هماهنگ با رابطه زیر داده می‌شود:

$$\lambda_{2n-1} = \frac{4L}{2n-1}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5-5)$$

و بسامد این صوت برابر است با:

$$f_{2n-1} = \frac{(2n-1)v}{4L} = (2n-1)f_1, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (6-5)$$

ملاحظه می‌شود در لوله‌ای که یک انتهای آن بسته است فقط هماهنگ‌های فرد صوت اصلی ایجاد می‌شود؛ یعنی، بسامد امواج ایستاده در داخل این لوله به صورت  $f_1$ ،  $3f_1$ ،  $5f_1$  و ... است. این حالت‌ها نوسان‌های طبیعی هوای داخل لوله صوتی که یک انتهای آن بسته است به‌شمار می‌روند.

## مثال ۲-۵

در یک لوله صوتی که یک انتهای آن بسته است، می‌خواهیم یک صوت اصلی با بسامد  $340 \text{ Hz}$  ایجاد کنیم. الف) طول لوله باید چه قدر باشد؟ ب) بسامد هماهنگ‌های سوم و پنجم را حساب کنید. سرعت صوت در هوا را  $340 \text{ m/s}$  فرض کنید.

### پاسخ

الف) با استفاده از رابطه  $v = \lambda f$  داریم:

$$\lambda_1 = \frac{v}{f_1} = \frac{340}{340} = 1 \text{ m}$$

در این صورت با استفاده از رابطه ۵-۲ طول لوله برابر است با:

$$L_1 = \frac{\lambda}{4} = 0.25 \text{ m}$$

ب) با استفاده از رابطه ۵-۶ برای  $n=2$  و  $n=3$  داریم:

$$f_2 = (2 \times 2 - 1)340 = 1020 \text{ Hz} \quad \text{و} \quad f_3 = (2 \times 3 - 1) \times 340 = 1700 \text{ Hz}$$

ب) هر دو انتهای لوله باز است. در این حالت در هر دو انتها شکم تشکیل می‌شود. برای صوت اصلی، همان‌طور که در شکل ۹-۵ الف نشان داده شده است، دو شکم در دو انتها و یک گره در وسط لوله تشکیل می‌شود. در این حالت طول لوله برابر فاصله دو شکم است. در این صورت داریم:

$$L = \lambda_1 / 2 \quad (7-5)$$

یعنی، طول موج صوت برابر با  $\lambda = 2L$  است.

در نتیجه بسامد اصلی برابر است با:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L} \quad (8-5)$$

همانگ‌های دیگر این صوت هنگامی

پدیدار می‌شوند که مطابق شکل ۹-۵ ب، پ

و... در داخل لوله دو گره ( $L = 4 \frac{\lambda_2}{4}$ )، سه گره

( $L = 6 \frac{\lambda_3}{4}$ )، ... n گره ( $L = 2n \frac{\lambda_n}{4}$ ) تشکیل

شود. طول موج صوت فرودی هنگامی که n گره

تشکیل شده است، از رابطه زیر به دست می‌آید:

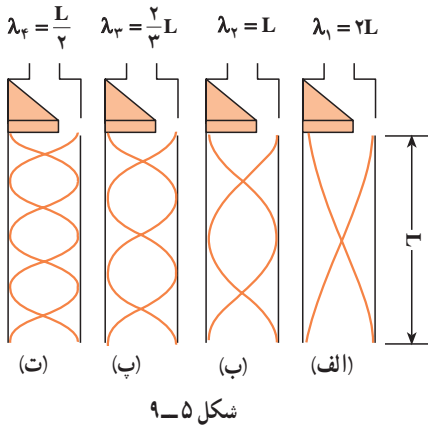
$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, \dots \quad (9-5)$$

و بسامد این صوت برابر است با:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n \frac{v}{2L} = n f_1 \quad n = 1, 2, \dots \quad (10-5)$$

ملاحظه می‌کنید که تمام همانگ‌ها در لوله‌ای که هر دو انتهای آن باز است ایجاد می‌شوند. در

چنین لوله‌ای، بسامد نوسان‌های طبیعی هوای داخل آن به صورت  $f_1$ ،  $2f_1$ ،  $3f_1$  و ... است.



شکل ۹-۵

## تمرین ۲-۵

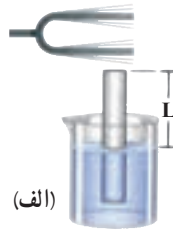
بسامد صوت اصلی و همانگ‌های دوم و سوم را در یک لوله صوتی به طول ۱ m

که هر دو انتهای آن باز است تعیین کنید (سرعت صوت را در هوا  $340 \text{ m/s}$  فرض کنید).

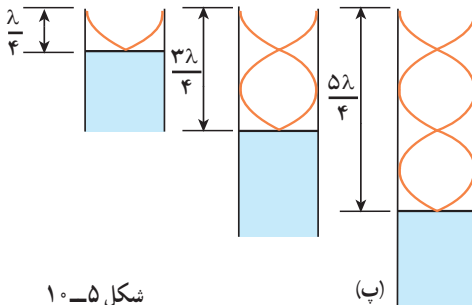
در قسمت قبل دیدیم که برای ایجاد موج‌های ایستاده، باید در دهانه لوله صوتی بدمیم. در واقع، از این طریق به راحتی نمی‌توان امواج ایستاده در لوله ایجاد کرد. روش مناسب و مؤثر برای انجام این کار این است که از پدیده تشدید استفاده کنیم. در فصل سوم با پدیده تشدید آشنا شدیم و دیدیم که اگر یک نوسانگر را با یک نیروی دوره‌ای به نوسان درآوریم، هنگامی که بسامد نیرو با بسامد طبیعی نوسانگر برابر باشد، تشدید رخ می‌دهد و در این حالت، بیشترین انرژی ممکن به نوسانگر منتقل می‌شود. برای ایجاد موج‌های ایستاده در لوله صوتی نیز می‌توانیم از این روش استفاده کنیم و هوای داخل لوله را با اعمال یک نیروی دوره‌ای به آن، به نوسان درآوریم. برای این کار کافی است که یک دیافراگم را در نزدیکی دهانه لوله به نوسان درآوریم. اگر بسامد نوسان این دیافراگم با هریک از بسامدهای طبیعی لوله صوتی برابر باشد، تشدید رخ خواهد داد. بدین وسیله می‌توان موج ایستاده با بسامد موردنظر را در لوله صوتی ایجاد کرد.

## فعالیت ۲-۵

در شکل ۵-۱ الف و ب می‌توان با تغییر مکان لیوان یا لوله، طول لوله صوتی را تغییر داد.  
با توجه به شکل پ توضیح دهید که در هریک از سه حالت شکل پ چگونه موج ایستاده تشکیل می‌شود.



(الف)



شکل ۵-۱

(ب)



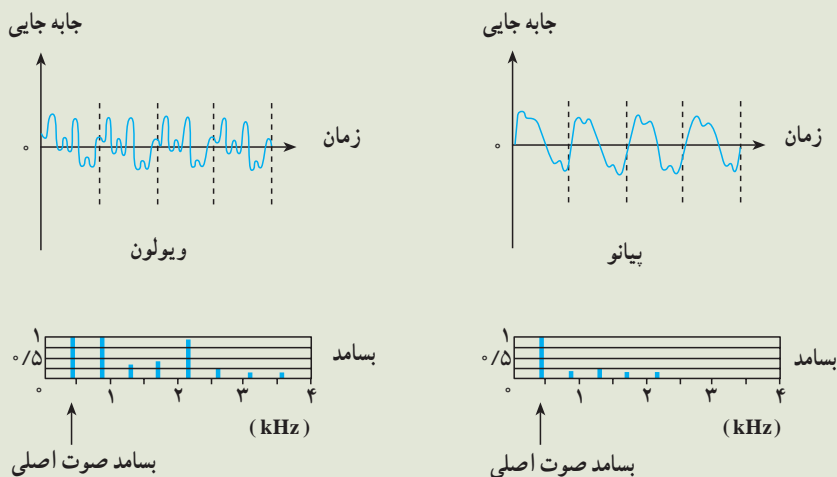
(ب)

با استفاده از یک لوله صوتی، آزمایشی را برای اندازه‌گیری سرعت صوت در هوا طراحی کنید.

### صوت‌های موسیقی

صوتی را که می‌شنویم به خصوصیت‌های گوش و ساز و کار شنوایی و نیز ویژگی‌های فیزیکی صوت بستگی دارد. معمولاً صوتی را که انسان با دستگاه شنوایی خود درک می‌کند برحسب سه مشخصه بلندی، ارتفاع و طنین بیان می‌کنند. برای تعریف این مشخصه‌ها به بررسی صوتی که یک تار مرتعش تولید می‌کند می‌پردازیم.

هنگامی که یک تار را مرتعش می‌کنیم، تنها هماهنگ اول آن ایجاد نمی‌شود، بلکه هماهنگ‌های دیگر آن نیز به وجود می‌آیند و از برهم نهی این هماهنگ‌ها یک موج مرکب ایجاد می‌شود. آنچه که ما پس از مرتعش کردن یک تار می‌شنویم از این موج مرکب حاصل می‌شود. در شکل ۵-۱۱ نسبت موج صوتی حاصل از پیانو و ویولون نشان داده شده است. در این شکل، نسبت دامنه هماهنگ‌ها به دامنه صوت اصلی نیز آمده است. در هر دو مورد بسامد صوت اصلی ۴۴۰ هرتز است؛ ولی تعداد و دامنه هماهنگ‌هایی که در ساختن این موج مرکب سهیم‌اند در این دو مورد متفاوت است. در نتیجه شکل موج مرکب حاصل با یکدیگر فرق می‌کنند. اکنون به توصیف مشخصه‌های صوت می‌پردازیم. طنین صوت به شکل موج مرکب بستگی دارد. یعنی طنین به نوع، تعداد و دامنه هماهنگ‌هایی که ایجاد شده‌اند وابسته است. ارتفاع صوت با بسامد موج اصلی که موج مرکب از آن ساخته می‌شود تعیین می‌شود و بلندی صوت، همان‌طور که دیدیم، به شدت صوت و خصوصیت‌های شنوایی شنونده بستگی دارد.



شکل ۵ - ۱۱

اکنون به توصیف صوت های موسیقی می پردازیم. برای این منظور لازم است چند مفهوم را تعریف کنیم.

۱- صوت موسیقی یا نت، صوتی است که (مانند شکل ۵-۱۱) از ارتعاش های منظم تشکیل شده است و اثر خوشایندی بر گوش انسان دارد.

۲- فاصله موسیقی، نسبت بسامد دو نت را فاصله موسیقی می نامند. تجربه نشان می دهد که هر فاصله ای برای انسان خوشایند نیست.

۳- گام موسیقی، مجموعه ای از چند نت است که فاصله آنها برای گوش خوشایند است. گام های متفاوتی در موسیقی وجود دارد. اکنون به توصیف گام طبیعی (زارلن) می پردازیم.

گام طبیعی از هشت نت  $do_1, re, mi, fa, sol, la, si, do_2$  تشکیل شده است که فاصله آنها از یک نت مینا ( $do_1$ ) که کمترین بسامد را دارد، به صورت زیر است:

$$9 \quad \frac{re}{do_1} = \frac{9}{8}, \quad \frac{mi}{do_1} = \frac{5}{4}, \quad \frac{fa}{do_1} = \frac{4}{3}, \quad \frac{sol}{do_1} = \frac{3}{2}, \quad \frac{la}{do_1} = \frac{5}{3}, \quad \frac{si}{do_1} = \frac{15}{8}$$

$\frac{do_2}{do_1} = 2$ ، بسامد  $do_2$  دو برابر بسامد  $do_1$  است و اکتاو  $do_1$  نامیده می شود. اگر  $do_2$  رانت مینا بگیریم، با رعایت فاصله های فوق می توان گام دوم را ساخت. به همین ترتیب

می توان بر مبنای  $do_p$  که اکتاو  $do_p$  است گام سوم را ساخت و به همین ترتیب ادامه داد. به عنوان مثال، اگر بسامد نت مینا را  $65/25$  هرتز اختیار کنیم، با استفاده از نسبت های بالا می توانیم بسامد نت های دیگر را به دست آوریم؛ در این صورت داریم:

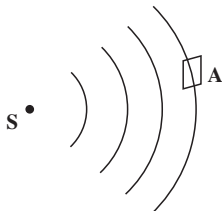
$$\frac{re_1}{do_1} = \frac{9}{8}$$

$$re_1 = \frac{9}{8} do_1 = 73/41 \text{ Hz}$$

به همین ترتیب بسامدهای  $81/56$ ،  $87$ ،  $97/88$ ،  $108/75$  و  $122/34$  هرتز به ترتیب برای  $me_1$ ،  $fa_1$ ،  $sol_1$ ،  $la_1$ ،  $si_1$  به دست می آیند. برای  $do_p$  که اکتاو  $do_1$  است بسامد  $130/5$  هرتز محاسبه می شود. اکنون می توانیم بر مبنای  $do_p$  گام بعدی را بسازیم. برای نت های این گام به ترتیب مقدارهای  $146/81$ ،  $163/13$ ،  $174$ ،  $195/75$ ،  $217/5$ ،  $244/69$  هرتز به دست می آیند. هر یک از این نت ها اکتاو نت متناظر در گام اول است (چرا؟) به همین ترتیب برای گام سوم به ترتیب مقدارهای  $261$ ،  $293/6$ ،  $326/25$ ،  $348$ ،  $391/5$ ،  $435$ ،  $489/38$  هرتز به دست می آیند. این مثال، نت های گام طبیعی را بر مبنای قرارداد  $la_p = 435 \text{ Hz}$  به دست می دهد. اکنون به عنوان تمرین تعیین کنید که بسامدهای  $1044$  و  $870$  هرتز بسامد چه نت هایی هستند و در کدام گام قرار دارند؟

## ۵-۴- شدت صوت

در بخش ۴-۴ دیدیم که موج ها (در طناب یا سطح آب) با خود انرژی حمل می کنند و این انرژی



شکل ۵-۱۲

با مجذور دامنه و مجذور بسامد موج متناسب است. این بیان در مورد موج های صوتی نیز درست است. در شکل ۵-۱۲ چشمه صوتی  $S$  را می بینید که موج های صوتی را در فضا منتشر می کند. فرض کنید انرژی  $E$  در زمان  $t$  به سطح  $A$  که عمود بر راستای انتشار صوت است برسد.

شدت صوت بنا به تعریف عبارت است از: مقدار انرژی ای که در واحد زمان به واحد سطح عمود بر راستای انتشار می رسد؛ در نتیجه، شدت صوت  $I$  در مکانی که سطح  $A$  قرار گرفته با رابطه زیر بیان می شود:

$$I = \frac{E}{At} \quad (5-11)$$

رابطه ۱۱-۵ را می توان با استفاده از تعریف توان ( $P = \frac{E}{t}$ ) به صورت زیر نوشت:

$$I = \frac{P}{A} \quad (۱۲-۵)$$

یکای شدت موج در SI وات بر مترمربع ( $W/m^2$ ) است.

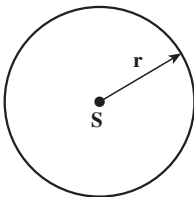
### مثال ۳-۵

به سطح یک میکروفون که مساحت آن  $3 \text{ cm}^2$  است در مدت ۵ ثانیه  $1/5 \times 10^{-11} \text{ J}$  انرژی صوتی می رسد. شدت صوت در سطح میکروفون چه مقدار است؟ (سطح میکروفون عمود بر راستای انتشار صوت است).

پاسخ

با استفاده از رابطه ۱۱-۵ داریم:

$$I = \frac{E}{At} = \frac{1/5 \times 10^{-11}}{3 \times 10^{-4} \times 5} = 10^{-8} \text{ W/m}^2$$



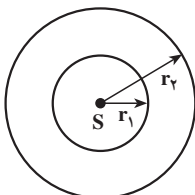
شکل ۱۳-۵

اکنون ممکن است این پرسش پیش بیاید که: چرا هرچه از چشمه صوت دور می شویم صدا ضعیف تر می شود؟ برای پاسخ دادن به این سؤال چشمه صوت S را در نظر می گیریم که موج های کروی در فضا ایجاد می کند (شکل ۱۳-۵).

فرض کنید توان چشمه صوت P باشد و چشمه در تمام جهتهای

فضا، موج را به صورت یکسان گسیل کند. شدت صوت در روی کره ای به شعاع r چه قدر است؟ اگر از اتلاف انرژی صوتی در هوا صرف نظر کنیم، در واحد زمان انرژی P به سطح کره ای به مساحت  $4\pi r^2$  می رسد. در نتیجه شدت صوت بر روی این کره برابر است با:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (۱۳-۵)$$



شکل ۱۴-۵

این رابطه نشان می دهد که با دور شدن از چشمه S شدت صوت کاهش می یابد. حال برای این که ببینیم این کاهش به چه نسبتی صورت می گیرد، دو جبهه موج کروی به شعاع های  $r_1$  و  $r_2$  در نظر می گیریم (شکل ۱۴-۵).



انرژی ای که در واحد زمان به سطح کره ای با شعاع  $r_1$  می رسد ( $P_1$ ) با انرژی ای که در واحد زمان به سطح کره ای با شعاع  $r_2$  می رسد ( $P_2$ ) برابر است. بنابراین داریم:

$$P_1 = P_2 \quad (14-5)$$

$$I_1 = \frac{P_1}{4\pi r_1^2} \quad \text{شدت صوت روی سطح کره ۱ برابر است با:}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{4\pi r_2^2} \quad \text{و روی سطح کره ۲ برابر است با:}$$

با جای گذاری این رابطه ها در رابطه ۱۴-۵ داریم:

$$4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \quad \text{و یا} \quad (15-5)$$

همان طور که این رابطه نشان می دهد، شدت صوت با مجذور فاصله از چشمه صوت نسبت عکس دارد.

### مثال ۴-۵

شدت صوت یک سخنران در یک سالن در فاصله ۴ متری  $W/m^2 \times 10^{-6}$  است. شدت صوت او در فاصله ۲۰ متری چه قدر است؟

**پاسخ**

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \quad \text{با استفاده از رابطه ۱۵-۵ داریم:}$$

$$\frac{I_2}{10^{-6}} = \left(\frac{4}{20}\right)^2 = \frac{1}{25} \quad \text{با جای گذاری مقادیر } r_1 \text{ و } r_2 \text{ و } I_1 \text{ داریم:}$$

$$I_2 = 4 \times 10^{-8} W/m^2$$

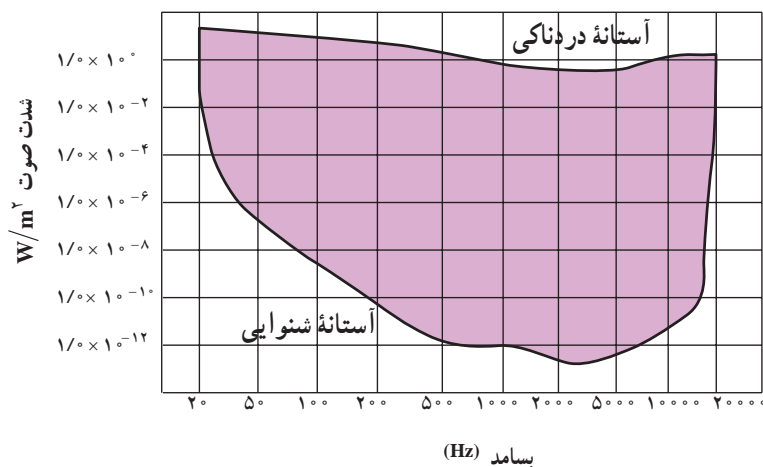
یعنی در مقایسه با فاصله ۴ متری، شدت صوت در فاصله ۲۰ متری ۲۵ مرتبه کاهش می یابد. به نظر شما آیا این بدان معنا است که صوت در فاصله ۴ متری ۲۵ بار بلندتر از صوت در فاصله ۲۰ متری شنیده می شود؟

شدت صوت برای برخی صوت‌ها در جدول ۳-۵ آمده است.

جدول ۳-۵- شدت صوت و تراز شدت صوت برای برخی صوت‌ها

تراز شدت صوت dB	شدت صوت $W/m^2$	صدا
۰	$10^{-12}$	شدت صوت مینا
۱۰	$10^{-11}$	نفس کشیدن
۲۰	$10^{-10}$	برگ درختان در نسیم صحبت کردن از فاصله
۴۰	$10^{-8}$	یک متری
۶۰	$10^{-6}$	همهمه در فروشگاه سروصدای خودروها در
۷۰	$10^{-5}$	خیابان شلوغ
۱۲۰	۱	آستانه دردناکی (برای بسامد ۱۰۰۰ Hz)
۱۳۰	۱۰	مسلسل غرش هواپیمای جت
۱۴۰	$10^2$	درحین بلندشدن راکت فضایی، در موقع
۱۷۰	$10^5$	بلندشدن

آهسته‌ترین صدایی (کمترین شدت) را که انسان می‌تواند بشنود آستانه شنوایی می‌نامند، و بلندترین صدایی (بیشینه شدت) که انسان می‌تواند بشنود بدون اینکه گوش او به درد آید آستانه دردناکی می‌نامند. آستانه شنوایی و آستانه دردناکی به بسامد بستگی دارند. نمودار شدت صوت در آستانه شنوایی و دردناکی را به صورت تابعی از بسامد، در شکل ۵-۱۵ مشاهده می‌کنید.



شکل ۵-۱۵

## پرسش ۲-۵

با استفاده از نمودار شکل ۵-۱۵ تعیین کنید که آستانه شنوایی و دردناکی در بسامد  $10,000$  هرتز تقریباً چه قدر است.

هرچه شدت صوت بیشتر باشد، مقدار انرژی ای که گوش دریافت می کند بیشتر است و انسان صدا را بلندتر احساس می کند، با این حال، این به معنای آن نیست که بلندی صوت با شدت آن نسبت مستقیم دارد؛ پس اگر شدت صوت دو برابر شود، بلندی صدایی که احساس می کنیم دو برابر نمی شود. در جدول ۳-۵ می بینید که شدت صوت در غرش هواپیما  $10^2 \text{ W/m}^2$  و شدت صوت در گفت و گوی بین دو نفر  $10^{-8} \text{ W/m}^2$  است؛ یعنی، شدت غرش هواپیمای جت  $10^{10}$  برابر شدت گفت و گو است. ولی می دانید که ما غرش هواپیما را هیچ گاه  $10^1$  برابر بلندتر از گفت و گوی دو نفر احساس نمی کنیم. به این علت به تعریف تراز شدت صوت که درک انسان را از بلندی صوت بیان می کند نیاز داریم: تراز شدت یک صوت عبارت است از لگاریتم (در پایه ده) نسبت شدت آن صوت به شدت صوت مبنا. تراز شدت صوت را با  $\beta$  نشان می دهند و یکای آن را به افتخار بل فیزیک دان امریکایی مخترع تلفن، بل (B) و دسی بل (dB) نام گذاری کرده اند. هر بل برابر ده دسی بل است.

$$\beta = \log \frac{I}{I_0} \quad \text{بل (B)} \quad (16-5)$$

$$\beta = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad (\text{dB}) \quad \text{دسی بل} \quad (17-5)$$

$I_0$  شدت صوت مبنا است که برابر با آستانه شنوایی گوش سالم در بسامد  $1000$  هرتز ( $10^{-12} \text{ W/m}^2$ ) در نظر گرفته می شود. در جدول ۳-۵ شدت پاره‌ای از صوت‌ها برحسب دسی بل بیان شده است.

### مثال ۵-۵

در جدول ۳-۵ شدت صوت آستانه دردناکی (برای بسامد  $1000 \text{ Hz}$ )  $1 \text{ W/m}^2$  ذکر شده است. تراز شدت صوت را برای آن به دست آورید.

### پاسخ

با استفاده از رابطه ۱۷-۵ داریم:

$$\beta = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{1}{10^{-12}} = 120 \text{ dB}$$

### تمرین های فصل پنجم

- ۱- کدام یک از عامل‌های زیر بر سرعت صوت در هوا مؤثر است؟  
الف) شکل موج      ب) دامنه موج      پ) بسامد موج      ت) دمای هوا
- ۲- آزمایشی برای اندازه‌گیری سرعت صوت در آب طراحی کنید.
- ۳- دلفین، مانند خفاش، از خود فراصوت گسیل می‌کند. طول موج صوت دلفین با بسامد  $10^5 \text{ Hz}$  در آب چه قدر است؟
- ۴- ناظری در سطح زمین ایستاده است، صدای رعد  $5$  ثانیه پس از مشاهده برق به گوش او می‌رسد. اگر دمای هوا  $27^\circ \text{C}$  باشد، فاصله ناظر از محل ایجاد رعد و برق چه مقدار است؟
- ۵- دانش‌آموزی بین دو صخره قائم ایستاده است و فاصله او از صخره نزدیکتر  $240$  متر است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از  $1/5$  ثانیه و صدای پژواک دوم را  $1$  ثانیه بعد از پژواک اول می‌شنود.
- الف) سرعت صوت را در هوا به دست آورید. ب) فاصله بین دو صخره را محاسبه کنید.

۶- یک انتهای یک لوله صوتی، باز و انتهای دیگر بسته است. الف) طول لوله برای این که هوای داخل لوله در بسامد اصلی  $6^\circ\text{Hz}$  به تشدید درآید چه قدر است؟ ب) بارسم شکل، هماهنگ اصلی و هماهنگ های سوم و پنجم آن را نمایش دهید. پ) طول موج صوت اصلی و هماهنگ های سوم و پنجم آن را تعیین کنید. سرعت صوت را  $340\text{ m/s}$  در نظر بگیرید.

۷- تمرین ۶ را در حالتی که هر دو انتهای لوله صوتی باز است حل کنید.

۸- طول یک لوله صوتی که هر دو انتهای آن باز است  $1/7\text{m}$  است. بسامد هماهنگ سوم این لوله را محاسبه کنید. سرعت صوت را  $340\text{ m/s}$  در نظر بگیرید.

۹- یک چشمه صوت موج های کروی در هوا گسیل می کند. الف) نسبت شدت صوت در دو نقطه که فاصله آنها از چشمه صوت  $d_1$  و  $2d_1$  است چه قدر است؟ ب) کاهش شدت صوت گسیل شده از چشمه عملاً بیشتر از آن است که در قسمت الف) به دست می آید. علت چیست؟

۱۰- دو نفر به فاصله های  $d_1$  و  $d_2$  از یک چشمه صوت ایستاده اند. تراز شدت صوت برای این دو نفر به ترتیب  $2^\circ\text{dB}$  و  $1^\circ\text{dB}$  است. نسبت  $\frac{d_2}{d_1}$  را حساب کنید.

۱۱- در فاصله  $2^\circ\text{m}$  از چشمه صوتی تراز شدت صوت  $6^\circ\text{dB}$  است. با این فرض که جذب صوت به وسیله هوا قابل چشم پوشی است، در چه فاصله ای از این چشمه می توان صوت را به زحمت شنید. آیا به نظر شما پاسخ به دست آمده منطقی است؟

۱۲- پرده صماخ گوش شخصی به قطر  $7/5^\circ$  سانتی متر، به مدت ۲ ساعت، صوتی با تراز  $9^\circ\text{dB}$  را جذب می کند. در این مدت پرده گوش چه مقدار انرژی برحسب ژول جذب کرده است؟