فصل چهارم

برهم کنش‌های موج

۴ـ۱ـ بازتاب موج
۴ـ۲ـ شکست موج
۴ـ۳ـپراش موج
۴ـ۴ـ تداخل امواج
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴

پیامدها

دانش‌آموزان با درک مفاهیم این فصل :

- درمی‌یابند امواج با محیط و نیز با خود برهم‌کنش می‌کنند.
- درمی‌یابند امواج، اعم از اینکه مکانیکی باشند یا الکترومغناطیسی، برهم‌کنش‌های مشابهی با محیط و نیز با خود دارند.
- با بازتاب امواج، شکست امواج، پراش و تداخل امواج به‌عنوان اقسامی از برهم‌کنش‌های امواج آشنا می‌شوند و به قوانین حاکم بر آنها پی می‌برند.
- با کاربردهای برهم‌کنش‌های امواج در پدیده‌های طبیعی و در علوم کاربردی آشنا می‌شوند.

چه شناختی مطلوب است؟

- در بازتاب امواج، زاویهٔ تابش با زاویهٔ بازتابش برابر است.
- از مکان‌یابی پژواکی می‌توان برای تعیین مکان ونیز تندی اجسام متحرک استفاده کرد.
- بر شکست امواج قانونی عمومی حاکم است که در مورد نور به قانون اسنل می‌انجامد.
- در شکست نور، برای دو محیط ضریب شکست تعریف می‌شود که برابر با نسبت تندی نور در خلأ به تندی نور در آن محیط است.
- توجیه پدیدهٔ سراب تنها به کمک جبهه‌های موج میسر است.
- وقتی باریکهٔ نوری شامل پرتوهایی با طول موج‌های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های متفاوتی شکسته می‌شوند.
- وقتی ابعاد مانع یا شکاف در مسیر پیشروی یک موج در حدود طول موجِ آن موج باشد، موج به اطراف مانع یا شکاف گسترده می‌شود.
- وقتی امواج با یکدیگر تداخل پیدا می‌کنند (ترکیب می‌شوند) دامنهٔ موج برایند در برخی نواحی بیشینه (تداخل سازنده) و در برخی ناحیه‌های دیگر کمینه می‌شود (تداخل ویرانگر) و نقش متناوب یک در میانی از بیشینه‌ها و کمینه‌ها تشکیل می‌شود.
- آزمایش یانگ اثباتی تجربی بر این مدعا است که نور نیز یک موج است.
- برهم نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف نقش یک موج ایستاده را ایجاد می‌کند.
- یک موج ایستاده با گره‌ها و شکم‌ها نشان داده می‌شود. در گره‌ها، دو موج کاملاً ناهم‌فاز و در شکم‌ها هم‌فاز هستند.
- به‌ازای بسامدهای خاصی موج ایستادهٔ بارزی تشکیل می‌شود که به آن بسامدها، بسامدهای تشدیدی گفته می‌شود.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید درنظر گرفته شود؟

- بازتاب موج چیست و چگونه ایجاد می‌شود؟
- بین زاویهٔ تابش و بازتابش در بازتاب چه رابطه‌ای وجود دارد؟
- تفاوت بازتاب آیینه‌ای با بازتاب پخشنده چیست؟
- شکست چیست و در چه صورت موج شکست پیدا می کند؟
- رابطهٔ ضریب شکست با تندی نور در یک محیط، و رابطهٔ زاویه‌های شکست و بازتابش نور با ضریب‌های شکست دو محیط چیست؟
- رابطهٔ ضریب شکست با دما چگونه است و چه چیز باعث پدیدهٔ سراب می‌شود؟
- پاشندگی نور چیست و با طول موج چه ارتباطی دارد؟
- پراش موج چیست و چه ارتباطی به ابعاد مانع یا شکاف دارد؟
- چگونه اصل برهم‌نهی امواج به تداخل‌های سازنده و ویرانگر می‌انجامد؟
- نقش تداخلی چیست و پهنای هر نوار تداخلی چه ارتباطی با طول موج دارد؟
- چگونه آزمایش یانگ تأییدی بر سرشت موجی نور است؟
- بسامدهای تشدیدی چیست و دو مورد تار و لولهٔ صوتی چه ارتباطی با طول تار یا لوله دارند؟
- در یک تشدیدگر هلموهولتز چگونه تشدید ایجاد می‌شود؟

در پایان این واحد یادگیری دانش آموزان چه دانش و مهارت‌های اساسی را کسب می کنند؟

دانشی

با مفاهیم بازتاب امواج، قانون بازتاب عمومی، پژواک، مکان‌یابی پژواکی، بازتاب‌های آینه‌ای و پخشنده، شکست امواج، قانون شکست عمومی، قانون شکست اسنل، پدیدهٔ سراب، پاشندگی نور، پراش امواج، اصل برهم‌نهی و تداخل امواج، تداخل سازنده و ویرانگر، آزمایش یانگ، موج ایستاده، بسامدهای تشدیدی، لوله‌های صوتی و تشدیدگر هلمهولتز آشنا می‌شوند.

مهارتی

با مهارت‌های تحقیق قانون بازتاب عمومی برای امواج صوتی، تعیین تندی صوت با استفاده از پژواک، تحلیل دلیل کج شدن جبهه‌های موج در ساحل، استفاده از تشت موج در تحلیل پدیده‌های شکست و پراش موج، تعیین ضریب شکست، توجیه پدیدهٔ سراب، تحقیق پاشندگی نور با استفاده از منشور، توجیه پدیده‌های مبتنی بر پراش و کاربردهای آن، تحلیل آزمایشگاهی تداخل امواج صوتی، انجام آزمایش یانگ، تحلیل بسامدهای تشدیدی با اسباب آزمایش، ایجاد موج ایستاده، توجیه چگونگی ایجاد صوت توسط آلات مختلف موسیقی، تشخیص تشدیدگرهای هلمهولتز و چگونگی آزمایش با آنها، مهارت استفاده از قانون بازتاب، قانون شکست عمومی و قانون اسنل در حل مسئله، تشخیص موج‌های ایستاده و محاسبهٔ بسامدهای تشدیدی و تعیین هماهنگ‌ها دست پیدا می کنند.

بودجه‌بندی پیشنهادی

بنا به صلاحدید مدرس می‌توان ۱۶ جلسهٔ ۹۰ دقیقه‌ای به آموزش این فصل اختصاص داد.

تصویر شگفت‌انگیز آغاز فصل وقتی ایجاد می‌شود که دو مجموعه از جبهه‌های موج تقریباً به حالت عمود بر یکدیگر، با هم برخورد کنند. این اتفاق معمولاً هنگامی رخ می‌دهد که جبهه‌های موج حاصل از دو سامانهٔ آب و هوایی در نقطه‌ای دور از هر دو سامانه، با هم برخورد کنند. توجه کنید *دریای شطرنجی* را به‌سادگی نمی‌توانید مشاهده کنید و باید از فاصله‌ای دور یا از آسمان آن را ببینید. در فیلم زیر چگونگی ایجاد یک دریای شطرنجی را می‌بینید.

فیلم

در فیلم چگونگی تشکیل دریای شطرنجی را مشاهده می‌کنید.

خوب است اشاره شود ساختار این فصل کتاب مبتنی بر بررسی پدیده‌های برهم‌کنش انواع امواج در یک بعد، دو بعد و سه بعد است.

فیزیک ۳

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 ۴ـ۱). 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 ۴ـ۱ خفاش برای یافتن طعمه از پژواک موج صوتی خود استفاده می‌کند.

شکل ۴ـ۲ 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 ۴ـ۲). 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 ۴ـ۳ 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.

۴ـ۱ 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 تپ تابیده حرکت می‌کند (شکل ۴ـ۳). شکل ۴ـ۴ طرحی واضح‌تر از تابش و بازتابش چنین تپی را نشان می‌دهد. چنین بازتابی را بازتاب در یک بُعد می‌گویند.

شکل ۴ـ۴ طرحی از پیشروی و بازتاب تپ عرضی شکل ۴ـ۳

۹۰

فیلم

در این فیلم بازتاب تپ از یک انتهای ثابت را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم بازتاب تپ از یک انتهای باز را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم بازتاب دو تپ از انتهاهای ثابت و آزاد را با هم می‌بینید.

فیلم

در این فیلم بازتاب دو موج سینوسی از تکیه‌گاه‌های ثابت و آزاد را می‌بینید.

دوباره گوشزد می‌شود وب‌گاه www.falstad.com/ripple کلیهٔ آزمایش‌های ممکن با تشت موج را دارد.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

به خاطر داریم وقتی تیغهٔ نخنی را بر سطح آب تشت موج به نوسان درمی‌آوردیم، امواج نخنی 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 ۴ـ۵)[1]. شکل ۴ـ۶ 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 ۴ـ۶ را در حضور جبهه‌های موج به‌صورت شکل ۴ـ۷ 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 ۴ـ۵ نشان داده شده است، ثابت می‌کند که برای هر وضعیت مانع، و همهٔ انواع دیگر موج، مانند امواج دایره‌ای با کروی نیز، همواره زاویهٔ بازتابش برابر با زاویهٔ تابش است یعنی : $\theta_i = \theta_r$ که به آن، قانون بازتاب عمومی گفته می‌شود.

شکل ۴ـ۵ بازتاب امواج تخت از مانع تخت در تشت موج.

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 ۴ـ۱ به تحقیق این امر می‌پردازیم.

شکل ۴ـ۶ طرحی از جبهه‌های موج تابیده (خطوط نوپر) و جبهه‌های موج بازتابیده (خطوط خط‌چین)

شکل ۴ـ۷ نمودار پرتویی همراه با جبهه‌های موج برای بازتاب امواج تخت از سطح مانعی تخت

فعالیت ۴ـ۱

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

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

۲ـ ۱ سرواژه کلمهٔ incident به معنی تابش است.

۳ـ ۲ سرواژه کلمهٔ reflection به معنی بازتابش است.

۹۱

خوب است اشاره شود قانون بازتاب عمومی برای امواج دایره‌ای و کروی نیز برقرار است. مثلاً اگر در تشت موج به جای تیغهٔ نوسان‌کننده از گوی کوچک نوسان‌کننده استفاده کنیم، امواجی دایره‌ای بر سطح آب تشکیل خواهد شد.

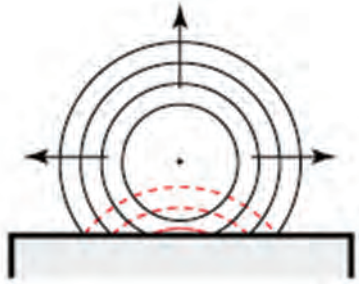
این امواج در برخورد با یک مانع تخت بازتابیده می‌شوند و بر اثر این بازتاب، امواج دایره‌ای دیگری تشکیل می‌شود که در ترکیب با امواج تابیده، شبکه‌ای را در جلوی مانع تشکیل می‌دهند. شکل الف تصویری واقعی از این پدیده در تشت موج

فیلم

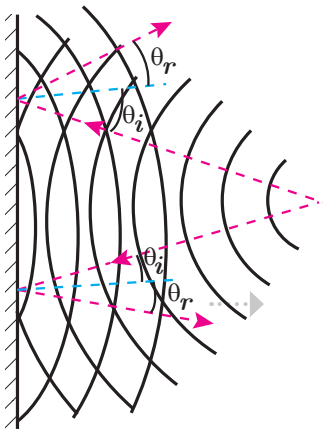
در این فیلم برهم‌کنش جبهه‌های موج دریا را می‌بینید.

و شکل ب طرحی از آن را نشان می‌دهد. آزمایش‌هایی نظیر آنچه که در شکل الف نشان داده شده است ثابت می‌کند که برای هر وضعیت مانع، زاویهٔ تابش برابر با زاویهٔ تابش است. ولی باید توجه کرد زاویهٔ تابش در نقاط مختلف، متفاوت است و بنابراین زاویهٔ بازتابش نیز که برابر زاویهٔ تابش در محل برخورد است، در نقاط مختلف متفاوت می‌شود. شکل پ پرتوهای تابش و بازتابش را برای امواج دایره‌ای، در دو نقطه از مانع تخت نشان می‌دهد. توجه کنید که در هر نقطه، زاویه‌های تابش و بازتابش برابرند، ولی برابر با زاویه‌های تابش و بازتابش در نقطه‌ای دیگر نیستند.

شکل الف) امواج دایره‌ای بازتابیده از مانعی تخت در یک تشت موج در ترکیب با امواج دایره‌ای تابیده، شبکه‌ای را در جلوی مانع تشکیل داده‌اند.



شکل ب) طرحی از جبهه‌های موج تابیده (خطوط توپر) و جبهه‌های موج بازتابیده (خطوط خط‌چین) و ترکیب آنها در جلوی مانع.



شکل پ) قانون بازتاب در هر نقطهٔ سطح مانع بازتاب‌دهنده برقرار است.

پاسخ فعالیت ۴ـ۱

این اسباب شامل دو لولهٔ متصل به دو دهانه است که یکی نقش دهانهٔ ورودی صدا و دیگری نقش گوشی را بازی می‌کند. با ایجاد صدا در دهانهٔ ورودی، صوت پس از عبور از لولهٔ اول، و بازتاب از یک دیوارهٔ سخت، با عبور از لولهٔ دوم وارد دهانهٔ گوشی می‌شود و ما آن را می‌شنویم. برای جلوگیری از انتشار مستقیم صوت از منبع به سمت شنونده، مانعی برروی گیره‌های شکل نصب می‌شود. شنونده با حرکت لولهٔ دوم، در زاویهٔ مشخصی درمی‌یابد که صدا با بیشترین بلندی به گوش او می‌رسد. اکنون اگر مکان لولهٔ دوم ثابت شود، با وارسی زاویهٔ لولهٔ اول با مانع (خطّ عمود بر دیوارهٔ بازتابنده) و زاویهٔ لولهٔ دوم با مانع، درمی‌یابیم که بیشترین بلندی دریافتی به ازای برابر بودن زاویهٔ تابش و زاویهٔ بازتابش حاصل می‌شود.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

به خاطر داریم وقتی تیغهٔ نخی را بر سطح آب تنشت موج به نوسان درمی‌آوردیم، امواج نخی 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 ۴ـ۵)[1]. شکل ۴ـ۶ 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 ۴ـ۶ را در حضور جبهه‌های موج به‌صورت شکل ۴ـ۷ 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]. آزمایش‌های نظیر آنچه در شکل ۴ـ۵ 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.

شکل ۴ـ۵ بازتاب امواج تخت از مانع تخت در تنشت موج

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 ۴ـ۱ به‌تحقیق این امر می‌پردازیم.

شکل ۴ـ۶ طرحی از جبهه‌های موج تابیده (خطوط توپر) و جبهه‌های موج بازتابیده (خطوط خط‌چین)

شکل ۴ـ۷ نمودار پرتویی همراه با جبهه‌های موج برای بازتاب امواج تخت از سطح مانعی تخت

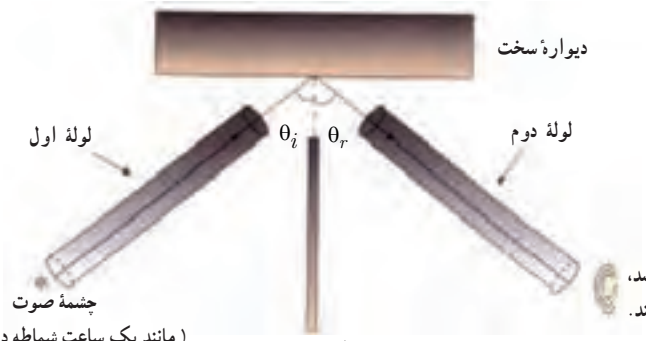
فعالیت ۴ـ۱

با اسباب نشان داده نشده 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

۱ـ توجه کنید که طول مانع باید در مقایسه با طول‌موج، بسیار بزرگ باشد. دلیل این الزام را در بحث پراش امواج می‌بینید.
۲ـ i سرواژهٔ کلمهٔ incident به معنی تابش است.
۳ـ r سرواژهٔ کلمهٔ reflection به معنی بازتابش است.

۹۱

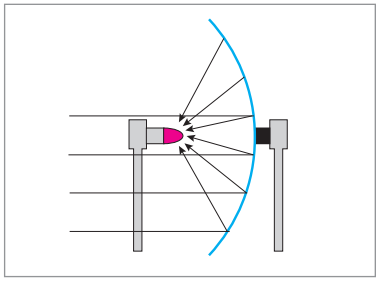


وقتی زاویهٔ تابش θ_i با زاویهٔ بازتابش θ_r برابر باشد، گوش صدای بازتابیده را با بیشترین بلندی دریافت می‌کند.

پاسخ فعالیت ۴ـ۲

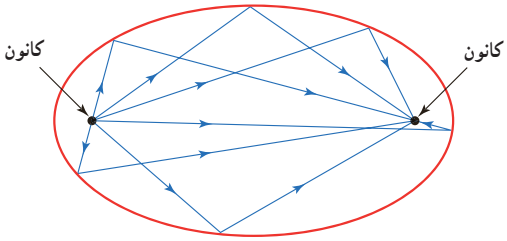
در میکروفون سهموی از یک سطح کاو سهموی برای جمع و کانونی‌کردن امواج صوتی در یک گیرنده استفاده می‌شود. این میکروفون‌ها به‌همین دلیل، حساسیت بسیار زیادی به صداهایی دارند که موازی با محور سطح سهموی به این سطح می‌تابند. استفادهٔ مرسوم از این میکروفون‌ها در ثبت صداهای پرندگان دوردست، و صداهای میادین ورزشی (شکل الف)، و نیز استراق سمع است. شکل ب طرحی از چگونگی کار این دستگاه را نشان می‌دهد.

(الف)

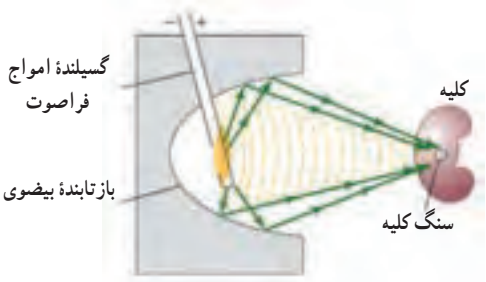


(ب)

دستگاه لیتوتریپسی از این ویژگی سطح بیضوی که دو کانون دارد استفاده می کند. بنابراین اگر موج صوتی در یک کانون ایجاد شود، این موج پس از بازتاب از نقاط مختلف سطح، در کانون دیگر جمع می‌شود.

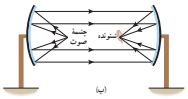


در دستگاه لیتوتریپسی، چشمه‌ای فراصوت در یک کانون بازتابندهٔ بیضوی ایجاد می کنند و محل بیمار را طوری تنظیم می کنند که سنگ کلیهٔ او در محل کانون دوم سطح این بازتابنده باشد. شکل پ، طرحی از چگونگی کار این دستگاه را نشان می‌دهد.



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 ۴ـ۸).

(الف)



(ب)

شکل ۴ـ۸ 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 ۴ـ۲

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 ۰/۱۸ باشد، گوش انسان نمی‌تواند پژواک را از صوت مستقیم اولیه تمیز دهد.

فناوری 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 انرژی دویلر 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 فناوری‌های نظیر اندازه‌گیری تندی شارش خون در رگ‌ها نیز از این روش استفاده می‌شود. خفاش، فَرَرانی 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، خود خفاش، یا هر دو متحرک باشند، خفاش تغییر بسامدی ناشی از اثر دویلر 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.

۱ـ Lithotripsy ۲ـ Echo ۳ـ Echolocation

خوب است تمرین ۴ـ۱ را بی‌درنگ در همین‌جا مطرح می‌کنید و از دانش‌آموزان بخواهید پاسخ خود را بیان کنند و سپس پاسخ‌ها را بررسی و پاسخ صحیح را مطرح کنید.

پاسخ تمرین ۴ـ۱

همان‌طور که در متن درس اشاره شد، اگر تأخیر زمانی صوت بازتابیده و صوت اولیه کمتر از ۰/۱s باشد، گوش انسان قادر به تمیز پژواک از صوت اولیه نخواهد بود. از اینجا می‌توان فاصلهٔ کمینهٔ لازم بین چشمهٔ صوت و سطح بازتاباننده را برای تمیز یک پژواک از صوت اولیه محاسبه کنیم. اگر چشمهٔ صوت و شنونده هردو تقریباً در یک مکان واقع باشند، آنگاه با توجه به اینکه تندی صوت در هوا را تقریباً ۳۴۰ m/s درنظر گرفته‌ایم، این مسافت به‌راحتی با استفاده از رابطهٔ $x = vt$ محاسبه می‌شود. با جای‌گذاری $x = 2L$، که L فاصلهٔ بین چشمه و سطح بازتاباننده است، به ازای $t = 0/10\,s$ خواهیم داشت :

$$L = \frac{1}{2}vt = \frac{1}{2}(340\,m/s)(0/10\,s) = 17\,m$$

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

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 ۳۴۰ m/s در نظر بگیرید.

مثال ۴ـ۱

وال عنبر یکی از جانورانی است که با استفاده از پژواک امواج فراصوتی، مکان‌یابی می‌کند. بسامد امواج فراصوتی‌ای که این وال تولید می‌کند حدود ۱۰۰ kHz است. با توجه به اینکه تندی صوت در آب دریا طبق جدول ۳ـ۱ حدود $1/52 \times 10^{3}\,m/s$ است، الف) طول‌موج این صوت و ب) زمان رفت و برگشت صوت گسیل شده توسط وال برای مانعی که در فاصلهٔ ۱۰۰ m از آن قرار گرفته، چقدر است؟

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

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1/52 \times 10^{3}\,m/s}{100 \times 10^{3}\,s^{-1}} = 1/52 \times 10^{-2}\,m = 1/52\,cm$$

همان‌طور که بعداً در بحث پراش خواهید دید برای تشخیص یک جسم، اندازهٔ آن باید در حدود طول‌موج به کار 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 :

$$t = \frac{x}{v} = \frac{2L}{v} = \frac{2 \times 100\,m}{1/52 \times 10^{3}\,m/s} = 0/132\,s$$

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.

(الف)

(ب)

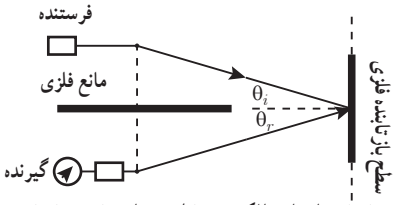
شکل ۴ـ۹ الف) یک موج الکترومغناطیسی تخت پس از بازتاب از یک سطح کاو در نقطه‌ای مقابل سطح کانونی می‌شود. ب) تصویری از یک اجاق خورشیدی

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.

۹۳

توجه کنید که بازتاب امواج الکترومغناطیسی را می‌توانید به عنوان نمونه‌ای از بازتاب در سه بُعد مطرح کنید. همچنین چون این مبحث را عمدتاً برای نور مطرح می‌کنند خوب است به اسباب‌های آزمایشگاهی‌ای که قانون بازتاب عمومی را بر فرض برای امواج رادیویی بررسی کرده‌اند نیز اشاره کنید تا دانش‌آموزان صرفاً این قانون را برای نور نپندارند. شکل زیر طرحی از چنین آزمایش‌هایی را نشان داده است. یک فرستندهٔ امواج رادیویی (RF)، امواجی را به سمت سطح یک بازتابندهٔ فلزی ارسال کرده است. در صورت حضور مانع فلزی می‌توان توسط گیرنده، امواج بازتابیده را آشکار کرد. با حرکت دادن سطح بازتابنده در امتداد خط CD که موازی خط AB است، مشاهده می‌شود که وقتی سطح بازتابنده وسط خط AB (در امتداد مانع فلزی) است، گیرنده پاسخ شدیدتری را دریافت و آشکار می‌کند و به این ترتیب قانون بازتاب عمومی برای امواج رادیویی تأیید می‌شود.



بازتاب امواج الکترومغناطیسی از قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند، به طوری که $\hat{\theta}_i = \hat{\theta}_r$ است.

سازوکار تقریباً مشابهی در رادارها وجود دارد، با این تفاوت که آنتن گیرنده و فرستندهٔ امواج رادیویی یکی است و امواج رادیویی گسیل شده توسط یک آنتن، پس از بازتاب از مثلاً یک هواپیما دوباره به همان آنتن بازمی‌گردند و بدین ترتیب حضور هواپیما آشکار می‌شود.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

تمرین ۴ـ۱

کمترین فاصلهٔ بین شما و یک دیوار بلند چقدر باشد تا بازتاب صدای خود را از صدای اصلی تمیز دهید؟ تندی صوت در هوا را $۳۴۰ m/s$ در نظر بگیرید.

مثال ۴ـ۱

وال عنبر یکی از جانورانی است که با استفاده از پژواک امواج فراصوتی، مکان‌یابی می‌کند. بسامد امواج فراصوتی‌ای که این وال تولید می‌کند حدود $۱۰۰ kHz$ است. با توجه به اینکه تندی صوت در آب دریا طبق جدول ۳ـ۱ حدود $۱/۵۲\times۱۰^{۳} m/s$ است، الف) طول موج این صوت و ب) زمان رفت و برگشت صوت گسیل شده توسط وال برای مانعی که در فاصلهٔ $۱۰۰ m$ از آن قرار گرفته، چقدر است؟

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

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{۱/۵۲\times۱۰^{۳} m/s}{۱۰۰\times۱۰^{۳} s^{-۱}} = ۱/۵۲\times۱۰^{-۲} m = ۱/۵۲ cm$$

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

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

$$t = \frac{x}{v} = \frac{۲L}{v} = \frac{۲\times۱۰۰ m}{۱/۵۲\times۱۰^{۳} m/s} = ۰/۱۳ s$$

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.

(الف)

(ب)

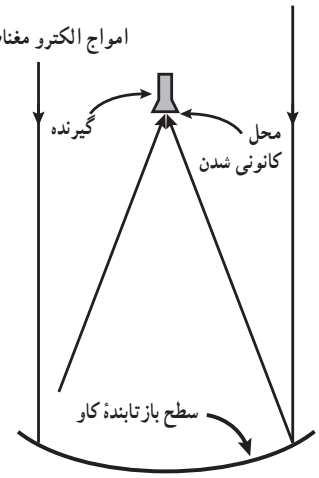
شکل ۴ـ۹ الف) بازتاب یک موج الکترومغناطیسی تخت پس از بازتاب از یک سطح کاو در نقطه‌ای مقابل سطح، کانونی می‌شود. ب) تصویری از یک اجاق خورشیدی

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.

۹۳

خوب است با رسم طرح‌هایی مانند زیر، چگونگی کانونی شدن امواج رادیویی به‌وسیلهٔ یک آنتن بشقابی را نشان دهید.



پاسخ فعالیت ۴ـ۳

روش کار به این ترتیب است که امواج میکروموج یا فروسرخ را مطابق شکل کتاب در محدودهٔ مشخصی گسیل می‌کنند. فاصلهٔ خودرو از فرستندهٔ گسیلندهٔ موج با اندازه‌گیری زمان بین گسیل و دریافت موج به‌دست می‌آید. تندی خودرو نیز از تغییر بسامد موج دریافتی نسبت به موج گسیل‌شده با استفاده از رابطهٔ دوپلری که برای امواج الکترومغناطیسی به‌کار می‌آید، تعیین می‌شود. خوب است بدانید این رابطه در تندی‌ها کم، برای تابش مستقیم $\Delta f = ۲\frac{v}{c} f_۰$ را به‌دست می‌دهد که در آن c تندی نور ($\approx ۳/۰ \times ۱۰^{۸} m/s$) است. برای تابش زاویه‌دار که در شکل نشان داده شده است به $\Delta f = ۲ f_۰ \frac{v\cos\theta}{c}$ می‌رسیم که در آن θ زاویهٔ بین پرتوی گسیل‌شده و امتداد حرکت خودرو است. یک مثال نوعی برای تابش مستقیم ($\theta = ۰$) را درنظر می‌گیریم. یک پلیس با دریافت بازتاب امواج گسیل‌شده با بسامد $۱/۷ \times ۱۰^{۱۴} Hz$ به سمت یک خودرو به تغییر بسامدی برابر $۴/۷ \times ۱۰^{۷} Hz$ می‌رسد. آنگاه با استفاده از رابطهٔ بالا به $v = ۱۵۰ km/h$ برای تندی خودرو می‌رسیم.

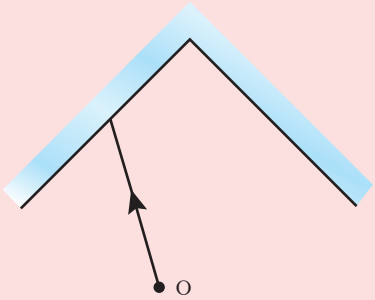
پاسخ فعالیت ۳ـ۹ کتاب تجربی

این فعالیت که برای رشتهٔ تجربی آمده است، زیرمجموعه‌ای از مکان‌یابی پژواکی است که در« فنّاوری و کاربرد» رشتهٔ ریاضی نیز مطرح شده است. در اندازه‌گیری تندی شارش خون، امواج فراصوت (با بسامدی عموماً بین ۲ تا ۱۰ مگاهرتز) به سمت یک رگ خونی گسیل می شود و با استفاده از تغییر بسامد باریکهٔ موج فراصوتی بازتابیده از گویچهٔ سرخ، که ناشی از اثر دوپلر است، تندی vی آن به‌دست می‌آید. خوب است بدانید رابطه‌ای که از آن برای این تندی استفاده می‌شود، برای تابش مستقیم $\Delta f \approx \frac{v}{v_s} f_۰ - (\frac{-v}{v_s}) f_۰ = ۲\frac{v}{v_s} f_۰$ است که در آن v_s تندی صوت است. برای تابش زاویه‌دار که در شکل نشان داده شده است

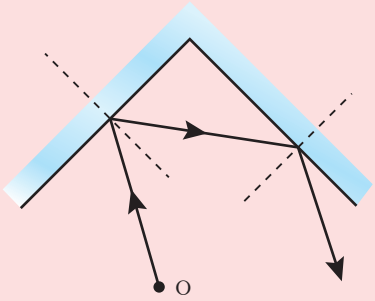
به $\Delta f \approx ۲f_۰ \frac{v\cos\theta}{v_s}$ می‌رسیم. آنگاه با دانستن تغییر بسامد ناشی از بازتاب و زاویهٔ تابش امواج فراصوت می‌توان به‌راحتی تندی vی شارش خون را محاسبه کرد. برای اینکه به حسی از عدد تندی شارش خون دست‌یابید، یک تابش غیرمستقیم با $\theta = ۳۰^\circ$ را درنظر بگیرید. در یک آزمایش نوعی، به ازای $v_s = ۱۵۴۰\,m/s$ و $f_۰ = ۳/۰\,MHz$ به تغییر بسامدی حدود $۱/۰\,MHz$ می‌رسند که از آن تندی شارش خون حدود $۳۰\,cm/s$ حاصل می شود. خوب است بدانید تندی شارش خون به سطح مقطع رگ بستگی دارد و مثلاً در آئورت حدود $۴۰\,cm/s$، و در مویرگ‌ها حدود $۰/۳۰\,cm/s$ است. البته در هنگام دویدن این عددها افزایش می‌یابد.

تمرین‌های پیشنهادی

۱ در شکل زیر پرتوهای بازتابیده از آینه‌ها را رسم کنید.



پاسخ : با رسم خطوط عمود بر دو آینه داریم :



۲ فرض کنید پس از ۱/۵ ثانیه، و چندین بازتاب رفت و برگشت آخرین پژواک صدا را از دیواری که ۲۵/۷m از شما فاصله دارد می‌شنوید. این پژواک مربوط به چندمین بازتاب است؟

پاسخ : به ازای یک رفت و برگشت، زمان پیمودن صوت $T/۲$ می‌شود. بنابراین به‌ازای n رفت و برگشت، زمان برابر $T/(n+۱)$ است. آنگاه برای بازتاب‌های چندگانه داریم :

$$d = vt = (۳۴۳\ m/s)(\frac{۱/۵\ s}{n+۱})$$

و در نتیجه

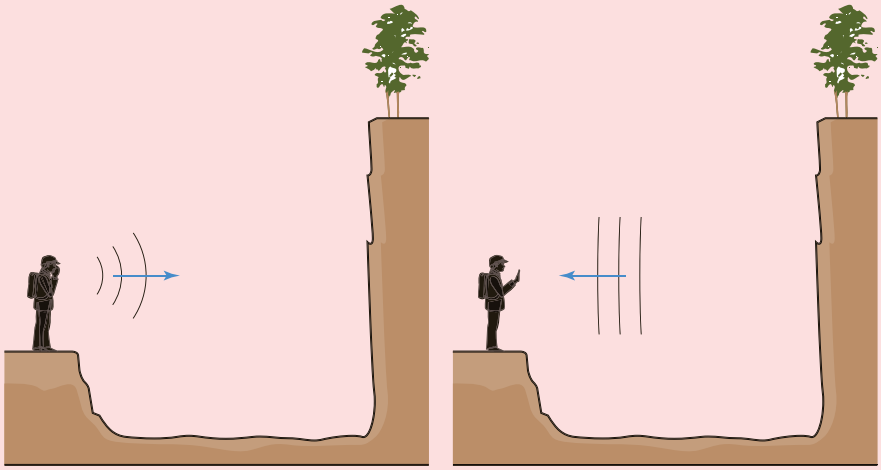
$$n = \frac{(۳۴۳\ m/s)(۱/۵\ s)}{۲۵/۷\ m} - ۱ = ۱۹$$

یعنی پس از ۱۹ رفت و برگشت، شخص آخرین پژواک را دریافت کرده است.

فعالیت‌های پیشنهادی

۱ تندی صوت را اندازه بگیرید

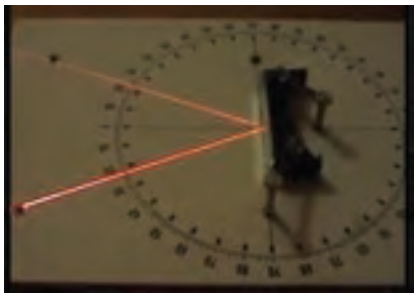
در برابر دیواره یا صخرهٔ بلندی که حدوداً ۱۰۰m از شما فاصله دارد بایستید و یک بار دست بزنید. پس از مدت زمان کوتاهی پژواک صدای کف زدن خود را خواهید شنید. برای آنکه تندی صوت را اندازه بگیرید، روش مناسب آن است که آن‌قدر به‌طور متولی کف بزنید تا اینکه صدای هر کف زدن را درست هم‌زمان با یک پژواک بشنوید. آنگاه باید از یک دوست خود بخواهید که تعداد کف زدن‌های شما را در یک مدت زمان معین (مثلاً ۳۰s) بشمارد. از اینجا می‌توانید فاصلهٔ زمانی بین دو کف زدن متوالی را محاسبه کنید. با توجه به هم‌زمانی هر پژواک با یک صدای کف زدن، این فاصلهٔ زمانی برابر زمان رفت و برگشت صوت است. اکنون با دانستن فاصلهٔ دقیق خود از دیواره یا صخره می‌توانید با استفاده از رابطهٔ $x=vt$ تندی صوت را در محل آزمایش تعیین کنید.



۲ قانون بازتاب را تحقیق کنید.

دو جفت سوزن ته‌گرد با رنگ‌های متفاوت را روی سطح افقی تختی در برابر یک آینهٔ تخت قرار دهید طوری که این چهار سوزن، مطابق شکل، یک نمای V‌شکل را تشکیل دهند که رأس آن تقریباً در وسط آینه قرار گیرد. اکنون به آینه نگاه کنید و سر خود را آن‌قدر حرکت دهید تا بتوانید تصویر یک جفت سوزن را در امتداد جفت سوزن دیگر ببینید. این فعالیت، روشی دیگر برای تحقیق قانون بازتاب است.

در اینجا خوب است ضمن یادآوری مفاهیمی که دانش‌آموزان در کتاب علوم هشتم خود آموختند، دوباره اسباب آزمایش بازتاب نور را جهت تحقیق قانون بازتاب عمومی به دانش‌آموزان معرفی کنید. اگر با یک لیزر مدادی باریکهٔ نور را به آینه‌ای تخت که عمود بر صفحهٔ مدرجی برحسب زاویه قرار دارد بتابانند، درمی‌یابند که اندازهٔ زاویه‌های تابش و بازتابش برای هر زاویهٔ تابشی برابر است و بدین ترتیب قانون بازتاب عمومی را برای نور مرئی تحقیق می‌کنند.



فیزیک ۳

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 ۴ـ۱۰ 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 ۴ـ۱۰ ب).

شکل ۴ـ۱۰ 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 بخشنده[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 ۴ـ۱۱). 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 بخشنده، 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 $1\mu m$ هستند. با توجه به اینکه طول‌موج نور مرئی در حدود $0/5\ \mu m$ است، چنین سطحی برای نور مرئی، ناهموار محسوب می‌شود. در مقابل، ناهمواری‌های یک آینه یا یک سطح فلزی صیقلی، بسیار کوچک‌تر از $1\mu m$ است و بنابراین برای نور مرئی سطوحی هموار محسوب می‌شوند.

۴ـ۲ 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 شکست‌نمدن 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

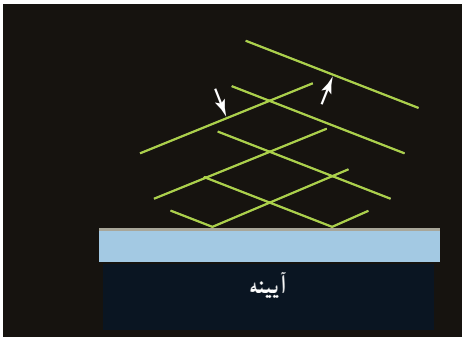
۱ـ specular reflection
۲ـ diffuse reflection

کریستین هویگنس (۱۶۹۵ـ۱۶۲۹م.)
در لاهه هلند به دنیا آمد. در دانشگاه‌های لیدن و پوا، تحصیل کرد و هنگامی که فقط ۲۲ سال داشت مقاله‌هایی در زمینهٔ ریاضی و اختربینی نوشت که مورد توجه رنه دکارت، ریاضی‌دان، ماهر، قرار گرفت. هویگنس در زبان 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 موج‌هایی روی آب نسبت 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 اختربینان برجسته‌ای نیز بود و اسباب‌ها و دستگاه‌های نوری زیادی را اختراع کرد. اختراع پرسنج را نیز به او نسبت داده‌اند.

شکل ۴ـ۱۱ طرحی از بازتاب بخشندهٔ 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.

۹۴

خوب است اشاره شود که واژهٔ «آینه‌ای» در بازتاب آینه‌ای به این بازمی‌گردد که سطح بازتابیده باید همچون یک آینه بسیار هموار باشد. بدین ترتیب، مثلاً سطح آرام آب یک برکه نیز سطحی است که از آن بازتاب آینه‌ای رخ می‌دهد. همچنین خوب است طرح بازتاب آینه‌ای را با جبهه‌های موج تخت نیز افزون بر نمایش پرتویی نشان دهید.



در اینجا خوب است با استفاده از دانشی که دانش‌آموزان از فصل پیش آموخته‌اند این مبحث را بیشتر باز کنید و در ضمن به توصیف وضعیتی که تپ از بخش ضخیم به بخش نازک می‌رسد نیز بپردازید. در مورد اول اشاره کنید که چون چگالی‌های خطی جرم بخش‌های نازک و ضخیم متفاوت ولی کشش در این دو بخش یکسان است، در قسمت ضخیم که چگالی خطی جرم بیشتر است، تندی کمتر و در قسمت نازک که چگالی خطی جرم کمتر است، تندی بیشتر است. هرچه بخش دوم ضخیم‌تر باشد، انرژی کمتری عبور می‌کند و بنابراین انرژی بیشتری بازمی‌تابد. در حالت حدّی که بخش دوم مثلاً دیواره یا تکیه‌گاه صلبی باشد، تقریباً همهٔ انرژی فرودی بازمی‌تابد. بنابراین در توضیح مورد دوم که تپ از بخش ضخیم به بخش نازک وارد می‌شود، انرژی موج عبوری بیشتر است، ولی موج بازتابیده وارون نمی‌شود.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

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 طول‌موج موجِ عبوری در مقایسه با موج فرودی چه تغییری می‌کند؟

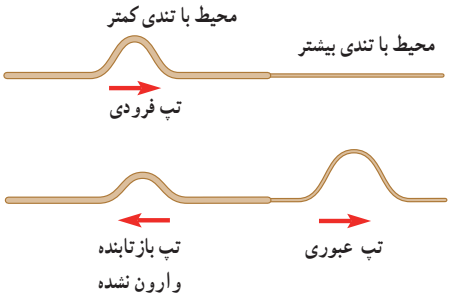
در حالت‌های دو یا سه بُعدی با عبور موج از یک مرز و ورود آن به محیط دیگر، تندی موج تغییر می‌کند و ممکن است جهت انتشار موج نیز تغییر کند و اصطلاحاً موج شکست پیدا کند. همان‌طور که پیش از این دیدیم، تندی امواج روی سطح آب به عمق آن بستگی دارد. از این ویژگی می‌توانیم برای تحقیق پدیدهٔ شکست در تشت موج استفاده 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 ۴ـ۱۲ الف) تپ فرودی از سمت چپ طناب وارد بخش ضخیم‌تر آن می‌شود. ب) بخشی از آن از مرز عبور می‌کند و بخشی بازمی‌تابد.

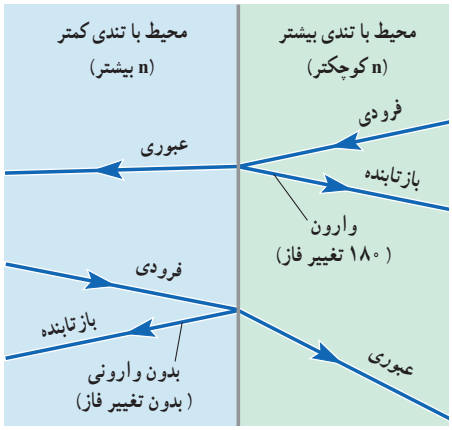
شکل ۴ـ۱۴ وقتی اسباب‌بازی وارد قالیچه می‌شود مسیرش تغییر می‌کند؛ زیرا چرخی که نخست به قالیچه می‌رسد، زودتر کند می‌شود.

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

۹۵



در مورد نور نیز وضعیت مشابهی رخ می‌دهد و شکل زیر بسیار آموزنده است.



فیلم

در این فیلم ورود تپ از یک محیط کم‌چگال به محیطی چگال‌تر را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم ورود تپ از یک محیط پرچگال به محیطی کم‌چگال‌تر را می‌بینید.

پاسخ پرسش ۴ـ۱

وقتی موج سینوسی از قسمت ضخیم طناب به قسمت نازک آن وارد شود، بسامد موج عبوری تغییری نمی‌کند، زیرا بسامد توسط چشمهٔ موج تعیین می‌شود. اما تندی در قسمت نازک طناب بیشتر است و بنا به رابطهٔ $\lambda = v/f$ درمی‌یابیم طول‌موجِ موج عبوری بیشتر از طول‌موجِ موج فرودی می‌شود. (همچنین محض اطلاعات عمومی خوب است بدانید اینجا نیز موج بازتابیده داریم، ولی موج بازتابیده تغییر فاز نمی‌دهد.)

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

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 طول‌موج موج 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).

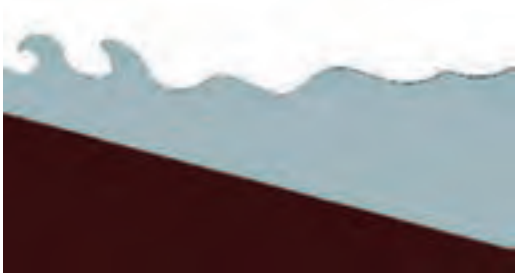
شکل ۴ـ۱۲ الف) تپ فرودی از سمت چپ طناب وارد بخش ضخیم‌تر آن می‌شود. ب) بخشی از آن از مرز عبور می‌کند و بخشی بازمی‌تابد.

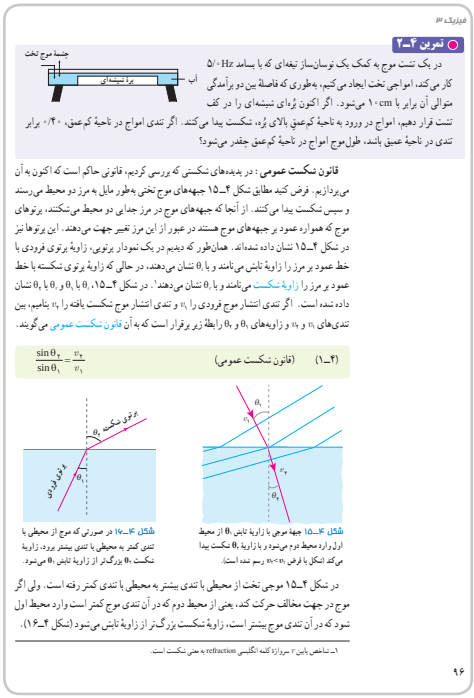
شکل ۴ـ۱۴ وقتی اسباب‌بازی وارد قالیچه می‌شود مسیرش تغییر می‌کند؛ زیرا چرخی که نخست به قالیچه می‌رسد، زودتر کند می‌شود.

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

۹۵

شاید محض اطلاعات عمومی خوب باشد در اینجا به شکن (kink) هم اشاره شود. وقتی ستیغ موج از آب عمیق وارد آب کم‌عمق می‌شود، سرعت آن قسمت از ستیغ که ابتدا عبور کرده است کم می‌شود و بقیهٔ ستیغ موج عقب می‌ماند و این باعث ایجاد یک شکن در ستیغ موج می‌شود.





فیزیک ۳

تمرین ۴ـ۲

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

جسمهٔ موج تخت — بُرهٔ شیشه‌ای — آب

قانون شکست عمومی : در پدیده‌های شکستی که بررسی کردیم، قانونی حاکم است که اکنون به آن می‌پردازیم. فرض کنید مطابق شکل ۴ـ۱۵ جبهه‌های موج تختی به‌طور مایل به مرز دو محیط می‌رسند و سبب 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 ۴ـ۱۵ 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_1 نشان می‌دهند، در حالی که زاویهٔ پرتوی شکسته با خط عمود بر مرز را زاویهٔ شکست می‌نامند و با θ_2 نشان می‌دهند[1]. در شکل ۴ـ۱۵، θ_1 یا θ_1 و θ_2 یا 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.

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1}=\frac{v_2}{v_1} \qquad (۴ـ۱)$$ (قانون شکست عمومی)

پرتوی شکست — پرتوی فرودی

شکل ۴ـ۱۵ 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 $v_2<v_1$ رسم شده است).

شکل ۴ـ۱۶ 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 ۴ـ۱۵ 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 ۴ـ۱۶).

۱ـ شاخص پایین ۲ سرواژهٔ کلمه انگلیسی refraction به معنی شکست است.

۹۶

پاسخ تمرین ۴ـ۲

لازم به توضیح است که حل این مسئله ربطی به شکست موج ندارد و اگر جبهه‌های موج به‌طور موازی به مرز می‌تابیدند نیز مسئله به همین ترتیب حل می شد. وقتی جبهه‌های موج به مرز می‌رسند، بسامد موج تغییری نمی‌کند و بنابراین

$$f=\frac{v_d}{\lambda_d}=\frac{v_s}{\lambda_s}$$

که در آن شاخص‌های پایین d و s به ترتیب مربوط به قسمت‌های عمیق (deep) و کم‌عمق (shallow) هستند. در صورت تمرین، طول‌موج فرودی که مربوط به ناحیهٔ عمیق است $\lambda_d = ۱۰\,cm$ داده شده است. همچنین تندی امواج در ناحیهٔ کم‌عمق $v_s = ۰/۴۰\,v_d$ داده شده است. بنابراین داریم :

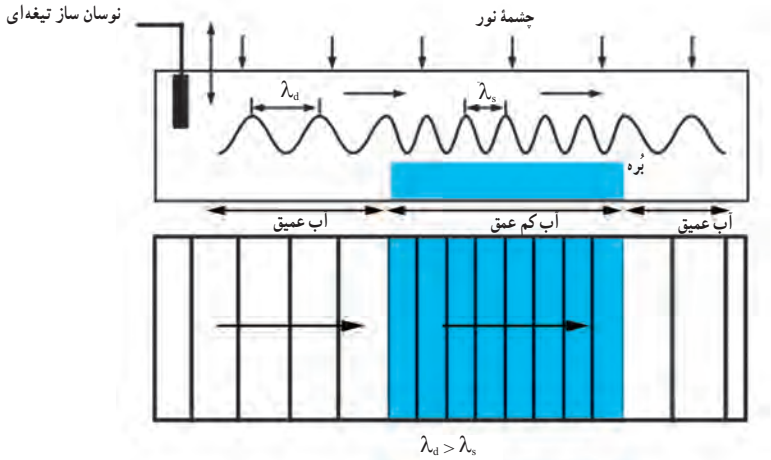
$$\frac{v_d}{۱۰\,cm}=\frac{۰/۴۰\,v_d}{\lambda_s}$$

از آنجا $\lambda_s = ۴/۰\,cm$ به‌دست می‌آید که همان طور که انتظار داشتیم از λ_d کوچک‌تر است. در این تمرین برای محاسبهٔ λ_s نیازی به دانستن بسامد f نداشتیم، مگر آنکه در ادامهٔ تمرین، پرسش دیگری نیز مطرح می‌شد و مثلاً تندی موج در ناحیهٔ عمیق یا کم‌عمق پرسیده می‌شد. در آن صورت، به ترتیب برای تندی در ناحیهٔ عمیق و کم‌عمق خواهیم داشت

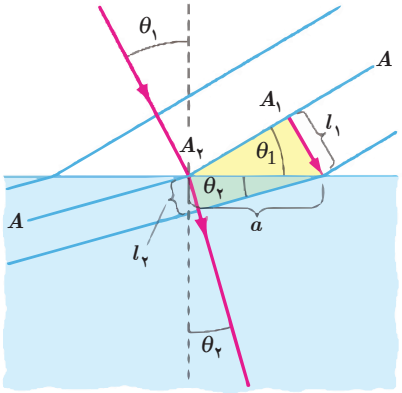
$$v_d = (۵/۰\,s^{-۱})\,(۱۰\,cm) = ۵۰\,cm/s$$

$$v_s = ۰/۴۰\,v_d = ۰/۴۰\,(۵۰\,cm/s) = ۲۰\,cm/s$$

این پاسخ‌ها نشان می‌دهد که بسامد داده شده برای نوسان تیغه، مقداری منطقی برای چنین آزمایش‌هایی است. شکل زیر، تحلیلی از آنچه در این آزمایش رخ می‌دهد را برای حالت ساده‌ای نشان می‌دهد که جبهه‌های موج موازی با مرز بین دو ناحیهٔ عمیق و کم‌عمق هستند و برای آنها شکستی رخ نمی‌دهد، ولی همچنان طول موج تغییر می‌کند.



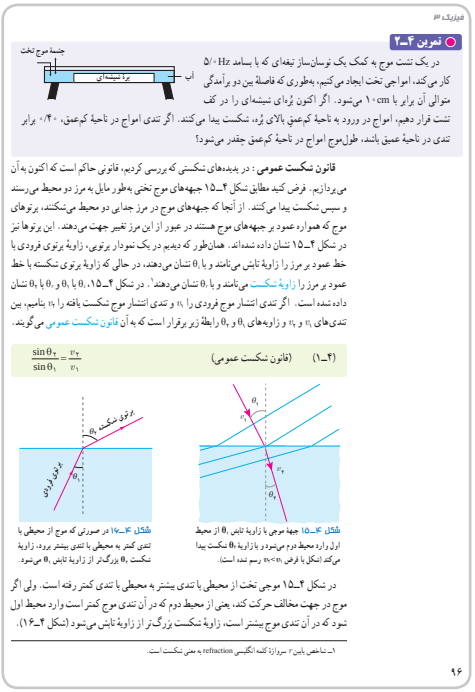
اثبات رابطهٔ ۴ــ۱ بسیار ساده است و دانش‌آموزان می‌توانند با دانشی که از درس هندسهٔ خود آموخته‌اند به آسانی آن را درک کنند. خوب است برای دانش‌آموزان علاقه‌مند به عنوان یک دانستنی این اثبات مطرح شود. دانش‌آموزان از درس هندسهٔ خود آموخته‌اند که اگر دو ضلع یک زاویهٔ حاده (بسته) بر دو ضلع زاویهٔ حاده‌ای دیگر عمود باشد، آن دو زاویه با هم برابرند. بنابراین زاویه‌های حاده نشان داده شده در مثلث‌های قائم‌الزاویه زرد و سبز به ترتیب با θ_1 و θ_2 برابرند. اکنون با استفاده از تعریف نسبت مثلثاتی سینوس یک زاویه، به ترتیب برای مثلث‌های قائم‌الزاویه زرد و سبز داریم :



شکل ۴ــ۲۵ جبهه موجی با زاویهٔ تابش θ_1 از محیط اول وارد محیط دوم می‌شود و با زاویهٔ θ_2 شکست پیدا می‌کند.

$$\sin\theta_1 = \frac{L_1}{a} = \frac{v_1 t}{a} \ , \ \sin\theta_2 = \frac{L_2}{a} = \frac{v_2 t}{a}$$

از تقسیم این دو رابطه بر هم قانون شکست عمومی به‌دست می‌آید.



فیزیک ۳

تمرین ۴ــ۲

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

جسمهٔ موج تخت — پرهٔ شیشه‌ای — آب

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_1 نشان می‌دهند، در حالی که زاویهٔ پرتوی شکسته با خط عمود بر مرز را زاویهٔ شکست می‌نامند و با θ_2 نشان می‌دهند[1]. در شکل ۴ــ۱۵، θ_1 یا θ_1 و θ_2 یا 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.

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

شکل ۴ــ۱۵ جبهه موجی با زاویهٔ تابش θ_1 از محیط اول وارد محیط دوم می‌شود و با زاویهٔ θ_2 شکست پیدا می‌کند (شکل با فرض $v_2<v_1$ 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 بالین ' سرواژهٔ کلمهٔ انگلیسی refraction به معنی شکست است.

۹۶

پاسخ تمرین ۴ـ۳

در اینجا فرض شده است رابطهٔ $v_s = ۰/۴۰\, v_d$ همچنان برقرار است. بنابراین با استفاده از قانون شکست عمومی داریم :

$$\frac{\sin\theta_r}{\sin\theta_i} = \frac{v_s}{v_d} = \frac{۰/۴۰\, v_d}{v_d} = ۰/۴۰$$

که در آن $\sin\theta_i = ۳۰^\circ$ است. بنابراین داریم :

$$\sin\theta_r = (۰/۴۰)(\sin ۳۰^\circ) = ۰/۲۰$$

و در نتیجه $\theta_r = ۱۱/۵۳^\circ \approx ۱۲^\circ$ می‌شود.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

تمرین ۴ـ۳

در تمرین ۴ـ۳ 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.

کاربرد فیزیک در علوم

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 فیزیکی اش 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 دای بزرگ‌تر از حدود $۱۰\,m$) 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 برتنش زمینی مربوط به پیرامون ایستگاه است، که امواج به‌طور مستقیم به گیرنده می‌رسد. منطقهٔ ردشدگی ناحیه‌ای است که امواج به زمین نمی‌رسد، و ناحیهٔ برتنش هوایی ناحیه‌ای است که امواج رادیویی با بازگشت از یون سپهر به زمین می‌رسد.

پرسش ۴ـ۲

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.

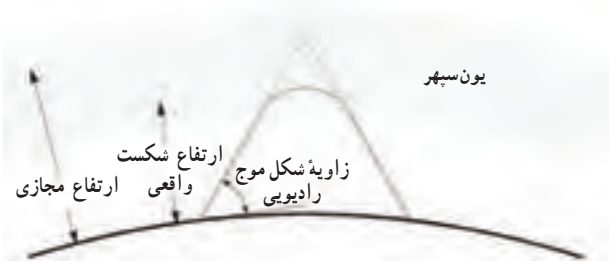
وقتی یک پرتوی نور از محیطی شفاف وارد محیط شفاف دیگری شود، بخشی از نور بازمی‌تابد و بخشی دیگر وارد محیط دوم می‌شود. همان‌طور که انتظار داریم آن بخش نور که وارد محیط دوم می‌شود، به دلیل آنکه تندی آن در محیط دوم تغییر می‌کند، شکسته می‌شود (شکل ۴ـ۱۷). به همین دلیل برای هر محیط ضریب شکست تعریف می‌کنند که برابر با نسبت تندی نور در خلأ به تندی نور در آن محیط است :

$$n = \frac{\text{تندی نور در خلأ}}{\text{تندی نور در یک محیط}} = \frac{c}{v} \qquad \text{(تعریف ضریب شکست)} \qquad (۴\text{ـ}۲)$$

شکل ۴ـ۱۷ در عبور یک پرتوی نور از محیطی شفاف به محیط شفافی دیگر، بخشی از نور بازمی‌تابد و بخشی می‌شکند.

۹۷

در اینجا خوب است با نشان دادن تصاویری مانند شکل زیر تأکید کنید که آنچه در یون‌سپهر رخ می‌دهد یک بازتاب «تیز» نیست و توضیح این بازتاب مانند چیزی است که در پدیدهٔ سراب خواهید دید.



پاسخ پرسش ۴ـ۲

باید بر خطّ جدایی محیط‌ها، خطوط عمود بر سطح را رسم کنیم و بعد به تحلیل این پرسش بپردازیم. اگر توجه کنید درمی‌یابید در محیط b پرتو از خطّ عمود دور می‌شود. این یعنی اینکه پرتو از محیطی که در آن تندی نور کمتر است وارد محیطی شده است که در آن تندی نور بیشتر است. ولی پس از آن، در محیط c، پرتو به خطّ عمود نزدیک می‌شود. بنابراین تندی نور در محیط c کمتر از تندی نور در محیط b است. و به همین ترتیب، تندی نور در محیط a کمتر از تندی نور در محیط c است : $v_b > v_c > v_a$. به عبارتی، همان‌طور که بعداً خواهیم دید پرتو از محیطی با ضریب شکست بالا (محیط a) وارد محیطی با ضریب شکست کمتر (محیط b) و سپس وارد محیطی با ضریب شکست بیشتر از b (محیط c) و سرانجام وارد محیطی با ضریب شکست بیشتر از آن (که دوباره همان a است) می‌شود. پس ترتیب ضریب شکست‌های محیط از کمترین به بیشترین، به ترتیب n_b ، n_c و n_a است. کمترین ضریب شکست مربوط به محیط b و بیشترین ضریب شکست مربوط به محیط a است.

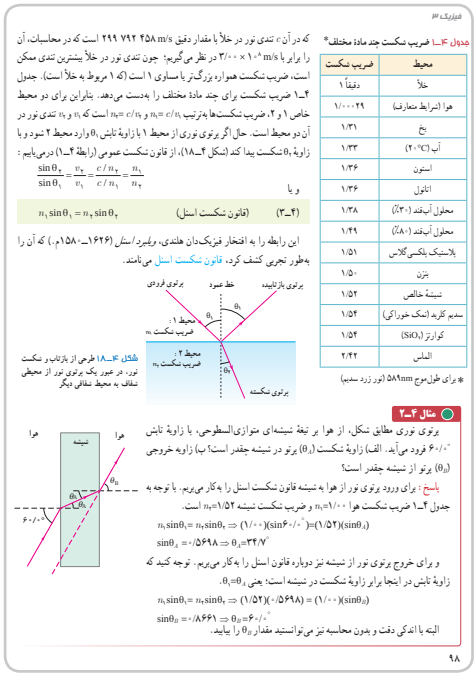
فیلم

در این فیلم، نمایشی از شکست نور در آب را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم تأثیر تفاوت ضریب شکست را در تصویر ایجاد شده می‌بینید.

توجه کنید ضریب شکست به طول موج بستگی دارد و در این کتاب ضریب‌های شکست برای طول موج نور زرد سدیم (589 nm) تعریف شده است.



فیزیک ۳

جدول ۴ـ۱ 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 پلکی‌گلاس	۱/۵۱
بنزن	۱/۵۰
شیشهٔ خالص	۱/۵۲
سدیم کلرید (نمک خوراکی)	۱/۵۴
کوارتز (SiO_2)	۱/۵۴
الماس	۲/۴۲

* برای طول‌موج ۵۸۹nm (نور زرد سدیم)

که در آن c تندی نور در خلأ با مقدار دقیق $299\,792\,458\ m/s$ است که در محاسبات، آن را برابر با $3/00 \times 10^8\ m/s$ 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 ۴ـ۱ ضریب شکست برای چند مادهٔ مختلف را به‌دست می‌دهد. بنابراین برای دو محیط خاص ۱ و ۲، ضریب شکست‌ها به‌ترتیب $n_1 = c/v_1$ و $n_2 = c/v_2$ است که v_1 و v_2 تندی نور در آن دو محیط است. حال اگر پرتوی نوری از محیط ۱ با زاویهٔ تابش θ_1 وارد محیط ۲ شود و با زاویهٔ θ_2 شکست پیدا کند (شکل ۴ـ۱۸)، از قانون شکست عمومی (رابطهٔ ۴ـ۱) درمی‌یابیم:

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{c/n_2}{c/n_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

و یا

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad \text{(قانون شکست اسنل)} \qquad (۴ـ۳)$$

این رابطه را به افتخار فیزیک‌دان هلندی، ویلبرد اسنل (۱۶۲۶ـ۱۵۸۰ م.) که آن را به‌طور تجربی کشف کرد، قانون شکست اسنل می‌نامند.

شکل ۴ـ۱۸ طرحی از بازتاب و شکست نور. در عبور یک پرتوی نور از محیطی شفاف به محیط شفافی دیگر

مثال ۴ـ۲

پرتوی نوری مطابق شکل، از هوا بر تیغهٔ شیشه‌ای متوازی‌السطوحی، با زاویهٔ تابش ۶۰/۰° فرود می‌آید. الف) زاویهٔ شکست (θ_1) پرتو در شیشه چقدر است؟ ب) زاویه خروجی (θ_2) پرتو از شیشه چقدر است؟

پاسخ: برای ورود پرتوی نور از هوا به شیشه قانون شکست اسنل را به‌کار می‌بریم. با توجه به جدول ۴ـ۱ ضریب شکست هوا $n_1 = 1/00$ و ضریب شکست شیشه $n_2 = 1/52$ است.

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \Rightarrow (1/00)(\sin 60/0^\circ) = (1/52)(\sin\theta_1)$$

$$\sin\theta_1 = 0/5698 \Rightarrow \theta_1 = 34/7^\circ$$

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 $\theta_1 = \theta_2$.

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \Rightarrow (1/52)(0/5698) = (1/00)(\sin\theta_2)$$

$$\sin\theta_2 = 0/8661 \Rightarrow \theta_2 \cong 60/0^\circ$$

البته با اندکی دقت و بدون محاسبه نیز می‌توانستید مقدار θ_2 را بیابید.

۹۸

فیلم

در این فیلم تحلیلی از قانون اسنل را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم تأثیر تفاوت ضریب شکست را در تصویر ایجاد شده می‌بینید.

پاسخ پرسش ۴ـ۳

در هر سه شکل باید خطّ عمود بر سطح جدایی را رسم و با بررسی چگونگی انحراف پرتوی شکسته، آن را تحلیل کرد. در شکل (الف) پرتوی نور از محیطی با ضریب شکست کمتر وارد محیطی با ضریب شکست بیشتر شده است. وقتی پرتو از محیط با ضریب شکست کمتر وارد محیطی با ضریب شکست بیشتر می‌شود، پرتو باید به خط عمود نزدیک‌تر شود که این در شکل (الف) برقرار است و بنابراین شکل (الف) از لحاظ فیزیکی ممکن است. اما شکل‌های (ب) و (پ) از لحاظ فیزیکی ناممکن هستند. زیرا در شکل (ب) اصلاً پرتوی شکسته در سویی نادرست رسم شده است و در شکل (پ) پرتو از خط عمود دور شده است که همان‌طور که

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

پرسش ۴ـ۳

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

فعالیت ۴ـ۲

اندازه‌گیری ضریب شکست: با توجه به مثال ۴ـ۲، آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان ضریب شکست یک تیغهٔ متوازی‌السطوح شفاف را اندازه گرفت.

شکل ۴ـ۱۹ تصویر یک خودرو در سراب بر سطح گرم جاده

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 آبگر[1] می‌گویند و نه‌تنها می‌توان آن را دید، بلکه می‌توان از آن عکس هم گرفت (شکل ۴ـ۱۹).

در روزهای گرم هوای سطح زمین نسبتاً داغ است. از طرفی، جگالی هوا با افزایش دما کاهش می‌یابد که این سبب کاهش ضریب شکست نیز می‌شود (شکل ۴ـ۲۰). در شکل ۴ـ۲۱ 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 جبه 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 ۴ـ۲۲ 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 ۴ـ۲۲ 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 تزدیک شدن به خط عمود، بیشتر و بیشتر رو به بالا خم می‌شوند (شکل ۴ـ۲۲ ب) 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 ۴ـ۲۱ نشان داده شده است این حس را ایجاد می‌کند که گویی از سطح زمین آمده است.

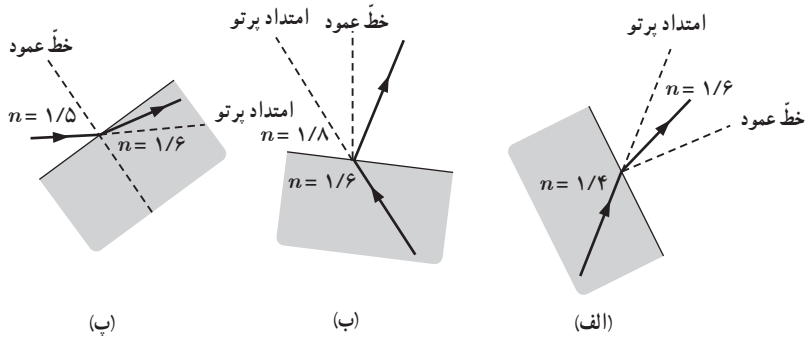
شکل ۴ـ۲۰ نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما

شکل ۴ـ۲۱ علت‌یابی 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.

[1] Oasis mirage

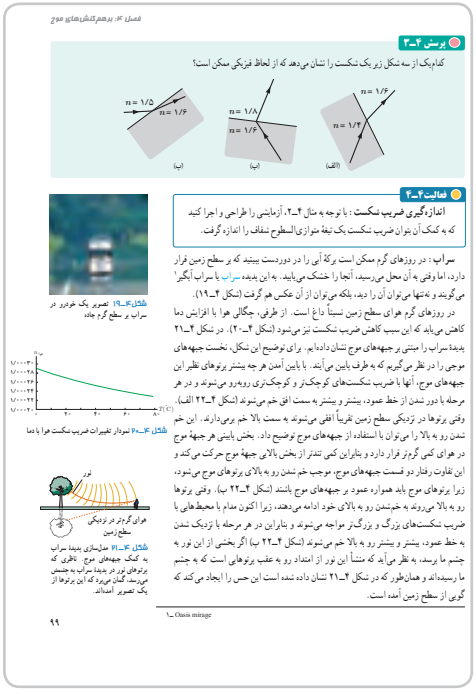
۹۹

گفتیم در عبور پرتو از محیطی با ضریب شکست کمتر به محیطی با ضریب شکست بیشتر، پرتو باید به خط عمود نزدیک‌تر شود.



پاسخ فعالیت ۴ـ۴

یک تیغهٔ متوازی‌السطوح را درنظر بگیرید و آن را روی کاغذ سفیدی قرار دهید. باریکهٔ نوری را به وجهی از تیغه بتابانید به‌طوری که از وجه مقابل آن خارج شود. محل تیغه بر کاغذ را با رسم اضلاع آن برروی کاغذ مشخص کنید. همچنین مسیر باریکهٔ فرودی و باریکهٔ خروجی از تیغه را روی کاغذ رسم کنید. برای رسم دقیق‌تر مسیر باریکه‌های فرودی و خروجی می‌توانید مطابق شکل الف کاغذ سفید را روی قطعه یونولیتی قرار دهید و مسیر باریکه‌ها را با فروبردن سوزن‌هایی در آن مشخص کنید. اکنون تیغه را بردارید و با استفاده از یک خط‌کش، مسیر باریکهٔ نور در درون تیغه را رسم کنید. بر روی مسیر باریکه‌های نور، پیکانه‌هایی رسم کنید تا جهت پرتوها مشخص شود. با استفاده از یک نقاله، خطوط عمود بر وجه‌های تیغه در محل ورود و خروج باریکه‌های نور را رسم کنید و زاویه‌های بین باریکه‌ها و خطوط عمود را اندازه بگیرید. شکل ب، طرحی از چنین ترسیمی را نشان می‌دهد. اکنون می‌توانیم با استفاده از قانون اسنل برای ورود باریکه از هوا به تیغه، ضریب شکست تیغه را به‌دست آوریم و یا اینکه ضریب شکست را با استفاده از قانون اسنل برای خروج باریکه از تیغه به هوا بیابیم. بدیهی است که این دو مقدار نباید تفاوت چندانی داشته باشند. درهر صورت آزمایش را به یکی از دو طریق بالا، برای گستره‌ای از زاویه‌های فرودی انجام دهید و مقدار ضریب شکست را با میانگین از عددهای حاصل گزارش کنید.



فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

پرسش ۴ـ۳

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

فعالیت ۴ـ۴

اندازه‌گیری ضریب شکست: با توجه به مثال ۴ـ۲، آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که با 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 آبگر[1] می‌گویند و نه‌تنها می‌توان آن را دید، بلکه می‌توان از آن عکس هم گرفت (شکل ۴ـ۱۹).

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 ۴ـ۲۰). در شکل ۴ـ۲۱ 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 جبه بیشتر پرتوهای نظیر این جبه‌های 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 ۴ـ۲۲ 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 جبه‌های موج توضیح داد. بخش پایینی هر جبهٔ موج در هوای کمی گرم‌تر قرار دارد و بنابراین کمی تندتر از بخش بالایی جبههٔ موج حرکت می‌کند و این تفاوت رفتار دو قسمت جبه‌های موج، موجب خم شدن رو به بالای پرتوهای موج می‌شود، زیرا پرتوهای موج باید همواره عمود بر جبه‌های موج باشند (شکل ۴ـ۲۲ 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 ۴ـ۲۲ ب) اگر بخشی از این نور به چشم ما برسد، به نظر می‌آید که منشأ این نور از امتداد رو به عقب پرتوهای است که به چشم ما رسیده‌اند و همان‌طور که در شکل ۴ـ۲۱ نشان داده شده است این حس را ایجاد می‌کند که گویی از سطح زمین آمده است.

شکل ۴ـ۱۹ تصویر یک خودرو در سراب بر سطح گرم جاده

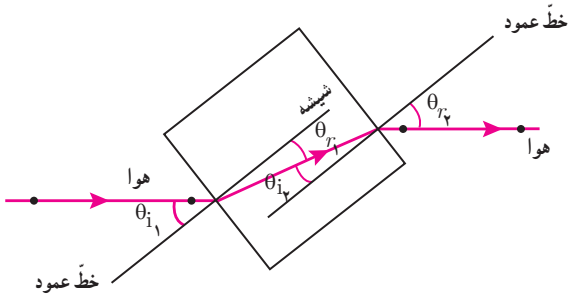
شکل ۴ـ۲۰ نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما

شکل ۴ـ۲۱ مدل‌سازی پدیدهٔ سراب به کمک جبه‌های موج. ناظری که پرتوهای نور در پدیدهٔ سراب به چشمش می‌رسد، گمان می‌برد که این پرتوها از یک تصویر آمده‌اند.

۱ـ Oasis mirage

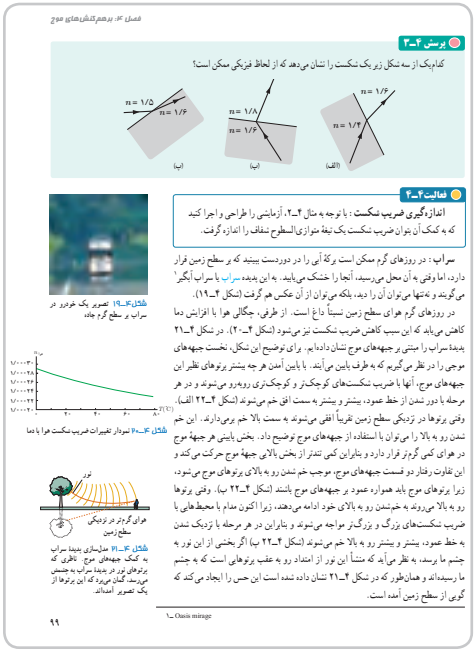
۹۹

الف) تصویری از اسباب آزمایش اندازه‌گیری ضریب شکست



ب) در نمودار پرتویی آزمایش توجه کنید θ_i زاویه تابش و θ_r زاویهٔ شکست و $\theta_{i_1} = \theta_{r_2}$ و $\theta_{i_2} = \theta_{r_1}$ است. بنابراین پرتوهای فرودی و خروجی باهم موازی‌اند

یکی از خطاهای بسیار رایج این است که پدیدهٔ سراب را مبتنی بر پدیدهٔ بازتاب داخلی کلی توضیح می‌دهند. تأکید شود که این یک خطای رایج است و اگر قانون اسنل را برای حضیض خمیدگی بنویسید به‌سادگی نادرستی این استدلال را درمی‌یابید، ضمن اینکه از لحاظ تجربی هم ثابت شده است که نور بازتابیده قطبیده (polarized) است، در حالی که برای سراب چنین نیست. همچنین در اینجا خوب است دانش‌آموزان را به پدیدهٔ سراب صوتی نیز ارجاع دهید و نیز اکنون دانش‌آموزان «خوب است بدانید» مربوط به ارسال امواج رادیویی را می‌توانند درک کنند.



فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

پرسش ۴ـ۳

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

فعالیت ۴ـ۴

اندازه‌گیری ضریب شکست: با توجه به مثال ۴ـ۲، آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان ضریب شکست یک تیغهٔ موازی‌السطوح 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[1] می‌گویند و به‌تنها می‌توان آن را دید، بلکه می‌توان از آن عکس هم گرفت (شکل ۴ـ۱۹).

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 ۴ـ۲۰). در شکل ۴ـ۲۱ 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 جبهه 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 ۴ـ۲۲ 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 ۴ـ۲۲ 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 ۴ـ۲۲ ب) 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 ۴ـ۲۱ نشان داده شده است این حس را ایجاد می‌کند که گویی از سطح زمین آمده است.

شکل ۴ـ۱۹ تصویر یک خودرو در سراب بر سطح گرم جاده

شکل ۴ـ۲۰ نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما

شکل ۴ـ۲۱ مدل‌سازی پدیدهٔ سراب به کمک جبهه‌های موج. تلاقی که پرتوهای نور در پدیدهٔ سراب به چشمش می‌رسد، گمان می‌برد که این پرتوها از یک تصویر آمده‌اند.

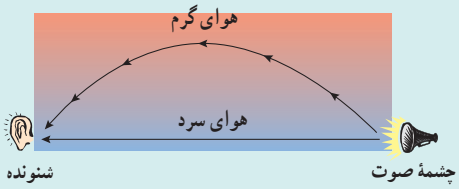
۱ـ Oasis mirage

۹۹

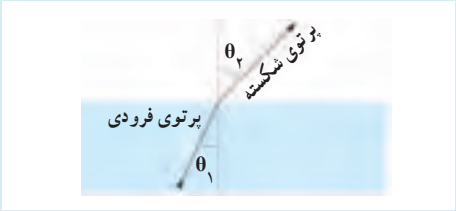
دانستنی برای معلم

شکست امواج صوتی

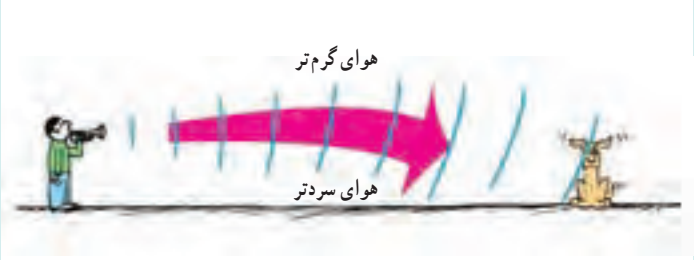
شکست برای امواج صوتی نیز می‌تواند رخ دهد ولی اهمیت آن به اندازهٔ پدیده‌هایی نیست که بر اثر شکست نور رخ می‌دهد. با این حال شکست صوت نیز به پدیده‌های جالبی می‌انجامد. مثلاً وقتی هوای بالای زمین گرم‌تر از هوای سطح زمین باشد، امواج صوتی پس از گسیل از سطح زمین بر اثر پدیدهٔ شکست، به پایین بازمی‌گردند و صوتی اضافی را افزون بر صوتی که مسیر مستقیم را می‌پیماید به گوش شنونده می‌رسانند و بدین ترتیب عملاً سبب تقویت صدایی می‌شوند که به شنونده می‌رسد (شکل ۱). این تقویت‌کننده‌های طبیعیِ صوت معمولاً در صبح‌های خیلی زود، پیش از طلوع آفتاب بر فراز دریاچه‌های سرد و یا هر گاه وارونگی هوا رخ دهد، بروز پیدا می‌کنند. یک توضیح این پدیده با استفاده از رابطهٔ ۴ـ۱ است که برای شکست امواج به دست آوردیم. اگر در شکل ۴ـ۱۶ کتاب، موج در جهت مخالف حرکت کند، یعنی از محیطی که در آن تندی موج کمتر است، وارد محیطی شود که در آن تندی موج بیشتر است، زاویهٔ شکست بزرگ‌تر از زاویهٔ تابش می‌شود (شکل ۲). در فصل پیش آموختیم که تندی صوت با دما رابطه دارد (این رابطه متناسب با جذر دما است) و بنابراین تندی صوت در هوای گرم‌تر بیشتر از تندی صوت در هوای سرد است. بنابراین وقتی صوت رو به بالا می‌رود، چون از هوای سردتر به هوای گرم‌تر رفته است، تندی آن افزایش می‌یابد و بدین ترتیب زاویهٔ پرتویِ صوت با خطّ عمود، با افزایش ارتفاع، بیشتر و بیشتر می‌شود. وقتی صوت روبه پایین می‌آید، چون از هوای گرم‌تر به هوای سردتر رفته است، تندی آن کاهش می‌یابد و بدین ترتیب زاویهٔ پرتوی صوت با خطّ عمود، با کاهش ارتفاع، کمتر و کمتر می‌شود. بنابراین صوت گسیل‌شده از چشمهٔ صوت، افزون بر مسیر مستقیم، از مسیر خمیده نیز به شنونده می‌رسد. البته روش پرتویی به‌سادگی نمی‌تواند دلیل خم شدن مسیر پرتو از نقطهٔ بالای مسیر به سمت شنونده را توضیح دهد. در اینجا برای توجیه خم شدن پرتوی صوت، ساده‌تر آن است که از روش جبهه‌های موج استفاده کنیم. شکل ۳ رفتار جبهه‌های موج صوتی را در حالتی که برخلاف معمول، هوای نزدیک سطح زمین سردتر از هوای بالای آن است نشان می‌دهد. توجه کنید که تمام نقاط یک جبههٔ موج دمای یکسانی ندارند و بخش بالایی آنها در هوای گرم‌تر و بخش پایینی آنها در هوای سردتر قرار دارد. بنابراین بخش‌های بالایی که در هوای گرم‌تر قرار دارند کمی تندتر از بخش‌های پایینی حرکت می‌کنند. این تفاوت رفتار دو قسمت جبهه‌های موج که بخشی تندتر و بخشی کندتر حرکت می‌کنند مانند همان اتفاقی است که موجب تغییر جهت جبهه‌های موج سطحی آب در نزدیکی ساحل می‌شود. به این ترتیب پرتوهای موج که همواره باید عمود بر جبهه‌های موج باشند، رو به پایین خم برمی‌دارند.



شکل ۱ــ هنگامی که برخلاف معمول، هوای سطح زمین سردتر از هوای بالای آن باشد، صوت افزون بر مسیر مستقیم، با شکست از لایه‌های هوا، به گوش شنونده می‌رسد.



شکل ۲ــ در صورتی که موج از محیطی با تندی بیشتر برود، زاویهٔ شکست θ_2 بزرگ‌تر از زاویهٔ تابش θ_1 می‌شود.

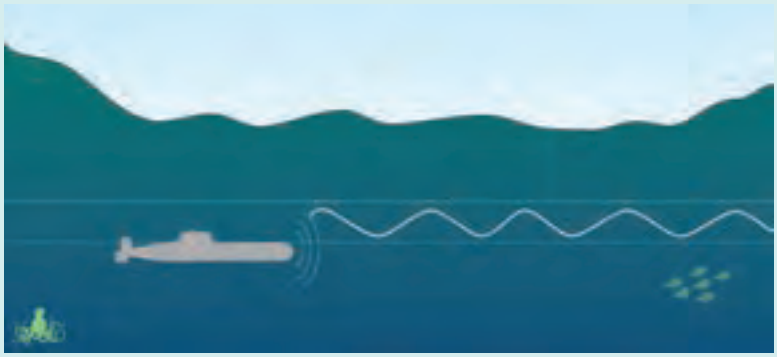


شکل ۳ــ چگونگی خم شدن جبهه‌های موج صوتی، وقتی هوای سطح زمین سردتر از هوای بالای آن است.

دانستنی برای معلم

شنیدن صدای زیردریایی‌های دشمن

در طول جنگ سرد، کشور آمریکا، زیردریایی‌های کشور شوروی را با شبکه‌ای از آنتن‌های صوتی در زیرآب دیدبانی می‌کرد، به‌طوری که حتی می‌توانست صدای ملخ پرسروصدای یک زیردریایی را از فاصله‌ای ۱۰۰۰ کیلومتری، در عرض‌های جغرافیایی میانی بشنود. در واقع صداهایی که از این زیردریایی‌ها گسیل می‌شد، در چیزی موسوم به *کانال صوتی عمیق* (DSC)[1] گیر می‌افتاد و به طور طولی به سمت آنتن‌های صوتی حرکت می‌کرد. توضیح ماجرا به این ترتیب است که تندی صوت در آب دریا، هم به عمق آب و هم به دمای آن بستگی دارد. اگر با پایین رفتن در آب، تندی صوت را اندازه بگیریم، نخست اثر دما غالب است و با کاهش دما تندی صوت نیز کاهش می‌یابد. اما با پیشتر رفتن در عمق آب سرانجام تأثیر عمق غالب می‌شود و از آن به بعد، تندی صوت افزایش پیدا می‌کند. بنابراین گستره‌ای از عمق وجود دارد که در آن تندی صوت کمینه است. اگر صوت در این گستره حرکت کند و بخواهد به درون منطقه‌ای با تندی بیشتر برود، بر اثر تغییر تندی، مانند آنچه در شکل ۳ دانستنی قبل دیدیم به طرف ناحیه‌ای با تندی کمتر شکست پیدا می‌کند و بنابراین در حرکتی رفت و برگشتی در این کانال صوتی گیر می‌افتد رو به جلو، به سمت آنتن‌های گیرنده، پیش می‌رود. از این سازوکار برای ارسال کم‌اتلاف امواج صوتی در اقیانوس‌ها نیز استفاده می‌شود.



۱ــ Deep Sound Channel

خوب است در پایان بحث به عنوان اطلاعات عمومی توضیحی در مورد زاویهٔ حد به دانش‌آموزان ارائه شود و آنها را به دانستنی مربوط به آن نیز ارجاع دهید.

فیزیک ۳

شکل ۴ـ۱۶ الف) شیفتگی افراق‌آمیز یک پرتوی نور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم به سمت هوای گرم‌تر پایین می‌رود. ب) تغییر جبهه‌های موج و شیفتگی مربوط به آن، به این دلیل رخ می‌دهد که انتهای پایین جبهه‌های موج در هوای گرم‌تر سریع‌تر حرکت می‌کنند. پ) شیفتگی افراق‌آمیز 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 ۴ـ۲۳ الف). دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیطی به جز 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 بخش‌شدگی نور، پاشندگی نور می‌گویند. عموماً ضریب شکست یک محیط معیّن برای طول‌موج‌های کوتاه‌تر، بیشتر است. نمودار شکل ۴ـ۲۴ 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 پر از شکست نور، مؤلفه‌های سازندهٔ باریکهٔ نور سفید هر کدام به میزان متفاوتی خم می‌شوند 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 ۴ـ۲۳ ب)[1].

تمرین ۴ـ۴

شکل روبه‌رو باریکهٔ نوری متشکل از دو پرتوی قرمز و آبی را نشان می‌دهد که از هوا و با زاویهٔ تابش 25° 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 $n_{\text{آبی}} = 1/467$.

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

۱۰۰

پاسخ تمرین ۴ـ۴

قانون اسنل را به‌طور مجزا برای دو پرتوی قرمز و آبی می‌نویسیم.

برای پرتوی قرمز داریم :

$$n_1 \sin\theta_1 = n_{\text{قرمز و ۲}} \sin\theta_{\text{قرمز و ۲}}$$

و از آنجا

$$\sin\theta_{\text{قرمز و ۲}} = \frac{n_1}{n_{\text{قرمز و ۲}}}\sin\theta_1 = \frac{1/000}{1/459}\sin 45/0^\circ$$

که به $\theta_{\text{قرمز و ۲}} = 28/9^\circ$ می‌انجامد و برای پرتوی آبی داریم :

$$\sin\theta_{\text{قرمز و ۲}} = \frac{n_1}{n_{\text{قرمز و ۲}}}\sin\theta_1 = \frac{1/000}{1/467}\sin 45/0^\circ$$

که به $\theta_{\text{قرمز و ۲}} = 28/8^\circ$ می‌انجامد. (در حلّ این تمرین، زاویهٔ تابش دقیقاً $45/0^\circ$ درنظر گرفته شد، چرا که در غیر این‌صورت هر دو پاسخ به 29° می‌انجامید و تفاوت فیزیکی این دو حالت دیده نمی‌شد.) اختلاف ناچیز همین دو زاویه است که به پاشندگی نور انجامیده است.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

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 فناوری 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 بیش 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.

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 مسی معمولی (شکل سمت راست) انتقال دهد.

پ) طرح ساده‌شده‌ای از طرز کار یک آندوسکوپ

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.

۱۰۱

فیلم

در این فیلم چگونگی طرز کار یک تار نوری را می‌بینید.

دانستنی برای معلم

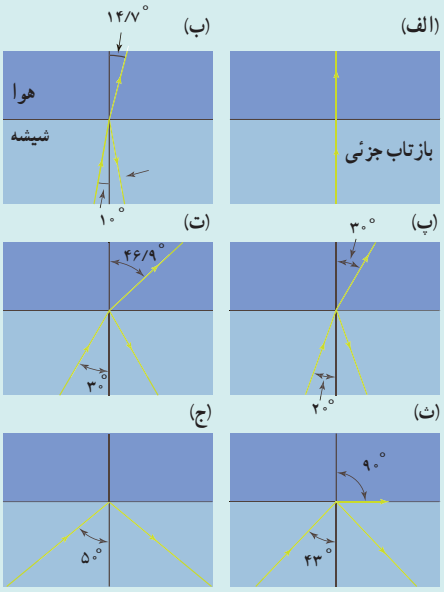
بازتاب داخلی کلی

وقتی نور از محیطی با ضریب شکست بیشتر به طور مایل وارد محیطی با ضریب شکست کمتر شود (مثلاً از شیشه وارد هوا گردد)، بخشی از نور در سطح مشترک بازمی‌تابد و بقیهٔ نور طوری شکست می‌یابد که از خطّ عمود دور می‌شود. اگر زاویهٔ تابش را بزرگ‌تر و بزرگ‌تر کنیم، زاویهٔ شکست نیز بزرگ‌تر و بزرگ‌تر می‌شود (شکل‌های ۱ الف تا ت) تا اینکه به ۹۰° برسد (شکل ۱ ث). از این پس برای هر زاویهٔ تابش بزرگ‌تری پرتوی شکسته‌ای وجود نخواهد داشت و همهٔ نور فرودی، بازتابیده می‌شود (شکل ۱ ج). به این پدیده **بازتاب داخلی کلی** می‌گویند. زاویه‌های شکست در شکل ۱ براساس قانون اسنل تعیین شده‌اند و به زاویهٔ تابشی که به ازای آن، زاویهٔ شکست برابر ۹۰° می‌شود (اصطلاحاً *زاویهٔ حد* می‌گویند و آن را با θ_C نشان می‌دهند.) اکنون به‌ازای $\theta_۲ = ۹۰^\circ$ و $\theta_۱ = \theta_۲$، با استفاده از قانون اسنل خواهیم داشت

$$n_۱ \sin\theta_C = n_۲ \sin ۹۰^\circ$$

و از آنجا زاویهٔ حدّ θ_C را می‌توانیم با استفاده از رابطهٔ زیر به دست آوریم

$$\sin\theta \quad = \text{—}$$

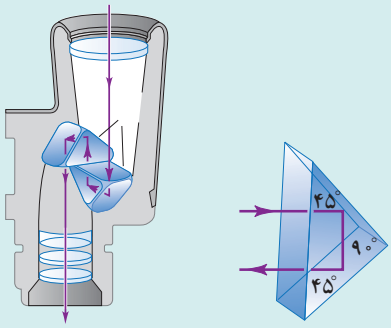


شکل ۱ــ پرتوی نوری با عبور از شیشه به سطح مشترک شیشه ــ هوا با زاویه‌های تابش مختلف برخورد می‌کند. با بزرگ‌تر شدن زاویهٔ تابش، زاویهٔ شکست نیز بزرگ می‌شود تا اینکه به ازای زاویهٔ حد، به ۹۰° می‌رسد. از آن پس، همهٔ نور فرودی بازمی‌تابد.

افزون بر تاری نوری، بازتاب داخلی کلی کاربردهای دیگری نیز دارد که در اینجا به آنها می‌پردازیم.

بازتاباننده‌ها و دوربین‌های دوچشمی

این واقعیت که زاویهٔ حد برای سطح شیشه ــ هوا با استفاده از رابطهٔ $\sin\theta_C = \frac{۱}{۱/۵۲} = ۰/۶۵۸$ برابر $\theta_C = ۴۱/۱^\circ$ به‌دست می‌آید، استفاده از منشوری مثلثی با زاویه‌های ۴۵°، ۴۵° و ۹۰° را به عنوان یک سطح بازتاباننده‌ٔ *کامل* برای پرتویی که مطابق شکل ۲ الف به وجوه ۴۵°ی آن تابیده، امکان‌پذیر می‌کند. به عبارتی، زاویهٔ تابش در این وجوه ۴۵° و بزرگ‌تر از زاویهٔ حد است و بنابراین در این وجوه بازتاب کلی رخ می‌دهد. یک منشوربازتاباننده‌ٔ کامل این مزیت را بر آینه‌های معمولی دارد که برخلاف آنها ۱۰۰٪ نور تابیده به خود را بازمی‌تاباند، ضمن اینکه خاصیت بازتابانندگی آن تحت تأثیر کدر شدن سطوح آن قرار نمی‌گیرد. به چنین منشوری، منشور پورّو[1] می‌گویند و معمولاً از ترکیب دوتای آنها در دوربین‌های دوچشمی استفاده می‌شود (شکل ۲ ب).



(ب) (الف)

شکل ۲ــ (الف) بازتاب داخلی کلی در یک منشور پورّو (ب) دوربین‌های دوچشمی از دو منشور پورّو برای بازتاباندن نور به هر عدسی چشمی استفاده می‌کند.

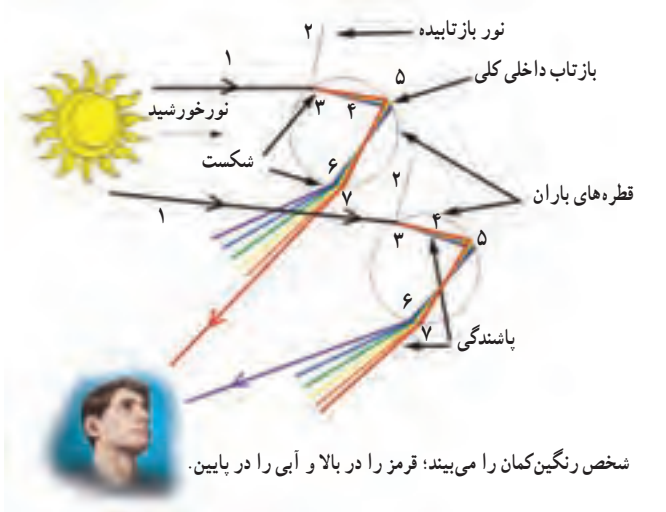
رنگین‌کمان

تشکیل یک رنگین‌کمان شامل مجموعه‌ای از پدیده‌های فیزیکی، از جمله بازتابش، شکست، پاشندگی، و بازتاب داخلی کلی است. مراحل تشکیل رنگین‌کمان بدین ترتیب است : ۱ــ نور سفید حاصل از خورشید به قطره‌های باران برخورد می‌کند. هر چه خورشید در ارتفاع پایین‌تری در آسمان باشد (مثلاً در هنگام سپیده‌دم یا غروب آفتاب) امکان مشاهدهٔ رنگین‌کمان بیشتر است. ۲ــ برخی از نور تابیده بازتابش پیدا می‌کند. این مانند حالتی است که تصویر خود را در یک شیشهٔ پنجرهٔ شفاف می‌بینید. شیشه هم بخشی از نور را عبور می‌دهد و هم بخشی از آن را بازمی‌تاباند. ۳ــ بقیهٔ نور شکست پیدا می‌کند. چون ضریب شکست آب بیشتر از هواست، نور به سمت خط عمود شکست پیدا می‌کند. ۴ــ نور سفید شامل مجموعه‌ای از رنگ‌ها با طول موج‌های مربوط به خود است. بنابراین همان‌طور که در مبحث پاشندگی دیدیم، هر طول موج در آب با تندی متفاوتی حرکت می‌کند و در نتیجه رنگ‌ها از هم جدا می‌گردند. ۵ــ نور شکسته‌یافته با سطح عقبی قطره برخورد می‌کند و اگر زاویهٔ تابش آن بزرگ‌تر از زاویهٔ حد باشد، دستخوش بازتاب داخلی کلی می‌شود. یک رنگین‌کمان تنها در صورتی دیده می‌شود که این اتفاق رخ دهد. در غیر این صورت، نور از قطره خارج می‌شود. ۶ــ نور در هنگام خروج از قطرهٔ آب، دوباره شکست پیدا می‌کند؛ اما چون این بار از محیطی چگال‌تر (آب) به محیطی کم‌چگال‌تر (هوا) وارد می‌شود، به سمت دور شدن از خط عمود کج می‌شود. ۷ــ پس از شکست مجدد نور، مؤلفه‌های رنگی نور سفید بر اثر پاشندگی، بیشتر از هم فاصله می‌گیرند. این هفت مرحله در شکل ۳ نشان داده شده است.

به این رنگین‌کمان، که شامل فقط یک بازتاب در داخل هر قطره است، *رنگین‌کمان اولیه* گفته می‌شود. در برخی قطره‌ها، دو

۱ــ Porro Prism

بازتاب رخ می‌دهد که آنها رنگین‌کمان دیگری موسوم به رنگین‌کمان *ثانویه* را می‌سازند که عریض‌تر و کم‌نورتر، و بنابراین مشاهدهٔ آن دشوارتر است. ترتیب رنگ‌ها در رنگین‌کمان ثانویه برعکس ترتیب رنگ‌ها در رنگین‌کمان اولیه است (شکل ۴).



شکل ۳ــ تشکیل رنگین‌کمان شامل چندین مرحله است که در اینجا برای دو قطرهٔ باران نشان داده شده است.

(الف) (ب)

شکل ۴ــ مقایسهٔ رنگین‌کمان اولیه و ثانویه

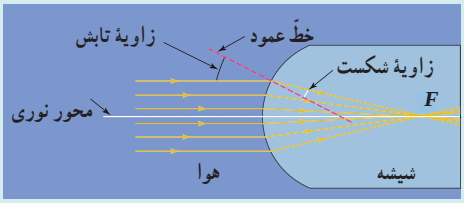
دانستنی برای معلم

شکست امواج نوری در مرز کروی

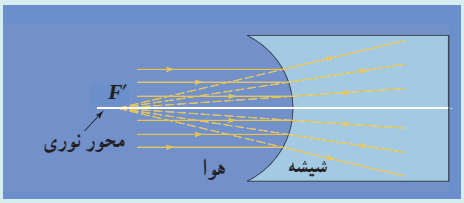
شکست نور در مرزهای کروی اهمیت فراوانی در فیزیک دارد و اساس کار بسیاری از ابزارهای نوری از جمله میکروسکوپ، دوربین‌های نجومی و حتی چشم ما مبتنی بر چنین شکستی است. شکست نور در سطحی کروی از همان قوانین شکست در یک سطح تخت پیروی می‌کند. یعنی پرتوهای تابش و شکست در دوطرف خطّ عمود بر سطح جدایی دو محیط در نقطهٔ تابش، و همه در یک صفحه قرار دارند. و همچنین قانون اسنل نیز برای آنها برقرار است. شکل ۱ پرتوهایی را نشان می‌دهد که به طور موازی با محور تقارن سطح شیشه‌ای که به آن *محور نوری* می‌گویند، از هوا وارد مرز کوژ هوا ــ شیشه شده‌اند. این پرتوها هر یک بر طبق قوانین شکست، شکست پیدا می‌کنند اما در این حالت شکست سبب نزدیک شدن پرتوها به یکدیگر یا اصطلاحاً کانونی شدن آنها در نقطه‌ای موسوم به کانون (نقطهٔ F) می‌گردد. ولی اگر این پرتوها مانند شکل ۲ از هوا وارد مرز کاو هوا ــ شیشه شوند، پرتوهای شکست‌یافته با اینکه دوباره به خط عمود نزدیک می‌گردند ولی به دلیل شکل کاو سطح از هم دور می‌شوند به طوری که گمان برده می‌شود آنها از کانون F' در سمت چپ مرز کروی ناشی شده‌اند. توانایی نزدیک کردن یا دور کردن پرتوهای موازی، مشخصهٔ اصلی عدسی‌ها است که در دوربین، تلسکوپ، یا چشم انسان وجود دارد. گرچه کانونی‌سازی در بسیاری از ابزارهای نوری رخ می‌دهد، اما نور باید از این ابزارها خارج گردد. به همین دلیل عدسی‌های معمولی دارای دو سطح شکست‌دهندهٔ نور، به جای یک سطح هستند؛ یکی یک سطح کروی و دیگری یک سطح کروی دیگر یا یک سطح تخت است. عدسی‌ها بسته به اینکه نور را همگرا یا واگرا کنند، *عدسی‌های همگرا* یا *عدسی‌های واگرا* نامیده می‌شوند. شکل ۳ تعدادی از عدسی‌های همگرا و واگرا، و شکل‌های ۴ و ۵ چگونگی شکست نور در دو نوع رایج این عدسی‌ها را نشان می‌دهد. در مورد شکل ۴ توجه کنید که هرچه خمیدگی سطوح شکست‌دهنده بیشتر باشد، فاصلهٔ کانون از عدسی که به آن *فاصلهٔ کانونی* گفته شده و با f نشان داده می‌شود کوتاه‌تر است. به همین دلیل برای عدسی‌ها کمیتی به نام *توان عدسی* معرفی می‌شود که برابر با عکس فاصلهٔ کانونی است:

$$\text{توان عدسی} = \frac{۱}{f}$$

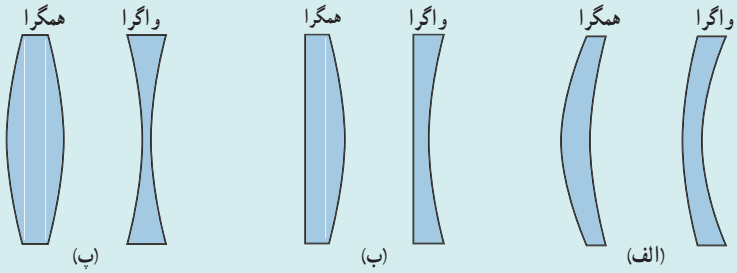
که یکای آن ۱/m است و آن را دیوپتر می‌نامند و با D نشان می‌دهند. بنابراین هرچه توان یک عدسی همگرا بیشتر باشد، توان آن برای کانونی‌کردن پرتوهای موازی بیشتر و فاصلهٔ کانونی آن کوتاه‌تر است. رابطهٔ بالا و آنچه در مورد توان و مقایسهٔ دو عدسی همگرا گفتیم در مورد عدسی‌های واگرا نیز برقرار است، یعنی هرچه توان یک عدسی واگرا بیشتر باشد، توانایی این عدسی برای واگرا کردن پرتوهای موازی بیشتر و فاصلهٔ کانونی آن کوتاه‌تر است، یعنی کانون F' آن به عدسی نزدیک‌تر است.



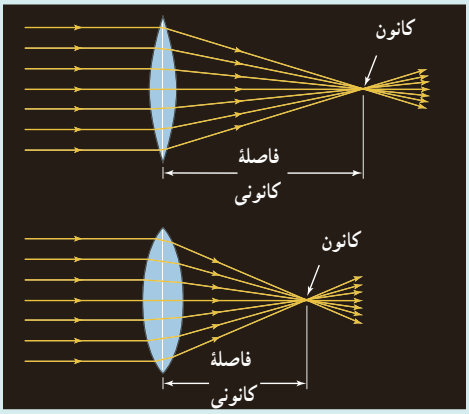
شکل ۱ــ شکست پرتوهای نور در مرز کوژ هوا ــ شیشه. توجه کنید که پرتوهای فرودی موازی محور نوری و نزدیک به آن هستند و در کانون F متمرکز می‌شوند.



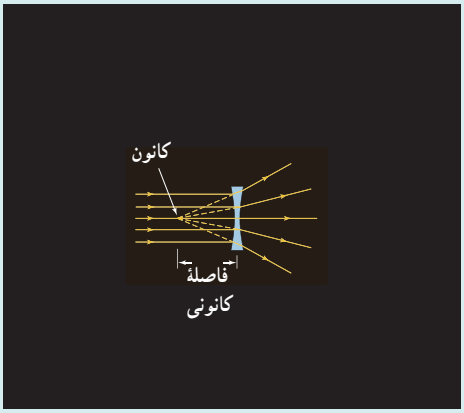
شکل ۲ــ شکست پرتوهای نور در مرز کاو هوا ــ شیشه. توجه کنید که پرتوهای فرودی موازی محور نوری و نزدیک به آن هستند و طوری شکست یافته‌اند که گویی از کانون F' ناشی شده‌اند.



شکل ۳ــ مثال‌هایی از چند نوع عدسی : (الف) کوژ ـ کوژ چپ، کاو ـ کاو راست ؛ (ب) تخت ـ کوژ چپ، تخت ـ کاو راست؛ (پ) هلالی ـ کوژ چپ، هلالی ـ کاو راست.



شکل ۴ــ مقایسهٔ توان دو عدسی همگرا با سطوح خمیدگی متفاوت. توان عدسی خمیده‌تر در کانونی کردن پرتوها، بیشتر و در نتیجه فاصلهٔ کانونی آن کوتاه‌تر است.



شکل ۵ــ چگونگی شکست نور در عدسی کاو ــ کاو که نمونهٔ رایج عدسی‌های واگرا است.

نمرهٔ عینک را معمولاً با یک علامت مثبت یا منفی در کنار یک عدد مشخص می‌کنند. علامت مثبت در کنار عدد به معنی دوربینی، و علامت منفی در کنار عدد به معنی نزدیک‌بینی است و عددها همان توان عدسی اصلاح‌کنندهٔ بینایی شخص است که همان‌طور که دیدیم با یکای دیوپتر مشخص می‌شود. هر چه عدد نمرهٔ عینک بیشتر باشد به معنی آن است که چشم شما ضعیف‌تر است و باید از عدسی تصحیح‌کنندهٔ با توان بیشتری استفاده کنید. عدسی تصحیح‌کنندهٔ دوربینی، همگرا و عدسی تصحیح‌کنندهٔ نزدیک بینی، واگرا است. مثلاً اگر با مراجعه به چشم‌پزشک دریافته‌اید که نمرهٔ عینک تصحیح‌کنندهٔ بینایی چشم شما ۴/۲۵D- است، به این معنی است که با توجه به منفی بودن نمرهٔ عینک، بیماری چشم شما نزدیک‌بینی است و بنابراین باید از یک عدسی واگرا برای تصحیح آن استفاده کنید. فاصلهٔ کانونی این عدسی از رابطهٔ زیر به دست می‌آید :

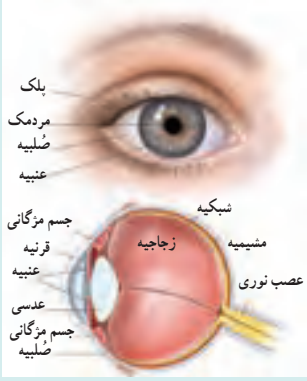
$$f = \frac{۱}{\text{توان عدسی}} = \frac{۱}{۴/۲۵\text{D}} = ۰/۲۳۵۳\text{m} \approx ۰/۲۳۵\text{m} = ۲۳/۵\text{cm}$$

دانستنی برای معلم

دیدن انسان و ماهی در زیر آب

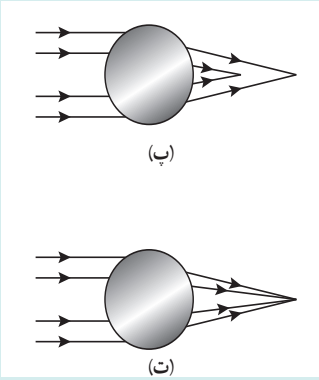
چشم ما از اجزای مختلفی تشکیل شده است (شکل الف). ما به این دلیل می‌توانیم ببینیم که چشم ما پرتوهای نور را خم می‌کند، به‌طوری‌که تصویر واضحی بر روی شبکیه تشکیل می‌شود. حدود $\frac{۲}{۳}$ از این خم شدن در سطح خمیدهٔ قرنیه رخ می‌دهد، بقیهٔ آن به هنگام عبور پرتوها از عدسی چشم که در پشت قرنیه قرار دارد (شکل ب). وقتی شما داخل آب می‌روید همهٔ قدرت کانونی‌سازی توسط قرنیه از دست می‌رود، زیرا ضریب شکست مادهٔ سازندهٔ قرنیه ۱/۳۷۶ و ضریب شکست آب حدود ۱/۳۳۳ است و بنابراین با ورود پرتوهای نور از آب به چشم تقریباً هیچ شکست نوری در قرنیه رخ نمی‌دهد. در نتیجه، این فقط عدسی چشم است که پرتوهای نور را کانونی می‌کند. بیشتر انسان‌ها نمی‌توانند شکل عدسی چشم خود را آنقدر تغییر دهند تا تصویر واضحی بر روی شبکیه تشکیل شود. البته برخی از شناگران بومی مناطق استوایی خود را تعلیم داده‌اند تا با خم کردن عدسی چشم خود تا آنجا که ممکن است باعث ایجاد تصاویری نسبتاً واضح بر روی شبکیه شوند. به همین دلیل است که یک شخص نزدیک‌بین که خمیدگی عدسی چشم او بیشتر از خمیدگی چشم فردی با دیدی طبیعی است، در زیر آب بهتر از او می‌بیند. غواصی که ماسک می‌زند به طریقی دیگر دید خود را در زیر آب اصلاح می‌کند. به عبارتی وقتی ماسک زده می‌شود هوای محبوس بین شیشهٔ ماسک و چشم موجب می‌شود خمیدگی پرتوهای نور در سطح قرنیه عادی گردد.

اما در مورد ماهی، چون در درون آب زیست می‌کند عدسی چشم آن به شکل کروی است تا بتواند پرتوها را به دقت بشکند و تصویری در شبکیه ایجاد کند. ولی یک عدسی کروی تمام پرتوهای موازی تابیده به خود را در یک نقطه کانونی نمی‌کند و پرتوها در گسترهٔ وسیعی کانونی می‌شوند (شکل پ) و بنابراین قاعدتاً نباید تصویر واضحی تشکیل شود. با این حال ماهی می‌تواند به خوبی در زیر آب ببیند. دلیل این امر آن است که ضریب شکست عدسی چشم ماهی مقدار واحدی ندارد، بلکه در امتداد محور مرکزی دارای ضریب شکست بزرگ‌تر و از آنجا به سمت پیرامون دارای ضریب شکست کوچک‌تر و کوچک‌تری است. شما این واقعیت را می‌توانید با وارسی چشم یک ماهی تازه یا پخته شده دریابید: بافت چشم ماهی در نزدیکی محور مرکزی سخت‌تر است. همین امر سبب می‌شود پرتوهای موازی در نقطهٔ واحدی کانونی شوند (شکل ت) و ماهی تصویر واضحی ببیند.



الف) اجزای مختلف چشم

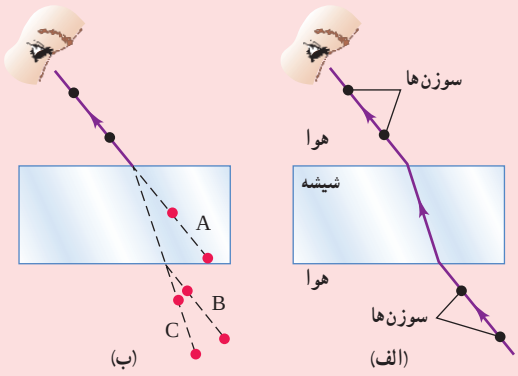
ب) بیشتر خم شدن پرتوها در سطح قرنیه رخ می‌دهد.



پ) طرحی از کانونی‌سازی پرتوهای نور توسط یک عدسی کروی با ضریب شکست یکنواخت
ت) طرحی از کانونی‌سازی پرتوهای نور توسط عدسی چشم ماهی

پرسش پیشنهادی

شکل الف مکان واقعی دو سوزن را نشان می‌دهد که شما آنها را از بالای قطعه‌ای شیشه‌ای مشاهده می‌کنید. کدام‌یک از گزینه‌های شکل ب مکان ظاهری سوزن‌ها را نشان می‌دهند؟



پاسخ : A

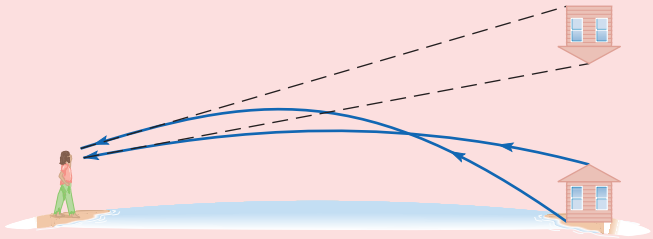
فعالیت‌های پیشنهادی

۱ سرتان را مماس بر دیواری طویل که رو به خورشید است قرار دهید، طوری‌که چشم‌هایتان نزدیک به سطح دیوار باشد. حال اگر به دوستتان نگاه کنید که در سر دیگر این دیوار ایستاده است،تصویری آینه‌ای از دوست خود را در دیوار می‌بینید که به نظر می‌رسد در نقاطی به دوستتان وصل شده است. به این، *سراب دیوار* می‌گویند.

۲ در نواحی بسیار سرد معمولاً سراب دیگری موسوم به *سراب فوقانی*[1] رخ می‌دهد که ناشی از سردتر بودن لایهٔ هوای نزدیک سطح زمین نسبت به هوای بالاتر آن است و بنابراین بر اثر تغییر تدریجی دما و در نتیجه ضریب شکست، سراب به جای سطح زمین بر روی هوا تشکیل می‌شود و تصویر وارونه‌ای از جسم مورد نظر در هوا دیده می‌شود. مثلاً شکل زیر، سرابی فوقانی از یک خانه در ناحیه‌ای از قطب شمال را نشان می‌دهد. با رسم نموداری پرتویی دلیل امر را نشان دهید.

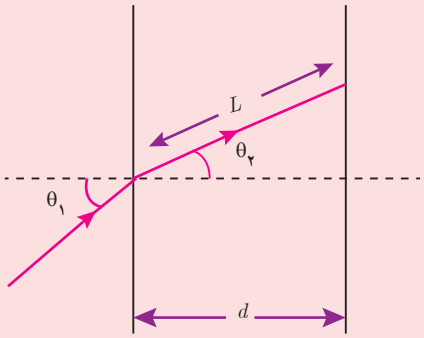
۱ــ Superior Mirage

پاسخ :



تمرین‌های پیشنهادی

۱ نوری تحت زاویهٔ $\theta=۳۸/۵^\circ$ بر تیغه‌ای با ضریب شکست $n=۱/۵۰$ و ضخامت $d=۵/۹۰\,cm$ تابیده است. مسافت L یی که نور در تیغه پیموده، چقدر است؟



پاسخ : از مثلث شکل درمی‌یابیم

$$\cos\theta_۲ = \frac{d}{L}$$

زاویهٔ $\theta_۲$ را از قانون اسنل می‌یابیم

$$n_۱\sin\theta_۱ = n_۲\sin\theta_۲$$

در نتیجه

$$\sin\theta_۲ = \frac{n_۱\sin\theta_۱}{n_۲} = \frac{\sin ۳۸/۵^\circ}{۱/۵۰} = ۰/۴۱۵$$

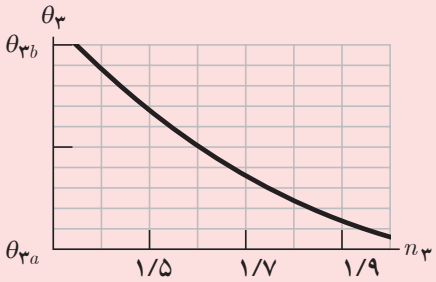
و بنابراین $\cos\theta_۲$ چنین می‌شود :

$$\cos\theta_۲ = \sqrt{۱-\sin^۲\theta_۲} = ۰/۹۱۰$$

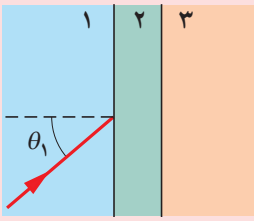
(که حدوداً مربوط به زاویهٔ $۲۴/۵^\circ$ است). بنابراین برای L خواهیم داشت :

$$L = \frac{d}{\cos\theta_۲} = \frac{۵/۹۰\,\text{cm}}{۰/۹۱۰} = ۶/۴۸۵\,\text{cm} \approx ۶/۴۸\,\text{cm}$$

۲ یک باریکهٔ نور مطابق شکل الف تحت زاویهٔ $\theta_۱=۴۰^\circ$ بر یک مرز تابیده است. دو مرز بین سه لایه، موازی و جنس لایه‌های ۱ و ۳ یکسان است. شکل ب زاویهٔ شکست $\theta_۳$ در لایه سوم را در حالت کلی برحسب $n_۳$ نشان می‌دهد (به عبارتی این نمودار نشان می‌دهد بسته به اینکه جنس محیط سوم چه باشد، زاویهٔ شکست چگونه است). اکنون دو وضعیت را در نظر بگیرید. الف) نخست فرض کنید جنس لایه‌های اول و سوم یکسان است. در این صورت ضریب شکست مادهٔ ۱ چقدر است؟ ب) اکنون فرض کنید جنس مادهٔ سوم با مادهٔ اول متفاوت و ضریب شکست مادهٔ ۳ برابر ۲/۴ باشد. درصورتی‌که $\theta_۱=۷۰^\circ$ باشد، $\theta_۳$ چقدر خواهد بود؟



(ب)



(الف)

پاسخ : از قانون اسنل داریم :

$$n_۱\sin\theta_۱ = n_۲\sin\theta_۲ = n_۳\sin\theta_۳$$

الف) چون جنس لایه‌های ۱ و ۳ یکسان است، $\theta_۱=\theta_۲$ می‌شود و بنابراین $\theta_۳=۴۰^\circ$ است. از روی منحنی (ب) درمی‌یابیم $\theta_۳=۴۰^\circ$ حدوداً مربوط به $n_۳=۱/۶$ است که همان $n_۱$ نیز هست.

ب) اکنون $\theta_۱\neq\theta_۳$. پس داریم :

$$n_۱\sin\theta_۱ = n_۳\sin\theta_۳$$

که به ازای $n_۱=۱/۶$، $\theta_۱=۷۰^\circ$، و $n_۳=۲/۴$ به $\theta_۳=۳۹^\circ$ می‌انجامد.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

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 °۹۰ 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 فناوری 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 بیش از آنکه نمدتش 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.

غلاف
پوش
مغزی
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 مسی معمولی (شکل سمت راست) انتقال دهد.

دسته تار نوری ۲ تصویر محل موردنظر را به بزنک می‌رساند.
چشم پزشک
دستهٔ ۲
دستهٔ ۱
جسمهٔ نور
دسته تار نوری ۱ محل مورد نظر را روشن می‌کند.
پ) طرح ساده‌شده‌ای از طرز کار یک آندوسکوپ

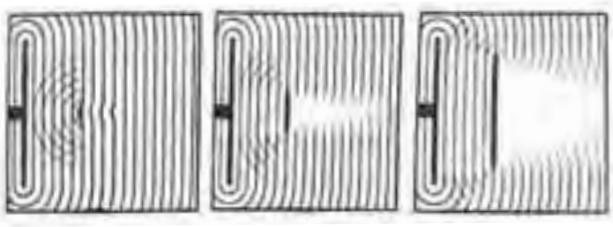
عدسی چشمی
عدسی کابل
جسمهٔ نور
کابل
دو دسته تار نوری داخل کابل قرار دارد.
ت) یک اسباب آندوسکوپ معمولی

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 طول موج باشد، بخشی از موج که از لبه‌ها یا شکاف‌ها عبور می‌کند، به‌وضوح به اطراف مانع یا شکاف گسترده می‌شود.

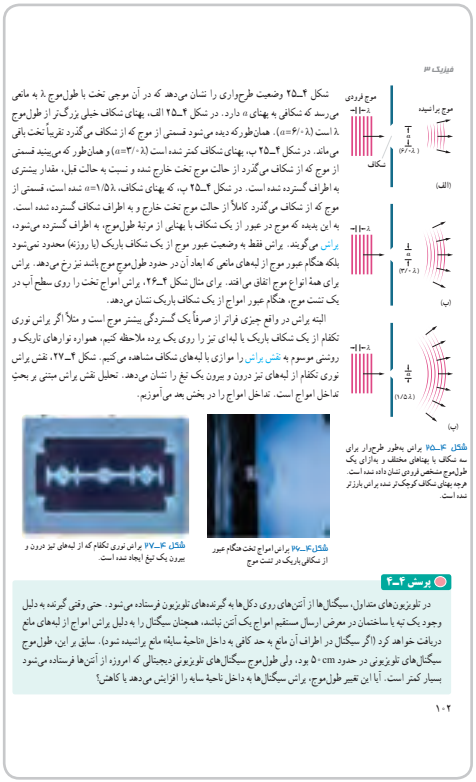
۱۰۱

در این مبحث خوب است دانش‌آموزان را با موارد ملموس‌تری آمادهٔ این بحث کنید. صدای امواج صوتی را بر خلاف نور امواج نوری می‌توانیم از پشت ساختمان یا دیواری در برابر چشمهٔ موج درک کنیم (بشنویم). به عبارتی این امواج «سایه صوتی» ایجاد نمی‌کنند. دلیل آن است که ابعاد این موانع در مقایسه با طول موج صوتی خیلی بزرگ نیستند، مگر آنکه ساختمان یا دیوار بسیار بزرگی باشد. همین تجربه را می‌توانیم با مشاهدهٔ تشکیل سایه در آزمایش با تشت موج در حضور موانعی با اندازه‌های متفاوت نیز بیازماییم. اگر مانند شکل زیر مانع‌هایی با اندازه‌های مختلف را در سر راه موج سطحی تخت تشکیل شده در تشت موجی قرار دهیم درمی‌یابیم تا وقتی که اندازهٔ مانع‌ها در مقایسه با طول موج قابل ملاحظه باشد سایهٔ نسبتاً واضحی تشکیل می‌شود، ولی وقتی مانع کوچک و کوچک‌تر شود وضوح سایه کمتر و کمتر می‌شود تا اینکه سایه عملاً ناپدید می‌گردد. به عبارتی در این حالت می‌گویند، موج مانع را« **دور زده** »است و طوری به اطراف آن پیشروی کرده است که گویی مانعی وجود نداشته است. این دور زدن موج از اطراف مانع در هنگامی که اندازهٔ مانع در مقایسه با طول موج بسیار کوچک باشد، **پراش** نامیده می‌شود.



برای توضیح بهتر شکل ۴ـ۲۶، خوب است در شکل‌هایی متوالی مانند شکل زیر، کوچک و کوچک‌تر شدن عرض شکاف و تأثیر آن بر شکل موج فرودی را نشان دهیم. اگر با شکاف‌هایی با اندازه‌های مختلف در تشت موج آزمایش را انجام دهیم درمی‌یابیم هر قدر اندازهٔ شکاف کمتر باشد، پراش بیشتر نمایان می‌شود و موج‌های تخت به شکل امواجی نیم‌دایره‌ای، گسترده‌تر می‌شوند. در شکل الف که اندازهٔ شکاف در مقایسه با طول موج بزرگ‌تر است، امواج عبوری همچنان تخت هستند، اما در شکل‌های ب و پ با کوچک‌تر شدن شکاف‌ها، امواجی نیم‌دایره‌ای به‌وجود آمده‌اند، به‌طوری‌که در شکل پ گویی امواج از چشمه‌ای نقطه‌ای در محلّ شکاف منشأ گرفته‌اند.

(الف) (ب) (پ)



فیزیک ۳

شکل ۴ـ۲۵ وضعیت طرح‌واری را نشان می‌دهد که در آن موجی تخت با طول‌موج λ به مانعی می‌رسد که شکافی به پهنای a دارد. در شکل ۴ـ۲۵ الف، پهنای شکاف خیلی بزرگ‌تر از طول‌موج λ است ($a=۶/۰\lambda$). همان‌طور که دیده می‌شود قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد تقریباً تخت باقی می‌ماند. در شکل ۴ـ۲۵ 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 ۴ـ۲۵ 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 بدیده 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 طول‌موج موج باشد نیز رخ می‌دهد. پراش برای همهٔ انواع موج اتفاق می‌افتد. برای مثال شکل ۴ـ۲۶، 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 ۴ـ۲۷، نقش پراش نوری تکفام از لبه‌های تیز درون و بیرون یک تیغ را نشان می‌دهد. تحلیل نقش پراش مبتنی بر بحث تداخل امواج است. تداخل امواج را در بخش بعد می‌آموزیم.

شکل ۴ـ۲۵ پراش به‌طور طرح‌وار برای سه شکاف با پهنای‌های مختلف و به‌ازای یک طول‌موج مشخص فرودی نشان داده شده است. هرچه پهنای شکاف کوچک‌تر شده پراش بارزتر شده است.

شکل ۴ـ۲۶ پراش امواج تخت هنگام عبور از شکافی باریک در تشت موج

شکل ۴ـ۲۷ پراش نوری تکفام که از لبه‌های تیز درون و بیرون یک تیغ ایجاد شده است.

پرسش ۴ـ۳

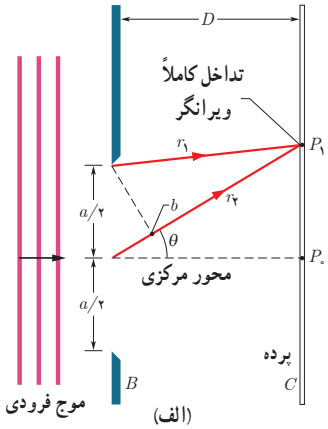
در تلویزیون‌های متداول، سیگنال‌ها از آنتن‌های روی دکل‌ها به گیرنده‌های تلویزیون فرستاده می‌شود. حتی وقتی گیرنده به دلیل وجود یک تپه یا ساختمان در معرض ارسال مستقیم امواج یک آنتن نباشد، همچنان سیگنال را به دلیل پراش امواج از لبه‌های مانع دریافت خواهد کرد (اگر سیگنال در اطراف آن مانع به حد کافی به داخل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

۱۰۲

حتماً تأکید شود که این رفتار نور تأییدی بر موجی بودن نور است.

در اینجا به درستی آمده است که تحلیل نقش پراش مبتنی بر بحث تداخل امواج است. اما توجه کنید مفاهیمی که در بخش ۴ـ۴ آمده است دانشی کافی برای این تحلیل را ارائه نمی‌کند. در واقع کتاب‌های مبتنی بر حسابان، نخست به تداخل و سپس به پراش می‌پردازند تا دانش ریاضی لازم برای تحلیل این مبحث را داشته باشند.

همان‌طور که در «دانستنی برای معلم» بخش تداخل خواهید دید، در تداخل دوشکافی، شرط تداخل کاملاً ویرانگر آن است که $a\sin\theta=(m+\frac{1}{2})\lambda$ باشد که در آن a فاصلهٔ دو شکاف است. برای تحلیل نقش پراش از روشی مشابه و البته هوشمندانه استفاده می‌کنیم. در این روش تمام پرتوهای عبوری از شکاف را به صورت جفت ــ جفت در نظر می‌گیریم و سپس شرط تداخل ویرانگر را به‌کار می‌بندیم.



(الف)

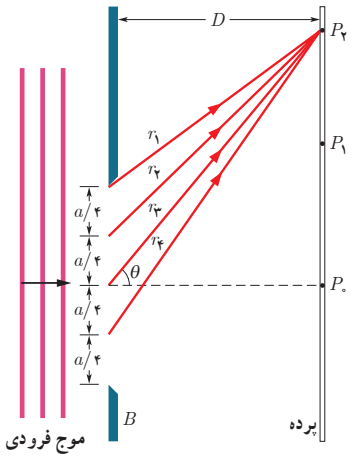
این روش را در شکل الف برای تعیین مکان نخستین فریز تاریک به‌کار برده‌ایم. یعنی به طور ذهنی شکاف را به دو منطقه با پهنای مساوی $a/2$ تقسیم کرده‌ایم. پرتوی نور r_1 از نقطهٔ بالایی منطقهٔ بالا و پرتوی نور r_2 از نقطهٔ بالایی منطقهٔ پایین به نقطهٔ p_1 وصل شده‌اند. برای اینکه موجک‌های این پرتو در هنگام رسیدن به p_1 یکدیگر را حذف کنند باید داشته باشیم

$$\frac{a}{2}\sin\theta=\frac{\lambda}{2}$$

سپس در حالی که طول موج ثابت است شروع به باریک کردن شکاف می‌کنیم. بدین ترتیب زاویه‌ای که در آن نخستین فریز دیده می شود افزایش می‌یابد. یعنی میزان پراش (پهن شدن پهنای نقش پراش) برای یک شکاف باریک‌تر، بیشتر است.

وقتی پهنای شکاف را به اندازهٔ طول موج کاهش دهیم (یعنی $a=\lambda$)، زاویهٔ نخستین فریزهای تاریک ۹۰° می‌شود. چون نخستین فریزهای تاریک دو لبهٔ فریز روشن مرکزی را مشخص می‌کنند، این فریز روشن باید کلّ پرده را بپوشاند. با تقسیم شکاف به منطقه‌های بیشتری با پهنای مساوی می‌توانیم به یافتن محلّ فریزهای تاریک در نقش پراش ادامه دهیم. مثلاً شکل (ب) چگونگی یافتن دومین فریز تاریک را نشان می‌دهد.

همواره می‌توان زوج منطقه‌هایی را انتخاب کرد که این منطقه‌ها (و موج‌های آنها) جفت هم باشند. می‌توان دریافت که فریزهای تاریک بالا و پایین محور مرکزی در مکان‌هایی واقع‌اند که در حالت کلی با معادلهٔ $a\sin\theta=m\lambda$ به ازای $m=۱,۲,۳,...$ داده می‌شود.



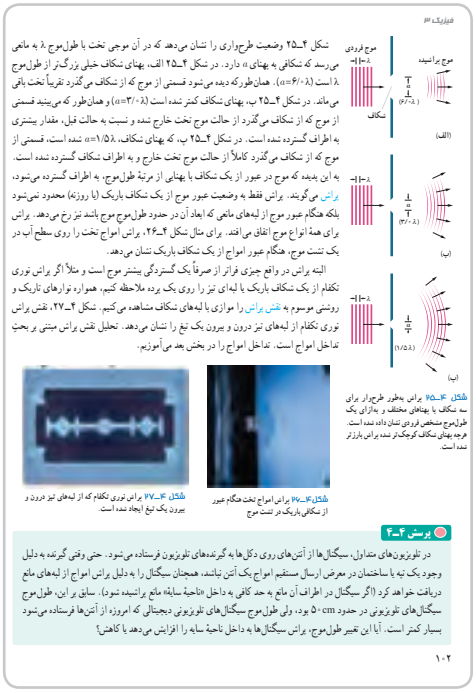
(ب)

در این فیلم، به زیبایی پراش برای موج‌های آب و نور را مشاهده می‌کنید.

فیلم

در این فیلم، ایجاد نوارهای تاریک و روشن موسوم به *نقش پراش* را می‌بینید.

فیلم


فیزیک ۳

شکل ۴ـ۲۵ وضعیت طرح‌واری را نشان می‌دهد که در آن موجی تخت با طول‌موج λ به مانعی می‌رسد که شکافی به پهنای a دارد. در شکل ۴ـ۲۵ الف، پهنای شکاف خیلی بزرگ‌تر از طول‌موج λ است ($a=۶/۰\lambda$). همان‌طور که دیده می‌شود قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد تقریباً تخت باقی می‌ماند. در شکل ۴ـ۲۵ 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 ۴ـ۲۵ 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 طول‌موج موج باشد نیز رخ می‌دهد. پراش برای همهٔ انواع موج اتفاق می‌افتد. برای مثال شکل ۴ـ۲۶، پراش امواج تخت را روی سطح آب در یک تشت موج، هنگام عبور امواج از یک شکاف باریک نشان می‌دهد.

البته پراش در واقع جزئی 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 ۴ـ۲۷، نقش پراش نوری تکفام از لبه‌های تیز درون و بیرون یک تیغ را نشان می‌دهد. تحلیل نقش پراش مبتنی بر بحث تداخل امواج است. تداخل امواج را در بخش بعد می‌آموزیم.

شکل ۴ـ۲۵ پراش به‌طور طرح‌وار برای سه شکاف با پهنای مختلف و به‌ازای یک طول‌موج مشخص فرودی نشان داده شده است. هرچه پهنای شکاف کوچک‌تر شده پراش بارزتر شده است.

شکل ۴ـ۲۶ پراش امواج تخت هنگام عبور از شکافی باریک در تشت موج

شکل ۴ـ۲۷ پراش نوری تکفام که از لبه‌های تیز درون و بیرون یک تیغ ایجاد شده است.

پرسش ۴ـ۴

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؟

۱۰۲

پاسخ پرسش ۴ـ۴

هرگاه اندازهٔ ابعاد مانع در مقایسه با طول موج، بزرگ باشد ناحیهٔ سایهٔ واضحی تشکیل می‌شود و هرچه مانع در مقایسه با طول موج کوچک‌تر باشد اندازهٔ ناحیهٔ سایه کوچک‌تر می شود تا اینکه عملاً سایه ناپدید گردد. بنابراین برای مانعی با ابعاد مشخص، هرچه طول موج تابیده کوچک‌تر باشد عملاً به این معنی است که اندازهٔ مانع در مقایسه با طول موج بزرگ‌تر می‌شود و به عبارتی ناحیهٔ سایه بزرگ‌تر می‌شود. پس برای سیگنال‌های تلویزیونی دیجیتال که طول موج آنها بسیار کمتر از طول موج سیگنال‌های تلویزیونی قدیمی است، ناحیهٔ سایه بزرگ‌تر است و به عبارتی دور زدن موج در اطراف مانع دشوارتر خواهد بود.

دانستنی برای معلم

شناورها

شناورها[1] یک نمونهٔ آشنا از پدیدهٔ پراش هستند که ممکن است هنگام نگاه کردن به آسمان صاف آبی متوجه آنها بشوید. این نقش‌ها که مانند خال‌های ریز و ساختارهایی مومانند هستند ناشی از خرده‌های ریزی در مایع زجاجیهٔ چشم هستند که با گذشت عمر و کم شدن یکنواختی مایع زجاجیه، بر میزان آنها افزوده می‌شود. در واقع آنچه شما هنگام دیدن یک شناور می‌بینید، ناشی از پراش نور از لبهٔ این خرده‌ها و تشکیل یک نقش پراشی بر روی شبکیه است. این نقش از نوارهای تاریک و روشنی تشکیل شده است. اگر بی‌نظمی‌های زجاجیه تقریباً دایره‌ای باشند، نقش حاصل نیز دایره‌ای با یک نقطهٔ مرکزی روشن خواهد بود. یک بی‌نظمی کشیده، نقش پراشی کشیده‌ای را ایجاد می‌کند. شناورها به این دلیل ایجاد می‌شوند که زجاجیه صُلب نیست و می‌تواند جابه‌جا شود. برخی از شناورها ناشی از تکه‌های سفت‌شده‌ای از زجاجیه هستند. همچنین آنها می‌توانند ناشی از گویچه‌هایی باشند که در این مایع رخنه کرده‌اند، شناورها را همه دارند و حضور آنها نشانهٔ بیماری نیست، ولی با پیر شدن بر شمار آنها افزوده می‌شود.

دانستنی برای معلم

لکهٔ روشن فرنل

نظریهٔ موجی نور توضیح ساده‌ای برای پدیدهٔ پراش ارائه می‌کند. ولی این نظریه که در اواخر سال‌های ۱۶۰۰ میلادی توسط هویگنس ارائه شد و ۱۲۳ سال بعد توسط *یانگ* برای توضیح تداخل دوشکافی به کار برده شد، به‌کندی مورد پذیرش قرار گرفت، عمدتاً به این دلیل که در مغایرت با نظریهٔ نیوتون بود که نور را جریانی از ذرات می‌پنداشت.

در سال ۱۸۱۸، *آگوستین جان فرنل*[2] یک مدل موجی نور را برای مسابقه‌ای در *آکادمی علوم فرانسه*[3] ارائه داد. *سایمون دی . پوآسون*[4]، یکی از اعضای کمیتهٔ داوری، شدیداً با این مدل به مخالفت برخاست و سعی کرد آن را با این آزمایش فکری، نامعقول جلوه دهد : اگر یک جسم کدر با سطح مقطع دایره‌ای (مثل یک سکه یا یک گوی) توسط باریکه‌ای از نور روشن شود، مدل موجی فرنل پیش‌بینی می‌کند که باید نقطه‌ای روشن در مرکز سایه‌ای که آن جسم بر روی یک پرده در فاصله‌ای دور می‌اندازد، ظاهر شود.

دومنیک اف. آراگو، عضو دیگر کمیته، ترتیبی داد که به رغم این نتیجهٔ نامعقول پیش‌بینی فرنل را امتحان کند. او، در کمال تعجب، آن نقطهٔ مرکزی روشن را یافت. از عجایب تاریخ آنکه، این نقطه اکنون به عنوان *نقطه‌ای پوآسون* یا نقطهٔ *آراگو* شناخته می‌شود، هرچند که هیچ یک از آن دو در ابتدا اعتقادی به وجود آن نداشتند.

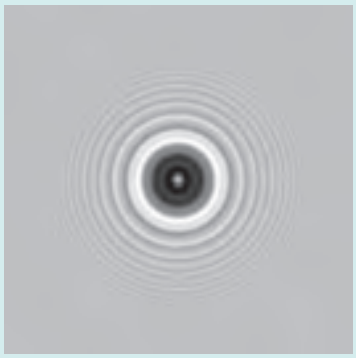
از زمان کشف این نقطه، پژوهشگرانِ بسیاری اشیا کدری مثل ساچمهٔ یک یاتاقان را به کار گرفته‌اند تا به عنوان یک عدسی برای ایجاد تصویر عمل کنند. اگر این تصویر بر روی فیلم شکل گیرد، شما می‌توانید درست مثل یک دوربین، عکسی از آن تهیه کنید.

۱ــ floaters

۲ــ Augustin Jean Fresnel

۳ــ French Academy

۴ــ Simeon D. Poisson



چرا نقطهٔ پوآسون شکل می‌گیرد؟ و چگونه جسمی مثل یک گوی فلزی می‌تواند نور را به ایجاد یک تصویر وادارد؟

فرض کنید چشمهٔ نور، نقطه‌ای روشن در فاصله‌ای دور است و تصویر توسط یک گوی صلب ایجاد می‌شود. وقتی امواج نوری به گوی می‌رسند، از اطراف آن پراشیده می‌شوند و به طور شعاعی به سمت بیرون و نیز به درون ناحیهٔ سایهٔ گوی پخش می‌شوند. اگر پرده‌ای کاملاً در پشت گوی قرار گیرد، نور نقش پراش کوچکی از دایره‌های هم‌مرکزِ تاریک و روشن را بر روی آن شکل می‌دهد. مرکز این نقش، نقطه‌ای روشن است، زیرا امواج عبوری از یک سمت گوی همان مسافتی را تا مرکز پرده طی می‌کنند که امواج عبوری از سمت مقابلِ آن طی می‌کنند و بنابراین، این امواج به طور هم‌فاز به یکدیگر می‌رسند و تداخل سازنده می‌کنند.

نخستین دایرهٔ تاریک، ناشی از تداخل ویرانگر است. بالای این دایره را در نظر بگیرید. امواج عبوری از پایین گوی باید مسافت بیشتری را نسبت به امواج عبوری از بالای گوی طی کنند تا به آن نقطه برسند. این مسافتِ اضافی برابر با نصف یک طول موج است و بنابراین این دو دسته موج (یکی از پایین و یکی از بالا) وقتی به نقطه‌ای روی پرده می‌رسند، تداخل ویرانگر می‌کنند.

بقیهٔ این نقش نیز ناشی از تداخل سازنده و ویرانگر مشابهی است. در بعضی جاها، فاصلهٔ طی‌شده توسط امواجی که از طرف‌های مقابلِ هم می‌آیند به اندازهٔ مضرب صحیحی از یک طول موج تفاوت دارند، که این به تداخل سازنده می‌انجامد، زیرا امواج را هم‌فاز می‌کند. در جاهای دیگر، تفاوت مسافت طی شده، برابر با مضرب فردی از نصف یک طول موج است، که این به تداخل ویرانگر می‌انجامد، زیرا امواج را ناهم‌فاز می‌کند.

وقتی یک گوی تصویری از یک جسم را به وجود می‌آورد، هر بخش روشنِ آن جسم به عنوان یک چشمهٔ نور نقطه‌ای عمل می‌کند و نقطه‌ای نسبتاً روشن را در نزدیکی مرکز نقش پراش ایجاد می‌کند. ترکیب این نقاط روشن، تقریباً شکل آن جسم را دوباره می‌سازد و بنابراین تصویری از جسم به وجود می‌آورد.

فیلم

در این فیلم، نمایشی از پراش فرنل را می‌بینید.

پرسش پیشنهادی

چرا امواج برنامه‌های تلویزیونی برخلاف امواج رادیویی به‌طور مستقیم پخش می‌شوند؟

پاسخ : ایستگاه‌های تلویزیونی در طول موج‌های کمتری از امواج رادیویی کار می‌کنند. برای چنین امواجی یون‌سپهر شفاف است و امواج را مانند امواج رادیویی بازنمی‌گرداند. بنابراین نمی‌توان آنها را مانند امواج رادیویی منتشر کرد. با توجه به بلند بودن طول‌موجِ این امواج، آنها را کلاً به‌طور مستقیم انتشار می‌دهند، زیرا از موانعی مانند خانه‌ها و... چندان پراشیده نمی‌گردند. البته همان‌طور که در پرسش ۴ـ۴ مطرح شده است، طول‌موج سیگنال تلویزیون‌های دیجیتال کمتر است و این به پراشیدگی بیشتری می‌انجامد.

۱ـ Dominique F. Arago

در اینجا نیز خوب است توجه دهید که تداخل در ریسمان برای تداخل در یک بُعد، تداخل امواج سطحی برای تداخل در دوبعد، تداخل امواج صوتی، و تداخل امواج نوری به عنوان تداخل در سه بُعد بررسی می‌شوند.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

۴ـ۴ 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 مسکن است بر اثر تأثیر هم‌زمان موج‌هایی که به دنبال تعداد زیادی قایق در حال حرکت به‌راه می‌افتند، متلاطم شود. اینها همگی نمونه‌هایی 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 ۴ـ۲۸، 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 ۴ـ ۲۸ الف، تپ‌ها هنگام همپوشانی تپ بزرگ‌تری را ایجاد کرده‌اند که به آن تداخل سازنده می‌گویند. در حالی که در شکل ۴ـ۲۸ 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 ۴ـ۲۸ دو تپ پیش‌روند 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 ۴ـ۲۹ 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 با فرورفتگی‌های دو موج که در یک زمان در نقطه‌ای به همدیگر برسند، سطح آب را در آن نقطه به‌شدت بالا یا پایین می‌برند، در

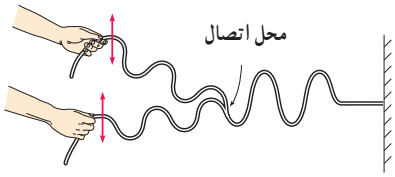
شکل ۴ـ۲۹ تداخل امواج دایره‌ای بر سطح آب یک تشت موج. هرگاه فاصلهٔ دو گوی از هر دو طول‌موج بزرگ‌تر باشد چنین نقشی ایجاد می‌شود.

۱۰۳

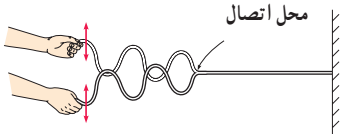
خوب است در اینجا این مفاهیم را برای امواج، با ایجاد دو موج سینوسی در دو ریسمان نیز بررسی کنید.

فرض کنید دو موج سینوسی با طول موج و دامنهٔ یکسان را مطابق شکل الف در دو ریسمان که در نقطه‌ای به ریسمان سومی وصل شده‌اند، روانه کنیم. توجه کنید ریسمان‌ها از هر لحاظ مشابه یکدیگرند و جرم واحد طول آنها با هم برابر است. روش آزمایش به این ترتیب است که یکی از ریسمان‌ها را در دست چپ خود و دیگری را در دست راست خود بگیرید و آنها را مطابق شکل به‌طور همگام به نوسان درآورید؛ یعنی آنها را به شیوهٔ یکسانی بالا و پایین ببرید، به‌طوری‌که امواج تولید شده در هر دو ریسمان کاملاً مشابه هم باشند.

وقتی این دو موج به محل اتصال ریسمان‌ها برسند، مشاهده خواهیم کرد که موجی با همان طول موج ولی با دامنه‌ای دو برابر بزرگ‌تر در ریسمان سوم ایجاد می‌شود. در واقع آنچه رخ می‌دهد آن است که قله‌های دو موج اولیه و نیز درّه‌های آنها در ریسمان سوم بر یکدیگر منطبق می‌شوند و اصطلاحاً می‌گوییم این دو موج با یکدیگر ***هم‌فاز*** بوده‌اند. به این نوع تداخل، **تداخل کاملاً سازنده** می‌گویند. حال اگر دو ریسمان را مانند شکل ب طوری حرکت دهیم که در حالی که یکی روبه بالا می‌رود دیگری روبه پایین برود، اصطلاحاً می‌گوییم موج‌هایی ***کاملاً ناهم‌فاز*** نسبت به یکدیگر ایجاد شده‌اند. و اگر این دو موج دامنهٔ یکسانی داشته باشند، اصل بر هم‌نهی پیش‌بینی می‌کند که وقتی این دو موج به محل اتصال برسند، اثر همدیگر را خنثی می‌کنند و جابه‌جایی خالص صفر می‌شود. در واقع آنچه رخ می‌دهد آن است که در ریسمان سوم قله‌های یک موج درست بر دره‌های موج دیگر منطبق می‌شود. به این نوع تداخل، **تداخل کاملاً ویرانگر** می‌گویند.

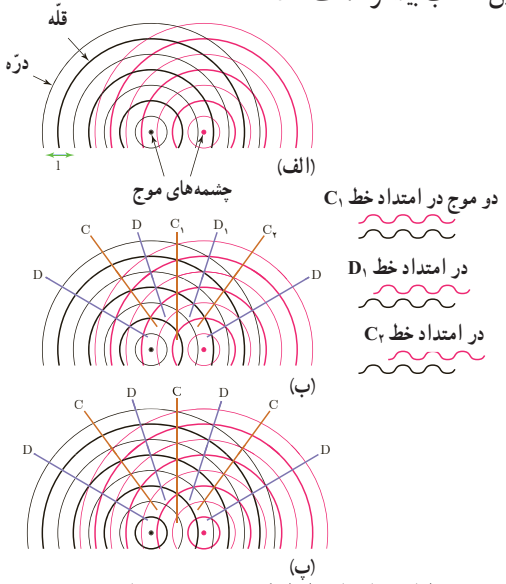


الف) دو موج که به‌طور هم‌فاز در دو ریسمان یکسان ایجاد شده‌اند، با رسیدن به ریسمان سومی با جرم واحد طول مشابه، موجی بزرگ‌تر در این ریسمان ایجاد کرده‌اند.



ب) دو موج که به طور کاملاً ناهم‌فاز در دو ریسمان مشابه ایجاد شده‌اند، هیچ جابه‌جایی در ریسمان مشابه دیگری که به آنها متصل شده است، ایجاد نمی‌کنند.

رسم شکل‌هایی مانند شکل‌های زیر می‌تواند دانش‌آموزان را در تفهیم این مطالب بیشتر کمک کند.



برای رسیدن به هر نقطه‌ای در امتداد خطوطی که با C مشخص شده‌اند قله‌ها بر هم و دره‌ها بر یکدیگر منطبق می‌شوند، در حالی که در امتداد خطوطی که با D مشخص شده‌اند قله‌ها بر دره‌ها و بالعکس قرار می‌گیرند.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

۴ـ۴ 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 قایق در حال حرکت به‌راه می‌افتند، متلاطم شود. اینها همگی نمونه‌هایی 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 ۴ـ۲۸، عکس‌های دو تب را که در جهت‌های مخالف هم در یک ریسمان کشیده شده حرکت می‌کنند در چند لحظهٔ متوالی نشان می‌دهد. وقتی این تب‌ها به هم می‌رسند و با یکدیگر همپوشانی می‌کنند، بنا بر اصل برهم‌نهی، تب برایند یا مجموع دو تب برابر است. توجه کنید چه برای تب‌ها 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 ۴ـ ۲۸ الف، تب‌ها هنگام همپوشانی تب بزرگ‌تری را ایجاد کرده‌اند که به آن تداخل سازنده می‌گویند، در حالی که در شکل ۴ـ ۲۸ ب، تب‌ها هنگام همپوشانی اثر یکدیگر را حذف کرده‌اند که به آن تداخل ویرانگر می‌گویند. تداخل‌های سازنده و ویرانگر برای موج‌ها نیز همچون تب‌ها رخ می‌دهد که آن را در قسمت‌های بعدی بررسی خواهیم کرد.

شکل ۴ـ۲۸ دو تب پیش‌روند 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 ۴ـ۲۹ 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 ۴ـ۲۹ تداخل امواج دایره‌ای بر سطح آب. یک تشت موج، هرگاه فاصلهٔ دو گوی از هم از طول‌موج بزرگ‌تر باشد چنین نقشی ایجاد می‌شود.

۱۰۳

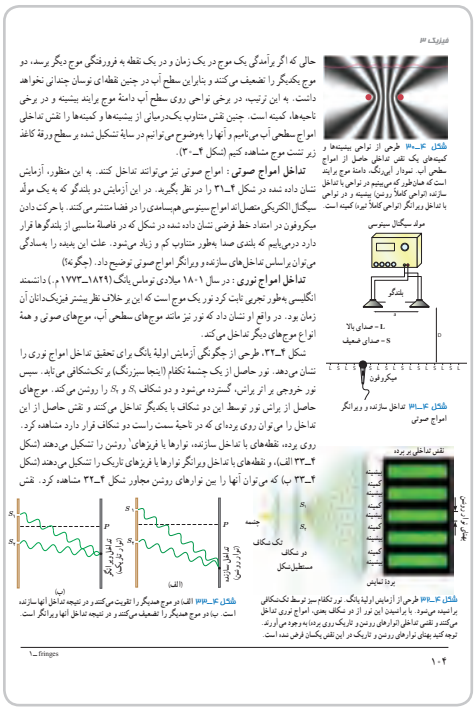
در این فیلم، طرحی از تداخل انواع دایره‌ای را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم تداخل امواج سطحی آب را می‌بینید.

فیلم

توجه کنید در این آزمایش از میکروفون به این دلیل استفاده کردیم که تمایز بین صداهای کم و زیاد را با وضوح بیشتری حس کنیم، وگرنه این آزمایش بدون استفاده از میکروفون، صرفاً با شنیدن نیز قابل انجام است. همچنین در توضیح آنچه رخ داده است، می‌توانید دانش‌آموزان را به تداخل امواج سطحی ارجاع دهید. مانند آنجا، وقتی موج‌های هم‌بسامد (و در نتیجه هم‌طول‌موج) به طور هم‌زمان ایجاد شوند، بر اثر تداخل این امواج، بسته به آنکه تداخل کاملاً سازنده یا کاملاً ویرانگر باشد، مکان‌هایی یافت می‌شود که در آنها دامنهٔ موج برانید وبه عبارتی بلندی صوت بیشینه یا کمینه باشد. این نقاط در شکل ۴ـ۳۱ به ترتیب با حروف L (سرواژهٔ Loud sound به معنی صدای بلند) و حرف S (سرواژهٔ Soft sound به معنی صدای ضعیف) نشان داده شده است. که یک در میان ظاهر می‌شوند. این آزمایش همچنین مدخلی مناسب برای بحث تداخل امواج نوری از دو شکاف باریک است.



فیزیک ۳

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 ۴ـ۳۰).

تداخل امواج صوتی: امواج صوتی نیز می‌توانند تداخل کنند. به این منظور، آزمایش نشان داده شده در شکل ۴ـ۳۱ 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 نشده 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؟)

تداخل امواج نوری: در سال ۱۸۰۱ میلادی توماس یانگ (۱۸۲۹ـ۱۷۷۳ 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 ۴ـ۳۲، طرحی از چگونگی آزمایش اولیهٔ یانگ برای تحقیق تداخل امواج نوری را نشان می‌دهد. نور حاصل از یک چشمهٔ نکتام (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 فرینج‌های[1] روشن را تشکیل می‌دهند (شکل ۴ـ۳۳ الف)، و نقطه‌های با تداخل ویرانگر نوارها یا فرینج‌های تاریک را تشکیل می‌دهند (شکل ۴ـ۳۳ ب) که می‌توان آنها را بین نوارهای روشن مجاور شکل ۴ـ۳۲ مشاهده کرد. نقش

شکل ۴ـ۳۰ طرحی از نواحی پیشینه‌ها و کمینه‌های یک نقش تداخلی حاصل از امواج سطحی آب. نمودار این‌رنگ، دامنهٔ موج برایند است که همان‌طور که می‌بینیم در نواحی با تداخل سازنده، نواحی کاملاً روشن، پیشینه و در نواحی با تداخل ویرانگر نواحی کاملاً تیره، کمینه است.

شکل ۴ـ۳۱ تداخل سازنده و ویرانگر امواج صوتی

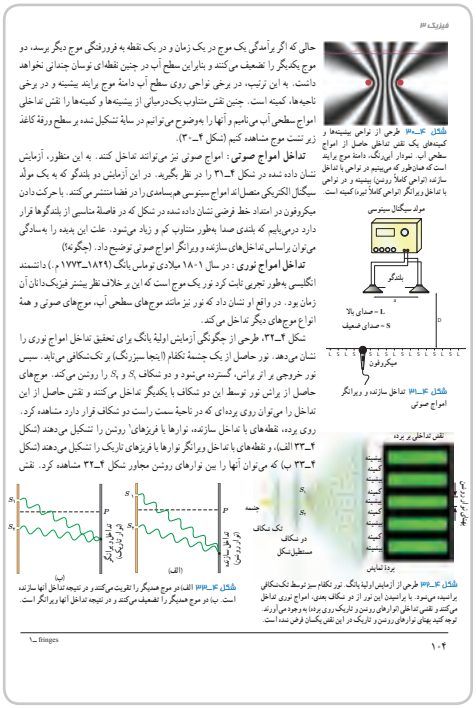
شکل ۴ـ۳۲ طرحی از آزمایش اولیهٔ یانگ. نور تکفام سبز توسط تک‌شکافی پراشیده می‌شود. با برآمدن این نور از دو شکاف بعدی، امواج نوری تداخل می‌کنند و نقش تداخلی نوارهای روشن و تاریک روی پرده را به‌وجود می‌آورند. توجه کنید پهنای نوارهای روشن و تاریک در این نقش یکسان فرض شده است.

شکل ۴ـ۳۳ 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.

۱ـ fringes

۱۰۴

توجه دهید تداخل امواج صوتی در یک بُعد نیز صورت می‌گیرد که آن را در مبحث لوله‌های صوتی بررسی خواهیم کرد.



فیزیک ۳

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 دامهٔ 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 ۴ـ۳۰).

تداخل امواج صوتی : امواج صوتی نیز می‌توانند تداخل کنند. به این منظور، آزمایش نشان داده شده در شکل ۴ـ۳۱ 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؟)

تداخل امواج نوری : در سال ۱۸۰۱ میلادی توماس یانگ (۱۸۲۹ـ۱۷۷۳ 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 ۴ـ۳۲، طرحی از چگونگی آزمایش اولیهٔ یانگ برای تحقیق تداخل امواج نوری را نشان می‌دهد. نور حاصل از یک جشمهٔ تکفام (اینجا سبزرنگ) بر تک‌شکافی می‌تابد. سپس نور خروجی پر اثر براش، گسترده می‌شود و دو شکاف S_1 و S_2 را روشن می‌کند. موج‌های حاصل از براش 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 فرنژهای[1] روشن را تشکیل می‌دهند (شکل ۴ـ۳۳ الف)، و نقطه‌های با تداخل ویرانگر نوارها یا فرنژهای تاریک را تشکیل می‌دهند (شکل ۴ـ۳۳ ب) که می‌توان آنها را بین نوارهای روشن مجاور شکل ۴ـ۳۲ مشاهده کرد. نقش

شکل ۴ـ۳۰ طرحی از تراوش بیشینه‌ها و کمینه‌های یک نقش تداخلی حاصل از امواج سطحی آب. نمودار آبی‌رنگ، دامهٔ 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.

شکل ۴ـ۳۱ تداخل سازنده و ویرانگر امواج صوتی

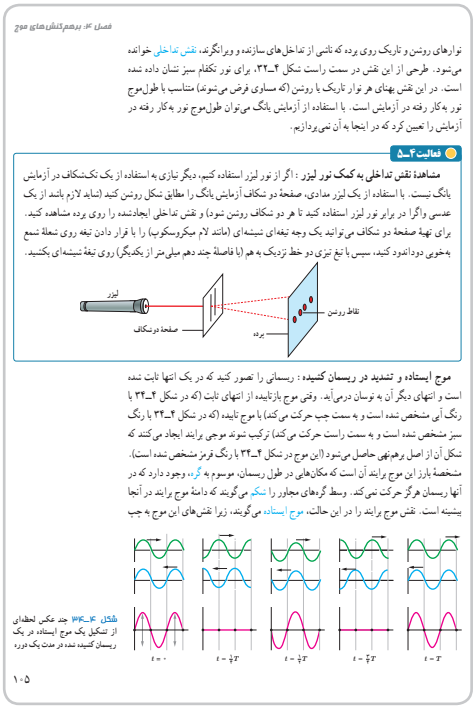
شکل ۴ـ۳۲ طرحی از آزمایش اولیهٔ یانگ. نور تکفام سبز توسط تک‌شکافی پراشیده می‌شود. با پراشیدن این نور از در تک‌شکاف بعدی، امواج نوری تداخل می‌کنند و نقشی تداخلی (نوارهای روشن و تاریک روی پرده) به وجود می‌آورند. توجه کنید بهنای نوارهای روشن و تاریک در این نقش یکسان فرض نشده است.

شکل ۴ـ۳۳ 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.

۱ـ fringes

۱۰۴

در اینجا خوب است دانش‌آموزان علاقه‌مند را به دانستنی «اختلاف طول مسیر و مکان نوارهای تداخلی» ارجاع دهید تا در صورت تمایل تحلیل ریاضی این موارد را دریابند. همچنین دانستنی «رنگ‌های حاصل از تداخل : لایه‌های روغن و جانوران» که در مورد نقش‌های حاصل از فشردن یکی از صفحه‌های دو لایهٔ نازک که بین‌شان هواست کاربرد دارد، می‌تواند برای دانش‌آموزان جالب باشد.



فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

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 ۴ـ۳۳، برای نور تکفام سبز نشان داده شده است. در این نقش بهنای هر نوار تاریک یا روشن (که مساوی فرض می‌شود) 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.

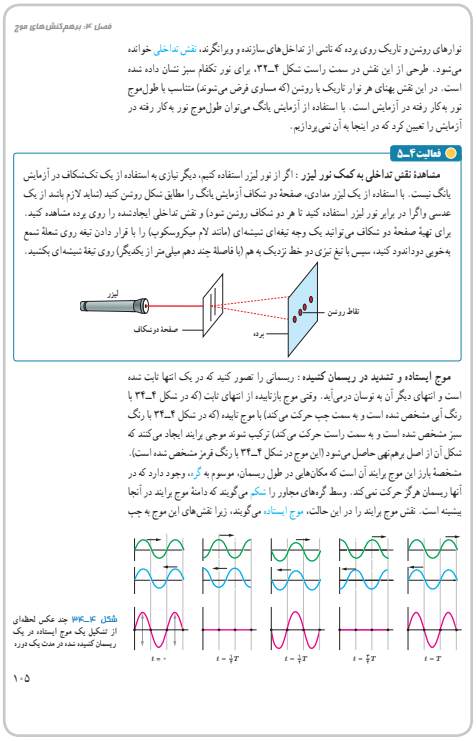
فعالیت ۴ـ۵

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 (نباید 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 دود اندود کنید، سپس با نیخ 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 ۴ـ۳۴ با رنگ آبی مشخص شده است و به سمت چپ حرکت می‌کند) با موج تابیده (که در شکل ۴ـ۳۴ 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 ۴ـ۳۴ 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 دامهٔ موج برایند در آنجا بیشینه است. نقش موج برایند را در این حالت، موج ایستاده می‌گویند، زیرا نقش‌های این موج به چپ

شکل ۴ـ۳۴ چند عکس لحظه‌ای از تشکیل یک موج ایستاده، در یک ریسمان کشیده شده در مدت یک دوره.

۱۰۵



فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

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 ۴ـ۳۲، 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 ۴ـ۵

مشاهدهٔ نقش تداخلی به کمک نور لیزر : اگر از نور لیزر استفاده کنید، 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 دود اندود کنید، سپس با نیغ 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 ۴ـ۳۴ با رنگ آبی مشخص شده است و به سمت چپ حرکت می‌کند) با موج تابیده (که در شکل ۴ـ۳۴ با رنگ سبز مشخص شده است و به سمت راست حرکت می‌کند) ترکیب شوند موجی پرایند ایجاد می‌کنند که شکل آن از اصل برهم‌نهی حاصل می‌شود (این موج در شکل ۴ـ۳۴ با رنگ قرمز مشخص شده است). مشخصهٔ بارز این موج پرایند 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 پرایند در آنجا بیشینه است. نقش موج پرایند را در این حالت، موج ایستاده می‌گویند، زیرا نقش‌های این موج به جب

شکل ۴ـ۳۴ چند عکس لحظه‌ای از تشکیل یک موج ایستاده، در یک ریسمان کشیده، شده در مدت یک دوره

۱۰۵

پاسخ فعالیت ۴ـ۵

در مورد این فعالیت موارد زیر را به دانش‌آموزان گوشزد کنید :

۱ از لحاظ ایمنی حتماً مواظب باشید باریکهٔ نور لیزر یا بازتاب آن وارد چشمتان نشود.

۲ پرده در حدود چند متر از صفحهٔ شکاف باشد.

۳ خوب است بدانید با این آزمایش می‌توان طول موج نور لیزر به‌کار رفته را نیز محاسبه کرد. این طول موج از رابطهٔ $\lambda = sd/D$ به‌دست می‌آید که در آن s فاصلهٔ نقطه‌ها است و اگر بر فرض ۹ نقطه داشته باشیم فاصلهٔ دو انتهای نقطه‌ها $8s$ می‌شود که با یک متر می‌توان این فاصله را اندازه گرفت و بر ۸ تقسیم کرد. همچنین d فاصلهٔ شکاف‌ها و D فاصلهٔ صفحهٔ شکاف‌ها تا پرده است.

فیلم

در این فیلم آزمایش یانگ با نور لیزر را مشاهده می‌کنید.

خوب است در اینجا اشاره شود که برای سایر امواج الکترومغناطیسی نیز تداخل رخ می‌دهد و مثلاً فناوری و کاربرد اجاق‌های میکروموج و نیز فعالیت ۴ـ۷ مثال‌هایی از تداخل امواج الکترومغناطیسی هستند. همچنین بررسی فعالیت پیشنهادی «تداخل برای امواج میکروموج» خالی از لطف نیست.

دانستنی معلم

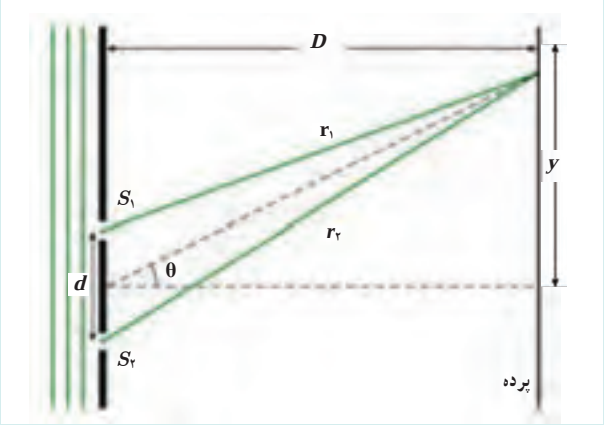
اختلاف طول مسیر و مکان نوارهای تداخلی

دیدیم امواج نوری، نوارهای تداخلی را بر یک پرده ایجاد می‌کنند. اکنون می‌خواهیم بررسی کنیم چگونه می‌توان محل دقیق این نوارها بر پرده را تعیین کید. برای پاسخ به این سؤال از آرایش شکل ۴ـ۳۳ کتاب استفاده می‌کنیم. فرض کنید موج تختی از نوری تک‌فام بر دو شکاف S_1 و S_2 فرود آید. همان‌طور که دیدیم نور در شکاف‌ها پراشیده می‌شود و نقشی تداخلی روی پرده ایجاد می‌کند. یک محور مرکزی را از نقطهٔ وسط بین شکاف تا پرده به عنوان خط مرجع (خط‌چین افقی) رسم می‌کنیم. سپس برای بحث خود، نقطهٔ دلخواه P را روی پرده در نظر می‌گیریم. در این نقطه، پرده موج پرتوی حاصل از شکاف S_1 و موج پرتوی حاصل از شکاف S_2 را قطع می‌کند. این موج‌ها وقتی از دو شکاف می‌گذرند هم‌فازند زیرا در محلّ شکاف‌ها، آنها دقیقاً بخش‌هایی از یک جبههٔ موج هستند. ولی با عبور این موج‌ها از شکاف‌ها، آنها مسیرهای متفاوتی را تا رسیدن به نقطهٔ P طی می‌کنند. اگر دو موج مسیرهایی با طول‌های متفاوت را طی کنند، ممکن است دیگر فازهای آنها در نقطهٔ P برابر نباشد. بنابراین بسته به اختلاف طول

مسیر پرتوها تا نقطهٔ P (که به آن *اختلاف راه* نیز می‌گویند) ممکن است تداخلی سازنده یا ویرانگر در نقطهٔ P ایجاد شود. همچنین نشان داده می‌شود که اگر این اختلاف طول مسیر مضرب درستی از طول موج نور باشد، تداخلی کاملاً سازنده خواهیم داشت و به نوارهای تداخلی روشنی (فریزهای روشن) یا بیشینه‌ها می‌رسیم، و اگر این اختلاف طول مسیر مضرب فردی از نصف طول موج باشد، تداخلی کاملاً ویرانگر خواهیم داشت و به نوارهای تداخلی تاریک (فریزهای تاریک) یا کمینه‌ها می‌رسیم. به عبارتی برای اختلاف راه ΔL داریم

$$\Delta L = m\lambda \ , \ m = ۰, ۱, ۲, ...$$ (برای نوارهای تداخلی روشن)

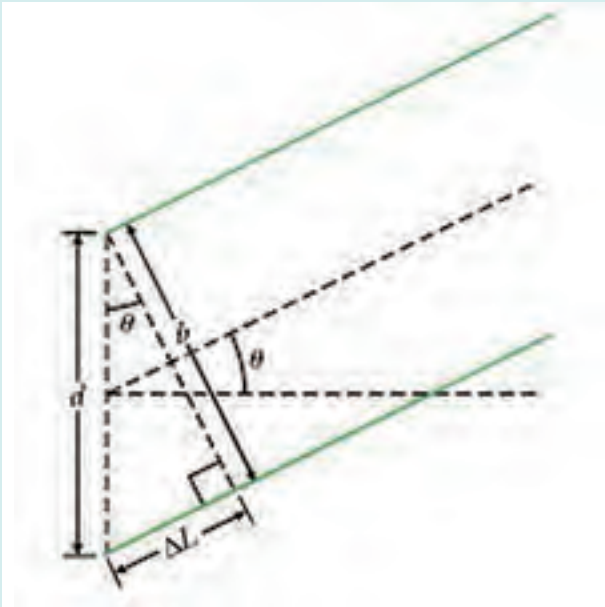
$$\Delta L = (۲m+۱)\frac{\lambda}{۲} \ , \ m = ۰, ۱, ۲, ...$$ (برای نوارهای تداخلی تاریک)



شکل ۱ــ موج‌های حاصل از شکاف‌های $S_۱$ و $S_۲$ در نقطهٔ دلخواه P روی پرده در فاصلهٔ y از محور مرکزی ترکیب شده‌اند. با زاویهٔ θ می‌توان مکان P را تعیین کرد.

برای محاسبهٔ ΔL در شکل ۱ (یعنی اختلاف بین طول مسیرهای $S_۱P$ و $S_۲P$) کمانی به مرکز P و به شعاع $PS_۱$ رسم می‌کنیم. این کمان خط $S_۲P$ را در نقطه‌ای قطع می‌کند. آنگاه فاصلهٔ $S_۲$ تا این نقطه همان اختلاف طول مسیر پرتوها است. اما محاسبهٔ این طول دشوار است و برای سادگی محاسبات معمولاً فرض می‌شود که فاصلهٔ Dی شکاف‌ها تا پرده بسیار بزرگ‌تر از فاصلهٔ dی شکاف‌ها از همدیگر است به‌طوری که می‌توانیم تقریباً پرتوهای $r_۱$ و $r_۲$ را موازی در نظر بگیریم (شکل ۲). در این صورت اختلاف طول مسیر پرتوها با رسم عمودی از $S_۱$ بر پرتوی $r_۲$ که در شکل با b نشان داده شده است به دست می‌آید و در نتیجه از مثلث قائم‌الزویهٔ شکل درمی‌یابیم $\Delta L = d\sin\theta$ است که در آن θ زاویهٔ بین محو مرکزی و خطی است که از وسط شکاف‌ها به نقطهٔ P رسم شده است.

بنابراین اکنون معادله‌هایی که برای Δx به دست آوردیم به رابطه‌های زیر می‌انجامد



شکل ۲ــ به ازای D خیلی بزرگ‌تر از d $(D \gg d)$ می‌توان پرتوهای r_1 و r_2 را تقریباً موازی در نظر گرفت. در این صورت با توجه به اینکه دو ضلع زاویهٔ θ در مثلث قائم‌الزاویهٔ شکل عمود بر دو ضلع زاویهٔ θ در شکل ۱ است، این دو زاویه با هم برابرند.

$$d \sin\theta = m\lambda \ , \ m = ۰, ۱, ۲, \ldots$$ (برای نوارهای تداخلی روشن)

$$d \sin\theta = (۲m+۱)\frac{\lambda}{۲} \ , \ m = ۰, ۱, ۲, \ldots$$ (برای نوارهای تداخلی تاریک)

و با توجه به اینکه در شکل زاویهٔ θ زاویه‌ای کوچک است $\sin\theta \approx \tan\theta = \frac{y}{D}$ ، که در آن y فاصلهٔ نقطهٔ P تا محور مرکزی است. در نتیجه رابطه‌های بالا چنین می‌شوند

$$y = \frac{m\lambda D}{d} \ , \ m = ۰, ۱, ۲, \ldots$$ (برای نوارهای تداخلی روشن)

$$y = \frac{(m+\frac{۱}{۲})\lambda D}{d} \ , \ m = ۰, ۱, ۲, \ldots$$ (برای نوارهای تداخلی تاریک)

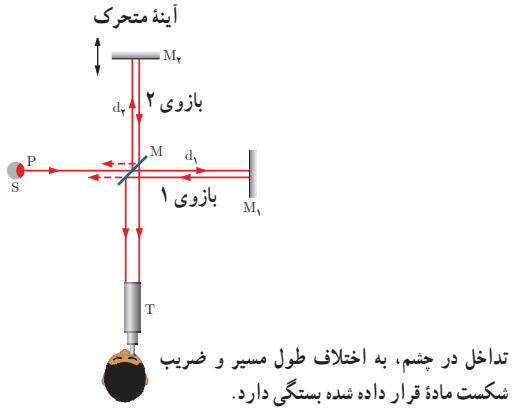
دانستنی معلم

تداخل‌سنج مایکلسون

تداخل‌سنج[1] وسیله‌ای است که به کمک فریزهای تداخلی می‌تواند برای اندازه‌گیری بسیار دقیق طول یا تغییر طول به‌کار رود. در اینجا شکل اولیهٔ آن را که در سال ۱۸۸۱ توسط *مایکلسون* طراحی و ساخته شد، توضیح می‌دهیم.

نوری را در نظر بگیرید که نقطهٔ P واقع بر چشمهٔ گستردهٔ S در شکل ۱ را ترک می‌کند و به شکافندهٔ باریکهٔ M می‌رسد. شکافندهٔ باریکه، آینه‌ای است که نیمی از نور فرودی را عبور می‌دهد و نیمی دیگر را بازمی‌تاباند. در شکل، برای راحتی کار، فرض کرده‌ایم ضخامت آینه ناچیز است. بنابراین، در نقطهٔ M نور به دو موج تقسیم می‌شود که یکی با عبور از شکافنده به طرف آینهٔ M_1 در انتهای یکی از بازوها و دیگری با بازتاب از شکافنده به طرف آینهٔ M_2 در انتهای بازوی دیگر پیش می‌رود. این موج‌ها از آینه‌ها کاملاً بازمی‌تابند و در امتداد جهت‌های فرودی خود بازمی‌گردند و سرانجام هر یک وارد دوربین T می‌شوند. آنچه ناظر می‌بیند نقشی تداخلی از فریزهای خمیده یا تقریباً مستقیم است که این آخری شبیه نوارهای روی پوست یک گورخر است.

اختلاف طول مسیر دو موج وقتی دوباره در دوربین با هم ترکیب می‌شوند برابر با $2d_2 - 2d_1$ است، و هر چیزی که این اختلاف طول مسیر را تغییر دهد، موجب تغییر در اختلاف فاز بین این دو موج در چشم می‌شود. مثلاً اگر آینهٔ M_2 به اندازهٔ $\frac{1}{2}\lambda$ حرکت کند، اختلاف طول مسیر به اندازهٔ λ تغییر می‌کند و نقش فریز به اندازهٔ یک فریز جابه‌جا می‌شود (گویی هر نوار تاریک گورخر به محلّ نوار تاریک مجاور حرکت کرده است). به همین ترتیب، حرکت آینهٔ M_2 به اندازهٔ $\frac{1}{4}\lambda$ موجب جابه‌جایی به اندازهٔ نیم فریز می‌شود (هر نوار تیرهٔ گورخر به محلّ نوار روشن مجاور جابه‌جا می‌شود).



شکل ۱ــ تداخل‌سنج مایکلسون که مسیر نوری را نشان می‌دهد که از نقطهٔ P چشمهٔ گسترده نشأت گرفته است. آینهٔ M نور را به دو باریکه تقسیم می‌کند، که از آینه‌های M_1 و M_2 به سمت M و سپس به دوربین T بازمی‌تاباند. ناظر در دوربین فریزهای تداخلی را می‌بیند.

۱ــ interferometer

جالب است بدانید که وجود امواج گرانشی را به چنین روشی در «رصدخانهٔ تداخل‌سنج لیزری امواج گرانشی» یا **لایگو**[1] (شکل ۲) رصد کردند که البته بحث آن در اینجا نمی‌گنجد ولی می‌توانید به فیلمی که در این رابطه در سایت گروه گذاشته شده است مراجعه کنید.

شکل ۲ــ تصویری از رصدخانه‌های لایگو درلیوینگستون و هانفورد

در این فیلم چگونگی آشکارسازی امواج گرانشی در لایگو را می‌بینید.

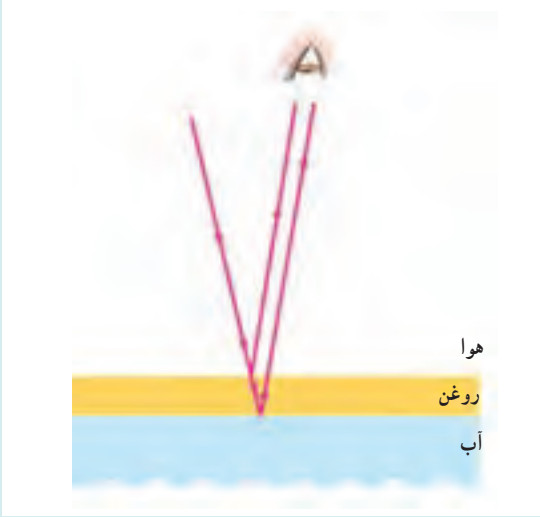
قرار دادن مادهٔ شفاف. با قرار دادن یک مادهٔ شفاف نازک در مسیر نوری یکی از آینه‌ها ــ مثلاً M_1 ــ نیز می‌توان باعث جابه‌جایی در نقش فریزها شد. اگر ضخامت ماده L و ضریب شکست آن n باشد، نشان داده می‌شود که تعداد فریزهای جابه‌جا شده از رابطهٔ $\frac{2L}{\lambda}(n-1)$ به‌دست می‌آید. برای هر تغییر فاز، نقش نواری به اندازهٔ یک فریز جابه‌جا می‌شود. بنابراین با شمردن تعداد فریزهایی که بر اثر حضور ماده باعث جابه‌جایی نقش نواری شده‌اند می‌توان ضخامت ماده برحسب λ را تعیین کرد. با چنین روش‌هایی می‌توان طول اجسام را برحسب طول موج معین کرد. در زمان مایکلسون، معیار طول، فاصلهٔ بین دو خراش ظریف روی یک میلهٔ فلزی معین بود که در جایی نزدیکی پاریس نگهداری می‌شد. مایکلسون با استفاده از تداخل‌سنج خود نشان داد که مترِ معیار معادل ۱۵۵۳۱۶۳/۵ طول موج نور قرمز تک‌فامی است که از یک چشمهٔ کادمیُم گسیل شده است. مایکلسون برای این اندازه‌گیری دقیق، جایزهٔ نوبل سال ۱۹۰۷ را دریافت کرد. کار او زمینه را برای کنار گذاشتن میلهٔ متر به عنوان معیار طول مهیا کرد و به تعریف دوبارهٔ متر برحسب طول موج نور در سال ۱۹۶۱ انجامید. البته این معیار نیز برای برآوردن الزامات روبه پیشرفت علم و فناوری به حدّ کافی دقیق نبود و در سال ۱۹۸۳ معیار جدیدی مبتنی بر مقداری تعریف شده برای تندی نور، جایگزین آن شد.

۱ــ Laser Interferomenter Gravitional wave Obeservatory

دانستنی برای معلم

رنگ‌های حاصل از تداخل : لایه‌های روغن و جانوران

اگر به لایه‌ها و حباب‌های صابون یا لکه‌های روغن در خیابانی خیس نگاه کنید، تنوع رنگیِ چشم‌نوازی را در آنها مشاهده می‌کنید. این تنوع رنگی ناشی از پدیدهٔ داخل نور است. در واقع، وقتی یک لایهٔ شفاف که ضخامتی تقریباً برابر با طول موج نور مرئی دارد توسط نور سفیدی روشن شود، به دلیل تداخل نور می‌تواند رنگ‌هایی ایجاد کند. فرض کنید پرتویی تکفام بر چنین لایه‌ای بتابد. بخشی از این نور از سطح جلویی لایه بازمی‌تابد، در حالی که بخشی از بقیهٔ نور با عبور از لایه، از سطح عقبی آن بازمی‌تابد، دوباره از لایه می‌گذرد، و سپس از آن خارج می‌شود. وقتی شما این دو موج خروجی از لایه را دریافت می‌کنید آنها با هم تداخل می‌کنند (شکل ۱). اگر آنها هم‌فاز باشند، به طور سازنده تداخل می‌کنند و شما رنگ روشنی را روی لایه می‌بینید و اگر آنها ناهم‌فاز باشند، به طور ویرانگر تداخل می‌کنند و شما روی لایه را سیاه می‌بینید. وقتی شما زاویهٔ دید خود را تغییر دهید، مسافتی که نور در لایه می‌پیماید تغییر می‌کند که این می‌تواند تداخل دو پرتو را از سازنده به ویرانگر و بالعکس تبدیل می‌کند. نور سفید آمیزه‌ای از رنگ‌های مختلف است و بنابراین رنگ‌هایی را که می‌بینید با تغییر زاویهٔ دید شما تغییر می‌کنند و نمایش‌های رنگارنگی را مشاهده خواهید کرد.



شکل ۱ــ نور بازتابیده از سطوح جلویی و عقبی لایه به چشم شما می‌رسد.

همچنین طبیعت دیرزمانی است از تداخل نوری برای ایجاد رنگ استفاده کرده است. رنگی که از برخی پروانه‌ها و حشرات می‌بینیم ناشی از تداخل نوری است. این پروانه‌ها و حشرات باله‌هایی دارند که رنگ آنها با تغییر زاویهٔ دید شما تغییر می‌کند. یک نمونهٔ جالب، پروانهٔ مورفو[1] است که گرچه رنگ بال آن قهوه‌ای است (و آن را می‌توانید از سطح پایینی بال آن ببینید)، ولی سطح بالایی بال آن بر اثر تداخل نور بازتابیده به رنگ آبی درخشانی دیده می‌شود (شکل ۲) و اگر زاویهٔ دید خود را تغییر دهید، این رنگ

۱ــ Morpho

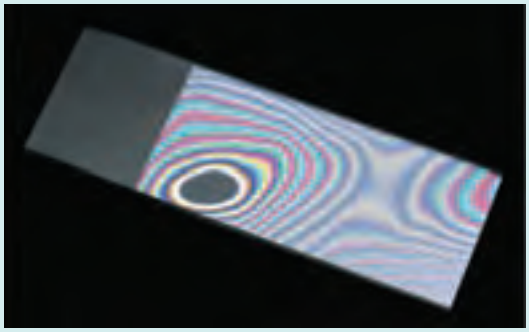
تغییر می‌کند. *شاه‌ماهی*[1] نیز از همین ویژگی استفاده می‌کند و خود را به رنگ سفید نقره‌ای می‌نمایاند تا شکارچی‌ها کار سختی در یافتن آن داشته باشد. وقتی به برخی از سوسک‌های *آبزی استوایی*[2] از زاویهٔ خاصی نگاه شود، رنگ‌های زیبایی را نشان می‌دهند. برخی سوسک‌ها از این ویژگی جهت استتار خود استفاده می‌کنند.

شکل ۲ــ تصویری از پروانهٔ مورفو

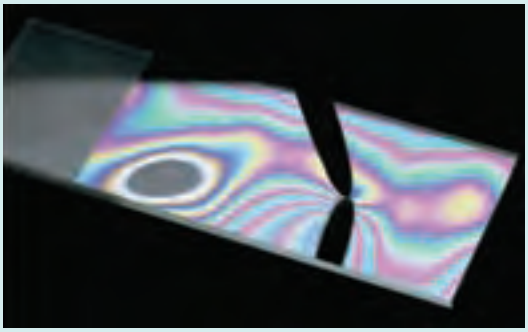
ویژگی این پروانه‌ها و حشرات ناشی از لایه‌های پوسته‌مانند شفافی است که موجب تداخل نور می‌شوند. مثلاً در سطح بالایی بال یک پروانهٔ مورفو، این پوسته‌ها ساختاری پله‌کانی دارند. ضخامت و فاصلهٔ این پوسته‌ها به‌گونه‌ای است که وقتی نور سفیدی از آنها می‌گذرد، بازتاب‌های حاصل از پوسته‌های متوالی (مثلاً پوستهٔ بالایی و پوستهٔ پایین‌تر بعدی) به تداخل ویرانگر می‌انجامد و بنابراین شما رنگی آبی از این بال می‌بینید. با تغییر زاویهٔ دید خود، مسیر نوری که به شما می‌رسد را تغییر می‌دهید و این موجب تغییر طول موجی می‌شود که به تداخل سازنده می‌انجامد.

از جابه‌جایی رنگی مشابهی در جوهرهای به‌کار رفته در بسیاری از اسکناس‌ها برای مقابله با جعل‌کنندگان استفاده می‌شود. وقتی از زاویه‌ای به یک نقطه از اسکناس نگاه می‌کنید آن نقطه را به رنگی می‌بینید و وقتی از زاویه‌ای دیگر به همان نقطه نگاه می‌کنید آن را به رنگی دیگر می‌بینید. دستگاه‌های نسخه‌برداری (کپی) فقط می‌توانند از یک زاویهٔ دید نسخه‌برداری کنند و بنابراین نمی‌توانند هر انتقال رنگی را که بر اثر تغییر زاویهٔ دید ایجاد می‌شود، به وجود آورند.

همچنین تغییر فاصلهٔ لایه‌هایی که برهم نهاده شده‌اند می‌تواند به تغییر رنگ بیانجامد. شکل ۳.الف دو لایهٔ شیشه با گاف هوای باریک را نشان می‌دهد که بر اثر تابش نور تقش‌هایی تداخلی بر آن ایجاد شده است. وقتی لایهٔ بالایی را می‌فشاریم (شکل ۳.ب) نقش‌های تداخلی تغییر شکل می‌دهند که این ناشی از آن است که با اعمال فشار، فاصلهٔ هوای بین لایه‌ها تغییر کرده است.



شکل ۳.الف دو فیلم نازک با گاف باریکی از هوا که به آن نور سفید تابانده شده است.

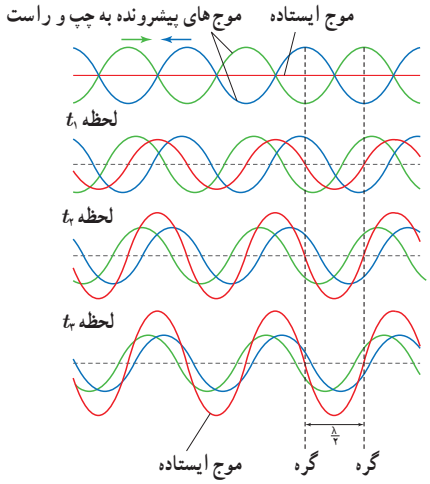


شکل ۳.ب با اعمال فشار به فیلم نازک بالایی، نقش های تداخلی تغییر می‌کنند.

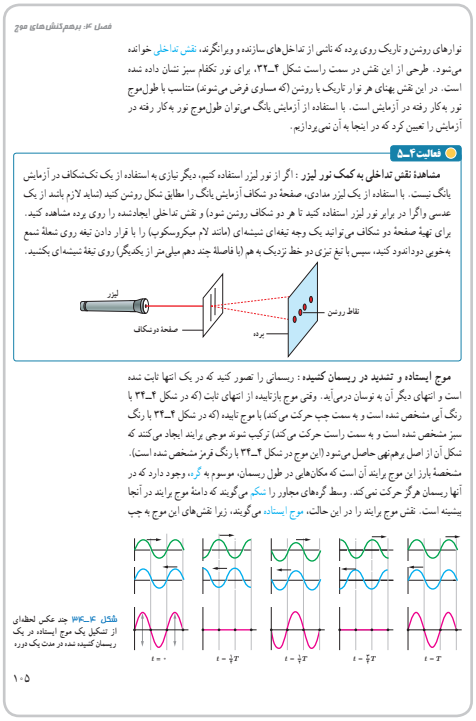
۱ــ Herring

۲ــ Eropical Gyrinid Beetle

اشاره کنید دو موج سینوسی با طول موج و دامنهٔ یکسان را بررسی می‌کنید که در جهت‌های مخالف هم حرکت می‌کنند (یعنی برخلاف آنچه که در حاشیهٔ دوم مربوط به صفحهٔ ۱۰۳ کتاب درسی آمده است و در آنجا دو موج سینوسی با طول موج و دامنهٔ یکسان در یک جهت حرکت می‌کنند). از این لحاظ می‌توان اشاره کرد که لزوماً نیازی به این نیست که ریسمانی را در نظر بگیرند. مثلاً شکل‌های زیر در حالت کلی این را برای دو موج، یک چپ رونده (سبزرنگ) و دیگری راست رونده (آبی) و تشکیل موج ایستاده برای چهار لحظه نشان می‌دهد.



چند عکس لحظه‌ای از تشکیل یک موج ایستاده



فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

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 ۴ـ۳۲، 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 ۴ـ۵

مشاهدهٔ نقش تداخلی به کمک نور لیزر : اگر از نور لیزر استفاده کنید، 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 دود اندود کنید، سپس با نیخ تیزی دو خط تزدیک به هم (با فاصلهٔ چند دهم میلی‌متر از یکدیگر) روی تیغهٔ شیشه‌ای بکشید.

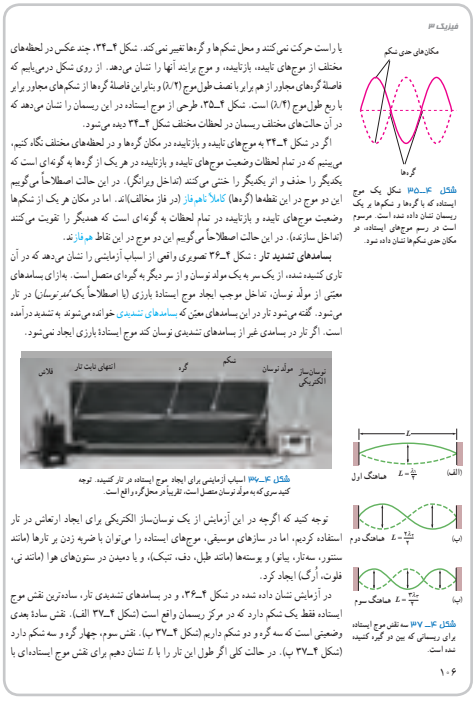
موج ایستاده و تشدید در ریسمان کشیده : ریسمانی را تصور کنید که در یک انتها ثابت شده است و انتهای دیگر آن به نوسان درمی‌آید. وقتی موج بازتابیده از انتهای ثابت (که در شکل ۴ـ۳۴ با رنگ آبی مشخص شده است و به سمت چپ حرکت می‌کند) با موج تابیده (که در شکل ۴ـ۳۴ با رنگ سبز مشخص شده است و به سمت راست حرکت می‌کند) ترکیب شوند موجی پرایند ایجاد می‌کنند که شکل آن از اصل برهم‌نهی حاصل می‌شود (این موج در شکل ۴ـ۳۴ با رنگ قرمز مشخص شده است). مشخصهٔ بارز این موج پرایند 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 پرایند در آنجا بیشینه است. نقش موج پرایند را در این حالت، موج ایستاده می‌گویند، زیرا نقش‌های این موج به جب

شکل ۴ـ۳۴ چند عکس لحظه‌ای از تشکیل یک موج ایستاده در یک ریسمان کشیده شده در مدت یک دوره

۱۰۵

اشاره کنید دو موج سینوسی با طول موج و دامنهٔ یکسان را بررسی می‌کنید که در جهت‌های مخالف هم حرکت می‌کنند (یعنی برخلاف آنچه که در حاشیهٔ دوم مربوط به صفحهٔ ۱۰۳ کتاب درسی آمده است و در آنجا دو موج سینوسی با طول موج و دامنهٔ یکسان در یک جهت حرکت می‌کنند). از این لحاظ می‌توان اشاره کرد که لزوماً نیازی به این نیست که ریسمانی را در نظر بگیرند. مثلاً شکل‌های زیر در حالت کلی این را برای دو موج، یک چپ رونده (سبزرنگ) و دیگری راست رونده (آبی) و تشکیل موج ایستاده برای چهار لحظه نشان می‌دهد.

در شکل ۴ـ۳۵ دوباره تأکید شود فاصلهٔ مکان‌های حدّی شکم، محدودهٔ حرکت شکم است.



فیزیک ۳

با راست حرکت نمی‌کند و محل شکم‌ها و گره‌ها تغییر نمی‌کند. شکل ۴ـ۳۴، چند عکس در لحظه‌های مختلف از موج‌های تابیده، بازتابیده، و موج پرایند 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 ۴ـ۳۵، طرحی از موج ایستاده در این ریسمان را نشان می‌دهد که در آن حالت‌های مختلف ریسمان در لحظات مختلف شکل ۴ـ۳۴ دیده می‌شود.

اگر در شکل ۴ـ۳۴ 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.

بسامدهای تشدید تار : شکل ۴ـ۳۶ 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 بازرگی (یا اصطلاحاً یک *مد 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 بازرگی ایجاد نمی‌شود.

شکل ۴ـ۳۶ 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، آرگ) ایجاد کرد.

در آزمایش نشان داده شده در شکل ۴ـ۳۶، و در بسامدهای تشدیدی تار، ساده‌ترین نقش موج ایستاده فقط یک شکم دارد که در مرکز ریسمان واقع است (شکل ۴ـ۳۷ الف). نقش سادهٔ بعدی وضعیتی است که سه گره و دو شکم داریم (شکل ۴ـ۳۷ ب). نقش سوم، چهار گره و سه شکم دارد (شکل ۴ـ۳۷ پ). در حالت کلی اگر طول این تار را با L نشان دهیم برای نقش موج ایستاده‌ای با

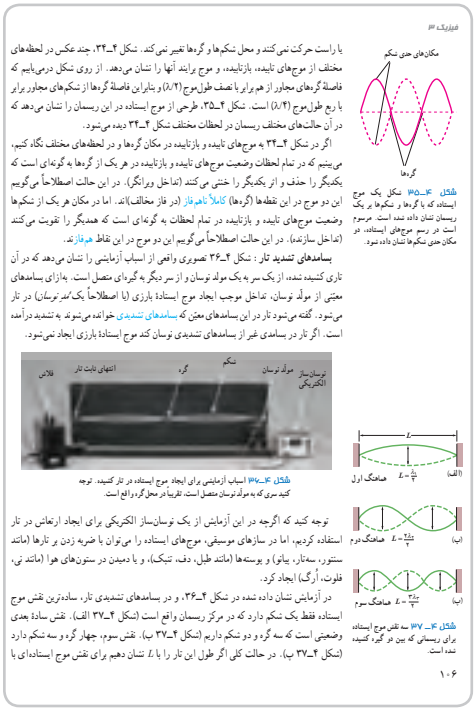
شکل ۴ـ۳۷ سه نقش موج ایستاده برای ریسمانی که بین دو گیره کشیده شده است.

۱۰۶

فیلم

در این فیلم تشریح جامعی از انتشار امواج و برهم‌کنش‌های آنها را می‌بینید.

شاید از لحاظ اطلاعات عمومی خوب باشد اشاره شود که به این آزمایش، *آزمایش ملد* (Meld's experiment) می‌گویند. به‌خصوص اگر دانش‌آموزان بخواهند آن را به عنوان واژه‌ای کلیدی در اینترنت جست‌وجو کنند مفید خواهد بود. در واقع این آزمایش را نخستین بار فیزیکدان آلمانی *فرانتز ملد* (۱۹۰۱ـ۱۸۳۲ م.) برای تشکیل موج‌های ایستاده در یک ریسمان انجام داد. در آزمایش‌های اولیه از یک دیاپازن به عنوان چشمهٔ نوسانی استفاده می‌شد. همچنین می‌توانید مانند فیلمی که در سایت گروه فیزیک بارگذاری شده است دانش‌آموزان را ترغیب به ایجاد موج‌های ایستاده بکنید.



فیزیک ۳

یا راست حرکت نمی‌کنند و محل شکم‌ها و گره‌ها تغییر نمی‌کند. شکل ۴ـ۳۴، چند عکس در لحظه‌های مختلف از موج‌های تابیده، بازتابیده، و موج برآیند 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 ۴ـ۳۵، طرحی از موج ایستاده در این ریسمان را نشان می‌دهد که در آن حالت‌های مختلف ریسمان در لحظات مختلف شکل ۴ـ۳۴ دیده می‌شود.

اگر در شکل ۴ـ۳۴ 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.

بسامدهای تشدید تار: شکل ۴ـ۳۶ 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 *مُد 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 ۴ـ۳۴ شکل یک موج ایستاده که با گره‌ها و شکم‌ها بر یک ریسمان نشان داده شده است. مرسوم است در رسم موج‌های ایستاده، در مکان حدّی شکم‌ها نشان داده نشود.

شکل ۴ـ۳۷ سه نقش موج ایستاده برای ریسمانی که بین دو گیره کشیده شده است.

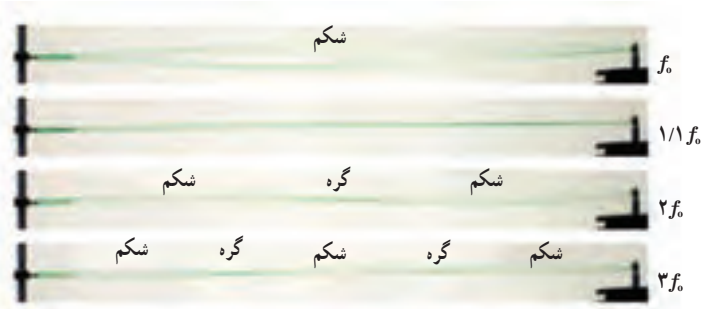
شکل ۴ـ۳۶ اسباب آزمایشی برای ایجاد موج ایستاده در تار کشیده. توجه کنید سری که به مولّد نوسان متصل است، تقریباً در محل گره واقع است.

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 بوسته‌ها (مانند طبل، دف، تنبک)، و با دمیدن در ستون‌های هوا (مانند نی، فلوت، اُرگ) ایجاد کرد.

در آزمایش نشان داده شده در شکل ۴ـ۳۶، و در بسامدهای تشدیدی تار، ساده‌ترین نقش موج ایستاده فقط یک شکم دارد که در مرکز ریسمان واقع است (شکل ۴ـ۳۷ الف). نقش سادهٔ بعدی وضعیتی است که سه گره و دو شکم داریم (شکل ۴ـ۳۷ ب). نقش سوم، چهار گره و سه شکم دارد (شکل ۴ـ۳۷ پ). در حالت کلی اگر طول این تار را با L نشان دهیم برای نقش موج ایستاده‌ای با

۱۰۶

در اینجا خوب است تأکید شود که اگر تار در بسامدی غیر از بسامدهای تشدیدی نوسان کند موج ایستادهٔ بارزی تشکیل نمی‌شود. شکل زیر برای درک این موضوع بسیار آموزنده است.



در حالی که به ازای بسامدی تشدیدی f_0، $2f_0$ و $3f_0$ موج‌های ایستادهٔ بارزی در یک تار ایجاد شده‌اند، به ازای بسامد غیرتشدیدی ۱/۱ f_0 موج ایستادهٔ بارزی تشکیل نشده است.

فیلم

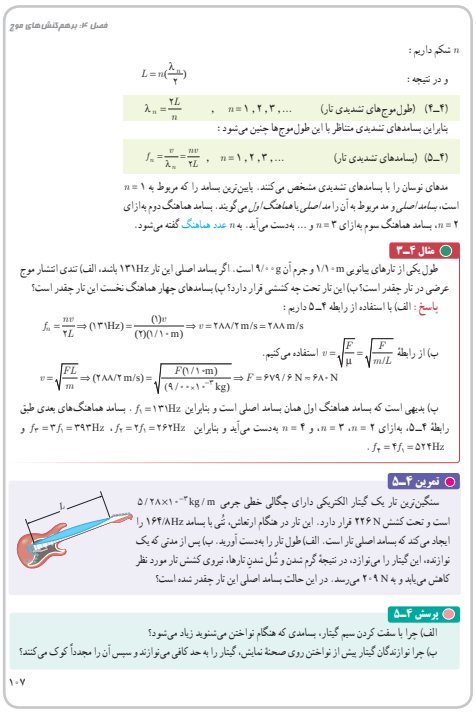
در این فیلم می‌بینید که چگونه می‌توان موج‌های ایستاده را به‌سادگی ایجاد کرد.

فیلم

در این فیلم آزمایشی مشابه را برای تشکیل گره و شکم می‌بینید.

فیلم

در این فیلم‌ها ایجاد هماهنگ‌های دوم تا پنجم را می‌بینید.



فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

n تنگم داریم :

و در نتیجه :

$$L = n\left(\frac{\lambda_n}{2}\right)$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad , \quad n = 1, 2, 3, \ldots \qquad \text{(طول موج‌های تشدیدی تار)} \qquad (4\text{-}4)$$

بنابراین بسامدهای تشدیدی متناظر با این طول موج‌ها چنین می‌شود :

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L} \quad , \quad n = 1, 2, 3, \ldots \qquad \text{(بسامدهای تشدیدی تار)} \qquad (5\text{-}4)$$

مدهای نوسان را با بسامدهای تشدیدی مشخص می‌کنند. پایین‌ترین بسامد را که مربوط به $n = 1$ است، *بسامد اصلی* و مد مربوط به آن را *مد اصلی* یا *هماهنگ اول* می‌گویند. بسامد هماهنگ دوم به‌ازای $n = 2$، بسامد هماهنگ سوم به‌ازای $n = 3$ و ... به‌دست می‌آید. به n عدد هماهنگ گفته می‌شود.

مثال ۴ـ۳

طول یکی از تارهای پیانو $1/10\,m$ و جرم آن $9/00\,g$ است. اگر بسامد اصلی این تار $131\,Hz$ 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 رابطهٔ ۴ـ۵ داریم :

$$f_n = \frac{nv}{2L} \Rightarrow (131\,Hz) = \frac{(1)v}{(2)(1/10\,m)} \Rightarrow v = 288/2\,m/s = 288\,m/s$$

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

$$v = \sqrt{\frac{FL}{m}} \Rightarrow (288/2\,m/s) = \sqrt{\frac{F(1/10\,m)}{(9/00\times10^{-3}\,kg)}} \Rightarrow F = 679/6\,N \approx 680\,N$$

پ) بدیهی است که بسامد هماهنگ اول همان بسامد اصلی است و بنابراین $f_1 = 131\,Hz$. بسامد هماهنگ‌های بعدی طبق رابطهٔ ۴ـ۵، به‌ازای $n = 2$، $n = 3$، و $n = 4$ به‌دست می‌آید و بنابراین $f_2 = 2f_1 = 262\,Hz$، $f_3 = 3f_1 = 393\,Hz$ و $f_4 = 4f_1 = 524\,Hz$.

تمرین ۴ـ۵

سنگین‌ترین تار یک گیتار الکتریکی دارای چگالی خطی جرمی $5/28\times10^{-3}\,kg/m$ است و تحت کشش $226\,N$ قرار دارد. این تار در هنگام ارتعاش، نُتی با بسامد $164/8\,Hz$ 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 $209\,N$ 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؟

۱۰۷

پاسخ تمرین ۴ـ۵

از رابطهٔ ۴ـ۵ ($f_n = nv/2L$) برای بسامدهای تشدیدی که در آن $v = \sqrt{F/\mu}$ است استفاده می‌کنیم.

الف) با قرار دادن تندی v در رابطهٔ f_n و حل آن برای L خواهیم داشت :

$$L = \frac{n}{2f_n}\sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

که به ازای $n = 1$ چنین به‌دست می‌دهد

$$L = \frac{1}{2(164/8\,Hz)}\sqrt{\frac{266\,N}{5/28\times10^{-3}\,kg/m}}$$

$$= 0/6277\,m \approx 0/628\,m$$

ب) اکنون $F = 209\,N$ و $L = 0/628\,m$ را در رابطهٔ بسامد تشدید قرار می‌دهیم، و از آنجا بسامد اصلی را به‌دست می‌آوریم.

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

$$= \frac{1}{2(0/6277\,m)}\sqrt{\frac{209\,N}{5/28\times10^{-3}\,kg/m}}$$

$$= 158/48\,Hz \approx 158\,Hz$$

فیلم

در این فیلم‌ها چگونگی ایجاد صدا توسط گیتار و چگونگی تأثیر طول و کشش تارها بر آن را مشاهده می‌کنید.

پاسخ پرسش ۴ـ۵

الف) اگر در رابطهٔ $v = \sqrt{F/\mu}$ به‌جای چگالی خطی جرم، مقدار m/L را قرار دهیم به $v = \sqrt{FL/m}$ می‌رسیم و از آنجا $f_n = n\sqrt{\frac{F}{4Lm}}$ می‌شود. چون با سفت کردن سیم گیتار جرم و طول آن تغییر چندانی نمی‌کند ولی کشش F آن زیاد می‌شود، در نتیجه امواجی سریع‌تر بر روی سیم روانه می‌شود و بسامد صدای بالاتری به گوش می‌رسد. ولی اگر کشی را در بین شست و انگشت خود بکشید، بسامدی که می‌شنویم تغییر محسوسی نمی‌کند. دلیل آن است که گرچه کشش افزایش می‌یابد، ولی همچنین طول آن نیز زیاد می‌شود و بنابراین بسامد گسیل‌یافته تغییر محسوسی نمی‌کند.

ب) وقتی به سیم گیتار زخمه می‌زنید، این حرکت موجب افزایش دمای آن و انبساط سیم می‌گردد و بنابراین کشش سیم هم کاهش می‌یابد. پس بسامدهایی که سیم می‌تواند تولید کند کم می‌شود. یک نوازندهٔ گیتار نمی‌خواهد چنین اتفاقی روی صحنه رخ دهد، زیرا در این صورت باید سیم را سفت کند تا دوباره کوک شود. بنابراین گیتار را در پایین سن آنقدر می‌نوازد تا سیم‌ها گرم شوند و سپس کشش سیم‌ها را تنظیم می‌کند تا روی سن کوک بمانند.

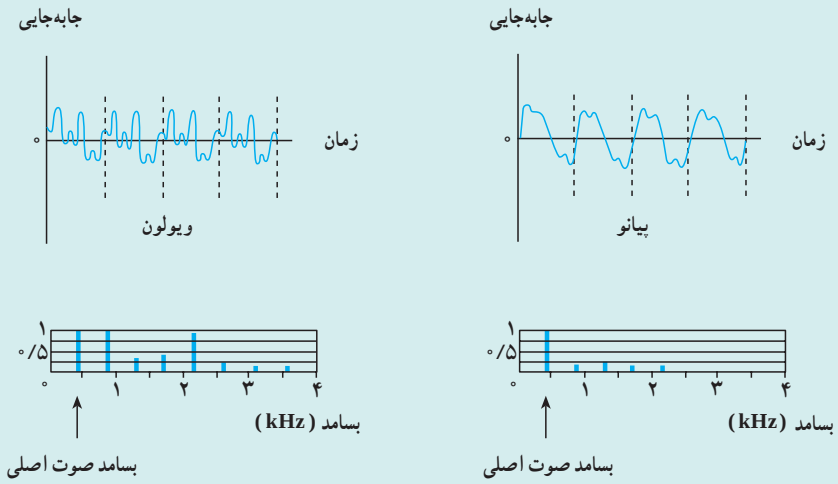
دانستنی برای معلم

صوت‌های موسیقایی

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.

هنگامی‌که 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 ما پس از مرتعش کردن یک تار می‌شنویم از این موج مرکب حاصل می‌شود. در شکل زیر 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. و لی 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 به شکل موج مرکب بستگی دارد. یعنی طنین به نوع، 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، به شدت صوت و خصوصیت‌های شنوایی بستگی دارد.



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

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

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

۳ 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 $do_۱$، re، mi، fa، sol، la، si، $do_۲$ تشکیل شده است که فاصلهٔ آنها از یک نت مبنا ($do_۱$) که کمترین بسامد را دارد، به‌صورت زیر است :

$$\frac{do_۲}{do_۱}=۲\ ,\ \frac{re}{do_۱}=\frac{۹}{۸}\ ,\ \frac{mi}{do_۱}=\frac{۵}{۴}\ ,\ \frac{fa}{do_۱}=\frac{۴}{۳}\ ,\ \frac{sol}{do_۱}=\frac{۳}{۲}\ ,\ \frac{la}{do_۱}=\frac{۵}{۳}\ ,\ \frac{si}{do_۱}=\frac{۱۵}{۸}$$

بسامد $do_۲$ دو برابر بسامد $do_۱$ است و اکتاو $do_۱$ نامیده می‌شود. اگر $do_۲$ را نت مبنا بگیریم، با رعایت فاصله‌های فوق می‌توان گام دوم را ساخت. به‌همین ترتیب می‌توان بر مبنای $do_۳$ که اکتاو $do_۲$ 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 :

$$\frac{re_۱}{do_۱}=\frac{۹}{۸}$$

$$re_۱=\frac{۹}{۸}do_۱=۷۳/۴۱Hz$$

به‌همین ترتیب بسامدهای ۸۱/۵۶، ۸۷، ۹۷/۸۸، ۱۰۸/۷۵ و ۱۲۲/۳۴ هرتز به‌ترتیب برای $me_۱$، $fa_۱$، $sol_۱$، $la_۱$، $si_۱$ به‌دست می‌آیند. برای $do_۲$ که اکتاو $do_۱$ است بسامد ۱۳۰/۵ هرتز محاسبه می‌شود. اکنون می‌توانیم بر مبنای $do_۲$ 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. هر یک از این نت‌ها اکتاو نت متناظر در گام اول است (چرا؟) به‌همین ترتیب برای گام سوم به ترتیب مقدارهای ۲۶۱، ۲۹۳/۶، ۳۲۶/۲۵، ۳۴۸، ۳۹۱/۵، ۴۳۵، ۴۸۹/۳۸ هرتز به‌دست می‌آیند. این مثال نت‌های گام طبیعی را بر مبنای قرارداد $la_۳$ = ۴۳۵ Hz به‌دست می‌دهد. اکنون به‌عنوان تمرین تعیین کنید که بسامدهای ۱۰۴۴ و ۸۷۰ هرتز بسامد چه نت‌هایی هستند و در کدام گام قرار دارند؟

دانستنی برای معلم

«آیا می‌توانید شکل یک طبل را بشنوید»؟

مقاله‌ای با این عنوان وایده در سال ۱۹۶۶ توسط ریاضیدانی به‌نام *مارک کاک*[1] منتشر شد. می‌توان این پرسش را این‌طور هم بیان کرد : آیا می‌توانید از روی بسامدهای گسیل‌شده از یک پوست طبل صاف شکل آن را حدس بزنید؟ یعنی، آیا می‌توانید پس از شنیدن بسیاری از این بسامدها بگویید شکل پوست طبل در هر یک از این بسامدها چگونه است ــ چه قسمت‌هایی در نوسان‌اند و چه قسمت‌هایی نوسان نمی‌کنند؟

در مورد تاری که بین دو پایه کشیده شده است، شما می‌توانید شکل تار را بشنوید، زیرا یک بسامد خاص متناظر با نقش معینی از نوسان تار است. برای مثال، پایین‌ترین بسامدی که تار می‌تواند در آن نوسان کند متناظر با نقش معینی است : دو انتهای تار ساکن هستند (چون در جای خود گره خورده‌اند)، مرکز تار به بیشترین مقدار و نقاط میانی به میزان متوسطی نوسان می‌کنند. بسامد بالاترِ بعدی مربوط به نقش پیچیده‌تر بعدی است، و الی آخر. همان‌طور که می‌دانیم به این بسامدها، بسامدهای هماهنگ تار و به شکل‌های متناظر آنها مُدهای تشدیدی، می‌گویند. وقتی شما برخی از این بسامدها را می‌شنوید می‌توانید از روی هر یک از آنها مُد متناظر آنها را بگویید. افزون بر این، اگر اتفاقاً چگالی و کشش تار را از قبل بدانید، می‌توانید از روی پایین‌ترین بسامد طول تار را نیز بگویید.

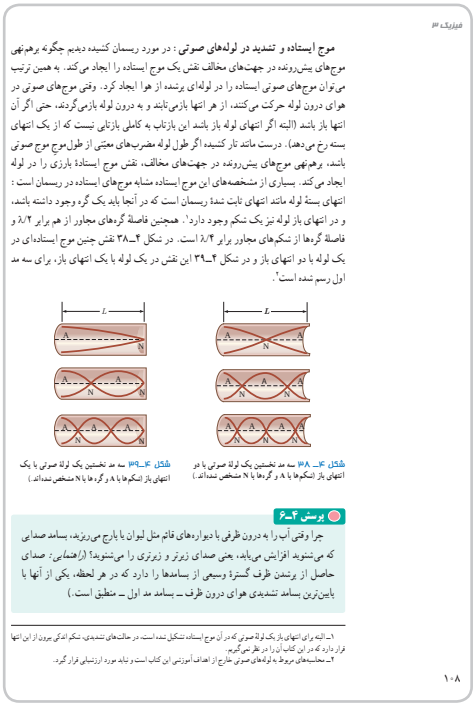
یک پوست طبل صاف مدهای تشدیدی و بسامدهای هماهنگ مشابهی دارد. اما، این مدها با توجه به این واقعیت که پوست طبل دوبعدی است پیچیده‌تر می‌شوند. برای طبل‌های دایره‌ای کار آسان است، امّا برای هر طبل دیگری ممکن است ارتباط مُد نوسانی (قسمت‌هایی که نوسان می‌کنند و قسمت‌هایی که نوسان نمی‌کنند) به شکل پوست طبل دشوار باشد. برای پوست طبل‌های پیچیده‌تر، همیشه نمی‌توانیم شکل نوسان را تعیین کنیم، زیرا دستِ‌کم دو شکل بسیار متفاوت می‌توانند همان دسته بسامدهای هماهنگ را تولید کنند. با این وجود، حتی در این وضعیت‌های دشوار نیز می‌توان مساحت پوست طبل را گفت، و در نتیجه حتی اگر نتوانید همیشه شکل یک طبل را بشنوید، می‌توانید مساحت آن را بشنوید.

فیلم

در این فیلم‌ها نمایش از نقش‌های نوسان (موسوم به *نقش‌های چلادنی*) را می‌بینید.

۱ــ این مقاله تحت عنوان «Can One Hear the Shape of a Drum» نوشته Mark Kac در اینترنت موجود است. تاکنون به این مقاله ۱۸۶۰ بار ارجاع داده شده است.

در اینجا خوب است اشاره شود غیر از آلات موسیقایی بادی (نظیر نی، فلوت و اُرگ) که با دمیدن ستون‌های هوا نوای موسیقی ایجاد می‌کنند، اساس کار آلات موسیقایی زهی (مانند تار، گیتار، ویولن) که با ضربه زدن بر تارهای نوسان، و آلات موسیقایی کوبه‌ای (مانند طبل، دُهُل، تنبک) که با ضربه زدن بر پوسته‌های نوسان‌کننده، نوایی ایجاد می‌کنند نیز مبتنی بر دانشی است که در این مبحث ارائه شده است. همچنین توجه داده شود که تشدید در لولهٔ صوتی مثالی از تداخل در یک بُعد امواج است.



فیزیک ۳

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 طول‌موج موج صوتی باشد، برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف، نقش موج ایستادهٔ بازرزی 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[1]. همچنین فاصلهٔ گره‌های مجاور از هم برابر $\lambda/2$ و فاصلهٔ گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر $\lambda/4$ است. در شکل ۴ـ۳۸ نقش چنین موج ایستاده‌ای در یک لوله با دو انتهای باز و در شکل ۴ـ۳۹ این نقش در یک لوله با یک انتهای باز، برای سه مد اول رسم شده است[2].

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

شکل ۴ـ۳۹ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز (شکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص شده‌اند.)

پرسش ۴ـ۶

چرا وقتی آب را به درون ظرفی با دیواره‌های قائم مثل لیوان یا پارچ می‌ریزید، بسامد صدایی که می‌شنوید افزایش می‌یابد، یعنی صدای زیوتر و زیوتری 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.)

۱ـ 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.
۲ـ مشخصه‌های مربوط به لوله‌های صوتی خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

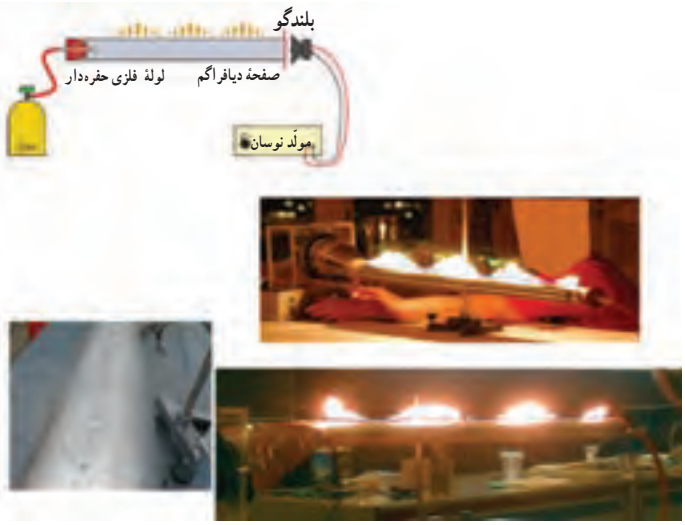
۱۰۸

در فیلم دمیدن در فلوت‌هایی با ابعاد مختلف برای ایجاد هماهنگ‌ها را می‌بینید.

فیلم

آزمایش‌های جالبی برای تحقیق تجربی این موارد وجود دارد که جالب‌ترین آن معروف به *لولهٔ روبین* (Rubin's Tube) است که اساس کار آن در شکل‌های زیر نشان داده شده است.

بلندگوی در فاصلهٔ کمی از صفحهٔ دیافراگم لوله‌ای فلزی قرار دارد که روی آن حفره‌هایی تعبیه شده است. بلندگو به یک نوسان‌ساز الکتریکی متصل است که بسامد آن را می‌توان تغییر داد. با تغییر بسامد صوت به بسامدهایی می‌رسیم که در آنها دامنهٔ موج‌های ایستاده زیاد می‌شود و می‌توان با افروختن گاز، آن نقاط را تشخیص داد و حتی فاصلهٔ بین قله‌ها را اندازه گرفت و از آنجا به‌راحتی تندی صوت در گاز را نیز محاسبه کرد.



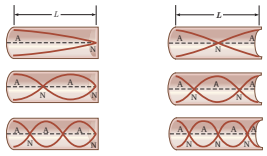
فیلم

در این فیلم‌ها اقسامی از آزمایش با لولهٔ روبین را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم لولهٔ روبین دو بعدی یا تختهٔ پایرو را می‌بینید.

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 طول‌موج 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[1]. 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[2].



شکل ۴ــ۳۸ 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 گره‌ها با N مشخص شده‌اند.)

پرسش ۴ــ۶

جرا 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.

خوب است با مثال‌هایی که جنبهٔ کاربردی دارند، این مباحث را بیشتر روشن کنید. مثلاً اشاره به برخی از دانستنی‌های این فصل خالی از لطف نیست. ولی می‌توان در همین مرحله با نشان دادن تصاویری مانند تصویر زیر نشان دهید که بر فرض اساس کار گوش انسان نیز مشابه یک لولهٔ صوتی یک سر باز است.

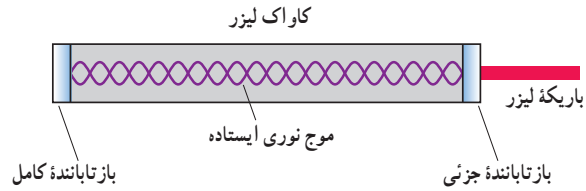
اشاره شود که ارتعاشات هوای داخل ستون هوا طولی هستند، یعنی حرکت ذرات هوا در راستای انتشار امواج صورت می‌گیرد و اگر مولکول یا ذره‌ای در حدّ شکم امواج در نظر گرفته شود این ذره در راستای طولی لوله با بیشترین دامنه نوسان می‌کند، ولی برای نمایش دادن مطابق شکل‌های ۴ــ۳۸ و ۴ــ۳۹، دامنهٔ نوسان‌ها را در قسمت عرضی لوله نشان می‌دهند و این مطلب نباید اشتباه شود که ارتعاشات در راستای عرضی صورت می‌گیرند.

خوب است در اینجا به یک تداخل در یک بُعد دیگر نیز که مربوط به امواج الکترومغناطیسی است و بعداً دانش‌آموزان به ترتیبی دیگر با آن نیز آشنا می‌شوند اشاره کرد. به‌عبارتی امواج الکترومغناطیسی ایستاده را می‌توان میان دو آینهٔ موازی که نور را به جلو و عقب بازمی‌تابانند نیز ایجاد کرد. این آینه‌ها مشابه دو انتهای یک ریسمان کشیده هستند.

این دو آینهٔ مقابل هم اصطلاحاً یک *کاواک لیزر* را تشکیل می‌دهند (شکل زیر). چون آینه‌ها مانند دو انتهای یک ریسمان کشیده عمل می‌کنند، موج ایستادهٔ نوری باید در سطح هر آینه یک گره داشته باشد. البته یکی از آینه‌ها بازتابندهٔ کامل نیست و همین سبب می‌شود که بخشی از نور از کاواک خارج شده و باریکهٔ لیزر را تشکیل دهد. اما این تأثیری بر تشکیل گره روی این آینه نمی‌گذارد. بنابراین همان رابطه‌ای که بین طول ریسمان و طول موج یک موج ایستاده بر ریسمان وجود دارد ($\lambda = ۲L/n$) بین طول یک کاواک لیزر و طول موج ایستادهٔ درون آن نیز برقرار است. یک کاواک نوعی لیزر طولی تقریباً برابر $L = ۳۰\,cm$ دارد و مثلاً اگر طول موج نور مرئی این لیزر $\lambda = ۶۰۰\,nm$ باشد تعداد حلقه‌های موج ایستادهٔ تشکیل شده در کاواک تقریباً برابر می‌شود با

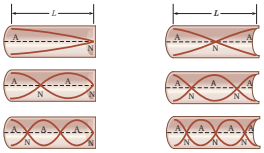
$$n = \frac{۲L}{\lambda} = \frac{۲\times ۰/۳۰\,m}{۶/۰۰\times ۱۰^{-۷}\,m} = ۱/۰۰\times ۱۰^{۶}$$

به عبارت دیگر، یک موج نوری ایستاده در داخل یک کاواک لیزر تقریباً یک میلیون شکم دارد. این نشانی از طول موج بسیار کوتاه یک موج نوری است.



یک کاواک لیزر شامل یک موج نوری ایستاده بین دو آینهٔ موازی است.

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 طول‌موج موج صوتی باشد، برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف، نقش موج ایستادهٔ بازرنی 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 $\lambda/۲$ و فاصلهٔ گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر $\lambda/۴$ است. در شکل ۴ـ۳۸ نقش چنین موج ایستاده‌ای در یک لوله با دو انتهای باز و در شکل ۴ـ۳۹ این نقش در یک لوله با یک انتهای باز، برای سه مد اول رسم شده است[۲].



شکل ۴ـ۳۸ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با دو انتهای باز (شکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص شده‌اند.)

شکل ۴ـ۳۹ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز (شکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص شده‌اند.)

پرسش ۴ـ۶

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 زیوتری 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.)*

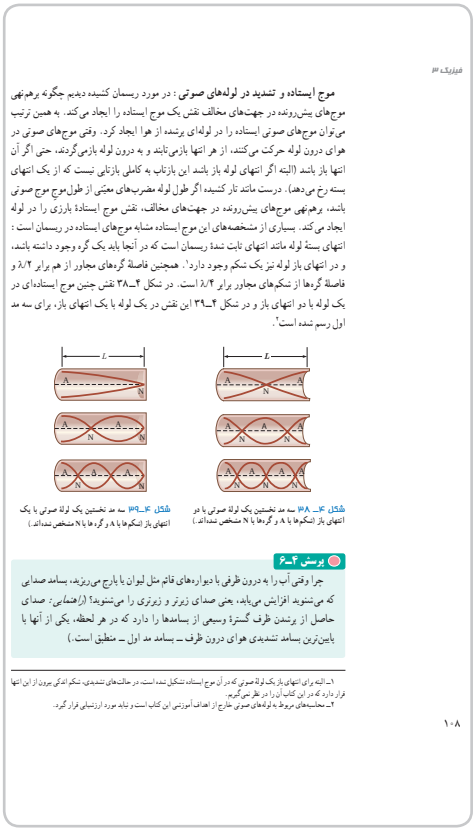
۱ـ البته برای انتهای باز یک لولهٔ صوتی، که در آن موج ایستاده تشکیل شده است، در حالت‌های تشدیدی، شکم اندکی بیرون از این انتها قرار دارد که در این کتاب آن را در نظر نمی‌گیریم.

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

پاسخ پرسش ۴ـ۶

با ریختن آب، فضای هوای داخل ظرف کمتر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ـ۲۹ کتاب دیده می‌شود، هرچه فضای هوای داخل کمتر شود، طول‌موج‌های تشدیدی کوتاه‌تر می‌گردند و بنابراین بسامدهای تشدید بیشتر می‌شوند. به عبارتی، بسامدهای تشدیدی با طول ستون هوا رابطهٔ معکوس دارند. صدای حاصل از پرشدن ظرف، گسترهٔ وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه با یکی از بسامدهای تشدید هوای درون ظرف منطبق می‌شود و بنابراین مدام صدای زیرتر و زیرتری را می‌شنویم.

در واقع برای این کار روشی تصحیحی به کار می‌گیرند که به آن end correction pipe (تصحیح دهانهٔ لوله) می‌گویند که در دانستنی معلم مربوط، در این مورد توضیح بیشتری داده شده است. *هلمهولتز* به طور تقریبی نشان داده بود چنانچه شعاع لولهٔ صوتی r باشد، مقدار تصحیح $c = ۰/۵۸r$ می‌شود که البته مقدار c به طول موج صوت نیز تا اندازه‌ای بستگی دارد.



فیزیک ۳

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 طول‌موج موج صوتی باشد، برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف، نقش موج ایستادهٔ بازرزی 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[1]. همچنین فاصلهٔ گره‌های مجاور از هم برابر $\lambda/۲$ و فاصلهٔ گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر $\lambda/۴$ است. در شکل ۴ـ۳۸ نقش چنین موج ایستاده‌ای در یک لوله با دو انتهای باز و در شکل ۴ـ۳۹ این نقش در یک لوله با یک انتهای باز، برای سه مد اول رسم شده است[2].

شکل ۴ـ۳۸ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با دو انتهای باز (شکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص شده‌اند.)

شکل ۴ـ۳۹ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز (شکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص شده‌اند.)

پرسش ۴ـ۶

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.)

۱ـ 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.

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

۱۰۸

دانستنی برای معلم

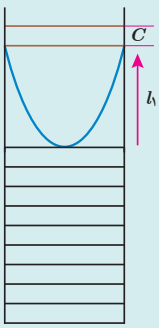
تصحیح دهانهٔ لوله

همان‌طور که در پانوشت کتاب نیز اشاره شده است، در واقع شکم دقیقاً در محل دهانهٔ لوله ایجاد نمی‌شود و شکم اندکی از دهانهٔ لوله بالاتر قرار می‌گیرد. بنابراین اگر فاصلهٔ یک گره و یک شکم در درون لوله اندازه‌گیری شود، این مقدار از فاصلهٔ شکم دهانه تا اولین گره نزدیک به دهانه کوچک‌تر است. یعنی امواج صوتی که از دهانهٔ لولهٔ باز در هوا گسیل می‌شوند طول موجی بیشتر از طول موجی دارند که طبق روابط ریاضی محاسبه می‌شود. برای اندازه‌گیری طول موج حقیقی می‌توان این مقدار اضافی را که معمولاً با c نشان داده می‌شود، محاسبه کرد. برای لولهٔ یک سر باز می‌توانیم شرط تشدید را به صورت زیر نیز بنویسیم

$$l = (۲n - ۱)\frac{\lambda}{۴} \quad \text{و} \quad \text{به‌ازای} \quad n = ۱, ۲, ۳, \ldots$$

حال اگر مقدار اضافی طول را به l بیافزاییم، برای دو نخستین مُد نوسان خواهیم داشت :

$$\frac{\lambda}{۴} = (l_۱ + c)$$



شکل مربوط به نخستین مُد نوسانی

$$\frac{۳\lambda}{۴} = (l_۲ + c)$$

از دو رابطهٔ بالا می‌توان c را چنین به‌دست آورد :

$$c = \frac{l_۲ - ۳l_۱}{۲}$$

در مورد لوله‌های با دو سرِ باز نیز می‌توانیم شرط تشدید را به‌صورت زیر بنویسیم :

$$l = ۲n\frac{\lambda}{۴} \quad \text{و} \quad \text{به‌ازای} \quad n = ۱, ۲, ۳, \ldots$$

در اینجا نیز می‌توانیم با طول‌های تصحیح شده برای دو نخستین مُد نوسان، c را به‌دست آوریم :

$$\frac{۲\lambda}{۴} = l_۱ + ۲c$$

و

$$\frac{۴\lambda}{۴} = l_۲ + ۲c$$

و از آنجا $c = \frac{l_۲ - ۲l_۱}{۲}$

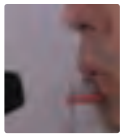
دانستنی برای معلم

چین (پرده) و فرمت‌های صوتی

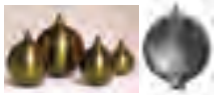
مجرای صوتی انسان در واقع لوله‌ای است که یک انتهای آن (در حنجره) بسته و انتهای دیگر آن (در دهان و سوراخ‌های بینی) باز است. اگر امواج صوتی بسامد مناسبی داشته باشند می‌توانند باعث تشدید هوای درون مجرای صوتی گردند. بسامدهای تشدید هوای درون مجرای صوتی را فرمت می‌نامند. صدا را عضلاتی موسوم به چین (پرده) صوتی تولید می‌کنند که در حنجره قرار دارند. وقتی صدا از چین‌های صوتی به مجرای صوتی وارد می‌شود، در صورتی که بسامد صوت تولیدشده توسط چین‌های صوتی با بسامد یکی از این فرمت‌ها منطبق شود، آن صدا برای شنیدن به حدّ کافی بلند است. می‌توان با تغییر بسامد فرمت‌ها از طریق تغییر جای زبان، تغییر میزان باز بودن دهان، یا با گرفتن بینی و... صداهای متنوعی را ایجاد کرد. همچنین می‌توان با تغییر کشش چین‌های صوتی بسامد امواج صوتی را که به درون مجرای صوتی فرستاده می‌شود را تغییر داد. مثلاً خواننده‌های سوپرانو می‌توانند به چین‌های صوتی خود چنان فشاری بیاورند که بسامدی را تولید کنند که با فرمتی از مجرای صوتی که بسامد بالایی دارد منطبق شود. افزون بر این، توجه کنید که بسامد فرمت‌ها به دو عامل بستگی دارد، یکی شکل و طول مجرای صوتی و دیگری تندی صوت در این مجرا. بنابراین اگر مثلاً هوا در مجرای صوتی با مخلوطی از هوا و هلیوم جایگزین شود، با توجه به اینکه تندی صوت بسیار بیشتر می‌شود این موجب افزایش بسامدهای فرمت‌ها می‌شود و بنابراین صدای با بسامد بیشتری تولید می‌شود که دیگر برای ما آشنا نیست، اما انجام این شیرین‌کاری خطرناک است و حتی می‌تواند کشنده باشد.

خوب است در کنار شکل ۴ـ۴۰، تصاویری مانند تصویر زیر را نیز نشان دهید تا دانش‌آموزان با دانش قبلی‌ای که دارند درک بهتری از مفاهیم این بحث پیدا کنند.

تشدید در بطری و تشدیدگر هلمهولتز : اگر در دهانهٔ باریک یک بطری بدمید، می‌توانید آن را به صدا درآورید (شکل ۴ـ ۴۰). در واقع یک بطری مانند یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز است که بسامدهای تشدیدی معیّنی دارد. وقتی در دهانهٔ یک بطری می‌دمید 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 جزیی 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 ۴ـ۴۱). 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.



شکل ۴ـ۴۰ با دمیدن در دهانهٔ یک بطری، می‌توانید آن را به‌صدا درآورید.



(الف) (ب)

شکل ۴ـ۴۱ الف) طرحی از تشدیدگر اولیه هلمهولتز و ب) تصویری از چند تشدیدگر هلمهولتز کروی با اندازه‌های متفاوت

هرمن فون هلمهولتز (۱۸۲۱ـ۱۸۹۴ م.)
در آلمان به دنیا آمد. او نخست به مطالعهٔ زیان‌شناسی و فلسفه پرداخت و سپس به نفعت علوم طبیعی گرایش پیدا کرد. وی در سال ۱۸۴۹ دانشیار فیزیولوژی دانشگاه کونیگزبرگ شد. در سال ۱۸۵۵ به استادتمامی رشته‌های آناتومی و فیزیولوژی دانشگاه بن 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 برجسته‌ای چون هانریش هرتز، ویلهم‌وین، آوگوست، آلبرت مایکلسون، فردریک‌ستانلی و... تربیت کرد. هلمهولتز نابغه‌ای بزرگ بود که به علوم فیزیولوژی، تشریح، فیزیک و ریاضی مسلط بود. برخی از اکتشافات وی عبارت‌اند از اندازه‌گیری سرعت سیگنال‌های عصبی، تجزیه و تحلیل حرکت امواج صوتی، نظریهٔ هماهنگ‌های بوسیله‌ای، نظریهٔ بینایی رنگ‌ها، دستگاه افتالموسکوپ که امروزه در پزشکی از آن برای تشخیص بیماری‌های چشم استفاده می‌شود، از اختراعات اوست.

فعالیت ۴ـ۶

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. درصورتی که منبع صوتی با بسامد قابل تنظیم ندارید می‌توانید از چند دیاپازون با بسامدهای معلوم و متفاوت، به بسامد یکی از آنها یا یکی از بسامدهای تشدیدی تشدیدگر برابر باشد، استفاده کنید[1]. دلیل آنچه را که مشاهده می‌کنید در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

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

خوب است از جنبهٔ تاریخی اشاره شود که هلمهولتز به عنوان یک پزشک تشدیدگرهای خود را نخستین‌بار به این دلیل ساخت که با استفاده از آنها به طریقی ابتدایی نوعی آزمون شنوایی‌سنجی انجام دهد.

محض اطلاعات عمومی خوب است بدانید رابطهٔ بسامد f با قطر دهانه در تشدیدگر هلمهولتز از رابطهٔ زیر به دست می‌آید :

$$f = \frac{n v}{۲(L + ۰/۸ d)}$$

که در آن L طول لوله، v تندی صوت در هوا، و d قطر دهانهٔ تشدیدگر است.

فیلم

در این فیلم آزمایش تشدید در تشدیدگر هلمهولتز را با دیاپازن می‌بینید.

پاسخ فعالیت ۴ـ۶

همان طور که در متن درس نیز اشاره شده است یک تشدیدگر هلمهوتز بسامدهایی تشدیدی دارد و اگر بسامد صوت ایجادشده توسط بلندگو با یکی از این بسامدهای تشدیدی منطبق شود موجب نوسانات هوای درون بطری (تشدیدگر) می‌شود که این به انحراف شعلهٔ شمع یا چرخاندن فرفره می‌انجامد. (در مورد این فعالیت، فیلمی نیز در سایت گروه گذاشته خواهد شد.) توجه کنید سوراخ انتهای تشدیدگر هلمهوتز گذرگاهی برای انتقال تلاطم ایجاد شده در درون تشدیدگر به فضای بیرون است.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

تشدید در بطری و تشدیدگر هلمهولتز : اگر در دهانهٔ باریک یک بطری بدمید، می‌توانید آن را به صدا درآورید (شکل ۴ـ۴۰). در واقع یک بطری مانند یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز است که بسامدهای تشدیدی معیّنی دارد. وقتی در دهانهٔ یک بطری می‌دمید 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 جیزی 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 ۴ـ۴۱). تشدیدگرهای هلمهولتز نیز همانند لوله‌های صوتی بسامدهای تشدیدی معیّنی دارند و هرگاه بسامد یک صوت برابر با یکی از بسامدهای تشدیدی آنها باشند، تشدیدگر پاسخ قوی‌تری به این صوت می‌دهد.

هرمن فون هلمهولتز (۱۸۹۴ـ۱۸۲۱ م.)
در آلمان به دنیا آمد. او نخست به مطالعه زیباشناسی و فلسفه پرداخت و سپس به سمت علوم طبیعی گرایش پیدا کرد. وی در سال ۱۸۴۹ دانشیار فیزیولوژی دانشگاه کونیگزبرگ شد. در سال ۱۸۵۵ به استادی رشته‌های آناتومی و فیزیولوژی دانشگاه بن 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 برجسته‌ای چون هانریش هرتز، ویلهم رونتگن، آلبرت مایکلسون، فردریک شاتکی و ... تربیت کرد. هلمهولتز نابغه‌ای بزرگ بود که به علوم فیزیولوژی، شریح، فیزیک و ریاضی تسلط داشت. برخی از اکتشافات وی عبارتند از اندازه‌گیری سرعت سیگنال‌های عصبی، تجزیه و تحلیل حرکت امواج صوتی، نظریهٔ هماهنگ‌های موسیقایی و نظریهٔ دیدرنگ‌ها. دستگاه اتالمسکوپ که امروزه در پزشکی از آن برای تشخیص بیماری‌های چشم استفاده می‌شود، از اختراعات اوست.

شکل ۴ـ۴۰ با دمیدن در دهانهٔ یک بطری، می‌توانید آن را به‌صدا درآورید.

(الف) (ب)

شکل ۴ـ۴۱ الف) طرحی از تشدیدگر اولیه هلمهولتز و ب) تصویری از چند تشدیدگر هلمهولتز کروی با اندازه‌های متفاوت

فعالیت ۴ـ۶

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[1]. دلیل آنچه را که مشاهده می‌کنید در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

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

۱۰۹

فیلم

در این فیلم آزمایش تشدید در تشدیدگر هلمهولتز را با دستگاه مولّد نوسان می‌بینید.

دانستنی برای معلم

سی‌شی‌ها، پارادوکس بندرگاه و مشابهت آن با بطری هلمهولتز

وقتی یک ظرف درباز، مثل کاسه‌ای حاوی آب را قدم‌زنان حمل می‌کنید، مایع شروع به چلپ و چلوپ می‌کند. ولی حتماً متوجه شده‌اید که گاهی چنان چلپ و چلوپ مایع شدید می‌شود که عنان کار از دستتان خارج می‌شود و آب شروع به سرریز شدن از ظرف می‌کند. در این وضعیت، شما با آهسته کردن قدم‌های خود یا تغییر روش راه رفتن خود می‌توانید احتمال سرریز شدن را کاهش دهید. در واقع وقتی شما راه می‌روید، طرز راه رفتن و چگونگی گرفتن ظرف حاوی آب باعث می‌شود آب به‌صورت افقی و عمودی حرکت کند. یعنی، امواجی در سطح مایع شکل می‌گیرند. اکثر امواج به صورت تصادفی تداخل می‌کنند و امواج ایستاده را تشکیل می‌دهند که در آنها نقش نوسان‌های عمودی تکرار می‌شود. برخی نقاط بیشترین نوسان را دارند و برخی کلاً فاقد هرگونه نوسانی هستند. بسامد اصلی (پایه) نوسان به ابعاد افقی ظرف و عمق آب بستگی دارد. وقتی بسامد قدم‌های شما تقریباً با بسامد اصلی برابر شود، تشدید رخ می‌دهد و در این وضعیت چلپ و چلوپ چنان شدید می‌شود که آب از ظرف سرریز می‌گردد. تغییر نحوهٔ راه رفتن و یا آهسته کردن آن باعث می‌شود که بسامد قدم‌های شما دیگر برابر بسامد اصلی نباشد و بدین ترتیب احتمال سرریز شدن آب کاهش یابد. به‌عنوان یک آزمایش جالب می‌توانید با چوب پارویی پهنی نیز به‌گونه‌ای دیگر این پدیده را مشاهده

کنید. چوب پارویی پهن را در آب وان حمام جلو و عقب ببرید و باعث چلپ و چلوپ آب آن شوید. آنقدر بسامد حرکت پارو را تغییر دهید تا آنکه بسامد اصلی نوسان را به‌دست آورید. از آن پس، چلپ و چلوپ آب چنان قوی می‌شود که حیرت خواهید کرد. مشابه همین چلپ و چلوپ‌ها در کامیون‌های حمل بنزین یا واگن‌های نفتکش نیز می‌تواند رخ دهد و اگر از کنترل خارج شوند می‌تواند موجب ناپایداری خود وسایل نقلیه نیز بشوند که این می‌تواند حتی به تصادف بیانجامد. از همین‌رو، در داخل این وسایل نقلیه ضربه‌گیرهایی نصب شده است تا موجب کاهش چلپ و چلوپ مایع گردند. در یک استخر شنا نیز اگر شناگرها به‌طور هماهنگ و پشت هم در آب بپرند می‌توانند مُد اصلی نوسان را ایجاد کنند و آب را به چلپ و چلوپ بارزی درآورند.

بندرگاه‌ها و آبگیرهای کشندی نیز اگر توسط جزر و مد یا آشفتگی‌هایی نظیر توفان بالا و پایین شوند می‌توانند سی‌شی ایجاد کنند که این می‌تواند خسارت بار باشد. به‌طور کلی میزان نوسان و در نتیجه احتمال تخریب برای بندرگاه‌هایی که دهانهٔ رو به دریای باریک‌تری دارند بیشتر است. یک دلیل آن چیزی است که به آن ***پارادوکس بندرگاه*** می‌گویند. بنابه این پارادوکس، دهانهٔ پهن به انرژی موج ورودی اجازه می‌دهد تا به عقب (یعنی درون دریا) بگریزد، در حالی که یک دهانهٔ باریک عملاً انرژی موج ورودی را به دام می‌اندازد. این کاملاً مشابه امواج صوتی است. اگر در دهانهٔ باریک یک بطری نیمه‌پر نوشابه فوت کنید، می‌توانید یک صوت بلند را در قسمت خالی بطری ایجاد کنید (مانند بطری هلمهولتز) اما اگر در یک بطری با دهانهٔ پهن فوت کنید، تولید این صوت بسیار سخت و حتی غیرممکن است.

فیزیک ۳

پرسش ۴ـ۷

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

فناوری و کاربرد: امواج ایستاده در اجاق‌های میکروموج

اجاق‌های میکروموج (مایکروفر) بر اساس تداخل امواج الکترومغناطیسی و تشکیل امواج ایستاده کار می‌کنند. بسامد امواج ایستادهٔ ایجاد شده در این اجاق‌ها ۲/۴۵×GHz و طول‌موج آنها حدود ۱۲cm 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.

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

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 رساند. در مورد چگونگی آزمایش هرتز تحقیق کنید.

۱۱۰

پاسخ پرسش ۴ـ۷

هریک از این بطری‌ها با سطوح مایع متفاوت تشدیدگر هلمهولتز هستند و مانند لوله‌های صوتی بسامدهای تشدیدی معینی دارند. چون سطح مایع در بطری‌ها متفاوت است، بسامد تشدیدی متفاوتی نیز دارند (هرچه سطح مایع درون ظرف ها بالاتر و حجم فضای بالای آنها کمتر باشد بسامد تشدیدی بیشتر است و بالعکس). بنابراین وقتی در دهانهٔ این بطری‌های یک‌شکل می‌دمیم، با ایجاد گسترهٔ وسیعی از بسامدها، یکی از این بسامدها با یکی از بسامدهای تشدیدی بطری‌ها منطبق می‌شود و هر بطری با بسامد متفاوتی به‌صدا درمی‌آید. بنابراین می‌توان آهنگی با بسامدهای متفاوت ایجاد کرد.

فیلم

در این فیلم بسیار زیبا نواختن را با چندین لیوان با سطوح مختلف آب را می‌بینید.

فیزیک ۳

پرسش ۴ـ۷

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

فناوری و کاربرد: امواج ایستاده در اجاق‌های 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 ۱۲cm 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.

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

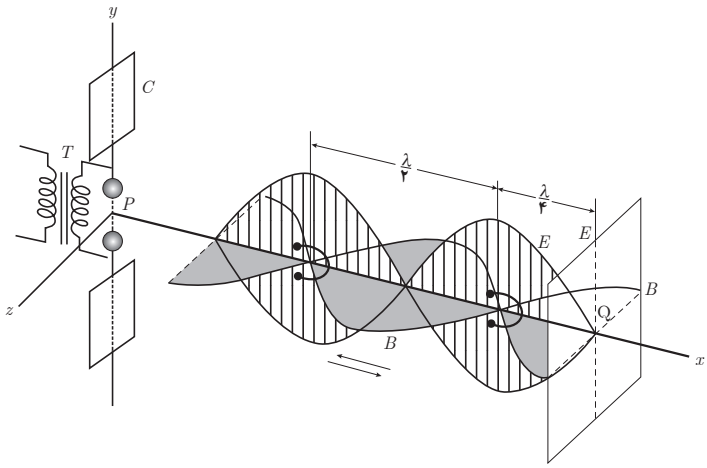
فعالیت ۴ـ۷

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. هانریش هرتز در سال ۱۸۸۸ میلادی با وسایل ابتدایی آن زمان این آزمایش را به انجام رسانید. در مورد چگونگی آزمایش هرتز تحقیق کنید.

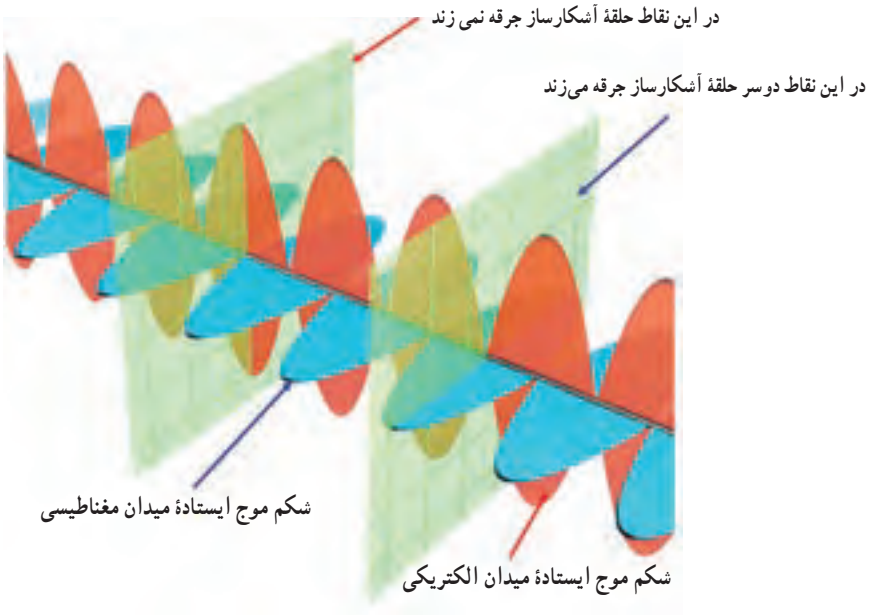
۱۱۰

پاسخ فعالیت ۴ـ۷

نوسانگر هرتز در شکل الف نشان داده شده است. مبدّل T، صفحه‌های فلزی C و C' را باردار می‌کند. این صفحه‌ها از طریق شکاف P تخلیه می شوند و بدین ترتیب یک موج الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود. در امتداد خط Px راستای میدان الکتریکی موازی محور y و راستای میدان مغناطیسی موازی با محور z است. هرتز برای مشاهدهٔ این موج‌ها از سیمی که آن را به شکل حلقه درآورده بود و دوسر آن فاصلهٔ کمی از هم داشت، استفاده کرد. اگر صفحهٔ این حلقه عمود بر میدان مغناطیسی موج می‌بود، میدان مغناطیسی متغیر بنا بر قانون القاءِ فاراده نیروی محرکهٔ الکتریکی القایی در حلقه ایجاد می‌کرد و این موجب جرقه زدن دو سر باز حلقه می‌شد. ولی اگر صفحهٔ حلقه با میدان مغناطیسی موازی می‌بود، هیچ نیروی محرکهٔ الکتریکی‌ای القا نمی شد و در نتیجه جرقه‌ای نیز مشاهده نمی شد، هرتز برای ایجاد امواج الکترومغناطیسی ایستاده از سطحی فلزی به‌عنوان بازتاباننده استفاده کرد که این در شکل الف در نقطهٔ Q نشان داده شده است. بنابراین موج الکترومغناطیسی پس از بازتاب از سطح بازتاباننده با برهم‌نهی با موج تابیده، موج‌های ایستادهٔ مغناطیسی و الکتریکی ایجاد می‌کند. نشان داده می‌شود درحالی که موج‌های میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی در مسیر رفت هم‌فازند، در مسیر برگشت کاملاً ناهم‌فازند و بنابراین همان‌طور که در شکل ب با وضوح بیشتری نشان داده شده است شکم‌های موج ایستادهٔ میدان مغناطیسی بر گره‌های موج ایستاده میدان الکتریکی منطبق می‌شود و بالعکس. حال اگر حلقهٔ آشکارساز در گرهٔ موج ایستادهٔ میدان مغناطیسی قرار گیرد، هیچ نیروی محرکهٔ القایی در آن ایجاد نمی‌شود و در نتیجه جرقه‌ای مشاهده نمی‌گردد. ولی اگر حلقه‌ای آشکارساز را در محل شکم‌های موج ایستادهٔ مغناطیسی قرار دهیم، شدیدترین جرقه‌ها را خواهیم داشت. هرتز با حرکت دادن حلقهٔ آشکارساز در امتداد خطّ PQ محل‌های گره‌ها و شکم‌های موج ایستادهٔ میدان مغناطیسی را پیدا کرد. او با اندازه‌گیری فاصلهٔ بین دو گرهٔ متوالی توانست طول موج λ را حساب کند و چون بسامد f نوسان را می‌دانست، با استفاده از رابطهٔ $v=\lambda f$، تندی موج الکترومغناطیسی را که برابر با تندی نور می‌شود، به‌دست آورد. این نخستین مقدار تجربی برای تندی انتشار موج‌های الکترومغناطیسی بود.



الف) طرحی از آزمایش هرتز و تشکیل امواج ایستادهٔ الکترومغناطیسی در آن



ب) طرحی از امواج ایستادهٔ میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی توجه کنید شکم‌های یکی بر گره‌های دیگری منطبق است.

فیلم

در این فیلم رفتار یک لامپ در اجاق میکروموج (مایکروفر) را می‌بینید.

پرسش‌های پیشنهادی

۱ دو تپ مثلثی یکسان با دامنهٔ A در امتداد یک تار به سمت یکدیگر حرکت می‌کنند. در لحظهٔ نشان داده شده در شکل زیر، نقطهٔ M بین دو تپ قرار دارد. وقتی تپ‌ها از نقطهٔ M بگذرند، دامنهٔ اعوجاج حاصل چقدر می‌شود؟

پاسخ : صفر

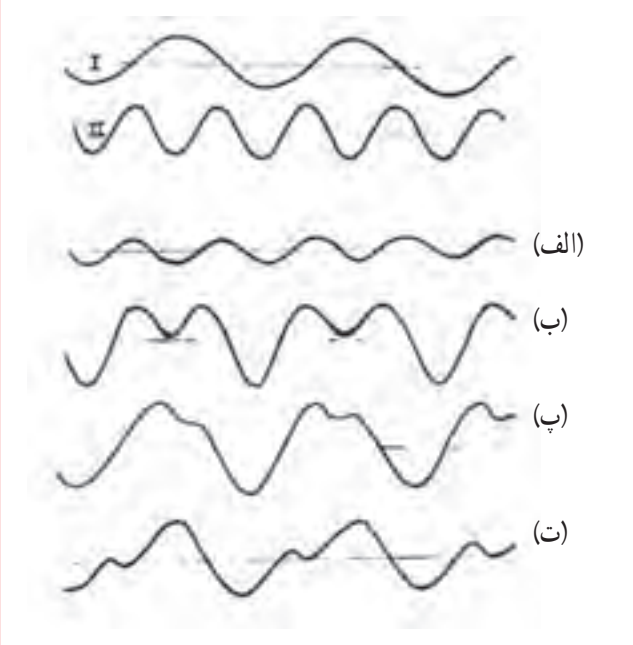
۲ دیاپازنی با بسامد طبیعی مشخص را در بالای یک لولهٔ استوانه‌ای بلندی با ارتفاع مشخص به ارتعاش درمی‌آوریم و در همان حال آب را به آرامی درون لوله می‌ریزیم. چه اتفاقی می‌افتد؟

پاسخ : در ارتفاع خاصی از آب، صدای دیاپازن به‌طور قابل ملاحظه‌ای شدید خواهد شد. زیرا بسامد نوسان طبیعی ستون هوا در لوله با بسامد دیاپازن یکی می‌گردد.

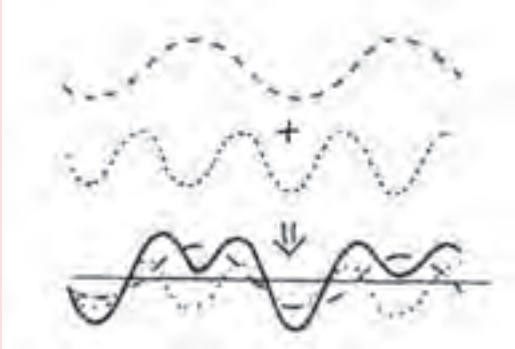
۳ اگر بر فرض آزمایش یانگ در آب انجام شود، پهنای نوارها افزایش می‌یابد یا کاهش؟

پاسخ : پهنای نوارها متناسب با طول موج به‌کار رفته است. چون در داخل آب طول موج λ/n می‌شود، بنابراین کوچک‌تر از طول موج نور به‌کار رفته در خلأ است و بنابراین پهنای نوارها کاهش می‌یابد.

۴ دو موج سینوس I و II برهم نهاده می‌شوند. به گمان شما کدام یک از شکل‌های الف تا ت ممکن است حاصل شود؟

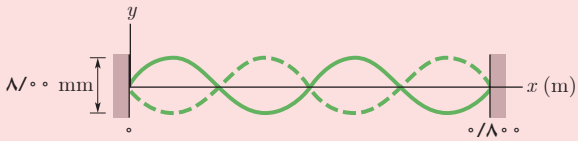


پاسخ : شکل ب. زیرا تقریباً از برهم نهی چنین چیزی حاصل می‌شود.



تمرین پیشنهادی

۱ الف) شکل زیر نقشی از نوسان‌های تشدیدی تاری به طول $L = ۰/۸۰۰\,\text{m}$ و جرم $m = ۲/۵۰۰\,\text{g}$ را نشان می‌دهد که تحت کشش $۳۲۵/۰\,\text{N}$ قرار دارد. الف) طول‌موج موج عرضی‌ای که این نقش موج ایستاده را ایجاد کرده و عدد هماهنگ n چیست؟ ب) بسامد f موج عرضی و نوسان اجزای تار چقدر است؟



پاسخ :

الف) شکل، دو طول موج کامل را در طول $L = ۰/۸۰۰\,\text{m}$ تار نشان می‌دهد. بنابراین داریم :

$$۲\lambda = L$$

و یا

$$\lambda = \frac{L}{۲} = \frac{۰/۸۰۰\,\text{m}}{۲} = ۰/۴۰۰\,\text{m}$$

با شمردن تعداد حلقه‌ها (یا نیم ــ طول موج‌ها) در شکل درمی‌یابیم که عدد هماهنگ $n=۴$ است.

ب) بسامد را از رابطهٔ $f=v/\lambda$ به‌دست می‌آوریم که در آن

$$v=\sqrt{\frac{F}{\mu}}=\sqrt{\frac{F}{m/L}}=\sqrt{\frac{FL}{m}}=\sqrt{\frac{(۳۲۵\text{N})(۰/۸۰۰\ \text{m})}{۲/۵۰\times ۱۰^{-۳}\ \text{kg}}}=۳۲۲/۴۹\ \text{m/s}$$

آنگاه برای بسامد f خواهید داشت :

$$f=\frac{v}{\lambda}=\frac{۳۲۲/۴۹\ \text{m/s}}{۰/۴۰۰\ \text{m}}=۸۰۶/۲\ \text{Hz}\approx ۸۰۶\ \text{Hz}$$

روش دیگر آن بود که مستقیماً از معادلهٔ ۴ــ۵ استفاده کنیم :

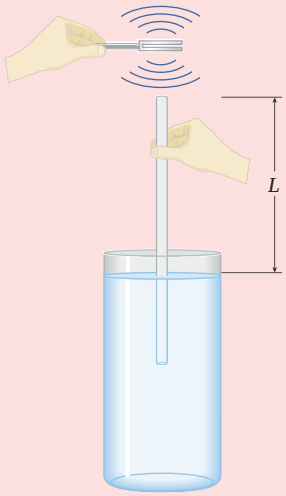
$$f=n\frac{v}{۲L}=۴\frac{۳۲۲/۴۹\ \text{m/s}}{۲(۰/۸۰۰)\text{m}}\approx ۸۰۶\ \text{Hz}$$

فعالیت‌های پیشنهادی

۱ بررسی پدیدهٔ تشدید در لوله‌های صوتی بسته

وسایل مورد نیاز : پنج عدد دیاپازن با بسامدهای متفاوت، جعبهٔ دیاپازن، کوبهٔ پلاستیکی دیاپازن، لولهٔ شیشه‌ای به قطر ۲ یا ۳ سانتی‌متر، ظرف استوانه‌ای

روش آزمایش : ظرف استوانه‌ای را پر از آب کنید و لولهٔ شیشه‌ای را در آن قرار دهید. بدیهی است سطح آب در لوله و ظرف یکی خواهد شد. با بالا و پایین بردن لوله می‌توانید طول ستون هوای درون لوله را به مقدار دلخواهی تنظیم کنید. اکنون اگر شاخه‌های یک دیاپازن مرتعش را در بالای دهانه لوله قرار دهیم، ممکن است صدای ضعیفی به گوش برسد. در صورتی که چنین صدایی به گوش برسد حاکی از آن است که بسامد طبیعی ستون هوا برابر با بسامد دیاپازن شده است. با درنظر گرفتن اینکه همیشه در سر باز لوله یک شکم پدید می‌آید و قسمت انتهای لوله نیز جای گرهٔ موج است و با دانستن این مطلب که فاصلهٔ دو گره و یا دو شکم متوالی برابر نصف طول موج است می‌توان طول‌های ستون هوایی که به تشدید می‌انجامد را تعیین کرد.

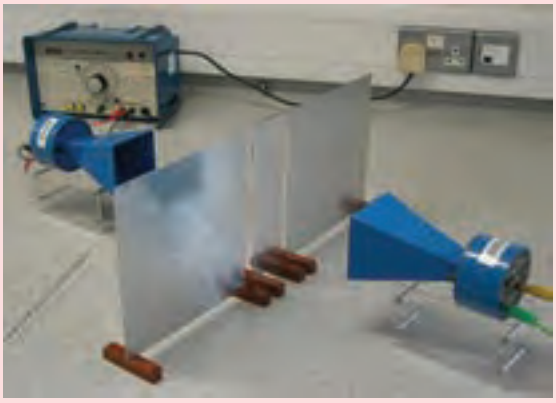


۲ بررسی پدیدهٔ تشدید در لوله‌های صوتی باز

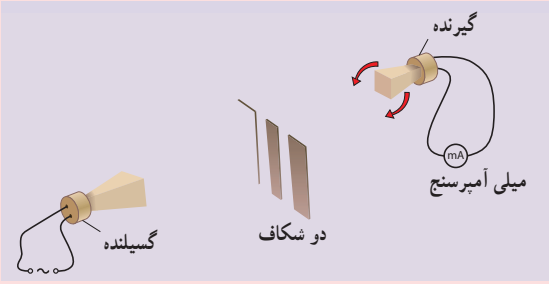
دو لولهٔ دوسر باز را انتخاب کنید که یکی بتواند در داخل دیگری بالا و پایین برود. در این صورت می‌توان طول لوله را به دلخواه تغییر داد و آن را طوری تنظیم کرد که هوای درون لوله بر اثر ارتعاشات شاخهٔ دیاپازن به تشدید درآید. در این صورت با توجه به اینکه همیشه دو سر لولهٔ باز محل تشکیل شکم نوسان‌ها است، طول لوله را برای ایجاد تشدید می‌توان به سادگی محاسبه کرد.

۳ تداخل برای امواج میکروموج

آزمایش تداخل دوشکافی یانگ را می‌توان برای امواج الکترومغناطیسی میکروموج نیز انجام داد. روش کار به این ترتیب است که گسیلندهٔ امواج میکروموج را مطابق شکل الف در برابر یک صفحهٔ دو شکافی قرار می‌دهند. توجه کنید هم گسیلنده و هم گیرندهٔ امواج در فاصلهٔ مناسبی از صفحهٔ شکاف‌ها قرار گیرند. شکل ب طرحی از اسباب انجام این آزمایش را نشان می‌دهد. با استفاده از این اسباب نیز می‌توان طول موج میکروموج را تعیین کرد.



الف) اسباب آزمایش دو شکافی برای موج الکترومغناطیسی میکروموج



ب) طرحی از اسباب این آزمایش و چگونگی انجام آن

۴ لولهٔ روبین

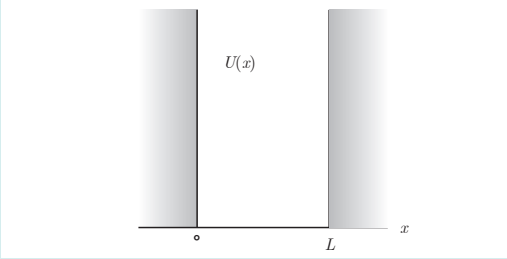
با کمک دبیر خود بکوشید با وسایل سادهٔ آزمایشگاه یک لولهٔ روبین را که توضیح آن در صفحهٔ ۲۴۹ درست کنید و حدّ شکم‌ها و محلّ گره‌های موج را تعیین کنید.

دانستنی برای معلم

موج‌های ایستاده رهیافتی مناسب به مبحث فیزیک کوانتومی

با توجه به اینکه فصل ۵ به مقدمات فیزیک کوانتومی می‌پردازد، بد ندانستم پایان مباحث فصل ۴ را به رهیافتی اختصاص بدهم که برخی کتاب‌ها از آن طریق وارد مبحث فیزیک کوانتومی می‌شوند. اگر طول تار مرتعش نامحدود باشد، می‌توانیم موج پیشرونده را با هر بسامدی روی آن ایجاد کنیم. ولی دیدیم اگر دوسر آن به جایی بسته شده باشد و طول آن محدود گردد، فقط می‌توانیم روی آن موج‌های ایستاده ایجاد کنیم که این موج‌های ایستاده فقط می‌توانند بسامدهای گسسته‌ای داشته باشند. به عبارت دیگر، محدود کردن موج به ناحیهٔ محدودی از فضا به ***کوانتیده کردن*** حرکت و وجود حالت‌های گسستهٔ موج می‌انجامد که در هر حالت بسامد کاملاً مشخصی دارد و به این اصطلاحاً ***اصل محدودیت*** می‌گویند. در سال ۱۹۲۴ فیزیکدان فرانسوی *لویی دوبروی* بیان کرد همان‌طور که یک باریکهٔ نور موج است، ولی انرژی و تکانه را از طریق فوتون‌ها منتقل می‌کند، یک الکترون متحرک (یا هر ذره دیگر را) را هم می‌توان به‌صورت یک موج ماده درنظر گرفت که انرژی و تکانه را به ماده‌ای دیگر منتقل می‌کند. بخصوص دوبروی پیشنهاد کرد که رابطهٔ $\lambda=h/p$ را که در آن h ثابت پلانک و p تکانه است، برای طول موج آنها به‌کار برد. پیش‌بینی دوبروی در سال ۱۹۲۷ توسط داویسون و جرمر به‌طور تجربی ثابت شد. بنابراین اصل محدودیت را برای موج‌های ماده نیز می‌توان به‌کار برد. موج مادهٔ یک الکترون متحرک که تحت تأثیر هیچ نیروی خالصی نیست (اصطلاحاً ذرهٔ آزاد) می‌تواند هر مقداری از انرژی داشته باشد که این شبیه تاری با طول نامتناهی است که می‌تواند هر بسامدی داشته باشد. ولی اگر الکترونی را بررسی کنیم که تحت تأثیر نیروی جاذبهٔ کولنی بین خود و هستهٔ باردار مثبت است، انرژی الکترون فقط می‌تواند در حالت‌های خاصی باشد که هر یک انرژی گسسته‌ای مربوط به خود را دارند که این شبیه یک تار کشیده با طول محدود است. در یک تار با طول محدود، نقش‌های گسستهٔ موج ایستاده آنهایی هستند که برای آنها طول L تار مضرب صحیحی از نصف طول موج ($L= n\lambda/۲$) است که به زبان فیزیک کوانتومی، اصطلاحاً به n عدد کوانتومی گفته می‌شود.

آنگاه هر جابه‌جایی عرضی تار در هر مکان x از رابطهٔ $y_n(x) = A\sin(n\pi x/L)$ به‌دست می‌آید. در مورد یک موج ماده نیز می‌توان آن را اصطلاحاً در تله‌ای محصور کرد، طوری که در حالت یک بعدی به‌ازای $۰< x <L$، $U= ۰$ و به‌ازای $x<۰$ و $x>L$، $U\to\infty$ میل کند که این همان چیزی است که به آن چاه پتانسیل نامتناهی می‌گوییم (شکل زیر).



انرژی پتانسیل الکتریکی $U(x)$ الکترون محصور در یک تلهٔ آرمانی.
می‌بینیم که به‌ازای $۰< x <L$، $U= ۰$ و به‌ازای $x<۰$ و $x>L$، $U\to\infty$.

دیدیم طول موج دوبروی $\lambda = h/p$ تعریف می‌شود و چون الکترون غیرنسبیتی است، p را می‌توان به صورت $p=\sqrt{۲mK}$ نوشت که m جرم الکترون و K انرژی جنبشی آن است. در $۰<x<L$، $U = ۰$ است و بنابراین $K = E$ می‌شود و داریم

$\lambda = h/\sqrt{۲mE}$ و پیش‌تر دیدیم که $L = n\lambda/۲$ است. بنابراین خواهیم داشت

$$E_n = (\frac{h^۲}{۸mL^۲})n^۲ \ , n = ۱, ۲, ۳, \ldots$$

پس، دریافتیم که چون الکترون در تله‌ای به دام افتاده است، فقط می‌تواند انرژی‌هایی داشته باشد که با این معادله داده می‌شود و نمی‌تواند هر مقداری را اختیار کند. این نتیجه را به‌راحتی می‌توان به چاه‌های دو و سه‌بُعدی نیز تعمیم داد.

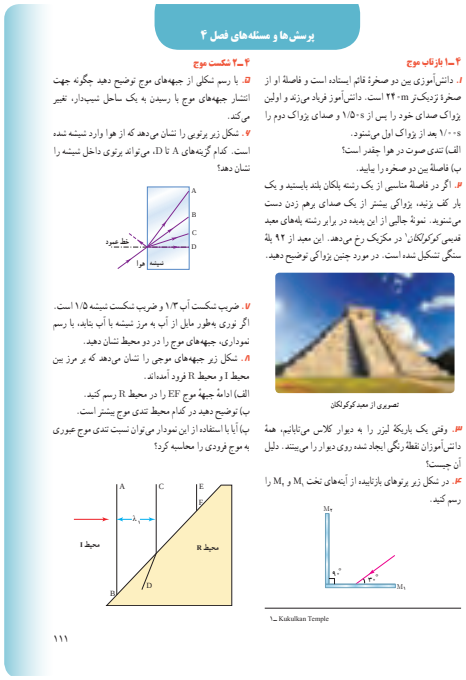
جالب است اگر اگر معادلهٔ شرودینگر را برای الکترونی که در چاه پتانسیل نامتنهای یک ــ بُعدی به پهنای L گیر افتاده است حل کنیم، برای توابع موج الکترون به رابطهٔ زیر می‌رسیم :

$$y_n = A \sin(n\pi x/L) \ , n = ۱, ۲, ۳, \ldots$$

که همان جابه‌جایی عرضی تار محدود در هر مکان x است. یعنی همان‌طور که پیش‌تر هم اشاره کردیم الکترون به دام افتاده در چاه پتانسیل یک بُعدی نامتناهی را می‌توان شبیه یک موج مادهٔ ساکن در نظر گرفت. توجه کنید که با همین شبیه‌سازی ساده می‌توانیم بسیاری دیگر از مفاهیم مکانیک کوانتومیِ ظاهراً خارج از محدودهٔ کتاب‌های درسی، مانند احتمال آشکارسازی که با چگالی احتمال $\Psi_n^۲(x)$ داده می‌شود و اصل بهنجارش را به دانش‌آموزان تفهیم کنیم. جالب است که حتی می‌توان انرژی نقطهٔ صفر را بیان کرد، و با توجه به اینکه به ازای $n = ۰$، $E_n = ۰$ و $\Psi_n^۲(x) = ۰$ می‌شود، می‌توان این بحث را مطرح کرد که این نتیجه به معنی آن است که هیچ الکترونی در چاه وجود ندارد و چون می‌دانیم که وجود دارد، بنابراین $n = ۰$ قابل قبول نیست و انرژی نقطهٔ صفر که کمترین انرژی مجاز الکترون است مربوط به $n = ۱$ است.

همین روش دلیل اصلی عدم موفقیت مدل بور را نیز توضیح می‌دهد. چراکه الکترونی که در اتم به دام افتاده است، در واقع موج ماده محصور در چاه پتانسیل است و برای یافتن مقادیر انرژی کوانتیده حاصل باید معادلهٔ شرودینگر را به کار برد.

راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴



پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴

۴ـ۱ بازتاب موج

I. 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.

II. اگر در فاصلهٔ مناسبی از یک رشته پلکان پله بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای پرهم زدن دست می‌شنوید. نمونهٔ جالبی از این پدیده در برابر رشته پله‌های معبد قدیمی "کوکولکان"[1] در مکزیک رخ می‌دهد. این معبد از ۹۲ پلهٔ سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.

تصویری از معبد کوکولکان

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

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

۱ـ Kukulkan Temple

۴ـ۲ شکست موج

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

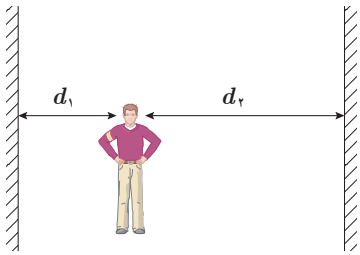
II. شکل زیر پرتویی را نشان می‌دهد که از هوا وارد شیشه شده است. کدام گزینه‌های A تا D، می‌تواند پرتوی داخل شیشه را نشان دهد؟

III. 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.

IV. شکل زیر جبهه‌های موجی را نشان می‌دهد که بر مرز بین محیط I و محیط R فرود آمده‌اند.
الف) ادامهٔ جبههٔ موج EE' 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؟

۱۱۱

۱ در واقع شکلی مانند شکل زیر داریم، به‌طوری که d_1 فاصلهٔ شخص از صخرهٔ نزدیک‌تر و d_2 فاصلهٔ شخص از صخرهٔ دورتر است.



بدیهی است که پژواک صدای اول مربوط به صخرهٔ نزدیک‌تر و زمان دریافت آن ۱/۵۰s پس از فریاد زدن و پژواک صدای دوم مربوط به صخرهٔ دورتر و زمان دریافت آن ۱/۰۰s +۱/۵۰s =۲/۵۰s پس از فریاد زدن است. چون مسافت پیموده شده در هر پژواک $2d$ است، به ترتیب داریم :

$$2d_1=vt_1 \quad , \quad 2d_2=vt_2$$

(الف) تندی صوت را از رابطهٔ اول به‌دست می‌آوریم

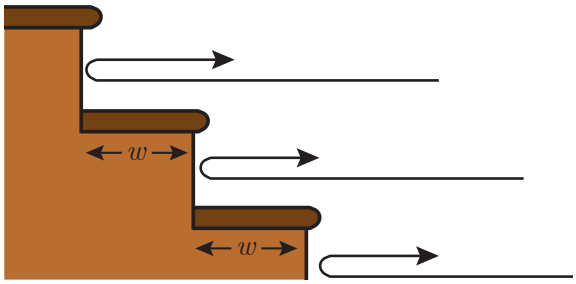
$$v=\frac{2d_1}{t_1}=\frac{480\,\text{m}}{1/50\,\text{s}}=320\,\text{m/s}$$

(ب) اکنون با دانستن تندی v می‌توانیم با استفاده از رابطهٔ دوم، d_2 را محاسبه کنیم :

$$d_2=\frac{vt_2}{2}=\frac{(320\,\text{m/s})(2/50\,\text{s})}{2}=400\,\text{m}$$

پس فاصلهٔ بین دو صخره $d=d_1+d_2=640\,\text{m}$ است.

۲ اگر فاصلهٔ شما از پلکان به حدّ کافی زیاد باشد، به‌طوری که بتوان مانند شکل زیر مسیر تپ‌های متوالی را تقریباً موازی در نظر گرفت، شما بسامد ثابتی برای رشته تپ‌های متوالی درک می‌کنید.

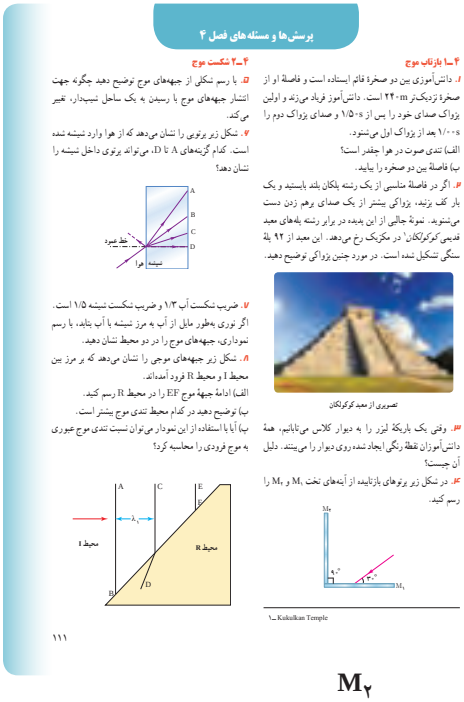


مثلاً اگر پهنای هر پله $w=0/750\,\text{m}$ باشد، بسامد ادراکی

$$f=\frac{1}{\Delta t}=\frac{v}{2w}=\frac{340\,\text{m/s}}{2(0/75\,\text{m})}=2/27\times10^{2}\,\text{Hz}\approx2/3\times10^{2}\,\text{Hz}$$

یا به عبارتی ۲۳۰Hz می‌شود. این صدا به‌صورت رشته‌ای دوره‌ای از تپ‌ها بازمی‌گردد و مانند یک نُت نواخته شده درک می‌شود. بدیهی است اگر پهنای پله‌ها کوچک‌تر باشد، با توجه به اینکه $f \alpha \frac{1}{w}$ است، بسامد ادراک‌شده بیشتر می‌شود.

البته در واقع امر، مسیر تپ‌های متوالی که هر کدام از یک پله نشأت گرفته‌اند، موازی نیست و بسامد ثابتی را برای رشته تپ‌های متوالی درک نمی‌کنید؛ بلکه گستره‌ای از بسامدها را درک می‌کنید که به تدریج کم می‌شوند. به‌طوری که بسامد دریافتی از پله‌های پایینی (که تپ‌های بازتابیده از آنها را زودتر می‌شنویم) بیشتر از بسامد دریافتی از پله‌های بالایی است (که تپ‌های بازتابیده از آنها را دیرتر می‌شنویم) و بدین ترتیب صدا را به‌صورت رشته‌ای دوره‌ای از تپ‌ها می‌شنوید.



پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴

۴ـ۱ بازتاب موج

آ. 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.

ب. اگر در فاصلهٔ مناسبی از یک رشته پلکان بلند بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای پرهم زدن دست می‌شنوید. نمونهٔ جالبی از این پدیده در برابر رشته پله‌های معبد قدیمی کوکولکان[1] در مکزیک رخ می‌دهد. این معبد از ۹۲ پلهٔ سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.

تصویری از معبد کوکولکان

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

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

۱ـ Kukulkan Temple

۴ـ۲ شکست موج

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

ب. 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؟

پ. 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.

ت. 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.

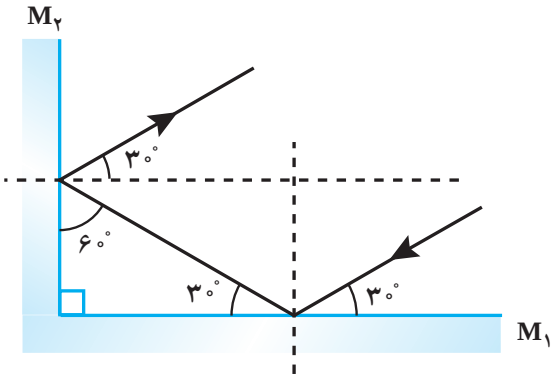
ب) توضیح دهید در کدام محیط تندی موج بیشتر است.

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

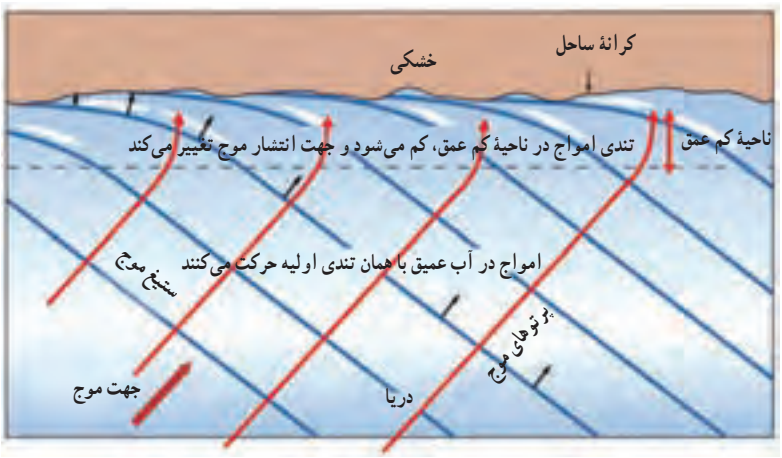
۱۱۱

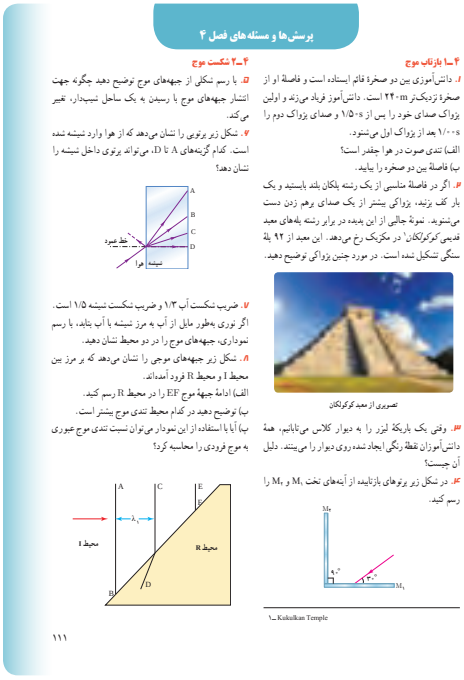
۳ همان‌طور که در متن کتاب اشاره شد، این ناشی از بازتاب پخشنده است.

۴ شکلی مانند شکل زیر خواهیم داشت.



۵ شکلی مانند شکل زیر خواهیم داشت. با نزدیک شدن امواج به یک ساحل شیبدار و رسیدن جبهه‌های موج به ساحل که در آنجا عمق آب کم می‌شود، جهت انتشار موج تغییر می‌کند. به عبارتی، با ورود امواج از ناحیهٔ عمیق به ناحیهٔ کم‌عمق، تندی آنها کم می‌شود.




پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴

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 پرهم زدن دست می‌شنوید. نمونهٔ جالبی از این پدیده در برابر رشته پله‌های معبد قدیمی "کوکولکان"[1] 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 می‌تابانید، 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؟

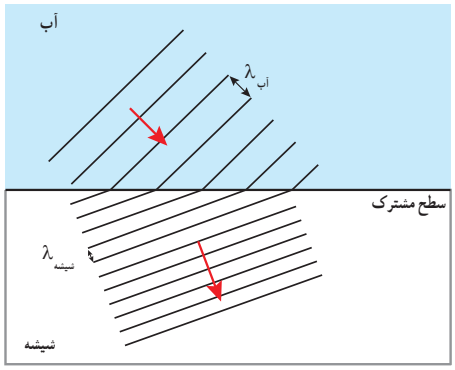
۷. ضریب شکست آب ۱/۳ و ضریب شکست شیشه ۱/۵ است. اگر نوری به‌طور مایل از آب به مرز شیشه با آب بتابد، با رسم نموداری، جبهه‌های موج را در دو محیط نشان دهید.

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؟

۱۱۱

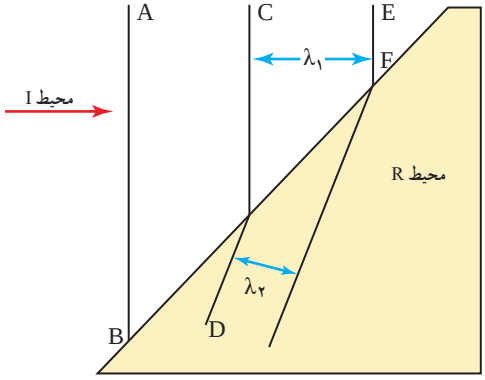
۶ شیشه ضریب شکست بزرگ‌تری نسبت به هوا دارد. بنابراین انتظار می‌رود که پرتوی شکسته شده در شیشه به خطّ عمود نزدیک شود. بنابراین پرتوی A نمی‌تواند درست باشد، زیرا از خطّ عمود دور شده است. اگر نور از شیشه وارد هوا می‌شد، این گزینهٔ درستی بود. پرتوی B نیز پاسخ درستی نیست، زیرا این پرتو خم نشده است و در امتداد پرتوی فرودی است. پرتوی C پاسخ درست است زیرا به سمت خطّ عمود کج شده است. ولی چرا پرتوی D نادرست است. توجه کنید که برای این پرتو، زاویهٔ شکست $\theta_r = 0$ است و بنابراین $\sin\theta_r = 0$ خواهد که این قانون اسنل را نقض می‌کند که در اینجا بیان می‌دارد $n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_r$.

۷ شکلی مطابق شکل زیر خواهیم داشت (البته در این شکل فاصلهٔ بین جبهه‌های موج در دو محیط به مقیاس نیست، ولی در هر حال، $\lambda_{\text{آب}} < \lambda_{\text{شیشه}}$ است).



۸ الف) ادامهٔ موج EF، پرتوی شکسته شده در محیط B است که باید موازی با D باشد. به عبارتی، پرتوهای شکسته باید موازی هم باشند.
ب) با عبور موج از محیطی به محیط دیگر، بسامد موج تغییر نمی‌کند. بنابراین نسبت $\frac{v}{\lambda}$ ثابت می‌ماند و داریم

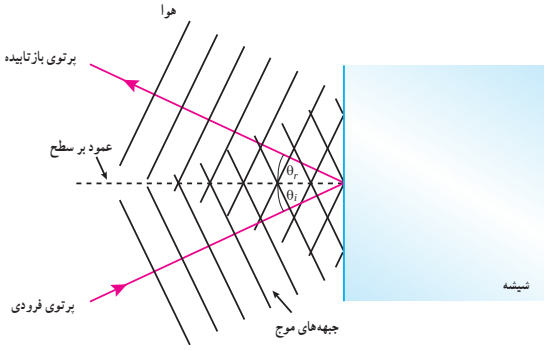
$$\frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

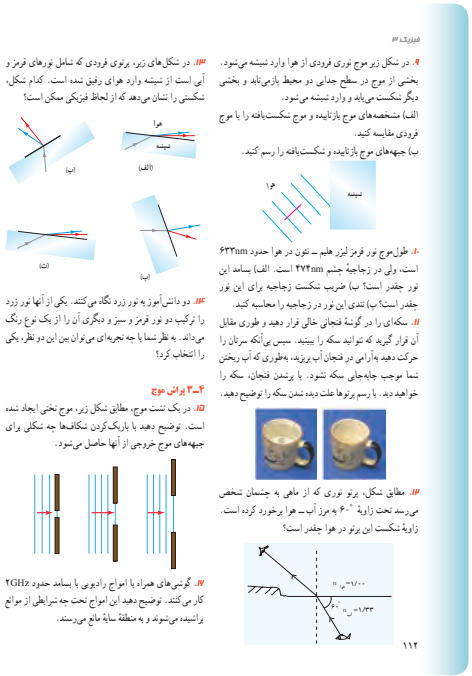


از روی شکل درمی‌یابیم که $\lambda_2 < \lambda_1$ و بنابراین $v_1 > v_2$ است. به عبارتی با دانستن فاصلهٔ بین جبهه‌های موج در دو محیط می‌توان دربارهٔ نسبت تندی موج در دو محیط اظهار نظر کرد. مثلاً برای شکل داده شده در این مسئله نسبت λ_1 به λ_2 تقریباً ۱/۶ می‌شود که همان نسبت v_1 به v_2 نیز هست.

۹ الف) برای موج شکسته، به جز بسامد سایر مشخصه‌ها با موج فرودی متفاوت است. چرا که تندی و طول موج (همان‌طور که در تمرین ۸ هم دیدیم) تغییر می‌کنند و این دو به ضریب شکست بستگی دارند. در حالی که برای موج بازتابیده، بسامد، طول موج و تندی با موج فرودی برابر است.

ب) امتداد پرتوها بر اثر شکست تفاوت پیدا می‌کند. شکل پرتویی این مسئله را در تمرین ۶ مشاهده کردیم و گفتیم که پرتوی شکسته شده باید به خطّ عمود نزدیک شود. در حل چنین مسائلی نخست پرتوی موج را رسم کنید و سپس جبهه‌های موج را به‌گونه‌ای رسم کنیم که این پرتو عمود بر آنها باشد. در مورد جبهه‌های موج بازتابیده، چون در خود محیط بازتابیده می‌شوند، فاصلهٔ خطوط تغییر نمی‌کند و بنابراین برای موج بازتابیده شکلی مانند زیر خواهیم داشت.




فیزیک ۳

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. طول موج نور قرمز لیزر هلیم ـ نئون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجهٔ 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 برشمدن 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 -۶° به مرز آب ـ 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 از شیشه وارد هوای رقیق شده است. 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؟

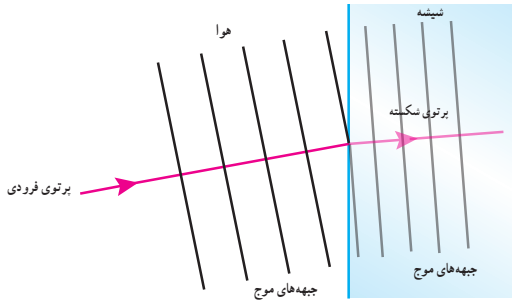
۴ـ۳ پراش موج

۱۵. در یک تست موج، مطابق شکل زیر، موج تخت 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.

۱۱۲

برای جبهه‌های موج شکست یافته نیز نخست یک پرتوی شکست یافته را رسم می‌کنیم و سپس جبهه‌های موج مربوط به آن را نشان می‌دهیم. توجه کنید که فاصلهٔ جبهه‌های موج در شیشه، کوتاه‌تر است.

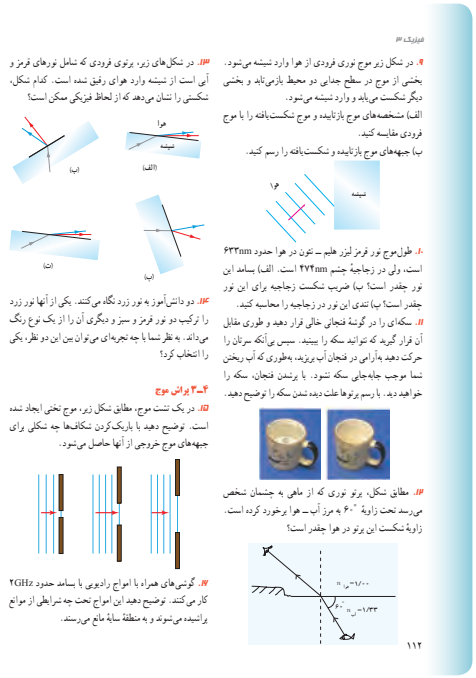


۱۰ الف) بسامد را از رابطهٔ $f=v/\lambda$ محاسبه می‌کنیم که در آن $v=c$ تندی نور است:

$$f=\frac{v}{\lambda}=\frac{c}{\lambda_\circ}=\frac{۳/۰۰\times۱۰^{۸}\,m/s}{۶۳۳\times۱۰^{-۹}\,m}=۴/۷۳۹\times۱۰^{۱۴}\,Hz\approx۴/۷۴\times۱۰^{۱۴}\,Hz$$

ب)

$$n=\frac{\lambda_\circ}{\lambda}=\frac{۶۳۳\times۱۰^{-۹}\,m}{۴۷۴\times۱۰^{-۹}\,m}=۱/۳۳۵\approx۱/۳۴$$



فیزیک ۳

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 زجاجهٔ جنس ۲۷۲nm 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 بآرامی در فنجان آب بریزید، به‌طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکه نشود. با پرتدن 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؟

۱۱۲

۱۳. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل نورهای قرمز و آبی است از شیشه وارد هوای رقیق شده است. 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؟

۴ـ۳ پراش موج

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

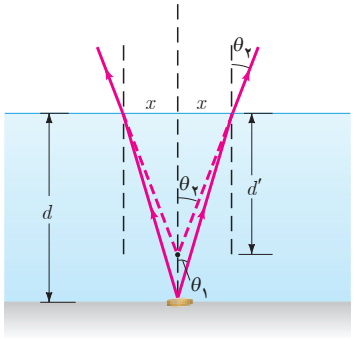
۱۶. گوشی‌های همراه با امواج رادیویی با بسامد حدود ۲GHz کار می‌کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از موانع پراشیده می‌شوند و به منطقهٔ سایهٔ مانع می‌رسند.

پ)

$$v=\frac{c}{n}=\frac{3/00\times10^{8}\,m/s}{1/335}=$$

$$=2/247\times10^{8}\,m/s\approx2/25\times10^{8}\,m/s$$

۱۱ نخست شاید بهتر باشد دید از بالا را بررسی کنیم تا با رسم نموداری پرتویی به حسی از این مطلب برسید. دو پرتو از نقطه‌ای از سکه رسم می‌کنیم که در زاویهٔ کوچکی از خطّ عمود بر سطح آب قرار دارند. به دلیل شکسته شدن پرتوها و ورود آنها از محیطی با ضریب شکست بیشتر به محیطی با ضریب شکست کمتر، آنها در محل خروج از سطح آب، از خطّ عمود دور می‌شوند و این طور به نظر می‌رسد که امتداد آنها در نقطه‌ای بالاتر از کف فنجان همدیگر را قطع می‌کنند (که با رسم خط‌چین‌هایی نشان داده شده است). همین باعث می‌شود عمق فنجان را کمتر ببینیم.



به‌طور محاسبه‌ای هم می‌توانیم رابطه‌ای به‌دست آوریم. چون در این وضعیت زاویه ها کوچک اند (که البته در شکل با اغراق بزرگ کشیده شده اند) داریم $\sin\theta\approx\tan\theta$ و در نتیجه از قانون اسنل داریم

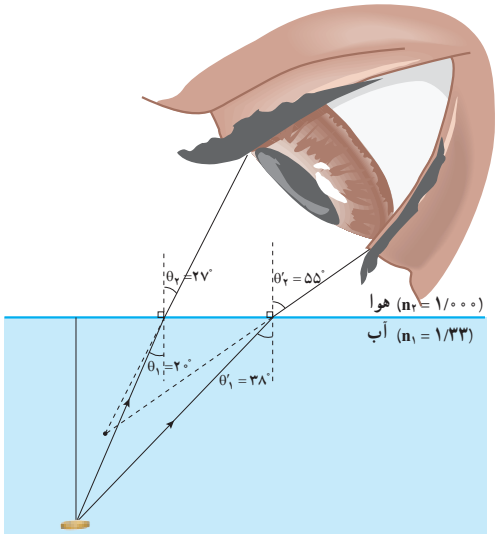
$$\tan\theta_2\approx n_1\tan\theta_1\Rightarrow\frac{x}{d'}\approx n_1\frac{x}{d}$$

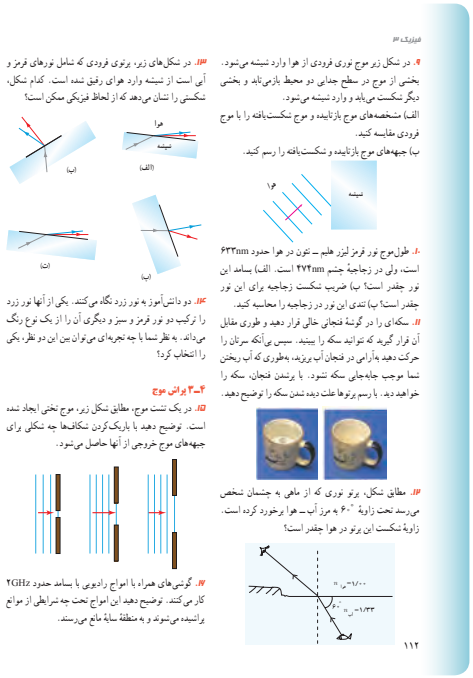
و در نتیجه $\frac{x}{d'}\approx$.

بنابراین برای شخصی که تقریباً به‌طور عمود نگاه می‌کند، عمق ظاهری $\frac{1}{n}$ عمق واقعی می‌شود ولی توجه کنید که در این حالت جابه‌جایی افقی ناچیز است. ولی اگر کسی به‌طور مایل نگاه کند، افزون بر جابه‌جایی قائم، یک جابه‌جایی افقی نیز وجود دارد و همان‌طور که در شکل زیر برای داده‌هایی خاص نشان داده شده است، تصویر در هر دو امتداد قائم و افقی به ناظر نزدیک می‌شود. البته محل این تصویر یکتا نیست و هر چه پرتوهایی که به چشم ناظر می‌رسند افقی‌تر گردند، تصویر به ناظر نزدیک‌تر می‌گردد که بدیهی است بیشترین آن برای پرتوهایی است که نزدیک به زاویهٔ حد به سطح جدایی می‌تابند.

۱۲ از قانون اسنل استفاده می‌کنیم :

$$n_1\sin\theta_1=n_2\sin\theta_2$$





فیزیک ۳

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. طول موج نور قرمز لیزر هلیم ــ نئون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجهٔ جشم ۲۷۲nm 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 بآرامی در فنجان آب بریزید، به‌طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکه نشود. با پرتوهای 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؟

۱۱۲

۱۳. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل نورهای قرمز و آبی است از شیشه وارد هوای رقیق شده است. 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؟

۴ـ۳ پراش موج

۱۵. در یک تست 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.

که در اینجا n_1 و n_2 به ترتیب ضریب شکست آب و هوا، و θ_1 و θ_2 به ترتیب زاویهٔ پرتوی نور نسبت به *امتداد قائم* در محیط‌های آب‌وهوا است. بنابراین داریم

$$\sin\theta_2 = \frac{n_1 \sin\theta_1}{n_2} = \frac{(1/33)\sin 30^\circ}{1/00} = 0/665$$

و از آنجا $\theta_2 = 41/7^\circ \approx 42^\circ$ می‌شود.

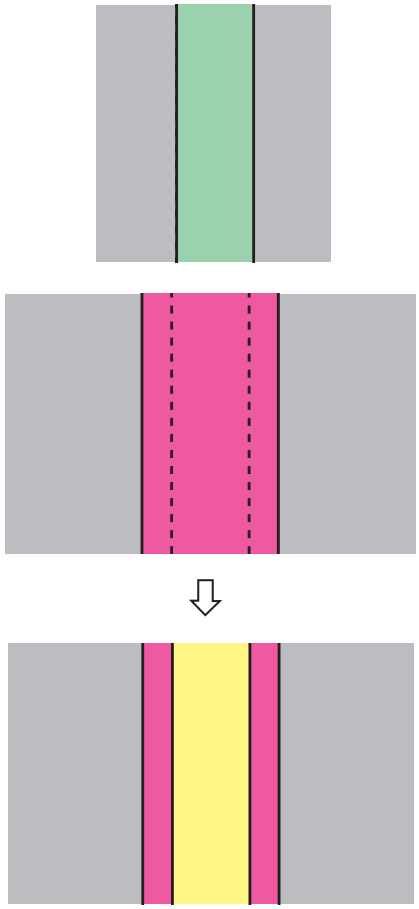
۱۳ نخست توجه کنید عددهای داده شده برای ضریب شکست‌ها صرفاً برای مقایسهٔ دو محیط است و اینکه کدام محیط چگال‌تر است، و نقش دیگری در حل این تمرین ندارد. در پاسخ به این مسئله باید به چند نکته دیگر نیز توجه کرد؛ یکی اینکه با توجه به اینکه نور از محیط با ضریب شکست بیشتر وارد محیط با ضریب شکست کمتر می‌شود باید پرتوهای نور شکسته شده «در سمت درستی» از خطّ عمود دور شوند و دیگر اینکه به پاشندگی نور توجه کنیم و ترتیب و توالی شکست پرتوها درست باشد. بنابراین نخست باید خطّ عمود را رسم کنیم. از آنجا درمی‌یابیم که شکل (ب) اصلاً از لحاظ منطقی نادرست است. پرتوی قرمز تقریباً در امتداد خطّ عمود و پرتوی آبی در سمت نادرست (سمت چپ خطّ عمود) شکسته شده است. شکل (پ) این مشکل را ندارد و پرتوها در سمتی درست شکسته شده‌اند، ولی اگر توجه کنید درمی‌یابید که پرتوی آبی به خطّ عمود نزدیک شده است و بنابراین کلّیت این شکل نیز نادرست است. اما شکل‌های (الف) و (ت) این هر دو مشکل را ندارند، هم پرتوها در سویی مناسب شکسته شده‌اند و هم هر دو پرتو از خطّ عمود دور شده‌اند. منتها همان‌طور که در مبحث پاشندگی دیدیم پرتوی آبی باید بیشتر از پرتوی قرمز شکست پیدا کند و بنابراین پاسخ درست، (ت) است.

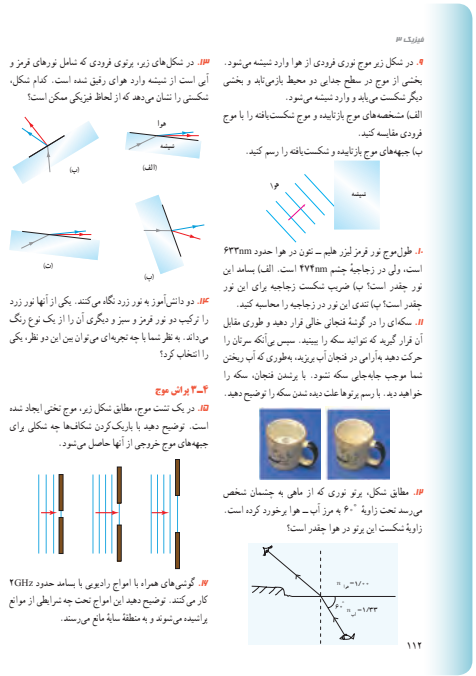
۱۴ چون این پرسش در بخش شکست نور مطرح شده است، بنابراین باید به آن با استفاده از دانش ارائه شده در این بخش و با استفاده از پاشندگی نور پاسخ دهیم. با استفاده از یک منشور به‌سادگی می‌توانیم بین این دو نظر، یکی را انتخاب کنیم. اگر نور زرد، ترکیبی باشد در منشور تجزیه می‌شود و می‌توانیم نورهای قرمز و سبز را مشاهده کنیم.

اما با توجه به اینکه در کلّ مجموعهٔ این کتاب، آزمایش یانگ نیز آموزش داده شده است، خوب است تحلیلی مبتنی بر این آزمایش نیز ارائه کنیم. پهنای هر نوار تاریک یا روشن در آزمایش یانگ با طول موج متناسب است و از این نتیجه در تحلیل خود استفاده می‌کنیم. اگر نور زرد به‌کار رفته در آزمایش یانگ تکفام باشد، ما نوارهای تداخلی یک در میان روشن (اینجا زرد) و تیره‌ای خواهیم داشت. ولی اگر نور زرد، ترکیبی از دو نور قرمز و سبز باشد، نوارهایی به چنین وضوحی نخواهیم داشت و نتیجهٔ کار از برهم نهی امواج تداخلی

قرمز و سبز حاصل می‌شود. به عبارتی، توجه کنید که اگر نور سبز را نداشتیم، نوارهای تداخلی یک در میان از قرمز و تیره حاصل می‌شد، و اگر نور قرمز را نداشتیم، نوارهای تداخلی یک در میانی از سبز و تیره حاصل می‌شد. حال در حضور این دو نور، نوارهای داخلی آنها روی هم می‌افتد. ولی توجه کنید که این برهم افتادن به‌طوری نیست که نوارها کاملاً برهم منطبق شوند. در واقع چون طول نوارهای تداخلی به طول موج به‌کاررفته مربوط است و هر چه طول موج بزرگ‌تر باشد، آنها نیز طویل‌ترند، بنابراین در همپوشانی، نوارها کاملاً بر هم منطبق نمی‌شوند.

برای مثال، نوار روشن مرکزی را در نظر بگیرید. وقتی نوارهای تداخلی حاصل از نور سبز و حاصل از نور قرمز را بر هم بنهیم، کّل نوار سبز به نوار زرد تبدیل می‌شود، ولی اطراف آن تا سر نوارهای تاریک حاشیه‌های قرمز خواهند داشت. بنابراین نتیجه می‌گیریم که نور زرد ترکیبی باعث نوار مرکزی زرد رنگی می‌شود که کوتاه‌تر از نوار زرد مرکزی حاصل از یک نور زرد تکفام است؛ ضمن آنکه اطراف آن نیز ته رنگ قرمزی می‌گیرد.





فیزیک ۳

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 زجاجهٔ چشم ۲۷۲nm 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 پرتوهای 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؟

۱۱۲

۱۳. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل نورهای قرمز و آبی است از شیشه وارد هوای رقیق شده است. کدام شکل، شکستی را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

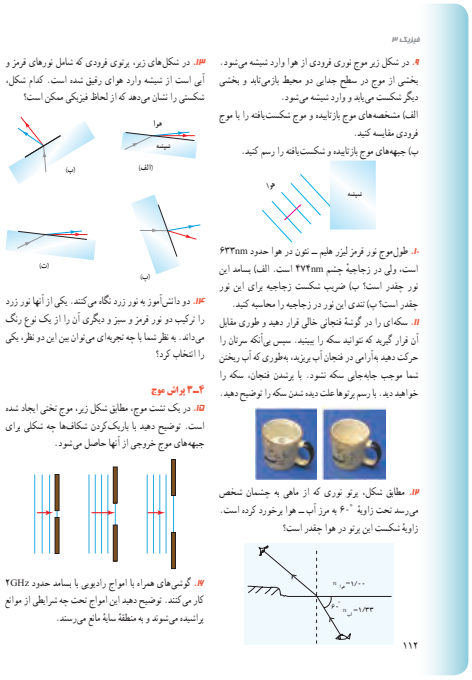
۱۴. دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آنها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. به نظر شما با چه تجربه‌ای می‌توان بین این دو نظر، یکی را انتخاب کرد؟

۴ــ۳ پراش موج

۱۵. در یک تست 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.

(جالب است اگر آزمایش یانگ را با نوری سفید انجام دهیم، همچنان حاشیه‌های نوار مرکزی قرمز خواهد بود، زیرا پهنای این نوار از همه بیشتر است و در میانهٔ نوار مرکزی هم نواری کاملاً سفید خواهیم داشت که از همپوشانی همهٔ رنگ‌های طیف ایجاد شده است و در بین آنها رنگین کمانی از ترکیب رنگ‌های مختلف ایجاد می‌شود. شکل زیر طرحی تقریبی از چنین تصویری را نشان می‌دهد).



فیزیک ۳

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. طول موج نور قرمز لیزر هلیم ــ نئون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجهٔ چشم ۲۷۲nm 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 بآرامی در فنجان آب بریزید، به‌طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکه نشود. با پرتندن 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؟

۱۱۲

۱۳. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل نورهای قرمز و آبی است از شیشه وارد هوای رقیق شده است. کدام شکل، شکستی را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

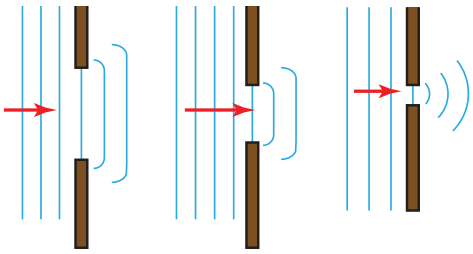
۱۴. دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آنها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. به نظر شما با چه تجربه‌ای می‌توان بین این دو نظر، یکی را انتخاب کرد؟

۴ـ۳ 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.

۱۵ با باریک کردن پهنای شکاف، پدیدهٔ پراش به‌طور بارزتری خود را نشان می‌دهد و موجی که از شکاف خارج می‌شود از حالت موج تخت بیشتر خارج می‌شود و در حالتی که پهنای شکاف در حدود طول موج باشد موج‌های تخت به‌صورت امواج نیم‌دایره‌ای گسترده می‌شوند.



۱۶ نخست طول موج این امواج را محاسبه می‌کنیم:

$$\lambda = v/f = \frac{c}{f} = \frac{۳/۰۰\times۱۰^{۸}\,m/s}{۲\times۱۰^{۹}\,s^{-۱}} = ۰/۱۵m \approx ۰/۱m$$

این امواج از اجسامی به قطری حدود ۱۵cm یا کوچک‌تر، به خوبی پراشیده می‌شوند.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

۴ـ۴ تداخل امواج

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

(۱)

(۲)

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

۱۹. دو چشمهٔ نقطه‌ای S_1 و S_2 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 طول‌موج 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 $t=0$ را نشان می‌دهد.

الف) جابه‌جایی تار را در $t=\frac{1}{4f}$ و $t=\frac{1}{2f}$ 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 $n=1$ خود نوسان می‌کند. تندی موج عرضی در این تار ۲۵۰m/s و تندی صوت در هوا ۳۴۸m/s است.

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

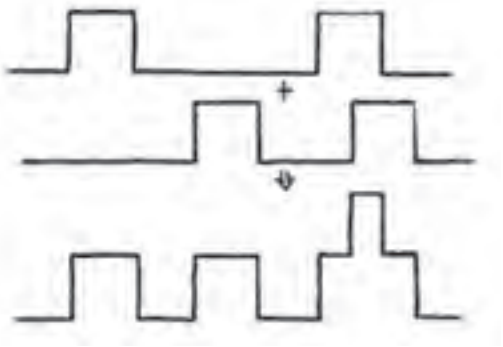
۲۴. اگر بسامد اصلی یک تار ویولن به جرم ۸۰۰mg و طول ۲۲/۰cm برابر ۹۲۰Hz باشد،

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

ب) کشش تار چقدر است؟

۱۱۳

۱۷ از بر هم نهی این دو موج، شکلی مانند زیر حاصل می‌شود :



۱۸ جابه‌جایی کل، جمع‌برداری هر جابه‌جایی مجزا است. چون جابه‌جایی‌های نقطهٔ M در جهت‌های مخالف هم هستند، جمع‌برداری آنها برابر y_1-y_2 می‌شود که چون $y_1>y_2$ است، مقداری مثبت است.

۱۹ در نقطهٔ P قله (ستیغ) موج‌ها همدیگر را قطع کرده‌اند و برهم نهاده شده‌اند و بنابراین تداخل کاملاً سازنده و دامنهٔ موج برایند بیشینه است. اما در نقطهٔ Q قله (ستیغ) یک موج با درّه (پاستیغ) موج دیگر تلاقی کرده است (توجه کنید که Q بر یک منحنی آبی و در میان دو منحنی قرمز است) و بنابراین همدیگر را تضعیف می‌کنند و دامنه کمینه است.

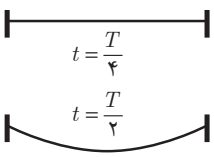
۲۰ الف) چون فاصلهٔ نقطه‌های S و L متناسب با طول موج به‌کار رفته است، بنابراین برای آنکه نقطه‌های S و L به هم نزدیک باشند باید طول موج به کار رفته کوچک باشد. با توجه به اینکه $f=v/\lambda$ است نتیجه می‌گیریم که این معادل با افزایش بسامد صوت است.

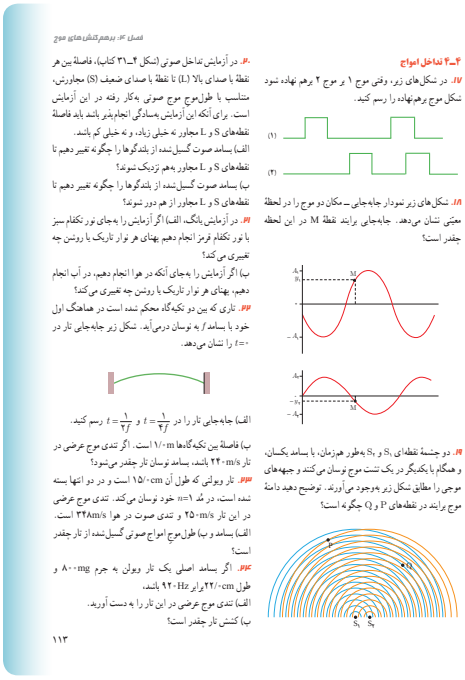
ب) برای آنکه نقطه‌های S و L از هم دور شوند باید طول موج به‌کار رفته بزرگ باشد. با توجه به اینکه $f=v/\lambda$ است نتیجه می‌گیریم که این معادل با کاهش بسامد صوت است.

۲۱ الف) پهنای نوارهای تداخلی در آزمایش یانگ متناسب با طول موج به‌کار رفته است. بنابراین با افزایش طول موج، پهنای نوارها زیاد می‌شود. پس پهنای نوارها با استفاده از نور تکفام قرمز به جای نور تکفام سبز، افزایش می‌یابد.

ب) چون پهنای نوارهای تداخلی با طول موج به‌کار رفته متناسب است، با توجه به اینکه در حضور آب طول موج به λ/n تغییر پیدا می‌کند و کم می‌شود، بنابراین طول موج به‌کار رفته کاهش می‌یابد که این به معنای کاهش پهنای نوارها است. (توجه! در متن درس فقط به رابطهٔ پهنای نوارها با طول موج پرداخته شده است. خوب است بدانید دو راه دیگر تغییر پهنای نوار، یکی تغییر دادن فاصلهٔ شکاف‌ها تا پرده، و دیگری تغییر فاصله شکاف‌ها از هم است.)

۲۲ الف) چون دورهٔ تناوب برابر با عکس بسامد است ($T=1/f$)، بنابراین $t=\frac{1}{4f}$ معادل با $\frac{1}{4}T$ و $t=\frac{1}{2f}$ معادل با $\frac{1}{2}T$ است. به‌عبارتی در زمان —— ، $\frac{1}{4}$ دوره گذشته است و در زمان $t=\frac{1}{2f}$ ، نصف دوره. پس شکل‌ها (در مشابهت با شکل‌های ۴ـ۳۴ کتاب) چنین می‌شوند :





فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

۴ـ۴ تداخل امواج

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

(۱)
(۲)

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

۱۹. دو چشمهٔ نقطه‌ای S_1 و S_2 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 طول‌موج 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 بانگ، الف) اگر آزمایش را به‌جای نور نکفام سبز با نور نکفام 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 نکیه‌گاه محکم شده است در هماهنگ اول خود با بسامد f به نوسان درمی‌آید. شکل زیر جابه‌جایی تار در $t=0$ را نشان می‌دهد.

الف) جابه‌جایی تار را در $t=\frac{1}{4f}$ و $t=\frac{1}{2f}$ رسم کنید.

ب) فاصلهٔ بین نکیه‌گاه‌ها 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) طول‌موج 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؟

۱۱۳

ب) از $v=f\lambda$ استفاده می‌کنیم. با توجه به اینکه $\frac{\lambda}{2}=1/0\,m$ است، خواهیم داشت:

$$f=\frac{v}{\lambda}=\frac{240\,m/s}{2/0\,m}=1/2\times10^{2}\,s^{-1}=1/2\times10^{2}\,Hz$$

و یا به‌عبارتی $120\,Hz$ می‌شود.

۲۳ الف) باید از رابطهٔ ۴ـ۵ استفاده کنیم

که در اینجا $n=1$ است: $f_n=\frac{nv}{2L}$ ، به‌ازای $n=1,2,\ldots$

$$f_1=\frac{v}{2L}=\frac{(1)(250\,m/s)}{2(0/150\,m)}=833/3\,Hz\approx833\,Hz$$

توجه کنید که بسامد موج روی تار همان بسامد موج صوتی است که تولید می‌شود.

ب) همان‌طور که گفتیم f_1 بسامد موج صوتی است و بنابراین برای طول موجِ موج صوتی گسیل‌شده داریم

$$\lambda=\frac{v}{f}=\frac{348\,m/s}{833/3\,s^{-1}}=0/4176\,m\approx0/418\,m$$

۲۴ الف) دو سر تار بسته است و وقتی در پایین‌ترین بسامد خود نوسان می‌کند، طول آن دقیقاً نصف طول موج است. اگر L طول سیم و λ طول موج باشد، $\lambda=2L$ است (این را به‌طور مستقیم از رابطهٔ ۴ـ۴ کتاب نیز می‌توانید ببینید). بسامد برابر $f=v/\lambda=v/2L$ است که در آن v تندی موج روی تار ویولن است. بنابراین

$$v=2Lf=2(0/220\,m)\,(920\,Hz)=404/8\,m/s\approx405\,m/s$$

که البته می‌توانستیم آن را به‌طور مستقیم با استفاده از رابطهٔ ۴ـ۵ نیز به ازای $n=1$ به‌دست آوریم.

ب) تندی موج با $v=\sqrt{F/\mu}$ داده می‌شود که در آن $\mu=m/L$ است. بنابراین کشش تار چنین می‌شود:

$$F=\mu v^2=\left(\frac{m}{L}\right)v^2=\left(\frac{800\times10^{-6}\,kg}{22/0\times10^{-2}\,m}\right)(404/8\,m/s)^2$$

$$=0/9595\,N\approx0/695\,N$$

پ) برای بسامد اصلی، طول موجِ موج عرضی در تار $\lambda=2L$ است و بنابراین

$$\lambda=2L=2(0/220\,m)=0/440\,m$$

بسامد صوت در هوا همان بسامد نوسان سیم است. ولی به خاطر تندی متفاوت صوت، طول موج *متفاوت می‌شود*. اگر هوا را با شاخص پایین a نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$\lambda_a=\frac{v_a}{f}=\frac{340\,m/s}{920\,s^{-1}}=0/3696\,m\approx0/370\,m=37/0\,cm$$

فیزیک ۳

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

۲۵. تار ویولنی به طول ۳۰/۰cm و جگالی خطی جرمی ۰/۶۵۰g/m در تزییکی 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 جفدر است؟ ب) کشش تار جفدر است؟

۲۶. ریسمان‌های A و B، طول و جگالی 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؟

ریسمان A — ریسمان B

(الف) (ب) (پ) (ت)

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.

۱۱۴

الف) این بسامد کدام است؟

ب) بسامد هماهنگ هفتم جفدر 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؟

A B C D E F G

۳۰. وقتی گلان آبی را خالی می‌کنیم، با خالی شدن آب صدای گلوپ گلوپی را می‌شنویم. موقع خالی شدن گلان بسامد این صدا کمتر می‌شود (صدای تم‌تر) 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؟

۲۵ الف) همان‌طور که در متن درس آمده، تشدید باعث به نوسان در آمدن تار می‌شود. اگر بسامد مولّد نوسان با بسامدهای ارتعاش تار منطبق شود، تار به تشدید درمی‌آید و در غیر این صورت، موج ایستادهٔ بارزی ایجاد نمی‌شود. به عبارتی وقتی $f=v/\lambda$ برابر با یکی از بسامدهای نوسان‌ساز باشد، این پدیده رخ می‌دهد.

ب) چون تار فقط در دو بسامد ۸۸۰Hz و ۱۳۲۰Hz به نوسان در می‌آید، تفاضل آنها برابر بسامد اصلی نوسان تار است. البته این را می‌توان به‌سادگی نیز اثبات کرد :

$$f_{n+1}-f_n=\frac{(n+1)v}{2L}-\frac{nv}{2L}=\frac{v}{2L}$$

که همان بسامد اصلی نوسان است. بنابراین

$$f_{n+1}-f_n=1320\,\text{Hz}-880\,\text{Hz}=440\,\text{Hz}$$

پ) در بالا ثابت کردیم $f_{n+1}-f_n=v/2L$ ، که در آن $v=\sqrt{F/\mu}$ است. بنابراین

$$f_{n+1}-f_n=\frac{1}{2L}\sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

و از آنجا

$$F=4L^2\mu(f_{n+1}-f_n)^2=4(0/300\,\text{m})^2(0/650\times10^{-3}\,\text{kg/m})\times(1320\,\text{Hz}-880\,\text{Hz})^2=45/3\,\text{N}$$

در اینجا خوب بود تندی صوت در تار ویولن نیز پرسیده می‌شد و آن را با تندی صوت در هوا مقایسه می‌کردیم. برای تندی صوت در تار داریم

$$v=\sqrt{\frac{F}{\mu}}=\sqrt{\frac{45/3\,\text{N}}{0/650\times10^{-3}\,\text{kg/m}}}=264\,\text{m/s}$$

۲۶ چون ریسمان B تحت کشش بیشتری نسبت به ریسمان A قرار دارد، تندی موج در این ریسمان بیشتر است، زیرا هر دو ریسمان چگالی خطی جرمی یکسانی دارند. پس طبق رابطهٔ $f_n=nv/2L$، با توجه به اینکه طول دو ریسمان یکسان است، درمی‌یابیم تنها در شکل (ت) که ریسمان B در هماهنگ اول و ریسمان A در هماهنگ دوم در نوسان است این امکان وجود دارد که ریسمان‌ها در بسامدهای تشدیدی یکسانی باشند.

۲۷ همان‌طور که در حل مسئله ۲۵ نشان دادیم، تفاضل دو بسامد نوسان متوالی تار برابر با بسامد اصلی نوسان تار است. بنابراین

$$f=390\,\text{Hz}-65\,\text{Hz}=325\,\text{Hz}$$

همان بسامد اصلی (پایه) است. پس بسامد هماهنگ بعدی پس از ۱۹۵Hz برابر با ۱۹۵Hz + ۶۵Hz = ۲۶۰Hz است. اگر بررسی کنیم عدد هماهنگ این بسامد تشدیدی ۴ است.

۲۸ الف) اگر بررسی کنید درمی‌یابید تفاوت بسامدهای تشدیدی برابر ۷۵Hz است و چون بسامد کمتر از ۴۰۰Hz خواسته شده است، پس بسامد مورد نظر همان ۷۵Hz است.

ب) بسامد پنج هماهنگ اول به ترتیب برابر با ۷۵Hz، ۱۵۰Hz، ۲۲۵Hz، ۳۰۰Hz، و ۳۷۵Hz شده است که به ترتیب هماهنگ‌های اول تا پنجم هستند. بنابراین بسامد هماهنگ هفتم برابر است با : $f_v = ۷(۷۵\ Hz) = ۵۲۵\ Hz$.

۲۹ توجه کنید آنچه در توصیف چگونگی انجام این آزمایش آمده است، صرفاً برای آن است. که مسئله از جنبهٔ انتزاعی خارج شده و عملاً انجام‌پذیر باشد. اگر تار در نقطهٔ C محکم گرفته شود، نوسان‌های تار به سمت راست منتقل نمی‌شوند. بنابراین در انجام این تجربه، چگونگی گرفتن تار در نقطهٔ C مهم است و تا آنجا که ممکن است باید به‌آرامی گرفته شود. در این صورت، موج ایستاده‌ای مانند شکل زیر بر تار ایجاد می‌شود به‌طوری که نقطه‌های A، C، E و G گره‌ها و نقطه‌های B، D و F شکم‌ها می‌شوند. بنابراین کاغذهای تاشده در نقطه‌های D و F به هوا برمی‌خیزند، در حالی که کاغذ واقع در E، در جای خود ثابت می‌ماند.

فیزیک ۳

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

۲۵. تار یوولنی به طول ۳۰/۰cm و جگالی 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 جفدر است؟ ب) کشش تار جفدر است؟

۲۶. ریسمان‌های A و B، طول و جگالی 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؟

ریسمان A — ریسمان B

(الف) (ب) (پ) (ت)

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.

۱۱۴

الف) این بسامد کدام است؟

ب) بسامد هماهنگ هفتم جفدر 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؟

A B C D E F G

۳۰. وقتی گالن آبی را خالی می‌کنیم، با خالی شدن آب صدای گلوپ گلوپ 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؟

۳۰ آنچه در این پرسش مطرح شده است در واقع وضعیتی مخالف پرسش ۴ـ۶ متن کتاب است که در آنجا با ریختن آب، بسامد صدایی که شنیده می‌شود، افزایش می‌یابد. در هنگام خالی شدن گالن، حجم فضای هوای داخل آن افزایش می‌یابد. هرچه فضای هوای خالی افزایش یابد، اندازهٔ بسامدهای تشدیدی کمتر می‌شوند (این بسامدها با طول ستون هوا نسبت معکوس دارند.)

صدای حاصل از خالی شدن ظرف، گسترهٔ وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه، یکی از آنها با بسامد تشدیدی هوای درون ظرف منطبق می‌شود، بنابراین موقع خالی شدن گالن، مدام صداهای بم‌تر و بم‌تری (با بسامد کمتری) را می‌شنویم.

۳۱ هنگام دمیدن در یک صدف حلزونی (conch) لب‌ها را روی دهانهٔ باریک آن می‌فشارند. با دمیدن صدف حلزونی، لب‌ها به نوسان درمی‌آیند و اگر این کار با دقت صورت بگیرد، لب‌ها در بسامدهای مختلفی به نوسان در می‌آیند. نوسان لب‌ها در درون صدف، امواجی صوتی را با همان بسامدهای نوسان لب به وجود می‌آورد. اگر برخی از این امواج با یکی از بسامدهای تشدید صدف منطبق شوند، در این صورت یک موج صوتی قوی را ایجاد می‌کنند. از لحاظ تجربی خوب است به یک آزمایش اشاره کنیم. در آن آزمایش، پایین‌ترین بسامد تشدید صدف ۳۳۲/۵Hz بود و بنابراین نوسان‌های لب در آن بسامد باعث تشدید در درون صدف در همان بسامد می‌شد.