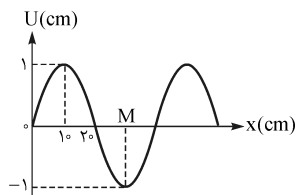




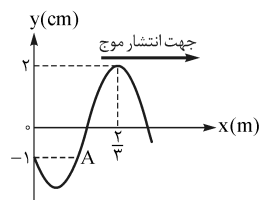
۱۲۸- شکل موجی در لحظه‌ی  $t = 0$ ، مطابق شکل است. موج با سرعت  $4 \text{ m/s}$  در حال انتشار در سوی محور  $x$  است. سرعت نقطه‌ی  $M$  از این محیط، در لحظه‌ی  $t = 0.25 \text{ s}$ ، چند  $\text{cm/s}$  است؟



(سراسری ریاضی - ۸۴)

- (۱)  $-1 \cdot \pi$  (۲)  $+1 \cdot \pi$   
(۳)  $-2 \cdot \pi$  (۴)  $+2 \cdot \pi$

۱۲۹- نقش موجی در لحظه‌ی  $t = 0$ ، مطابق شکل است. اگر سرعت انتشار موج  $10 \text{ m/s}$  باشد، در لحظه‌ی



(سراسری ریاضی - ۸۷)

$t = \frac{1}{6} \text{ s}$  مکان نوسانگر  $A$  چند سانتی‌متر است؟

- (۱)  $-1$  (۲)  $1$  (۳)  $-2$  (۴)  $2$

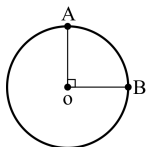
### واحد ۳ انتشار موج در دو و سه بُعد

۱۳۰- جبهه‌ی موج مکان هندسی نقطه‌هایی از محیط انتشار موج است که در آن نقطه‌ها، تابع موج دارای ..... یکسانی است.

(آزمایشی آموزش و پرورش شهر تهران - ۸۴، با ویرایش فیزی)

- (۱) طول موج (۲) فاز (۳) بسامد (۴) بسامد زاویه‌ای

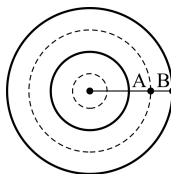
۱۳۱- شکل مقابل، نقاط  $A$  و  $B$  را روی یک جبهه‌ی موج نشان می‌دهد. اختلاف فاز بین این دو نقطه چند رادیان است؟



- (۱) صفر (۲)  $\frac{\pi}{2}$

- (۳)  $\pi$  (۴) صفر یا  $2n\pi$  ( $n$  عدد صحیح است).

۱۳۲- شکل مقابل، موج‌های دوره‌ای ایجادشده بر سطح آب را در یک لحظه نشان می‌دهد. دایره‌های توپر، قله‌ها و



دایره‌های خط‌چین دره‌های ایجادشده در سطح آب هستند. اختلاف فاز بین نقاط  $A$  و  $B$  چند رادیان است؟

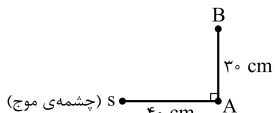
- (۱) صفر (۲)  $\frac{\pi}{2}$

- (۳)  $\pi$  (۴)  $2\pi$

۱۳۳- در تست ۱۳۲، اگر  $AB = 2 \text{ cm}$  و سرعت انتشار موج بر سطح آب  $4 \text{ m/s}$  باشد، بسامد نوسان‌های چشمه چند هرتز است؟

- (۱)  $1$  (۲)  $2$  (۳)  $100$  (۴)  $200$

۱۳۴- آشفته‌گی‌های حاصل از نوسان چشمه‌ی موجی با بسامد  $50 \text{ Hz}$  و با سرعت  $10 \text{ m/s}$ ، بر سطح آب



منتشر می‌شوند.  $A$  و  $B$  دو نقطه‌ی دل‌خواه بر سطح آب هستند؛ اختلاف فاز آن‌ها چند رادیان است؟

- (۱)  $\frac{\pi}{2}$  (۲)  $\pi$  (۳)  $\frac{3\pi}{4}$  (۴)  $\frac{4}{3}\pi$

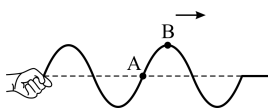
### واحد ۴ انرژی منتقل‌شده توسط موج

۱۳۵- انرژی موج متناسب با کدام است؟

(سراسری تیربی - ۸۲)

- (۱) دامنه - بسامد (۲) مجذور دامنه - مجذور بسامد (۳) مجذور دامنه - بسامد (۴) دامنه - مجذور بسامد

۱۳۶- مطابق شکل زیر، یک موج سینوسی در طول طنابی در حال انتشار است و  $A$  و  $B$  دو ذره بر روی طناب هستند. انرژی کدام ذره بیشتر است؟ (جرم ذره‌ها برابر است و از اتلاف انرژی، صرف‌نظر می‌شود.)



- (۱)  $A$  (۲)  $B$

- (۳) برابر است. (۴) اظهار نظر قطعی ممکن نیست.

۱۳۷- در تست ۱۳۶، انرژی جنبشی کدام ذره در لحظه‌ی نشان‌داده‌شده، بیشتر است؟

- (۱)  $A$  (۲)  $B$  (۳) برابر است. (۴) اظهار نظر قطعی ممکن نیست.

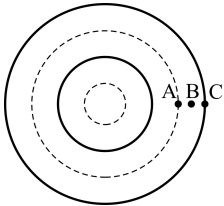
۱۳۸- در تست ۱۳۶، انرژی پتانسیل کدام ذره در لحظه‌ی نشان داده‌شده، بیشتر است؟

- A (۱) B (۲) C (۳) برابر است. (۴) اظهار نظر قطعی ممکن نیست.

۱۳۹- در تست ۱۳۶، دامنه‌ی نوسان کدام ذره بیشتر است؟

- A (۱) B (۲) C (۳) برابر است. (۴) اظهار نظر قطعی ممکن نیست.

۱۴۰- شکل مقابل، انتشار امواج بر سطح آب را در یک لحظه نشان می‌دهد. دایره‌های توپر، برجستگی‌ها و دایره‌های خط‌چین فرورفتگی‌های ایجادشده بر سطح آب می‌باشند. در کدام گزینه، دامنه‌ی نوسان نقاط A، B و C به‌درستی مقایسه شده است؟ (از اتلاف انرژی صرف نظر می‌شود).



$A_A > A_B > A_C$  (۱)  $A_C > A_B > A_A$  (۲)

$A_C > A_A > A_B$  (۳)  $A_A = A_B = A_C$  (۴)

۱۴۱- یک موج سینوسی در طول یک طناب پیش می‌رود. با تغییر چشمه‌ی موج، طول موج ایجادشده در طناب، نصف و بیشینه‌ی سرعت نوسان ذرات محیط ۴ برابر می‌شود. انرژی منتقل‌شده توسط موج چند برابر می‌شود؟

- ۲ (۱) ۴ (۲) ۸ (۳) ۱۶ (۴)

۱۴۲- یک موج سینوسی با طول موج ۱۰ m و دامنه‌ی ۴ cm، در امتداد طنابی به طول ۱۰ m و جرم ۲۵ g که تحت نیروی کششی ۱۰۰ N است، حرکت می‌کند. انرژی موج در قسمتی از طناب به طول ۲ m، چند ژول است؟ ( $\pi^2 = 10$ )

- $6/4 \times 10^{-2}$  (۱)  $1/6 \times 10^{-2}$  (۲)  $6/4 \times 10^{-4}$  (۳)  $1/6 \times 10^{-4}$  (۴)

۱۴۳- موجی با دامنه‌ی A و بسامد f، با سرعت v در ریسمانی با چگالی طولی  $\mu$  منتشر می‌شود. انرژی موج در طولی از طناب که برابر یک طول موج است، از کدام رابطه به‌دست می‌آید؟

$2\pi^2 \mu v f^2 A^2$  (۱)  $2\pi^2 \mu v f^2 A^2$  (۲)  $2\pi^2 \mu v f A^2$  (۳)  $2\pi^2 \mu v f^3 A^2$  (۴)

۱۴۴- موجی با بسامد f و دامنه‌ی A، در یک سیم منتشر می‌شود. سیم را از دستگاه پرس عبور می‌دهیم تا طول آن دو برابر شود و تحت همان نیروی کشش اولیه، موجی با همان بسامد و دامنه‌ی اولیه در آن ایجاد می‌کنیم. انرژی موج در کل طناب چند برابر می‌شود؟

- $1/2$  (۱) ۱ (۲) ۲ (۳) ۴ (۴)

۱۴۵- در تست ۱۴۴، توان متوسط انتقال انرژی توسط موج از هر نقطه‌ی طناب، چند برابر می‌شود؟

- $1/2$  (۱) ۱ (۲)  $\frac{\sqrt{2}}{2}$  (۳)  $\frac{\sqrt{2}}{4}$  (۴)

۱۴۶- طنابی با چگالی طولی ۸۰ g/m، تحت نیروی کشش ۲۰۰ N قرار دارد و یک موج سینوسی با بسامد ۱۰۰ Hz و دامنه‌ی ۲ cm، در امتداد آن حرکت می‌کند. موج با چه آهنگ متوسطی (در SI)، انرژی را از هر نقطه‌ی طناب انتقال می‌دهد؟ ( $\pi^2 = 10$ )

- $3/2$  (۱) ۳۲۰ (۲)  $6/4$  (۳) ۶۴۰ (۴)

۱۴۷- تابع موج منتشرشده بر روی ریسمانی با چگالی طولی ۲ g/cm، به‌صورت  $U = 10^{-3} \sin(100\pi t - 4\pi x)$  (SI) است. توان متوسط انتقال انرژی از هر نقطه‌ی طناب چند وات است؟

- ۰/۵ (۱) ۵ (۲) ۲۵ (۳) ۲۵۰ (۴)

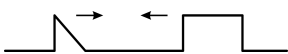
۱۴۸- یک موج سینوسی با توان متوسط ۱۰ W و بسامد ۲ Hz، در طول ریسمانی منتشر می‌شود. انرژی موج در طولی از طناب که برابر با یک طول موج می‌باشد، چند ژول است؟

- $2/5$  (۱) ۵ (۲) ۲۰ (۳) ۴۰ (۴)

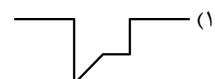
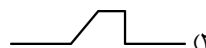
## برهم‌نهی موج‌ها

واحد ۵

ترکیب موج‌ها



۱۴۹- ترکیب دو علامت موجی نشان داده‌شده در شکل مقابل، به کدام صورت می‌تواند باشد؟ (آزمایشی سنپش - ۱۶)

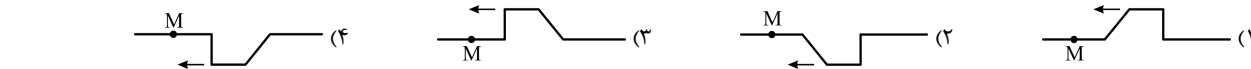




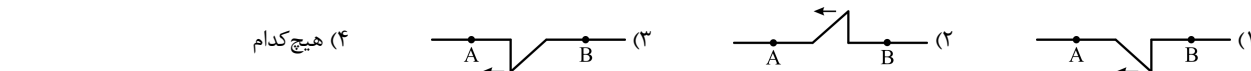
۱۵۰- موجی به شکل روبه‌رو، در طول طنابی منتشر می‌شود. از تداخل این موج با کدام یک از موج‌های زیر، آشفته‌گی‌های طناب در یک لحظه از بین می‌رود؟



۱۵۱- موجی به شکل روبه‌رو، در طول طنابی منتشر می‌شود. تداخل این موج با کدام یک از موج‌های زیر در نقطه‌ی M، باعث می‌شود که این نقطه همواره ساکن بماند؟



۱۵۲- موجی به شکل مقابل، در امتداد ریسمانی منتشر می‌شود. کدام یک از موج‌های زیر، ممکن است به‌طور کامل، موج رسم‌شده را خنثا کند؟ (طوری که نقطه‌ی B مرتعش نشود.)



۱۵۳- دو تپ مشابه، مطابق شکل زیر، در دو جهت مخالف، روی طنابی در حال انتشارند. این دو تپ در ناحیه‌ی AMB از طناب، با هم تداخل کرده و شکل طناب در این لحظه، به‌صورت افقی درمی‌آید. کدام گزینه برای نقطه‌های واقع در ناحیه‌ی AMB، در این لحظه درست است؟ (AM = MB) (آزمایشی آموزش و پرورش شهر تهران - ۹۱)

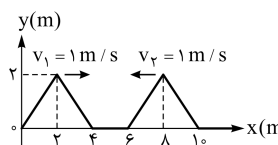


(۱) تمام نقطه‌های بین A و B طناب ساکن می‌شوند.

(۲) تمام نقطه‌ها ساکن و فقط نقطه‌ی M به طرف بالا حرکت می‌کند.

(۳) نقطه‌ی M ساکن و AM به طرف بالا و BM به طرف پایین حرکت می‌کند.

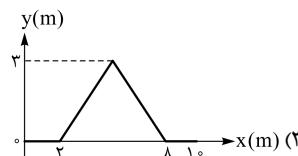
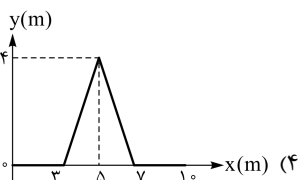
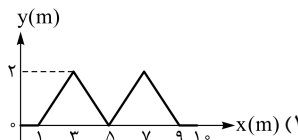
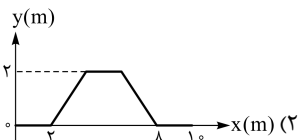
(۴) نقطه‌ی M ساکن و AM به طرف پایین و BM به طرف بالا حرکت می‌کند.



۱۵۴- شکل مقابل، دو تپ مثلثی شکل را در لحظه‌ی  $t = 0$  نشان می‌دهد که در طنابی ایجاد و با سرعت  $1 \text{ m/s}$ ،

به یکدیگر نزدیک می‌شوند. در لحظه‌ی  $t = 2 \text{ s}$ ، طناب در کدام نمای زیر دیده می‌شود؟

(برگرفته از کتاب «فیزیک برای دانش‌پویان و مهندسان» نوشته‌ی «رنال نایت»)

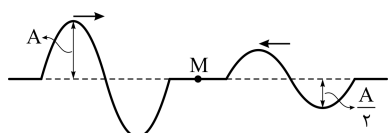


۱۵۵- در تست ۱۵۴، در کدام لحظه (برحسب ثانیه)، طناب مجدداً به شکلی درمی‌آید که در لحظه‌ی  $t = 2 \text{ s}$  داشته است؟

- (۱) ۳ (۲) ۴ (۳) ۵ (۴) هیچ‌گاه

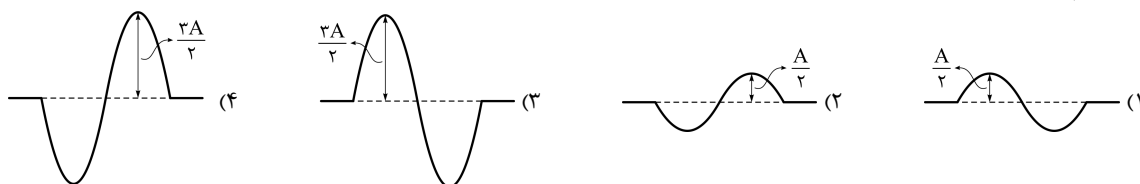
۱۵۶- در تست ۱۵۴، در چه لحظه‌ای (برحسب ثانیه)، طناب به شکلی درمی‌آید که در مبدأ زمان (لحظه‌ی  $t = 0$ ) داشته است؟

- (۱) ۴ (۲) ۵ (۳) ۶ (۴) هیچ‌گاه

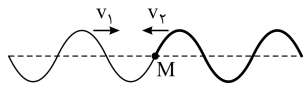


۱۵۷- در شکل مقابل، دو تپ سینوسی با دوره‌ی T که در خلاف جهت هم، روی یک طناب منتشر می‌شوند، در لحظه‌ی  $t = 0$ ، به نقطه‌ی M از طناب می‌رسند. شکل موج حاصل از برهم‌نهی دو موج،

در لحظه‌ی  $t = \frac{T}{2}$  کدام است؟



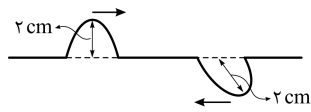
۱۵۸- مطابق شکل مقابل، دو موج سینوسی هم‌بسامد و هم‌دامنه در لحظه  $t = 0$ ، در نقطه‌ی  $M$  به هم می‌رسند.



برهم‌نهی دو موج در لحظه‌های  $t = \frac{T}{4}$  و  $t = \frac{3T}{4}$  در نقطه‌ی  $M$ ، به ترتیب (از راست به چپ) چگونه است؟

- (۱) سازنده، سازنده (۲) سازنده، ویرانگر (۳) ویرانگر، سازنده (۴) ویرانگر، ویرانگر

۱۵۹- مطابق شکل مقابل، دو تپ فرضی مشابه در طول یک طناب، به طرف یکدیگر در حال انتشارند



(صفحه‌ی شامل تپ‌ها بر یکدیگر عمودند). بیشترین جابه‌جایی از وضع تعادل برای یک نقطه از طناب، در

زمان تداخل موج‌ها با یکدیگر، چند سانتی‌متر است؟

- (۱) صفر (۲) ۲ (۳) ۴ (۴)  $2\sqrt{2}$

۱۶۰- دو حرکت نوسانی هم‌امتداد و هم‌دوره، اولی با دامنه‌ی  $4 \text{ cm}$  و دومی با دامنه‌ی  $6 \text{ cm}$ ، با اختلاف فاز  $\pi$  رادیان به یک نقطه از یک محیط

(سراسری ریاضی - ۷۱)

ارتعاش می‌رسند. دامنه‌ی حرکت ارتعاشی ترکیب این دو حرکت، در این نقطه چند سانتی‌متر است؟

- (۱) ۲ (۲)  $4/46$  (۳)  $7/20$  (۴) ۱۰

۱۶۱- تابع دو موج  $A$  و  $B$  در نقطه‌ی  $M$  (و در SI) به ترتیب، برابر  $U_A = 0.02 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$  و  $U_B = 0.05 \sin(\omega t - \frac{\pi}{3})$  است. اگر این دو موج

هم‌زمان به نقطه‌ی  $M$  برسند، دامنه‌ی نوسان نقطه‌ی  $M$  چند سانتی‌متر می‌شود؟

- (۱)  $0.03$  (۲) ۳ (۳)  $0.07$  (۴) ۷

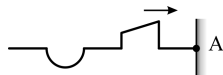
۱۶۲- تابع دو موج پیش‌رونده در نقطه‌ی  $M$  (و در SI) به ترتیب،  $U_1 = 0.02 \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3})$  و  $U_2 = 0.05 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$  است. دامنه‌ی نوسان

نقطه‌ی  $M$  چند سانتی‌متر است؟

- (۱)  $0.03$  (۲) ۳ (۳)  $0.07$  (۴) ۷

### بازتاب موج

۱۶۳- طنابی در نقطه‌ی  $A$ ، به دیوار محکم بسته شده است. تپی مطابق شکل، در طناب ایجاد شده است؛ تپ



(آزمایشی آموزش و پرورش شهر تهران - ۸۷، با ویرایش‌گزینه‌ها)

بازتابش کدام است؟

- (۱) (۲) (۳) (۴)

۱۶۴- در تست ۱۶۳، اگر انتهای طناب در نقطه‌ی  $A$  آزاد باشد، تپ بازتابش کدام است؟

- (۱) (۲) (۳) (۴)

۱۶۵- موجی مطابق شکل، در یک طناب که انتهایش به دیوار بسته شده، تولید شده است. کدام گزینه موج

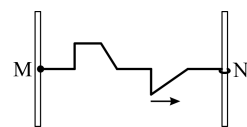


(سراسری تجربی - ۶۹)

برگشتی از دیوار را نشان می‌دهد؟

- (۱) (۲) (۳) (۴)

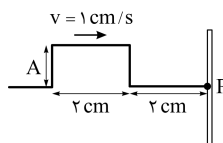
۱۶۶- در شکل روبه‌رو، انتهای طناب در نقطه‌ی  $M$  بسته و در نقطه‌ی  $N$  آزاد است. شکل تپ بازتابی، پس از اولین



برخورد به نقطه‌ی  $M$  و پیش از دومین برخورد به نقطه‌ی  $N$ ، کدام است؟

- (۱) (۲) (۳) (۴)

۱۶۷- در لحظه‌ی  $t = 0$ ، شکل یک تپ فرودی (تابشی) در ریسمان سبکی، مطابق شکل است و نقطه‌ی  $P$  یک

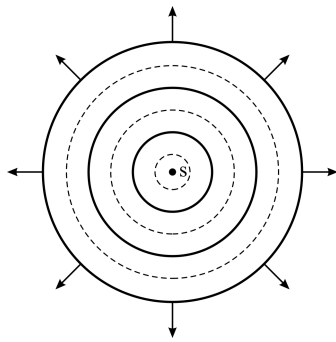


نقطه‌ی ثابت از ریسمان است. اگر سرعت انتشار این تپ عرضی یک سانتی‌متر بر ثانیه باشد، در لحظه‌ی  $t = 3 \text{ s}$ ،

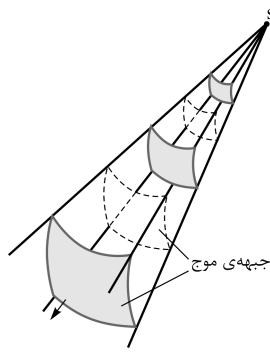
(سراسری ریاضی ۸۱، قارج از کشور)

شکل ارتعاش این ریسمان، به‌طور تقریبی، مطابق کدام گزینه است؟

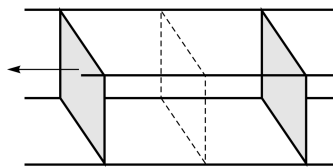
- (۱) (۲) (۳) (۴)

**انتشار موج در دو و سه بُعد**


شکل ۲۴: انتشار موج بر سطح آب.



(الف)



(ب)

شکل ۲۵: الف) جبهه‌های موج کروی.

ب) جبهه‌های موج تخت.

اگر آرامش آب را کدِ درون حوضچه‌ای را با یک تِلنگَر به هم بزنیم، نوعی آشفتگی در سطح آب گسترش می‌یابد؛ به این معنی که موج در سطح آب (در دو بُعد) منتشر می‌شود. اگر این عمل را به‌طور دوره‌ای تکرار کنیم، امواج دایره‌شکلی به مرکز چشمه‌ی موج، بر سطح آب ایجاد و در همه‌ی جهت‌ها منتشر می‌شوند.

شکل ۲۴ این امواج را از نمای بالا و در یک لحظه، نشان می‌دهد. دایره‌های توپر، برجستگی‌ها (قله‌ها) و دایره‌های خط‌چین، فرورفتگی‌ها (دره‌ها)ی ایجادشده بر سطح آب را نشان می‌دهند. تمام نقاط روی یک دایره، هم‌فازند و به هر کدام از این دایره‌ها، یک «جبهه‌ی موج» می‌گوییم.

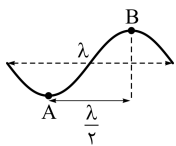
**نتیجه** جبهه‌ی موج مکان هندسی نقطه‌ای است که فاز موج در آن نقاط، یکسان است.

این‌که می‌گیریم موجی یک‌بعدی، دوبعدی یا سه‌بعدی، بستگی به محیط انتشار موج دارد. اگر موج در امتداد یک خط منتشر شود، آن را یک‌بعدی می‌گوییم (مثل انتشار موج در طول طناب). اگر موج بر یک سطح منتشر شود، آن را دوبعدی می‌گوییم (مثل انتشار موج بر سطح آب) و اگر موج در حجمی از فضا منتشر شود، آن را سه‌بعدی می‌گوییم. (مثل من، من! من سه‌بعدی! یا در رس می‌درس! یا در رس می‌فونم! یا پیتزا می‌فروزم!!!) موج‌های صوتی و موج‌های الکترومغناطیسی (مثل امواج رادار و نور) نمونه‌هایی از انتشار موج در سه بُعدند. جبهه‌های موج حاصل از یک چشمه‌ی موج نقطه‌ای (مثل بلندگو)، در یک محیط همسانگرد سه‌بعدی، به شکل کره‌هایی هستند که چشمه را احاطه می‌کنند. به این موج‌ها، «موج‌های کروی» می‌گوییم (شکل ۲۵-الف). گسترش فضای اشغال‌شده توسط موج، ویژگی بارز امواج دوبعدی و سه‌بعدی است.

با گسترش این امواج، شعاع آن‌ها افزایش می‌یابد و انحناى سطح آن‌ها کم‌تر می‌شود؛ به‌طوری که در فاصله‌ی بسیار دور از چشمه، قسمت‌های کوچکی از جبهه‌ی موج‌های کروی به شکل صفحه‌های موازی هم درمی‌آیند که به آن‌ها «موج تخت» می‌گویند (شکل ۲۵-ب).

**توجه** خط عمود بر جبهه‌ی موج در هر نقطه، راستای انتشار موج را در آن نقطه، نشان می‌دهد.

۱۳۱- گزینه‌ی «۱» نقاط A و B روی یک جبهه‌ی موج قرار دارند؛ پس اختلاف فازشان صفر است. فاصله‌ی بین A و B اهمیتی ندارد!



۱۳۲- گزینه‌ی «۳» در امواج یک‌بعدی، گفتیم: فاصله‌ی قله‌ها و دره‌های متوالی از یکدیگر  $\frac{\lambda}{2}$  و اختلاف فاز آن‌ها  $\pi$  رادیان است. این‌جا می‌گوییم: فاصله‌ی برجستگی‌ها و فرورفتگی‌های متوالی از یکدیگر  $\frac{\lambda}{2}$  و اختلاف فاز آن‌ها  $\pi$  رادیان است!

$$\frac{\lambda}{2} = 2 \text{ cm} \rightarrow \lambda = 4 \text{ cm} = 4 \times 10^{-2} \text{ m}$$

۱۳۳- گزینه‌ی «۳» بر مبنای پاسخ تست ۱۳۲، داریم:

$$\lambda = \frac{v}{f} \rightarrow 4 \times 10^{-2} = \frac{4}{f} \rightarrow f = \frac{4}{4 \times 10^{-2}} = 10^2 \rightarrow f = 100 \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{10}{50} = 0.2 \text{ m} = 20 \text{ cm}$$

۱۳۴- گزینه‌ی «۲» گام اول: محاسبه‌ی طول موج:

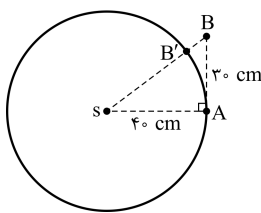
گام دوم: در شکل مقابل، A و B' روی یک دایره قرار دارند. پس هم‌فازند و در نتیجه:

$$\phi_A = \phi_{B'} \rightarrow \phi_A - \phi_B = \phi_{B'} - \phi_B$$

برای محاسبه‌ی اختلاف فاز بین نقاط B و B'، باید فاصله‌ی آن‌ها را از یکدیگر حساب کنیم:

$$s_B = \sqrt{s_A^2 + AB^2} = \sqrt{40^2 + 30^2} = \sqrt{1600 + 900} = \sqrt{2500} = 50 \text{ cm}$$

$$s_{B'} = s_A = 40 \text{ cm} \rightarrow BB' = s_B - s_{B'} = 50 - 40 = 10 \text{ cm}$$





گام سوم: فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی B و B' برابر  $\frac{\lambda}{4}$  است:  $BB' = 10 \text{ cm} \xrightarrow{(\lambda = 20 \text{ cm})} BB' = \frac{\lambda}{4}$

پس، اختلاف فاز بین آن‌ها  $\pi$  رادیان است:  $\Delta\phi = \phi_{B'} - \phi_B = \pi \text{ rad} \rightarrow \phi_A - \phi_B = \pi \text{ rad}$

البته، می‌توانید از رابطه‌ی  $\Delta\phi = k\Delta x$  هم در این‌جا استفاده کنید که  $\Delta x$  فاصله‌ی بین دو نقطه در راستای انتشار موج است:

$$\Delta\phi = k\Delta x = \frac{2\pi}{\lambda} \times (BB') = \frac{2\pi}{20} \times 10 = \frac{2\pi}{2} \rightarrow \Delta\phi = \pi \text{ rad}$$

۱۳۵- گزینه‌ی «۲» درس‌نامه‌ی زیر رو زیوررو کن؛ جواب رو پیدا می‌کنی!

### انتقال انرژی توسط موج مکانیکی



وقتی یک موج بر روی طناب سوار می‌شود، باعث می‌شود که ذرات طناب انرژی به‌دست آورند. ذرات حرکت می‌کنند (پس، انرژی جنبشی دارند) و از وضع تعادلشان خارج می‌شوند (پس، انرژی پتانسیل دارند). وقتی یک موج سینوسی با دامنه‌ی A و بسامد f در طول طناب پیش می‌رود، ذرات طناب به نوسان درمی‌آیند.

انرژی نوسانگری به جرم m، از رابطه‌ی مقابل به‌دست می‌آید:

$$E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2$$

$$\omega = 2\pi f \rightarrow E = \frac{1}{2}m \times (2\pi f)^2 A^2 = \frac{1}{2}m \times 4\pi^2 f^2 A^2 \rightarrow \boxed{E = 2\pi^2 m f^2 A^2} \quad (\text{رابطه‌ی ۲۲})$$

انرژی منتقل‌شده توسط موج، با مجذور دامنه و مجذور بسامد آن نسبت مستقیم دارد. نتیجه

قسمتی از طناب به جرم m و طول l را در نظر بگیرید. انرژی توزیع‌شده بر این قسمت از طناب، می‌شود:

$$E = 2\pi^2 m f^2 A^2$$

$$\mu = \frac{m}{l} \rightarrow m = \mu l \rightarrow E = 2\pi^2 \mu l f^2 A^2$$

اگر موج این طول از طناب را در مدت t، طی کرده باشد، آن‌گاه:

$$l = vt \rightarrow E = 2\pi^2 \mu (vt) f^2 A^2$$

لذا، آهنگ متوسط انتقال انرژی توسط موج (از هر نقطه‌ی طناب)، یعنی توان متوسط، از رابطه‌ی ۲۳ به‌دست می‌آید:

$$\bar{P} = \frac{E}{t} = \frac{2\pi^2 \mu v t f^2 A^2}{t} \rightarrow \boxed{\bar{P} = 2\pi^2 \mu v f^2 A^2} \quad (\text{رابطه‌ی ۲۳})$$

۱۳۶- گزینه‌ی «۳» وقتی موج در یک محیط همگن یک‌بعدی منتشر می‌شود، انرژی موج ذره‌به‌ذره منتقل می‌شود. لذا، با فرض عدم اتلاف انرژی، انرژی تمام ذرات محیط با یکدیگر برابر است.

۱۳۷- گزینه‌ی «۱» A در حال عبور از مرکز نوسان است؛ پس، انرژی جنبشی آن بیشینه است. B در قله قرار گرفته است؛ پس، انرژی جنبشی آن صفر و تمام انرژی آن به نوع پتانسیل است.

۱۳۸- گزینه‌ی «۲» توضیح نمی‌دم! اصرار نکن!!

۱۳۹- گزینه‌ی «۳» اول، رابطه‌ی ۲۲ رو ببین! حالا، با من بیا جلو!! انرژی و جرم ذرات که با هم برابر است (انرژی تلف نمی‌شود)؛ بسامدشان هم که با هم برابر است (همان بسامد چشمه است)؛ پس، چرا دامنه‌شون با هم فرق داشته باشه؟! آخه چرا!؟

۱۴۰- گزینه‌ی «۱» شما: «چرا دامنه‌شون با هم فرق داره؟ آخه چرا؟» حالا من: «در امواج یک‌بعدی، دامنه‌ی نوسان ذرات تغییر نمی‌کند (البته، به شرط عدم اتلاف انرژی)». چون تغییر دامنه به معنی تغییر انرژی موج است. اما در محیط دو یا سه‌بعدی، قضیه به‌طور کامل، فرق می‌کند؛ هرچه از منبع دورتر می‌شویم، محیط یا مساحت جبهه‌های موج وسیع‌تر می‌شوند و ذرات بیشتری را در آغوش خود جای می‌دهند! پس، انرژی موج بین ذرات بیشتری توزیع می‌شود و در نتیجه، انرژی ذرات در جهت انتشار موج کاهش می‌یابد. این انرژی کاهش‌یافته، خود را به‌صورت کاهش دامنه‌ی نوسان ذرات نشان می‌دهد. (به همین دلیل که برآمدگی و فرورفتگی‌های سطح آب در نزدیکی چشمه‌ی موج بیشتر از قسمت‌های دورتر

است.) پس:  $E_A > E_B > E_C \xrightarrow{(f: \text{ثابت})} A_A > A_B > A_C$

۱۴۱- گزینه‌ی «۴» محیط انتشار موج تغییر نکرده؛ پس، سرعت انتشار موج در طناب (که وابسته به شرایط فیزیکی محیط است)، تغییر

نکرده است. پس، بسامد نوسان چشمه ۲ برابر شده است:  $\lambda = \frac{v}{f} \rightarrow (\text{ثابت}) \Rightarrow \left(\frac{1}{f}\right) \leftarrow$

بیشینه‌ی سرعت نوسان ذرات با حاصل ضرب  $f$  در  $A$  متناسب است: ( $A$ ،  $\nu$  برابر شده است.)  $v_m \propto Af \Rightarrow v_m \propto A \omega = A \times (2\pi f) \rightarrow v_m \propto Af$  (برابر ۲) (برابر ۴)

طبق رابطه‌ی ۲۲:  $E \propto f^2 A^2 \Rightarrow E \propto 4 \times 4 = 16$  برابر می‌شود. (برابر ۲) (برابر ۲)

۱۴۲- گزینه‌ی «۱» جرم کل طناب را با  $M$  و طول آن را با  $L$  نشان می‌دهیم:  $\mu = \frac{M}{L} = \frac{25 \times 10^{-2}}{10} = 25 \times 10^{-4} \text{ kg/m}$

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{100}{25 \times 10^{-4}}} = \sqrt{4 \times 10^4} = 200 \text{ m/s}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} \rightarrow 10 = \frac{200}{f} \rightarrow f = \frac{200}{10} = 20 \text{ Hz}$$

جرم قسمتی از طناب به طول  $l = 2 \text{ m}$  را با  $m$  نشان می‌دهیم:  $\mu = \frac{m}{l} \rightarrow m = \mu l = 25 \times 10^{-4} \times 2 = 50 \times 10^{-4} = 5 \times 10^{-3} \text{ kg}$

$$E = 2\pi^2 m f^2 A^2 = 2 \times 10 \times (5 \times 10^{-3}) \times (20)^2 \times (4 \times 10^{-2})^2 = 20 \times 5 \times 10^{-3} \times 400 \times 16 \times 10^{-4} = 64 \times 10^{-3} \rightarrow E = 64 \times 10^{-3} \text{ J}$$

۱۴۳- گزینه‌ی «۱»  $\mu = \frac{m}{l} \rightarrow m = \mu l \xrightarrow{(l=\lambda)} m = \mu \lambda = \mu \frac{v}{f}$

$$E_\lambda = 2\pi^2 m f^2 A^2 = 2\pi^2 \times \left(\frac{\mu v}{f}\right) f^2 A^2 \rightarrow \boxed{E_\lambda = 2\pi^2 \mu v f A^2}$$
 ( $E_\lambda$ : انرژی موج در طولی از طناب که برابر  $\lambda$  است.)

۱۴۴- گزینه‌ی «۲» عبور سیم از دستگاه پرس، جرم آن را تغییر نمی‌دهد. پس،  $m$  تغییر نمی‌کند؛  $f$  و  $A$  هم که تغییر نکرده‌اند؛ پس (با توجه به رابطه‌ی ۲۲)، انرژی موج در کل طناب نیز تغییر نمی‌کند.

۱۴۵- گزینه‌ی «۳» با دو برابر شدن طول سیم، جرم واحد طول آن نصف می‌شود:  $\mu = \frac{m}{l} \xrightarrow{\text{(ثابت)}} \Rightarrow \mu \rightarrow \frac{1}{2} \mu$  (برابر ۲)

سرعت انتشار موج در طناب (یا سیم)؛ با جذر  $\mu$  رابطه‌ی عکس دارد. پس:  $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \xrightarrow{\text{(ثابت)}} \Rightarrow v \rightarrow \sqrt{2} v$  (برابر ۱)

$$\left(\frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{\mu_1}{\mu_2}} = \sqrt{\frac{\mu_1}{\frac{1}{2}\mu_1}} = \sqrt{2}\right)$$
 (اگر سخته، این جوری بنویس:

با توجه به رابطه‌ی ۲۳:  $\bar{P} = 2\pi^2 \mu v f^2 A^2 \xrightarrow{\substack{(f: \text{ثابت}) \\ (A: \text{ثابت})}} \frac{\bar{P}_2}{\bar{P}_1} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \times \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{2} \times \sqrt{2} \rightarrow \frac{\bar{P}_2}{\bar{P}_1} = \frac{\sqrt{2}}{2}$

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{200}{80 \times 10^{-3}}} = \sqrt{2500} = 50 \text{ m/s}$$
 ۱۴۶- گزینه‌ی «۲»

$$\bar{P} = 2\pi^2 \mu v f^2 A^2 = 2 \times 10 \times (80 \times 10^{-3}) \times 50 \times 10^2 \times (2 \times 10^{-2})^2 = 20 \times (8 \times 10^{-2}) \times 50 \times 10^4 \times 4 \times 10^{-4} \rightarrow \bar{P} = 320 \text{ W}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U = 10^{-2} \sin(100\pi t - 4\pi x) \\ U = A \sin(\omega t - kx) \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} A = 10^{-2} \text{ m} \\ \omega = 100\pi \text{ rad/s} \rightarrow 2\pi f = 100\pi \rightarrow f = 50 \text{ Hz} \\ k = 4\pi \text{ rad/m} \rightarrow \frac{\omega}{v} = 4\pi \rightarrow \frac{100\pi}{v} = 4\pi \rightarrow v = \frac{100}{4} = 25 \text{ m/s} \end{array} \right.$$
 ۱۴۷- گزینه‌ی «۳»

$$\mu = 2 \frac{\text{g}}{\text{cm}} = 2 \times \frac{10^{-3} \text{ kg}}{10^{-2} \text{ m}} = 0.2 \text{ kg/m}$$

$$\bar{P} = 2\pi^2 \mu v f^2 A^2 = 2 \times 10 \times 0.2 \times 25 \times 50^2 \times (10^{-2})^2 = 250000 \times 10^{-4} \rightarrow \bar{P} = 25 \text{ W}$$

۱۴۸- گزینه‌ی «۲» (۵۱ مل اول: رابطه‌ی ۲۳ را با رابطه‌ی اثبات‌شده در پاسخ تست ۱۴۳ مقایسه کنید؛ جواب می‌گیرید.)

$$\left\{ \begin{array}{l} E_\lambda = 2\pi^2 \mu v f A^2 \\ \bar{P} = 2\pi^2 \mu v f^2 A^2 \end{array} \right. \Rightarrow \frac{\bar{P}}{E_\lambda} = f \rightarrow E_\lambda = \frac{\bar{P}}{f} = \frac{10}{2} \rightarrow E_\lambda = 5 \text{ J}$$

(۵۱ مل دهه: اگر فرمول یاد رفت، از مفهوم استفاده کن. به‌طور ساده، توان متوسط یعنی انرژی در واحد زمان:  $\bar{P} = \frac{E}{t}$ )

در مدت یک دوره، موج به اندازه‌ی یک طول موج پیش‌روی می‌کند و در نتیجه، انرژی‌ای که در این مدت منتقل می‌شود، برابر  $E_\lambda$  است ( $E_\lambda$ )

$$\bar{P} = \frac{E_\lambda}{T}$$
 یعنی انرژی موج در قطعه‌ای از ریسمان به طول  $\lambda$ . پس:

$$f = \frac{1}{T} \rightarrow \bar{P} = E_\lambda f$$
 بقیه‌ی ماجرا هم که مثل قبل است!

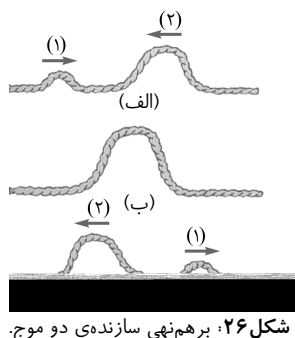
۹ اصل برهم‌نهی موج‌ها



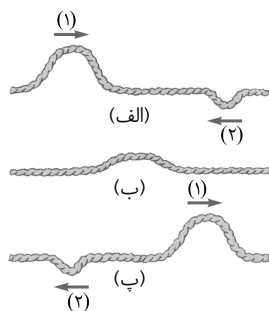
طبق اصل برهم‌نهی موج‌ها، اگر دو یا چند موج در یک نقطه به هم برسند، جابه‌جایی آن نقطه برابر برابری جابه‌جایی‌هایی است که هر کدام از موج‌ها به تنهایی، در آن نقطه ایجاد می‌کنند:

$$\bar{U}_T = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \dots$$

جالب این‌که موج‌ها پس از تداخل با یکدیگر، به شکل اولیه برمی‌گردند و در همان جهت قبلی، به حرکت خود ادامه می‌دهند؛ انگار نه انگار که اتفاقی افتاده است!!



شکل ۲۶: برهم‌نهی سازنده‌ی دو موج.

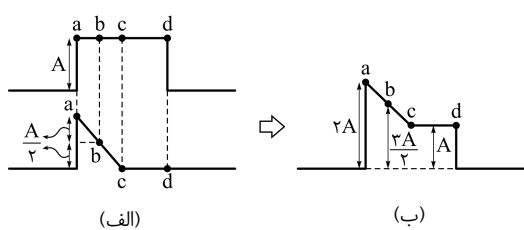


شکل ۲۷: برهم‌نهی ویرانگر دو موج.

در شکل ۲۶- الف، دو تپ عرضی دیده می‌شوند که روی ریسمانی سوار شده‌اند. تپ ۱ به سمت راست و تپ ۲ به سمت چپ حرکت می‌کند. در شکل ۲۶- ب، این دو موج شاخ‌به‌شاخ شده‌اند! چون جابه‌جایی حاصل از دو تپ هم‌جهتند، جابه‌جایی هر نقطه از طناب در منطقه‌ی تداخل، برابر مجموع اندازه‌ی جابه‌جایی‌هایی است که هر یک از موج‌ها به‌طور جداگانه، در آن نقطه ایجاد می‌کنند:  $U_T = U_1 + U_2$  در این حالت که موج‌ها اثر یکدیگر را تقویت می‌کنند، می‌گوییم برهم‌نهی آن‌ها سازنده است. در شکل ۲۶- پ، دو تپ از دیده بوسی دست می‌کشند (!) و بدون مزاحمت (برای دیگری!)، به حرکت خود ادامه می‌دهند.

اگر جابه‌جایی‌های حاصل از دو تپ در یک نقطه، در خلاف جهت یکدیگر باشند (شکل ۲۷- الف)، اندازه‌ی جابه‌جایی آن نقطه برابر تفاضل اندازه‌ی جابه‌جایی‌هایی است که هر تپ به تنهایی، در آن نقطه ایجاد می‌کند (شکل ۲۷- ب):  $U_T = U_1 - U_2$  در این حالت که امواج اثر هم را تضعیف می‌کنند، می‌گوییم برهم‌نهی آن‌ها ویرانگر است. شکل ۲۷- پ نشان می‌دهد که تپ‌ها پس از زدوخورد با یکدیگر، دست از سر هم برمی‌دارند و به راه خود ادامه می‌دهند!

شکل الف، تأثیر هر موج بر جابه‌جایی نقاط محیط را در یک لحظه و به تنهایی نشان می‌دهد. در شکل ب، حاصل برهم‌نهی این دو موج را در همان



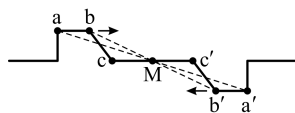
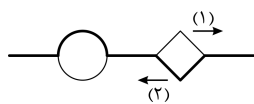
لحظه ملاحظه می‌فرمایید. (برای سادگی کار، دامنه‌ی موج‌ها را مساوی در نظر گرفتیم. در ضمن، نقطه‌ی b در وسط وتر مثلثی شکل (وسط ac) قرار دارد.)

$$A_a = A + A = 2A$$

$$A_b = A + \frac{A}{2} = \frac{3}{2}A$$

$$A_c = A_d = A + 0 = A$$

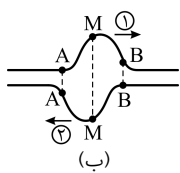
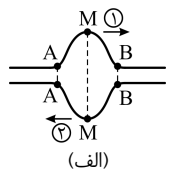
۱۵۰- گزینه‌ی «۳» مطابق شکل مقابل، از برهم‌نهی ویرانگر تپ ۱ (تپ اصلی رسم‌شده در صورت تست) و تپ ۲ (تپ رسم‌شده در گزینه‌ی ۳)، آشفتگی‌های طناب در یک لحظه از بین می‌رود و طناب در یک لحظه، به شکل افقی درمی‌آید. در حالت کلی، می‌توان گفت: در صورتی آشفتگی‌های طناب در یک لحظه، ناپدید می‌شود که موج‌ها، نسبت به راستای انتشار موج‌ها، قرینه‌ی یکدیگر باشند.



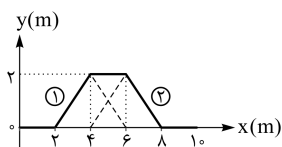
۱۵۱- گزینه‌ی «۲» در صورتی نقطه‌ی M ساکن می‌ماند که جابه‌جایی‌های حاصل از دو موج در هر لحظه، در نقطه‌ی M هم‌اندازه، اما در خلاف جهت هم باشند. یعنی مطابق شکل روبه‌رو، دو موج باید نسبت به نقطه‌ی M قرینه باشند. در شکل، نقاط a و a' (هم‌چنین b و b' و نیز c و c') هم‌زمان به نقطه‌ی M می‌رسند و اثر هم را خنثا می‌کنند؛ طوری که نقطه‌ی M ساکن می‌ماند.

۱۵۲- گزینه‌ی «۴» موج رسم‌شده در گزینه‌ی ۳، در یک لحظه موج رسم‌شده در صورت تست را خنثا می‌کند؛ اما بعد از آن، موج‌ها شکل خود را بازسازی می‌کنند و پس از رسیدن به نقاط A و B، باعث ارتعاش آن‌ها می‌شوند (موج‌ها در یک لحظه، می‌توانند اثر هم را خنثا کنند؛ اما نمی‌توانند به‌طور کامل، یکدیگر را از صحنه‌ی روزگار محو کنند!)

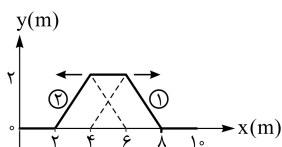




۱۵۳- گزینه‌ی «۴» شکل الف، وضعیت تپ‌های ۱ و ۲ را در لحظه‌ای نشان می‌دهد که به‌طور کامل، برهم‌نهاده شده‌اند. در این وضعیت، تپ‌ها به‌طور کامل، اثر هم را خنثا می‌کنند و طناب را به شکل افقی درمی‌آورند. شکل ب، وضعیت تپ‌ها را اندکی پس از ایجاد وضعیت شکل الف، به تصویر می‌کشد. فاصله‌ی موج‌های ۱ و ۲ از نقطه‌ی M و اندازه‌ی سرعتشان برابر است. لذا، دو موج همواره جابه‌جایی‌هایی هم‌اندازه اما در خلاف جهت یکدیگر را در نقطه‌ی M ایجاد می‌کنند و نقطه‌ی M ساکن می‌ماند. (اگره با این حرف من مشکل دارید، پاسخ تست ۱۵۲ رو بازم بخونید!) مطابق شکل ب، جابه‌جایی‌ای که موج ۲ در تمام نقاط بین A و M ایجاد می‌کند، بزرگ‌تر از جابه‌جایی‌ای است که موج ۱ در این نقاط ایجاد می‌کند و AM به طرف پایین جابه‌جا می‌شود (مثلاً وقتی موج ۱ از A عبور کرده، موج ۲ آن را به سمت پایین می‌کشد). از طرفی، جابه‌جایی‌ای که موج ۱ در تمام نقاط بین M تا B ایجاد می‌کند، بزرگ‌تر از جابه‌جایی حاصل از موج ۲ در این نقاط است؛ لذا، BM به طرف بالا حرکت می‌کند. (مثلاً وقتی نقطه‌ی B تنها حضور موج ۱ را احساس می‌کند، به سمت بالا خیز برمی‌دارد!)



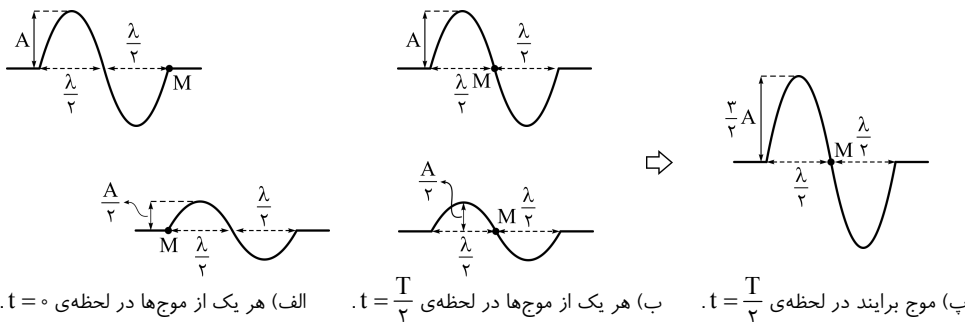
۱۵۴- گزینه‌ی «۲» مطابق شکل روبه‌رو، در لحظه‌ی  $t = 2s$ ، هر یک از موج‌ها  $2m$  جابه‌جا می‌شوند و ابتدای موج ۱ در مکان  $x = 6m$  و ابتدای موج ۲ در مکان  $x = 4m$  واقع می‌شود. موج‌ها را در ناحیه‌ی تداخل، با خط‌چین رسم کرده‌ایم. در ناحیه‌ی  $x = 2m$  تا  $x = 4m$ ، فقط موج ۱ و در ناحیه‌ی  $x = 4m$  تا  $x = 6m$  تا  $x = 8m$ ، فقط موج ۲ و در ناحیه‌ی  $x = 4m$  تا  $x = 6m$ ، هر دو موج تأثیرگذارند. در ناحیه‌ی  $x = 4m$  تا  $x = 6m$ ، موج‌ها قطرهای یک مربع را به وجود می‌آورند که مجموع جابه‌جایی‌های حاصل از آن‌ها در هر نقطه، ثابت و برابر  $2m$  است. (چرا؟)



۱۵۵- گزینه‌ی «۲» پس از  $4s$ ، هر یک از موج‌ها  $4m$  جابه‌جا می‌شوند. موج ۱ فضای  $x = 4m$  تا  $x = 8m$  و موج ۲ فضای  $x = 2m$  تا  $x = 6m$  را اشغال می‌کنند و طناب در همان شرایطی قرار می‌گیرد که در لحظه‌ی  $t = 2s$  داشته است. (شکل روبه‌رو را با شکل پاسخ تست ۱۵۴ مقایسه کنید. فرق داره!)

۱۵۶- گزینه‌ی «۳» موج‌ها پس از تداخل، از یکدیگر دست می‌کشند و مثل آدم، به حرکت خودشان ادامه می‌دن! پس از  $6s$ ، هر یک از موج‌ها  $6m$  جابه‌جا می‌شوند. موج ۱ فضای  $x = 6m$  تا  $x = 10m$  و موج ۲ فضای  $x = 0$  تا  $x = 4m$  را اشغال می‌کنند و طناب به شکلی درمی‌آید که در مبدأ زمان (شکل اصلی در صورت تست ۱۵۴) داشته است.

۱۵۷- گزینه‌ی «۳» هر موج در مدت  $T$ ، به اندازه‌ی  $\lambda$  و در مدت  $\frac{T}{4}$ ، به اندازه‌ی  $\frac{\lambda}{4}$  پیش‌روی می‌کند. بنابراین، موج‌ها در لحظه‌ی  $t = \frac{T}{4}$ ، در وضعیت نشان‌داده‌شده در شکل ب قرار می‌گیرند و از برهم‌نهی سازنده‌ی آن‌ها، طناب به شکل پ درمی‌آید.



۱۵۸- گزینه‌ی «۴» هر موج در مدت  $T$  به اندازه‌ی  $\lambda$ ، در مدت  $\frac{T}{4}$  به اندازه‌ی  $\frac{\lambda}{4}$  (شکل الف) و در مدت  $\frac{3T}{4}$  به اندازه‌ی  $\frac{3\lambda}{4}$  (شکل ب) پیش‌روی می‌کند. همان‌گونه که از شکل‌ها برمی‌آید، در این دو لحظه، موج‌ها جابه‌جایی‌های هم‌اندازه اما در خلاف جهت هم، در نقطه‌ی M ایجاد می‌کنند. لذا، در این دو لحظه، تداخل موج‌ها در نقطه‌ی M ویرانگر است.





با توجه به این که دو موج نسبت به نقطه‌ی M یکدیگرند، تداخل آن‌ها همواره در این نقطه، ویرانگر است و نقطه‌ی M همواره ساکن می‌ماند. **توجه** ⚠️

۱۵۹- گزینه‌ی «۴» نقطه‌ای که محل تداخل قله‌های دو تپ است، بیشترین جابه‌جایی را تجربه می‌کند. با توجه به این که جابه‌جایی‌های حاصل از تپ‌ها، در این نقطه عمود بر یکدیگرند، اندازه‌ی جابه‌جایی برآیند آن‌ها از وضع تعادل، از رابطه‌ی فیثاغورس به دست می‌آید:

$$A_T = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} = \sqrt{2^2 + 2^2} = \sqrt{8} = \sqrt{4 \times 2} \rightarrow A_T = 2\sqrt{2} \text{ cm}$$

۱۶۰- گزینه‌ی «۱» چون اختلاف فاز دو موج  $\pi$  رادیان است، در فاز مخالف یکدیگر هستند و دامنه‌ی موج برآیند، برابر تفاضل دامنه‌ی موج‌های سازنده‌ی آن است:

$$A_T = A_2 - A_1 = 6 - 4 \rightarrow A_T = 2 \text{ cm}$$

۱۶۱- گزینه‌ی «۲» اختلاف فاز دو موج در نقطه‌ی M برابر است با:

$$\Delta\phi = \phi_A - \phi_B = \frac{2\pi}{3} - \left(-\frac{\pi}{3}\right) = \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{3} = \frac{3\pi}{3} = \pi \text{ rad}$$

پس دو موج در نقطه‌ی M، در فاز مخالفند و دامنه‌ی نوسان نقطه‌ی M می‌شود:

$$A_M = A_B - A_A = 0.05 - 0.02 = 0.03 \text{ m} \rightarrow A_M = 3 \text{ cm}$$

۱۶۲- گزینه‌ی «۴» اختلاف فاز دو موج در نقطه‌ی M برابر است با:

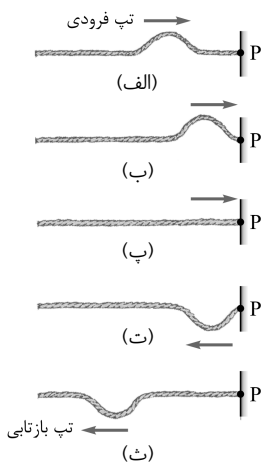
$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{3} - \left(-\frac{2\pi}{3}\right) = \frac{4\pi}{3} + \frac{2\pi}{3} = \frac{6\pi}{3} = 2\pi \text{ rad}$$

وقتی اختلاف فاز دو موج در یک نقطه، مضرب زوجی از  $\pi$  رادیان است، دو موج در آن نقطه هم‌فازند و برهم‌نهی آن‌ها سازنده است:

$$A_M = A_1 + A_2 = 0.02 + 0.05 = 0.07 \text{ m} \rightarrow A_M = 7 \text{ cm}$$

۱۶۳- گزینه‌ی «۴» پس از خواندن درس‌نامه‌ی ۱۰، به استقبال این تست می‌رویم!

### ۱۰ بازتاب موج



فرض کنید مطابق شکل ۲۸- الف، یک انتهای طنابی به دیوار ثابت شده و امکان حرکت از این نقطه گرفته شده است. تپی در طناب ایجاد می‌کنیم؛ شکل ۲۸- ب موقعیتی را نشان می‌دهد که ابتدای تپ به انتهای طناب (نقطه‌ی P) رسیده است. ذره‌ای از طناب که در همسایگی P قرار دارد، نیرویی روبه‌بالا به P وارد می‌کند تا آن را هم‌رنگ جماعت کند! اما P از اون‌ها نیست که با یک ضربه، جابزنه! هم با نیرویی هم‌اندازه و روبه‌پایین، جواب ضربه‌ی همسایه‌اش را می‌دهد (قانون سوم نیوتون) و در نتیجه، تپی در خلاف جهت تپ فرودی، در طناب ایجاد می‌شود (شکل ۲۸- ث).

**نتیجه ۱** موج بازتابیده از انتهای بسته، به شکل وارونه به محیط بازمی‌گردد.

**توجه** ⚠️ از زمانی که موج به انتهای طناب می‌رسد تا زمانی که به طور کامل برمی‌گردد، موج تابش با موج بازتابش تداخل می‌کند و صحنه‌ای که ما در طناب می‌بینیم، حاصل برهم‌نهی این دو موج است.

**دکته ۱** اختلاف فاز بین موج فرودی و موج بازتابیده در انتهای بسته‌ی طناب، برابر  $\pi$  رادیان است (یعنی دو موج در این نقطه، در فاز مخالفند).

**دلیل:** اگر تابع موج فرودی و بازگشتی در انتهای بسته‌ی طناب را به ترتیب، با  $U_1$  و  $U_2$  نشان دهیم، با توجه به این که  $U_1$  و  $U_2$  قرینه‌اند، داریم:

$$U_2 = -U_1$$

$$U_1 = -U_2 = -A \sin(\omega t + \phi_0) = A \sin(\omega t + \phi_0 + \pi)$$

اگر  $U_2 = A \sin(\omega t + \phi_0)$  باشد، آن‌گاه:

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = (\omega t + \phi_0 + \pi) - (\omega t + \phi_0) \rightarrow \Delta\phi = \pi \text{ rad}$$

**دکته ۲** در شکل ۲۸- پ، موج تابشی به شکل «» و موج بازتابش به شکل «» است. این دو، کاملاً اثر هم را خنثا می‌کنند و طناب یک لحظه به شکل افقی درمی‌آید. (در تست ۱۶۷، نمونه‌ای از این نوع برهم‌نهی را خواهید دید).

اگر مطابق شکل ۲۹- الف، به انتهای طناب قلاب سبکی وصل کنیم تا طناب بتواند در امتداد میله‌ی بدون اصطکاک آزادانه حرکت کند، انتهای طناب را «انتهای آزاد» می‌نامیم. وقتی تپ به انتهای آزاد طناب می‌رسد، قلاب را به سمت بالا می‌کشد. قلاب تا یک جایی (بعداً می‌گم کجا!) بالا می‌رود و سپس به سمت پایین برمی‌گردد. قلاب با این حرکت، مانند یک چشمه‌ی موج عمل می‌کند و تپی در جهت تپ فرودی ایجاد می‌کند که در خلاف جهت حرکت آن در طناب منتشر می‌شود.

**نتیجه ۲** موج بازتابیده از انتهای آزاد، به شکل مستقیم به محیط بازمی‌گردد.

**ذکته ۳** اختلاف فاز بین موج فرودی و موج بازتابیده در انتهای آزاد طناب، برابر صفر است (یعنی دو موج در این نقطه هم‌فازند). به عبارتی، تابع موج فرودی و بازگشتی در انتهای آزاد طناب، با هم برابرند:

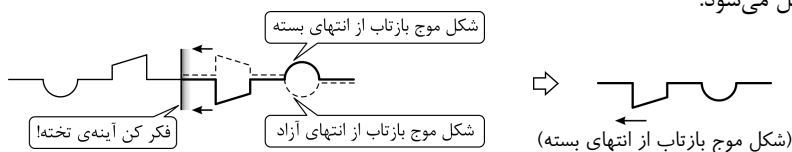
$$U_p = U_1$$

**ذکته ۴** در شکل ۲۹- ب، تپ‌های تابشی و بازتابشی، هر دو به شکل «.....» هستند. این دو تپ با هم می‌سازند و در انتهای آزاد طناب، تپی را به وجود می‌آورند که دامنه‌ی آن ۲ برابر دامنه‌ی تپ فرودی است.

**شکل ۲۹:** نحوه‌ی بازتاب موج از انتهای باز طناب.

**راه حل اول:** چون انتهای طناب ثابت است، موج به‌طور کامل وارون می‌شود. با این حساب، گزینه‌های ۱ و ۳ به مرخصی می‌روند! از طرفی، موج دوزنقه‌ای شکل زودتر از موج نیم‌دایره‌ای شکل به مانع می‌رسد و بازتابیده می‌شود. از این رو، در مسیر بازتاب هم موج دوزنقه‌ای شکل باید جلوتر از موج نیم‌دایره‌ای شکل حرکت کند. مثل این که چاره‌ای جز انتخاب گزینه‌ی ۴ نداریم!

**راه حل دوم:** برای رسم مطمئن موج بازتابش، می‌توانید این راه را در پیش بگیرید: مانع را مثل یک آینه‌ی تخت فرض کنید و تصویر موج را در آن رسم کنید. تصویر ایجادشده (خط‌چین)، شکل موج بازتاب از انتهای آزاد است. حالا اگر قرینه‌ی تصویر حاصل را نسبت به خط عمود بر مانع رسم کنید، شکل موج بازتاب از انتهای بسته (خط تیره‌تر) حاصل می‌شود.

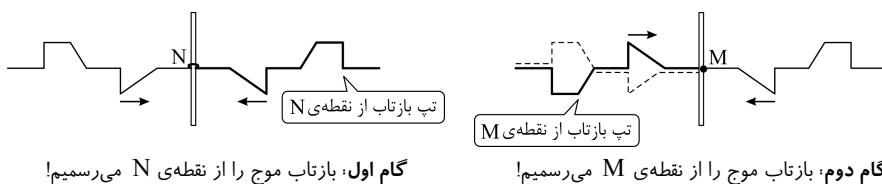


**۱۶۴- گزینه‌ی «۳»** یادت نره! اونی که اول خورده، اول هم برمی‌گرده! به شکل مستقیم!

**۱۶۵- گزینه‌ی «۴»** یادت نره! اونی که اول خورده، اول هم برمی‌گرده! به شکل وارونه!

**۱۶۶- گزینه‌ی «۲»** از تاکتیک‌های ارائه‌شده در راه حل دوم پاسخ تست ۱۶۳، استفاده می‌کنیم؛ دوبار! (نمی‌دونم چرا جمله‌هام این‌جوری

شده! ناقص!!)



**۱۶۷- گزینه‌ی «۴»** با توجه به اندازه‌ی سرعت انتشار موج (۱ cm/s)، پس از ۳s، موج مسافت ۳ cm را می‌پیماید. اگر تپ فرودی را به دو

نیمه‌ی مساوی تقسیم کنیم، نیمه‌ی سمت راست بازتابیده می‌شود (شکل ب) و با نیمه‌ی سمت چپ (شکل الف) تداخل می‌کند. از آن جا که این دو نیمه کاملاً قرینه‌ی یکدیگرند، اثر همدیگر را خنثا می‌کنند و طناب را به شکل افقی درمی‌آورند (شکل پ).

