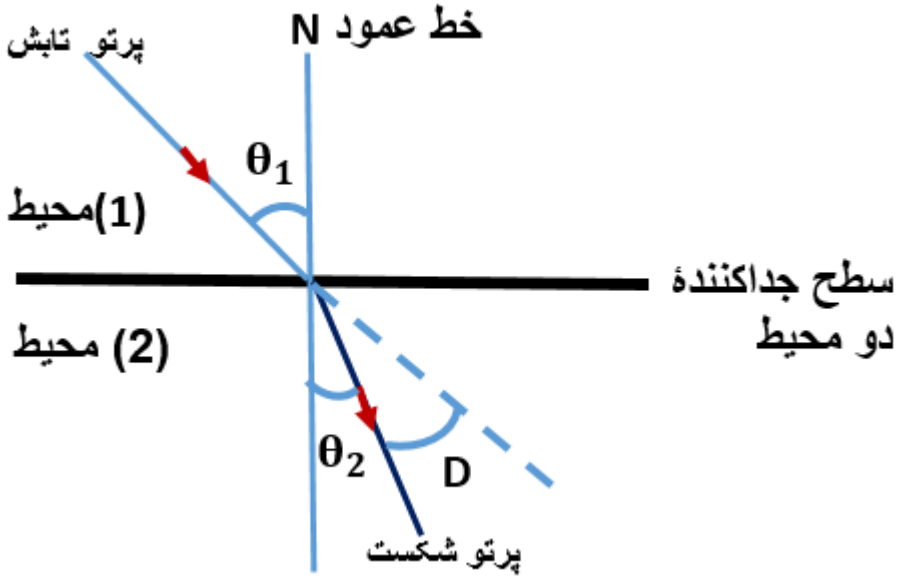
پدیده شکست موج چیست ؟ هرگاه پرتو موجی به طور مایل بخواهد از یک محیط وارد محیط دیگر شود ، بر سطح جداکنندهٔ دو محیط شکسته می شود که به این پدیده شکست موج می گویند .



زاویهٔ تابش : زاویهٔ بین خط عمود بر سطح و پرتو تابش است (θ_1).

زاویهٔ شکست : زاویهٔ بین خط عمود بر سطح و پرتو شکست می باشد (θ_2)

زاویهٔ انحراف : زاویهٔ بین پرتو شکست و امتداد پرتو تابش است (D)

ضریب شکست محیط چیست ؟ نسبت تندی نور در خلأ ($C = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$) به تندی نور در آن محیط ضریب شکست آن محیط گفته می شود و آنرا با حرف n نشان می دهند که فرمول آن بصورت زیر است :($n \geq 1$)

$$n = \frac{C}{V} \Longrightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

توجه : رابطهٔ بالا نشان می دهد که ضریب شکست یک محیط با تندی نور در آن محیط رابطهٔ وارون دارد یعنی هرچه ضریب شکست یک محیط بیشتر با شد ، تندی نور در آن کمتر است .

تست : پرتو نوری از محیط شفافی به ضریب شکست 2.5 وارد محیط شفاف دیگری به ضریب شکست 2 می شود ، تندی نور چند در صد تغییر می کند ؟

1) 25 2) 20 3) 30 4) 40

جواب : گزینه 1 درست است .

$$\frac{V_2}{V_1}=\frac{n_1}{n_2}\Longrightarrow\frac{V_2}{V_1}=\frac{2.5}{2}=1.25\Longrightarrow V_2=1.25V_1$$

درصد تغیرات تندی از رابطه زیر محاسبه می شود:

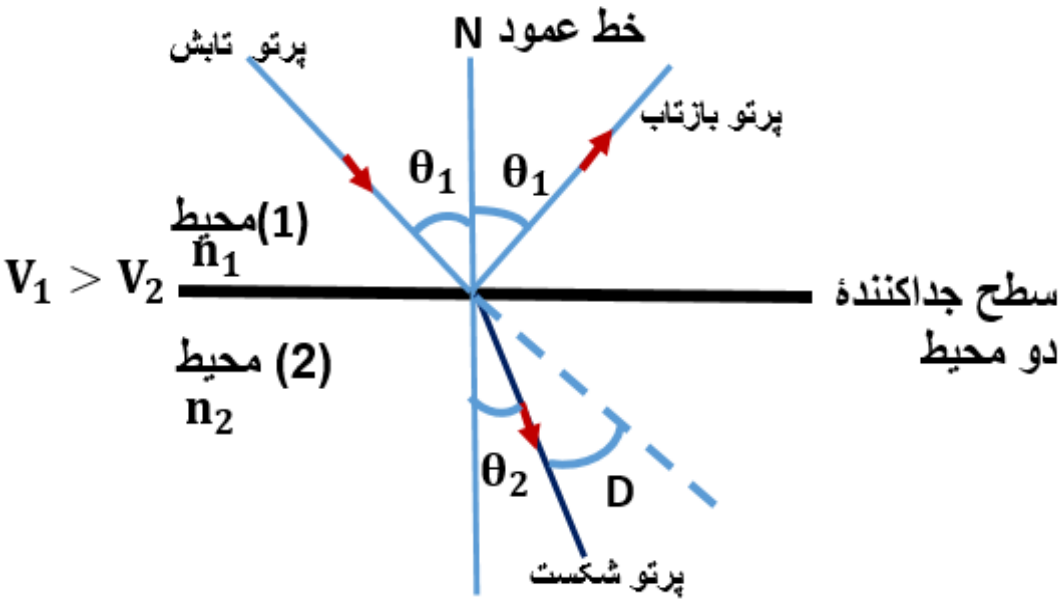
$$\text{درصد تغییرات تندی}=\frac{\Delta V}{V_1}\times 100=\frac{V_2-V_1}{V_1}\times 100$$

$$=\frac{1.25V_1-V_1}{V_1}\times 100=\frac{./25V_1}{V_1}\times 100=25\%$$

یعنی تندی 25 در صد افزایش می یابد .

نکتهٔ مهم 1 : هرگاه پرتو موجی ازیک محیط با تندی بیشتر وارد محیط دیگری با تندی کمتر شود ($V_1>V_2$) موارد زیر را داریم :

1) پرتو شکست به خط عمود نزدیک می شود .
2) $n_1<n_2$ (ضریب شکست محیط اول کمتر از ضریب شکست محیط دوم است)
3) $\theta_1>\theta_2$ (زاویهٔ تابش بزرگتر از زاویهٔ شکست می شود)
4) $D=\theta_1-\theta_2$ (زاویهٔ انحراف کوچکتر از زاویهٔ تابش است)
5) $\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1}=\frac{V_2}{V_1}=\frac{n_1}{n_2}$ (قانون شکست عمومی)



نکتهٔ مهم 2 : هرگاه پرتو موجی از یک محیط با تندی انتشار موج کمتر وارد محیط دیگری با تندی انتشار موج بیشتر شود ($V_1 < V_2$) موارد زیر را داریم :

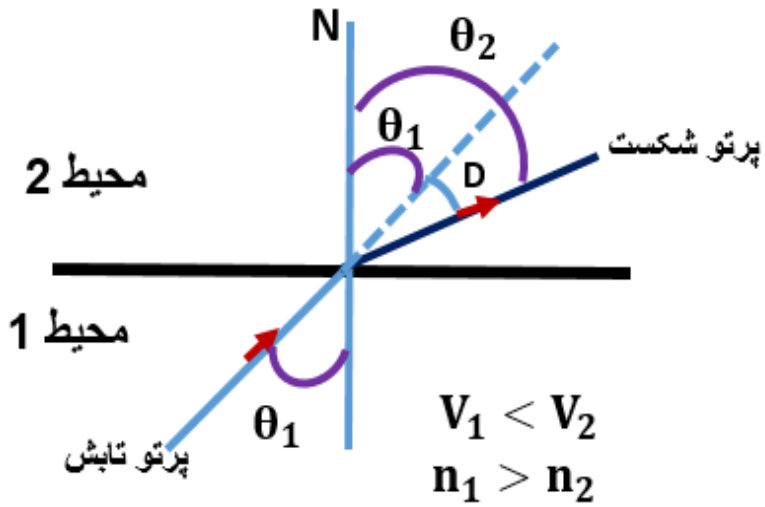
1) پرتو شکست ازخط عمود دور می شود .

2) $n_1 > n_2$ (ضریب شکست محیط اول بیشتراز ضریب شکست محیط دوم است)

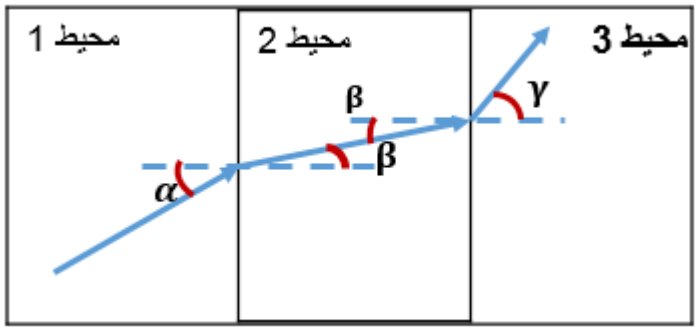
3) $\theta_2 > \theta_1$ (زاویهٔ شکست بزرگتر از زاویهٔ تابش می شود)

4) $D = \theta_2 - \theta_1$ (زاویهٔ انحراف کوچکتر از زاویهٔ شکست است)

5) $\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{n_1}{n_2}$ (قانون شکست عمومی)



مثال : در شکل زیر ، مسیر یک پرتو موج الکترومغناطیسی در سه محیط متوالی نشان داده شده است . باتوجه به شکل ، تندی سرعت نور را در سه محیط بایکدیگر مقایسه کنید ؟ ($\gamma > \alpha > \beta$)



روش سریع : هرچه زاویهٔ شکست (یا تابش) محیطی بزرگتر باشد ، تندی انتشار موج در آن محیط نیز بزرگتر وضریب شکست کوچکتر است و برعکس .

$$\alpha > \beta \Rightarrow V_1 > V_2 \Rightarrow n_1 < n_2$$
$$\gamma > \beta \Rightarrow V_3 > V_2 \Rightarrow n_3 < n_2$$
$$\gamma > \alpha \Rightarrow V_3 > V_1 \Rightarrow n_3 < n_1$$

$$V_2 < V_1 < V_3$$
$$n_2 > n_1 > n_3$$

α زاویه تابش محیط اول و β زاویه شکست محیط دوم و γ زاویه شکست محیط سوم است .

تست کنکور : تندی نور در یک محیط شفاف نصف تندی آن در هوا است . پرتو نوری با بازویهٔ تابش 30 درجه از این محیط به هوا می تابد . زاویهٔ شکست این پرتو، موقع ورود به هوا چند درجه می شود ؟ 1) صفر 2) 45 3) 60 4) 90

$$V_1 = \frac{1}{2}V_2 \Rightarrow \frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{V_2}{V_1} \Rightarrow \frac{\sin\theta_2}{\sin 30^\circ} = \frac{V_2}{\frac{1}{2}V_2} \Rightarrow \frac{\sin\theta_2}{\frac{1}{2}} = 2$$

$$\sin\theta_2 = 1 \Rightarrow \theta_2 = 90^\circ$$

(محیط شفاف محیط اول (V_1) و هوا محیط دوم (V_2) می باشد)

عبور یک تپ در طول طنابی را در نظر بگیرید که از دو بخش، یکی نازک و دیگری ضخیم، تشکیل شده است. وقتی این تپ از سمت بخش نازک به مرز دو بخش می‌رسد (شکل ۳ـ۴۰ الف)، بخشی از این تپ بازمی‌تابد و بخشی دیگر عبور می‌کند (شکل ۳ـ۴۰ 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.

شکل ۳ـ۴۰ الف) تپ فرودی از سمت چپ طناب وارد بخش ضخیم‌تر آن می‌شود. ب) بخشی از آن از مرز عبور می‌کند و بخشی بازمی‌تابد.

پرسش ۳ـ۸

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

پاسخ :

وقتی موج سینوسی از قسمت ضخیم طناب به قسمت نازک آن وارد شود، بسامد موج عبوری تغییری نمی کند، زیرا بسامد توسط چشمه موج تعیین می‌شود، اما تندی در قسمت نازک طناب بیشتر است و بنابر رابطهٔ $\lambda = v / f$ در می یابیم طول موج عبوری بیشتر از طول موج موج فرودی می‌شود.

تمرین ۳ـ۹

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 کم‌عمقِ 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؟

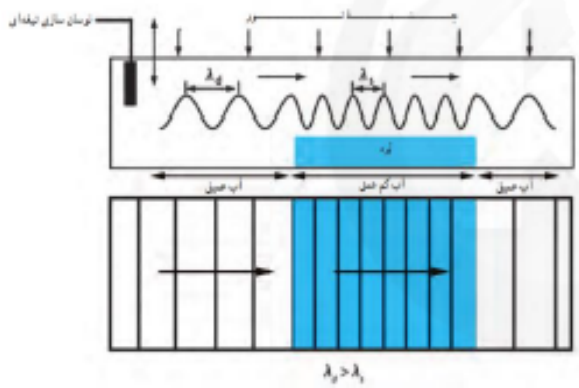
پاسخ:

وقتی جبهه‌های موج به مرز می‌رسند، بسامد موج تغییری نمی‌کند

طول موج فرودی مربوط به ناحیه عمیق $= \lambda_1 = \lambda_d$

طول موج فرودی مربوط به ناحیه کم عمق $= \lambda_2 = \lambda_s$

$$, \ \lambda_d = 10cm \quad , \quad v_s = 0/4 v_d$$



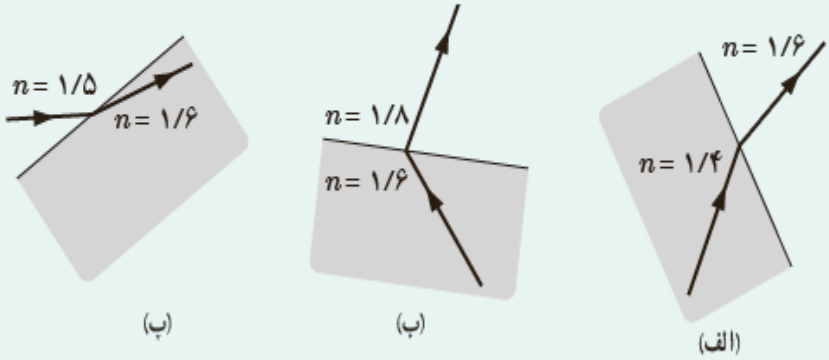
$$f = \frac{v_d}{\lambda_d} \rightarrow v_d = 10cm \times 5Hz = 50cm/s$$

$$f = \frac{v_s}{\lambda_s} = \frac{v_d}{\lambda_d} \rightarrow \lambda_s = \frac{v_s}{f} = \frac{0/4 v_d}{f}$$

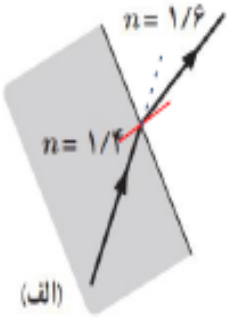
$$= \frac{0/4 \times 50cm/s}{5Hz} = 4cm$$

پرسش ۳ـ۱۰

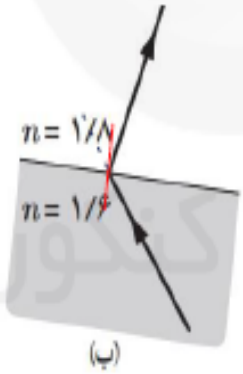
کدام‌یک از سه شکل زیر یک شکست را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟



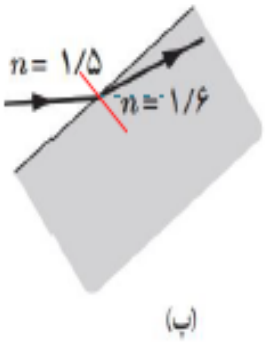
در شکل (الف) پرتوی نور از محیطی با ضریب شکست کمتر وارد محیطی با ضریب شکست بیشتر شده است. و به خط عمود نزدیک‌تر می‌شود که در شکل (الف) برقرار است و بنابراین شکل (الف) از لحاظ فیزیکی ممکن است



در شکل (ب) پرتو نور در سمتی درست شکسته نشده است، و امکان شکسته شدن در سویی وجود ندارد.

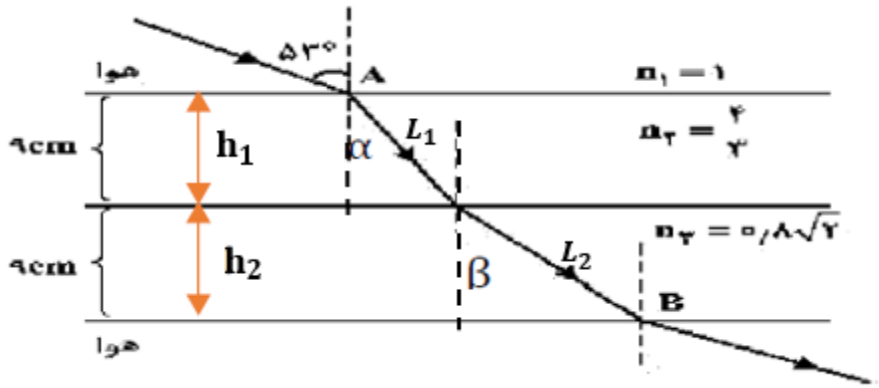


در شکل (پ) پرتو نور از خط عمود دور شده است در حالیکه هنگامیکه پرتو نور از محیطی با ضریب شکست کمتر به محیطی با ضریب شکست بیشتر شده باشد، پرتو نور به خط عمود نزدیک‌تر می‌شود.



مثال : پرتو نوری مطابق شکل زیر ، از هوا وارد محیط های شفافی می شود و شکست می یابد ، این پرتو فاصله A تا B را در چند نانو ثانیه طی می کند ؟

(تندی نور در هوا $= 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ و $\sin 37° = ./6$)



از قانون شکست برای محیط های 1 و 2 و 3 زاویه های α و β را بدست می آوریم :

$$n_1 \sin 53° = n_2 \sin \alpha \Rightarrow 1 \times ./8 = \frac{4}{3} \times \sin \alpha \Rightarrow \alpha = 37°$$

$$n_2 \sin 37° = n_3 \sin \beta \Rightarrow \frac{4}{3} \times ./6 = ./8\sqrt{2} \times \sin \beta \Rightarrow \beta = 45°$$

$$t_1 = \frac{L_1}{V_2} = \frac{\frac{h_1}{\cos \alpha}}{\frac{C}{n_2}} \Rightarrow t_1 = \frac{n_2 h_2}{C \cos \alpha} = \frac{\frac{4}{3} \times 9 \times 10^{-2}}{3 \times 10^8 \times ./8} = 5 \times 10^{-10} s = ./5ns$$

$$t_1 = ./5ns$$

$$t_2 = \frac{L_2}{V_3} = \frac{\frac{h_2}{\cos \beta}}{\frac{C}{n_3}} \Rightarrow t_2 = \frac{n_3 h_3}{C \cos \beta}$$

$$t_2 = \frac{./8\sqrt{2} \times 9 \times 10^{-2}}{3 \times 10^8 \times \frac{\sqrt{2}}{2}} = 4.8 \times 10^{-10} s = ./48ns$$

$$t = t_1 + t_2$$

$$t = ./5 + ./48 = ./98ns$$