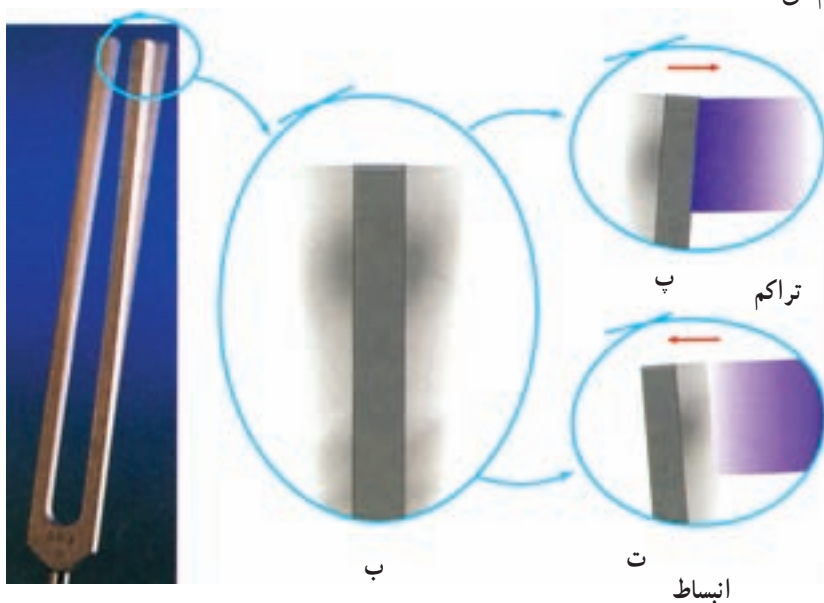


۱-۴- موج صوتی

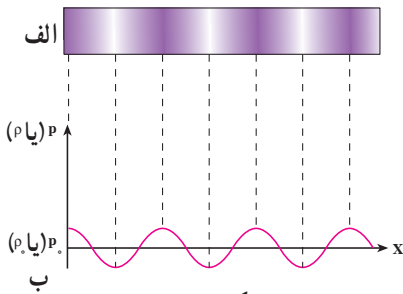
یکی از مهم‌ترین موج‌هایی که ما در زندگی روزمره با آن سروکار داریم موج صوتی است. برای مثال، از طریق این موج‌ها با یک‌دیگر گفت‌وگو می‌کنیم، با به صدا در آوردن بوق ماشین، به عابری که از خیابان عبور می‌کند هشدار می‌دهیم و ...

برای این که بدانیم موج‌های صوتی چگونه ایجاد می‌شوند فرایند تولید صوت به وسیله‌ی یک دیپازون را تشریح می‌کنیم. یک دیپازون را مطابق شکل ۱-۲۸- 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 ρ_0 است. اکنون دیپازون را مرتعش می‌کنیم. هنگامی که شاخه‌ی آن مطابق شکل ۱-۲۸- پ به طرف راست حرکت می‌کند، لایه‌ی هوای مجاور خود را متراکم می‌کند و چگالی و فشار آن را نسبت به حالت تعادل افزایش می‌دهد که این لایه‌ی متراکم نیز به نوبه‌ی خود لایه‌ی مجاورش را متراکم می‌کند.

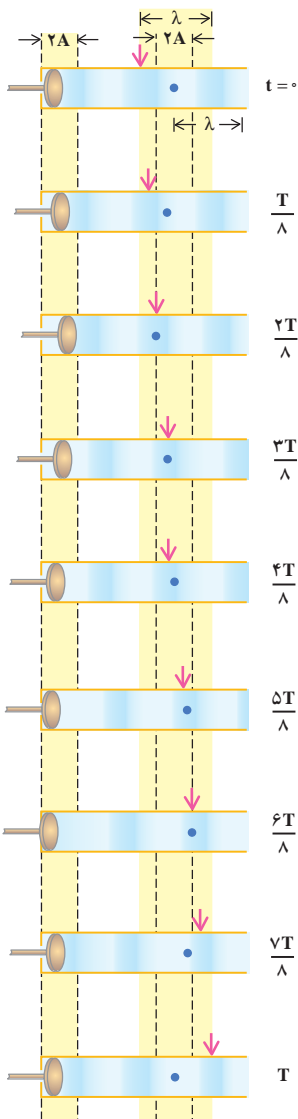


شکل ۱-۲۸

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 شاخه‌ی دیپازون برمی‌گردد، همان‌طور که در شکل ۱-۲۸- ت می‌بینید، لایه‌ی هوای مجاور آن منبسط می‌شود و چگالی و فشار این لایه نسبت به حالت تعادل کاهش می‌یابد. این لایه‌ی انبساط یافته نیز به صورت یک تپ انبساطی (کم‌فشار) در



شکل ۲۹-۱



شکل ۳۰-۱

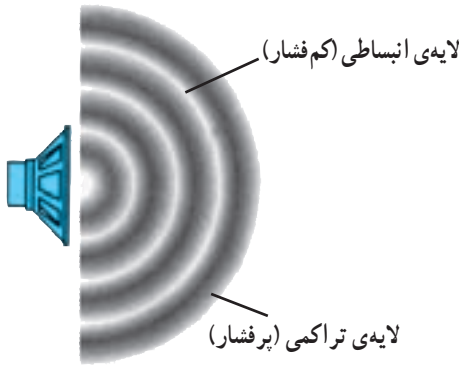
هوا منتشر می‌شود. بنابراین هنگامی که دیافراگم مرتعش می‌شود تب‌های متوالی تراکمی و انبساطی (شکل ۲۹-۱) در هوا منتشر می‌کند. نمودار تغییرات فشار (چگالی) برحسب فاصله در یک لحظه از زمان در شکل ۲۹-۱-ب نشان داده شده است.

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 پرفشار و کم‌فشار است. هم‌چنین، دیدیم که هنگام انتشار موج در محیط ذره‌های محیط منتقل نمی‌شوند، بلکه حول نقطه‌ی تعادل خود حرکت نوسانی انجام می‌دهند؛ مثلاً، در شکل ۴-۷ دیدیم که اگر به یک نقطه از محیط نگاه کنیم، این نقطه (که با رنگ قرمز نشان داده شده است) درحین 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 نقطه‌ی تعادل خود نوسان می‌کنند. لایه‌های تراکمی و انبساطی نیز در اثر این نوسان‌ها به وجود می‌آید.

در شکل ۱-۳۰ 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، درحین انتشار موج پس از یک نوسان کامل به محل اولیه‌ی خود برمی‌گردد. در حالی اگر یک نقطه از موج را مثلاً در ناحیه‌ی مترام که در شکل ۱-۳۰ 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.

فعالیت ۱-۱

مثال‌هایی از انتشار صوت در مایع‌ها و جامد‌ها ذکر کنید.



شکل ۱-۳۱

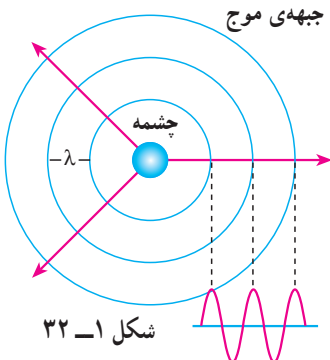
هر جسم مرتعش در هوا، خود یک چشمه‌ی تولید موج‌های صوتی است. چشمه‌ی صوت ممکن است به سادگی یک دیابازون و یا به پیچیدگی حنجره‌ی انسان باشد. در هنگام صحبت در اثر ارتعاش تارهای صوتی در حنجره امواج صوتی در هوا ایجاد می‌شوند.

هنگامی که یک چشمه‌ی صوت مرتعش می‌شود، صوت ایجاد شده در تمام جهت‌ها منتشر می‌شوند. لایه‌های تراکمی (پرفشار) و انبساطی (کم فشار) یک موج صوتی که از یک بلندگوی کوچک در هوا منتشر می‌شود، در شکل ۱-۳۱ نشان داده شده است.

پرسش ۱-۳

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

می‌شوند.



شکل ۱-۳۲

اگر یک چشمه‌ی 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 چشمه‌ی صوت در شکل ۱-۳۲ 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 گستره‌ی 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 فرصوت و بالاتر از ۲۰,۰۰۰ Hz را فراصوت می‌نامند. موج‌های فراصوت کاربردهای فراوانی در پزشکی و صنعت دارند.

۱-۵- 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 ۱-۱ داده شده است. چنان که می‌بینید هرچه ماده متراکم‌تر باشد، سرعت انتشار صوت در آن بیش‌تر است؛ زیرا در ماده‌ی متراکم مولکول‌ها به یک‌دیگر نزدیک‌ترند و تپ ایجاد شده می‌تواند در زمان کم‌تری به نقطه‌ی مجاور خود منتقل شود.

جدول ۱-۱- سرعت صوت در ماده‌های مختلف*

سرعت (m/s)	دما (°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 رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad (11-1)$$

که در آن T دمای گاز برحسب کلوین، R ثابت عمومی گازها و M جرم مولکولی گاز است. γ نیز ضریب اتمیسیته‌ی گاز نام دارد که برای گازهای مختلف در جدول ۱-۲ داده شده است.

جدول ۱-۲- ظرفیت گرمایی مولی در حجم و فشار ثابت γ و M

M g/mol	γ	گاز	
۴	۱/۶۷	He	تک اتمی
۴۰	۱/۶۷	Ar	
۲	۱/۴۱	H _۲	دو اتمی
۲۸	۱/۴۰	N _۲	
۳۲	۱/۳۹	O _۲	

مثال ۱-۳

سرعت انتشار صوت را در هوا و در دمای 27°C به‌دست آورید (برای هوا

$$(R \approx 8/3 \text{ J/mol.K} \text{ و } \gamma = 1/4, M = 29 \text{ g})$$

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی ۱-۱۱ داریم :

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} = \sqrt{\frac{1/4(8/3)(273+27)}{29 \times 10^{-3}}} \approx 347 \text{ m/s}$$

تمرین ۱-۳

با استفاده از اطلاعات جدول ۱-۲ سرعت صوت را در گازهای اکسیژن، نیتروژن و هلیوم در دمای صفر درجه‌ی سلسیوس محاسبه و نتیجه‌ی به‌دست آمده را با مقادیر جدول ۱-۱ مقایسه کنید.

مطالعه‌ی آزاد

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 فاصله‌ی 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 kHz که در ناحیه‌ی 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

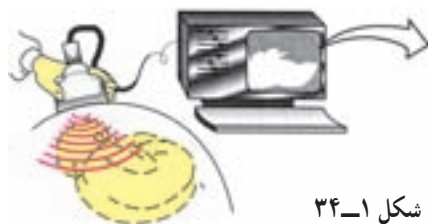
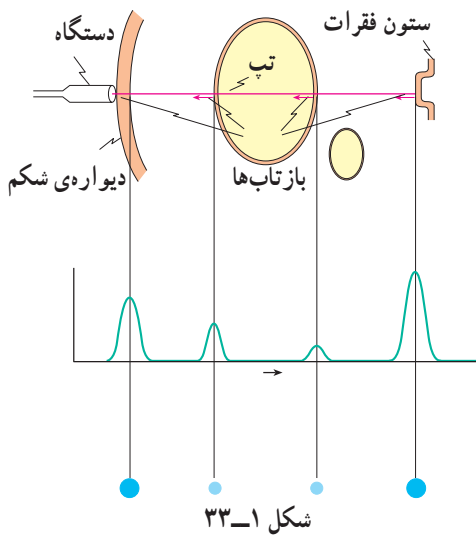
ماده‌ی ناخواسته متمرکز می‌شوند؛ برای مثال، تابش متمرکز این موج‌ها بر روی سنگ کلیه باعث می‌شود که سنگ به پاره‌های کوچک شکسته شده و به تدریج از بدن دفع گردند. بدون این که احتیاجی به عمل جراحی باشد.

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 از این تپ از فصل مشترک بافت‌های مختلف در بدن بازتابیده می‌شود (شکل ۱-۳۳). 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 ۱-۳۴).

تصویر یک جنین که با استفاده از فراصوت تهیه شده نیز در این شکل نشان داده شده است.



۱-۶- 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 لوله‌ی صوتی می‌نامند. هنگامی که در دهانه‌ی لوله‌ی 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 لوله‌ی صوتی باز و انتهای دیگر بسته و یا این که هر دو انتهای آن باز باشد، دو حالت متفاوت به‌وجود می‌آید که به بررسی آن‌ها می‌پردازیم:

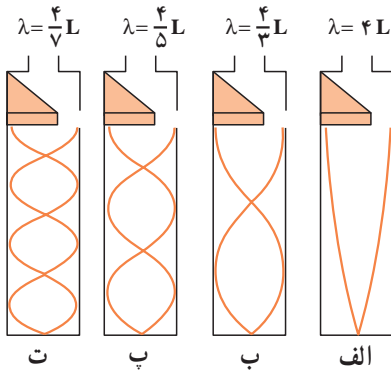
الف: یک انتهای لوله باز و انتهای دیگر آن بسته است. در این حالت در انتهای باز شکم و در انتهای بسته گره تشکیل می‌شود. در ساده‌ترین حالت، مطابق شکل ۱-۳۵- الف فقط یک گره و شکم در داخل لوله تشکیل می‌شود (در این شکل موج‌های صوتی داخل لوله برای سهولت نمایش به صورت موج‌های عرضی نشان داده شده‌اند. بیشینه‌ی دامنه در این شکل حالتی را نشان می‌دهد که در آن جابه‌جایی ذرات لایه‌ی هوا بیشینه است) در این حالت طول لوله، L ، با فاصله‌ی گره تا شکم برابر است یعنی:

$$L = \frac{\lambda}{4} \quad (12-1)$$

و یا طول موج صوت برابر است با:

$$\lambda = 4L \quad (13-1)$$

اگر سرعت صوت در داخل لوله v باشد، بسامد این صوت، f_1 ، از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:



شکل ۳۵-۱

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L} \quad (۱۴-۱)$$

موج ایستاده‌ی 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 ۱-۳۵-ب، پ، ... تعداد بیش‌تری گره و شکم 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 $\frac{3\lambda}{4}$ ، $\frac{5\lambda}{4}$ ، ...، $\frac{\lambda}{4}(2n-1)$ و در حالی که n گره در داخل لوله‌ی صوتی تشکیل می‌شود، طول موج مربوط به $2n-1$ امین هماهنگ با رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$\lambda_{2n-1} = \frac{4L}{2n-1} \quad \text{و} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (۱۵-۱)$$

و بسامد این صوت برابر است با:

$$f_{2n-1} = \frac{(2n-1)v}{4L} = (2n-1)f_1, \quad n = 1, 2, \dots \quad (۱۶-۱)$$

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 لوله‌ی صوتی که یک انتهای آن بسته است به‌شمار می‌روند.

مثال ۴-۱

در یک لوله‌ی صوتی که یک انتهای آن بسته است، می‌خواهیم یک صوت اصلی با بسامد 340 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 m/s فرض کنید.

پاسخ

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

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

در این صورت با استفاده از رابطه‌ی ۱-۱۲ طول لوله برابر است با :

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

ب : با استفاده از رابطه‌ی ۱-۱۶ برای $n=2$ و $n=3$ داریم :

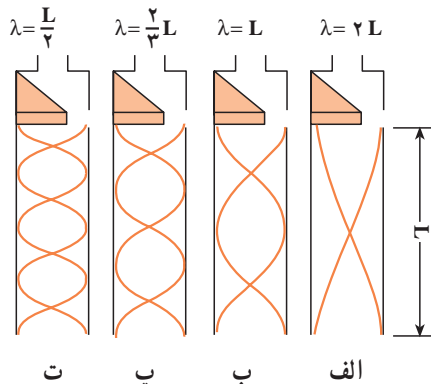
$$f_3 = (2 \times 2 - 1) 340 = 1020 \text{ Hz}$$

$$f_5 = (2 \times 3 - 1) \times 340 = 1700 \text{ Hz}$$

ب: هر دو انتهای لوله باز است. در این حالت در هر دو انتها شکم تشکیل می‌شود. برای صوت اصلی، همان‌طور که در شکل ۱-۳۶ الف نشان داده شده است، دو شکم در دو انتها و یک گره در وسط لوله تشکیل می‌شود. در این حالت طول لوله برابر فاصله‌ی دو شکم است. در این صورت داریم :

$$L = \lambda/2 \quad (17-1)$$

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



شکل ۱-۳۶

در نتیجه بسامد اصلی برابر است با :

$$f_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2L} \quad (18-1)$$

همان‌گونه‌های دیگر این صوت هنگامی پدیدار می‌شوند که مطابق شکل ۱-۳۶ ب، پ و ... در

داخل لوله دو گره $(L = 4\frac{\lambda}{4})$ ، سه گره $(L = 6\frac{\lambda}{4})$ ، ... n گره $(L = 2n\frac{\lambda}{4})$ تشکیل شود. طول موج صوت فرودی هنگامی که n گره تشکیل شده است، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, \dots \quad (19-1)$$

و بسامد این صوت برابر است با:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n \frac{v}{2L} = nf_1 \quad (20-1)$$

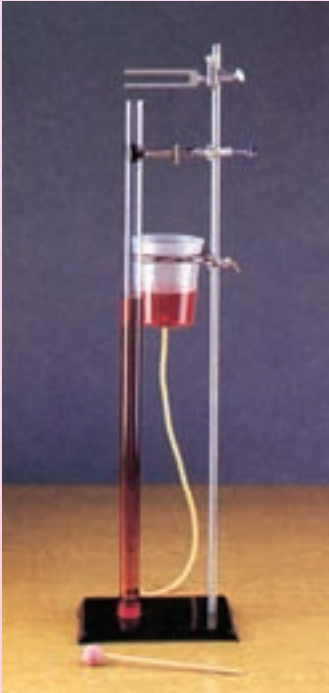
ملاحظه می‌کنید که تمام هماهنگ‌ها در لوله‌ای که هر دو انتهای آن باز است ایجاد می‌شود. در چنین لوله‌ای، بسامد نوسان‌های طبیعی هوای داخل آن به صورت f_1 ، $2f_1$ ، $3f_1$ و ... است.

تمرین ۴-۱

بسامد صوت اصلی و هماهنگ‌های دوم و سوم را در یک لوله‌ی صوتی به طول ۱ m که هر دو انتهای آن باز است تعیین کنید. (سرعت صوت را در هوا 340 m/s فرض کنید)

در قسمت قبل دیدیم که برای ایجاد موج‌های ایستاده، باید در دهانه‌ی لوله‌ی 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 پدیده‌ی تشدید استفاده کنیم. در فصل سوم فیزیک (۱) با پدیده‌ی 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 لوله‌ی 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 دهانه‌ی لوله به نوسان درآوریم. اگر بسامد نوسان این دیافازون با هریک از بسامدهای طبیعی لوله‌ی صوتی برابر باشد، تشدید رخ خواهد داد. بدین وسیله می‌توان موج ایستاده با بسامد موردنظر را در لوله‌ی صوتی ایجاد کرد.

فعالیت ۲-۱

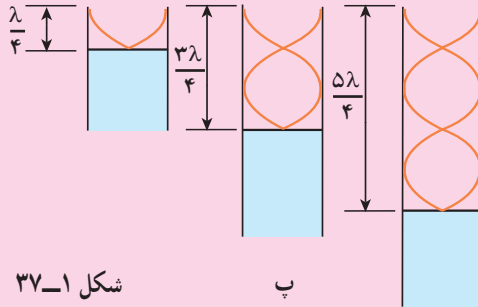


ب

در شکل ۱-۳۷ الف و ب می‌توان با تغییر مکان لیوان یا لوله، طول لوله‌ی صوتی را تغییر داد. با توجه به شکل پ توضیح دهید که در هر یک از سه حالت شکل پ چگونه موج ایستاده تشکیل می‌شود؟



الف



شکل ۱-۳۷

ب

فعالیت ۳-۱

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

فعالیت ۱-۴

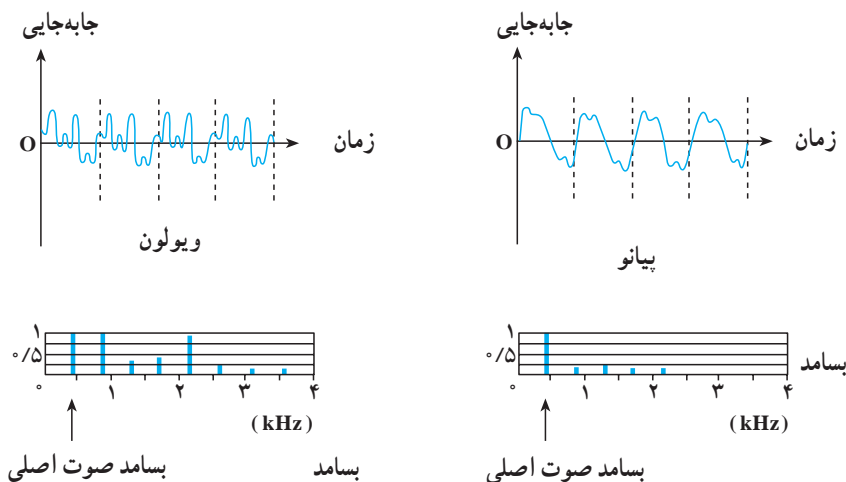
یک لوله‌ی صوتی باز بسازید که بسامدی برابر با ۴۳۵ هرتز (la_3) در گام طبیعی (به مطالعه‌ی آزاد زیر مراجعه کنید) تولید کند.

مطالعه‌ی آزاد

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 مشخصه‌ی بلندی، ارتفاع و ظنین 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 ۱-۳۸ نسبت موج صوتی حاصل از پیانو و ویولون نشان داده شده است. در این شکل، نسبت دامنه‌ی هماهنگ‌ها به دامنه‌ی صوت اصلی نیز آمده است. در هر دو مورد بسامد صوت اصلی 440 هرتز است؛ ولی تعداد و دامنه‌ی 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. ظنین صوت به شکل موج مرکب بستگی دارد. یعنی ظنین به نوع، تعداد و دامنه‌ی 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



شکل ۱-۳۸

شنونده بستگی دارد.

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 ۱-۳۸) از ارتعاش‌های منظم تشکیل شده است و اثر خوشایندی بر گوش انسان دارد.

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

۳- گام موسیقی، مجموعه‌ای از چند نت است که فاصله‌ی 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 فاصله‌ی آن‌ها از یک نت مینا (do_1) که کم‌ترین بسامد را دارد، به صورت زیر است:

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

بسامد $do_2 = 2 \frac{do_2}{do_1}$ 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 مبنا را $65/25$ هرتز اختیار کنیم، با استفاده از نسبت‌های بالا می‌توانیم بسامد نت‌های دیگر را به‌دست آوریم؛ در این صورت داریم:

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

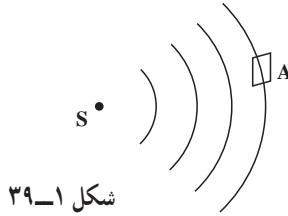
$$re_1 = \frac{9}{8} do_1 = 73/41 \text{ Hz}$$

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. هر یک 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؟

۷-۱- شدت صوت

در بخش ۱-۱ 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 ($E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$). این بیان در مورد موج‌های صوتی نیز درست است. در شکل ۱-۳۹ چشمه‌ی 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 رابطه‌ی صفحه‌ی بعد بیان می‌شود:

$$I = \frac{E}{At} \quad (21-1)$$



شکل ۱-۳۹

رابطه‌ی ۲۱-۱ را می‌توان با استفاده از تعریف توان ($P = \frac{E}{t}$) به صورت زیر نوشت:

$$I = \frac{P}{A} \quad (22-1)$$

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

مثال ۱-۵

به سطح یک میکروفون که مساحت آن 3cm^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 رابطه‌ی ۲۱-۱ داریم:

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

اکنون ممکن است این پرسش پیش بیاید که: چرا هرچه از چشمه‌ی صوت دور می‌شویم صدا

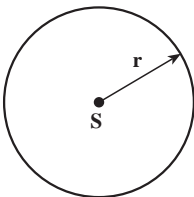
ضعیف‌تر می‌شود؟ برای پاسخ دادن به این سؤال چشمه‌ی صوت S را

در نظر می‌گیریم که موج‌های کروی در فضا ایجاد می‌کند (شکل ۱-۴۰).

فرض کنید توان چشمه‌ی صوت P باشد. شدت صوت در روی

کره‌ای به شعاع r چه قدر است؟ اگر از اتلاف انرژی صوتی در هوا صرف نظر

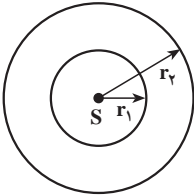
کنیم، در واحد زمان انرژی P به سطح کره‌ای به مساحت $4\pi r^2$ می‌رسد.



شکل ۱-۴۰

در نتیجه شدت صوت بر روی این کره برابر است با :
(۲۳-۱)

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$



شکل ۱-۴۱

این رابطه نشان می‌دهد که با دور شدن از چشمه‌ی S شدت صوت کاهش می‌یابد. حال برای این که بینیم این کاهش به چه نسبتی صورت می‌گیرد، دو جبهه‌ی موج کروی به شعاع‌های r_1 و r_2 در نظر می‌گیریم (شکل ۱-۴۱).

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 :

$$P_1 = P_2 \quad (24-1)$$

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

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

با جای گذاری این رابطه‌ها در رابطه‌ی ۱-۴۱ داریم :

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

و یا

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \quad (25-1)$$

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

مثال ۱-۶

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

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی ۱-۲۵ داریم :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

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

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

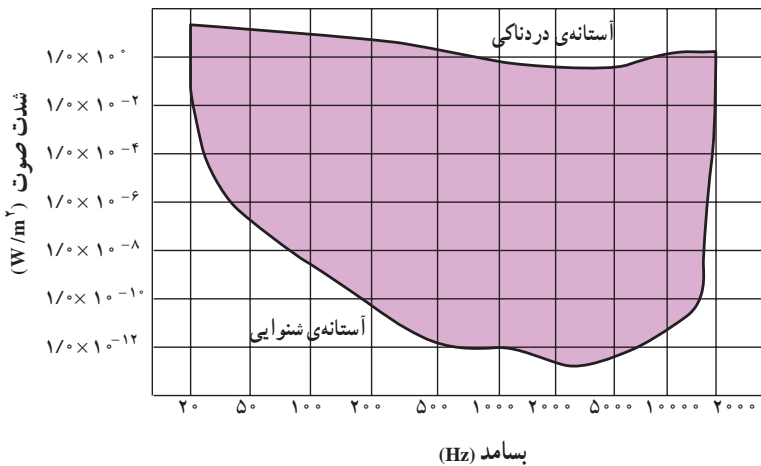
یعنی در مقایسه با فاصله‌ی ۴ متری، شدت صوت در فاصله‌ی ۲۰ متری ۲۵ مرتبه کاهش می‌یابد. به نظر شما آیا این بدان معنا است که صوت در فاصله‌ی ۴ متری ۲۵ بار بلندتر از صوت در فاصله‌ی ۲۰ متری شنیده می‌شود؟

شدت صوت برای برخی صوت‌ها در جدول ۱-۳ آمده است.

جدول ۱-۳- شدت صوت و تراز شدت صوت برای برخی صوت‌ها

تراز شدت صوت db	شدت صوت W/m ²	صدا
۰	۱۰ ^{-۱۲}	شدت صوت مینا
۱۰	۱۰ ^{-۱۱}	نفس کشیدن
۲۰	۱۰ ^{-۱۰}	برگ درختان در نسیم صحبت کردن از فاصله‌ی
۴۰	۱۰ ^{-۸}	یک متری
۶۰	۱۰ ^{-۶}	همهمه در فروشگاه سروصدای خودروها در
۷۰	۱۰ ^{-۵}	خیابان شلوغ
۱۲۰	۱	آستانه‌ی دردناکی (برای بسامد ۱۰۰۰ Hz)
۱۳۰	۱۰	مسلسل غرش هواپیمای جت
۱۴۰	۱۰ ^۲	درحین بلندشدن راکت فضایی، در موقع
۱۷۰	۱۰ ^۵	بلندشدن

آهسته‌ترین صدایی (کم‌ترین شدت) را که انسان می‌تواند بشنود آستانه‌ی شنوایی می‌نامند، و بلندترین صدایی (بیشینه‌ی شدت) که انسان می‌تواند بشنود بدون این که گوش او به درد آید آستانه‌ی دردناکی می‌نامند. آستانه‌ی شنوایی و آستانه‌ی دردناکی به بسامد بستگی دارند. نمودار شدت صوت در آستانه‌ی شنوایی و دردناکی را به صورت تابعی از بسامد، در شکل ۴۲-۱ مشاهده می‌کنید.



شکل ۴۲-۱

پرسش ۴-۱

با استفاده از نمودار شکل ۴۲-۱ تعیین کنید که آستانه‌ی شنوایی و دردناکی در بسامد $10,000$ هرتز تقریباً چه قدر است.

هرچه شدت صوت بیش‌تر باشد، مقدار انرژی‌ای که گوش دریافت می‌کند بیش‌تر است و انسان صدا را بلندتر احساس می‌کند، 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 می‌کنیم دو برابر نمی‌شود. در جدول ۳-۱ می‌بینید که شدت صوت در غرش هواپیما 10^2 W/m^2 و شدت صوت در گفت و گوی بین دو نفر 10^{-8} W/m^2 است؛ یعنی، شدت غرش هواپیمای جت 10^{10} برابر شدت گفت و گو است. ولی می‌دانید که ما غرش هواپیما را هیچ‌گاه 10^0 برابر بلندتر از گفت و گوی دو نفر احساس نمی‌کنیم. به این علت به تعریف تراز شدت صوت که درک انسان را از بلندی صوت بیان می‌کند 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 β نشان می‌دهند و یکای آن را به افتخار بل فیزیک‌دان امریکایی

مخترع تلفن، بل (B) و دسی بل (dB) نام گذاری کرده اند. هر بل برابر ده دسی بل است.

$$\beta = \log \frac{I}{I_0} \quad \text{بل (B)} \quad (26-1)$$

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad \text{دسی بل (dB)} \quad (27-1)$$

I_0 شدت صوت مبنا است که برابر با آستانه‌ی شنوایی گوش سالم در بسامد 1000 هرتز (10^{-12} W/m^2) در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۳-۱ شدت پاره‌ای از صوت‌ها برحسب دسی بل بیان شده است.

مثال ۲-۱

در جدول ۳-۱ شدت صوت آستانه‌ی دردناکی (برای بسامد 1000 Hz) 1 W/m^2 ذکر شده است. تراز شدت صوت را برای آن به دست آورید.

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی ۲۷-۱ داریم:

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

تمرین‌های فصل اول

۱- جرم سیم پیاپی به طول $8/0$ متر برابر 6 گرم و نیروی کشش آن 432 N است. این سیم به گونه‌ای مرتعش می‌شود که در طول آن، دو شکم تشکیل می‌شود، بسامد صوتی را که ایجاد می‌شود محاسبه کنید. بسامد اصلی این سیم چند هرتز است؟

۲- کدام یک از عامل‌های زیر بر سرعت صوت در هوا مؤثر است؟

الف: شکل موج ب: دامنه‌ی موج پ: بسامد موج ت: دمای هوا

۳- آزمایشی برای اندازه‌گیری سرعت صوت در آب طراحی کنید.

۴- دلفین، مانند خفاش، از خود فراصوت گسیل می‌کند. طول موج صوت دلفین با بسامد 4×10^5 Hz در آب چه قدر است؟

۵- ناظری در سطح زمین ایستاده است، صدای رعد 5 ثانیه پس از مشاهده‌ی برق به گوش او می‌رسد. اگر دمای هوا 27°C باشد، فاصله‌ی ناظر از محل ایجاد رعد و برق چه مقدار است؟

۶- دانش‌آموزی بین دو صخره‌ی قائم ایستاده است و فاصله‌ی او از صخره‌ی نزدیک‌تر 48 متر است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از 3 ثانیه و صدای پژواک دوم را 2 ثانیه بعد از پژواک اول می‌شنود.

الف: سرعت صوت را در هوا به دست آورید. ب: فاصله‌ی بین دو صخره را محاسبه کنید.

۷- یک انتهای یک لوله‌ی صوتی، باز و انتهای دیگر بسته است. الف: طول لوله برای این که هوای داخل لوله در بسامد اصلی 60 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 m/s در نظر بگیرید.

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

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

۱۰- یک چشمه‌ی صوت موج‌های کروی در هوا گسیل می‌کند. الف: نسبت شدت صوت در دو نقطه که فاصله‌ی آن‌ها از چشمه‌ی 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؟

۱۱- دو نفر به فاصله‌های d_1 و d_2 از یک چشمه‌ی صوت ایستاده‌اند. تراز شدت صوت برای

این دو نفر به ترتیب 2 dB و 10 dB است. نسبت $\frac{d_2}{d_1}$ را حساب کنید.

- ۱۲- در فاصله‌ی ۲۰m از چشمه‌ی صوتی تراز شدت صوت ۶۰dB است. با این فرض که جذب صوت به وسیله‌ی 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؟
- ۱۳- پرده‌ی صماخ گوش شخصی به قطر ۷۵/۰ سانتی‌متر، به مدت ۲ ساعت، صوتی با تراز ۹۰dB را جذب می‌کند. در این مدت پرده‌ی گوش چه مقدار انرژی برحسب ژول جذب کرده است؟