۱ـ به کمک نمودار و نشان دادن روی آن، توضیح دهید که وقتی یک تیغه مرتعش می‌شود، حرکات ذرات هوای مجاور آن چگونه تغییر می‌کند و چطور شخص صدای ناشی از آن را می‌شنود؟

۲ـ توضیح دهید چگونه یک پشهٔ در حال پرواز صوت تولید می‌کند و چرا ارتفاع صدای تولید شده زیاد است؟

شکل ۱۳

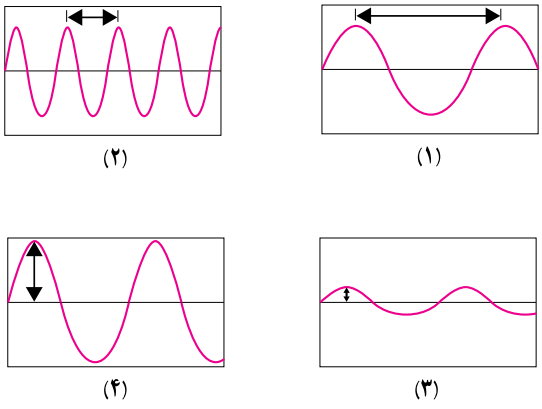
۳ـ کدام یک از شکل‌های ۱۴ :

الف) یک صدای آهسته (دامنهٔ کم) را نشان می‌دهد؟

ب) یک صدای بلند (دامنهٔ زیاد) را نشان می‌دهد؟

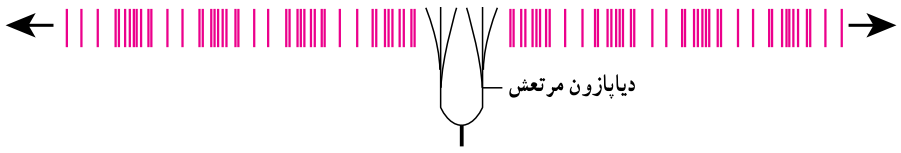
پ) یک صدا با بسامد کم (بم) را نشان می‌دهد.

ت) یک صدا با بسامد زیاد (زیر) را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴

۴ـ شکل زیر امواجی را نشان می‌دهد که توسط یک دیاپازون مرتعش ایجاد می‌شود.



شکل ۱۵

الف) نمودار فشار برحسب فاصلهٔ موجی را که در یک طرف دیاپازون ایجاد شده است، رسم کنید.

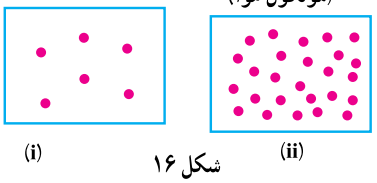
ب) i) روی این نمودار نقطه‌ای را که در آن هوا فشرده شده است، با حرف A مشخص کنید.

ii) روی این نمودار، نقطه‌ای را که در آن، امواج از یکدیگر باز شده‌اند، با حرف B مشخص کنید.

iii) فاصله‌ای را که نشان‌دهندهٔ طول موج صوت است، با حرف λ مشخص کنید.

ج) دو شکل زیر نشان‌دهندهٔ غلظت مولکول‌های هوا، در دو نقطهٔ A و B است.

این دو شکل را بکشید و مشخص کنید که کدام یک مربوط به وضعیت مولکول‌های هوا در نقطهٔ A و کدام یک مربوط به دیگری است.



شکل ۱۶

د) جملهٔ زیر را با انتخاب گزینهٔ درست، کامل کنید و دوباره بنویسید.

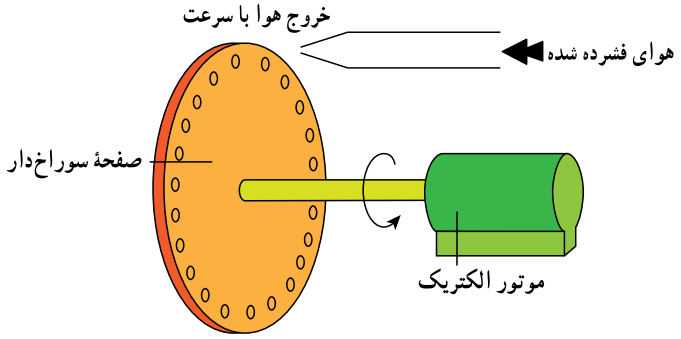
هنگامی که امواج صوتی در جهت → حرکت می‌کند، مولکول‌های هوا :

i) در جهت عمود بر جهت انتشار صوت، ارتعاش می‌کنند .

ii) هم‌جهت با جهت انتشار صوت، ارتعاش می‌کنند. ● ⟷

iii) همراه با موج حرکت می‌کنند. ● ⟶

۵ــ برخی از انواع سوت کشتی به این دلیل صدا ایجاد می‌کنند که هوای فشرده از سوراخ‌های یک صفحهٔ دوّار چرخان، بسرعت خارج می‌شود. با عبور هوا از هر سوراخ، مجموعه‌ای از پالس‌ها تشکیل می‌شود. بسامد صوت، تابع بازهٔ زمانی بین پالس‌هاست.



شکل ۱۷

الف) فکر می‌کنید با افزایش سرعت چرخش صفحه، بسامد صوت، بیشتر شود یا کمتر؟ پاسخ خود را توضیح دهید.

ب) راه دیگری برای افزایش بسامد صوت پیشنهاد کنید.

ج) افزایش سرعت عبور هوا از سوراخ‌ها، چه اثری بر صدای ایجاد شده خواهد داشت؟

۵ــ۲ ــ سرعت صوت

نگاهی دوباره به مفهوم

بیشتر صداهایی که می‌شنویم در هوا منتشر می‌شوند. با این همه، هر مادهٔ کشسان ــ جامد، مایع، گاز، یا پلاسما ــ می‌تواند صدا را منتقل کند. کشسانی توانایی ماده‌ای است که در پاسخ به نیروی وارد بر آن تغییر شکل می‌دهد و پس از حذف این نیرو شکل اولیهٔ خود را به‌دست می‌آورد. فولاد ماده‌ای کشسان است. بتونه، برخلاف آن، ناکشسان[1] است. اتم‌ها در مایع‌ها و جامدهای کشسان نسبتاً به هم نزدیک‌اند، به سرعت به حرکت‌های یکدیگر پاسخ می‌دهند، و انرژی را با اتلاف مختصر منتقل می‌کنند. سرعت صوت در آب تقریباً چهار برابر سرعت آن در هوا، و در فولاد حدود پانزده برابر سرعت صوت در هواست.

هوا، در مقایسه با مایع‌ها و جامدها، رسانای ضعیفی برای صوت است. اگر گوشتان را روی خط آهن بگذارید، می‌توانید صدای قطار را از فاصلهٔ دور راحت بشنوید. یا در حالی که گوشتان زیر آب است چند سنگ را تق تق به هم بزنید. صدای تق تق را خیلی خوب می‌شنوید. اگر زمانی در حضور قایق‌های موتوری شنا کرده باشید، احتمالاً متوجه شده‌اید که صدای موتور قایق‌ها را زیر آب بسیار واضح‌تر از بالای آن می‌شنوید. مایع‌ها و جامدهای بلورین معمولاً رساناهای عالی صدایند ــ بسیار بهتر از هوا. سرعت صوت در جامدها معمولاً بیشتر از مایع‌ها و در مایع‌ها بیشتر از گازهاست.

۱ــ کشسانی «حالت کش‌آمدن» مانند کش نیست، بعضی مواد سخت مانند فولاد، کشسان‌اند.

محدودهٔ 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 گسترهٔ 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.

۵ــ۲ــ 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 ۵ــ۱ داده شده است. چنانکه می‌بینید هرچه ماده متراکم‌تر باشد، سرعت انتشار صوت در آن بیشتر است. زیرا در مادهٔ متراکم مولکول‌ها به یکدیگر نزدیک‌ترند و تپ ایجاد شده می‌تواند در زمان کمتری به نقطهٔ مجاور خود منتقل شود.

جدول ۵ــ۱ــ سرعت صوت در ماده‌های مختلف*

	دما °C		سرعت m/s
گازها	۰	اکسیژن	۳۱۶
	۰	هوا	۳۳۱
	۲۰	هوا	۳۴۳
	۰	نیتروژن	۳۳۴
	۰	هلیم	۹۶۵
مایع‌ها	۲۵	جیوه	۱۴۵۰
	۲۵	آب	۱۴۹۸
	۲۵	آب دریا	۱۵۳۱
جامدها	ــ	سرب	۲۱۰۰
	ــ	طلا	۳۰۰۰
	ــ	آهن	۵۰۰۰ــ۶۰۰۰
	ــ	شیشه	۵۰۰۰ــ۶۰۰۰

* 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 رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$v=\sqrt{\gamma\frac{RT}{M}} \qquad (۵ــ۱)$$

که در آن T دمای گاز برحسب کلوین، R ثابت عمومی گازها و M جرم مولکولی گاز است. γ نیز ضریب اتمیسیتهٔ گاز نام دارد که به‌صورت نسبت ظرفیت گرمایی مولی گاز در فشار ثابت (C_{MP}) به ظرفیت گرمایی مولی آن در حجم ثابت (C_{MV}) تعریف می‌شود. مقادیر C_{MP} و C_{MV} و $\gamma=\frac{C_{MP}}{C_{MV}}$ و M برای گازهای مختلف در جدول ۵ــ۲ داده شده است.

جدول ۵ــ۲ــ ظرفیت گرمایی مولی در حجم و فشار ثابت γ و M

	گاز	C_{MV} J/mol.K	C_{MP} J/mol.K	γ	M g/mol
تک اتمی	He	۱۲/۵	۲۰/۸	۱/۶۷	۴
	Ar	۱۲/۵	۲۰/۸	۱/۶۷	۴۰
دو اتمی	H_2	۲۰/۴	۲۸/۸	۱/۴۱	۲
	N_2	۲۰/۸	۲۹/۱	۱/۴۰	۲۸
	O_2	۲۱/۱	۲۹/۴	۱/۳۹	۳۲

مثال ۵ــ۱

سرعت انتشار صوت را در هوا و در دمای ۲۷ °C به‌دست آورید. (برای هوا $M=29g/mol$ ،$\gamma=1/4$ و $R=8/3\ J/mol.K$)

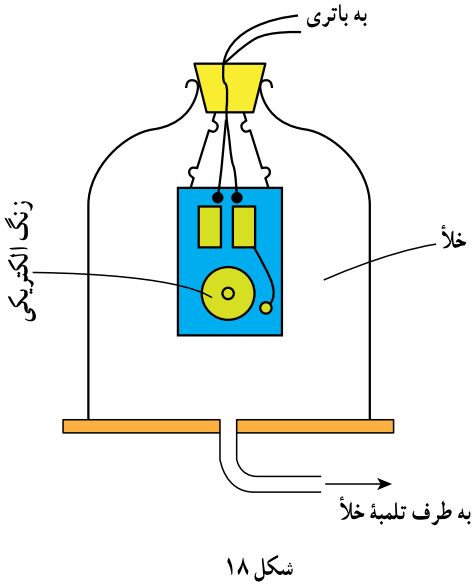
پاسخ

با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۱ داریم :

$$v=\sqrt{\gamma\frac{RT}{M}}=\sqrt{\frac{1/4(8/3)(273+27)}{29\times10^{-3}}}=347m/s$$

مثال پیشنهادی

اگر یک زنگ الکتریکی را مطابق شکل در زیر یک سرپوش شیشه‌ای قرار دهیم و کلید آن را فشار دهیم، برخورد چکش به کاسهٔ زنگ را می‌بینیم و صدای حاصل از این برخورد را می‌شنویم. هرگاه به کمک تلمبهٔ تخلیه، هوای زیر سرپوش را به‌تدریج خارج کنیم، برخورد چکش به کاسهٔ زنگ را خواهیم دید. درحالی که صدا به‌تدریج ضعیف می‌شود و لحظه‌ای می‌رسد که هوای زیر سرپوش بسیار رقیق می‌شود و صدا به‌سختی شنیده می‌شود. از این آزمایش چه نتیجه‌ای می‌گیرید.



شکل ۱۸

پاسخ : صوت در خلأ منتشر نمی‌شود و برای انتشار احتیاج به محیط مادی دارد. این ویژگی مختص صوت نمی‌باشد بلکه به‌طور کلی همهٔ امواج مکانیکی برای انتشار خود نیاز به محیط مادی دارند و در خلأ منتشر نمی‌شوند.

اگر از فاصله‌ای دور کسی را ببینیم که چوب می‌بُرد، یا ضربهٔ بازیکن فوتبال به توپ را از فاصله‌ای دور نگاه کنیم، به‌راحتی درمی‌یابیم که صدای آنها خیلی دیرتر از دیدنشان به گوش ما می‌رسد. صدای رعد مدتی پس از مشاهدهٔ آذرخش شنیده می‌شود. این تجربه‌های معمولی نشان می‌دهند که حرکت صوت از محلی به محل دیگر به مدت مشخصی نیاز دارد. سرعت صوت تابع وضعیت باد، دما، و رطوبت است. این سرعت به بلندی یا بسامد صدا بستگی ندارد؛ تمام صداها با سرعت یکسان حرکت می‌کنند. سرعت صوت در هوای خشک در $0^\circ C$ حدود ۳۳۰ متر در ثانیه، یعنی تقریباً ۱۲۰۰ کیلومتر در ساعت است (اندکی بیش از یک میلیونیم سرعت نور). بخار آب موجود در هوا این سرعت را اندکی افزایش می‌دهد. صدا در هوای گرم سریع‌تر از هوای سرد حرکت می‌کند. چون همان‌طورکه پیش‌بینی می‌شود مولکول‌های سریع در هوای گرم بیشتر به هم می‌خورند و درنتیجه تپ را در زمان کمتری منتقل می‌کنند.[1] به‌ازای افزایش هر درجه بالای $0^\circ C$، سرعت صوت در هوا ۰/۶ متر در ثانیه زیاد می‌شود. بنابراین، صوت در هوا با دمای عادی حدود $20^\circ C$ با سرعت ۳۴۰ متر در ثانیه حرکت می‌کند.

مثال پیشنهادی

فاصلهٔ تقریبی یک توفان تندری که دارای تأخیر زمانی ۴s بین آذرخش و صدای رعد باشد، چقدر است؟ دمای هوا را حدود $20^\circ C$ در نظر بگیرید.

پاسخ : با این فرض که سرعت صوت در هوای عادی تقریباً ۳۴۰m/s است، در ۴s مسافتی برابر ۱۳۶۰m (۴×۳۴۰m/s=۱۳۶۰m) را طی خواهدکرد. آذرخش تأخیر چندانی ندارد، بنابراین توفان در فاصلهٔ اندکی بیش از ۱km قرار دارد.

مثال پیشنهادی

تندی موج‌های صوتی را در هوای اتاقی با دمای ($T = 20^\circ C$) محاسبه کنید و گسترهٔ طول موج‌هایی را در هوا به‌دست آورید که برای آنها گوش انسان (که می‌تواند بسامدهای گسترهٔ ۲۰Hz – ۲۰۰۰۰ را بشنود) حساس است. جرم مولی میانگین برای هوا (آمیزه‌ای اصولاً از نیتروژن و اکسیژن) $28/8 \times 10^{-3} kg/mol$ و نسبت ظرفیت‌های گرمایی $\gamma = 1/40$ است.

پاسخ :

$$\theta = 20^\circ C \Rightarrow T = 273 + 20 = 293K$$

$$V = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \sqrt{\frac{1/40 \times 8/3 \times 293}{288 \times 10^{-2}}} = 344\ m/s$$

با استفاده از رابطهٔ $\lambda = \frac{V}{f}$، طول موج‌ها را به‌دست می‌آوریم.

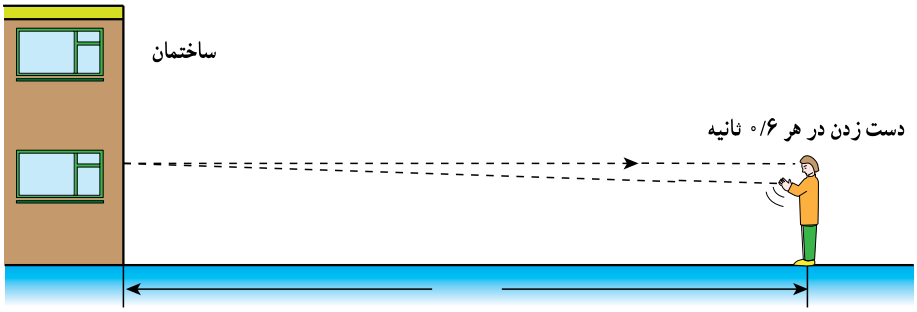
$$f_1 = 20Hz \Rightarrow \lambda_1 = \frac{v}{f_1} = \frac{344}{20} = 17m$$

$$f_2 = 20000Hz \Rightarrow \lambda_2 = \frac{v}{f_2} = \frac{344}{20000} = 0/17m = 17cm$$

۱ــ سرعت صوت در گاز حدود $\frac{3}{2}$ سرعت متوسط مولکول‌های گاز است.

مثال پیشنهادی

صوت بازتابیده شده از روی دیوار یا یک صخره را پژواک (echo) می‌نامند. دانش‌آموزی با انجام یک فعالیت ساده مطابق شکل ۱۹، در نظر دارد سرعت صوت را در هوا اندازه بگیرد. بدین منظور یک صدا ایجاد کرده و سپس تا صدا را می‌شنود بار دیگر دست‌هایش را برای ایجاد صدا به هم می‌زند. اگر فاصلهٔ دو دست‌زدن متوالی‌اش ۰/۶s و فاصلهٔ شخص تا ساختمان ۱۰۰ متر باشد، سرعت انتشار صوت در محیط چه مقدار است؟



شکل ۱۹

پاسخ :

$$\text{سرعت صوت} = \frac{\text{مسافت}}{\text{زمان}}$$

$$V = \frac{۲\times ۱۰۰}{۰/۶} = ۳۳۳/۳\,m/s$$

مثال پیشنهادی

گازی با دمای $۱۵^\circ C$ را تا $-۷۳^\circ C$ سرد می‌کنیم درنتیجه سرعت صوت در گاز ۱۲۵m/s تغییر می‌کند. سرعت صوت در دمای $۱۵^\circ C$ چه مقدار بوده است؟

پاسخ :

$$\theta_۱ = ۱۵^\circ C \quad T_۱ = ۲۷۳ + ۱۵ = ۲۸۸K$$

$$\theta_۲ = -۷۳^\circ C \quad T_۲ = ۲۷۳ + (-۷۳) = ۲۰۰K$$

$$\frac{V_۲}{V_۱} = \frac{\sqrt{۵\frac{RT_۲}{M}}}{\sqrt{۵\frac{RT_۱}{M_۱}}} = \sqrt{\frac{T_۲}{T_۱}} = \sqrt{\frac{۲۰۰}{۲۸۸}} = \sqrt{\frac{۱۰۰}{۱۴۴}} = \frac{۱۰}{۱۲}$$

$$V_۲ = \frac{۱۰}{۱۲}V_۱$$

چون دما در حالت دوم کمتر از حالت اول است، بنابراین سرعت در حالت اول ۱۲۵m/s از سرعت در حالت دوم بیشتر است :

$$V_۱ - V_۲ = ۱۲۵\,m/s \Rightarrow V_۱ - \frac{۱۰}{۱۲}V_۱ = ۱۲۵ \Rightarrow V_۱ = ۷۵۰\,m/s$$

مثال پیشنهادی

به‌ازای هر کیلومتر ارتفاع از سطح زمین، درجه حرارت (دما) تقریباً $5^{\circ}C$ کاهش می‌یابد. اگر سرعت انتشار صوت در سطح زمین $340\,m/s$ باشد، سرعت انتشار صوت در ارتفاع ۴ کیلومتری سطح زمین چه مقدار است؟

پاسخ :

$$\frac{V_2}{V_1}=\frac{\sqrt{\frac{5RT_2}{M}}}{\sqrt{\frac{5RT_1}{M}}}=\sqrt{\frac{T_2}{T_1}}=\sqrt{\frac{T_1-20}{T_1}}$$

$$\frac{V_2}{V_1}=(1-\frac{20}{T_1})^{\frac{1}{2}}=1-\frac{1}{2}\times\frac{20}{T_1}$$

با توجه به اینکه دما در سطح زمین $340\,m/s$ است، دمای تقریبی T_1، $300\,K$ است، بنابراین می‌توانیم بنویسیم :

$$\frac{V_3}{340}\simeq 1-\frac{1}{2}\times\frac{20}{300}\Rightarrow V_2=340-\frac{340\times 20}{600}\simeq 328\,m/s$$

مثال پیشنهادی

صوتی با بسامد معین در گاز کاملی منتشر می‌شود. در هریک از حالت‌های زیر، در سرعت انتشار صوت در گاز و طول موج آن چه تغییری حاصل می‌شود؟

الف) در دمای ثابت، فشار گاز کم شود.

ب) فشار و حجم گاز هریک ۲ برابر شوند.

پ) دمای گاز $1/2T$، و فشار ۲ برابر شوند.

پاسخ : سرعت انتشار صوت در یک گاز کامل از رابطهٔ $V=\sqrt{\frac{5RT}{M}}$ به‌دست می‌آید. پس در فرایندهای ترمودینامیکی که دما تغییر کند، سرعت انتشار تغییر می‌کند و چون بسامد صوت ربطی به محیط ندارد، طول موج طبق رابطهٔ $\lambda=\frac{V}{f}$ تغییر خواهد کرد.

الف) چون دما تغییر نکرده است، سرعت و طول موج تغییر نمی‌کنند.

ب)

$$\frac{P_1V_1}{T_1}=\frac{P_2V_2}{T_2}\Rightarrow\frac{P_1V_1}{T_1}=\frac{(2P_1)(2V_1)}{T_2}\Rightarrow T_2=4T_1$$

$$V=\sqrt{\frac{5RT}{M}}\Rightarrow\frac{V_2}{V_1}=\sqrt{\frac{T_2}{T_1}}=\sqrt{\frac{4T_1}{T_1}}=2$$

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1}=\frac{V_2/f}{V_1/f}=\frac{V_2}{V_1}=\frac{\lambda_2}{\lambda_1}=\frac{2V_1}{V_1}=2$$

پ)

$$\frac{V_2}{V_1}=\sqrt{\frac{1/2T}{T}}=\sqrt{1/2}\quad\text{و}\quad\frac{\lambda_2}{\lambda_1}=\frac{V_2}{V_1}=\sqrt{1/2}$$

تمرین ۵ـ۱

$$V_O = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} = \sqrt{\frac{۱/۳۹ \times ۸/۳ \times ۲۷۳}{۳۲ \times ۱۰^{-۳}}} = ۳۱۴ \text{ m/s} \quad \text{m/s}$$

$$V_N = \sqrt{\frac{۱/۴۰ \times ۸/۳ \times ۲۷۳}{۲۸ \times ۱۰^{-۳}}} = ۳۱۵ \text{ m/s}$$

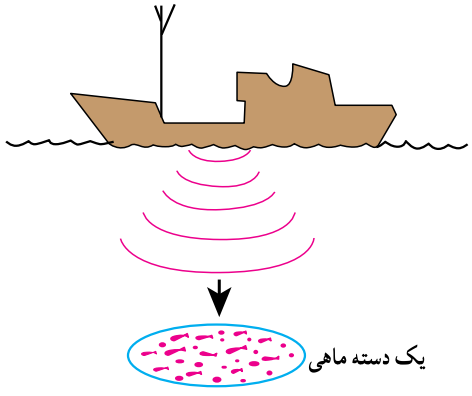
$$V_{He} = \sqrt{\frac{۱/۶۷ \times ۸/۳ \times ۲۷۳}{۴ \times ۱۰^{-۳}}} \simeq ۳۴۴ \text{ m/s}$$

با توجه به سرعت‌های داده شده در جدول ۱ـ۱ـ اختلاف عدد به‌دست آمده برای گاز نیتروژن نسبت به بقیه، بیشتر است.

پرسش‌ها و تمرین‌های پیشنهادی بخش ۵ـ۲

۱ـ آیا می‌توان صدای ویلن فضانوردی را که روی سطح ماه ایستاده و آن را می‌نوازد، شنید؟ دلیل خود را توضیح دهید.

۲ـ عمق‌یاب (یا «ماهی‌یاب») یک کشتی یک تپ صوتی به سوی کف دریا می‌فرستد و زمان بازگشت پژواک را می‌سنجد (شکل ۲۰). صفحهٔ مدرج دستگاه، زمان پژواک را در مقیاسی که مستقیماً برحسب واحد طول است نشان می‌دهد. اپراتورهای با تجربه می‌توانند بفهمند که کف دریا صخرهٔ تمیز، یا صخرهٔ پوشیده از لایهٔ لجن است، و یا اینکه یک گله ماهی در عمق آب شنا می‌کند. به نظر شما در هریک از این موارد چه زمان پژواکی را باید در روی صفحه مدرج انتظار داشت؟



شکل ۲۰

۳ـ برای اندازه‌گیری عمق یک دره، فیزیکدانی که روی یک پل ایستاده است سنگی را پایین می‌اندازد و ثانیه‌هایی را که بین رهاکردن سنگ و شنیدن صدای برخورد آن با کف دره طی می‌شوند، می‌شمارد. اگر این فاصلهٔ زمانی ۶/۰s باشد، عمق دره چقدر است؟ زمان سیر علامت صوتی را منظور کنید، ولی مقاومت هوا را نادیده بگیرید.

۴ـ تماشاگران مسابقهٔ فوتبال، معمولاً صدای برخورد توپ با پای (یا سر) بازیکن‌ها را اندک زمانی پس از دیدن آن می‌شنوند. اگر یک تماشاگر متوجه شود که تأخیر زمانی در حدود ۰/۵s است، فاصلهٔ او از بازیکن چقدر است؟

۵ــ در آب زلال، سرعت صوت ۱۴۶۰m/s است. در هوا صوت با سرعت ۳۳۱m/s انتشار می‌یابد. فرض کنید در سطح یک دریاچه مقداری ماده منفجره ترکیده است. شخصی که سرش زیر آب است بانگ انفجار را می‌شنود و سپس با بیرون آوردن سرش از زیر آب، صدا را پس از ۵s دوباره می‌شنود. فاصلهٔ این شخص از موضع انفجار چقدر است؟

۶ــ امواج صوتی مورد استفاده در اسکن‌های فراصوتی پزشکی در بدن انسان، نوعاً دارای بسامد ۱۰MHz هستند و دامنهٔ نوسان آنها (دامنهٔ حرکت هماهنگ ساده ذرات در عضوی که موج از آن می‌گذرد) $۸\times۱۰^{-۸}m$ است. سرعت بیشینهٔ ذره‌ای که در معرض چنین موج صوتی قرار گرفته است، چقدر است؟ شتاب بیشینه ذره چقدر است؟ این شتاب را با شتاب g سقوط آزاد مقایسه کنید.

۵ــ۳ــ لوله‌های صوتی

نگاهی دیگر به مفهوم

وقتی موج‌های صوتی طولی در شاره‌ای درون یک لوله با طول محدود منتشر شوند، موج‌ها به همان ترتیبی که موج‌های روی یک ریسمان از دو انتها بازتابیده می‌شوند در دو انتهای لوله بازتاب می‌کنند. بر هم‌نهی موج‌های متحرک در دو جهت مخالف دوباره موج ایستاده را تشکیل می‌دهند. درست مانند موج‌های ایستاده عرضی روی ریسمان، موج‌های صوتی ایستاده (مدهای عادی) درون یک لوله می‌توانند موج‌های ایستاده‌ای در هوای مجاور به وجود آورند. این اصلی است که در مورد صدای انسان و همچنین بسیاری از سازهای موسیقایی، از جمله سازهای بادی چوبی، سازهای بادی برنجی و ارگ‌های لوله‌ای عمل می‌کند.

۵ــ۳ــ 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 لولهٔ صوتی می‌نامند.

هنگامی که در دهانهٔ لولهٔ 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 لولهٔ صوتی باز و انتهای دیگر بسته و یا این که هر دو انتهای آن باز باشد، دو حالت متفاوت به‌وجود می‌آید که به‌بررسی 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 ۵ــ۸ــ الف فقط یک گره و شکم در داخل لوله تشکیل می‌شود (در این شکل موج‌های صوتی داخل لوله برای سهولت نمایش به‌صورت موج‌های عرضی نشان داده شده‌اند. پیشینهٔ دامنه در این شکل حالتی را نشان می‌دهد که در آن جابه جایی ذرات لایهٔ هوا بیشینه است) در این حالت طول لوله، L ، با فاصلهٔ گره تا شکم برابر است یعنی :

$$L=\frac{\lambda_۱}{۴} \qquad (۵ــ۲)$$

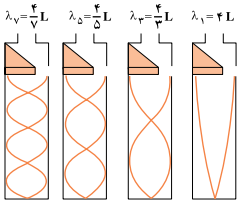
و یا طول موج صوت برابر است با :

$$\lambda_۱=۴L \qquad (۵ــ۳)$$

اگر سرعت صوت در داخل لوله v باشد، بسامد این صوت، $f_۱$، از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$f_۱=\frac{v}{\lambda_۱}=\frac{v}{۴L} \qquad (۵ــ۴)$$

موج ایستادهٔ 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 ۵ــ۸ــ ب، پ، ... تعداد بیشتری گره و شکم در لوله تشکیل می‌شود یعنی ممکن است در داخل لوله دوگره، سه گره، ... n گره تشکیل شود. در این صورت، همان‌گونه که در این شکل می‌بینید، طول



شکل ۵ــ۸

لوله به ترتیب برابر است با $۳\frac{\lambda_۴}{۴}$ ، $۵\frac{\lambda_۵}{۴}$ ، ... ، $(۲n-۱)\frac{\lambda_{۲n-۱}}{۴}$ و در حالی که n گره در داخل لولهٔ صوتی تشکیل می‌شود، طول موج مربوط به $۲n-۱$ امین هماهنگ با رابطهٔ زیر داده می‌شود :

$$\lambda_{۲n-۱}=\frac{۴L}{۲n-۱} \qquad \text{و} \qquad n=۱,۲,۳,\ldots \qquad (۵ــ۵)$$

و بسامد این صوت برابر است با :

$$f_{۲n-۱}=\frac{(۲n-۱)v}{۴L}=(۲n-۱)f_۱ \qquad n=۱,۲,\ldots \qquad (۵ــ۶)$$

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 $f_۱$، $۳f_۱$، $۵f_۱$ و ... است. این حالت‌ها نوسان‌های طبیعی هوای داخل لولهٔ صوتی که یک انتهای آن بسته است به‌شمار می‌روند.

مثال ۵ــ۲

در یک لولهٔ صوتی که یک انتهای آن بسته است، می‌خواهیم یک صوت اصلی بابسامد ۳۴۰ Hz ایجاد کنیم. الف) طول لوله باید چقدر باشد. ب) بسامد هماهنگ‌های سوم و پنجم را حساب کنید. سرعت صوت در هوا را ۳۴۰ m/s فرض کنید.

پاسخ

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

$$\lambda_۱=\frac{v}{f_۱}=\frac{۳۴۰}{۳۴۰}=۱m$$

در این صورت با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۲ طول لوله برابر است با :

$$L_1 = \frac{\lambda}{4} = 0/25\,m$$

ب) با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۶ برای $n = 2$ و $n = 3$ داریم :

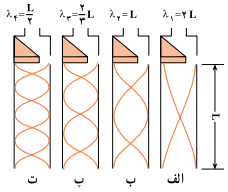
$$f_3 = (2\times2-1)340 = 1020\,Hz$$

$$f_5 = (2\times3-1)\times340 = 1700\,Hz$$

ب) هر دو انتهای لوله باز است. در این حالت در هر دو انتها شکم تشکیل می‌شود. برای صوت اصلی، همان‌طور که در شکل ۵ــ۹ــ الف نشان داده شده است، دو شکم در دو انتها و یک گره در وسط لوله تشکیل می‌شود. در این حالت طول لوله برابر فاصلهٔ دو شکم است. در این‌صورت داریم :

$$L = \lambda_1 / 2 \qquad (۵ــ۷)$$

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



شکل ۵ــ۹

در نتیجه بسامد اصلی برابر است با :

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L} \qquad (۵ــ۸)$$

هماهنگ‌های دیگر این صوت هنگامی پدیدار می‌شوند که مطابق شکل ۵ــ۹ــ ب، پ و... در داخل

لوله دو گره $\left(L = 4\frac{\lambda_2}{4}\right)$، سه گره $\left(L = 6\frac{\lambda_3}{4}\right)$، ... n گره $\left(L = 2n\frac{\lambda_n}{4}\right)$ تشکیل شود. طول موج صوت فرودی هنگامی که n گره تشکیل شده است، از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad n = 1, 2, .. \qquad (۵ــ۹)$$

و بسامد این صوت برابر است با :

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n\frac{v}{2L} = nf_1 \qquad (۵ــ۱۰)$$

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.

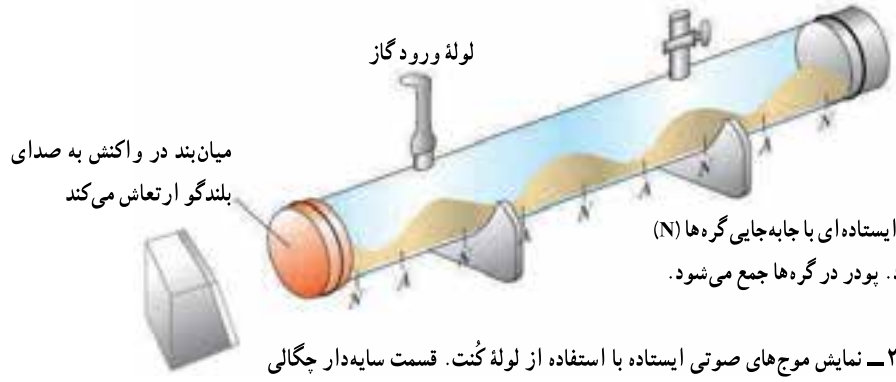
تمرین ۵ــ۲

بسامد صوت اصلی و هماهنگ‌های دوم و سوم را در یک لولهٔ صوتی به طول ۱m که هر دو انتهای آن باز است تعیین کنید. (سرعت صوت را در هوا ۳۴۰ m/s فرض کنید)

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

موج‌های عرضی روی ریسمان، از جمله موج‌های ایستاده، معمولاً فقط برحسب جابه‌جایی ریسمان توضیح داده می‌شوند. ولی، موج‌های صوتی درون یک شاره را می‌توان یا برحسب جابه‌جایی شاره یا برحسب تغییر فشار در شاره توضیح داد. برای جلوگیری از پیچیده شدن، از اصطلاح‌های **گره جابه‌جایی و شکم جابه‌جایی** استفاده می‌کنیم تا به نقطه‌هایی اشاره کنیم که در آنجا ذره‌های شاره به ترتیب جابه‌جایی صفر و جابه‌جایی بیشینه دارند.

با استفاده از وسیله‌ای به نام لولهٔ کُنت (شکل ۲۱)، می‌توان موج‌های صوتی ایستاده در ستونی از گاز را به نمایش گذاشت. یک لولهٔ شیشه‌ای افقی به طول تقریباً یک متر در یک انتها بسته است و در انتهای دیگر میان بند قابل انعطافی دارد که می‌تواند ارتعاش‌ها را عبور دهد. در فاصلهٔ کمی بلندگویی وجود دارد که توسط یک نوسانگر صوتی و تقویت‌کننده کار می‌کند و موج‌هایی صوتی فراهم می‌آورد که میان‌بند را با بسامدی که می‌توان آن را تغییر داد به ارتعاش درمی‌آورد.



صوت با بسامد مناسب موج‌های ایستاده‌ای با جابه‌جایی گره‌ها (N) و شکم ها (A) به وجود می‌آورد. پودر در گره‌ها جمع می‌شود.

شکل ۲۱ــ نمایش موج‌های صوتی ایستاده با استفاده از لولهٔ کُنت. قسمت سایه‌دار چگالی گاز را در لحظه‌ای که فشار گاز در جابه‌جایی گره‌ها در بیشینه یا کمینه است نشان می‌دهد.

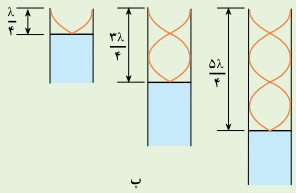
فعالیت ۵ــ۲

در شکل ۵ــ۱۰ الف و ب می‌توان با تغییر مکان لیوان یا لوله، طول لولهٔ 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



پ

شکل ۵ــ۱۰

فعالیت ۵ــ۳

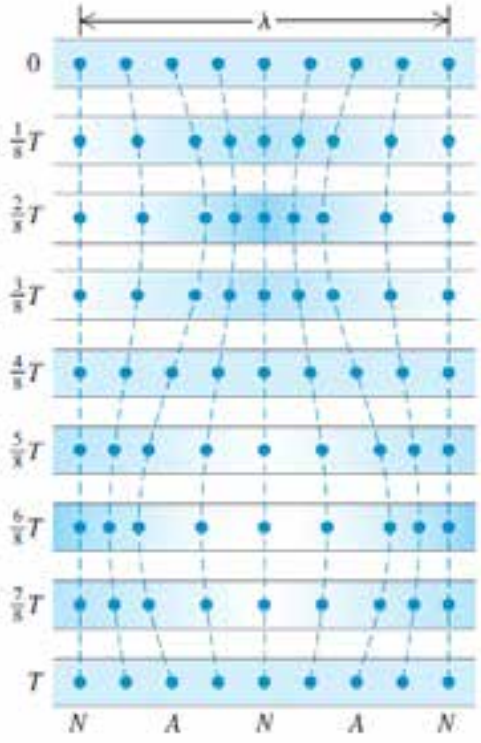
با استفاده از یک لولهٔ صوتی، آزمایشی را برای اندازه‌گیری سرعت صوت در هوا طراحی کنید.

۱۴۶

موج‌های صوتی درون لوله از انتهای بستهٔ لوله بازتابیده می‌شوند. مقدار کمی پودر سبک را به‌طور یکنواخت در امتداد زیر لوله پخش می‌کنیم. وقتی بسامد صوت را تغییر دهیم به بسامدهایی می‌رسیم که در آنها دامنهٔ موج‌های ایستاده برای پودر به قدری بزرگ می‌شود که در نقطه‌هایی که گاز در حرکت است در امتداد لوله کشیده می‌شوند. بنابراین پودر در گره‌های جابه‌جایی (جایی که گاز حرکت نمی‌کند) جمع می‌شود. گره‌های مجاور به فاصله‌ای برابر $\lambda/2$ از هم جدا هستند و این فاصله را می‌توان اندازه‌گیری کرد. با معلوم شدن طول موج، می‌توان با استفاده از این آزمایش سرعت صوت را معین کرد : بسامد را از درجهٔ نوسانگر می‌خوانیم، و سپس می‌توانیم سرعت v موج‌ها را از رابطهٔ $v=\lambda f$ به‌دست آوریم.

شکل ۲۲ حرکت نه ذرهٔ متفاوت را درون لولهٔ پرشده از گاز نشان می‌دهد که در آن یک موج صوتی ایستاده وجود دارد. یک ذره که در گره جابه‌جایی (N) است حرکت نمی‌کند، در حالی که ذره‌ای که در شکم جابه‌جایی (A) است با دامنهٔ بیشینه‌ای نوسان می‌کند. توجه کنید که ذره‌های دو طرف گره جابه‌جایی در فاز مخالف ارتعاش می‌کنند. وقتی این ذره‌ها به یکدیگر نزدیک می‌شوند، گاز بین آنها متراکم می‌شود و فشار بالا می‌رود؛ وقتی از یک‌دیگر دور می‌شوند انبساط وجود دارد و فشار افت می‌کند. از این رو در گره جابه‌جایی گاز بیشترین مقدار تراکم و انبساط را متحمل می‌شود و تغییرات در فشار و چگالی در بالا و زیر مقدار متوسط بیشینهٔ مقدار خود را دارند. برعکس، ذره‌هایی که در دو طرف شکم جابه‌جایی قرار دارند هم‌فاز ارتعاش می‌کنند؛ فاصلهٔ بین ذره‌ها تقریباً ثابت است و در شکم جابه‌جایی هیچ تغییری در فشار یا چگالی وجود ندارد.

یک موج ایستاده در بازه‌های $\frac{1}{8}T$ برای یک دورهٔ تناوب T نشان داده شده است.



یک شکم فشار = یک گره جابه‌جایی = N

یک گره فشار = یک شکم جابه‌جایی = A

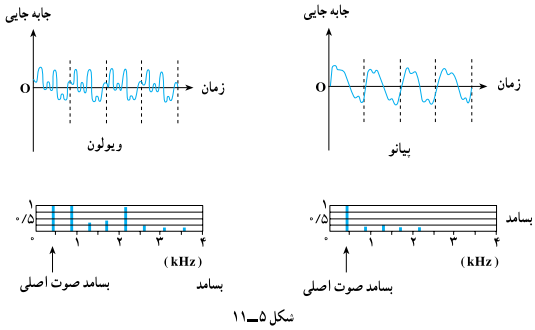
شکل ۲۲ــ در موج صوتی ایستاده، گره جابه‌جایی N یک شکم برای فشار است (نقطه‌ای که در آن جا فشار بیشترین افت و خیز را دارد) و شکم جابه‌جایی A یک گره فشار است (نقطه‌ای که در آن جا فشار اصلاً افت و خیز نمی‌کند)

مطالعهٔ 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 مشخصهٔ 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 اوّل آن ایجاد نمی‌شود، بلکه هماهنگ‌های دیگر آن نیز به‌وجود 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 ۵ــ۱۱ نسبت موج صوتی حاصل از پیانو و ویولون نشان داده شده است. در این شکل نسبت دامنهٔ هماهنگ‌ها به دامنهٔ صوت اصلی نیز آمده است. در هر دو مورد بسامد صوت اصلی ۴۴۰ هرتز است. ولی تعداد و دامنهٔ 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 به‌شکل موج مرکب بستگی دارد. یعنی طنین به نوع،



شکل ۵ــ۱۱

تعداد و دامنهٔ 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.

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

۱ــ صوت موسیقی یا نت، صوتی است که (مانند شکل ۵ــ۱۱) از ارتعاش‌های منظم تشکیل شده است و اثر خوشایندی بر گوش انسان دارد.

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

۳ــ گام موسیقی، مجموعه‌ای از چند نت است که فاصلهٔ 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 فاصلهٔ آنها از یک نت مبنا (do_1) که کمترین بسامد را دارد، به‌صورت زیر است :

$$\frac{do_2}{do_1}=۲ \quad \text{و} \quad \frac{re}{do_1}=\frac{۹}{۸}, \frac{mi}{do_1}=\frac{۵}{۴}, \frac{fa}{do_1}=\frac{۴}{۳}, \frac{sol}{do_1}=\frac{۳}{۲}, \frac{la}{do_1}=\frac{۵}{۳}, \frac{si}{do_1}=\frac{۱۵}{۸}$$

بسامد do_2 دو برابر بسامد do_1 است و اکتاو do_1 نامیده می‌شود. اگر do_2 را نت مبنا بگیریم، با رعایت فاصله‌های فوق می‌توان گام دوم را ساخت. به همین ترتیب می‌توان بر مبنای do_2 که اکتاو do_1 است گام سوم را ساخت و به همین ترتیب ادامه داد.

به‌عنوان مثال اگر بسامد نت مبنا را ۶۵/۲۵ هرتز اختیار کنیم، با استفاده از نسبت‌های بالا می‌توانیم بسامد نت‌های دیگر را به‌دست آوریم. در این‌صورت داریم :

$$\frac{re_1}{do_1}=\frac{۹}{۸}$$

$$re_1=\frac{۹}{۸}do_1=۷۳/۴۱Hz$$

به همین ترتیب بسامدهای ۸۱/۵۶، ۸۷، ۹۷/۸۸، ۱۰۸/۷۵ و ۱۲۲/۳۴ هرتز به‌ترتیب برای me_1، fa_1، sol_1، la_1، si_1 به‌دست می‌آیند. برای do_2 که اکتاو do_1 است

می‌توانیم از اصطلاح **گره فشار** برای توصیف نقطه‌ای در یک موج صوتی ایستاده استفاده کنیم که در آنجا فشار و چگالی تغییر نمی‌کنند و از اصطلاح **شکم فشار** برای توصیف نقطه‌ای استفاده کنیم که در آنجا فشار و چگالی بیشترین تغییرات را دارند. با استفاده از این اصطلاح‌ها، می‌توانیم مشاهدات خود را در مورد موج‌های صوتی ایستاده به ترتیب زیر خلاصه کنیم :

یک گره فشار همواره شکم جابه‌جایی، و یک شکم فشار همواره گره جابه‌جایی است.

شکل ۵۷ یک موج صوتی ایستاده را در لحظه‌ای که فشار بیشترین تغییرات را دارد نشان می‌دهد، قسمت سایه‌دار نشان می‌دهد که چگالی و فشار گاز مقدارهای بیشینه و کمینه خود را در گره‌های جابه‌جایی دارند (با N نشان داده شده‌اند).

وقتی در انتهای بسته شدهٔ لوله (انتهای با مانع سخت یا درپوش) بازتاب صورت بگیرد جابه‌جایی ذره‌ها در این انتها باید صفر باشد، که با انتهای ثابت شدهٔ ریسمان قابل قیاس است. بنابراین انتهای بستهٔ لوله گره جابه‌جایی و شکم فشار است، ذره‌ها حرکت نمی‌کنند، ولی فشار بیشترین تغییر را دارد. در انتهای باز لوله گره فشار است زیرا به جو باز می‌شود، جایی که فشار ثابت است. به همین دلیل، انتهای باز همواره شکم جابه‌جایی است، که با انتهای باز ریسمان قابل قیاس است، ذره‌ها با دامنهٔ بیشینه نوسان می‌کنند، ولی فشار تغییر نمی‌کند (دقیق‌تر بگوییم گره فشار در واقع قدری بیرون انتهای باز یک لوله تشکیل می‌شود. ولی اگر قطر لوله در مقایسه با طول موج کوچک باشد، که در بیشتر سازهای موسیقایی همین طور است، با اطمینان می‌توان از این اثر صرف نظر کرد). بنابراین موج طولی در ستونی از شاره در دو انتهای بسته و باز لوله بازتابیده می‌شوند به همان ترتیبی که موج‌های عرضی در ریسمان در دو انتهای بسته شده و آزاد بازتابیده می‌شوند.

مثال پیشنهادی

بلندگوی جهت‌داری یک موج صوتی با طول موج λ را به طرف دیوار می‌فرستد (شکل ۵۷). در چه فاصله‌هایی از دیوار می‌توان ایستاد و اصلاً هیچ صدایی را نشنید؟

پاسخ : گوش ما تغییرات فشار در هوا را آشکار می‌کند، افزایش یا کاهش در فشار هوای بیرون باعث حرکت مختصری در پردهٔ گوش به طرف داخل یا خارج می‌شود، حرکتی که یک سیگنال الکتریکی ایجاد می‌کند که به مغز فرستاده می‌شود (اگر تاکنون موقع رانندگی در کوهستان یا موقع پرواز با هواپیما دچار مشکل «صدا کردن» گوش شده باشید می‌دانید که گوش‌های شما به تغییرات فشار چقدر حساس هستند.) از این رو اگر گوش شما در گره فشار قرارگیرد که یک شکم جابه‌جایی است هیچ صدایی نخواهید شنید. دیوار یک گره جابه‌جایی است، فاصلهٔ یک گره از شکم مجاور $\lambda/۴$ و فاصلهٔ یک شکم از شکم بعدی $\lambda/۲$ است (شکل ۲۳). درنتیجه فاصله‌های d از دیوار که هیچ صدایی شنیده نخواهد شد عبارت‌اند از :

$d = \lambda/۴$

(اولین شکم جابه‌جایی و گره فشار)

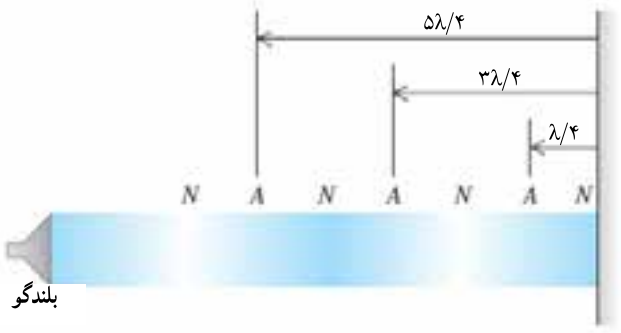
$d = \lambda/۴ + \lambda/۲ = ۳\lambda/۴$

(دومین شکم جابه‌جایی و گره فشار)

$d = ۳\lambda/۴ + \lambda/۲ = ۵\lambda/۴$

(سومین شکم جابه‌جایی و گره فشار)

و نظایر آن. اگر بلندگو خیلی جهت‌دار نباشد، به علت بازتاب‌های متعدد موج‌های صوتی از کف، سقف و سایر نقطه‌ها روی دیوارها این اثر به سختی دیده خواهد شد.

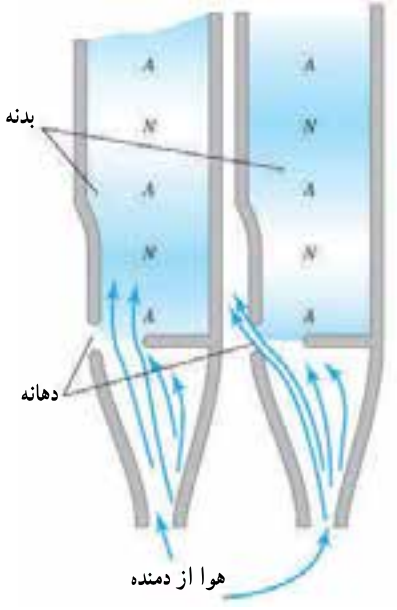


شکل ۲۳ــ وقتی موج صوتی به طرف دیوار می رود، با موج بازتابیده تداخل می‌کند و موج ایستاده به وجود می‌آید. N ها و Aها گره‌ها و شکم‌های جابه‌جایی هستند.

مهم‌ترین کاربرد موج‌های صوتی ایستاده ایجاد آهنگ‌های موسیقایی با سازهای بادی است. لوله‌های ارگ یکی از ساده‌ترین نمونه‌هاست (شکل ۲۴). هوا به وسیلهٔ دمنده با فشار پیمانه‌ای که در مرتبهٔ $۱۰^{۳}Pa(۱۰^{-۲}atm)$ است به انتهای پایین لوله فرستاده می‌شود. جریان هوا از روزنهٔ باریکی در لبهٔ سطح افقی خارج می‌شود و به لبهٔ بالایی روزنه که دهانهٔ لوله نامیده می‌شود می‌رود. ستون هوای داخل لوله به ارتعاش درمی‌آید و درست مانند ریسمان کشیده شده دسته‌ای از مدهای عادی ممکن به وجود می‌آید. دهانه همواره مثل انتهای باز عمل می‌کند، درنتیجه یک گره فشار و شکم جابه‌جایی است. انتهای دیگر لوله (در بالای شکل ۲۵) می‌تواند باز یا بسته باشد.

شکل ۲۴ــ لوله‌های ارگ که اندازه‌های متفاوتی دارند آهنگی با بسامدهای مختلف ایجاد می‌کنند.

این‌ها به ترتیب نقطه هایی با بیشینهٔ تغییر فشار و تغییر فشار صفر هستند.



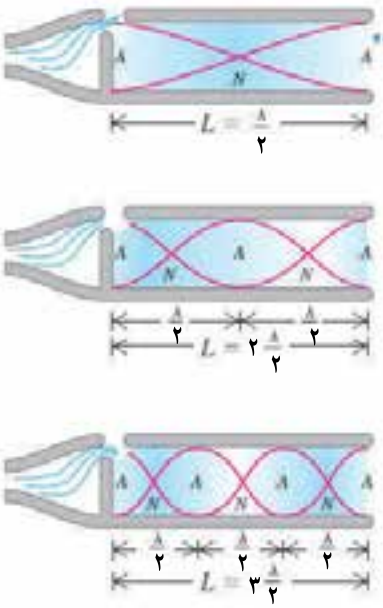
شکل ۲۵ــ مقطع یک لولهٔ ارگ در دو لحظه که نصف یک دوره فاصله دارند. Nها و Aها گره‌ها و شکم‌ها جابه‌جایی هستند که با سایه نشان داده شده‌اند.

در شکل ۲۶ هر دو انتهای لوله باز است، از این رو هر دو انتها گره‌های فشار و شکم‌های جابه‌جایی هستند. یک لولهٔ ارگ که در دو انتها باز است لولهٔ باز نامیده می‌شود. بسامد اصلی f_1 به نقش موج ایستاده با شکم جابه‌جایی در هر انتها و گره جابه‌جایی در وسط لوله مربوط است (شکل ۶۰ــ الف). فاصلهٔ بین شکم‌های مجاور همواره برابر نصف طول موج است، و در این حالت مساوی طول L لوله است : $\lambda/2=L$ بسامد مربوطه از رابطهٔ $f=v/\lambda$ به دست می‌آید و عبارت است از :

$$f_1=\frac{v}{2L}$$ (لولهٔ باز)

شکل‌های ۲۶ــ ب و ۲۶ــ پ هماهنگ‌های دوم و سوم را نشان می‌دهند (فرآهنگ‌ها یا صداهای فرعی)؛ نقش ارتعاش آنها به ترتیب دو و سه گره جابه‌جایی دارد. برای این‌ها، نصف طول موج به ترتیب برابر $L/2$ و $L/3$ است، و بسامدها به ترتیب دو برابر و سه برابر بسامد اصلی هستند. یعنی $f_2=2f_1$ و $f_3=3f_1$. برای هر مد عادی در یک لولهٔ باز طول L باید عدد درستی از نصف طول موج باشد و طول موج‌های ممکن λ_n عبارت‌اند از :

انتهای باز لوله همواره شکم جابه‌جایی است.



(الف) اصلی: $f_1=\frac{v}{2L}$

(ب) هماهنگ دوم : $f_2=2\frac{v}{2L}=2f_1$

(پ) هماهنگ دوم : $f_3=3\frac{v}{2L}=3f_1$

شکل ۲۶ــ مقطع یک لولهٔ باز که اولین سه مد عادی را نشان می‌دهد. قسمت سایه‌دار تغییرات فشار را مشخص می‌کند. منحنی‌ها نمودارهای جابه جایی در طول محور لوله در دو لحظهٔ زمانی به فاصلهٔ نصف دوره هستند. Nها و Aها، گره‌ها و شکم‌های جابه‌جایی هستند. تغییر این‌ها، گره‌ها و شکم‌های فشار را نشان می‌دهند.

(لوله باز) $L = n\frac{\lambda_n}{2}$ یا $\lambda_n = \frac{2L}{n}$ $(n=1،2،3،\ldots)$

بسامدهای مربوطه f_n با $f_n = v/\lambda_n$ داده می‌شوند، بنابراین همهٔ بسامدهای مد عادی برای لولهٔ دو سر باز عبارت‌اند از :

(لولهٔ باز) $f_n = \frac{nv}{2L}$ $(n=1،2،3،\ldots)$

مقدار $n=1$ به بسامد اصلی و $n=2$ به هماهنگ دوم (یا اولین فرآهنگ) و نظایر آن مربوط‌اند.

شکل ۲۷ــ لوله‌ای را نشان می‌دهد که در انتهای چپ باز و در انتهای راست بسته است. این لولهٔ بسته نامیده می‌شود. انتهای چپ (باز) شکم جابه‌جایی (گره فشار) ولی طرف راست (بسته) گره جابه‌جایی (شکم فشار) است. فاصلهٔ بین یک گره و شکم مجاور همواره یک چهارم طول موج است.

شکل ۲۷ــ الف مد با کمترین بسامد را نشان می‌دهد، طول لوله یک‌چهارم طول موج است ($L=\lambda_1/4$). بسامد اصلی برابر است با $f_1=v/\lambda_1$، یا

(لولهٔ بسته) $f_1 = \frac{v}{4L}$

این نصف بسامد اصلی برای یک لولهٔ باز با همان طول است (به زبان موسیقایی، ارتفاع یک لولهٔ بسته یک اکتاو (عامل ۲ در بسامد) از لولهٔ باز با همان طول پایین‌تر است.) شکل ۶۱ــ ب مد بعدی را نشان می‌دهد، که برای آن طول لوله سه‌چهارم طول موج است که به بسامد $3f_1$ ارتباط دارد. برای شکل ۶۱ــ پ، $L=5\lambda/4$، و بسامد $5f_1$ است. طول موج‌های ممکن عبارت‌اند از :

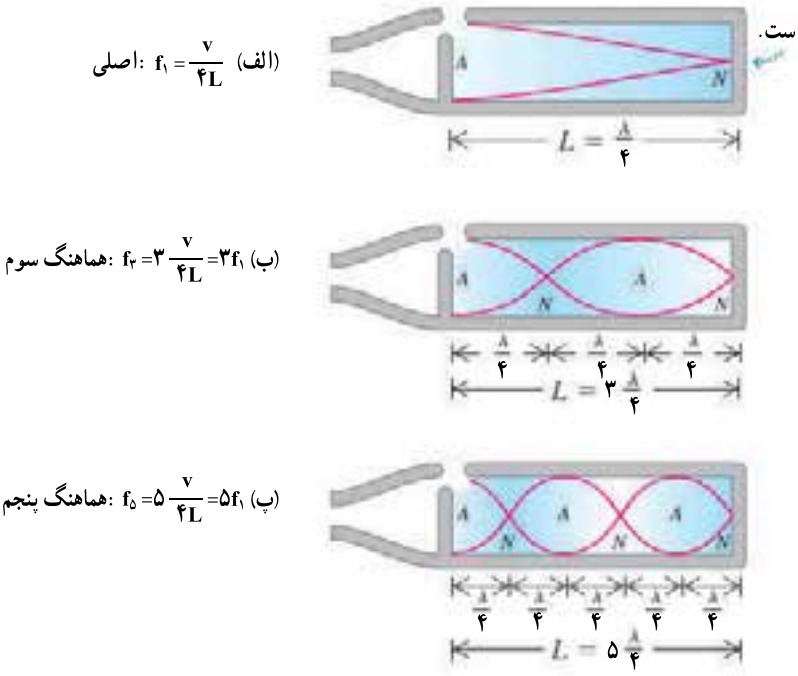
(لولهٔ بسته) $L = n\frac{\lambda_n}{4}$ یا $\lambda_n = \frac{4L}{n}$ $(n=1،3،5،\ldots)$

بسامدهای مد عادی با $f_n = v/\lambda_n$ داده می‌شوند یا

(لولهٔ بسته) $f_n = \frac{nv}{4L}$ $(n=1،3،5،\ldots)$

که f_1 با معادلهٔ $f_1 = \frac{v}{4L}$ داده می‌شود. می‌بینیم که هماهنگ‌های دوم، چهارم و همهٔ هماهنگ زوج وجود ندارند. در لوله‌ای که در یک انتها بسته است، بسامد اصلی $f_1=v/4L$ است و فقط هماهنگ‌های فرد در دستهٔ $(3f_1، 5f_1،\ldots)$ امکان‌پذیرند.

امکان آخر لوله‌ای است که هر دو انتها بسته باشد، که در آن در دو انتها گره‌های جابه‌جایی و شکم‌های فشار قرار دارند. این نوع لوله در سازهای موسیقی زیاد، به کار نمی‌روند زیرا راهی برای خارج شدن ارتعاش‌ها از لوله وجود ندارد.



شکل ۲۷ــ مقطع یک لولهٔ بسته که اولین سه مد عادی و نیز گره‌ها و شکم‌های جابه‌جایی را نشان می‌دهد. فقط هماهنگ‌های فرد امکان‌پذیر هستند.

مثال پیشنهادی

در یک روز وقتی سرعت صوت ۳۴۵m/s است. بسامد اصلی یک لولهٔ بسته ارگ ۲۲۰Hz است. (الف) طول این لولهٔ بسته چقدر است؟ هماهنگ پنجم این لوله همان طول موج هماهنگ سوم یک لولهٔ باز را دارد. (ب) طول لولهٔ باز چقدر است؟

پاسخ : این مثال از رابطهٔ بین طول و بسامدهای مد عادی در لولهٔ باز (شکل ۶۰) و لولهٔ بسته (شکل ۶۱) استفاده می‌کند.

چون لوله بسته است (باز در یک انتها و بسته در انتهای دیگر) بسامدهای مد عادی با معادلهٔ (۱ــ۲۱) داده می‌شوند. از این معادله برای تعیین طول L از روی بسامد در قسمت (الف) استفاده می‌کنیم. در قسمت (ب) باید آن را با یک لولهٔ باز مقایسه کنیم، که برای آن بسامدها با معادلهٔ (۱ــ۲۵) داده می‌شوند.

الف) برای لولهٔ بسته $f_1=v/4L$، پس طول لولهٔ بسته برابر است با :

$$L_{\text{بسته}}=\frac{v}{4f_1}=\frac{345\,m/s}{4(220\,s^{-1})}=0/392\,m$$

ب) بسامد هماهنگ سوم لولهٔ بسته برابر $f_3=3f_1$ و بسامد هماهنگ پنجم برابر $f_5=5f_1$ است.

$$f_5=5f_1=5(220\,Hz)=1100\,Hz$$

اگر طول موج‌ها یکسان باشند، بسامدها یکسان هستند، پس بسامد هماهنگ در لولهٔ باز نیز ۱۱۰۰Hz است. هماهنگ سوم یک لولهٔ باز در $3f_1=3(v/2L)$ است. اگر این برابر ۱۱۰۰Hz باشد، آنگاه :

$$1100\,Hz=3\left(\frac{345\,m/s}{2L_{\text{باز}}}\right) \quad \text{و} \quad L_{\text{باز}}=0/470\,m$$

لولهٔ بسته ۰/۳۹۲m طول دارد و بسامد اصلی آن ۲۲۰Hz است، لولهٔ باز درازتر است، ۰/۴۷۰m، ولی دارای بسامد اصلی بالاتر ۳۶۷Hz=۳/(۱۱۰۰Hz) است. اگر این متناقض به نظر می‌رسد، دانش‌آموزان باید شکل‌های ۶۰ــالف و ۶۱ــ الف را دوباره باهم مقایسه کنند.

توجه : در یک لولهٔ ارگ که در عمل مورد استفاده است همواره در یک زمان چندین مد وجود دارند، حرکت هوا برهم‌نهشی از این مدهاست. این وضعیت قابل قیاس با ریسمانی است که مانند شکل ۲۸ با انگشت زده شود. نظیر یک ریسمان در حال ارتعاش، موج ایستاده پیچیده‌ای در لوله به وجود می‌آید و موج صوتی پیش‌رونده‌ای با محتوای هماهنگی مشابه آن موج ایستاده در هوای اطراف فراهم می‌آید. یک لولهٔ بسیار باریک موج صوتی با هماهنگ‌های بالاتر زیاد به و جود می‌آورد و ما آن را به‌صورت آهنگ ظریف و «تیزی» می‌شنویم، لوله‌های پهن‌تر

شکل ۲۸

بیشتر مد اصلی را به‌وجود می‌آورند، که نرم‌تر و شبیه آهنگ فلوت شنیده می‌شوند. محتوای هماهنگی به شکل دهانهٔ لوله نیز بستگی دارد.

ما دربارهٔ لوله‌های ارگ صحبت کردیم، ولی این بحث در مورد سازه‌های بادی دیگر نیز صادق است. فلوت و نی مستقیماً قابل قیاس هستند. مهم‌ترین اختلاف در این است که این سازها در امتداد لوله سوراخ‌هایی دارند. بازکردن و بستن این سوراخ‌ها با انگشت‌ها طول مؤثر L ستون هوا را تغییر می‌دهد و درنتیجه ارتفاع صوت تغییر می‌کند. هر لولهٔ ارگ جداگانه، از نظر مقایسه، می‌تواند فقط یک نت تنها را بنوازد. فلوت و نی به صورت لوله‌های باز عمل می‌کنند درحالی که قره‌نی مثل لولهٔ بسته است (بسته در زبانهٔ انتهایی و باز در قسمت شیپور مانند).

توجه : معادله‌های (۵ــ۲۵) و (۵ــ۲۶) نشان می‌دهند که بسامدهای هر ساز بادی با سرعت صوت در ستون هوای درون‌ساز متناسب است. همان‌طورکه معادلهٔ $V=\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$ نشان می‌دهد، V به دما و جرم مولکولی وابسته است و با زیاد شدن دما، افزایش می‌یابد. بنابراین ارتفاع صوت (بسامد) در همهٔ سازهای بادی با افزایش دما بالا می‌رود. ارگ که بعضی از لوله‌هایش در یک دما و بعضی دیگر در دمای متفاوتی قرار دارند، در معرض از کوک خارج شدن است.

پرسش پیشنهادی

اگر شیلنگی را به یک انتهای لوله‌ای وصل کنید و با فوت‌کردن هوا را در آن متراکم کنید، لوله آهنگی موسیقیایی ایجاد می‌کند. اگر به جای آن هلیم متراکم شده در آن لوله و با همان فشار و دما بدمید آیا لوله همان آهنگ را تولید می‌کند یا آهنگی با ارتفاع صوتی بالاتر به وجود می‌آورد؟

پاسخ : هلیم کم چگال‌تر است و جرم مولکولی کمتری از هوا دارد. بنابراین صوت در هلیم سریع‌تر از هوا حرکت می‌کند و بسامدهای طبیعی متناسب با سرعت صوت در لوله است. از این رو بسامد و درنتیجه ارتفاع صوت وقتی به جای هوا هلیم قرار داده شود، افزایش می‌یابد.

مثال پیشنهادی

در یک نمایش هیجان‌انگیز و تماشایی، خواننده‌ای با صدای تقویت شده‌اش، گیلاسی (یک نوع لیوان پایه‌دار) را می‌شکند. چگونه این عمل ممکن است؟

پاسخ : یک گیلاس با کیفیت خوب، بسامدهای مدهای عادی‌ای دارد که می‌توانید با آهسته‌زدن ضربه به گیلاس، آنها را بشنوید. وقتی خواننده‌ای نت بلندی را با بسامدی که دقیقاً به یکی از این بسامدهای طبیعی مربوط است، گسیل دارد، دراثر تشدید، دامنهٔ بزرگ نوسان‌ها می‌تواند زیادتر شود و گیلاس را بشکند. البته این اتفاق می‌تواند توسط یک ابزار موسیقی مانند ترومپت نیز بیفتد.

شکل ۲۹

مثال پیشنهادی

ساز نی یکی از سازهای بادی ایرانی است که به‌طور معمول طول آن بین ۴۰cm تا ۸۰cm است. این ساز شامل ۶ سوراخ است که اولین سوراخ آن از بالا در پشت نی قرار دارد. هنگامی که یک نوازندهٔ نی انگشتان خود را روی ۶ سوراخ ساز خود قرار می‌دهد و در آن می‌دمد، صوت اصلی در آن ایجاد می‌شود. اگر طول ساز این نوازنده ۶۰cm باشد، بسامد اصلی و بسامد چهارمین هماهنگ ایجاد شده در این نی چقدر است؟ فرض کنید سرعت صوت در هوا ۳۴۵m/s است.

پاسخ : ساز نی یک ساز دو سر باز محسوب می‌شود (وقتی سوراخ‌های آن بسته باشد) و بسامدهای طبیعی آن از رابطهٔ $f_n = nv/2l$ به‌دست می‌آید. بنابراین صوت اصلی و بسامد چهارمین هماهنگ آن به‌صورت زیر محاسبه می‌شود :

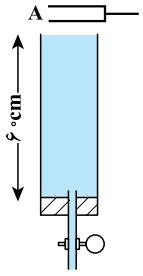
$$f_1 = \frac{V}{2l} = \frac{345}{0/6 \times 2} = 287/5\,Hz$$

$$f_4 = \frac{4V}{2l} = \frac{4 \times 345}{2 \times 0/6} = 1150\,Hz$$

مثال پیشنهادی

الف) چرا موج صوتی ایجاد شده توسط یک دیاپازون در هوا طولی است؟

ب) دانش‌آموزی دیاپازون مرتعش A را که عدد ۲۵۶ بر آن حک شده است درست در بالای لولهٔ شیشه‌ای پر از آبی به طول ۶۰cm قرار می‌دهد. لوله را به‌آرامی از آب خالی می‌کنیم و وقتی آب باقیمانده در لوله ۲۵/۰cm است دانش‌آموز صدای بلندی را می‌شنود. او آزمایش را با دیاپازون B که عدد ۵۱۲ روی آن حک شده است تکرار می‌کند، در موقع خالی‌شدن آب در دو وضعیت صدای بلندی را می‌شنود.



شکل ۳۰

۱) معنی عدد ۲۵۶ روی دیاپازون A چیست؟

۲) توضیح دهید که چرا دانش‌آموز در موقع استفاده از دیاپازون A صدای بلندی می‌شنود، نام این پدیده چیست؟

۳) با استفاده از اعداد داده شده برای دیاپازون A مقدار و سرعت صوت در هوا را حساب کنید. دلیلی بیاورید که چرا این مقدار فقط به تقریب درست است.

۴) توضیح دهید که چرا، وقتی از دیاپازون B استفاده می‌کنید، هنگام خالی‌کردن آب از لوله در دو وضعیت صدای بلند شنیده می‌شود، درحالی که با دیاپازون A فقط در یک وضعیت.

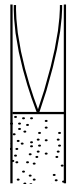
پاسخ :

الف) وقتی شاخه‌های دیاپازون مرتعش حرکت می‌کند، متناوباً مولکول‌های هوا را متراکم می‌کند و یک تپ (پالس) رقت هوا ایجاد می‌شود. این تپها به مولکول‌های هوای مجاور انتقال پیدا می‌کنند و بنابراین موج با ارتعاش مولکول‌های هوا در همان امتداد سرعت موج حرکت می‌کند.

ب) (۱) معنی عدد ۲۵۶ این است که بسامد دیاپازون ۲۵۶Hz می‌باشد.

(۲) وقتی آب به قدری خالی شود که بسامد طبیعی ستون هوا برابر بسامد دیاپازون A گردد، ستون هوا نیز با دامنه‌ای بزرگ به ارتعاش درمی‌آید و صدای بلندی شنیده خواهد شد. این پدیده **تشدید** نامیده می‌شود.

(۳) $۶۰-۲۵=۳۵\,cm$ = طول ستون هوا در تشدید

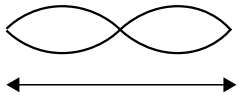


شکل ۳۱

شکل مد اصلی ارتعاش را برای لوله نشان می‌دهد.

در اینجا $۳۵\,(cm)=\lambda/۴$.

چون برای موج ساکن



شکل ۳۲

بنابراین $\lambda=۱۴۰\,cm=۱/۴m$

چون $v=f\lambda$ $\quad v=۲۵۶(Hz)\times۱/۴(m)=۳۵۸/۴ms^{-۱}$

این مقدار تقریبی است زیرا از تصحیح مربوط به انتها (مربوط به شعاع لولهٔ تشدید و فاصلهٔ بین دیاپازون و انتهای لوله شیشه‌ای) چشم‌پوشی شده است.

(۴) با استفاده از این مقدار برای v، وضعیت اولین تشدید برای دیاپازون ۵۱۲Hz را می‌توان به‌دست آورد.

$v=f\lambda$

$۳۵۸/۴(ms^{-۱})=۵۱۲(Hz)\times\lambda$ $\quad \lambda=۰/۷m$

بنابراین برای اولین وضعیت تشدید

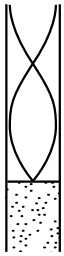
$l_۱=\lambda/۴=۰/۱۷۵m$

دومین وضعیت تشدید در شکل نشان داده شده است،

در اینجا $l_۲=۳\lambda/۴$

$l_۲=۰/۵۹۵m$

چون $l_۲<۶۰\,cm$ است. در هر دو وضعیت تشدید شنیده می‌شود.



شکل ۳۳

تمرین ۵ـ۲

$$f_n = \frac{nV}{2L}$$

$$f_1 = \frac{1 \times V}{2L} = \frac{340}{2 \times 1} = 170\,Hz$$

$$f_2 = \frac{2 \times V}{2L} = \frac{2 \times 340}{2 \times 1} = 340\,Hz$$

$$f_3 = \frac{3 \times V}{2L} = \frac{3 \times 340}{2 \times 1} = 510\,Hz$$

فعالیت ۵ـ۲

در این آزمایش بسامد دیاپازون ثابت است. وقتی ارتفاع آب در لوله به‌تدریج کم می‌شود، طول لوله یک سر بسته زیاد می‌شود. در حالتی که بسامد طبیعی ستون هوا در لوله با بسامد دیاپازون یکی شود، صدای بلندی شنیده می‌شود ($L_1 = \frac{\lambda}{4}$). با ارائه این عمل دوباره در یک ارتفاع دیگر ($L_2 = 3\frac{\lambda}{4}$). بسامد طبیعی لوله بستهٔ جدید با دیاپازون یکی می‌شود و صدا بلندتر شنیده می‌شود. این روند می‌تواند برای طول‌های $\frac{5\lambda}{4}$، $\frac{7\lambda}{4}$ و ... تکرار شود. در حالت‌هایی که صدا بلندتر شنیده می‌شود : بسامد لولهٔ صوتی با دیاپازون یکی بوده و پدیده تشدید اتفاق می‌افتد و ستون هوای درون لوله، با دامنهٔ زیاد به ارتعاش درمی‌آید و صدای بلندی شنیده می‌شود.

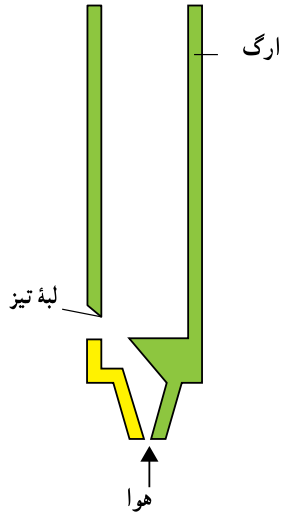
فعالیت ۵ـ۳

اگر آزمایش شبیه آزمایش فعالیت **۵ـ۲** انجام شود و در حالت‌های تشدید، طول لولهٔ صوتی توسط خط‌کش اندازه‌گیری گردد (مثلاً طول L_1، L_2). از تفاضل آنها، طول موج صوت در لوله به‌دست می‌آید.

$$\Delta L = L_2 - L_1 = \frac{3\lambda}{4} - \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2}$$

$$\lambda = 2\Delta L$$

با توجه به اینکه بسامد دیاپازون معلوم است (بر روی آن حک شده) و رابطهٔ $V=\lambda f$، سرعت صوت در هوا مشخص می‌شود.



شکل ۳۴

۱ـ هنگامی‌که هوا از انتهای لولهٔ ارگ وارد آن می‌شود، به لبهٔ تیزی می‌خورد و ارتعاشاتی در هوای درون لوله ایجاد می‌کند. شدّت صدای تولید شده تابع قطر لوله است، در حالی که زیر و بمی این صدا به طول لوله بستگی دارد.

الف) در جدول زیر اثر تغییر قطر لوله در دامنه، بسامد و سرعت موج صوتی ایجاد شده، بررسی می‌شود. این جدول را رسم و تکمیل کنید.

تغییر	اثر تغییر بر روی موج صوتی		
	دامنه	بسامد	سرعت
افزایش قطر لوله			
کاهش قطر لوله			
افزایش طول لوله			

ب) انتظار دارید، ارتفاع صوت ایجاد شده از لوله‌ای با طول کوتاه، کم باشد یا زیاد؟ پاسخ خود را توضیح دهید.

۲ـ خیلی‌ها دوست دارند در حمام زیر دوش آواز بخوانند، چون صدایشان بلندتر می‌شود، چگونه این اتفاق می‌افتد؟ آیا اثرش برای مرد یا زن متفاوت است؟

۳ـ در یک ارگ بزرگ، لوله‌هایی که پایین‌ترین بسامدها را تولید می‌کنند بسیار دراز، معمولاً ۴/۸۸ m هستند. چرا؟

۴ـ برخی از بناهای قدیمی اپرا و تالارهای کنسرت در اروپا که به داشتن آکوستیک عالی مشهورند، دیوارهای بسیار نامنظم، با پوششی از انبوه تزیینات گچ‌بری دارند که امواج صوت را تقریباً در همهٔ جهات باز می‌تابانند. صدایی که به یک شنونده در چنین تالاری می‌رسد، چه تفاوتی با صدایی که یک شنونده در یک تالار کنسرت مدرن با چهار دیوار صاف و تخت دریافت می‌کند، دارد؟

۵ـ آیا دمای هوا تأثیری در ارتفاع صدای یک فلوت دارد؟

در گیتار که دارای سیم است چطور؟

۶ـ معمولاً بزرگترین لولهٔ یک ارگ بزرگ طولی در حدود ۴/۸۸ m دارد. این لوله‌ها در هر دو انتهایشان باز هستند، لذا موج صوتی ایستاده در هر دو انتها دارای شکم خواهد بود. بسامد مد اصلی چنین لوله‌ای چقدر است؟

۵ــ۴ــ شدت صوت

نگاهی دوباره به مفهوم

امواج الکترومغناطیسی خورشید انرژی عظیم لازم برای تداوم حیات روی زمین را تأمین می‌کنند. انرژی صوت در مقایسه با آن بسیار کم است، زیرا تولید صوت فقط به انرژی اندکی نیاز دارد. مثلاً، ۱۰ میلیون نفر که همزمان صحبت کنند فقط انرژی لازم برای روشن‌کردن چراغ قوه‌ای معمولی را تولید می‌کنند. شنوایی فقط به مدد گوش‌های بسیار حساس ما امکان‌پذیر است. فقط حساس‌ترین میکروفون‌ها می‌توانند صدایی را آشکار سازند که از آنچه می‌شنویم ضعیف‌تر است.

انرژی صوتی هنگام حرکت در هوا به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. انرژی صوتی امواج پربسامد سریع‌تر از امواج کم‌بسامد به انرژی درونی تبدیل می‌شود. درنتیجه، صداهای کم‌بسامد در هوا از امواج پربسامد دورتر می‌روند. بدین دلیل است که بوق کامیون‌ها یا کشتی‌ها کم‌بسامد است.

همهٔ امواج حامل انرژی‌اند. امواج دریا سواحل را می‌سایند، صوت می‌تواند شیشه را بشکند، و ویرانی‌های زمین‌لرزه ممکن است به اندازهٔ ویرانی‌های چندین بمب هسته‌ای باشد. بعضی‌ها حتی امواج را به‌عنوان آشفتگی‌هایی تعریف می‌کنند که در آنها انرژی بدون انتقال جرم، منتقل می‌شود. انرژی وابسته به موج با مجذور دامنه متناسب است. دامنهٔ هر موج صوتی به فشار پیمانه‌ای تراکم‌ها و رقت‌های آن مربوط می‌شود، بنابراین انرژی حمل شده به وسیلهٔ موج صوتی با مجذور مقدار فشار (کمتر از فشار جو یا بیشتر از آن) متناسب است.

چون امواج معمولاً از یک چشمه پخش می‌شوند، انرژیشان نیز منتشر می‌شود. بنابراین، انرژی در واحد مساحت در یک محل مشخص همان‌قدر مهم است که انرژی کل حمل شده توسط موج. شدت هر موج، بنابه تعریف، عبارت است از انرژی‌ای که این موج در یکای زمان و در یکای مساحت حمل می‌کند.

$$I = \frac{E/t}{A}$$

که در آن I شدت، E/t انرژی در یکای زمان، و A مساحت است. انرژی در یکای زمان توان است، بنابراین تعریف شدت عبارت است از

$$I = \text{توان} / A$$

این تعریف برای تمام انواع موج‌ها صادق و درک شهودی آن نیز به‌خوبی میسر است. مثلاً، یک صوت خیلی شدید به گوش آسیب می‌رساند زیرا انرژی را سریعتر از آن حمل می‌کند که گوش بتواند آن را بدون آسیب مستهلک کند. در این حالت پردهٔ صماخ با دامنهٔ خیلی زیاد به ارتعاش درمی‌آید و ممکن است هم پردهٔ صماخ و هم ساز و کار شنوایی داخل گوش آسیب ببینند.

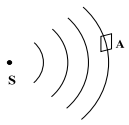
یکی از یکاهای شدت وات بر مترمربع (W/m^2) است. شدت نور خورشید در یک روز تابستان در حدود $10^3 W/m^2$ است. گوش انسان می‌تواند صداهایی آهسته با شدت $10^{-12} W/m^2$ را تشخیص دهد و نیز می‌تواند بدون اینکه آسیب ببیند برای مدت کوتاهی در معرض اصواتی با شدت $1 W/m^2$ قرار بگیرد. این یک گسترهٔ قابل توجه از حساسیت است، گوش می‌تواند صداهایی را بشنود که شدت آنها با ضریب 10^{12} تغییر می‌کند. کوچکی شدتی که گوش می‌تواند تشخیص دهد نیز به همان اندازه قابل توجه است.

بسامد ۱۳۰/۵ هرتز محاسبه می‌شود. اکنون می‌توانیم بر مبنای do_4 گام بعدی را بسازیم. برای نتهای این گام به ترتیب مقدارهای ۱۴۶/۸۱، ۱۶۳/۱۳، ۱۷۴، ۱۹۵/۷۵، ۲۱۷/۵، ۲۴۴/۶۹ هرتز به‌دست می‌آیند. هریک از این نت‌ها اکتاو نت متناظر در گام اول است (چرا؟) به همین ترتیب برای گام سوم به‌ترتیب مقدارهای ۲۶۱، ۲۹۳/۶، ۳۲۶/۲۵، ۳۴۸، ۳۹۱/۵، ۴۳۵، ۴۸۹/۳۸ هرتز به دست می‌آیند. این مثال نت‌های گام طبیعی را بر مبنای قرارداد $la_4 = 435Hz$ به‌دست می‌دهد. اکنون به‌عنوان تمرین تعیین کنید که بسامدهای ۱۰۴۴ و ۸۷۰ هرتز بسامد چه نت‌هایی هستند و در کدام گام قرار دارند؟

۵ــ۴ــ شدت صوت

در بخش ۱ــ۱ 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 ۵ــ۱۲ چشمهٔ 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. درنتیجه، شدت صوت I در مکانی که سطح A قرار گرفته با رابطهٔ زیر بیان می‌شود :

$$I = \frac{E}{At} \qquad (۵ــ۱۱)$$



شکل ۵ــ۱۲

رابطهٔ ۵ــ۱۱ را می‌توان با استفاده از تعریف توان ($P = \frac{E}{t}$) به‌صورت زیر نوشت :

$$I = \frac{P}{A} \qquad (۵ــ۱۲)$$

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

مثال ۵ــ۳

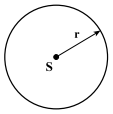
به سطح یک میکروفون که مساحت آن $3cm^2$ است در مدت ۵ ثانیه $1/5\times10^{-11}J$ انرژی صوتی می‌رسد. شدت صوت در سطح میکروفون چقدر است؟ (سطح میکروفون عمود بر راستای انتشار صوت است).

پاسخ

با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۱۱ داریم :

$$I=\frac{E}{At}=\frac{1/5\times10^{-11}}{3\times10^{-4}\times5}=10^{-8}\,W/m^2$$

اکنون ممکن است این پرسش پیش بیاید که : چرا هرچه از چشمهٔ صوت دور می‌شویم صدا ضعیف‌تر می‌شود؟ برای پاسخ‌دادن به این سؤال چشمهٔ صوت S را درنظر می‌گیریم که موج‌های کروی در فضا ایجاد می‌کند (شکل ۵ــ۱۳).

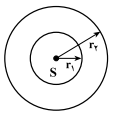


شکل ۵ــ۱۳

فرض کنید توان چشمهٔ صوت P باشد و چشمه در تمام جهت‌های فضا، موج را به‌صورت یکسان گسیل کند. شدت صوت در روی کره‌ای به شعاع r چقدر 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. درنتیجه شدت صوت بر روی این کره برابر است با :

$$I=\frac{P}{4\pi r^2}$$ (۵ــ۱۳)

این رابطه نشان می‌دهد که با دورشدن از چشمهٔ S شدت صوت کاهش می‌یابد. حال برای اینکه ببینیم این کاهش به چه نسبتی صورت می‌گیرد، دو جبههٔ موج کروی به شعاع‌های r_1 و r_2 در نظر می‌گیریم (شکل ۵ــ۱۴).



شکل ۵ــ۱۴

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 :

$$P_1=P_2$$ (۵ــ۱۴)

شدت صوت روی سطح کرهٔ ۱ برابر است با :

$$I_1=\frac{P_1}{4\pi r_1^2}$$

و روی سطح کرهٔ ۲ برابر است با :

$$I_2=\frac{P_2}{4\pi r_2^2}$$

با جایگذاری این رابطه‌ها در رابطهٔ ۵ــ۱۴ داریم :

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

و یا

$$\frac{I_2}{I_1}=\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$$ (۵ــ۱۵)

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

مثال ۵ــ۴

شدت صوت یک سخنران در یک سالن در فاصلهٔ ۴ متری از او برابر $10^{-6}W/m^2$ است. شدت صوت سخنران در فاصلهٔ ۲۰ متری چقدر است؟

پاسخ

با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۱۵ داریم :

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

با جایگذاری مقادیر r_2 و r_1 و I_1 داریم :

$$\frac{I_2}{10^{-6}}=\left(\frac{4}{20}\right)^2=\frac{1}{25}$$

$$I_2=4\times10^{-8}\,W/m^2$$

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

شدت صوت برای برخی صداها درجدول ۵ــ۳ آمده است.

یک میلیاردیم وات بر مترمربع، مقدار فوق‌العاده کمی توان بر واحد مساحت است. مولکول‌ها با این شدت در یک موج صوتی در فاصله‌ای کمتر از قطر یک مولکول به ارتعاش درمی‌آیند و فشارهای پیمانه‌ای موجود کمتر از $10^{-9}atm$ هستند.

شکل ۳۵ــ با گرفتن دست‌ها به این شکل، به خروج صوت از دهان جهت داده می‌شود به‌طوری که صوت به اطراف منتشر نمی‌شود. از این رو شدت با فاصله بسیار کندتر از قانون عکس مجذور کاهش می‌یابد و صدای شما می‌تواند در فضای بیشتری شنیده شود.

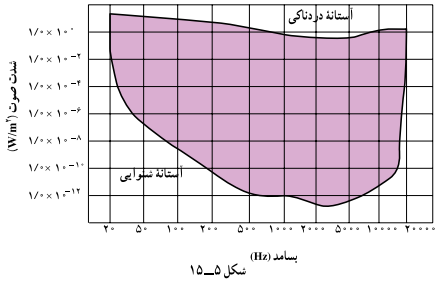
توان میانگین کل حمل شده توسط موج صوتی از یک سطح مساوی است با حاصل ضرب شدت در مساحت سطح، درصورتی که شدت در تمام سطح یکنواخت باشد. توان صوتی میانگین کل گسیل شده توسط شخصی که در حال صحبت کردن در حالت معمولی است حدود $10^{-5}W$ است، درحالی که با فریاد بلند در حدود $3\times10^{-2}W$ است. اگر تمام ساکنان شهر تهران در یک زمان صحبت کنند توان صوتی کل حدود $100W$ است که معادل توان الکتریکی لازم برای روشن‌کردن یک لامپ با اندازهٔ متوسط است. از طرف دیگر توان لازم برای پرکردن یک سالن بزرگ یا ورزشگاه با صدای بلند قابل ملاحظه است.

اگر چشمهٔ صوتی موج‌ها را در تمام جهت‌ها یکسان گسیل کند، شدت با افزایش فاصلهٔ r از چشمه بنابر قانون عکس مجذور کاهش می‌یابد : شدت متناسب با $1/r^2$ است. اگر صوت عمدتاً در یک امتداد حرکت کند قانون عکس مجذور معتبر نیست و شدت با فاصله بسیار کندتر از $1/r^2$ کاهش می‌یابد.

جدول ۵ــ۳ــ شدت صوت و تراز شدت صوت برای برخی صداها

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

آهسته‌ترین صدایی (کمترین شدت) را که انسان می‌تواند بشنود آستانهٔ شنوایی می‌نامند، و بلندترین صدایی (بیشینهٔ شدت) که انسان می‌تواند بشنود بدون اینکه گوش او به درد آید آستانهٔ دردناکی می‌نامند. آستانهٔ شنوایی و آستانهٔ دردناکی به بسامد بستگی دارند. نمودار شدت صوت در آستانهٔ شنوایی و دردناکی را، به‌صورت تابعی از بسامد، در شکل ۵ــ۱۵ مشاهده می‌کنید.



شکل ۵ــ۱۵

پرسش ۵ــ۲

با استفاده از نمودار شکل ۵ــ۱۵ تعیین کنید که آستانهٔ شنوایی و دردناکی در بسامد ۱۰,۰۰۰ هرتز تقریباً چقدر 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 معنی 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 ۵ــ۳ می‌بینید که شدت صوت در غرش هواپیما $10^{2}W/m^2$ و شدت صوت در گفت‌وگوی بین دو نفر $10^{-8}W/m^2$ است؛ یعنی شدت غرش هواپیمای جت 10^{10} برابر شدت گفت‌وگو است. ولی می‌دانید که ما غرش هواپیما را هیچ‌گاه 10^{10} برابر بلندتر از گفت وگوی 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 دسی‌بل (dB) نام‌گذاری کرده‌اند. هر بل برابر ده دسی‌بل است.

$$\beta = \log\frac{I}{I_0} \qquad \text{بل (B)} \qquad (۵ــ۱۶)$$

$$\beta = 10\log\frac{I}{I_0} \qquad \text{دسی‌بل (dB)} \qquad (۵ــ۱۷)$$

I_0 شدت صوت مبنا است که برابر با آستانهٔ شنوایی گوش سالم در بسامد ۱۰۰۰ هرتز ($10^{-12}W/m^2$) در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۵ــ۳ شدت پاره‌ای از صوت‌ها برحسب دسی‌بل بیان شده است.

مثال ۵ــ۵

در جدول ۵ــ۳ شدت صوت آستانهٔ دردناکی (برای بسامد ۱۰۰۰ Hz) برابر با $1W/m^2$ ذکر شده است. تراز شدت صوت را برای آن به‌دست آورید.

رابطهٔ عکس مجذور در محوطهٔ سرپوشیده نیز برقرار نیست. زیرا انرژی صوتی می‌تواند با بازتاب از دیوارها و سقف به شنونده برسد. در واقع، بخشی از حرفهٔ معماری در طراحی یک سالن، شکل مناسب دادن به این بازتاب‌هاست، به‌طوری که شدت تا حد ممکن در تمام سالن تقریباً یکنواخت باشد.

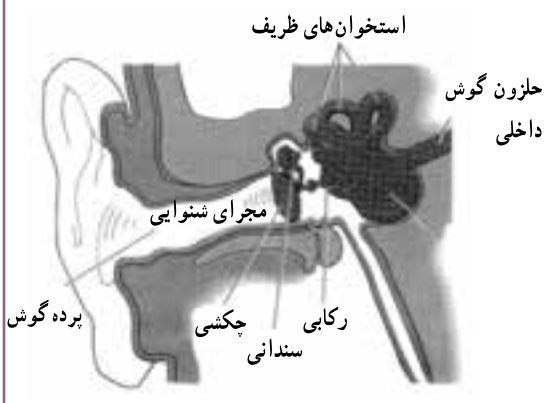
مثال پیشنهادی

موج‌های صوتی پس از رسیدن به پردهٔ گوش، از گوش میانی عبور می‌کنند (شکل ۳۶) قطر سوراخ گوش میانی در بزرگسالان 7mm و طول آن 2/5 cm است. هنگام شنیدن صحبت‌های عادی، شدت موج‌های صوتی در گوش میانی $3/2\times10^{-6}W/m^2$ است. توان متوسط دریافتی توسط گوش میانی چقدر است؟

پاسخ : شعاع سوراخ گوش میانی $r=\frac{7}{2}=3/5mm$ است. درنتیجه سطح مقطع آن برابر است با

$$A=\pi r^2=3/14(3/5\times10^{-3}m)^2=3/8\times10^{-5}m^2$$

پس توان متوسط برابر است با



شکل ۳۶

$$\overline{P} = IA = (۳/۲\times۱۰^{-۶}\ W/m^۲)\times(۳/۸\times۱۰^{-۵}\ m^۲) = ۱/۲\times۱۰^{-۱۰}\ W$$

این توان ناچیز را پردهٔ گوش جذب می‌کند و نوسان حاصل از آن در گوش میانی و داخلی به تپ الکتریکی تبدیل و به مغز ارسال می‌شود. گوش سالم می‌تواند شدت‌هایی در حد $۱۰^{-۱۲}\ W/m^۲$را حس کند و در این حالت توان متوسطی که توسط گوش دریافت می‌شود برابر $۳/۸\times۱۰^{-۱۷}W$ خواهد شد. به این ترتیب می‌توان گفت گوش انسان حقیقتاً عضو بسیار بسیار حساسی است!

مثال پیشنهادی

بلندگویی موج‌هایی صوتی با توان $۲۴۰W$ در همهٔ امتدادهای فضا به‌طور یکنواخت گسیل می‌کند. در چه فاصله‌ای از این بلندگو شدت صوت بین آستانهٔ دردناکی $(۱W/m^۲)$ و آستانهٔ شنوایی $(۱۰^{-۱۲}W/m^۲)$ است؟

پاسخ : چون گسیل موج در همهٔ امتدادهای فضا یکنواخت است، بنابراین موج صوتی کروی است و توان صوتی آن از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید.

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{۴\pi r^۲} \Rightarrow r = \sqrt{\frac{P}{۴\pi I}}$$

حداقل فاصلهٔ شخص تا بلندگو برابر است با

$$r_{min} = \sqrt{\frac{P}{۴\pi I_{max}}} \Rightarrow r_{min} = \sqrt{\frac{۲۴۰}{۴\pi\times۱}} = ۴/۴m$$

توجه کنید که آستانهٔ دردناکی $I_{max}=۱W/m^۲$ است. همچنین بیشینهٔ فاصلهٔ شخص تا بلندگو برابر است با

$$r_{max} = \sqrt{\frac{P}{۴\pi I_{min}}} = \sqrt{\frac{۲۴۰}{۴\pi\times۱۰^{-۱۲}}} = ۴/۴\times۱۰^{۶}\ m$$

بنابراین می‌توان گفت در فاصلهٔ کمتر از $۴/۴\ m$ شدت صوت از آستانهٔ دردناکی بالاتر و از فاصلهٔ $۴/۴\times۱۰^{۶}m$ شدت صوت از آستانهٔ شنوایی کمتر است. توجه کنید که نتیجه‌های حاصل با فرض نادیده‌گرفتن اتلاف انرژی موج‌های صوتی در هوا بوده است.

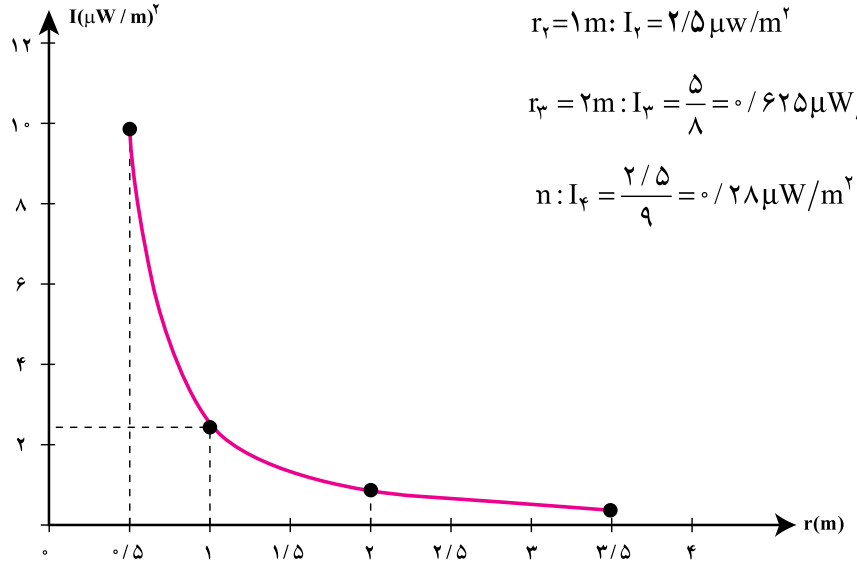
مثال پیشنهادی

امواج صوتی حاصل از یک منبع صوت در هوا به شکل کره منتشر می‌شوند. اگر توان یک منبع $\pi\times۱۰^{-۵}W$ باشد، شدت آن صوت در فاصله‌های $۰/۵m$، $۱m$، $۲m$ و $۳m$ از منبع، چند میکروووات بر مترمربع است؟ نمودار شدت برحسب فاصله را رسم کنید.

پاسخ :

$$I = \frac{E}{A.t} = \frac{P}{A} = \frac{p}{۴\pi r^۲}$$

$$r_۱ = ۰/۵\text{m} : I_۱ = \frac{\pi \times ۱۰^{-۵}}{۴\pi \times (۰/۵)^۲} = ۱ \times ۱۰^{-۵}\ \text{W/m}^۲ = ۱۰ \times ۱۰^{-۶}\ \text{W/m}^۲ = ۱۰\mu\text{W/m}^۲$$



$$r_۲ = ۱\text{m} : I_۲ = ۲/۵\,\mu\text{w/m}^۲$$

$$r_۳ = ۲\text{m} : I_۳ = \frac{۵}{۸} = ۰/۶۲۵\mu\text{W/m}^۲$$

$$n : I_۴ = \frac{۲/۵}{۹} = ۰/۲۸\mu\text{W/m}^۲$$

شکل ۳۷

هرچند انسان می‌تواند میان صداهایی با شدت‌های متفاوت تمیز قائل شود، اما گوش اختلاف میان شدت صوت، از آستانهٔ شنوایی تا آستانهٔ دردناکی، را که برابر $۱۰^{۱۲}$ است به همین صورت سادهٔ ریاضی احساس نمی‌کند. پاسخ گوش به صداها تقریباً لگاریتمی است تا خطی. به همین دلیل مقیاس دیگری به نام مقیاس *دسی‌بل* (dB)، برای شدت صوت در نظر گرفته شده است. معادلهٔ زیر مقیاس دسی‌بل را به‌دست می‌دهد و تبدیل شدت صوت از وات بر مترمربع به دسی‌بل و برعکس آن را امکان‌پذیر می‌سازد.

$$\beta = ۱۰ \log_{۱۰}(I/I_۰)$$

که در آن $I_۰ = ۱۰^{-۱۲}\text{W/m}^۲$، آستانهٔ شنوایی در بسامد ۱۰۰۰Hz است. β را تراز صوت می‌گویند. لازم به تذکر است که β برحسب دسی‌بل *تراز صوت* را نسبت به یک تراز مرجع به‌دست می‌دهد نه برحسب توان بر واحد مساحت. توجه کنید که هر ۱۰dB با تغییری در شدت به اندازهٔ ضریب ۱۰ متناظر است.

در جدول صفحهٔ بعد شدت صداهای گوناگون برحسب وات بر مترمربع و دسی‌بل آمده است. توجه کنید که تراز صوت آستانهٔ شنوایی برابر صفر دسی‌بل است. تراز صوتی صداهای با شدت کمتر از آستانه در مقیاس دسی‌بل منفی است. یکی از مزیت‌های مقیاس دسی‌بل این است که به کمک آن می‌توانیم به‌راحتی اعداد را به ترازهای صوتی مختلف نسبت دهیم. تغییراتی به اندازهٔ ۱۰dB در تراز صوت را به‌راحتی می‌توان احساس کرد. مثلاً، تراز صوت ۹۰dB در داخل یک قطار زیرزمینی به وضوح بلندتر از تراز صوت ۸۰dB در یک خیابان شلوغ است (البته، ده‌بار بلندتر به‌نظر نمی‌آید). تراز و شدت صوت، مشخصه‌های فیزیکی هستند نه انسانی. این مشخصه‌ها برای فراصوت یا صوتی که بسامد خیلی از بسامد شنیدن بالاتر است، نیز معتبرند.

مثال پیشنهادی

الف) شدت صوت یک تراز صوتی با شدت $10^{-9}\,W/m^2$ را برحسب دسی‌بل محاسبه کنید. ب) شدت صوت یک تراز صوتی $90\,dB$ را برحسب وات بر مترمربع محاسبه کنید.

پاسخ : الف) با استفاده از معادلهٔ (۵ـ۱۷) داریم

$$\beta = 10\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{10^{-9}\,W/m^2}{10^{-12}\,W/m^2}\right)$$

$$= 10\log_{10}10^3 = 10\times 3 \quad \rightarrow \quad \beta = 30\,dB$$

ب) در اینجا نیز از معادلهٔ ۱ـ۳۲ استفاده می‌کنیم

$$90 = 10\log_{10}(I/I_0)$$

این معادله را برحسب I حل می‌کنیم

$$9 = \log_{10}(I/I_0) = 9$$

یا

$$\frac{I}{I_0} = 10^9 \longrightarrow I = 10^9 I_0 = 10^9(10^{-12}\,W/m^2) \longrightarrow I = 10^{-3}\,W/m^2$$

جدول ترازها و شدت‌های اصوات مختلف

تراز صوت (dB)	شدت (W/m^2)	
۰	1×10^{-12}	آستانهٔ شنوایی در بسامد ۱۰۰۰Hz
۱۰	1×10^{-11}	خش خش برگها
۲۰	1×10^{-10}	نجوا در فاصلهٔ یک متری
۳۰	1×10^{-9}	فضای خانه
۴۰	1×10^{-8}	موسیقی سبک در فضای یک خانهٔ معمولی
۵۰	1×10^{-7}	دفتر کار معمولی
۶۰	1×10^{-6}	گفتگوی معمولی
۷۰	1×10^{-5}	ادارهٔ شلوغ، خیابان پر رفت و آمد
۸۰	1×10^{-4}	صدای بلند رادیو، تدریس در کلاس
۹۰	1×10^{-3}	داخل قطار زیرزمینی، این تراز پس از مدتی طولانی به گوش آسیب می‌رساند[1]
۱۰۰	1×10^{-2}	کارخانهٔ معمولی، سیرنی در ۳۰ متری : اگر گوش روزانه بیش از ۸ ساعت در معرض آن واقع شود آسیب می‌بیند.
۱۱۰	1×10^{-1}	اگر گوش روزانه ۳۰ دقیقه در معرض این صدا باشد، آسیب می‌بیند.
۱۲۰	۱	تبر بادی در دومتری، کنسرت راک با صدای بلند در فضای سربسته : آستانهٔ درد، در چند دقیقه گوش آسیب می‌بیند.
۱۴۰	1×10^{2}	هواپیمای جت در ۳۰ متری، درد شدید.
۱۶۰	1×10^{4}	پاره‌شدن پرده صماخ

۱ـ چند سازمان دولتی و انجمن‌های حرفه‌ای وابسته به بهداشت پیشنهاد کرده‌اند که حراکثر شدتی که گوش ۸ ساعت در روز در معرض آن قرار می‌گیرد، ۸۵dB باشد.

مثال پیشنهادی

یک چشمهٔ نقطه‌ای صوت، موج‌هایی را به‌طور یکنواخت در همهٔ جهت‌ها در فضا منتشر می‌کند. اگر تراز شدت صوت در فاصلهٔ ۱۰ متری از این چشمه ۶۰dB باشد، مطلوب است

الف) شدت صوت در این فاصله

ب) شدت صوت در فاصلهٔ ۱۰۰ متری از چشمه

ب) تراز شدت صوت در فاصلهٔ ۱۰۰ متری از چشمه

پاسخ : الف)

$$\beta = 10\log\frac{I}{I_0}$$

ب)

$$60 = 10\log\frac{I}{I_0} \Rightarrow \frac{I}{I_0} = 10^6 \ , \ I = 10^6 \times 10^{-12} = 10^{-6}\ W/m^2$$

ب) شدت صوت در فاصلهٔ ۱۰۰ متری برابر است با

$$\frac{I_2}{I_1} = (\frac{r_1}{r_2})^2 \Rightarrow \frac{I_2}{10^{-6}} = (\frac{10}{100})^2 \Rightarrow I_2 = 10^{-8}\ W/m^2$$

پ)

$$\beta = 10\log\frac{I}{I_0}$$

$$= 10\log\frac{10^{-8}}{10^{-12}} = 10\log 10^4 = 40dB$$

مثال پیشنهادی

یک موشک آتش‌بازی در ارتفاع ۲۰۰ متری زمین منفجر می‌شود و صوتی تولید می‌کند که شدت متوسط آن روی زمین و دقیقاً زیر موشک و پس از ۰/۶ ثانیه، $0/4 W/m^2$ است. الف) شدت متوسط این صوت در فاصلهٔ ۲۰متری موشک چه مقدار است؟ ب) تراز شدت این صوت در فاصلهٔ ۲۰ متری موشک چقدر است؟ پ) کل انرژی صوتی ناشی از این انفجار چقدر است؟ ($\log_{10}^2 = 0/3$)

پاسخ :

الف)

$$\frac{I_2}{I_1} = (\frac{r_1}{r_2})^2 \Rightarrow \frac{I_2}{0/4} = (\frac{200}{20})^2 \Rightarrow I_2 = 40\ W/m^2$$

ب)

$$\beta = 10\log_{10}\frac{I_2}{I_0} = 10\log_{10}\frac{40}{10^{-12}} = 10\log 2^2 \times 10^{13}$$

$$= 10(2\log_{10} 2 + 13) = 136dB$$

پ)

$$I = \frac{E}{A.\Delta t} \Rightarrow E = I.A.\Delta t = 0/4 \times (4\pi r^2)(0/6) = 0/4 \times 4\pi(200)^2 \times 0/6 = 120637J$$

مثال پیشنهادی

دامنهٔ ارتعاشی یک منبع صوت را چند برابر کنیم تا در یک فاصلهٔ معین تراز شدت صوت ۳ دسی‌بل افزایش یابد؟ ($\log_{10}^{2} = 0/3$)

پاسخ : با توجه به رابطهٔ تراز شدت صوت برحسب دسی‌بل، می‌توانیم

$$\beta = 10\log_{10}\frac{I}{I_0} \Rightarrow \beta_2 - \beta_1 = 10\log_{10}\frac{I_2}{I_0} - 10\log_{10}\frac{I_1}{I_0}$$

$$\Delta\beta = 10\log_{10}\frac{I_2}{I_1} \Rightarrow 0/3 = \log_{10}\frac{I_2}{I_1}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = 2 \quad \text{و} \quad I \propto (\text{دامنه})^2$$

اگر دامنه را با A نشان دهیم، می‌توانیم بنویسیم :

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \Rightarrow \frac{A_2}{A_1} = \sqrt{2}$$

توجه : مشخصه‌های فیزیکی یک موج صوتی ارتباط مستقیم با درک صدا توسط شنونده دارد. برای یک بسامد معین، هرچه دامنهٔ فشار موج صوتی سینوسی بزرگتر باشد، **بلندی** دریافت شده بزرگتر است. رابطهٔ بین دامنهٔ فشار و بلندی رابطهٔ ساده‌ای نیست، و از شخصی به شخص دیگر تغییر می‌کند. یک عامل مهم این است که گوش نسبت به همهٔ بسامدها در گسترهٔ شنیداری حساسیت یکسانی ندارد. ممکن است صوتی در یک بسامد از بسامد دیگری که با آن دامنهٔ فشار یکسانی دارد بلندتر به نظر آید. در ۱۰۰۰Hz کمینهٔ دامنه فشاری که می‌تواند با گوش عادی دریافت شود حدود 3×10^{-5}Pa است، برای ایجاد همین بلندی در ۲۰۰Hz یا ۱۵۰۰۰Hz دامنهٔ فشاری برابر 3×10^{-4}Pa مورد نیاز است. بلندی دریافت شده به سلامت گوش نیز بستگی دارد. کم شدن حساسیت در انتهای بسامد بالا به طور طبیعی با بالا رفتن سن پیش می‌آید ولی می‌تواند با ترازهای سر و صدای بیش از حد حادتر شود. بررسی‌ها نشان می‌دهند که جوان‌هایی که موسیقی راک کار می‌کنند در معرض آسیب دائمی گوش هستند و شنوایی آنها نوعاً مثل شخصی است که ۶۵ سال سن دارد. گوشی‌های دستگاه‌های پخش موسیقی شخصی که با صدای بلند مورد استفاده قرار می‌گیرند تهدیدهای مشابهی برای شنوایی دارند. مواظب باشید!

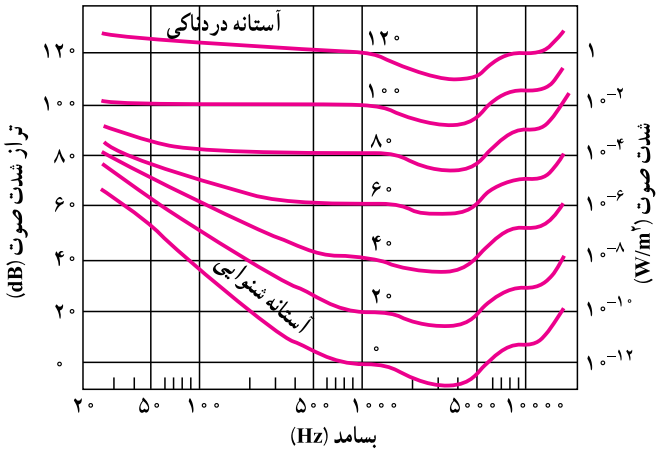
بسامد یک موج صوتی در تعیین **ارتفاع** صوت یک عامل اساسی است. کمیتی که امکان می‌دهد «زیر» یا «بم» بودن صوت را بتوان طبقه‌بندی کرد. هرچه بسامد صوتی بیشتر باشد (در گسترهٔ شنیداری)، ارتفاع صوتی که شنونده دریافت می‌کند زیرتر است. دامنهٔ فشار نیز در تعیین بلندی صوت نقش دارد. وقتی شنونده‌ای دو موج صوتی سینوسی با بسامد یکسان ولی دامنه‌های فشار متفاوت را مقایسه می‌کند، صوتی که دامنهٔ فشار بیشتری دارد معمولاً بلندتر و با ارتفاع کمی بم‌تر دریافت می‌شود.

مثال پیشنهادی

نمودارهای شدت و تراز شدت صوت به‌صورت تابعی از بسامد، در شکل ۳۸ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار تراز شدت صوت در بسامد ۱۰۰۰Hz روی هریک از منحنی‌ها مشخص شده است. برای سایر بسامدها، می‌توان به کمک نقطه‌یابی تراز شدت صوت را تعیین کرد. بلندی هر منحنی یکسان است؛ به عبارت دیگر گوش انسان احساس یکسانی از بلندی صوتی که می‌شنود برای هریک از این منحنی‌ها درک می‌کند. ویژگی‌های کلی نمودار شکل ۳۸ برای هر کسی که نارسایی شنوایی نداشته باشد، صادق است. با استفاده از این منحنی‌ها ببینید

تراز شدت صوتی با بسامد ۱۰۰Hz باید چقدر باشد تا احساس بلندی آن روی گوش، مشابه صوتی با بسامد ۱۰۰۰Hz و تراز شدت صوت ۴۰dB به نظر آید؟

پاسخ: منحنی‌ای که می‌تواند به ما کمک کند، منحنی سوم از پایین است. این منحنی بسامد ۱۰۰۰Hz را در تراز ۴۰dB و بسامد ۱۰۰Hz را کمی بالاتر از ۶۰dB قطع می‌کند. بنابراین صدایی با شدت $10^{-6}W/m^2$ در بسامد ۱۰۰Hz همان تراز شدت صوت را دارد که صدایی با شدت $10^{-8}W/m^2$ در بسامد ۱۰۰۰Hz دارد.



شکل ۳۸

پرسش ۵ـ۱

خط قائم بسامد ۱۰,۰۰۰ هرتز؛ منحنی‌های آستانهٔ شنوایی را تقریباً در وسط شدت‌های $1/0\times10^{-12}W/m^2$ و $1/0\times10^{-10}W/m^2$ قطع می‌کند. پس به‌طور تقریبی می‌توان شدت آستانه شنوایی را $1/0\times10^{-11}W/m^2$ در نظر گرفت. این خط منحنی آستانه دردناکی را تقریباً در $1/0\times10^{0}W/m^2$ یعنی همان $1/0\ W/m^2$ قطع می‌کند. توجه داریم که منحنی آستانه دردناکی همانند منحنی آستانه شنوایی دارای افت و خیزهای فراوان نمی‌باشد.

دانستنی ۵ـ۲

زلزله

در این دانستنی در مورد زلزله و امواج اصلی (P) و فرعی (S) و همچنین تعیین شدت آن مطالب مفیدی آورده شده است.

دانستنی ۵ـ۳

تشریح شنیدن توسط گوش انسان

در این دانستنی در مورد وظیفهٔ گوش، ساختار گوش، نقش اجزای مختلف گوش و ...، مطالب کاربردی آورده شده است.

دانستنی ۵ـ۴

ادراک صوت

در این دانستنی در مورد ادراک تک بسامد و بسامدهای چندگانه، ادراک شدت صوت، یکای بلندی (فون) و اندازه‌گیری‌های تراز صوتی و نوفهٔ محیطی، مطالبی آورده شده است.

۱ــ شخصی در فاصلهٔ ۸ متری بلندگوی کوچکی ایستاده است و شدت صوت در این فاصله $۱/۰ \times ۱۰^{-۵} W/m^۲$ است. اگر شخص در فاصلهٔ ۲۴ متری این بلندگو قرار گیرد، شدت صوتی که به گوش او می‌رسد، چقدر است؟ بلندگو را یک چشمهٔ نقطه‌ای صوت فرض کنید و اتلاف انرژی موج صوتی را در هوا نادیده بگیرید.

۲ــ شدت صوت یک هواپیمای جت در فاصلهٔ ۳۰ متری از آن $۱۰^۲ W/m^۲$ است. شدت صوت در فاصلهٔ ۵ کیلومتری این هواپیما چقدر است؟ هواپیما را یک چشمهٔ نقطه‌ای صوت فرض کنید و از اتلاف انرژی موج صوتی چشم‌پوشی کنید.

۳ــ هرگاه گوش خود را روی یک ریل خط آهن قرار دهیم، می‌توانیم صدای قطار را که فاصله‌اش با ما بسیار زیاد است، بشنویم. این، چگونه ممکن می‌شود؟ (راهنمایی : با چشم‌پوشی از اتلاف ناشی ازاصطکاک، شدت صوت در هوا با فاصله چطور کم می‌شود؟ در ریل آهن چطور؟)

۴ــ تراز شدت صوت یک هواپیمای جت در فاصلهٔ ۳۰ متری از آن ۱۴۰dB است. تراز شدت صوت در فاصلهٔ ۳۰۰ متری از این هواپیمای جت چقدر است؟ (اتلاف انرژی موج‌های صوتی و بازتاب موج‌های صوتی را از زمین نادیده بگیرید.)

۵ــ صداهای با تراز شدت صوت بیشتر از ۸۰dB می‌تواند به گوش آسیب برساند. رادمهر می‌خواهد با انجام آزمایشی حداقل فاصله‌ای را اندازه بگیرد که لازم است از یک دستگاه پر سر و صدا برای مدتی طولانی داشته باشد، بدون آن که به گوشش آسیبی وارد آید. نتایجی که او با استفاده از دستگاه سنجش شدت صوت به دست آورده، در جدول زیر آمده است :

مسافت (m)	۱	۲	۳	۵	۷	۸	۱۰	۱۴
شدت صوت (dB)	۹۶	۹۰	۸۶	۸۲	۸۹	۷۸	۷۶	۷۳

الف) i) در نموداری این نتایج را رسم کنید. محورها را مطابق شکل نامگذاری کنید.

ii) یکی از اعدادی که رادمهر در جدول نوشته، اشتباه است. آن عدد کدام است؟

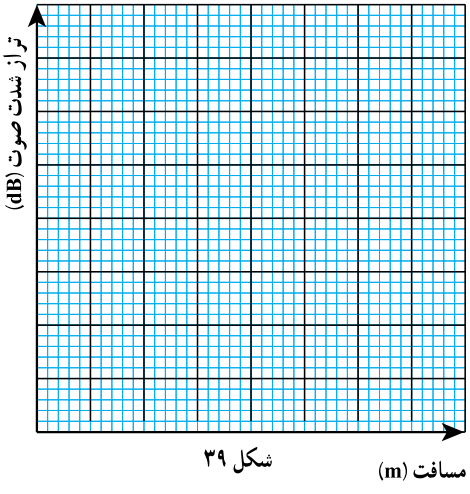
iii) حدس می‌زنید مقدار صحیح این عدد اشتباه، چه عددی باشد؟

ب) با استفاده از نمودار به سؤالات زیر پاسخ دهید.

i) شدت صوت در چهارمتری دستگاه چقدر است؟

ii) در چه فاصله‌ای از دستگاه شدت صوت برابر ۷۴dB است؟

iii) حداقل فاصله‌ای که رادمهر می‌تواند تا دستگاه داشته باشد، بدون آنکه گوشش آسیبی ببیند، چه فاصله‌ای است؟



شکل ۳۹

۶ــ جدول زیر، تراز شدت تقریبی صوت بعضی منابع صوتی را که در فاصلهٔ معمول اثر اندازه‌گیری شده‌اند، نشان می‌دهد.

منبع	تراز شدت صوت (dB)
کمترین صوت قابل شنیدن (آستانهٔ شنوایی)	۰
نجوا کردن	۳۰
مکالمه	۶۰
ترافیک سنگین	۹۰
متهٔ بادی	۱۰۰
موتور هواپیماهای سبک	۱۳۰
آستانهٔ دردناکی (در بسامد ۱۰۰۰Hz)	۱۲۰
در شدت ۱۱۰ dB ــ ۱۰۰ گفتگو امکان‌پذیر نیست.	

الف) با استفاده از اطلاعات داده شده در جدول بالا، شدت صوت هریک از موارد زیر را تخمین بزنید.

i) زنگ تلفن

ii) بلندگوی یک سالن

iii) فریاد انسان

ب) در مدارسی که نزدیک فرودگاه قرار دارند، صحبت معلم گاهی به سبب صدای مزاحم موتور هواپیماها قطع می‌شود. یک روش برای ضد صوت کردن محیط کلاس بیان کنید.

۷ــ جمله‌های زیر را پس از انتخاب واژه‌های مناسب از بین کلمات داخل پرانتز، دوباره بنویسید.

الف) در میکروفن، انرژی (صوتی / الکتریکی) به انرژی (صوتی / الکتریکی) تبدیل می‌شود.

ب) در بلندگو، انرژی (صوتی / الکتریکی) به انرژی (صوتی / الکتریکی) تبدیل می‌شود.

۸ــ تراز شدت صوت در نزدیکی یک ارکستر ۱۲۰dB است. تراز شدت صوت در نزدیکی دو ارکستر (نظیر بالا) وقتی که با هم می‌نوازند چقدر است؟ (راهنمایی : دقت کنید؛ جواب ۲۴۰dB نیست . $\log_{10} 2 = 0/3$)

۹ــ شدت سر و صدای مزاحم و مدت زمان وجود آنها، می‌تواند بر شنوایی انسان تأثیر نامطلوب بگذارد. ازاین رو، قوانینی برای کار در محیط‌های پر سر و صدا، به تصویب رسیده است. مثلاً حداکثر مدت زمان مجاز کار در شدت ۹۰dB، هشت ساعت، در شدت ۹۳dB، چهار ساعت و در شدت ۹۶dB دو ساعت است.

الف) حدس می‌زنید، محدودیت زمانی برای کارکردن در محیطی که شدت صوت در آنجا برابر ۹۹dB است، چقدر باشد؟

ب) i) کارگران خط تولید یک کارخانهٔ بزرگ، ادعا می‌کنند که شدت صوت محیط کارخانه، سلامتی آنها را به خطر انداخته است. اگر شما مأمور بازرسی باشید، چگونه به صحّت یا سقم این ادعا پی می‌برید؟

ii) چگونه می‌توان کارگرانی را که در محیط‌های پر سر و صدا کار می‌کنند در برابر آلودگی صوتی محفوظ داشت؟

ج) صدایی که از دستگاه‌های پخش استریو شخصی بیرون می‌آید، مستقیماً وارد گوش می‌شود. اندازه‌گیری شدت صوت آنها در بالاترین حالت، نتایج زیر را به‌دست داده است :

موسیقی پاپ	۱۱۰ dB
موسیقی راک الکترونیکی	۱۰۰ dB
موسیقی کلاسیک	۹۰ dB

i) آیا لازم است سازندگان این دستگاه‌ها، هشداری به استفاده‌کنندگان بدهند؟ اگر چنین است، چه باید بگویند؟

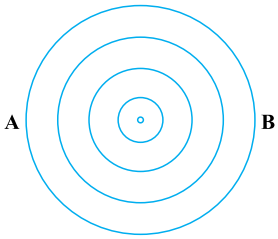
ii) در ساختمان این دستگاه‌ها چه اصلاحاتی باید انجام داد تا احتمال وقوع آسیب‌دیدگی کمتر شود؟

۱۰ــ یک بلندگو ۸W توان الکتریکی از یک تقویت‌کنندهٔ صوت دریافت می‌کند و ۳ درصد این توان را تبدیل به امواج صوتی می‌کند. با فرض اینکه بلندگو این صدا را به‌طور یکنواخت در یک فضای نیمکره‌ای (گسترش زاویه‌ای قائم و افقی ۱۸۰ درجه‌ای) پخش می‌کند، در ده‌متری جلوی بلندگو، شدت و تراز شدت صدا چقدر خواهد بود؟

۵ــ۵ــ اثر دوپلر

نگاهی دوباره به مفهوم

طرح امواج آبی که حشره‌ای با تکان دادنِ پاهایش و آرام بالا و پایین پریدن در مرکز حوضچه‌ای آرام به‌وجود می‌آورد در شکل ۴۰ نشان داده شده است. حشره جایی نمی‌رود، بلکه صرفاً در مکانی ثابت به آب لگد می‌زند. امواج حاصل دایره‌هایی



شکل ۴۰ــ منظرهٔ از بالای امواج آبی که حشره‌ای در مکانی ثابت با تکان خوردن به‌وجود آورده است.

پاسخ

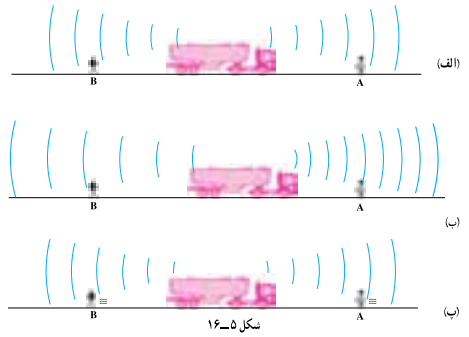
با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۱۷ داریم :

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

۵ــ۵ــ اثر دوپلر

آیا تاکنون توجه کرده‌اید که وقتی یک ماشین آتش‌نشانی یا آمبولانس آژیرکشان عبور می‌کند، صوت آن هنگامی که به شما نزدیک می‌شود با صوت آن هنگامی که از شما دور می‌شود متفاوت است؟ یا هنگامی که با ماشین در جاده حرکت می‌کنید، صدای بوق ماشینی که نزدیک می‌شود، با صدای بوق آن در هنگام دورشدن تفاوت دارد؟ برای بررسی این پدیده، ماشینی را مطابق شکل ۵ــ۱۶، در نظر بگیرید که دو ناظر A و B در جلو و پشت آن قرار دارند. در ابتدا فرض کنید که هم ناظرهای A و B و هم ماشین آتش‌نشانی، که آژیر می‌کشد، ساکن‌اند (شکل ۵ــ۱۶ــالف). این ماشین یک موج صوتی با بسامد f_s و دورهٔ T_s گسیل می‌کند. جبهه‌های موج مربوط به (مثلاً) قله‌های این صوت (پیشینهٔ تراکم) نیز در شکل ۵ــ۱۶ــ الف نشان داده شده‌اند.

اگر طول موج صوت را در هوا، هنگامی که چشمه ساکن است، با λ نشان دهیم داریم :



شکل ۵ــ۱۶

$$\lambda = vT_s = \frac{v}{f_s} \qquad (۵ــ۱۸)$$

که در آن v سرعت صوت در هواست.

اکنون دو حالت زیر را در نظر می‌گیریم :

الف) چشمهٔ صوت به ناظر ساکن A نزدیک و از ناظر ساکن B دور می‌شود. ب) ناظر A به چشمهٔ ساکن (ماشین آتش‌نشان) نزدیک و یا از آن دور می‌شود. هر یک از این دو حالت را بررسی می‌کنیم :

الف) چشمهٔ صوت با سرعت v_s به ناظر A نزدیک می‌شود. در این حالت چشمه در بازهٔ زمانی بین گسیل یک جبههٔ موج و جبههٔ موج بعدی، مسافت v_sT_s را طی می‌کند. یعنی، همان‌طور که در شکل ۵ــ۱۶ــب نشان داده شده است، طول موج صوتی که به طرف ناظر A در حرکت است به اندازهٔ v_sT_s از λ کوتاهتر است. پس، اگر طول موج این صوت را در هوا با λ' نشان دهیم داریم :

$$\lambda' = \lambda - v_sT_s \qquad (۵ــ۱۹)$$

بسامد این صوت را با f_o نمایش می‌دهیم یعنی، ناظر ساکن، صوت را با بسامد f_o می‌شنود.

اکنون می‌توان f_o را، با استفاده از رابطهٔ طول موج و بسامد $(f_o = \frac{v}{\lambda})$ به دست آورد :

$$f_o = \frac{v}{\lambda - v_sT_s}$$

که با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۱۸ به‌صورت زیر درمی‌آید :

$$f_o = \frac{v}{\frac{v}{f_s} - v_sT_s} = \frac{v}{v - v_s} f_s \qquad (۵ــ۲۰)$$

مثال ۵ــ۶

یک خودروی پلیس در حالی که صوتی را با بسامد ۴۰۰۰Hz گسیل می‌کند با سرعت ۷۲ km/h به یک عابر ساکن نزدیک می‌شود؛ بسامد صوتی را که عابر می‌شنود به‌دست آورید. سرعت صوت را در هوا ۳۴۰m/s فرض کنید.

پاسخ

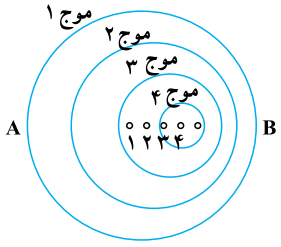
با استفاده از رابطهٔ ۵ــ۲۰ داریم :

$$f_o = \frac{v}{v - v_s} f_s$$

در این رابطه $v = 340\ \text{m/s}$ ، $v_s = 72\ \text{km/h} = 20\ \text{m/s}$ و $f_s = 4000\ \text{Hz}$ است.

هم‌مرکزند، زیرا سرعت موج در تمام جهت‌ها یکسان است. اگر حشره با بسامد ثابت در آب بالا و پایین ببرد، فاصلهٔ بین قلّه‌ها (طول موج) در تمام جهت‌ها یکسان است. امواج با همان بسامدی به نقطهٔ A می‌رسند که به نقطهٔ B. یعنی بسامد حرکت موج در نقطه‌های A و B، یا هر جای دیگر در حوالی حشره یکسان است. این بسامد موج همان بسامد بالا و پایین پریدن حشره است.

فرض کنید حشره‌ای که بالا و پایین می‌پرد با سرعتی کمتر از سرعت موج روی آب حرکت کند. در واقع، حشره به بخش‌هایی از امواجی برخورد می‌کند که تولید کرده است. طرح موج واپیچیده



شکل ۴۱ ــ امواج آب تولید شدهٔ ناشی از حرکت حشره‌ای که در آب ساکن به طرف نقطهٔ B شنا می‌کند.

می‌شود و دیگر به صورت دایره‌های هم مرکز نیست (شکل ۴۱). مرکز موج خارجی وقتی به‌وجود آمده که حشره در مرکز دایره بوده است. مرکز دایرهٔ بعدی کوچک‌تر هم مربوط به وقتی است که حشره در مرکز این دایره بوده و به همین ترتیب تا آخر. مراکز امواج کروی در جهت حشرهٔ شناگر حرکت می‌کنند، گرچه بسامد بالا و پایین پریدن حشره مثل قبل است، اما ناظر واقع در B می‌بیند که امواج بیشتری به طرف او می‌آیند. این ناظر بسامد بالاتری را اندازه می‌گیرد. این بدان سبب است که امواج متوالی برای رسیدن به B باید فاصلهٔ کوتاه‌تری را بپیمایند و در نتیجه، با فراوانی بیشتر از موردی به B می‌رسند که حشره به طرف آن حرکت نمی‌کرد. از طرف دیگر، ناظر واقع در A، به‌واسطهٔ زمان طولانی‌تر بین ورود قلّه ــ موج‌های متوالی، بسامد پایین‌تری را اندازه می‌گیرد. زیرا هر قلّه برای رسیدن به A به‌واسطهٔ حرکت حشره باید مسافتی طولانی‌تر از قلّهٔ قبلی را طی کند. این تغییر بسامد به علت حرکت چشمه (یا گیرنده) را اثر دوپلر می‌نامند (به افتخار کریستیان دوپلر دانشمند اتریشی، ۱۸۵۳ــ۱۸۰۳).

امواج آب در سطح هموار آن پخش می‌شوند. از طرف دیگر، امواج نور و صدا در فضای سه بعدی، مثل بادکنکی که باد می‌شود، در تمام جهت‌ها به حرکت درمی‌آیند. درست همانطور که امواج دایره‌ای پیش روی حشرهٔ شناگر به هم نزدیک‌ترند، امواج کروی نور و صدای جلو چشمهٔ متحرک نیز به هم نزدیک‌ترند و با فراوانی بیشتری به گیرنده می‌رسند.

اثر دوپلر وقتی نمایان است که ارتفاع متغیر آژیر آمبولانس را هنگام عبور از کنارتان می‌شنوید. وقتی وسیلهٔ نقلیه به شما نزدیک می‌شود، ارتفاع آن بالاتر از مقدار عادی است (مثل نُت بالاتر در مقیاس موسیقایی). این بدان سبب است که قلّه‌های موج صوتی بیشتری به گوش شما برخورد می‌کنند و وقتی این وسیله از کنار شما گذشت و دور شد، افتی در ارتفاع می‌شنوید. زیرا قلّه‌های موج کمتری به گوش شما می‌خورند.

اثر دوپلر برای نور هم باید به‌وقوع بپیوندد. وقتی چشمهٔ نوری به شما نزدیک می‌شود، بسامد اندازه‌گیری شده افزایش می‌یابد؛ و وقتی از شما دور می‌شود، کاهشی در بسامد به‌وجود می‌آید. افزایش بسامد را انتقال به آبی می‌نامند، زیرا افزایش به طرف انتهای بالا بسامد (یا آبی) طیف رنگی است. کاهش بسامد را انتقال به سرخ می‌نامند که به انتقال به طرف انتهای پایین بسامد (یا سرخ) طیف رنگی اشاره دارد. مثلاً، در نور گسیل شده از کهکشان‌های دوردست انتقال به سرخ را مشاهده می‌کنیم. اندازه‌گیری این انتقال محاسبه سرعت عقب‌نشینی آنها را ممکن می‌سازد. ستاره‌ای که به سرعت می‌چرخد از طرفی که از ما دور می‌شود انتقال به سرخ و از طرفی که به ما نزدیک می‌شود

پرسش پیشنهادی

وقتی ساکن ایستاده‌اید و چشمهٔ صوتی به طرف شما حرکت می‌کند، اندازهٔ سرعت امواج صوتی آن افزایش می‌یابد یا کاهش؟

پاسخ : اندازهٔ سرعت موج تغییر نمی‌کند امّا بسامد موج هنگام حرکت چشمه تغییر می‌کند، به تفاوت بسامد و اندازهٔ سرعت دقت کنید. فراوانی ارتعاش‌ها کاملاً با سرعت حرکت آشفتگی از محلی به محل دیگر متفاوت است.

درنتیجه :

$$f_o = \frac{۳۴۰}{۳۴۰ - ۲۰}(۴۰۰۰) = ۴۲۵۰\,Hz$$

در همین حال، ماشین آتش‌نشانی از ناظر B دور می‌شود. در این صورت، همان‌طورکه در شکل ۵ــ۱۶ــ ب نشان داده شده است، طول موج صوتی که به طرف ناظر B در حرکت است به اندازهٔ $v_s T_s$ از λ بلندتر است (چرا؟). یعنی :

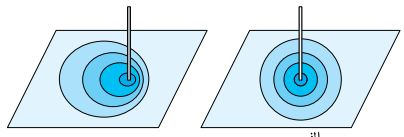
$$\lambda' = \lambda + v_s T_s$$

و برای بسامد صوتی که ناظر B می‌شنود، رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید.

$$f_o = \frac{v}{v + v_s} f_s \qquad (۵ــ۲۱)$$

ملاحظه می‌شود هنگامی که چشمه به طرف ناظر در حرکت است، بسامد صوتی که ناظر می‌شنود بیشتر از بسامد صوتی است که چشمهٔ ساکن ایجاد می‌کند؛ و برعکس، در حالتی که چشمه از ناظر دور می‌شود، بسامد صوتی که ناظر می‌شنود کمتر از بسامد صوتی است که چشمهٔ ساکن ایجاد می‌کند. این تغییر بسامد، هم در حالتی که چشمه ساکن است و ناظر حرکت می‌کند (حالت ب) و هم در حالتی که هر دو حرکت می‌کنند رخ می‌دهد. به این تغییر بسامد که از حرکت چشمه، ناظر یا هر دو ناشی می‌شود اثر دوپلر می‌گویند.

دیدیم هنگامی که چشمهٔ صوت در حرکت است، طول موج صوت در جلوی چشمه کوتاهتر و در پشت چشمه بلندتر از طول موج صوت در حالتی است که چشمهٔ موج ساکن باشد. این پدیده در مورد موج‌های مکانیکی دیگر نیز رخ می‌دهد. شکل ۵ــ۱۷ــ الف میله‌ای را نشان می‌دهد که در بازه‌های زمانی یکسان روی سطح آب ضربه می‌زند و جبهه‌های موج دایره‌ای ایجاد می‌کند. در شکل ۵ــ۱۷ــ ب میله در حین حرکت بر روی سطح آب ضربه می‌زند. ملاحظه می‌شود که طول موج در جلوی میله کوتاهتر و در پشت آن بلندتر از طول موجی است که میلهٔ ساکن ایجاد می‌کند.



شکل ۵ــ۱۷

انتقال به آبی از خود نشان می‌دهد. این به اخترشناسان امکان می‌دهد تا آهنگ چرخش ستاره را محاسبه کنند.

تمرین ۵ــ۳

در مثال ۵ــ۶ فرض کنید که خودروی پلیس با همان سرعت از عابر دور می‌شود. عابر چه بسامدی را می‌شنود؟

ب) ناظر A با سرعت v_o به چشمهٔ ساکن نزدیک می‌شود(شکل ۵ــ۱۶ــ پ). در این حالت، چون چشمه ساکن است، طول موج صوتی که ایجاد می‌کند برابر λ است، و چون ناظر با سرعت v_o به سوی آن در حرکت است، صوت با سرعت $v + v_o$ به او و نزدیک می‌شود. درنتیجه، بسامد صوتی که ناظر A می‌شنود، برابر خواهد بود با :

$$f_o = \frac{v + v_o}{\lambda}$$

که با توجه به رابطهٔ ۵ــ۱۸ داریم :

$$f_o = \frac{v + v_o}{\frac{v}{f_s}} = \frac{v + v_o}{v} f_s \qquad (۵ــ۲۲)$$

یعنی، در این حالت، بسامد صوتی که ناظر A می‌شنود بیشتر از بسامد صوتی است که چشمهٔ ساکن ایجاد می‌کند.

حال اگر ناظر B با سرعت v_o از چشمهٔ ساکن دور شود، در این حالت نیز طول موج صوت برابر λ است صوت با سرعت $v - v_o$ به ناظر نزدیک می‌شود.

درنتیجه، بسامد صوتی که ناظر می‌شنود، با انجام محاسباتی نظیر حالت قبل، از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$f_o = \frac{v + v_o}{v} f_s \qquad (۵ــ۲۳)$$

ملاحظه می‌شود که در این حالت بسامد صوتی که ناظر A می‌شنود، کمتر از بسامد صوتی است که چشمهٔ ساکن ایجاد می‌کند.

تمرین ۵ــ۴

شخصی یک سوت را با بسامد ۷۰۰ هرتز به صدا درمی‌آورد. سرنشین خودرویی که با سرعت ۳۶ km/h، الف) به او نزدیک می‌شود. ب) از او دور می‌شود، چه بسامدی را می‌شنود؟

توجه : اغلب دانش‌آموزان فرق بین بسامد و اندازهٔ سرعت را به روشنی نمی‌فهمند. فراوانی تعداد ارتعاش‌های موج کاملاً با

مثال پیشنهادی

در برخی آزمایش‌های دوپلر، نوازندگان سوار بر یک اتومبیل دراز و روباز نتها را می‌نواختند و ناظر ساکنی با نزدیک‌شدن اتومبیل به او و گذشتن از کنارش، آن را دریافت می‌کرد. بسامد مشاهده شده را در هنگامی که (الف) اتومبیل نزدیک می‌شود (ب) دور می‌شود، حساب کنید. بسامد نتی را که نوازندگان می‌نوازند ۲۲۰Hz، سرعت اتومبیل را ۱۵m/s، و سرعت صوت را ۳۴۱m/s بگیرید.

پاسخ : (الف) چون چشمه به سوی ناظر حرکت می‌کند، در معادلهٔ (۱ــ۳۵) از علامت منفی استفاده می‌کنیم.

$$f_{\text{ناظر}} = \left(\frac{v}{v - v_{\text{چشمه}}}\right) f_{\text{چشمه}}$$

مقادیر معلوم را در معادله قرار می‌دهیم.

$$f_{\text{ناظر}} = \left[\frac{۳۴۱\,m/s}{(۳۴۱ - ۱۵)\,m/s}\right](۲۲۰\,Hz)$$

$$= \left(\frac{۳۴۱}{۳۲۶}\right)(۲۲۰\,Hz) = ۲۳۰\,Hz$$

(ب) چون چشمه از ناظر دور می‌شود، در معادلهٔ (۱ــ۳۵) علامت مثبت به‌کار می‌بریم، پس :

$$f_{\text{ناظر}} = \left[\frac{۳۴۱\,m/s}{(۳۴۱+۱۵)\,m/s}\right](۲۲۰\,Hz) = ۲۱۱\,Hz$$

همچنانکه اتومبیل عبور می‌کند، بسامد مشاهده شده به آرامی از ۲۳۰ به ۲۱۱ هرتز تغییر می‌کند، که این تغییر بسامد را به آسانی می‌توان تشخیص داد.

سرعت جابه‌جایی آن فرق دارد.

توجه : فرض کنید شما آشکار سازید و به حدّی نزدیک خطّ آهن قرار دارید که می‌توان تأثیر هندسی را نادیده گرفت. باید با نزدیک شدن قطار به شما، بسامد بالای معینی را حس کنید و با دور شدن قطار، بسامد پایین معینی را. اما، در کمال تعجب چنین نیست. بلکه، وقتی قطار به طرف شما حرکت می‌کند افزایش مدامی را در بسامد حس می‌کنید، و وقتی قطار از شما دور می‌شود، کاهش مدامی در بسامد را. این بسامد حس شده را اغلب ارتفاع صدا[1] گویند. در این وضعیت، ارتفاعی که حس می‌شود تحت تأثیر بلندی صدا قرار دارد. چون با نزدیک شدن سوت، صدای آن مدام زیاد می‌شود، به غلط فکر می‌کنید که بسامد دائماً افزایش می‌یابد. چون با دور شدن سوت، صدای آن مدام کمتر می‌شود، به غلط فکر می‌کنید که بسامد دائماً کاهش می‌یابد. این اثر تغییر ارتفاع را توهم اثر دوپلر می‌نامند.

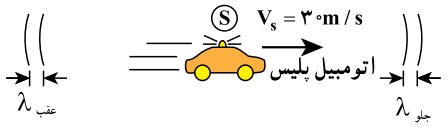
مثال پیشنهادی

آژیر پلیس موجی سینوسی با بسامد $f_s = ۳۰۰\,Hz$ گسیل می‌کند. سرعت صوت $۳۴۰\,m/s$ است. (الف) اگر آژیر در هوا ساکن باشد طول موج موج‌ها را به دست آورید. (ب) اگر آژیر با تندی $۳۰\,m/s$ در حرکت باشد طول موج موج‌ها را در جلو و پشت چشمه به‌دست آورید.

پاسخ : اثر دوپلر در قسمت (الف) وجود ندارد زیرا نه چشمه و نه شنونده در حرکت نیستند. در قسمت (ب) چشمه در حرکت است و باید از اثر دوپلر کمک بگیریم. شکل ۷۶ وضعیت را نشان می‌دهد. از رابطهٔ $v=\lambda f$ برای تعیین طول موج در وقتی که آژیر پلیس ساکن است استفاده می‌کنیم. وقتی آژیر در حرکت است، طول موج در هر طرف آژیر را با استفاده از معادله‌های $\lambda_{\circ} = \lambda_s \pm v_s T = \frac{v \pm v_s}{f_s}$ پیدا می‌کنیم.

(الف) وقتی چشمه ساکن است.

$$\lambda = \frac{v}{f_s} = \frac{۳۴۰\,m/s}{۳۰۰\,Hz} = ۱/۱۳\,m$$



شکل ۴۲

(ب) وضعیت در شکل ۴۲ نشان داده شده است. عقب از معادله (۱ــ۳۴)، در جلوی آژیر داریم :

$$\lambda_{\text{جلو}} = \frac{v - v_s}{f_s} = \frac{۳۴۰\,m/s - ۳۰\,m/s}{۳۰۰\,Hz} = ۱/۰۳\,m$$

از معادلهٔ مربوطه در پشت آژیر داریم :

$$\lambda_{\text{جلو}} = \frac{v + v_s}{f_s} = \frac{۳۴۰\,m/s + ۳۰\,m/s}{۳۰۰\,Hz} = ۱/۲۳\,m$$

توجه : طول موج در جلوی آژیر کوچک‌تر و در پشت آژیر بزرگ‌تر است، همانطور که باید باشد.

۱ــ Pitch