فصل ۴

برهم‌کنش‌های موج

در این تصویر نقشی شگفت‌انگیز از امواج دریا موسوم به دریای شطرنجی (Cross Sea) را می‌بینید. این نقش افسون‌کننده چگونه ممکن است ایجاد شده باشد؟

بخش‌ها

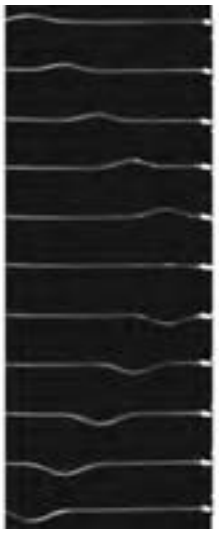
۴ـ۱ بازتاب موج
۴ـ۲ شکست موج
۴ـ۳ پراش موج
۴ـ۴ تداخل امواج

آیا تاکنون پژواک صدای خود را شنیده‌اید؟ پژواک نمونه‌ای از بازتاب امواج مکانیکی است. برخی از جانداران نظیر خفاش از همین ویژگی برای یافتن مسیر خود یا طعمه استفاده می‌کنند (شکل ۴ــ۱). امواج الکترومغناطیسی (از جمله نور) نیز بازمی‌تابند. در واقع همان‌طور که در علوم هشتم آموختیم، وقتی نور بازتابیده از جسمی به چشم ما برسد، آن جسم را می‌بینیم. بازتاب، تنها راه برهم‌کنش امواج با محیط نیست. شکست نیز نوع دیگری از برهم‌کنش امواج با محیط است.

شکل ۴ــ۱ خفاش برای یافتن طعمه از پژواک موج صوتی خود استفاده می‌کند.

شکل۴ــ۲ شکارچیان بومی آمریکای جنوبی به تجربه دریافته‌اند که محل واقعی یک ماهی متفاوت با محلی است که آن را می‌بینند.

شکست وقتی رخ می‌دهد که جهت پیشروی موج در ورود به یک محیط جدید تغییر کند. وقتی یک ماهی را از بالای برکه‌ای می‌بینید، آن را در مکان واقعی خود مشاهده نمی‌کنید، بلکه مکانی ظاهری بر اثر شکست نور را ادراک می‌کنید (شکل ۴ــ۲). همان‌طور که خواهیم دید، شکست برای امواج مکانیکی نیز رخ می‌دهد. پراش نیز نوع دیگری از برهم‌کنش امواج با محیط است. امواج نه تنها با محیط بلکه با یکدیگر نیز برهم‌کنش می‌کنند. تداخل نمونه‌ای از برهم‌کنش امواج با یکدیگر است. در این فصل، بازتاب، شکست، پراش و تداخل را به‌عنوان برهم‌کنش‌های امواج بررسی می‌کنیم.

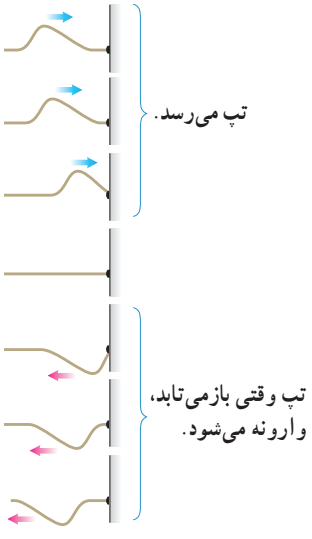


شکل ۴ــ۳ چند تصویر لحظه‌ای متوالی از پیشروی و بازتاب یک تپ عرضی در یک فنر بلند کشیده شده که یک سر آن در تکیه‌گاهی واقع در سمت راست، ثابت شده است.

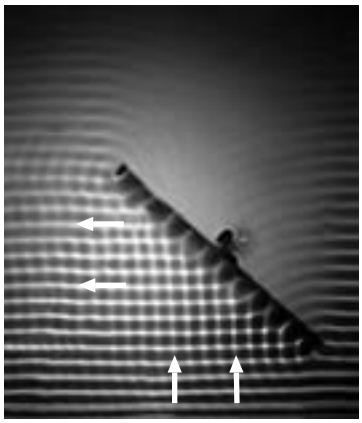
۴ــ۱ بازتاب موج

تولید صدا در آلات موسیقی، پژواک صداها، دیدن ماه، دیدن صفحهٔ این کتاب، گرم شدن مواد غذایی در اجاق‌های خورشیدی، جمع شدن امواج رادیویی در کانون آنتن‌های بشقابی و... مثال‌هایی از کاربرد بازتاب امواج در زندگی هستند. در این بخش، نخست بازتاب امواج مکانیکی و سپس بازتاب امواج الکترومغناطیسی را بررسی می‌کنیم.

بازتاب امواج مکانیکی : اگر تپی را در یک فنر (یا یک ریسمان) کشیدهٔ بلند که یک سر آن بر تکیه‌گاهی ثابت شده است روانه کنیم، وقتی تپ به تکیه‌گاه (مرز) می‌رسد نیرویی به آن وارد می‌کند و طبق قانون سوم نیوتون، تکیه‌گاه نیز نیرویی با اندازهٔ برابر و در جهت مخالف بر فنر وارد می‌آورد. این نیرو در محل تکیه‌گاه، تپی در فنر ایجاد می‌کند که روی فنر در جهت مخالف تپِ تابیده حرکت می‌کند (شکل ۴ــ۳). شکل ۴ــ۴ طرحی واضح‌تر از تابش و بازتابش چنین تپی را نشان می‌دهد. چنین بازتابی را بازتاب در یک بُعد می‌گویند.



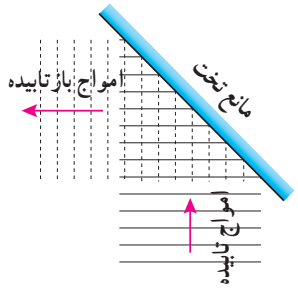
شکل ۴ــ۴ طرحی از پیشروی و بازتاب تپ عرضیِ شکل ۴ــ۳



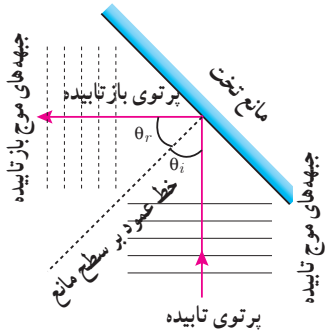
شکل ۴ــ ۵ بازتاب امواج تخت از مانع تخت در تشت موج.

به خاطر داریم وقتی تیغهٔ تختی را بر سطح آب تشت موج به نوسان درمی‌آوردیم، امواج تختی بر سطح آب تشکیل می‌شد. اکنون اگر بر سر راه این امواج مانع‌هایی قرار دهیم، این امواج پس از برخورد با این موانع بازمی‌تابند. به‌چنین بازتابی، بازتاب در دو بُعد می‌گویند. ساده‌ترین شکل یک مانع، مانعی تخت است. در حضور این نوع مانع، امواج بازتابیده نیز تخت‌اند (شکل ۴ــ۵)[1]. شکل ۴ــ۶ طرحی از چنین بازتابی را نشان می‌دهد. با استفاده از جبهه‌های موج می‌توانیم به‌طور تجربی به رفتار موج در برخورد با یک مانع پی ببریم. طرح معادل دیگری برای نشان دادن رفتار موج، استفاده از نمودار پرتویی است. یک پرتو، پیکان مستقیمی عمود بر جبهه‌های موج است که جهت انتشار موج را نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان نمودار پرتویی شکل ۴ــ۶ را در حضور جبهه‌های موج به‌صورت شکل ۴ــ۷ رسم کرد. زاویهٔ بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی تابیده (فرودی) را زاویهٔ تابش می‌نامند و با θ_i نشان می‌دهند[2] و زاویهٔ بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی بازتابیده را زاویهٔ بازتابش می‌نامند و با θ_r نشان می‌دهند[3]. آزمایش‌هایی نظیر آنچه در شکل ۴ــ۵ نشان داده شده است، ثابت می‌کند که برای هر وضعیت مانع، و همهٔ انواع دیگر موج، مانند امواج دایره‌ای یا کروی نیز، همواره زاویهٔ بازتابش برابر با زاویهٔ تابش است یعنی : $\theta_i = \theta_r$ که به آن، قانون بازتاب عمومی گفته می‌شود.

نمونهٔ دیگری از بازتاب امواج مکانیکی، بازتاب امواج صوتی است. صوت می‌تواند از یک سطح سخت مانند دیوار بازتابش کند. این مثالی از بازتاب امواج در سه بُعد است. بازتاب صوت نیز از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند. در فعالیت ۴ــ۱ به‌تحقیق این امر می‌پردازیم.



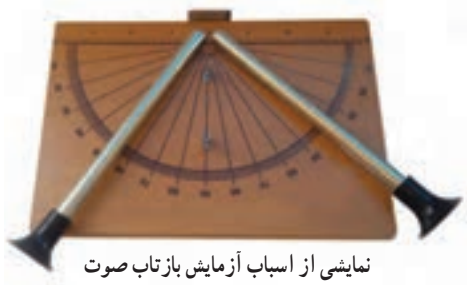
شکل ۴ــ۶ طرحی از جبهه‌های موج تابیده (خطوط توپر) و جبهه‌های موج بازتابیده (خطوط خط‌چین)



شکل ۴ــ۷ نمودار پرتویی همراه با جبهه‌های موج برای بازتاب امواج تخت از سطح مانعی تخت

فعالیت ۴ــ۱

با اسباب نشان داده شده در شکل روبه‌رو، می‌توان زاویهٔ تابش و زاویهٔ بازتابش را در امواج صوتی اندازه‌گیری کرد. با استفاده از این اسباب، قانون بازتاب عمومی را برای امواج صوتی تحقیق کنید.



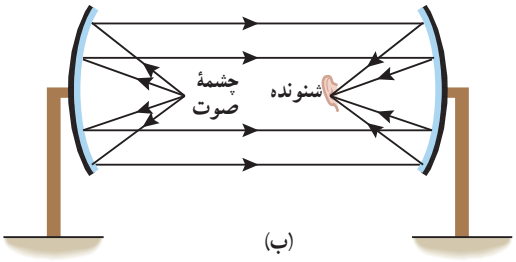
نمایشی از اسباب آزمایش بازتاب صوت

۱ــ توجه کنید که طول مانع باید در مقایسه با طول‌موج λ بسیار بزرگ باشد. دلیل این الزام را در بحث پراش امواج می‌بینید.

۲ــ i سرواژهٔ کلمهٔ incident به معنی تابش است.

۳ــ r سرواژهٔ کلمه reflection به معنی بازتابش است.

امواج صوتی می‌توانند مانند سایر امواج از سطوح خمیده نیز بازتابیده شوند. شاید در پارک‌های تفریحی دو سطح کاو را در برابر هم دیده باشید که وقتی شخصی در کانون یکی از این سطوح صحبت می‌کند، شخص دیگری در کانون سطح کاو دیگر آن را می‌شنود (شکل ۴ــ۸).



(ب)

(الف)

شکل ۴ــ۸ الف) دو سطح بازتابندهٔ کاو در یک پارک تفریحی و ب) طرحی از بازتاب امواج صوتی از دو سطح کاو مقابل هم با استفاده از نمودار پرتویی

فعالیت ۴ــ۲

دربارهٔ میکروفون سهموی که از آن برای ثبت صداهای ضعیف و دستگاه *لیتوتریپسی*[1] که از آن برای شکستن سنگ‌های کلیه، با کمک بازتابنده‌های بیضوی استفاده می‌شود تحقیق کنید.

تصویری از یک میکروفون سهموی

پژواک[2] : در برابر دیواره یا صخرهٔ بلندی که چند ده متر از شما فاصله دارد، بایستید و یک بار دست بزنید. پس از مدت زمان کوتاهی، بازتاب صدای دست زدن خود را خواهید شنید. اگر صوت پس از بازتاب، با یک تأخیر زمانی به گوش شنونده‌ای برسد که صوت اولیه را مستقیماً می‌شنود، به چنین بازتابی پژواک می‌گویند. اگر تأخیر زمانی بین این دو صوت کمتر از ۰/۱s باشد، گوش انسان نمی‌تواند پژواک را از صوت مستقیم اولیه تمیز دهد.

فنّاوری و کاربرد: مکان‌یابی پژواکی

مکان‌یابی پژواکی[3] روشی است که بر اساس امواج صوتی بازتابیده از یک جسم، مکان آن جسم را تعیین می‌کند. مکان‌یابی پژواکی به همراه اثر دوپلر که در فصل پیش آموختیم، در تعیین مکان اجسام متحرک و نیز تعیین تندی آنها به‌کار می‌رود. برخی از جانوران نظیر خفاش و دُلفین از این روش استفاده می‌کنند. همین‌طور در فنّاوری‌هایی نظیر اندازه‌گیری تندی شارش خون در رگ‌ها نیز از این روش استفاده می‌شود. خفاش، فَوَرانی از امواج فراصوتی را گسیل می‌کند که این بسته به نوع خفاش از دهان یا سوراخ‌های بینی آن گسیل می‌شود. این امواج از اشیایی که در مسیر خفاش قرار دارند بازمی‌تابد و بدین ترتیب خفاش را از اشیایی که بر سر راه او قرار دارند آگاه می‌سازد. البته بسته به اینکه شیء بازتابنده، خودِ خفاش، یا هر دو متحرک باشند، خفاش تغییر بسامدی ناشی از اثر دوپلر را در موج بازتابیده ادراک می‌کند و بدین‌وسیله می‌تواند سرعت خود یا شیء متحرک را تعیین کند. خفاش‌ها از این ویژگی برای شناسایی و شکار طعمه‌های خود استفاده می‌کنند. همچنین در دستگاه سونار که در کشتی‌ها برای مکان‌یابی اجسام زیر آب به‌کار می‌رود، و در سونوگرافی نیز از مکان‌یابی پژواکی استفاده می‌شود.

۱ــ Lithotripsy ۲ــ Echo ۳ــ Echolocation

تمرین ۴ـ۱

کمترین فاصلهٔ بین شما و یک دیوار بلند چقدر باشد تا پژواک صدای خود را از صدای اصلی تمیز دهید؟ تندی صوت در هوا را $340\ m/s$ در نظر بگیرید.

مثال ۴ـ۱

والِ عنبر یکی از جانورانی است که با استفاده از پژواک امواج فراصوتی، مکان‌یابی می‌کند. بسامد امواج فراصوتی‌ای که این وال تولید می‌کند حدود $100\ kHz$ است. با توجه به اینکه تندی صوت در آب دریا طبق جدول ۳ـ۱ حدود $1/52\times10^{3}\ m/s$ است، الف) طول‌موج این صوت و ب) زمان رفت و برگشت صوت گسیل شده توسط وال برای مانعی که در فاصلهٔ $100\ m$ از آن قرار گرفته، چقدر است؟

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

$$\lambda=\frac{v}{f}=\frac{1/52\times10^{3}\ m/s}{100\times10^{3}\ s^{-1}}=1/52\times10^{-2}\ m=1/52\ cm$$

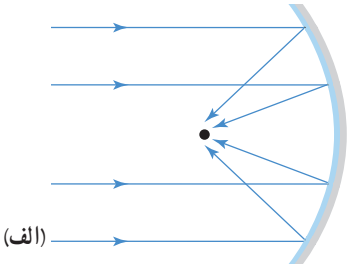
همان‌طور که بعداً در بحث پراش خواهید دید برای تشخیص یک جسم، اندازهٔ آن باید در حدود طول‌موج به‌کار رفته یا بزرگ‌تر از آن باشد. بنابراین، وال اجسامی در حدود این طول‌موج یا بزرگ‌تر را می‌تواند تشخیص دهد.

ب) زمان لازم برای حرکت رفت و برگشت صوت بین وال و مانع برابر است با :

$$t=\frac{x}{v}=\frac{2L}{v}=\frac{2\times100\ m}{1/52\times10^{3}\ m/s}=0/132\ s$$

بازتاب امواج الکترومغناطیسی : امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توانند از یک سطح، بازتابیده شوند و بازتاب آنها از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند.

امواج الکترومغناطیسی تخت تابیده به یک سطح کاو پس از بازتابش، مانند شکل ۴ـ۹ الف در یک نقطه کانونی می‌شوند. این نمونهٔ دیگری از بازتاب در سه بُعد است. از همین سازوکار برای دریافت امواج رادیویی توسط آنتن‌های بشقابی و یا امواج فروسرخ برای گرم کردن آب یا مواد غذایی در اجاق‌های خورشیدی (شکل ۴ـ۹ ب) استفاده می‌شود.

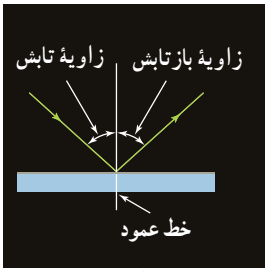


شکل ۴ـ۹ الف) یک موج الکترومغناطیسی تخت پس از بازتاب از یک سطح کاو در نقطه‌ای مقابل سطح، کانونی می‌شود. ب) تصویری از یک اجاق خورشیدی

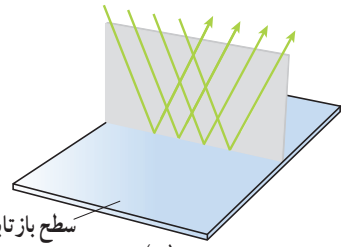
فعالیت ۴ـ۳

رادار دوپلری : از امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توان برای مکان‌یابی پژواکی استفاده کرد. در این مورد و کاربرد آن به‌خصوص در تعیین تندی خودروها تحقیق کنید.

همان‌طور که قبلاً دیدیم نور مرئی بخشی از طیف امواج الکترومغناطیسی است. بنابراین نور مرئی نیز از همان قانون بازتاب عمومی امواج پیروی می‌کند؛ یعنی زاویهٔ تابش و بازتابش در هر بازتابشی با هم برابرند (شکل ۴ــ۱۰ الف)، افزون بر این، برای نور مرئی نیز همچون سایر امواج، پرتوی تابش، پرتوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده، در هر بازتابشی در یک صفحه واقع‌اند (شکل ۴ــ۱۰ ب).



(الف)



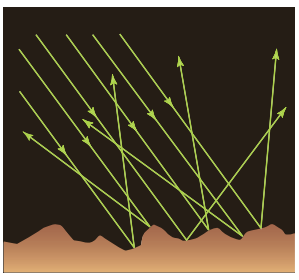
(ب)

شکل ۴ــ۱۰ الف) در هر بازتابشی زاویهٔ تابش و زاویهٔ بازتابش با هم برابرند. ب) پرتوی تابش، پرتوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع‌اند.

در مواردی که سطح بازتابندهٔ نور همچون یک آینه، بسیار هموار باشد، بازتاب نور را بازتاب آینه‌ای[1] یا منظم می‌گویند.

نوع دیگر بازتابش، بازتاب پخشنده[2] یا نامنظم است. این بازتاب وقتی رخ می‌دهد که نور به سطحی برخورد کند که صیقلی و هموار نباشد. پرتوهای نور به‌طور کاتوره‌ای از پستی و بلندی‌های سطح بازتابیده، و در تمام جهات پراکنده می‌شوند (شکل ۴ــ۱۱). به‌دلیل این بازتاب است که شما این صفحهٔ کاغذ، دیوار، دستتان، دوست خود، و... را می‌بینید. در بازتاب آینه‌ای از یک آینهٔ تخت، بازتابش یک دسته پرتوی موازی را فقط در یک جهت می‌توانید ببینید، ولی در بازتاب پخشنده، بازتابش این دسته پرتو را می‌توانید در جهت‌های مختلف مشاهده کنید. توجه کنید منظور از سطح ناهموار آن است که سطح در مقایسه با طول‌موج نور ناهموار است؛ مثلاً یک کاغذ در ظاهر بسیار هموار به نظر می‌رسد اما از دید میکروسکوپی این سطح از اجزای متمایز و کوچکی تشکیل شده است که بسیار بزرگ‌تر از ۱μm هستند. با توجه به اینکه طول‌موج نور مرئی در حدود ۰/۵ μm است، چنین سطحی برای نور مرئی، ناهموار محسوب می‌شود. در مقابل، ناهمواری‌های یک آینه یا یک سطح فلزی صیقلی، بسیار کوچک‌تر از ۱μm است و بنابراین برای نور مرئی سطوحی هموار محسوب می‌شوند.

کریستین هویگنس (۱۶۹۵ــ۱۶۲۹م.)
در لاههٔ هلند به دنیا آمد. در دانشگاه‌های لیدن و پِردا تحصیل کرد و هنگامی که فقط ۲۲ سال داشت مقاله‌هایی در زمینهٔ ریاضی و اخترشناسی نوشت که مورد توجه رنه دکارت، ریاضی‌دان نامی، قرار گرفت. هویگنس در زمان خود دانشمندی با ذوق و مبتکر بود. در سال ۱۶۵۷ ساعت آونگی را اختراع کرد که پیش از آن دانشمندانی مانند گالیله روی آن کار کرده بودند، اما به جایی نرسیده بودند. علاوه بر این، او پژوهش‌هایی با ارزش روی نور نیز انجام داد و نظریهٔ مشهور خود را در این مورد ارائه کرد. بنا به نظریهٔ هویگنس، نور از موج‌های زیادی تشکیل شده است که این موج‌ها را می‌توان به موج‌های صوتی یا موج‌های روی آب تشبیه کرد. نظریهٔ موجی بودن نور هویگنس بحث‌های فراوانی برانگیخت تا اینکه در حدود ۲۰۰ سال بعد ماکسول فیزیک‌دان اسکاتلندی دوباره به این نظریه پرداخت و به آن جان تازه‌ای بخشید. هویگنس اخترشناس برجسته‌ای نیز بود و اسباب‌ها و دستگاه‌های نوری زیادی را اختراع کرد. اختراع ریزسنج را نیز به او نسبت داده‌اند.

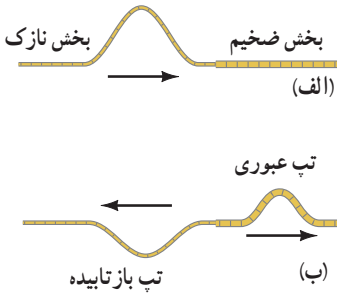


شکل ۴ــ۱۱ طرحی از بازتاب پخشندهٔ نور از سطحی ناهموار. توجه کنید که در اینجا نیز در هر بازتاب، زاویه‌های تابش و بازتابش با هم برابرند و پرتوی تابش، پرتوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع‌اند.

۴ــ۲ شکست موج

رنگ‌های رنگین کمان، تصویری که با کمک عینک می‌بینیم، تصاویری که با استفاده از عدسی‌های ابزارهای نوری مانند میکروسکوپ و دوربین دیده می‌شود، و... مثال‌های رایجی از شکسته‌شدن موج‌های نوری در پیرامون ما است. این پدیده برای امواج صوتی نیز رخ می‌دهد ولی به اندازهٔ موج‌های نوری اهمیت ندارد. وقتی موج به مرز جدایی دو محیط می‌رسد بخشی از آن بازتابیده می‌شود و بخشی دیگر عبور می‌کند که این افزون بر جذب موج است که در هر دو محیط رخ می‌دهد؛ مثلاً عبور یک تپ در طول طنابی را در نظر بگیرید که از دو بخش، یکی نازک و دیگری ضخیم، تشکیل شده است. وقتی

۱ــ specular reflection
۲ــ diffuse reflection



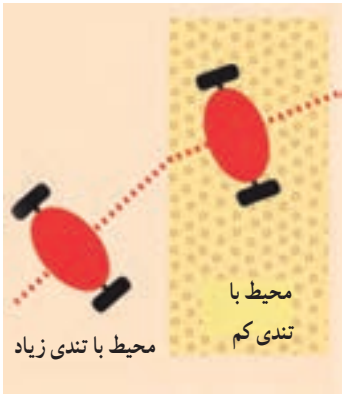
شکل ۴ـ۱۲ الف) تپ فرودی از سمت چپ طناب وارد بخش ضخیم‌تر آن می‌شود. ب) بخشی از آن از مرز عبور می‌کند و بخشی بازمی‌تابد.

این تپ از سمت بخش نازک به مرز دو بخش می‌رسد (شکل ۴ـ۱۲ الف)، بخشی از این تپ بازمی‌تابد و بخشی دیگر عبور می‌کند (شکل ۴ـ۱۲ ب). برای یک موج سینوسی بسامد این دو موج همان بسامد موج فرودی است که توسط چشمهٔ موج تعیین می‌شود. بنابراین موج عبوری که تندی آن در قسمت ضخیم کمتر است، بنا به رابطهٔ $\lambda = v/f$، طول‌موج کمتری نسبت به موج فرودی خواهد داشت.

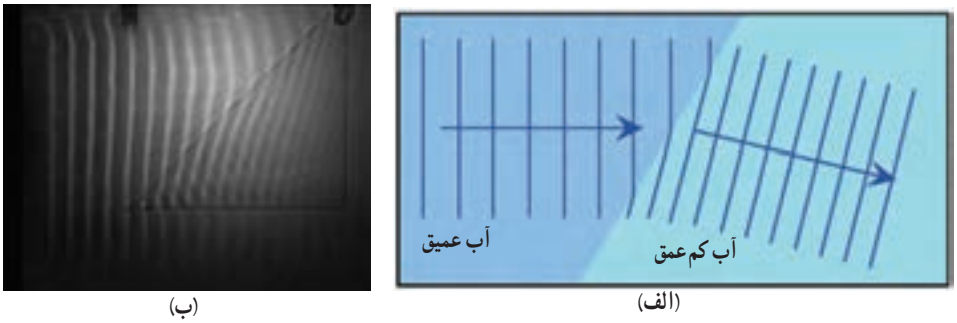
پرسش ۴ـ۱

اگر موج سینوسی از قسمت ضخیم طناب به قسمت نازک آن وارد شود، بسامد، تندی، و طول‌موجِ موجِ عبوری در مقایسه با موج فرودی چه تغییری می‌کند؟

در حالت‌های دو یا سه بُعدی با عبور موج از یک مرز و ورود آن به محیط دیگر، تندی موج تغییر می‌کند و ممکن است جهت انتشار موج نیز تغییر کند و اصطلاحاً موج شکست پیدا کند. همان‌طور که پیش از این دیدیم، تندی امواج روی سطح آب به عمق آن بستگی دارد. از این ویژگی می‌توانیم برای تحقیق پدیدهٔ شکست در تشت موج استفاده کنیم؛ یعنی با تغییردادن عمق آب در بخشی از تشت می‌توان تندی موج سطحی در آن بخش را تغییر داد که این همان‌طور که دیدیم به تغییر جهت انتشار موج در آن بخش، و به عبارتی به شکست موج می‌انجامد. مشاهده می‌شود با ورود موج به بخش کم‌عمق، تندی موج سطحی کاهش می‌یابد. روشن است، آن بخش موج که زودتر به ناحیهٔ کم‌عمق می‌رسد، چون با تندی کمتر حرکت می‌کند از بقیهٔ موج که هنوز وارد این ناحیه نشده عقب می‌افتد و بنابراین فاصلهٔ بین جبهه‌های موج و در نتیجه طول‌موج کاهش می‌یابد و به این ترتیب جبهه‌های موج مطابق شکل ۴ـ۱۳ در مرز دو ناحیه تغییر جهت می‌دهند. این مطلب را می‌توان در نزدیک شدن امواج به یک ساحل شیب‌دار نیز مشاهده کرد که با رسیدن جبهه‌های موج به ساحل که در آنجا عمق آب کم می‌شود، جهت انتشار جبهه‌های موج تغییر می‌کند. شاید برای تفهیم این موضوع، مثال یک اسباب‌بازی چرخ‌دار که با عبور از کف صاف اتاق وارد قالیچه‌ای می‌شود، مناسب باشد. با ورود این اسباب‌بازی به قالیچه، تندی آن کم می‌شود و در نتیجه مسیر آن تغییر می‌کند (شکل ۴ـ۱۴).



شکل ۴ـ۱۴ وقتی اسباب‌بازی وارد قالیچه می‌شود مسیرش تغییر می‌کند؛ زیرا چرخی که نخست به قالیچه می‌رسد، زودتر کند می‌شود.



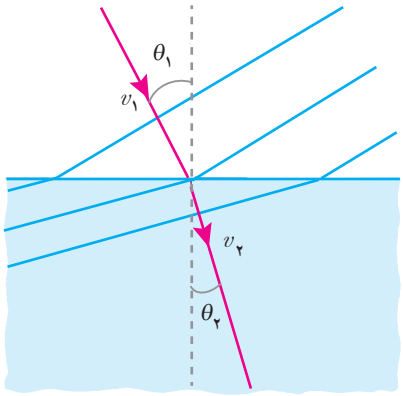
شکل ۴ـ۱۳ الف) طرحی از شکست امواج سطحی در مرز آب عمیق و آب کم‌عمق در تشت موج و ب) تصویری واقعی از شکست امواج سطحی در تشت موج

تمرین ۴ــ۲

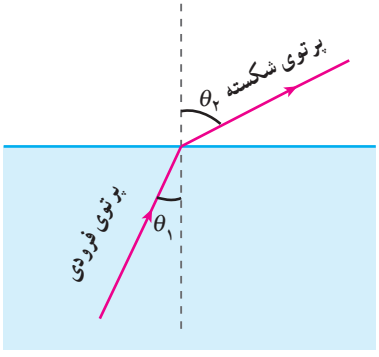
در یک تشت موج به کمک یک نوسان‌ساز تیغه‌ای که با بسامد ۵/۰ Hz کار می‌کند، امواجی تخت ایجاد می‌کنیم، به‌طوری که فاصلهٔ بین دو برآمدگی متوالی آن برابر با ۱۰ cm می‌شود. اگر اکنون بُرِه‌ای شیشه‌ای را در کف تشت قرار دهیم، امواج در ورود به ناحیهٔ کم‌عمقِ بالای بُرِه، شکست پیدا می‌کنند. اگر تندی امواج در ناحیهٔ کم‌عمق، ۰/۴۰ برابر تندی در ناحیهٔ عمیق باشد، طول‌موج امواج در ناحیهٔ کم‌عمق چقدر می‌شود؟

قانون شکست عمومی : در پدیده‌های شکستی که بررسی کردیم، قانونی حاکم است که اکنون به آن می‌پردازیم. فرض کنید مطابق شکل ۴ــ۱۵ جبهه‌های موج تختی به‌طور مایل به مرز دو محیط می‌رسند و سپس شکست پیدا می‌کنند. از آنجا که جبهه‌های موج در مرز جدایی دو محیط می‌شکنند، پرتوهای موج که همواره عمود بر جبهه‌های موج هستند در عبور از این مرز تغییر جهت می‌دهند. این پرتوها نیز در شکل ۴ــ۱۵ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که دیدیم در یک نمودار پرتویی، زاویهٔ پرتوی فرودی با خط عمود بر مرز را زاویهٔ تابش می‌نامند و با θ_i نشان می‌دهند، در حالی که زاویهٔ پرتوی شکسته با خط عمود بر مرز را زاویهٔ شکست می‌نامند و با θ_r نشان می‌دهند[1]. در شکل ۴ــ۱۵، θ_i با θ_1 و θ_r با θ_2 نشان داده شده است. اگر تندی انتشار موج فرودی را v_1 و تندی انتشار موج شکست یافته را v_2 بنامیم، بین تندی‌های v_1 و v_2 و زاویه‌های θ_1 و θ_2 رابطهٔ زیر برقرار است که به آن قانون شکست عمومی می‌گویند.

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1}=\frac{v_2}{v_1} \qquad (قانون شکست عمومی) \qquad (۴ــ۱)$$



شکل ۴ــ۱۵ جبههٔ موجی با زاویهٔ تابش θ_1 از محیط اول وارد محیط دوم می‌شود و با زاویهٔ θ_2 شکست پیدا می‌کند (شکل با فرض $v_1<v_2$ رسم شده است).



شکل ۴ــ۱۶ در صورتی که موج از محیطی با تندی کمتر به محیطی با تندی بیشتر برود، زاویهٔ شکست θ_2 بزرگ‌تر از زاویهٔ تابش θ_1 می‌شود.

در شکل ۴ــ۱۵ موجی تخت از محیطی با تندی بیشتر به محیطی با تندی کمتر رفته است. ولی اگر موج در جهت مخالف حرکت کند، یعنی از محیط دوم که در آن تندی موج کمتر است وارد محیط اول شود که در آن تندی موج بیشتر است، زاویهٔ شکست بزرگ‌تر از زاویهٔ تابش می‌شود (شکل ۴ــ۱۶).

۱ــ شاخص پایین r سرواژهٔ کلمه انگلیسی refraction به معنی شکست است.

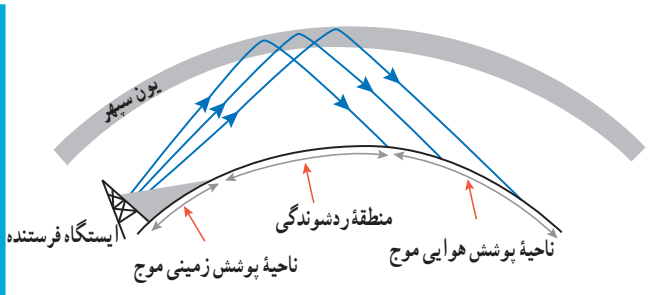
تمرین ۴ــ۳

در تمرین ۴ــ۲ با فرض اینکه زاویهٔ تابش امواج برابر ۳۰° باشد، زاویهٔ شکست چقدر می‌شود؟

شکست امواج الکترومغناطیسی : امواج الکترومغناطیسی (و از جمله نور مرئی) نیز با گذر از یک محیط به محیطی دیگر که در آن تندی آنها متفاوت می‌شود، شکست پیدا می‌کنند. به جز گسترهٔ نور مرئی که بیشترین و معروف‌ترین موارد شکست برای آنها مطرح می‌شود و به پیامدها و کاربردهای جالبی می‌انجامد، شکست امواج رادیویی نیز اهمیتی کاربردی در ارتباطات رادیویی دارد.

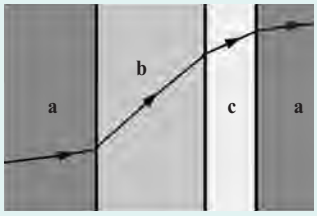
پژواک چگونه است؟

موج‌های ارسال شده از یک ایستگاه فرستندهٔ رادیویی دوردست را به همان وضوحی می‌شنویم که در محدودهٔ آن ایستگاه شنیده می‌شود. روش کار به این ترتیب است که یک موج پر قدرت رادیویی، با بسامد بین ۳ تا ۳۰ مگاهرتز، به لایهٔ یون‌سپهر (یونسفر) بالای جو که در ارتفاع ۸۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتری سطح زمین واقع است فرستاده می‌شود. این لایه به علت وجود یون‌ها و الکترون‌های آزاد، پلاسمایی را ایجاد می‌کند که ویژگی‌های فیزیکی‌اش آن را از بقیهٔ جو متمایز می‌سازد. یون‌سپهر در حالی که نور مرئی و تابش فروسرخ را عبور می‌دهد، امواج رادیویی با طول‌موج‌های بلند (با λی بزرگ‌تر از حدود ۱۰m) را که در جهت‌های مناسبی به سوی این لایه ارسال شده باشند، به طرف زمین برمی‌گرداند. دلیل این اتفاق، یکنواخت نبودن چگالی الکترون‌های آزاد در این لایه و در نتیجه، تفاوت تندی امواج رادیویی در قسمت‌های مختلف آن است، به‌طوری که در سازوکاری مانند پدیدهٔ سراب که بعداً خواهیم آموخت، امواج را به سمت پایین بازمی‌گرداند.



در این شکل *ناحیهٔ پوشش زمینی* مربوط به پیرامون ایستگاه است، که امواج به‌طور مستقیم به گیرنده می‌رسد. *منطقهٔ ردشوندگی* ناحیه‌ای است که امواج به زمین نمی‌رسد، و *ناحیهٔ پوشش هوایی* ناحیه‌ای است که امواج رادیویی با بازگشت از یون سپهر به زمین می‌رسد.

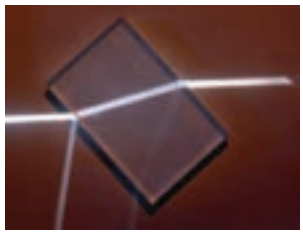
پرسش ۴ــ۲



شکل روبه‌رو یک پرتوی موج الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد که با عبور از محیط اولیهٔ a، از طریق محیط‌های b و c به محیط a بازمی‌گردد. این محیط‌ها را بر حسب تندی موج در آنها از بیشترین تا کمترین مرتب کنید.

وقتی یک پرتوی نور از محیطی شفاف وارد محیط شفاف دیگری شود، بخشی از نور بازمی‌تابد و بخشی دیگر وارد محیط دوم می‌شود. همان‌طور که انتظار داریم آن بخش نور که وارد محیط دوم می‌شود، به دلیل آنکه تندی آن در محیط دوم تغییر می‌کند، شکسته می‌شود (شکل ۴ــ۱۷). به همین دلیل برای هر محیط ضریب شکست تعریف می‌کنند که برابر با نسبت تندی نور در خلأ به تندی نور در آن محیط است :

$$n = \frac{\text{تندی نور در خلأ}}{\text{تندی نور در یک محیط}} = \frac{c}{v} \qquad \text{(تعریف ضریب شکست)} \qquad (۴ــ۲)$$



شکل ۴ــ۱۷ در عبور یک پرتوی نور از محیطی شفاف به محیط شفافی دیگر، بخشی از نور بازمی‌تابد و بخشی می‌شکند.

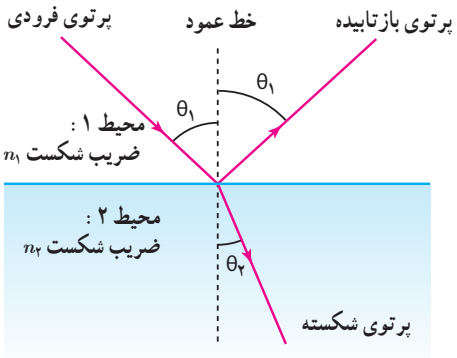
که در آن c تندی نور در خلأ با مقدار دقیق ۲۹۹ ۷۹۲ ۴۵۸ m/s است که در محاسبات، آن را برابر با $۳/۰۰ \times ۱۰^۸$ m/s در نظر می‌گیریم؛ چون تندی نور در خلأ بیشترین تندی ممکن است، ضریب شکست همواره بزرگ‌تر یا مساوی ۱ است (که ۱ مربوط به خلأ است). جدول ۴ــ۱ ضریب شکست برای چند مادهٔ مختلف را به‌دست می‌دهد. بنابراین برای دو محیط خاص ۱ و ۲، ضریب شکست‌ها به‌ترتیب $n_۱ = c/v_۱$ و $n_۲ = c/v_۲$ است که $v_۱$ و $v_۲$ تندی نور در آن دو محیط است. حال اگر پرتوی نوری از محیط ۱ با زاویهٔ تابش $\theta_۱$ وارد محیط ۲ شود و با زاویهٔ $\theta_۲$ شکست پیدا کند (شکل ۴ــ۱۸)، از قانون شکست عمومی (رابطهٔ ۴ــ۱) درمی‌یابیم :

$$\frac{\sin\theta_۲}{\sin\theta_۱} = \frac{v_۲}{v_۱} = \frac{c/n_۲}{c/n_۱} = \frac{n_۱}{n_۲}$$

و یا

$$n_۱ \sin\theta_۱ = n_۲ \sin\theta_۲ \qquad \text{(قانون شکست اسنل)} \qquad (۴ــ۳)$$

این رابطه را به افتخار فیزیک‌دان هلندی، *ویلبرد اسنل* (۱۶۲۶ــ۱۵۸۰م.) که آن را به‌طور تجربی کشف کرد، قانون شکست اسنل می‌نامند.



شکل ۴ــ۱۸ طرحی از بازتاب و شکست نور، در عبور یک پرتوی نور از محیطی شفاف به محیط شفافی دیگر

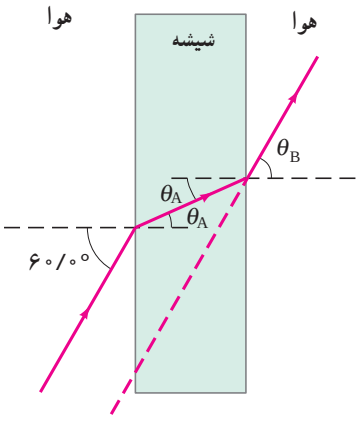
جدول ۴ــ۱ ضریب شکست چند مادهٔ مختلف*

محیط	ضریب شکست
خلأ	دقیقاً ۱
هوا (شرایط متعارف)	۱/۰۰۰۲۹
یخ	۱/۳۱
آب (۲۰°C)	۱/۳۳
استون	۱/۳۶
اتانول	۱/۳۶
محلول آب‌قند (۳۰٪)	۱/۳۸
محلول آب‌قند (۸۰٪)	۱/۴۹
پلاستیک پلکسی‌گلاس	۱/۵۱
بنزن	۱/۵۰
شیشهٔ خالص	۱/۵۲
سدیم کلرید (نمک خوراکی)	۱/۵۴
کوارتز ($SiO_۲$)	۱/۵۴
الماس	۲/۴۲

* برای طول‌موج ۵۸۹nm (نور زرد سدیم)

مثال ۴ــ۲

پرتوی نوری مطابق شکل، از هوا بر تیغهٔ شیشه‌ای متوازی‌السطوحی، با زاویهٔ تابش ۶۰/۰° فرود می‌آید. الف) زاویهٔ شکست (θ_A) پرتو در شیشه چقدر است؟ ب) زاویه خروجی (θ_B) پرتو از شیشه چقدر است؟



پاسخ : برای ورود پرتوی نور از هوا به شیشه قانون شکست اسنل را به‌کار می‌بریم. با توجه به جدول ۴ــ۱ ضریب شکست هوا $n_۱ = ۱/۰۰$ و ضریب شکست شیشه $n_۲ = ۱/۵۲$ است.

$$n_۱ \sin\theta_۱ = n_۲ \sin\theta_۲ \Rightarrow (۱/۰۰)(\sin ۶۰/۰^\circ) = (۱/۵۲)(\sin\theta_A)$$

$$\sin\theta_A = ۰/۵۶۹۸ \Rightarrow \theta_A = ۳۴/۷^\circ$$

و برای خروج پرتوی نور از شیشه نیز دوباره قانون اسنل را به‌کار می‌بریم. توجه کنید که زاویهٔ تابش در اینجا برابر زاویهٔ شکست در شیشه است؛ یعنی $\theta_۱ = \theta_A$.

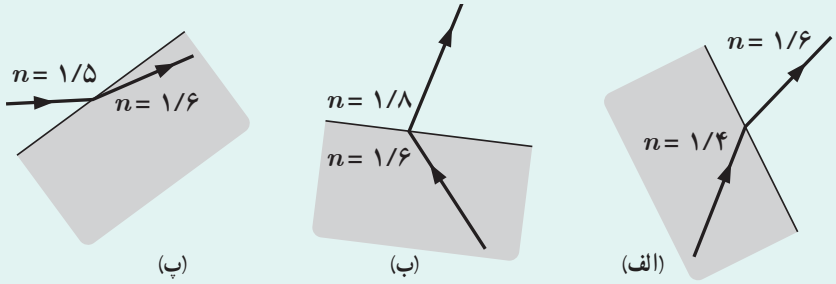
$$n_۱ \sin\theta_۱ = n_۲ \sin\theta_۲ \Rightarrow (۱/۵۲)(۰/۵۶۹۸) = (۱/۰۰)(\sin\theta_B)$$

$$\sin\theta_B = ۰/۸۶۶۱ \Rightarrow \theta_B = ۶۰/۰^\circ$$

البته با اندکی دقت و بدون محاسبه نیز می‌توانستید مقدار θ_B را بیابید.

پرسش ۴ــ۳

کدام‌یک از سه شکل زیر یک شکست را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟



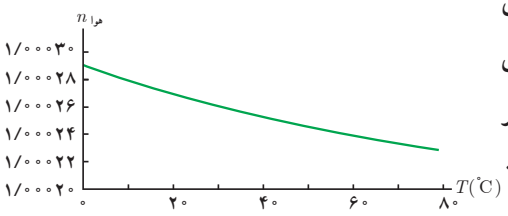
فعالیت ۴ــ۴

اندازه‌گیری ضریب شکست : با توجه به مثال ۴ــ۲، آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان ضریب شکست یک تیغهٔ متوازی‌السطوح شفاف را اندازه گرفت.

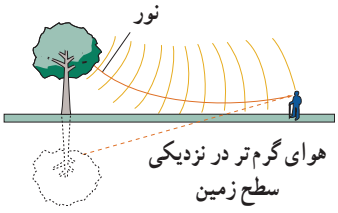
سراب : در روزهای گرم ممکن است برکهٔ آبی را در دوردست ببینید که بر سطح زمین قرار دارد، اما وقتی به آن محل می‌رسید، آنجا را خشک می‌یابید. به این پدیده سراب یا سراب آبگیر[۱] می‌گویند و نه‌تنها می‌توان آن را دید، بلکه می‌توان از آن عکس هم گرفت (شکل ۴ــ۱۹).

شکل ۴ــ۱۹ تصویر یک خودرو در سراب بر سطح گرم جاده

در روزهای گرم هوای سطح زمین نسبتاً داغ است. از طرفی، چگالی هوا با افزایش دما کاهش می‌یابد که این سبب کاهش ضریب شکست نیز می‌شود (شکل ۴ــ۲۰). در شکل ۴ــ۲۱ پدیدهٔ سراب را مبتنی بر جبهه‌های موج نشان داده‌ایم. برای توضیح این شکل، نخست جبهه‌های موجی را در نظر می‌گیریم که به طرف پایین می‌آیند. با پایین آمدن هر چه بیشتر پرتوهای نظیر این جبهه‌های موج، آنها با ضریب شکست‌های کوچک‌تر و کوچک‌تری روبه‌رو می‌شوند و در هر مرحله با دور شدن از خط عمود، بیشتر و بیشتر به سمت افق خم می‌شوند (شکل ۴ــ۲۲ الف). وقتی پرتوها در نزدیکی سطح زمین تقریباً افقی می‌شوند به سمت بالا خم برمی‌دارند. این خم شدن رو به بالا را می‌توان با استفاده از جبهه‌های موج توضیح داد. بخش پایینی هر جبههٔ موج در هوای کمی گرم‌تر قرار دارد و بنابراین کمی تندتر از بخش بالایی جبههٔ موج حرکت می‌کند و این تفاوت رفتار دو قسمت جبهه‌های موج، موجب خم شدن رو به بالای پرتوهای موج می‌شود، زیرا پرتوهای موج باید همواره عمود بر جبهه‌های موج باشند (شکل ۴ــ۲۲ ب). وقتی پرتوها رو به بالا می‌روند به خم‌شدن رو به بالای خود ادامه می‌دهند، زیرا اکنون مدام با محیط‌هایی با ضریب شکست‌های بزرگ و بزرگ‌تر مواجه می‌شوند و بنابراین در هر مرحله با نزدیک شدن به خط عمود، بیشتر و بیشتر رو به بالا خم می‌شوند (شکل ۴ــ۲۲ پ) اگر بخشی از این نور به چشم ما برسد، به نظر می‌آید که منشأ این نور از امتداد رو به عقب پرتوهایی است که به چشم ما رسیده‌اند و همان‌طور که در شکل ۴ــ۲۱ نشان داده شده است این حس را ایجاد می‌کند که گویی از سطح زمین آمده است.

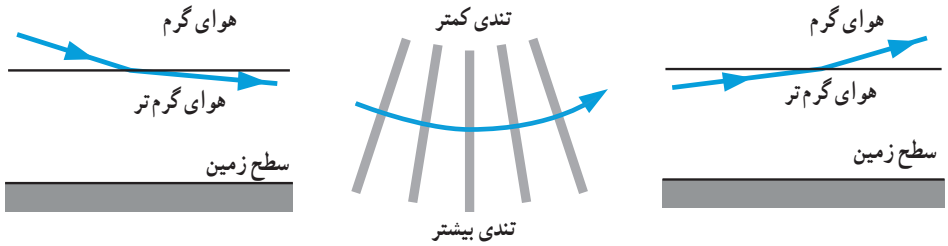


شکل ۴ــ۲۰ نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما



شکل ۴ــ۲۱ مدل‌سازی پدیدهٔ سراب به کمک جبهه‌های موج. ناظری که پرتوهای نور در پدیدهٔ سراب به چشمش می‌رسد، گمان می‌برد که این پرتوها از یک تصویر آمده‌اند.

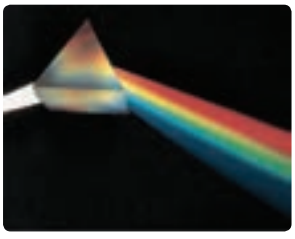
۱ــ Oasis mirage

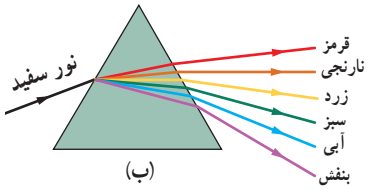


شکل ۴ــ۲۲ الف) خمیدگی اغراق‌آمیز یک پرتوی نور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم به سمت هوای گرم‌تر پایین می‌رود. ب) تغییر جبهه‌های موج و خمیدگی مربوط به آن، به این دلیل رخ می‌دهد که انتهای پایین جبهه‌های موج در هوای گرم‌تر سریع‌تر حرکت می‌کنند. پ) خمیدگی اغراق‌آمیز یک پرتوی نور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم‌تر به سمت هوای گرم بالا می‌رود.

پاشندگی نور : همان‌طور که در علوم هشتم دیدیم وقتی باریکهٔ نور سفید خورشید به وجهی از یک منشور می‌تابد، در عبور از منشور به رنگ‌های مختلفی تجزیه می‌شود (شکل ۴ــ۲۳ الف). دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیطی به‌جز خلأ به طول‌موج نور بستگی دارد؛ یعنی وقتی باریکهٔ نوری شامل پرتوهایی با طول‌موج‌های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های مختلفی شکسته می‌شوند. به این پخش‌شدگی نور، پاشندگی نور می‌گویند. عموماً ضریب شکست یک محیط معیّن برای طول‌موج‌های کوتاه‌تر، بیشتر است. نمودار شکل ۴ــ۲۴ این وابستگی ضریب شکست به طول‌موج نور را برای شیشهٔ معمولی نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار اگر مثلاً دو باریکهٔ نور آبی و قرمز با زاویهٔ تابش یکسانی از هوا وارد شیشه شوند باریکهٔ آبی بیشتر از باریکهٔ قرمز خم می‌شود.

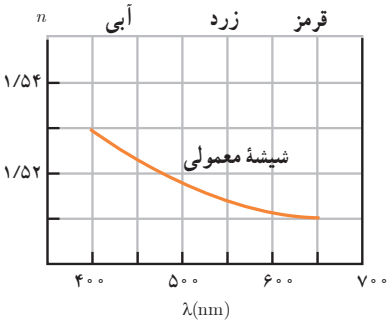
اگر باریکهٔ نور سفید از هوا بر یک سطح شیشه‌ای فرود آید بر اثر شکست نور، مؤلفه‌های سازندهٔ باریکهٔ نور سفید هر کدام به میزان متفاوتی خم می شوند که البته این تفاوت چندان محسوس نیست. برای افزایش جدایی رنگ‌ها در پاشندگی نور، معمولاً از یک منشور با سطح مقطع مثلثی استفاده می‌کنیم. پاشندگی ناچیز در سطح اول، سپس با پاشندگی در سطح دوم افزایش می‌یابد و مؤلفه‌های رنگی نور سفید به‌طور محسوسی از هم جدا می‌شوند (شکل ۴ــ۲۳ ب)[1].


(الف)



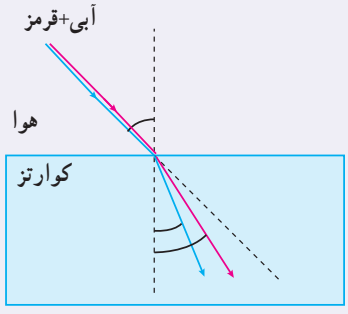
(ب)

شکل ۴ــ۲۳ الف) باریکه‌ای از نور سفید که بر یک منشور شیشه‌ای تابیده است، به مؤلفه‌های رنگی خود پاشیده است. ب) طرحی از پاشیدگی نور سفید در یک منشور با قاعدهٔ مثلثی



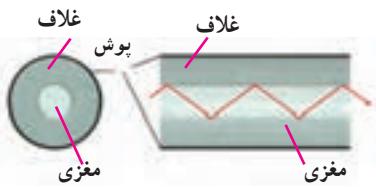
شکل ۴ــ۲۴ تغییرات ضریب شکست در طیف مرئی نور برحسب طول‌موج برای شیشهٔ معمولی

تمرین ۴ــ۴



شکل روبه‌رو باریکهٔ نوری متشکل از دو پرتوی قرمز و آبی را نشان می‌دهد که از هوا و با زاویهٔ تابش 45° بر سطح تیغهٔ تختی از کوارتز می‌تابد. زاویه‌های شکست برای این دو پرتو را محاسبه کنید. ضریب شکست نورهای قرمز و آبی در کوارتز به‌ترتیب برابرند با $n_{\text{قرمز}} = 1/459$ و $n_{\text{آبی}} = 1/467$.

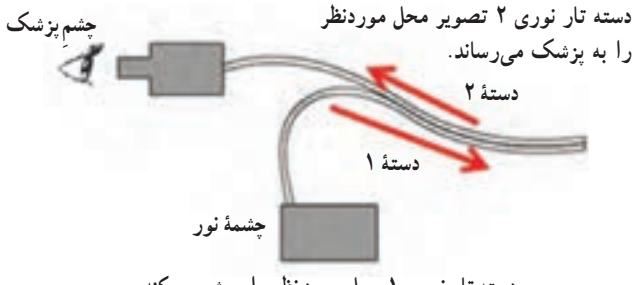
۱ــ محاسبهٔ زاویه‌ها در شکست نور به‌وسیلهٔ منشور، خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.



الف) طرحی از ساختار یک تار نوری و مسیر زیگزاگی که نور در آن می‌پیماید.

ب) یک کابل سبک تار نوری (شکل سمت چپ) می‌تواند مکالمه‌های تلفنی بسیار بیشتری را از یک کابل سیمی معمولی (شکل سمت راست) انتقال دهد.

تار نوری : وقتی نور از محیطی با ضریب شکست بیشتر به‌طور مایل وارد محیطی با ضریب شکست کمتر شود، به ازای زاویهٔ تابش خاصی موسوم به زاویهٔ حد، زاویهٔ شکست 90° می‌شود و از آن پس برای هر زاویهٔ تابش بزرگ‌تری همهٔ نور فرودی بازمی‌تابد که به این پدیده، بازتاب داخلی کلی گفته می‌شود. تار نوری که هم در پزشکی و هم در فنّاوری ارتباطات نقش مهمی دارد، بر اساس این پدیده عمل می‌کند. در مرکز یک تار نوری، مغزی استوانه‌ای شفافی از جنس شیشه یا پلاستیک با ضریب شکست نسبتاً بالا قرار دارد. ضخامت این مغزی می‌تواند تا چند میکرومتر باشد. اطراف مغزی با غلافی پوشیده شده است که آن نیز شفاف است، ولی ضریب شکستِ بسیار کوچک‌تری از ضریب شکست مغزی دارد تا زاویهٔ حد به اندازهٔ کافی کوچک باشد. نور طوری از یک سر مغزی وارد می‌شود که به مرز مغزی ــ غلاف تحت زاویه‌ای بزرگ‌تر از زاویهٔ حد بتابد و در نتیجه تماماً به درون مغزی بازتاب کند. سپس همین اتفاق در مرز روبه‌روی مرز قبلی رخ می‌دهد و نور بر اثر بازتاب داخلی کلی دوباره به مغزی بازتابیده می‌شود و این رفت و برگشت نور در مسیری زیگزاگ ادامه می‌یابد (شکل الف) تا اینکه به سر دیگر تار برسد. در یک تار نوری خوب، نور در مغزی کمی جذب پیدا می‌کند و بنابراین می‌تواند پیش از آنکه شدتش کاهش یابد، تا مسافت‌های طولانی حرکت کند. تارهای نوری اغلب به‌صورت دسته‌ای کنار هم قرار می‌گیرند تا به شکل یک کابل درآیند. چون تارها بسیار نازک‌اند کابل‌ها نسبتاً کوچک و انعطاف‌پذیر هستند و به این ترتیب می‌توانند در بسیاری موارد، برای انتقال اطلاعات جایگزین کابل‌های فلزی بزرگ شوند (شکل ب). یکی از کاربردهای مهم تارهای نوری در عمل آندوسکوپی در پزشکی است. از آندوسکوپ برای دیدن درون بدن، بدون انجام جراحی استفاده می‌شود. در آندوسکوپی، جراح دو دسته تار نوری را وارد بدن بیمار می‌کند که یکی نور را به محل موردنظر می‌رساند و دیگری تصویر محل موردنظر را به یک چشمی یا صفحهٔ نمایشگر می‌رساند. شکل پ، طرح ساده شده‌ای از چگونگی این تصویربرداری و شکل ت، یک اسباب آندوسکوپی معمولی را نشان می‌دهد.



دسته تار نوری ۲ تصویر محل موردنظر را به پزشک می‌رساند.

دسته تار نوری ۱ محل مورد نظر را روشن می‌کند.

پ) طرح ساده‌شده‌ای از طرز کار یک آندوسکوپ

دو دسته تار نوری داخل کابل قرار دارد.

ت) یک اسباب آندوسکوپ معمولی

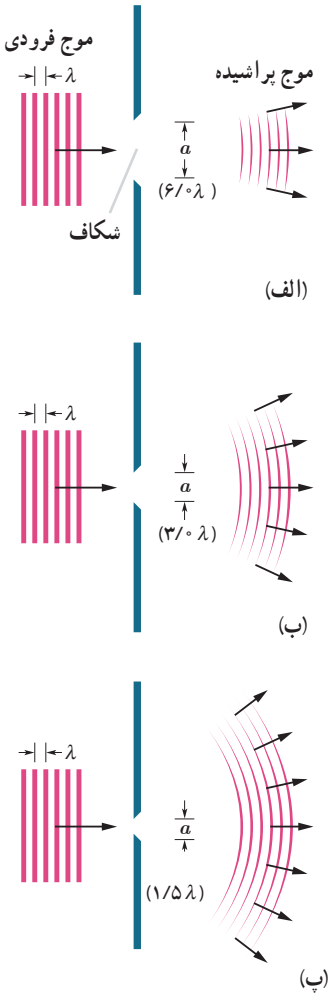
۴ـ۳ پراش موج

اگر در مسیر پیشروی یک موج مانعی قرار دهیم بخشی از موج که به مانع برخورد می‌کند، توسط مانع بازتاب و یا جذب می‌شود و به پشت مانع نمی‌رسد و بخشی دیگر، از لبه‌های مانع یا شکاف‌های موجود در آن، می‌گذرد. در صورتی که ابعاد مانع یا شکاف در حدود طول‌موج باشد، بخشی از موج که از لبه‌ها یا شکاف‌ها عبور می‌کند، به‌وضوح به اطراف مانع یا شکاف گسترده می‌شود.

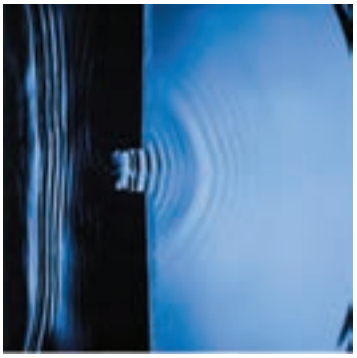
شکل ۴ــ۲۵ وضعیت طرح‌واری را نشان می‌دهد که در آن موجی تخت با طول‌موج λ به مانعی می‌رسد که شکافی به پهنای a دارد. در شکل ۴ــ۲۵ الف، پهنای شکاف خیلی بزرگ‌تر از طول‌موج λ است ($a=۶/۰\lambda$). همان‌طورکه دیده می‌شود قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد تقریباً تخت باقی می‌ماند. در شکل ۴ــ۲۵ ب، پهنای شکاف کمتر شده است ($a=۳/۰\lambda$) و همان‌طور که می‌بینید قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد از حالت موج تخت خارج شده و نسبت به حالت قبل، مقدار بیشتری به اطراف گسترده شده است. در شکل ۴ــ۲۵ پ، که پهنای شکاف، $a=۱/۵\lambda$ شده است، قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد کاملاً از حالت موج تخت خارج و به اطراف شکاف گسترده شده است.

به این پدیده که موج در عبور از یک شکاف با پهنایی از مرتبهٔ طول‌موج، به اطراف گسترده می‌شود، **پراش** می‌گویند. پراش فقط به وضعیت عبور موج از یک شکاف باریک (یا روزنه) محدود نمی‌شود بلکه هنگام عبور موج از لبه‌های مانعی که ابعاد آن در حدود طول‌موجِ موج باشد نیز رخ می‌دهد. پراش برای همهٔ انواع موج اتفاق می‌افتد. برای مثال شکل ۴ــ۲۶، پراش امواج تخت را روی سطح آب در یک تشت موج، هنگام عبور امواج از یک شکاف باریک نشان می‌دهد.

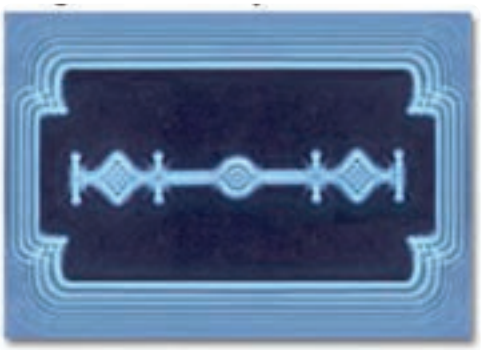
البته پراش در واقع چیزی فراتر از صرفاً یک گستردگی بیشتر موج است و مثلاً اگر پراش نوری تکفام از یک شکاف باریک یا لبه‌ای تیز را روی یک پرده ملاحظه کنیم، همواره نوارهای تاریک و روشنی موسوم به **نقش پراش** را موازی با لبه‌های شکاف مشاهده می‌کنیم. شکل ۴ــ۲۷، نقش پراش نوری تکفام از لبه‌های تیز درون و بیرون یک تیغ را نشان می‌دهد. تحلیل نقش پراش مبتنی بر بحثِ تداخل امواج است. تداخل امواج را در بخش بعد می‌آموزیم.



شکل ۴ــ۲۵ پراش به‌طور طرح‌وار برای سه شکاف با پهناهای مختلف و به‌ازای یک طول‌موج مشخص فرودی نشان داده شده است. هرچه پهنای شکاف کوچک‌تر شده پراش بارزتر شده است.



شکل ۴ــ۲۶ پراش امواج تخت هنگام عبور از شکافی باریک در تشت موج



شکل ۴ــ۲۷ پراش نوری تکفام که از لبه‌های تیز درون و بیرون یک تیغ ایجاد شده است.

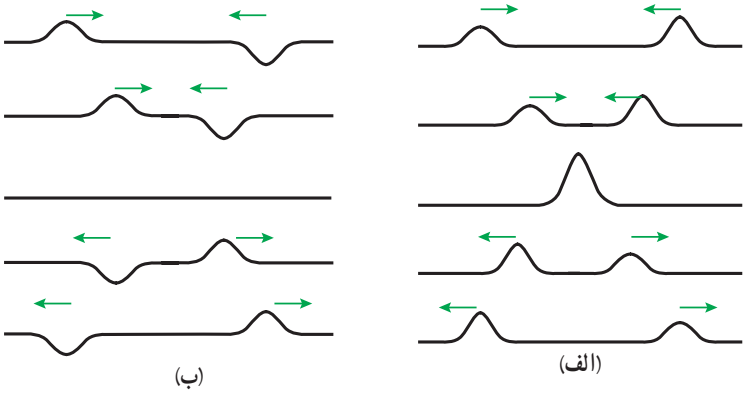
پرسش ۴ــ۴

در تلویزیون‌های متداول، سیگنال‌ها از آنتن‌های روی دکل‌ها به گیرنده‌های تلویزیون فرستاده می‌شود. حتی وقتی گیرنده به دلیل وجود یک تپه یا ساختمان در معرض ارسال مستقیم امواج یک آنتن نباشد، همچنان سیگنال را به دلیل پراش امواج از لبه‌های مانع دریافت خواهد کرد (اگر سیگنال در اطراف آن مانع به حد کافی به داخل «ناحیهٔ سایهٔ» مانع پراشیده شود). سابق بر این، طول‌موج سیگنال‌های تلویزیونی در حدود ۵۰ cm بود، ولی طول‌موج سیگنال‌های تلویزیونی دیجیتالی که امروزه از آنتن‌ها فرستاده می‌شود بسیار کمتر است. آیا این تغییر طول‌موج، پراش سیگنال‌ها به داخل ناحیهٔ سایه را افزایش می‌دهد یا کاهش؟

۴ــ۴ تداخل امواج

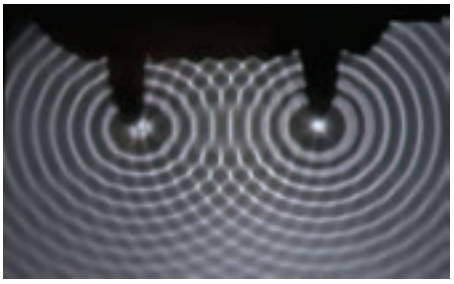
وقتی در تالاری به نوای موسیقی گوش می‌دهید، امواج صوتی حاصل از سازهای مختلف به‌طور هم‌زمان به گوشتان می‌رسد. الکترون‌ها در آنتن گیرنده‌های رادیو و تلویزیون تحت تأثیر هم‌زمان امواج الکترومغناطیسی زیادی که از فرستنده‌های مختلف ارسال می‌شوند، به حرکت می‌افتند. آب یک دریاچه یا بندرگاه ممکن است بر اثر تأثیر هم‌زمان موج‌هایی که به دنبال تعداد زیادی قایقِ در حال حرکت به‌راه می‌افتند، متلاطم شود. اینها همگی نمودهایی از اصل برهم‌نهی امواج هستند که بیان می‌دارد وقتی چندین موج به‌طور هم‌زمان بر ناحیه‌ای از فضا تأثیر بگذارند، اثر خالص آنها برابر مجموع اثرهای مجزای هر یک از آنها است.

شکل ۴ــ۲۸، عکس‌های دو تپ را که در جهت‌های مخالف هم در یک ریسمانِ کشیده شده حرکت می‌کنند در چند لحظهٔ متوالی نشان می‌دهد. وقتی این تپ‌ها به هم می‌رسند و با یکدیگر همپوشانی می‌کنند، بنا بر اصل برهم‌نهی، تپ برایند با مجموع دو تپ برابر است. توجه کنید چه برای تپ‌ها و چه برای موج‌هایی که همپوشانی می‌کنند، آنها به هیچ وجه شکل و حرکت یکدیگر را تغییر نمی‌دهند، و بنابراین پس از همپوشانی، بدون هرگونه تغییر شکلی به حرکت خود ادامه می‌دهند. به ترکیب موج‌ها با یکدیگر، تداخل می‌گویند. به بیان دیگر تداخل، ترکیب دو یا چند موج است که هم‌زمان از یک منطقه عبور می‌کنند. در شکل ۴ــ ۲۸ الف، تپ‌ها هنگام همپوشانی تپ بزرگ‌تری را ایجاد کرده‌اند که به آن تداخل سازنده می‌گویند، در حالی که در شکل ۴ــ۲۸ ب، تپ‌ها هنگام همپوشانی اثر یکدیگر را حذف کرده‌اند که به آن تداخل ویرانگر می‌گویند. تداخل‌های سازنده و ویرانگر برای موج‌ها نیز همچون تپ‌ها رخ می‌دهد که آن را در قسمت‌های بعدی بررسی خواهیم کرد.

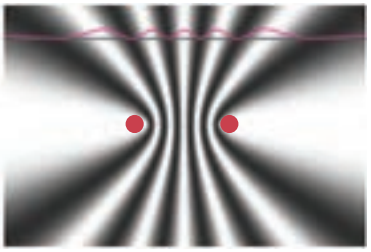


شکل ۴ــ۲۸ دو تپ پیش‌رونده در جهت‌های مخالف هم در طول یک ریسمان کشیده که با یکدیگر الف) تداخل سازنده و ب) تداخل ویرانگر انجام می‌دهند.

تداخل امواج سطحی آب: برای مشاهدهٔ تداخل امواج سطحی بر سطح آب، دو گوی کوچک را با بسامد یکسان، به‌طور هم‌زمان بر سطح آب به نوسان درمی‌آوریم. دو دسته موج دایره‌ای ایجاد می‌شود که بی‌آنکه بر انتشار یکدیگر تأثیر بگذارند با یکدیگر همپوشانی می‌کنند و نقشی مانند نقش شکل ۴ــ۲۹ را بر سطح آب به‌وجود می‌آورند. امواج در برخی نقاط همدیگر را تقویت می‌کنند و تداخل سازنده انجام می‌دهند و در برخی نقاط همدیگر را تضعیف می‌کنند و تداخل ویرانگر انجام می‌دهند. به عبارتی، برآمدگی‌ها یا فرورفتگی‌های دو موج که در یک زمان در نقطه‌ای به همدیگر برسند، سطح آب را در آن نقطه به‌شدت بالا یا پایین می‌برند، در



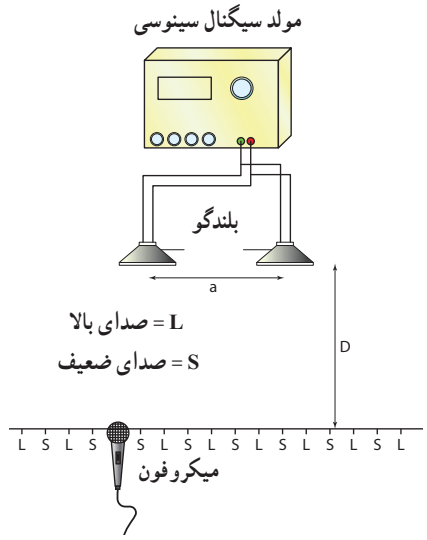
شکل ۴ــ۲۹ تداخل امواج دایره‌ای بر سطح آب یک تشت موج. هرگاه فاصلهٔ دو گوی از هم از طول‌موج بزرگ‌تر باشد چنین نقشی ایجاد می‌شود.



شکل ۴ــ۳۰ طرحی از نواحی بیشینه‌ها و کمینه‌های یک نقش تداخلی حاصل از امواج سطحی آب. نمودار آبی‌رنگ، دامنهٔ موج برایند است که همان‌طور که می‌بینیم در نواحی با تداخل سازنده (نواحی کاملاً روشن) بیشینه و در نواحی با تداخل ویرانگر (نواحی کاملاً تیره) کمینه است.

حالی که اگر برآمدگی یک موج در یک زمان و در یک نقطه به فرورفتگی موج دیگر برسد، دو موج یکدیگر را تضعیف می‌کنند و بنابراین سطح آب در چنین نقطه‌ای نوسان چندانی نخواهد داشت. به این ترتیب، در برخی نواحی روی سطح آب دامنهٔ موج برایند بیشینه و در برخی ناحیه‌ها، کمینه است. چنین نقش متناوب یک‌درمیانی از بیشینه‌ها و کمینه‌ها را نقش تداخلی امواج سطحی آب می‌نامیم و آنها را به‌وضوح می‌توانیم در سایهٔ تشکیل شده بر سطح ورقهٔ کاغذ زیر تشت موج مشاهده کنیم (شکل ۴ــ۳۰).

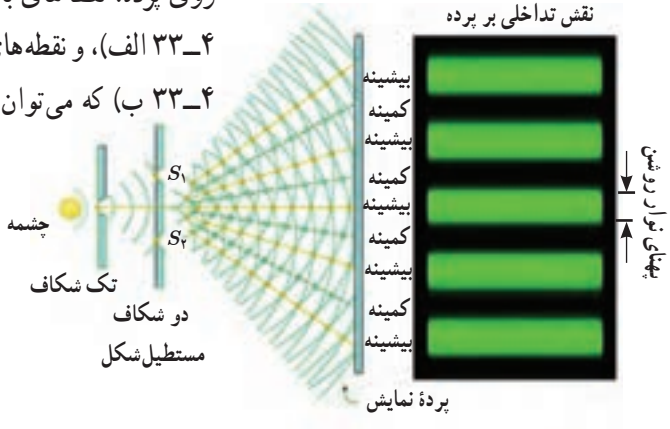
تداخل امواج صوتی: امواج صوتی نیز می‌توانند تداخل کنند. به این منظور، آزمایش نشان داده شده در شکل ۴ــ۳۱ را در نظر بگیرید. در این آزمایش دو بلندگو که به یک مولّد سیگنال الکتریکی متصل‌اند امواج سینوسی هم‌بسامدی را در فضا منتشر می‌کنند. با حرکت دادن میکروفون در امتداد خط فرضی نشان داده شده در شکل که در فاصلهٔ مناسبی از بلندگوها قرار دارد درمی‌یابیم که بلندی صدا به‌طور متناوب کم و زیاد می‌شود. علت این پدیده را به‌سادگی می‌توان براساس تداخل‌های سازنده و ویرانگر امواج صوتی توضیح داد. (چگونه؟)



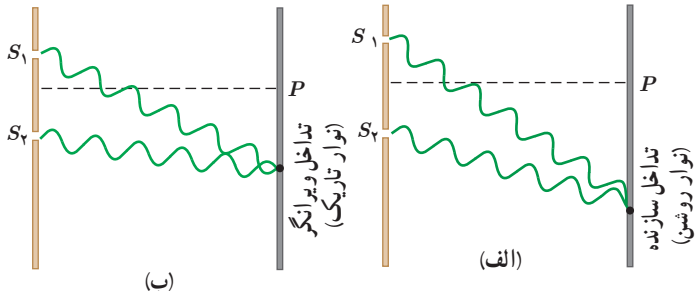
شکل ۴ــ۳۱ تداخل سازنده و ویرانگر امواج صوتی

تداخل امواج نوری: در سال ۱۸۰۱ میلادی توماس یانگ (۱۸۲۹ــ۱۷۷۳ م.) دانشمند انگلیسی به‌طور تجربی ثابت کرد نور یک موج است که این بر خلاف نظر بیشتر فیزیک‌دانان آن زمان بود. در واقع او نشان داد که نور نیز مانند موج‌های سطحی آب، موج‌های صوتی و همهٔ انواع موج‌های دیگر تداخل می‌کند.

شکل ۴ــ۳۲، طرحی از چگونگی آزمایش اولیهٔ یانگ برای تحقیق تداخل امواج نوری را نشان می‌دهد. نور حاصل از یک چشمهٔ تکفام (اینجا سبزرنگ) بر تک‌شکافی می‌تابد. سپس نور خروجی بر اثر پراش، گسترده می‌شود و دو شکاف S_1 و S_2 را روشن می‌کند. موج‌های حاصل از پراش نور توسط این دو شکاف با یکدیگر تداخل می‌کنند و نقش حاصل از این تداخل را می‌توان روی پرده‌ای که در ناحیهٔ سمت راست دو شکاف قرار دارد مشاهده کرد. روی پرده، نقطه‌های با تداخل سازنده، نوارها یا فریزهای[1] روشن را تشکیل می‌دهند (شکل ۴ــ۳۳ الف)، و نقطه‌های با تداخل ویرانگر نوارها یا فریزهای تاریک را تشکیل می‌دهند (شکل ۴ــ۳۳ ب) که می‌توان آنها را بین نوارهای روشن مجاور شکل ۴ــ۳۲ مشاهده کرد. نقش



شکل ۴ــ۳۲ طرحی از آزمایش اولیهٔ یانگ. نور تکفام سبز توسط تک‌شکافی پراشیده می‌شود. با پراشیدن این نور از دو شکاف بعدی، امواج نوری تداخل می‌کنند و نقشی تداخلی (نوارهای روشن و تاریک روی پرده) به وجود می‌آورند. توجه کنید پهنای نوارهای روشن و تاریک در این نقش یکسان فرض شده است.



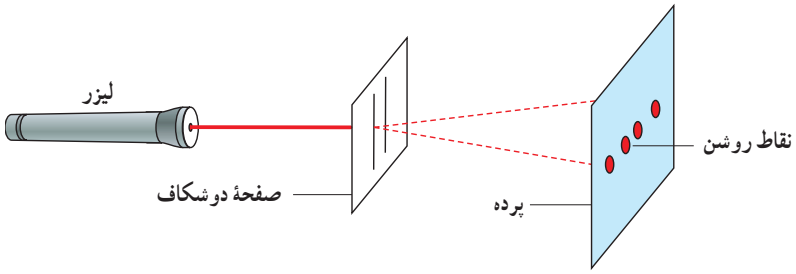
شکل ۴ــ۳۳ الف) دو موج همدیگر را تقویت می‌کنند و در نتیجه تداخل آنها سازنده است. ب) دو موج همدیگر را تضعیف می‌کنند و در نتیجه تداخل آنها ویرانگر است.

۱ــ fringes

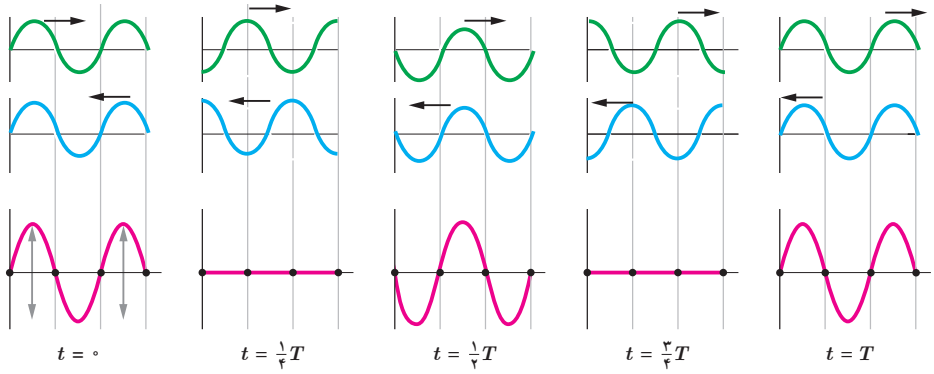
نوارهای روشن و تاریک روی پرده که ناشی از تداخل‌های سازنده و ویرانگرند، نقش تداخلی خوانده می‌شود. طرحی از این نقش در سمت راست شکل ۴ــ۳۲، برای نور تکفام سبز نشان داده شده است. در این نقش پهنای هر نوار تاریک یا روشن (که مساوی فرض می‌شوند) متناسب با طول‌موج نور به‌کار رفته در آزمایش است. با استفاده از آزمایش یانگ می‌توان طول‌موج نور به‌کار رفته در آزمایش را تعیین کرد که در اینجا به آن نمی‌پردازیم.

فعالیت ۴ــ۵

مشاهدهٔ نقش تداخلی به کمک نور لیزر : اگر از نور لیزر استفاده کنیم، دیگر نیازی به استفاده از یک تک‌شکاف در آزمایش یانگ نیست. با استفاده از یک لیزر مدادی، صفحهٔ دو شکاف آزمایش یانگ را مطابق شکل روشن کنید (شاید لازم باشد از یک عدسی واگرا در برابر نور لیزر استفاده کنید تا هر دو شکاف روشن شود) و نقش تداخلی ایجادشده را روی پرده مشاهده کنید. برای تهیهٔ صفحهٔ دو شکاف می‌توانید یک وجه تیغه‌ای شیشه‌ای (مانند لام میکروسکوپ) را با قرار دادن تیغه روی شعلهٔ شمع به‌خوبی دوداندود کنید، سپس با تیغ تیزی دو خط نزدیک به هم (با فاصلهٔ چند دهم میلی‌متر از یکدیگر) روی تیغهٔ شیشه‌ای بکشید.



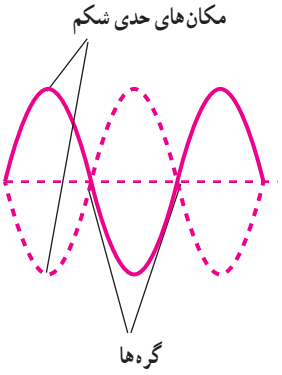
موج ایستاده و تشدید در ریسمان کشیده : ریسمانی را تصور کنید که در یک انتها ثابت شده است و انتهای دیگر آن به نوسان درمی‌آید. وقتی موج بازتابیده از انتهای ثابت (که در شکل ۴ــ۳۴ با رنگ آبی مشخص شده است و به سمت چپ حرکت می‌کند) با موج تابیده (که در شکل ۴ــ۳۴ با رنگ سبز مشخص شده است و به سمت راست حرکت می‌کند) ترکیب شوند موجی برایند ایجاد می‌کنند که شکل آن از اصل برهم‌نهی حاصل می‌شود (این موج در شکل ۴ــ۳۴ با رنگ قرمز مشخص شده است). مشخصهٔ بارز این موج برایند آن است که مکان‌هایی در طول ریسمان، موسوم به گره، وجود دارد که در آنها ریسمان هرگز حرکت نمی‌کند. وسط گره‌های مجاور را شکم می‌گویند که دامنهٔ موج برایند در آنجا بیشینه است. نقش موج برایند را در این حالت، موج ایستاده می‌گویند، زیرا نقش‌های این موج به چپ



شکل ۴ــ۳۴ چند عکس لحظه‌ای از تشکیل یک موج ایستاده در یک ریسمان کشیده شده در مدت یک دوره

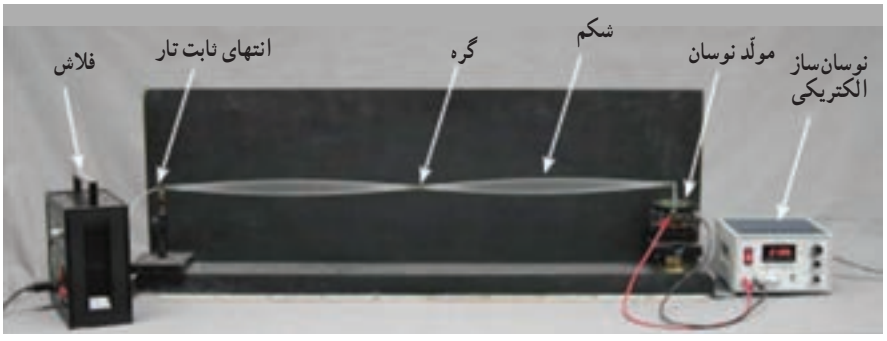
یا راست حرکت نمی‌کنند و محل شکم‌ها و گره‌ها تغییر نمی‌کند. شکل ۴ــ۳۴، چند عکس در لحظه‌های مختلف از موج‌های تابیده، بازتابیده، و موج برایند آنها را نشان می‌دهد. از روی شکل درمی‌یابیم که فاصلهٔ گره‌های مجاور از هم برابر با نصف طول‌موج ($\lambda/2$) و بنابراین فاصلهٔ گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر با ربع طول‌موج ($\lambda/4$) است. شکل ۴ــ۳۵، طرحی از موج ایستاده در این ریسمان را نشان می‌دهد که در آن حالت‌های مختلف ریسمان در لحظات مختلف شکل ۴ــ۳۴ دیده می‌شود.

اگر در شکل ۴ــ۳۴ به موج‌های تابیده و بازتابیده در مکان گره‌ها و در لحظه‌های مختلف نگاه کنیم، می‌بینیم که در تمام لحظات وضعیت موج‌های تابیده و بازتابیده در هر یک از گره‌ها به گونه‌ای است که یکدیگر را حذف و اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند (تداخل ویرانگر). در این حالت اصطلاحاً می‌گوییم این دو موج در این نقطه‌ها (گره‌ها) کاملاً ناهم‌فاز (در فاز مخالف)اند. اما در مکان هر یک از شکم‌ها وضعیت موج‌های تابیده و بازتابیده در تمام لحظات به گونه‌ای است که همدیگر را تقویت می‌کنند (تداخل سازنده). در این حالت اصطلاحاً می‌گوییم این دو موج در این نقاط هم‌فازند.



شکل ۴ــ۳۵ شکل یک موج ایستاده که با گره‌ها و شکم‌ها بر یک ریسمان نشان داده شده است. مرسوم است در رسم موج‌های ایستاده، دو مکان حدی شکم‌ها نشان داده شود.

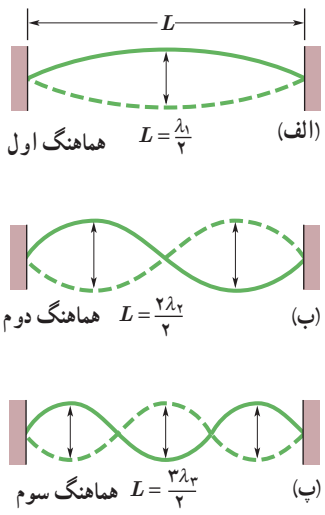
بسامدهای تشدید تار : شکل ۴ــ۳۶ تصویری واقعی از اسباب آزمایشی را نشان می‌دهد که در آن تاری کشیده شده، از یک سر به یک مولد نوسان و از سر دیگر به گیره‌ای متصل است. به‌ازای بسامدهای معیّنی از مولّد نوسان، تداخل موجب ایجاد موج ایستادهٔ بارزی (یا اصطلاحاً یک *شِکم نوسان*) در تار می‌شود. گفته می‌شود تار در این بسامدهای معیّن که بسامدهای تشدیدی خوانده می‌شوند به تشدید درآمده است. اگر تار در بسامدی غیر از بسامدهای تشدیدی نوسان کند موج ایستادهٔ بارزی ایجاد نمی‌شود.



شکل ۴ــ۳۶ اسباب آزمایشی برای ایجاد موج ایستاده در تار کشیده. توجه کنید سری که به مولّد نوسان متصل است، تقریباً در محل گره واقع است.

توجه کنید که اگرچه در این آزمایش از یک نوسان‌ساز الکتریکی برای ایجاد ارتعاش در تار استفاده کردیم، اما در سازهای موسیقی، موج‌های ایستاده را می‌توان با ضربه زدن بر تارها (مانند سنتور، سه‌تار، پیانو) و پوسته‌ها (مانند طبل، دف، تنبک)، و یا دمیدن در ستون‌های هوا (مانند نی، فلوت، اُرگ) ایجاد کرد.

در آزمایش نشان داده شده در شکل ۴ــ۳۶، و در بسامدهای تشدیدی تار، ساده‌ترین نقش موج ایستاده فقط یک شکم دارد که در مرکز ریسمان واقع است (شکل ۴ــ۳۷ الف). نقش سادهٔ بعدی وضعیتی است که سه گره و دو شکم داریم (شکل ۴ــ۳۷ ب). نقش سوم، چهار گره و سه شکم دارد (شکل ۴ــ۳۷ پ). در حالت کلی اگر طول این تار را با L نشان دهیم برای نقش موج ایستاده‌ای با



شکل ۴ــ۳۷ سه نقش موج ایستاده برای ریسمانی که بین دو گیره کشیده شده است.

n شکم داریم :

و در نتیجه :

$$L = n(\frac{\lambda_n}{۲})$$

(۴ـ۴) (طول‌موج‌های تشدیدی تار) $\quad \lambda_n = \frac{۲L}{n} \quad , \quad n = ۱, ۲, ۳, \ldots$

بنابراین بسامدهای تشدیدی متناظر با این طول‌موج‌ها چنین می‌شود :

(۴ـ۵) (بسامدهای تشدیدی تار) $\quad f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{۲L} \quad , \quad n = ۱, ۲, ۳, \ldots$

مدهای نوسان را با بسامدهای تشدیدی مشخص می‌کنند. پایین‌ترین بسامد را که مربوط به $n = ۱$ است، *بسامد اصلی* و مد مربوط به آن را *مد اصلی* یا *هماهنگ اول* می‌گویند. بسامد هماهنگ دوم به‌ازای $n = ۲$، بسامد هماهنگ سوم به‌ازای $n = ۳$ و ... به‌دست می‌آید. به n عدد هماهنگ گفته می‌شود.

مثال ۴ـ۳

طول یکی از تارهای پیانویی $۱/۱۰\,m$ و جرم آن $۹/۰۰\,g$ است. اگر بسامد اصلی این تار $۱۳۱\,Hz$ باشد، الف) تندی انتشار موج عرضی در تار چقدر است؟ ب) این تار تحت چه کششی قرار دارد؟ پ) بسامدهای چهار هماهنگ نخست این تار چقدر است؟

پاسخ : الف) با استفاده از رابطه ۴ـ۵ داریم :

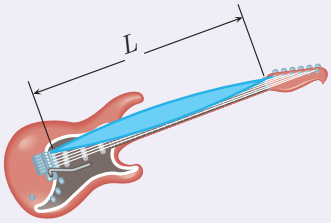
$$f_n = \frac{nv}{۲L} \Rightarrow (۱۳۱\,Hz) = \frac{(۱)v}{(۲)(۱/۱۰\,m)} \Rightarrow v = ۲۸۸/۲\,m/s \simeq ۲۸۸\,m/s$$

ب) از رابطهٔ $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{F}{m/L}}$ استفاده می‌کنیم.

$$v = \sqrt{\frac{FL}{m}} \Rightarrow (۲۸۸/۲\,m/s) = \sqrt{\frac{F(۱/۱۰\,m)}{(۹/۰۰\times۱۰^{-۳}\,kg)}} \Rightarrow F = ۶۷۹/۶\,N \approx ۶۸۰\,N$$

پ) بدیهی است که بسامد هماهنگ اول همان بسامد اصلی است و بنابراین $f_۱ = ۱۳۱\,Hz$. بسامد هماهنگ‌های بعدی طبق رابطهٔ ۴ـ۵، به‌ازای $n = ۲$، $n = ۳$، و $n = ۴$ به‌دست می‌آید و بنابراین $f_۲ = ۲f_۱ = ۲۶۲\,Hz$ ، $f_۳ = ۳f_۱ = ۳۹۳\,Hz$ و $f_۴ = ۴f_۱ = ۵۲۴\,Hz$.

تمرین ۴ـ۵



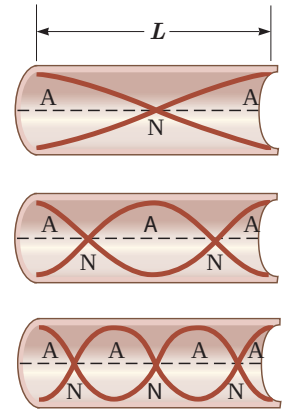
سنگین‌ترین تار یک گیتار الکتریکی دارای چگالی خطی جرمی $۵/۲۸\times۱۰^{-۳}\,kg/m$ است و تحت کشش $۲۲۶\,N$ قرار دارد. این تار در هنگام ارتعاش، نُتی با بسامد $۱۶۴/۸\,Hz$ را ایجاد می‌کند که بسامد اصلی تار است. الف) طول تار را به‌دست آورید. ب) پس از مدتی که یک نوازنده، این گیتار را می‌نوازد، در نتیجهٔ گرم شدن و شُل شدنِ تارها، نیروی کشش تار مورد نظر کاهش می‌یابد و به $۲۰۹\,N$ می‌رسد. در این حالت بسامد اصلی این تار چقدر شده است؟

پرسش ۴ـ۵

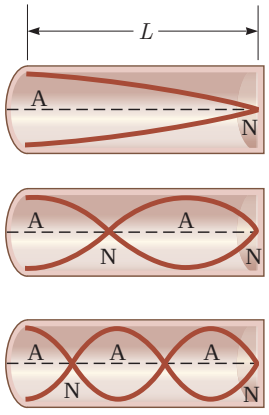
الف) چرا با سفت کردن سیم گیتار، بسامدی که هنگام نواختن می‌شنوید زیاد می‌شود؟

ب) چرا نوازندگان گیتار پیش از نواختن روی صحنهٔ نمایش، گیتار را به حد کافی می‌نوازند و سپس آن را مجدداً کوک می‌کنند؟

موج ایستاده و تشدید در لوله‌های صوتی : در مورد ریسمان کشیده دیدیم چگونه برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف نقش یک موج ایستاده را ایجاد می‌کند. به همین ترتیب می‌توان موج‌های صوتی ایستاده را در لوله‌ای پرشده از هوا ایجاد کرد. وقتی موج‌های صوتی در هوای درون لوله حرکت می‌کنند، از هر انتها بازمی‌تابند و به درون لوله بازمی‌گردند، حتی اگر آن انتها باز باشد (البته اگر انتهای لوله باز باشد این بازتاب به کاملی بازتابی نیست که از یک انتهای بسته رخ می‌دهد). درست مانند تار کشیده اگر طول لوله مضرب‌های معیّنی از طول‌موجِ موج صوتی باشد، برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف، نقش موج ایستادهٔ بارزی را در لوله ایجاد می‌کند. بسیاری از مشخصه‌های این موج ایستاده مشابه موج‌های ایستاده در ریسمان است : انتهای بستهٔ لوله مانند انتهای ثابت شدهٔ ریسمان است که در آنجا باید یک گره وجود داشته باشد، و در انتهای باز لوله نیز یک شکم وجود دارد[۱]. همچنین فاصلهٔ گره‌های مجاور از هم برابر $\lambda/2$ و فاصلهٔ گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر $\lambda/4$ است. در شکل ۴ــ۳۸ نقش چنین موج ایستاده‌ای در یک لوله با دو انتهای باز و در شکل ۴ــ۳۹ این نقش در یک لوله با یک انتهای باز، برای سه مد اول رسم شده است[۲].



شکل ۴ــ ۳۸ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با دو انتهای باز (شکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص شده‌اند.)



شکل ۴ــ۳۹ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز (شکم‌ها با A و گره ها با N مشخص شده‌اند.)

پرسش ۴ــ۶

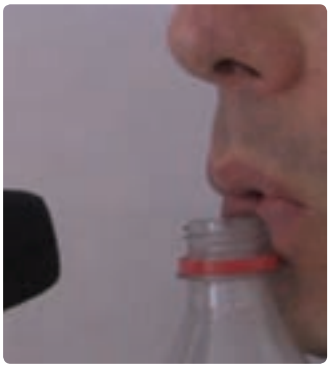
چرا وقتی آب را به درون ظرفی با دیواره‌های قائم مثل لیوان یا پارچ می‌ریزید، بسامد صدایی که می‌شنوید افزایش می‌یابد، یعنی صدای زیرتر و زیرتری را می‌شنوید؟ (*راهنمایی: صدای حاصل از پرشدن ظرف گسترهٔ وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه، یکی از آنها با پایین‌ترین بسامد تشدیدی هوای درون ظرف ــ بسامد مد اول ــ منطبق است.*)

۱ــ البته برای انتهای باز یک لولهٔ صوتی که در آن موج ایستاده تشکیل شده است، در حالت‌های تشدیدی، شکم اندکی بیرون از این انتها قرار دارد که در این کتاب آن را در نظر نمی‌گیریم.

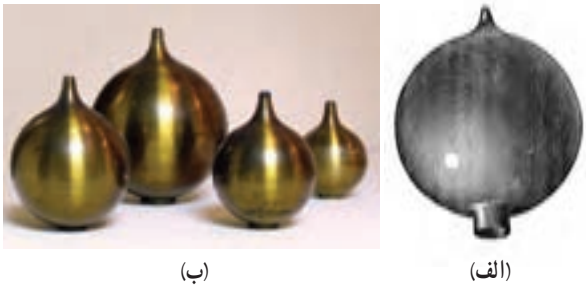
۲ــ محاسبه‌های مربوط به لوله‌های صوتی خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

تشدید در بطری و تشدیدگر هلمهولتز : اگر در دهانهٔ باریک یک بطری بدمید، می‌توانید آن را به صدا درآورید (شکل ۴ــ ۴۰). در واقع یک بطری مانند یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز است که بسامدهای تشدیدی معیّنی دارد. وقتی در دهانهٔ یک بطری می‌دمیم گسترهٔ وسیعی از بسامدها ایجاد می‌شود. حال اگر یکی از این بسامدها با یکی از بسامدهای تشدیدی بطری منطبق باشد، یک موج صوتی قوی ایجاد می‌شود. البته نوسان‌های بطری دقیقاً مانند نوسان‌هایی نیست که در یک لولهٔ صوتی ساده ایجاد می‌شود، زیرا بطری یک گردن دارد و هوای موجود در این گردن با هوای موجود در بقیهٔ قسمت‌های بطری چیزی موسوم به تشدیدگر هلمهولتز را تشکیل می‌دهد که این موجب نوسانات هوای درون بطری می‌شود. نوع اولیهٔ تشدیدگر هلمهولتز کره‌هایی توخالی با دهانه‌ای باز به شکل یک گردن است که در سال ۱۸۵۰ میلادی توسط دانشمند آلمانی، هرمن فون هلمهولتز، ساخته شد (شکل ۴ــ۴۱). تشدیدگرهای هلمهولتز نیز همانند لوله‌های صوتی بسامدهای تشدیدی معیّنی دارند و هرگاه بسامد یک صوت برابر با یکی از بسامدهای تشدیدی آنها باشد، تشدیدگر پاسخ قوی‌تری به این صوت می‌دهد.

هرمن فون هلمهولتز (۱۸۹۴ــ۱۸۲۱م.)
در آلمان به دنیا آمد. او نخست به مطالعهٔ زبان‌شناسی و فلسفه پرداخت و سپس به سَمت علوم طبیعی گرایش پیدا کرد. وی در سال ۱۸۴۹ دانشیار فیزیولوژی دانشگاه کونگزبرگ شد. در سال ۱۸۵۵ به استادتمامی رشته‌های آناتومی و فیزیولوژی دانشگاه بُن رسید. سه سال بعد به دانشگاه هایدلبرگ رفت و استاد فیزیولوژی آن دانشگاه شد. آخرین مقام دانشگاهی او، استادی فیزیک در دانشگاه برلین بود که از سال ۱۸۷۱ تا پایان عمر در آنجا خدمت کرد و شاگردان درخشانی چون هاینریش هرتز، ویلهم وین، اُتو لومر، آلبرت مایکلسون، فردریک شانکی و... تربیت کرد. هلمهولتز نابغه‌ای بزرگ بود که به علوم فیزیولوژی، تشریح، فیزیک و ریاضی تسلط داشت. برخی از اکتشاف‌های وی عبارت‌اند از اندازه‌گیری سرعت سیگنال‌های عصبی، تجزیه و تحلیل حرکت امواج صوتی، نظریهٔ هماهنگ‌های موسیقایی و نظریهٔ دید رنگ‌ها. دستگاه افتالموسکوپ که امروزه در پزشکی از آن برای تشخیص بیماری‌های چشم استفاده می‌شود، از اختراعات اوست.



شکل ۴ــ۴۰ با دمیدن در دهانهٔ یک بطری، می‌توانید آن را به‌صدا درآورید.

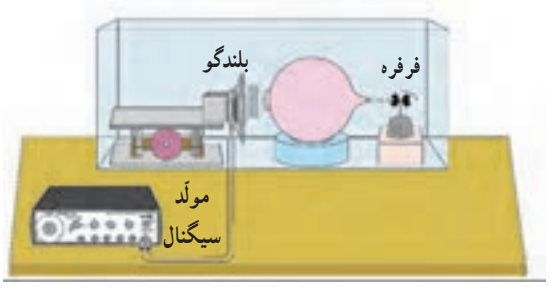


(الف) (ب)

شکل ۴ــ۴۱ الف) طرحی از تشدیدگر اولیه هلمهولتز و ب) تصویری از چند تشدیدگر هلمهولتز کروی با اندازه‌های متفاوت

فعالیت ۴ــ۶

یک بلندگو را در برابر دهانهٔ یک تشدیدگر هلمهولتز با بسامدهای تشدیدی معیّن قرار دهید و جلوی زائدهٔ خروجی آن یک شمع روشن یا یک فرفرهٔ کوچک و کم‌اصطکاک بگذارید. بسامد صوت ایجاد شده توسط بلندگو را در نزدیکی بسامد تشدید تشدیدگر آن‌قدر کم و زیاد کنید تا شعلهٔ شمع، منحرف شود و یا فرفره شروع به چرخیدن کند. درصورتی‌که منبع صوتی با بسامد قابل تنظیم ندارید می‌توانید از چند دیاپازون با بسامدهای معلوم و متفاوت، که بسامد یکی از آنها با یکی از بسامدهای تشدیدی تشدیدگر برابر باشد، استفاده کنید[۱]. دلیل آنچه را که مشاهده می‌کنید در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

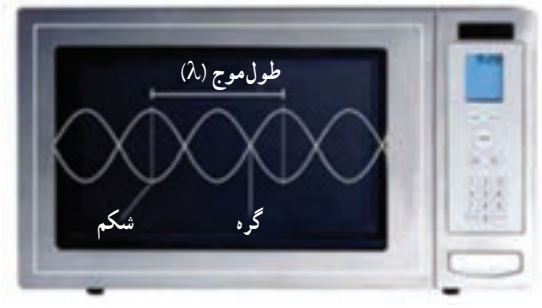


۱ــ می‌توانید از برنامه‌هایی با نام‌های Audio Generator، Function Generator، Signal Generator، و Sound Generator که روی گوشی همراه نصب می‌شوند نیز به‌عنوان منبع صوتی با بسامد قابل تنظیم استفاده کنید.

پرسش ۴ـ۷

با دمیدن در بطری‌های یکسان با سطوح مایع مختلف می‌توان آهنگی با بسامدهای متفاوت ایجاد کرد. دلیل آن چیست؟

فنّاوری و کاربرد: امواج ایستاده در اجاق‌های میکروموج



تصویری یک بُعدی از ایجاد امواج ایستاده در داخل یک اجاق میکروموج

اجاق‌های میکروموج (مایکروفر) بر اساس تداخل امواج الکترومغناطیسی و تشکیل امواج ایستاده کار می‌کنند. بسامد امواج ایستادهٔ ایجاد شده در این اجاق‌ها ۲/۴۵۰ GHz و طول‌موج آنها حدود ۱۲ cm است. میکروموج‌های بازتابیده از دیواره‌های فلزی اجاق با برهم‌نهی با موج‌های تابیده، موج‌های ایستاده‌ای را در داخل محفظهٔ اجاق ایجاد می‌کنند که از گره‌ها و شکم‌ها تشکیل شده‌اند. در محل شکم‌ها دامنهٔ نوسان میدان الکتریکی بیشینه است. مولکول‌های آب موجود در مواد غذایی در این نقاط به‌شدت به ارتعاش درمی‌آیند و بیشترین افزایش دما ایجاد می‌شود. در حالی که در محل گره‌ها، دامنهٔ نوسان میدان الکتریکی صفر است و هیچ نوسان میدان الکتریکی‌ای نداریم که موجب پختن یا گرم شدن مواد غذایی شود و در گره‌ها اصطلاحاً نقاط سرد داریم. بنابراین غذا به‌طور یکنواخت پخته یا گرم نمی‌شود. به همین دلیل اجاق‌های میکروموج صفحه‌های گردانی دارند تا با گرداندن غذا در اجاق، هیچ بخشی از غذا در گره (نقطهٔ سردی) باقی نماند.

فعالیت ۴ـ۷

تداخل در امواج الکترومغناطیسی (آزمایش هرتز): اگرچه ماکسول پیش از پایان قرن نوزدهم وجود امواج الکترومغناطیسی را پیش‌بینی کرده بود، این هرتز بود که با آزمایش‌های تداخلی خود که به تولید موج‌های الکترومغناطیسی ایستاده انجامید، وجود موج‌های الکترومغناطیسی را در گسترهٔ بسامد رادیویی اثبات کرد. هاینریش هرتز در سال ۱۸۸۸ میلادی با وسایل ابتدایی آن زمان این آزمایش را به انجام رسانید. در مورد چگونگی آزمایش هرتز تحقیق کنید.

۴ـ۱ بازتاب موج

۱. دانش‌آموزی بین دو صخرهٔ قائم ایستاده است و فاصلهٔ او از صخرهٔ نزدیک‌تر ۲۴۰m است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از ۱/۵۰s و صدای پژواک دوم را ۱/۰۰s بعد از پژواک اول می‌شنود.

الف) تندی صوت در هوا چقدر است؟

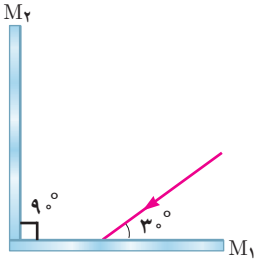
ب) فاصلهٔ بین دو صخره را بیابید.

۲. اگر در فاصلهٔ مناسبی از یک رشته پلکان بلند بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای برهم زدن دست می‌شنوید. نمونهٔ جالبی از این پدیده در برابر رشته پله‌های معبد قدیمی *کوکولکان*[۱] در مکزیک رخ می‌دهد. این معبد از ۹۲ پلهٔ سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.

تصویری از معبد کوکولکان

۳. وقتی یک باریکهٔ لیزر را به دیوار کلاس می‌تابانیم، همهٔ دانش‌آموزان نقطهٔ رنگی ایجاد شده روی دیوار را می‌بینند. دلیل آن چیست؟

۴. در شکل زیر پرتوهای بازتابیده از آینه‌های تخت M_1 و M_2 را رسم کنید.

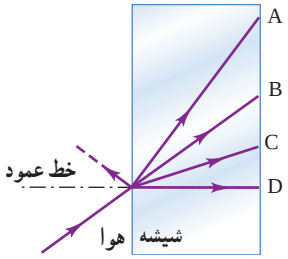


۱ـ Kukulkan Temple

۴ـ۲ شکست موج

۵. با رسم شکلی از جبهه‌های موج توضیح دهید چگونه جهت انتشار جبهه‌های موج با رسیدن به یک ساحل شیب‌دار، تغییر می‌کند.

۶. شکل زیر پرتویی را نشان می‌دهد که از هوا وارد شیشه شده است. کدام گزینه‌های A تا D، می‌تواند پرتوی داخل شیشه را نشان دهد؟



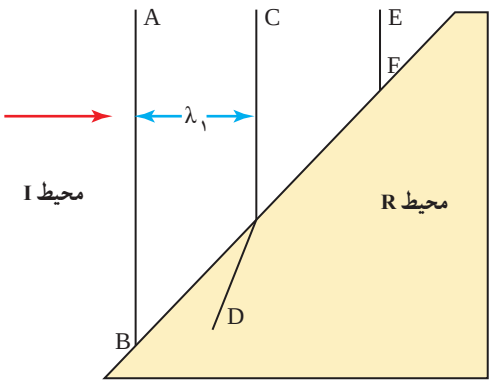
۷. ضریب شکست آب ۱/۳ و ضریب شکست شیشه ۱/۵ است. اگر نوری به‌طور مایل از آب به مرز شیشه با آب بتابد، با رسم نموداری، جبهه‌های موج را در دو محیط نشان دهید.

۸. شکل زیر جبهه‌های موجی را نشان می‌دهد که بر مرز بین محیط I و محیط R فرود آمده‌اند.

الف) ادامهٔ جبههٔ موج EF را در محیط R رسم کنید.

ب) توضیح دهید در کدام محیط تندی موج بیشتر است.

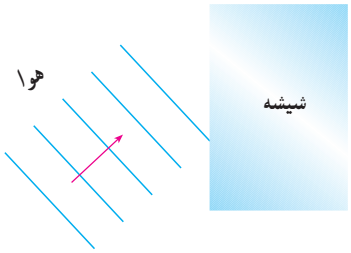
پ) آیا با استفاده از این نمودار می‌توان نسبت تندی موج عبوری به موج فرودی را محاسبه کرد؟



۹. در شکل زیر موج نوری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط بازمی‌تابد و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد شیشه می‌شود.

الف) مشخصه‌های موج بازتابیده و موج شکست‌یافته را با موج فرودی مقایسه کنید.

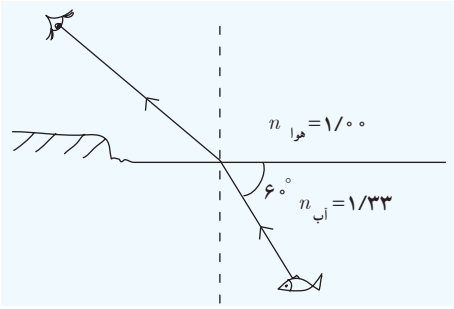
ب) جبهه‌های موج بازتابیده و شکست‌یافته را رسم کنید.



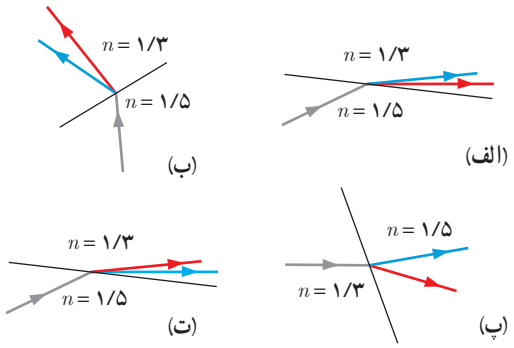
۱۰. طول‌موج نور قرمز لیزر هلیم ــ نئون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجیهٔ چشم ۴۷۴nm است. الف) بسامد این نور چقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجیه برای این نور چقدر است؟ پ) تندی این نور در زجاجیه را محاسبه کنید.

۱۱. سکه‌ای را در گوشهٔ فنجانی خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار گیرید که نتوانید سکه را ببینید. سپس بی‌آنکه سرتان را حرکت دهید به‌آرامی در فنجان آب بریزید، به‌طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکه نشود. با پرشدن فنجان، سکه را خواهید دید. با رسم پرتوها علت دیده شدن سکه را توضیح دهید.

۱۲. مطابق شکل، پرتو نوری که از ماهی به چشمان شخص می‌رسد تحت زاویهٔ 60° به مرز آب ــ هوا برخورد کرده است. زاویهٔ شکست این پرتو در هوا چقدر است؟



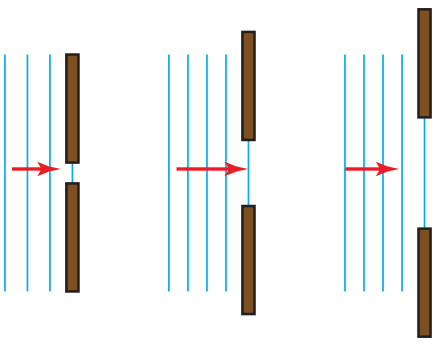
۱۳. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل نورهای قرمز و آبی است در سطح مشترک دو ماده شکست پیدا کرده‌اند. کدام شکل، شکستی را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟



۱۴. دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آنها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. به نظر شما با چه تجربه‌ای می‌توان بین این دو نظر، یکی را انتخاب کرد؟

۴ــ۳ پراش موج

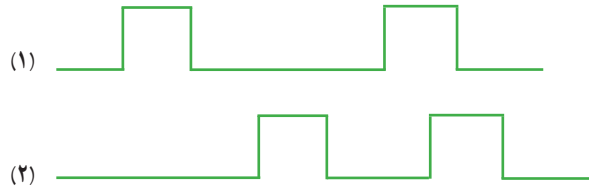
۱۵. در یک تشت موج، مطابق شکل زیر، موج تختی ایجاد شده است. توضیح دهید با باریک‌کردن شکاف‌ها چه شکلی برای جبهه‌های موج خروجی از آنها حاصل می‌شود.



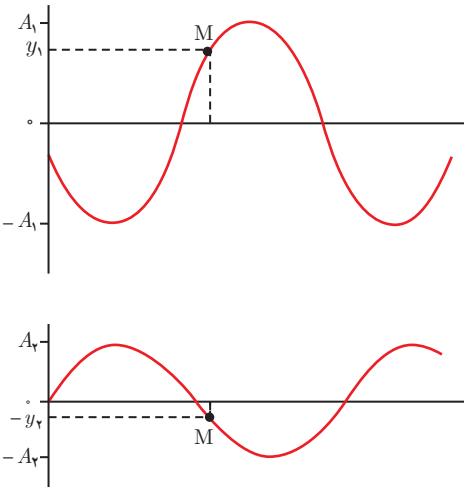
۱۶. گوشی‌های همراه با امواج رادیویی با بسامد حدود ۲GHz کار می‌کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از موانع پراشیده می‌شوند و به منطقهٔ سایهٔ مانع می‌رسند.

۴ـ۴ تداخل امواج

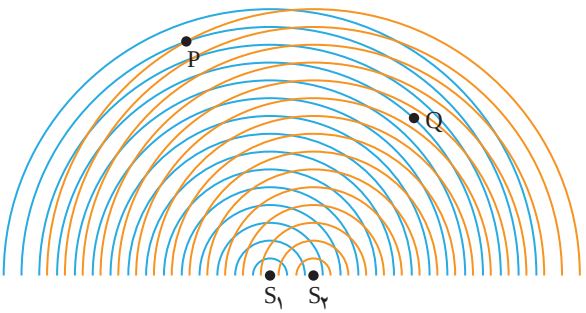
۱۷. در شکل‌های زیر، وقتی موج ۱ بر موج ۲ برهم نهاده شود شکل موج برهم‌نهاده را رسم کنید.



۱۸. شکل‌های زیر نمودار جابه‌جایی ــ مکان دو موج را در لحظهٔ معیّنی نشان می‌دهد. جابه‌جایی برایند نقطهٔ M در این لحظه چقدر است؟



۱۹. دو چشمهٔ نقطه‌ای $S_۱$ و $S_۲$ به‌طور هم‌زمان، با بسامد یکسان، و همگام با یکدیگر در یک تشت موج نوسان می‌کنند و جبهه‌های موجی را مطابق شکل زیر به‌وجود می‌آورند. توضیح دهید دامنهٔ موج برایند در نقطه‌های P و Q چگونه است؟



۲۰. در آزمایش تداخل صوتی (شکل ۴ـ۳۱ کتاب)، فاصلهٔ بین هر نقطهٔ با صدای بالا (L) تا نقطهٔ با صدای ضعیف (S) مجاورش، متناسب با طول‌موجِ موج صوتی به‌کار رفته در این آزمایش است. برای آنکه این آزمایش به‌سادگی انجام‌پذیر باشد باید فاصلهٔ نقطه‌های S و L مجاور نه خیلی زیاد، و نه خیلی کم باشد.

الف) بسامد صوت گسیل‌شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه‌های S و L مجاور به‌هم نزدیک شوند؟

ب) بسامد صوت گسیل‌شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه‌های S و L مجاور از هم دور شوند؟

۲۱. در آزمایش یانگ، الف) اگر آزمایش را به‌جای نور تکفام سبز با نور تکفام قرمز انجام دهیم پهنای هر نوار تاریک یا روشن چه تغییری می‌کند؟

ب) اگر آزمایش را به‌جای آنکه در هوا انجام دهیم، در آب انجام دهیم، پهنای هر نوار تاریک یا روشن چه تغییری می‌کند؟

۲۲. تاری که بین دو تکیه‌گاه محکم شده است در هماهنگ اول خود با بسامد f به نوسان درمی‌آید. شکل زیر جابه‌جایی تار در $t=۰$ را نشان می‌دهد.

الف) جابه‌جایی تار را در $t=\frac{۱}{۴f}$ و $t=\frac{۱}{۲f}$ رسم کنید.

ب) فاصلهٔ بین تکیه‌گاه‌ها ۱/۰m است. اگر تندی موج عرضی در تار ۲۴۰m/s باشد، بسامد نوسان تار چقدر می‌شود؟

۲۳. تار ویولنی که طول آن ۱۵/۰cm است و در دو انتها بسته شده است، در مُد $n=۱$ خود نوسان می‌کند. تندی موج عرضی در این تار ۲۵۰m/s و تندی صوت در هوا ۳۴۸m/s است.

الف) بسامد و ب) طول‌موجِ امواج صوتی گسیل‌شده از تار چقدر است؟

۲۴. اگر بسامد اصلی یک تار ویولن به جرم ۸۰۰mg و طول ۲۲/۰cm برابر ۹۲۰Hz باشد،

الف) تندی موج عرضی در این تار را به دست آورید.

ب) کشش تار چقدر است؟

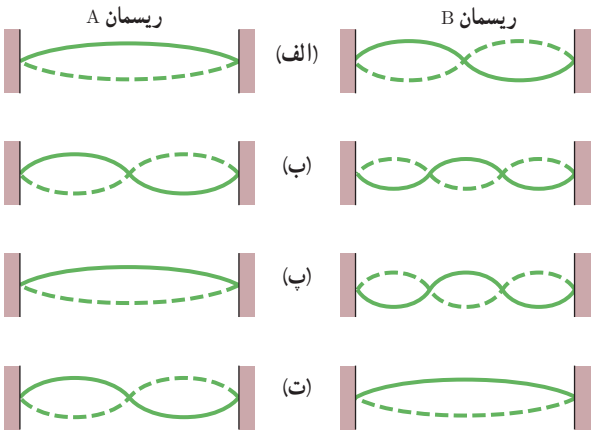
پ) برای بسامد اصلی، طول‌موجِ موج عرضی در تار و طول‌موجِ امواج صوتی گسیل شده توسط تار چقدر است؟ تندی صوت در هوا را ۳۴۰m/s بگیرید.

۲۵. تار ویولنی به طول ۳۰/۰cm و چگالی خطی جرمی ۰/۶۵۰g/m در نزدیکی بلندگویی قرار داده شده است که توسط یک نوسان‌ساز صوتی با بسامد متغیر به‌کار می‌افتد. معلوم شده است وقتی بسامد نوسان‌ساز در گسترهٔ ۵۰۰–۱۵۰۰Hz تغییر می‌کند تار فقط هنگامی به نوسان در می‌آید که بسامد آن ۸۸۰Hz و ۱۳۲۰Hz باشد.

الف) چه پدیده‌ای سبب به نوسان درآمدن تار شده است؟

ب) بسامد اصلی تار چقدر است؟ پ) کشش تار چقدر است؟

۲۶. ریسمان‌های A و B، طول و چگالی خطی جرمی یکسانی دارند، ولی ریسمان B تحت کشش بیشتری نسبت به ریسمان A قرار دارد. شکل زیر چهار وضعیت (الف) تا (ت) را نشان می‌دهد که در آنها نقش‌های موج ایستاده در دو ریسمان وجود دارند. در کدام وضعیت‌ها، احتمال دارد که ریسمان‌های A و B در بسامد تشدیدی یکسانی نوسان کنند؟



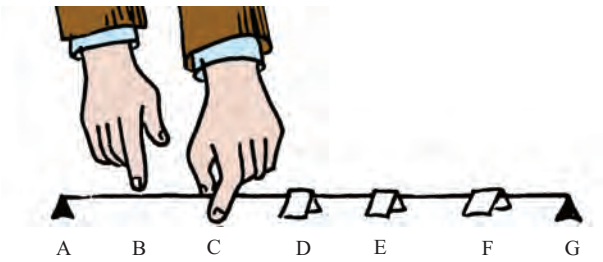
۲۷. در یک تار دو سر بسته، یکی از بسامدهای تشدیدی ۳۲۵Hz، و بسامد تشدیدی بعدی ۳۹۰Hz است. بسامد تشدیدی پس از ۱۹۵Hz این تار چیست؟

۲۸. رشته‌ای از بسامدهای تشدیدی یک تار با دو انتهای بسته عبارت‌اند از : ۱۵۰Hz، ۲۲۵Hz، ۳۰۰Hz، و ۳۷۵Hz. در این رشته یک بسامد (کمتر از ۴۰۰Hz) جا افتاده است.

الف) این بسامد کدام است؟

ب) بسامد هماهنگ هفتم چقدر است؟

۲۹. در شکل نشان داده شده، نقاط A، B، C، D، E، F، و G در فاصله‌های یکسانی از هم قرار دارند. تار را در نقطهٔ C به آرامی می‌گیریم، طوری که نوسان‌های بخشی از تار که سمت چپ نقطهٔ C است، بتواند به سمت راست این نقطه منتقل شود. اکنون تار را در نقطهٔ B می‌نوازیم. بدین ترتیب موج ایستاده‌ای در طول تار تشکیل می‌شود، به‌طوری که در نقطه‌های A و C گره و در نقطهٔ B شکم آن قرار دارد. به گمان شما برای کاغذهای تاشده‌ای که در نقاط D ،E، و F قرار دارند، چه رخ می‌دهد؟



۳۰. وقتی گالن آبی را خالی می‌کنیم، با خالی شدن آب صدای گلوپ گلوپی را می‌شنویم. موقع خالی شدن گالن بسامد این صدا کمتر می‌شود (صدای بَم‌تر) یا بیشتر (صدای زیرتر)؟ چرا؟

۳۱. در گذشته برای آگاه کردن کشتی‌ها از خطر صخره‌ها، در صدف‌های حلزونی می‌دمیدند. امروزه بیشتر برای جشن‌ها و شادی‌ها در آنها می‌دمند. چگونه این صدف‌ها می‌توانند چنین صدایی ایجاد کنند؟