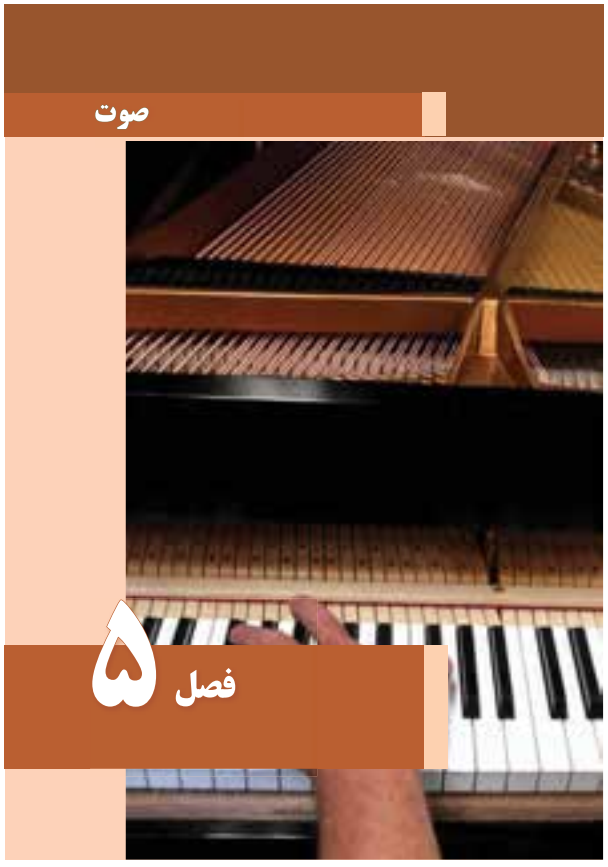
فصل پنجم

صوت



الکساندر گراهام‌بل (۱۹۲۲ـ۱۸۴۷) در ادینبورگ پایتخت اسکاتلند به‌دنیا آمد. پیش از اینکه در سن ۱۰ سالگی به مدرسه برود، از آموزشی نامنظم و بی‌برنامه برخوردار بود و تنها چهار سال از آموزش رسمی برخوردار شد. در سال ۱۸۶۲ و در سن ۱۵ سالگی مدرسه را رها کرد و به لندن، جایی که پدربزرگ‌اش زندگی می‌کرد، رفت. چند سال بعد، پدر و مادرش نیز به او پیوستند و اکنون که ۱۹ ساله شده بود در دانشگاهی واقع در جنوب غربی انگلستان، درس می‌داد.

پدر بل از پیشگامان آموزش افراد کر و لال بود و در سال ۱۸۷۰ به همراه اعضاء خانواده به کانادا و سال بعد از آن به آمریکا رفتند. بل در همان سال در دانشگاه بوستون با سمت استاد فیزیولوژی صوتی مشغول به کار شد. پس از ازدواج با یکی از شاگردانش که کرولال بود برای آموزش این نوع افراد سعی و تلاش بسیار کرد. در سال ۱۸۷۱، خودش مدرسه‌ای برای ناشنوایان در بوستون تأسیس کرد و در اوقات فراغت تحقیقات علمی خود را پیش می‌برد. در سال ۱۸۷۵ با توماس واتسون همکار شد. واتسون دانش خوبی از برق داشت و در ساخت نمونه‌های عملی مهارت ویژه‌ای از خود نشان داد. همکاری این دو ادامه یافت تا اینکه در سال ۱۸۷۶ آنها اولین کسانی بودند که توانستند صدای مفهوم یک انسان را از طریق تلفن بشنوند. سپس با بهبود دستگاهی که ساخته بودند، توانستند استفاده از آن را راحت‌تر و فراگیر نمایند. اکنون که بل حدود ۳۰ سال سن داشت، شرکت تلفن بل را تأسیس کرد. از دیگر اختراع‌های او می‌توان به دستگاه شنوایی‌سنجی، دستگاه ضبط صوت و ترازوی القایی اشاره کرد. شرکت بل در سال ۹۱۵ نخستین خط تلفنی فراقاره‌ای را افتتاح کرد و توانست از شرق آمریکا با غرب آن صحبت کند.

۵ــ۱ــ موج صوتی

نگاهی دوباره به مفهوم

واژهٔ صوت یا صدا می‌تواند دو معنی داشته باشد : احساس شنوایی در گوش، یا آشفتگی محیط که باعث این احساس می‌شود. با این تمایز می‌توان به این سؤال قدیمی پاسخ داد که اگر درختی در جنگلی به زمین بیفتد و کسی در آنجا نباشد که صدای آن را بشنود، آیا درخت تولید صدا می‌کند؟

صوت توسط امواجی که در مولد کشسان انتشار می‌یابند و باعث تغییرات فشار می‌شوند، منتقل می‌شود.

بیشتر صداها امواجی‌اند که بر اثر ارتعاش‌های اجسام مادی تولید شده‌اند. در پیانو، ویولن و گیتار، تارهای مرتعش صدا تولید می‌کنند. در ساکسیفون زبانهٔ مرتعش و در فلوت ستون لرزان هوا در دهنی، صدا تولید می‌کنند و صدای شما ناشی از ارتعاش تارهای صوتی شماست.

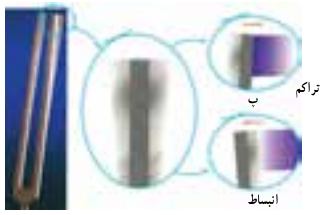
وقتی دست‌هایمان را به‌هم می‌زنیم، صدای تولید شده دوره‌ای نیست. این صدا از تپ موجی تشکیل شده است که در همهٔ جهت‌ها منتشر می‌شود. این تپ همان‌طور هوا را آشفته می‌سازد که تپ همانند آن، فنری حلقه‌ای را آشفته می‌کند. هر ذرهٔ واقع در جهت موج گسترش یابنده به جلو و عقب حرکت می‌کند.

صوت

۵ــ۱ــ موج صوتی

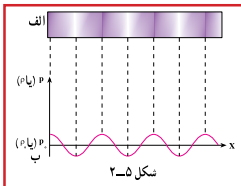
یکی از مهم‌ترین موج‌هایی که ما در زندگی روزمره با آن سروکار داریم موج صوتی است. برای مثال،از طریق این موج‌ها با یکدیگر گفتگو می‌کنیم، با به صدا در آوردن بوق ماشین، به عابری که از خیابان عبور می‌کند هشدار می‌دهیم و ... .

برای اینکه بدانیم موج‌های صوتی چگونه ایجاد می‌شوند فرایند تولید صوت بوسیلهٔ یک دیاپازون را تشریح می‌کنیم. یک دیاپازون را مطابق شکل ۵ــ۱ــ الف و ب درنظر بگیرید قبل از ارتعاش دیاپازون هوای مجاور آن در حال تعادل است و فشار و چگالی آن در همه‌جا ثابت و به ترتیب برابر P_0 و ρ_0 است. اکنون دیاپازون را مرتعش می‌کنیم. هنگامی که شاخهٔ آن مطابق شکل ۵ــ۱ــ ب به طرف راست حرکت می‌کند، لایهٔ هوای مجاور خود را متراکم می‌کند و چگالی و فشار آن را نسبت به حالت تعادل افزایش می‌دهد که این لایهٔ متراکم نیز به نوبهٔ خود لایهٔ مجاورش را متراکم می‌کند.

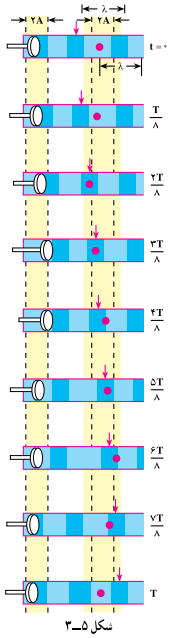


شکل ۵ــ۱

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 شاخهٔ دیاپازون برمی‌گردد، همان‌طور که در شکل ۵ــ۱ــ ت می‌بینید، لایهٔ هوای مجاور آن منبسط می‌شود و چگالی و فشار این لایه نسبت به حالت تعادل کاهش می‌یابد. این لایهٔ انبساط یافته نیز به‌صورت یک تپ انبساطی (کم‌فشار) در هوا منتشر



شکل ۵ــ۲



شکل ۵ــ۳

می‌شود. بنابراین هنگامی که دیاپازون مرتعش می‌شود تپ‌های متوالی تراکمی و انبساطی (شکل ۵ــ۲) در هوا منتشر می‌کند. نمودار تغییرات فشار (چگالی) برحسب فاصله در یک لحظه از زمان در شکل ۵ــ۲ــ ب نشان داده شده است.

در مورد انتشار موج در طناب یا سطح آب دیدیم که آشفتگی یا تپ به‌صورت برجستگی و یا فرورفتگی بود. اما در حالت انتشار صوت در هوا، آشفتگی یا تپ به‌صورت لایه‌های تراکمی و انبساطی یا لایه‌های پرفشار وکم‌فشار است. همچنین، دیدیم که هنگام انتشار موج در محیط ذره‌های محیط منتقل نمی‌شوند، بلکه حول نقطهٔ تعادل خود حرکت نوسانی انجام می‌دهند. مثلاً، در شکل ۴ــ۷ فصل چهارم 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 نقطهٔ تعادل خود نوسان می‌کنند. لایه‌های تراکمی و انبساطی نیز در اثر این نوسان‌ها به وجود می‌آید.

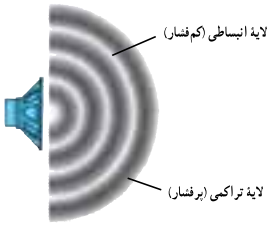
در شکل ۵ــ۳ انتشار یک موج صوتی در یک لوله، در بازه‌های زمانی $\frac{T}{8}$ ، نشان داده شده است. در این شکل یکی از ذره‌های هوا (محیط) با رنگ آبی مشخص شده است. این نقطه، درحین انتشار موج پس از یک نوسان کامل به محل اولیهٔ خود برمی‌گردد. در حالی اگر یک نقطه از موج را، مثلاً در ناحیهٔ متراکم که درشکل ۵ــ۳ با پیکان مشخص شده است، درنظر 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 ۵ــ۱

مثال‌هایی از انتشار صوت در مایع‌ها و جامدها ذکر کنید.

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

هنگامی که یک چشمهٔ صوت مرتعش می‌شود، صوت ایجاد شده در تمام جهت‌ها منتشر می‌شوند. لایه‌های تراکمی (پرفشار) و انبساطی (کم‌فشار) یک موج صوتی که از یک بلندگوی کوچک در هوا منتشر می‌شود در شکل ۵ــ۴ نشان داده شده است.

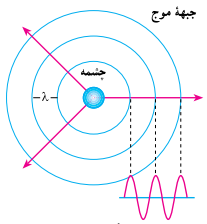


شکل ۵ــ۴

پرسش ۵ــ۱

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

اگر یک چشمهٔ 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 چشمهٔ صوت در شکل ۵ــ۵ نشان داده شده‌اند. جبهه‌های موج در این شکل نقاط پرفشار را نشان می‌دهند.



شکل ۵ــ۵

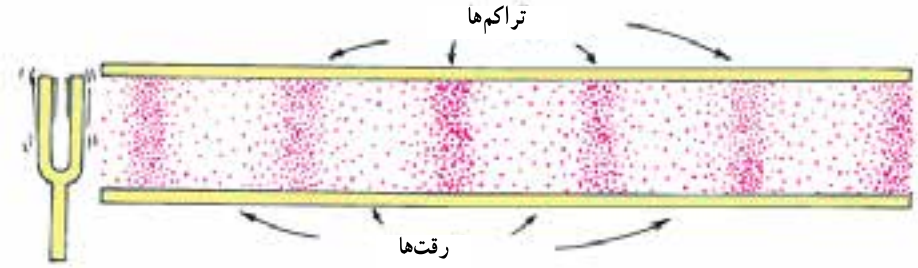
۱۳۷

برای به‌دست آوردن تصویر روشن‌تری از این فرایند، اتاق درازی را مطابق شکل ۱ــ الف درنظر بگیرید. در یک انتهای آن پنجرهٔ باز پرده‌داری وجود دارد. در انتهای دیگر آن دری است. هنگام باز کردن در، می‌توان مجسم کرد که درِ اتاق مولکول‌های هوای مجاور خود را از مکان‌های اولیه‌شان به نقطه‌های مجاور می‌راند. مولکول‌های مجاور نیز به همسایگان خود فشار می‌آورند، همین‌طور تا آخر، درست مثل تراکمی که در امتداد فنر حرکت می‌کند، تا آنکه پرده از پنجره بیرون رانده شود. یک تپ هوای فشرده از در به سمت پرده رفته است. تپ هوای فشرده را **تراکم** می‌نامند.

شکل ۱ــ الف) وقتی در باز شود، تراکمی در اتاق حرکت می‌کند. ب) وقتی در بسته شود، رقتی در اتاق به حرکت درمی‌آید.

وقتی در را می‌بندیم (شکل ۱ــ ب)، درِ اتاق برخی از مولکول‌های هوا را از آنجا بیرون می‌راند. این کار ناحیه‌ای کم فشار پشت در به‌وجود می‌آورد. مولکول‌های مجاور می‌توانند وارد آن شوند، و منطقه‌ای کم‌فشارتر را پشت سرخود به‌جای بگذارند. این منطقهٔ کم فشار هوا را رقیق شده می‌نامیم. سایر مولکول‌های دورتر از درِ اتاق، به نوبت، وارد ناحیه‌های رقیق شده می‌شوند، و باز هم آشفتگی از یک طرف اتاق به طرف دیگر می‌رود. دلیل این کار را پرده نشان می‌دهد که این بار به داخل رانده می‌شود. این بار آشفتگی به‌صورت **رقت** است.

مانند تمام حرکت‌های موجی تپ حامل انرژی است که در سراسر اتاق حرکت می‌کند، نه خود محیط. در هر دو مورد، تپ از درِ اتاق به طرف پرده می‌رود. این را از آنجا می‌دانیم که پرده پس از باز و بسته کردن درِ اتاق حرکت می‌کند. اگر مدام درِ اتاق را به‌صورت دوره‌ای باز و بسته کنید، می‌توانید موجی از تراکم و رقت‌های دوره‌ای به‌وجود آورید که باعث تاب خوردن پرده به داخل و خارج پنجره شود. در مقیاسی بسیار کوچکتر، و با سرعت بیشتر، این همان چیزی است که هنگام ضربه زدن به دیاپازون رخ می‌دهد. ارتعاش‌های دوره‌ای دیاپازون و امواجی که تولید می‌کند بسامدی بالاتر و دامنه‌ای کمتر از دری دارند که تاب می‌خورد. شما متوجه اثر امواج صوتی بر پرده نمی‌شوید، اما هنگام برخوردشان با پرده‌های حساس گوشتان کاملاً به‌وجودشان پی‌می‌برید.



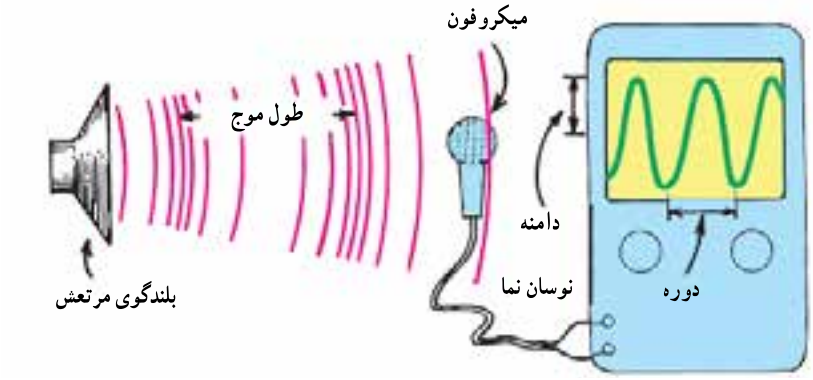
شکل ۲ــ حرکت تراکم‌ها و رقت‌های ناشی از دیاپازون (هردو با یک سرعت و در یک جهت) در هوای درون لوله حرکت می‌کنند.

امواج صوتی موجود در لولهٔ شکل ۲ را درنظر بگیرید. برای سادگی فقط امواجی نشان داده شده‌اند که در لوله حرکت می‌کنند. وقتی شاخهٔ دیاپازون مجاور لوله به طرف آن حرکت می‌کند، تراکمی وارد لوله می‌شود. هنگامی که شاخه در جهت مخالف از لوله دور می‌شود، رقتی در پی تراکم به‌وجود می‌آید. مثل راکت پینگ‌پونگی که در اتاقی پر از توپ‌های پینگ‌پونگ جلو و عقب می‌رود. با ارتعاش چشمه، رشته‌ای دوره‌ای از تراکم‌ها و رقت‌ها تولید می‌شود. بسامد چشمهٔ مرتعش و بسامد موج تولیدی آن یکسان است.

شکل ۳ــ راکت پینگ‌پونگی که درمیان توپ‌های پینگ‌پونگ ارتعاش دارد سبب ارتعاش توپ‌ها می‌شود.

گاهی هنگام گوش دادن به رادیو، اندکی تأمل کنید و به فیزیک صوت بیندیشید. بلندگوی رادیو مخروطی کاغذی است که با ضرباهنگ یک سیگنال الکتریکی به ارتعاش درمی‌آید. در نتیجه، مولکول‌های هوای مجاور مخروط مرتعش نیز به ارتعاش درمی‌آیند. سپس، خود هوا نیز در برابر ذرات مجاور ارتعاش می‌کند، که آنها نیز همین کار را انجام می‌دهند، و به همین ترتیب تا آخر. در نتیجه، طرح‌های موزون هوای متراکم و رقیق از بلندگو خارج می‌شود، و رگباری از حرکت‌های موجی شکل تمام اتاق را پر می‌کند. هوای مرتعش حاصل پردهٔ گوش شما را به ارتعاش درمی‌آورد، که آن هم به سهم خود آبشارهایی از ضربه‌های الکتریکی موزونی در امتداد مجرای عصب حلزونی گوش به مغز می‌فرستد و شما به آوای موسیقی گوش فرامی‌دهید.

شکل ۴ــ امواج هوای متراکم و رقیق شدهٔ ناشی از مخروط مرتعش بلندگو صدای دلپذیر موسیقی را به‌وجود می‌آورند.



شکل ۵ــ الف) بلندگوی رادیو مخروطی کاغذی است که با ضرباهنگ سیگنال الکتریکی به ارتعاش درمی‌آید. صدای تولید شده ارتعاش‌های مشابهی در میکروفون به‌وجود می‌آورد، که روی نوسان‌نما به نمایش درمی‌آیند. ب) شکل موج روی صفحهٔ نوسان‌نما اطلاعاتی در مورد صدا به‌دست می‌دهد.

فعالیت ۵ـ۱

اگر بلندگوهای ضبط صوت استریوی همسایهٔ شما درست در پهلوی دیوار شما باشد، صدای آن با گذشتن از دیوار به شما می‌رسد و یا اگر گوشتان را روی خط آهن بگذارید، می‌توانید صدای قطار را از فاصلهٔ بسیار دور، راحت بشنوید که مثالی از انتشار صوت در جامدهاست. اگر درحالی که گوش شما زیر آب است چند سنگ را تق‌تق به‌هم بزنید، صدای تق‌تق را خیلی خوب می‌شنوید یا اگر زمانی در حضور قایق‌های موتوری شنا کرده باشید، احتمالاً متوجه شده‌اید که صدای موتور قایق‌ها در زیر آب بسیار واضح‌تر از بالای آن شنیده می‌شود؛ که مثالی از انتشار صوت در مایع‌هاست.

پرسش ۵ـ۱

در یک بازی تنیس؛ تماشاچیان در اطراف زمین بازی و در ارتفاع‌های مختلف بر روی سکوها نشسته‌اند. همهٔ آنها در مکان‌های مختلف صدای برخورد توپ با راکت را می‌شنوند. یعنی صدای برخورد در تمام جهت‌ها منتشر شده است. لازم به یادآوری است، موج‌های صوتی از یک چشمه درتمام جهت‌ها با دامنه‌ای که به جهت و فاصله از چشمه بستگی دارد، حرکت می‌کنند.

توجه : دانش‌آموزان باید به‌خاطر داشته باشند که سرعت موج به‌طور کلی با سرعت ذره مساوی نیست. درحالی که موج به حرکت در امتداد انتشار ادامه می‌دهد، ذره‌های منفرد در محیط موج به ترتیب نشان داده شده درشکل ۵ــ۳ صرفاً به کندی به این طرف و آن‌طرف می‌روند. افزون بر این، بیشینهٔ سرعت یک ذره از محیط می‌تواند با سرعت موج بسیار متفاوت باشد.

مثال پیشنهادی

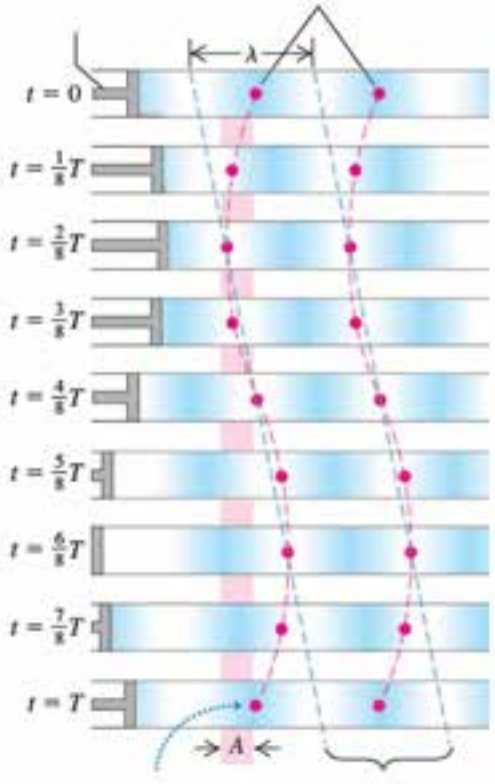
در شکل ۶ با حرکت نوسانی سادهٔ پیستون، یک موج طولی در شاره به‌وجود آمده است که به‌طرف راست حرکت می‌کند.

الف) فاصلهٔ دو تراکم متوالی یا دو انبساط متوالی، چه نام دارد؟

ب) در یک دورهٔ T، موج چه مقدار جلو می‌رود؟

پ) حداکثر جابه‌جایی یک ذره از محیط از وضع تعادلش، چه مقدار است؟

ت) حرکت رو به جلوی پیستون سبب ایجاد تراکم می‌شود یا انبساط؟



شکل ۶

پاسخ : الف) طول موج

ب) زمان × سرعت انتشار = مسافت طی شده

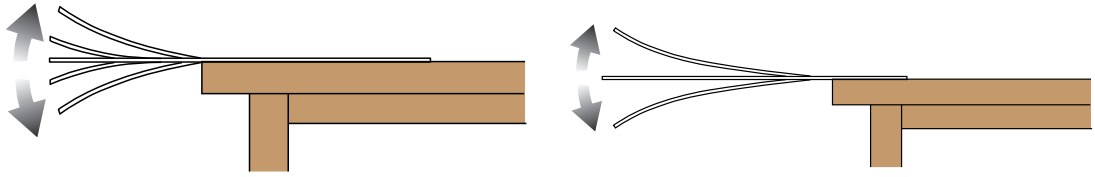
$$\Delta x = VT = \lambda$$

پ) ذره‌ها با دامنهٔ A نوسان می‌کنند.

ت) حرکت رو به جلو سبب تراکم و رو به عقب سبب انبساط می‌شود.

مثال پیشنهادی

هرگاه قسمت کمی از خط‌کش را روی میز قرار داده و سپس به انتهای آن ضربه بزنیم، به سرعت ارتعاش می‌کند و صوتی با ارتفاع زیاد (بسامد زیاد) ایجاد می‌کند. اما اگر بیشتر خط‌کش روی میز و قسمت کمی از آن خارج از میز بوده و به آن ضربه بزنیم، صوتی با ارتفاع کم تولید می‌کنند. از این آزمایش چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟



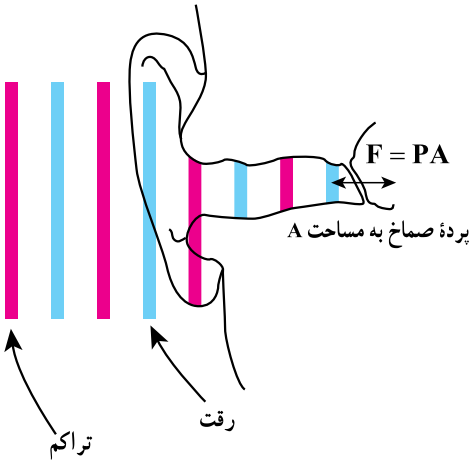
شکل ۷

پاسخ : این آزمایش نشان می‌دهد که : تختهٔ کوتاه‌تر به سرعت ارتعاش می‌کند و صوت‌هایی با ارتفاع زیاد ایجاد می‌کند و تختهٔ بلندتر به آرامی ارتعاش می‌کند و صوت‌هایی با ارتفاع کم ایجاد می‌کند. مثلاً بال حشرات کوچک صدایی با بسامد زیاد (زیر) و بال حشرات بزرگ صدایی با بسامد کم (بم) تولید می‌کند.

مثال پیشنهادی

توضیح دهید چگونه امواج صوتی توسط گوش شنیده می‌شوند؟

پاسخ : امواج صوتی می توانند اجسام را به ارتعاش وادارند. با برخورد موج صوتی به یک جسم مانند پردهٔ صماخ گوش (شکل۴۲) فشار هوا کم و زیاد می‌شود. فشار در پشت پردهٔ صماخ (داخل گوش) ثابت می‌ماند (فشار پیمانه‌ای) تقریباً صفر است)، بنابراین با هر تراکم و رقتی یک نیروی خالص بر پردهٔ صماخ وارد می‌آید. فشار در هر تراکمی اندکی مثبت است، بنابراین به هنگام فرارسیدن هر تراکم نیروی خالص به سمت راست وارد می‌آید. فشار در هر رقتی اندکی منفی است، بنابراین به هنگام فرارسیدن هر رقت نیروی خالص به سوی چپ وارد می‌آید. از این‌رو، پردهٔ صماخ با همان بسامد موج صوتی به ارتعاش درمی‌آید. هرگاه صوت به اندازهٔ کافی شدید و بسامد آن در گسترهٔ معمولی شنوایی باشد، سلول‌های عصبی گوش با حرکات پردهٔ صماخ تحریک می‌شوند و صوت ادراک می‌شود.

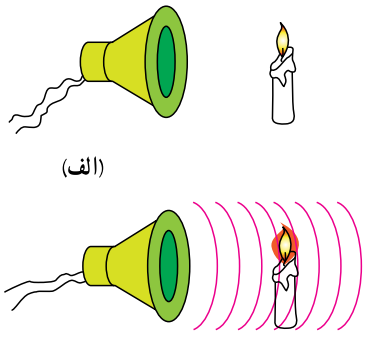


شکل ۸ــ امواج می‌توانند اجسام را به ارتعاش درآورند. در اینجا امواج صوتی پردهٔ صماخ را مرتعش می‌کنند.

مثال پیشنهادی

شکل ۹ شمع روشنی را نشان می‌دهد که مقابل بلندگویی قرار گرفته است. بلندگو در شکل ۹ــ الف صوتی تولید نمی‌کند در حالی که در شکل۹ــ ب یک موج صوتی تولید کرده است و شعلهٔ شمع به طرف جلو و عقب کشیده شده است. علت را توضیح دهید.

پاسخ : وقتی در شکل ۹ــ ب بلندگو در حال کار کردن است، پوستهٔ جلوی آن مرتعش می‌شود و این صفحه مرتعش هوا ی پیرامون خود را در حرکت به طرف جلو متراکم و در حرکت به طرف عقب، منبسط می‌کند و در هوا این آشفتگی منتشر شده و به شعله شمع می‌رسد و شعله نیز به طرف جلو و عقب نوسان می‌کند و شعلهٔ آن کشیده شده به‌نظر می‌رسد.



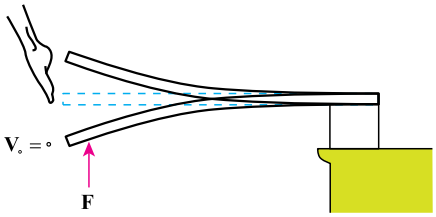
شکل ۹

مثال پیشنهادی

وقتی یک شناگر از روی یک تختهٔ شنا می‌پرد، تخته به علت خواص کشسانی به بالا و پایین نوسان می‌کند. اگر یک ارتعاش کامل تخته پرش ۰/۰۸ ثانیه طول بکشد :

الف) بسامد تخته چند هرتز است؟ آیا این بسامد توسط انسان قابل شنیدن است؟

ب) زمان لازم برای یک ارتعاش سیم گیتار که بسامد آن ۲۶۴Hz است، چقدر می‌باشد؟

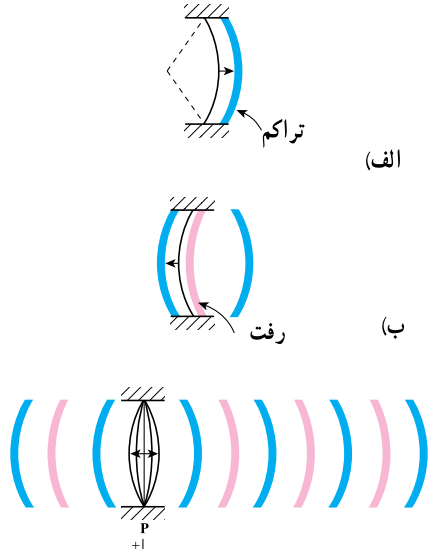


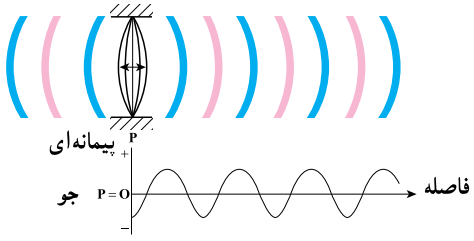
شکل ۱۰

پاسخ : الف) ۱۲/۵ Hz ــ خیر ب) $۳/۷۹ \times ۱۰^{-۳}$s

مثال پیشنهادی

در شکل ۱۱، حرکت تار به سمت راست یک تراکم به وجود می‌آورد و حرکتش به سمت چپ یک فضای رقیق پدید می‌آورد. تراکم اولیه به سمت راست حرکت می‌کند. تکرار حرکت باعث انتشار امواج صوتی دوره‌ای به خارج می‌شود. با توجه به این شکل، نمودار فشار برحسب فاصله از منبع را (در یک لحظه) رسم کنید.





شکل ۱۱

دانستنی ۵ــ۱

رابطهٔ فشار با شدت موج صوتی

در این دانستنی در مورد محدودهٔ فشاری که برای گوش قابل تحمل است و رابطهٔ فشار با شدت توسط یک موج صوتی، مطالبی آورده شده است.

مثال پیشنهادی

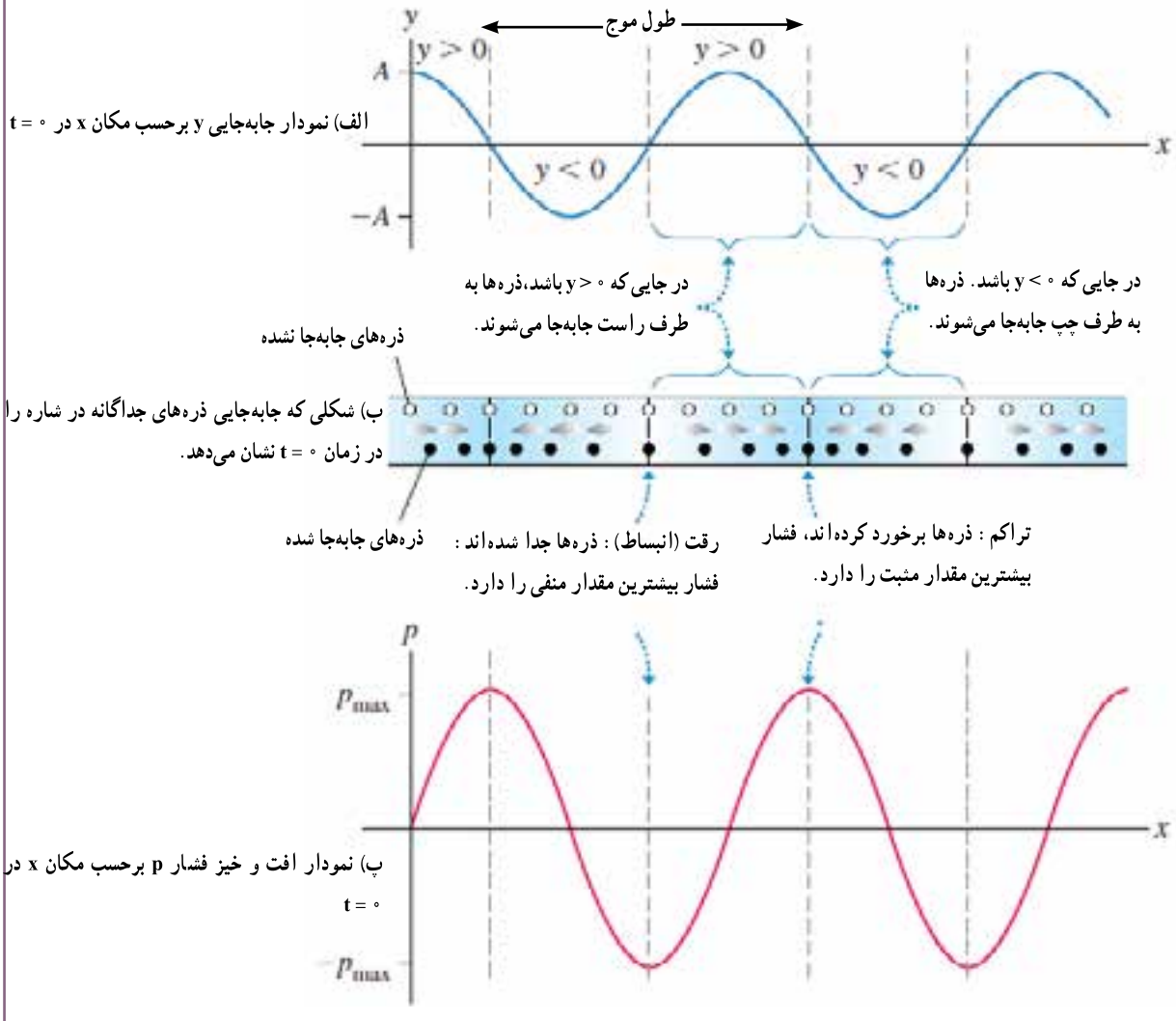
یک موج صوتی را درنظر بگیرید که در لوله‌ای در حال انتشار است. جهت انتشار را محور xها فرض کنید. در یک لحظهٔ مشخص نمودارهای زیر را رسم کنید.

الف) نمودار جابه‌جایی y برحسب مکان x در $t = 0\,s$

ب) شکلی که جابه‌جایی ذره‌های جداگانه در شاره را در زمان $t = 0\,s$ نشان می‌دهد.

پ) نمودار افت و خیز فشار p برحسب مکان x در $t = 0\,s$

پاسخ :



الف) نمودار جابه‌جایی y برحسب مکان x در $t = 0$

ب) شکلی که جابه‌جایی ذره‌های جداگانه در شاره را در زمان $t = 0$ نشان می‌دهد.

پ) نمودار افت و خیز فشار p برحسب مکان x در $t = 0$

شکل ۱۲