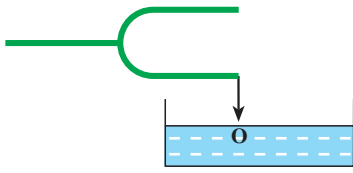


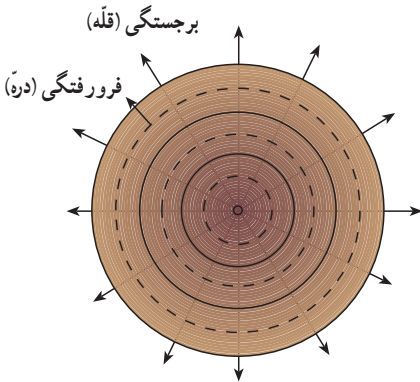
#### ۴-۴- انتشار موج در دو و سه بُعد

اگر مطابق شکل ۴-۱۵ به کمک یک سوزنی که به انتهای یک شاخهٔ دیافازون نصب شده است، ضربه‌هایی را در راستای قائم بر سطح آب درون تشتک وارد کنیم، موج‌های ایجاد شده به صورت دایره‌هایی به مرکز چشمهٔ موج، در سطح آب، یعنی در دو بُعد منتشر می‌شوند.



شکل ۴-۱۵

در شکل ۴-۱۶ دو دسته دایره می‌بینید. دایره‌های توپر، برجستگی‌ها و دایره‌های خط‌چین، فرورفتگی‌ها را در سطح آب نشان می‌دهند. به این دایره‌های در حال انتشار جبههٔ موج می‌گوییم و آن را چنین تعریف می‌کنیم: جبههٔ موج مکان هندسی نقطه‌هایی از محیط است که در آن نقطه‌ها تابع موج دارای فاز یکسانی است. بنابراین، اختلاف فاز نقطه‌های واقع بر یک جبههٔ موج همواره برابر صفر است.

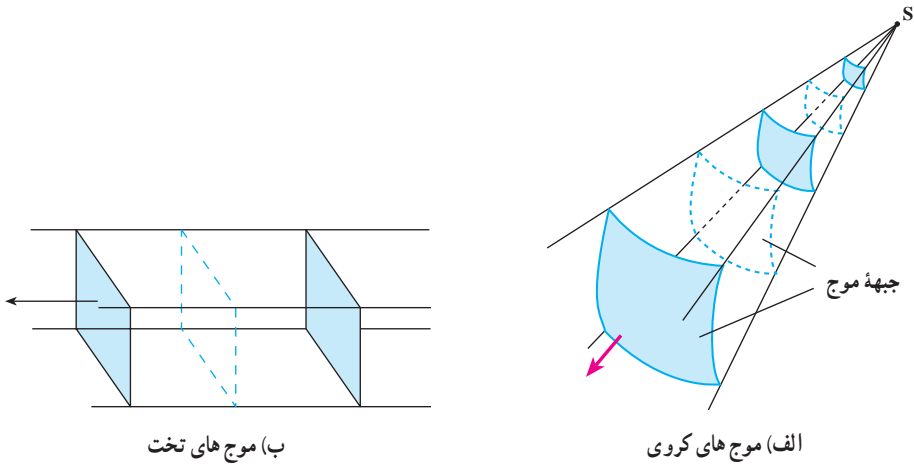


شکل ۴-۱۶

موج‌های سطح آب، نمونه‌ای از انتشار موج در دو بُعد است. موج‌هایی نیز هستند که در سه بُعد منتشر

می‌شوند؛ انتشار موج‌های صوتی و انتشار موج‌های الکترومغناطیسی، نمونه‌هایی از انتشار موج در سه بُعداند. اگر یک چشمهٔ موج نقطه‌ای را در یک محیط همسانگرد سه بُعدی قرار دهیم (مثلاً بلندگوی کوچکی در هوای درون اتاق)، جبههٔ موج به صورت کره‌هایی خواهد بود که مرکز همهٔ آنها، چشمهٔ موج است و از چشمهٔ موج در سه بُعد منتشر می‌شوند و شعاع آنها با انتشار موج به تدریج افزایش می‌یابد. به این موج‌ها، موج کروی می‌گوییم. شکل ۴-۱۷ الف قسمت‌های کوچکی از سطح موج‌ها را که از چشمهٔ موج نقطه‌ای S گسیل می‌شوند نشان می‌دهد.

در فاصلهٔ بسیار دور از یک چشمهٔ موج نقطه‌ای، قسمت‌های کوچکی از جبههٔ موج‌های کروی، همان‌گونه که در شکل ۴-۱۷ ب نشان داده شده است، به صورت صفحه‌هایی موازی یکدیگر درمی‌آیند. در این صورت به آنها موج تخت می‌گوییم.



شکل ۱۷-۴

موج حامل انرژی است: موج‌ها با خود انرژی را از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر منتقل می‌کنند. اگر یک سر طنابی در دست شما باشد و از سر دیگر آن موجی به طرف شما منتشر شود، وقتی موج به دست شما می‌رسد، ضربه‌ی موج می‌خواهد طناب را از دست شما خارج کند. در فصل ۳ دیدیم، انرژی مکانیکی نوسانگر ساده با مجذور دامنه و مجذور بسامد نوسانگر متناسب است.

وقتی یک موج سینوسی با دامنه‌ی  $A$  و بسامد  $f$  در طناب بلند و کشیده شده‌ای پیش می‌رود، همراه با پیشروی موج، انرژی نیز در طناب پیش می‌رود. توان انتقال انرژی از هر نقطه‌ی طناب تابعی از زمان است و با گذشت زمان تغییر می‌کند. مقدار متوسط توان انتقال انرژی از هر نقطه‌ی طناب در مدت زمان یک دوره ( $T$ ) از رابطه زیر به دست می‌آید:

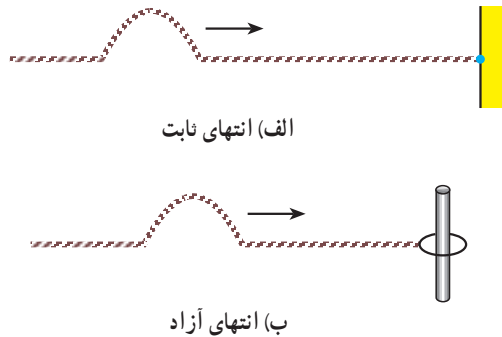
$$\bar{P} = 2\pi^2 A^2 f^2 \mu v \quad (17-4)$$

در رابطه ۱۷-۴،  $\mu$ ، جرم واحد طول طناب و  $v$  سرعت انتشار موج در طناب است. اینکه مقدار متوسط توان انتقال انرژی از هر نقطه‌ی طناب با مجذور دامنه و مجذور بسامد موج متناسب است، در مورد انتشار موج سینوسی در سایر محیط‌ها نیز درست است (مثلاً انتشار امواج سینوسی روی سطح آب یا انتشار امواج صوتی سینوسی در هوا).

بازتاب موج: فرض کنید موجی در یک محیط در حال انتشار است. به نظر شما وقتی این موج

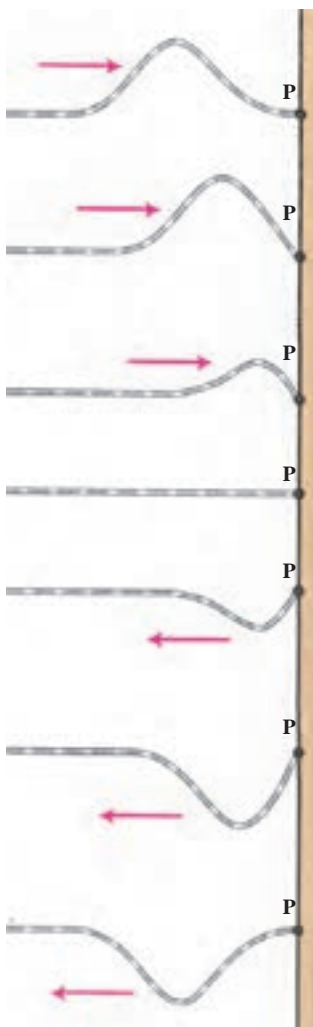
به انتهای محیط، یعنی مرز این محیط با محیط دیگر، می‌رسد چه پدیده‌ای رخ می‌دهد؟  
 مقداری از انرژی این موج از مرز مشترک دو محیط عبور می‌کند و وارد محیط دوم می‌شود و بقیه آن از مرز مشترک بازتاب شده و به محیط اول برمی‌گردد.  
 برای بررسی پدیده بازتاب، باید، اولاً فرض کنیم که تمام انرژی موج از مرز مشترک دو محیط بازتاب شده و به محیط اول برمی‌گردد و ثانیاً اصطکاک ناچیز است و انرژی موج هم تلف نمی‌شود.  
 نتیجه به دست آمده در این مورد در مورد دیگر موج‌های مکانیکی، نظیر موج‌های صوتی و نیز موج‌های الکترومغناطیسی، درست است.

برای این بررسی، فرض می‌کنیم که یک تپ روی یک طناب در حال انتشار است. بازتاب تپ (موج) از انتهای طناب به نحوه اتصال انتهای طناب بستگی دارد. انتهای طناب، ممکن است محکم به یک دیوار ثابت شده باشد. در این صورت، انتهای طناب را انتهای ثابت یا بسته می‌نامیم (شکل ۱۸-۴ الف). همچنین ممکن است، انتهای طناب به حلقه بسیار سبکی وصل شده باشد و بتواند روی میله قائمی بدون اصطکاک، بالا و پایین برود (شکل ۱۸-۴ ب). در این حالت، انتهای طناب انتهای آزاد نامیده می‌شود. بدین ترتیب، انتهای ثابت نمی‌تواند نوسان کند، در صورتی که انتهای آزاد برای نوسان آزاد است.



شکل ۱۸-۴

بازتاب از انتهای ثابت: وقتی تپ مطابق شکل ۱۹-۴ به انتهای ثابت P می‌رسد، جزء کوچکی از طناب که در مجاورت نقطه P قرار دارد، به آن نیرویی رو به بالا وارد می‌کند تا نقطه P را به نوسان وادارد. نقطه P ثابت است و نمی‌تواند جابه‌جا شود، بنا به قانون سوم نیوتون، به طناب نیرویی رو به

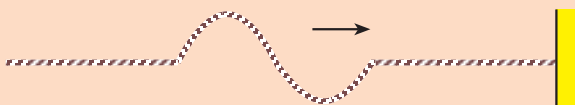


پایین وارد می‌کند. این درست مانند آن است که انتهای طناب را با دست گرفته و رو به پایین بکشیم و در آن تپی رو به پایین ایجاد کنیم. در واقع در این بازتاب، تپ مانند یک چشمه موج عمل می‌کند و یک تپ در خلاف جهت، تپ تابشی (فرودی) در طناب ایجاد می‌کند که برجستگی را به فرورفتگی و فرورفتگی را به برجستگی تبدیل می‌کند (به حالت‌های مختلف شکل ۴-۱۹ توجه کنید). تپ باز تابیده، در خلاف جهت تپ تابشی، روی طناب منتشر می‌شود.

شکل ۴-۱۹- انتهای طناب ثابت است.

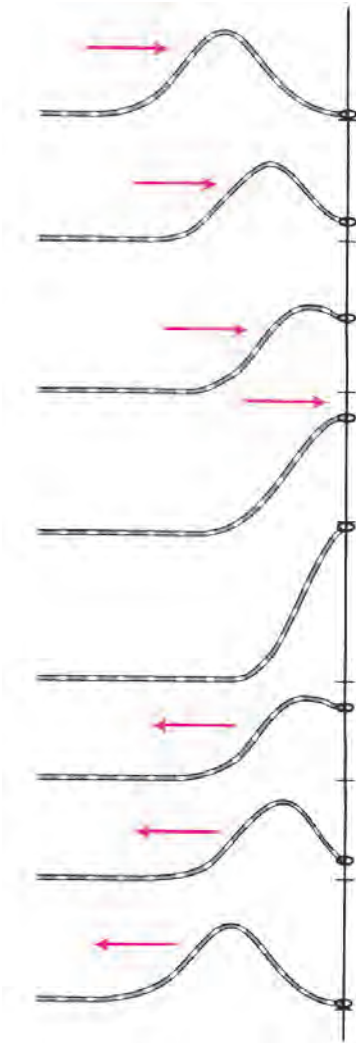
### تمرین ۴-۶

در شکل ۴-۲۰ تپی روی طنابی در حال انتشار است. شکل تپ بازتاب آن را از انتهای ثابت طناب، رسم کنید.



شکل ۴-۲۰

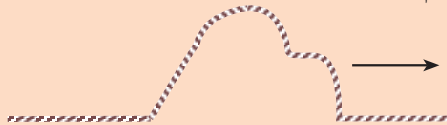
بازتاب از انتهای آزاد : اگر انتهای طناب آزاد باشد، وقتی تپ به آن می‌رسد، طناب را در جهت خود به حرکت درمی‌آورد. در شکل ۴-۲۱ تپ تابشی، انتهای طناب را بالا می‌کشد. در این حالت همان طور که شکل نشان می‌دهد، انتهای طناب به قله‌ای می‌رسد که جابه‌جایی آن از وضع تعادل، دو برابر جابه‌جایی سایر نقطه‌های طناب است. در این حالت، انتهای طناب، مانند چشمه موجی عمل می‌کند که در طناب، تپی در جهت تپ تابشی ایجاد می‌کند که در خلاف جهت آن در طناب منتشر می‌شود. درست مانند آنکه انتهای طناب را با دست گرفته و بالا برده و به جای اول برگردانیم. بنابراین، در انتهای آزاد، برجستگی به صورت برجستگی، و فرورفتگی به صورت فرورفتگی، بازتاب می‌شود.



شکل ۴-۲۱- انتهای طناب آزاد است.

### تمرین ۴-۷

تپی مانند شکل ۴-۲۲ در طنابی در حال انتشار است. شکل تپ بازتابی آن را از انتهای آزاد طناب، رسم کنید.



شکل ۴-۲۲

#### ۴-۵- اصل برهم نهی موج ها

وقتی در یک مکان شلوغ و پُر سر و صدا در حال حرکت هستید، صداهاى مختلفی از چشمه های صوتی متفاوت به گوش شما می رسد. هرچند انسان قادر است، گوش خود را روی صدای خاصی متمرکز کند و آن را بشنود، اما صداهاى مختلف همگی و با هم در هوا منتشر می شوند و انتشار یک صوت مانع انتشار صوت های دیگر نمی شود.

به شکل ۴-۲۳ نگاه کنید، در سطح آب دریاچه، موج هایی هم زمان در حال انتشارند. این موج ها، هر یک به طور مستقل به انتشار خود ادامه می دهند.

مثال های بالا به طور عملی نشان دهنده اصلی

به نام اصل برهم نهی هستند. مطابق این اصل :

هر موج در حال انتشار، بدون آنکه برای انتشار سایر موج ها مزاحمتی ایجاد کند، از آنها عبور کرده و به انتشار خود ادامه می دهد؛ درست مانند آنکه هیچ موج دیگری در محیط منتشر نمی شود. در نقطه ای که دو و یا چند موج با هم تلاقی می کنند، جابه جایی

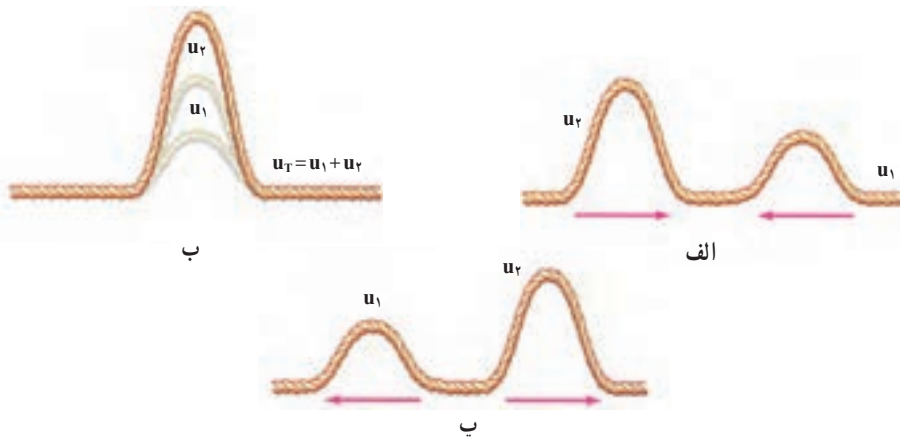
ذره ای از محیط که در آن نقطه است، برابر برآیند جابه جایی های حاصل از هر یک از موج ها است.

$$\vec{u}_T = \vec{u}_1 + \vec{u}_2 + \dots$$

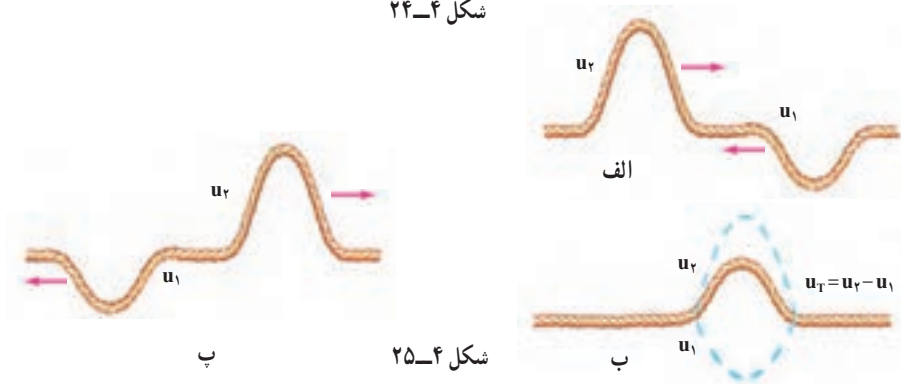
(۴-۱۸)

به حالت های مختلف شکل ۴-۲۴ نگاه کنید. در حالت (الف) دو تپ عرضی در طول طناب به طرف یکدیگر در حال انتشارند. این دو تپ در حالت (ب) به یکدیگر رسیده اند و چون جابه جایی حاصل از دو تپ، هم جهت اند، برآیند آنها برابر مجموع اندازه جابه جایی های حاصل از هر یک شده است. در این حالت (ب) می گوئیم : برهم نهی موج ها سازنده است. در حالت (پ) دو تپ از یکدیگر عبور کرده و به انتشار خود ادامه داده اند.

در حالتی که جابه جایی ها در خلاف جهت یکدیگر باشند جابه جایی برآیند برابر تفاضل اندازه جابه جایی هایی است که هر تپ به تنهایی در جزیی از طناب که با هم به آن رسیده اند، ایجاد می کند. به حالت های مختلف شکل ۴-۲۵ توجه کنید. در این حالت (ب) می گوئیم : برهم نهی موج ها، ویرانگر است.



شکل ۲۴-۴

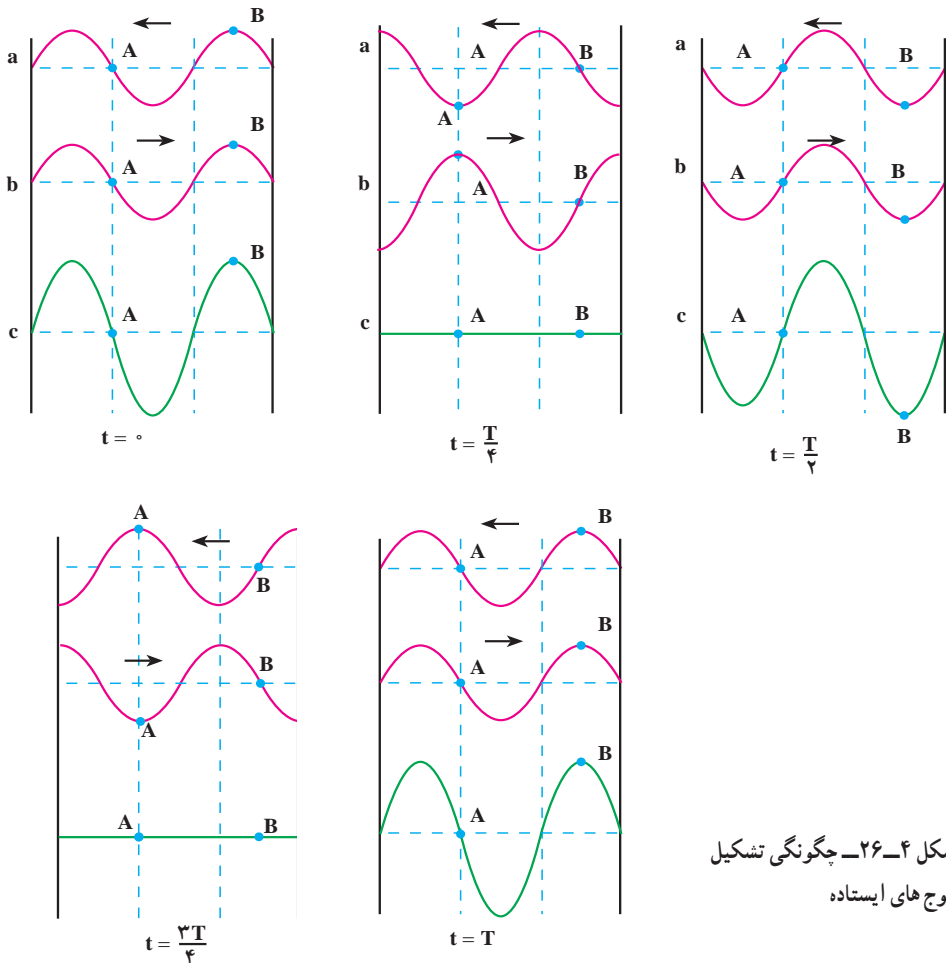


شکل ۲۵-۴

برهم نهی موج‌ها در یک بُعد؛ موج‌های ایستاده: فرض کنید که دو چشمه موج با دامنه و بسامد یکسان  $A$  و  $f$  یکی در ابتدا و دیگری در انتهای یک طناب کشیده شده، شروع به نوسان کرده و نوسان‌هایی هم راستا ایجاد کنند. موج‌های حاصل از این دو چشمه یکسان، به سوی یکدیگر، منتشر می‌شوند. وقتی هریک از دو موج در تمام طول طناب گسترده شده باشد، به هر جزء طناب در هر لحظه دو موج می‌رسد. بنا به اصل برهم نهی، جابه‌جایی هر جزء طناب در هر لحظه، برابر برآیند جابه‌جایی‌هایی است که هریک از دو موج در آن لحظه در آن جزء ایجاد می‌کنند. وضعیت نوسانی هر نقطه بستگی به مکان آن نقطه در طناب دارد. از برهم نهی چنین دو موجی در طناب شکل خاصی به وجود می‌آید که به آن موج ایستاده گفته می‌شود.

گره و شکم: به بعضی از نقطه‌های طناب در هر لحظه دو موج می‌رسد که در آن نقطه جابه‌جایی‌هایی یکسان اما در خلاف جهت ایجاد می‌کنند. در نتیجه برهم نهی دو موج در چنین نقطه‌هایی ویرانگر و جابه‌جایی آنها از وضع تعادل صفر است. به این نقطه‌ها که همواره ساکن می‌مانند گره می‌گویند و آنها را با  $N$  نشان می‌دهند. جای گره‌ها در طول طناب ثابت است.

به حالت‌های مختلف شکل ۴-۲۶ توجه کنید. در این حالت‌ها و در هر یک از لحظه‌های مشخص شده، موجی را که از راست به چپ منتشر می‌شود با  $a$  و موجی را که از چپ به راست شده، در حال انتشار است با  $b$  و حاصل برهم نهی این دو موج را با  $c$  نشان داده و هر یک را جداگانه رسم کرده‌ایم. در واقع، حالت‌های  $c$  وضعیت طناب را هنگامی که موج‌های  $a$  و  $b$  روی آن منتشر می‌شوند، در بازه‌های زمانی  $\frac{T}{4}$  (دوره موج است) نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۶- چگونگی تشکیل موج‌های ایستاده

در حالت‌های مختلف شکل ۴-۲۶ به نقطه  $A$  توجه کنید. موج‌های  $a$  و  $b$  در هر لحظه به این نقطه، جابه‌جایی‌هایی هم اندازه اما در خلاف جهت می‌دهند. در نتیجه، همان‌گونه که حالت‌های  $c$  در لحظه‌های مختلف نشان می‌دهد، نقطه  $A$  همواره ساکن می‌ماند. نقطه  $A$  یک گره است.



## پرسش ۲-۴

در شکل ۲۶-۴ گره‌های دیگری نیز وجود دارند. آنها را مشخص کنید.

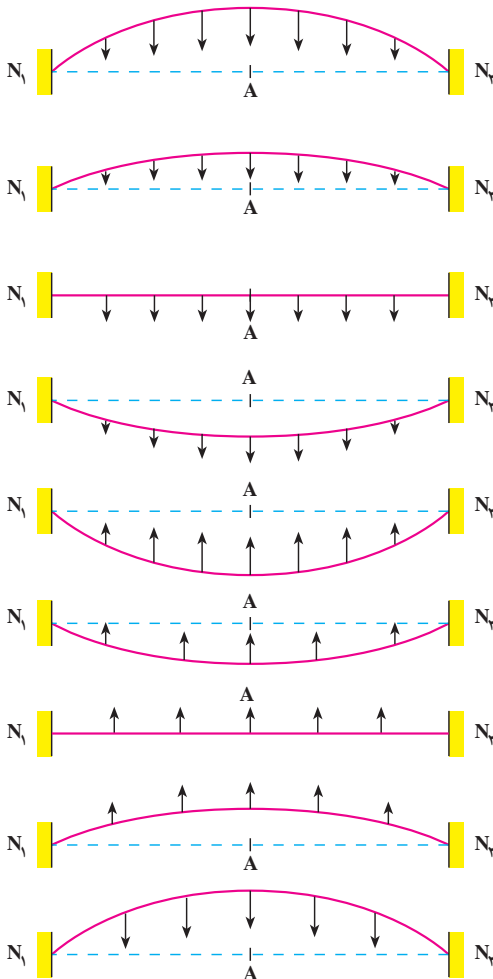
به بعضی نقطه‌های دیگر طناب نیز در هر لحظه دو موج می‌رسد، با این تفاوت که در این نقطه‌ها برهم نهی به گونه‌ای است که باعث می‌شود موج برآیند، با بیشینه دامنه نوسان کند. به این نقطه‌ها شکم، یا پادگره، می‌گویند و آنها را با A نشان می‌دهند. جای شکم‌ها نیز، مانند گره‌ها، ثابت است. در حالت‌های مختلف شکل ۲۶-۴ یکی از شکم‌ها را با نام B مشخص کرده‌ایم. نقطه B در مکانی واقع شده است که برهم نهی حاصل از دو موج a و b آن را با بیشینه دامنه به نوسان وا می‌دارد. نقطه B یک شکم است.

## پرسش ۳-۴

آیا در حالت‌های مختلف شکل ۲۶-۴ شکم دیگری نیز وجود دارد؟ اگر پاسخ شما مثبت است، آن را مشخص کنید.

محاسبه نشان می‌دهد که وقتی در طنابی یک موج ایستاده تشکیل می‌شود، فاصله دو گره متوالی برابر فاصله دو شکم متوالی و برابر نصف طول موج است. همچنین فاصله یک گره و شکم متوالی برابر ربع طول موج است. به همین دلیل برای آنکه موج ایستاده در طناب ایجاد شود باید بین طول طناب و طول موج رابطه معینی برقرار باشد. این رابطه به بسامد نوسان‌ها، سرعت انتشار موج در طناب (در نتیجه به نیروی کشش طناب و جرم واحد طول آن) و طول طناب بستگی دارد. علاوه بر این کمیت‌ها، این رابطه به ثابت و یا آزاد بودن انتهای طناب نیز بستگی دارد. در ادامه سعی می‌کنیم این رابطه را به دست آوریم.

یکی از روش‌های ایجاد دو موج کاملاً یکسان، که در خلاف جهت یکدیگر در طناب کشیده شده، آن است که یک سر طناب را به کمک یک دیافازون به نوسان درآوریم. این نوسان‌ها از انتهای طناب، بازتاب شده و با موج‌های فرودی برهم نهاده می‌شوند و موج ایستاده را به وجود می‌آورند. برای بررسی، می‌توان دو حالت الف: دو سر طناب ثابت و ب: یک سر ثابت و سر دیگر آزاد، را در نظر گرفت.



شکل ۲۷-۴

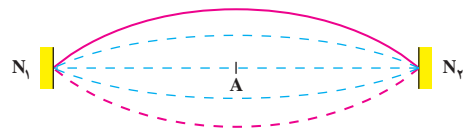
این کتاب تنها وضعیتی که دو سر طناب ثابت است، بررسی می‌شود. در این بررسی، فرض شده است که تعداد گره‌ها و شکم‌ها در طول طناب کمترین تعداد ممکن باشد.

چون انتهای ثابت نمی‌تواند نوسان کند، در دو انتهای (دو سر) طناب، همواره گره ایجاد می‌شود. حالت‌های مختلف شکل ۲۷-۴ وضعیت طناب را در لحظه‌های مختلف و در یک دوره نشان می‌دهد.

در این شکل‌ها، خط چین  $N_1AN_1$ ، وضعیت تعادل طناب را نشان می‌دهد. در شکل ۲۸-۴ حالت‌های مختلف شکل ۲۷-۴ نشان داده شده است.

اگر طول طناب  $L$  باشد، با توجه به آنچه که بیان شد، فاصله دو گره متوالی برابر نصف طول موج است. در این حالت می‌توان نوشت:

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad (۱۹-۴)$$



شکل ۲۸-۴

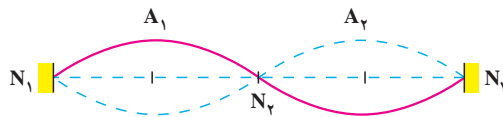
اگر بسامد نوسان  $f$  و سرعت انتشار موج در طناب  $v$  باشد، با استفاده از رابطه ۶-۴ خواهیم

داشت:

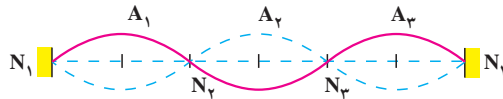
$$\lambda = \frac{v}{f} \Rightarrow 2L = \frac{v}{f}$$

$$f_1 = \frac{v}{2L} \quad (20-4)$$

در آلات موسیقی سیمی (زهی) مانند تار، ویلون و... ارتعاش‌های ایجاد شده توسط مضراب و یا آرشه و... در سیم منتشر می‌شود و از دو انتهای ثابت تار بازتاب می‌یابد که از برهم نهی آنها در طول سیم موج ایستاده تشکیل می‌شود. اگر یک سیم (تار مرتعش)، به گونه‌ای مرتعش شود که مانند شکل ۲۷-۴ یک شکم در وسط و دو گره در طرفین آن تشکیل شود، گفته می‌شود که تار بسامد اصلی خود را تولید کرده است. این بسامد از رابطه ۲-۴ به دست می‌آید. یک طناب (یا یک تار) را می‌توان به گونه‌ای به نوسان درآورد که تعداد گره‌ها و شکم‌های تشکیل شده در طول آن از حالت اصلی بیشتر باشد. شکل‌های ۲۹-۴ و ۳۰-۴ وضعیت‌هایی را نشان می‌دهد که در آنها به ترتیب دو و یا سه شکم تشکیل شده است.



شکل ۲۹-۴



شکل ۳۰-۴

با کمی دقت معلوم می‌شود که: وقتی روی طنابی موج ایستاده تشکیل می‌شود در حالی که دو انتهای آن ثابت است، طول طناب مضرب صحیحی از نصف طول موج است.

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad (21-4)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

رابطهٔ اخیر را می‌توان برحسب بسامد به صورت زیر نوشت:

$$f_n = \frac{nv}{2L} = nf_1 \quad (22-4)$$

روشن است که به ازای  $n = 1$ ، بسامد اصلی به دست می‌آید. اگر  $n = 2$  باشد ( $f_2 = 2f_1$ ) به آن هماهنگ و یا مُد دوم و به همین ترتیب سوم، چهارم و... گفته می‌شود.

## مثال ۱-۱

دو سر طنابی ثابت شده است. وقتی طناب را به ارتعاش درمی آوریم، در آن موج ایستاده تشکیل می شود. اگر طول طناب  $60\text{ cm}$  و در آن ۳ گره ایجاد شده باشد؛ الف: طول موج و ب: بسامد نوسان طناب را به دست آورید. سرعت انتشار موج در طناب  $240\text{ m/s}$  است.

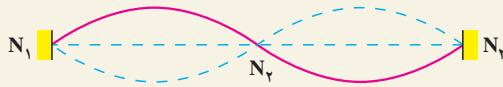
پاسخ

الف) شکل ۴-۳۱ وضعیت نوسانی طناب را نشان می دهد. با توجه به شکل، معلوم می شود که  $n = 2$  است. با استفاده از رابطه ۴-۲۱ داریم:

$$L = n \frac{\lambda_n}{2}$$

$$60 = 2 \frac{\lambda_2}{2}$$

$$\lambda_2 = 60\text{ cm}$$



شکل ۴-۳۱

ب) با استفاده از رابطه  $\lambda = \frac{v}{f}$  داریم:

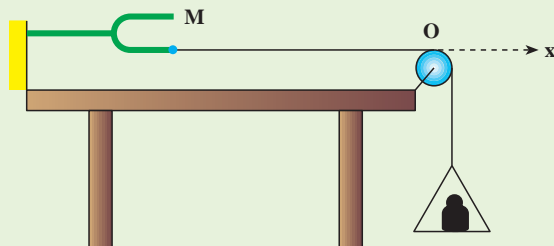
$$0.6 = \frac{240}{f} \Rightarrow f = 400\text{ Hz}$$

همان طور که دیدیم برای آنکه در طول طناب موج ایستاده تشکیل شود، باید رابطه ۴-۲۱ برقرار شود. برای برقراری این رابطه می توان طول طناب و یا نیروی کششی طناب و در نتیجه سرعت انتشار موج در طناب را تغییر داد.

## فعالیت ۴-۵

اگر در آزمایشگاه دبیرستان شما، دیاپازونی با نوسان پایدار (مانند آنچه که بیشتر توضیح داده شد) موجود است، آزمایش زیر را انجام دهید و موج ایستاده را در طناب مشاهده کنید.

مطابق شکل ۴-۳۲ یک سر طناب نازکی را به دیپازون وصل کنید و سر دیگر آن را از روی قرقره ثابتی بگذرانید و به آن کفه‌ای آویزان کنید. وزن کفه و وزنه درون آن، نیروی کشش را در طناب ایجاد می‌کند. وقتی دیپازون را به نوسان درمی‌آورید، در طناب موج ایجاد می‌شود. موج‌ها از انتهای ثابت O بازتاب می‌یابند و با موج‌های فرودی، برهم نهاده می‌شوند. با تغییر وزنه درون کفه، می‌توانید نیروی کشش طناب و در نتیجه سرعت انتشار موج را در آن تغییر دهید. با این کار، بیشترین مقدار وزنه را که به ازای آن در نقطه‌های O و M گره و در وسط آنها شکم تشکیل می‌شود، به دست آورید. با کاهش وزنه درون کفه، حالت‌هایی را به وجود آورید که تعداد گره و شکم‌ها بیشتر شوند. با جایگزین



شکل ۴-۳۲

کردن دیپازونی که بسامد دیگری دارد چه تغییری در آزمایش رخ می‌دهد؟ نتیجه این آزمایش را چگونه توجیه می‌کنید؟

#### ۴-۶- برهم نهی موج‌ها در دو بُعد - تداخل موج‌ها در سطح آب

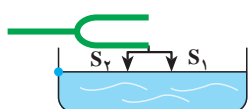
در بخش قبل، برهم نهی دو موج کاملاً یکسان را در طناب یا تار بررسی کردیم. در این بخش به بررسی برهم نهی موج‌هایی می‌پردازیم که در دو بُعد، مثلاً در سطح آب، منتشر می‌شوند.



با یک دیپازون، دو چشمه موج  $S_1$  و  $S_2$  را ایجاد می‌کنیم (شکل

۴-۳۳). طول سوزن‌های  $S_1$  و  $S_2$  با هم برابرند.

شکل ۴-۳۳

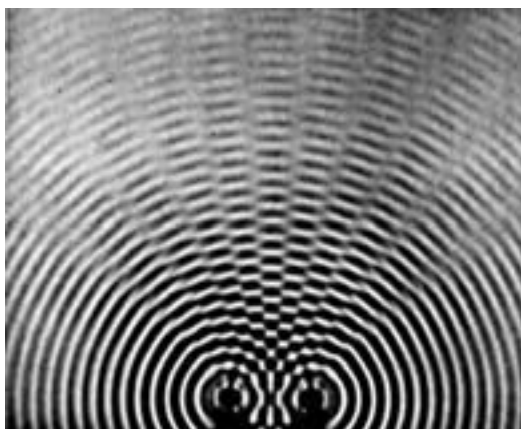


شکل ۴-۳۴

اکنون دیپازون را مطابق شکل ۴-۳۴ با سطح آب درون تشتکی در تماس قرار می‌دهیم و برای جلوگیری از بازتاب موج از روی دیواره تشتک، دور تا دور دیواره را اسفنج نازکی می‌چسبانیم. در این صورت، موج‌ها وقتی به دیواره می‌رسند، توسط اسفنج، جذب می‌شوند. حال اگر

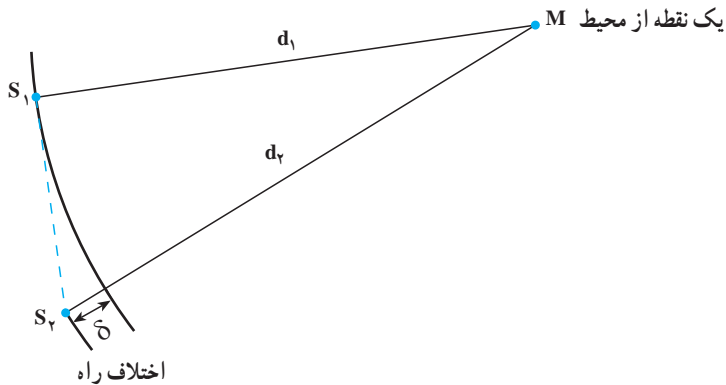
دیپازون را به نوسان درآوریم، موج‌های دایره‌ای حاصل از هریک از دو چشمه  $S_1$  و  $S_2$  در سطح آب منتشر می‌شوند. در نتیجه به هر ذره آب که در سطح آب تشتک قرار دارد، هم‌زمان دو موج می‌رسد. بنابراین وضعیت نوسانی ذره‌های آب، حاصل برهم‌نهی دو موجی است که با هم به هر ذره می‌رسند. در اینجا هم مانند تشکیل موج‌های ایستاده روی طناب، بعضی از ذره‌های سطح آب در هر لحظه دو موج دریافت می‌کنند که این دو موج می‌خواهند در هر ذره جابه‌جایی‌های هم‌اندازه اما در خلاف جهت یکدیگر ایجاد کنند، در نتیجه، برهم‌نهی دو موج در این نقاط، ویرانگر است و این ذره‌ها مانند گره‌ها، ساکن می‌مانند. مکان بعضی ذره‌ها طوری است که برهم‌نهی دو موجی که در هر لحظه به آنها می‌رسند، سازنده است و ذره‌های واقع در این مکان‌ها مانند شکم‌ها در موج ایستاده روی طناب، با بیشینه دامنه، نوسان می‌کنند. در طناب که محیطی یک بُعدی است، تعدادی نقطه گره و شکم به طور متوالی تشکیل می‌شود اما در اینجا که سطح آن دو بُعدی است، نقطه‌های گره مشابه و نیز نقطه‌های شکم مشابه بی‌شماری وجود دارد.

شکل ۴-۳۵ تصویری را نشان می‌دهد که حاصل برهم‌نهی آزمایشی مشابه آزمایش یادشده بالا (به شکل ۴-۳۴ نگاه کنید) است. این پدیده را تداخل موج‌ها می‌نامیم. شرط ایجاد چنین وضعیتی، یعنی شرط ایجاد تداخل موج‌ها، آن است که دو چشمه موج، هم‌بسامد و هم‌فاز باشند.



شکل ۴-۳۵

طرح تداخلی تشکیل شده توسط دو چشمه موج به اختلاف فاصله هر نقطه محیط از این چشمه‌ها که به آن اختلاف راه گفته می‌شود، بستگی دارد (شکل ۴-۳۶).



شکل ۴-۳۶

اگر این اختلاف راه مضرب زوجی از نصف طول موج باشد، موجی که از هر دو چشمه به این نقطه می‌رسد هم‌فاز و بر هم نهی آنها سازنده است و اگر اختلاف راه هر نقطه از محیط مضرب فردی از نصف طولی موج باشد در هر لحظه دو موج با فاز مخالف به این نقطه خواهد رسید که بر هم نهی ویرانگری با هم خواهند داشت.

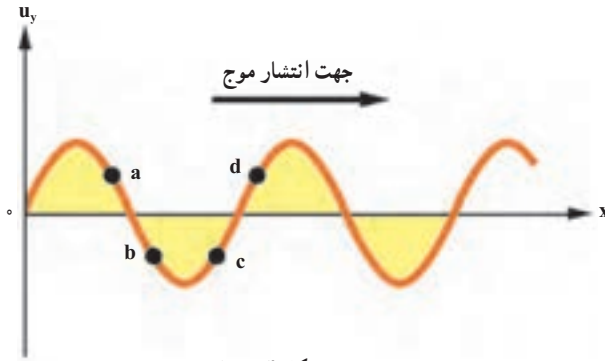
## تمرین‌های فصل چهارم

۱- موج طولی و عرضی را تعریف کنید. تحقیق کنید که چه نوع موجی می‌تواند در جامد، مایع و یا گاز منتشر شود.

۲- نوسان‌های حاصل از چشمه موجی با بسامد  $200 \text{ Hz}$  با سرعت  $100 \text{ m/s}$  در یک محیط منتشر می‌شود. اگر چشمه موج دیگری با بسامد  $150 \text{ Hz}$  را جایگزین چشمه اولی کنیم، نوسان‌های آن با چه سرعتی در این محیط منتشر می‌شود؟ برای پاسخ خود دلیل بیاورید.

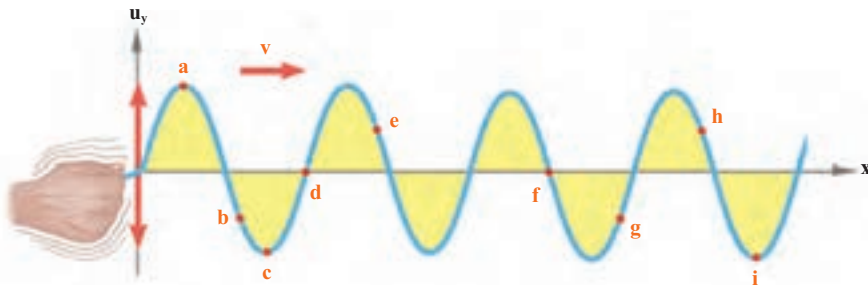
۳- شکل ۴-۳۷ نقش موجی  $1$  را در یک لحظه معین  $t$  نشان می‌دهد که در جهت مثبت محور  $x$  در طول طناب تحت کششی حرکت می‌کند. چهار جزء طناب با حروف در آن نقطه‌ها مشخص شده‌اند. برای هر یک از این جزءها معین کنید که آیا در لحظه معین  $t$ ، آن جزء به بالا حرکت می‌کند یا پایین، یا به‌طور لحظه‌ای ساکن است.

۱- منظور از نقش موج، تصویر یک موج در یک لحظه مشخص است.



شکل ۴-۳۷

۴- شکل ۳۸-۴ موجی عرضی را نشان می‌دهد که در جهت مثبت محور  $x$  در امتداد طناب تحت کششی در حال انتشار است. روی این شکل چند نقطه از طناب با حروف مشخص شده است. الف) نقاط هم فاز را بنویسید. ب) نقاط با فاز مخالف را بنویسید. پ) شتاب نوسانی در کدام نقطه‌ها صفر است؟ ت) جهت سرعت نوسانی کدامیک از نقطه‌ها برخلاف جهت مثبت محور  $y$  است. ث) دست کم یک نقطه با نام  $O$  روی شکل مشخص کنید که با سرعت بیشینه در جهت  $+y$  در نوسان است.

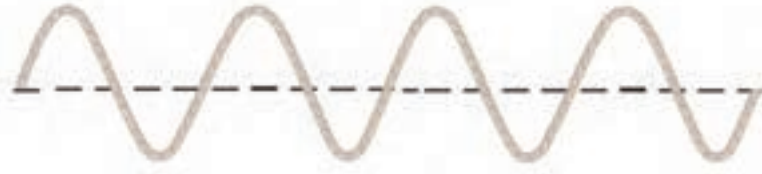


شکل ۴-۳۸

۵- سرعت انتشار موج در طنابی به طول  $L$  با نیروی کشش  $F$  برابر  $v$  است. اگر طول طناب را نصف کنیم اما نیروی کشش را ثابت نگه داریم سرعت انتشار در آن چند برابر می‌شود؟



۶- شکل ۴-۳۹، نقش یک موج را در یک لحظه نشان می‌دهد. این شکل را در دفتر خود کپی کنید و بر روی آن موج دیگری رسم کنید که طول موج آن دو برابر و دامنه آن نصف باشد. دامنه و طول موج را روی شکل مشخص کنید.



شکل ۴-۳۹

۷- سیمی به چگالی  $7/8 \text{ g/cm}^3$  و سطح مقطع  $5 \text{ mm}^2$  بین دو نقطه با نیروی  $156 \text{ N}$  کشیده شده است. سرعت انتشار موج را در این سیم محاسبه کنید.

۸- دو موج با بسامدهای  $50 \text{ Hz}$  و  $75 \text{ Hz}$  در یک محیط منتشر می‌شوند.

الف) سرعت انتشار موج دوم چند برابر سرعت انتشار موج اول است؟

ب) طول موج برای موج دوم چند برابر طول موج برای موج اول است؟

۹- تابع یک موج در یک محیط، در SI، به صورت  $u_y = 2 \times 10^{-2} \sin(50\pi t - \frac{\pi}{4} x)$

است.

الف) این موج طولی است یا عرضی؟

ب) دامنه، بسامد، طول موج و سرعت انتشار را به دست آورید.

پ) معادله نوسان نقطه‌های واقع در  $x = \pm 5 \text{ m}$  را تعیین کنید.

۱۰- چشمه موجی با بسامد  $10 \text{ Hz}$  در یک محیط که سرعت انتشار موج در آن  $100 \text{ m/s}$

است، نوسان‌هایی طولی ایجاد می‌کند. اگر دامنه نوسان‌ها  $4 \text{ cm}$  باشد، تابع موجی را که در راستای محور  $y$  منتشر می‌شود بنویسید.

۱۱- شکل ۴-۴۰ نمودار نقش دو موج را در لحظه معینی نشان می‌دهد که با سرعت یکسان

$12 \text{ m/s}$  به طرف راست در حرکت‌اند.

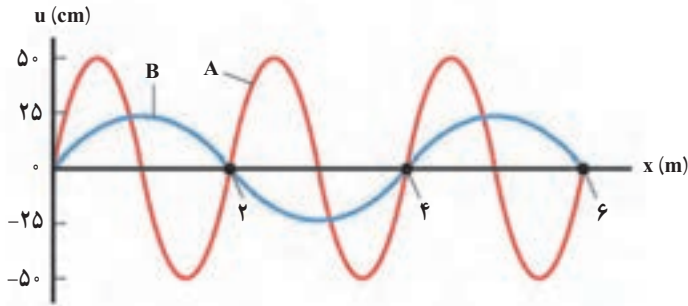
الف) با توجه به اطلاعات روی نمودار، طول موج هر کدام از موج‌ها را پیدا کنید.

ب) بسامد هر موج چقدر است؟

پ) بیشینه سرعتی که هر موج به ذره‌های محیط کشسان می‌دهد تا حول وضع تعادلشان به نوسان

درآیند، چقدر است؟

ت) معادله هر موج را در SI بنویسید.



شکل ۴-۴۰

۱۲- موجی در یک محیط در حال انتشار است. معادله نوسان دو نقطه A و B از این محیط به صورت زیر است:

$$u_A = 0.2 \sin(50\pi t - \frac{\pi}{8}x)$$

$$u_B = 0.2 \sin(50\pi t - \frac{\pi}{12}x)$$

فاصله این دو نقطه را از یکدیگر، به دست آورید. سرعت انتشار موج در محیط را  $200 \text{ m/s}$  فرض کنید.

۱۳- جرم یک سیم پیاپی به طول  $0.8 \text{ m}$  برابر  $6 \text{ g}$  و نیروی کشش آن  $432 \text{ N}$  است. این سیم به گونه‌ای به نوسان درمی‌آید که در طول آن، دو شکم تشکیل می‌شود؛ بسامد صوتی که ایجاد می‌شود، محاسبه کنید. بسامد اصلی این سیم چند هرتز است؟

۱۴- در سطح آب درون یک تشتک دو چشمه موج،  $S_1$  و  $S_2$ ، ارتعاش‌هایی با بسامد  $20 \text{ Hz}$  ایجاد می‌کنند. فاصله یک نقطه M در سطح آب از دو چشمه  $d_1 = 12/5 \text{ cm}$  و  $d_2 = 5 \text{ cm}$  است. اگر سرعت انتشار موجود در سطح آب  $5 \text{ m/s}$  باشد، دو موجی که با هم به این نقطه می‌رسند، نسبت به هم در چه وضعی خواهند بود؟

۱۵- نشان دهید اگر سرعت انتشار موج سینوسی در طناب برابر  $v$  باشد، انرژی موج در طولی از طناب که برابر یک طول موج است از رابطه  $E = 2\pi^2 \mu v f A^2$  به دست می‌آید.

اگر دامنه موج  $5 \text{ cm}$  و بسامد آن  $4 \text{ Hz}$ ، سرعت انتشار  $20 \text{ m/s}$  و جرم واحد طول طناب  $0.2 \text{ kg/m}$  باشد، انرژی موج را در یک طول موج محاسبه کنید. ( $\pi^2 \approx 10$ )