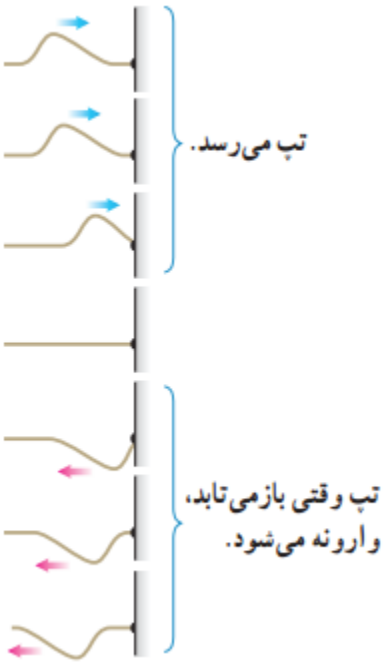
به نام خدا

مبحث: برهمکنش امواج

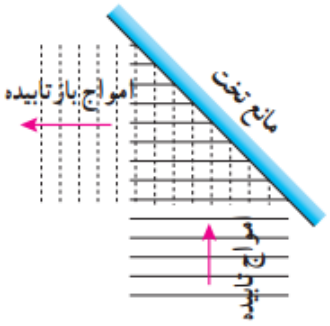
دکتر سلطانی

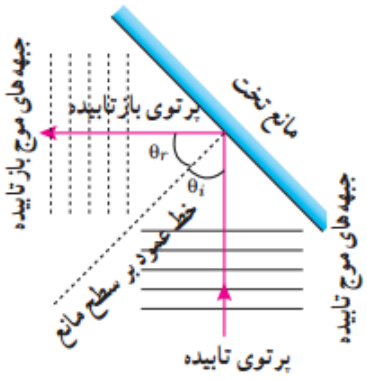
بازتاب موج: بازتاب موج در واقع برخورد یک موج با یک سطح از جسمی و بازگشت از آن نامیده می‌شود. همانظور که بیان شد امواج شامل دو موج مکانیکی و الکترومغناطیس هستند. لذا برای فهم موضوع بازتاب به بررسی بازتاب هر دو نوع این امواج می‌پردازیم.

بازتاب امواج مکانیکی: اگر تپی را در یک فنر (یا یک ریسمان) کشیده 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 اندازه 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. چنین بازتابی را بازتاب در یک بُعد می‌گویند.



نمودار پرتویی: برای نمایش رفتار موج از نمودارهایی موسوم به نمودار پرتویی استفاده می‌بریم. اگر جهت حرکت جبهه موج را با پیکانی مستقیم و عمود بر آن جبهه موج‌ها نمایش دهیم، زاویه خط عمود بر سطح بازتاب و بردار موج (جهت حرکت انتشار موج) را زاویه‌ی تابش θ_i می‌نامیم. از طرفی زاویه‌ی بین خط عمود بر سطح تابش و بردار بازتابش را زاویه‌ی بازتابش θ_r می‌نامیم. میتوان نشان داد که همواره برای تمامی امواج زاویه‌ی تابش و بازتایش با هم برابر است که به آن **قانون بازتاب عمومی** می‌گوییم. $\theta_i = \theta_r$

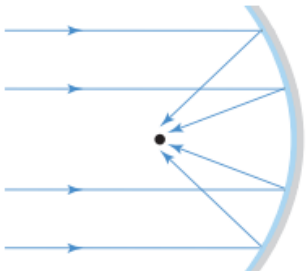




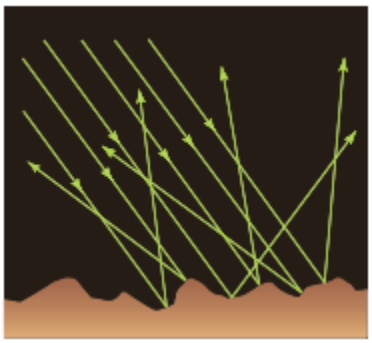
پژواک: در برابر دیواره یا صخره بلندی که چند ده متر از شما فاصله دارد، بایستید و یک بار دست بزنید. پس از مدت زمان کوتاهی، بازتاب صدای دست زدن خود را خواهید شنید. اگر صوت پس از بازتاب، با یک تأخیر زمانی به گوش شنوندهای برسد که صوت اولیه را مستقیماً میشنود، به چنین بازتابی پژواک میگویند. اگر تأخیر زمانی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

مکان یابی پژواکی روشی است که بر اساس امواج صوتی بازتابیده از یک جسم، مکان آن جسم را تعیین میکند. مکان یابی پژواکی به همراه اثر دوپلر که در فصل پیش آموختیم، در تعیین مکان اجسام متحرک و نیز تعیین تندی آنها به کار می‌رود. برخی از جانوران نظیر خفاش و دلفین از این روش استفاده می‌کنند. همینطور در فنّاوریهایی نظیر اندازهگیری تندی شارش خون در رگها نیز از این روش استفاده می‌شود. خفاش، فَورانی 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 دوپلر را در موج بازتابیده ادراک میکند و بدینوسیله میتواند سرعت خود یا شیء متحرک را تعیین کند. خفاش‌ها از این ویژگی برای شناسایی و شکار طعمه‌های خود استفاده میکنند. همچنین در دستگاه سونار که در کشتیها برای مکانیابی اجسام زیر آب بهکار میرود، و در سونوگرافی نیز از مکانیابی پژواکی استفاده میشود.

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 زیر در یک نقطه کانونی می‌شوند. این نمونه 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 استفاده می‌شود.



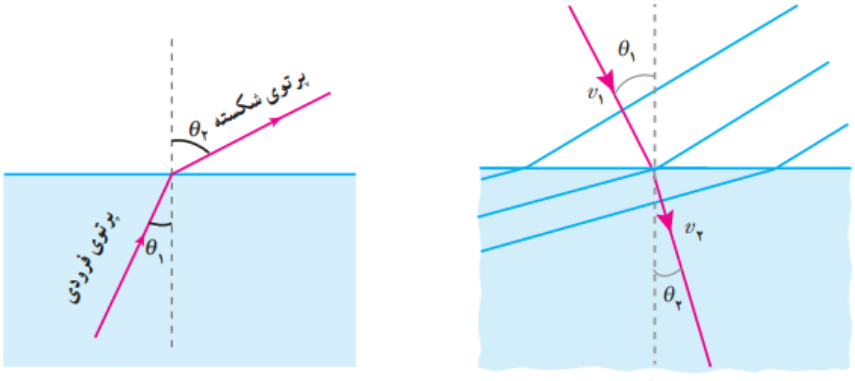
انواع بازتابش: در مواردی که سطح بازتابنده‌ی نور همچون یک آینه، بسیار هموار باشد، بازتاب نور را بازتاب آینه‌ای یا منظم میگویند. نوع دیگر بازتابش، بازتاب پخشنده یا نامنظم است.این بازتاب وقتی رخ میدهد که نور به سطحی برخورد کند که صیقلی و هموار نباشد. پرتوهای نور به‌طور کاتورهای از پستی و بلندی‌های سطح بازتابیده، و در تمام جهات پراکنده می‌شونده به دلیل این بازتاب است که شما این صفحه کاغذ، دیوار، دستتان، دوست خود، و... را میبینید. در بازتاب آینه‌ای از یک آینه تخت، بازتابش یک دسته پرتوی موازی را فقط در یک جهت می‌توانید ببینید، ولی در بازتاب پخشنده، بازتابش این دسته پرتو را می‌توانید در جهت‌های مختلف مشاهده کنید. توجه کنید منظور از سطح ناهموار آن است که سطح در مقایسه با طول‌موج نور ناهموار است.



شکست موج: 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؛ 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.

قانون شکست عمومی: 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 رابطه زیر برقرار است که به آن **قانون شکست عمومی** میگویند.

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1}=\frac{V_2}{V_1}$$



نکته!

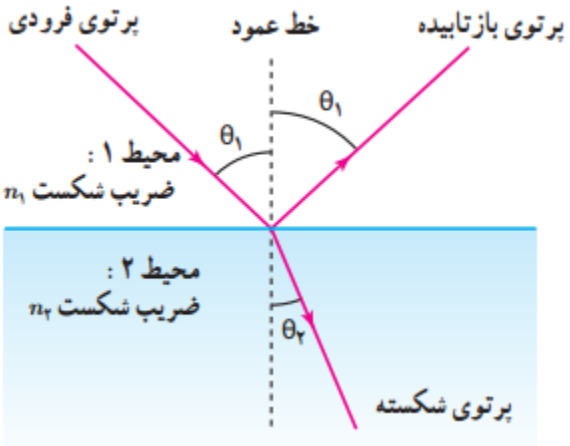
در صورتیکه موج از محیط با تندی بیشتر وارد محیطی با تندی کمتر شود، زاویه تابش از زاویه شکست بزرگتر خواهد بود و بالعکس.

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 گستره 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.

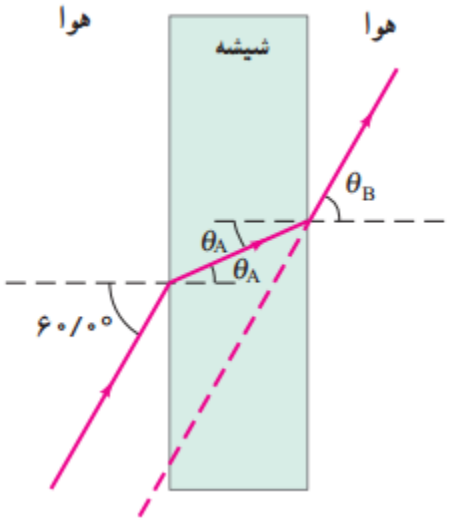
وقتی یک پرتوی نور از محیطی شفاف وارد محیط شفاف دیگری شود، بخشی از نور بازمی‌تابد و بخشی دیگر وارد محیط دوم میشود. همانطور که انتظار داریم آن بخش نور که وارد محیط دوم می‌شود، به دلیل آنکه تندی آن در محیط دوم تغییر میکند، شکسته میشود. به همین‌دلیل برای هر محیط ضریب شکست تعریف میکنند که برابر با نسبت تندی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

$$n = \frac{\text{تندی نور در خلأ}}{\text{تندی نور در یک محیط}} = \frac{c}{v}$$

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$ **(قانون شکست اسنل)**



مثال۱: پرتوی نوری مطابق شکل، از هوا بر تیغه‌ای شیشه‌ای متوازی السطوحی، با زاویه تابش ۶۰ درجه فرود می‌آید.



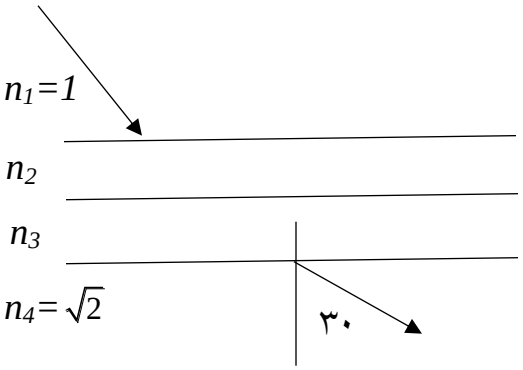
الف) زاویه شکست θ_A پرتو در شیشه چقدر است؟

ب) زاویه‌ی خروجی θ_B پرتو از شیشه چقدر است؟

نکته۲:

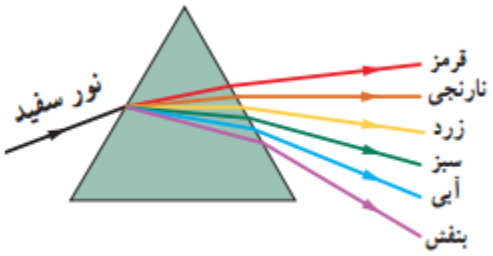
قانون شکست را می‌توان بین هر دو سطح دلخواه نوشت. لذا در حالتیکه چند سطح میانی در مسئله وجود داشته باشد می‌توان از آنها صرف نظر کرد.

مثال۲: در شکل زیر زاویه‌ی تابش اولیه به تیغه چند درجه است؟



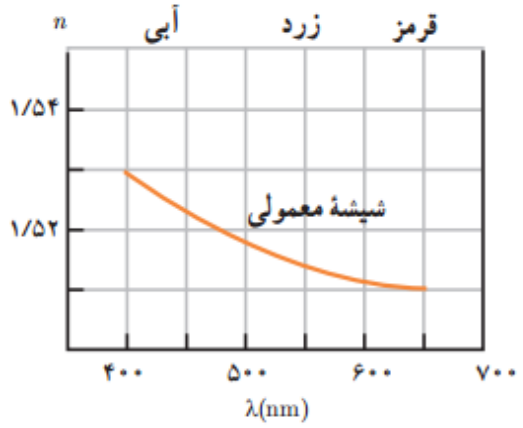
سراب: در روزهای گرم ممکن است برکه آبی را در دوردست ببینید که بر سطح زمین قرار دارد، اما وقتی به آن محل میرسید، آنجا را خشک می‌یابید. به این پدیده **سراب یا سراب آبگیر** میگویند و نه تنها میتوان آن را دید، بلکه میتوان از آن عکس هم گرفت. در روزهای گرم هوای سطح زمین نسبتاً داغ است. از طرفی، چگالی هوا با افزایش دما کاهش مییابد که این سبب کاهش ضریب شکست نیز می‌شود.

پاشندگی نور: همان طور که در علوم هشتم دیدیم وقتی باریکه نور سفید خورشید به وجهی از یک منشور میتابد، در عبور از منشور به رنگهای مختلفی تجزیه می‌شود. دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیطی به جز خلأ به طول موج نور بستگی دارد؛ یعنی وقتی باریکه نوری شامل پرتوهایی با طول موج‌های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های مختلفی شکسته می‌شوند. به این پخش شدگی نور، پاشندگی نور میگویند.

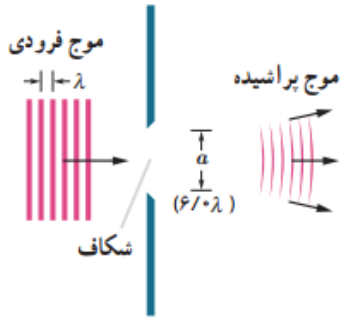


نکته۳:

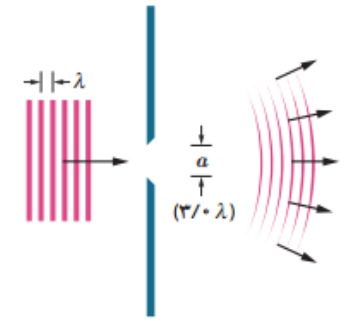
عموماً ضریب شکست یک محیط معین برای طول موج‌های کوتاهتر، بیشتر است. با توجه به این نموداراگر مثلاً دو باریکه نور آبی و قرمز با زاویه‌ی تابش یکسانی از هوا وارد شیشه شوند باریکه آبی بیشتر از باریکه قرمز خم میشود



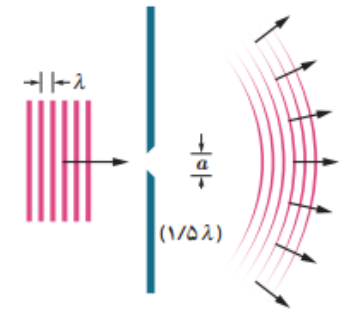
تار نوری: وقتی نور از محیطی با ضریب شکست بیشتر به طور مایل وارد محیطی با ضریب شکست کمتر شود، به ازای زاویه تابش خاصی موسوم به زاویه حد ، زاویه شکست ۹۰ درجه می‌شود و از آن پس برای هر زاویه تابش بزرگتری همه نور فرودی بازمی‌تابد که به این پدیده، بازتاب داخلی کلی گفته میشود. تار نوری که هم در پزشکی و هم در فنّاوری ارتباطات نقش مهمی دارد، بر اساس این پدیده عمل میکند. در مرکز یک تار نوری، مغزی استوان‌های شفافی از جنس شیشه یا پلاستیک با ضریب شکست نسبتاً بالا قرار دارد. ضخامت این مغزی می‌تواند تا چند میکرومتر باشد.



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، به وضوح به اطراف مانع یا شکاف گسترده می‌شود.



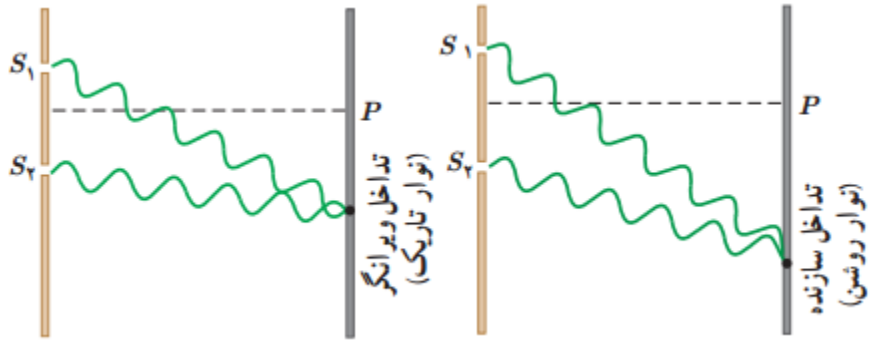
البته پراش در واقع چیزی فراتر از صرفاً یک گستردگی بیشتر موج است و مثلاً اگر پراش نوری تکفام از یک شکاف باریک یا لبه‌ای تیز را روی یک پرده ملاحظه کنیم، همواره نوارهای تاریک و روشنی موسوم به نقش پراش را موازی با لبه‌های شکاف مشاهده می‌کنیم.



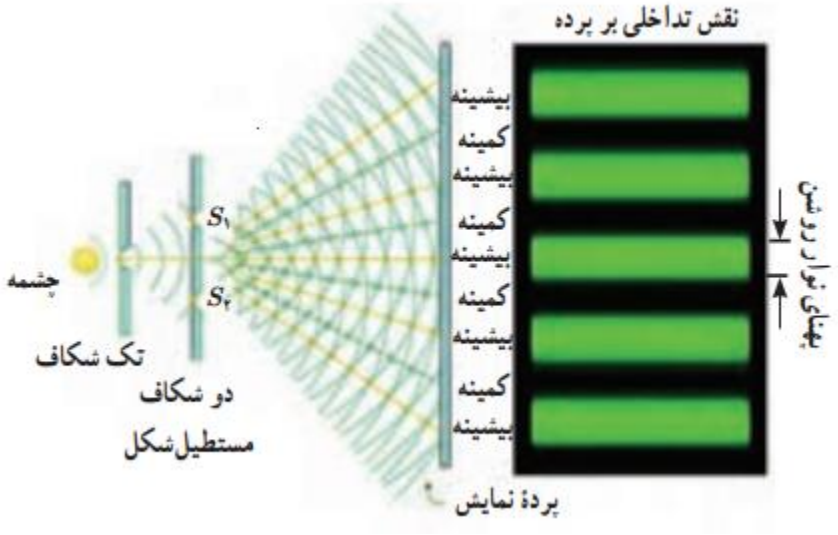
تداخل امواج:

هر موج در حال انتشار بدون آنکه برای انتشار سایز موج‌ها مزاحمتی ایجاد کند از آنها عبور می‌کند و به انتشار خود ادامه می‌دهد. درست مانند آنکه هیچ موجی در محیط وجود نداشته باشد. در نقاطی که دو یا چند موج با هم تلاقی داشته باشند، دامنه حرکت موج می‌تواند دستخوشه تغییراتی شود. اگر جابجایی حاصل از دو تپ هم جهت باشد برآیند آنها برابر است با مجموع جابجایی‌های حاصله از هر یک از امواج. در این حالت برهم نهی موج‌ها را سازنده می‌نامیم. اگر جابجایی حاصل از دو تپ خلاف جهت باشد می‌تواند سبب تضعیف دامنه موج برهم نهی باشد که به آن تداخل ویرانگر می‌گوییم.

نمونه‌ای از این تداخل‌ها را میتوان در آزمایش **دوشکافی یانگ** مشاهده کرد.



در شکل روبه‌رو طرحی از چگونگی آزمایش اولیه یانگ برای تحقیق تداخل امواج نوری را نشان می‌دهد. نور حاصل از یک چشمه تکفام (اینجا سبزرنگ) بر تک شکافی می‌تابد. سپس نور خروجی بر اثر پراش، گسترده میشود و دو شکاف $S1$ و $S2$ 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 ناحیه سمت راست دو شکاف قرار دارد مشاهده کرد. روی پرده، نقطه‌های با تداخل سازنده، نوارها یا فریزهای روشن



را تشکیل میدهند و نقطه‌های با تداخل ویرانگر نوارها یا فریزهای تاریک را تشکیل میدهند. نقش نوارهای روشن و تاریک روی پرده که ناشی از تداخل‌های سازنده و ویرانگرند، نقش تداخلی خوانده می‌شود نقش پهنای هر

نوار تاریک یا روشن (که مساوی فرض می‌شوند) متناسب با طول موج نور به کار رفته در آزمایش است. با استفاده از آزمایش یانگ می‌توان طول موج نور به کار رفته در آزمایش را تعیین کرد که در اینجا به آن نمی‌پردازیم.

موج ایستاده و تشدید در ریسمان:

موج ایستاده موجی است که دامنه‌ی نوسان آن در هر نقطه‌ی خاص در طول محور موج، مقداری ثابت است. در واقع امواج ایستاده از برهم نهی دو موج در یک بعد در ریسمان شکل خاصی به وجود می‌آید. در بعضی از نقاط محیط دو موج هم فاز بوده و دامنه آن‌ها به هم جمع می‌شود که تولید شکم می‌کند و در بعضی از نقاط محیط دو موج در فاز متقابلند و دامنه‌های آن‌ها از هم کم می‌شود که سبب تولید گره می‌گردد.

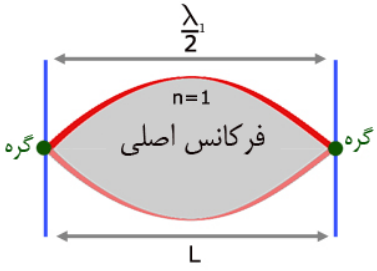
نکته: فاصله دو گره‌ی متوالی(دو شکم متوالی) در امواج ایستاده $\frac{\lambda}{2}$ است.

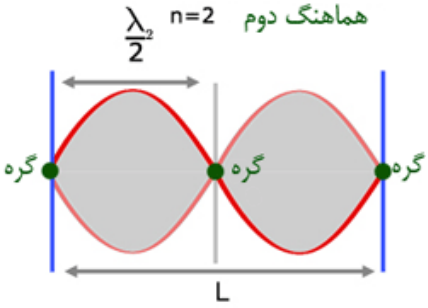
نکته: فاصله‌ی گره تا شکم (و بالعکس) $\frac{\lambda}{4}$ است.

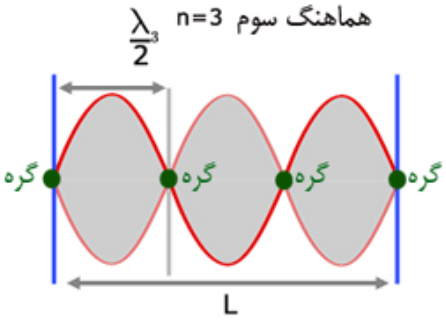
مثال۳: ریسمانی به میله‌ی قائمی متصل است. آن را به نوسان در می‌آوریم. اگر موج درون ریسمان به میله برخورد کند و بازگردد ٤ گره در طول ریسمان تشکیل می‌شود. اگر فاصله‌ی اولین گره تا ابتدای ریسمان ۲ سانتی‌متر باشد، طول ریسمان چند سانتی متر است؟

۱) ۱۲ ۲) ۱٦ ۳) ۱٤ ٥) ۱۸

ریسمان دو سر بسته:







$$L = \frac{n\lambda}{2} \rightarrow \lambda = \frac{2L}{n}$$

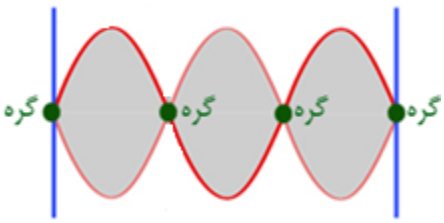
$$f = \frac{V}{\lambda} \rightarrow f = \frac{nV}{2L}$$

$$f_n - f_{n-1} = f_1$$

$$f_n = nf_1$$

مثال٤: سیمی به طول ۱/۲ متر بشکل زیر به ارتعاش درآمده است. اگر بسامد ارتعاش‌ها ٤۰۰ هرتز باشد، سرعت انتشار موج در طول سیم چند متر بر ثانیه است؟[آزاد ریاضی ۸٦]

۱) ۲٤۰ ۲) ۱٦۰ ۳) ٤۸۰ ٤) ۳۲۰



مثال۵: اگر درون تاری که دو سر آن بسته است ۳ شکم تولید شود، طول موج آن تار چند برابر طول تار است؟

۱) $\frac{2}{3}$ ۲) $\frac{3}{2}$ ۳) $\frac{1}{2}$ ٤) $\frac{5}{3}$

مثال٦: اگر در درون تاری فاصله‌ی دو گره‌ی متوالی ۵ سانتی‌متر باشد و در اثر به وجود آمدن امواج ایستاده درون آن ۵ گره تولید شود؛ اگر سرعت انتشار موج درون این تار ۱۰۰ متر بر ثانیه باشد، بسامد ایجاد شده توسط تار چند هرتز است؟

۱) ۱۰ ۲) ۱۰۰ ۳) ۱۰۰۰ ٤) ۵۰

مثال۷: یک تار مرتعش بین دو نقطه بسته شده و در آن ۵ گره تولید می‌شود. اگر طول تار ۱ متر و جرم آن ۲۰ گرم و نیروی کشش تار ۸۰۰ نیوتن باشد، شکل موج ایستاده، طول موج، سرعت موج، بسامد موج و فاصله‌ی اولین گره تا دومین شکم را بدست آورد.

مثال۸: در یک تار مرتعش بطول ۸۰ سانتی‌متر، ۵ گره تولید شده است. اگر سرعت موج عرضی ۳۲۰ متر بر ثانیه باشد طول موج بسامد تولید شده و بسامد اصلی را بدست آورید.

مثال۹: در یک تار مرتعش یک شکم تولید شده و بسامد آن ۱۰۰ هرتز است. اگر نیروی کشش را ۹ برابر کنیم و در آن ۲ شکم ایجاد شود بسامدی چند هرتزی تولید خواهد شد؟

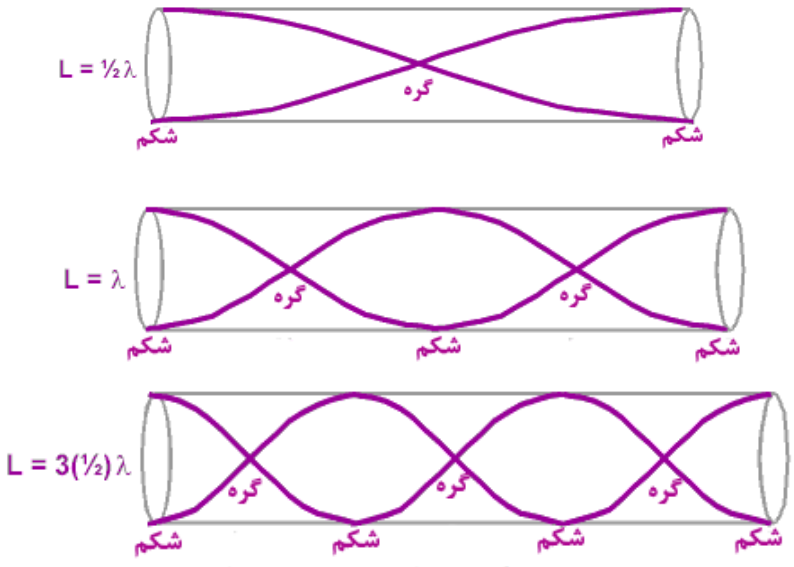
۱) ۵۰۰ ۲) ۶۰۰ ۳) ۱۲۰۰ ٤) ۱۰۰۰

مثال۱۰: تار مرتعشی در مجاورت یک دیاپازون قرار دارد و در آن ۵ گره تولید می‌شود. اگر نیروی کشش تار را ٤ برابر کنیم چند گره در آن تولید می‌شود؟

۱) ۲ ۲) ٤ ۳) ۳ ٤) ۵

موج ایستاده و تشدید در لوله‌های صوتی:

۱) لوله‌ی صوتی باز: اگر محیط دو طرف لوله با محیط داخل لوله یکسان باشد لوله‌ی صوتی را باز می‌نامند.



$$L = \frac{n\lambda}{2} \rightarrow \lambda = \frac{2L}{n}$$

$$f = \frac{V}{\lambda} \rightarrow f = \frac{nV}{2L}$$

$$f_n = nf_1$$

$$f_{n+1} - f_n = f_1$$

مثال۱۱: اگر در لوله‌ی صوتی بازی فاصله‌ی دهانه‌ی لوله تا اولین گره برابر با ۲ سانتی‌متر باشد و لوله صوت سوم خود را بیان کند، طول لوله چند سانتی‌متر است؟

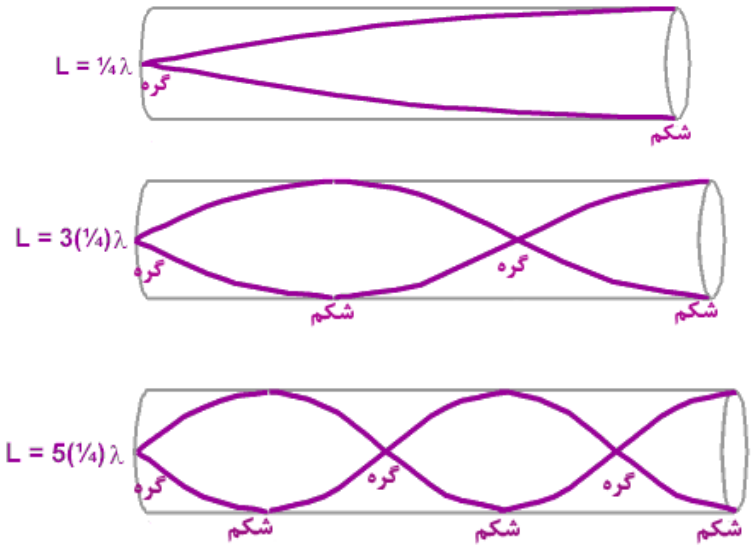
۱) ۱۲ ۲) ۱٤ ۳) ۲٤ ٤) ۱٦

مثال۱۲: دو بسامد متوالی لوله‌ی بازی ۲۱۰ و ۲۸۰ هرتز است. بسامد هفتم لوله چقدر است؟

۱) ۵۹۰ ۲) ٤۹۰ ۳) ۳۸۰ ٤) ۲۸۰

---

۲) لوله‌ی صوتی بسته: اگر انتهای لوله‌ی صوتی بازی به هر طریقی بسته شود(وارد محیط غلیظ تر شود) لوله‌ی صوتی بسته خواهیم داشت. در محل بسته گره تولید می‌شود و در محل باز شکم.



$$L = \frac{(2n-1)\lambda}{4} \rightarrow \lambda = \frac{4L}{(2n-1)}$$

$$f = \frac{V}{\lambda} \rightarrow f = \frac{(2n-1)V}{4L}$$

$$f_n = (2n-1)f_1$$

$$f_{n+1} - f_n = 2f_1$$

تشدید در بطری و تشدیدگر هلمهولتز: اگر در دهانه باریک یک بطری بدمید، میتوانید آن را به صدا درآورید. در واقع یک بطری مانند یک لوله صوتی با یک انتهای باز است که بسامدهای تشدیدی معینی دارد. وقتی در دهانه یک بطری می‌دمیم گستره 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 لوله صوتی ساده ایجاد می‌شود، زیرا بطری یک گردن دارد و هوای موجود در این گردن با هوای موجود در بقیه قسمت‌های بطری چیزی موسوم به تشدیدگر هلمهولتز را تشکیل می‌دهد که این موجب نوسانات هوای درون بطری می‌شود.