

فصل پنجم: شکست نور

یک روز داغ تابستان، در دشت خوزستان، جاده‌ی اهواز به دزفول، از درون ماشین به جاده نگاه می‌کنم. در دوردست منظره‌ی آب کلافه‌ام کرده و برای رسیدن به دریاچه‌ای که در روبه‌رو می‌بینم و به امید آب‌تنی کردن در آن، لحظه‌شماری می‌کنم. اما به آب نمی‌رسیم! هرچه هم ماشین جلوتر می‌رود، آب عقب‌تر می‌رود. به مقصد می‌رسیم و من خسته و عصبانی از ماشینی بیرون می‌آیم. در تمام راه برگشت نیز همین داستان برقرار است ...

امروز وقتی به گذشته برمی‌گردم می‌فهمم که در تمام آن سال‌های کودکی، هوای آب‌تنی کردن در آن دریاچه بیهوده بوده، چرا که دریاچه‌ای در کار نبود و من تنها بر جاده‌ی داغ سراب می‌دیدم نه آب! حتی می‌دانم علت به‌وجود آمدن سراب پدیده‌ای به نام شکست نور است. اما هنوز هم در هر جاده‌ای که سراب می‌بینم هوس آب‌تنی کردن به سراغم می‌آید!

شکست نور



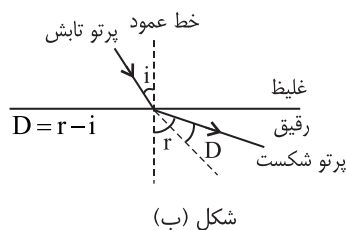
به شکل روبه‌رو نگاه کنید. به نظر شما علت شکسته دیدن مداد درون لیوان چیست؟ برای دیدن اجسام باید نور از آن‌ها به چشم ما برسد، اگر عاملی سبب تغییر مسیر پرتوهای نور بشود، ما جسم را در جای واقعی خود نمی‌بینیم.

تعریف

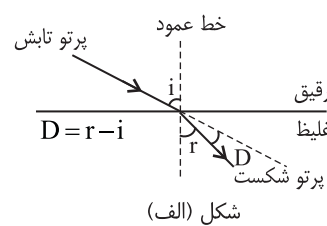
هر گاه نور به طور مایل از یک محیط شفاف وارد محیط شفاف دیگری می‌شود، هنگام گذر از سطح جدایی دو محیط، مسیرش به‌طور ناگهانی تغییر می‌کند. این پدیده را شکست نور می‌گویند.

آزمایش نشان می‌دهد که اگر در محل تابش نور در مرز دو محیط خطی عمودی رسم کنیم، چنانچه پرتو از محیط رقیق مانند هوا به محیط غلیظ مانند آب وارد شود پرتو به خط عمود نزدیک می‌شود (شکل الف) و چنانچه پرتو از محیط غلیظ وارد محیط رقیق شود، پرتو از خط عمود دور می‌شود (شکل ب).

در شکل‌های (الف) و (ب)، زاویه‌ی بین پرتو تابش و خط عمود را **زاویه‌ی تابش (i)**، زاویه‌ی بین پرتو شکست و خط عمود را **زاویه‌ی شکست (r)** و زاویه‌ی بین امتداد پرتو تابش و پرتو شکست را **زاویه‌ی انحراف (D)** می‌گویند.



شکل (ب)

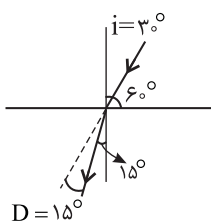
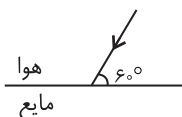


شکل (الف)

اگر پرتوی عمود بر سطح دو محیط بتابد ($i=0$) بدون انحراف وارد محیط دوم می‌شود. ($r=0$)

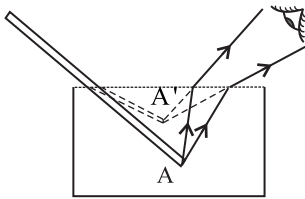
مسئله ۱ مطابق شکل روبه‌رو نور از هوا وارد مایع شفاف می‌شود، زاویه‌ی انحراف 15° است. زاویه‌ی شکست

چند درجه است؟



$$r = 3^\circ - 15^\circ = 15^\circ$$

راه‌حل: با توجه به شکل، زاویه‌ی تابش 3° است و زاویه‌ی شکست برابر است با:



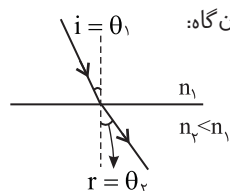
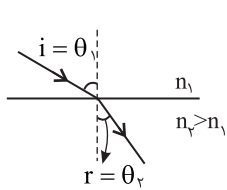
پرسش: علت شکسته دیدن چوب در آب و یا قاشق چای خوری در لیوان چای را به کمک پدیده‌ی شکست توضیح دهید.

پاسخ: علت شکسته دیدن چوب در آب و یا قاشق چای خوری در لیوان چای این است که مطابق شکل زیر پرتوهای نور از محیط غلیظ وارد محیط رقیق شده و از خط عمود دور می‌شوند و ناظر به جای نقطه‌ی A، تصویر آن یعنی نقطه‌ی A' را می‌بیند.

قانون‌های شکست نور

- ۱- پرتو تابش، پرتو شکست و خط عمود بر سطح جدا کننده‌ی دو محیط، در نقطه‌ی تابش در یک صفحه قرار دارند.
- ۲- نسبت سینوس زاویه‌ی تابش به سینوس زاویه‌ی شکست برای دو محیط شفاف مقدار ثابتی است که به آن ضریب شکست محیط دوم نسبت به محیط اول می‌گویند.

اگر محیط اول هوا (خلأ) باشد این مقدار ثابت را ضریب شکست مطلق محیط می‌گویند. $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ ضریب شکست مطلق یک محیط شفاف



اگر مطابق شکل، پرتو از یک محیط شفاف (غیر هوا) وارد محیط شفاف دیگری شود، آن‌گاه:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin i}{\sin r} \Rightarrow n_1 \sin i = n_2 \sin r \Rightarrow \boxed{n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2}$$

این رابطه را **قانون اسنل** می‌گویند.

نکته: قانون اسنل نشان می‌دهد در محیطی که n بزرگ‌تر است θ کوچک‌تر است.

مسئله ۲

یک پرتو نور با زاویه‌ی تابش 53° ، از هوا به سطح آب با ضریب شکست $\frac{4}{3}$ می‌تابد. زاویه‌ی شکست این پرتو را بیابید.

$$(\sin 53^\circ = 0.8)$$

راه‌حل: با توجه به قانون اسنل می‌توان نوشت:

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} \Rightarrow \frac{4}{3} = \frac{0.8}{\sin r} \Rightarrow \sin r = 0.6$$

$$1 - (0.8)^2 = (0.6)^2 \Rightarrow 1 - \sin^2 53^\circ = \cos^2 53^\circ \Rightarrow \cos 53^\circ = 0.6 \xrightarrow{53^\circ, 37^\circ \text{ متمم هستند}} \sin 37^\circ = 0.6 \Rightarrow r = 37^\circ$$

مسئله ۳

پرتو نوری تحت زاویه‌ی تابش 45° از یک محیط شفاف به ضریب شکست $\sqrt{3}$ وارد محیط شفاف دیگری به ضریب شکست $\sqrt{2}$ می‌شود. زاویه‌ی انحراف پرتو را بیابید.

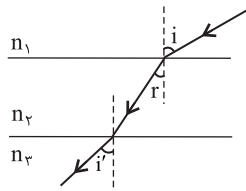
$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \Rightarrow \sqrt{3} \times \sin 45^\circ = \sqrt{2} \sin r \Rightarrow \sqrt{3} \times \frac{\sqrt{2}}{2} = \sqrt{2} \sin r$$

راه‌حل: با توجه به قانون اسنل:

$$\Rightarrow \sin r = \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow r = 60^\circ$$

$$D = r - i = 60^\circ - 45^\circ = 15^\circ$$

بنابراین زاویه‌ی انحراف برابر خواهد شد با:



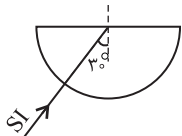
پرسش: در شکل روبه‌رو مسیر یک پرتو نورانی در محیط‌هایی که ضریب شکست آن‌ها n_1 ، n_2 و n_3 می‌باشد رسم شده است. اگر $i > i' > r$ ، ترتیب بزرگ‌تر بودن ضریب شکست‌ها را نسبت به هم مشخص کنید.

پاسخ: در هر محیط اگر θ بزرگ‌تر باشد، ضریب شکست کوچک‌تر است، بنابراین:

$$i > i' > r \Rightarrow n_1 < n_3 < n_2$$

مسئله ۴

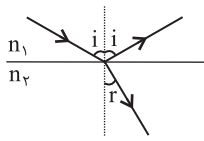
در شکل روبه‌رو پرتو SI، از هوا به سطح یک نیم‌استوانه‌ی شفاف به ضریب شکست $\sqrt{2}$ به گونه‌ای می‌تابد که امتداد آن از مرکز نیم‌استوانه می‌گذرد. زاویه‌ی بین پرتو نور خروجی و خط عمود بر سطح جدایی چند درجه است؟



راه‌حل: پرتوی که بر سطح نیم‌استوانه بتابد و امتداد آن از مرکز بگذرد، در امتداد شعاع نیم‌استوانه بوده و بر سطح نیم‌استوانه عمود است و بدون انحراف وارد آن می‌شود. مطابق شکل، زاویه‌ی تابش برابر 30° است، بنابراین:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \Rightarrow \sqrt{2} \times \frac{1}{2} = 1 \times \sin r \Rightarrow r = 45^\circ$$

مسئله ۵ پرتو نوری تحت زاویه تابش 53° به سطح جدایی دو محیط شفاف می‌تابد، بخشی از نور از روی سطح بازتابیده می‌شود و بخشی وارد محیط دوم می‌شود. اگر پرتو بازتابش بر پرتو شکست عمود باشد، نسبت ضریب شکست محیط دوم به محیط اول را بیابید.
 $(\cos 53^\circ = \sin 37^\circ = 0.6, \sin 53^\circ = \cos 37^\circ = 0.8)$

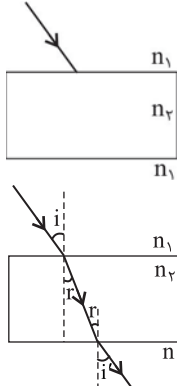


$$i + r = 90^\circ \Rightarrow 53^\circ + r = 90^\circ \Rightarrow r = 37^\circ$$

راه حل: با توجه به شکل:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin i}{\sin r} \Rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin 53^\circ}{\sin 37^\circ} = \frac{0.8}{0.6} \Rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{4}{3}$$

پرسش: در شکل روبه‌رو پرتو نوری از هوا به یک تیغه تخت شفاف می‌تابد. مسیر پرتو در تیغه را رسم کرده و زاویه خروج از تیغه را با زاویه ورود به تیغه مقایسه کنید.



پاسخ: پرتو از هوا وارد تیغه شده و به خط عمود نزدیک می‌شود بنا بر قانون اسنل داریم:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \quad (1)$$

از قضیه خطوط موازی و مورب درمی‌یابیم که زاویه تابش بر وجه پایینی تیغه برابر است با زاویه شکست در تیغه. برای سطح جدایی پایینی نیز می‌توان نوشت:

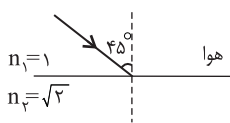
$$n_1 \sin i' = n_2 \sin r \quad (2)$$

$$n_1 \sin i' = n_1 \sin i \Rightarrow i' = i$$

از رابطه (۱) و (۲) نتیجه می‌شود:

نتیجه:

- زاویه ورود به تیغه با زاویه خروج از تیغه برابر است.
- پرتو خروجی از تیغه، موازی پرتو ورودی به تیغه است.
- اجسام از پشت تیغه در محل اصلی خود دیده نمی‌شوند.
- اگر هر تعداد تیغه با جنس مختلف روی هم قرار گیرند زاویه خروجی از مجموعه همواره با زاویه ورودی به مجموعه برابر است.



مسئله ۶ پرتو نوری از هوا مطابق شکل وارد محیط شفاف با ضریب شکست $n = \sqrt{2}$ می‌شود.

الف) زاویه شکست و زاویه انحراف را بیابید.

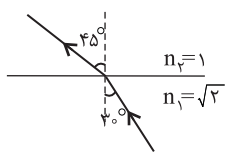
ب) اگر نور با زاویه 30° از این محیط شفاف وارد هوا شود، زاویه شکست و زاویه انحراف را بیابید.

پ) از قسمت (الف) و (ب) چه نتیجه‌ای می‌توان گرفت؟

راه حل: الف) با توجه به قانون اسنل داریم:

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} \Rightarrow \sqrt{2} = \frac{\sin 45^\circ}{\sin r} \Rightarrow \sin r = \frac{1}{2} \Rightarrow r = 30^\circ \xrightarrow{D=i-r} D = 45^\circ - 30^\circ = 15^\circ$$

ب) با توجه به قانون اسنل داریم:



$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

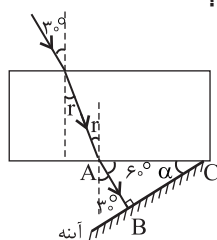
$$\sqrt{2} \times \frac{1}{2} = 1 \times \sin r \Rightarrow r = 45^\circ \xrightarrow{D=r-i} D = 45^\circ - 30^\circ = 15^\circ$$

زاویه انحراف برابر است با:

پ) نتیجه: هرگاه پرتو تابش به جای پرتو شکست قرار گیرد پرتو شکست به محل پرتو تابش می‌رود.

این نتیجه را اصل بازگشت نور می‌گویند.

مسئله ۷ پرتو نوری با زاویه 30° ، به تیغه تخت شفاف برخورد می‌کند و پس از عبور از تیغه به سطح آینه‌ی تختی می‌تابد. زاویه بین آینه و تیغه چند درجه باشد تا پرتو پس از بازتاب از آینه روی همان مسیر قبلی از تیغه گذشته و از تیغه خارج شود؟



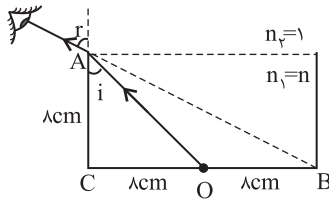
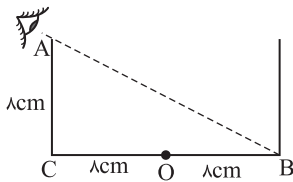
راه حل: با توجه به صورت مسئله مسیر حرکت پرتو را رسم می‌کنیم. برای آن‌که پرتو روی خودش

بازتاب نماید باید بر سطح آینه عمود باشد. در این صورت مثلث ABC قائم‌الزاویه است و زاویه

$$\alpha + 60^\circ = 90^\circ \Rightarrow \alpha = 30^\circ$$

α (زاویه بین تیغه و آینه) برابر است با:

یعنی زاویه بین آینه و تیغه باید با زاویه تابش برابر باشد.



مسئله ۸ مطابق شکل، چشم ناظر در وضعیتی قرار دارد که فقط پایین دیواره‌ی روبه‌روی ظرف (نقطه‌ی B) را می‌بیند. ظرف را پر از مایع می‌کنیم. ناظر در همان وضعیت، قادر به دیدن نقطه‌ی O در وسط BC می‌شود. ضریب شکست مطلق مایع چقدر است؟ (المپیاد فیزیک ایران)

راه‌حل: با توجه به شکل پرتوی که از نقطه‌ی O به A می‌تابد پس از شکست به چشم ناظر می‌رسد. ابتدا از مثلث OAC و مثلث ABC، $\sin i$ و $\sin r$ را حساب می‌کنیم:

$$OA^2 = AC^2 + OC^2 \Rightarrow OA^2 = 8^2 + 4^2 \Rightarrow OA = 8\sqrt{2} \text{ cm}$$

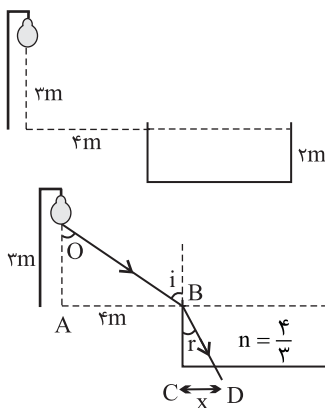
$$AB^2 = AC^2 + BC^2 \Rightarrow AB^2 = 8^2 + 8^2 \Rightarrow AB = 8\sqrt{2} \text{ cm}$$

$$\sin i = \frac{OC}{OA} = \frac{4}{8\sqrt{2}} \Rightarrow \sin i = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$\sin r = \frac{BC}{AB} \Rightarrow \sin r = \frac{8}{8\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \Rightarrow n \times \frac{\sqrt{2}}{2} = 1 \times \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow n = \frac{1}{1} = 1$$

در این صورت:



مسئله ۹ در شکل روبه‌رو یک لامپ در بالای یک استخر پر از آب به عمق ۲ متر قرار دارد. طول سایه‌ی دیواره‌ی استخر در کف آن چند متر است؟

(ضریب شکست آب $\frac{4}{3}$ است، $\sin 37^\circ = 0.6$, $\sin 53^\circ = 0.8$, $\tan 37^\circ = \frac{3}{4}$)

راه‌حل: پرتو نوری که از لامپ به لبه‌ی دیوار می‌رسد و از آن می‌گذرد، در آب شکست یافته و از مسیرش منحرف می‌شود.

در مثلث OAB زاویه‌ی O بنا بر قضیه‌ی خطوط موازی و مورب با زاویه‌ی i برابر است. در این صورت:

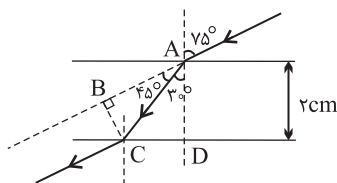
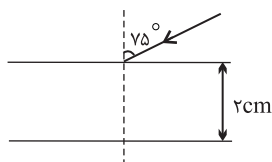
$$\sin i = \sin O \Rightarrow \sin i = \frac{AB}{OB} \Rightarrow \sin i = \frac{4}{5} \Rightarrow \sin i = \frac{4}{5}$$

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} \Rightarrow \frac{4}{3} = \frac{\frac{4}{5}}{\sin r} \Rightarrow \sin r = \frac{3}{5} = 0.6 \Rightarrow r = 37^\circ$$

بنابر قانون اسنل خواهیم داشت:

$$\tan r = \frac{CD}{BC} \Rightarrow \frac{3}{4} = \frac{x}{2} \Rightarrow x = 1.5 \text{ m}$$

در مثلث BCD می‌توان نوشت:



مسئله ۱۰ در شکل روبه‌رو پرتو با زاویه‌ی تابش 75° به تیغه‌ی تخت شفاف به ضخامت ۲ cm می‌تابد و با زاویه‌ی 30° وارد تیغه می‌شود. فاصله‌ی امتداد پرتو ورودی و خروجی را بیابید.

راه‌حل: فاصله‌ی امتداد دو پرتو ورودی و خروجی خط عمود بین دو پرتو یعنی اندازه‌ی پاره‌خط BC است. در مثلث ACD طول وتر AC را به‌دست می‌آوریم:

$$\cos 30^\circ = \frac{AD}{AC} \Rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{2}{AC}$$

$$AC = \frac{4}{\sqrt{3}} = \frac{4\sqrt{3}}{3} \text{ cm}$$

$$\sin 45^\circ = \frac{BC}{AC} \Rightarrow \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{BC}{\frac{4\sqrt{3}}{3}} \Rightarrow BC = \frac{2\sqrt{6}}{3} \text{ cm}$$

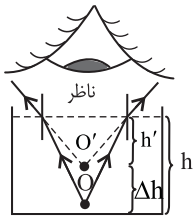
در مثلث ABC طول BC را به‌دست می‌آوریم:

عمق واقعی - عمق ظاهری

اگر کنار استخر پر از آبی ایستاده‌اید و هوس آب‌تنی کردن به سرتان می‌زنید، یادتان باشد که عمق آب از آنچه به نظر شما می‌آید بیش‌تر است و برای رفتن درون آب باید دقت کنید؛ به‌ویژه اگر شنا بلد نیستید، زیرا ممکن است خطر غرق شدن شما را تهدید کند! علت آن که کف استخر یا اجسام درون آب را بالاتر از مکان واقعی آن‌ها می‌بینید این است که پرتوهای نور وقتی به‌طور مایل به سطح جدایی دو محیط می‌تابند، شکست یافته و از مسیر خود منحرف می‌شوند. این امر سبب می‌گردد اجسام در جای واقعی خود دیده نشوند. می‌توان نشان داد که بین عمق واقعی، عمق ظاهری و ضریب شکست دو محیط رابطه‌ی زیر برقرار است:

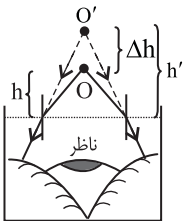
$$\frac{\text{ضریب شکست محیط ناظر}}{\text{عمق ظاهری}} = \frac{\text{عمق واقعی}}{\text{ضریب شکست محیط جسم}}$$

در هر یک از شکل‌های زیر مسیر پرتوها رسم شده و چشم از اندازه‌ی واقعی بسیار بزرگ‌تر نشان داده است. وقتی شخص به‌طور قائم از محیط رقیق مانند هوا به محیط غلیظ مانند آب نگاه می‌کند، اجسام درون آب را نزدیک‌تر به خود و بزرگ‌تر می‌بیند، عمق آب را کم‌تر احساس می‌کند.



$$h' = \frac{h}{n} \Rightarrow \Delta h = h - h' = h\left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

(عمق واقعی) $h' < h$ (عمق ظاهری)



وقتی شخص به‌طور قائم از محیط غلیظ مانند آب به محیط رقیق مانند هوا نگاه می‌کند، اجسام را دورتر و کوچک‌تر احساس می‌کند.

$$h' = nh \Rightarrow \Delta h = h' - h = h(n - 1)$$

(ارتفاع واقعی) $h' > h$ (ارتفاع ظاهری)

پرسش: اگر یک لیوان پر از آب را روی یک سکه قرار دهیم و به آن نگاه کنیم، سکه چگونه به نظر می‌آید؟
پاسخ: سکه از محل واقعی‌اش بالاتر دیده می‌شود و بزرگ‌تر به نظر می‌آید.

مسئله ۱۱ اگر از بالای یک لیوان پر از آب به سکه‌ی درون آن بنگریم، فاصله‌ی سکه از سطح آب ۹ cm به نظر می‌آید. عمق آب درون لیوان چند سانتی‌متر است؟ (ضریب شکست آب $\frac{4}{3}$ است.)

$$h' = \frac{h}{n} \Rightarrow 9 = \frac{h}{\frac{4}{3}} \Rightarrow h = 12 \text{ cm}$$

راه‌حل: با توجه به رابطه‌ی عمق ظاهری خواهیم داشت:

مسئله ۱۲ شخصی از درون آب استخر به یک لامپ که در فاصله‌ی ۲ متری بالای سطح آب نصب شده، نگاه می‌کند. شخص لامپ را از محل واقعی‌اش چند متر بالاتر می‌بیند؟ (ضریب شکست آب $\frac{4}{3}$ است.)

$$h' = nh \Rightarrow h' = \frac{4}{3} \times 2 = \frac{8}{3} \text{ m}$$

راه‌حل: با توجه به رابطه‌ی ارتفاع ظاهری خواهیم داشت:

$$\Delta h = h' - h \Rightarrow \Delta h = \frac{8}{3} - 2 \Rightarrow \Delta h = \frac{2}{3} \text{ m}$$

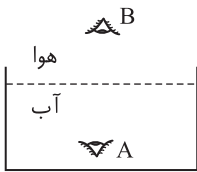
مسئله ۱۳ در ظرفی تا ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری، مایعی به ضریب شکست $\frac{1}{5}$ می‌ریزیم. بار دیگر در همان ظرف تا ارتفاع ۳۲ سانتی‌متری مایعی به ضریب شکست n می‌ریزیم. اگر در دو حالت عمق ظاهری یکسان باشد، n را بیابید.

راه‌حل: ابتدا به کمک رابطه‌ی عمق ظاهری، در حالت اول عمق ظاهری را حساب می‌کنیم:

$$h' = \frac{h}{n} \Rightarrow h' = \frac{30}{1/5} \Rightarrow h' = 150 \text{ cm}$$

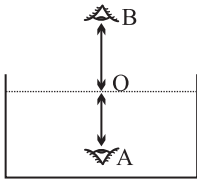
$$h' = h'' \xrightarrow{h' = \frac{h}{n}} 150 = \frac{32}{n} \Rightarrow n = \frac{1}{6}$$

اکنون n را به‌دست می‌آوریم:



مسئله ۱۴ در شکل روبه‌رو ناظر A، ناظر B را در فاصله H_1 و ناظر B، ناظر A را در فاصله H_2 را در

فاصله H_2 از خود می‌بیند. نسبت $\frac{H_1}{H_2}$ را بیابید. ($n_{\text{آب}} = \frac{4}{3}$)



راه‌حل: ناظر A، ناظر B را در فاصله H_1 می‌بیند:

$$H_1 = OB + \frac{OA}{n} = \frac{n \times OB + OA}{n}$$

و ناظر B، ناظر A را در فاصله H_2 می‌بیند:

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{n \times OB + OA}{n \times OB + OA} \Rightarrow \frac{H_1}{H_2} = n \Rightarrow \frac{H_1}{H_2} = \frac{4}{3}$$

اکنون دو رابطه را بر هم تقسیم می‌کنیم:

مسئله ۱۵ درون یک ظرف دو مایع شفاف به ضریب شکست $n_1 = \frac{4}{3}$ و $n_2 = \frac{5}{4}$ به ترتیب به عمق ۱۲ cm و ۲۰ cm می‌ریزیم. اگر

سکه‌ای در ته ظرف باشد، سکه چند سانتی‌متر از محل واقعی‌اش بالاتر دیده می‌شود؟

راه‌حل: عمق ظاهری را با فرض آن که تنها یک مایع در ظرف وجود دارد در دو حالت به‌دست می‌آوریم:

$$h'_1 = \frac{h_1}{n} \Rightarrow h'_1 = \frac{12}{\frac{4}{3}} = 9 \text{ cm} \Rightarrow \Delta h_1 = 12 - 9 = 3 \text{ cm}$$

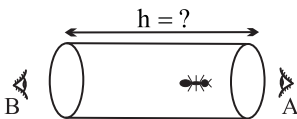
$$h'_2 = \frac{h_2}{n} \Rightarrow h'_2 = \frac{20}{\frac{5}{4}} = 16 \text{ cm} \Rightarrow \Delta h_2 = 20 - 16 = 4 \text{ cm}$$

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 \Rightarrow \Delta h = 3 + 4 = 7 \text{ cm}$$

سکه در مجموع، ۷ cm بالاتر از محل واقعی‌اش دیده می‌شود.

مسئله ۱۶ مورچه‌ای در یک استوانه‌ی شیشه‌ای توپر گرفتار شده است. هرگاه از طرف یک قاعده‌ی استوانه (قاعده نیز شیشه‌ای است) به مورچه نگاه کنیم، آن را در فاصله ۱۲ سانتی‌متر از آن قاعده می‌بینیم و هرگاه از طرف قاعده‌ی دیگر به آن نگاه کنیم مورچه را در فاصله ۱۸ سانتی‌متری قاعده می‌بینیم. ارتفاع استوانه چند سانتی‌متر است؟ ($n_{\text{شیشه}} = \frac{3}{2}$)

راه‌حل: ناظر A، عمق ظاهری را ۱۲ cm می‌بیند، بنابراین:



$$h'_A = \frac{h_A}{n} \Rightarrow 12 = \frac{h_A}{\frac{3}{2}} \Rightarrow h_A = 18 \text{ cm}$$

$$h'_B = \frac{h_B}{n} \Rightarrow 18 = \frac{h_B}{\frac{3}{2}} \Rightarrow h_B = 27 \text{ cm}$$

ناظر B، عمق ظاهری را ۱۸ cm می‌بیند:

$$h = h_A + h_B = 18 + 27 = 45 \text{ cm}$$

در این صورت:

رابطه‌ی ضریب شکست نور با سرعت نور در دو محیط

سرعت نور در محیط‌های شفاف مختلف، متفاوت است. سرعت انتشار نور در خلأ بیش‌تر از بقیه‌ی محیط‌هاست و تقریباً $3 \times 10^8 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ است

که آن را با حرف c نشان می‌دهند.

۱- آیا مفهوم $3 \times 10^8 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ را حس می‌کنید؟ آیا می‌توانید بزرگی آن را درک کنید؟ سیصد هزار کیلومتر بر ثانیه، یعنی در هر ثانیه نور می‌تواند فاصله‌ی اهواز تا تهران را ۳۰۰ بار طی کند! بله فقط در یک ثانیه، ۳۰۰ بار! اما نور فاصله‌ی بین خورشید و زمین را در حدود ۸ دقیقه و فاصله‌ی بین نزدیک‌ترین ستاره به زمین (بعد از خورشید) را در مدت ۴/۵ سال طی می‌کند. اگر در همین لحظه در آن ستاره اتفاقی بیافتد، ما پس از چه مدت از این اتفاق باخبر می‌شویم؟ ۴/۵ سال بعد.

اگر فاصله‌ی ستاره‌ای از زمین به گونه‌ای باشد که نور آن پس از ۱۵۰۰۰ سال به ما برسد، اگر آن ستاره خاموش شود ما پس از چه مدتی از آن آگاه می‌شویم؟ قطعاً ما دیگر نخواهیم بود تا از آن باخبر شویم ولی آیندگان ۱۵۰۰۰ سال بعد باخبر می‌شوند!

نتیجه این که ما با دوربین‌های گول‌پیکر خود، زمان حال کهکشان‌ها را مطالعه نمی‌کنیم بلکه گذشته‌ی آن‌ها را مرور می‌کنیم و هرچه تلسکوپ‌های ما قوی‌تر شوند، در زمان بیش‌تر به عقب می‌رویم.

آزمایش نشان می‌دهد که نسبت سرعت نور در هوا (c) به سرعت نور در یک محیط شفاف (v) برابر ضریب شکست مطلق آن محیط شفاف است:

$$n = \frac{c}{v}$$

اگر نور از یک محیط شفاف با ضریب شکست مطلق n_1 به محیط شفاف دیگری با ضریب شکست n_2 برود در این صورت:

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= \frac{c}{v_1} \\ n_2 &= \frac{c}{v_2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} \Rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

یعنی سرعت نور در محیطی که ضریب شکست بیش‌تری دارد، کم‌تر است و برعکس.

مسئله ۱۷ سرعت نور در شیشه به ضریب شکست $\frac{3}{2}$ چند متر بر ثانیه است؟ ($c = 3 \times 10^8 \frac{\text{km}}{\text{s}}$)

راه‌حل: با توجه به رابطه‌ی ضریب شکست و سرعت نور می‌توان نوشت:

$$n = \frac{c}{v} \Rightarrow v = \frac{c}{n} \Rightarrow v = \frac{3 \times 10^8}{\frac{3}{2}} = 2 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

دقت کنید، سرعت نور برحسب $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ برابر 3×10^8 است.

مسئله ۱۸ نور در مدت t در هوا مسافت 15° متر را طی می‌کند. نور در آب به ضریب شکست $\frac{4}{3}$ ، در همان مدت t چند متر را طی می‌کند؟

راه‌حل: طبق آنچه در علوم سال‌های پیش فرا گرفته‌اید، مسافت طی شده برابر حاصل ضرب سرعت در زمان است:

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= v_1 t_1 \\ d_2 &= v_2 t_2 \end{aligned} \right\} \xrightarrow{t_1 = t_2} \frac{d_2}{d_1} = \frac{v_2}{v_1} \xrightarrow{v_1 = c} \frac{d_2}{d_1} = \frac{v_2}{c} = \frac{1}{n}$$

$$\frac{d_2}{15^\circ} = \frac{3}{4} \Rightarrow d_2 = \frac{45^\circ}{4} = 112.5 \text{ m}$$

تست ۱: سرعت نور در محیط A بیش‌تر از محیط B است. اگر پرتو نوری با زاویه‌ی تابش مساوی، از هوا به هر دو محیط بتابد، در این صورت:

(۱) زاویه‌ی انحراف در محیط B بزرگ‌تر از محیط A است. (۲) زاویه‌ی انحراف در محیط A بزرگ‌تر از محیط B است.

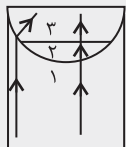
(۳) زاویه‌ی انحراف در هر دو محیط یکسان است. (۴) هر حالتی ممکن است رخ دهد.

پاسخ: سرعت نور در محیط A بیش‌تر از محیط B است. بنابراین ضریب شکست محیط A از ضریب شکست محیط B کم‌تر بوده و پرتو

در محیط A کم‌تر منحرف می‌شود، بنابراین زاویه‌ی انحراف در محیط B بزرگ‌تر است.

$$v_A > v_B \Rightarrow n_A < n_B \Rightarrow r_B < r_A \Rightarrow D_B > D_A$$

بنابراین گزینه‌ی (۱) درست است.



تست ۲: دو پرتو نور تک‌رنگ مشابه مطابق شکل از محیط (۱) می‌تابند. با توجه به نحوه‌ی عبور نور از هر سه محیط،

کدام‌یک از روابط زیر درباره‌ی سرعت نور در هر سه محیط درست است؟

$$v_1 = v_2 > v_3 \quad (2)$$

$$v_1 = v_2 = v_3 \quad (1)$$

$$v_2 = v_3 < v_1 \quad (4)$$

$$v_1 = v_2 < v_3 \quad (3)$$

پاسخ: با توجه به شکل پرتو از محیط ۱ به ۲ با آن‌که بر مرز دو محیط عمود نیست بدون انحراف رد شده است. بنابراین $n_1 = n_2$ است.

اما از محیط ۱ به محیط ۳ پرتو به خط عمود نزدیک می‌شود پس $n_3 > n_1$ است. در این صورت:

$$n_1 = n_2 < n_3 \Rightarrow v_1 = v_2 > v_3$$

بنابراین گزینه‌ی (۲) درست است.

مسئله ۱۹ ضریب شکست شیشه نسبت به الماس $\frac{5}{8}$ و ضریب شکست آب نسبت به شیشه $\frac{4}{9}$ است. سرعت نور در آب چند برابر سرعت نور در شیشه است؟

راه حل: با توجه به رابطه‌ی ضریب شکست و تغییر سرعت نور خواهیم داشت:
 (اندیس W, D, S به ترتیب برای شیشه، الماس و آب در نظر گرفته شده است.)

$$\frac{n_S}{n_D} = \frac{v_D}{v_S} \Rightarrow \frac{5}{8} = \frac{v_D}{v_S}$$

$$\frac{n_W}{n_S} = \frac{v_S}{v_W} \Rightarrow \frac{4}{9} = \frac{v_S}{v_W}$$

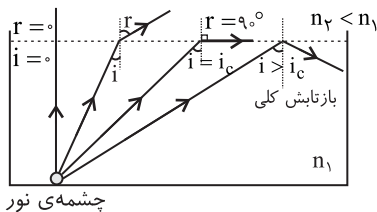
$$\frac{5}{8} \times \frac{4}{9} = \frac{v_D}{v_S} \times \frac{v_S}{v_W} \Rightarrow \frac{v_D}{v_W} = \frac{5}{9} \Rightarrow \frac{v_W}{v_D} = \frac{9}{5}$$

دو رابطه را در هم ضرب می‌کنیم:

زاویه‌ی حد - بازتاب کلی

در نوجوانی هرگاه به استخر می‌رفتم، با عینک شنا سرم را زیر آب می‌بردم و از زیر آب به سطح آب نگاه می‌کردم گاهی اوقات تصویر لامپ درون آب روی دیواره‌ی استخر را در بالای آب می‌دیدم و از این که از درون استخر آب شبیه آینه بود تعجب می‌کردم و لذت می‌بردم بدون آن که دلیل این پدیده را بفهمم. اما امروز می‌دانم که:

هرگاه نور از محیط غلیظ مانند آب وارد محیط رقیق مانند هوا شود، پرتو نور از خط عمود دور می‌شود، تا جایی که سرانجام زاویه‌ی شکست برابر 90° شده و پرتو شکست مماس بر سطح دو محیط، خارج می‌شود. در این حالت زاویه‌ی تابش را **زاویه‌ی حد** می‌گوییم و آن را با c نشان می‌دهیم. اگر زاویه‌ی تابش از زاویه‌ی حد بزرگ‌تر شود پرتو وارد محیط رقیق نشده و بازتاب کلی رخ می‌دهد و سطح جدایی دو محیط شبیه آینه عمل می‌کند.



$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin i}{\sin r} \xrightarrow[r=i_c]{r=90^\circ} \sin i_c = \frac{n_2}{n_1}$$

با توجه به رابطه‌ی اسنل خواهیم داشت:

$$\sin i_c = \frac{1}{n}$$

اگر محیط رقیق هوا باشد:

مسئله ۲۰ ضریب شکست محیطی نسبت به هوا $\frac{2\sqrt{3}}{3}$ است. اگر نور بخواهد از این محیط وارد هوا شود، زاویه‌ی حد چقدر خواهد بود؟

$$\sin i_c = \frac{1}{n} \Rightarrow \sin i_c = \frac{1}{\frac{2\sqrt{3}}{3}} \Rightarrow \sin i_c = \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow i_c = 60^\circ$$

راه حل: با توجه به رابطه‌ی زاویه‌ی حد:

مسئله ۲۱ پرتو نوری با زاویه‌ی تابش 60° از هوا وارد محیط شفاف شده و 15° منحرف می‌شود. سینوس زاویه‌ی حد این محیط نسبت به هوا را بیابید.

$$r = i - D \Rightarrow r = 60^\circ - 15^\circ \Rightarrow r = 45^\circ$$

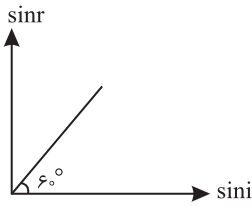
راه حل: ابتدا زاویه‌ی شکست را می‌یابیم:

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} \Rightarrow n = \frac{\sin 60^\circ}{\sin 45^\circ} \Rightarrow n = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{\sqrt{2}}{2}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}$$

سپس ضریب شکست مطلق محیط شفاف را به دست می‌آوریم:

$$\sin i_c = \frac{1}{n} \Rightarrow \sin i_c = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \Rightarrow \sin i_c = \frac{\sqrt{6}}{3}$$

اکنون سینوس زاویه‌ی حد را حساب می‌کنیم:



$$\frac{n_B}{n_A} = \frac{\sin i}{\sin r}$$

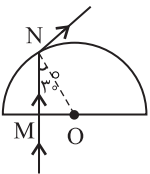
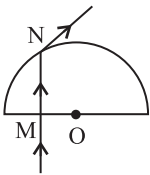
مسئله ۲۲) پرتو نور تک‌رنگی تحت زاویه‌ی i از محیط شفاف A وارد محیط شفاف B می‌شود. نمودار تغییرات $\sin r$ بر حسب $\sin i$ مطابق شکل است. آیا هرگاه پرتو از محیط A به محیط B بتابد به آن وارد می‌شود؟

راه‌حل: با توجه به رابطه‌ی اسنل داریم:

از طرفی شیب خط این نمودار برابر است با:

$$\tan 60^\circ = \frac{\sin r}{\sin i} \Rightarrow \sqrt{3} = \frac{\sin r}{\sin i} \Rightarrow \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{\sqrt{3}} \Rightarrow \frac{n_B}{n_A} = \frac{1}{\sqrt{3}} \Rightarrow n_A = \sqrt{3}n_B$$

بنابراین محیط A غلیظ‌تر از محیط B است، از این‌رو پرتو تنها هنگامی از محیط A وارد محیط B می‌شود که زاویه‌ی تابش از زاویه‌ی حد محیط A کم‌تر باشد. بنابراین جواب پرسش بالا منفی است.



مسئله ۲۳) در شکل روبه‌رو یک نیم‌استوانه‌ی شفاف که ضریب شکست آن ۲ می‌باشد، نشان داده شده است. پرتو نوری در نقطه‌ی M عمود بر وجه تخت آن می‌تابد و مماس از وجه نیم‌دایره خارج می‌شود. فاصله‌ی MN چند سانتی‌متر است؟ (شعاع نیم‌استوانه ۵ سانتی‌متر است.)

راه‌حل: زاویه‌ی حد نیم‌استوانه را به دست می‌آوریم:

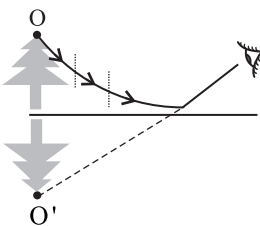
$$\sin i_c = \frac{1}{n} \Rightarrow \sin i_c = \frac{1}{2} \Rightarrow i_c = 30^\circ$$

پرتو، مماس خارج شده است، بنابراین زاویه‌ی تابش در نیم‌استوانه بر وجه نیم‌دایره برابر زاویه‌ی حد است.
در مثلث OMN خواهیم داشت:

$$\cos 30^\circ = \frac{MN}{ON} \Rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{MN}{5} \Rightarrow MN = \frac{5\sqrt{3}}{2} \text{ cm}$$



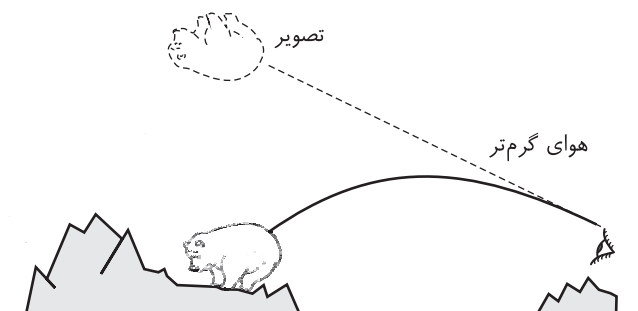
پرسش: در تصویر روبه‌رو سطح جاده خیس به نظر می‌رسد. این پدیده را سراب می‌گویند. علت آن را به کمک شکست نور توضیح دهید.



پاسخ: در روزهای گرم که سطح زمین در اثر تابش آفتاب گرم است، هوای مجاور سطح زمین گرم شده و در نتیجه لایه‌های هوای مجاور سطح زمین رقیق‌تر هستند و نور با عبور از لایه‌های هوای غلیظ و ورود به لایه‌های هوای رقیق در نهایت بازتاب کلی می‌کند و ناظر احساس می‌کند که روی سطح زمین آب وجود دارد و تصویر اجسام را در آن می‌بیند.

پرسش: یکی از پدیده‌هایی که در قطب قابل مشاهده است دیدن تصویر یک خرس در آسمان است که در شکل روبه‌رو نشان داده شده است. علت آن را توضیح دهید.

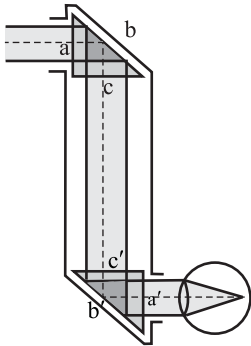
پاسخ: به عهده‌ی دانش‌آموز.



نمونه‌هایی از کاربرد عملی بازتاب کلی نور

پریسکوپ (پیرابین)

در دوران راهنمایی با دستگاه پریسکوپ که در زیردریایی‌ها برای دیدن اجسام روی سطح آب به کار می‌رود آشنا شده‌اید. این دستگاه از دو آینه‌ی موازی تشکیل شده بود. اما در پریسکوپ‌های واقعی به جای آینه از منشور استفاده می‌شود. زاویه‌ی حد ماده‌ای که منشور از آن‌ها ساخته شده است حدود 42° است.



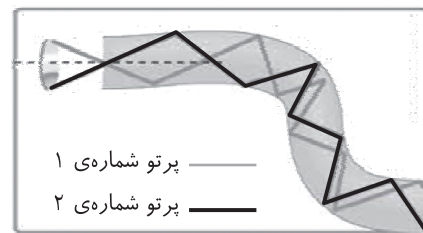
در شکل روبه‌رو طرز عمل منشور نشان داده شده است. پرتو عمود بر وجه a می‌تابد و وارد منشور می‌شود. زاویه‌ی تابش بر وجه b برابر 45° است که از زاویه‌ی حد منشور ($i_c = 42^\circ$) بزرگ‌تر بوده بازتاب کلی رخ می‌دهد و پرتو از وجه c خارج می‌شود همین حالت در منشور $a'b'c'$ تکرار می‌شود و ناظر، تصویر جسم را می‌بیند.

تار نوری (فیبر نوری)

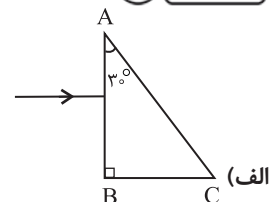
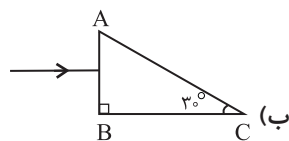
از این وسیله در دستگاه اندوسکوپی که برای دیدن درون معده یا دستگاه کلونوسکوپی برای دیدن درون روده و یا در وسایل تزئینی و همچنین در مخابرات استفاده می‌شود. اساس کار انتقال تصویر یا نور بازتاب‌های کلی و متوالی روی دیواره‌ی این تار است. در شکل زیر یک تار که در آن دو پرتو نور فرستاده شده نشان داده شده است. این پرتوها در تار منتشر شده و از سوی دیگر آن خارج می‌شوند.



تارهای نوری که نور از نوک آن‌ها خارج می‌شود و در بدنه‌ی آن‌ها بازتاب کلی رخ می‌دهد.

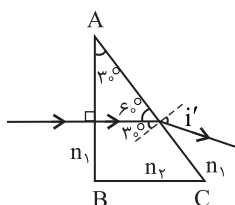


مسئله ۲۴ در شکل‌های داده شده، ضریب شکست منشور $\sqrt{2}$ است. مسیر پرتو خروجی را مشخص کنید.



$$\sin i_c = \frac{1}{n} \Rightarrow \sin i_c = \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow i_c = 45^\circ$$

راه حل: ابتدا زاویه‌ی حد منشور را به دست می‌آوریم:



(الف) در شکل روبه‌رو پرتو عمود بر وجه AB می‌تابد ($i=0$) بنابراین بدون انحراف وارد منشور می‌شود ($r=0$)، زاویه‌ی تابش بر وجه AC برابر 30° و زاویه‌ی خروج از وجه AC برابر است با:

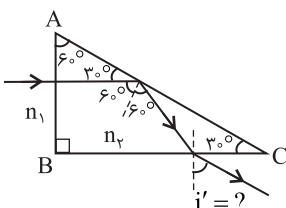
$$n_1 \sin i' = n_2 \sin r' \Rightarrow 1 \times \sin i' = \sqrt{2} \times \frac{1}{2} \Rightarrow i' = 45^\circ$$

پرتو با زاویه‌ی 45° از وجه AC خارج می‌شود.

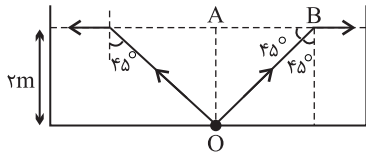
(ب) پرتو با زاویه‌ی 60° بر وجه AC می‌تابد که از زاویه‌ی حد منشور ($i_c = 45^\circ$) بزرگ‌تر است پس بازتاب کلی رخ می‌دهد، سپس پرتو با زاویه‌ی 30° بر وجه BC می‌تابد.

$$n_1 \sin i' = n_2 \sin r' \Rightarrow 1 \times \sin i' = \sqrt{2} \times \frac{1}{2} \Rightarrow i' = 45^\circ$$

بنابراین پرتو با زاویه‌ی 45° از وجه BC خارج می‌شود.



مسئله ۲۵ در وسط کف استخری یک چشمه‌ی نور نقطه‌ای وجود دارد. اگر ضریب شکست آب استخر $\sqrt{2}$ و ارتفاع آب درون استخر $2m$ باشد، مساحت لکه‌ی روشن روی سطح آب چند متر مربع است؟ ($\pi=3$)



راه حل: تنها پرتوهایی از سطح جدایی وارد هوا می‌شوند که زاویه‌ی تابش آن‌ها از آب بر سطح جدایی کمتر از زاویه‌ی حد باشد. $i \leq i_c$
ابتدا زاویه‌ی حد را به دست می‌آوریم:

$$\sin i_c = \frac{1}{n} \Rightarrow \sin i_c = \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow i_c = 45^\circ$$

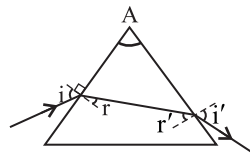
$$\tan 45^\circ = \frac{OA}{AB} \xrightarrow{\tan 45^\circ = 1} AB = OA \Rightarrow AB = 2m$$

مطابق شکل در مثلث OAB داریم:

$$S = \pi R^2 \Rightarrow S = 3 \times 2^2 = 12m^2$$

سطح لکه‌ی روشن برابر است با:

مسئله ۲۶ در منشور شکل روبه‌رو A را زاویه‌ی رأس و زاویه‌های r و r' را زاویه‌های شکست داخلی منشور می‌گویند. ثابت کنید: $\hat{A} = \hat{r} + \hat{r}'$



راه حل: با توجه به شکل:

$$\begin{cases} \hat{i} + \hat{r} = 90^\circ \\ \hat{i}' + \hat{r}' = 90^\circ \end{cases} \Rightarrow \hat{r} + \hat{r}' + \hat{i} + \hat{i}' = 180^\circ \quad (1)$$

مجموع زاویه‌های یک مثلث نیز 180° است:

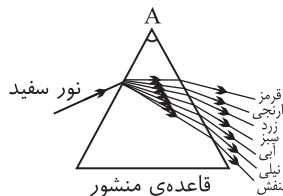
$$\hat{A} + \hat{i} + \hat{i}' = 180^\circ \quad (2)$$

$$\hat{A} = \hat{r} + \hat{r}'$$

با مقایسه‌ی روابط (۱) و (۲) نتیجه می‌شود:

پرسش: در تمام مسایلی که درباره‌ی منشور حل کردیم، پرتو پس از ورود به منشور به سمت قاعده‌ی آن منحرف می‌شود. اگر منشور در محیطی غلیظ‌تر از خودش قرار گیرد چه اتفاقی می‌افتد؟
پاسخ: اگر منشور در محیطی غلیظ‌تر از خودش قرار گیرد، پرتوها به سمت رأس منحرف می‌شوند.

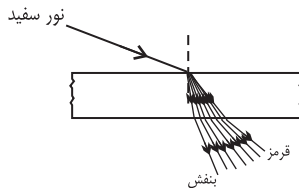
پاشیدگی نور



وقتی نور سفید به منشور می‌تابد، نور خروجی از منشور به هفت رنگ تجزیه می‌شود. این پدیده را **پاشیدگی نور** می‌گویند. ضریب شکست یک محیط شفاف برای رنگ‌های مختلف، متفاوت است. برای رنگ قرمز کمترین مقدار و برای رنگ بنفش بیشترین مقدار است.

پرسش: آیا تیغه‌ی تخت شفاف، نور را تجزیه می‌کند؟

پاسخ: بله، زیرا وقتی مطابق شکل، نور سفید به تیغه می‌تابد، پرتو قرمز کمتر و پرتو بنفش بیشترین منحرف می‌شود.



پرسش: چرا با آن که تیغه‌ی تخت نور را تجزیه می‌کند، این پدیده توسط چشم ما قابل مشاهده نیست؟

پاسخ: چون امتداد پرتوهای خروجی موازی می‌باشند و پرتوها به هم نزدیک هستند، چشم نور خروجی را سفید می‌بیند.

تست ۳: در بالای استخری دو لامپ قرمز و آبی در یک فاصله از سطح آب و در کنار هم نصب شده‌اند. اگر از درون آب به آن‌ها نگاه کنیم

(۱) لامپ آبی را نزدیک‌تر می‌بینیم.

(۲) هر دو لامپ را نزدیک‌تر و در یک فاصله می‌بینیم.

(۳) لامپ قرمز را نزدیک‌تر می‌بینیم.

(۴) هر دو لامپ را دورتر و در یک فاصله می‌بینیم.

پاسخ: همان‌گونه که بیان شد، ضریب شکست یک محیط شفاف مانند آب برای نور قرمز کمتر از نور آبی است.

$$n_{\text{آبی}} < n_{\text{قرمز}} \xrightarrow{h' = nh} h'_{\text{قرمز}} < h'_{\text{آبی}}$$

بنابراین گزینه‌ی (۳) درست است.

عدسی‌ها

پدرم یک ذره‌بین (امروز می‌دانم به آن عدسی همگرا می‌گویند) برای من خریده بود و من که در کنار پنجره‌ی کلاس می‌نشستم، با ذره‌بین نور خورشید را روی یک تکه کاغذ جمع می‌کردم و کاغذ شروع به سوختن می‌کرد و بوی کاغذ سوخته تمام کلاس را فرا می‌گرفت، البته من هم از کلاس اخراج می‌شدم! این اولین آشنایی من با کاربردهای عدسی همگرا بود. البته شما می‌دانید از عدسی در ساخت عینک طبی یا در دستگاه‌های نوری مانند میکروسکوپ، تلسکوپ و ... نیز استفاده می‌شود.



عدسی از یک ماده‌ی شفاف ساخته شده است. عدسی‌ها به دو دسته‌ی همگرا و واگرا تقسیم می‌شوند. این تقسیم‌بندی بر اساس رفتار عدسی با نور گذرنده از آن صورت گرفته است. عدسی همگرا، پرتوهای نور را به هم نزدیک و عدسی واگرا پرتوهای نور را از هم دور می‌کند.

عدسی همگرا

در عدسی همگرا ضخامت قسمت میانی عدسی از لبه‌های آن بیش‌تر است.

تعریف

محور اصلی عدسی: خطی را که از مرکز خمیدگی دو سطح عدسی می‌گذرد و یا از مرکز سطح خمیده گذشته و به سطح تخت عمود می‌شود، محور اصلی می‌گویند.