

# موج های صوتی



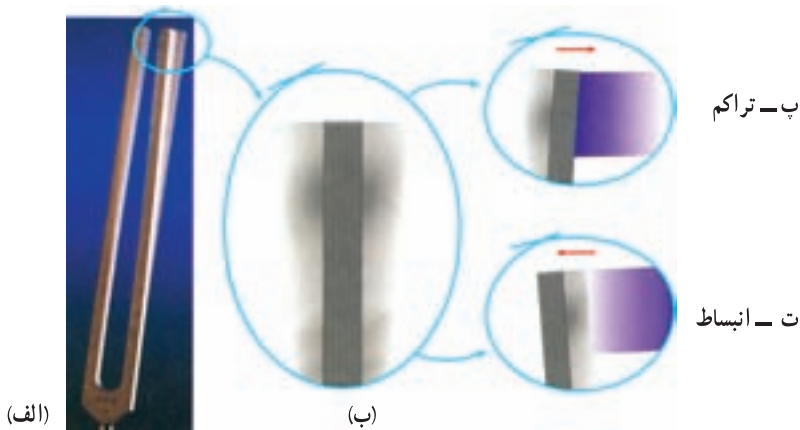
## فصل

## صوت

### ۱-۵- موج صوتی

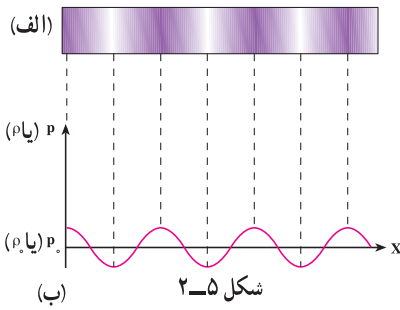
یکی از مهم‌ترین موج‌هایی که ما در زندگی روزمره با آن سروکار داریم موج صوتی است. برای مثال، از طریق این موج‌ها با یکدیگر گفت‌وگو می‌کنیم، با به صدا در آوردن بوق ماشین، به عابری که از خیابان عبور می‌کند هشدار می‌دهیم و ...

برای اینکه بدانیم موج‌های صوتی چگونه ایجاد می‌شوند فرایند تولید صوت به وسیله یک دیپازون را تشریح می‌کنیم. یک دیپازون را مطابق شکل ۱-۵ الف و ب در نظر بگیرید. قبل از ارتعاش دیپازون هوای مجاور آن در حال تعادل است و فشار و چگالی آن در همه جا ثابت و به ترتیب برابر  $P_0$  و  $P_0$  است. اکنون دیپازون را مرتعش می‌کنیم. هنگامی که شاخه آن مطابق شکل ۱-۵ پ به طرف راست حرکت می‌کند، لایه هوای مجاور خود را متراکم می‌کند و چگالی و فشار آن را نسبت به حالت تعادل افزایش می‌دهد که این لایه متراکم نیز به نوبه خود لایه مجاورش را متراکم می‌کند.



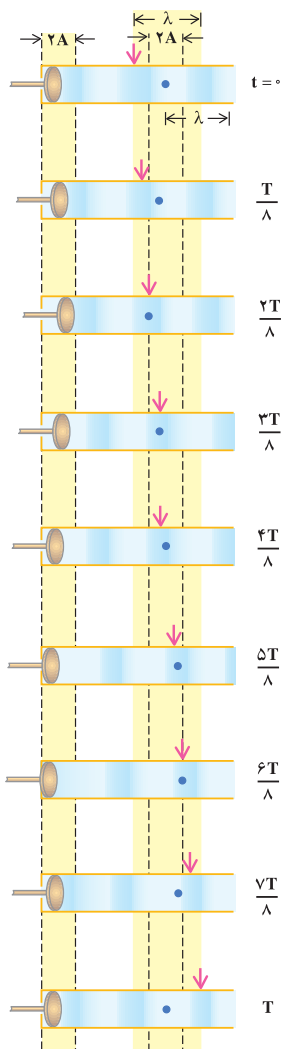
شکل ۱-۵

به این ترتیب یک آشفتگی یا تپ ایجاد می‌شود که در آن فشار و چگالی بیشتر از حالت تعادل است. این تپ تراکمی (پرفشار) در هوا منتشر می‌شود. هنگامی که شاخه دیپازون برمی‌گردد، همان‌طور که در شکل ۱-۵ ت می‌بینید، لایه هوای مجاور آن منبسط می‌شود و چگالی و فشار این لایه نسبت به حالت تعادل کاهش می‌یابد. این لایه انبساط یافته نیز به صورت یک تپ انبساطی (کم‌فشار) در هوا منتشر



می‌شود. بنابراین هنگامی که دیابازون مرتعش می‌شود تب‌های متوالی تراکمی و انبساطی (شکل ۲-۵) در هوا منتشر می‌کند. نمودار تغییرات فشار (جگالی) 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 تب به صورت برجستگی و یا فرورفتگی بود. اما در حالت انتشار صوت در هوا، آشفستگی یا تب به صورت لایه‌های تراکمی و انبساطی یا لایه‌های پر فشار و کم فشار 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 ۲-۴ 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.

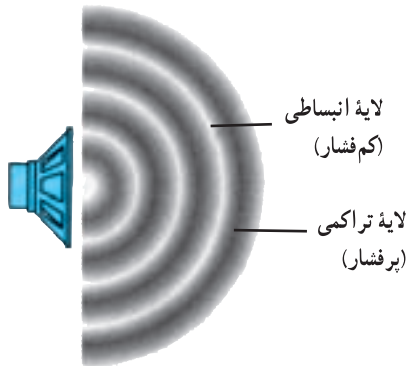


شکل ۳-۵

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.

مثال‌هایی از انتشار صوت در مایع‌ها و جامدها ذکر کنید.



شکل ۴-۵

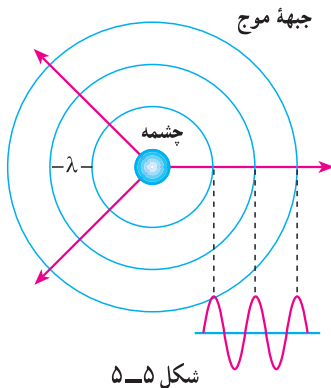
هر جسم مرتعش در هوا، خود یک چشمه تولید موج‌های صوتی است. چشمه صوت ممکن است به سادگی یک دیابازون و یا به پیچیدگی حنجره انسان باشد. در هنگام صحبت در اثر ارتعاش تارهای صوتی در حنجره امواج صوتی در هوا ایجاد می‌شوند.

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

لایه‌های تراکمی (پرفشار) و انبساطی (کم‌فشار) یک موج صوتی که از یک بلندگوی کوچک در هوا منتشر می‌شود، 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 به‌طور یکنواخت در تمام جهت‌ها گسیل کند، صوت به‌صورت موج کروی در فضا منتشر می‌شود. جبهه‌های موج این امواج به‌صورت کره‌هایی به‌مرکز 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 ۲۰ تا ۲۰,۰۰۰ هرتز است، بشنود. بعضی حیوان‌ها مانند سگ‌ها گستره وسیع‌تری از بسامدها (۱۵ تا ۵۰,۰۰۰ هرتز) را می‌شنوند. خفاش‌ها تا بسامد ۱۰۰,۰۰۰ هرتز را نیز می‌شنوند. موج‌های صوتی با بسامد پایین‌تر از ۲۰ Hz را فرو‌صوت و بالاتر از ۲۰,۰۰۰ Hz را فراصوت می‌نامند. موج‌های فراصوت کاربردهای فراوانی در پزشکی و صنعت دارند.

## ۲-۵- سرعت صوت

در فیزیک ۱ 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. چنان که می‌بینید هرچه ماده متراکم‌تر باشد، سرعت انتشار صوت در آن بیشتر است؛ زیرا در ماده متراکم مولکول‌ها به یکدیگر نزدیک‌ترند و تپ ایجاد شده می‌تواند در زمان کمتری به نقطه مجاور خود منتقل شود.

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

سرعت (m/s)	دما (°C)		
۳۱۶	۰	اکسیژن	گازها
۳۳۱	۰	هوا	
۳۴۳	۲۰	هوا	
۳۳۴	۰	نیترژن	
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 شده 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 بر حسب کلونین،  $R$  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	تک‌اتمی
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  $۲۷^{\circ}\text{C}$  به دست آورید (برای هوا،  $M = ۲۹\text{g}$ )

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

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

### کاربرد موج‌های صوتی

برای تعیین محل جسم‌هایی که زیر آب قرار دارند، از بازتاب موج‌های صوتی استفاده می‌شود. 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 می‌فرستند و با یک آشکارساز، بازتاب یا پژواک آن را اندکی بعد دریافت می‌کنند. سپس زمان رفت و برگشت موج را به دقت اندازه می‌گیرند و از روی آن فاصله جسمی را که موج را بازتابانده است تعیین می‌کنند. (سرعت صوت در آب مشخص است) با این روش عمق دریاها، محل صخره‌های زیر آب، محل کشتی‌های غرق شده، زیر دریایی‌ها و حتی محل تجمع گروهی از ماهی‌ها را که باهم حرکت می‌کنند می‌توان تعیین کرد.

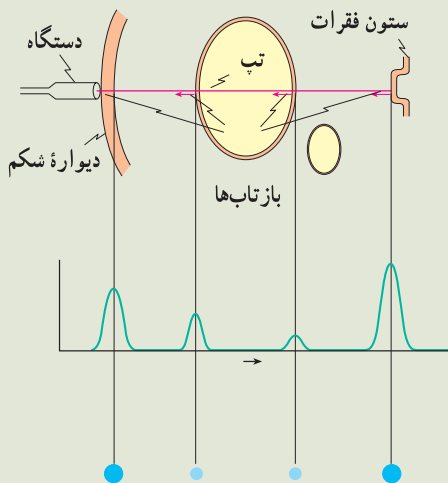
با این روش می‌توان ساختار داخلی زمین را نیز مشخص کرد. برای این منظور یک انفجار زیرزمینی ایجاد می‌کنند و با آشکارسازی بازتاب موج‌های تولید شده در اثر انفجار می‌توان ساختار نواحی مختلف زمین را تعیین کرد. این روش در اکتشاف نفت و مواد معدنی به کار می‌رود.

در کاربردهای بالا اغلب از بسامدهای بیش از  $20 \text{ kHz}$  که در ناحیه فراصوتی قرار دارد استفاده می‌شود؛ زیرا این موج‌ها علاوه بر این که قابل شنیدن نیستند دارای طول موج کوتاه‌اند و اجسام با ابعاد کوچک را می‌توان با استفاده از آنها آشکار کرد. در پزشکی هم از این موج‌ها برای از بین بردن بافت‌های ناخواسته و یا اجسام نامطلوب در بدن (مانند غده‌ها و یا سنگ‌های کلیه) استفاده می‌شود. این موج‌ها بر روی ماده ناخواسته متمرکز می‌شوند؛ برای مثال، تابش متمرکز این موج‌ها 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.

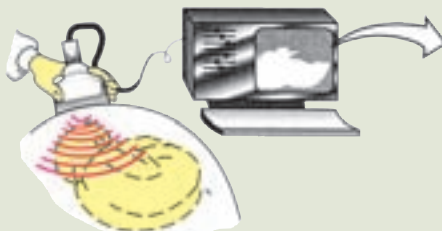
از موج‌های فراصوتی همچنین در تشخیص بیماری نیز استفاده می‌شود. بدین ترتیب که یک تپ فراصوتی به داخل بدن بیمار فرستاده می‌شود. این تپ از مرزها و فصل مشترک‌های بین اعضای داخل بدن بازتاب می‌یابد که با آشکارسازی آن می‌توان اطلاع لازم را در مورد بیماری عضو مورد نظر کسب کرد. این روش برای تشخیص محل غده‌ها و سایر 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



شکل ۶-۵

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



شکل ۷-۵





## 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:

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

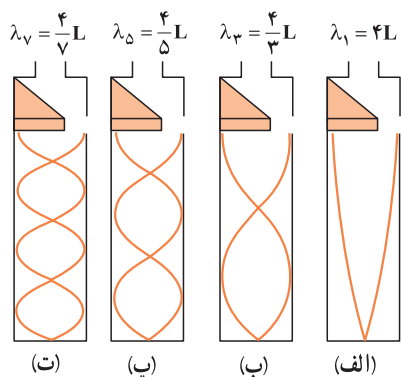
و یا طول موج صوت برابر است با:

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

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 دو گره، سه گره، ... n گره تشکیل شود. در این صورت، همان‌گونه که در این شکل می‌بینید، طول لوله به ترتیب برابر است با  $\frac{\lambda_3}{4}$ ،  $\frac{\lambda_5}{4}$ ، ...،  $\frac{\lambda_{2n-1}}{4}$  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، ب، ب، ب

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 می‌شود. در

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

## تمرین ۲-۵

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

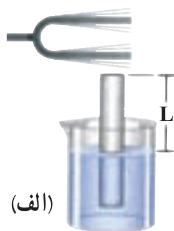
هر دو انتهای آن باز است تعیین کنید. (سرعت صوت را در هوا  $340 \text{ m/s}$  فرض کنید).

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 فیزیک (۱) 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 دیافازون را در نزدیکی دهانه لوله به نوسان درآوریم. اگر بسامد نوسان این دیافازون 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.

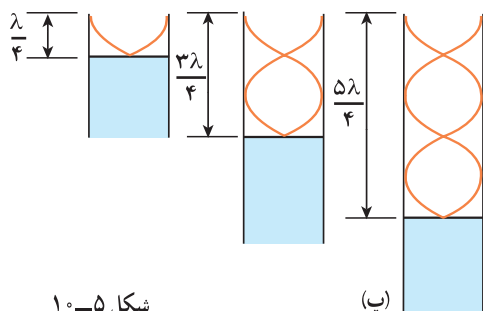
## فعالیت ۵-۲

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)



(ب)

شکل ۵-۱



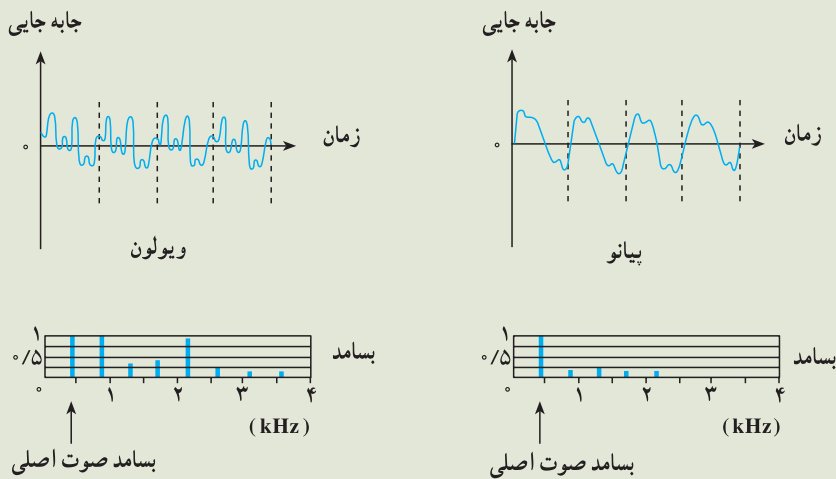
(ب)

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 سازوکار 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 ۱۱-۵

اکنون به توصیف صوت‌های موسیقی می‌پردازیم. برای این منظور لازم است چند مفهوم را تعریف کنیم.

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

۲- فاصله موسیقی، نسبت بسامد دو نت را فاصله موسیقی می‌نامند. تجربه نشان می‌دهد که هر فاصله‌ای برای انسان خوشایند نیست.

۳- گام موسیقی، مجموعه‌ای از چند نت است که فاصله آنها برای گوش خوشایند است. گام‌های متفاوتی در موسیقی وجود دارد. اکنون به توصیف گام طبیعی (زارلن) می‌پردازیم.

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

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

$\frac{do_2}{do_1} = 2$ ، بسامد  $do_2$  دو برابر بسامد  $do_1$  است و اکتاو  $do_1$  نامیده می‌شود. اگر  $do_2$

رانت مبنا بگیریم، با رعایت فاصله‌های فوق می‌توان گام دوم را ساخت. به همین ترتیب

می‌توان بر مبنای  $do_3$  که اکتاو  $do_2$  است گام سوم را ساخت و به همین ترتیب ادامه داد. به‌عنوان مثال، اگر بسامد نت مینا را  $65/25$  هرتز اختیار کنیم، با استفاده از نسبت‌های بالا می‌توانیم بسامد نت‌های دیگر را به‌دست 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  $me_1$ ،  $fa_1$ ،  $sol_1$ ،  $la_1$ ،  $si_1$  به‌دست می‌آیند. برای  $do_2$  که اکتاو  $do_1$  است بسامد  $130/5$  هرتز محاسبه می‌شود. اکنون می‌توانیم بر مبنای  $do_2$  گام بعدی را بسازیم. برای نت‌های این گام به ترتیب مقدارهای  $146/81$ ،  $163/13$ ،  $174$ ،  $195/75$ ،  $217/5$ ،  $244/69$  هرتز به‌دست می‌آیند. هریک از این نت‌ها 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 می‌آیند. این مثال، نت‌های گام طبیعی را بر مبنای قرارداد  $la_3 = 435 \text{ Hz}$  به‌دست می‌دهد. اکنون به‌عنوان تمرین تعیین کنید که بسامدهای  $1044$  و  $870$  هرتز بسامد چه نت‌هایی هستند و در کدام گام قرار دارند؟

## ۵-۴- شدت صوت

در بخش ۴-۴ دیدیم که موج‌ها (در طناب یا سطح آب) با خود انرژی حمل می‌کنند و این انرژی با مجذور دامنه و مجذور بسامد موج متناسب است. این بیان در مورد موج‌های صوتی نیز درست است. در شکل ۵-۱۲ چشمه صوتی  $S$  را می‌بینید که موج‌های صوتی را در فضا منتشر می‌کند. 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 انرژی‌ای که در واحد زمان به واحد سطح عمود بر راستای انتشار می‌رسد؛ در نتیجه، شدت صوت  $I$  در مکانی که سطح  $A$  قرار گرفته با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$I = \frac{E}{At}$$

(۵-۱۱)

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

$$I = \frac{P}{A} \quad (12-5)$$

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

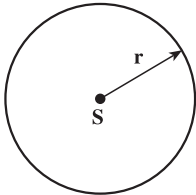
### مثال ۳-۵

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 می‌رسد. شدت صوت در سطح میکروفون چه مقدار است؟ (سطح میکروفون عمود بر راستای انتشار صوت است).

پاسخ

با استفاده از رابطه ۱۱-۵ داریم:

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



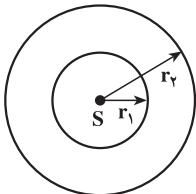
شکل ۱۳-۵

اکنون ممکن است این پرسش پیش بیاید که: چرا هرچه از چشمه صوت دور می‌شویم صدا ضعیف‌تر می‌شود؟ برای پاسخ‌دادن به این سؤال چشمه صوت S را در نظر می‌گیریم که موج‌های کروی در فضا ایجاد می‌کند (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 کره‌ای به شعاع r چه قدر است؟ اگر از اتلاف انرژی صوتی در هوا صرف‌نظر کنیم، در واحد زمان انرژی P به سطح کره‌ای به مساحت  $4\pi r^2$  می‌رسد. در نتیجه شدت صوت بر روی این کره برابر است با:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (13-5)$$



شکل ۱۴-۵

این رابطه نشان می‌دهد که با دور شدن از چشمه S شدت صوت کاهش

می‌یابد. حال برای این که بینیم این کاهش به چه نسبتی صورت می‌گیرد، دو جبهه موج کروی به شعاع‌های  $r_1$  و  $r_2$  در نظر می‌گیریم (شکل ۱۴-۵).



انرژی‌ای که در واحد زمان به سطح کره‌ای با شعاع  $r_1$  می‌رسد ( $P_1$ ) با انرژی‌ای که در واحد زمان به سطح کره‌ای با شعاع  $r_2$  می‌رسد ( $P_2$ ) برابر است. بنابراین داریم:

$$P_1 = P_2 \quad (۱۴-۵)$$

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

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

با جای‌گذاری این رابطه‌ها در رابطه ۱۴-۵ داریم:

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

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \quad \text{و یا} \quad (۱۵-۵)$$

همان‌طور که این رابطه نشان می‌دهد، شدت صوت با مجذور فاصله از چشمه صوت نسبت عکس دارد.

### مثال ۱۴-۵

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

**پاسخ**

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

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

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

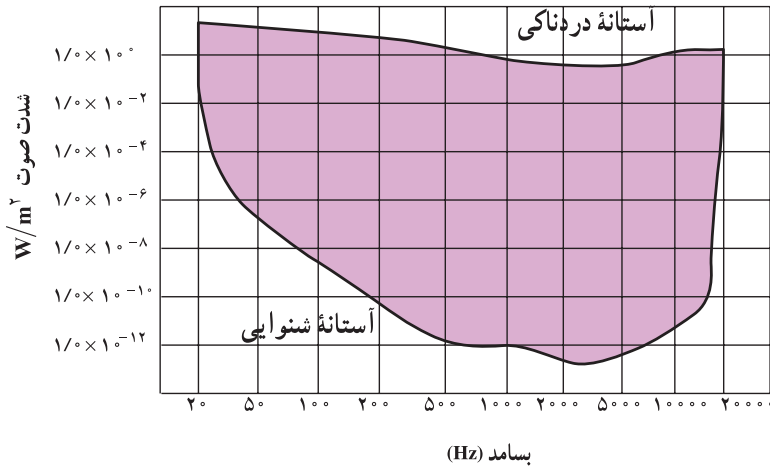
یعنی در مقایسه با فاصله ۴ متری، شدت صوت در فاصله ۲۰ متری ۲۵ مرتبه کاهش می‌یابد. به نظر شما آیا این بدان معنا است که صوت در فاصله ۴ متری ۲۵ بار بلندتر از صوت در فاصله ۲۰ متری شنیده می‌شود؟

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 <sup>2</sup>	صدا
۰	۱۰ <sup>-۱۲</sup>	شدت صوت مینا
۱۰	۱۰ <sup>-۱۱</sup>	نفس کشیدن
۲۰	۱۰ <sup>-۱۰</sup>	برگ درختان در نسیم صحبت کردن از فاصله
۴۰	۱۰ <sup>-۸</sup>	یک متری
۶۰	۱۰ <sup>-۶</sup>	همهمه در فروشگاه سروصدای خودروها در
۷۰	۱۰ <sup>-۵</sup>	خیابان شلوغ
۱۲۰	۱	آستانه دردناکی (برای بسامد ۱۰۰۰ Hz)
۱۳۰	۱۰	مسلسل غرش هواپیمای جت
۱۴۰	۱۰ <sup>۲</sup>	درحین بلندشدن راکت فضایی، در موقع
۱۷۰	۱۰ <sup>۵</sup>	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 آستانۀ شنوایی و دردناکی در بسامد  $۱۰,۰۰۰$  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  $۱۰^۲ \text{ W/m}^2$  و شدت صوت در گفت و گوی بین دو نفر  $۱۰^{-۸} \text{ W/m}^2$  است؛ یعنی، شدت غرش هواپیمای جت  $۱۰^{۱۰}$  برابر شدت گفت و گو است. ولی می دانید که ما غرش هواپیما را هیچ گاه  $۱۰^{۱۰}$  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  $\beta$  با 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.

$$\beta = \log \frac{I}{I_0} \quad \text{بل (B)} \quad (۱۶-۵)$$

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

$I_0$  شدت صوت مبنا است که برابر با آستانه شنوایی گوش سالم در بسامد  $1000$  هرتز ( $10^{-12} \text{ W/m}^2$ ) در نظر گرفته می‌شود. 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:

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

### تمرین‌های 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  $4 \times 10^5 \text{ Hz}$  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  $60\text{ Hz}$  به تشدید درآید چه قدر است؟ ب) با رسم شکل، هماهنگ اصلی و هماهنگ‌های سوم و پنجم آن را نمایش دهید. پ) طول موج صوت اصلی و هماهنگ‌های 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 موج‌های کروی در هوا گسیل می‌کند. 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 می‌آید. علت چیست؟
- ۱۰- دو نفر به فاصله‌های  $d_1$  و  $d_2$  از یک چشمه صوت ایستاده‌اند. تراز شدت صوت برای این دو نفر به ترتیب  $2\text{ dB}$  و  $10\text{ dB}$  است. نسبت  $\frac{d_2}{d_1}$  را حساب کنید.
- ۱۱- در فاصله  $2\text{ m}$  از چشمه صوتی تراز شدت صوت  $60\text{ dB}$  است. با این فرض که جذب صوت به وسیله هوا قابل چشم‌پوشی است، در چه فاصله‌ای از این چشمه می‌توان صوت را به زحمت شنید. آیا به نظر شما پاسخ به دست آمده منطقی است؟
- ۱۲- پرده صماخ گوش شخصی به قطر  $7/5^\circ$  سانتی‌متر، به مدت ۲ ساعت، صوتی با تراز  $90\text{ dB}$  را جذب می‌کند. در این مدت پرده گوش چه مقدار انرژی برحسب ژول جذب کرده است؟