

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# فیزیک

دورهٔ پیش دانشگاهی

رشتهٔ علوم ریاضی



## وزارت آموزش و پرورش سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

نام کتاب :	فیزیک پیش‌دانشگاهی - ۲/۲۹۳
پدیدآورنده :	سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی
مدیریت برنامه‌ریزی درسی و تألیف :	دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری
شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف :	احمد احمدی، اعظم پورقاضی، روح‌الله خلیلی‌بروجنی، ابوالقاسم زال‌پور، سید مهدی شیوایی، شیرین فراهانی، حسن عزیزی و غلامعلی محمودزاده (اعضای شورای برنامه‌ریزی و تألیف)
مدیریت آماده‌سازی هنری :	اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی
شناسه افزوده آماده‌سازی :	لیدا نیک‌روش (مدیر امور فنی و چاپ) - طاهره حسن‌زاده (طراح جلد) - مریم نصرتی (صفحه‌آرا) - فاطمه رئیسیان فیروز‌آباد، مریم دهقان‌زاده (رسم) - کبری اجابتی، سیده فاطمه محسنی، رعنا فرج‌زاده‌درونی، فاطمه گیتی‌جبین، زینت بهشتی شیرازی، حمید نابت‌کلاچاهی، راحله زادفتح‌اله (امور آماده‌سازی)
نشانی سازمان :	تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی) تلفن: ۸۸۸۳۱۱۶۱-۹، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کد پستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹
ناشر :	شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران - تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش) تلفن: ۴۴۹۸۵۱۶۱-۵، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۳۷۵۱۵-۱۳۹
جایخانه :	شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»
سال انتشار و نوبت چاپ :	چاپ شانزدهم ۱۳۹۶
برای دریافت فایل pdf کتاب‌های درسی به پایگاه کتاب‌های درسی به نشانی <a href="http://www.chap.sch.ir">www.chap.sch.ir</a> و برای خرید کتاب‌های درسی به سامانه فروش و توزیع مواد آموزشی به نشانی <a href="http://www.irtextbook.ir">www.irtextbook.ir</a> یا <a href="http://www.irtextbook.com">www.irtextbook.com</a> مراجعه نمایید.	

کلیه حقوق مادی و معنوی این کتاب متعلق به سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی وزارت آموزش و پرورش است و هرگونه استفاده از کتاب و اجزای آن به صورت چاپی و الکترونیکی و ارائه در پایگاه‌های مجازی، نمایش، اقتباس، تلخیص، تبدیل، ترجمه، عکسبرداری، نقاشی، تهیه فیلم و تکثیر به هر شکل و نوع بدون کسب مجوز ممنوع است و متخلفان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.



هر کاری را که انسان باورش این است که نسبت به آن کار ضعیف است، نمی تواند  
آن کار را انجام بدهد... هر کشوری که اعتقادش این باشد که نمی تواند خودش صنعتی  
را ایجاد کند این ملت محکوم به این است که تا آخر نتواند، و این اساس نقشه هایی بوده  
است که برای ملل ضعیف دنیا قدرت های بزرگ کشیده اند.

امام خمینی رحمه الله علیه

## فهرست

فصل ۱ : حرکت شناسی در دو بعد	۱	۳-۳- معادله های سرعت و شتاب در	۸۹
۱-۱- حرکت در یک بعد	۲	حرکت هماهنگ ساده	۹۱
۲-۱- حرکت در دو بُعد یا حرکت در	۲۱	۴-۳- انرژی مکانیکی نوسانگر (دستگاه	۹۳
صفحه	۳۷	جرم - فنر)	۹۶
تمرین های فصل اول	۴۱	۵-۳- آونگ ساده	۹۸
فصل ۲ : دینامیک	۴۲	۶-۳- تشدید	۱۰۰
۱-۲- قانون های نیوتون	۴۶	تمرین های فصل سوم	۱۰۱
۲-۲- چگونگی استفاده از قانون های	۵۴	فصل ۴ : موج های مکانیکی	۱۱۱
نیوتون در حرکت یک جسم	۵۸	۱-۴- موج	۱۱۳
۳-۲- تکانه (اندازه حرکت)	۶۱	۲-۴- موج های عرضی - موج های	۱۲۱
۴-۲- حرکت دایره ای	۶۷	طولی	۱۲۶
۵-۲- حرکت دایره ای یکنواخت	۷۲	۳-۴- تابع موج	۱۳۳
۶-۲- دینامیک حرکت دایره ای	۷۵	۴-۴- انتشار موج در دو و سه بُعد	۱۳۵
یکنواخت	۷۸	۵-۴- اصل برهم نهی موج ها	۱۳۹
۷-۲- قانون های کپلر	۷۹	۶-۴- برهم نهی موج ها در دو بُعد -	۱۴۰
تمرین های فصل دوم	۸۳	تداخل موج ها در سطح آب	
فصل ۳ : حرکت نوسانی		تمرین های فصل چهارم	
۱-۳- حرکت هماهنگ ساده			
۲-۳- معادله حرکت هماهنگ ساده			

۲۱۷	تمرین های فصل هفتم	۱۴۳	۲-۵- سرعت صوت
		۱۴۷	۳-۵- لوله های صوتی
	<b>فصل ۸: آشنایی با فیزیک حالت جامد و</b>	۱۵۴	۴-۵- شدت صوت
۲۲۱	<b>ساختار هسته</b>	۱۵۹	۵-۵- اثر دوپلر
۲۲۲	۱-۸- مواد رسانا و نارسانا	۱۶۳	تمرین های فصل پنجم
۲۲۴	۲-۸- نظریه نواری		
	۳-۸- رسانش الکتریکی در مدل ساختار		<b>فصل ۶: موج های الکترومغناطیسی ۱۶۶</b>
۲۲۸	نواری	۱-۶- چگونگی تشکیل موج های	
۲۲۹	۴-۸- برخی از ویژگی های نیم رساناها	۱۶۸	الکترومغناطیس توسط یک آنتن
۲۳۱	۵-۸- آرایش نیم رساناها	۲-۶- سرعت انتشار موج های	
۲۳۵	۶-۸- دیود و پیوندگاه p-n	۱۷۲	الکترومغناطیسی
۲۳۸	۷-۸- ابر رساناها	۳-۶- طیف موج های الکترومغناطیسی	
۲۴۲	۸-۸- ساختار هسته اتم	۴-۶- تداخل موج های نوری	
۲۵۱	۹-۸- پرتوزایی	۱۸۱	تمرین های فصل ششم
۲۵۷	۱۰-۸- انرژی هسته ای		
۲۶۶	تمرین های فصل هشتم		<b>فصل ۷: آشنایی با فیزیک اتمی ۱۸۳</b>
		۱۸۵	۱-۷- نظریه کوانتومی
۲۷۲	<b>واژه نامه فارسی - انگلیسی</b>	۱۹۱	۲-۷- فوتون و پدیده فوتوالکتریک
		۱۹۹	۳-۷- طیف اتمی
۲۸۲	<b>فهرست مراجع</b>	۲۰۷	۴-۷- الگوهای اتمی
		۲۱۴	۵-۷- آشنایی با لیزر

## پیشگفتار

### سخنی با دانش آموزان

کتابی که پیش رو دارید، چهارمین و آخرین کتاب در دوره آموزش متوسطه است که شما را با برخی دیگر از مفاهیم و کاربردهای علم فیزیک آشنا می‌سازد. انتظار می‌رود با مفاهیم کتاب‌های پیشین خود به خوبی آشنا شده باشید، چرا که هر علم بر مبنای پیش‌نیازهای آن بی‌ریزی می‌شود. همچنین امیدواریم تاکنون به اهمیت فیزیک که یکی از بنیادی‌ترین دانش‌هاست پی برده و از مطالعه آن لذت برده باشید. فیزیک شالوده تمام علوم مهندسی و فناوری دیروز، امروز و فردای بشر بوده و خواهد بود. دانش فیزیک که تجلی هوشمندی و تفکر بشر در طبیعت پیرامون است، شما را یاری می‌دهد تا با درک عمیق مفاهیم آن، پاسخی در خور برای بیشتر پرسش‌ها و کنجکاوی‌های هر روزه خود بیابید. افزون بر این، فیزیک علمی تجربی است و هیچ نظریه‌ای در فیزیک تاکنون به عنوان حقیقت پایانی و غایی اثبات نشده است. این امکان همواره وجود دارد که مشاهدات و آزمایش‌های جدید ایجاب کنند که یک نظریه فیزیکی بازنگری و یا حتی رد شود؛ و این همان چیزی است که مطالعه فیزیک را هیجان‌انگیز می‌کند تا افراد خلاق بتوانند روزنه‌ها و مسیرهای جدیدی را در پیشبرد فیزیک بگشایند. پیش از ورود به قلمروهایی از فیزیک که برای شما جذاب‌اند، باید در چیزهایی مهارت پیدا کنید که شاید جذابیت کمتری دارند، ولی بسیار اساسی‌اند و بدون آنها نمی‌توانید به راحتی فیزیک را بفهمید و آن را به کار گیرید.

در آموزش این کتاب دو هدف دنبال می‌شود. نخست، شما با شماری از قوانین بنیادی و اصولی آشنا می‌شوید که علم فیزیک را تشکیل می‌دهند. دوم، توانایی شما در به کار بستن این نظریات در وضعیت‌های مشخص و مثال‌های عینی افزایش یابد. برای رسیدن به هدف دوم، مثال‌های حل شده زیادی در لابه‌لای متن اصلی و همچنین مسائلی در پایان هر فصل آمده است. سفارش می‌کنیم که نخست متن اصلی را به خوبی درک کنید و سپس به مطالعه مثال‌های حل شده و مسئله‌ها بپردازید.

### سخنی با همکاران ارجمند

به تبع تغییرات انجام شده در آخرین سال تحصیلی، کتاب فیزیک (۱) و (۲) دوره‌های پیش‌دانشگاهی نظام ترمی واحدی، با عنوان فیزیک پیش‌دانشگاهی دوره متوسطه نظری و در قالب ۸ فصل تغییر یافته و محتوای آن مورد بازنگری کلی قرار گرفته است. در این بازنگری تلاش شده است که محتوای کتاب برای ارائه در یک سال تحصیلی مناسب باشد. هم‌زمان با سال تحصیلی ۹۱-۹۲ کتاب راهنمای معلم فیزیک دوره پیش‌دانشگاهی به همراه لوحی فشرده در اختیار همکاران عزیز قرار می‌گیرد تا مواد آموزشی بیشتری را جهت ارائه تدریس کارآمد در دست داشته باشید. امید است همکاران محترم نیز از هر کوششی که موجب شوق انگیزتر شدن یادگیری و مشارکت دانش‌آموزان در فرایند آموزش این درس می‌شود، دریغ نورزند.

### قدردانی

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب‌های درسی ابتدایی و متوسطه نظری از همکاران عزیزی که طی سال‌های گذشته، نظرهای اصلاحی و پیشنهادی سازنده خود را برای این گروه فرستاده‌اند، سپاس فراوان دارد. پس از این نیز می‌توانید از طریق [physics-dept@talif.sch.ir](mailto:physics-dept@talif.sch.ir) با نسانی تهران - صندوق پستی ۱۵۸۷۵/۴۸۷۴ گروه فیزیک، نظرهای اصلاحی خود را برای ما بفرستید.

اعضای گروه فیزیک همچنین از خانم‌ها سمیرا بهرامی، معصومه شاه‌سواری و بتول فرنوش و آقایان سیامک خادمی، محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر، محمدرضا شریف‌زاده، حیدر شکری و مجید فلاح که ما را در بازنگری این کتاب یاری نمودند صمیمانه تشکر می‌کند.

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری

# حرکت شناسی در دو بعد



## فصل

# حرکت شناسی در دو بعد

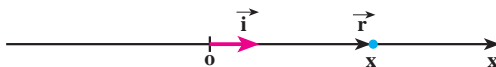
**نگاهی به فصل :** دربارهٔ حرکت‌هایی که در اطراف ما رخ می‌دهد، اغلب، پرسش‌های زیادی برای ما مطرح می‌شود؛ پرسش‌هایی چون : سیاره‌ها در چه مسیرهایی به دور خورشید حرکت می‌کنند؟ چرا هنگامی که فتری را می‌کشیم و رها می‌کنیم، نوسان می‌کند؟ ماهواره‌ها را چگونه در مدار زمین قرار می‌دهند؟ ... پاسخ این پرسش‌ها را باید در علم مکانیک جست‌وجو کرد. علمی که در آن حرکت اجسام مورد بررسی قرار می‌گیرد. هنگامی که چگونگی حرکت را توصیف می‌کنیم، با بخشی از علم مکانیک که حرکت شناسی نامیده می‌شود، سروکار داریم. بخش دیگری از علم مکانیک، دینامیک است که به بررسی رابطهٔ بین حرکت و نیرو می‌پردازد. به این موضوع در فصل بعد خواهیم پرداخت. در فیزیک (۲) و آزمایشگاه تا اندازه‌ای حرکت شناسی در یک بعد را مورد بررسی قرار دادیم، با کمیت‌های مکان، جابه‌جایی سرعت متوسط و ... آشنا شدیم، و حرکت یکنواخت و حرکت با شتاب ثابت بر روی یک خط راست را نیز بررسی کردیم. ما در زندگی روزمره بیشتر با حرکت‌هایی که در دو بعد و سه بعد انجام می‌شوند سروکار داریم، و بررسی آنها اهمیت بیشتری دارد؛ از این رو، در این فصل، پس از یادآوری مطالبی که در کتاب فیزیک (۲) و آزمایشگاه خوانده‌اید، به بررسی حرکت در دو بعد می‌پردازیم.

## ۱-۱- حرکت در یک بعد

در شکل ۱-۱ جسمی بر روی محور  $x$  نمایش داده شده است. مکان جسم در این شکل با بردار  $\vec{r}$  مشخص شده است. بردار  $\vec{r}$  را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$\vec{r} = x \vec{i} \quad (1-1)$$

در این رابطه،  $\vec{i}$  بردار یکه در جهت محور  $x$  است.



شکل ۱-۱



هنگامی که جسم روی محور  $x$  حرکت می‌کند، در هر لحظه بردار مکان آن تغییر می‌کند. برای توصیف حرکت جسم، یعنی برای مشخص کردن بردار مکان جسم در لحظه  $t$  کافی است که  $x$  را به صورت تابعی از زمان داشته باشیم :

$$x=f(t) \quad (2-1)$$

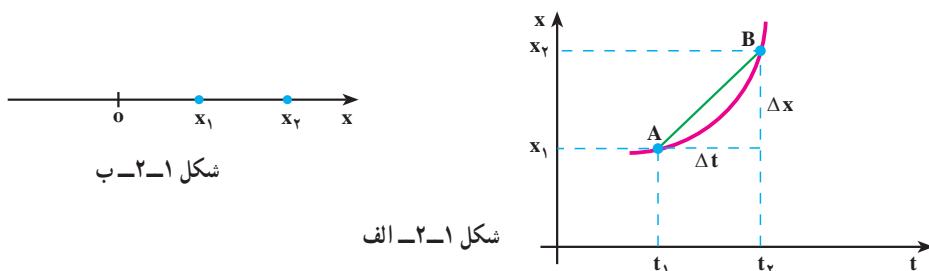
این رابطه، معادله حرکت جسم نامیده می‌شود.

در کتاب فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم که حرکت جسم را می‌توان به صورت نموداری در دستگاه مختصات مکان-زمان نمایش داد؛ به عبارت دیگر، این نمودار با رسم تابع  $x=f(t)$  در دستگاه مختصات  $t-x$  به دست می‌آید.

## تمرین ۱-۱

معادله حرکت جسمی در یک بعد در SI با رابطه  $x = -t^2 + 6t - 8$  بیان شده است. الف) نمودار مکان-زمان آن را رسم کنید. ب) بردار مکان جسم را در زمان‌های  $t = 0, 1, 3$  (s) روی محور  $x$  نمایش دهید.

سرعت متوسط : نمودار مکان-زمان جسمی در شکل ۱-۲ الف نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱-۲ الف نشان داده شده است، متحرک در لحظه  $t_1$  در مکان  $x_1$  (نقطه A) روی نمودار مکان-زمان و در لحظه  $t_2$  در مکان  $x_2$  (نقطه B) قرار دارد.

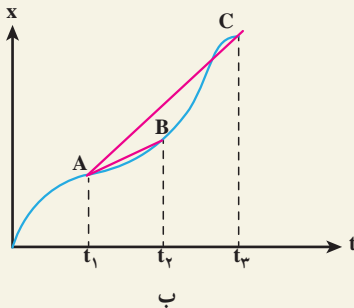
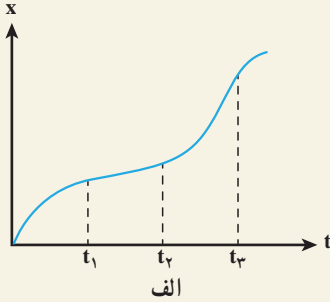


در این شکل،  $\Delta x = x_2 - x_1$  مقدار جابه‌جایی متحرک در بازه زمانی  $\Delta t = t_2 - t_1$ ، و نسبت  $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ ، که شیب خط AB در دستگاه مکان-زمان است، سرعت متوسط متحرک نامیده می‌شود. این کمیت را با  $\bar{v}_x$  نشان دادیم :

$$\bar{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3-1)$$

زیرنویس  $x$  مشخص می‌کند که حرکت در راستای محور  $x$  انجام می‌شود.

### مثال ۱-۱



شکل ۱-۳

در نمودار شکل ۱-۳-الف سرعت متوسط را در بازه‌های  $t_2 - t_1$  و  $t_3 - t_1$  با هم مقایسه کنید.

پاسخ : در شکل ۱-۳-ب خط‌های AB و AC به ترتیب بین دو لحظه  $t_1$  و  $t_2$  و دو لحظه  $t_1$  و  $t_3$  رسم شده‌اند. شیب پاره‌خط AB برابر سرعت متوسط در بازه  $t_2 - t_1$  است و شیب پاره‌خط AC برابر سرعت متوسط در بازه  $t_3 - t_1$  است. و چون شیب پاره‌خط AC بیشتر از شیب پاره‌خط AB است، بنابراین سرعت متوسط در بازه  $t_3 - t_1$  بزرگتر از سرعت متوسط در بازه  $t_2 - t_1$  است.

### مثال ۲-۱

معادله حرکت جسمی در SI با رابطه  $x = 2t^2 + 1$  بیان شده است. سرعت متوسط آن را در بازه‌های زمانی (الف) ۱ تا ۲ ثانیه، (ب) ۱ تا ۱/۱ ثانیه، (پ) ۱ تا ۱/۰۱ ثانیه و (ت) ۱ تا ۱/۰۰۱ ثانیه به دست آورید. (ث) از این مثال به چه نتیجه‌ای می‌رسید؟

پاسخ

$$\bar{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

(الف)

$$\bar{v}_x = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{9 - 3}{2 - 1} = 6 \text{ m/s}$$

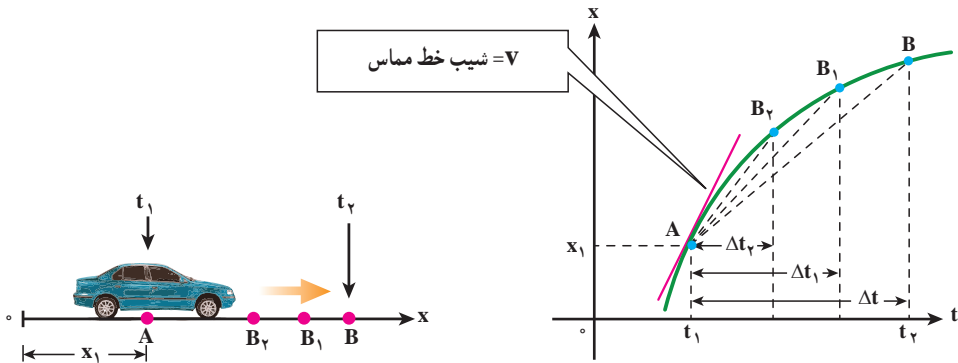
$$\bar{v}_x = \frac{3/42 - 3}{1/1 - 1} = 4/2 \text{ m/s} \quad (\text{ب})$$

$$\bar{v}_x = \frac{3/0.42 - 3}{1/0.1 - 1} = 4/0.2 \text{ m/s} \quad (\text{پ})$$

$$\bar{v}_x = \frac{3/0.0402 - 3}{1/0.01 - 1} = 4/0.02 \text{ m/s} \quad (\text{ت})$$

(ث) همان طور که دیدیم سرعت متوسط در بازه های زمانی کوچک و کوچک تر به یک مقدار مشخص میل می کند.

**سرعت لحظه ای :** دیدیم که سرعت متوسط بین دو نقطه از نمودار مکان - زمان، شیب خطی است که نمودار مکان - زمان را در آن دو نقطه قطع می کند. اکنون می خواهیم ببینیم از دید هندسی با کوچک شدن تدریجی  $\Delta t$ ، سرعت متوسط به چه صورتی در می آید. به این منظور، نمودار مکان - زمان شکل ۱-۴ را در نظر بگیرید. از این شکل در می یابیم اگر بازه زمانی  $\Delta t$ ، کوچک و کوچک تر شود، نقطه B به نقطه A نزدیک و نزدیک تر شده و سرانجام، خط AB در نقطه A بر نمودار مماس می شود. شیب خط مماس را در این حالت، سرعت لحظه ای جسم در لحظه  $t_1$  می نامیم.



شکل ۱-۴ - شکل سمت چپ، اتومبیلی را نشان می دهد که در راستای محور x حرکت می کند. شکل سمت راست، نمودار مکان - زمان حرکت اتومبیل را نشان می دهد. با کوچک شدن  $\Delta t$ ، B به A نزدیک شده و خط واصل در حالت  $\Delta t \rightarrow 0$  تبدیل به خط مماس بر منحنی می شود و شیب آن، سرعت لحظه ای را نشان می دهد.

به عبارت دیگر، هنگامی که  $t_2$  به  $t_1$  نزدیک می شود، یعنی وقتی  $\Delta t$  به سمت صفر میل می کند،

$$\bar{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \text{ سرعت لحظه ای جسم را در لحظه } t_1 \text{ به دست می دهد. پس، سرعت لحظه ای حد سرعت}$$

متوسط است، هنگامی که  $\Delta t$  به سمت صفر میل می کند. سرعت لحظه ای را با  $v_x$  نمایش می دهیم؛  
در نتیجه داریم :

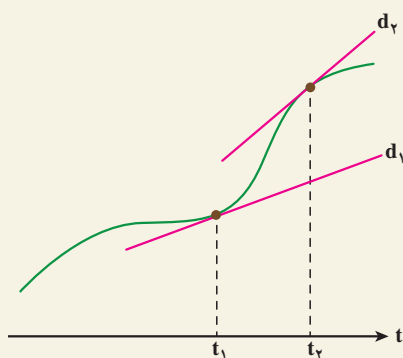
$$v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (4-1)$$

در درس ریاضی دیده اید که این حد برابر مشتق تابع  $x$  نسبت به زمان است که به صورت زیر نوشته می شود :

$$v_x = \frac{dx}{dt} \quad (5-1)$$

اگر  $x = f(t)$  معلوم باشد، از رابطه ۵-۱ می توان  $v_x$  را به صورت تابعی از زمان به دست آورد؛ این تابع، معادله سرعت نامیده می شود. در حالت حدی، وقتی که  $\Delta t$  به سمت صفر میل می کند، وتر  $AB$  در نقطه  $A$  بر نمودار مکان - زمان مماس می شود. این همان تعبیر هندسی مشتق است که در درس ریاضی خوانده اید. از این پس، سرعت لحظه ای را - به اختصار- سرعت می نامیم.

### مثال ۳-۱



شکل ۵-۱

در شکل ۵-۱ مماس  $d_1$ ، در لحظه  $t_1$   
و مماس  $d_2$  در لحظه  $t_2$  نشان داده شده است.  
در کدام لحظه سرعت بیشتر است؟  
پاسخ : همان طور که در شکل دیده  
می شود شیب  $d_2$  بیشتر از شیب  $d_1$  است و  
بنابراین  $v_2 > v_1$  است (سرعت در لحظه  $t_2$   
بیشتر از سرعت در لحظه  $t_1$  است).

### مثال ۴-۱

در مثال ۲-۱، معادله حرکت متحرک در SI به صورت  $x = 2t^2 + 1$  است.  
الف) معادله سرعت آن را به دست آورید.  
ب) نمودار سرعت - زمان را برای آن رسم کنید.

پ) سرعت متحرک را در لحظه  $t = 1\text{ s}$  به دست آورید.

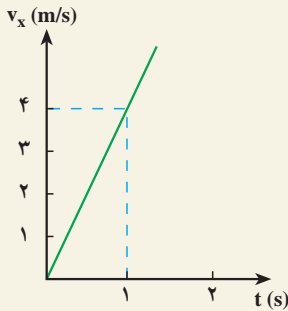
پاسخ

الف) با استفاده از رابطه ۱-۵ داریم :

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 4t$$

ب) نمودار سرعت - زمان به صورت خط راستی است که از مبدأ دستگاه  $v - t$

می گذرد.



شکل ۱-۶

$$v_x = 4t$$

پ)

$$t = 1\text{ s} \Rightarrow v_x = 4\text{ m/s}$$

این نتیجه را می توانستیم از مثال ۱-۲ نیز حدس بزنیم؛ زیرا در آن مثال با نزدیک

شدن  $t_1$  به  $t_2$ ، سرعت متوسط جسم نیز به مقدار  $4\text{ m/s}$  (سرعت جسم در لحظه  $t = 1\text{ s}$ ) نزدیک می شود.

بردار سرعت متحرک را، در حرکت یک بُعدی، می توان به صورت زیر نمایش داد :

$$\vec{v} = v_x \vec{i} \quad (1-6)$$

هنگامی که جسم در جهت مثبت محور  $x$  حرکت می کند،  $v_x$  مثبت است (چرا؟) و در نتیجه،

بردار سرعت جسم در جهت این محور قرار می گیرد. هنگامی که جسم در خلاف جهت مثبت محور  $x$

حرکت می کند،  $v_x$  منفی است و بردار سرعت در جهت عکس این محور قرار می گیرد.

## مثال ۵-۱

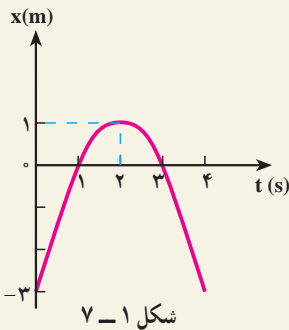
معادله حرکت جسمی در SI با رابطه  $x = -t^2 + 4t - 3$  بیان شده است. الف) معادله سرعت آن را به دست آورید. ب) نمودارهای مکان-زمان و سرعت-زمان متحرک را در ۴ ثانیه اول رسم کنید. پ) مسیر حرکت جسم را رسم و چگونگی حرکت را توصیف کنید.

پاسخ

الف) با استفاده از رابطه ۵-۱ داریم :

$$v_x = \frac{dx}{dt} = -2t + 4$$

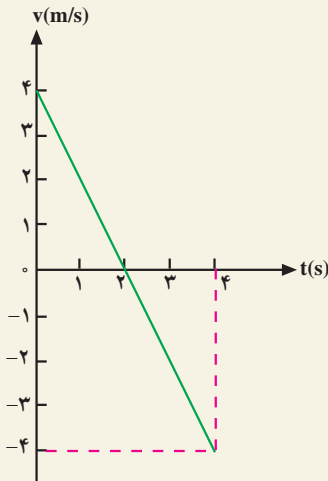
ب) نمودار مکان-زمان متحرک به صورت یک سهمی است (شکل ۷-۱) که بیشینه آن در لحظه  $t = 2$  s است (چرا؟). همچنین، جسم در لحظه های  $t = 1$  s و  $t = 3$  s در مبدأ و در لحظه  $t = 0$ ، در نقطه  $x = -3$  m قرار دارد.



نمودار سرعت-زمان متحرک به صورت

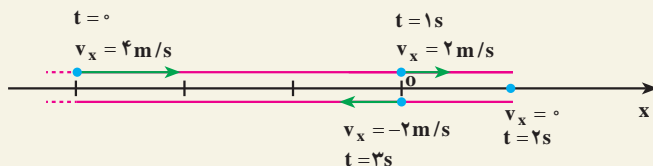
یک خط راست است (شکل ۸-۱) که در بند الف) معادله آن را به دست آوردیم.

پ) با توجه به این نمودارها ملاحظه می شود که متحرک در لحظه  $t = 0$  در مکان  $x = -3$  m قرار دارد و با سرعت  $4$  m/s در جهت محور  $x$  حرکت می کند. سپس سرعت آن به تدریج کاهش می یابد (شیب مماس بر نمودار مکان-زمان در شکل ۷-۱ به تدریج کم می شود) تا در لحظه  $t = 2$  s که سرعت آن صفر می شود. می توان گفت شیب مماس بر نمودار مکان-زمان در این لحظه صفر می شود.



از لحظه  $t = 2$  s به بعد متحرک برمی گردد و در خلاف جهت محور  $x$  شروع به حرکت می کند و  $v_x$  منفی می شود. در برگشت، اندازه سرعت افزایش می یابد و در لحظه

$t = 3\text{ s}$  دوباره از مبدأ می‌گذرد. در این لحظه، سرعت آن  $-2\text{ m/s}$  است. مسیر حرکت جسم در شکل ۹-۱ رسم شده و بردار سرعت آن نیز روی شکل نمایش داده شده است.



شکل ۹-۱

در شکل ۹-۱ باید مسیر روی محور  $x$  رسم شود ولی ما برای اینکه مسیر را بهتر مشخص کنیم، آن را در بالا و پایین این محور رسم کرده‌ایم. ملاحظه می‌شود که در تمام مسیر رفت و برگشت، معادله مکان و معادله سرعت جسم، به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شود:

$$x = -t^2 + 4t - 3$$

$$v_x = -2t + 4$$

## مثال ۶-۱

متحرکی با سرعت ثابت  $5\text{ m/s}$ ، در خلاف جهت محور  $x$  حرکت می‌کند. این متحرک در لحظه  $t = 0$  از نقطه  $x = 1\text{ m}$  می‌گذرد. الف) معادله حرکت را بنویسید. ب) تعیین کنید که متحرک در چه زمانی به مبدأ مختصات می‌رسد.

پاسخ

الف) در فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که معادله حرکت یکنواخت یک جسم روی خط راست با رابطه:

$$x = v_x t + x_0$$

(۷-۱)

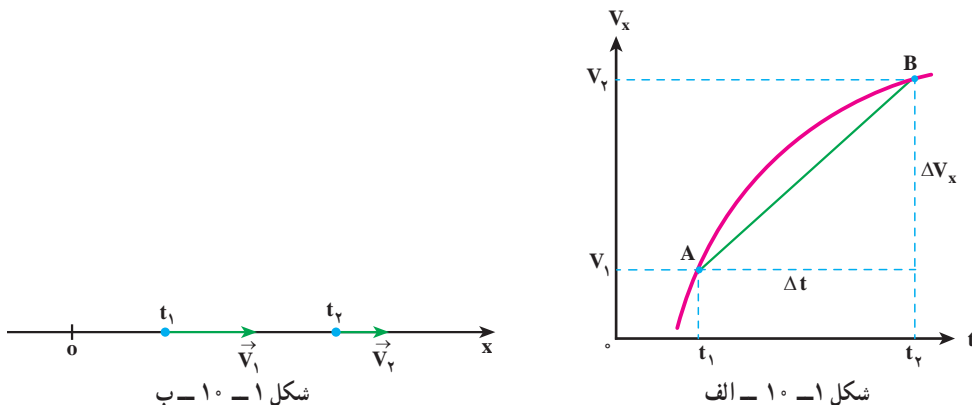
بیان می‌شود که در آن  $v_x$  سرعت (ثابت) جسم و  $x_0$  مکان جسم در لحظه  $t = 0$  است؛ در نتیجه، چون در این مثال  $x_0 = +1\text{ m}$  و  $v_x = -5\text{ m/s}$  است، معادله حرکت جسم به صورت زیر خواهد بود.

ب)

$$x = -5t + 1$$

$$x = 0 \Rightarrow -5t + 1 = 0 \Rightarrow t = 2\text{ s}$$

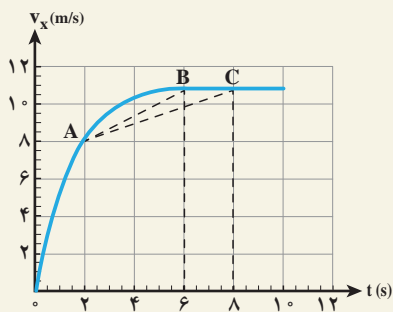
شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای: می‌دانید هنگامی که سرعت جسم تغییر می‌کند، حرکت را شتابدار می‌نامند. در شکل ۱-۱ الف نمودار سرعت - زمان یک حرکت شتابدار و در شکل ۱-۱ ب بردار سرعت متحرک، در زمان‌های  $t_1$  و  $t_2$ ، نشان داده شده است.



همچنین، می‌دانید که  $\Delta v_x = v_{2x} - v_{1x}$  را تغییر سرعت متحرک در بازه زمانی  $\Delta t$  و نسبت  $\frac{\Delta v_x}{\Delta t}$  را که شیب خط AB در نمودار سرعت - زمان است، شتاب متوسط متحرک در این بازه زمانی می‌نامند. این کمیت را با نماد  $\bar{a}$  نشان می‌دهیم؛ در نتیجه داریم:

$$\bar{a}_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} \quad (1-1)$$

## مثال ۱-۷



نمودار سرعت - زمان متحرکی که در راستای محور x حرکت می‌کند، به صورت شکل ۱-۱۱ است. شتاب متوسط این متحرک را در بازه‌های زمانی بین ۲s و ۶s، و بین ۲s و ۸s تعیین و با هم مقایسه کنید.

پاسخ: شیب پاره خط AB برابر

شتاب متوسط متحرک در بازه بین ۲s و ۶s، و شیب پاره خط AC برابر شتاب متوسط متحرک در بازه بین ۲s و ۸s است. بنابراین شتاب متوسط در بازه زمانی نخست برابر



است با

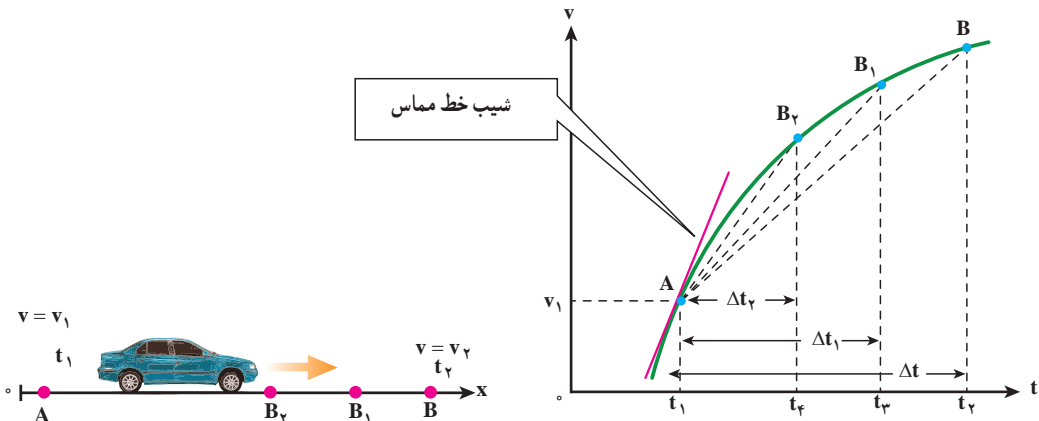
$$\bar{a}_1 = AB \text{ شیب} \approx \frac{11-8}{6-2} = \frac{3}{4} \text{ m/s}^2$$

و شتاب متوسط در بازه زمانی دوم چنین می شود.

$$\bar{a}_2 = AC \text{ شیب} \approx \frac{11-8}{8-2} = \frac{3}{6} = \frac{1}{2} \text{ m/s}^2$$

بنابراین  $\bar{a}_1 > \bar{a}_2$  است.

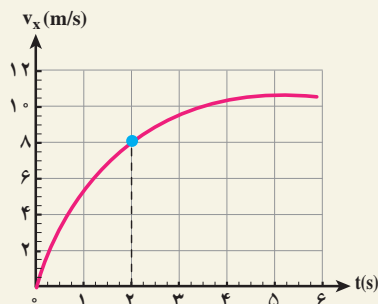
در شکل ۱-۱۰ هنگامی که  $\Delta t$  بسیار کوچک و کوچک تر می شود، نقطه B به نقطه A نزدیک و نزدیک تر شده و سرانجام خط AB در نقطه A بر نمودار سرعت - زمان مماس می شود. شیب خط مماس بر نمودار در نقطه A را شتاب لحظه ای جسم در لحظه  $t_1$  می نامیم (شکل ۱-۱۲).



شکل ۱-۱۲ - شکل سمت چپ اتومبیلی را نشان می دهد که در راستای محور x حرکت می کند. شکل سمت راست، نمودار سرعت - زمان اتومبیل را نشان می دهد. با کوچک شدن  $\Delta t$ ، B به A نزدیک شده و در حالت  $\Delta t \rightarrow 0$  خط واصل تبدیل به خط مماس بر منحنی می شود و شیب آن، شتاب لحظه ای را نشان می دهد.

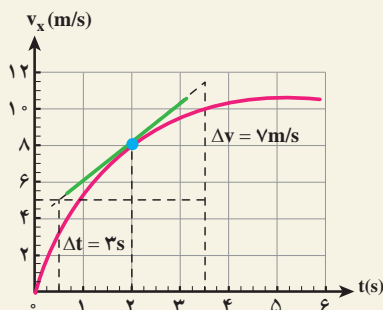
## مثال ۱-۸

نمودار سرعت - زمان متحرکی که در راستای محور x حرکت می کند در شکل ۱۳-۱ نشان داده شده است. شتاب این متحرک را در  $t = 2 \text{ s}$  تعیین کنید.



شکل ۱۳-۱

پاسخ: شتاب متحرک در  $t = 2\text{ s}$  برابر شیب این منحنی در  $t = 2\text{ s}$  است. شیب، شتاب لحظه‌ای را به دست می‌دهد.



شکل ۱۴-۱

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{9\text{ m/s}}{3\text{ s}} = 3\text{ m/s}^2$$

توجه کنید که در حل این مسئله می‌توانستید از مختصات هر دو نقطه دلخواه دیگری از خط مماس نیز استفاده کنید.

اکنون می‌توان شتاب لحظه‌ای را، مانند سرعت لحظه‌ای، به طور دقیق این گونه تعریف کرد: هنگامی که  $\Delta t$  به سمت صفر میل می‌کند،  $\bar{a}_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}$  شتاب لحظه‌ای جسم را در لحظه  $t_1$  به دست می‌دهد؛ به عبارت دیگر، شتاب لحظه‌ای حد شتاب متوسط است، هنگامی که  $\Delta t$  به سمت صفر میل می‌کند. شتاب لحظه‌ای را با  $a_x$  نمایش می‌دهیم؛ در نتیجه داریم:

$$a_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{dv_x}{dt} \quad (9-1)$$

به بیان ریاضی، شتاب لحظه‌ای مشتق سرعت نسبت به زمان است؛ از این پس، شتاب لحظه‌ای را - برای اختصار - شتاب می‌نامیم. اکنون با استفاده از رابطه‌های ۵-۱ و ۹-۱ شتاب را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$a_x = \frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dt} \right) = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

### مثال ۹-۱

معادله حرکت جسمی در SI به صورت  $x = t^3 - 6t^2 + 9t$  بیان شده است. الف) شتاب متوسط آن را در بازه زمانی ۱ تا ۲ ثانیه به دست آورید. ب) شتاب آن را در لحظه‌های  $t = 0$  و  $t = 1$  ثانیه پیدا کنید.

پاسخ

الف) برای به دست آوردن شتاب متوسط در این بازه زمانی لازم است سرعت متحرک را در لحظه‌های  $t = 1$  s و  $t = 2$  s داشته باشیم. ابتدا معادله سرعت را به دست می‌آوریم:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 3t^2 - 12t + 9$$

از این معادله در لحظه‌های  $t = 1$  s و  $t = 2$  s به ترتیب مقادیر ۰ (صفر) و  $-3$  m/s برای سرعت به دست می‌آید.

$$\bar{a}_x = \frac{v_{2x} - v_{1x}}{t_2 - t_1} = \frac{-3 - 0}{2 - 1} = -3 \text{ m/s}^2$$

ب) ابتدا معادله شتاب متحرک را می‌نویسیم:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = 6t - 12$$

با استفاده از این رابطه، شتاب متحرک در لحظه‌های  $t = 0$  و  $t = 1$  s چنین به دست می‌آید:

$$t = 0 \text{ s} \rightarrow a_x = -12 \text{ m/s}^2$$

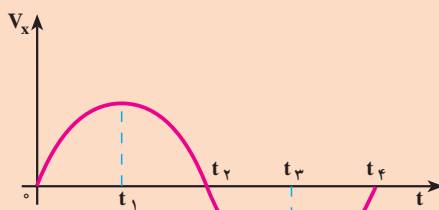
$$t = 1 \text{ s} \rightarrow a_x = -6 \text{ m/s}^2$$

بردار شتاب را می‌توان به صورت زیر نمایش داد :

$$\vec{a} = a_x \vec{i} \quad (۱-۱)$$

در رابطه بالا اگر  $a_x$  مثبت باشد،  $\vec{a}$  در جهت محور  $x$  و اگر منفی باشد در خلاف جهت محور  $x$  قرار می‌گیرد.

## تمرین ۱-۲



شکل ۱-۱۵

نمودار سرعت - زمان متحرکی  
در شکل ۱-۱۵ نشان داده شده است.  
تعیین کنید در چه بازه زمانی بردار شتاب  
در جهت محور  $x$  و در کدام بازه زمانی در  
خلاف جهت محور  $x$  است.

هنگامی که اندازه سرعت متحرکی زیاد می‌شود، حرکت را تندشونده و هنگامی که اندازه سرعت متحرکی کاهش می‌یابد، حرکت را کندشونده می‌نامند.

## فعالیت ۱-۱

در تمرین ۱-۲، سرعت متحرک در بازه زمانی  $0$  تا  $t_1$  مثبت است.  $a_x$  نیز مثبت است؛ زیرا شیب مماس بر نمودار در این بازه زمانی مثبت است و حرکت تندشونده است. حاصل ضرب  $a_x v_x$  نیز مثبت است. اکنون جاهای خالی را در گزاره‌های زیر پر کنید.

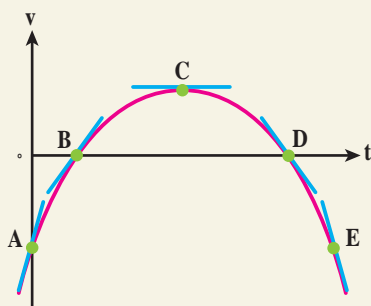
الف) در بازه زمانی  $t_1$  تا  $t_2$  سرعت متحرک ..... است.  $a_x$  ..... است. حرکت ..... است. حاصل ضرب  $a_x v_x$  ..... است.

ب) در بازه زمانی  $t_2$  تا  $t_3$  سرعت متحرک ..... است.  $a_x$  ..... است. حرکت ..... است. حاصل ضرب  $a_x v_x$  ..... است.

پ) در زمان‌های بزرگ‌تر از  $t_3$ ، سرعت متحرک ..... است.  $a_x$  ..... است. حرکت ..... است. حاصل ضرب  $a_x v_x$  ..... است.

در فعالیت ۱-۱ می بینید که وقتی  $a_x v_x > 0$  باشد، حرکت تندشونده و وقتی  $a_x v_x < 0$  باشد، حرکت کند شونده است.

### مثال ۱-۱۰

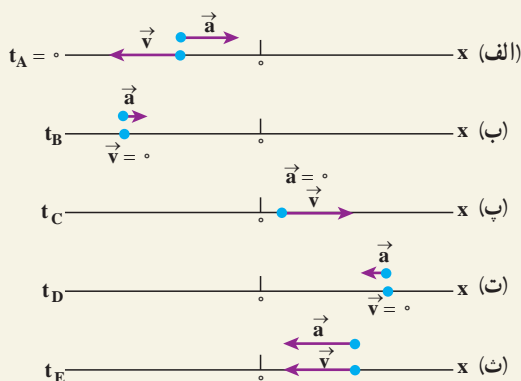


شکل ۱۶-۱

شکل ۱۶-۱، نمودار سرعت-زمان متحرکی است که در راستای محور  $x$  حرکت می کند. درباره علامت های شتاب و سرعت متحرک و تندشونده یا کندشونده بودن حرکت اظهار نظر کنید.

### پاسخ

خط های مماس بر منحنی در نقاط  $A, B, C, D, E$  رسم شده که شیب این خط ها نشان دهنده شتاب در آن نقطه ها است. از روی شکل در می یابیم که شیب در نقاط  $A$  و  $B$  مثبت، در نقطه  $C$  برابر صفر و در نقطه های  $D$  و  $E$  منفی است. بنابراین شتاب در نقطه های  $A$  و  $B$  مثبت، شتاب در نقطه  $C$  برابر صفر و در نقطه های  $D$  و  $E$  منفی است. در حالی که همان طور که از شکل مشخص است، سرعت در نقطه های  $A$  و  $E$  منفی، در نقطه های  $B$  و  $D$  صفر، و در نقطه  $C$  مثبت است. بنابراین مکان، سرعت و شتاب ذره روی محور  $x$  با شکل های زیر سازگارند.



شکل ۱۷-۱

در (الف)  $v < 0$  و  $a > 0$  و در نتیجه  $av < 0$  و حرکت کندشونده است. در (ب)  $v = 0$  و  $a > 0$  و متحرک در سکون لحظه‌ای و در آستانه حرکت در جهت  $+x$  است. در (پ)  $v > 0$  و  $a = 0$  است. در (ت)  $v = 0$  و  $a < 0$  و متحرک به طور لحظه‌ای ساکن و در آستانه حرکت در جهت  $-x$  است. در (ث)  $v < 0$  و  $a < 0$  و در نتیجه  $av > 0$  و حرکت تندشونده است.

## مثال ۱۱-۱

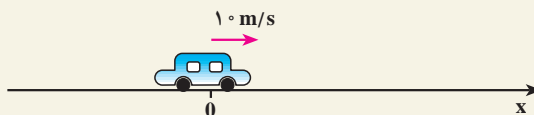
خودرویی با سرعت  $10 \text{ m/s}$  در حال حرکت است. راننده ترمز می‌کند و سرعت خودرو با شتاب  $2 \text{ m/s}^2$  کاهش می‌یابد. الف) چه زمانی طول می‌کشد تا خودرو متوقف شود؟ ب) در این بازه زمانی خودرو چه مسافتی را می‌پیماید؟

پاسخ

الف) در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که در حرکت با شتاب ثابت معادله سرعت به صورت زیر است:

$$v_x = a_x t + v_{0x} \quad (11-1)$$

که در آن  $a_x$  شتاب (ثابت) جسم و  $v_{0x}$  سرعت جسم در لحظه  $t = 0$  است. در شکل ۱۸-۱ حرکت خودرو را در جهت محور  $x$  در نظر گرفته‌ایم.



شکل ۱۸-۱

بنابراین،  $v_{0x} = +10 \text{ m/s}$  و چون حرکت کندشونده است، علامت  $a_x$  مخالف علامت  $v_{0x}$  است؛ در نتیجه،  $a_x = -2 \text{ m/s}^2$ . با استفاده از معادله سرعت داریم:

$$v_x = -2t + 10$$

هنگامی که خودرو متوقف می‌شود،  $v_x = 0$  است؛ در نتیجه:

$$0 = -2t + 10 \Rightarrow t = 5 \text{ s}$$

ب) می‌دانیم که در حرکت با شتاب ثابت معادله حرکت به صورت زیر است :

$$\Delta x = \frac{1}{2} a_x t^2 + v_{ox} t \quad (12-1)$$

$$\Delta x = \frac{1}{2} (-2)(5)^2 + 1 \cdot (5) + 0 = 25 \text{ m}$$

این نتیجه را می‌توانستیم از رابطه مستقل از زمان زیر نیز به دست آوریم :

$$v_x^2 - v_{ox}^2 = 2 a_x (x - x_o) \quad (13-1)$$

$$0 - (10)^2 = 2 (-2) (\Delta x) \Rightarrow \Delta x = 25 \text{ m}$$

## سقوط آزاد

سقوط آزاد نمونه‌ای طبیعی از حرکت یک بُعدی با شتاب ثابت است. اگر جسمی را در امتداد قائم رو به بالا یا رو به پایین پرتاب کنید، در صورتی که بتوان از تأثیرات هوا چشم‌پوشی کرد، سرعت جسم با آهنگ ثابت و معینی تغییر می‌کند. گالیله نخستین کسی بود که استدلال کرد تمام اجسام در نبود مقاومت هوا با شتاب ثابتی سقوط می‌کنند. این شتاب برای همه اجسام یکسان و بزرگی آن در نزدیکی سطح زمین تقریباً برابر  $9/8 \text{ m/s}^2$  است. شکل ۱-۱۹ نشان می‌دهد یک پر و یک سیب در شرایط خلأ نسبی با شتاب یکسانی سقوط می‌کنند.



شکل ۱-۱۹ - یک پر و یک سیب در شرایط خلأ نسبی با شتاب یکسانی سقوط می‌کنند. این شتاب، فاصله میان عکس‌های متوالی را افزایش داده است.

در سقوط آزاد، جابه‌جایی در راستای قائم است، بنابراین مکان متحرک با  $y$  نشان داده می‌شود. معادله‌های حرکت شتاب ثابت که در فیزیک ۲ و آزمایشگاه با آنها آشنا شدیم برای سقوط آزاد در نزدیکی سطح زمین نیز به کار می‌آیند. یعنی کافی است حرکت را به جای محور  $x$  در راستای محور قائم ( $y$ ) در نظر بگیریم، به طوری که جهت  $+y$  رو به بالا باشد. با این انتخاب، شتاب سقوط آزاد همواره منفی است (یعنی در خلاف جهت مثبت محور  $y$  است) و بنابراین ذره، چه رو به بالا و چه رو به پایین حرکت کند  $a = -g = -9.8 \text{ m/s}^2$  است. به این ترتیب کافی است در معادله‌های حرکت شتاب ثابت،  $x$  را به  $y$  و  $a$  را به  $-g$  تبدیل کنیم تا معادله‌های سقوط آزاد به دست آیند:

$$v = -gt + v_0 \quad (14-1)$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t + y_0 \quad (15-1)$$

$$v^2 - v_0^2 = -2g(y - y_0) \quad (16-1)$$

همان‌طور که گفتیم شتاب همواره منفی و روبه پایین است، ولی سرعت می‌تواند مثبت یا منفی باشد. در حین بالا رفتن، سرعت مثبت است ولی این سرعت مثبت کاهش می‌یابد تا اینکه به طور لحظه‌ای صفر شود. در حین پایین آمدن، سرعت منفی است ولی بزرگی آن افزایش می‌یابد.

### مثال ۱۲-۱

سنگی را از بالای ساختمان بلندی به ارتفاع  $45 \text{ m}$  رها می‌کنیم، (الف) سنگ پس از چه زمانی به زمین می‌رسد؟ (ب) سرعت آن هنگام رسیدن به زمین چقدر است؟ ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

پاسخ

(الف) برای بررسی حرکت سقوط آزاد اجسام، محور  $y$  را در راستای قائم و رو به بالا و مبدأ آن را نقطه رها کردن جسم در نظر می‌گیریم. در این صورت، معادله حرکت با شتاب ثابت (۱۵-۱) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$y = -\frac{1}{2}gt^2$$

$$-45 = -\frac{1}{2}(10)t^2 \Rightarrow t = 3 \text{ s}$$



ب) با استفاده از معادله سرعت (۱۱-۱) داریم :

$$v = -gt$$

$$v = -10 \times 3 = -30 \text{ m/s}$$

## فعالیت ۲-۱



شکل ۲-۱

از دوست خود بخواهید که مطابق شکل ۲-۱، خط کش مدرج بلندی را بین انگشتان شما نگه دارد و در یک لحظه، آن را رها کند. چگونه می‌توانید زمان واکنش خود را (یعنی زمانی که طول می‌کشد تا پس از مشاهده رها شدن خط کش، آن را بگیرید) اندازه‌گیری کنید؟

## مثال ۱۳-۱

سنگی را با سرعت  $20 \text{ m/s}$  در راستای قائم به طرف بالا پرتاب می‌کنیم. الف) چه زمانی طول می‌کشد تا سنگ به بالاترین ارتفاع برسد؟ ب) سنگ تا چه ارتفاعی بالا می‌رود؟ پ) چه زمانی طول می‌کشد تا سنگ به نقطه پرتاب برگردد؟ ت) سرعت سنگ در این نقطه چه مقدار است؟ ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

پاسخ

الف) محور  $y$  را روبه بالا و مبدأ آن را در نقطه پرتاب فرض می‌کنیم؛ در نتیجه، در لحظه پرتاب داریم:  $v_{y0} = +20 \text{ m/s}$  و  $y_0 = 0$ . در شروع حرکت، جسم در جهت محور  $y$  حرکت می‌کند، با استفاده از رابطه‌های ۱۵-۱ و ۱۴-۱ داریم :

$$y = -5t^2 + 20t$$

$$v_y = -10t + 20$$

در بالاترین نقطه،  $v_y = 0$ ؛ در نتیجه :

$$0 = -10t + 20 \Rightarrow t = 2s$$

$$t = 2s$$

ب) بالاترین ارتفاعی که سنگ به آن می‌رسد، از معادله حرکت به دست می‌آید :

$$y = -5(2)^2 + 20(2) = 20m$$

پ) در بازگشت سنگ به نقطه پرتاب، داریم :  $y = 0$ ؛ در نتیجه :

$$-5t^2 + 20t = 0$$

$$t(-5t + 20) = 0$$

یا

پاسخ‌های این معادله  $t = 0s$  و  $t = 4s$  است.  $t = 0s$  مربوط به لحظه پرتاب است و  $t = 4s$  زمانی است که طول می‌کشد تا سنگ به نقطه پرتاب برگردد.

ت) سرعت متحرک در این لحظه از معادله سرعت به دست می‌آید :

$$v_y = -10(4) + 20 = -20 m/s$$

علامت منفی نشان می‌دهد که در هنگام بازگشت سنگ به نقطه پرتاب، سوی سرعت آن رو به پایین است. ملاحظه می‌شود که با معادله‌های حرکت و سرعت، می‌توان چگونگی حرکت سنگ را، در هر لحظه از رفت و برگشت، توصیف کرد.

### مثال ۱-۱۴

از بالای ساختمانی به ارتفاع  $50m$  سنگی را در راستای قائم با سرعت  $15 m/s$ ، به بالا پرتاب می‌کنیم. چه مدت زمانی طول می‌کشد تا سنگ به زمین برسد؟ ( $g = 10 m/s^2$ )

پاسخ

محور مختصات را رو به بالا و مبدأ آن را در بالای ساختمان در نظر می‌گیریم؛ در نتیجه، معادله حرکت سنگ به صورت زیر است :

$$y = -5t^2 + 15t$$

در پایین ساختمان،  $y = -5\text{ m}$ ؛ در نتیجه :

$$-50 = -5t^2 + 15t$$

با حل این معادله، دو مقدار  $t = -2\text{ s}$  و  $t = 5\text{ s}$  به دست می آید. چون حرکت از لحظه  $t = 0$  شروع شده است، پاسخ اول قابل قبول نیست؛ در نتیجه، زمان رسیدن سنگ به زمین  $5\text{ s}$  است.

## ۲-۱- حرکت در دو بُعد یا حرکت در صفحه

در بخش ۱-۱ حرکت در یک بعد را مرور کردیم. در این بخش به بررسی حرکت در صفحه که آن را حرکت دو بُعدی نیز می نامیم، می پردازیم. حرکت گلوله تویی که شلیک می شود یا حرکت یک سیاره به دور خورشید یا حرکت اتومبیل در پیچ جاده و ... مثال هایی از حرکت دو بُعدی اند.



در شکل ۲۲-۱ مسیر حرکت جسمی در صفحه  $xoy$  نشان داده شده است. مکان جسم در این صفحه، با بردار  $\vec{r}$  نمایش داده می شود. این بردار را می توان به صورت زیر نوشت :

$$\vec{r} = x \vec{i} + y \vec{j} \quad (17-1)$$

که در آن  $\vec{i}$  و  $\vec{j}$  به ترتیب بردارهای یکه در جهت های  $x$  و  $y$  اند.

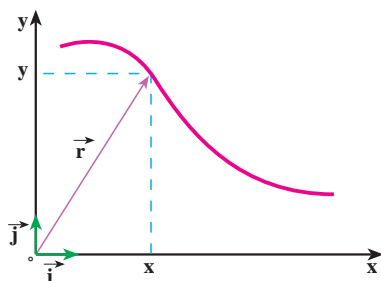
چون هنگام حرکت جسم، در هر لحظه بردار مکان آن تغییر می کند، برای مشخص کردن مکان جسم در حین حرکت، کافی است که مؤلفه های  $x$  و  $y$  را به صورت تابع هایی از زمان داشته باشیم :

$$x = f(t) \text{ و } y = g(t) \quad (18-1)$$

رابطه های ۱۸-۱ معادله های حرکت یک جسم را در دو بُعد نشان می دهند. واضح است که در حرکت دو بُعدی، بردار مکان نیز تابعی از زمان است :

شکل ۲۱-۱

$$\vec{r} = f(t) \vec{i} + g(t) \vec{j} \quad (19-1)$$



شکل ۲۲-۱

بنابراین، می‌توان گفت که حرکت در صفحه، ترکیب دو حرکت یک بعدی در امتدادهای  $x$  و  $y$  است که با داشتن معادله‌های مربوط به آن، مکان جسم در هر لحظه معلوم و در نتیجه، مسیر حرکت آن مشخص می‌شود.

### فعالیت ۳-۱

فرض کنید در یک مدت کوتاه، معادله‌های حرکت یک خرگوش در سطح زمین، برحسب یکاهای SI، به صورت  $x = 1 \cdot t$  و  $y = -5t^2$  است. مسیر حرکت این خرگوش را به کمک نقطه‌یابی، در بازه زمانی  $0$  تا  $5$  ثانیه، روی کاغذ شطرنجی رسم کنید.

باید دانست که مسیر را می‌توان، علاوه بر روش نقطه‌یابی، به کمک معادله مسیر هم مشخص کرد. برای یافتن معادله مسیر کافی است که با حذف زمان  $(t)$  بین معادله‌های حرکت برای  $x$  و  $y$  رابطه‌ای بین آنها، به دست آورد.

### مثال ۱۵-۱

معادله مسیر را برای خرگوش در فعالیت ۳-۱ به دست آورید و آن را رسم کنید.

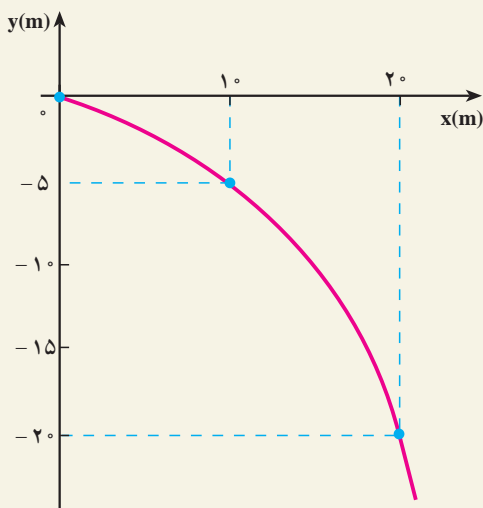
پاسخ

$t$  را بین مؤلفه‌های بردار مکان حذف می‌کنیم:

$$x = 1 \cdot t \rightarrow t = \frac{x}{1}$$

و

$$y = -5t^2 \rightarrow y = -5\left(\frac{x}{1}\right)^2$$



$$y = -\frac{x^2}{2}$$

معادله مسیر در این مثال، یک سهمی است که بیشینه آن در  $x = 0$ ، است و از نقطه‌های  $(1\text{ m}, -5\text{ m})$  و  $(2\text{ m}, -20\text{ m})$  می‌گذرد (شکل ۲۳-۱).

شکل ۲۳-۱

## فعالیت ۴-۱

معادله‌های حرکت در SI برای خودروی A در صفحه افقی به صورت  $x_A = 3t^2$  و  $y_A = 8$  و برای خودروی B در همان صفحه به صورت  $x_B = 6t$  و  $y_B = 4t$  داده شده است. از طریق نقطه‌یابی تحقیق کنید که آیا مسیر این دو خودرو تلاقی دارند یا نه؟ چه شرطی باید برقرار باشد تا بین خودروها برخورد رخ دهد؟

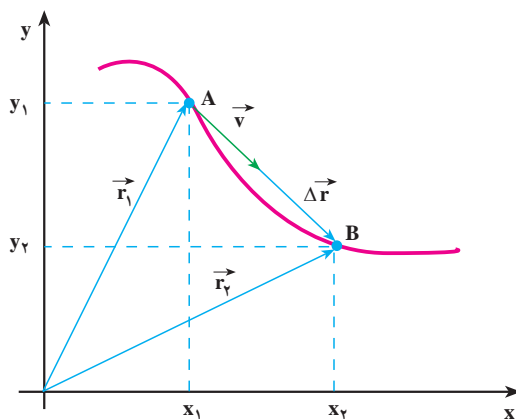
جابه‌جایی و سرعت متوسط: برای بررسی حرکت جسم روی مسیری مطابق شکل ۲۴-۱،

فرض کنید متحرکی در لحظه  $t_1$  در نقطه A (مکان  $\vec{r}_1$ ) و در لحظه  $t_2$  در نقطه B (مکان  $\vec{r}_2$ ) باشد. در فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم، برداری که از A به B رسم می‌شود جابه‌جایی (تغییر مکان) جسم را در بازه زمانی  $\Delta t = t_2 - t_1$  نمایش می‌دهد. این بردار که در شکل ۲۴-۱ رسم شده است، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \quad (20-1)$$

$$\Delta \vec{r} = (x_2 \vec{i} + y_2 \vec{j}) - (x_1 \vec{i} + y_1 \vec{j})$$

$$\vec{\Delta r} = (\Delta x) \vec{i} + (\Delta y) \vec{j} \quad (21-1)$$



شکل ۱-۲۴ بردار سرعت متوسط و بردار تغییر مکان هم جهت اند.

سرعت متوسط جسم در یک بازه زمانی معین، همانند حالت یک بعدی، به این صورت تعریف می شود:

$$\vec{v} = \frac{\vec{\Delta r}}{\Delta t} \quad (22-1)$$

و با استفاده از رابطه ۱-۲۱ داریم:

$$\vec{v} = \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right) \vec{i} + \left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right) \vec{j} \quad (23-1)$$

اگر  $\frac{\Delta x}{\Delta t}$  را با  $\bar{v}_x$  و  $\frac{\Delta y}{\Delta t}$  را با  $\bar{v}_y$  نمایش دهیم، خواهیم داشت:

$$\vec{v} = (\bar{v}_x) \vec{i} + (\bar{v}_y) \vec{j} \quad (24-1)$$

### پرسش ۱-۱

رابطه ۱-۲۲ نشان می دهد که سرعت متوسط، کمیتی برداری است و  $\vec{v}$  با  $\vec{\Delta r}$  هم جهت است. علت را توضیح دهید.

### مثال ۱-۱۶

معادله‌های حرکت جسمی در دو بُعد، به صورت زیر است :

$$x = 2t \text{ و } y = -t^2 + 4t \quad (SI)$$

الف) بردار مکان جسم را در لحظه‌های  $t_1 = 1s$  و  $t_2 = 2s$  به دست آورید.

ب) سرعت متوسط آن را در بازه زمانی ۱ تا ۲ ثانیه تعیین و بزرگی آن را حساب کنید.

پاسخ

الف) در  $t_1 = 1s$  :

$$x_1 = 2m \text{ و } y_1 = +3m$$

$$\vec{r}_1 = 2\vec{i} + 3\vec{j}$$

$$x_2 = 4m \text{ و } y_2 = 4m$$

به همین ترتیب در  $t_2 = 2s$  :

$$\vec{r}_2 = 4\vec{i} + 4\vec{j}$$

ب) در بازه زمانی ۱ تا ۲ ثانیه :

$$\Delta x = x_2 - x_1 = 4 - 2 = 2m$$

$$\Delta y = y_2 - y_1 = 4 - 3 = 1m$$

$$\bar{v}_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2}{1} = 2m/s$$

$$\bar{v}_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{1}{1} = 1m/s$$

$$\vec{v} = 2\vec{i} + \vec{j}$$

$$(\bar{v})^2 = (\bar{v}_x)^2 + (\bar{v}_y)^2 = 2^2 + 1^2 = 5$$

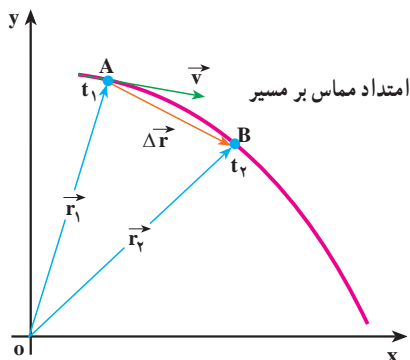
$$\bar{v} = \sqrt{5} \approx 2.23m/s$$

### تمرین ۱-۳

در فعالیت ۱-۳ سرعت متوسط خرگوش را در بازه زمانی ۰ تا ۲ ثانیه به دست آورید.

**سرعت لحظه‌ای :** در شکل ۲۵-۱ نمودار حرکت جسمی روی یک مسیر خمیده در صفحه  $xOy$  نشان داده شده است. مکان جسم در دو لحظه  $t_1$  و  $t_2$ ، مشخص شده است. پیش‌تر گفتیم که بردار سرعت متوسط در یک بازه زمانی معین، با بردار جابه‌جایی مربوط به آن، هم‌جهت است. همچنین می‌دانید هنگامی که بازه زمانی  $\Delta t$ ، کوچک و کوچک‌تر شود، سرعت متوسط به سرعت لحظه‌ای نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود؛ یعنی، بردار سرعت لحظه‌ای حد بردار سرعت متوسط است، وقتی  $\Delta t$  به سمت صفر میل می‌کند :

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\vec{v}) \quad (25-1)$$



شکل ۲۵-۱- سرعت لحظه‌ای در امتداد مماس بر مسیر حرکت است.

به عبارت دیگر می‌توان گفت که «سرعت لحظه‌ای، مشتق بردار مکان جسم، نسبت به زمان است» :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (26-1)$$

در حدی که  $\Delta t$  به سمت صفر میل کند، با استفاده از رابطه ۲۱-۱ می‌توان سرعت لحظه‌ای جسم را برحسب مؤلفه‌های آن در دو امتداد  $x$  و  $y$  به‌دست آورد :

$$\begin{aligned} \vec{v} &= \left(\frac{dx}{dt}\right) \vec{i} + \left(\frac{dy}{dt}\right) \vec{j} \\ \vec{v} &= (v_x) \vec{i} + (v_y) \vec{j} \end{aligned} \quad (27-1)$$



در شکل ۱-۲۵ می بینید که وقتی  $t_2$  به سمت  $t_1$  میل کند، راستای بردار جابه جایی  $\Delta \vec{r}$ ، به سمت راستای مماس بر منحنی مسیر، در نقطه A میل خواهد کرد؛ بنابراین، چون بردار سرعت متوسط همواره هم جهت با جابه جایی است، در حدی که  $\Delta t$  به سمت صفر میل می کند، بردار سرعت لحظه ای بر مسیر حرکت در نقطه A مماس خواهد شد؛ بدین ترتیب می توان گفت، هنگامی که جسم روی یک مسیر خمیده حرکت می کند، جهت بردار سرعت آن که همواره بر مسیر حرکت مماس است، در هر لحظه تغییر می کند. از این پس، برای اختصار، بردار سرعت لحظه ای را سرعت می نامیم.

### مثال ۱-۱۷

خودرویی در صفحه xoy حرکت می کند. معادله های حرکت آن در SI به صورت زیر است:

$$x = 6t + 5 \text{ و } y = 4t^2$$

بزرگی سرعت خودرو را در  $t = 1 \text{ s}$  به دست آورید.

پاسخ

با استفاده از رابطه ۱-۲۷ مؤلفه های سرعت به دست می آید:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 6 \text{ m/s}$$

ملاحظه می شود که مؤلفه افقی سرعت مقدار ثابتی دارد و تابع زمان نیست؛ به همین ترتیب، برای مؤلفه قائم سرعت داریم:

$$v_y = \frac{dy}{dt} = 8t$$

همان طور که می بینید، این مؤلفه تابع زمان است و بزرگی آن در  $t = 1 \text{ s}$  برابر است با:

$$v_y = 8 \text{ m/s}$$

پس، بزرگی سرعت در  $t = 1 \text{ s}$  برابر است با:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10 \text{ m/s}$$

## تمرین ۴-۱

در مثال ۱۷-۱ معادلهٔ مسیر را بنویسید و آن را رسم کنید. بردار سرعت متحرک را در  $t = ۱s$  روی مسیر، نمایش دهید.

## شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای

می‌دانید وقتی که سرعت جسم در حال حرکت تغییر می‌کند، حرکت را شتاب‌دار می‌گویند. البته این تغییر سرعت می‌تواند به معنای تغییر در بزرگی سرعت، تغییر در جهت سرعت یا هر دو باشد. دیدیم که وقتی مسیر حرکت جسم خمیده است، جهت سرعت آن الزاماً تغییر می‌کند؛ بنابراین، حرکت بر روی مسیر منحنی، حرکتی شتاب‌دار است حتی اگر بزرگی سرعت ثابت باشد.

## فعالیت ۵-۱

دو حرکت شتاب‌دار مثال بزنید که در آنها، بزرگی سرعت تغییر نکند.

در شکل ۲۶-۱ الف، بردارهای سرعت در دو لحظهٔ  $t_1$  و  $t_2$  روی مسیر نشان داده شده است.

برای محاسبهٔ تغییر در بازهٔ زمانی  $\Delta t = t_2 - t_1$  بردارهای  $\vec{v}_1$  و  $\vec{v}_2$  را مطابق شکل ۲۶-۱ ب از مبدأ مشترک O رسم می‌کنیم و  $\Delta \vec{v}$  را به دست می‌آوریم (شکل ۲۶-۱ ب). در اینجا نیز، مشابه حرکت یک بعدی، بردار شتاب متوسط را در بازهٔ زمانی  $\Delta t$  به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

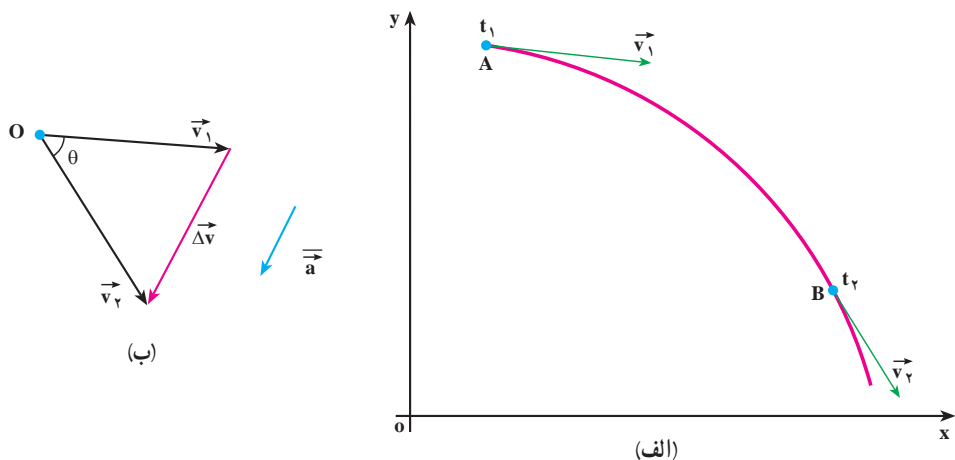
$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (۲۸-۱)$$

با استفاده از رابطهٔ ۲۷-۱ داریم:

$$\vec{a} = \left( \frac{\Delta v_x}{\Delta t} \right) \vec{i} + \left( \frac{\Delta v_y}{\Delta t} \right) \vec{j}$$

که آن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\vec{a} = (\bar{a}_x) \vec{i} + (\bar{a}_y) \vec{j} \quad (۲۹-۱)$$



شکل ۱-۲۶- بردار شتاب متوسط با  $\Delta \vec{v}$  هم جهت است.

شتاب لحظه‌ای در لحظه  $t_1$  را نیز می‌توان به صورت حد شتاب متوسط، هنگامی که  $\Delta t$  به سمت

صفر میل می‌کند، تعریف کرد؛ یعنی:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (1-30)$$

با توجه به مفهوم مشتق، رابطه ۱-۳۰ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (1-31)$$

$$\vec{a} = \frac{d^2(\vec{r})}{dt^2} \quad (1-32)$$

به کمک رابطه ۱-۲۹ می‌توانیم بنویسیم:

$$\vec{a} = \left(\frac{dv_x}{dt}\right) \vec{i} + \left(\frac{dv_y}{dt}\right) \vec{j} \quad (1-33)$$

که در آن،  $\frac{dv_x}{dt} = a_x$  و  $\frac{dv_y}{dt} = a_y$  مؤلفه‌های شتاب لحظه‌ای اند.

در نتیجه، می‌توان نوشت:

$$\vec{a} = (a_x) \vec{i} + (a_y) \vec{j} \quad (1-34)$$

رابطه ۱-۲۸ نشان می‌دهد که  $\vec{a}$  و  $\Delta \vec{v}$  هم جهت‌اند ولی همان‌طور که در شکل ۱-۲۶-ب نشان داده شده است، در حرکت روی مسیر خمیده، معمولاً بردار شتاب متوسط  $\vec{a}$ ، با بردارهای سرعت، ( $\vec{v}_1$  یا  $\vec{v}_2$ ) هم جهت نیست. در حالتی هم که  $\Delta t$  به سمت صفر میل می‌کند و بردار  $\vec{v}_2$  به بردار  $\vec{v}_1$  بسیار نزدیک می‌شود، شتاب لحظه‌ای با سرعت لحظه‌ای نیز معمولاً هم جهت نخواهد بود. ولی به کمک رابطه ۱-۳۳ و با داشتن معادله سرعت، جهت بردار شتاب لحظه‌ای را، که از این پس آن را به اختصار شتاب خواهیم نامید، می‌توان به دست آورد.

### مثال ۱-۱۸

معادله حرکت دو بعدی جسمی در SI به صورت زیر است:

$$\begin{cases} x = 2 \cdot t^2 \\ y = -5t^3 \end{cases}$$

بردار سرعت و بردار شتاب این جسم را در لحظه  $t=1s$  به دست آورید. آیا این دو بردار هم جهت‌اند؟

پاسخ

برای تعیین بردار سرعت، ابتدا مؤلفه‌های  $v_x$  و  $v_y$  را در  $t=1s$  به دست می‌آوریم:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 4 \cdot t \xrightarrow{t=1s} v_x = 4 \text{ m/s}$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = -15t^2 \xrightarrow{t=1s} v_y = -15 \text{ m/s}$$

بنابراین، بردار سرعت لحظه‌ای در  $t=1s$  چنین خواهد بود:

$$\vec{v} = 4 \cdot \vec{i} - 15 \cdot \vec{j}$$

برای تعیین بردار شتاب نیز ابتدا مؤلفه‌های شتاب، یعنی  $a_x$  و  $a_y$  را به دست می‌آوریم. مؤلفه افقی شتاب، ثابت است:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = 4 \text{ m/s}^2$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = -30t$$

$a_y$  تابع زمان است و در  $t=1s$  برابر است با :

$$a_y = -3^\circ \text{m/s}^2$$

با توجه به مقادیرهای  $a_x$  و  $a_y$  در لحظه  $t=1s$ ، بردار شتاب در این لحظه برابر

است با :

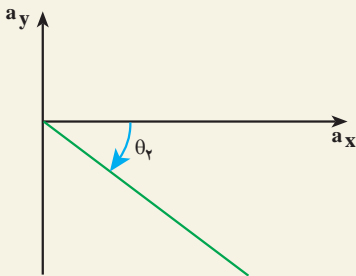
$$\vec{a} = 4^\circ \vec{i} - 3^\circ \vec{j}$$

زاویه‌ای که بردارهای سرعت و شتاب در لحظه  $t=1s$  با محور افقی می‌سازند،

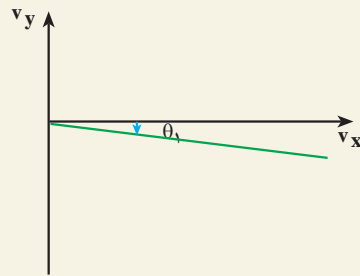
به ترتیب برابرند با :

$$\tan \theta_1 = \frac{v_y}{v_x} = \frac{-15}{4^\circ} \Rightarrow \theta_1 = \tan^{-1} \frac{-3}{4} \approx -37^\circ$$

$$\tan \theta_2 = \frac{a_y}{a_x} = -\frac{3^\circ}{4^\circ} \Rightarrow \theta_2 = \tan^{-1} \frac{-3}{4} \approx -37^\circ$$



(ب)



(الف)

شکل ۱-۲۷

با مقایسه زاویه‌های  $\theta_1$  و  $\theta_2$  در شکل ۱-۲۷ می‌توان نتیجه گرفت که بردارهای سرعت و شتاب در این لحظه هم جهت نیستند.

## حرکت با شتاب ثابت در صفحه — حرکت پرتابی

وقتی حرکت در یک صفحه با شتاب ثابت باشد، بزرگی و جهت بردار شتاب ثابت می‌ماند؛ از

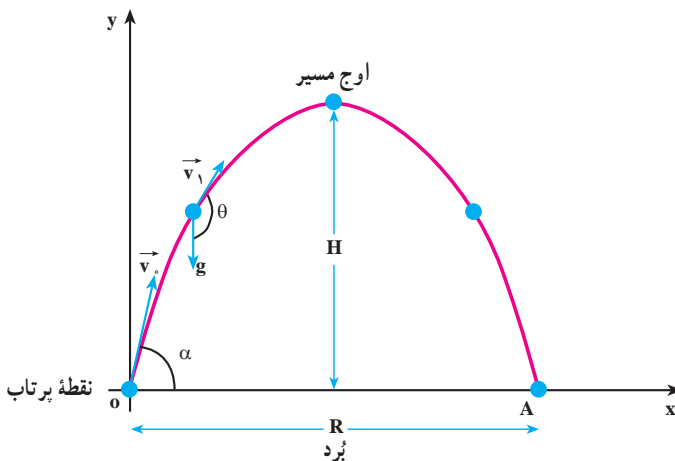
این رو، مؤلفه‌های  $\vec{a}$  در طول حرکت تغییری نمی‌کنند و مقدار ثابتی دارند. از سوی دیگر، طبق قانون



شکل ۱-۲۸

هوا صرف نظر کنیم، تنها نیروی وارد بر پرتابه، وزن آن  $mg$  و شتاب حاصل از این نیرو  $\vec{g}$  است که در نزدیکی سطح زمین، بزرگی آن ثابت و جهت آن به طرف مرکز زمین است.

نتیجهٔ فعالیت ۱-۷ نشان می‌دهد که حرکت پرتابی در یک صفحهٔ قائم انجام می‌شود. برای بررسی این حرکت، محور  $ox$  را در راستای افق و محور  $oy$  را در راستای  $g$  در نظر می‌گیریم. در نتیجه، حرکت پرتابی را می‌توان به صورت ترکیب دو حرکت، یکی در راستای افق و دیگری در راستای قائم دانست. در این حرکت، نقطهٔ پرتاب جسم را مبدأ مختصات ( $x_0 = 0$  و  $y_0 = 0$ ) جهت مثبت محور  $y$  را، به طرف بالا فرض می‌کنیم.



شکل ۱-۲۹

در شکل ۲۹-۱ مسیر حرکت یک پرتابه، روی صفحه مختصات xoy، همراه با بردار شتاب  $\vec{g}$  و نیز بردار سرعت اولیه جسم  $\vec{v}_0$  که با افق زاویه  $\alpha$  می‌سازد، نشان داده شده است. در این شکل، مؤلفه‌های بردار شتاب  $\vec{g}$  با رابطه‌های زیر داده می‌شوند:

$$a_x = 0 \text{ و } a_y = -g \quad (35-1)$$

مؤلفه‌های سرعت اولیه  $\vec{v}_0$  نیز برابرند با:

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha \text{ و } v_{0y} = v_0 \sin \alpha \quad (36-1)$$

چون  $a_x = 0$  است، حرکت در راستای محور x با سرعت ثابت ( $v_0 \cos \alpha$ ) انجام می‌شود. بنابراین، با استفاده از رابطه ۷-۱، معادله‌های حرکت و سرعت پرتابه در راستای محور x، به صورت زیر است:

$$x = (v_0 \cos \alpha) t \quad (37-1)$$

$$v_x = v_0 \cos \alpha = \text{ثابت} \quad (38-1)$$

حرکت در راستای قائم y، یک حرکت با شتاب ثابت ( $-g$ ) است؛ بنابراین، با استفاده از رابطه‌های ۱۴-۱ و ۱۵-۱ معادله‌های حرکت پرتابه در راستای محور y را نیز به صورت زیر خواهیم داشت:

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + (v_0 \sin \alpha)t \quad (39-1)$$

$$v_y = -gt + v_0 \sin \alpha \quad (40-1)$$

معادله‌های ۱-۳۵ تا ۱-۴۰ مؤلفه‌های بردار شتاب و سرعت و مکان پرتابه را در هر لحظه روی محورهای x و y مشخص می‌کنند. می‌دانیم که اگر در معادله‌های حرکت، برای x و y در حرکت دو بعدی، زمان حذف شود، معادله مسیر حرکت به دست خواهد آمد؛ بدین ترتیب، معادله مسیر حرکت پرتابی روی صفحه xoy نیز چنین است:

$$t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha}$$

$$y = -\frac{1}{2}g\left(\frac{x}{v_0 \cos \alpha}\right)^2 + v_0 \sin \alpha \left(\frac{x}{v_0 \cos \alpha}\right)$$

$$y = -\frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} + x \tan \alpha \quad (41-1)$$

رابطه ۱-۴۱ نشان می‌دهد که مسیر حرکت پرتابی در شرایط خلأ، سهمی است (چرا؟). در حرکت پرتابی، فاصله افقی ای را که پرتابه طی می‌کند تا دوباره به ارتفاع اولیه پرتاب برگردد، بُرد پرتابه

می‌نامند. بُرد پرتابه را با R نمایش می‌دهیم (شکل ۱-۲۹). مختصات نقطه بازگشت به ارتفاع اولیه با توجه به شکل ۱-۲۰ به صورت  $y = 0$  و  $x = R$  است. با استفاده از رابطه ۱-۴۱ داریم:

$$0 = -\frac{g(R)^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} + (R) \tan \alpha$$

$$R = \frac{v_0^2 \times \sin \alpha \times \cos \alpha}{g}$$

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g} \quad (1-42)$$

## تمرین ۱-۵

زاویه پرتاب چقدر باشد تا بُرد پرتابه به مقدار بیشینه خود برسد؟

در حرکت پرتابی، بالاترین نقطه‌ای که پرتابه به آن می‌رسد، نقطه اوج نام دارد. در شکل ۱-۲۹ ارتفاع نقطه اوج با H نشان داده شده است. سرعت در راستای محور y در نقطه اوج صفر است (چرا؟)؛ در نتیجه، با استفاده از رابطه ۱-۴۰ داریم:

$$0 = -gt + v_0 \sin \alpha$$

$$t = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$$

t زمان رسیدن به نقطه اوج است. با جای‌گذاری این زمان در معادله ۱-۳۹، ارتفاع نقطه اوج به دست می‌آید:

$$H = -\frac{1}{2}g\left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g}\right)^2 + (v_0 \sin \alpha)\left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g}\right)$$

$$H = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} \quad (1-43)$$



## فعالیت ۱-۶

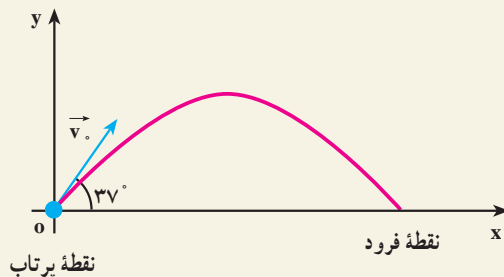
آزمایشی پیشنهاد کنید که به کمک آن بتوان سرعت آب را در لحظه خارج شدن از شیلنگ اندازه گرفت.

## مثال ۱-۱۹

یک بازیکن فوتبال، توبی را تحت زاویه  $37^\circ$  نسبت به افق، با سرعت اولیه  $10 \text{ m/s}$  شوت می‌کند. با فرض اینکه توب در صفحه  $xOy$  حرکت کند و مقاومت هوا ناچیز باشد:

(الف) زمان رسیدن توب به نقطه اوج را به دست آورید.

(ب) پس از چه زمانی توب به زمین برمی‌گردد؟ ( $\sin 37^\circ = 0.6$ )



شکل ۱-۳۰

پاسخ

(الف) در نقطه اوج مسیر داریم:

$$v_y = -gt + v_0 \sin \alpha$$

$$0 = -9.8t + 10 \times 0.6 \quad \Rightarrow \quad t = \frac{6}{9.8} \approx 0.6 \text{ s}$$

(ب) در بازگشت به زمین  $y = 0$  است.

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + (v_0 \sin \alpha)t$$

$$0 = -4/9t^2 + (10 \times 0/6)t$$

$$t(-4/9t + 6) = 0 \Rightarrow t = 0, t = 1/2s$$

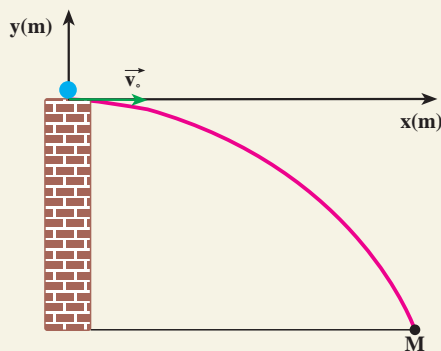
که در آن  $t=0$  لحظه پرتاب توپ و  $t=1/2s$  لحظه برخورد توپ به زمین (زمان کل حرکت) است.

## تمرین ۱-۶

ارتفاع نقطه اوج و نیز بُرد توپ را در مثال ۱-۱۹ محاسبه کنید.

## مثال ۱-۲۰

از بالای برجی به ارتفاع ۴۹ متر، تویی با سرعت افقی  $22\text{ m/s}$  پرتاب می شود. الف) چه مدت طول می کشد تا توپ به زمین برسد؟ ب) فاصله نقطه برخورد توپ با زمین تا پای برج چند متر است؟ پ) سرعت توپ هنگام برخورد به زمین چه قدر است؟



شکل ۱-۳۱

پاسخ

الف) نقطه پرتاب را مبدأ مختصات می گیریم. نقطه M محل فرود توپ بر روی زمین است که برای آن  $y_m = -49\text{ m}$ . با استفاده از رابطه ۱-۳۹ داریم:

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + (v_0 \sin \alpha)t$$

$$-49 = -4/9t^2 + 0$$

$$t = \sqrt{10} \approx 3/2 \text{ s}$$

ب) برای محاسبه فاصله نقطه فرود تا پای برج از معادله ۱-۳۷ استفاده می کنیم :

$$x = (v_0 \cos \alpha)t$$

$$x = (22 \times 1) \times 3/2 = 33 \text{ m}$$

پ) مؤلفه های سرعت را در لحظه برخورد با زمین از رابطه های ۱-۳۸ و ۱-۴۰ به دست می آوریم :

$$v_x = v_0 \cos \alpha = 22 \times 1 = 22 \text{ m/s}$$

و

$$v_y = -gt + v_0 \sin \alpha = -9/8 \times 3/2 + 0 = -31/36 \text{ m/s}$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{22^2 + (31/36)^2} \approx \sqrt{484 + 983/4}$$

$$v \approx 38 \text{ m/s}$$

## تمرین های فصل اول

۱- معادله حرکت جسمی در SI به صورت  $x = t^2 - 3t^2$  است. مطلوب است :

الف) بزرگی سرعت متوسط جسم در بازه زمانی ۱ تا ۲ ثانیه.

ب) بزرگی سرعت متحرک در لحظه  $t = 4 \text{ s}$ .

پ) بزرگی شتاب متوسط متحرک در بازه زمانی ۲ تا ۳ ثانیه.

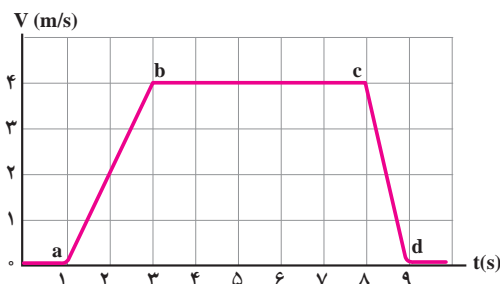
ت) بزرگی شتاب متحرک در لحظه  $t = 4 \text{ s}$ .

۲- خودرویی در پشت چراغ قرمز ایستاده است. با سبز شدن چراغ، خودرو با شتاب

$2 \text{ m/s}^2$  شروع به حرکت می کند. در همین لحظه، کامیونی با سرعت ثابت  $36 \text{ km/h}$  از کنار آن می گذرد.

الف) نمودارهای مکان - زمان و سرعت - زمان را برای اتومبیل و کامیون رسم کنید.

ب) پس از چه مدتی، اتومبیل به کامیون می رسد؟



شکل ۱-۳۲

۳- نمودار سرعت- زمان آسانسوری مطابق شکل ۱-۳۲ است. نمودار شتاب- زمان آن چگونه می شود و در مورد کندشونده یا تندشونده بودن حرکت اظهار نظر کنید.

۴- در شکل ۱-۳۳ توپی در راستای قائم به طرف بالا پرتاب می شود و پس از ۴ ثانیه به نقطه پرتاب برمی گردد. توپ:

(الف) با چه سرعتی پرتاب شده است؟ (ب) تا چه ارتفاعی بالا می رود؟  
(پ) با چه سرعتی به زمین می رسد؟ (ت) بعد از چند ثانیه به زمین می رسد؟ ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

۵- بردارهای مکان ذره متحرکی در لحظه های  $t_1 = 5 \text{ s}$  و  $t_2 = 25 \text{ s}$  به ترتیب  $\vec{r}_1 = 2\vec{i} + 14\vec{j}$  و  $\vec{r}_2 = 8\vec{i} + 6\vec{j}$  است. بزرگی سرعت متوسط این ذره را بین دو لحظه  $t_1$  و  $t_2$  به دست آورید. با رسم یک نمودار جهت  $\vec{v}$  را نشان دهید.

۶- معادله حرکت جسمی با دو رابطه زیر، در SI داده شده است:

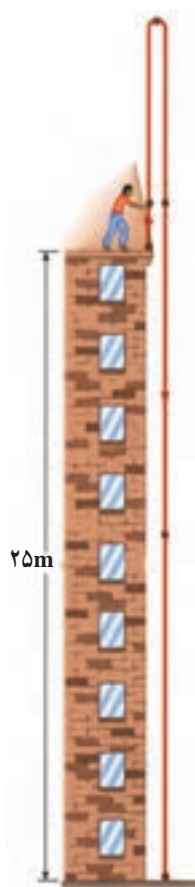
$$y = 2t^2 + 1, \quad x = 6t$$

(الف) معادله سرعت جسم را بنویسید و بزرگی سرعت را در  $t = 2 \text{ s}$  محاسبه کنید.

(ب) معادله مسیر حرکت را به دست آورید.

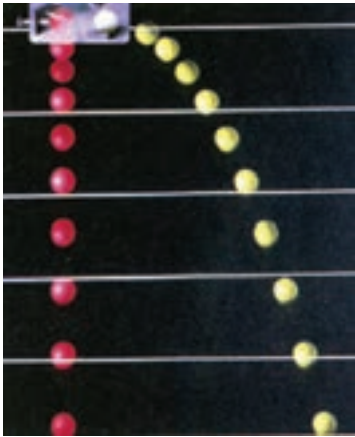
(پ) بردار سرعت متوسط جسم را بین لحظه های  $t = 1$  و  $t = 2$  ثانیه بر حسب بردارهای یکه  $\vec{i}$  و  $\vec{j}$  بنویسید.

۷- (الف) سرعت یک پرتابه را در نقطه اوج آن، بر حسب  $v$  و  $\alpha$  به دست آورید.



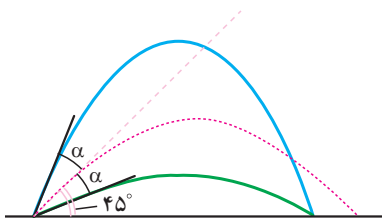
شکل ۱-۳۳

(ب) اگر نقطه فرود و نقطه پرتاب در یک صفحه افقی باشند، بردار سرعت پرتابه را هنگام فرود بر حسب  $\alpha$  و  $v$  به دست آورید.



شکل ۱-۳۴

۸- در شکل ۱-۳۴، گلولهٔ زرد رنگ در امتداد افق پرتاب شده است. اگر گلولهٔ قرمز رنگ نیز هم‌زمان با گلولهٔ زرد رنگ رها شده باشد، نشان دهید که ارتفاع این دو، در حین سقوط در تمام لحظه‌ها، یکسان خواهد بود.

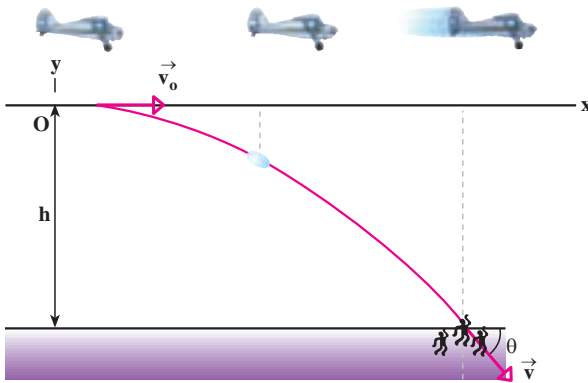


شکل ۱-۳۵

۹- گالیله در یکی از کتاب‌های خود نوشته است: «برای زاویه‌های پرتابی که به یک اندازه از زاویهٔ  $45^\circ$  بیشتر یا کمترند، بُردها مساوی‌اند...» (شکل ۱-۳۵). درستی این گفته را اثبات کنید.

۱۰- از روی پلی به ارتفاع  $20$  متر، بالای سطح آب یک رودخانه، جسمی را در راستای افقی با سرعت  $30 \text{ m/s}$  پرتاب می‌کنیم.

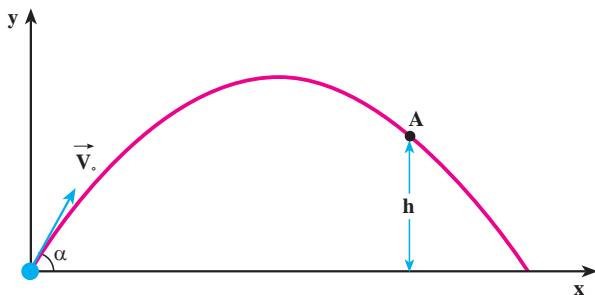
- الف) چه زمانی طول می‌کشد تا جسم به آب برخورد کند؟  
 ب) فاصلهٔ افقی نقطهٔ برخورد به آب تا نقطهٔ پرتاب چه مقدار است؟  
 پ) بزرگی سرعت جسم هنگام برخورد با آب، چه مقدار است؟



شکل ۱-۳۶

۱۱- هواپیمایی که با سرعت  $360 \text{ km/h}$  در ارتفاع  $245 \text{ m}$  موازی با سطح زمین پرواز می‌کند، می‌خواهد بسته‌ای را برای سیل‌زدگان به پایین بیندازد (شکل ۱-۳۶). خلبان در چه فاصلهٔ افقی، بسته را رها کند تا به سیل‌زدگان برسد؟

۱۲- مطابق شکل ۱-۳۷ جسمی به جرم  $m$  را با سرعت اولیه  $\vec{v}_0$  و با زاویه  $\alpha$  نسبت به افق، پرتاب می‌کنیم. فرض کنید نیروی مقاومت هوا در برابر حرکت جسم قابل چشم‌پوشی است. الف) با استفاده از قانون پایستگی انرژی مکانیکی، بزرگی سرعت جسم را در نقطه  $A$  در ارتفاع  $h$ ، از نقطه پرتاب به دست آورید.

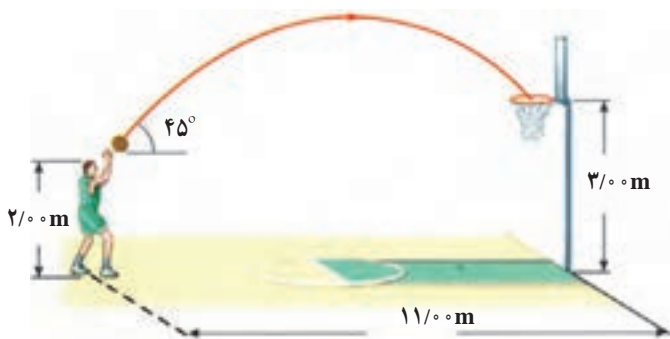


شکل ۱-۳۷

ب) بزرگی سرعت جسم را در نقطه  $A$  با استفاده از معادله‌های حرکت پرتابی به دست آورید و آن را با نتیجه قسمت «الف» مقایسه کنید.

۱۳- در شکل ۱-۳۸ سرعت اولیه توپ را طوری حساب کنید که توپ داخل سبد بیفتد.

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$



شکل ۱-۳۸

# دینامیک



## فصل



# دینامیک

**نگاهی به فصل:** قانون‌های نیوتون از جمله قانون‌های اساسی و بنیادی در دانش فیزیک به شمار می‌روند. این قانون‌ها، کاربردهای گسترده‌ای در فناوری و غالب رشته‌های مهندسی دارند. در صنعت، امور ساختمانی، دریانوردی، فضاوردی و...، اصول حاکم بر پدیده‌ها از قانون‌های نیوتون پیروی می‌کنند.

شما در فیزیک ۲ و آزمایشگاه، با قانون‌های نیوتون آشنا شدید و دیدید که چگونه می‌توان آنها را برای حل مسئله‌های دینامیک در یک بُعد به کار برد. در این فصل، پس از یادآوری این قانون‌ها، کاربرد آنها را در حل مسئله‌ها، در دینامیک دوبعدی، بررسی می‌کنیم.

## ۱-۲ قانون‌های نیوتون

**قانون اول نیوتون:** «هر جسمی، حالت سکون یا حرکت یکنواخت خود را روی خط راست حفظ می‌کند، مگر آنکه تحت تأثیر نیرو یا نیروهایی، مجبور به تغییر آن حالت شود.»

**قانون دوم نیوتون:** «نیروی برآیند وارد بر جسم برابر است با حاصل ضرب جرم جسم در شتاب

$$\vec{F} = m \vec{a} \quad \text{آن. یعنی:}$$

به عبارت دیگر شتاب یک جسم در همان جهت نیروی برآیند وارد بر آن است و با نیروی برآیند تقسیم بر جرم جسم برابر است:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (1-2)$$

توجه کنید در رابطه بالا،  $\vec{F}$  برآیند نیروهای وارد بر جسم است که معمولاً به صورت  $\sum \vec{F}$  نیز نوشته می‌شود.

**قانون سوم نیوتون:** «هرگاه جسمی به جسم دیگر نیرو وارد کند، جسم دوم هم به جسم اول



نیروی هم اندازه، هم راستا و در خلاف سوی آن وارد می‌کند.»  
همچنین، در فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم که نیرویی که جسم اول وارد می‌کند، «کنش» و نیرویی که جسم دوم وارد می‌کند «واکنش» نام دارد. این دو نیرو همواره هم اندازه، هم راستا و در سوی مخالف یکدیگرند که هر یک بر دیگری وارد می‌کند.

## تمرین ۱-۲

با مراجعه به آنچه در فیزیک (۲) و آزمایشگاه خوانده‌اید، جمله‌های زیر را کامل کنید.

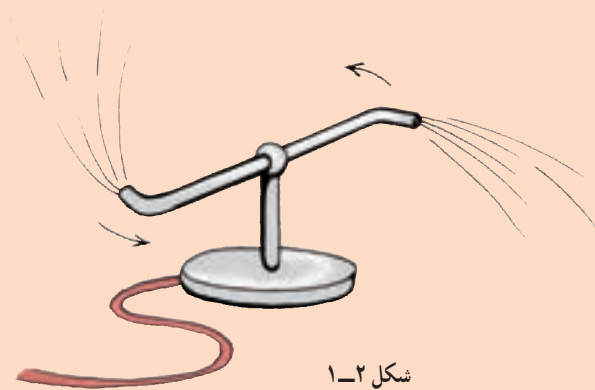
- ۱- تغییر بردار سرعت بر اثر ..... است.
- ۲- اگر در اثر اعمال نیرو، جسم ساکنی به حرکت درآید، در شروع حرکت بردارهای سرعت و ..... هم جهت‌اند.
- ۳- در مسیر خمیده بردارهای سرعت و نیرو .....  
۴- اگر جسمی بر روی خط راستی در حرکت باشد و بر آن نیرویی هم راستا و هم سو با سرعت حرکت آن وارد شود، حرکت جسم ..... خواهد شد.
- ۵- در صورتی که جسم بر روی خط راستی در حرکت باشد و بر آن نیرویی در خلاف جهت سرعت اعمال شود، حرکت جسم ..... خواهد شد.

## تمرین ۲-۲

توضیح دهید چرا هنگامی که :

- ۱- با پا به دیواری ضربه می‌زنید، پای شما درد می‌گیرد؟
- ۲- قایقران پارو می‌زند، قایق در آب حرکت می‌کند؟
- ۳- چمدان را از زمین بلند می‌کنید، دست شما به طرف پایین کشیده می‌شود؟

۴- آب از فواره مطابق شکل ۱-۲ خارج می شود و فواره می چرخد؟



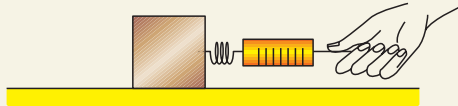
## فعالیت ۱-۲

در شکل ۲-۲ تصویر موشکی در حال پرتاب را مشاهده می کنید. براساس قانون سوم نیوتون چگونگی حرکت آن را شرح دهید.



## مثال ۲-۱

صندوقی به جرم  $10 \text{ kg}$  روی یک سطح افقی با ضریب اصطکاک ایستایی  $0.4$  و ضریب اصطکاک جنبشی  $0.2$  قرار دارد. مطابق شکل ۲-۳ الف نیروی سنجی به صندوق وصل می‌کنیم و آن را می‌کشیم.



شکل ۲-۳ الف

الف) نخست با نیرویی برابر با  $20 \text{ N}$  صندوق را می‌کشیم. آیا صندوق شروع به حرکت می‌کند؟ در این حالت، نیروی اصطکاک بین صندوق و سطح چه مقدار است؟  
ب) نیروی وارد بر صندوق را به  $60 \text{ N}$  می‌رسانیم. در این حالت، نیروی اصطکاک چه مقدار است؟ شتاب حرکت صندوق را در این حالت حساب کنید.

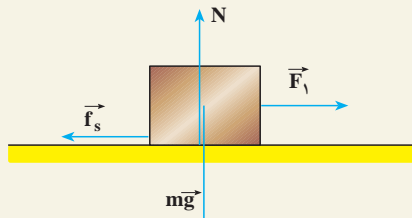
پاسخ

الف) در فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم، برای آنکه جسمی به حرکت درآید نیروی وارد بر آن از نیروی اصطکاک در آستانه حرکت بیشتر باشد.  
بنابراین، ابتدا نیروی اصطکاک در آستانه حرکت (پیشینه نیروی اصطکاک) را محاسبه می‌کنیم:

$$f_{s \max} = \mu_s N$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow N = mg = 10 \times 10 = 100 \text{ N}$$

$$f_{s \max} = 0.4 \times 100 = 40 \text{ N}$$



شکل ۲-۳ ب

در این حالت، چون نیروی وارد شده کمتر از نیروی اصطکاک در آستانه حرکت است، صندوق ساکن می ماند و در نتیجه، شتاب حرکت آن صفر است. بنابر قانون دوم نیوتون داریم:

$$\sum F_x = ma \Rightarrow F_1 - f_s = ma = 0$$

$$f_s = 20 \text{ N}$$

(ب) در این حالت، چون نیروی وارد شده بیشتر از نیروی اصطکاک در آستانه حرکت است، جسم حرکت می کند و نیروی اصطکاک، جنبشی است و با استفاده از رابطه  $f_k = \mu_k N$  محاسبه می شود.

$$f_k = 0.2 \times 100 = 20 \text{ N}$$

برای محاسبه شتاب حرکت، قانون دوم نیوتون را می نویسیم:

$$F - f_k = ma$$

$$60 - 20 = 10a$$

$$a = 4 \text{ m/s}^2$$

## فعالیت ۲-۲

جسمی را روی سطح افقی قرار دهید و آن را با یک نیروی افقی بکشید و به تدریج نیروی کشش را افزایش دهید تا این که جسم در آستانه حرکت قرار گیرد و سپس حرکت کند. حال، به طور کیفی، نمودار تغییر نیروی اصطکاک را، برحسب نیروی کشش، رسم کنید.

## ۲-۲- چگونگی استفاده از قانون های نیوتون در حرکت یک جسم

در فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم که برای حل مسئله های دینامیک یک بعدی چه نکاتی را باید در نظر بگیریم. اکنون برای حل مسئله های دینامیک دوبعدی این نکات را یادآوری و تکمیل می کنیم:

- ۱- شکل ساده ای از جسم و تکیه گاه آن رسم می کنیم.
- ۲- نیروهایی را که اجسام دیگر بر جسم وارد می کنند، روی شکل مشخص می کنیم.
- ۳- دستگاه محورهای مختصات مناسب انتخاب می کنیم. (ضمن حل مسئله، با نحوه انتخاب

دستگاه مختصات مناسب نیز آشنا خواهیم شد.)

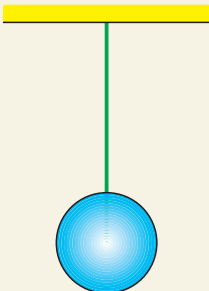
۴- نیروها را روی محورهای مختصات تجزیه می‌کنیم؛ یعنی، مؤلفه‌های هر نیرو را روی محورها تعیین می‌کنیم.

۵- با نوشتن قانون دوم نیوتون روی هریک از محورها، شتاب حرکت جسم را روی هر محور محاسبه می‌کنیم؛ به عبارت دیگر، مؤلفه‌های نیرو را روی هر محور به‌طور جداگانه، به صورت  $F_x = ma_x$  و  $F_y = ma_y$  می‌نویسیم.

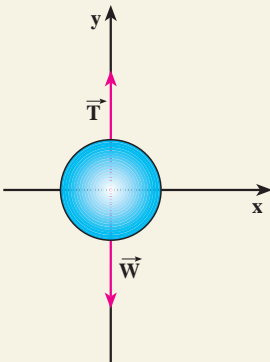
۶- هرگاه چند جسم به هم متصل باشند، در صورتی که شتاب‌های حرکت آنها یکسان باشند، مجموعه را می‌توانیم به عنوان یک دستگاه (با جرمی برابر مجموع جرم‌ها) در نظر بگیریم و قانون دوم را برای آن بنویسیم.

نحوه استفاده از قانون‌های نیوتون در مثال‌های زیر نشان داده شده است.

## مثال ۲-۲



شکل ۲-۴-الف



شکل ۲-۴-ب

جسمی به جرم  $m = 12 \text{ kg}$  را با طنابی که جرم آن ناچیز است، مطابق شکل ۲-۴-الف می‌آویزیم. نیروهای وارد بر جسم را تعیین کنید و مقدار هریک را به دست آورید.

### پاسخ

نیروهای وارد بر جسم عبارت‌اند از:

نیروی وزن، که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود و نیرویی که از طرف طناب به جسم وارد می‌شود. چون جسم ساکن است، باید برآیند نیروهای وارد بر آن صفر باشد؛ در نتیجه باید از طرف طناب، نیرویی در امتداد قائم و رو به بالا بر جسم اعمال شود. این نیرو را نیروی کشش طناب (نخ) می‌نامند که آن را با  $\vec{T}$  نمایش می‌دهیم.

نیروهای وارد بر جسم، در راستای محور  $y$ ‌اند و در شکل ۲-۴-ب نشان داده شده‌اند. بنابر قانون دوم نیوتون داریم:

$$T - mg = ma$$

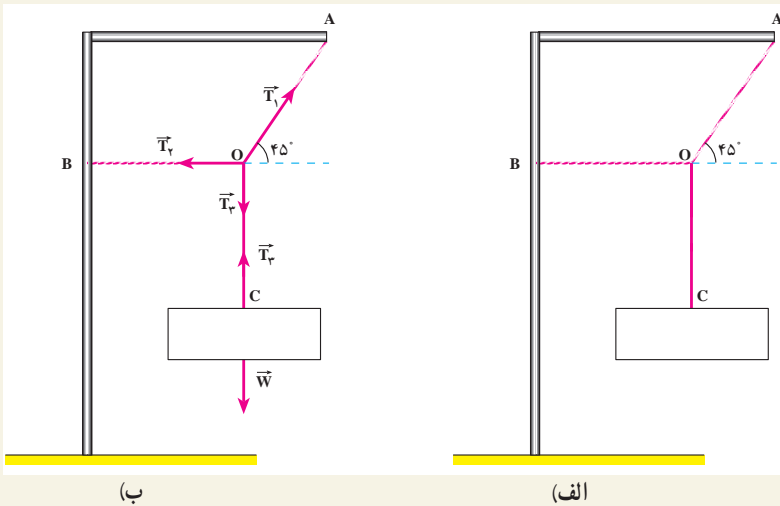
چون  $a = 0$ ، داریم :

$$T = mg = 12 \times 10 = 120 \text{ N}$$

در هر نقطه از طناب کشیده شده، نیرویی از طرف یک بخش بر بخش دیگر وارد می‌شود. نیروی کشش طناب در هر نقطه برابر نیرویی است که در صورت پاره شدن طناب در آن نقطه، باید وارد کنیم تا وضعیت اولیه آن حفظ شود؛ یعنی، اگر جسم ساکن بوده با جای‌گزینی این نیرو در آن نقطه هم چنان ساکن بماند و اگر در حرکت بوده با همان حالت قبل از پاره شدن حرکت کند.

### مثال ۲-۳

یک تابلوی تبلیغاتی مطابق شکل ۲-۵ الف از پایه‌ای آویزان است. اگر وزن تابلو  $120 \text{ N}$  باشد، کشش طناب‌های OA و OB را محاسبه کنید. (از وزن طناب‌ها چشم‌پوشی کنید.)



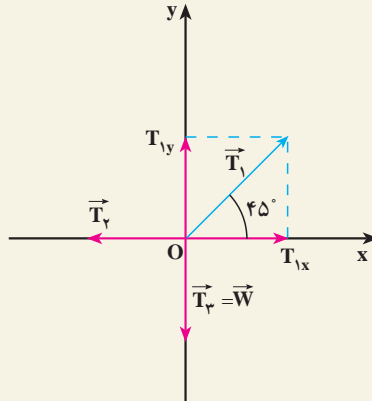
شکل ۲-۵

پاسخ

در شکل ۲-۵ ب نیروهای وارد بر گره O و تابلو نشان داده شده‌اند. قانون دوم

نیوتون را برای گره O می نویسیم. نیروهای وارد بر گره عبارت اند از :

$\vec{T}_1$  نیروی کشش طناب در امتداد OA،  $\vec{T}_r$  نیروی کشش طناب در امتداد OB و  $\vec{T}_r$  نیروی کشش در امتداد OC. داریم :  $T_r = W$  (چرا؟). با انتخاب دستگاه محوره‌ای مختصات مناسب مطابق شکل ۵-۲ پ نیروها را روی محوره‌ای مختصات تصویر می کنیم.



شکل ۵-۲ پ

چون گره در حال سکون است، داریم :

$$F_x = 0 \Rightarrow T_{1x} - T_r = 0$$

$$F_y = 0 \Rightarrow T_{1y} - W = 0$$

$$T_{1y} = T_1 \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} T_1 \quad \text{و} \quad T_{1x} = T_1 \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} T_1$$

با جایگزینی مقادیر  $T_{1y}$  و  $T_{1x}$  در معادله‌های بالا داریم :

$$\frac{\sqrt{2}}{2} T_1 - T_r = 0$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} T_1 - 120 = 0$$

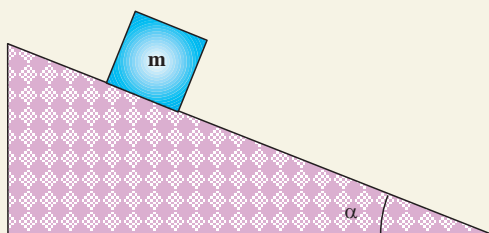
با حل این دو معادله داریم :

$$T_1 = 170 \text{ N} \quad \text{و} \quad T_r = 120 \text{ N}$$

## مثال ۲-۴

جسمی به جرم  $m$  را روی سطح شیب‌داری که با افق زاویه  $\alpha$  می‌سازد، قرار می‌دهیم:

الف) شتاب حرکت جسم و نیروی عمودی تکیه‌گاه را محاسبه کنید (در این قسمت اصطکاک را نادیده بگیرید).

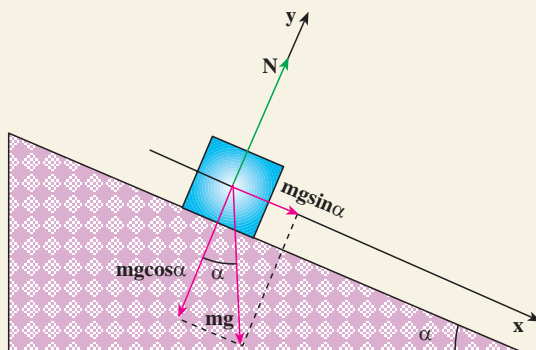


شکل ۲-۶-الف

ب) اگر بر اثر نیروی اصطکاک، جسم روی سطح ساکن بایستد، نیروی اصطکاک چه مقدار خواهد بود. آن را محاسبه کنید.

پاسخ

الف) ابتدا نیروهای وارد بر جسم را رسم می‌کنیم. جسم در امتداد سطح شیب‌دار حرکت می‌کند. محور  $x$  را در راستای سطح شیب‌دار و در جهت حرکت و محور  $y$  را عمود بر آن سطح انتخاب می‌کنیم.



شکل ۲-۶-ب



مؤلفه‌های وزن روی محورهای  $x$  و  $y$  به ترتیب عبارت‌اند از :

$$mg \cos \alpha \text{ و } mg \sin \alpha$$

با توجه به قانون دوم نیوتون در راستای محور  $x$  داریم :

$$F_x = mg \sin \alpha = ma$$

$$a = g \sin \alpha$$

چون جسم در راستای محور  $y$  حرکت ندارد :

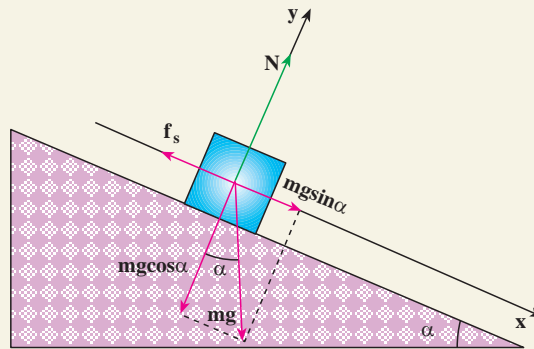
$$F_y = 0$$

$$N - mg \cos \alpha = 0$$

و در نتیجه :

$$N = mg \cos \alpha$$

(ب) نمودار نیروهای وارد بر جسم در شکل ۷-۲ نشان داده شده است. چون جسم ساکن است، برآیند نیروهای وارد بر آن صفر است :



شکل ۷-۲

$$F_x = 0$$

$$mg \sin \alpha - f_s = 0$$

و از آنجا داریم :

$$f_s = mg \sin \alpha$$

### تمرین ۲-۳

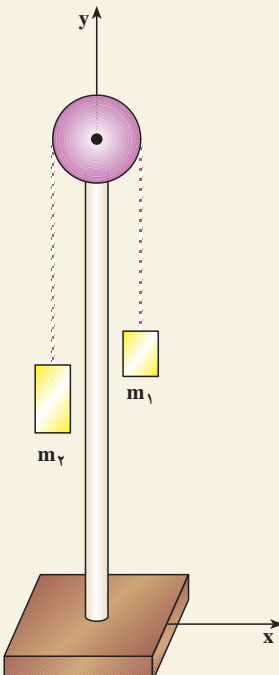
توضیح دهید که آیا می‌توان با استفاده از مثال ۲-۴ ب ضریب اصطکاک ایستایی جسم و سطح را محاسبه کرد.

### فعالیت ۲-۳

آزمایشی برای تعیین ضریب اصطکاک ایستایی سطح‌های مختلف با استفاده از سطح شیب دار طراحی کنید.

### مثال ۲-۵

قرقره‌ای را مطابق شکل ۲-۸ الف بر روی پایه‌ای نصب می‌کنیم. دو وزنه  $m_1 = 100\text{ g}$  و  $m_2 = 150\text{ g}$  را با نخ سبک به یکدیگر وصل می‌کنیم و نخ را از شیار قرقره می‌گذرانیم. شتاب حرکت وزنه‌ها و نیروی کشش نخ را محاسبه کنید. این وسیله را ماشین اتوود می‌نامند.



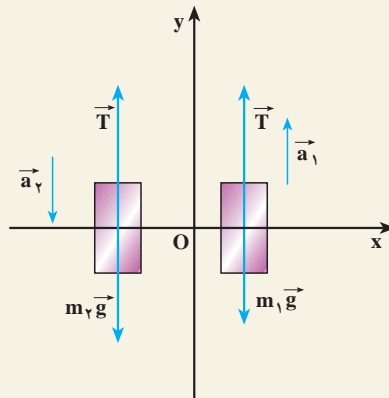
شکل ۲-۸ الف

### پاسخ

نیروهای وارد بر جرم‌های  $m_1$  و  $m_2$  در شکل ۸-۲ ب رسم شده است. چون جرم نخ، قرقره و نیروی اصطکاک ناچیز است، کشش طناب در تمام نقطه‌های آن یکسان است؛ بنابراین،  $T_1 = T_2$  و چون  $m_2 > m_1$  است،  $m_2$  به طرف پایین و  $m_1$  به طرف بالا حرکت می‌کند. در این صورت، شتاب حرکت  $m_2$  در خلاف جهت محور  $y$  و  $m_1$  در جهت محور  $y$  خواهد بود؛ پس:

$$T - m_1 g = m_1 a_1 \quad (1)$$

$$T - m_2 g = -m_2 a_2 \quad (2)$$



شکل ۸-۲ ب

چون بزرگی جابه‌جایی وزنه‌ها یکسان است:

$$a_1 = -a_2 = a$$

با جایگزینی مقادیر  $m_1$  و  $m_2$  در رابطه‌های (۱) و (۲) خواهیم داشت:

$$T - 1 \times 10 = +1a$$

$$T - 15 \times 10 = -15a$$

با حل این معادله‌ها داریم:

$$T = 1/2 \text{ N و } a = 2 \text{ m/s}^2$$

## ۳-۲- تکانه (اندازه حرکت)

در شکل ۹-۲ یک خودروی سواری و یک کامیون مجاور هم با سرعت یکسان در حرکت اند. خودرو و کامیون با نزدیک شدن به چراغ قرمز، باید پس از طی مسافت  $50\text{ m}$  متوقف شوند. به نظر شما، نیروی لازم برای متوقف کردن کدام یک از آنها با شتاب ثابت، بیشتر است؟ برای بررسی دقیق تر،



شکل ۹-۲

فرض کنید جرم کامیون  $10^4$  تن و جرم خودروی سواری  $1$  تن باشد و هر یک با سرعت  $20\text{ m/s}$  در حرکت باشند. شتاب حرکت کندشونده برای کامیون و خودروی سواری، در این جابه جایی، برابر است با :

$$|a_1| = |a_2| = \left| \frac{v^2 - v_0^2}{2\Delta x} \right| = \frac{400}{2 \times 50} = 4\text{ m/s}^2$$

نیروی لازم برای توقف کامیون برابر است با :

$$F_1 = m_1 a = 10000 \times 4 = 4 \times 10^4\text{ N}$$

و نیروی لازم برای توقف خودروی سواری برابر است با :

$$F_2 = m_2 a = 1000 \times 4 = 4 \times 10^3\text{ N}$$

نتیجه می گیریم که نیروی لازم برای متوقف کردن کامیون بیشتر از نیروی لازم برای متوقف کردن خودروی سواری است.

## فعالیت ۲-۴

فرض کنید در مثال بالا، جرم خودرو و کامیون یکسان، ولی سرعت یکی  $20 \text{ m/s}$  و دیگری  $15 \text{ m/s}$  باشد. نیروی لازم برای متوقف کردن هر یک از آنها را محاسبه و با هم مقایسه کنید. نتیجه‌های این فعالیت و مثال قبل را در گروه خود، تجزیه و تحلیل و به کلاس گزارش کنید.

در مثال‌های بالا دیدیم که نیروی لازم برای متوقف کردن خودروها به جرم و سرعت آنها بستگی دارد. در فیزیک کمیتی به نام تکانه (اندازه حرکت) تعریف می‌شود که به هر دو کمیت جرم و سرعت بستگی دارد. «تکانه یک جسم، حاصل ضرب جرم جسم در سرعت آن است.»

تکانه را با  $\vec{P}$  نمایش می‌دهند و یکای آن کیلوگرم متر بر ثانیه ( $\text{kgm/s}$ ) است؛ بنابراین، می‌توان نوشت:

$$\vec{P} = m \vec{v} \quad (2-2)$$

تکانه، کمیتی برداری است. چرا؟

رابطه بین نیرو و تکانه: با به کارگیری قانون دوم نیوتون، به سادگی رابطه نیرو و تکانه به دست می‌آید. با استفاده از رابطه ۲-۱ داریم:

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$$

چون جرم جسم، مقداری ثابت است، می‌توان نوشت:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = d(m\vec{v})$$

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{v})$$

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} \quad (3-2)$$

یعنی، آهنگ تغییر تکانه یک جسم نسبت به زمان برابر با برآیند نیروهای وارد بر جسم

است؛ به بیان دیگر، برآیند نیروهای وارد بر جسم، مشتق تکانه آن نسبت به زمان است.  
اگر در بازه زمانی  $\Delta t$  تغییر تکانه یک جسم  $\vec{P}$  باشد، نیروی متوسط وارد بر آن از رابطه زیر

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} \quad \text{به دست می آید:} \quad (۴-۲)$$

## مثال ۲-۶

چکشی به جرم  $۱/۵ \text{ kg}$  را با سرعت  $۱۰ \text{ m/s}$  به سر میخی می کوبیم (شکل ۲-۱۰).  
اگر زمان برخورد چکش با سر میخ  $۰/۰۰۵ \text{ s}$  باشد، بزرگی نیروی متوسطی که به چکش وارد می شود، چه قدر است؟

پاسخ

$$\bar{F} = \left| \frac{\Delta P}{\Delta t} \right| = m \left| \left( \frac{v - v_0}{\Delta t} \right) \right|$$

$$\bar{F} = \left| ۱/۵ \frac{(۰ - ۱۰)}{۰/۰۰۵} \right| = ۳۰۰۰ \text{ N}$$



شکل ۲-۱۰

## تمرین ۲-۴

دو خودروی A و B دارای مشخصات فنی متفاوت اند. جرم خودروی A برابر یک تن و جرم خودروی B برابر  $۸۰۰ \text{ kg}$  است. سرعت خودروی A حداقل پس از  $۱۱/۷ \text{ s}$  از صفر به  $۹۶ \text{ km/h}$  می رسد ولی سرعت خودروی B حداقل پس از  $۱۲/۱ \text{ s}$ ، همین مقدار افزایش پیدا می کند.  
حداکثر برآیند نیروهای وارد بر هر یک از خودروهای A و B را حساب کنید.

## نقش کیسه هوا در تصادف های رانندگی



شکل ۱۱-۲

حوادث ناشی از سوانح رانندگی هر روز عده ای را به کام مرگ می کشاند یا موجب آسیب ها و خسارت های فراوان می شود؛ از این رو، شرکت های خودروسازی، همواره می کوشند خودروهای خود را با امکانات جدیدی، به منظور کاهش ضایعات ناشی از تصادف، مجهز کنند.

جاسازی کیسه هوا در خودروها، یکی از روش های معمول ایجاد ایمنی است. ساز و کار این وسیله، به این صورت است که هنگام بروز حادثه که به تغییر سرعت ناگهانی خودرو می انجامد، بر اثر یک واکنش شیمیایی سریع، گازی در یک کیسه پلاستیکی تولید می شود و کیسه پر از گاز در مقابل راننده و سرنشین قرار می گیرد. برخورد آنها به کیسه هوا، مدت زمان تغییر سرعت یا زمان توقف آنها را بسیار طولانی تر می کند؛ در نتیجه، طبق رابطه  $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t}$ ، با افزایش  $\Delta t$  نیروی متوسط وارد بر سرنشینان کاهش می یابد و بدین ترتیب از وارد آمدن آسیب جدی به آنها جلوگیری می شود.

زمان توقف در برخورد با جسم سخت در حدود هزارم ثانیه است، درحالی که کیسه هوا، این زمان را تا چند ثانیه افزایش می دهد؛ از این رو، نیروی وارد بر سرنشین تا حدود یک هزارم، کاهش می یابد.

## فعالیت ۵-۲

در یک مسابقهٔ پرش با نیزه، ورزشکاری از مانع پرش با ارتفاع ۶m بدون خطا عبور می‌کند.  
نقش تشک را در جلوگیری از آسیب رسیدن به ورزشکار مورد بحث و بررسی قرار دهید.



شکل ۲-۱۲

## ۴-۲- حرکت دایره‌ای

حرکت یک جسم در مسیر دایره‌ای، نمونهٔ دیگری از حرکت در صفحه است. مسیر حرکت ماه و ماهواره‌ها به دور زمین و برخی سیاره‌ها به دور خورشید تقریباً دایره‌ای است. در بعضی وسایل خانگی مانند لباس شویی، آب میوه‌گیری و... اجسام درون آنها در مسیر دایره‌ای حرکت می‌کنند. در تصویرهای زیر، نمونه‌هایی از حرکت اجسام بر مسیر دایره را مشاهده می‌کنید.





شکل ۲-۱۳ ب - طرحی از چرخش ماهواره امید  
در مدار زمین



شکل ۲-۱۳ الف - تصویری از یک قطار هوایی در  
پارک تفریحی



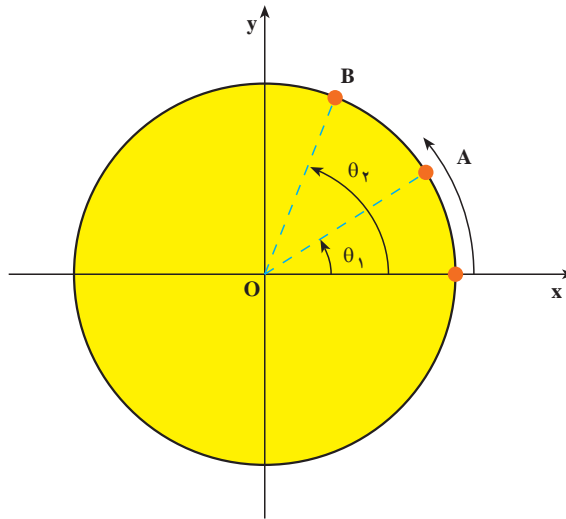
شکل ۲-۱۳ پ - تصویری از حرکت اتومبیل در شیب عرضی جاده

اکنون به بررسی حرکت دایره‌ای و دینامیک آن می‌پردازیم.

**سرعت زاویه‌ای متوسط:** ذره‌ای را در نظر بگیرید که روی مسیر دایره‌ای در جهت مخالف عقربه‌های ساعت در حرکت است (شکل ۲-۱۴). در این جا منظور از ذره، جسم کوچکی است که ابعاد آن در برابر شعاع دایره ناچیز باشد. مکان ذره را روی دایره در هر لحظه می‌توان با زاویه  $\theta$  نسبت به محور  $ox$  نمایش داد. به  $\theta$ ، مکان زاویه‌ای می‌گوییم؛ بنابراین، هنگامی که ذره در نقطه  $A$  قرار دارد، مکان آن را با زاویه  $\theta_1$  و هنگامی که در نقطه  $B$  قرار دارد، مکان آن را با زاویه  $\theta_2$  نشان می‌دهیم.  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$  را جابه‌جایی زاویه‌ای ذره می‌نامیم. سرعت زاویه‌ای متوسط ذره در حرکت دایره‌ای، به صورت نسبت جابه‌جایی زاویه‌ای به زمان آن تعریف می‌شود؛ یعنی:

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (2-5)$$

یکای سرعت زاویه‌ای، رادیان بر ثانیه (rad/s) است.



شکل ۲-۱۴

## مثال ۲-۷

حرکت زمین به دور خورشید تقریباً دایره‌ای است، سرعت زاویه‌ای متوسط زمین به دور خورشید را محاسبه کنید.

پاسخ

زمین در مدت ۳۶۵ روز، یک بار به دور خورشید می‌چرخد و در این مدت  $2\pi$  رادیان طی می‌کند؛ بنابراین:

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{2\pi}{365 \times 24 \times 3600} = \frac{2\pi}{31536000} \approx 2 \times 10^{-7} \text{ (rad/s)}$$

**سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای:** سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای را، مانند آنچه در مورد تعریف سرعت لحظه‌ای در فصل (۱) دیدیم، چنین تعریف می‌کنیم:

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

یا :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

(۶-۲)

از این به بعد، سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای را به اختصار سرعت زاویه‌ای می‌گوییم.

## تمرین ۵-۲

مکان زاویه‌ای ذره‌ای که روی مسیر دایره‌ای حرکت می‌کند، با رابطه  $\theta = 2t^2 + 6t$  بیان شده است. (  $t$  بر حسب ثانیه و  $\theta$  بر حسب رادیان )  
الف) سرعت زاویه‌ای متوسط ذره را بین لحظه‌های  $t_1 = 1s$  و  $t_2 = 2s$  و  
ب) سرعت زاویه‌ای آن را در لحظه  $t_3 = 3s$  حساب کنید.

## ۵-۲- حرکت دایره‌ای یکنواخت

هرگاه اندازه سرعت زاویه‌ای ذره‌ای که بر روی مسیر دایره‌ای در حرکت است ثابت بماند، می‌گوییم ذره، حرکت دایره‌ای یکنواخت دارد. در چنین حرکتی، سرعت زاویه‌ای متوسط در هر بازه زمانی با سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای ذره برابر است.

$$\bar{\omega} = \omega = \frac{\theta - \theta_0}{t - t_0}$$

یا :

$$\theta = \omega t + \theta_0 \quad (7-2)$$

برای بررسی حرکت دایره‌ای یکنواخت، کمیت‌های زیر را تعریف می‌کنیم :

دوره : زمانی که طول می‌کشد تا ذره روی مسیر دایره‌ای یک دور کامل طی کند، دوره نامیده می‌شود. دوره را با  $T$  نمایش می‌دهند و یکای آن ثانیه است.

بسامد : تعداد دورهای ذره را در یک ثانیه بسامد (فرکانس) می‌گویند. بسامد را با  $f$  نمایش می‌دهند. یکای بسامد  $\frac{1}{s}$  یا هرتز (Hz) است.

روشن است که :

$$T = \frac{1}{f} \quad (۲-۸)$$

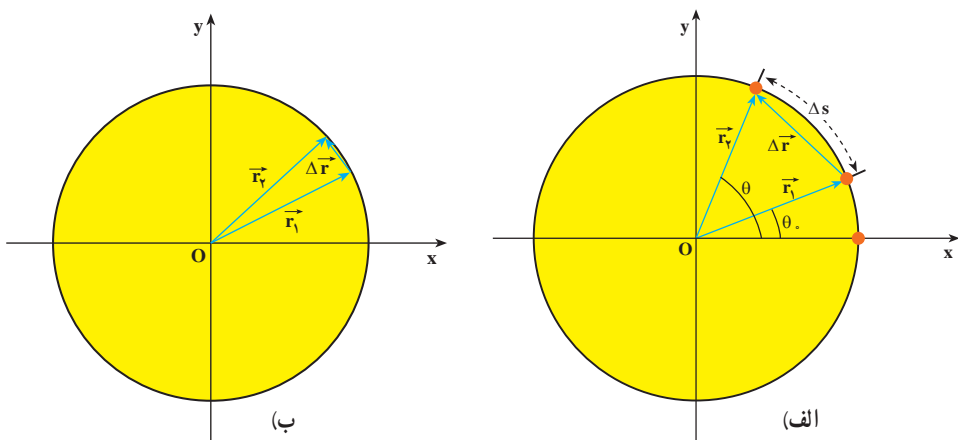
چون ذره در هر دور،  $2\pi$  رادیان طی می کند، سرعت زاویه ای آن برابر است با :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (۲-۹)$$

## تمرین ۲-۶

سرعت زاویه ای گردش ماه به دور زمین را محاسبه کنید (دوره گردش ماه به دور زمین را ۲۹ روز و حرکت آن را دایره ای یکنواخت فرض کنید).

**سرعت خطی در حرکت دایره ای :** در فصل قبل دیدید که موقعیت ذره را در صفحه می توان با بردار مکان مشخص کرد. اگر بردار مکان ذره در لحظه  $t_1$ ،  $\vec{r}_1$  و در لحظه  $t_2$ ،  $\vec{r}_2$  باشد، جابه جایی ذره در بازه زمانی  $\Delta t = (t_2 - t_1)$  برابر  $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$  خواهد بود. ذره در این بازه زمانی کمان  $\Delta s$  را می پیماید (شکل ۲-۱۵ - الف). اگر بازه زمانی  $\Delta t$  بسیار کوچک باشد، کمان  $\Delta s$  کوچک می شود و می توان طول کمان  $\Delta s$  را تقریباً با طول وتر مقابل آن یعنی  $|\Delta \vec{r}|$  برابر گرفت (شکل ۲-۱۵ - ب).



شکل ۲-۱۵

در فصل قبل دیدیم که سرعت متوسط متحرک را می توان از رابطه ۱-۱۰ به دست آورد و بزرگی سرعت لحظه ای نیز با رابطه زیر تعریف می شود :

$$|\vec{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t}$$

از آن جایی که در حالت حد،  $|\Delta \vec{r}| \approx \Delta s$  داریم :

$$|\vec{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (10-2)$$

در درس ریاضی خوانده اید که زاویه  $\Delta\theta$  بر حسب رادیان برابر است با نسبت طول کمان مقابل به آن زاویه، به شعاع دایره.

$$\Delta\theta = \frac{\Delta s}{r} \quad \text{یعنی :}$$

یا :

$$\Delta s = r\Delta\theta \quad (11-2)$$

بنابراین رابطه ۲-۱۰ را می توان به صورت زیر نوشت :

$$v = r \frac{d\theta}{dt}$$

یا :

$$v = r\omega \quad (12-2)$$

در فصل (۱) دیدیم که بردار سرعت جسم، همواره مماس بر مسیر حرکت است.  $v$  را سرعت خطی متحرک نیز می نامند.

## مثال ۲-۸

در یک شهربازی، گردونه ای افراد را در یک سطح افقی و در مسیر دایره ای می گرداند (شکل ۲-۱۶). به طوری که هر فرد حرکت دایره ای یکنواختی دارد. اگر گردونه در هر ۱۰ ثانیه یک دور بزند و شعاع چرخش برای هر نفر ۵m باشد، سرعت زاویه ای و سرعت خطی هر شخص را در این گردونه محاسبه کنید.



شکل ۲-۱۶

پاسخ

دوره چرخش  $T = ۱۰$  s است.

پس سرعت زاویه‌ای برابر است با:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{۱۰} = \frac{\pi}{۵} \text{ rad/s}$$

و سرعت خطی آن نیز برابر خواهد بود با:

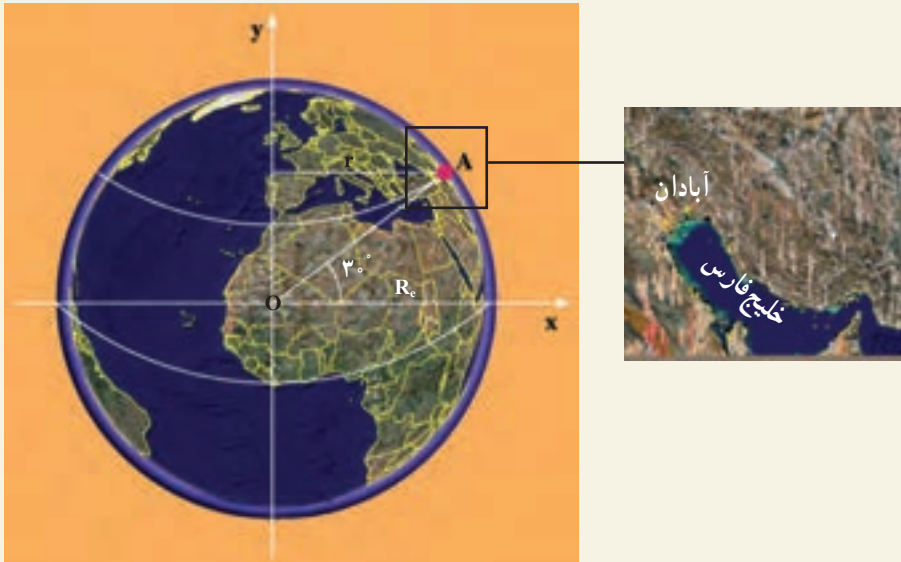
$$v = r\omega = ۵ \times \frac{\pi}{۵} = ۳/۱۴ \text{ m/s}$$

## تمرین ۲-۷

طول عقربه‌های ساعت شمار، دقیقه شمار و ثانیه شمار یک ساعت دیواری به ترتیب ۸ cm، ۱۲ cm و ۱۲ cm است. سرعت خطی نوک هر یک از عقربه‌های این ساعت را محاسبه کنید.

## مثال ۲-۹

شهر آبادان در مدار جغرافیایی  $3^\circ$  شمالی قرار دارد. سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی شخصی را که در این شهر زندگی می‌کند حساب کنید. شعاع زمین را  $R_e = 6/4 \times 10^6 \text{ m}$  بگیرید.



شکل ۲-۱۷

### پاسخ

سرعت زاویه‌ای حرکت وضعی زمین، در تمام نقاط زمین یکسان است (چرا؟). با توجه به اینکه دوره چرخش زمین به دور خود، ۲۴ ساعت است، می‌توانیم سرعت زاویه‌ای هر نقطه از زمین را محاسبه کنیم.

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$T = 24 \times 60 \times 60 = 86400 \text{ s}$$

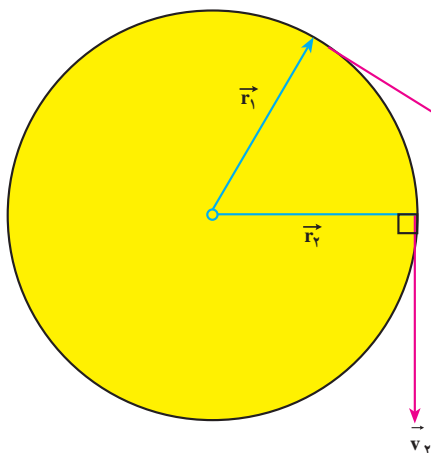
$$\omega = \frac{2\pi}{86400} = 7/27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

فاصله آبادان از محور چرخش زمین، با توجه به شکل ۱۷-۲ برابر است با:

$$r = 6 / 4 \times 10^6 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 5 / 54 \times 10^6 \text{ m}$$

و سرعت خطی شخص در آبادان برابر است با:

$$v = r\omega = 5 / 54 \times 10^6 \times 7 / 27 \times 10^{-5} = 402 / 76 \text{ m/s}$$



شکل ۱۸-۲

### شتاب در حرکت دایره‌ای

یکنواخت: ذره‌ای را در نظر بگیرید که

دارای حرکت دایره‌ای یکنواخت است (شکل ۱۸-۲). در فصل قبل دیدیم که بردار

سرعت در هر لحظه مماس بر مسیر است.

اگر مکان ذره در لحظه  $t_1$  و در لحظه  $t_2$ ،

$\vec{r}_1$  باشد، بردارهای سرعت متحرک در این

نقاط به ترتیب بر  $\vec{r}_1$  و  $\vec{r}_2$  عمودند. بردار

$\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$  در شکل ۱۹-۲ رسم شده

است. ملاحظه می‌شود با اینکه بزرگی بردار

سرعت ثابت است، به علت تغییر راستای بردار سرعت  $\Delta \vec{v} \neq 0$  است. اندازه شتاب متوسط حرکت را

در این حالت می‌توان با استفاده از رابطه  $|\vec{a}| = \frac{|\Delta \vec{v}|}{\Delta t}$  به دست آورد. می‌توان نشان داد، هنگامی که

$\Delta t$  به سمت صفر میل می‌کند، شتاب حرکت از رابطه زیر به دست می‌آید:

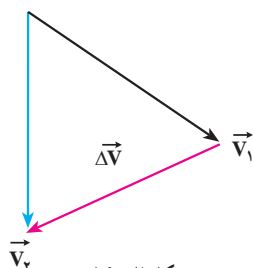
$$a = \frac{v^2}{r}$$

$$a = r\omega^2$$

(۱۳-۲)

یا

(۱۴-۲)



شکل ۱۹-۲



راستای این شتاب در راستای شعاع دایره و سوی آن به طرف مرکز است، به این علت این شتاب را شتاب مرکز گرا گویند.

## تمرین ۸-۲

شتاب مرکز گرای ماه به دور زمین را محاسبه کنید.  
فاصله ماه از زمین  $3/8 \times 10^8 \text{ m}$  و دوره ماه را ۲۹ روز فرض کنید.

## مثال ۱۰-۲

خودرویی پیچ جاده‌ای به شعاع  $200 \text{ m}$  را با سرعت ثابت  $20 \text{ m/s}$  می‌پیماید. شتاب مرکز گرای این خودرو را محاسبه کنید.

$$a = \frac{v^2}{r}$$

پاسخ

$$a = \frac{400}{200} = 2 \text{ m/s}^2$$

## ۶-۲- دینامیک حرکت دایره‌ای یکنواخت

در بخش ۵-۲ دیدیم که در حرکت دایره‌ای یکنواخت، شتاب جسم در راستای شعاع دایره و جهت آن به طرف مرکز است. بنابر قانون دوم نیوتون نیرو و شتاب هم جهت‌اند، در نتیجه در حرکت دایره‌ای یکنواخت، برآیند نیروهای وارد بر جسم در راستای شعاع و به سوی مرکز است. از این رو برآیند نیروهای وارد بر جسم را که منجر به حرکت دایره‌ای می‌شوند، نیروی مرکز گرا می‌نامند. با توجه به رابطه‌های ۱۳-۲ و ۱۴-۲ قانون دوم نیوتون در حرکت دایره‌ای یکنواخت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

(۱۵-۲ الف)

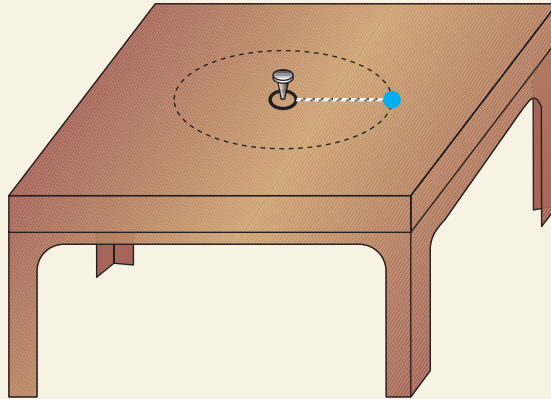
$$F = mr\omega^2$$

(۱۵-۲ ب)

در این رابطه،  $F$  بزرگی برآیند نیروهای وارد بر جسم در راستای شعاع دایره است.

## مثال ۲-۱۱

مهره‌ای به جرم  $20\text{g}$  را به نخ می‌بندیم و به انتهای دیگر نخ، حلقه کوچکی وصل می‌کنیم. سپس حلقه را مطابق شکل ۲-۲۰ الف با میخ کوتاهی در وسط یک میز ثابت می‌کنیم. نیروی اصطکاک مهره با میز ناچیز است.



شکل ۲-۲۰ الف

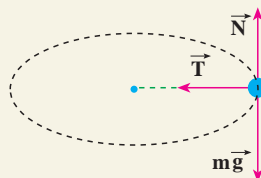
فاصله مهره از میخ  $25\text{cm}$  است، با یک ضربه که به مهره وارد می‌کنیم آن را روی مسیر دایره‌ای به حرکت درمی‌آوریم. نیروهای وارد بر مهره را با رسم شکل مشخص کنید. اگر مهره در هر ثانیه یک دور بزند، بزرگی نیروی کشش نخ را محاسبه کنید.

پاسخ

نیروهای وارد بر مهره در شکل ۲-۲۰ ب نشان داده شده است. در راستای قائم، نیروی وزن و نیروی عمودی تکیه‌گاه بر جسم اثر می‌کنند. برآیند این دو نیرو صفر است:

$$N - mg = 0$$

$$N = mg$$



شکل ۲-۲۰ ب

تنها نیروی کشش نخ می ماند که در این جا همان نیروی مرکزگرا یعنی،  $T = \frac{mv^2}{r}$  است. سرعت زاویه ای برابر است با:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \text{ rad/s}$$

و سرعت خطی نیز برابر است با:

$$v = r\omega = 0.25 \times 2\pi = \frac{\pi}{2} \approx 1.57 \text{ m/s}$$

و نیروی کشش نخ برابر است با:

$$T = m \frac{v^2}{r} = 2 \times 10^{-3} \times \frac{\pi^2}{4} \times \frac{1}{0.25} \approx 0.25 \text{ N}$$

## تمرین ۲-۹

در هر یک از موارد زیر چه نیرویی مرکزگرا است؟

۱- در حرکت لباس هایی که در ماشین لباس شویی می چرخند.

۲- در چرخش الکترون به دور هسته.

۳- در گردش سیاره ها به دور خورشید.

## مثال ۲-۱۲



شکل ۲-۲۱- الف

بر اساس اصول مهندسی، در سرپیچ های جاده ها، شیب عرضی ایجاد می کنند تا خودروها بدون خطر انحراف و خارج شدن از مسیر، جاده را طی کنند. زاویه شیب عرضی جاده با راستای افق چقدر باید باشد، تا هنگامی که خودرو با بیشینه سرعت مجاز پیچ جاده را می پیماید از مسیر جاده منحرف نشود (اصطکاک در عرض جاده قابل چشم پوشی است).

## پاسخ

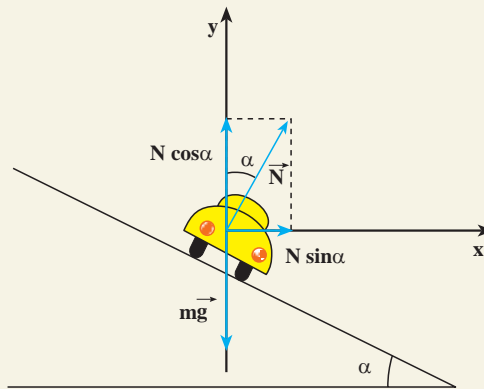
نمودار نیروهای وارد بر خودرو را، در مقطع عرضی جاده، رسم می‌کنیم (شکل ۲۱-۲ ب).

دو نیرو، یکی نیروی وزن خودرو ( $mg$ ) و دیگری نیروی عمودی سطح جاده ( $\vec{N}$ ) بر خودرو وارد می‌شوند. این نیروها را روی محورهای  $x$  و  $y$  تجزیه می‌کنیم. روی محور  $y$  داریم:

$$F_y = 0$$

$$N \cos \alpha - mg = 0$$

$$N \cos \alpha = mg$$



شکل ۲۱-۲ ب

برآیند نیروهای وارد در راستای محور  $x$  (که جهت آن متوجه مرکز پیچ است) برابر  $F_x = N \sin \alpha$  است. در این مثال نیروی مرکزگرا برابر  $N \sin \alpha$  است. در نتیجه با استفاده از قانون دوم نیوتون داریم:

$$N \sin \alpha = m \frac{v^2}{r}$$

که در این رابطه  $r$  شعاع انحنای جاده است. در نتیجه:

$$\tan \alpha = \frac{v^2}{rg}$$

## تمرین ۲-۱۰

در پیچ جاده‌ای حداکثر سرعت مجاز را  $40 \text{ km/h}$  نوشته‌اند، اگر شعاع انحنای این پیچ  $50 \text{ m}$  باشد، زاویه شیب عرضی جاده را با افق محاسبه کنید.

## ابوریحان بیرونی

ابوریحان محمد بن احمد بیرونی، دانشمند برجسته ایرانی، در نیمه دوم قرن چهارم و اوایل قرن پنجم می زیست. وی در بیرون (حومه) شهر کاث، پایتخت خوارزمشاهیان، به دنیا آمد. او تا سن بیست و پنج سالگی در زادگاه خود مشغول فراگیری علوم می چون جغرافیا، ریاضیات، ستاره شناسی، پزشکی، فقه، کلام و... بود. بیرونی اولین فعالیت های علمی خود را در حدود سال ۳۸۰ هجری در شهر کاث با رصد آسمان به کمک وسایل نه چندان دقیق آغاز کرد. در سال ۳۸۷ هجری بار دیگر در شهر کاث خسوفی را با هماهنگی انجام شده بین او و ابوالوفاء بوزجانی، از برجسته ترین منجمان آن دوره، رصد کرد. در واقع، ابوالوفاء نیز همین خسوف را در بغداد رصد کرده بود. با مقایسه نتایج به دست آمده از این دو رصد، بیرونی اختلاف طول جغرافیایی بغداد و کاث را پیدا کرد.

با توجه به اطلاعات به دست آمده، تعداد آثار ابوریحان بیرونی شامل تألیف ها، ترجمه ها و آثار نیمه تمام او به ۱۸۰ عنوان می رسد که دست کم ۱۱۵ عنوان از آنها به ریاضیات و نجوم اختصاص دارد و از این تعداد تنها ۲۸ عنوان به دست ما رسیده است.

بیرونی در کتاب «افراد المقال فی امر الظلال»، یکی از نظریات مشهور ارسطو را با تکیه بر آزمایش رد می کند. نکته مهم و مورد توجه در آزمایش های بیرونی، شیوه علمی او در انجام دادن آزمایش هاست. وی مانند یک محقق امروزی در آزمایش خود به نکاتی توجه می کند؛ از جمله: هنگام مقایسه خاصیتی ویژه از دو ماده می کوشد تا سایر شرایط برای آنها یکسان باشد و نیز به تکرار در آزمایش تأکید می کند تا مطمئن شود که نتایج حاصل از فرایند اتفاقی نیست.

دیدگاه بیرونی درباره چستی کهکشان راه شیری که در کتاب التفهیم آمده از اهمیتی بسزا برخوردار است؛ زیرا در میان طبیعی دانان مسلمان کمتر کسی به آن پرداخته است و همگی از نظریات ارسطو در این زمینه پیروی می کرده اند. تنها بیرونی و ابن هیشم نظریاتی نو در این زمینه مطرح کرده اند. بیرونی چنین می گوید: «مجره را پارسیان راه کاهکشان خوانند و هندوان راه بهشت و آن جمله شدن ستارگان است از جنس ستارگان ابری و...»

بیرونی در بخشی از کتاب افراد المقال فی امر الظلال سخن احمد بن طیب سرخسی در کتاب «ارکان الفلسفه» دربارهٔ سیاهی هوا بر فراز نقاط مرتفع را نشانهٔ مبالغهٔ وی در پیروی از نظریه‌ای که از کتاب «الحس و المحسوس» ارسطو برمی‌آید، می‌داند. ابوریحان بر آن است که در این باره باید فقط با استناد به آزمایش و تجربه سخن گفت و می‌گوید که هیچ‌گاه از تغییر رنگ هوا در سرما یا نبود گرما سخنی نرفته است و قله کوه دماوند با بلندی بسیارش دیده می‌شود و هیچ نشانه‌ای از سیاهی در آن نیست.

## مطالعه آزاد

### ۲-۷- قانون‌های کپلر

نظریهٔ زمین مرکزی بطلمیوس تا قرن شانزدهم میلادی، نظریه‌ای قابل قبول برای توصیف حرکت سیاره‌ها بود، به گونه‌ای که دانشمندان ایرانی به ویژه خواجه نصیرالدین توسی، این نظریه را گسترش دادند و حرکت سیارات را با دقت زیادی مورد بررسی قرار دادند.

در سال ۱۵۳۳ میلادی کوپرنیک، منجم لهستانی در کتاب خود به نام «دربارهٔ مدارهای گردش اجسام آسمانی» نظریهٔ خورشید مرکزی را ارائه کرد که تحول بسیار بزرگی در شناخت بشر از جهان به وجود آورد.

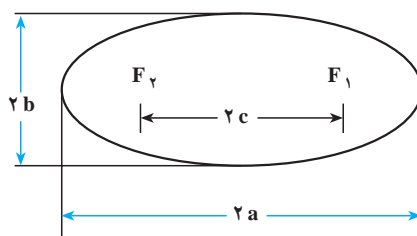
تیکو براهه، اخترشناس دانمارکی، سال‌های زیادی را به رصد ستاره‌ها پرداخت و موقعیت سیاره‌ها را در میان ستاره‌های ثابت آسمان در زمان‌های مختلف ثبت کرد. کپلر پس از ۲۰ سال تحقیق و بررسی در سال ۹۸۸ هجری خورشیدی (۱۶۰۹ میلادی) دو قانون دربارهٔ حرکت سیاره‌ها به دور خورشید، بیان کرد. ۹ سال پس از آن نیز قانون دیگری دربارهٔ حرکت سیاره‌ها به دست آورد. اکنون به بیان این سه قانون می‌پردازیم:

**قانون اول:** «مسیر حرکت تمام سیاره‌ها به دور خورشید، بیضی است، که خورشید یکی از کانون‌های آن است.»

در درس ریاضی خوانده‌اید که اگر فاصلهٔ بین دو کانون بیضی ۲c، قطر بزرگ آن

۲a و قطر کوچک آن ۲b باشد، نسبت c/a را خروج از مرکز بیضی می گویند و آن را با e نمایش می دهند.

به شکل ۲۲-۲ توجه کنید. هر قدر e کوچک تر باشد فاصله بین دو کانون در مقایسه با قطر بیضی کمتر است و شکل بیضی به دایره نزدیک تر می شود. خروج از مرکز سیاره های منظومه خورشیدی و میانگین فاصله آنها از خورشید در جدول ۱-۲ آورده شده است.



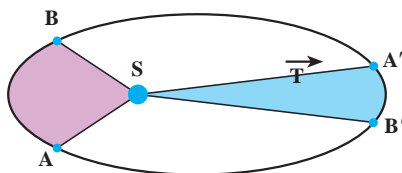
شکل ۲۲-۲

جدول ۱-۲

نام سیاره	خروج از مرکز $e = \frac{c}{a}$	میانگین فاصله سیاره از خورشید بر حسب m
تیر (عطارد)	۰/۲۰۶	$۵/۷۹ \times ۱۰^{۱۰}$
ناهید (زهره)	۰/۰۰۷	$۱/۰۸ \times ۱۰^{۱۱}$
زمین	۰/۰۱۷	$۱/۴۹ \times ۱۰^{۱۱}$
بهرام (مریخ)	۰/۰۹۳	$۲/۲۸ \times ۱۰^{۱۱}$
برجیس (مشتری)	۰/۰۴۸	$۷/۷۸ \times ۱۰^{۱۱}$
کیوان (زحل)	۰/۰۵۶	$۱/۴۳ \times ۱۰^{۱۲}$
اورانوس	۰/۰۴۸	$۲/۸۷ \times ۱۰^{۱۲}$
نپتون	۰/۰۰۹	$۴/۵ \times ۱۰^{۱۲}$
پلوتو	۰/۲۴۹	$۵/۹ \times ۱۰^{۱۲}$

با توجه به جدول بالا می بینیم که مسیر بیشتر سیاره های منظومه خورشیدی، به دایره نزدیک است. پس می توان خورشید را مرکز دایره فرض کرد.

**قانون دوم:** «شعاع حامل هر سیاره (خطی که خورشید را به سیاره وصل می کند) در زمان های مساوی، مساحت های مساوی را جاروب می کند.» مسیر یک سیاره به دور خورشید، در شکل ۲-۲۳ نشان داده شده است. در این شکل، دو قسمت هاشور زده دارای مساحت برابرند. در نتیجه بنابر قانون دوم کپلر، سیاره کمان های  $AB$  و  $A'B'$  را در زمان های مساوی می پیماید. اما چون سیاره در مسیر  $AB$  به خورشید نزدیک تر است. در نتیجه طول کمان  $AB$  از طول کمان  $A'B'$  بیشتر است، از این رو سیاره کمان  $AB$  را با سرعت بیشتری می پیماید تا کمان  $A'B'$  را.



شکل ۲-۲۳

گفتیم اگر خروج از مرکز بیضی مسیر سیاره کوچک باشد، می توان آن را دایره فرض کرد که در این صورت قسمت های هاشور خورده به دو قطاع مساوی دایره روبه رو به کمان های مساوی تبدیل می شوند. در نتیجه سیاره تمام مسیر را با سرعت ثابت می پیماید که در این صورت حرکت سیاره به دور خورشید را می توان حرکت دایره ای یکنواخت فرض کرد. مسیر حرکت زمین به دور خورشید نیز بسیار نزدیک به دایره است و سرعت این حرکت حدود  $30 \text{ km/s}$  محاسبه شده است.

**قانون سوم:** «مجدور دوره حرکت هر سیاره به دور خورشید با مکعب فاصله میانگین آن از خورشید متناسب است. یعنی اگر  $T$  دوره سیاره و  $r$  فاصله میانگین آن از خورشید باشد، نسبت  $\frac{T^2}{r^3}$  برای تمام سیاره ها یکسان است.»



## تمرین‌های فصل دوم

۱- براساس قانون سوم نیوتون، به پرسش‌های زیر پاسخ دهید :

الف) نیروهای وارد بر یک شخص، هنگامی که جسمی را هل می‌دهد، و همچنین نیروهای وارد بر جسم چگونه است؟

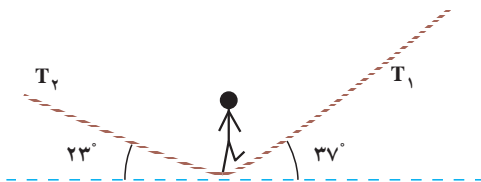
ب) نقش نیروهای مختلف در هنگام راه رفتن ما بر روی زمین چگونه است؟

۲- به جسمی به جرم  $10 \text{ kg}$  نیروی ثابت  $F$  در راستای قائم به طرف بالا وارد می‌شود. جسم از حال سکون با شتاب  $5 \text{ m/s}^2$  به طرف بالا حرکت می‌کند و پس از  $20^\circ$  نیروی  $F$  حذف می‌شود. الف) مقدار نیروی  $F$  را تعیین کنید.

ب) جسم تا چه ارتفاعی بالا می‌رود؟  $g = 10 \text{ m/s}^2$  (از مقاومت هوا چشم‌پوشی کنید.)

۳- یک بازیگر سیرک به وزن  $600 \text{ N}$

روی طنابی مطابق شکل ۲-۲۴، در حال تعادل است. نیروهای کشش طناب را محاسبه کنید.



شکل ۲-۲۴

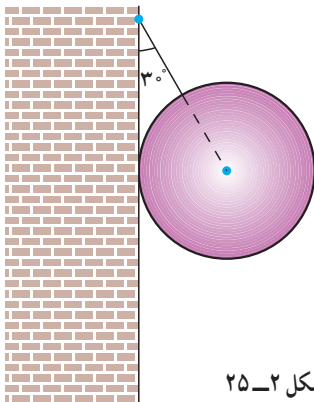
۴- جسمی را با سرعت اولیه  $v_0$  در امتداد سطح شیب‌داری که با افق زاویه  $\alpha$  می‌سازد به بالا

پرتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی جسم و سطح را  $\mu_k$  بگیرید :

الف) این جسم تا چه مسافتی روی سطح شیب‌دار بالا می‌رود؟ (بر حسب  $v_0$ ،  $\alpha$  و  $\mu_k$ )

ب) اگر جسم دوباره به پایین حرکت کند، سرعت آن را هنگام رسیدن به پایین سطح شیب‌دار

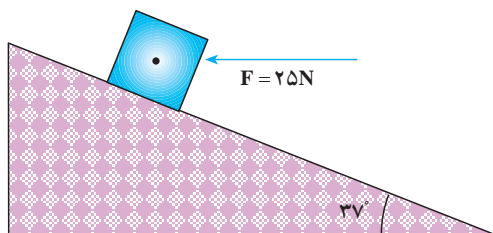
بر حسب  $v_0$ ،  $\alpha$  و  $\mu_k$  محاسبه کنید.



شکل ۲-۲۵

۵- کره‌ای به جرم  $20 \text{ kg}$  را، مطابق شکل ۲-۲۵، به وسیله

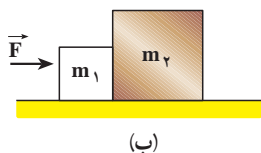
کابلی به دیوار قائم و بدون اصطکاک آویزان می‌کنیم. نیروی کشش کابل و واکنش دیوار را محاسبه کنید.



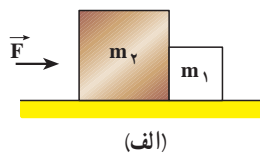
شکل ۲۶-۲

۶- جسمی به جرم  $2\text{ kg}$  روی سطح شیب‌داری با زاویه  $37^\circ$  نسبت به افق، توسط نیروی افقی  $F = 25\text{ N}$  مطابق شکل ۲۶-۲ به بالا رانده می‌شود. ضریب اصطکاک جنبشی جسم با سطح  $0.2$  است. شتاب حرکت جسم را محاسبه کنید.

۷- دو جسم به جرم‌های  $m_1 = 1\text{ kg}$  و  $m_2 = 2\text{ kg}$  مطابق شکل ۲۷-۲ روی سطح افقی صافی قرار دارند. نیروی افقی  $\vec{F}$  باعث می‌شود که دو جسم با شتاب  $3\text{ m/s}^2$  به حرکت درآیند. اندازه نیروی  $F$  و نیروی تماسی‌ای که دو جسم بر یکدیگر وارد می‌کنند را در هر یک از دو شکل «الف» و «ب» محاسبه کنید.



(ب)



(الف)

شکل ۲۷-۲

۸- پاسخ مسئله ۷ را برای حالتی که ضریب اصطکاک جنبشی بین جسم و سطح  $0.1$  باشد، بنویسید.



شکل ۲۸-۲

۹- کتابی را مانند شکل ۲۸-۲ به دیوار فشرده و ثابت نگه داشته‌ایم.

الف) آیا نیروی اصطکاک با نیروی وزن برابر است؟ چرا؟

ب) اگر کتاب را بیشتر به دیوار بفشاریم آیا نیروی اصطکاک تغییر می‌کند؟ با این کار چه نیرویی افزایش می‌یابد؟



شکل ۲-۲۹

۱۰- از یک لوله آتش‌نشانی آب با آهنگ  $5 \text{ kg/s}$  با سرعت  $5 \text{ m/s}$  به دیوار مقابل برخورد می‌کند (شکل ۲-۲۹). نیروی متوسط وارد بر دیوار توسط آب را حساب کنید. (از برگشت آب از روی دیوار چشم‌پوشی کنید.)

۱۱- پره‌های یک بالگرد (هلیکوپتر) در هر دقیقه  $900^\circ$  دور می‌گردد. کمیت‌های زیر را برای پره‌ها محاسبه کنید.

(الف) دوره، بسامد و سرعت زاویه‌ای؛

(ب) سرعت خطی و شتاب مرکز‌گرایی نقطه‌ای که فاصله آن از محور دوران  $3 \text{ m}$  است.

۱۲- برای اینکه خودرویی بتواند در پیچ جاده‌ای به شعاع  $120 \text{ m}$  در شرایطی که اصطکاک در عرض جاده ناچیز است با سرعت  $54 \text{ km/h}$  حرکت کند، شیب عرضی جاده چقدر باید باشد؟

۱۳- ماهواره‌ای در اثر نیروی گرانشی بین زمین و ماهواره، روی مدار دایره‌ای به دور زمین می‌گردد. اگر جرم ماهواره  $m = 250 \text{ kg}$ ، جرم زمین  $M_E = 5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$ ، ثابت جهانی گرانش  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ ، فاصله ماهواره از سطح زمین  $260 \text{ km}$  و شعاع زمین  $6400 \text{ km}$  باشد، کمیت‌های زیر را محاسبه کنید :

(الف) نیروی گرانش بین ماهواره و زمین

(ب) سرعت ماهواره

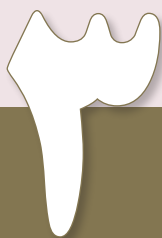
(پ) دوره گردش ماهواره

۱۴- یک ماهواره در چه فاصله‌ای از مرکز زمین باید قرار گیرد تا همواره در یک نقطه در بالای

خط استوا باشد؟ جرم زمین  $5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$  و  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ .

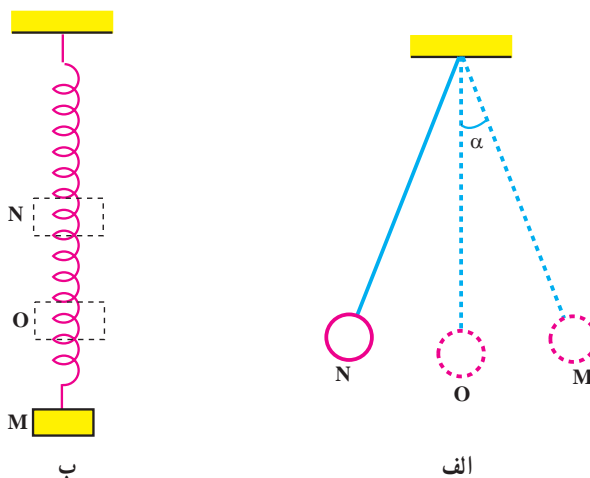


۱۵- جرم ماهواره امید (شکل ۲-۳۰) تقریباً  $27$  کیلوگرم و فاصله آن از سطح زمین حدوداً  $250$  کیلومتر است. با توجه به داده‌های مسئله ۱۳، دوره، سرعت و نیروی گرانش بین این ماهواره و زمین را به دست آورید.



## حرکت نوسانی

**نگاهی به فصل:** گردش زمین به دور خورشید، گردش ماه به دور زمین، ضربان قلب انسان، ارتعاش تارهای کمانچه یا تار و سه تار، بالا و پایین رفتن تاب بازی، پیدایش فصل های سال، طلوع و غروب خورشید، یا حرکت یک آونگ ساده (شکل ۱-۳ الف)، حرکت وزنه ای که به یک فنر متصل است (شکل ۱-۳ ب) و مثال های بسیار دیگری مانند اینها، حرکت های دوره ای هستند که با گذشت زمان بارها تکرار می شوند. در حرکت های دوره ای، متحرک پس از طی زمان معینی به وضعیت اولیه برمی گردد و حرکت خود را از نو آغاز می کند. در این فصل پس از معرفی پدیده های دوره ای به توصیف حرکت هماهنگ ساده می پردازیم. زیرا شناخت و بررسی این حرکت، پایه و اساس مناسبی برای درک امواج و انتشار آنها فراهم می کند.



شکل ۱-۳

### ۱-۳- حرکت هماهنگ ساده

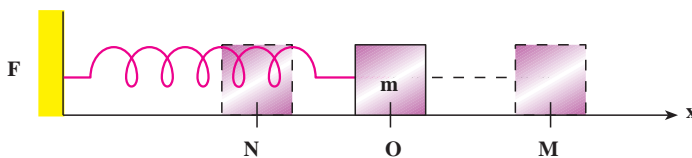
یک حرکت نوسانی را **هماهنگ ساده** می نامیم وقتی مسیر رفت و برگشت متحرک روی یک پاره خط حول نقطه ای واقع در وسط آن باشد. برای مثال، حرکت آونگ (شکل ۱-۳ الف)، وقتی زاویه  $\alpha$  خیلی کوچک

باشد، به گونه‌ای که بتوان تاثرات و سینوس آن را برابر گرفت و همچنین بالا و پایین رفتن وزنه آویخته به فنر (شکل ۱-۳-ب). در این دو حرکت، متحرک، در بازه‌های زمانی یکسان، از ابتدای پاره خط، یعنی از نقطه M به نقطه N می‌رود و برمی‌گردد و به این ترتیب حول نقطه O واقع در وسط پاره خط نوسان می‌کند. از این پس دستگاهی را که دارای حرکت هماهنگ ساده است نوسانگر هماهنگ ساده می‌نامیم. نوسانگر وزنه-فنر در شکل ۱-۳-ب الگوی مناسبی برای بررسی حرکت نوسانی ساده است. ابتدا برخی مفهوماً را در این حرکت معرفی می‌کنیم.

**دوره و بسامد:** در حرکت هماهنگ ساده بازه زمانی بین دو وضعیت یکسان و متوالی را دوره می‌نامیم. به عبارت دیگر دوره، زمان یک نوسان (زمان یک رفت و برگشت به وضع قبلی) است و با T نشان داده می‌شود. همچنین تعداد دوره‌ها یا تعداد نوسان‌ها را در یک ثانیه بسامد می‌نامیم و آن را با f نشان می‌دهیم. یکای بسامد در SI،  $s^{-1}$  است که هرتز (Hz) نامیده می‌شود. با توجه به تعریف دوره، معلوم می‌شود که بسامد وارون دوره است:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-3)$$

**دامنه نوسان:** جسمی به جرم m را در نظر بگیرید که به سرآزاد یک فنر متصل است و می‌تواند در راستای محور x، روی یک سطح افقی که اصطکاک آن ناچیز است، جابه‌جا شود (شکل ۲-۳). در حالتی که فنر طول عادی خود را دارد برآیند نیروهای وارد به جسم صفر و در نتیجه جسم در حال تعادل است.



شکل ۲-۳

حال اگر مبدأ محور مختصات، یعنی نقطه O، را منطبق بر مکان جسم در حالت تعادل اختیار نماییم و سپس جسم را تا نقطه M به سمت راست بکشیم و سپس رها کنیم، جسم حول وضع تعادلش (نقطه O) با حرکت هماهنگ ساده شروع به نوسان می‌کند. در ضمن نوسان جسم، فاصله آن از مبدأ تغییر می‌کند، اما هیچ‌گاه فاصله آن از مبدأ بیش از OM یا ON نمی‌شود. این بیشترین فاصله نوسانگر از مبدأ را دامنه می‌نامیم و معمولاً آن را با A نشان می‌دهیم.

نیروی بازگرداننده : در شکل ۲-۳، جهت نیروی فنر همواره به گونه‌ای است که می‌خواهد جسم را به حالت تعادل (نقطه O) برگرداند، این نیرو، نیروی بازگرداننده نامیده می‌شود. نیروی بازگرداننده فنر با تغییر طول فنر متناسب است و از رابطه زیر، که به قانون هوک معروف است، به دست می‌آید :

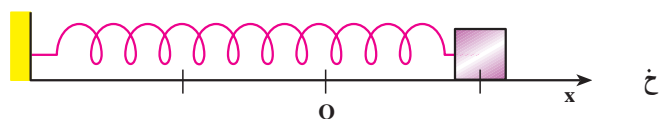
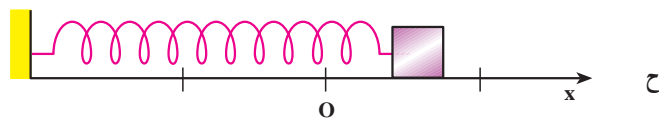
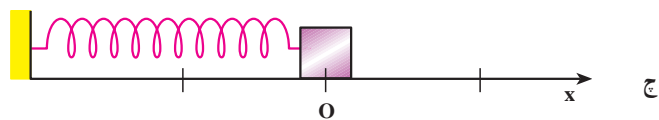
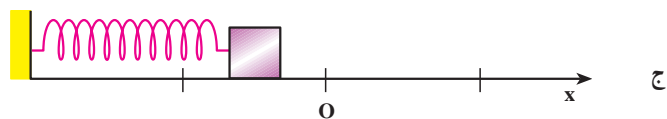
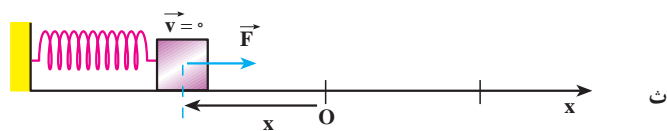
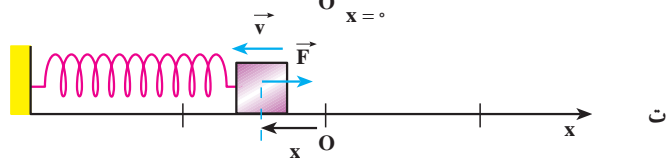
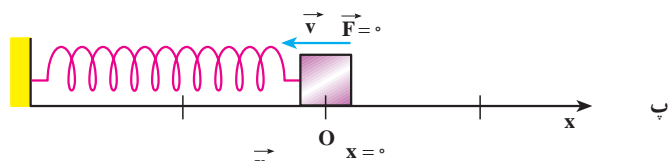
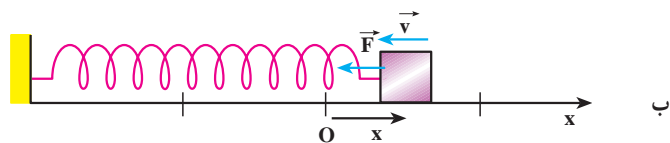
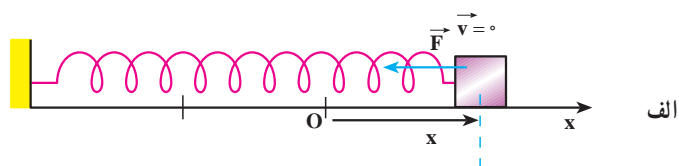
$$F = -kx \quad (2-3)$$

در این رابطه،  $x$  تغییر طول فنر،  $F$  نیروی بازگرداننده فنر و  $k$  ثابت تناسب است که به ویژگی‌های فنر بستگی دارد و آن را ثابت نیروی فنر می‌نامیم. یکای  $k$  در SI نیوتون بر متر (N/m) است. علامت منفی در رابطه ۲-۳ نشان می‌دهد که جهت نیروی بازگرداننده فنر همواره خلاف جهت بردار مکان جسم است. هر دستگاهی که نیروی بازگرداننده آن از قانون هوک پیروی کند، حرکت هماهنگ ساده خواهد داشت.

حال اثر نیروی بازگرداننده را در نوسانگر وزنه - فنر، در یک دوره، بررسی می‌کنیم. همان‌طور که در شکل ۳-۳ الف تا پ دیده می‌شود، اگر جسم را پس از خارج کردن از وضع تعادل رها کنیم، تحت اثر نیروی بازگرداننده به طرف وضع تعادل خود (نقطه O) برمی‌گردد و پس از رسیدن به نقطه O، به سبب داشتن انرژی جنبشی، به حرکتش به سمت چپ ادامه می‌دهد (شکل پ). از این لحظه به بعد، مکان و سرعت جسم منفی و نیروی بازگرداننده در جهت محور  $x$  و مثبت است. بنابه قانون دوم نیوتون، چون شتاب با نیروی برآیند هم جهت است در این مرحله از حرکت، شتاب نیز مثبت است. اما چون سرعت آن منفی است حرکت جسم کند شونده است (شکل ت)؛ یعنی از سرعت آن کاسته می‌شود و در یک لحظه به صفر می‌رسد. در این لحظه فنر بیشترین فشردگی یا تغییر طول را دارد و نیروی بازگرداننده بیشینه است (شکل ث).

### فعالیت ۱-۳

دیدیم در لحظه‌ای که فنر بیشترین فشردگی را پیدا می‌کند سرعت نوسانگر به صفر می‌رسد. اکنون با توجه به شکل‌های ۳-۳ ج تا خ نیروی وارد بر نوسانگر و همچنین مکان، سرعت و شتاب نوسانگر را پس از لحظه مذکور بررسی کنید.

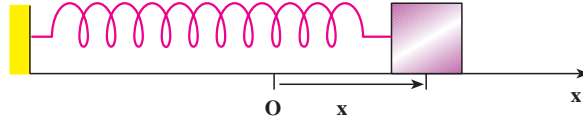


شكل ٣-٣



### ۳-۲- معادله حرکت هماهنگ ساده

یک نوسانگر را در نظر بگیرید که مطابق شکل ۳-۴ در فاصله  $x$  از وضع تعادل قرار دارد.



شکل ۳-۴

بنا به رابطه ۳-۲ نیروی وارد بر وزنه در این لحظه  $F = -kx$  است. اگر جرم وزنه  $m$  باشد بنا به

قانون دوم نیوتون داریم :

$$a = \frac{F}{m}$$

$$a = -\frac{k}{m}x \quad (3-3)$$

بنا به آنچه در فصل ۱ دیدیم، شتاب مشتق دوم مکان نسبت به زمان است، یعنی :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x$$

بنابراین  $x = f(t)$  باید به صورتی باشد که مشتق دوم آن نسبت به زمان، با علامت منفی، با  $x$

متناسب باشد. با توجه به اینکه تابع سینوسی، که در درس ریاضی خوانده‌اید، همین ویژگی را دارد، معادله حرکت هماهنگ ساده باید به صورت زیر باشد.<sup>۱</sup>

$$x = A \sin \omega t \quad (4-3)$$

اگر از رابطه ۳-۴ دو بار نسبت به زمان مشتق بگیریم خواهیم داشت :

$$\frac{dx}{dt} = A\omega \cos \omega t$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega^2 \sin \omega t$$

با توجه به رابطه ۳-۴ می‌توان نوشت :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x$$

۱- در برنامه درسی این کتاب همواره فرض می‌شود که نوسانگر در مبدا زمان در مبدا مکان بوده و در جهت مثبت محور  $x$  در حال

از مقایسه رابطه اخیر با رابطه ۳-۳ نتیجه زیر حاصل می‌شود.

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (۵-۳)$$

$\omega$  را بسامد زاویه‌ای می‌نامیم. یکای بسامد زاویه‌ای رادیان بر ثانیه است. در رابطه ۴-۳،  $x$  مکان متحرک در لحظه  $t$  و  $A$  دامنه نوسان است؛ (چرا؟). همچنین  $\varphi = \omega t$  فاز حرکت در لحظه  $t$  نامیده می‌شود. اگر در لحظه  $t_1$  فاز حرکت:

$$\varphi_1 = \omega t_1$$

و در لحظه  $t_2$  فاز حرکت

$$\varphi_2 = \omega t_2$$

باشد، تغییر فاز بین دو لحظه  $t_1$  و  $t_2$  برابر است با:

$$\Delta\varphi = \omega t_2 - \omega t_1 = \omega(t_2 - t_1)$$

یا

$$\Delta\varphi = \omega \Delta t \quad (۶-۳)$$

در رابطه ۶-۳ اگر  $\Delta t = 1s$  باشد  $\Delta\varphi = \omega$  می‌شود. یعنی بسامد زاویه‌ای ( $\omega$ ) تغییر فاز در هر ثانیه است.

رابطه بسامد زاویه‌ای و دوره تناوب: چون دوره تناوب تابع سینوسی،  $2\pi$  است باید در هر دوره (یعنی در زمان  $T$ ) فاز به اندازه  $2\pi$  تغییر کند، بنابراین، با توجه به رابطه ۶-۳ می‌توان چنین نوشت:

$$\Delta\varphi = \omega T = 2\pi$$

و از آنجا

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (۷-۳)$$

اکنون با توجه به رابطه‌های ۵-۳ و ۷-۳ رابطه‌های زیر به دست می‌آید:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (۸-۳)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (۹-۳)$$

رابطه ۳-۸ نشان می‌دهد که دوره به ویژگی‌های فیزیکی نوسانگر بستگی دارد؛ چنانکه اگر وزنه را تغییر دهیم (m تغییر کند) یا فنر را عوض کنیم (k تغییر کند) دوره و در نتیجه بسامد نوسان‌های دستگاه، تغییر می‌کند. از طرف دیگر دوره و بسامد به دامنه بستگی ندارد؛ به همین دلیل گفته می‌شود که بسامد یک نوسانگر از ویژگی‌های ساختاری آن نوسانگر است و بسامد طبیعی آن نامیده می‌شود.

### مثال ۳-۱

معادله حرکت نوسانگری در SI به صورت زیر است.

$$x = 0.05 \sin 6\pi t$$

(الف) دامنه، دوره و بسامد این حرکت چه مقدار است؟

(ب) مکان نوسانگر را در لحظه  $\frac{1}{36}$  ثانیه به دست آورید.

پاسخ

(الف) با توجه به معادله ۳-۴ و رابطه ۳-۷ نتایج زیر حاصل می‌شود.

$$A = 0.05 \text{ m} \quad \text{دامنه:}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 6\pi \Rightarrow T = \frac{1}{3} \text{ s} \quad \text{دوره:}$$

$$f = \frac{1}{T} = 3 \text{ Hz} \quad \text{بسامد:}$$

$$x = 0.05 \sin 6\pi \times \frac{1}{36} \Rightarrow x = 0.05 \sin \frac{\pi}{6} = 0.025 \text{ m} \quad \text{(ب)}$$

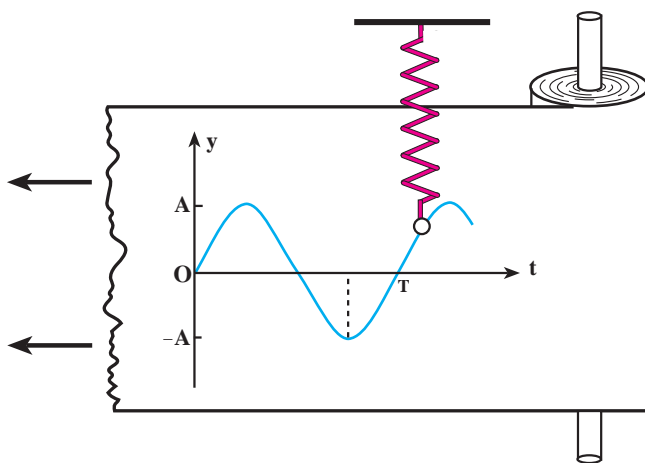
### مثال ۳-۲

دامنه نوسان نوسانگر هماهنگ ساده‌ای ۲ cm و بسامد آن ۲ Hz است. معادله حرکت آن را بنویسید.

$$A = 0.02 \text{ m}, \quad f = 2 \text{ Hz}, \quad \omega = 2\pi f \Rightarrow \omega = 4\pi \text{ rad/s} \quad \text{پاسخ}$$

$$x = A \sin \omega t \Rightarrow x = 0.02 \sin 4\pi t$$

رسم نمودار یک نوسانگر هماهنگ ساده : یکی از روش های نمایش نمودار مکان - زمان حرکت نوسانگر هماهنگ ساده در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵

در این روش نوار کاغذی روی استوانه ای که در امتداد قائم قرار دارد پیچیده شده است. استوانه می تواند به طور یکنواخت حول محورش بچرخد. نوسانگر وزنه - فنر در امتداد قائم طوری نصب شده است که وزنه متصل به آن به وسیله نوک یک مداد با نوار کاغذی در تماس است. اگر نوسانگر ساکن باشد و نوار کاغذی به سمت چپ کشیده شود نوک مداد یک خط افقی (محور زمان) روی نوار ثبت می کند. اگر نوار ساکن باشد و نوسانگر را به نوسان درآوریم نوک مداد، خطی در امتداد قائم رسم می کند، که نشان دهنده جابه جایی نوسانگر است. حال اگر نوار کاغذی را با سرعت ثابت بکشیم و در همان حال نوسانگر را به نوسان واداریم نمودار حرکت هماهنگ ساده که یک نمودار سینوسی است رسم می شود، محور افقی، زمان حرکت و محور قائم، مکان متحرک را در هر لحظه نشان می دهد.

شما در درس ریاضی با چگونگی رسم نمودار تابع سینوسی آشنا شده اید. به همان ترتیب هم می توان نمودار حرکت هماهنگ ساده را، به کمک نقطه یابی، رسم کرد. برای این کار نقطه های بیشینه، کمینه و محل برخورد نمودار را با محور زمان معلوم نموده و با مشخص کردن آنها در صفحه مختصات  $x - t$  نمودار را رسم می کنیم. به مثال هایی در این باره توجه کنید :

### مثال ۳-۳

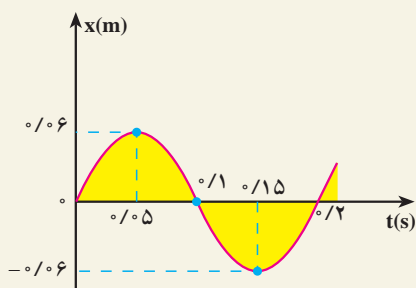
دوره و دامنه نوسانگر هماهنگ ساده‌ای به ترتیب  $\frac{\pi}{2}$  s و ۶ cm است. معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان-زمان آن را رسم کنید.

پاسخ  $T = \frac{\pi}{2}$  s ,  $A = 0.06$  m ,  $\omega = 1.0 \pi$  rad/s

معادله حرکت :  $x = A \sin \omega t \rightarrow x = 0.06 \sin 1.0 \pi t$

برای رسم نمودار تغییرات  $x$  بر حسب  $t$  به کمک نقطه‌یابی به ترتیب زیر عمل

می‌کنیم :

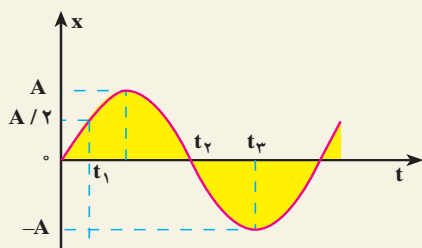


شکل ۳-۶

$t$ (s)	$x$ (m)
۰	۰
$\frac{T}{4} = 0.05$	$0.06 = +A$
$\frac{T}{2} = 0.1$	۰
$\frac{3T}{4} = 0.15$	$-0.06 = -A$
$T = 0.2$	۰

### مثال ۴-۳

نمودار شکل ۳-۷ مربوط به حرکت هماهنگ ساده‌ای است که دوره آن  $\frac{\pi}{2}$  ثانیه است. زمان‌های  $t_1$  و  $t_2$  و  $t_3$  را به دست آورید.



شکل ۳-۷

پاسخ

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 1.0 \pi \text{ rad/s} \Rightarrow x = A \sin 1.0 \pi t$$

با توجه به شکل ۳-۷ در لحظه  $t_1$  مکان برابر  $A/2$  است؛ بنابراین:

$$+A/2 = A \sin \omega \pi t_1 \Rightarrow \sin \omega \pi t_1 = \frac{1}{2}$$

$$\omega \pi t_1 = \frac{\pi}{6} \Rightarrow t_1 = \frac{1}{6} s$$

در لحظه  $t_2$  مکان صفر است، بنابراین:

$$0 = A \sin \omega \pi t_2$$

$$\omega \pi t_2 = 0 \quad \text{یا} \quad \omega \pi t_2 = \pi$$

از تساوی  $\omega \pi t_2 = 0$  زمان  $t_2$ ، صفر به دست می‌آید در حالی که در شکل  $t_2$  مثبت است. بنابراین:

$$\omega \pi t_2 = \pi \Rightarrow t_2 = \frac{1}{\omega} s$$

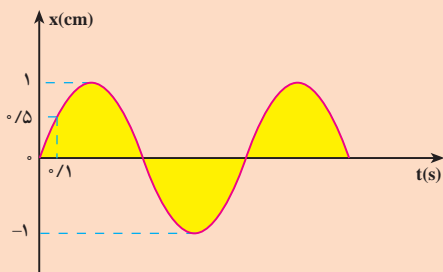
در لحظه  $t_3$  مکان  $-A$  است بنابراین:

$$-A = A \sin \omega \pi t_3 \Rightarrow \sin \omega \pi t_3 = -1$$

$$\omega \pi t_3 = \frac{3\pi}{2} \Rightarrow t_3 = \frac{3}{2\omega} s$$

مقدار  $t_3$  را می‌توانستیم از رابطه  $t_3 = t_1 + \frac{T}{4}$  نیز به دست آوریم.

### تمرین ۳-۱



شکل ۳-۸

نمودار مکان - زمان نوسانگری در

شکل ۳-۸ رسم شده است. مطلوب است:

الف) دوره حرکت

ب) مکان نوسانگر در لحظه  $t = 0.5 s$

### ۳-۳ معادله‌های سرعت و شتاب در حرکت هماهنگ ساده

الف) معادله سرعت: با توجه به اینکه سرعت، مشتق مکان نسبت به زمان است با مشتق‌گیری از رابطه ۳-۴ خواهیم داشت:

$$v = \frac{dx}{dt} \Rightarrow v = A\omega \cos \omega t \quad (۱۰-۳)$$

معادله ۳-۱۰ نشان می‌دهد که سرعت به ازای  $\cos \omega t = \pm 1$  بیشینه می‌شود؛ پس داریم:

$$v_{\max} = A\omega \quad (۱۱-۳)$$

در لحظه‌ای که  $\cos \omega t = \pm 1$  است،  $\sin \omega t = 0$  و در نتیجه  $x = 0$ . یعنی سرعت بیشینه مربوط به لحظه‌ای است که نوسانگر در حال گذر از وضع تعادل است.

### تمرین ۲-۳

الف) به کمک رابطه‌های ۳-۴ و ۳-۱۰ نشان دهید که  $v = \pm \omega \sqrt{A^2 - x^2}$  است.  
ب) به کمک رابطه اخیر معلوم کنید که در چه مکانی سرعت نوسانگر صفر و یا بیشینه است؟

ب) معادله شتاب: می‌دانیم که شتاب، مشتق سرعت نسبت به زمان، یا مشتق دوم مکان نسبت به زمان است. در نتیجه، با استفاده از رابطه ۳-۴ یا ۳-۱۰ داریم:

$$a = -A\omega^2 \sin \omega t \quad (۱۲-۳)$$

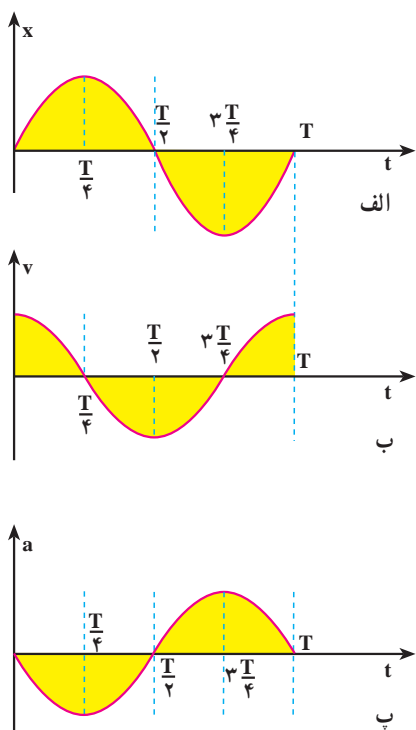
معادله ۳-۱۲ نشان می‌دهد که در حرکت هماهنگ ساده، شتاب نیز به‌طور دوره‌ای تغییر می‌کند و بیشینه آن از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$a_{\max} = A\omega^2 \quad (۱۳-۳)$$

با استفاده از رابطه ۳-۴ می‌توان رابطه ۳-۱۲ را به‌صورت زیر نوشت:

$$a = -\omega^2 x \quad (۱۴-۳)$$

که رابطه شتاب را با مکان نوسانگر به‌دست می‌دهد. این رابطه همچنین نشان می‌دهد که بردار شتاب در خلاف جهت بردار مکان است.



شکل ۹-۳

در شکل‌های ۹-۳ الف-ب و پ، به ترتیب، نمودارهای مکان-زمان، سرعت-زمان و شتاب-زمان برای حرکت هماهنگ ساده‌ای که معادله آن به صورت  $x = A \sin \omega t$  است نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودارها دیده می‌شود در لحظه  $x = 0$ ،  $t = 0$  s است. در این لحظه سرعت بیشینه و مثبت و شتاب صفر است. در لحظه  $x = \frac{T}{4}$ ، بیشینه و مثبت، سرعت صفر و شتاب بیشینه و منفی است. در لحظه  $x = 0$ ،  $\frac{T}{2}$ ، سرعت بیشینه و منفی و شتاب صفر است. در لحظه  $x = \frac{3T}{4}$ ، بیشینه و منفی، سرعت صفر و شتاب بیشینه و مثبت است. در لحظه  $x = T$ ، صفر، سرعت بیشینه و مثبت و شتاب صفر است.

### مثال ۵-۳

دامنه یک نوسانگر وزنه - فنر، ۵ cm است. اگر جرم وزنه  $20^\circ$  و ثابت فنر ۲ N/m باشد:

الف) بیشینه سرعت و شتاب در SI چه اندازه است؟

ب) در لحظه‌ای که مکان نوسانگر ۴ cm است سرعت و شتاب آن را به دست آورید.

پاسخ

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{2}{0.02}} = 10 \text{ rad/s}$$

الف)

$$v_{\max} = A\omega = 0.05 \times 10 = 0.5 \text{ m/s}$$



$$a_{\max} = A\omega^2 = 0.05 \times 100 = 5 \text{ m/s}^2$$

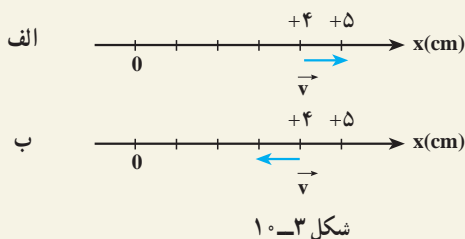
ب) در تمرین ۲-۳ دیدیم که  $V = \pm \omega \sqrt{A^2 - x^2}$  ، بنابراین

$$v = \pm 10 \sqrt{(0.05)^2 - (0.04)^2} = \pm 0.3 \text{ m/s}$$

علامت ( $\pm$ ) نشان دهنده این است که در مکان  $x = +4 \text{ cm}$  ممکن است سرعت در جهت محور  $x$  یا در خلاف جهت محور  $x$  باشد. یعنی در لحظه ای که  $x = +4 \text{ cm}$  است ممکن است متحرک در حال دور شدن از مبدأ باشد که در این صورت  $v = +0.3 \text{ m/s}$  است و یا در حال نزدیک شدن به مبدأ باشد که در این صورت  $v = -0.3 \text{ m/s}$  است. این وضعیت به ترتیب در شکل های ۱-۳ الف و ۱-۳ ب نشان داده شده است.

$$a = -\omega^2 x = -100 \times (0.04) = -4 \text{ m/s}^2$$

پس معلوم می شود در مکان  $x = +4 \text{ cm}$  شتاب منفی و در خلاف جهت محور  $x$  است.



شکل ۱-۳

### ۴-۳- انرژی مکانیکی نوسانگر (دستگاه جرم - فنر)

در فیزیک (۲) و آزمایشگاه دیدیم، هنگامی که فنری فشرده یا کشیده می شود در آن انرژی پتانسیل کشسانی ذخیره می شود؛ می توان نشان داد مقدار این انرژی از رابطه زیر به دست می آید :

$$U_e = \frac{1}{2} kx^2$$

با جایگذاری  $x$  از معادله ۴-۳ خواهیم داشت :

$$U_e = \frac{1}{2} kA^2 \sin^2 \omega t \quad (۱۵-۳)$$

با استفاده از رابطه ۵-۳ می توان نوشت :

$$U_e = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \sin^2 \omega t \quad (۱۶-۳)$$

از طرفی با توجه به رابطه ۳-۱۰ انرژی جنبشی این نوسانگر از رابطه زیر به دست می آید :

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \cos^2 \omega t \quad (۱۷-۳)$$

بنابراین، انرژی مکانیکی، یعنی مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی این نوسانگر به ترتیب زیر به دست می آید :

$$E = U_e + K = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \sin^2 \omega t + \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \cos^2 \omega t$$

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 [\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t]$$

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \quad (۱۸-۳)$$

از رابطه های ۳-۱۵ و ۳-۱۷ می توان دریافت که انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی نوسانگر وزنه - فنر با زمان تغییر می کنند. یعنی در لحظه ای که نوسانگر در فاصله  $x$  از مبدأ قرار دارد بخشی از انرژی آن به صورت پتانسیل و بقیه به صورت جنبشی است. اما رابطه ۳-۱۸ نشان می دهد که انرژی مکانیکی نوسانگر مستقل از زمان است.

اگر چه ما انرژی مکانیکی را برای نوسانگر وزنه - فنر محاسبه کردیم، ولی می توان نشان داد که برای هر نوع نوسانگر ساده دیگری نیز انرژی مکانیکی با مربع دامنه و مربع بسامد متناسب است.

### تمرین ۳-۳

الف) رابطه انرژی جنبشی نوسانگر ساده را بر حسب مکان نوسانگر ( $x$ ) به دست آورید و با استفاده از آن و همچنین رابطه انرژی پتانسیل نوسانگر نشان دهید که انرژی مکانیکی آن به مکان بستگی ندارد.

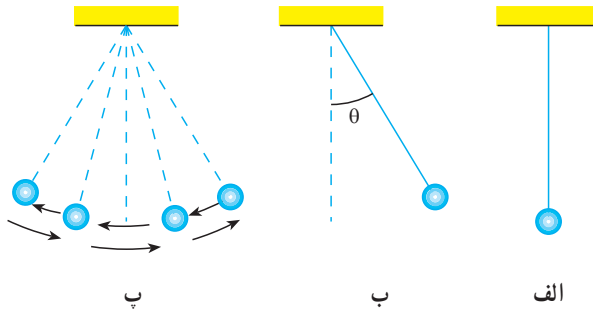
ب) با استفاده از رابطه ای که به دست آوردید، مشخص کنید که در چه مکانی انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی نوسانگر صفر و یا بیشینه است.

### تمرین ۳-۴

نمودار تغییرات  $U_e$ ،  $K$  و  $E$  را نسبت به مکان برای یک دوره نوسانگر ساده رسم کنید.

### ۳-۵- آونگ ساده

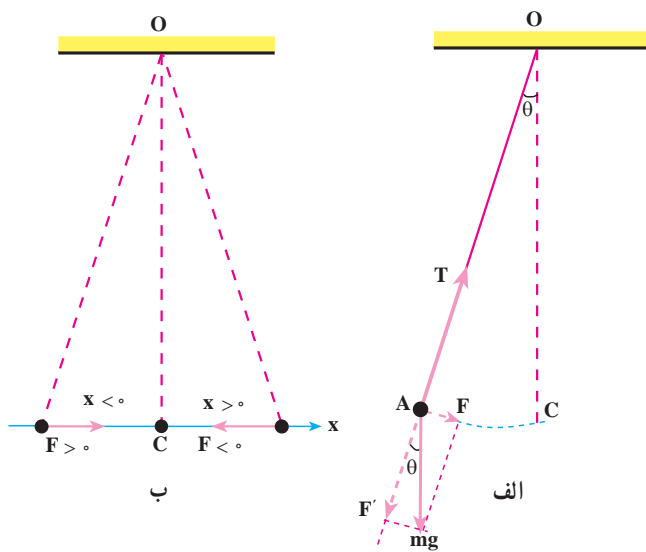
آونگ ساده وزنه کوچکی است به جرم  $m$  که با نخ سبکی به یک نقطه آویخته شده است. در حالت تعادل، آونگ در امتداد قائم قرار دارد (شکل ۳-۱۱-الف). اگر وزنه را پس از خارج کردن آونگ از وضع تعادل رها کنیم (شکل ۳-۱۱-ب) حول وضع تعادلش نوسان می‌کند (شکل ۳-۱۱-پ). در نوسان آونگ، نیروی بازگرداننده مؤلفه نیروی وزن جسم در راستای مماس بر مسیر است.



شکل ۳-۱۱

اگر زاویه انحراف اولیه از وضع قائم ( $\theta$ ) به اندازه کافی کوچک باشد مسیر حرکت وزنه تقریباً یک پاره خط افقی است (شکل ۳-۱۲-ب). در این صورت، وزنه مانند وزنه متصل به فنر یک حرکت هماهنگ ساده با دامنه کم (حرکت نوسانی کم دامنه) انجام می‌دهد.

**محاسبه دوره آونگ ساده کم دامنه:** در آونگ ساده اگر اصطکاک قابل چشم‌پوشی و جرم نخ ناچیز باشد بر وزنه آونگ نیروی وزن ( $m\vec{g}$ ) و نیروی کشش نخ ( $\vec{T}$ ) وارد می‌شود. همان‌طور که شکل ۳-۱۲-الف نشان می‌دهد نیروی کشش نخ در امتداد نخ است و در هر لحظه بر مسیر حرکت وزنه عمود است. بنابراین در راستای مماس بر مسیر، مؤلفه ندارد. مؤلفه نیروی وزن در امتداد مماس بر مسیر



شکل ۱۲-۳

$F = mg \sin \theta$  و در امتداد

عمود بر مسیر  $F' = mg \cos \theta$

است. مؤلفه مماس بر مسیر

که نیروی بازگرداننده است

می‌خواهد آونگ را به وضع

تعادل برگرداند.

دیدیم که اگر زاویه

انحراف آونگ از وضع

تعادل ( $\theta$ ) کوچک باشد مسیر

حرکت وزنه تقریباً یک خط

راست افقی است؛ در این

صورت، اگر طول آونگ را

با  $l$  نمایش دهیم،  $\sin \theta \approx \theta = \frac{x}{l}$  می‌توان نوشت :

$$|F| = mg \theta = mg \frac{x}{l}$$

همان گونه که در شکل ۱۲-۳-ب دیده می‌شود مؤلفه نیروی وزن جسم در راستای مماس بر

مسیر و همواره در خلاف جهت بردار مکان است. بنابراین :

$$F = -mg \frac{x}{l}$$

همان طور که می‌بینید، نیروی بازگرداننده از قانون هوک (رابطه ۲-۳) پیروی می‌کند و حرکت

آونگ ساده کم دامنه یک حرکت هماهنگ ساده است.

اکنون با توجه به قانون دوم نیوتون داریم :

$$F = mg \Rightarrow -mg \frac{x}{l} = ma$$

$$a = -\frac{g}{l} x \quad (۱۹-۳)$$

از رابطه ۱۴-۳ و ۱۹-۳ نتیجه می‌گیریم که :

$$\omega^2 = \frac{g}{l} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

و

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (۲۰-۳)$$

### مثال ۳-۶

دوره و بسامد حرکت نوسانی کم دامنۀ یک آونگ ساده که طول آن  $40\text{ cm}$  است چه اندازه است؟ ( $g = 10\text{ m/s}^2$ ).

پاسخ

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{0.4}{10}} = 2\pi \times \frac{2}{10} \approx 1.25\text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = 0.8\text{ Hz}$$

### مثال ۳-۷

طول آونگ ساده کم دامنۀ چند سانتی متر باشد تا بتواند در هر دقیقه  $30$  نوسان انجام دهد؟  $g = 9.8\text{ m/s}^2$  و  $\pi^2 = 10$

پاسخ

$$T = \frac{t}{n} = \frac{60}{30} = 2\text{ s}$$

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{l}{g}$$

$$4 = 4 \times 10 \times \frac{l}{9.8}$$

$$l = 0.98\text{ m} = 98\text{ cm}$$

### فعالیت ۳-۲

۱- به کمک یک گلوله و قطعه نخ به طول  $40\text{ cm}$  آونگ ساده ای بسازید و دوره آن را به ترتیب با زاویه های انحراف  $4^\circ$ ،  $6^\circ$  و  $20^\circ$  درجه اندازه بگیرید.

۲- گلوله آونگی را که ساخته اید به ترتیب با چند گلوله دیگر تعویض کنید. سپس دوره هریک را با زاویه انحراف  $6^\circ$  درجه اندازه بگیرید.

۳- طول آونگ‌هایی را که ساخته‌اید تغییر دهید و دورهٔ نوسان آنها را با زاویهٔ انحراف ۶ درجه اندازه بگیرید.  
نتیجهٔ فعالیت گروه را در کلاس به بحث بگذارید.

### ۳-۳ فعالیت

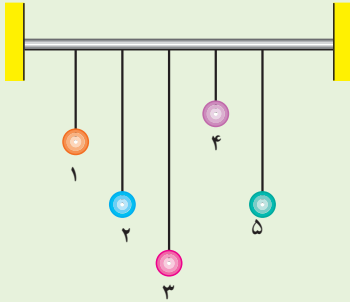
به کمک یک آونگ ساده شتاب گرانش را در محل سکونت خود اندازه‌گیری کنید. روش کار و نتیجهٔ اندازه‌گیری را به کلاس گزارش کنید.

### ۳-۶- تشدید

در بخش‌های قبل دیدیم که وقتی یک نوسانگر ساده نظیر آونگ و یا دستگاه وزنه - فنر را از وضع تعادل منحرف می‌کنیم و آن را برای نوسان آزاد می‌گذاریم، دستگاه حول وضع تعادل خود شروع به نوسان می‌کند. این حرکت نوسانی، نوسان طبیعی یا آزاد دستگاه نامیده می‌شود. بسامد (یا دورهٔ) نوسان طبیعی از ویژگی‌های ساختاری نوسانگر است. مثلاً، بسامد آونگ سادهٔ کم دامنه به طول آونگ (۱) بستگی دارد. یعنی، اگر با دادن انرژی به یک آونگ دامنهٔ نوسان آن را افزایش دهیم (به‌طوری که زاویهٔ انحراف آونگ کوچک باقی بماند) بسامد نوسان‌های آن تغییر نمی‌کند، در حالی که برای تغییر بسامد، لازم است طول آونگ را تغییر دهیم.

هنگامی که نوسانگر را از حالت تعادل خارج می‌کنیم و آن را به نوسان درمی‌آوریم، به علت نیروهای اتلافی از قبیل اصطکاک و مقاومت هوا، دامنهٔ نوسان آن به تدریج کاهش می‌یابد و دستگاه پس از چند نوسان می‌ایستد. این نوسان‌ها را نوسان میرا می‌نامیم. ساده‌ترین مثال برای نوسان میرا آونگ ساده و نیز تاب بازی در بوستان‌ها است. می‌دانید هنگامی که تاب را به نوسان درمی‌آوریم و آن را رها می‌کنیم پس از تعدادی نوسان می‌ایستد. ولی اگر بخواهیم تاب به نوسان خود ادامه دهد باید به آن نیرو وارد کنیم. مثلاً، می‌توانیم، پس از یک رفت و برگشت، هنگامی که تاب می‌خواهد نوسان بعدی را شروع کند به آن نیرو وارد کنیم. در این حالت دورهٔ وارد کردن نیرو با دورهٔ نوسان تاب برابر است. با اعمال این نیرو دامنهٔ نوسان افزایش می‌یابد و به یک مقدار بیشینه می‌رسد و از این پس حرکت نوسانی بدون کاهش دامنه ادامه می‌یابد. در این حالت نیروی اعمال شده اثر نیروهای اتلافی را خنثی می‌کند.

### فعالیت ۳-۴



شکل ۳-۱۳

مطابق شکل ۳-۱۳ به یک میله افقی آونگ‌های ساده‌ای با طول‌های متفاوت ولی جرم یکسان بیاویزید، به طوری که طول آونگ‌های شماره ۲ و ۵ با یکدیگر برابر باشد. اکنون آونگ شماره ۵ را از وضع تعادل خارج و آن را رها کنید. حرکت چهار آونگ دیگر را به دقت مشاهده و تجزیه و تحلیل کنید و نتیجه کار گروه را به کلاس گزارش دهید.

در این فعالیت با نوسان آونگ شماره ۵ آونگ‌های ۱ و ۳ و ۴ نیز به نوسان درمی‌آیند، اما پس از چند نوسان می‌ایستند. ولی آونگ شماره ۲ که دوره آن با آونگ شماره ۵ یکسان است، در مدت طولانی‌تری می‌ایستد. نتیجه اینکه :

اگر به نوسانگری یک نیروی دوره‌ای اعمال شود، در صورتی که بسامد نیروی اعمال شده با بسامد نوسانگر یکسان باشد، دامنه نوسان تا مقدار بیشینه‌ای افزایش می‌یابد و از آن پس حرکت نوسانی بدون کاهش دامنه ادامه می‌یابد. در این صورت می‌گوییم پدیده تشدید رخ داده است. در حالتی هم که بسامد نیروی اعمال شده با بسامد نوسانگر برابر نیست، انرژی به نوسانگر منتقل می‌شود. مثلاً در فعالیت ۳-۴ به آونگ‌های ۱ و ۳ و ۴ انرژی منتقل می‌شود و آنها را به حرکت درمی‌آورد. ولی بیشترین انرژی در حالت تشدید به نوسانگر منتقل می‌شود (مانند آونگ ۲).

### پرسش ۳-۱

اگر نیروی اتلافی به نوسانگر وارد نشود، پیش‌بینی می‌کنید، در اثر تشدید، نوسانگر چگونه رفتار کند؟

پدیده تشدید ممکن است مفید و یا برعکس مشکل‌زا باشد. مثلاً در ساعت کوکی این پدیده مفید است. فنر کوک شده یک نیروی دوره‌ای بر رقاصک ساعت اعمال می‌کند که بسامد آن با بسامد نوسان رقاصک برابر است و در نتیجه تشدید رخ می‌دهد و باعث می‌شود که حرکت نوسانی رقاصک ادامه یابد. پدیده تشدید ممکن است اثر مخرب نیز داشته باشد و باعث تخریب ساختمان‌ها و تأسیسات شود.

## تمرین‌های فصل سوم

۱- توضیح دهید در حرکت هماهنگ ساده وزنه - فنر اگر دامنه نوسان دو برابر شود چه تغییری در دوره، بیشینه سرعت و انرژی مکانیکی نوسانگر ایجاد می‌شود؟

۲- جهت سرعت و شتاب را در حرکت هماهنگ ساده، در دو حالت الف و ب، با هم مقایسه کنید و درباره نتیجه این مقایسه توضیح دهید.

الف) نوسانگر به مبدأ (وضع تعادل) نزدیک می‌شود.

ب) نوسانگر از مبدأ دور می‌شود.

۳- آیا در حرکت هماهنگ ساده اندازه و جهت نیروی بازگرداننده ثابت است؟ آیا امکان دارد این نیرو با بردار مکان جسم از مبدأ هم جهت باشد؟ توضیح دهید.

۴- اگر بیشینه سرعت نوسانگر وزنه - فنری دو برابر شود، انرژی کل آن چند برابر می‌شود؟

۵- در لحظه‌ای که انرژی جنبشی یک نوسانگر وزنه - فنر ۳ برابر انرژی پتانسیل آن است مکان نوسانگر چند برابر دامنه نوسان آن است؟ سرعت و شتاب نوسانگر در این لحظه به ترتیب چند برابر بیشینه سرعت و بیشینه شتاب نوسانگر است؟

۶- دامنه نوسان یک حرکت هماهنگ ساده  $m \times 10^{-2} \times 3$  و بسامد آن ۵ هرتز است. معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان - زمان آن را در یک دوره رسم کنید.

۷- معادله حرکت، سرعت و شتاب هماهنگ ساده‌ای را بنویسید که دامنه آن ۴ cm و دوره آن ۴ s است. نمودار مکان - زمان، سرعت - زمان و شتاب - زمان را در یک دوره رسم کنید.

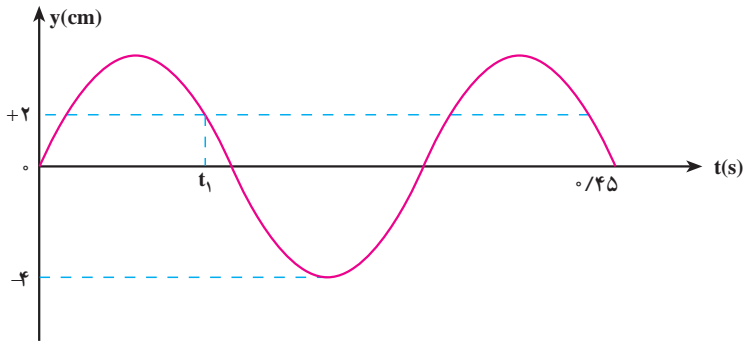
۸- معادله حرکت هماهنگ ساده یک نوسانگر در SI به صورت  $x = 0.05 \sin 20\pi t$  است.

الف) در چه زمانی، پس از لحظه صفر، برای اولین بار سرعت نوسانگر به بیشترین مقدار خود می‌رسد؟

ب) در چه فاصله‌ای از مبدأ انرژی جنبشی نوسانگر برابر با انرژی پتانسیل آن خواهد شد؟



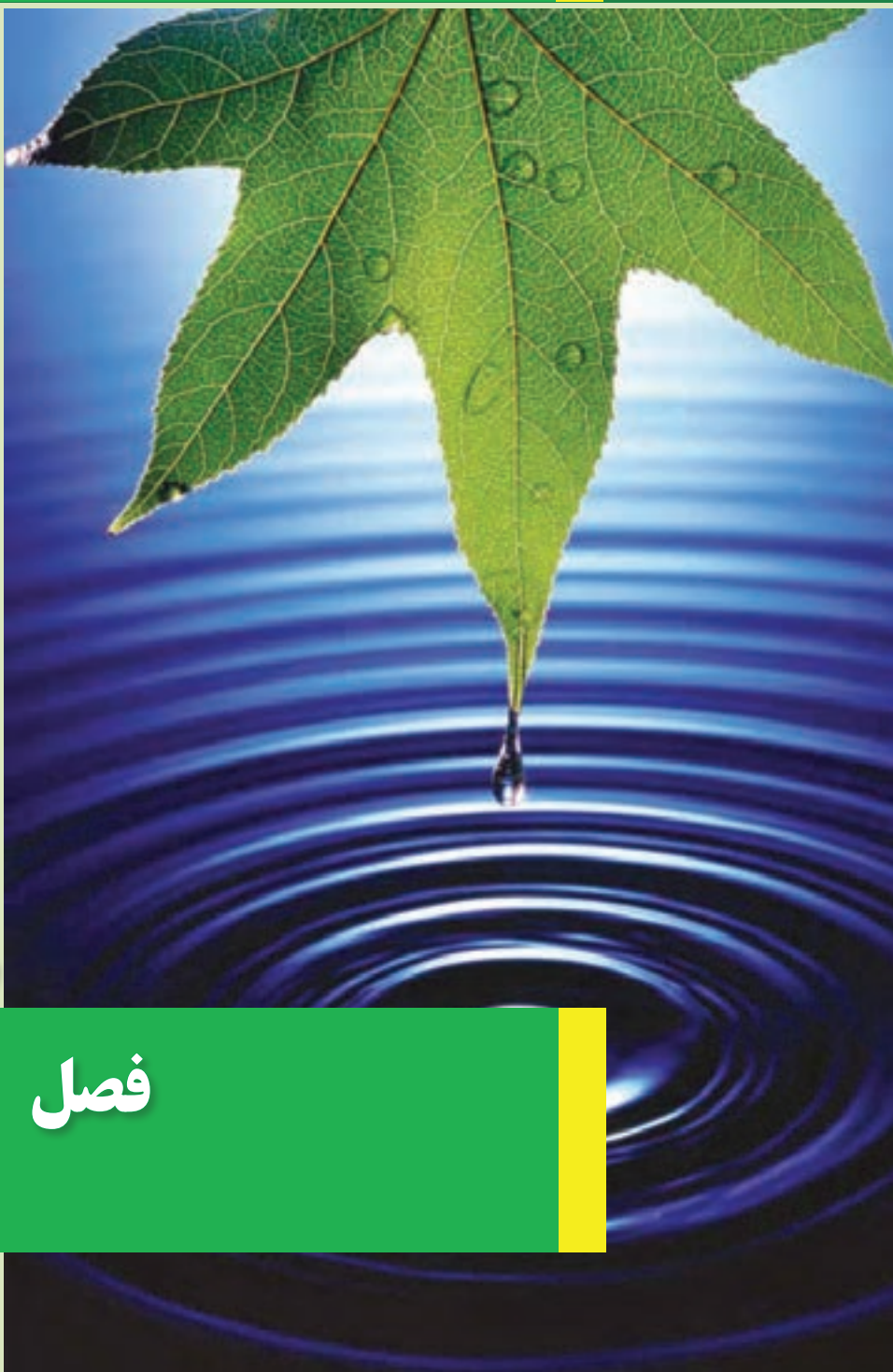
- ۹- نمودار مکان - زمان نوسانگری مطابق شکل ۳-۱۴ است :
- الف) معادله‌های حرکت و سرعت و شتاب این نوسانگر را بنویسید.
- ب) اندازه سرعت و شتاب نوسانگر را در لحظه  $t_1$  به دست آورید.



شکل ۳-۱۴

- ۱۰- پیستون‌های یک اتومبیل ۴ سیلندر در حالت خلاص تقریباً حرکت نوسانی ساده دارند.
- اگر دامنه نوسان آنها  $5^\circ$  میلی متر و بسامد آن  $11^\circ$  هرتز باشد، کمیت‌های زیر را به دست آورید.
- الف) بیشینه سرعت پیستون‌ها
- ب) بیشینه شتاب نوسان آنها

# موج های مکانیکی



۴

فصل

## موج های مکانیکی

**نگاهی به فصل :** مبحث موج یکی از مباحث های مهم فیزیک است. بیشترین اطلاعاتی که از جهان اطرافمان دریافت می کنیم، از طریق انتشار موج ها صورت می گیرد.

برخی از موج ها برای انتشار به محیط مادی نیاز دارند؛ این گونه موج ها را **موج های مکانیکی** می نامند. تشکیل موج بر سطح آب را کد، در اثر وزش باد یا هر عامل دیگری که باعث برهم زدن تعادل آب شود، نمونه ای آشنا از موج های مکانیکی است. انتقال صوت از منبع به شنونده، با موج های صوتی که در هوا منتشر می شوند، صورت می گیرد. موج صوتی نیز نوعی موج مکانیکی است که در فصل پنجم با ویژگی های آن بیشتر آشنا می شوید.

نوع دیگری از موج ها که می توانند در محیط های غیرمادی (خلاء) نیز منتشر شوند، **موج های الکترومغناطیسی** نامیده می شوند. برای مثال هم اکنون که در حال خواندن این نوشته ها هستید، اطلاعات را به صورت نوری که از صفحه کتاب باز می تابد دریافت می کنید. نور نوعی موج الکترومغناطیسی است. در فصل ششم با ماهیت و ویژگی های این گونه موج ها آشنا می شوید. هرچند ماهیت موج های مکانیکی و الکترومغناطیسی با یکدیگر تفاوت دارند، اما رفتار و ویژگی های آنها از جهت های زیادی، مشابه یکدیگر است. برای مثال هر دو در حین انتشار می توانند انرژی را از نقطه ای به نقطه دیگر منتقل کنند.

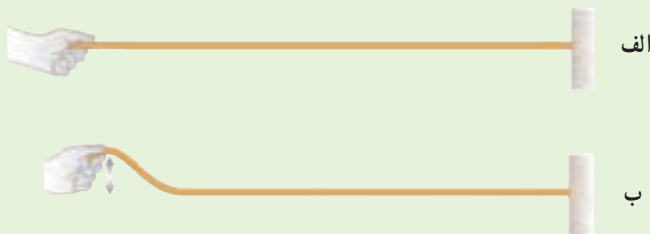
### ۴-۱- موج

پیش از این با نیروی کشسانی فنر آشنا شدیم. اگر در یک فنر تغییر طولی ایجاد کنیم، بین هر دو حلقه مجاور فنر نیروی کشسانی به وجود می آید که می خواهد فنر را به حالت اولیه برگرداند. به فنر یا هر محیط دیگری که مانند فنر عمل می کند محیط کشسان گفته می شود. پس محیط کشسان محیطی است که وقتی در آن تغییر شکلی ایجاد شود نیروهای کشسان ایجاد شده بین اجزای محیط، تمایل دارند محیط را به حالت اول خود برگردانند. بیشتر جامدها، مایع ها و گازها محیط های کشسان هستند. مثلاً اگر یک تیغه فنری را خم کرده و رها کنیم، به حالت اول برمی گردد. اگر تویی را که بر سطح آرام آب درون تشتکی

قرار دارد، کمی بیشتر در آب فرو برده و رها کنیم، به حالت اول برمی‌گردد. به همین ترتیب اگر انتهای سُرنگی را با دست مسدود کرده و پیستون را به درون آن فرو ببریم و رها کنیم، پیستون به حالت اول برمی‌گردد. در همه این مثال‌ها، تیغه فنی، آب و هوای درون سُرنگ محیط‌هایی کشسان هستند.

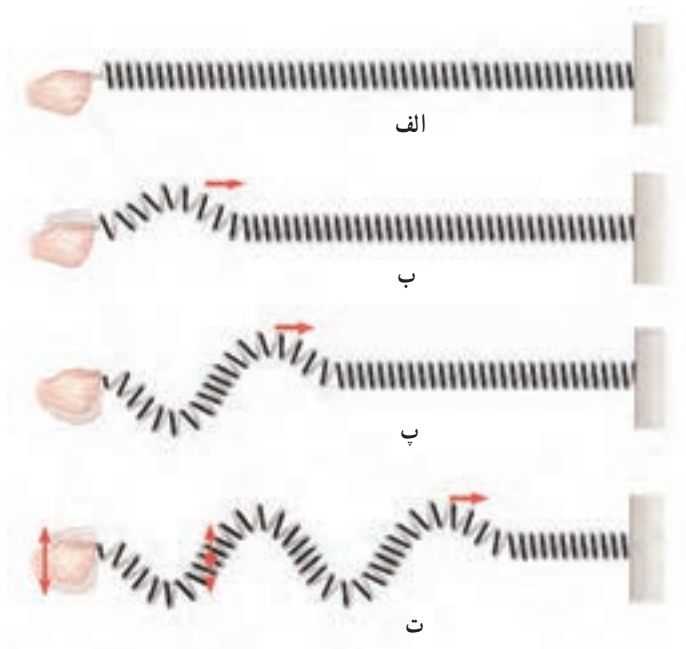
## فعالیت ۴-۱

طناب درازی را به نقطه‌ای محکم کنید و آن را بکشید (شکل ۴-۱ الف) اکنون مطابق شکل (۴-۱ ب) تغییر شکلی در آن ایجاد کنید. رفتار بعدی طناب را مشاهده و نتیجه مشاهده‌های خود را به کلاس گزارش کنید. همین آزمایش را با یک فنر تکرار کنید.



شکل ۴-۱

یک محیط کشسان در حال تعادل را در نظر بگیرید. اگر تغییر شکلی در جزء کوچکی از این محیط ایجاد نموده و آن را به حال خود رها کنیم چه روی می‌دهد؟ مثلاً فنی را در نظر بگیرید که روی یک سطح افقی صاف به حال سکون قرار دارد (شکل ۴-۲ الف). اگر مطابق شکل ۴-۲ ب، چند حلقه فنی را به یک سمت بکشیم و تغییر شکلی در آن ایجاد کرده و آن را رهاش کنیم، می‌بینیم که حلقه‌های جابه‌جا شده به جای اول برگشته و حلقه‌های مجاور آن از وضع تعادل خارج می‌شوند و همان شکل حلقه‌های قبلی را به خود می‌گیرند. این تغییر شکل، جزء به جزء در طول فنر منتقل می‌شود و تا آخر در آن پیش می‌رود (شکل‌های ۴-۲ پ و ت) علت انتقال تغییر شکل، وجود نیروی بازگرداننده بین حلقه‌های فنر است.



شکل ۲-۴

به همین ترتیب، هرگاه تغییر شکلی (و یا آشفستگی) در یک جزء از محیط کشسانی که به حال تعادل است، ایجاد کنیم، به علت وجود نیروی کشسانی بین اجزای محیط، آن تغییر شکل، جزء به جزء در محیط منتقل می‌شود. تغییر شکل ایجاد شده در محیط را تپ و انتقال تپ در محیط را انتشار می‌گوییم.

## فعالیت ۲-۴

سنگ کوچکی را از بالای سطح آب آرام استخر یا برکه‌ای رها کنید و آنچه را که رخ می‌دهد به دقت مشاهده کنید. نتیجه مشاهده خود را به کلاس گزارش کنید.

**موج سینوسی:** اگر یک جزء از محیط کشسانی را که در حال تعادل است با حرکت هماهنگ ساده به نوسان درآوریم، با نوسان آن جزء، تپ‌های متوالی در محیط تولید و به دنبال یکدیگر، منتشر می‌شوند. چنین موجی را، **موج سینوسی** می‌نامیم. چشمه موج سینوسی، نوسانگری است که می‌تواند،

با بسامد (یا دوره) و دامنه ثابتی، حرکت هماهنگ ساده انجام دهد. دیپازون یکی از وسیله‌هایی است که به عنوان چشمه موج در آزمایش‌ها به کار برده می‌شود.

## مطالعه آزاد

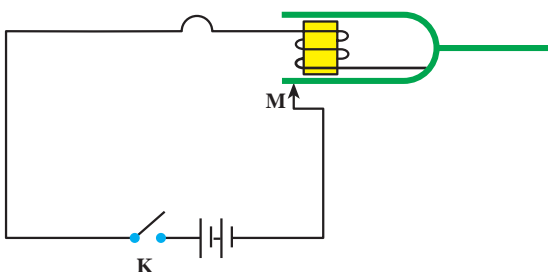
### نوسان دیپازون با دامنه ثابت

دیپازون، دو شاخه‌ای مانند شکل ۳-۴ است که اگر به یکی از شاخه‌های آن ضربه‌ای وارد کنیم، هر دو شاخه با حرکت هماهنگ ساده نوسان می‌کنند. این نوسان میرا است و دیپازون بعد از تعدادی نوسان از حرکت باز می‌ایستد. برای آنکه نوسان‌های دیپازون ادامه یابد، می‌توان آن را در مداری الکتریکی مانند



شکل ۳-۴

شکل ۴-۴ قرار داد. در این مدار، توسط آهنربای الکتریکی، نیروی مغناطیسی‌ای به طور دوره‌ای، بر شاخه‌های دیپازون (که خود از ماده مغناطیسی ساخته شده است) وارد و آن را به نوسان دائم وادار می‌کند. با اتصال کلید  $K$  جریان الکتریکی در مدار برقرار و شاخه‌های دیپازون، جذب آهنربای الکتریکی می‌شوند. در نتیجه در نقطه  $M$ ، شاخه دیپازون از مدار جدا شده و جریان الکتریکی نیز قطع می‌شود. با قطع جریان، خاصیت مغناطیسی از



شکل ۴-۴

بین می‌رود و شاخه‌های دیپازون به جای اول برمی‌گردند و دوباره اتصال برقرار می‌شود و این عمل، ادامه می‌یابد. به این ترتیب نوسان‌های دیپازون پایدار می‌ماند.

شکل ۴-۵ الف تا پ ایجاد و انتشار موج سینوسی را در طناب، فنر و سطح آب نشان می دهد.



الف) دست با نوسان خود در طناب موجی دوره ای به صورت برجستگی و فرورفتگی ایجاد کرده است.

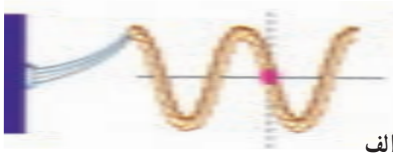


ب) نوسان های دست، در فنر موج دوره ای به صورت تراکم و انبساط ایجاد کرده است.

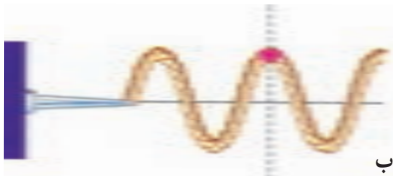


پ) موج های ایجاد شده در سطح آب به صورت دایره های متوالی برجسته و فرورفته منتشر می شوند.

شکل ۴-۵



الف



ب



ب



ت

موج‌های ایجاد شده در طناب، فنر و سطح آب، نمونه‌هایی از موج‌های مکانیکی‌اند. این موج‌ها در محیط‌های مادی کشسان تولید و منتشر می‌شوند.

**بسامد موج:** وقتی یک چشمه موج با بسامد  $f$  در محیطی کشسان شروع به نوسان می‌کند، ذره‌های مجاور خود را نیز با همان بسامد به نوسان وامی‌دارد. به همین ترتیب، همه ذره‌های محیط با همان بسامد چشمه موج به نوسان درمی‌آیند.

شکل ۴-۶ - الف تا ت چگونگی نوسان یک ذره محیط را، که با رنگ قرمز مشخص شده است، ضمن انتشار موج نشان می‌دهد.

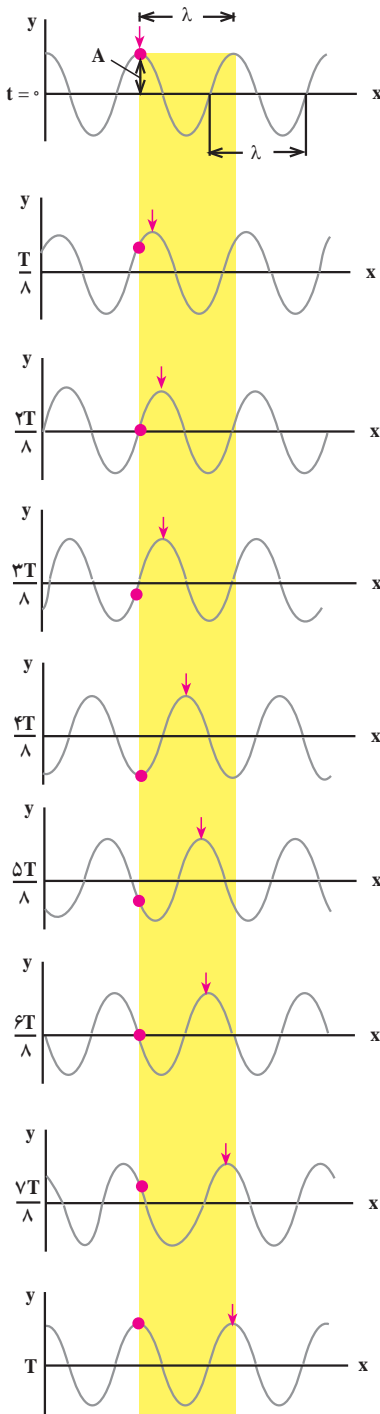
شکل ۴-۶ - ضمن انتشار موج به طرف راست، یک ذره از طناب، حرکت هماهنگ ساده با بسامد موج، انجام می‌دهد.

**انتشار موج:** شکل ۴-۷ حالت‌های مختلف طنابی را نشان می‌دهد که در آن موجی سینوسی منتشر می‌شود. در این شکل‌ها، یک قله موج را با پیکان مشخص کرده‌ایم. در حالت‌های مختلف شکل مشاهده می‌شود که پیکان در جهت محور  $x$  جابه‌جا می‌شود که نشان دهنده پیشروی موج در طول طناب است. این شکل‌ها، وضعیت نقطه‌های مختلف طناب را در بازه‌های زمانی  $\frac{T}{8}$  نشان می‌دهد. اگر در یک لحظه معین یکی از نقطه‌های طناب در قله موج باشد و پس از  $t$  ثانیه نقطه دیگری که به فاصله  $x$  از آن واقع است به همان وضعیت برسد، سرعت پیشروی موج که آن را سرعت انتشار می‌نامیم برابر است با:

$$v = \frac{x}{t}$$

(۴-۱)





سرعت انتشار موج در یک محیط به ویژگی‌های فیزیکی محیط (جنس، دما و...) بستگی دارد اما به شرایط فیزیکی چشمهٔ موج (بسامد، دامنه و...) بستگی ندارد. برای مثال، سرعت انتشار موج در یک طناب که با نیروی کشیده شده است، به نیروی کشش طناب و نیز به جرم واحد طول آن بستگی دارد. سرعت انتشار موج عرضی (در همین فصل با موج‌های طولی و عرضی آشنا می‌شویم) در طناب (و یا در تار) یکنواختی به جرم  $m$  و طول  $L$  از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$v = \sqrt{\frac{F}{m/L}} \quad (۴-۲-الف)$$

برای سادگی،  $\frac{m}{L}$  (که جرم واحد طول است) را با  $\mu$  نشان می‌دهیم.

$$\mu = \frac{m}{L}$$

در نتیجه، سرعت انتشار موج در یک طناب را می‌توان از رابطهٔ زیر به دست آورد:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (۴-۲-ب)$$

در این رابطه،  $F$ ، نیروی کشش طناب برحسب نیوتون،  $\mu$ ، جرم واحد طول طناب برحسب کیلوگرم بر متر و  $v$  سرعت انتشار موج مکانیکی در طناب برحسب متر بر ثانیه است.

شکل ۴-۷- انتشار موج در طناب

### مثال ۴-۱

ریسمانی به طول یک متر و جرم  $10^\circ\text{g}$  بین دو نقطه محکم کشیده شده است. اگر نیروی کشش ریسمان برابر  $4^\circ\text{N}$  باشد، سرعت انتشار موج‌های عرضی را در این طناب، محاسبه کنید.

پاسخ

ابتدا جرم واحد طول ریسمان را محاسبه می‌کنیم:

$$\mu = \frac{m}{L}$$

$$\mu = \frac{10^\circ/1}{1} = 10^\circ/\text{kg} / \text{m}$$

اکنون به کمک رابطه ۴-۲ سرعت انتشار را به دست می‌آوریم:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

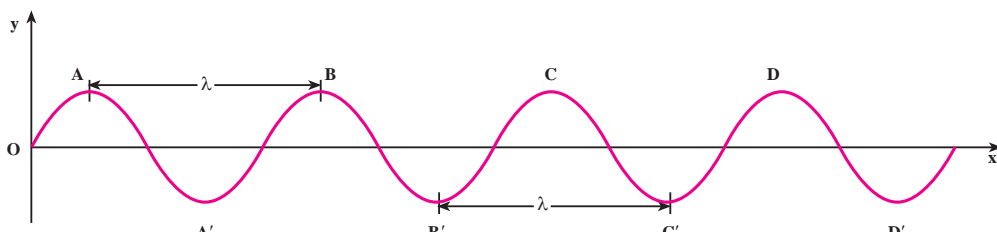
$$V = \sqrt{\frac{4^\circ}{10^\circ/1}} = 2^\circ\text{m/s}$$

### فعالیت ۴-۳

در فعالیت ۴-۱، مشاهده انتقال تپ، به دلیل آنکه سرعت انتشار آن در طناب زیاد است، مشکل است. چه راه‌هایی پیشنهاد می‌کنید تا بتوان با کاهش سرعت انتشار، انتقال تپ را مشاهده کرد؟ پیشنهادهای خود را در کلاس به بحث بگذارید.

**طول موج:** به حالت‌های مختلف شکل ۴-۷ توجه کنید. در مدتی که یک نقطه محیط (مثلاً نقطه واقع در قله موج) یک نوسان انجام می‌دهد، یعنی در مدت یک دوره  $T$ ، قله موج که با علامت پیکان مشخص شده است، به اندازه پهنای نوار زرد رنگ پیش می‌رود اندازه این پیشروی را **طول موج** می‌نامیم و آن را با  $\lambda$  نشان می‌دهیم. اگر به هر نقطه دیگر موج، مثلاً دره موج هم توجه کنید، می‌بینید که در مدت یک دوره به اندازه طول موج منتقل می‌شود. بنابراین، طول موج را می‌توان به صورت مسافتی

که موج در مدت یک دوره می‌پیماید، تعریف کرد.  
 شکل ۸-۴ که انتشار موج را در یک طناب نشان می‌دهد، فاصله دو قله متوالی موج و یا فاصله دو دره متوالی برابر طول موج است.



شکل ۸-۴

بار دیگر به شکل ۸-۴ توجه کنید. در این شکل نقطه‌های دیگری نیز می‌توان یافت که فاصله آنها از یکدیگر برابر طول موج است. همچنین می‌توان دریافت که هر دو نقطه که فاصله آنها از یکدیگر برابر طول موج است، همواره در وضعیت نوسانی مشابهی قرار دارند. به چنین دو نقطه‌ای، نقاط هم‌فاز گفته می‌شود. برای مثال نقطه‌های A و B و C و D، همه در قله موج واقع‌اند و در نتیجه هم‌فازند. به همین ترتیب، نقطه‌هایی که فاصله آنها از یکدیگر دو، سه و یا  $n \dots$  برابر  $\lambda$  ( $n$  عددی است صحیح) باشد، همواره در یک وضعیت نوسانی‌اند. پس می‌توان گفت: نقطه‌هایی از محیط که فاصله آنها از یکدیگر مضرب صحیحی از طول موج یا مضرب زوجی از نصف طول موج باشد، هم‌فازند. اگر فاصله دو نقطه هم‌فاز را با  $\Delta x$  نشان دهیم داریم:

$$\Delta x = n\lambda = 2n \frac{\lambda}{2} \quad (۳-۴)$$

اکنون به دو نقطه متوالی طناب در شکل ۸-۴ که یکی در قله موج (نقطه A) و دیگری در دره موج (نقطه A') قرار دارد توجه کنید. اگر حرکت این دو نقطه را دنبال کنید، متوجه خواهید شد که حرکت آنها همواره در جهت‌های مخالف یکدیگر است. چنین دو نقطه‌ای را در فاز مخالف می‌نامیم. فاصله این دو نقطه از یکدیگر، در راستای انتشار، برابر نصف طول موج است. به همین ترتیب نقطه‌های دیگری نیز می‌توان مشخص کرد که با یکدیگر در فاز مخالف‌اند. فاصله این نقطه‌ها از یکدیگر مضرب فردی از نصف طول موج است. بنابراین: نقطه‌هایی از محیط که فاصله آنها از یکدیگر مضرب

فردی از نصف طول موج باشد، در فاز مخالف اند. برای این نقطه ها داریم :

$$\Delta x = (2n - 1) \frac{\lambda}{2} \quad (4-4)$$

### پرسش ۱-۴

روی شکل ۴-۸ نقطه هایی را که هم فازند و نقطه هایی را که در فاز مخالف اند پیدا کنید.

رابطه طول موج با سرعت و بسامد : اگر زمان انتشار برابر یک دوره یعنی  $t = T$  باشد، مسافتی که موج در این مدت می پیماید، برابر طول موج می شود، یعنی  $x = \lambda$  است. با توجه به تعریف طول موج و رابطه ۴-۱ داریم :

$$\lambda = vT \quad (5-4)$$

چون دوره و بسامد، عکس یکدیگراند خواهیم داشت :

$$\lambda = vT = \frac{v}{f} \quad (6-4)$$

### مثال ۲-۴

نیروی کشش طنابی  $12\text{ N}$  و جرم واحد طول آن  $3\text{ g/m}$  است. الف : اگر سر این طناب را با دیپازونی که بسامد آن  $10\text{ Hz}$  است، عمود بر راستای طناب به نوسان درآوریم، طول موج در طناب را پیدا کنید. ب : اگر نیروی کشش طناب را نصف کنیم، بسامد و طول موج در طناب را حساب کنید.

$$\mu = 3\text{ g/m} = 0.003\text{ kg/m}$$

پاسخ

الف) با استفاده از رابطه ۴-۲ داریم :

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

$$v = \sqrt{\frac{12}{0.3}} = 20 \text{ m/s}$$

طول موج را از رابطه ۴-۶ محاسبه می‌کنیم:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$$\lambda = \frac{20}{100} = 0.2 \text{ m}$$

ب) با تغییر نیروی کشش طناب، سرعت انتشار موج در طناب تغییر می‌کند، اما بسامد موج همچنان برابر بسامد دیاپازون است. با تغییر سرعت انتشار، طول موج تغییر می‌کند. داریم:

$$f_2 = f_1 = 100 \text{ Hz}$$

از رابطه ۴-۲ و با توجه به اینکه  $\mu_1 = \mu_2$  است داریم:

$$\frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{F_2}{F_1}}$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{6}{12}} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

چون بسامد نوسان‌ها ثابت است، از رابطه ۴-۶ نتیجه می‌شود:

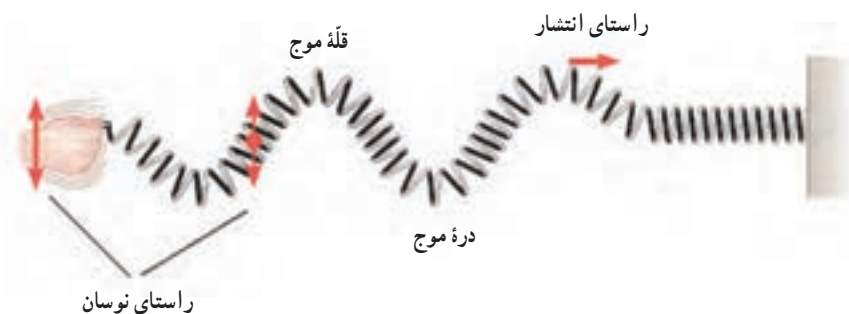
$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$\lambda_2 = 0.2 \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0.14 \text{ m}$$

## ۴-۲- موج‌های عرضی - موج‌های طولی

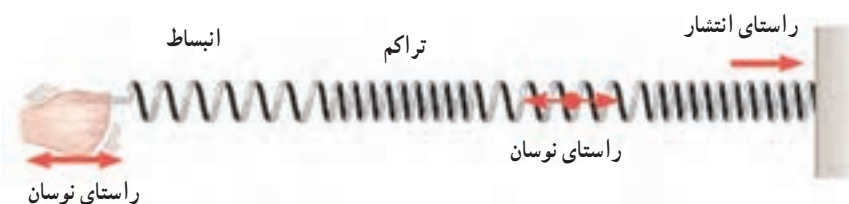
گفتیم وقتی یک چشمه موج با بسامد  $f$  در محیطی کثیف نوسان می‌کند ذره‌های مجاور خود را نیز با همان بسامد به نوسان درمی‌آورد و بدین ترتیب همه ذرات محیط به نوسان درمی‌آیند. راستای نوسان این ذره‌ها، ممکن است عمود بر راستای انتشار موج و یا موازی با آن باشد.

**الف) موج عرضی:** اگر راستای نوسان ذره‌های محیط، عمود بر راستای انتشار موج باشد موج را عرضی می‌نامند. برای مثال موج‌های ایجاد شده در فنر در شکل ۴-۹ عرضی‌اند. موج عرضی در فنر و یا در طناب با قله‌ها و دره‌ها قابل تشخیص است.



شکل ۴-۹- موج عرضی در فنر

**ب) موج طولی:** اگر راستای نوسان ذره‌های محیط، موازی با راستای انتشار موج باشد، موج را طولی می‌نامند. برای مثال در شکل ۴-۱۰ وقتی دست خود را در امتداد افق به نوسان در آوریم، حلقه‌های فنر به چپ و راست، یعنی در امتداد طول فنر، نوسان می‌کنند و موج طولی در طول فنر منتشر می‌شود.

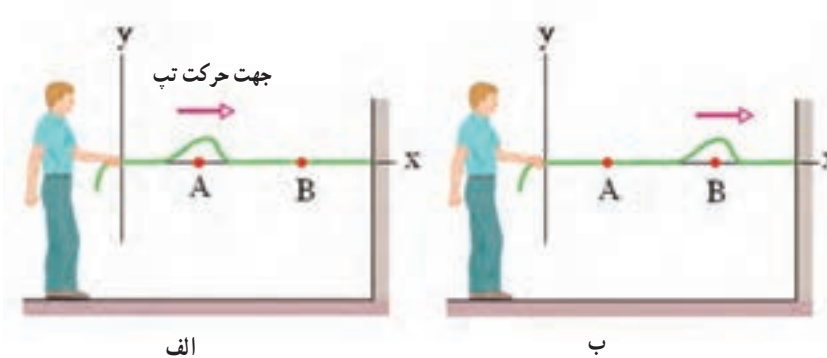


شکل ۴-۱۰- انتشار موج طولی در فنر

وقتی موج طولی در فنر منتشر می‌شود، حلقه‌های فنر، به طور متناوب به هم نزدیک یا از هم دور می‌شوند. وقتی به هم نزدیک می‌شوند، حلقه‌ها متراکم شده و وقتی از هم دور می‌شوند، حلقه‌ها انبساط پیدا می‌کنند. موج طولی در فنر را با همین تراکم‌ها و انبساط‌های پی در پی می‌توان تشخیص داد. در فنر می‌توان هر دو نوع موج عرضی و طولی را ایجاد کرد.

### ۴-۳- تابع موج

وقتی یک موج در یک محیط همگن در حال انتشار است، شکل موج، در ضمن انتشار از نقطه‌ای به نقطه دیگر، تغییر نمی‌کند. مثلاً اگر شکل یک تپ در یک لحظه (مثلاً در  $t = 0$ ) و در نقطه A به صورت شکل ۴-۱۱-الف باشد، بعد از  $\Delta t$  ثانیه (در لحظه t) این تپ به نقطه B می‌رسد. شکل تپ در نقطه B و در لحظه t، همان است که  $\Delta t$  ثانیه قبل در نقطه A بوده است (شکل ۴-۱۱-ب). به بیان دیگر، وضعیت نقطه B در لحظه t، مانند وضعیت A در  $\Delta t$  ثانیه قبل از آن است.



شکل ۴-۱۱

اکنون فرض کنید چشمه موجی با دوره T (بسامد f) و دامنه A حرکت هماهنگ ساده‌ای انجام دهد و نوسان‌های آن با سرعت v در طنابی همگن منتشر شود. مبدأ مختصات را منطبق بر چشمه موج (ابتدای طناب) و راستای طناب را، پیش از نوسان، محور x انتخاب می‌کنیم. وقتی چشمه به نوسان درآید، نوسان‌ها در طول طناب، منتشر می‌شوند.

چشمه موج و نقطه‌ای از طناب که به آن متصل است در مکان  $x = 0$  واقع‌اند. اگر جابه‌جایی هر نقطه طناب را از وضع تعادل خود با u نشان دهیم، وضعیت نوسانی آن با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$u = A \sin \omega t = A \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (4-7)$$

موج بعد از زمان  $\Delta t = \frac{x}{v}$  به نقطه‌ای واقع در مکان x می‌رسد. وضعیت این نقطه، همان‌گونه

که قبلاً بیان شد، مانند وضعیت چشمه موج در  $\Delta t$  ثانیه قبل است که با جایگزین کردن مقدار « $t - \frac{x}{v}$ »

به جای  $t$  در رابطه ۴-۷ مشخص می شود. بنابراین خواهیم داشت :

$$u = A \sin \omega(t - \frac{x}{v}) = A \sin(\omega t - \frac{\omega x}{v}) \quad (۴-۸)$$

و با توجه به رابطه های  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  و  $\lambda = vT$  داریم :

$$u = A \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x) \quad (۴-۹)$$

$\frac{2\pi}{\lambda}$  را با  $k$  نشان می دهند و به آن عدد موج می گویند.

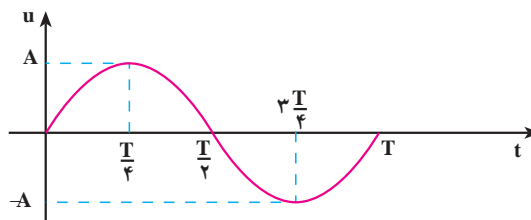
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} \quad (۴-۱۰)$$

یکای عدد موج در SI رادیان بر متر (rad/m) است. در نتیجه رابطه ۴-۹ به صورت زیر نوشته می شود.

$$u = A \sin(\omega t - kx) \quad (۴-۱۱)$$

رابطه ۴-۱۱ وضعیت نوسانی نقطه ای از محیط را که به فاصله  $x$  از مبدأ مختصات (چشمه موج) واقع است، در لحظه  $t$  نشان می دهد. به این رابطه تابع موج می گویم.

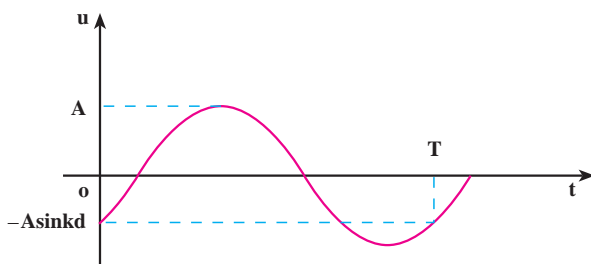
تابع موج تابعی دو متغیره است؛ یعنی در آن،  $u$ ، تابع دو متغیر زمان ( $t$ ) و مکان ( $x$ ) است برای مثال، اگر به یک نقطه محیط نگاه کنیم ( $x$  را ثابت بگیریم) خواهیم دید که این نقطه در لحظه های مختلف وضعیت های نوسانی متفاوتی پیدا می کند؛ یک لحظه در وضعیت تعادل است، لحظه ای دیگر از وضع تعادل خارج شده و فاصله آن از وضع تعادل برابر  $u$  می شود و در لحظه ای دیگر، در دورترین فاصله از وضع تعادل قرار می گیرد ( $u = A$ ). به عبارت دیگر  $u$  تابع زمان است. پس با ثابت گرفتن  $x$ ، می توان تابع  $u$  را بر حسب زمان ( $t$ ) برای هر یک از ذره های محیط به دست آورد و نمودار آن را نیز رسم کرد. مثلاً این تابع برای چشمه موج، که آن را مبدأ مختصات گرفته ایم ( $x = 0$ ) به صورت  $u = A \sin \frac{2\pi}{T} t$  و نمودار آن نیز به صورت زیر است :



شکل ۴-۱۲



تابع  $u$  برای یک ذره که به فاصله  $x=d$  از چشمه موج واقع است،  $u = A \sin(\frac{2\pi}{T}t - kd)$  خواهد بود. نمودار  $u$  برای این نقطه در شکل ۴-۱۳ آمده است. توجه کنید که شروع نمودار به  $d$  بستگی دارد.



شکل ۴-۱۳

### مثال ۴-۳

یک چشمه موج با بسامد  $10^\circ \text{ Hz}$  نوسان‌هایی با دامنه  $5 \text{ mm}$  ایجاد می‌کند که با سرعت  $10 \text{ m/s}$  در امتداد محور  $x$  منتشر می‌شوند. طول موج و عدد موج را محاسبه کنید و تابع موج آن را نیز بنویسید.

پاسخ

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{با استفاده از رابطه ۴-۶ داریم:}$$

$$\lambda = \frac{10}{10} = 1 \text{ m}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{با توجه به رابطه ۴-۱۰ خواهیم داشت:}$$

$$k = \frac{2\pi}{1} = 2\pi \text{ rad/m}$$

با استفاده از رابطه ۴-۱۱ داریم:

$$u = A \sin(\omega t - kx) = A \sin(2\pi f t - kx)$$

$$u = 5 \times 10^{-3} \sin(20\pi t - 2\pi x) = 5 \times 10^{-3} \sin 2\pi(10t - x)$$

## تمرین ۱-۴

تابع موجی که در جهت محور  $x$  منتشر می‌شود برحسب یکاهای SI به صورت  $u = 0.2 \sin(2\pi t - 4\pi x)$  است. دامنه، بسامد، طول موج و سرعت انتشار این موج را محاسبه کنید.

اگر موج عرضی باشد، نوسان ذره‌های محیط عمود بر محور  $x$  (مثلاً در راستای محور  $y$ ) است. برای نشان دادن راستای نوسان، نام محوری را که نوسان در راستای آن انجام می‌شود زیرنویس  $u$  قرار می‌دهیم. برای مثال، تابع زیر نشان دهنده یک موج عرضی است که نوسان آن در راستای محور  $y$  و انتشار آن در جهت محور  $x$  است:

$$u_y = A \sin(\omega t - kx) \quad (12-4)$$

حال اگر موج طولی در جهت محور  $x$  منتشر شود، تابع آن به صورت زیر خواهد بود:

$$u_x = A \sin(\omega t - kx) \quad (13-4)$$

همچنین می‌توان نشان داد که اگر موج در خلاف جهت محور  $x$  منتشر شود، تابع آن به صورت زیر خواهد بود:

$$u_x = A \sin(\omega t + kx) \quad (14-4)$$

در رابطه‌های ۱۲-۴ و ۱۴-۴ به  $\varphi = \omega t - kx$  و یا  $\varphi = \omega t + kx$ ، فاز موج گفته می‌شود. چون شکل موج در هنگام انتشار، تغییر نمی‌کند، فاز آن هم با گذشت زمان و انتشار موج، ثابت می‌ماند.

## تمرین ۲-۴

نشان دهید که در تابع‌های  $u = A \sin(\omega t - kx)$  و  $u = A \sin(\omega t + kx)$  به ترتیب سرعت‌های انتشار موج مثبت و منفی است، یعنی این تابع‌ها، موج‌هایی را نشان می‌دهند که در جهت محور  $x$  و در خلاف جهت آن منتشر می‌شوند.

### تمرین ۳-۴

نقش یک موج را در لحظه‌ای مانند شکل ۴-۸ در نظر بگیرید. نشان دهید نقاطی که وضعیت نوسانی یکسان در هر لحظه دارند دارای اختلاف فاز  $2n\pi$  هستند که  $n = 0, 1, \dots$  و نقاطی که وضعیت نوسانی قرینه دارند دارای اختلاف فاز  $\pi(2m - 1)$  هستند که  $m = 1, 2, \dots$ .

### مثال ۴-۴

با دیافازونی به بسامد  $50 \text{ Hz}$  سر طناب کشیده شده‌ای را به نوسان درمی‌آوریم. دامنه نوسان‌ها  $5 \text{ mm}$  در راستای محور  $y$  و سرعت انتشار موج در طناب برابر  $100 \text{ m/s}$  و نوسان‌ها در جهت مثبت محور  $x$  منتشر می‌شود. الف) تابع موج ایجاد شده در طناب را بنویسید. ب) معادله نوسان نقطه  $M$  از طناب را که به فاصله  $25 \text{ cm}$  از سر طناب (نقطه  $O$ ) واقع است بنویسید.

پاسخ

الف) با استفاده از رابطه‌های  $\omega = 2\pi f$ ،  $\lambda = \frac{v}{f}$  و  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  داریم:

$$\omega = 2\pi f = 100\pi \text{ rad/s}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{100}{50} = 2 \text{ m}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{2} = \pi \text{ rad/m}$$

با استفاده از رابطه ۴-۱۲ داریم:

$$u_y = A \sin(\omega t - kx)$$

$$u_y = 5 \times 10^{-3} \sin(100\pi t - \pi x)$$

ب) برای نقطه مزبور داریم:

$$x = 0.25 \text{ m} = \frac{1}{4} \text{ m}$$

با قرار دادن مقدار  $x$  در تابع موج، نتیجه می شود :

$$u_M = 5 \times 10^{-3} \sin(100\pi t - \frac{\pi}{4})$$

## تمرین ۴-۴

چشمه موجی نوسان هایی با بسامد  $200 \text{ Hz}$  و دامنه  $5 \text{ cm}$  در یک محیط کشسان و در راستای محور  $y$  انجام می دهد. اگر این نوسان ها در خلاف جهت محور  $x$  و با سرعت  $10 \text{ m/s}$  در این محیط منتشر شوند :

الف) طول موج و عدد موج را محاسبه کنید.

ب) تابع این موج را بنویسید.

پ) کمترین فاصله نقطه  $M$  از چشمه موج چه اندازه باشد تا با چشمه موج در فاز مخالف قرار گیرد.

**فاصله دو نقطه محیط از یکدیگر :** محیطی را در نظر بگیرید که در آن موجی در حال انتشار است. معادله نوسان دو نقطه  $A$  و  $B$  از این محیط که در یک جهت انتشار موج و به فاصله  $x_A$  و  $x_B$  از مبدأ مختصات واقع اند، با توجه به رابطه ۴-۱۲، به صورت زیر است:

$$u_A = A \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x_A)$$

$$u_B = A \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x_B)$$

$$|\Delta\phi| = \frac{2\pi}{\lambda} |x_B - x_A|$$

اختلاف فاز این دو نقطه برابر است با :

اگر « $x_B - x_A$ » را با  $\Delta x$  نشان دهیم، داریم :

$$|\Delta\phi| = \frac{2\pi}{\lambda} |\Delta x| = k |\Delta x| \quad (15-4)$$

از رابطه ۴-۱۵ با معلوم بودن اختلاف فاز دو نقطه محیط که در یک جهت انتشار موج اند، می توان فاصله دو نقطه را از یکدیگر (یعنی  $\Delta x$ ) محاسبه کرد.

رابطه ۴-۱۵ نشان می‌دهد که اختلاف فاز دو نقطه محیط که به فاصله  $\Delta x = 1\text{ m}$  از یکدیگر و در یک جهت انتشار موج‌اند، برابر است با :

$$\Delta x = 1\text{ m}$$

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} = k \quad (4-16)$$

رابطه ۴-۱۶ را می‌توان تعریفی برای عدد موج دانست و گفت : عدد موج برابر اختلاف فاز دو نقطه محیط است که به فاصله یک متر از یکدیگر قرار دارند.

### مثال ۴-۵

موجی در یک محیط، در حال انتشار است. معادله نوسانی نقطه‌های A و B از این محیط، در SI، به صورت  $u_A = 0.02 \sin(50\pi t - 0.4\pi)$  و  $u_B = 0.02 \sin(50\pi t - 0.7\pi)$  است. اگر موج از نقطه A به نقطه B برود، کمترین فاصله دو نقطه را از یکدیگر به دست آورید. سرعت انتشار موج  $20\text{ m/s}$  است.

پاسخ

ابتدا بسامد نوسان‌ها و سپس طول موج را محاسبه می‌کنیم :

$$\omega = 2\pi f$$

$$2\pi f = 50\pi$$

$$f = 25\text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{20}{25} = 0.8\text{ m} = 80\text{ cm}$$

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

اکنون اندازه اختلاف فاز دو نقطه را محاسبه می‌کنیم :

$$\Delta \varphi = |\varphi_B - \varphi_A|$$

$$\Delta \varphi = 0.7\pi - 0.4\pi = 0.3\pi\text{ rad}$$

$$\frac{3\pi}{10} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x = \frac{2\pi}{80} \Delta x$$

با استفاده از رابطه ۴-۱۵ داریم :

$$\Delta x = AB = 12\text{ cm}$$

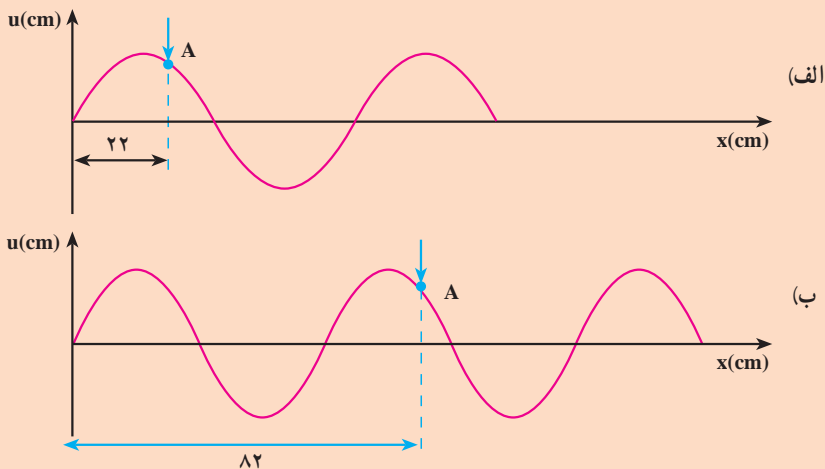
## فعالیت ۴-۴

با استدلال توضیح دهید که چرا در مثال ۴-۵،  $\Delta x$  کمترین فاصله دو نقطه از محیط است که در یک جهت انتشار موج واقع اند.

## تمرین ۴-۵

شکل های ۴-۱۴ - الف و ب، نمودار یک موج را در دو لحظه  $t_1$  و  $t_2$  نشان می دهد که در امتداد محور  $x$  منتشر می شود. علامت پیکان، یک نقطه از موج را این دو لحظه نشان می دهد. با فرض اینکه محور قائم لزوماً محور  $y$  نیست، مطلوب است:

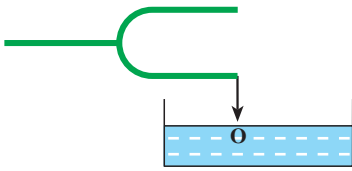
الف) این موج طولی است یا عرضی و عدد موج آن چه اندازه است؟  
 ب) اگر بسامد نوسان ها  $25 \text{ Hz}$  باشد،  $\Delta t = t_2 - t_1$  چند ثانیه است؟



شکل ۴-۱۴

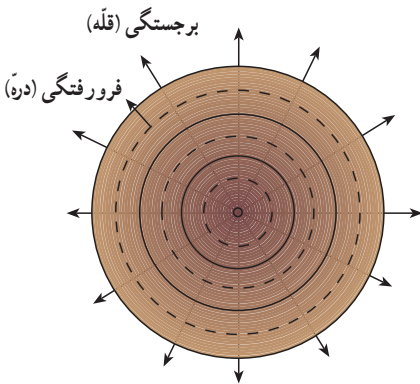
#### ۴-۴- انتشار موج در دو و سه بُعد

اگر مطابق شکل ۴-۱۵ به کمک یک سوزنی که به انتهای یک شاخه دیاپازون نصب شده است، ضربه‌هایی را در راستای قائم بر سطح آب درون تشتک وارد کنیم، موج‌های ایجاد شده به صورت دایره‌هایی به مرکز چشمه 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 جبهه موج می‌گوییم و آن را چنین تعریف می‌کنیم: جبهه موج مکان هندسی نقطه‌هایی از محیط است که در آن نقطه‌ها تابع موج دارای فاز یکسانی است. بنابراین، اختلاف فاز نقطه‌های واقع بر یک جبهه موج همواره برابر صفر است.

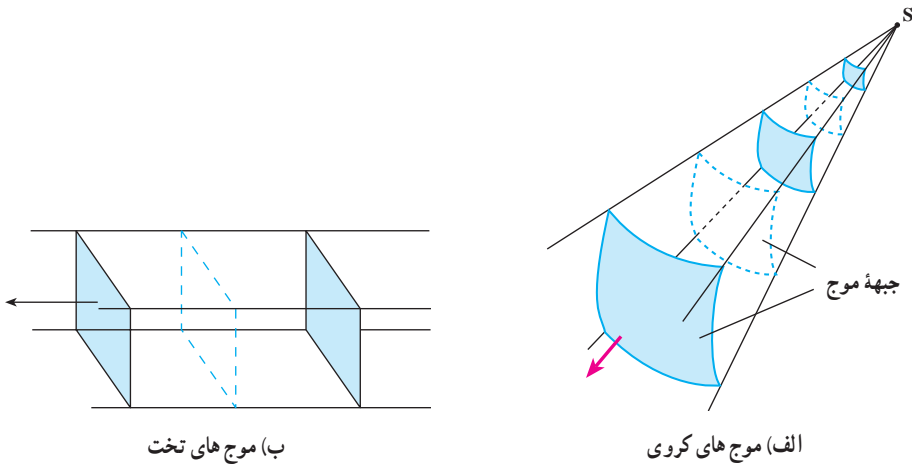


شکل ۴-۱۶

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 چشمه موج نقطه‌ای را در یک محیط همسانگرد سه بُعدی قرار دهیم (مثلاً بلندگوی کوچکی در هوای درون اتاق)، جبهه موج به صورت کره‌هایی خواهد بود که مرکز همه آنها، چشمه موج است و از چشمه 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 چشمه موج نقطه‌ای S گسیل می‌شوند نشان می‌دهد.

در فاصله بسیار دور از یک چشمه موج نقطه‌ای، قسمت‌های کوچکی از جبهه موج‌های کروی، همان گونه 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:** موج ها با خود انرژی را از نقطه ای به نقطه دیگر منتقل می کنند. اگر یک سر طنابی در دست شما باشد و از سر دیگر آن موجی به طرف شما منتشر شود، وقتی موج به دست شما می رسد، ضربه موج می خواهد 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 دامنه  $A$  و بسامد  $f$  در طناب بلند و کشیده شده ای پیش می رود، همراه با پیشروی موج، انرژی نیز در طناب پیش می رود. توان انتقال انرژی از هر نقطه طناب تابعی از زمان است و با گذشت زمان تغییر می کند. مقدار متوسط توان انتقال انرژی از هر نقطه طناب در مدت زمان یک دوره ( $T$ ) از رابطه زیر به دست می آید:

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

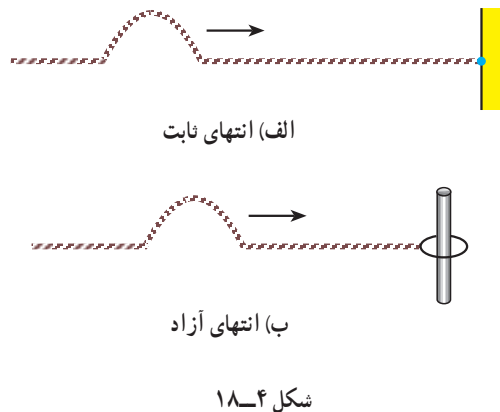
در رابطه ۱۷-۴،  $\mu$ ، جرم واحد طول طناب و  $v$  سرعت انتشار موج در طناب است. اینکه مقدار متوسط توان انتقال انرژی از هر نقطه طناب با مجذور دامنه و مجذور بسامد موج متناسب است، در مورد انتشار موج سینوسی در سایر محیط ها نیز درست است (مثلاً انتشار امواج سینوسی روی سطح آب یا انتشار امواج صوتی سینوسی در هوا).

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

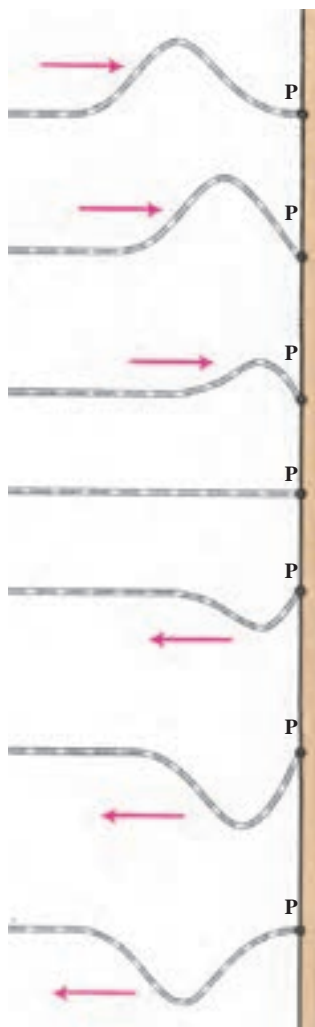


به انتهای محیط، یعنی مرز این محیط با محیط دیگر، می‌رسد چه پدیده‌ای رخ می‌دهد؟  
 مقداری از انرژی این موج از مرز مشترک دو محیط عبور می‌کند و وارد محیط دوم می‌شود و  
 بقیه آن از مرز مشترک بازتاب شده و به محیط اول برمی‌گردد.  
 برای بررسی پدیده بازتاب، باید، اولاً فرض کنیم که تمام انرژی موج از مرز مشترک 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.



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

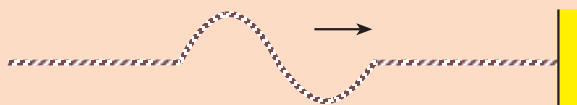


پایین وارد می‌کند. این درست مانند آن است که انتهای طناب را با دست گرفته و رو به پایین بکشیم و در آن تپی رو به پایین ایجاد کنیم. در واقع در این بازتاب، تپ مانند یک چشمه موج عمل می‌کند و یک تپ در خلاف جهت، تپ تابشی (فروودی) در طناب ایجاد می‌کند که برجستگی را به فرو رفتگی و فرو رفتگی را به برجستگی تبدیل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

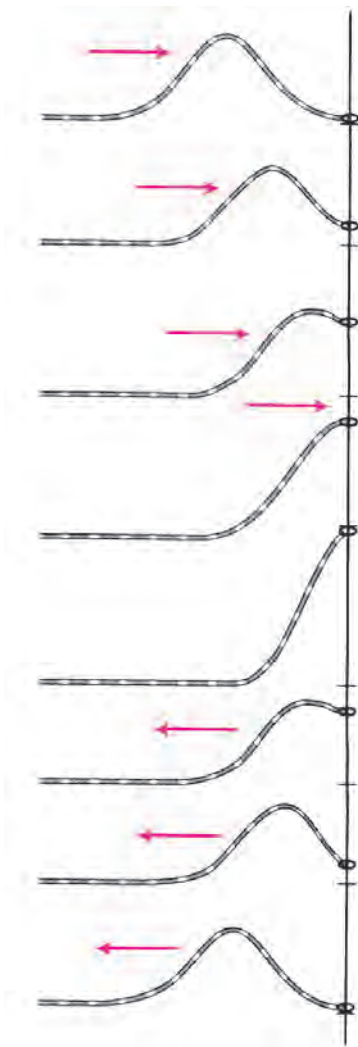
شکل ۴-۱۹- انتهای طناب ثابت است.

### 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 پُرس 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 :



شکل ۴-۲۳

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

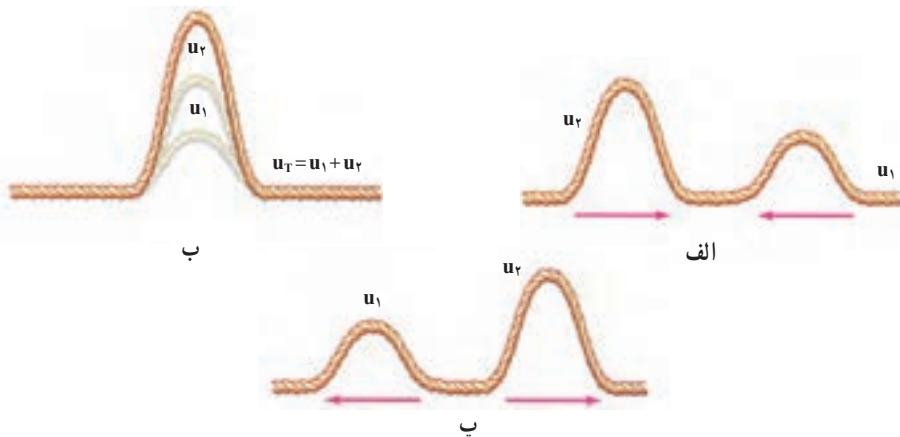
ذره ای از محیط که در آن نقطه است، برابر برآیند جابه جایی های حاصل از هر یک از موج ها است.

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

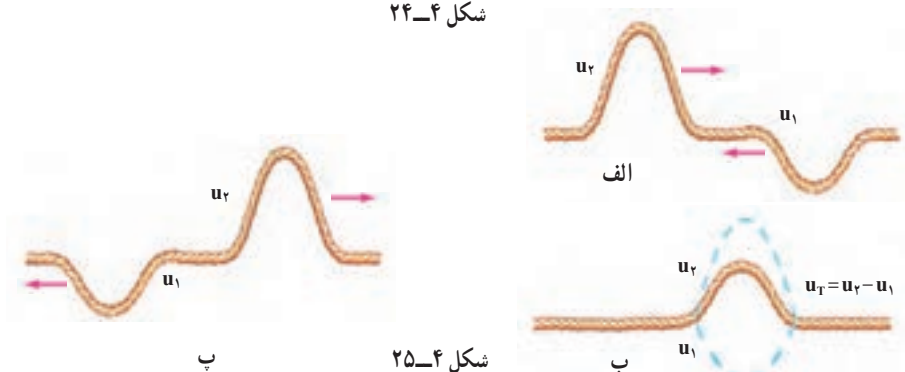
(۴-۱۸)

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

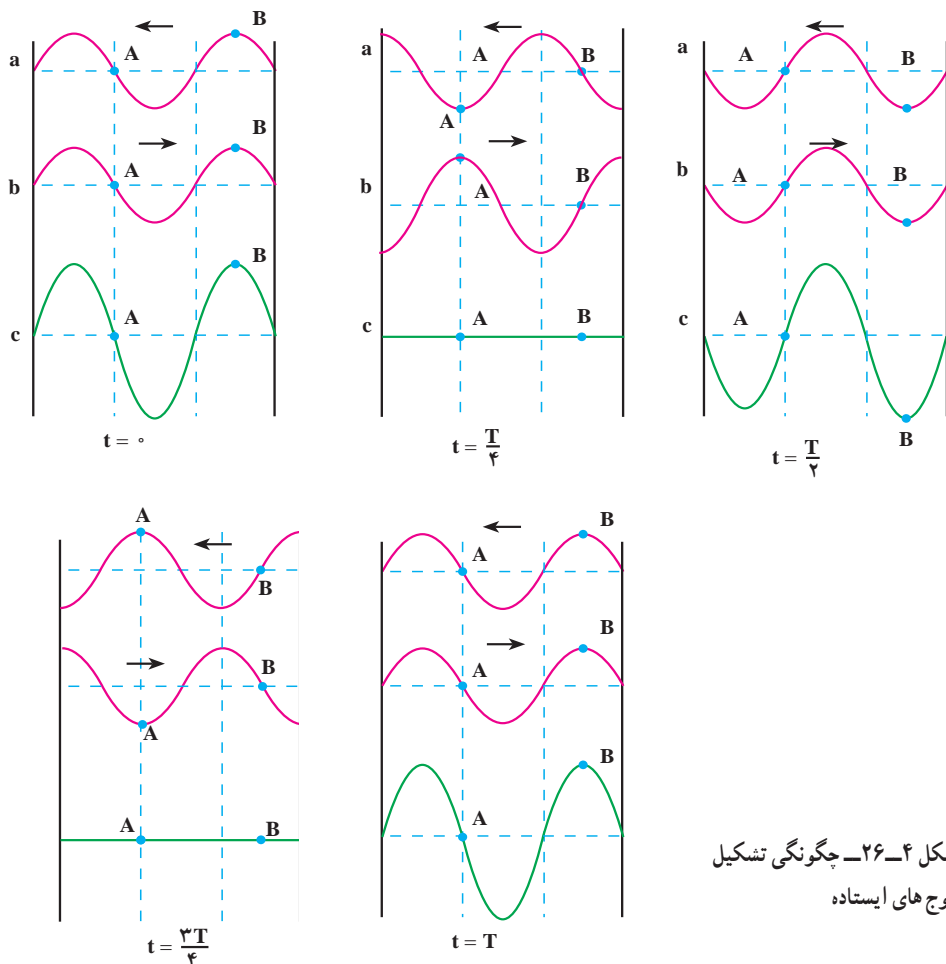


شکل ۲۵-۴

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 جابه‌جایی‌های 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 روی طناب منتشر می‌شود با a و موجی را که از چپ به راست 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.



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.

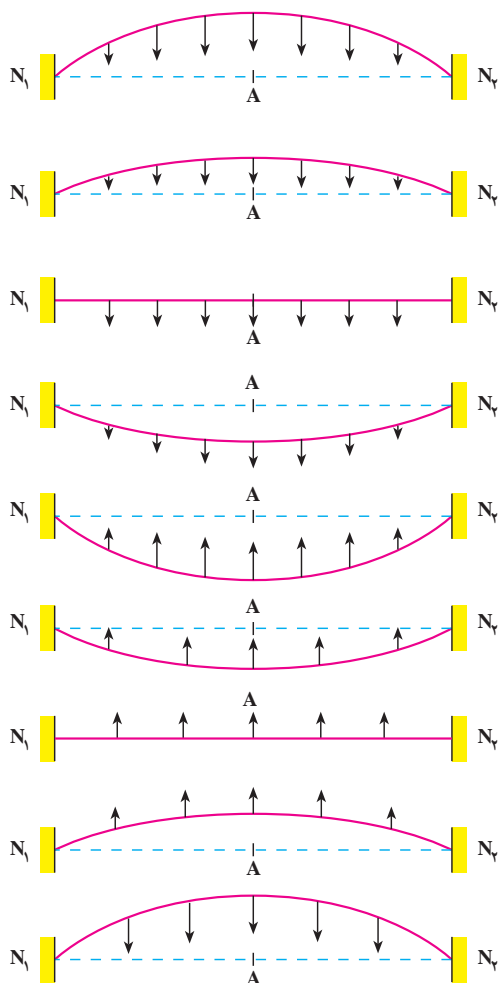
به بعضی نقطه‌های دیگر طناب نیز در هر لحظه دو موج می‌رسد، با این تفاوت که در این نقطه‌ها برهم نهی به گونه‌ای است که باعث می‌شود موج برآیند، با بیشینه دامنه نوسان کند. به این نقطه‌ها شکم، یا پادگره، می‌گویند و آنها را با A نشان می‌دهند. جای شکم‌ها نیز، مانند گره‌ها، ثابت است. در حالت‌های مختلف شکل ۲۶-۴ 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 دیاپازون 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. در



شکل ۲۷-۴

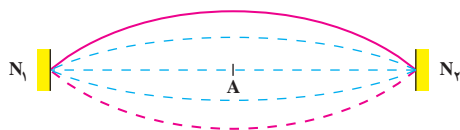
این کتاب تنها وضعیتی که دو سر طناب ثابت است، بررسی می‌شود. در این بررسی، فرض شده است که تعداد گره‌ها و شکم‌ها در طول طناب کمترین تعداد ممکن باشد.

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  $N_1AN_2$ ، 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

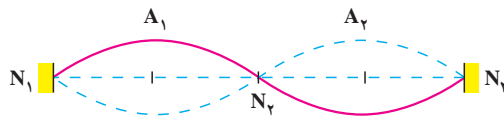
اگر بسامد نوسان  $f$  و سرعت انتشار موج در طناب  $v$  باشد، با استفاده از رابطه ۶-۴ خواهیم داشت:

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

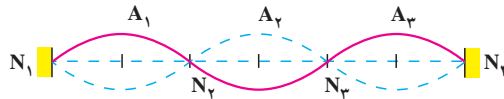


$$f_1 = \frac{v}{2L} \quad (20-4)$$

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 ۲۰-۴ 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.

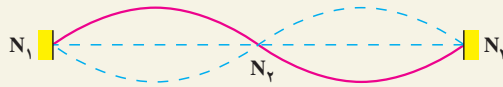
پاسخ

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:

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

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

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



شکل ۴-۳۱

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

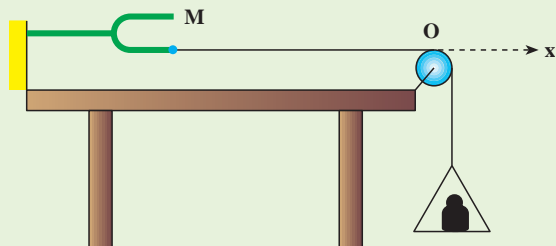
$$60/6 = \frac{240}{f} \Rightarrow f = 400\text{ Hz}$$

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، دیافازونی با نوسان پایدار (مانند آنچه که پیشتر توضیح داده شد)، موجود است، آزمایش زیر را انجام دهید و موج ایستاده را در طناب مشاهده کنید.

مطابق شکل ۳۲-۴ یک سر طناب نازکی را به دیاپازون 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 دیاپازون 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 ۳۲-۴

کردن دیاپازونی 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

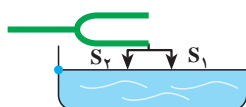
در بخش قبل، برهم نهی دو موج کاملاً یکسان را در طناب یا تار بررسی کردیم. در این بخش به بررسی برهم نهی موج‌هایی می‌پردازیم که در دو بُعد، مثلاً در سطح آب، منتشر می‌شوند.



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

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

شکل ۳۳-۴

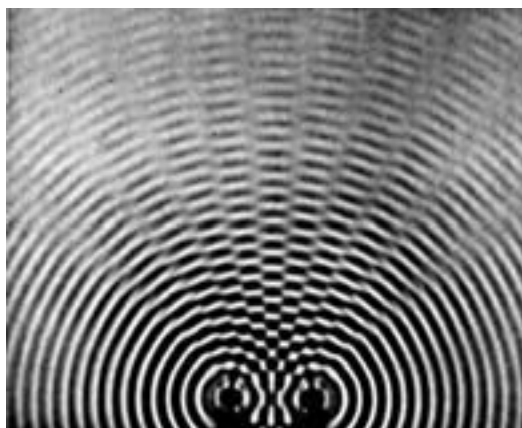


شکل ۳۴-۴

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

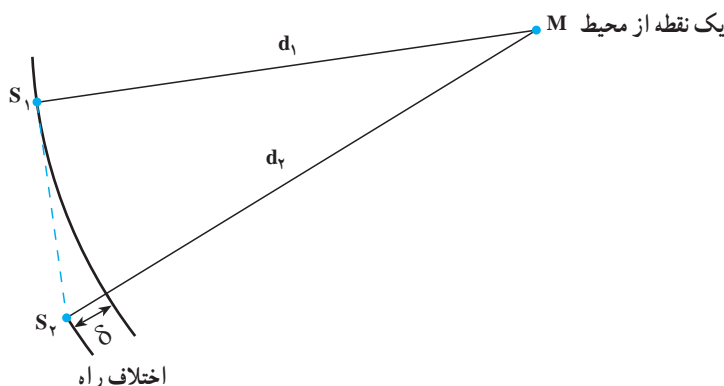
دیپازون را به نوسان درآوریم، موج‌های دایره‌ای حاصل از هریک از دو چشمه  $S_1$  و  $S_2$  در سطح آب منتشر می‌شوند. در نتیجه به هر ذره آب که در سطح آب تشکک قرار دارد، هم‌زمان دو موج می‌رسد. بنابراین وضعیت نوسانی ذره‌های آب، حاصل برهم‌نهی دو موجی است که با هم به هر ذره می‌رسند. در اینجا هم مانند تشکیل موج‌های 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 برهم‌نهی 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 برهم‌نهی ویرانگری با هم خواهند داشت.

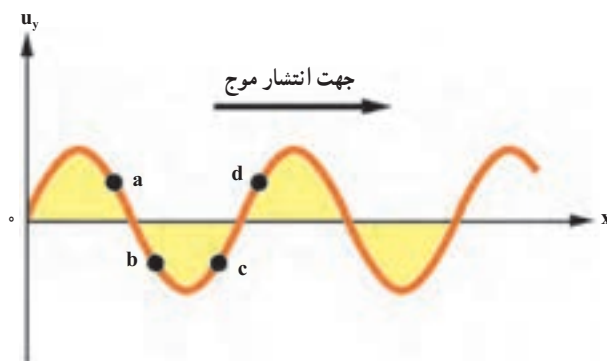
## تمرین‌های فصل چهارم

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.

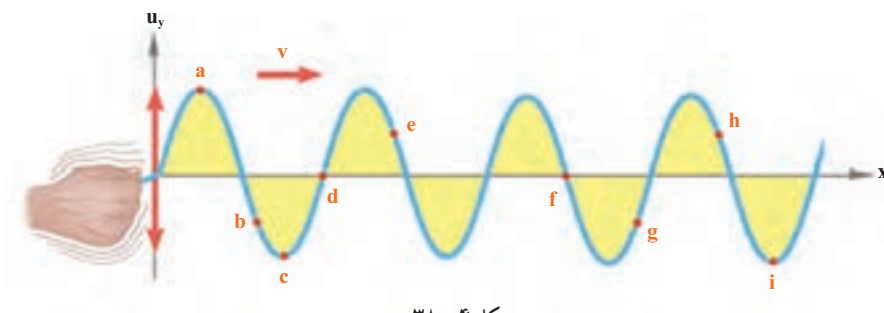
۳- شکل ۴-۳۷ نقش موجی<sup>۱</sup> را در یک لحظه معین  $t$  نشان می‌دهد که در جهت مثبت محور  $x$  در طول طناب تحت کششی حرکت می‌کند. چهار جزء طناب با حروف در آن نقطه‌ها مشخص شده‌اند. برای هر یک از این جزء‌ها معین کنید که آیا در لحظه معین  $t$ ، آن جزء به بالا حرکت می‌کند یا پایین، یا به‌طور لحظه‌ای ساکن است.

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



شکل ۴-۳۷

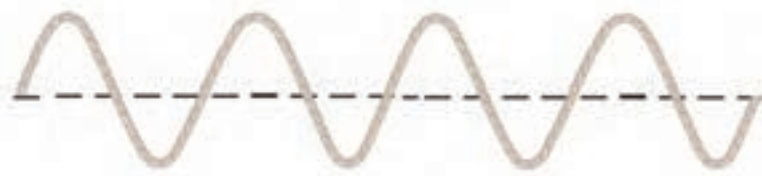
- ۴- شکل ۳۸-۴ موجی عرضی را نشان می‌دهد که در جهت مثبت محور  $x$  در امتداد طناب تحت کششی در حال انتشار است. روی این شکل چند نقطه از طناب با حروف مشخص شده است.
- الف) نقاط هم فاز را بنویسید.
- ب) نقاط با فاز مخالف را بنویسید.
- پ) شتاب نوسانی در کدام نقطه‌ها صفر است؟
- ت) جهت سرعت نوسانی کدامیک از نقطه‌ها 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  $10 \text{ m/s}$  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.

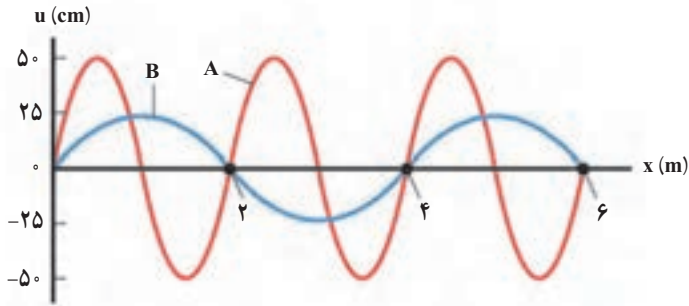
الف) با توجه به اطلاعات روی نمودار، طول موج هر کدام از موج‌ها را پیدا کنید.

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:

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

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

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 پیانو به طول  $0.8 \text{ m}$  و نیرو کشش آن  $432 \text{ N}$  است. این سیم به گونه ای به نوسان در می آید که در طول آن، دو شکم تشکیل می شود؛ بسامد صوتی که ایجاد می شود، محاسبه کنید. بسامد اصلی این سیم چند هرتز است؟

۱۴- در سطح آب درون یک تشتک دو چشمه موج،  $S_1$  و  $S_2$ ، ارتعاش هایی با بسامد  $20 \text{ Hz}$  ایجاد می کنند. 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 می رسند، 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 می آید.

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. ( $\pi^2 \approx 10$ )



صوت



۵

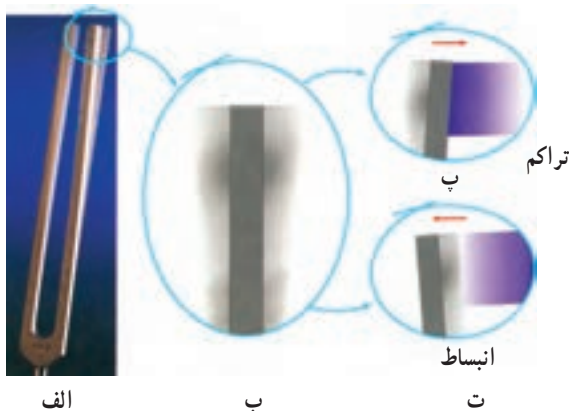
فصل

## صوت

### ۵-۱- موج صوتی

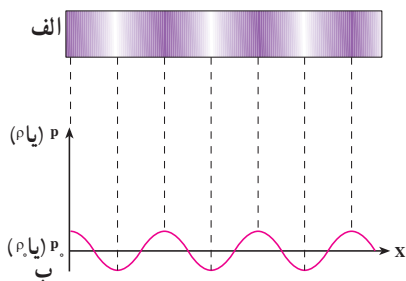
یکی از مهم‌ترین موج‌هایی که ما در زندگی روزمره با آن سروکار داریم موج صوتی است. برای مثال، از طریق این موج‌ها با یکدیگر گفتگو می‌کنیم، با به صدا در آوردن بوق ماشین، به عابری که از خیابان عبور می‌کند هشدار می‌دهیم و ...

برای اینکه بدانیم موج‌های صوتی چگونه ایجاد می‌شوند فرایند تولید صوت به وسیله یک دیافازون را تشریح می‌کنیم. یک دیافازون را مطابق شکل ۵-۱ الف و ب در نظر بگیرید قبل از ارتعاش دیافازون هوای مجاور آن در حال تعادل است و فشار و چگالی آن در همه جا ثابت و به ترتیب برابر  $P_0$  و  $\rho_0$  است. اکنون دیافازون را مرتعش می‌کنیم. هنگامی که شاخه آن مطابق شکل ۵-۱ ب به طرف راست حرکت می‌کند، لایه هوای مجاور خود را متراکم می‌کند و چگالی و فشار آن را نسبت به حالت تعادل افزایش می‌دهد که این لایه متراکم نیز به نوبه خود لایه مجاورش را متراکم می‌کند.

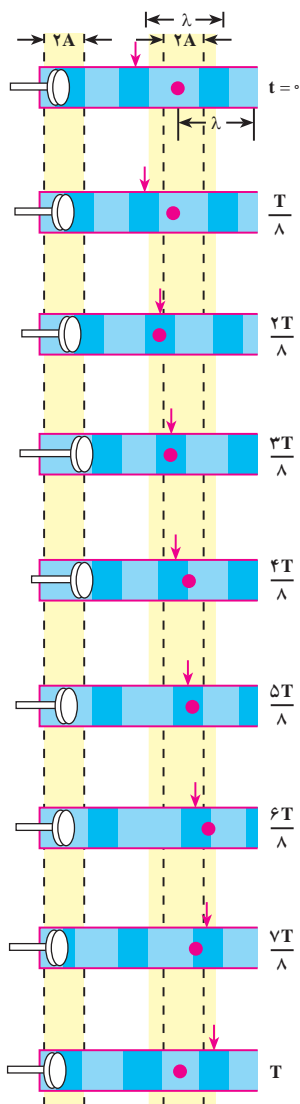


شکل ۵-۱

به این ترتیب یک آشفتگی یا تب ایجاد می‌شود که در آن فشار و چگالی بیشتر از حالت تعادل است. این تب تراکمی (پرفشار) در هوا منتشر می‌شود. هنگامی که شاخه دیافازون برمی‌گردد، همان‌طور که در شکل ۵-۱ ت می‌بینید، لایه هوای مجاور آن منبسط می‌شود و چگالی و فشار این لایه نسبت به حالت تعادل کاهش می‌یابد. این لایه انبساط یافته نیز به صورت یک تب انبساطی (کم فشار) در هوا منتشر



شکل ۲-۵



شکل ۳-۵

می‌شود. بنابراین هنگامی که دیافراگم مرتعش می‌شود تپ‌های متوالی تراکمی و انبساطی (شکل ۲-۵) در هوا منتشر می‌کند. نمودار تغییرات فشار (جگالی) برحسب فاصله در یک لحظه از زمان در شکل ۲-۵ ب نشان داده شده است.

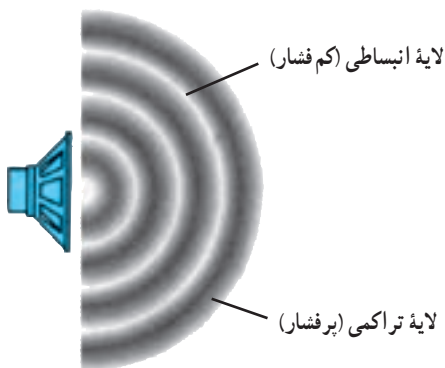
در مورد انتشار موج در طناب یا سطح آب دیدیم که آشفستگی یا تپ به صورت برجستگی و یا فرورفتگی بود. اما در حالت انتشار صوت در هوا، آشفستگی یا تپ به صورت لایه‌های تراکمی و انبساطی یا لایه‌های پرفشار و کم‌فشار است. همچنین، دیدیم که هنگام انتشار موج در محیط ذره‌های محیط منتقل نمی‌شوند، بلکه حول نقطه تعادل خود حرکت نوسانی انجام می‌دهند. مثلاً، در شکل ۴-۷ فصل چهارم دیدیم که اگر به یک نقطه از محیط نگاه کنیم، این نقطه (که با رنگ قرمز نشان داده شده است) در حین انتشار موج حول حالت تعادل خود نوسان می‌کند. ولی، اگر به یک نقطه از موج که با پیکان مشخص شده است نگاه کنیم، این نقطه با سرعت ثابت در محیط حرکت می‌کند.

در انتشار صوت نیز ذره‌های هوا منتقل نمی‌شوند بلکه حول نقطه تعادل خود نوسان می‌کنند. لایه‌های تراکمی و انبساطی نیز در اثر این نوسان‌ها به وجود می‌آید.

در شکل ۳-۵ انتشار یک موج صوتی در یک لوله، در بازه‌های زمانی  $\frac{T}{\lambda}$ ، نشان داده شده است. در این شکل یکی از ذره‌های هوا (محیط) با رنگ آبی مشخص شده است. این نقطه، در حین انتشار موج پس از یک نوسان کامل به محل اولیه خود برمی‌گردد. در حالی که اگر یک نقطه از موج را، مثلاً در ناحیه تراکم که در شکل ۳-۵ با پیکان مشخص شده است، در نظر بگیریم، می‌بینیم که با سرعت ثابت در هوا حرکت می‌کند، چون در انتشار صوت ذره‌های هوا در راستای انتشار نوسان می‌کنند. این موج‌ها طولی‌اند.

## فعالیت ۱-۵

مثال‌هایی از انتشار صوت در مایع‌ها و جامدها ذکر کنید.



شکل ۴-۵

هر جسم مرتعش در هوا، خود یک چشمه تولید موج‌های صوتی است. چشمه صوت ممکن است به سادگی یک دیابازون و یا به پیچیدگی حنجره انسان باشد. در هنگام صحبت در اثر ارتعاش تارهای صوتی در حنجره امواج صوتی در هوا ایجاد می‌شوند.

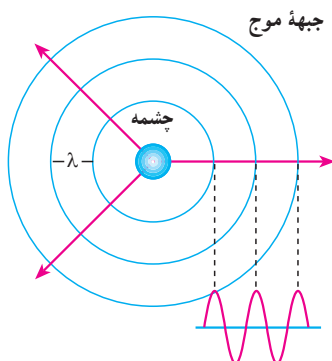
هنگامی که یک چشمه صوت مرتعش می‌شود، صوت ایجاد شده در تمام جهت‌ها منتشر می‌شوند. لایه‌های تراکمی (پرفشار) و انبساطی (کم فشار) یک

موج صوتی که از یک بلندگوی کوچک در هوا منتشر می‌شود در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.

## پرسش ۱-۵

مثال‌هایی ذکر کنید که نشان دهد امواج صوتی در هوا در تمام جهت‌ها منتشر

می‌شوند.



شکل ۵-۵

اگر یک چشمه صوت، صوت را به طور یکنواخت در تمام جهت‌ها گسیل کند، صوت به صورت موج کروی در فضا منتشر می‌شود. جبهه‌های موج این امواج به صورت کره‌هایی به مرکز چشمه صوت در شکل ۵-۵ نشان داده شده‌اند. جبهه‌های موج در این شکل نقاط پرفشار را نشان می‌دهند.

## محدوده شنوایی انسان

انسان نمی تواند هر موج صوتی با هر بسامدی را بشنود. بلکه تنها می تواند موج هایی را که بسامد آن ها بین ۲۰ تا ۲۰/۰۰۰ هرتز است، بشنود. بعضی حیوان ها مانند سگ ها گستره وسیع تری از بسامدها (۱۵ تا ۵۰/۰۰۰ هرتز) را می شنوند. خفاش ها تا بسامد ۱۰۰/۰۰۰ هرتز را نیز می شنوند. موج های صوتی با بسامد پایین تر از ۲۰ Hz را فروصوت و بالاتر از ۲۰/۰۰۰ Hz را فراصوت می نامند. موج های فراصوت کاربردهای فراوانی در پزشکی و صنعت دارند.

## ۵-۲- سرعت صوت

در فصل چهارم دیدیم که سرعت انتشار موج در یک محیط (طناب) به ویژگی های محیط انتشار موج (کشش طناب و جرم واحد طول آن) بستگی دارد سرعت صوت نیز به ویژگی های فیزیکی محیطی که صوت در آن منتشر می شود وابسته است. صوت علاوه بر گازها در مایعات و جامدات نیز منتشر می شود. سرعت انتشار صوت در مواد مختلف در جدول ۵-۱ داده شده است. چنانکه می بینید هرچه ماده متراکم تر باشد، سرعت انتشار صوت در آن بیشتر است. زیرا در ماده متراکم مولکول ها به یکدیگر نزدیک ترند و تپ ایجاد شده می تواند در زمان کمتری به نقطه مجاور خود منتقل شود.

جدول ۵-۱- سرعت صوت در ماده های مختلف\*

سرعت m/s	دما °C		
۳۱۶	۰	اکسیژن	گازها
۳۳۱	۰	هوا	
۳۴۳	۲۰	هوا	
۳۳۴	۰	نیتروژن	
۹۶۵	۰	هلیوم	
۱۴۵۰	۲۵	جیوه	مایع ها
۱۴۹۸	۲۵	آب	
۱۵۳۱	۲۵	آب دریا	
۲۱۰۰	—	سرب	جامد ها
۳۰۰۰	—	طلا	
۵۰۰۰-۶۰۰۰	—	آهن	
۵۰۰۰-۶۰۰۰	—	شیشه	

\* در مواردی که تغییر سرعت با دما قابل ملاحظه نیست، دمای مربوط به اندازه گیری در جدول ذکر نشده است.

می‌توان نشان داد که سرعت انتشار صوت در گازها از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad (۱-۵)$$

که در آن  $T$  دمای گاز برحسب کلوین،  $R$  ثابت عمومی گازها و  $M$  جرم مولکولی گاز است.  $\gamma$  نیز ضریب اتمیسیته گاز نام دارد که به صورت نسبت ظرفیت گرمایی مولی گاز در فشار ثابت ( $C_p$ ) به ظرفیت گرمایی مولی آن در حجم ثابت ( $C_v$ ) تعریف می‌شود. مقادیر  $C_p$  و  $C_v$  و  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  برای گازهای مختلف در جدول ۲-۵ داده شده است.

جدول ۲-۵- ظرفیت گرمایی مولی در حجم و فشار ثابت،  $\gamma$  و  $M$

$M$ g/mol	$\gamma$	$C_p$ J/mol.K	$C_v$ J/mol.K	گاز	
۴	۱/۶۷	۲۰/۸	۱۲/۵	He	تک اتمی
۴۰	۱/۶۷	۲۰/۸	۱۲/۵	Ar	
۲	۱/۴۱	۲۸/۸	۲۰/۴	H <sub>۲</sub>	دو اتمی
۲۸	۱/۴۰	۲۹/۱	۲۰/۸	N <sub>۲</sub>	
۳۲	۱/۳۹	۲۹/۴	۲۱/۱	O <sub>۲</sub>	

### مثال ۱-۵

سرعت انتشار صوت را در هوا و در دمای  $۲۷^\circ\text{C}$  به دست آورید. (برای هوا

$$R \approx ۸/۳ \text{ J/mol.K} \text{ و } \gamma = ۱/۴, M = ۲۹ \text{ g/mol}$$

پاسخ

با استفاده از رابطه ۱-۵ داریم :

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} = \sqrt{\frac{۱/۴(۸/۳)(۲۷۳+۲۷)}{۲۹ \times ۱۰^{-۳}}} \approx ۳۴۷ \text{ m/s}$$

## تمرین ۵-۱

با استفاده از اطلاعات جدول ۵-۲، سرعت صوت را در گازهای اکسیژن، نیتروژن و هلیوم در دمای صفر درجه سلسیوس محاسبه و نتیجه به دست آمده را با مقادیر جدول ۱-۱ مقایسه کنید.

## مطالعه آزاد

### کاربرد موج‌های صوتی

برای تعیین محل جسم‌هایی که زیر آب قرار دارند، از بازتاب موج‌های صوتی استفاده می‌شود. این روش که به نام روش پژواک تپ معروف است کاربردهای پزشکی نیز دارد.

اساس این روش آن است که یک موج صوتی را به عمق آب می‌فرستند و با یک آشکارساز، بازتاب یا پژواک آن را اندکی بعد دریافت می‌کنند. سپس زمان رفت و برگشت موج را به دقت اندازه می‌گیرند و از روی آن فاصله جسمی را که موج را بازتابانده است تعیین می‌کنند. (سرعت صوت در آب مشخص است) با این روش عمق دریاها، محل صخره‌های زیرآب، محل کشتی‌های غرق شده، زیردریایی‌ها و حتی محل تجمع گروهی از ماهی‌ها را که باهم حرکت می‌کنند می‌توان تعیین کرد.

با این روش می‌توان ساختار داخلی زمین را نیز مشخص کرد. برای این منظور یک انفجار زیرزمینی ایجاد می‌کنند و با آشکارسازی بازتاب موج‌های تولید شده در اثر انفجار، می‌توان ساختار نواحی مختلف زمین را تعیین کرد. این روش در اکتشاف نفت و مواد معدنی به کار می‌رود.

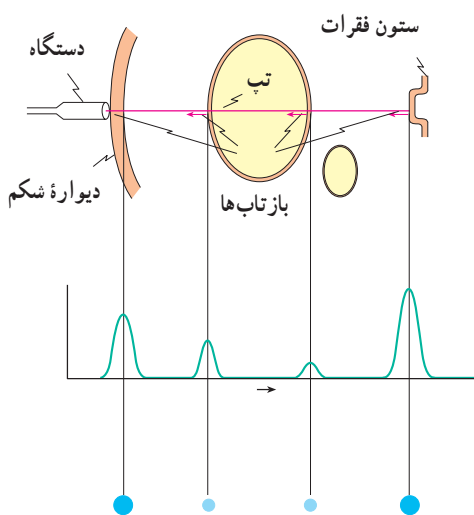
در کاربردهای بالا اغلب از بسامدهای بیش از  $20\text{ kHz}$  که در ناحیه فراصوتی قرار دارد استفاده می‌شود، زیرا این موج‌ها علاوه بر این که قابل شنیدن نیستند دارای طول موج کوتاه‌اند و اجسام با ابعاد کوچک را می‌توان با استفاده از آنها آشکار کرد. در پزشکی هم از این موج‌ها برای از بین بردن بافت‌های ناخواسته و یا اجسام نامطلوب در بدن (مانند غده‌ها و یا سنگ‌های کلیه) استفاده می‌شود. این موج‌ها بر روی

ماده ناخواسته متمرکز می‌شوند. برای مثال تابش متمرکز این موج‌ها بر روی سنگ کلیه باعث می‌شود که سنگ به پاره‌های کوچک شکسته شده و به تدریج از بدن دفع گردند. بدون اینکه احتیاجی به عمل جراحی باشد.

از موج‌های فراصوتی همچنین در تشخیص بیماری نیز استفاده می‌شود. بدین ترتیب که یک تب فراصوتی به داخل بدن بیمار فرستاده می‌شود. این تب از مرزها و فصل مشترک‌های بین اعضای داخل بدن بازتاب می‌یابد که با آشکارسازی آن می‌توان اطلاع لازم را در مورد بیماری عضو موردنظر کسب کرد. این روش برای تشخیص محل غده‌ها و سایر عوامل غیرعادی در بدن، عملکرد قلب و دریچه‌های آن، وضعیت

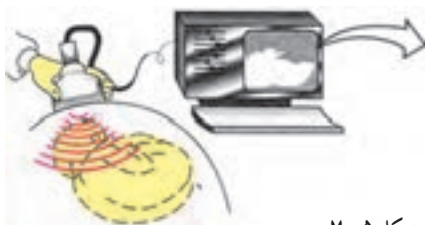
جنین، سنگ کلیه و غیره به کار می‌رود.

روش کار به این ترتیب است که با دستگاه خاصی، مانند بلندگو، تب الکتریکی را به ارتعاش‌های مکانیکی تبدیل می‌کنند و به این وسیله یک تب صوتی ایجاد می‌شود. بخشی از این تب از فصل مشترک بافت‌های مختلف در بدن بازتابیده می‌شود (شکل ۵-۶). آشکارسازی تب‌های بازتابیده، با همان دستگاه صورت می‌گیرد که موج‌های صوتی را به تب‌های الکتریکی تبدیل



شکل ۵-۶

می‌کند. تب‌ها را می‌توان روی یک مونیتور مشاهده کرد (شکل ۵-۷). تصویر یک جنین که با استفاده از فراصوت تهیه شده نیز در این شکل نشان داده شده است.



شکل ۵-۷





## ۵-۳- لوله‌های صوتی

پیش از این دیدیم که وقتی یک موج عرضی در طنابی که یک انتهای آن ثابت است ایجاد می‌کنیم، این موج از انتهای ثابت بازتابیده می‌شود و از برهم نهی موج‌های فرودی و بازتابی موج ایستاده تشکیل می‌شود. همچنین، در انتهای ثابت که جابه‌جایی طناب صفر است گره تشکیل می‌شود، ولی اگر انتهای طناب آزاد باشد در آنجا شکم ایجاد می‌شود.

با موج‌های طولی نیز می‌توان موج ایستاده تشکیل داد. این موج را می‌توان در یک فنر و یا یک ستون هوا (مثلاً هوای داخل یک لوله) ایجاد کرد. در این بخش، چگونگی ایجاد موج‌های ایستاده را در ستون هوای داخل یک لوله مورد بررسی قرار می‌دهیم. چنین لوله‌ای را لولهٔ صوتی می‌نامند.

هنگامی که در دهانهٔ لولهٔ صوتی، هوا می‌دمیم، در هوای داخل آن موج صوتی منتشر می‌شود. این موج از دو انتهای لوله بازتابیده می‌شود و از برهم نهی موج‌های فرودی و بازتابیده، موج ایستاده تشکیل می‌شود. حال اگر انتهای لوله بسته باشد، چون مولکول‌های هوا نمی‌توانند در این انتها نوسان طولی داشته باشند بنابراین در انتهای بسته گره ایجاد می‌شود. اگر، برعکس، انتهای لوله باز باشد مولکول‌ها می‌توانند آزادانه در آن نوسان کنند و در صورتی که قطر لوله در مقایسه با طول موج صوت کوچک باشد، در این انتها شکم تشکیل می‌شود. بسته به این که یک انتهای لولهٔ صوتی باز و انتهای دیگر بسته و یا این که هر دو انتهای آن باز باشد، دو حالت متفاوت به وجود می‌آید که به بررسی آنها می‌پردازیم:

**الف) یک انتهای لوله باز و انتهای دیگر آن بسته است.** در این حالت در انتهای باز شکم و در انتهای بسته گره تشکیل می‌شود. در ساده‌ترین حالت، مطابق شکل ۵-۸- الف فقط یک گره و شکم در داخل لوله تشکیل می‌شود (در این شکل موج‌های صوتی داخل لوله برای سهولت نمایش به صورت موج‌های عرضی نشان داده شده‌اند. بیشینهٔ دامنه در این شکل حالتی را نشان می‌دهد که در آن جابه‌جایی ذرات لایهٔ هوا بیشینه است) در این حالت طول لوله،  $L$ ، با فاصلهٔ گره تا شکم برابر است یعنی:

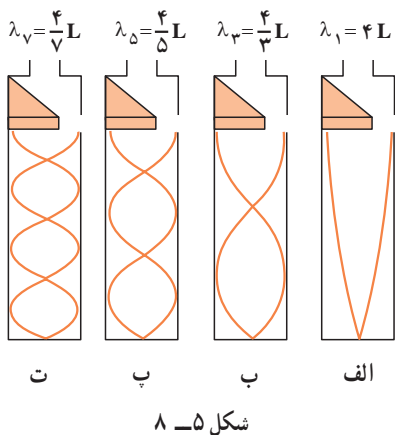
$$L = \frac{\lambda_1}{4} \quad (2-5)$$

و با طول موج صوت برابر است با:

$$\lambda_1 = 4L \quad (3-5)$$

اگر سرعت صوت در داخل لوله  $v$  باشد، بسامد این صوت،  $f_1$ ، از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L} \quad (4-5)$$



موج ایستاده ایجاد شده در این حالت، کمترین بسامد را دارد و صوت اصلی نامیده می شود. مضرب های درست این صوت را هماهنگ های صوت اصلی می نامند. همان طور که در تار مرتعش دیدیم، این هماهنگ ها هنگامی ایجاد می شوند که مطابق شکل ۵-۸ ب، ب، پ، ... تعداد بیشتری گره و شکم در لوله تشکیل می شود یعنی ممکن است در داخل لوله دو گره، سه گره، ...  $n$  گره تشکیل شود. در این صورت، همان گونه که در این شکل می بینید،

طول لوله به ترتیب برابر است با  $\frac{3}{4}\lambda_4$ ،  $\frac{5}{4}\lambda_5$ ، ...،  $\frac{\lambda_{2n-1}}{4}(2n-1)$  و در حالی که  $n$  گره در داخل لوله صوتی تشکیل می شود، طول موج مربوط به  $2n-1$  امین هماهنگ با رابطه زیر داده می شود:

$$\lambda_{2n-1} = \frac{4L}{2n-1} \quad \text{و} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5-5)$$

و بسامد این صوت برابر است با:

$$f_{2n-1} = \frac{(2n-1)v}{4L} = (2n-1)f_1 \quad \text{و} \quad n = 1, 2, \dots \quad (5-6)$$

ملاحظه می شود در لوله ای که یک انتهای آن بسته است فقط هماهنگ های فرد صوت اصلی ایجاد می شود. یعنی، بسامد امواج ایستاده در داخل این لوله به صورت  $f_1$ ،  $3f_1$ ،  $5f_1$  و ... است. این حالت ها نوسان های طبیعی هوای داخل لوله صوتی که یک انتهای آن بسته است به شمار می روند.

## مثال ۵-۲

در یک لوله صوتی که یک انتهای آن بسته است، می خواهیم یک صوت اصلی با بسامد  $340 \text{ Hz}$  ایجاد کنیم. (الف) طول لوله باید چقدر باشد. (ب) بسامد هماهنگ های سوم و پنجم را حساب کنید. سرعت صوت در هوا را  $340 \text{ m/s}$  فرض کنید.

پاسخ

(الف) با استفاده از رابطه  $v = \lambda f$  داریم:

$$\lambda_1 = \frac{v}{f_1} = \frac{340}{340} = 1 \text{ m}$$

در این صورت با استفاده از رابطه ۵-۲ طول لوله برابر است با :

$$L_1 = \frac{\lambda}{4} = 0.25 \text{ m}$$

(ب) با استفاده از رابطه ۵-۶ برای  $n=2$  و  $n=3$  داریم :

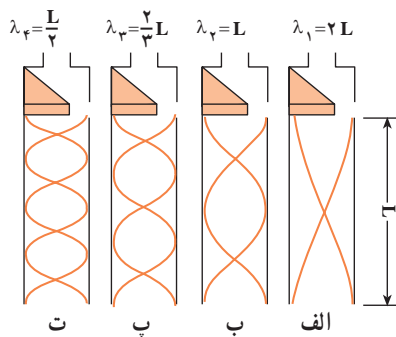
$$f_2 = (2 \times 2 - 1) 340 = 1020 \text{ Hz}$$

$$f_3 = (2 \times 3 - 1) \times 340 = 1700 \text{ Hz}$$

(ب) هر دو انتهای لوله باز است. در این حالت در هر دو انتها شکم تشکیل می‌شود. برای صوت اصلی، همان‌طور که در شکل ۵-۹ الف نشان داده شده است، دو شکم در دو انتها و یک گره در وسط لوله تشکیل می‌شود. در این حالت طول لوله برابر فاصله دو شکم است. در این صورت داریم :

$$L = \lambda_1 / 2 \quad (5-7)$$

یعنی، طول موج صوت برابر با  $\lambda = 2L$  است.



شکل ۵-۹

در نتیجه بسامد اصلی برابر است با :

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L} \quad (5-8)$$

هماهنگ‌های دیگر این صوت هنگامی پدیدار می‌شوند که مطابق شکل ۵-۹ ب، پ و ... در داخل

لوله دو گره  $(L = 4\frac{\lambda_2}{4})$ ، سه گره  $(L = 6\frac{\lambda_3}{4})$ ، ...،  $n$  گره  $(L = 2n\frac{\lambda_n}{4})$  تشکیل شود. طول موج صوت فرودی هنگامی که  $n$  گره تشکیل شده است، از رابطه زیر به دست می آید:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, \dots \quad (9-5)$$

و بسامد این صوت برابر است با:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n \frac{v}{2L} = nf_1 \quad (10-5)$$

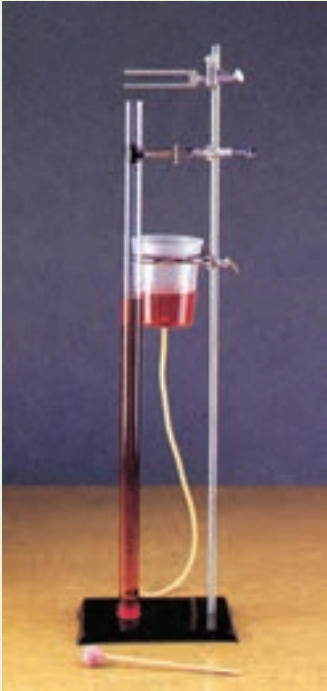
ملاحظه می کنید که تمام هماهنگ ها در لوله ای که هر دو انتهای آن باز است ایجاد می شود. در چنین لوله ای، بسامد نوسان های طبیعی هوای داخل آن به صورت  $f_1, 2f_1, 3f_1, \dots$  است.

## تمرین ۲-۵

بسامد صوت اصلی و هماهنگ های دوم و سوم را در یک لوله صوتی به طول  $1\text{ m}$  که هر دو انتهای آن باز است تعیین کنید. (سرعت صوت را در هوا  $340\text{ m/s}$  فرض کنید)

در قسمت قبل دیدیم که برای ایجاد موج های ایستاده، باید در دهانه لوله صوتی بدمیم. در واقع، از این طریق به راحتی نمی توان امواج ایستاده در لوله ایجاد کرد. روش مناسب و مؤثر برای انجام این کار این است که از پدیده تشدید استفاده کنیم. در فصل سوم با پدیده تشدید آشنا شدیم و دیدیم که اگر یک نوسانگر را با یک نیروی دوره ای به نوسان درآوریم، هنگامی که بسامد نیرو با بسامد طبیعی نوسانگر برابر باشد، تشدید رخ می دهد و در این حالت بیشترین انرژی ممکن به نوسانگر منتقل می شود. برای ایجاد موج های ایستاده در لوله صوتی نیز می توانیم از این روش استفاده کنیم و هوای داخل لوله را با اعمال یک نیروی دوره ای به آن، به نوسان درآوریم. برای این کار کافی است که یک دیافازون را در نزدیکی دهانه لوله به نوسان درآوریم. اگر بسامد نوسان این دیافازون با هریک از بسامدهای طبیعی لوله صوتی برابر باشد، تشدید رخ خواهد داد. بدین وسیله می توان موج ایستاده با بسامد موردنظر را در لوله صوتی ایجاد کرد.

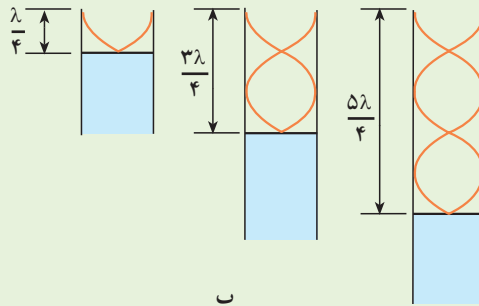
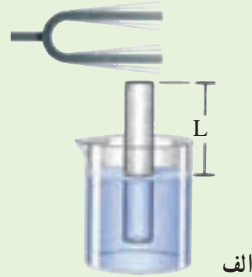
## فعالیت ۲-۵



ب

در شکل ۵-۱۰ الف و ب می‌توان با تغییر مکان لیوان یا لوله، طول لوله صوتی را تغییر داد.

با توجه به شکل پ توضیح دهید که در هریک از سه حالت شکل پ چگونه موج ایستاده تشکیل می‌شود؟



ب

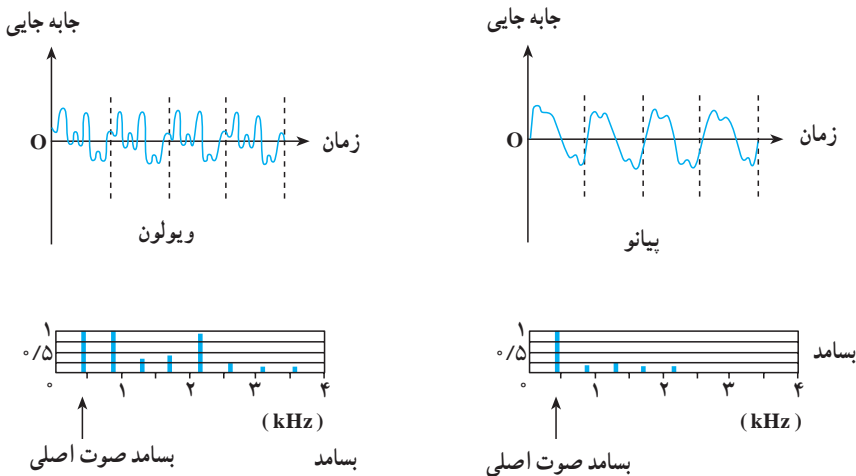
شکل ۵-۱۰

## فعالیت ۳-۵

با استفاده از یک لوله صوتی، آزمایشی را برای اندازه‌گیری سرعت صوت در هوا طراحی کنید.

## صوت‌های موسیقی

صوتی را که می‌شنویم به خصوصیت‌های گوش و ساز و کار شنوایی و نیز ویژگی‌های فیزیکی صوت بستگی دارد. معمولاً صوتی را که انسان با دستگاه شنوایی خود درک می‌کند برحسب سه مشخصهٔ بلندی، ارتفاع و طنین بیان می‌کنند. برای تعریف این مشخصه‌ها به بررسی صوتی که یک تار مرتعش تولید می‌کند، می‌پردازیم. هنگامی که یک تار را مرتعش می‌کنیم، تنها هماهنگ اول آن ایجاد نمی‌شود، بلکه هماهنگ‌های دیگر آن نیز به وجود می‌آیند و از برهم نهی این هماهنگ‌ها یک موج مرکب ایجاد می‌شود. آنچه که ما پس از مرتعش کردن یک تار می‌شنویم از این موج مرکب حاصل می‌شود. در شکل ۵-۱۱ نسبت موج صوتی حاصل از پیانو و ویولون نشان داده شده است. در این شکل نسبت دامنهٔ هماهنگ‌ها به دامنهٔ صوت اصلی نیز آمده است. در هر دو مورد بسامد صوت اصلی  $440$  هرتز است. ولی تعداد و دامنهٔ هماهنگ‌هایی که در ساختن این موج مرکب سهیم‌اند در این دو مورد متفاوت است. در نتیجه شکل موج مرکب حاصل با یکدیگر فرق می‌کنند. اکنون به توصیف مشخصه‌های صوت می‌پردازیم. طنین صوت به شکل موج مرکب بستگی دارد. یعنی طنین به نوع،



شکل ۵-۱۱

تعداد و دامنه هماهنگ‌هایی که ایجاد شده‌اند وابسته است. ارتفاع صوت با بسامد موج اصلی که موج مرکب از آن ساخته می‌شود تعیین می‌شود و بلندی صوت، همان‌طور که دیدیم، به شدت صوت و خصوصیت‌های شنوایی شنونده بستگی دارد.

اکنون به توصیف صوت‌های موسیقی می‌پردازیم. برای این منظور لازم است چند مفهوم را تعریف کنیم.

۱- صوت موسیقی یا نت، صوتی است که (مانند شکل ۵-۱۱) از ارتعاش‌های منظم تشکیل شده است و اثر خوشایندی بر گوش انسان دارد.

۲- فاصله موسیقی، نسبت بسامد دو نت را فاصله موسیقی می‌نامند. تجربه نشان می‌دهد که هر فاصله‌ای برای انسان خوشایند نیست.

۳- گام موسیقی، مجموعه‌ای از چند نت است که فاصله آنها برای گوش خوشایند است. گام‌های متفاوتی در موسیقی وجود دارد. اکنون به توصیف گام طبیعی (زارلن) می‌پردازیم.

گام طبیعی از هشت نت  $do_1, re, mi, fa, sol, la, si, do_2$  تشکیل شده است که فاصله آنها از یک نت مبنا ( $do_1$ ) که کمترین بسامد را دارد، به صورت زیر است:

$$\frac{do_2}{do_1} = 2 \text{ و } \frac{re}{do_1} = \frac{9}{8}, \frac{mi}{do_1} = \frac{5}{4}, \frac{fa}{do_1} = \frac{4}{3}, \frac{sol}{do_1} = \frac{3}{2}, \frac{la}{do_1} = \frac{5}{3}, \frac{si}{do_1} = \frac{15}{8}$$

بسامد  $do_2$  دو برابر بسامد  $do_1$  است و اکتاو  $do_1$  نامیده می‌شود. اگر  $do_2$  را نت مبنا بگیریم، با رعایت فاصله‌های فوق می‌توان گام دوم را ساخت. به همین ترتیب می‌توان بر مبنای  $do_2$  که اکتاو  $do_2$  است گام سوم را ساخت و به همین ترتیب ادامه داد.

به عنوان مثال اگر بسامد نت مبنا را ۶۵/۲۵ هرتز اختیار کنیم، با استفاده از نسبت‌های بالا می‌توانیم بسامد نت‌های دیگر را به دست آوریم. در این صورت داریم:

$$\frac{re_1}{do_1} = \frac{9}{8}$$

$$re_1 = \frac{9}{8} do_1 = 73 / 41 \text{ Hz}$$

به همین ترتیب بسامدهای ۸۱/۵۶، ۸۷، ۹۷/۸۸، ۱۰۸/۷۵ و ۱۲۲/۳۴ هرتز

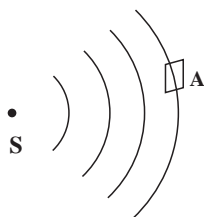
به ترتیب برای  $si_1, la_1, sol_1, fa_1, me_1$  به دست می‌آیند. برای  $do_2$  که اکتاو  $do_1$  است

بسامد  $130^\circ/5$  هرتز محاسبه می‌شود. اکنون می‌توانیم بر مبنای  $do_r$  گام بعدی را بسازیم. برای تنهای این گام به ترتیب مقدارهای  $146/81, 163/13, 174, 195/75, 217/5$ ،  $244/69$  هرتز به دست می‌آیند. هریک از این نت‌ها اکتاونت متناظر در گام اول است (چرا؟) به همین ترتیب برای گام سوم به ترتیب مقدارهای  $261, 293/6, 326/25, 348, 391/5$  هرتز به دست می‌آیند. این مثال نت‌های گام طبیعی را بر مبنای قرارداد  $la_r = 435\text{Hz}$  به دست می‌دهد. اکنون به عنوان تمرین تعیین کنید که بسامدهای  $1044^\circ$  و  $870^\circ$  هرتز بسامد چه نت‌هایی هستند و در کدام گام قرار دارند؟

## ۴-۵ - شدت صوت

در بخش ۱-۱ دیدیم که موج‌ها (در طناب یا سطح آب) با خود انرژی حمل می‌کنند و این انرژی با مجذور دامنه و مجذور بسامد موج متناسب است. این بیان در مورد موج‌های صوتی نیز درست است. در شکل ۱۲-۵ چشمه صوتی  $S$  را می‌بینید که موج‌های صوتی را در فضا منتشر می‌کند. فرض کنید انرژی  $E$  در زمان  $t$  به سطح  $A$  که عمود بر راستای انتشار صوت است برسد. شدت صوت بنا به تعریف عبارت است از مقدار انرژی‌ای که در واحد زمان به واحد سطح عمود بر راستای انتشار می‌رسد. در نتیجه، شدت صوت  $I$  در مکانی که سطح  $A$  قرار گرفته با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$I = \frac{E}{At} \quad (11-5)$$



شکل ۱۲-۵

رابطه ۱۱-۵ را می‌توان با استفاده از تعریف توان ( $P = \frac{E}{t}$ ) به صورت زیر نوشت:

$$I = \frac{P}{A} \quad (12-5)$$

یکای شدت موج در SI وات بر مترمربع ( $\text{W/m}^2$ ) است.



### مثال ۳-۵

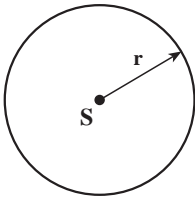
به سطح یک میکروفون که مساحت آن  $3 \text{ cm}^2$  است در مدت ۵ ثانیه  $1/5 \times 10^{-11} \text{ J}$  انرژی صوتی می‌رسد. شدت صوت در سطح میکروفون چقدر است؟ (سطح میکروفون عمود بر راستای انتشار صوت است).

پاسخ

با استفاده از رابطه ۱۱-۵ داریم:

$$I = \frac{E}{At} = \frac{1/5 \times 10^{-11}}{3 \times 10^{-4} \times 5} = 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

اکنون ممکن است این پرسش پیش بیاید که: چرا هرچه از چشمه صوت دور می‌شویم صدا ضعیف‌تر می‌شود؟ برای پاسخ دادن به این سؤال چشمه صوت S را در نظر می‌گیریم که موج‌های کروی در فضا ایجاد می‌کند (شکل ۱۳-۵).

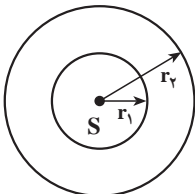


شکل ۱۳-۵

فرض کنید توان چشمه صوت P باشد و چشمه در تمام جهت‌های فضا، موج را به صورت یکسان گسیل کند. شدت صوت در روی کره‌ای به شعاع r چقدر است؟ اگر از اتلاف انرژی صوتی در هوا صرف نظر کنیم، در واحد زمان انرژی P به سطح کره‌ای به مساحت  $4\pi r^2$  می‌رسد. در نتیجه شدت صوت بر روی این کره برابر است با:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

(۱۳-۵)



شکل ۱۴-۵

این رابطه نشان می‌دهد که با دور شدن از چشمه S شدت صوت کاهش می‌یابد. حال برای اینکه ببینیم این کاهش به چه نسبتی صورت می‌گیرد، دو جبهه موج کروی به شعاع‌های  $r_1$  و  $r_2$  در نظر می‌گیریم (شکل ۱۴-۵).

انرژی‌ای که در واحد زمان به سطح کره‌ای با شعاع  $r_1$  می‌رسد ( $P_1$ ) با انرژی‌ای که در واحد زمان به سطح کره‌ای با شعاع  $r_2$  می‌رسد ( $P_2$ ) برابر است. بنابراین داریم:

$$P_1 = P_2$$

(۱۴-۵)

$$I_1 = \frac{P_1}{4\pi r_1^2} \quad \text{شدت صوت روی سطح کره ۱ برابر است با:}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{4\pi r_2^2} \quad \text{و روی سطح کره ۲ برابر است با:}$$

با جایگذاری این رابطه‌ها در رابطه ۵-۱۴ داریم:

$$4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2$$

و یا

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \quad (5-15)$$

همان‌طور که این رابطه نشان می‌دهد، شدت صوت با مجذور فاصله از چشمه صوت نسبت عکس دارد.

### مثال ۵-۴

شدت صوت یک سخنان در یک سالن در فاصله ۴ متری از او برابر  $10^{-6} \text{ W/m}^2$  است. شدت صوت سخنان در فاصله ۲ متری چقدر است؟

پاسخ

با استفاده از رابطه ۵-۱۵ داریم:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

$$\frac{I_2}{10^{-6}} = \left(\frac{4}{2}\right)^2 = \frac{1}{25} \quad \text{با جایگذاری مقادیر } r_1 \text{ و } I_1 \text{ داریم:}$$

$$I_2 = 4 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

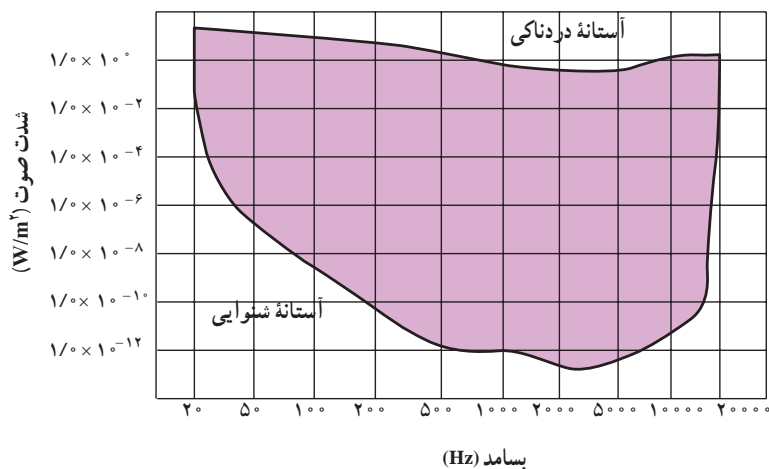
یعنی در مقایسه با فاصله ۴ متری، شدت صوت در فاصله ۲ متری ۲۵ مرتبه کاهش می‌یابد. به نظر شما آیا این بدان معنی است که صوت در فاصله ۴ متری ۲۵ بار بلندتر از صوت در فاصله ۲ متری شنیده می‌شود؟

شدت صوت برای برخی صداها در جدول ۵-۳ آمده است.

جدول ۵-۳- شدت صوت و تراز شدت صوت برای برخی صداها

تراز شدت صوت dB	شدت صوت W/m <sup>2</sup>	صدا
۰	$10^{-12}$	شدت صوت مبنا
۱۰	$10^{-11}$	نفس کشیدن
۲۰	$10^{-10}$	برگ درختان در نسیم صحبت کردن از فاصله
۴۰	$10^{-8}$	یک متری
۶۰	$10^{-6}$	همهمه در فروشگاه سروصدای خودروها در
۷۰	$10^{-5}$	خیابان شلوغ
۱۲۰	۱	آستانه دردناکی (برای بسامد ۱۰۰۰ Hz)
۱۳۰	۱۰	مسلسل غرش هواپیمای جت
۱۴۰	$10^2$	درحین بلندشدن راکت فضایی، در موقع
۱۷۰	$10^5$	بلند شدن

آهسته‌ترین صدایی (کمترین شدت) را که انسان می‌تواند بشنود آستانه شنوایی می‌نامند، و بلندترین صدایی (بیشینه شدت) که انسان می‌تواند بشنود بدون اینکه گوش او به درد آید آستانه دردناکی می‌نامند. آستانه شنوایی و آستانه دردناکی به بسامد بستگی دارند. نمودار شدت صوت در آستانه شنوایی و دردناکی را، به صورت تابعی از بسامد، در شکل ۵-۱۵ مشاهده می‌کنید.



شکل ۵-۱۵ بسامد (Hz)

## پرسش ۲-۵

با استفاده از نمودار شکل ۱۵-۵ تعیین کنید که آستانه شنوایی و دردناکی در بسامد  $10,000$  هرتز تقریباً چقدر است.

هرچه شدت صوت بیشتر باشد، مقدار انرژی ای که گوش دریافت می کند بیشتر است و انسان صدا را بلندتر احساس می کند، با این حال، این به معنی آن نیست که بلندی صوت با شدت آن نسبت مستقیم دارد؛ پس اگر شدت صوت دو برابر شود، بلندی صدایی که احساس می کنیم دو برابر نمی شود. در جدول ۳-۵ می بینید که شدت صوت در غرش هواپیما  $10^2 \text{ W/m}^2$  و شدت صوت در گفت و گوی بین دو نفر  $10^{-8} \text{ W/m}^2$  است؛ یعنی شدت غرش هواپیمای جت  $10^{10}$  برابر شدت گفت و گو است. ولی می دانید که ما غرش هواپیما را هیچ گاه  $10^{10}$  برابر بلندتر از گفت و گوی دو نفر احساس نمی کنیم. به این علت به تعریف تراز شدت صوت که درک انسان را از بلندی صوت بیان می کند نیاز داریم: تراز شدت یک صوت عبارت است از لگاریتم (در پایه ده) نسبت شدت آن صوت به شدت صوت مبنا. تراز شدت صوت را با  $\beta$  نشان می دهند و یکای آن را به افتخار بل فیزیک دان امریکایی مخترع تلفن، بل (B) و دسی بل (dB) نام گذاری کرده اند. هر بل برابر ده دسی بل است.

$$\beta = \log \frac{I}{I_0} \quad \text{بل (B)} \quad (16-5)$$

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad \text{دسی بل (dB)} \quad (17-5)$$

$I_0$  شدت صوت مبنا است که برابر با آستانه شنوایی گوش سالم در بسامد  $1000$  هرتز ( $10^{-12} \text{ W/m}^2$ ) در نظر گرفته می شود. در جدول ۳-۵ شدت پاره ای از صوت ها بر حسب دسی بل بیان شده است.

## مثال ۵-۵

در جدول ۳-۵ شدت صوت آستانه دردناکی (برای بسامد  $1000 \text{ Hz}$ ) برابر با  $1 \text{ W/m}^2$  ذکر شده است. تراز شدت صوت را برای آن به دست آورید.

پاسخ

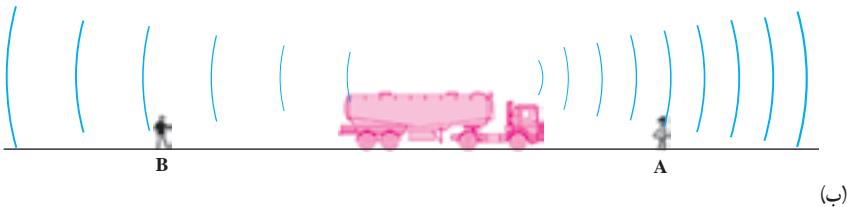
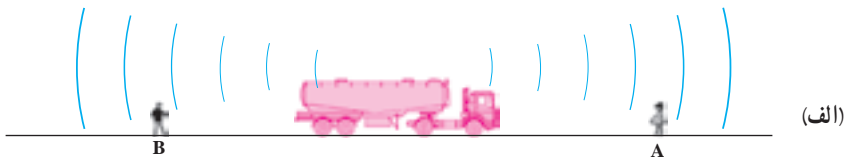
با استفاده از رابطه ۱۷-۵ داریم :

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{1}{10^{-12}} = 120 \text{ dB}$$

## ۵-۵- اثر دوپلر

آیا تاکنون توجه کرده‌اید که وقتی یک ماشین آتش‌نشانی یا آمبولانس آژیرکشان عبور می‌کند، صوت آن هنگامی که به شما نزدیک می‌شود با صوت آن هنگامی که از شما دور می‌شود متفاوت است؟ یا هنگامی که با ماشین در جاده حرکت می‌کنید، صدای بوق ماشینی که نزدیک می‌شود، با صدای بوق آن در هنگام دور شدن تفاوت دارد؟ برای بررسی این پدیده، ماشینی را مطابق شکل ۵-۱۶، در نظر بگیرید که دو ناظر A و B در جلو و پشت آن قرار دارند. در ابتدا فرض کنید که هم ناظرهای A و B و هم ماشین آتش‌نشانی، که آژیر می‌کشد، ساکن اند (شکل ۵-۱۶ الف). این ماشین یک موج صوتی با بسامد  $f_s$  و دوره  $T_s$  گسیل می‌کند. جبهه‌های موج مربوط به (مثلاً) قله‌های این صوت (بیشینه تراکم) نیز در شکل ۵-۱۶ الف نشان داده شده‌اند.

اگر طول موج صوت را در هوا، هنگامی که چشمه ساکن است، با  $\lambda$  نشان دهیم داریم :



شکل ۵-۱۶

$$\lambda = vT_s = \frac{v}{f_s} \quad (5-18)$$

که در آن  $v$  سرعت صوت در هواست.

اکنون دو حالت زیر را در نظر می‌گیریم:

الف) چشمه صوت به ناظر ساکن A نزدیک و از ناظر ساکن B دور می‌شود. (ب) ناظر A به چشمه ساکن (ماشین آتش‌نشان) نزدیک و یا از آن دور می‌شود. هر یک از این دو حالت را بررسی می‌کنیم:

الف) چشمه صوت با سرعت  $v_s$  به ناظر A نزدیک می‌شود. در این حالت چشمه در بازه زمانی بین گسیل یک جبهه موج و جبهه موج بعدی، مسافت  $v_s T_s$  را طی می‌کند. یعنی، همان‌طور که در شکل ۵-۱۶ ب نشان داده شده است، طول موج صوتی که به طرف ناظر A در حرکت است به اندازه  $v_s T_s$  از  $\lambda$  کوتاه‌تر است. پس، اگر طول موج این صوت را در هوا با  $\lambda'$  نشان دهیم داریم:

$$\lambda' = \lambda - v_s T_s \quad (5-19)$$

بسامد این صوت را با  $f_o$  نمایش می‌دهیم یعنی، ناظر ساکن، صوت را با بسامد  $f_o$  می‌شنود.

اکنون می‌توان  $f_o$  را، با استفاده از رابطه طول موج و بسامد ( $f_o = \frac{v}{\lambda'}$ ) به دست آورد:

$$f_o = \frac{v}{\lambda - v_s T_s}$$

که با استفاده از رابطه ۵-۱۸ به صورت زیر درمی‌آید:

$$f_o = \frac{v}{\frac{v}{f_s} - v_s T_s} = \frac{v}{v - v_s} f_s \quad (5-20)$$

## مثال ۵-۶

یک خودروی پلیس در حالی که صوتی را با بسامد  $4000 \text{ Hz}$  گسیل می‌کند با سرعت  $72 \text{ km/h}$  به یک عابر ساکن نزدیک می‌شود؛ بسامد صوتی را که عابر می‌شنود به دست آورید. سرعت صوت را در هوا  $340 \text{ m/s}$  فرض کنید.

پاسخ

با استفاده از رابطه ۵-۲۰ داریم:

$$f_o = \frac{v}{v - v_s} f_s$$

در این رابطه  $v = 340 \text{ m/s}$ ،  $v_s = 20 \text{ m/s}$  و  $f_s = 4000 \text{ Hz}$  است.

در نتیجه :

$$f_o = \frac{340}{340 - 20} (4000) = 4250 \text{ Hz}$$

در همین حال، ماشین آتش‌نشانی از ناظر B دور می‌شود. در این صورت، همان‌طور که در شکل ۵-۱۶ - ب نشان داده شده است، طول موج صوتی که به طرف ناظر B در حرکت است به اندازه  $v_s T_s$  از  $\lambda$  بلندتر است (چرا؟). یعنی :

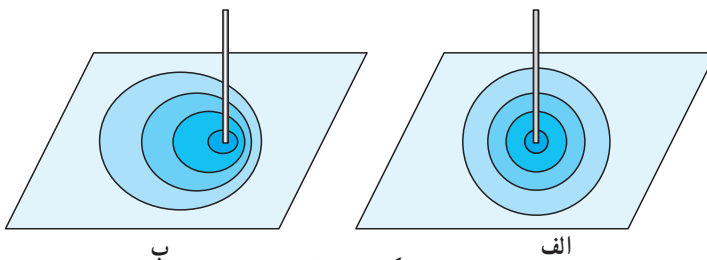
$$\lambda' = \lambda + v_s T_s$$

و برای بسامد صوتی که ناظر B می‌شنود، رابطه زیر به دست می‌آید.

$$f_o = \frac{v}{v + v_s} f_s \quad (5-21)$$

ملاحظه می‌شود هنگامی که چشمه به طرف ناظر در حرکت است، بسامد صوتی که ناظر می‌شنود بیشتر از بسامد صوتی است که چشمه ساکن ایجاد می‌کند؛ و برعکس، در حالتی که چشمه از ناظر دور می‌شود، بسامد صوتی که ناظر می‌شنود کمتر از بسامد صوتی است که چشمه ساکن ایجاد می‌کند. این تغییر بسامد، هم در حالتی که چشمه ساکن است و ناظر حرکت می‌کند (حالت ب) و هم در حالتی که هر دو حرکت می‌کنند رخ می‌دهد. به این تغییر بسامد که از حرکت چشمه، ناظر یا هر دو ناشی می‌شود اثر دوپلر می‌گویند.

دیدیم هنگامی که چشمه صوت در حرکت است، طول موج صوت در جلوی چشمه کوتاه‌تر و در پشت چشمه بلندتر از طول موج صوت در حالتی است که چشمه موج ساکن باشد. این پدیده در مورد موج‌های مکانیکی دیگر نیز رخ می‌دهد. شکل ۵-۱۷ - الف میله‌ای را نشان می‌دهد که در بازه‌های زمانی یکسان روی سطح آب ضربه می‌زند و جبهه‌های موج دایره‌ای ایجاد می‌کند. در شکل ۵-۱۷ - ب میله در حین حرکت بر روی سطح آب ضربه می‌زند. ملاحظه می‌شود که طول موج در جلوی میله کوتاه‌تر و در پشت آن بلندتر از طول موجی است که میله ساکن ایجاد می‌کند.



شکل ۵-۱۷

### تمرین ۳-۵

در مثال ۵-۶ فرض کنید که خودروی پلیس با همان سرعت از عابر دور می‌شود. عابر چه بسامدی را می‌شنود؟

ب) ناظر A با سرعت  $v_0$  به چشمه ساکن نزدیک می‌شود (شکل ۵-۱۶ پ). در این حالت، چون چشمه ساکن است، طول موج صوتی که ایجاد می‌کند برابر  $\lambda$  است، و چون ناظر با سرعت  $v_0$  به سوی آن در حرکت است، صوت با سرعت  $v_0 + v$  به او نزدیک می‌شود. در نتیجه، بسامد صوتی که ناظر A می‌شنود، برابر خواهد بود با:

$$f_o = \frac{v + v_0}{\lambda}$$

که با توجه به رابطه ۵-۱۸ داریم:

$$f_o = \frac{v + v_0}{\frac{v}{f_s}} = \frac{v + v_0}{v} f_s \quad (۵-۲۲)$$

یعنی، در این حالت، بسامد صوتی که ناظر A می‌شنود بیشتر از بسامد صوتی است که چشمه ساکن ایجاد می‌کند.

حال اگر ناظر B با سرعت  $v_0$  از چشمه ساکن دور شود، در این حالت نیز طول موج صوت برابر  $\lambda$  است صوت با سرعت  $v - v_0$  به ناظر نزدیک می‌شود.

در نتیجه، بسامد صوتی که ناظر می‌شنود، با انجام محاسباتی نظیر حالت قبل، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f_o = \frac{v - v_0}{v} f_s \quad (۵-۲۳)$$

ملاحظه می‌شود که در این حالت بسامد صوتی که ناظر A می‌شنود، کمتر از بسامد صوتی است که چشمه ساکن ایجاد می‌کند.

### تمرین ۴-۵

شخصی یک سوت را با بسامد  $700$  هرتز به صدا درمی‌آورد. سرنشین خودرویی که با سرعت  $36 \text{ km/h}$ ، الف) به او نزدیک می‌شود. ب) از او دور می‌شود، چه بسامدی را می‌شنود؟



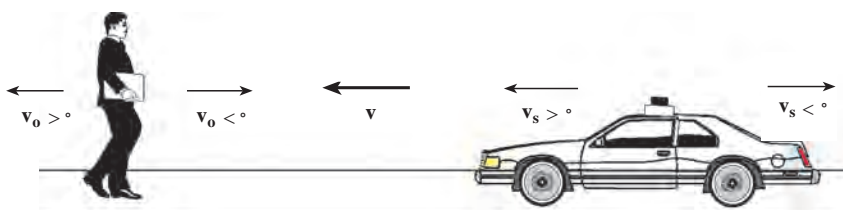
### پرسش ۳-۵

در رابطه ۲۳-۵، اگر  $v_0 > v$  باشد،  $f_0$  منفی می‌شود. این نتیجه را چگونه می‌توان تحلیل کرد؟

در حالت کلی که چشمه صوت و ناظر هر دو در حرکت‌اند، بسامدی که ناظر می‌شنود از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f_0 = \frac{v - v_0}{v - v_s} f_s \quad (24-5)$$

در این رابطه سرعت صوت  $v$  به طرف ناظر را مثبت فرض کرده‌ایم. علامت  $v_0$  و  $v_s$  در مقایسه با  $v$  مشخص می‌شود. اگر  $v_0$  یا  $v_s$  با  $v$  هم جهت باشند، مثبت و در غیر این صورت منفی خواهند بود (شکل ۱۸-۵).



شکل ۱۸-۵

### تمرین‌های فصل پنجم

- ۱- کدام یک از عامل‌های زیر بر سرعت صوت در هوا مؤثر است؟  
(الف) شکل موج (ب) دامنه موج (پ) بسامد موج (ت) دمای هوا
- ۲- آزمایشی برای اندازه‌گیری سرعت صوت در آب طراحی کنید.
- ۳- دلفین، مانند خفاش، از خود فراصوت گسیل می‌کند. طول موج صوت دلفین با بسامد  $4 \times 10^5 \text{ Hz}$  در آب چقدر است؟
- ۴- ناظری در سطح زمین ایستاده است. صدای رعد ۵ ثانیه پس از مشاهده برق به گوش او می‌رسد. اگر دمای هوا  $27^\circ \text{C}$  باشد، فاصله ناظر از محل ایجاد رعد و برق چقدر است؟

۵- دانش آموزی بین دو صخره قائم ایستاده است و فاصله او از صخره نزدیک  $24^\circ$  متر است. دانش آموز فریاد می زند و اولین پژواک صدای خود را پس از  $1/5$  ثانیه و صدای پژواک دوم را  $1$  ثانیه بعد از پژواک اول می شنود.

الف) سرعت صوت در هوا را به دست آورید.

ب) فاصله بین دو صخره را محاسبه کنید.

۶- یک انتهای لوله ای صوتی، باز و انتهای دیگر آن بسته است. الف) طول لوله برای این که هوای داخل لوله در بسامد اصلی  $6^\circ \text{Hz}$  به تشدید درآید، چقدر است؟ ب) با رسم شکل، هماهنگ اصلی و هماهنگ های سوم و پنجم آن را نمایش دهید. پ) طول موج صوت اصلی و هماهنگ های سوم و پنجم آن را تعیین کنید. (سرعت صوت را  $340 \text{ m/s}$  در نظر بگیرید.)

۷- تمرین ۶ را در حالتی که هر دو انتهای لوله صوتی باز است، حل کنید.

۸- طول یک لوله صوتی که هر دو انتهای آن باز است،  $1/7 \text{ m}$  است. بسامد هماهنگ سوم این لوله را محاسبه کنید. (سرعت صوت را  $340 \text{ m/s}$  در نظر بگیرید.)

۹- یک چشمه صوت، موج های کروی در هوا گسیل می کند. الف) نسبت شدت صوت در دو نقطه را که فاصله آنها از چشمه صوت  $d_1$  و  $2d_1$  است، محاسبه کنید. ب) کاهش شدت صوت گسیل شده از چشمه عملاً بیشتر از آن است که در قسمت (الف) به دست می آید. علت چیست؟

۱۰- دو نفر به فاصله های  $d_1$  و  $d_2$  از یک چشمه صوت ایستاده اند. تراز شدت صوت برای این دو نفر به ترتیب  $2^\circ \text{dB}$  و  $1^\circ \text{dB}$  است. نسبت  $\frac{d_2}{d_1}$  را حساب کنید.

۱۱- در فاصله  $2 \text{ m}$  از چشمه صوتی تراز شدت صوت  $6^\circ \text{dB}$  است. با این فرض که جذب صوت به وسیله هوا قابل چشم پوشی است، در چه فاصله ای از این چشمه می توان صوت را به زحمت شنید؟ آیا به نظر شما، پاسخ به دست آمده منطقی است؟

۱۲- دو قطار با سرعت یکسان  $34 \text{ m/s}$  به طرف یکدیگر در حرکت اند، یکی از آنها صوتی را با بسامد  $50^\circ \text{Hz}$  گسیل می کند. بسامد صوتی که مسافر قطار دیگر می شنود، چقدر است؟ (سرعت صوت را  $334 \text{ m/s}$  فرض کنید.)

۱۳- یک ماشین آتش نشانی با سرعت  $4 \text{ m/s}$  به یک اتومبیل که با سرعت  $20 \text{ m/s}$  در حرکت است، نزدیک می شود و از آن سبقت می گیرد. بسامد صوتی را که راننده اتومبیل می شنود، در دو حالت زیر حساب کنید :

الف) قبل از رسیدن ماشین آتش نشانی به اتومبیل

ب) بعد از عبور ماشین آتش‌نشانی از آن. بسامد آژیر ماشین آتش‌نشانی  $855\text{Hz}$  و سرعت صوت در هوا  $340\text{m/s}$  است.

۱۴- یک چشمه صوت با سرعت  $3\text{m/s}$  در حرکت است. بسامد چشمه صوت  $600\text{Hz}$  و سرعت صوت در هوا  $330\text{m/s}$  است. طول موج صوت را در جلو و عقب این چشمه حساب کنید.

۱۵- خودرویی با سرعت  $72\text{km/h}$  در جاده‌ای در حال حرکت است. صدای آژیر خودرو با بسامد  $680\text{Hz}$  به صخره‌ای واقع در جلوی مسیر خودرو برخورد می‌کند. صوت بازتاب شده با چه بسامدی به گوش راننده می‌رسد؟ (سرعت صوت را  $340\text{m/s}$  در نظر بگیرید.)

۱۶- یک پرده صماخ به قطر  $75^\circ$  سانتی‌متر به مدت ۲ ساعت صوتی با تراز شدت  $9\text{dB}$  را جذب می‌کند. در این مدت، پرده گوش چه مقدار انرژی بر حسب ژول جذب کرده است؟

۱۷- سرعت صوت در بافت‌های بدن تقریباً مساوی سرعت صوت در آب دریاست، ( $1500\text{m/s}$ ) قسمتی از یک موج فراصوت که به داخل خون فرستاده می‌شود، به وسیله گلبول‌های خون بازتابیده می‌شود. اگر بسامد پژواک برگشتی  $400\text{Hz}$  بیشتر از بسامد  $2\text{MHz}$  اولیه باشد، سرعت حرکت خون چه مقدار است؟ (توجه کنید که در اینجا دو جابه‌جایی دوپلری وجود دارد.)



# موج های الکترو مغناطیسی

**نگاهی به فصل:** آیا می دانید انرژی حیاتی مورد نیاز گیاهان، جانوران، انسان و ... از چه طریق و چگونه به زمین می رسد؟

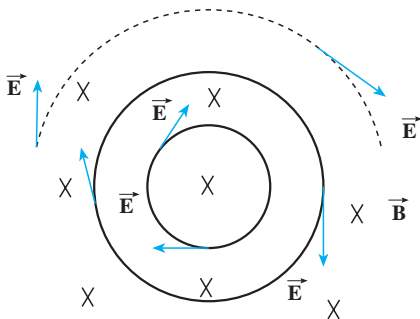
آیا می دانید رادیو، تلویزیون، تلفن، بی سیم، ماهواره ها و ... بر چه اساسی کار می کنند؟



شکل ۱-۶

هر موجود زنده ای در زمین به انرژی خورشید نیاز دارد، به طوری که بدون انرژی خورشید حیات روی کره زمین از بین می رود. این انرژی از طریق موج های الکترومغناطیسی به زمین می رسد و در تمام ارتباطات راه دور این موج ها به کار گرفته می شوند. با استفاده از سرعت بالای این امواج می توان خبر رخ دادن هر حادثه را کمتر از چند دهم ثانیه به هر نقطه از زمین رساند.

مایکل فارادی دانشمند انگلیسی (۱۸۶۷-۱۷۹۱ میلادی) و جیمز کلارک ماکسول فیزیک دان اسکاتلندی (۱۸۷۹-۱۸۳۱ میلادی) نقش عمده ای در کشف پدیده های الکترومغناطیسی و مطالعه بر روی آنها داشتند.



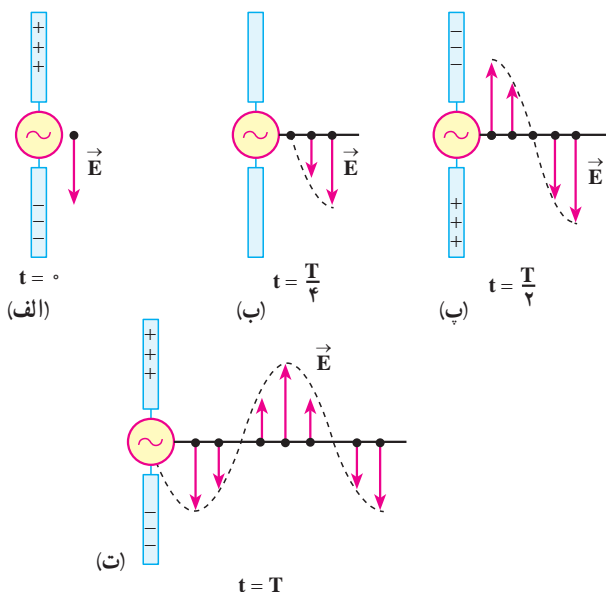
شکل ۲-۶

در فیزیک ۳ و آزمایشگاه با قانون فارادی آشنا شدیم و دیدیم که اگر شار مغناطیسی گذرنده از یک مدار بسته تغییر کند، نیروی محرکه ای را در مدار ایجاد می کند که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار متناسب است. مثلاً اگر در شکل ۲-۶ میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  تغییر کند، اثر تغییر شار یک نیروی محرکه در مدار القا می شود.

در واقع و به طور عمیق تر می توان گفت که در اثر تغییر میدان مغناطیسی یک میدان الکتریکی القایی در فضا ایجاد می شود که خط های آن در این شکل نشان داده شده اند. این میدان حتی هنگامی که مدار نیز وجود ندارد ایجاد می شود یعنی میدان الکتریکی را تنها بارهای الکتریکی تولید نمی کنند، بلکه در اثر تغییر میدان مغناطیسی نیز به وجود می آید. در فیزیک ۳ و آزمایشگاه همچنین دیدیم، هنگامی که میدان الکتریکی داخل یک رسانا وجود دارد، در آن اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد می کند در نتیجه می توان گفت، «نیروی محرکه القایی از این میدان الکتریکی القایی حاصل می شود.» ماکسول پیش بینی کرد همان طور که در اثر تغییر میدان مغناطیسی در فضا، میدان الکتریکی تولید می شود، در اثر تغییر میدان الکتریکی نیز میدان مغناطیسی ایجاد می شود. یعنی علاوه بر جریان الکتریکی و آهنربا تغییر میدان الکتریکی نیز می تواند منشأ میدان مغناطیسی باشد. ماکسول با توجه به کارهای اورستد، آمپر، هانری و فارادی مبانی علم الکترومغناطیس را تدوین کرد و وجود موج های الکترومغناطیسی و انتشار آنها در فضا را پیش بینی کرد. بعدها هرتز فیزیک دان آلمانی (۱۸۹۴-۱۸۵۷ میلادی) وجود این موج ها را به طور تجربی نشان داد.

## ۱-۶- چگونگی تشکیل موج های الکترومغناطیس توسط یک آنتن

موج های الکترومغناطیس از میدان های الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده اند. عامل اصلی ایجاد



موج های الکترومغناطیسی، ذرات باردار شتاب دارند یعنی وقتی ذره باردار شتاب دار می شود بخشی از انرژی خود را به صورت موج های الکترومغناطیسی گسیل می کند، گسیل موج های الکترومغناطیسی توسط اجسام را تابش می نامند.

در آنتن، یک منبع ولتاژ متناوب برای ایجاد نوسان بار الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرد و این شیوه ای مرسوم برای شتاب دار کردن ذرات است. از آنتن ها به عنوان چشمه موج های

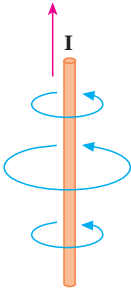
شکل ۳-۶- میدان الکتریکی ناشی از نوسان بارهای الکتریکی در آنتن با سرعت نور از آنتن دور می شود.

الکترومغناطیس در ایستگاه‌های رادیویی، مخابراتی و ... استفاده می‌شود. شکل ۳-۶ نحوه تولید یک موج الکترومغناطیس را در یک آنتن نشان می‌دهد. دو میله فلزی به یک مولد متناوب (ac) متصل شده‌اند. چون ولتاژ خروجی این مولد به صورت سینوسی است، بار روی میله‌ها دائماً تغییر می‌کند. در لحظه  $t = 0$  بار روی میله بالایی بیشینه و مثبت و روی میله پایینی بیشینه و منفی است. سپس بار این میله‌ها کاهش می‌یابد و در لحظه  $t = T/4$  به صفر می‌رسد (شکل ۳-۶-ب) در ادامه این حرکت، علامت بار میله‌ها معکوس می‌شود، یعنی بار میله بالایی منفی و بار میله پایینی مثبت می‌شود و مقدار آن نیز افزایش می‌یابد تا در لحظه  $t = T/2$  به یک مقدار بیشینه برسد (شکل ۳-۶-پ). تغییر بار میله‌ها به همین ترتیب ادامه می‌یابد. در زمان  $t = 0$  بار مثبت در میله بالایی و بار منفی در میله پایینی بیشینه است (شکل ۳-۶-الف). پس میدان الکتریکی حاصل از این بارها نیز بیشینه است. میدان الکتریکی ایجاد شده در نزدیکی آنتن در این لحظه، در این شکل نشان داده شده است.

با کاهش بار روی میله‌ها، شدت میدان الکتریکی در نزدیکی میله‌ها، کاهش می‌یابد و میدان الکتریکی بیشینه رو به پایینی که در لحظه  $t = 0$  تولید شده بود از میله دور می‌شود. هنگامی که بارهای مثبت و منفی روی میله‌ها صفر است (مانند شکل ۳-۶-ب) میدان الکتریکی نیز صفر است. این وضعیت  $\frac{1}{4}$  دوره ( $t = T/4$ ) بعد از شروع نوسان پیش می‌آید. با ادامه این عمل، میله بالایی، بعد از زمان  $t = T/4$ ، دارای بیشترین مقدار بار منفی و میله پایینی دارای بیشترین بار مثبت می‌شود. در این حالت میدان الکتریکی ایجاد شده رو به بالاست (شکل ۳-۶-پ) و با ادامه یافتن نوسان بار الکتریکی روی میله‌ها میدان الکتریکی مطابق شکل ۳-۶-ت تشکیل می‌شود. در تمام این مراحل میدان الکتریکی نزدیک آنتن با نوسان بار الکتریکی روی آن هم فاز است، یعنی، جهت میدان الکتریکی در زمانی که میله بالایی مثبت است رو به پایین و وقتی میله بالایی منفی است، رو به بالاست و اندازه میدان در هر لحظه به مقدار بار روی میله در آن لحظه بستگی دارد.

با ادامه نوسان بارهای الکتریکی روی میله‌ها، میدان‌های الکتریکی ایجاد شده با سرعت نور از آنتن دور می‌شوند. در شکل ۳-۶-گویی از میدان الکتریکی را در لحظه‌های مشخص از نوسان مشاهده می‌کنید. همان‌گونه که می‌بینید در طول یک دوره از نوسان بار، میدان الکتریکی ایجاد شده در ابتدای دوره به اندازه یک طول موج کامل جلو رفته است.

تغییر بارهای الکتریکی در میله‌ها سبب ایجاد جریان الکتریکی در میله‌ها و در نتیجه تولید یک میدان مغناطیسی در اطراف میله‌ها می‌شود. وقتی جریان در میله‌ها رو به بالاست (همان‌طور که در



شکل ۴-۶ - چگونگی تشکیل خطوط میدان مغناطیسی در اطراف یک آنتن که از آن جریان الکتریکی متغیر می‌گذرد.

فیزیک ۳ و آزمایشگاه در مورد میدان حاصل از جریان در یک سیم دیدیم) خطوط میدان مغناطیسی تولید شده به صورت دایره‌هایی هم‌مرکز به دور آنتن اند (شکل ۴-۶). این خط‌ها بر میدان الکتریکی تولید شده در هر نقطه عمودند. با عوض شدن جهت جریان، جهت میدان مغناطیسی نیز وارونه می‌شود و با تغییر جریان نسبت به زمان، میدان مغناطیسی نیز همانند میدان الکتریکی در اطراف آنتن تغییر می‌کند.

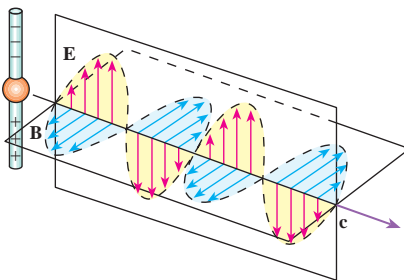
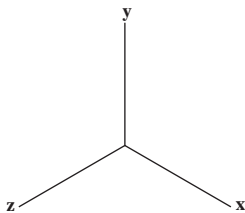
تا اینجا دیدیم که نوسان بارهای الکتریکی روی میله‌ها، در فضا میدان الکتریکی و مغناطیسی متغیر تولید می‌کند. اما علاوه بر اینها دو پدیده دیگر نیز رخ می‌دهد. همان‌طور که دیدیم:

الف) میدان مغناطیسی متغیر با زمان، میدان الکتریکی تولید می‌کند.

ب) میدان الکتریکی متغیر با زمان - همان‌طور که ماکسول پیش‌بینی کرده بود - میدان مغناطیسی

ایجاد می‌کند.

این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی القایی هم‌فازند؛ یعنی، در هر نقطه هر دو میدان هم‌زمان با



شکل ۵-۶ - یک موج الکترومغناطیسی گسیل شده از یک آنتن در یک لحظه از زمان. توجه کنید که میدان الکتریکی بر میدان مغناطیسی و هر دو بر راستای انتشار موج عمودند.

هم‌بیشینه یا کمینه می‌شوند (شکل ۵-۶). علاوه بر این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یکدیگر و هر دوی آنها بر راستای حرکت موج عمودند. در نتیجه این دو پدیده و مواردی که در بالا ذکر شد، یک موج الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود که در فضا منتشر می‌شوند (شکل ۵-۶).

موج‌های الکترومغناطیسی نیز، مانند موج‌های مکانیکی، در زمان و مکان تغییر می‌کنند، با این تفاوت که در موج‌های مکانیکی ذره‌های تشکیل‌دهنده محیط نوسان می‌کنند و در موج‌های الکترومغناطیسی، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در هر نقطه از فضا به‌طور نوسانی تغییر می‌کنند. همین موضوع سبب می‌شود

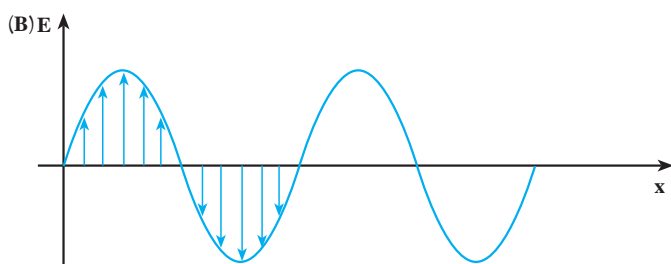


که موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار خود الزاماً به محیط مادی نیاز نداشته باشند و در خلأ نیز منتشر شوند.

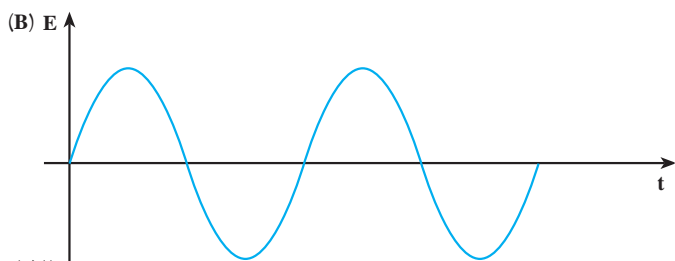
برای بیان چگونگی انتشار موج‌های الکترومغناطیسی نیز می‌توانیم، همان‌طور که در مورد موج‌های مکانیکی انجام دادیم، از نمودارهای میدان‌های الکتریکی (و یا مغناطیسی) بر حسب مکان یا زمان استفاده کنیم. ابتدا تغییرات میدان الکتریکی را توصیف می‌کنیم.

یک موج الکترومغناطیسی را در نظر می‌گیریم که در جهت محور  $x$  منتشر می‌شود. نمودار میدان الکتریکی بر حسب مکان این موج در شکل ۶-۶ رسم شده است. این نمودار، میدان الکتریکی را در تمام نقطه‌ها در امتداد محور  $x$  و در یک لحظه نشان می‌دهد. می‌بینید که در جهت محور  $x$ ، میدان الکتریکی افزایش می‌یابد تا به یک مقدار بیشینه برسد، سپس کاهش می‌یابد و صفر می‌شود و در ادامه، همین تغییرات در جهت عکس صورت می‌گیرد.

تغییرات میدان الکتریکی در یک نقطه از فضا را نیز می‌توان با استفاده از نمودار میدان الکتریکی بر حسب زمان نشان داد. این نمودار در شکل ۶-۷ رسم شده است. مشاهده می‌کنید که مقدار میدان در این نقطه، از صفر تا مقدار بیشینه افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد و دوباره به صفر می‌رسد. پس از آن جهت میدان معکوس می‌شود. در این جهت نیز میدان از صفر تا مقدار بیشینه افزایش می‌یابد و دوباره کاهش می‌یابد تا به صفر برسد و این نوسان‌ها به همین ترتیب ادامه می‌یابد. نمودار میدان مغناطیسی بر حسب مکان و میدان مغناطیسی بر حسب زمان را نیز می‌توان مانند نمودارهای مربوط به میدان الکتریکی رسم کرد که باز هم نمودارهایی مانند شکل‌های ۶-۶ و ۶-۷ به دست خواهد آمد.

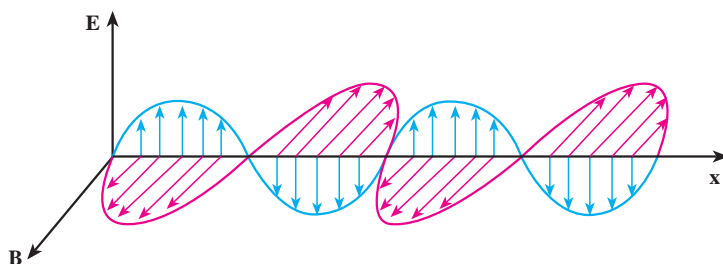


شکل ۶-۶ - نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) بر حسب مکان، یک موج الکترومغناطیسی در امتداد محور  $x$ ، در یک لحظه از زمان.



شکل ۶-۷ - نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) بر حسب زمان، یک موج الکترومغناطیسی در یک نقطه از محور  $x$ .

در شکل ۸-۶ نمودارهای میدان الکترومغناطیسی بر حسب مکان که در آن هم میدان الکتریکی و هم میدان مغناطیسی نشان داده شده است را می بینید.



شکل ۸-۶ — نمودار میدان الکترومغناطیسی بر حسب مکان

تعریف هایی که قبلاً در مورد موج های مکانیکی بیان کردیم، در مورد موج های الکترومغناطیسی هم به کار می روند. مثلاً تعداد نوسان های میدان الکتریکی (و یا مغناطیسی) در واحد زمان و در هر نقطه از فضا، بسامد و زمانی که طول می کشد تا میدان الکتریکی (و یا مغناطیسی) یک نوسان کامل انجام دهد، دوره نامیده می شود. به همین ترتیب، طول موج فاصله بین دو نقطه متوالی از موج است که در آن دو نقطه میدان های الکتریکی (و یا مغناطیسی) هم فازند. سرعت انتشار موج های الکترومغناطیسی نیز، همچون موج های مکانیکی، از رابطه  $v = \lambda f$  به دست می آید.

## پرسش ۱-۶

با توجه به شکل ۵-۶ توضیح دهید که موج های الکترومغناطیسی طولی اند یا

عرضی؟

## ۲-۶ — سرعت انتشار موج های الکترومغناطیسی

میدان مغناطیسی و الکتریکی حاصل از جریان نوسانی در یک آنتن به طور هم زمان به تمام نقاط نمی رسد، بلکه با سرعت مشخصی منتشر می شوند. ابتدا این میدان ها در نقاط نزدیک و سپس به نقاط دورتر می رسند. ماکسول نشان داد که سرعت انتشار موج های الکترومغناطیسی در خلأ از رابطه زیر به دست می آید:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (۱-۶)$$

که در آن  $\epsilon$  ضریب گذردهی الکتریکی در خلأ و  $\mu$  تراوایی مغناطیسی خلأ است. از فیزیک (۳) و

آزمایشگاه به یاد دارید که  $\epsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$  و  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$  است. با قرار دادن مقادیر بالا در رابطه ۱-۶ سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیس در خلأ به دست می‌آید:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8.85 \times 10^{-12} \times 4\pi \times 10^{-7}}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

که این مقدار برابر سرعت انتشار نور در خلأ است.

### ۳-۶ طیف موج‌های الکترومغناطیسی

موج‌های الکترومغناطیسی طیف گسترده‌ای از نظر بسامد (و طول موج) دارند. به نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی، نام‌هایی از قبیل موج‌های رادیویی، نوری، تابش گرمایی، فرابنفش،  $X$ ،  $\gamma$  و ... اتلاق می‌شود. در هریک از این ناحیه‌ها تابش به طریق خاصی تولید و آشکار می‌شود. جدول ۱-۶ نحوه تولید، کاربرد و آشکارسازی نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. مثلاً نور که گستره کوچکی از این طیف است، مستقیماً بر شبکیه چشم اثر می‌کند و از این طریق آشکار می‌شود اما آشکارسازی موج‌های رادیویی توسط وسیله‌های الکترونیکی خاصی مانند رادیو، تلویزیون و ... صورت می‌گیرد.

شکل ۹-۶ گستره (طیف) موج‌های الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. این موج‌ها، طیف پیوسته‌ای را تشکیل می‌دهند. با وجود تفاوت بسیار زیاد در بسامد، نحوه تولید و آشکارسازی آنها، ماهیت و قانون‌های حاکم بر همه آنها یکسان است.

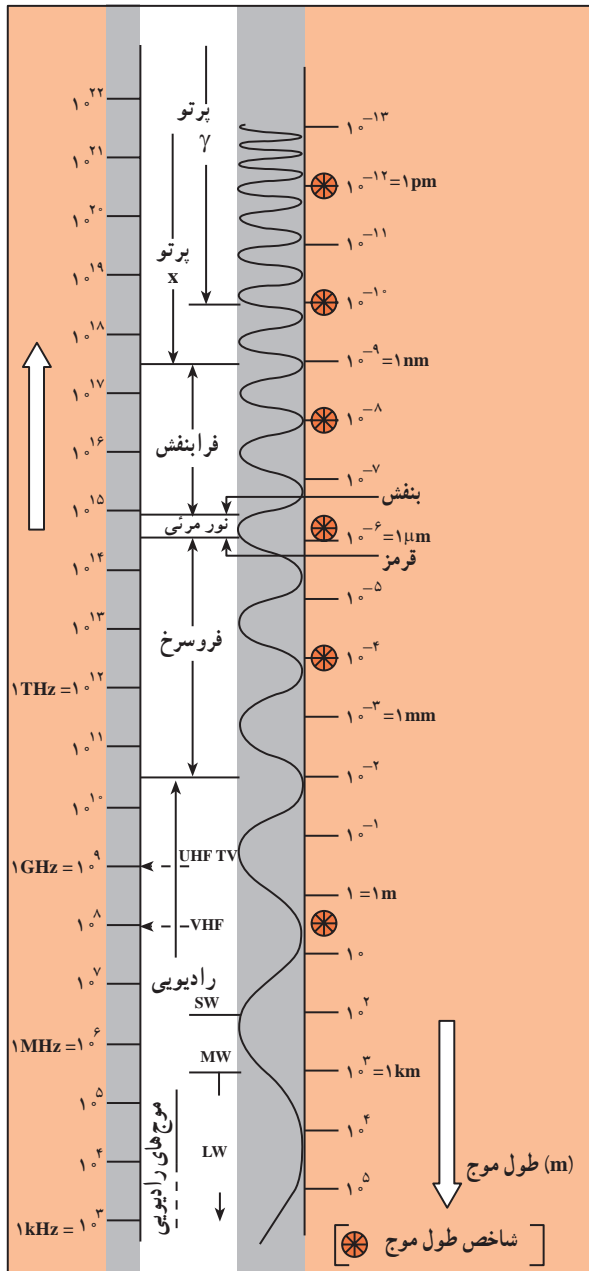
## جدول ۶-۱- نحوه تولید، آشکار سازی و کاربرد طیف موج های الکترومغناطیسی

نام و حدود طول موج	چشمه	وسایل آشکار سازی	بعضی از ویژگی های خاص و کاربرد
پرتو گاما ( $\gamma$ ) $1\text{ Pm} = 10^{-12}\text{ m}$	هسته مواد رادیواکتیو و پرتوهای کیهانی	شمارش گر گایگر- مولر و فیلم عکاسی	فوتون های با انرژی بسیار بالا و با قدرت نفوذ زیاد، خیلی خطرناک کاربرد : بافت های سرطانی را از بین می برد، برای پیدا کردن ترک در فلزات، برای ضد عفونی کردن تجهیزات و وسایل
پرتو ایکس (X) $100\text{ Pm} = 10^{-10}\text{ m}$	لامپ پرتو X	فیلم عکاسی و صفحه فلوئورسان	فوتون های بسیار پر انرژی و با قدرت نفوذ زیاد، خیلی خطرناک کاربرد : استفاده در پرتونگاری، استفاده در مطالعه ساختار بلورها، مطالعه بیماری های پوستی، استفاده در پرتو درمانی
فرابنفش (UV) $100\text{ nm} = 10^{-8}\text{ m}$	خورشید، جسم های خیلی داغ، جرقه الکتریکی، لامپ بخار جیوه	فیلم عکاسی، فوتوسل	ویژگی ها : توسط شیشه جذب می شود، سبب بسیاری از واکنش های شیمیایی می شود، باخته های زنده را از بین می برد. کاربرد : لامپ های UV در پزشکی
نور مرئی $400\text{ nm} = 4 \times 10^{-7}\text{ m}$ (سبز)	خورشید، جسم های داغ، لیزرها	چشم، فیلم عکاسی، فوتوسل	ویژگی ها : در دیدن اجسام نقش اساسی دارد، برای رشد گیاهان و عمل فتوسنتز نقش حیاتی دارد. کاربرد : در سیستم های مخبراتی (لیزر و تارهای نوری) مورد استفاده قرار می گیرد.
فروسرخ (IR) $100\text{ }\mu\text{m} = 10^{-4}\text{ m}$	خورشید، جسم های گرم داغ	فیلم های مخصوص عکاسی	ویژگی : هنگامی که جذب می شود، پوست را گرم می کند. کاربرد : برای گرم کردن، برای فیلم برداری و عکاسی در مده و تاریکی، عکاسی IR توسط ماهواره ها
رادیویی $3\text{ m} (\text{VHF})$	اجاق های مایکروویو، آنتن های رادیویی و تلویزیونی	رادیو و تلویزیون	کاربرد : در آشپزی، رادیو، تلویزیون، مخابرات ماهواره ای و در رادارها برای آشکار سازی هواپیما، موشک و کشتی

## پرسش ۲-۶

با استفاده از شکل ۹-۶ موج‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی را به ترتیب افزایش

طول موج، نام ببرید.



در شکل ۹-۶ بیشترین بسامد

در بالای طیف و کمترین بسامد در

پایین طیف قرار دارد. کوتاهترین

طول موج در بالای طیف، مربوط به

پرتوهای گاما که در حدود  $10^{-13}$  متر

است و بر عکس بلندترین طول موج

مربوط به موج‌های رادیویی است که

در حدود  $10^5$  m است.

شکل ۹-۶- طیف موج‌های

الکترومغناطیسی

## مثال ۶-۱

محدوده طول موج، امواج الکترومغناطیسی مرئی از  $4 \times 10^{-7} \text{ m}$  (میکرون) تا  $7 \times 10^{-7} \text{ m}$  (میکرون) مربوط به طول موج بنفش تا  $7 \times 10^{-7} \text{ m}$  میکرون مربوط به طول موج نور قرمز است. محدوده بسامد نور مرئی را به دست آورید.

پاسخ

با استفاده از رابطه  $c = \lambda f$  داریم :

$$f_{\text{بنفش}} = \frac{c}{\lambda_{\text{بنفش}}} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 10^{-7}} = 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$f_{\text{قرمز}} = \frac{c}{\lambda_{\text{قرمز}}} = \frac{3 \times 10^8}{7 \times 10^{-7}} \approx 4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

یعنی گستره بسامد نور مرئی بین  $4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$  تا  $7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$  است.

## فعالیت ۶-۱

جمله‌های زیر را کامل کنید.

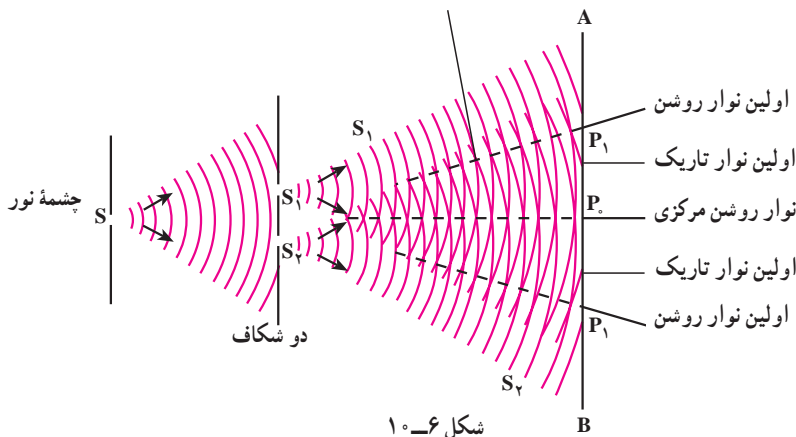
- ۱- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یکدیگر ....
- ۲- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هر دو بر ..... عمودند بنابراین موج‌های الکترومغناطیسی از نوع موج‌های ....
- ۳- نوسان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با یکدیگر ..... .
- ۴- موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار نیاز به ..... و انرژی را از محلی به محل دیگر منتقل می‌کنند.
- ۵- همه موج‌های الکترومغناطیسی با سرعت ..... منتشر می‌شوند.

## ۴-۶- تداخل موج‌های نوری

در فصل نوسان و موج با تداخل موج‌های مکانیکی آشنا شدیم و در آنجا دیدیم که اگر دو سوزن که به فاصله نزدیکی از هم قرار دارند با بسامد معینی بر سطح آب درون یک ظرف همزمان ضربه بزنند،

موج‌هایی در سطح آب به وجود می‌آید که در همه جهت‌ها منتشر می‌شود. برهم‌نهی این موج‌ها را تداخل نامیدیم و گفتیم در نقطه‌هایی که دو موج هم‌فاز باشند تداخل سازنده و در نقاطی که دو موج در فاز مخالف باشند تداخل ویرانگر به وجود می‌آید. همین آزمایش را با نور نیز می‌توان انجام داد. یانگ، فیزیک‌دان انگلیسی، در آزمایش‌هایی که بین سال‌های ۱۸۰۲ تا ۱۸۰۴ انجام داد، دریافت که پدیده تداخل در نور هم مشاهده می‌شود.

شکل ۱۰-۶ طرح آزمایش یانگ را نشان می‌دهد. در پشت شکاف باریک  $S$  یک چشمه نور تک‌رنگ (لامپ روشن) قرار می‌دهیم. این شکاف خود مانند یک چشمه نور عمل می‌کند. در فاصله کمی از شکاف  $S$ ، دو شکاف موازی  $S_1$  و  $S_2$  که با  $S$  نیز موازی و هم‌فاصله‌اند، قرار می‌دهیم. نور رسیده به شکاف‌های  $S_1$  و  $S_2$  همانند دو چشمه هم‌بسامد، هم‌دامنه و هم‌فاز عمل می‌کنند و نور را در جهت‌های مختلف گسیل می‌کنند. نورهای گسیل شده از دو چشمه  $S_1$  و  $S_2$  با یکدیگر تداخل کرده و نوارهای تداخلی روشن و تاریک را بر روی پرده  $AB$  که در مقابل شکاف‌ها قرار دارد تشکیل می‌دهند.



دو موجی که به نقطه  $P_0$  روی محور تقارن دو شکاف می‌رسند، هم‌فازند. زیرا آنها دو راه مساوی  $S_1P_0$  و  $S_2P_0$  را تا پرده پیموده‌اند. تداخل این دو موج سازنده است و در نتیجه در محل  $P_0$  روی پرده یک نوار روشن تشکیل می‌شود. این نوار روشن را نوار روشن مرکزی می‌نامیم. برای اینکه ببینیم در چه شرایطی نوار روشن و در چه شرایطی نوار تاریک تشکیل می‌شود نقطه  $P$  را در شکل ۱۱-۶ در نظر می‌گیریم. پرتوهایی که از  $S_1$  و  $S_2$  به این نقطه می‌رسند، دو راه نامساوی  $S_1P$  و  $S_2P$  را می‌پیمایند. اختلاف فاز پرتوها را می‌توان از روی اختلاف راه آنها تعیین کرد.

$$\Delta\phi = k(d_2 - d_1) = \frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1)$$

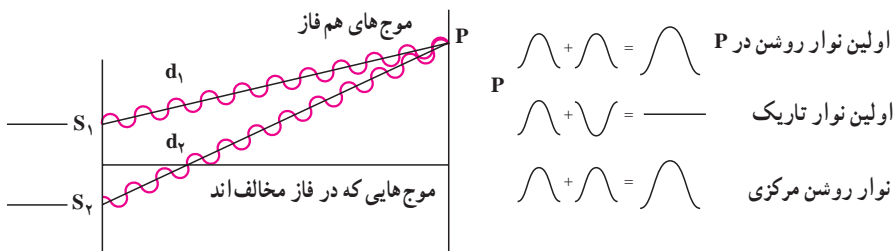
اگر  $\Delta\phi$  مضرب زوجی از  $\pi$  باشد یعنی :

$$\Delta\phi = \pm 2n\pi, n = 0, 1, \dots \quad (2-6)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) = \pm 2n\pi \quad \text{یا:}$$

$$d_2 - d_1 = \pm n\lambda = \pm 2n \frac{\lambda}{2}$$

در این صورت دو پرتوی که به پرده می‌رسند هم‌فاز اند و تداخل سازنده ایجاد می‌شود و در این نقطه‌ها نوار روشن تشکیل می‌شود. در رابطه ۶-۲ به ازای  $n = 0$ ، اختلاف راه و اختلاف فاز صفر است و نوار روشنی که تشکیل می‌شود همان نوار مرکزی است. به ازای  $n = 1$ ، اختلاف فاز  $2\pi$  است و اولین نوار روشن در دو طرف نوار مرکزی به دست می‌آید و به همین ترتیب می‌توان نوارهای روشن بعدی را به ازای  $n = 2, 3, \dots$  به دست آورد.



شکل ۶-۱۱

حال اگر  $\Delta\phi$  مضرب فردی از  $\pi$  باشد یعنی :

$$\Delta\phi = \pm (2m-1)\pi, m = 1, 2, \dots \quad (3-6)$$

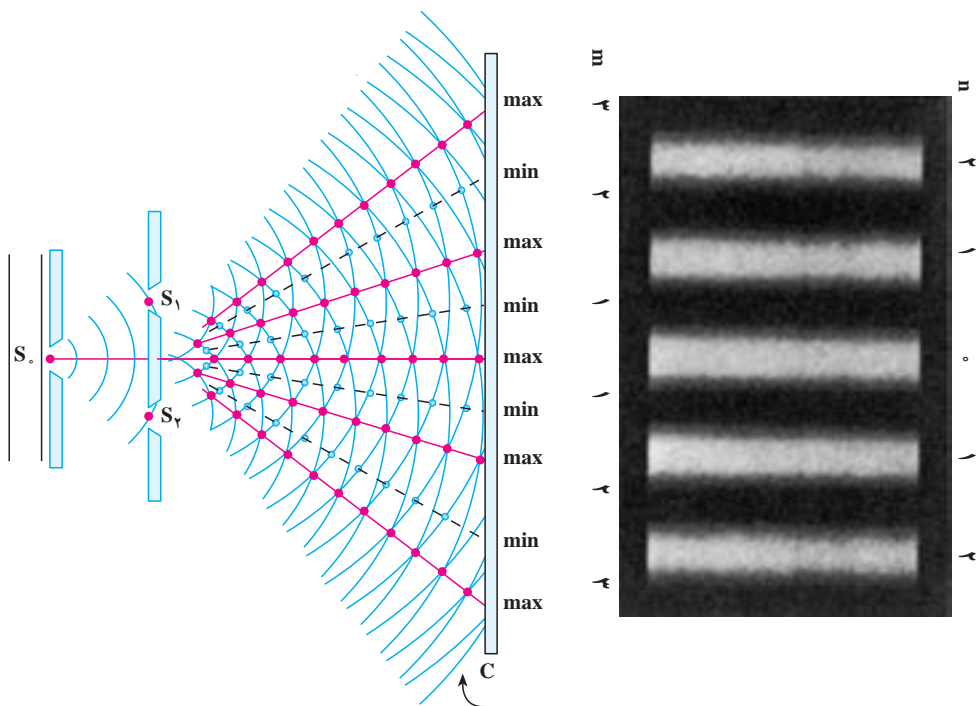
$$\frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) = \pm (2m-1)\pi \quad \text{یا:}$$

$$d_2 - d_1 = \pm (2m-1) \frac{\lambda}{2}$$

در این صورت دو موجی که به پرده می‌رسند در فاز مخالف هم خواهند بود و تداخل ویرانگر صورت می‌گیرد و در نتیجه در این نقاط نوار تاریک خواهیم داشت. در رابطه ۶-۳،  $m = 1$  مربوط به اولین نوار تاریک است که در دو طرف نوار روشن مرکزی قرار می‌گیرد. این نوار تاریک میان نوار روشن مرکزی و اولین نوار روشن قرار دارد.

نوارهای روشن و تاریک را که روی پرده تشکیل می‌شوند طرح تداخلی می‌نامند. شکل ۶-۱۲ طرح تداخلی دو شکاف یانگ را نشان می‌دهد. در دو طرف شکل، شماره نوارهای روشن که با مقادیر مختلف  $n$  و شماره نوارهای تاریک که با مقادیر مختلف  $m$  داده می‌شوند نیز آمده است.

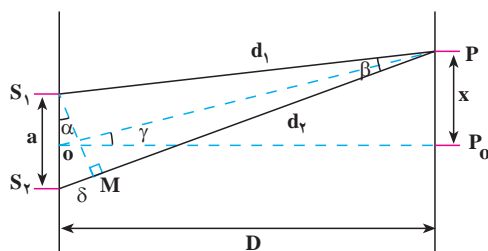




شکل ۱۲-۶

اندازه‌گیری طول موج: با استفاده از آزمایش یانگ می‌توان طول موج نور را اندازه‌گیری کرد. در شکل ۱۳-۶ طرحی از این آزمایش رسم شده است. در این شکل فاصله دو شکاف از هم  $a$  و فاصله شکاف‌ها از پرده  $D$  است. فرض کنید نور روشن  $n$ ام در نقطه  $P$  در فاصله  $x$  از نواری مرکزی روی پرده تشکیل شده است. دایره‌ای به مرکز  $P$  و به شعاع  $PS_1$  رسم می‌کنیم، دایره  $PS_2$  را در نقطه  $M$  قطع می‌کند. اختلاف راه نوری بین دو پرتو  $PS_1$  و  $PS_2$  برابر است با:

$$\delta = S_2M = d_2 - d_1$$



شکل ۱۳-۶

اگر فاصله پرده از صفحه دو شکاف بسیار بزرگ تر از فاصله دو شکاف یعنی  $D \gg a$  باشد، زاویه  $\gamma$  و نیز زاویه  $\beta$  (بین پرتوهایی که به P می‌رسند) بسیار کوچک خواهند بود و می‌توان  $S_1M$  را عمود بر  $S_1P$  و OP در نظر گرفت. در این صورت زاویه‌های  $\alpha$  و  $\gamma$  با یکدیگر برابرند، در نتیجه:

$$\tan \alpha = \tan \gamma, \tan \gamma = \frac{x}{D}$$

چون زاویه  $\alpha$  کوچک است، داریم:

$$\tan \alpha = \sin \alpha = \frac{\delta}{a}$$

بنابراین:

$$\frac{x}{D} = \frac{\delta}{a} \quad (4-6)$$

برای نوار روشن  $n\lambda$ :

$$\frac{x}{D} = \frac{n\lambda}{a} \quad (5-6)$$

که از آن رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\lambda = \frac{xa}{nD} \quad (6-6)$$

با اندازه‌گیری، فاصله نوار روشن از نوار مرکزی می‌توان طول موج را اندازه گرفت.

### پرسش ۳-۶

به نظر شما اگر آزمایش یانگ را با نور سفید انجام دهیم، طرح تداخلی چگونه خواهد بود؟

### مثال ۲-۶

آزمایش یانگ را با نور زرد سدیم انجام داده‌ایم. فاصله دو شکاف یانگ از یکدیگر  $a = 1/2 \text{ mm}$  و فاصله شکاف تا پرده  $1/2 \text{ m}$  است. اگر فاصله نوار روشن بیستم از وسط نوار مرکزی  $11/8 \text{ mm}$  باشد، طول موج نور زرد سدیم چند متر است؟

پاسخ

با استفاده از رابطه ۶-۶ داریم:

$$\lambda = \frac{ax}{nD} = \frac{1/2 \times 10^{-3} \times 11/8 \times 10^{-3}}{20 \times 1/2} \approx 5/9 \times 10^{-7} \text{ m} = 590 \text{ nm}$$

## تمرین‌های فصل ششم

۱- شکل ۱۴-۶ طیف موج‌های الکترومغناطیسی را با یک مقیاس تقریبی نشان می‌دهد.

پرتوهای $\gamma$	پرتوهای x	P	Q	R	S
------------------	-----------	---	---	---	---

شکل ۱۴-۶

الف) نام قسمت‌هایی از طیف را که تنها با حروف علامت‌گذاری شده‌اند، بنویسید.  
 ب) اگر در طول طیف از چپ به راست (از پرتوهای  $\gamma$  به طرف S) حرکت کنیم، چه خاصیتی از پرتوها افزایش، کاهش و یا ثابت می‌ماند؟

۲- چهار وجه اشتراک و دو تفاوت برای نور فروسرخ و امواج رادیویی بیان کنید.  
 ۳- الف) از یک ایستگاه رادیویی موج الکترومغناطیسی به طول موج ۷۵m گسیل می‌شود.  
 بسامد این موج را حساب کنید.

ب) موج‌های رادیویی با بسامد ۱۲MHz چه طول موجی دارند؟  
 ۴- الف) طول موج نور نارنجی  $m \times 10^{-7} 6/42$  است، بسامد این نور چند هرتز است؟  
 ب) بسامد نور قرمز در حدود  $Hz \times 10^{14} 4/28$  است، طول موج این نور در هوا و آب را حساب کنید. (سرعت نور را در هوا  $m/s \times 10^8 3$  و در آب  $m/s \times 10^8 2/25$  فرض کنید.)

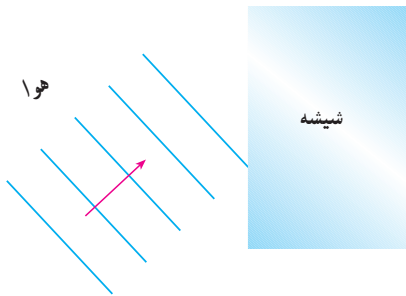
۵- گستره طول موج‌های رادیویی زیر را به دست آورید.  
 الف) باند AM در گستره بسامدی  $540$  تا  $1600$  کیلوهرتز  
 ب) باند FM در گستره بسامدی  $88$  تا  $108$  مگاهرتز  
 ۶- آزمایش یانگ را با نور تک‌رنگ سبز انجام داده و نوارهای تداخلی بر روی پرده موازی با سطح شکاف‌ها تشکیل داده‌ایم. برای اینکه فاصله دو نوار روشن متوالی را زیاد کنیم می‌توانیم:

- ۱) به جای نور سبز از نور تک‌رنگ قرمز استفاده کنیم.
- ۲) به جای نور سبز از نور تک‌رنگ بنفش استفاده کنیم.
- ۳) فاصله پرده از شکاف‌ها را زیاد کنیم.
- ۴) فاصله دو شکاف را از هم کم کنیم.
- ۷- اگر آزمایش یانگ عیناً در آب انجام گیرد چه تغییری در وضعیت نوارها نسبت به هوا حاصل

می شود؟ توضیح دهید.

۸- یک صافی مقابل چراغ جیوه قرار می دهیم، به طوری که تمام طول موج ها به جز ناحیه سبز آن جذب شود. با این نور سبز طرح داخلی آزمایش ینگ را به فاصله دو شکاف  $a = 0.6 \text{ mm}$  روی پرده ای به فاصله  $D = 2/5 \text{ m}$  از دو شکاف تشکیل می دهیم. اگر فاصله دو نوار روشن پهلوی هم  $2/27 \text{ mm}$  باشد، طول موج نور سبز را حساب کنید.

۹- در آزمایش دو شکاف ینگ، فاصله دو شکاف  $0.4 \text{ mm}$  و فاصله پرده تا دو شکاف  $80 \text{ cm}$  است. اگر طول موج نور  $0.6 \mu\text{m}$  باشد فاصله نوار دهم روشن از نوار مرکزی را حساب کنید.



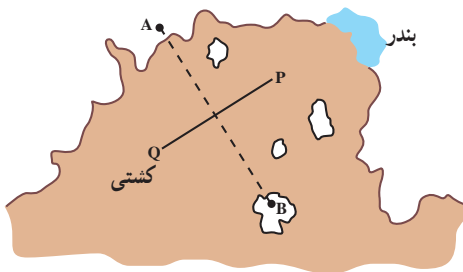
شکل ۱۵-۶

۱۰- در شکل ۱۵-۶ موج های نور فرودی از هوا وارد شیشه می شوند. بعضی از آنها در سطح جدایی دو محیط بازتابیده و بعضی شکسته شده و وارد شیشه می شوند. کدام یک از کمیت های زیر برای موج های بازتابیده و موج های شکسته شده یکسان است؟

الف) سرعت (ب) طول موج

پ) امتداد (ت) شدت نور

ث) بسامد



شکل ۱۶-۶

۱۱- در شکل ۱۶-۶ یک خط ساحلی با

دو ایستگاه رادیویی دریانوردی زمینی A و B دیده می شود که در فاصله زیادی از هم قرار گرفته اند. هر دو ایستگاه پیوسته سیگنال های رادیویی هم فاز گسیل می کنند که بسامد آنها  $1/5 \text{ MHz}$  است.

الف) طول موج این سیگنال ها چند متر است؟

ب) یک کشتی از مسیر QP به سوی بندر در حرکت است. هنگامی که این کشتی به نقطه ای درست در وسط خط فرضی AB می رسد، سیگنالی دریافت می کند که دامنه آن درست دو برابر دامنه هر موجی است که از یک ایستگاه به تنهایی دریافت می کرد. این مشاهده چه موضوعی را درباره سیگنال های گسیل شده از A و B نشان می دهد؟

پ) توضیح دهید در شرایط هوای مه آلود چگونه می توان از این سیگنال های رادیویی برای ادامه مسیر استفاده کرد.

# آشنایی با فیزیک اتمی



## فصل

# آشنایی با فیزیک اتمی

**نگاهی به فصل :** پیش از این در درس فیزیک با بسیاری از قانون‌های فیزیک آشنا شده‌ایم و دریافته‌ایم که چگونه با استفاده از این قانون‌ها می‌توان بسیاری از پدیده‌های طبیعی را تجزیه و تحلیل کرد. از جمله دیدیم که به کمک قانون‌های نیوتون می‌توان حرکت هر جسم را تحت تأثیر نیروهای وارد بر آن پیش‌بینی کرد و یا با استفاده از قانون گرانش، نیروی گرانشی بین جرم‌های مختلف را مشخص نمود، و یا با استفاده از قانون کولن، نیروی الکتریکی بین بارهای الکتریکی را به دست آورد و بالاخره با استفاده از قانون فارادی، می‌توان اثرهای مغناطیسی جریان‌های الکتریکی را توجیه کرد. شما می‌توانید با مراجعه به کتاب‌های فیزیک خود که تاکنون خوانده‌اید، قانون‌های دیگری را که فرا گرفته‌اید، به این فهرست بیفزایید.

فیزیک دانان تا آخر سده نوزدهم میلادی توانسته بودند برای بسیاری از پدیده‌های طبیعی توجیه‌های قانع‌کننده‌ای ارائه کنند. مجموعه آن قانون‌ها و نظریه‌ها را «فیزیک کلاسیک» می‌نامند که امروز هم در حل بسیاری از مسائل فیزیک و توجیه پدیده‌های طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما در سال‌های پایانی سده نوزدهم میلادی دانشمندان پدیده‌هایی را مشاهده کردند که دیگر با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند. امروزه به مجموعه نظریه‌ها و قانون‌هایی که به توجیه این پدیده‌ها می‌پردازد، فیزیک جدید (یا نوین) می‌گویند.

شالوده فیزیک جدید را نظریه‌های «نسبیت» و «کوانتومی» تشکیل می‌دهد. نظریه نسبیت مربوط به مطالعه پدیده‌ها در سرعت‌های بسیار زیاد و نزدیک به سرعت نور است. نظریه کوانتومی نیز به مطالعه پدیده‌ها در مقیاس‌های بسیار کوچک، مانند مولکول‌ها، اتم‌ها و ذره‌های ریزی که اتم‌ها را می‌سازند، می‌پردازد. ذره‌هایی که اتم‌ها را می‌سازند، ذره‌های زیر-اتمی نامیده می‌شوند. این نام اشاره بر آن دارد که این ذره‌ها اجزای اتم‌ها هستند و از اتم‌ها کوچکترند.

نظریه‌های نسبیت و کوانتومی هر دو طی بیست و پنج سال اول سده بیستم مطرح شدند. نظریه نسبیت را برای نخستین بار آلبرت اینشتین عرضه کرد. نظریه کوانتومی نیز نتیجه پژوهش‌های فیزیکدانان بسیاری از جمله ماکس پلانک، آلبرت اینشتین، نیلس بور، اروین شرودینگر، ورنر هایزنبرگ، پل دیراک،

ولف گانگ پائولی، ماکس بورن و ... بوده است.

در این فصل ضمن معرفی و بررسی برخی از پدیده‌هایی که با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند، به معرفی مفهوم برخی از نظریه‌های ساده‌تر که در فیزیک کوانتومی مطرح است می‌پردازیم. بررسی دقیق‌تر و مشروح این نظریه‌ها و قانون‌های مربوط به آنها کاری تخصصی و فراتر از سطح این کتاب است.

## ۷-۱- نظریه کوانتومی

آیا تاکنون به نوری که از زغال افروخته و یا فلز گداخته‌ای گسیل می‌شود توجه کرده‌اید؟ این پدیده نشان می‌دهد که اجسام در دماهای بالا از سطح خود نور مرئی گسیل می‌کنند. آزمایش‌های دقیق فیزیکی نشان می‌دهد که: از سطح همه اجسام در هر دمایی تابش‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌شود.

گسیل تابش‌های الکترومغناطیسی از سطح جسم‌ها را تابش گرمایی نیز می‌نامند. در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که چگونه می‌توان با عبور یک نور سفید از منشور، آن را به رنگ‌های مختلف (که در نتیجه طول موج‌های مختلف دارند) تجزیه کرد و طیف آن را به دست آورد. اگر بین طول موج‌هایی که در یک طیف وجود دارد فاصله‌ای نباشد آن طیف را طیف پیوسته می‌گوییم.

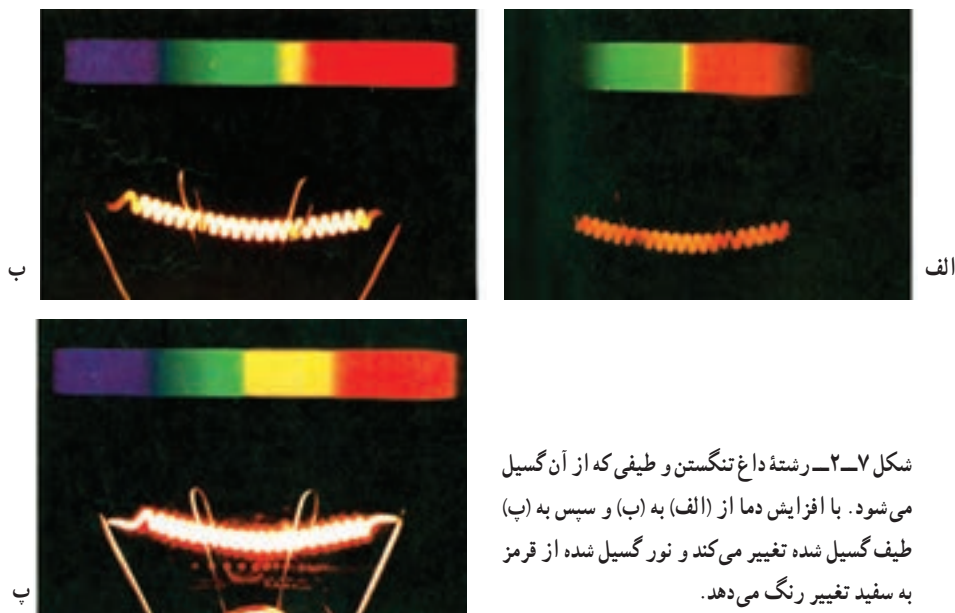
آزمایش نشان می‌دهد که تابش گسیل شده از هر جسم به دمای آن و برخی از خصوصیت‌های سطح آن بستگی دارد و در آن همه طول موج‌ها از فروسرخ، مرئی و فرابنفش به صورت یک طیف پیوسته وجود دارد.

در دمای پایین، مثلاً در دمای اتاق یا کمی بالاتر، بیشتر تابش گسیل شده دارای طول موج‌هایی در ناحیه فروسرخ است، به همین دلیل ما نمی‌توانیم با چشم خود وجود این تابش را تشخیص دهیم و فقط گرمای آن را حس می‌کنیم. هرچه دمای جسم بالاتر رود، طول موج‌هایی که بیش از همه تابش می‌شود، به تدریج از طول موج‌های بلند به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر و به طرف نور مرئی نزدیک می‌شوند. وقتی دمای جسم به اندازه کافی بالا رود، از آن نور



قرمز رنگی گسیل می‌شود، (شکل ۷-۱). در دماهای باز هم بالاتر، اجسامی — مانند رشته تنگستن داغ درون لامپ روشنایی — نور سفید (یعنی نوری با طیف پیوسته، که همه طول موج‌های نور مرئی را در طیف خود دارد) گسیل می‌کنند (شکل ۷-۲).

شکل ۷-۱



شکل ۷-۲- رشته داغ تنگستن و طیفی که از آن گسیل می‌شود. با افزایش دما از (الف) به (ب) و سپس به (پ) طیف گسیل شده تغییر می‌کند و نور گسیل شده از قرمز به سفید تغییر رنگ می‌دهد.

## پرسش ۷-۱

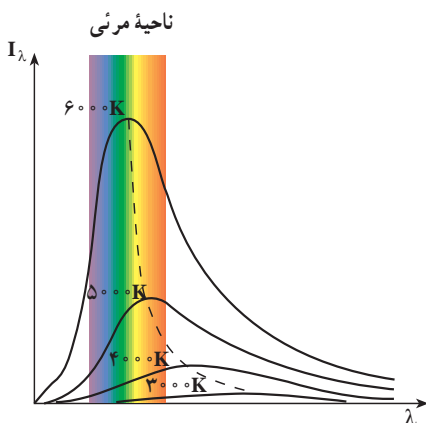
آیا می‌توانید بگویید در جایی که نشسته‌اید تابش گسیل شده از چه اجسامی بر شما می‌تابد (فرود می‌آید)؟ آیا از خود شما نیز در این حال تابش گسیل می‌شود؟

**شدت تابشی:** دیدیم که هر جسم همواره در حال گسیل تابش است و طول موج و انرژی تابش گسیل شده از آن هم به دما و هم به ویژگی‌های سطح آن جسم بستگی دارد. بنا به تعریف، شدت تابشی یک جسم برابر است با مقدار کل انرژی تابش‌های الکترومغناطیسی‌ای که در بازه زمانی یک ثانیه از واحد سطح آن جسم گسیل می‌شود.

مقدار تابش گسیل شده را با کمیتی به نام تابندگی مشخص می‌کنند. تابندگی یک جسم در هر طول موج برابر است با مقدار انرژی تابش‌های الکترومغناطیسی با طول موج‌های بین  $\lambda$  و  $\lambda + \Delta\lambda$  که در واحد زمان از واحد سطح جسم بر یکای گستره طول موج گسیل می‌شود.

اگر یکای طول موج را میکرون ( $\mu\text{m}$ ) و یکای سطح را سانتی متر مربع ( $\text{cm}^2$ ) اختیار کنیم، یکای تابندگی  $\mu\text{m} \cdot \text{W/cm}^2$  خواهد شد.





شکل ۳-۷- نمودار تقریبی تابندگی پرتوی گسیل شده از یک جسم بر حسب طول موج

تابندگی یک جسم ( $I_\lambda$ ) در طول موج‌ها و دماهای مختلف اندازه‌گیری شده و نتیجه آن در شکل ۳-۷ برای چهار دمای مختلف با تقریب رسم شده است. گستره طول موج‌های مرئی نیز در این شکل مشخص شده است. سطح زیر نمودار تابندگی بر حسب طول موج برابر با شدت تابشی جسم است. همان‌طور که از شکل پیداست با افزایش دما، سطح زیر منحنی بیشتر می‌شود.

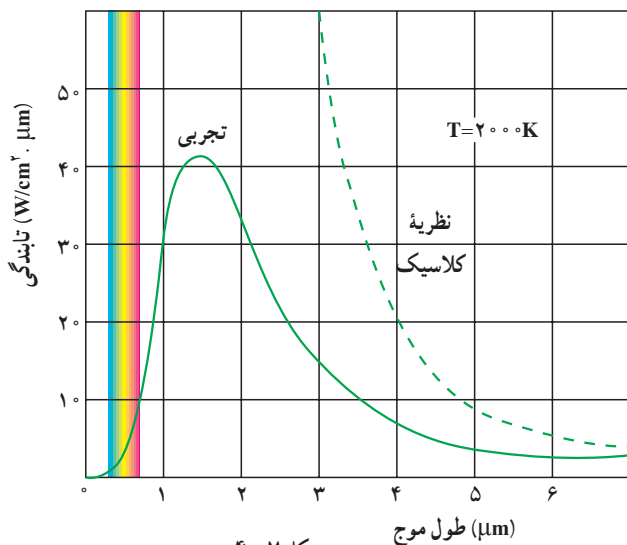
## فعالیت ۱-۷

با بررسی شکل ۳-۷ در گروه خود، الف) تابندگی جسم را برای یک طول موج معین، در دماهای مختلف، با یکدیگر مقایسه کنید. ب) مشخص کنید که آیا در یک دمای معین همه طول موج‌ها با تابندگی یکسان تابش می‌شوند یا نه؟ پ) اگر نتیجه دیگری از این بررسی به دست آورده‌اید به کلاس گزارش کنید.

همان‌طور که در شکل ۳-۷ می‌بینید هرچه دمای جسم بیشتر باشد، بیشینه منحنی، یعنی طول موجی که با بیشترین تابندگی گسیل می‌شود، به طرف طول موج‌های کوتاه‌تر می‌رود. علاوه بر این، شدت تابشی کل گسیل شده نیز با افزایش دما بیشتر می‌شود.

ناتوانی فیزیک کلاسیک در توجیه نظری تابش جسم: در فصل موج‌های الکترومغناطیسی دیدیم که چگونه حرکت شتاب‌دار ذره‌های باردار در آنتن منجر به گسیل موج الکترومغناطیسی در فضا می‌شود. بنا به نظریه فیزیک کلاسیک، تابش گرمایی که از سطح یک جسم گسیل می‌شود نیز از نوسان‌های ذره‌های باردار که درون جسم و در نزدیکی سطح آن واقع‌اند، سرچشمه می‌گیرد.

تا ابتدای سده بیستم میلادی، فیزیک‌دانان نتوانسته بودند با به کار بردن قانون‌ها و مفهوم‌های فیزیک کلاسیک، از جمله موج‌های الکترومغناطیسی گسیل شده از سطح یک جسم، منحنی‌های تجربی شکل ۳-۷ را توجیه کنند. به عبارت دیگر از محاسبه‌های آنان نتیجه شد که تابندگی با توان چهارم طول موج نسبت عکس دارد. این موضوع سبب می‌شود که در طول موج‌های کوتاه تابندگی جسم به سمت بی‌نهایت



شکل ۴-۷

میل کند که با نتیجه‌های تجربی شکل ۳-۷ سازگاری نداشت. در شکل ۴-۷ منحنی حاصل از محاسبه‌های نظری براساس فیزیک کلاسیک (خط چین) همراه با یک منحنی تجربی برای دمای ۲۰۰۰ کلوین نشان داده شده است.

## فعالیت ۲-۷

در گروه خود دو منحنی شکل ۴-۷ را مورد بحث قرار دهید و موارد ناسازگاری بین آن دو را مشخص کنید.

همان‌طور که از شکل ۴-۷ پیداست و پیش از این نیز توضیح داده شد، هر چه دمای جسمی بالاتر باشد،  $\lambda_m$  یعنی طول موجی که تابندگی با آن طول موج بیشینه است، کوچک‌تر خواهد بود. آزمایش نشان می‌دهد که میان  $\lambda_m$  و دمای مطلق جسم، رابطه‌ی زیر برقرار است که قانون جابه‌جایی وین نام دارد.

$$\lambda_m T = \text{مقدار ثابت} = 2/9 \times 10^{-2} \text{ m.K} \quad (۱-۷)$$

واژه‌ی جابه‌جایی در این قانون به چگونگی حرکت یا جابه‌جایی بیشینه‌ی تابندگی با تغییر دمای جسم سیاه مربوط است.

## مثال ۱-۷

دمای بدن انسان  $37^\circ\text{C}$  است. با محاسبه نشان دهید بیشینه‌ی تابندگی بدن انسان در چه ناحیه‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی است.

## پاسخ

$$\lambda_m T = 2/9 \times 10^{-3} \text{ m.K}$$

$$\lambda_m = \frac{2/9 \times 10^{-3}}{273 + 37}$$

$$\lambda_m \approx 9/35 \times 10^{-6} \text{ m}$$

با استفاده از شکل ۶-۹، این طول موج در محدودهٔ فروسرخ است.

یکی از ناسازگاری‌های بین نتایج محاسبات مبتنی بر فیزیک کلاسیک و نتیجه‌های تجربی، آن است که محاسبه‌های کلاسیکی پیش‌بینی می‌کنند که مقدار انرژی تابشی گسیل‌شده با طول موج بسیار کوتاه باید نامتناهی باشد. اما همان‌طور که در نمودار تجربی می‌بینید مقدار این انرژی بسیار کوچک است.

در سال ۱۹۰۰ میلادی پلانک با ارائهٔ نظریهٔ کوانتومی خود دربارهٔ تابش توانست نتیجه‌های تجربی به دست آمده را توجیه کند. اساس نظریهٔ پلانک بر این فرض استوار بود که انرژی تابشی **جسم کوانتومی** است. در ادامه نخست واژهٔ کوانتوم و مفهوم کمیت کوانتومی را معرفی می‌کنیم. سپس سعی می‌کنیم با بیان بسیار ساده شده‌ای به شرح نظریهٔ پلانک بپردازیم.

**کمیت کوانتومی:** ما در زندگی روزمره با کمیت‌های متفاوتی سروکار داریم که برخی از آنها مقدارهای پیوسته و برخی دیگر مقدارهای گسسته اختیار می‌کنند. برای مثال طول یک پارچه، مساحت یک زمین و یا حجم یک ظرف کمیت‌های پیوسته‌اند و هر مقداری را می‌توانند اختیار کنند. می‌توانیم ۲ متر یا ۲/۲ متر و یا ۲/۲۵ متر و ... پارچه داشته باشیم. از سوی دیگر، کمیت‌هایی مانند تعداد دانش‌آموزان یک کلاس و یا تعداد سکه‌های موجود در صندوق یک دستگاه تلفن سکه‌ای کمیت‌هایی گسسته‌اند و تنها می‌توانند مقدارهای خاصی اختیار کنند. برای مثال ما نمی‌توانیم ۲۴/۳ دانش‌آموز در یک کلاس و یا ۹۲/۵ عدد سکه در یک مجموعه از سکه‌ها داشته باشیم. در فیزیک کمیت‌های گسسته را «کوانتومی» می‌نامند. کمترین مقدار یک کمیت کوانتومی را مقدار پایه یا «کوانتوم» آن کمیت می‌خوانند.

برای مثال در مبحث الکتریسیته دیده‌ایم که مقدار بار الکتریکی موجود در یک جسم باردار مضرب درستی از بار یک الکترون ( $e = 1/6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ) است. به این ترتیب می‌گوییم که بار الکتریکی هر جسم باردار یک کمیت کوانتومی است و هر کوانتوم آن برابر بار الکتریکی یک الکترون است.

در فصل ۵ همین کتاب نیز دیدیم که بسامد حاصل از موج ایستاده در طنابی که دو سر آن ثابت شده است به صورت  $f_n = nf_1$  و در واقع مضرب صحیحی از مقدار پایهٔ آن، یعنی بسامد هماهنگ اول

است و بنابراین بسامد امواج ایستاده تشکیل شده در طناب نیز کمیتی گسسته است.

**نظریه پلانک درباره تابش:** بنابر نظریه پلانک مقدار انرژی ای که جسم به صورت تابش الکترومغناطیسی گسیل می کند همواره مضرب درستی از یک مقدار پایه است و این مقدار پایه به بسامد تابش الکترومغناطیسی بستگی دارد. به این ترتیب داریم:

$$E = nhf \quad (2-7)$$

در این رابطه  $n$  یک عدد صحیح مثبت است و ضریب  $h$  مقدار ثابتی است که ثابت پلانک نام دارد. نخستین برآورد این ثابت توسط پلانک به کمک تطبیق نتیجه محاسبه با منحنی های تجربی مربوط به تابش جسم صورت گرفت. هم اکنون مقدار پذیرفته شده برای این ثابت برابر با  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$  است.  $hf$  کوانتوم انرژی تابشی گسیل شده با بسامد  $f$  است و  $n$  که تعداد کوانتوم ها را مشخص می کند، عدد کوانتومی نام دارد.

در رابطه ۲-۷ اگر ثابت پلانک را برحسب ژول ثانیه قرار دهیم، انرژی برحسب ژول به دست می آید. ولی در بحث درباره اجزای سازنده اتم ها، ژول به دلیل آنکه یکای بزرگی است مناسب نیست و معمولاً از یکای دیگری برای انرژی به نام الکترون ولت (eV) استفاده می شود. الکترون ولت برابر مقدار انرژی مورد نیاز برای عبور یک الکترون از اختلاف پتانسیل ۱ ولت در خلأ است. درحالی که یک ژول برابر با مقدار انرژی لازم برای عبور بار الکتریکی برابر یک کولن در عبور از اختلاف پتانسیل یک ولت از خلأ است. در نتیجه، رابطه بین الکترون ولت و ژول به صورت زیر است:

$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (1\text{V}) = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (1\text{J/C}) = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

## تمرین ۱-۷

ثابت پلانک را برحسب eV.s به دست آورید.

## تمرین ۲-۷

نور زرد با بسامد تقریبی  $5.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ، بسامد اصلی نور خورشید را تشکیل می دهد. انرژی ای که هر کوانتوم این نور (فوتون) حمل می کند برحسب eV چقدر است؟

### تمرین ۳-۷

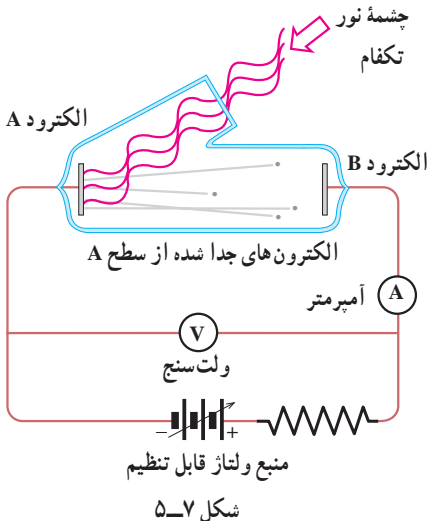
انرژی یک کوانتوم رنگ معینی از نور مرئی، برابر  $10^{-19} \times 5$  است. رنگ این نور را مشخص کنید.

### تمرین ۴-۷

بیشترین طول موج گسلی که از بدن انسان تابش می شود برابر  $940 \mu\text{m}$  است.  $\lambda = 940$  است.  
 الف) بسامد این تابش چقدر است؟  
 ب) این تابش در چه گستره ای از طیف موج های الکترومغناطیسی قرار دارد؟  
 پ) انرژی ای که توسط هر کوانتوم این تابش الکترومغناطیسی حمل می شود بر حسب eV چقدر است؟

## ۲-۷ فوتون و پدیده فوتوالکتریک

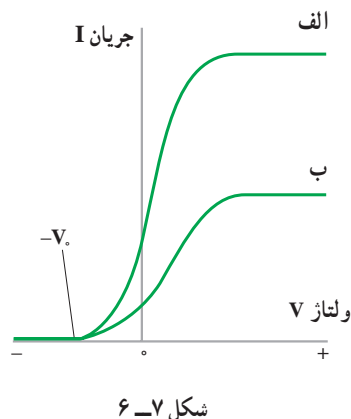
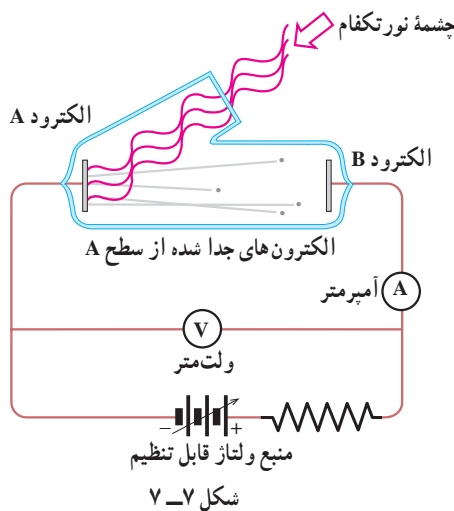
در سال ۱۸۸۷ میلادی، هانریش هرتز دانشمند آلمانی، مشاهده کرد که وقتی نوری با طول موج بسیار کوتاه - مانند نور فرابنفش - به کلاهک فلزی یک الکتروسکوپ (برق نما) باردار منفی می تابد، باعث تخلیه الکتروسکوپ می شود. آزمایش های دیگر نشان دادند که این تخلیه الکتریکی، به دلیل جدا شدن الکترون ها از سطح کلاهک فلزی روی داده است. این پدیده، یعنی جدا کردن الکترون ها از سطح یک فلز توسط تاباندن نور بر آن را پدیده فوتوالکتریک و الکترون های گسیل شده از سطح فلز را فوتوالکترون می نامند.



برای بررسی پدیده فوتوالکتریک از دستگاهی مطابق شکل ۵-۷ استفاده می کنیم. در این دستگاه دو الکتروود فلزی A و B در یک محفظه خلأ قرار دارند و از بیرون به یک منبع ولتاژ قابل تنظیم متصل شده اند. الکتروود A در مقابل یک چشمه نور تکفام (تک بسامد) قرار دارد.

آزمایش نشان می‌دهد که اگر نوری بر الکترود A نتابد هر قدر هم که ولتاژ بالا باشد، جریانی در مدار مشاهده نمی‌شود. ولی هنگامی که نوری با بسامد مناسب به الکترود A بتابد جریان در مدار برقرار می‌شود. وجود این جریان را می‌توانیم به این صورت تفسیر کنیم که تاباندن نور باعث جدا شدن فوتوالکتردها از سطح الکترود A و گسیل آنها شده است. اگر این الکتردها انرژی جنبشی کافی داشته باشند، به الکترود B می‌رسند و جریان برقرار می‌شود.

با تغییر دادن ولتاژ  $V$  می‌توانیم منحنی تغییرات جریان  $I$  را بر حسب  $V$  به دست آوریم. در شکل ۶-۷ منحنی تغییرات جریان بر حسب ولتاژ برای دو مقدار مختلف شدت نور فرودی بر الکترود A نشان داده شده است. بسامد نور فرودی در هر دو حالت یکسان است. مقدارهای مثبت  $V$  مربوط به شرایطی است که الکترود B به پایانه مثبت منبع ولتاژ متصل است.



همان گونه که منحنی (الف) نشان می‌دهد برای مقدارهای مثبت  $V$ ، با افزایش ولتاژ  $V$ ، نخست جریان افزایش می‌یابد و سپس به یک مقدار ثابت می‌رسد که افزایش ولتاژ  $V$  دیگر اثری بر مقدار آن ندارد.

این موضوع را می‌توان به این صورت توضیح داد که ولتاژ  $V$  مثبت باعث می‌شود که فوتوالکتردها به سمت الکترود B کشیده شوند و با افزایش ولتاژ  $V$  تعداد بیشتری از فوتوالکتردها به سمت B کشیده می‌شوند و جریان زیاد می‌شود. ولی پس از آنکه ولتاژ  $V$  به حدی رسید که الکترود B بتواند تمام فوتوالکتردها را جمع کند، دیگر با افزایش ولتاژ  $V$ ، جریان زیاد نمی‌شود.

نکته جالب توجه دیگری که در این منحنی دیده می‌شود آن است که برای مقادارهای منفی  $V$  (یعنی وقتی که الکتروود B مانند شکل ۷-۷ به پایانه منفی منبع ولتاژ متصل شده است) جهت جریان عوض نمی‌شود. با کاهش ولتاژ  $V$ ، جریان (مثبت) کاهش می‌یابد، تا اینکه به ازای یک ولتاژ  $V_0 -$  که ولتاژ متوقف‌کننده نامیده می‌شود، جریان صفر می‌شود و به ازای مقادارهای کمتر از  $V_0 -$  جریان همچنان صفر می‌ماند. برای بیان این وضعیت می‌توان گفت که برای مقادارهای منفی  $V$ ، الکتروود A، که اکنون به پایانه مثبت متصل است، فوتوالکتردها را به سوی خود می‌کشد و از انرژی جنبشی آنها می‌کاهد. در نتیجه تعداد کمتری از آنها می‌توانند به B برسند. در ولتاژ  $V_0 -$  هیچ فوتوالکترونی به B نمی‌رسد.

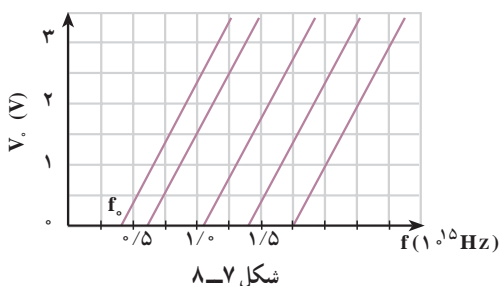
منحنی (ب) مربوط به آزمایشی است که در آن شدت نور فرودی را نصف کرده‌ایم (بسامد نور همان مقدار قبل را دارد). همان‌گونه که از منحنی پیداست مقدار  $V_0$  برای هر دو منحنی یکی است یعنی، مقدار ولتاژ متوقف‌کننده به شدت پرتوی فرودی بستگی ندارد.

اگر این آزمایش را با نور تکفام با بسامد دیگری تکرار کنیم، منحنی‌های تغییرات جریان برحسب ولتاژ را به همان صورت منحنی‌های شکل ۷-۶ به دست می‌آوریم تنها با این تفاوت که ولتاژ متوقف‌کننده مقدار دیگری خواهد داشت. یعنی مقدار ولتاژ متوقف‌کننده به بسامد نور فرودی بستگی دارد.

اگر در دستگاه شکل ۷-۵ جنس الکتروود فلزی A را تغییر دهیم، باز هم همین نتیجه‌ها را به دست می‌آوریم ولی در این مورد نیز مقدار ولتاژ متوقف‌کننده تغییر می‌کند، به عبارت دیگر مقدار ولتاژ متوقف‌کننده به جنس الکتروود فلزی A بستگی دارد.

رابرت میلیکان با آزمایش‌های دقیقی که در طول ۱۰ سال انجام داد مقدار ولتاژ متوقف‌کننده را برای فلزهای متفاوت و برای بسامدهای متفاوت پرتوی فرودی اندازه گرفت.

در شکل ۷-۸ منحنی تغییرات ولتاژ متوقف‌کننده برحسب بسامد پرتوی نور فرودی، برای چند فلز مختلف، نشان داده شده است. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که هر قدر بسامد پرتوی فرودی بر الکتروود A کمتر باشد، ولتاژ قطع‌کننده نیز کمتر خواهد بود. مقادارهای ولتاژ قطع‌کننده برای هر فلز بر روی یک



خط راست قرار دارد. همان‌گونه که در شکل می‌بینید هر خط، محور بسامد را، در بسامد معینی که آن را با  $f_0$  نشان می‌دهیم قطع می‌کند. تجربه نشان می‌دهد که اگر بسامد پرتوی تابیده بر الکتروود فلزی A از  $f_0$  مربوط به آن فلز کمتر باشد، پدیده فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. از این رو  $f_0$  را بسامد قطع می‌نامند.

ناتوانی فیزیک کلاسیک در تفسیر پدیده فوتوالکتریک : این پدیده که تاباندن نور بر یک فلز باعث جدا شدن الکترون‌های آن می‌شود، با برداشت‌های فیزیک کلاسیک کاملاً قابل قبول است. زیرا با توجه به آنکه نور نیز از جنس موج‌های الکترومغناطیسی است، می‌توان نتیجه گرفت که میدان الکتریکی آن موج‌ها، بر الکترون نیروی  $-eE$  وارد می‌کند، در نتیجه الکترون‌ها شتاب پیدا می‌کنند و انرژی جنبشی آنها افزایش می‌یابد و تعدادی از آنها که انرژی کافی کسب می‌کنند می‌توانند از فلز خارج شوند. حال اگر انرژی جنبشی فوتوالکترتون به هنگام خروج از سطح الکتروود A برابر  $K_A$  و به هنگام رسیدن به الکتروود B برابر  $K_B$  باشد و بین دو الکتروود ولتاژ  $V$  برقرار باشد، بنابر قضیه کار-انرژی داریم :

$$eV = K_B - K_A \quad (3-7)$$

که در آن  $eV$  کار نیروی وارد بر الکترون از سوی میدان الکتریکی بین الکتروودها در تغییر مکان از A به B است. اگر ولتاژ  $V$  منفی باشد (یعنی الکتروود B به پایانه منفی منبع ولتاژ متصل شده باشد)  $K_B$  کمتر از  $K_A$  خواهد بود.

اگر این ولتاژ منفی برابر ولتاژ متوقف کننده باشد ( $V = -V_0$ )، تنها آن الکترون‌هایی که بیشترین انرژی جنبشی را دارند می‌توانند تا نزدیکی الکتروود B برسند. برای این الکترون‌ها داریم :

$K_A = K_{\text{بیشینه}}$   
این الکترون‌ها جذب الکتروود B نمی‌شوند و برمی‌گردند. لذا برای آنها داریم :  $K_B = 0$ ، و در نتیجه از رابطه ۳-۷ داریم :

$$-eV_0 = -K_{\text{بیشینه}} \Rightarrow eV_0 = K_{\text{بیشینه}} \quad (4-7)$$

بنابراین با داشتن ولتاژ متوقف کننده، بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکترتون‌ها به هنگام خروج از الکتروود A مشخص می‌شود.

فیزیک کلاسیک در تفسیر نتیجه‌های تجربی مربوط به پدیده فوتوالکتریک با دو مشکل روبه‌رو شد.

- ۱- بنابر قانون‌های فیزیک کلاسیک، با افزایش شدت نور فرودی بر الکتروود A و در نتیجه افزایش میدان الکتریکی مربوط به موج الکترومغناطیسی، می‌توانیم بیشینه  $K$  را افزایش دهیم. درحالی که در منحنی شکل ۳-۸ دیدیم که  $V_0$  در نتیجه بیشینه  $K$  مستقل از شدت نوری است که بر الکتروود A می‌تابد.
- ۲- اگر شدت نور برای گسیل فوتوالکترتون‌ها از الکتروود A کافی باشد، اثر فوتوالکتریک باید در هر بسامدی رخ دهد. در حالی که دیدیم اگر بسامد نوری که بر A فرود می‌آید کمتر از بسامد قطع باشد، اثر فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد.



تفسیر کوانتومی پدیده فوتوالکتریک : پیش از این دیدیم که بنا بر فرضیه پلانک انرژی تابشی یک موج الکترومغناطیسی گسیل شده با بسامد  $f$ ، تنها می تواند مضرب درستی از یک مقدار پایه به نام کوانتوم انرژی ( $hf$ ) باشد. اینشتین در سال ۱۹۰۵ میلادی برای تفسیر پدیده فوتوالکتریک، با استفاده از فرضیه پلانک فرض کرد که هر موج الکترومغناطیسی با بسامد  $f$  از بسته های متمرکز یا کوانتوم های انرژی تشکیل شده است که آنها را فوتون می نامند.

فوتون های نور با رنگ های مختلف انرژی یکسان ندارند. فوتون بنفش انرژی بیشتر و فوتون قرمز انرژی کمتری دارد. اگر بسامد یک موج الکترومغناطیسی برابر  $f$  باشد، انرژی فوتون آن برابر خواهد بود با

$$E = hf \quad (۷-۵)$$

براساس پیشنهاد اینشتین انرژی یک موج الکترومغناطیسی با بسامد  $f$  تنها می تواند مضرب درستی از انرژی یک فوتون باشد، یعنی :

$$E = nhf \quad (۷-۶)$$

در این صورت می گوئیم این موج از  $n$  فوتون تشکیل شده است.

## مثال ۷-۲

الف) انرژی فوتون نور زرد با طول موج میانگین  $۵۸۹\text{nm}$  را برحسب الکترون ولت به دست آورید. ثابت پلانک برابر است با  $h = ۴/۱۴ \times ۱۰^{-۱۵} \text{ eVs}$ .

ب) تعداد فوتون هایی را که در یک ثانیه از یک لامپ زرد  $۶۰$  واتی گسیل می شوند محاسبه کنید.

پاسخ

الف) موج های الکترومغناطیسی با سرعت نور حرکت می کنند. از این رو داریم :

$$\lambda f = c$$

و در نتیجه رابطه  $E = hf$  چنین به دست می دهد :

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

$$= \frac{۴/۱۴ \times ۱۰^{-۱۵} \times ۳ \times ۱۰^8}{۵۸۹ \times ۱۰^{-9}} = ۲/۱۱ \text{ eV}$$

(ب)

$$E_T = pt = 60 \times 1 = 60 \text{ J} = 37/5 \times 10^{19} \text{ eV}$$

$$E_T = nhf = nE$$

$$37/5 \times 10^{19} = n \times 2/11$$

$$n = 1/8 \times 10^{20}$$

یعنی در هر ثانیه  $1/8 \times 10^{20}$  فوتون از این لامپ گسیل می‌شود که عدد بسیار بزرگی است.

اینشتین همچنین فرض کرد که در پدیده فوتوالکتریک، هر فوتون (با انرژی hf) صرفاً با یک الکترون برهم کنش می‌کند. به طوری که اگر انرژی فوتون به قدر کافی بزرگ باشد، بخشی از آن صرف جدا کردن الکترون از فلز می‌شود و مابقی آن به انرژی جنبشی الکترون جدا شده تبدیل می‌شود. این فرض اینشتین را می‌توان به کمک قانون پایستگی انرژی به صورت زیر نوشت :

$$hf = W + K \quad (7-7)$$

که در آن W انرژی لازم برای جدا کردن الکترون از سطح فلز و K انرژی جنبشی الکترون جدا شده است. برخی از الکترون‌ها در فلز کمتر مقیداند و برای خارج کردن آنها از فلز کار کمتری لازم است. اگر حداقل کار لازم برای خارج کردن الکترون‌ها از یک فلز خاص برابر W باشد، انرژی جنبشی سریع‌ترین فوتوالکترن‌های گسیل شده از آن برابر خواهد بود با :

$$K_{\text{بیشینه}} = hf - W. \quad (8-7)$$

W را تابع کار فلز می‌نامند و همان‌گونه که گفتیم، حداقل کار لازم برای خارج کردن یک الکترون از فلز است.

با استفاده از رابطه 7-4 می‌توانیم رابطه 7-8 را به صورت زیر بنویسیم :

$$eV_0 = hf - W. \quad (9-7)$$

### فعالیت ۳-۷

با بحث و بررسی در گروه خود، نشان دهید که دو مشکلی که در تفسیر کلاسیکی نتیجه‌های تجربی پدیده فوتوالکتریک وجود داشت در رابطه 7-9 وجود ندارد.

رابطه ۹-۷، بین ولتاژ متوقف کننده  $V_0$  و بسامد فوتون فرودی بر الکتروود A، یک رابطه خطی است و منحنی آن یک خط راست است که کاملاً با منحنی های تجربی در شکل ۸-۷ سازگار است.

### فعالیت ۴-۷

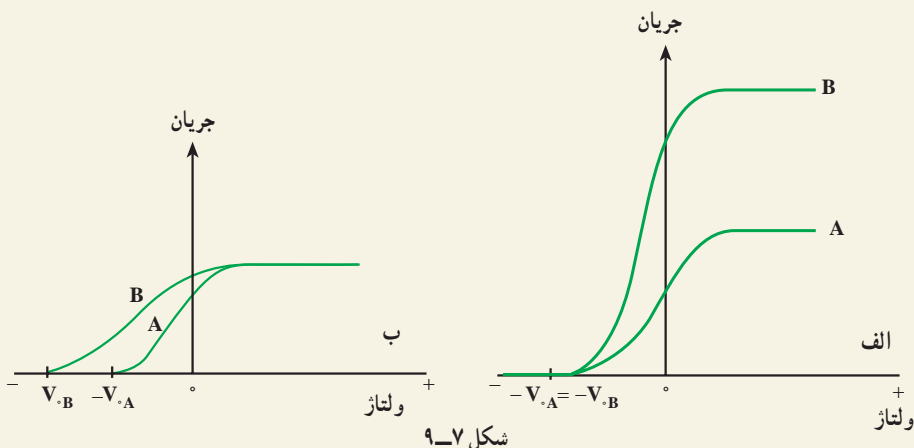
منحنی تغییرات  $V_0$  بر حسب بسامد  $f$  را با استفاده از رابطه ۹-۷ رسم کنید. با بحث و بررسی در گروه خود مشخص کنید که شیب این خط و طول از مبدأ آن، هر یک چه کمیت هایی را مشخص می کنند؟

در رابطه ۹-۷ اگر  $hf$  از  $W_0$  کوچک تر باشد، هیچ الکترونی از فلز خارج نمی شود. در نتیجه  $hf$  حداقل می تواند برابر  $W_0$  باشد. به این ترتیب بسامد قطع از رابطه زیر به دست می آید:

$$f_0 = \frac{W_0}{h} \quad (۱۰-۷)$$

### مثال ۳-۷

شکل های ۹-۷ الف و ب به ترتیب منحنی تغییرات جریان بر حسب ولتاژ را برای دو شدت مختلف و همچنین دو باریکه نور فرودی با تعداد فوتون های یکسان در واحد زمان در پدیده فوتوالکتریک نشان می دهد. توضیح دهید هر یک از این منحنی ها در چه شرایطی می توانند برقرار باشند.



پاسخ :

با توجه به اینکه در منحنی (الف) شدت نور فرودی متفاوت و ولتاژ متوقف کننده برای هر دو حالت یکسان است، نتیجه می گیریم که بسامد پرتوهای فرودی یکسان است. در صورتی که در منحنی (ب) تعداد فوتون های باریکه های نور فرودی در واحد زمان برای هر دو حالت یکسان است و ولتاژ متوقف کننده متفاوت است؛ بنابراین، بسامد پرتوهای فرودی متفاوت است. به این ترتیب این منحنی می تواند برای دو باریکه فرودی با تعداد فوتون های یکسان در پدیده فوتوالکتریک برقرار باشد. علاوه بر این منحنی (ب) نشان می دهد که  $V_{B} > V_{A}$ ؛ این، یعنی بسامد پرتوهای فرودی B بزرگ تر از بسامد پرتوهای فرودی A است (چرا؟).

## مثال ۷-۴

تابع کار تنگستن  $4.52\text{eV}$  است.

(الف) بسامد و طول موج قطع تنگستن را حساب کنید.

(ب) بیشینه انرژی جنبشی الکترون ها را هنگامی که طول موج  $198\text{nm}$  به کار می رود، حساب کنید. ولتاژ متوقف کننده در این حالت چقدر است؟

پاسخ

(الف) بسامد قطع برابر است با

$$f_0 = \frac{w_0}{h} = \frac{4.52 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}} \\ = 1.09 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

با توجه به رابطه  $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$ ، طول موج قطع برابر است با

$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{1.09 \times 10^{15}} = 2.7 \times 10^{-7} \text{ m} \\ = 270 \text{ nm}$$

$$K_{\text{بیشینه}} = hf - W_0 \quad (\text{ب})$$

$$= \frac{hc}{\lambda} - W_0$$

$$= \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{198 \text{ nm}} - 4/52 \text{ eV}$$

$$= 1/74 \text{ eV} \quad 2/7 \times 10^{-19} \text{ J}$$

ولتاژ متوقف کننده، متناظر با بیشینه K است. بنابراین

$$V_0 = \frac{K_{\text{بیشینه}}}{e} = \frac{1/74 \text{ eV}}{e} = 1/74 \text{ V}$$

### تمرین ۵-۷

طول موج قطع برای اثر فوتوالکتریک در یک فلز معین برابر ۲۵۴ nm است.

الف) تابع کار این فلز بر حسب الکترون – ولت چقدر است؟

ب) آیا اثر فوتوالکتریک به ازای  $\lambda > 254 \text{ nm}$  مشاهده خواهد شد یا به ازای  $\lambda < 254 \text{ nm}$ ؟ چرا؟

### تمرین ۶-۷

تابع کار فلز روی ۴/۳۱ eV است. هرگاه نور بر سطحی از جنس روی بتابد و فوتوالکترن ها مشاهده شوند،

الف) بلندترین طول موجی که سبب گسیل فوتوالکترن ها می شود چقدر است؟

ب) وقتی نور به طول موج ۲۲۰ nm به کار گرفته شود ولتاژ متوقف کننده چقدر است؟

### ۳-۷ طیف اتمی

علاوه بر آنچه تا اینجا به آنها اشاره کردیم، پدیده های دیگری نیز هستند که فیزیک کلاسیک قادر به تفسیر آنها نبود. لذا فیزیکدانان با فرض های غیر کلاسیکی – مانند فرضیه های پلانک و ایششتین که در بالا به آنها اشاره شد – توانستند این پدیده ها را به خوبی تفسیر کنند. توصیف این پدیده ها فراتر



شکل ۷-۱۰

از سطح این کتاب است و ما در اینجا تنها به عنوان نمونه طیف گسیل شده از اتم‌ها را که بر مبنای فیزیک کلاسیک قابل تفسیر نیست، ذکر می‌کنیم.

در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه پاشیدگی نور در منشور آشنا شدید و دیدید که نیوتون برای نخستین بار با گذراندن نور خورشید از منشور «طیف نور سفید» را تشکیل داد. نیوتون نشان داد که نور سفید آمیزه‌ای از رنگ‌های مختلف است. اکنون می‌دانیم نور سفید از طول موج‌های مختلفی، از نور بنفش با طول موج حدود  $400\text{ nm}$  تا نور قرمز با طول موج حدود  $700\text{ nm}$ ،

تشکیل شده است. طیف نور سفید که یک طیف پیوسته است در شکل ۷-۱۰ نشان داده شده است. به همین ترتیب می‌توان طیف هر نوری را که از رنگ‌های مختلف تشکیل شده باشد، توسط پاشیدگی در منشور شناسایی کرد. پیش از این با تابش گرمایی که از سطح جسم‌های جامد گسیل می‌شود، آشنا شدیم و دیدیم که این تابش دارای طیف پیوسته است.

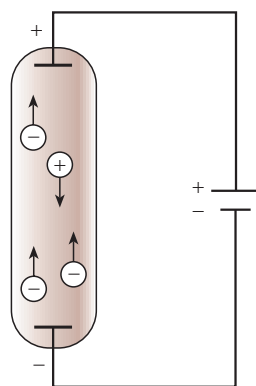
اکنون به بررسی نوع دیگری از تابش می‌پردازیم. این تابش توسط لامپ‌های حاوی بخار بسیار رقیق عناصرها گسیل می‌شود. این لامپ‌ها مطابق شکل ۷-۱۱ الف به صورت لوله‌های باریک شیشه‌ای هستند که درون آنها یک گاز رقیق در فشار کم وجود دارد. دو الکترود به نام‌های کاتد و آند در دو



ب



ب

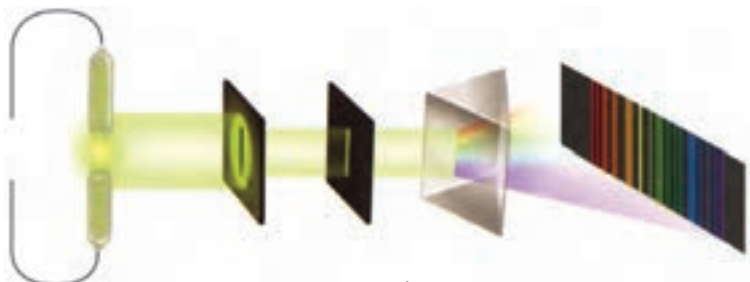


الف

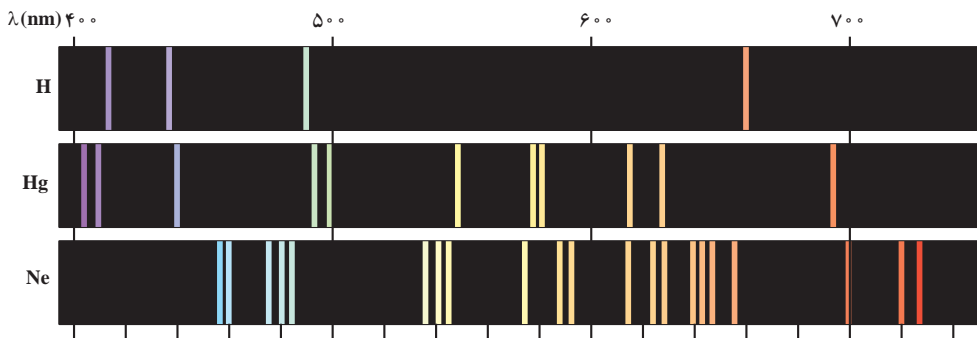
شکل ۷-۱۱

انتهای لوله قرار دارند. اگر بین این دو الکترود ولتاژ بالایی برقرار شود، اتم‌های گاز درون لامپ مطابق شکل ۷-۱۱- ب و پ شروع به گسیل نور می‌کنند. نوری که از لامپ‌های حاوی بخار عنصرهای متفاوت گسیل می‌شود، با یکدیگر تفاوت دارد. برای مثال نوری که اتم‌های بخار جیوه گسیل می‌کنند، همان‌گونه که در شکل ۷-۱۱ نشان داده شده است به رنگ نیلی-آبی است. اگر این نور را مطابق شکل ۷-۱۲ از منشور بگذرانیم و طیف آن را تشکیل دهیم، می‌بینیم که این طیف پیوسته نیست، بلکه تنها از چند خط رنگی جدا از هم با طول موج‌های معین تشکیل شده است.

اگر درون لامپ به جای بخار جیوه، بخار عنصر دیگری باشد، باز هم در طیف حاصل خط‌های رنگی جدا از هم دیده می‌شود، ولی این خط‌ها هم از نظر تعداد و هم از نظر طول موج با خط‌های طیف حاصل از لامپ بخار جیوه تفاوت دارد. طیف نور گسیل شده از بخار هر عنصر را طیف اتمی آن عنصر می‌نامند. پس می‌توان گفت که طیف اتمی عنصرهای مختلف با هم تفاوت دارد. طیف اتمی چند عنصر در شکل ۷-۱۳ نشان داده شده است. طیف اتمی حاصل از نور گسیل شده از بخار عنصرها را طیف گسیلی (یا نشری) آن اتم‌ها می‌نامند.



شکل ۷-۱۲



شکل ۷-۱۳

طیف اتمی جیوه، خط‌هایی در ناحیهٔ فرابنفش دارد. یعنی یک لامپ بخار جیوه مقدار زیادی نور فرابنفش نیز گسیل می‌کند. چون تابش فرابنفش برای انسان مضر است، نباید به‌طور مستقیم در معرض نور گسیل شده از لامپ بخار جیوه قرار گرفت.

درون لامپ‌های فلورسان نیز بخار جیوه وجود دارد اما دیوارهٔ درونی این لامپ‌ها با پوشش نازکی از یک مادهٔ شیری رنگ (مخلوطی از بورات کادمیوم، سیلیکات روی و تنگستات کلسیم) پوشانده شده است. این ماده دارای این ویژگی است که اگر نور تکفام در ناحیهٔ فرابنفش بر آن بتابد، از خود نور سفید گسیل می‌کند. پس نوری که از لامپ فلورسان گسیل می‌شود، نور سفید است. در کاربردهای متداول، از لامپ بخار جیوه بدون پوشش فلورسان به عنوان لامپ روشنایی استفاده نمی‌شود.

**طیف جذبی:** در سال ۱۸۱۴ میلادی فرانیهوفر، فیزیکدان آلمانی، کشف کرد که اگر به‌دقت به طیف خورشید بنگریم، خط‌های تاریکی در طیف پیوستهٔ آن مشاهده خواهیم کرد (شکل ۷-۱۴). این مطلب نشان می‌دهد که بعضی از طول موج‌ها در نوری که از خورشید به زمین می‌رسد، وجود ندارد و به جای آنها، در طیف پیوستهٔ خورشید خط‌های تاریک (یا سیاه) دیده می‌شود.

اکنون می‌دانیم که گازهای عنصرهای موجود در جو خورشید، بعضی از طول موج‌های گسیل شده از خورشید را جذب می‌کنند و نبود آنها در طیف پیوستهٔ خورشید به صورت خط‌های تاریک ظاهر می‌شود. طیف نور سفیدی را که بعضی از خط‌ها با طول موج‌های آن جذب شده باشد، **طیف جذبی** می‌نامیم.

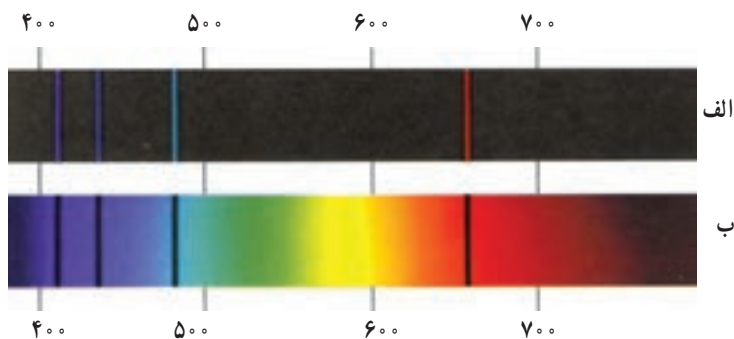
در اواسط سدهٔ نوزدهم، معلوم شد که اگر نور سفید از داخل بخار عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط‌های تاریکی ظاهر می‌شود. این خط‌ها (طول موج‌ها) توسط اتم‌های بخار عنصر جذب شده‌اند. مطالعهٔ طیف‌های گسیلی و جذبی عنصرهای مختلف نشان می‌دهد که:

۱- هم در طیف گسیلی و هم در طیف جذبی اتم‌های بخار هر عنصر، طول موج‌های معینی وجود دارد که از ویژگی‌های مشخصهٔ آن عنصر است. یعنی طیف‌های گسیلی و جذبی هیچ دو عنصری مثل هم نیست.

شکل ۷-۱۴- خط‌های تاریکی که در طیف خورشید دیده می‌شود، خط‌های فرانیهوفر نام دارد. طول موج‌های مربوط جو خورشید از نور تابشی خورشید حذف شده است.



۲- اتم هر عنصر دقیقاً همان طول موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کند که اگر دمای آن به اندازه کافی بالا رود و یا به هر صورت دیگر برانگیخته شود، آنها را تابش می‌کند. طیف‌های گسیلی (نثری) و جذبی اتم هیدروژن در شکل ۷-۱۵ نشان داده شده‌اند.



الف - طیف گسیلی، خط‌های روشن معرف طول موج‌های گسیلی هستند.  
ب - طیف جذبی، خط‌های تاریک در زمینه روشن معرف طول موج‌های جذب شده هستند.

شکل ۷-۱۵

از آنچه گفته شد، نتیجه می‌گیریم که طیف اتمی هر عنصر خط‌ها یا طول موج‌های ویژه خود را دارد و طیف‌های گسیلی و جذبی هر عنصر مانند اثر انگشت افراد می‌تواند برای شناسایی اتم‌ها از یکدیگر به کار رود.

## فعالیت ۷-۵

با بحث در گروه خود مشخص کنید که چگونه می‌توان با استفاده از طیف جذبی خورشید به وجود عنصرهای مختلف در جو خورشید پی برد؟

تهیه و بررسی طیف‌های گسیلی و جذبی را طیف‌نمایی می‌نامند. طیف‌نمایی ابزار توانمندی برای شناسایی عنصرهاست. در سال‌های پایانی سده نوزدهم میلادی چند عنصر ناشناخته، تنها به کمک طیف‌نمایی کشف شد. ولی علیرغم این کاربردهای موفق تجربی، در قرن نوزدهم نظریه قابل قبولی برای تفسیر طیف اتمی وجود نداشت. به عبارت دیگر، اینکه چرا هر عنصر طیف مخصوص به خود را دارد، سوالی بود که در فیزیک کلاسیک پاسخی برای آن یافت نمی‌شد.

درک ساز و کار جذب و گسیل نور به وسیله اتم‌ها از دیدگاه فیزیک کلاسیک آسان است. زیرا بنابر نظریه‌های کلاسیکی یک اتم در صورتی نور گسیل می‌کند که به طریقی — مانند برخورد با سایر اتم‌ها یا توسط میدان‌های الکتریکی — به الکترون‌های آن انرژی داده شود. در نتیجه الکترون‌ها با به دست آوردن انرژی ارتعاش می‌کنند و موج‌های الکترومغناطیسی به وجود می‌آورند؛ یعنی نور گسیل می‌کنند. اما اینکه چرا اتم‌های همهٔ عناصر موج‌های الکترومغناطیسی با طول موج‌های یکسان گسیل نمی‌کنند و اینکه چرا هر عنصر طول موج خاص خود را دارد از دیدگاه فیزیک کلاسیک قابل توجیه نیست.

در مورد جذب نور هم، از دیدگاه فیزیک کلاسیک، می‌توان گفت که وقتی نور به یک اتم می‌تابد، نوسان میدان الکتریکی ناشی از نور فرودی، باعث می‌شود که الکترون‌های اتم شروع به ارتعاش کنند و نور فرودی را جذب کنند. ولی باز هم در این دیدگاه هیچ توجیه قانع‌کننده‌ای برای اینکه «چرا هر عنصر تنها طول موج‌های خاصی را که مشخصهٔ آن عنصر است جذب می‌کند و بقیهٔ طول موج‌ها را جذب نمی‌کند؟» وجود ندارد.

نیلس بور، فیزیکدان دانمارکی، در سال ۱۹۱۳ میلادی با بیان فرضیه‌هایی دربارهٔ اتم‌ها، طیف اتمی را توجیه کرد و بار دیگر نشان داد که تجدید نظر اساسی در فیزیک کلاسیک ضروری است. رابطهٔ ریدبرگ — بالمر: اتم هیدروژن ساده‌ترین اتم هاست و طیف آن اولین طیفی بود که به‌طور کامل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آنگستروم تا سال ۱۸۸۵ میلادی طول موج چهارخط از طیف اتم هیدروژن را با دقت زیاد اندازه گرفت. این طول موج‌ها در شکل ۷-۱۵ نشان داده شده‌اند. بالمر که یک معلم سوئسی بود، این اندازه‌گیری‌ها را مطالعه کرد و نشان داد که طول موج خط‌های این طیف را می‌توان با دقت بسیار زیاد از رابطهٔ زیر به دست آورد:

$$\lambda = 364 / 56 \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (7-11)$$

که در آن  $\lambda$  طول موج خط‌های طیف برحسب نانومتر (nm) و  $n$  یکی از عددهای صحیح زیر است:

$$n = 3, 4, 5, 6$$

گفتنی است که بالمر این رابطه را صرفاً با بررسی رابطه‌های ریاضی مختلف و بدون هیچ‌گونه تجربهٔ فیزیکی به دست آورد.

## مثال ۷-۵

طول موج خط‌های طیفی شکل ۷-۱۴ را به کمک رابطهٔ بالمر به دست آورید.

پاسخ

داریم:

$$\lambda = 364 / 56 \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

برای  $n = 3$  به دست می‌آوریم.

$$\lambda_1 = 364 / 56 \frac{9}{9 - 4} = 656 / 2 \text{ nm}$$

برای  $n = 4$  داریم:

$$\lambda_2 = 364 / 56 \frac{16}{16 - 4} = 486 / 0 \text{ nm}$$

و به همین ترتیب

$$n = 5 \Rightarrow \lambda_3 = 434 / 0 \text{ nm}$$

$$n = 6 \Rightarrow \lambda_4 = 410 / 13 \text{ nm}$$

کار عمده در زمینهٔ جستجوی طیف کامل اتم هیدروژن توسط ریذبرگ در حدود سال ۱۸۹۰ میلادی انجام شد. ریذبرگ کار کردن با عکس طول موج را مناسب‌تر تشخیص داد، لذا رابطهٔ بالمر (معادلهٔ ۷-۱۱) را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (7-12)$$

که در آن  $R_H$  ثابت ریذبرگ برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود و مقدار آن برابر است با  $R_H = 109678 \text{ nm}^{-1}$ .

طول موج تمامی خط‌های طیف اتم هیدروژن را می‌توان از رابطهٔ زیر که به رابطهٔ ریذبرگ معروف است به دست آورد.

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n > n' \quad (7-13)$$

با قرار دادن  $n' = 2$  رابطهٔ بالمر (۷-۱۲) به دست می‌آید. خط‌های طیف مربوط به  $n' = 2$  را «رشتهٔ بالمر» می‌نامند.

خط‌های دیگر طیف اتم هیدروژن، با قرار دادن عددهای صحیح دیگر به جای  $n'$  به شرح زیر به دست می‌آیند.

به ازای  $n' = ۱$  داریم :

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = ۲, ۳, ۴, \dots$$

این رشته را «رشته لیمان» می نامند.

همچنین به ازای  $n' = ۳$  داریم :

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = ۴, ۵, ۶, \dots$$

این رشته را نیز «رشته پاشن» می نامند. در جدول ۷-۱ رشته های طیف اتم هیدروژن داده شده اند.

جدول ۷-۱

نام رشته	مقدار $n'$	رابطه ریذبرگ مربوط	مقدارهای $n$	گستره طول موج
لیمان	۱	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = ۲, ۳, ۴, \dots$	فرابنفش
بالمر	۲	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = ۳, ۴, ۵, \dots$	فرابنفش و مرئی
پاشن	۳	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = ۴, ۵, ۶, \dots$	فروسرخ
براکت	۴	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = ۵, ۶, ۷, \dots$	فروسرخ
پفوند	۵	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = ۶, ۷, ۸, \dots$	فروسرخ

## مثال ۷-۶

طول موج اولین خط طیفی اتم هیدروژن در رشته لیمان را که برای آن  $n' = ۱$  و  $n = ۲$  است به دست آورید و تعیین کنید که این خط در کدام گستره موج های الکترومغناطیسی واقع است.

پاسخ

برای  $n' = ۱$  و  $n = ۲$  طبق رابطه ریذبرگ داریم :

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{۲^2} \right) = \frac{۳}{۴} R_H$$

در نتیجه طول موج این خط برابر است با :

$$\lambda = \frac{4}{3R_H} = \frac{4}{3 \times 0.0109(\text{nm})^{-1}} = 121 \text{ nm}$$

با مراجعه به طیف موج‌های الکترومغناطیسی در فصل ۲ مشاهده می‌کنیم که این خط طیفی در ناحیهٔ فرابنفش واقع است.

وجود خط‌های طیفی متفاوت برای اتم‌ها و رابطهٔ ساده و دقیقی مثل رابطهٔ ریدبرگ برای طیف اتم هیدروژن، لزوم داشتن الگویی برای اتم را نشان می‌داد. الگویی که بتوان به کمک آن این نتیجه‌های تجربی را توجیه کرد.

## ۴-۷- الگوهای اتمی

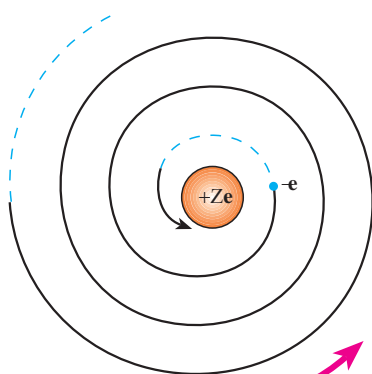
**الگوی اتمی تامسون :** تامسون، دانشمند انگلیسی که با آزمایش‌هایی موفق به کشف الکترون در سال ۱۸۹۶ میلادی شده بود، نخستین الگوی اتمی را در سال ۱۸۹۹ میلادی ارائه داد. در این الگو، اتم به صورت توزیع کروی یکنواختی از جرم و بار مثبت در نظر گرفته شد که الکترون‌ها (بارهای منفی) مانند کشمش‌های درون یک کیک کشمش‌ی درون آن قرار دارند.

اگرچه تامسون براساس الگوی کیک کشمش‌ی توانست برخی از ویژگی‌های اتم‌ها را توجیه کند، ولی رادرفورد با آزمایش‌هایی که به منظور تأیید و تکمیل الگوی کیک کشمش‌ی تامسون انجام داد، به نتیجه‌هایی دست یافت که با چنین الگویی سازگار نبود. آزمایش‌های وی نشان دادند که بار مثبت اتم باید در بخش کوچکی در مرکز اتم متمرکز باشد. رادرفورد براساس این نتیجه‌ها در سال ۱۹۱۲ میلادی الگوی دیگری برای ساختار اتم ارائه کرد.

**الگوی اتمی رادرفورد :** در الگوی اتمی رادرفورد همهٔ بار مثبت اتم در یک ناحیهٔ مرکزی با حجم بسیار کوچکی به نام هسته متمرکز شده است و اطراف آن را الکترون‌ها با بار منفی، در فاصله‌ای زیاد احاطه کرده‌اند، به گونه‌ای که می‌توان گفت فضای بین هسته و الکترون‌ها خالی است. رادرفورد الگویی که برای اتم ارائه کرد به اینکه الکترون‌ها در اتم چگونه حرکت می‌کنند اشاره‌ای نکرد. اشکال اساسی این الگو آن است که اگر آن الکترون‌ها را نسبت به هسته ساکن فرض کنیم، باید تحت تأثیر نیروی ربایشی الکتریکی بین هسته و الکترون، روی هسته سقوط کنند و در نتیجه اتم ناپایدار باشد، یعنی ساختار

داخلی آن درهم فرو ریزد که این موضوع کاملاً خلاف چیزی است که در عمل وجود دارد. اگر هم فرض کنیم که الکترون‌ها - مانند سیاره‌های منظومه خورشیدی که به دور خورشید در حرکت اند - به دور هسته در گردش باشند، باز هم این حرکت به دلیل زیر پایدار نمی‌ماند.

در فصل قبل در قسمت تولید موج‌های الکترومغناطیسی دیدیم، حرکت شتابدار بارهای الکتریکی در آنتن موج الکترومغناطیسی تولید می‌کند. حرکت الکترون به دور هسته نیز یک حرکت شتابدار است، از این رو بنابر نظریه الکترومغناطیسی کلاسیک باید این الکترون، موج الکترومغناطیسی گسیل کند و بسامد موج گسیل شده با بسامد حرکت مداری الکترون برابر است. در نتیجه با گسیل موج الکترومغناطیسی، از انرژی الکترون کاسته می‌شود که این کاهش انرژی با توجه به آنچه در مبحث حرکت دایره‌ای دیدیم، باعث می‌شود که شعاع مدار الکترون به دور هسته کوچک‌تر و بسامد حرکت آن بیشتر شود. تغییر بسامد



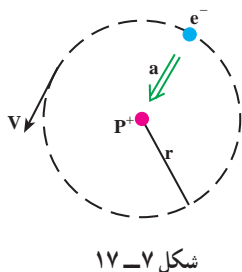
شکل ۷-۱۶

مداری به معنای تغییر بسامد موج الکترومغناطیسی است که گسیل می‌شود. بنابراین الکترون‌ها به تدریج انرژی خود را از دست می‌دهند و بسامد حرکت آنها به تدریج افزایش می‌یابد، بسامد موج الکترومغناطیسی گسیل شده نیز به تدریج زیاد می‌شود. به این ترتیب باید طیف موج الکترومغناطیسی گسیل شده از اتم، پیوسته باشد و الکترون پس از گسیل‌های متوالی موج‌های الکترومغناطیسی روی هسته بیفتد (شکل ۷-۱۶). بدین ترتیب الگوی رادرفورد برای اتم، با تجربه سازگار نیست. زیرا اولاً نمی‌تواند پایداری حرکت الکترون‌ها

در مدارهای اتمی و در نتیجه پایداری اتم‌ها را توضیح دهد و ثانیاً قادر به توجیه طیف گسسته اتمی نیست. الگوی اتمی بور: نیلس بور، فیزیکدان دانمارکی، در سال ۱۹۱۳ میلادی برای حل مشکل ناپایداری الگوی اتمی رادرفورد و با توجه به طیف گسسته تابش گسیل شده از اتم‌ها و رابطه تجربی ریذبرگ - بالمر برای طیف اتم هیدروژن، با الهام گرفتن از نظریه‌های کوانتومی پلانک و اینشتین الگوی برای اتم هیدروژن که یک الکترون دارد ارائه کرد. در این الگو، بور پیشنهاد کرد که قانون‌های مکانیک و قانون‌های الکترومغناطیسی کلاسیک، در مقیاس‌های اتمی باید همراه با فرضیه‌هایی در نظر گرفته شوند. این فرضیه‌ها را می‌توان به صورت ساده در چهار اصل زیر بیان کرد:

### ۱- الکترون، تنها روی مدارهای دایره‌ای با شعاع‌های معینی حرکت

می‌کند، این مدارها «مدارهای مانا» نامیده می‌شوند.



شکل ۷-۱۷

حرکت الکترون با جرم  $m$  و بار  $-e$  روی یک مدار دایره‌ای به شعاع  $r$  به مرکز هسته با بار  $+e$  در شکل ۷-۱۷ نشان داده شده است. نیروی مرکزگرای این حرکت از رابیش الکتریکی بین الکترون و هسته است، و برابر است با  $\frac{ke^2}{r^2}$  (که در آن  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2$ ). شتاب حرکت الکترون همان‌گونه که در مبحث حرکت دایره‌ای دیدیم

برابر است با  $\frac{v^2}{r}$  که در آن  $v$  سرعت حرکت الکترون روی مسیر دایره‌ای است. در نتیجه با استفاده از قانون دوم نیوتون داریم:

$$\frac{ke^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (۷-۱۴)$$

از آنجا که انرژی پتانسیل الکترون در میدان الکتریکی هسته برابر  $-\frac{ke^2}{r}$  است در نتیجه انرژی کل (پتانسیل + جنبشی) الکترون در این مدار برابر است با:

$$E = K + U = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{ke^2}{r} \quad (۷-۱۵)$$

با استفاده از رابطه ۷-۱۴ به دست می‌آوریم:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = +\frac{ke^2}{2r} \quad (۷-۱۶)$$

در نتیجه انرژی کل الکترون روی یک مدار مانا با شعاع  $r$  برابر است با:

$$E = -\frac{ke^2}{2r} \quad (۷-۱۷)$$

**۲- الکترون در حین حرکت روی یک مدار مانا، برخلاف نظریه الکترومغناطیسی کلاسیک، تابشی گسیل نمی‌کند.** در این وضعیت می‌گوییم الکترون در یک «حالت مانا» است.

**۳- شعاع مدارهای مانا مقدارهای مشخص گسسته‌ای می‌توانند داشته باشند.** اگر شعاع اولین مدار را برابر  $a$  بگیریم، شعاع‌های مجاز از رابطه زیر به دست می‌آیند

$$r_n = a \cdot n^2 \quad n = ۲, ۳, \dots \quad (۷-۱۸)$$

که در آن  $n$  یک عدد صحیح است.

علاوه بر این، بور برای کوچک ترین شعاع مدار الکترون در اتم هیدروژن، یعنی  $a_0$ ، که آن را شعاع اتم بور نیز می نامند مقدار زیر را به دست آورد:

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2} \quad (۱۹-۷)$$

که در آن  $h$  ثابت پلانک،  $k$  ثابت کولن،  $e$  بار الکترون و  $m$  جرم الکترون است.

### مثال ۷-۷

شعاع اتم بور را محاسبه کنید.

پاسخ

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2} \\ &= \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s})^2}{4 \times (3/14) \times (9 \times 10^{-31} \text{ kg}) \times (9 \times 10^9 \text{ N}^2 \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2) (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2} \\ &= 0.529 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.529 \text{ nm} \end{aligned}$$

اکنون اگر به کمک رابطه ۷-۱۷ مقدار انرژی الکترون در مدار مجاز  $n$ ام را محاسبه کنیم، به دست می آوریم:

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^2} \times \frac{1}{n^2} \quad n = 1, 2, \dots \quad (۲۰-۷)$$

بدین ترتیب الکترون تنها مجاز است انرژی ای برابر با یکی از مقدارهایی که از رابطه ۷-۲۰ به دست می آید داشته باشد. هر یک از این مقدارهای مجاز را یک تراز انرژی می نامند.

**۴- الکترون تنها هنگامی می تواند تابش الکترومغناطیسی گسیل کند که از یک حالت مانا با انرژی  $E_{n_1}$  به حالت مانای دیگری با انرژی کمتر  $E_{n_2}$  ( $n_2 < n_1$ ) برود، یا به عبارت دیگر از یک تراز انرژی بالاتر به یک تراز انرژی پایین تر برود. در این صورت انرژی فوتون موج الکترومغناطیسی گسیل شده برابر اختلاف انرژی بین دو تراز است، یعنی:**

$$hf = E_{n_1} - E_{n_2} \quad (۲۱-۷)$$



رابطه ۷-۲۱ را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم:

$$E_n = -\frac{E_R}{n^2} \quad (22-7)$$

که در آن با استفاده از مقدار کمیت‌های ثابت  $h$  و  $e, m, k$  داریم:

$$E_R = \frac{2\pi^2 k^2 m e^4}{h^2} = 2/17 \times 10^{-18} \text{ J} = 13/6 \text{ eV}$$

این مقدار انرژی را یک ریذبرگ می‌نامند. یک ریذبرگ برابر  $13/6$  الکترون‌ولت و  $2/17 \times 10^{-18}$  ژول است.

اگر الکترون اتم هیدروژن، در مدار اول ( $n = 1$ ) باشد، می‌گوییم در حالت پایه قرار دارد. مدارهای با انرژی بالاتر از  $E_1$  را حالت‌های برانگیخته می‌خوانند. انرژی این حالت‌ها از رابطه (۷-۲۲) به‌ازای  $n = 2, 3, \dots$  به‌دست می‌آید.

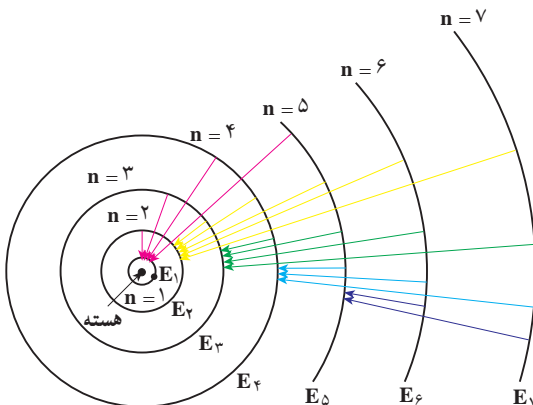
$$n = 2 \Rightarrow E_2 = -\frac{E_R}{4} = -3/4 \text{ eV} = \frac{-1}{4} \text{ ریذبرگ}$$

و

$$n = 3 \Rightarrow E_3 = -\frac{E_R}{9} = -1/9 \text{ eV} = \frac{-1}{9} \text{ ریذبرگ}$$

و به همین ترتیب برای بقیه مقدارهای  $n$ . این مقدارها، مقدارهای مجاز انرژی الکترون در اتم هیدروژن‌اند. هر مقدار مجاز انرژی را یک تراز انرژی الکترون در اتم هیدروژن می‌نامیم.

مدارهای الکترون در الگوی بور  
برای اتم هیدروژن در شکل ۷-۱۸ نشان  
داده شده است.



الگوی بور برای اتم هیدروژن نه تنها  
مشکل ناپایداری الگوی اتمی رادرفورد را  
نداشت بلکه به کمک این الگو طیف گسیلی  
اتم هیدروژن و رابطه تجربی ریذبرگ - بالمر  
نیز به‌درستی توضیح داده شد.

شکل ۷-۱۸

## مثال ۷-۸

هنگامی که الکترون در اتم هیدروژن از مدار  $n_1$  به مدار  $n_2$  ( $n_1 > n_2$ ) می‌رود.  
الف) بسامد فوتون موج الکترومغناطیسی گسیل شده را به دست آورید.  
ب) طول موج این فوتون را محاسبه و نتیجه را با رابطه ریدبرگ مقایسه کنید.  
پاسخ

الف) با استفاده از رابطه‌های ۷-۲۱ و ۷-۲۲ داریم:

$$f = \frac{E_{n_1} - E_{n_2}}{h} = \frac{E_R}{h} \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad \text{ب) داریم:}$$

که در آن  $c$  سرعت نور است. در نتیجه:

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{E_R}{h} \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

از این رابطه نتیجه می‌گیریم:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{E_R}{hc} \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

از سوی دیگر داریم:

$$\frac{E_R}{hc} = \frac{2/17 \times 10^{-18}}{6/63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 1/09 \times 10^9 \text{ m}^{-1} = 0/0109 (\text{nm})^{-1}$$

که همان ثابت ریدبرگ است.

در نتیجه با فرضیه‌های بور می‌توانیم رابطه تجربی ریدبرگ را به دست آوریم و طیف اتمی هیدروژن را توجیه کنیم. به این ترتیب وقتی الکترون از یکی از مدارهای با  $n_1 > 2$  به مدار  $n_2 = 2$  می‌رود، یکی از خط‌های رشته‌بالم را گسیل می‌کند.

## تمرین ۷-۷

مشخص کنید که برای خط‌های هر یک از رشته‌های دیگر طیف اتم هیدروژن الکترون باید از چه مدارهایی به چه مدارهایی برود؟

جذب تابش الکترومغناطیسی و وجود خط‌های جذبی در طیف اتمی اتم هیدروژن را نیز می‌توان به کمک الگوی بور برای اتم هیدروژن به صورت زیر توضیح داد. برای آنکه الکترونی را از تراز انرژی  $n_1$  به تراز انرژی  $n_2$  ( $n_2 > n_1$ ) منتقل کنیم، باید به آن مقداری انرژی درست برابر اختلاف انرژی دو تراز بدهیم. هر چه اختلاف  $n_1$  با  $n_2$  بیشتر باشد، انرژی داده شده به الکترون نیز باید بیشتر باشد. این مقدار انرژی را الکترون با جذب فوتونی که درست همین مقدار انرژی دارد به دست می‌آورد.

## فعالیت ۶-۷

موضوع زیر را در گروه خود به بحث گذاشته و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.  
به کمک الگوی اتمی بور برای اتم هیدروژن، نشان دهید که طول موج خط‌های طیف جذبی و طیف گسیلی اتم هیدروژن با یکدیگر برابرند.

انرژی بستگی الکترون: اگر انرژی الکترون را در حالتی که کاملاً از قید هسته رها شده است برابر با صفر بگیریم، انرژی آن روی مدارها که مقدار کمتری دارد باید منفی باشد، علامت منفی در رابطه  $۷-۲^{\circ}$  نیز به همین معناست.

انرژی الکترون در مدار اول بور برابر  $E_1 = -۱۳/۶\text{eV}$  است؛ و این بدان معنی است که برای آنکه الکترونی را که در حالت پایه اتم هیدروژن است کاملاً از قید هسته رها کنیم، باید به آن  $۱۳/۶\text{eV}$  انرژی بدهیم. این مقدار انرژی را انرژی بستگی الکترون در تراز اول اتم هیدروژن می‌نامیم. این مقدار با تجربه به خوبی سازگار است.

## تمرین ۸-۷

انرژی بستگی الکترون را در هر یک از حالت‌های برانگیخته  $E_2$  و  $E_3$  اتم هیدروژن به دست آورید.

نظریه بور برای اتم هیدروژن را می‌توان برای هر اتم تک الکترونی دیگر به کار برد، هر چند که بار هسته‌ای آن بیشتر از  $+e$  باشد.

الگوی اتمی بور برای اتم هیدروژن، بسامد خط‌های طیف اتم هیدروژن و نیز یون‌هایی را که

یک الکترون دارند به درستی توجیه می‌کند. ولی این الگو هیچ اطلاعی دربارهٔ تعداد فوتون‌هایی که با یک بسامد معین گسیل می‌شوند نمی‌دهد. علاوه بر این اتم‌های با تعداد الکترون‌های بیشتر نیز پاسخی ندارد. البته این مسئله توسط مکانیک کوانتومی، با استفاده از الگوی ابر الکترونی یا الگوی اوربیتالی، که در کتاب‌های شیمی خود با آن آشنا شده‌اید حل شده است. در این الگو نیز الکترون‌ها حالت‌های کوانتومی خاصی دارند که هر یک با یک مقدار معین انرژی و یا یک تراز معین انرژی مشخص می‌شود و الکترون تنها با تغییر دادن تراز انرژی خود می‌تواند فوتون گسیل یا جذب کند. در ادامه به توصیف چگونگی عملکرد لیزر به طور ساده می‌پردازیم که اساس سازوکار آن بر همین توانایی اتم‌ها برای گسیل فوتون‌ها قرار دارد.

## ۷-۵- آشنایی با لیزر

بیش از نیم قرن سال از ساخت نخستین لیزر یا فوتی توسط مایمن<sup>۱</sup> و نخستین لیزر گازی هلیم - نئون توسط علی جوان دانشمند ایرانی در سال ۱۹۶۰ میلادی می‌گذرد، هر چند مبانی نظری لیزر سال‌ها پیش از آن توسط اینشتین در سال ۱۹۱۷ میلادی مطرح شده بود ولی سال‌های نسبتاً زیادی طول کشید تا صنعت و فناوری امکان ساخت اولین لیزر را فراهم کند. از آن پس کاربرد لیزر در زمینه‌های مختلف به سرعت افزایش یافت به طوری که هم‌اکنون در بسیاری از وسیله‌های مورد استفادهٔ مادر زندگی و صنعت، از قبیل دستگاه‌های بازخوانی اطلاعات از روی لوح‌های فشرده، چاپگرها، شبکه‌های مخابرات کابل نوری، دستگاه‌های برش فلزات (شکل ۷-۱۹ الف) و ... کاربرد زیادی پیدا کرده است. در حرفهٔ پزشکی نیز جهت انجام پاره‌ای امور همچون جراحی، بخیهٔ بافت‌های بدن، اصلاح دید چشم (شکل ۷-۱۹ ب) و ... کاربرد زیادی دارد.



ب



الف

شکل ۷-۱۹

<sup>۱</sup> T. H. Maiman

## فعالیت ۷-۷

به اتفاق دیگر اعضای گروه خود، فهرستی دیگر از کاربردهای لیزر در زندگی، صنعت و فناوری تهیه کنید و به کلاس درس ارائه دهید.

در بخش‌های قبل دیدیم که هرگاه در یک اتم الکترون‌ها روی مدارهای مانا حرکت کنند، تابشی از آن اتم گسیل نمی‌شود. همچنین دیدیم برای آنکه الکترونی را از حالت  $n_1$  به حالت  $n_2$  ( $n_2 > n_1$ ) منتقل کنیم، باید به آن مقدار معینی انرژی بدهیم، که در این صورت گفته می‌شود، اتم به حالت برانگیخته رفته است و آن را به صورت زیر نمایش می‌دهیم:

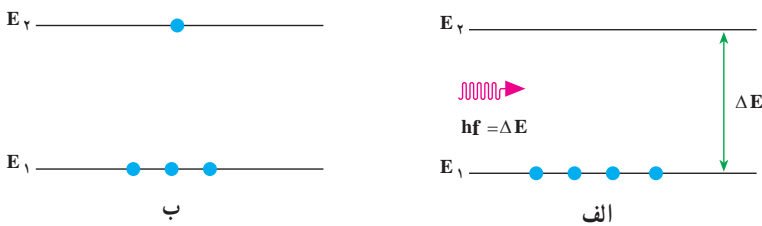


علامت ستاره حاکی از حالت برانگیخته است. برهم کنش فوتون با اتم را جذب می‌نامیم که در نمودارهای شکل ۷-۲ نشان داده شده است. شکل ۷-۲ الف اتم را قبل از دریافت تابش و شکل ۷-۲ ب اتم را پس از دریافت تابش نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینید یکی از الکترون‌هایی که در تراز  $E_1$  قرار دارد با جذب انرژی  $hf$  به تراز  $E_2$  می‌رود. به عبارت دیگر:

$$E_2 + hf = E_1$$

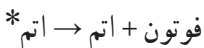
یا

$$\Delta E = E_2 - E_1 = hf$$



شکل ۷-۲

لازم به ذکر است که، اتم تنها فوتون‌هایی را جذب می‌کند که انرژی آنها،  $hf$ ، با اختلاف انرژی بین ترازهای اتمی،  $\Delta E$ ، برابر باشد. همچنین دیدیم که هرگاه اتم در حالت برانگیخته باشد با گسیل یک فوتون به حالت پایین‌تر می‌رود. این برهم کنش گسیل خودبه‌خود نامیده می‌شود و آن را به صورت زیر نمایش می‌دهیم:

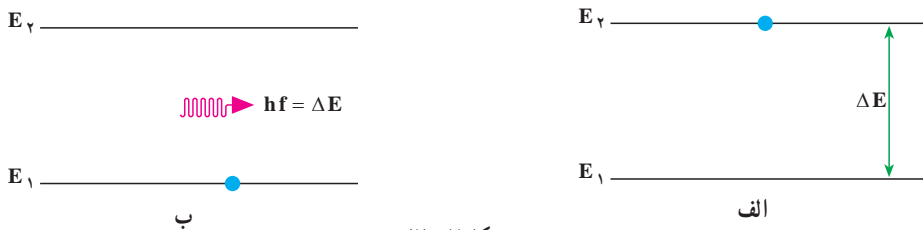


این برهم کنش در نمودارهای شکل ۲۱-۷ نشان داده شده است. شکل ۲۱-۷-الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۲۱-۷-ب اتم را در حالت پایه نشان می‌دهد. توجه کنید الکترون با گسیل تابش از حالت برانگیخته به حالت پایه می‌رود. در این مورد نیز انرژی فوتون گسیل شده برابر اختلاف انرژی بین دو تراز اتمی است، یعنی:

$$hf = E_p - E_1 = \Delta E$$

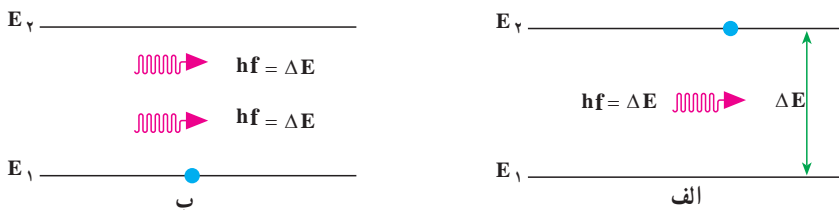
نوع دیگری از برهم کنش فوتون با اتم، که اساس کار لیزر به‌شمار می‌آید، گسیل القایی (یا تحریک شده) است. در این برهم کنش، اتم ابتدا در حالت برانگیخته است. آنگاه یک فوتون با انرژی  $hf$  که برابر اختلاف انرژی دو تراز اتم است، اتم برانگیخته را وامی‌دارد تا با گسیل یک فوتون دیگر با همین بسامد، به حالت پایین‌تر، یا حالت پایه، برود. این برهم کنش را به‌صورت زیر نمایش می‌دهیم:

۲ فوتون + اتم  $\rightarrow$  فوتون + اتم\*



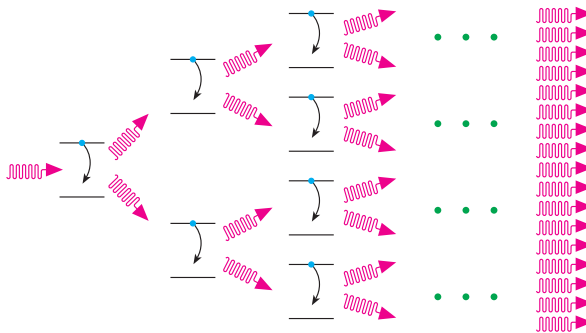
شکل ۲۱-۷

این برهم کنش در نمودارهای شکل ۲۲-۷ نشان داده شده است. شکل ۲۲-۷-الف اتم را در حالت برانگیخته و شکل ۲۲-۷-ب اتم را در حالت پایه نشان می‌دهد. توجه به این نکته ضروری است که اگر اتم در حالتی که در شکل ۲۲-۷-الف نشان داده شده است به حال خود هم گذاشته می‌شد، سرانجام الکترون با تابش یک فوتون به حالت پایین‌تر یا پایه می‌رفت، در حالی که با تابش یک فوتون به آن، نه تنها این فرایند سریع‌تر انجام می‌شود بلکه همان‌طور که در شکل ۲۲-۷-ب نیز دیده می‌شود، فوتون گسیل شده از اتم، با فوتون فرودی هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی است.



شکل ۲۲-۷

اکنون فرض کنید مجموعه‌ای از اتم‌های یکسان، که همگی در یک حالت برانگیخته‌اند، در اختیار داریم (شکل ۷-۲۳). فوتونی با انرژی مناسب به اتم اول فرود می‌آید و سبب گسیل القایی یک فوتون هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی با فوتون فرودی می‌شود. به این ترتیب دو فوتون که به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی کاملاً مشابه‌اند به وجود می‌آید. اینک هر یک از این دو فوتون باعث فرایند گسیل القایی دیگری می‌شوند و به این ترتیب چهار فوتون هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی تولید می‌شود. این فرایند، یعنی دو برابر شدن تعداد فوتون‌ها در هر مرحله، ادامه می‌یابد تا باریکه‌ی شدیدی از فوتون‌ها که همگی هم‌جهت، هم‌فاز و هم‌انرژی‌اند، ایجاد شود. این باریکه را یک باریکه‌ی لیزری می‌نامند. این پدیده که به ساده‌ترین شکل بیان شد، اساس کار لیزر<sup>۱</sup> را تشکیل می‌دهد. توجه داشته باشید که شکل ۷-۲۳ صرفاً طرح واره‌ای از فرایند گسیل القایی را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲۳

## تمرین‌های فصل هفتم

- ۱- چند پدیده را نام ببرید که فیزیک کلاسیک قادر به توجیه آن نیست.
- ۲- دمای سطح خورشید حدود  $6000\text{ K}$  است.  
(الف) بیشینه تابندگی خورشید در چه طول موجی است؟  
(ب) انرژی هر فوتون در این طول موج چند الکترون‌ولت است؟  
(پ) این طول موج در چه ناحیه‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی است؟

۱- کلمه لیزر از ابتدای حرف واژه‌های انگلیسی در عبارت زیر گرفته شده و به معنای «تقویت نور به روش گسیل القایی تابش» است.

۳- یکی از سازوکارهای تعیین وضعیت یک ماهواره، مبتنی بر آشکارسازی امواج گسیل شده از سطح زمین است. اگر دمای سطح زمین را  $27^{\circ}\text{C}$  فرض کنیم، طول موج دریافتی توسط این آشکارساز چه مقدار و در چه محدوده‌ای از طیف موج‌های الکترومغناطیسی خواهد بود؟

۴- توضیح دهید تغییر هر یک از کمیت‌های زیر چه تأثیری در نتیجه پدیده فوتوالکتریک دارد.

الف) دو برابر کردن بسامد نور فرودی

ب) دو برابر کردن طول موج نور فرودی

پ) دو برابر کردن شدت نور فرودی در یک بسامد معین

۵- طول موج قطع فوتوالکتریک یک سطح فلزی برابر  $325/6\text{ nm}$  است. به ازای چه طول موجی، ولتاژ متوقف کننده برابر  $97\text{ V}$  است؟

۶- فوتون‌هایی به سطح یک قطعه سدیم که تابع کار آن  $2/2\text{ eV}$  است فرود می‌آید و موجب گسیل فوتوالکترون‌هایی از سطح این فلز می‌شود. هرگاه ولتاژ متوقف کننده‌ای برابر  $5\text{ V}$  اعمال شود، جریان ناشی از فوتوالکترون‌ها قطع می‌شود. طول موج فوتون‌های فرودی چقدر است؟

۷- انرژی لازم برای جدا کردن یک الکترون از سطح فلز سدیم برابر با  $2/28\text{ eV}$  است.

الف) آیا فوتون‌هایی با طول موج  $680\text{ nm}$  قادر به جدا کردن الکترون از سطح این فلز هستند؟

ب) طول موج قطع برای گسیل فوتوالکترون از سطح فلز سدیم چقدر است و این طول موج مربوط به چه رنگی است؟

۸- در چه مواردی یک جسم، طیف پیوسته یا ناپیوسته گسیل می‌کند؟

۹- آیا ممکن است به کمک طیف گسیلی پیوسته یک جسم، به جنس آن پی برد؟ به کمک چه طیفی می‌توان این کار را انجام داد؟

۱۰- آیا ممکن است به کمک طیف خورشید، عناصر موجود در خورشید را شناسایی کرد؟ توضیح دهید.

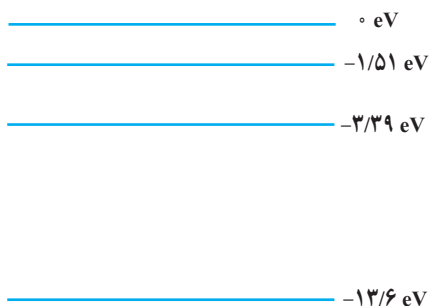
۱۱- ضعف مدل اتمی رادرفورد را در مورد پایداری اتم توضیح دهید. بور چگونه پایداری اتم هیدروژن را توضیح داد؟

۱۲- ناپیوسته بودن طیف گسیلی اتم هیدروژن را براساس مدل اتمی بور توضیح دهید.

۱۳- در پدیده شفق قطبی مولکول‌های اکسیژن و نیتروژن جو در اثر برخورد با زبانه‌های خورشیدی، یونیده یا برانگیخته می‌شوند. اتم‌های برانگیخته در بازگشت به حالت پایه خود، فوتون‌هایی گسیل می‌کنند که برخی از رنگ‌های شفق قطبی ناشی از چنین گسیل‌هایی است. در گسیل فوتون از



- اتم نیتروژن، طول موج فوتون‌ها  $63^\circ \text{nm}$  است. رنگ و انرژی این فوتون‌ها را تعیین کنید.
- ۱۴- طول موج رشته لیمان مربوط به اتم هیدروژن را با استفاده از رابطه ریدبرگ حساب کنید. مکان این خطوط را در طیف موج‌های الکترومغناطیسی مشخص کنید.
- ۱۵- چه جنبه‌هایی از مدل بور در مورد اتم هیدروژن (الف) کلاسیکی، و (ب) غیرکلاسیکی است؟
- ۱۶- شکل ۷-۲۴ تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲۴

- (الف) چرا تراز  $-13/6 \text{ eV}$ ، تراز پایه نامیده می‌شود.
- (ب) نشان دهید که کمترین طول موج تابش الکترومغناطیسی گسیل شده از اتم هیدروژن تقریباً  $9^\circ \text{nm}$  است.
- (پ) کدام گذار (بین دو تراز) می‌تواند به گسیل فوتونی با طول موج  $66^\circ \text{nm}$  منجر شود؟
- ۱۷- اگر الکترون در اتم هیدروژن در تراز  $n = 4$  باشد چه طول موج‌هایی را می‌تواند تابش کند؟
- ۱۸- یک لامپ بخار سدیم، فوتون‌هایی با طول موج  $589 \text{ nm}$  گسیل می‌کند. اگر توان تابشی لامپ  $6 \text{ W}$  باشد در هر ثانیه چند فوتون از این لامپ گسیل می‌شود؟
- ۱۹- طول موج فوتون‌های گسیلی از یک لامپ نارنجی رنگ برابر  $6^\circ \text{nm}$  است. بسامد و انرژی فوتون‌های گسیلی را حساب کنید. انرژی را بر حسب ژول و همچنین الکترون-ولت بیان کنید.
- ۲۰- انرژی یونش، انرژی لازم برای خارج کردن یک الکترون از اتم است. انرژی یونش را در موارد زیر حساب کنید.
- (الف) حالت پایه اتم هیدروژن ( $n = 1$ )
- (ب) تراز  $n = 3$  اتم هیدروژن.

۲۱- با استفاده از رابطهٔ بور اختلاف انرژی  $E_{n_1} - E_{n_2} = \Delta E (n_1 \rightarrow n_2)$  را حساب کنید و نشان دهید که :

$$\Delta E (4 \rightarrow 2) = \Delta E (4 \rightarrow 3) + \Delta E (3 \rightarrow 2) \quad \text{الف)}$$

$$\Delta E (4 \rightarrow 1) = \Delta E (4 \rightarrow 2) + \Delta E (2 \rightarrow 1) \quad \text{ب)}$$

۲۲- یک اتم هیدروژن در حالت  $n = 6$  قرار دارد،

الف) با در نظر گرفتن تمام گذارهای ممکن، اگر این اتم به حالت پایه برود، چند نوع فوتون با انرژی مختلف گسیل می‌شود؟

ب) فرض کنید فقط گذارهای  $\Delta n = 1$  مجاز باشند، در این صورت چند نوع فوتون با انرژی مختلف گسیل خواهد شد؟

۲۳- یکی از مشکلاتی که نازک شدن لایهٔ اوزن به همراه دارد عبور پرتوهای فرابنفش از جو زمین است. توضیح دهید چرا پرتوهای فرابنفش موجب سوختگی پوست می‌شوند در حالی که پرتوهای نور مرئی این مشکل را به وجود نمی‌آورند؟

۲۴- توان باریکهٔ نور خروجی از یک لیزر گازی هلیم نتون برابر  $5/^\circ$  میلی‌وات است. اگر توان ورودی این لیزر  $W 5^\circ$  باشد،

الف) بازده این لیزر را حساب کنید.

ب) اگر طول موج باریکهٔ نور خروجی  $633\text{nm}$  باشد، در هر ثانیه چند فوتون از این لیزر گسیل می‌شود؟

# آشنایی با فیزیک حالت جامد و ساختار هسته



فصل



## آشنایی با فیزیک حالت جامد و ساختار هسته

**نگاهی به فصل :** در فصل قبل با برخی از مفهوم‌های فیزیک جدید آشنا شدیم و دانستیم که نظریه‌های نسبیت و کوانتومی، در سده بیستم میلادی، فیزیک را به طور کامل متحول ساخت. امروزه دانشمندان به کمک نظریه مکانیک کوانتومی برای بسیاری از پدیده‌ها به توجیه‌هایی کاملاً سازگار با تجربه دست یافته‌اند.

ما در این فصل، به توصیف برخی از این نظریه‌ها و چگونگی توجیه نتیجه‌های تجربی توسط آنها می‌پردازیم. نخست مسئله رسانش الکتریکی در جسم‌های جامد را بررسی می‌کنیم تا نشان دهیم که با استفاده از نظریه نواری می‌توان تفاوت بین رسانش جسم‌های مختلف را توجیه کرد. مبحث دیگری نیز در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرد و آن ساختار هسته اتم و برخی از ویژگی‌ها و واکنش‌های مربوط به آن است.

### ۱-۸ — مواد رسانا و نارسانا

در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که در فلزات، برخی از الکترون‌ها به راحتی از اتم خود جدا می‌شوند. چون این الکترون‌ها می‌توانند آزادانه درون جسم حرکت کنند، آنها را الکترون‌های آزاد می‌نامند. شارش بار الکتریکی در رساناها به حرکت این الکترون‌ها مربوط می‌شود. در کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه نیز مقاومت الکتریکی را تعریف کردیم و دیدیم که مقاومت ویژه پاره‌ای از رساناها، مانند نقره و مس، کم و پاره‌ای دیگر، مانند تنگستن و آهن، نسبتاً زیاد است.

#### فعالیت ۱-۸

با بحث و بررسی در گروه خود، مطالب مربوط به قانون اهم و مقاومت الکتریکی را که در کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه خواندید مرور کنید.

با انجام فعالیت صفحه قبل به یاد آورده اید که،

الف) هر ماده مقاومت ویژه الکتریکی مخصوص به خود را دارد.

ب) هرچه مقاومت ویژه الکتریکی یک جسم کمتر باشد آن جسم رسانای الکتریکی بهتری است.

مقاومت ویژه الکتریکی یک رسانای خوب، مانند نقره خالص، در دمای اتاق ( $27^{\circ}\text{C}$ ) به کوچکی

$10^{-8} \times 1/6$  اهم متر است. در حالی که مقاومت ویژه الکتریکی یک نارسانا مانند تفلون، به بزرگی  $10^{14}$

اهم متر است. به اختلاف بزرگ بین این دو عدد توجه کنید. مقاومت ویژه پاره ای از مواد در جدول ۸-۱

داده شده است. همان گونه که در این جدول می بینید، دسته ای از مواد، مانند ژرمانیوم و سیلیسیوم، نیز

هستند که مقاومت ویژه الکتریکی آنها در دمای اتاق بین مقاومت ویژه الکتریکی رساناها و نارساناهاست.

این دسته از مواد که نیم رسانا نام دارند، ویژگی های جالب توجه دیگری نیز دارند که آنها را هم از رساناها

و هم از نارساناها متمایز می سازد. برخی از این ویژگی ها را در بخش ۸-۴ خواهیم شناخت.

جدول ۸-۱- مقاومت ویژه برخی از مواد (در دمای اتاق)

ماده	مقاومت ویژه بر حسب اهم متر
آلومینیم	$2/8 \times 10^{-8}$
برنج	$\approx 8 \times 10^{-8}$
آلیاژ کنستانتان (مس ۶۰٪ نیکل ۴۰٪)	$\approx 4 \times 10^{-8}$
مس	$1/7 \times 10^{-8}$
آهن	$\approx 10 \times 10^{-8}$
آلیاژ منگانه (مس ۸۴٪ منگنز ۱۲٪ نیکل ۴٪)	$44 \times 10^{-8}$
جیوه	$96 \times 10^{-8}$
آلیاژ نیکروم (نیکل ۵۹٪ مس ۲۳٪ کرم ۱۷٪)	$100 \times 10^{-8}$
پلاتین	$10 \times 10^{-8}$
نقره	$1/6 \times 10^{-8}$
تنگستن	$5/5 \times 10^{-8}$
ژرمانیوم	$4/6 \times 10^{-1}$
سیلیسیوم	$100 - 1000$
شیشه	$10^{10} - 10^{14}$
تفلون	$10^{14}$
خون	$1/5$

در ساده‌ترین مدل، یک جسم جامد را به صورت مجموعه‌ای از اتم‌ها در نظر می‌گیرند. حال اگر در یک جسم الکترون‌های هر اتم به هسته خود مقید باشند، به طوری که نتوانند از ربایش الکتروستاتیکی آن‌رها شوند، آن ماده نارسانا (عایق) است. از سوی دیگر اگر برخی از الکترون‌ها بتوانند از قید هسته آزاد شوند، و در نتیجه بار الکتریکی را منتقل کنند، ماده رساناست.

این مدل ساده گرچه تفاوت بین یک جسم رسانا و یک جسم نارسانا را توجیه می‌کند، ولی نمی‌تواند برای بسیاری از پرسش‌هایی که دربارهٔ رسانش الکتریکی مطرح می‌شود پاسخ دهد. از جمله اینکه:

● مواد نیمرسانا چه ویژگی‌هایی دارند که هم با رساناها و هم با نارساناها متفاوت‌اند؟ مثلاً مقاومت ویژهٔ رساناها با افزایش دما زیاد می‌شود ولی همان‌گونه که در بخش ۸-۴ خواهیم دید مقاومت ویژهٔ نیمرساناها با افزایش دما کاهش می‌یابد.

● چرا الکترون‌ها در برخی از شرایط مقید به هسته می‌مانند و در برخی شرایط نه؟ مثلاً چرا کربن وقتی به شکل الماس متبلور می‌شود نارسانا است ولی به صورت گرافیت رسانای الکتریکی است؟

● چرا رسانش الکتریکی نه تنها بین رساناها و نارساناها متفاوت است، بلکه رساناهای مختلف نیز همان‌گونه که جدول ۸-۱ نشان می‌دهد، مقاومت‌های ویژهٔ الکتریکی متفاوت دارند؟

برای یافتن پاسخ چنین پرسش‌هایی است که به مدل کامل‌تری برای یک جسم جامد نیاز داریم. این مدل توسط نظریه‌ای که نظریهٔ نواری جسم جامد نام دارد ارائه می‌شود.

## ۸-۲- نظریهٔ نواری

در فصل ۷ دیدیم که در اتم، الکترون‌ها بر روی مدارهایی، که هر یک انرژی معینی دارد، در اطراف هستهٔ اتم حرکت می‌کنند. این مقدار انرژی را تراز انرژی آن مدار می‌نامند. علاوه بر این دیدیم که هریک از این مدارها با تراز انرژی وابسته به آن را یک حالت کوانتومی برای الکترون در اتم می‌نامند. دربارهٔ نحوهٔ توزیع الکترون‌ها روی ترازها هم دیدیم که الکترون‌ها ترجیحاً مدارهای کم انرژی‌تر (ترازهای انرژی پایین‌تر) را اشغال می‌کنند. در نتیجه حالت‌های کوانتومی در هر اتم از تراز پایین به بالا توسط الکترون‌های آن اتم اشغال می‌شود. در این وضعیت می‌گوییم اتم در حالت پایهٔ خود قرار دارد. همچنین دیدیم که الکترون می‌تواند با جذب مقدار معینی انرژی تراز خود را ترک کند و به تراز بالاتر که خالی است برود، یعنی اتم به حالت برانگیخته درآید. مقدار انرژی لازم برای این گذار از یک تراز به تراز بالاتر درست برابر اختلاف انرژی دو تراز است.

همهٔ این اطلاعات دربارهٔ توزیع الکترون‌ها در اتم، با استفاده از روش‌های متداول در مکانیک کوانتومی و بر پایهٔ اصول مکانیک کوانتومی و با در نظر گرفتن یک هستهٔ با بار مثبت و الکترون‌های

اطراف آن، به دست می‌آید.

اکنون این سؤال پیش می‌آید که ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد چگونه‌اند؟ نظریه نواری پاسخی است که مکانیک کوانتومی به این سؤال می‌دهد و ما در این جا به زبان ساده و کاملاً به طور کیفی به شرح آن می‌پردازیم.

در یک جسم جامد به جای یک اتم، مجموعه‌ای از اتم‌ها وجود دارد که بسیار نزدیک به یکدیگر هستند، در نتیجه دیگر تنها یک هسته با بار مثبت و الکترون‌های اطراف آن نیست که بررسی شود، بلکه با مسئله مکانیک کوانتومی جدیدی روبرو هستیم که در آن الکترون‌ها تحت تأثیر نیروهای حاصل از تمام هسته‌های مثبت حرکت می‌کنند.

این مسئله یک مسئله تخصصی در زمینه فیزیک حالت جامد است که دانشمندان برای حل آن برای هر جسم روش‌های ویژه‌ای به کار برده‌اند. چون بررسی این روش‌ها و شگردهای مربوط بسیار فراتر از سطح این کتاب است؛ ما در این جا تنها به توضیح مهم‌ترین ویژگی‌های پاسخی که از حل این مسئله به دست می‌آید می‌پردازیم. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از:

الف) ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد (مانند مدارهای اتمی) مقدارهای انرژی ویژه خود را دارند.

ب) ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد نیز همانند ترازهای اتمی گسسته‌اند.

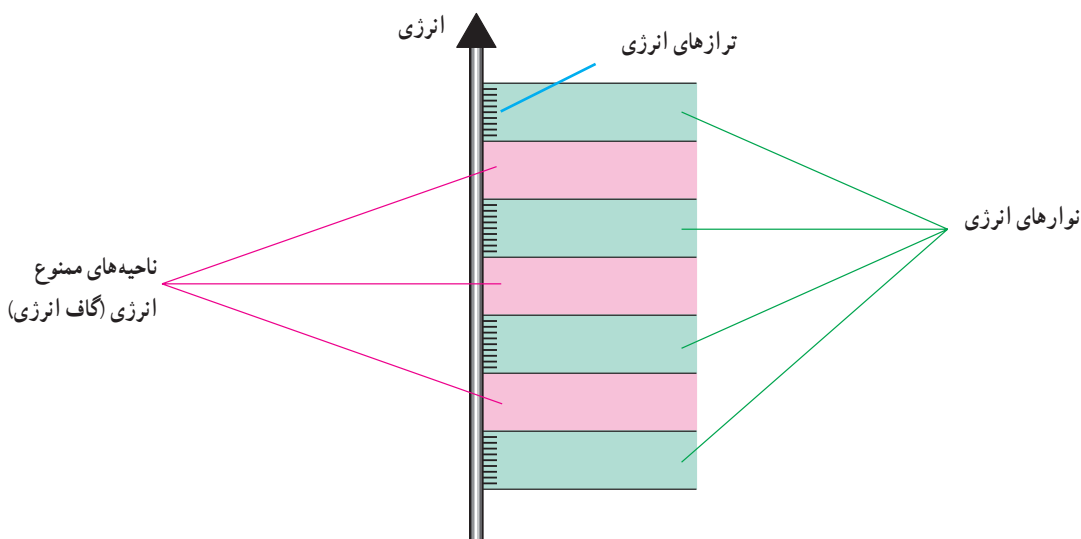
پ) هر تراز انرژی تنها توسط یک الکترون می‌تواند اشغال شود.\*

ت) از همه مهم‌تر این که ترازهای انرژی الکترون در جسم جامد تشکیل نوارهایی می‌دهند. هر نوار شامل تعداد بسیار زیادی ترازهای گسسته است که (از نظر مقدار انرژی) بسیار نزدیک به هم هستند. ولی بین نوارهای مختلف در برخی از موارد ممکن است از نظر انرژی فاصله زیادی باشد. یعنی بین بالاترین تراز انرژی در یک نوار و پایین‌ترین تراز انرژی در نوار بعدی ممکن است اختلاف انرژی زیادی وجود داشته باشد. در این فاصله هیچ تراز انرژی وجود ندارد. این فاصله را ناحیه ممنوع یا گاف انرژی می‌نامند.

نمودار نوارهای انرژی در شکل ۸-۱ نمایش داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود ترازهای انرژی فقط در قسمت نوارها وجود دارند و در گاف‌های انرژی، تراز انرژی وجود

---

\* در برخی موارد ترازهای الکترونی مربوط به اسپین‌های مختلف به عنوان ترازهای جداگانه در نظر گرفته می‌شوند که به هر کدام یک حالت کوانتومی متمایز نسبت داده می‌شود. در این کتاب نیز این روش مورد استفاده قرار گرفته است. در بعضی موارد نیز به طور معادل، ترازهای با اسپین مخالف به عنوان یک تراز در نظر گرفته می‌شوند در این حالت گفته می‌شود که هر تراز با دو الکترون اشغال می‌شود.



شکل ۸-۱

ندارد. شایان ذکر است که در این نوع نمودارهای انرژی محور قائم محور انرژی است و محور افقی کمیت بخصوصی را نشان نمی‌دهد.

اکنون ببینیم الکترون‌ها چگونه بین ترازهای مختلف توزیع می‌شوند. در دماهای بسیار پایین الکترون‌های موجود در جسم جامد معمولاً پایین‌ترین ترازهای انرژی موجود را اشغال می‌کنند. ولی چون هیچ دو الکترونی نمی‌توانند یک تراز را اشغال کنند، در نتیجه همه الکترون‌ها نمی‌توانند در پایین‌ترین تراز باشند. از این رو ترازهای انرژی از پایین به بالا اشغال می‌شوند، تا جایی که دیگر تراز خالی در پایین‌ترین نوار (نوار اول) موجود نباشد. حال اگر تعداد الکترون‌ها در جسم جامد بیش از تعداد ترازها در نوار اول باشد، ترازهای انرژی نوار بعدی اشغال می‌شود، و این روند تا جایی ادامه می‌یابد که همه الکترون‌ها در ترازهای موجود، در پایین‌ترین نوارها، جای گیرند. به این ترتیب آخرین نواری که با الکترون‌ها اشغال می‌شود ممکن است یا کاملاً پر باشد (یعنی همه ترازهای آن اشغال شده باشد) و یا بخشی پر باشد (یعنی ترازهای اشغال نشده هم داشته باشد). روشن است که در این صورت نوارهای بالاتر خالی اند (یعنی هیچ الکترونی ترازهای آنها را اشغال نکرده است). نتیجه اینکه، یک نوار انرژی، ممکن است پر یا بخشی پر و یا خالی باشد.

**در جسم جامد یک الکترون چگونه می‌تواند تراز انرژی خود را تغییر دهد؟**  
دیدیم که در یک اتم، الکترون می‌تواند با جذب مقداری انرژی (که درست برابر است با اختلاف



انرژی بین تراز‌ی که اشغال کرده است با یک تراز خالی بالاتر) به تراز بالاتر برود. همین فرایند در جسم جامد نیز روی می‌دهد. یعنی الکترون با جذب انرژی برانگیخته می‌شود و به تراز انرژی خالی بالاتر برود. این فرایند را گذار الکترون از یک تراز به تراز انرژی دیگر می‌نامند.

## فعالیت ۲-۸

با بحث در گروه خود، دو گذار متفاوت زیر را برای الکترون بررسی کنید.

الف) گذار الکترون از یک تراز به تراز خالی دیگر در همان نوار (گذار درون نوری)

ب) گذار الکترون از یک تراز به تراز خالی دیگر در نوار انرژی بالاتر (گذار بین نوری)

با استدلال توضیح دهید که کدام گذار به جذب انرژی کمتری نیاز دارد؟

همان‌گونه که با انجام فعالیت بالا دریافته‌اید، اگر درون یک نوار، الکترونی انرژی جذب کند به تراز بالاتر می‌رود و در صورتی که بر اثر برخورد با الکترون‌های دیگر انرژی از دست دهد به تراز پایین‌تر در همان نوار می‌رود. همچنین گذار الکترون از یک تراز به تراز دیگر در همان نوار، در مقایسه با گذار از یک نوار به نوار دیگر، به انرژی کمتری نیاز دارد. این‌گونه گذارها البته تنها در صورتی ممکن است انجام شوند که بخشی از نوار پر باشد.

بر اساس نظریهٔ نوری، الکترون‌های نوارهای پر، سهمی در رسانش الکتریکی ندارند، زیرا با انرژی‌ای که در میدان الکتریکی کسب می‌کنند، نمی‌توانند نوار خود را ترک کنند و درون نوار پر هم، تراز خالی برای گذار وجود ندارد. در نتیجه این الکترون‌ها نمی‌توانند از میدان الکتریکی انرژی بگیرند. به عبارت دیگر تنها آن دسته از الکترون‌ها در رسانش الکتریکی نقش دارند که در نوارهای بخشی پر هستند.

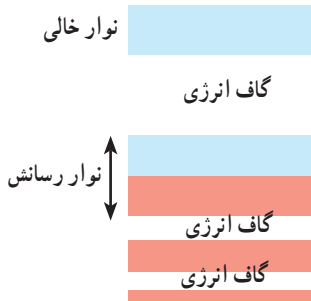
لازم به یادآوری است: انرژی موردنیاز الکترون برای انجام گذار بین ترازهای مختلف در یک جسم جامد از دو منبع می‌تواند تأمین شود؛ یکی میدان الکتریکی‌ای که جسم جامد در آن قرار گرفته و دیگری برانگیختگی گرمایی.

در ادامهٔ این مطلب به بررسی این موضوع می‌پردازیم که با مدل ساختار نوری جسم جامد چگونه می‌توان رسانش الکتریکی جسم‌های مختلف را تفسیر کرد.

## ۸-۳- رسانش الکتریکی در مدل ساختار نواری

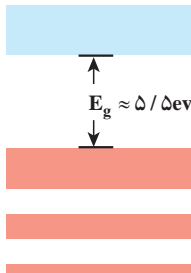
رساناها، نارساناها و نیمرساناها، ساختارهای نواری متفاوتی دارند، که هر یک به خوبی توجیه کننده ویژگی های الکتریکی آنهاست.

**الف) ساختار نواری اجسام رسانا :** اگر در ساختار نواری جسمی، نواری وجود داشته باشد که بخشی از آن پُر باشد، آن جسم رسانا است؛ زیرا الکترون های آن نوار، به آسانی می توانند تحت تأثیر میدان الکتریکی تراز انرژی خود را عوض کنند، و در رسانش شرکت جویند. این الکترون ها را الکترون های رسانش و نواری که بخشی از آن پُر است را نوار رسانش می نامند. تعداد الکترون های نوار رسانش، در یک رسانای فلزی بسیار زیاد است. در شکل ۸-۲ ساختار نواری یک رسانا نشان داده شده است. مشخصه اصلی یک رسانا، در ساختار نواری، داشتن نوار بخشی پُر است.



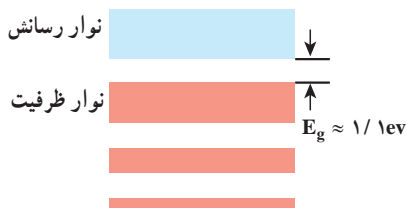
شکل ۸-۲- ساختار نواری یک رسانا.  
نوارهای پُر شده به رنگ قرمز و نوارهای خالی به رنگ آبی است. توجه کنید تنها بخشی از نوار رسانش پُر شده است.

**ب) ساختار نواری اجسام نارسانا :** نارساناها در ساختار نواری خود نواری ندارند که بخشی از آن خالی باشد. ساختار نواری یک نارسانا در شکل ۸-۳ نشان داده شده است. گاف انرژی بین آخرین نوار پُر و اولین نوار خالی در نارساناها بزرگ است، به گونه ای که هیچ الکترونی نمی تواند برانگیخته شود و از نوار پُر به نوار خالی برود. از این رو رسانش الکتریکی در این مواد صورت نمی گیرد.



شکل ۸-۳- ساختار نواری یک عایق.  
نوارهای پُر شده به رنگ قرمز و نوارهای خالی به رنگ آبی است. گاف انرژی  $E_g$  به حدی زیاد است که الکترون ها نمی توانند از نوار ظرفیت به نوار خالی بروند.

پ) ساختار نواری اجسام نیمرسانا: یک جسم نیمرسانا، در دماهای خیلی پایین مانند نارساناها دارای نوارهای پر و خالی است و نوار بخشی پر ندارد، با این تفاوت که گاف انرژی بین بالاترین نوار پر و پایین ترین نوار خالی در نیمرساناها بسیار کوچک تر از این گاف در نارساناهاست. در مبحث نیمرساناها بالاترین نوار پر را نوار ظرفیت و پایین ترین نوار خالی را نوار رسانش می نامند. کوچک بودن گاف انرژی بین نوار ظرفیت و نوار رسانش موجب می شود که تعدادی از الکترون های نوار ظرفیت در دمای اتاق نیز، با برانگیختگی گرمایی، انرژی لازم برای گذار بین نواری از نوار ظرفیت به نوار رسانش، به دست آورند و به نوار رسانش بروند. روشن است هرچه دما بالاتر رود تعداد بیشتری از الکترون ها می توانند این گذار را انجام دهند. ساختار نواری یک نیمرسانا در شکل ۸-۴ نشان داده شده است.



شکل ۸-۴— ساختار نواری یک نیمرسانا. نوارهای پر شده به رنگ قرمز و نوارهای خالی به رنگ آبی است. این ساختار مشابه نقش ساختار نواری یک عایق است، با این تفاوت که گاف انرژی  $E_g$  بسیار کوچک تر است و بنابراین الکترون ها می توانند به دلیل اغتشاش گرمایی از این گاف عبور کنند.

## ۸-۴— برخی از ویژگی های نیمرساناها

نیمرساناها ویژگی های جالب توجهی دارند که آنها را به طور کامل از رساناها متمایز می سازد. یکی از این ویژگی ها نحوه تغییر مقاومت ویژه الکتریکی نیمرساناها با دماست. در کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه در مبحث «اثر دما بر مقاومت رساناهای فلزی» دیدیم که افزایش دما سبب افزایش مقاومت ویژه رساناها می شود. در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه نیز دیدیم که عامل ایجاد مقاومت الکتریکی در رساناها برخورد الکترون های آزاد با اتم های در حال نوسان است؛ یعنی هرچه دما بالاتر رود این نوسان ها پر دامنه تر می شود و در نتیجه مقاومت ویژه الکتریکی بالا می رود.

در نیمرساناها هرچه دما افزایش یابد، مقاومت ویژه الکتریکی (برخلاف مقاومت ویژه رساناها) کاهش می یابد. این نحوه تغییر را تنها با توجه به ساختار نواری نیمرسانا می توان توجیه کرد.

در دماهای بسیار پایین، نیمرسانا، نوار ظرفیت کاملاً پر و نوار رسانش کاملاً خالی دارد، از این رو همان گونه که پیش از این گفته شد، نه الکترون های نوار ظرفیت (که پر است) در رسانش شرکت می کنند و نه در نوار رسانش الکترونی وجود دارد. بدین ترتیب در دماهای بسیار پایین، نیمرسانا مثل

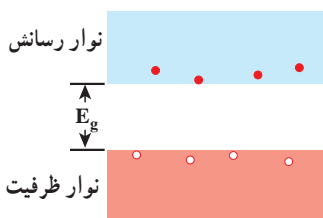
یک نارسانا است. یعنی الکترون‌های آن نمی‌توانند از میدان الکتریکی انرژی کسب کنند و لذا مقاومت ویژه الکتریکی آن بسیار بالاست. حال اگر دما افزایش یابد تعدادی از الکترون‌ها از نوار ظرفیت به نوار رسانش می‌روند. در نتیجه هم تعداد بسیار کم الکترون در نوار رسانش، در رسانش الکتریکی شرکت می‌کنند و هم چند تراز خالی در نوار ظرفیت ایجاد می‌شود که گذار الکترون‌ها از یک تراز پر در نوار ظرفیت به یکی از این ترازهای خالی در همان نوار میسر می‌شود و در نتیجه نوار ظرفیت نیز سهمی در رسانش الکتریکی پیدا می‌کند و از مقاومت ویژه الکتریکی آن کاسته می‌شود. ولی با توجه به کم بودن تعداد الکترون‌هایی که به نوار رسانش رفته‌اند و کم بودن ترازهای خالی در نوار ظرفیت، میزان مقاومت ویژه الکتریکی هنوز زیاد است.

بدین ترتیب هرچه دما بالاتر رود تعداد الکترون‌های نوار رسانش و تعداد ترازهای خالی نوار ظرفیت بیشتر می‌شود و سهم هر دو نوار در رسانش الکتریکی بیشتر می‌شود که در نتیجه از مقاومت ویژه الکتریکی بیشتر کاسته می‌شود.

ویژگی دیگر نیمرسانا این است که تاکنون هر جا از انتقال بار الکتریکی سخن گفته‌ایم الکترون‌ها را به عنوان حاملان بار معرفی کرده‌ایم. ولی آزمایش نشان می‌دهد که برخی از نیمرساناها به گونه‌ای رفتار می‌کنند که گویی حاملان بار الکتریکی در آنها تنها الکترون‌های با بار منفی نیستند، بلکه ذره‌هایی با بار مثبت نیز حامل بار هستند.

اینک ببینیم چگونه می‌توانیم این خصوصیت را به کمک نظریه نواری توجیه کنیم. نوارهای ظرفیت و رسانش یک نیمرسانا در دمای اتاق در شکل ۸-۴ نمایش داده شده‌اند. پیش از این گفتیم که تعدادی از الکترون‌های نوار ظرفیت برانگیخته می‌شوند و به نوار رسانش می‌روند. چنین الکترون‌هایی می‌توانند آزادانه در ماده حرکت و در رسانش الکتریکی شرکت کنند.

اکنون به بررسی سهم الکترون‌هایی که در نوار ظرفیت مانده‌اند در رسانش می‌پردازیم. این الکترون‌ها پیش از آنکه الکترون‌های دیگر برانگیخته شوند و نوار ظرفیت را ترک کنند، سهمی در رسانش الکتریکی نداشتند، زیرا تمام ترازهای انرژی موجود در نوار ظرفیت اشغال شده بود، ولی پس از آنکه تعدادی از الکترون‌ها به نوار رسانش می‌روند، چند تراز خالی در نوار ظرفیت پیدا می‌شود. این جای خالی الکترون در نوار ظرفیت را حفره می‌نامند (شکل ۸-۵). در این وضعیت الکترون‌هایی که در نوار ظرفیت مانده‌اند می‌توانند با کسب مقدار نسبتاً کمی انرژی، از تراز خود به یکی از این ترازهای خالی گذاری انجام دهند و در رسانش شرکت کنند. در این صورت همان گونه که پیش از این گفتیم نوار ظرفیت نیز در رسانش الکتریکی سهم دارد.



شکل ۵-۸- اغتشاش گرمایی باعث می‌شود چند الکترون معدود از گاف بین نوار ظرفیت و نوار رسانش بگذرند و بدین ترتیب تعداد یکسانی حفره در نوار ظرفیت بر جا می‌ماند.

این گذار الکترون از تراز اولیه خود به تراز خالی، مشابه آن است که حفره از تراز قبلی خود به تراز اولیه الکترون رفته است. به این ترتیب می‌توانیم به جای آنکه بگوییم «الکترون، گذاری را درون نوار ظرفیت انجام داده است» بگوییم «حفره تراز خود را تغییر داده است» و بدین ترتیب می‌توان رسانش مربوط به نوار ظرفیت را، برحسب حفره، توضیح داد، و به جای اینکه گذار تعداد بسیار زیاد الکترون‌های نوار ظرفیت را در نظر بگیریم، گذار تعداد کم حفره‌ها را بررسی کنیم که در نتیجه توضیح پدیده‌ها بسیار ساده‌تر می‌شود. هنگامی که یک نیمرسانا در میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، الکترون‌های نوار رسانش در خلاف جهت میدان و حفره‌های نوار ظرفیت در جهت میدان حرکت می‌کنند. برای نیمرسانایی که ناخالصی نداشته باشد، تعداد الکترون‌های موجود در نوار رسانش و تعداد حفره‌های موجود در نوار ظرفیت با هم برابرند. چنین نیمرسانایی را نیمرسانای ذاتی می‌گویند.

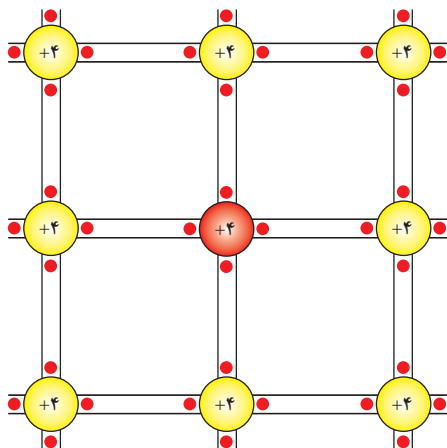
## پرسش ۱-۸

چرا در نیمرسانای ذاتی تعداد الکترون‌های نوار رسانش با تعداد حفره‌های نوار ظرفیت برابر است؟

## ۵-۸- آرایش نیمرساناها

در بخش قبل دیدیم که تعداد حاملان بار (الکترون‌های نوار رسانش و حفره‌های نوار ظرفیت) با افزایش دما زیاد می‌شود. اما روش دیگری نیز برای افزایش تعداد حاملان بار وجود دارد و آن اضافه کردن ناخالصی به نیمرساناست. منظور از ناخالصی، اتم‌هایی است که از جنس اتم‌های نیمرسانای ذاتی (اتم‌های میزبان) نباشند. افزودن مقدار کمی ناخالصی به نیمرسانا را آرایش نیمرسانا می‌نامند. این کار تأثیر چشمگیری بر مقاومت الکتریکی نیمرسانا دارد. مقاومت نیمرسانا با افزایش ناخالصی‌ها کم می‌شود، و رسانش الکتریکی در آن بهتر انجام می‌گیرد.

در موردی که رسانش بیشتر به دلیل وجود ناخالصی باشد، نیمرسانا را غیر ذاتی می‌گویند. آلایش نیمرساناها به دو روش مختلف انجام می‌شود. روش اول آن است که اتم ناخالصی، یک الکترون ظرفیت بیشتر از اتم‌های نیمرسانای ذاتی داشته باشد و روش دوم آن است که اتم ناخالصی، یک الکترون ظرفیت کمتر از اتم‌های نیمرسانای ذاتی داشته باشد. نیمرسانایی را که به روش اول آلایش یافته باشد، نیمرسانای نوع n و نیمرسانایی را که به روش دوم آلایش یافته باشد نیمرسانای نوع p می‌نامند. برای مثال سیلیسیوم و ژرمانیوم دو ماده نیمرسانا هستند که معمولاً در قطعه‌های الکترونیکی به کار می‌روند. اتم‌های هر دوی این عناصرها، هریک چهار الکترون ظرفیت دارند (شکل ۸-۶). حال اگر در هریک از این نیمرساناها به جای یکی از اتم‌ها یک اتم ناخالصی پنج یا سه ظرفیتی وارد کنیم، نیمرسانا را آلاییده‌ایم، و به ترتیب نیمرسانای غیر ذاتی نوع n یا p به دست آورده‌ایم.

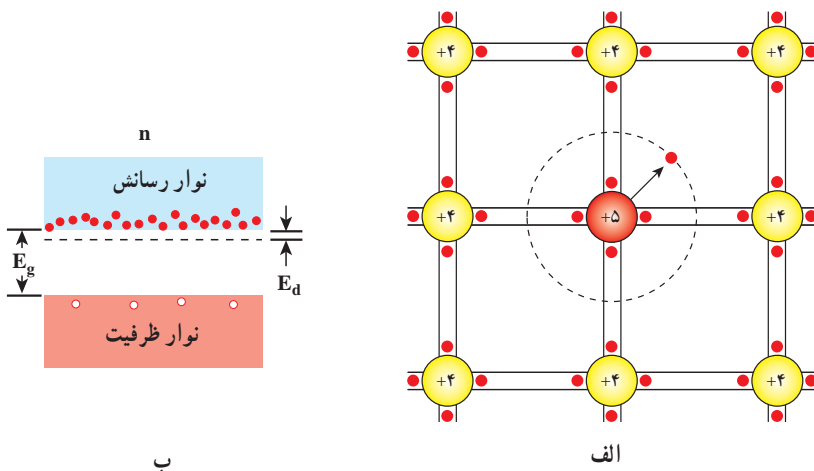


شکل ۸-۶- نمایشی مسطح از ساختار شبکه سیلیسیوم خالص. هر یون سیلیسیوم توسط یک پیوند کووالانسی دو الکترونی به چهار نزدیک‌ترین همسایه خود جفت شده است (که با یک جفت نقطه بین دو خط تیره موازی نشان داده شده است). توجه کنید که الکترون‌ها به پیوند — و نه اتم‌های مجزا — تعلق دارند و تشکیل یک پیوند ظرفیتی را می‌دهند.

**نیمرسانای نوع n:** فرض کنیم که به نیمرسانایی از جنس سیلیسیوم یک اتم ناخالصی پنج ظرفیتی مانند آرسنیک — وارد کنیم. همان‌گونه که در شکل ۸-۷ الف نشان داده شده است، چهار تا از الکترون‌های ظرفیت اتم آرسنیک در پیوند کووالان بین این اتم و اتم‌های سیلیسیوم همسایه شرکت می‌کنند. این چهار الکترون به جای الکترون‌های اتم سیلیسیوم ترازهای انرژی را در نوار ظرفیت اشغال می‌کنند.

حضور اتم ناخالصی ساختار نواری را تغییر می‌دهد. به این ترتیب که الکترون اضافی (الکترون پنجم) بر روی تراز قرار می‌گیرد به نام تراز دهنده که مطابق شکل ۸-۷ ب در فاصله بسیار کمی زیر نوار رسانش قرار دارد. چون فاصله این تراز از نوار رسانش بسیار کم است، تنها مقدار کمی

انرژی برای برانگیخته کردن الکترون و بردن آن از این تراز به نوار رسانش کافی است. در نتیجه در نوار رسانش علاوه بر الکترون‌های ذاتی، یک الکترون دیگر نیز خواهیم داشت. این نوع اتم‌های ناخالصی را که یک الکترون اضافی به نوار رسانش می‌دهند، ناخالصی دهنده می‌نامند. نیمرساناهایی را که با اتم‌های دهنده آلاینده شده باشند، نیمرسانای نوع  $n$  می‌نامند زیرا بیشتر حاملان بار در آنها از نوع منفی (negative) هستند.



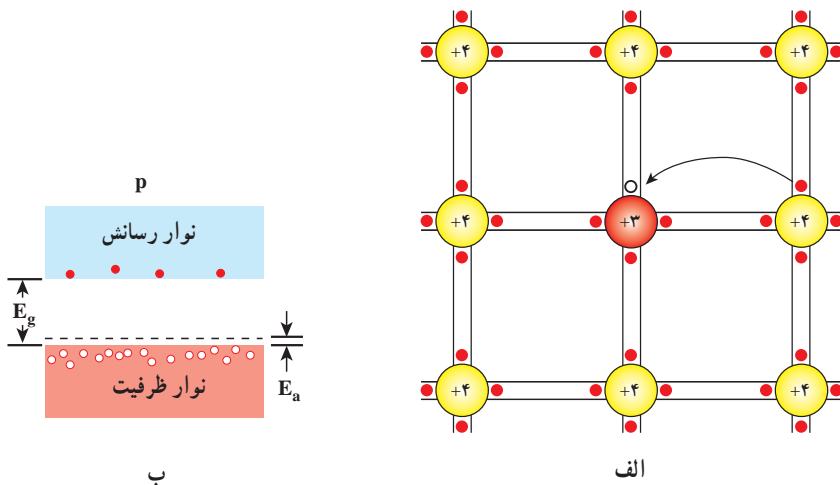
شکل ۸-۷ الف) یک اتم سیلیسیوم با یک اتم پنج ظرفیتی جایگزین شده است. الکترون اضافی به سستی به مغز یونی خود مقید است و به سادگی می‌تواند به نوار رسانش بالا برود. (ب) در یک نیمرسانای آلاینده نوع  $n$ ، ترازهای انرژی الکترون‌های دهنده در فاصله کوچک  $E_d$  زیر نوار رسانش قرار دارند. چون الکترون‌های دهنده می‌توانند به آسانی به نوار رسانش برانگیخته شوند، اکنون تعداد بسیار زیادی الکترون در این نوار وجود دارند. نوار ظرفیت شامل همان تعداد کم حفره‌ها، به اندازه پیش از اضافه کردن آلاینده است.

نیمرسانای نوع  $p$  : اگر به نیمرسانایی از جنس سیلیسیوم اتم‌های ناخالصی سه ظرفیتی – مانند ایندیم یا آلومینیوم – وارد کنیم، سه الکترون ظرفیت اتم ناخالصی مطابق شکل ۸-۸ الف در پیوند بین اتم‌های سیلیسیوم شرکت می‌کنند. ولی برای کامل شدن پیوند بین اتم‌ها یک الکترون کمبود داریم. الکترون‌های موجود در نوار ظرفیت نیمرسانا با جذب مقدار کمی انرژی جای این الکترون را پر می‌کنند که این عمل باعث می‌شود یک حفره اضافی در نوار ظرفیت ایجاد شود. در نتیجه، در نوار ظرفیت، علاوه بر تراز خالی مربوط به الکترون‌هایی که به نوار رسانش رفته‌اند، یک تراز خالی یا حفره اضافی نیز خواهیم

داشت. این نوع اتم‌های ناخالصی را پذیرنده می‌نامند.

ساختار نواری در حضور اتم ناخالصی پذیرنده در شکل ۸-۸ ب نشان داده شده است. تراز پذیرنده در فاصله بسیار کمی در بالای نوار ظرفیت قرار دارد. به گونه‌ای که در دمای اتاق، الکترون‌های نوار ظرفیت انرژی کافی برای گذار به تراز پذیرنده را در دسترس دارند. در نتیجه این گذار، یک حفره اضافی در نوار ظرفیت ایجاد می‌شود.

نیمرسانه‌هایی را که با اتم‌های پذیرنده آلاینده شده باشند، نیمرسانای نوع p می‌نامند، زیرا بیشتر حاملان بار در آن‌ها حفره‌ها هستند و آن‌ها مانند حامل‌های بار مثبت (positive) رفتار می‌کنند.



شکل ۸-۸ الف). یک اتم سیلیسیوم با یک اتم سه ظرفیتی جایگزین شده است. اکنون حفره‌ای در یکی از پیوندهای کووالانسی و بنابراین در نوار ظرفیت ایجاد شده است. این حفره می‌تواند هنگامی که الکترون‌های پیوندهای مجاور برای پر کردن آن حرکت می‌کنند، به سادگی در سر تا سر شبکه حرکت کند. در شکل، حفره به سمت راست حرکت می‌کند. (ب) در یک نیمرسانای آلاینده نوع p، ترازهای پذیرنده در فاصله کوچک  $E_a$  بالای نوار ظرفیت قرار دارند. اکنون تعداد بسیار بیشتری حفره در نوار ظرفیت وجود دارد. نوار رسانش شامل همان تعداد کم الکترون‌ها به اندازه پیش از افزودن آلاینده است.

افزودن حتی مقدار بسیار کم ناخالصی به یک نیمرسانا، بر مقاومت آن تأثیر عمده می‌گذارد. تراکم‌های ناخالصی نوعاً در حدود یک اتم ناخالصی به ازای هر صد میلیون اتم از جنس ماده نیمرساناست.



## ۸-۶- دیود و پیوندگاه p-n

اگر یک نیمرسانای نوع n را به یک نیمرسانای نوع p متصل کنیم، قطعه حاصل را یک پیوند p-n و مرز مشترک آن دو را پیوندگاه p-n می‌نامند.

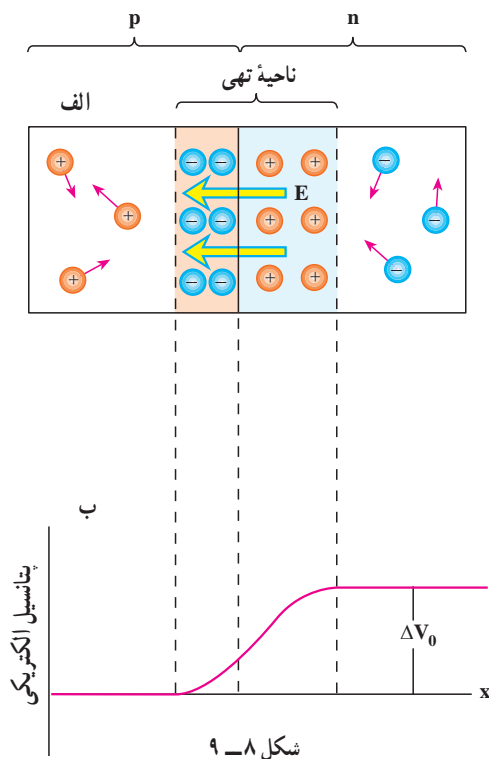
پیوند p-n ویژگی جالب توجهی دارد و آن این است که هرگاه در مداری قرار گیرد، جریان الکتریکی را تنها از یک سو عبور می‌دهد. قطعه‌ای را که دارای این خاصیت باشد یک دیود می‌نامند. پس دیود قطعه‌ای است که مقاومت آن برای جریان‌هایی که در یک سوی معین می‌گذرند بسیار زیاد، و برای جریان‌هایی که در سوی مخالف می‌گذرند عملاً ناچیز است. به همین دلیل دیود را یک سوکننده نیز می‌نامند. در مدارهای الکتریکی دیود را با نماد  $\rightarrow|$  نمایش می‌دهند. پیکان جهت جریان را نشان می‌دهد.

اکنون سازوکار یک سوکنندگی پیوند p-n را بررسی می‌کنیم. می‌دانیم که یک نیمرسانای نوع n، الکترون آزاد و یک نیمرسانای نوع p حفره آزاد دارد. هنگامی که مطابق شکل ۸-۹ الف پیوند p-n را تشکیل می‌دهیم، الکترون‌هایی که در طرف n، در نزدیکی پیوندگاه، یعنی در ناحیه‌ای که در شکل با رنگ آبی نشان داده شده است، قرار دارند، به طرف p پخش می‌شوند و یون‌های مثبت را که قادر به حرکت نیستند، بر جای می‌گذارند. به همین ترتیب در طرف p هم حفره‌ها به طرف n می‌روند و ناحیه‌ای از بارهای منفی ثابت را بر جای می‌گذارند. وقتی الکترون‌های آزاد و حفره‌های آزاد که از دو طرف می‌آیند به یکدیگر می‌رسند، یکدیگر را خنثی می‌کنند و از تعداد حاملان بار آزاد در این لایه کم می‌شود. در نتیجه، در ناحیه پیوندگاه تعداد حامل‌های بار آزاد بسیار کم است. به همین دلیل این ناحیه را ناحیه تهی می‌نامند. ناحیه تهی عرض معینی دارد، زیرا به دلیل حضور یون‌های ثابت یک میدان الکتریکی داخلی به وجود می‌آید که از رفتن الکترون‌ها از ناحیه n و حفره‌ها از ناحیه p جلوگیری می‌کند و نمی‌گذارد که عرض ناحیه تهی بیشتر شود.

جهت این میدان الکتریکی داخلی همان‌گونه که در شکل ۸-۹ الف نشان داده شده است از ناحیه n به طرف ناحیه p است.

**دیود چگونه از عبور جریان الکتریکی در یک جهت جلوگیری می‌کند؟**

خصوصیت‌های ناحیه‌های مختلف یک دیود را می‌توانیم با مراجعه به نمودار پتانسیل الکتریکی در شکل ۸-۹ ب درایم. میدان الکتریکی موجود در ناحیه تهی باعث می‌شود که یک طرف این ناحیه، نسبت به طرف مقابل، پتانسیل الکتریکی بیشتری داشته باشد. اگر اختلاف پتانسیل دو سر ناحیه تهی را با  $\Delta V$  نمایش دهیم، نیرویی که از میدان الکتریکی داخلی بر هر حفره‌ای که بخواهد از ناحیه



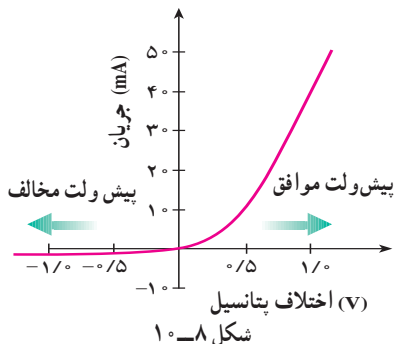
شکل ۸-۹

p به ناحیه n برود وارد می‌شود، در جهتی است که آن را به طرف p می‌راند. در نتیجه برای غلبه بر میدان الکتریکی داخلی، به انرژی اضافی  $e\Delta V_0$  نیاز خواهد داشت. نیروی وارد بر الکترونی هم که بخواهد از ناحیه n به ناحیه p برود، در جهتی است که آن را به طرف n می‌راند. در نتیجه الکترون‌ها نیز برای عبور از ناحیه تهی نیاز به انرژی اضافی دارند.

انرژی اضافی لازم برای حرکت الکترون‌ها از سمت راست به چپ ناحیه تهی و حفره‌ها از سمت چپ به راست ناحیه تهی را می‌توان به وسیله یک منبع ولتاژ خارجی تأمین کرد. برای این کار باید ولتاژ خارجی به گونه‌ای به دو طرف پیوندگاه اعمال شود که پایانه مثبت به p و پایانه منفی به n وصل شود.

به این ترتیب اختلاف پتانسیل بین دو طرف ناحیه تهی کاهش می‌یابد و موجب می‌شود که الکترون‌ها بتوانند از n به p و حفره‌ها از p به n حرکت کنند و جریان الکتریکی را به وجود آورند. در چنین شرایطی می‌گوییم دیود دارای **پیش ولت موافق (بایاس مستقیم)** است.

در صورتی که ولتاژ خارجی در جهت عکس اعمال شود، اختلاف پتانسیل دو سر ناحیه تهی افزایش می‌یابد و از عبور الکترون‌ها از n به p و عبور حفره‌ها از p به n جلوگیری می‌کند که در نتیجه جریان بسیار کمی از پیوندگاه عبور می‌کند. در این صورت می‌گوییم که دیود دارای **پیش ولت مخالف (بایاس معکوس)** است.



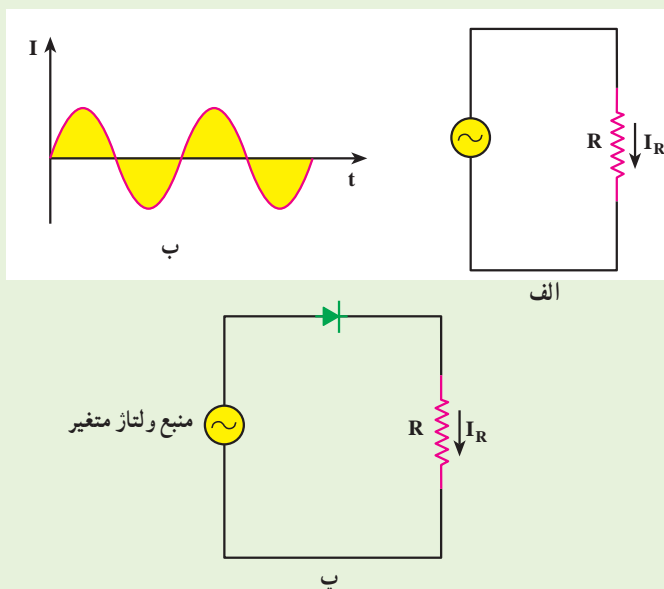
شکل ۸-۱۰

منحنی تغییرات جریان برحسب اختلاف پتانسیل دو سر دیود در شکل ۸-۱۰ رسم شده است. به این نکته توجه داشته باشید که دیود از قانون اهم پیروی نمی‌کند. منحنی تغییرات جریان برحسب ولتاژ برای مقاومت‌هایی که از قانون اهم پیروی می‌کنند، به صورت خط راستی است که

از مبدأ می‌گذرد و شیب ثابت آن برابر عکس مقاومت است. چنین مقاومت‌هایی را مقاومت‌های اهمی می‌خوانند. در نتیجه می‌توان گفت که دیود، غیر/همی است. بنابراین دیدیم که دیود جریان را در یک جهت از خود عبور می‌دهد و در جهت دیگر عبور نمی‌دهد.

### فعالیت ۳-۸

در شکل ۸-۱۱، نمودار (ب) منحنی تغییرات شدت جریان بر حسب زمان را برای مدار (الف) نشان می‌دهد. شما نیز با بحث و بررسی در گروه خود نمودار تغییرات شدت جریان بر حسب زمان را برای مدار (پ) به دست آورید.





شکل ۸ - ۱۱

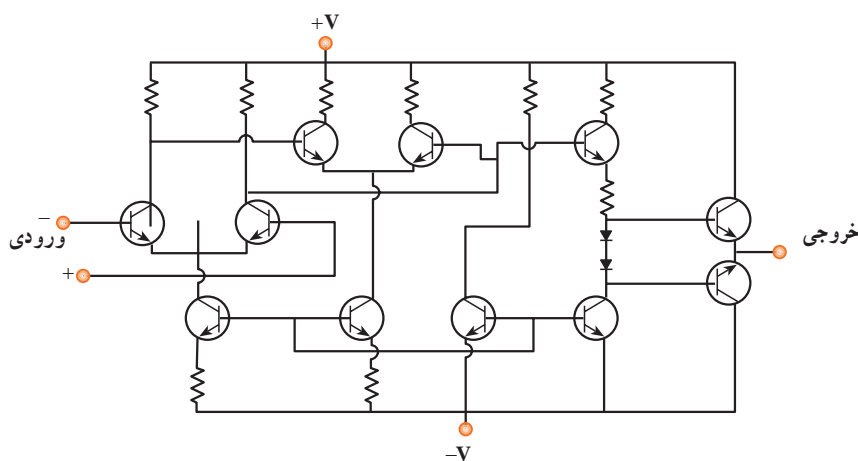
### مطالعه آزاد

#### ترانزیستور

از وصل کردن سه قطعه نیم رسانای  $p, n, p$ ، و یا  $p, n, p$  و  $n$  قطعه‌ای به نام ترانزیستور به دست می‌آید. ترانزیستورها برخلاف بیشتر قطعات الکتریکی، سه محل اتصال به سیم‌های

رابط دارند که هر محل به یکی از سه قطعه نیم رسانای  $p$  و  $n$ ،  $p$  و  $p$  (و یا  $p$  و  $n$ ) متصل می‌شود. در مدارهای الکتریکی، ترانزیستور  $pnp$  را با نماد  و ترانزیستور  $npn$  را با نماد  نمایش می‌دهند. از ترانزیستورها به عنوان تقویت کننده جریان یا ولتاژ استفاده می‌شود. شرح ساز و کار ترانزیستور در تقویت جریان یا ولتاژ فراتر از سطح این کتاب است.

**مدارهای جمعی IC:** مدارهای جمعی را «مهم‌ترین فناوری ساخته بشر» نامیده‌اند. این مدارها، شالوده رایانه‌ها، ساعت‌ها، دوربین‌ها، اتومبیل‌ها، هواپیماها، روبات‌ها، سفینه‌های فضایی و انواع و اقسام شبکه‌های ارتباطی و... را تشکیل می‌دهند. به بیان ساده یک مدار جمعی مجموعه‌ای از ترانزیستورها، دیودها، مقاومت‌ها و خازن‌هاست که بر روی یک تکه بسیار کوچک سیلیسیم به نام تراشه تعبیه شده است. بعضی از تراشه‌ها دارای چند صد هزار جزء بر روی سطحی به مساحت کمتر از یک روی سکه هستند. یک نمودار بسیار ساده شده از یک IC در شکل ۸-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۸-۱۲

## ۸-۷- ابر رساناها

پیش از این یادآوری کردیم که افزایش دما سبب افزایش مقاومت ویژه رساناها می‌شود. این افزایش را این‌طور توجیه می‌کنند که در اجسام جامد اتم‌ها و یون‌ها در دمای بالاتر از صفر مطلق به‌طور

دائم در حال ارتعاش هستند، حال هرچه دما بالاتر رود دامنه این ارتعاش ها بیشتر می شود که در نتیجه آن الکترون های رسانش مشکل تر می توانند از بین آنها عبور کنند.

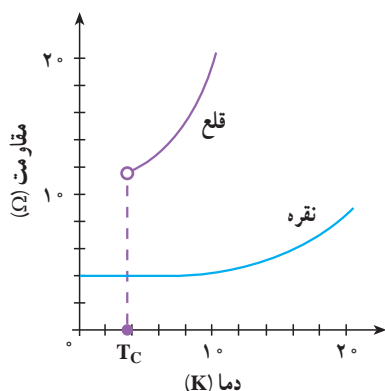
برای درک بهتر این وضعیت مثالی می زنیم. دانش آموزی را در نظر بگیرید که می خواهد در حیاط شلوغ مدرسه حرکت کند. اگر همه افراد در جای خود بی حرکت ایستاده باشند، دانش آموز مورد نظر بسیار آسان تر از وقتی حرکت می کند که این افراد در حال حرکت باشند، و البته هرچه حرکت دانش آموزان پیرامونه تر باشد، حرکت وی مشکل تر خواهد شد.

اگر ارتعاش های اتمی تنها سازوکار مقاومت در مقابل حرکت الکترون ها باشد، باید انتظار داشته باشیم که با کاهش دما و رسیدن به صفر مطلق، مقاومت ویژه رسانا هم به تدریج و به آرامی به سمت صفر میل کند. در حالی که آزمایش ها نشان می دهند که در عمل وضعیت به این صورت نیست، بلکه دو نوع رفتار بسیار متفاوت در مقاومت ویژه الکتریکی جامدهای بسیار سرد دیده می شود. یا مقاومت ویژه الکتریکی در دمایی که بالاتر از صفر مطلق است، به طور ناگهانی (و نه به تدریج) صفر می شود، و یا اینکه اصلاً صفر نمی شود. همان گونه که در شکل ۸-۱۳ می بینید اگر نمونه ای از جنس نقره را سرد کنیم، مقاومت ویژه الکتریکی آن به تدریج کاهش می یابد ولی در دماهای کمتر از  $2^{\circ}\text{K}$  این کاهش مقاومت متوقف می شود و مقاومت ثابت می ماند. این نشان می دهد که علاوه بر ارتعاش های اتمی، سازوکار دیگری نیز در جسم جامد برای ایجاد مقاومت الکتریکی وجود دارد که تنها وقتی اثر مقاومتی ارتعاش های اتمی ناچیز شود قابل تشخیص می شود. این سازوکار، ناشی از بی نظمی هایی است که در ترتیب قرار گرفتن اتم ها ممکن است وجود داشته باشد.

برای روشن شدن این وضعیت فرض کنید که شما می خواهید از میان جمعیت شلوغی عبور کنید. اگر همه افراد در صف هایی مرتب بایستند عبور از میان آنها آسان است، ولی اگر یکی از صف خود خارج شده و در میان دو صف متوالی ایستاده باشد و یا کسی بسته بزرگی را سر راه قرار داده باشد، حرکت شما مشکل خواهد شد. این گونه بی نظمی ها در ساختار جسم جامد را ناکاملی می نامند. ناکاملی ها، حتی وقتی که ارتعاش های اتمی هم متوقف شود، باعث مقاومت در مقابل حرکت الکترون ها می شوند. مقدار مقاومت ویژه الکتریکی یک رسانای فلزی در صفر مطلق را مقاومت ویژه باقیمانده می نامند.

حال اگر این آزمایش را با نمونه ای از جنس قلع تکرار کنیم، همان گونه که در شکل پیداست مقاومت ویژه الکتریکی قلع (که در دماهای بالا بیشتر از مقاومت ویژه نقره است) در دمایی حدود  $4^{\circ}\text{K}$  کلین افت سریع پیدا می کند و ناگهان صفر می شود. در این وضعیت می گوئیم قلع ابر رسانا شده است. دمایی را که در آن «افت سریع مقاومت ویژه» روی می دهد دمای بحرانی می نامند و آن را با  $T_c$  نمایش می دهند.

بنابراین قلع در دماهای بالاتر از  $T_C$  یک رسانای معمولی و در زیر  $T_C$  یک ابررساناست. از این رو  $T_C$  را دمای گذار به حالت ابر رسانایی نیز می‌گویند. دمای گذار به ابررسانایی برای رساناهای مختلف یکسان نیست. هر عنصر یا آلیاژ دمای گذار ویژه خود را دارد. برخی از فلزات که عموماً رساناهای بهتری هستند – مانند نقره – گذار به ابررسانایی را از خود نشان نمی‌دهند. دمای گذار چند ماده مختلف در جدول ۸-۲ ارائه شده است.



شکل ۸-۱۳

جدول ۸-۲

دمای گذار بر حسب کلوین	ماده
۰/۸۸	Zn
۱/۱۹	Al
۳/۷۲	Sn
۴/۱۵	Hg
۹/۴۶	Nb
۲۳/۲	Nb <sub>3</sub> Ge
۹۰	YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub>
۱۲۵	Tl-Ba-Ca-Cu-O
۱۳۵	HgBa <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>x</sub>

### ابر رسانایی و تحول الکترونیک

اینکه مقاومت ویژه الکتریکی ابررسانا صفر است، در امر انتقال کم اتلاف انرژی الکتریکی مزیت بسیار بزرگی به حساب می‌آید. اگر خط‌های انتقال از نوع رساناهای معمولی باشد بخش قابل ملاحظه‌ای از انرژی الکتریکی در حال انتقال تلف می‌شود. درحالی که با استفاده از ابررسانا، این اتلاف از بین می‌رود و صرفه جویی عمده‌ای در مصرف انرژی انجام می‌شود.

ابررساناهای با دمای  $T_c$  نسبتاً زیاد، که ابررساناهای گرم نام دارند، در امر فناوری الکترونیکی نیز تأثیر عمده‌ای دارند. برای مثال پیوندگاه دو ابررسانا نیز همانند پیوندگاه دو نیمرسانا - ویژگی‌های خاص خود را دارد. برای مثال در صنعت رایانه از لایه‌های نازک ابررسانا برای اتصال تراشه‌های رایانه استفاده می‌شود که باعث افزایش سرعت عمل رایانه می‌شود.

علاوه بر این از حلقه‌های ابررسانا می‌توان به عنوان ابزار ذخیره‌سازی جریان یا انرژی الکتریکی استفاده کرد. جریانی که در یک حلقه ابررسانا برقرار می‌شود همواره برقرار خواهد بود، زیرا هیچ مقاومتی در مقابل آن وجود ندارد و لذا از این انرژی الکتریکی می‌توان در هر زمان که نیاز باشد استفاده کرد.

**ویژگی‌های مغناطیسی ابررساناها :** در کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه دیدیم که در اطراف سیم رسانای حامل جریان الکتریکی، یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. در این صورت اگر آهنربایی در نزدیکی سیم قرار گیرد، به سوی آن روده و یا از آن رانده خواهد شد. این پدیده، اساس پدیده بالابری (معلق‌سازی) مغناطیسی را تشکیل می‌دهد. منظور از بالابری مغناطیسی آن است که جسمی به دلیل رانش مغناطیسی ناشی از یک آهنربا در هوا معلق نگه داشته شود. آهنربایی که معمولاً به این منظور به کار می‌رود یک آهنربای الکتریکی است. ولی مشکلی که وجود دارد آن است که مقدار زیادی از انرژی، به دلیل مقاومت الکتریکی سیم‌های آهنربای الکتریکی، تلف می‌شود. راه حل این مشکل آن است که در آهنربای الکتریکی از سیم‌های ابررسانا استفاده شود.

تعلیق مغناطیسی، کاربردهای احتمالی زیادی در زمینه حمل و نقل دارد. هم‌اکنون

در کشور ژاپن قطاری به صورت نمونه ساخته شده است که بر روی آهنرباهای ابر رسانا حرکت می کند.

یکی دیگر از کاربردهای مهم آهنرباهای ابر رسانا در پزشکی است. این آهنرباها در ابزار تشخیصی به نام «تصویربرداری تشدید مغناطیسی»<sup>۱</sup> یا MRI به کار می روند. در این روش برای ایجاد تصویر، به جای پرتوهای ایکس از تابش با بسامد رادیویی که نسبتاً بی خطر است استفاده می شود.

تا اینجا پدیدهٔ رسانش الکتریکی و تفاوت هایی را که بین جسم های مختلف از این نظر وجود دارد بررسی کردیم. سایر ویژگی های فیزیکی اجسام جامد مانند رسانش گرمایی، انبساط، خواص مغناطیسی، ویژگی های کشاینده و ... نیز به کمک مفهوم های فیزیک جدید و مکانیک کوانتومی توجیه شده است. ولی چون حجم محدود این کتاب گنجایش پرداختن به این موضوع ها را ندارد به همین مقدار بسنده می کنیم و در ادامهٔ این فصل یکی دیگر از موضوع هایی که در فیزیک جدید مطرح می شود، یعنی ساختار هستهٔ اتم و برخی از ویژگی های هستهٔ اتم ها را مطرح می کنیم.

## ۸-۸ — ساختار هستهٔ اتم

کشف پرتوزایی در سال ۱۸۹۶ میلادی (۱۲۷۵ ه.ش) آغازی برای پی بردن به وجود هستهٔ اتم بود. این کشف به شناخت کنونی ما از اتم انجامید و اطلاعاتی را در اختیار ما قرار داد که پیامدهای آن تأثیری ژرف بر جامعهٔ بشری داشت.

### کشف هستهٔ اتم

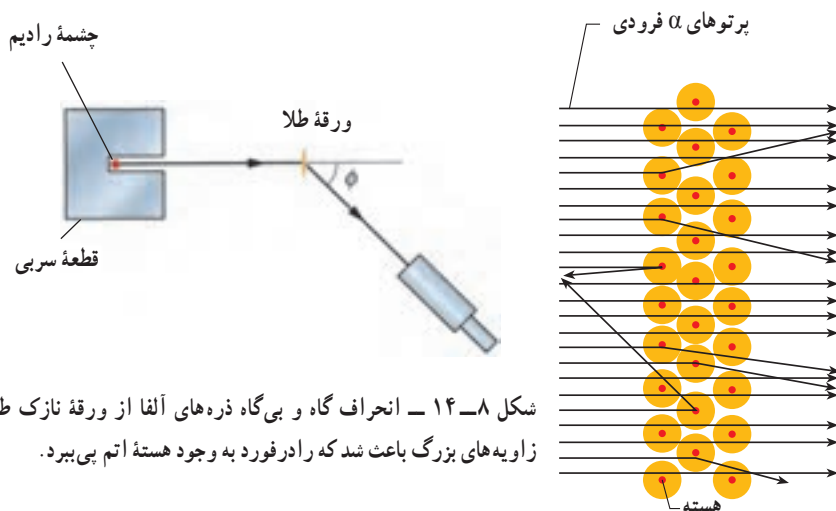
چند سال پس از آنکه اینشتین اثر فوتوالکتریک را توجیه کرد، ارنست رادرفورد آزمایشی را انجام داد که معلوم کرد اتم تقریباً از فضای تهی تشکیل شده و بیشتر جرم آن در بخش مرکزی به نام هسته متمرکز شده است.

در این آزمایش، باریکه ای از ذره های دارای بار مثبت (ذره های آلفا) گسیل شده از چشمه ای پرتوزا بر ورقه ای نازک از طلا فرود می آمدند (شکل ۸-۱۴). چون ذره های آلفا بسیار سنگین تر از الکترون ها هستند، انتظار می رفت که این ذره ها بدون برخورد با مانع از ورقه طلا بگذرند. در عمل نیز اغلب این ذره ها بدون انحراف یا با انحراف مختصر از ورقه می گذشتند و در برخورد با صفحهٔ فلزاتورسان، در پشت آن، جرقه های نورانی تولید می کردند. با این همه، برخی از این ذره ها در هنگام خروج از ورقه در زاویه های بزرگ

۱ — Magnetic Resonance Imaging (MRI)

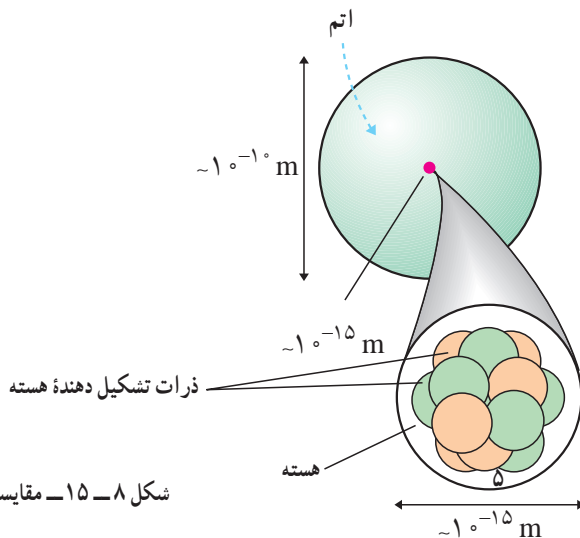


منحرف می‌شدند و حتی تعدادی از آنها به عقب برمی‌گشتند! رادرفورد می‌گفت: «مثل آن بود که گلوله‌توبی را به ورقه‌نازکی از کاغذ شلیک کنید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از برخورد گلوله، توپ بازگردد.» این ذره‌ها باید با چیز پرجرمی برخورد کرده باشند؛ اما با چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد که ذره‌های بدون انحراف باید از قسمت‌هایی از ورقه گذشته باشند که تهی بوده باشند، در حالی که ذره‌های با انحراف شدید از مرکزهایی بسیار چگال و دارای بار مثبت منحرف شده بودند. او نتیجه گرفت که هر اتم باید دارای هسته‌ای چگال و دارای بار مثبت باشد.



شکل ۸-۱۴ — انحراف گاه و بی‌گاه ذره‌های آلفا از ورقه نازک طلا در زاویه‌های بزرگ باعث شد که رادرفورد به وجود هسته اتم پی‌برد.

بررسی‌های رادرفورد نشان داد که ابعاد هسته اتم در حدود  $10^{-15} \text{ m}$  (۱۰<sup>-۱۵</sup> متر یا ۱ فرمی) و در حدود صد هزار مرتبه کوچک‌تر از ابعاد اتم ( $10^{-1} \text{ m}$ ) است (شکل ۸-۱۵).



شکل ۸-۱۵ — مقایسه ابعاد هسته اتم و اتم

## فعالیت ۸-۴

در یک زمین ورزشی ناحیه‌ای را مشخص کنید که ابعاد آن به همان اندازه کوچک‌تر از ابعاد زمین باشد که ابعاد هسته کوچک‌تر از ابعاد اتم است.

در زمان کشف هسته اتم فقط ذره‌های شناخته شده زیر اتمی، الکترون و هسته هیدروژن معمولی (پروتون) بودند. بعدها با کشف نوترون معلوم شد که هسته از پروتون و نوترون ساخته شده است. تعداد پروتون‌های هسته با  $Z$  مشخص می‌شود و آن را «عدد اتمی» می‌نامند. چون اتم به لحاظ الکتریکی خنثی است،  $Z$  تعداد الکترون‌های اتم نیز هست. تعداد نوترون‌های هسته را با  $N$  نشان می‌دهند و آن را «عدد نوترونی» می‌نامند. مجموع عدد اتمی و عدد نوترونی یعنی  $Z+N$  را «عدد جرمی» می‌نامند و آن را با  $A$  نشان می‌دهند.

$$A=Z+N \quad (۸-۱)$$

در فیزیک هسته‌ای هر هسته را با نماد شیمیایی مربوط به آن و  $A$  و  $Z$  را به صورت زیر مشخص

$${}_Z^AX = \text{هسته اتم } X \text{ می‌کنند.}$$

مشخص کردن  $N$  ضروری نیست؛ زیرا می‌توان آن را از تفاضل  $A$  و  $Z$  به دست آورد. همین‌طور در بسیاری موارد  $Z$  را هم ذکر نمی‌کنند؛ زیرا نماد شیمیایی معرف آن است؛ مثلاً:

$${}^1_1\text{H} \text{ یا } {}^1\text{H} = \text{هسته اتم هیدروژن}$$

$${}^{16}_8\text{O} \text{ یا } {}^{16}\text{O} = \text{هسته اتم اکسیژن}$$

$${}^{56}_{26}\text{Fe} \text{ یا } {}^{56}\text{Fe} = \text{هسته اتم آهن}$$

جدول ۸-۳

نام ذره	بار (کولن)	جرم (kg)	شعاع (fm)
الکترون	$-1.6 \times 10^{-19} = -e$	$9.1 \times 10^{-31} = m_e$	کوچک‌تر از $10^{-2}$
پروتون	$+1.6 \times 10^{-19} = +e$	$1.67 \times 10^{-27} = m_p$	$1/2$
نوترون	صفر	$1.68 \times 10^{-27} = m_n$	$1/2$

۱- فمتومتر که در فیزیک هسته‌ای آن را فرمی نیز می‌گویند.

ایزوتوپ‌ها: ویژگی‌های هر اتم را تعداد الکترون‌های آن اتم مشخص می‌کند. اما ویژگی‌های هسته را تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های آن تعیین می‌کند؛ بنابراین، تعداد هسته‌های متفاوت موجود در طبیعت بسیار بیشتر از تعداد اتم‌های متفاوت است. اتم‌های با تعداد پروتون معین و تعداد نوترون‌های مختلف را ایزوتوپ (هم مکان) می‌نامند؛ زیرا همگی در جدول مندلیف یک خانه را اشغال می‌کنند. ایزوتوپ‌ها دارای خواص شیمیایی یکسان و خواص هسته‌ای کاملاً متفاوت‌اند. این تفاوت ویژگی‌های هسته‌ای ایزوتوپ‌های مختلف را می‌توان با توجه به دو ایزوتوپ اورانیم - ۲۳۵ و اورانیم - ۲۳۸ به خوبی نشان داد.  $^{235}\text{U}$  به راحتی شکافته می‌شود و می‌توان از آن در راکتورهای هسته‌ای به عنوان سوخت استفاده کرد.  $^{238}\text{U}$  این ویژگی را ندارد و چون به راحتی شکافته نمی‌شود نمی‌توان از آن مستقیماً به عنوان سوخت هسته‌ای استفاده کرد. هر عنصر هم دارای ایزوتوپ‌های پایدار و هم پرتوزاست. عناصری هم وجود دارند که ایزوتوپ پایدار ندارند؛ مانند: رادون. از برخی ایزوتوپ‌های پرتوزا به عنوان ردیاب در موارد مختلف پزشکی، کشاورزی و صنعت استفاده می‌کنند. چون این ایزوتوپ‌های پرتوزا از نظر شیمیایی تفاوتی با ایزوتوپ‌های پایدار ندارند، پس رفتار آنها هنگام جذب در بدن یا گیاهان مانند ایزوتوپ‌های پایدار است و چون پرتوهایی را از خود گسیل می‌دارند، می‌توان محل و تراکم آنها را به دقت مشخص کرد.

**نیروی هسته‌ای:** دیدیم که ابعاد هسته بسیار کوچک است (در حدود  $10^{-15}\text{m}$ ). همین‌طور گفتیم که بیشتر جرم اتم در هسته متمرکز شده است. با توجه به این نکته‌ها می‌توان چگالی هسته را به راحتی محاسبه کرد. با محاسبه آن به مقدار تقریباً  $10^{14}\text{g/cm}^3$  می‌رسیم که به صورتی باورنکردنی بزرگ است (چگالی آب  $1\text{g/cm}^3$ ). موضوع وقتی شگفت‌انگیزتر می‌شود که توجه کنیم نیروی کولنی شناخته شده بین پروتون‌های دارای بار مثبت رانشی است. پس اصلاً انتظار نداریم که دستگاه متشکل از ذرات دارای بار هم نام پایدار باشد تا چه رسد به این که تا این حد هم چگال باشد. البته نیروی گرانشی موجود بین اجزای هسته ربایشی است اما، نیروی گرانشی بسیار ضعیف‌تر از نیروی کولنی است؛ پس نمی‌تواند عامل پایداری هسته و چگال بودن آن باشد.

این موضوع وجود نیروی جدیدی را در طبیعت مطرح کرد که به نیروی هسته‌ای قوی مشهور شد. این نیرو، با نیروی شناخته شده کولنی و گرانشی تفاوت بسیار دارد؛ زیرا اولاً، بسیار قوی‌تر از این نیروهاست؛ چون اجزای هسته را به رغم نیروی رانشی بین پروتون‌های آن به صورت بسیار فشرده در کنار هم نگه می‌دارد. دوم اینکه، این نیرو، برخلاف نیروهای کولنی و گرانشی، کوتاه‌برد است؛ زیرا در ابعاد اتمی ( $10^{-10}\text{m}$ )، دیگر اثری از آن مشاهده نمی‌شود و اتم به کمک نیروی کولنی بین هسته دارای بار مثبت و الکترون دارای بار منفی بررسی می‌شود.

با مراجعه به کتاب‌های فیزیک ۲ و ۳ و با استفاده از جدول ۴-۳ نیروهای گرانشی و الکتریکی بین دو پروتون را که به فاصله  $r$  از یکدیگر قرار دارند، محاسبه کنید.

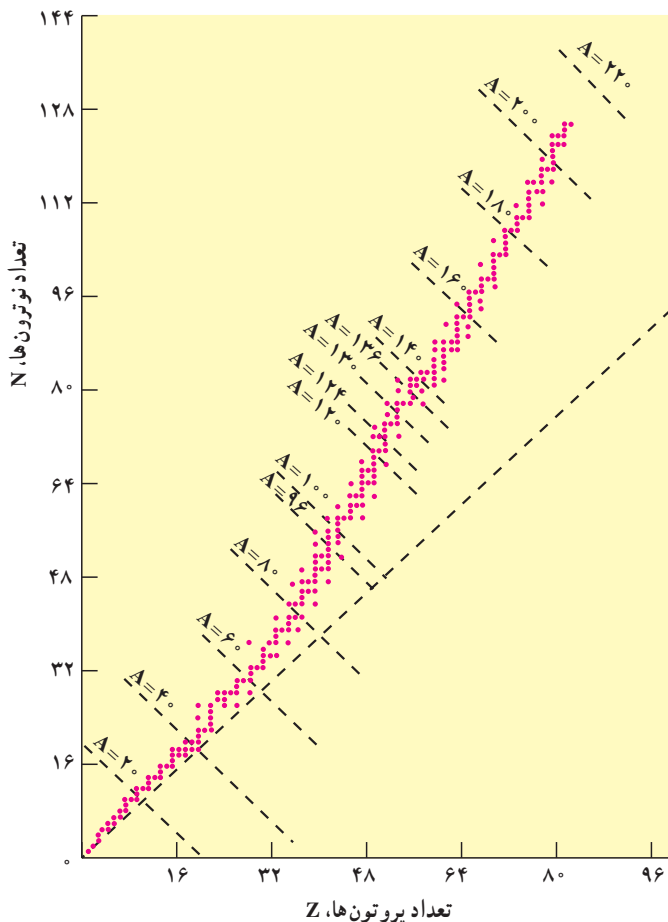
**پایداری هسته‌ها :** دیدیم که در هسته علاوه بر نیروی رانش کولنی بین پروتون‌ها، نیروی ربایش هسته‌ای بین کلیه اجزاء هسته اعم از پروتون‌ها و نوترون‌ها نیز حکمفرماست. از دید نیروی هسته‌ای، تفاوتی بین پروتون و نوترون وجود ندارد. از این رو آنها را با نام عام «نوکلئون» نیز می‌نامند. پس وقتی می‌گوییم نوکلئون منظورمان پروتون یا نوترون است و آنها از نظر نیروی هسته‌ای تفاوتی ندارند.

نیروی هسته‌ای گرچه بسیار قوی بوده اما کوتاه بُرد است؛ بنابراین، هر نوکلئون فقط به نوکلئون‌های مجاور خود نیروی هسته‌ای وارد می‌کند. اما، نیروی کولنی گرچه دارای شدت کمتری است اما بلند برد است و هر پروتون به تمام پروتون‌های موجود در هسته نیروی رانشی وارد می‌سازد؛ بنابراین، به تدریج با زیاد شدن تعداد پروتون‌ها در هسته نقش نیروی کولنی بارز می‌شود و اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. این موضوع سبب ناپایداری هسته می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفتیم، اغلب ایزوتوپ‌های عناصر، ناپایدارند. ایزوتوپ‌های ناپایدار با گذشت زمان واپاشیده می‌شوند و سرانجام به ایزوتوپ‌های پایدار تبدیل می‌شوند.

واپاشی برخی از ایزوتوپ‌ها بسیار سریع صورت می‌گیرد، در حالی که واپاشی بعضی از آنها به قدری کُند است که از زمان تشکیل زمین تاکنون هنوز کاملاً از بین نرفته‌اند.

عدد اتمی عنصرهای طبیعی موجود در طبیعت  $1 \leq Z \leq 92$  است. عناصر با  $Z > 92$  را به طور مصنوعی در آزمایشگاه تولید می‌کنند و به آنها «عناصر فرا اورانیمی» می‌گویند. همین‌طور عدد نوترونی عنصرهای موجود در طبیعت  $0 \leq N \leq 146$  است.

خط  $N=Z$  و نمودار تغییرات  $N$  و  $Z$  عنصرهای پایدار در شکل ۸-۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خط پایداری ایزوتوپ‌ها ابتدا بر خط  $N=Z$  منطبق است اما با زیاد شدن  $Z$  به تدریج از آن منحرف می‌شود و ایزوتوپ‌های پایدار سنگین‌تر دارای تعداد نوترون بیش از پروتون‌اند. دلیل آن نیز روشن است؛ زیرا نوترون به هسته ربایش هسته‌ای اضافه می‌کند بدون اینکه رانش کولنی داشته باشد.



شکل ۸-۱۶

## فعالیت ۸-۶

با توجه به شکل ۸-۱۶ و با بحث در گروه خود به پرسش‌های زیر پاسخ دهید.

الف) خط راست خط چین به چه مقدارهای  $Z$ ،  $N$  و  $A$  مربوط می‌شود؟

ب) آیا نسبت تعداد نوترون به تعداد پروتون برای هسته‌های پایدار مختلف ثابت است یا تغییر می‌کند؟ اگر تغییر می‌کند این تغییر چگونه است؟

پ) ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر را چگونه می‌توان با استفاده از شکل تشخیص داد؟

اکنون با استفاده از راکتورهای هسته‌ای و شتاب‌دهنده‌ها می‌توان ایزوتوپ‌های مختلف را به‌طور مصنوعی تولید کرد. همان‌طور که قبلاً هم توضیح دادیم این ایزوتوپ‌ها کاربردهای روزافزونی در پزشکی برای تشخیص و درمان، در کشاورزی برای بررسی چگونگی جذب مواد در گیاهان، و در صنعت برای ردیابی جریان‌ها و کنترل کیفیت دارند.

**انرژی بستگی هسته :** اندازه‌گیری‌های دقیق نشان می‌دهد که جرم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل دهنده‌اش اندکی کمتر است. این موضوع در مورد اتم‌ها نیز کاملاً صدق می‌کند. به طوری که جرم اتم هم از مجموع جرم هسته و الکترون‌های آن کمتر است اما این تفاوت جرم برای هسته بیشتر است؛ اگر جرم هسته  $X$  را با  $M_x$  و جرم پروتون را با  $M_p$  و جرم نوترون را با  $M_n$  نشان دهیم، خواهیم داشت :

$$M_x < ZM_p + NM_n \quad (2-8)$$

اگر اختلاف جرم دو طرف رابطه بالا را با  $\Delta M$  نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$\Delta M = ZM_p + NM_n - M_v \quad (3-8)$$

این اختلاف جرم طبق رابطه معروف اینشتین:

$$E=mc^2 \quad (9-1)$$

به انرژی تبدیل می شود. این انرژی را «انرژی بستگی» می نامند و آن را با B نشان می دهند. پس داریم :

$$B = \Delta mc^{\gamma} = [ZM_p + NM_n - M_x]c^{\gamma} \quad (5-1)$$

در موقع تشکیل هسته  $X$  از  $Z$  پروتون و  $N$  نوترون این انرژی آزاد می‌شود و برای جدا کردن هسته به اجزای تشکیل دهنده‌اش، این انرژی را باید مصرف کرد.

توجه داریم که در فرایندهای هسته‌ای معمولاً جرم محصولات فرایند از جرم ذرات اولیه اندکی کمتر است. این تفاوت جرم طبق رابطه  $E = mc^2$  به انرژی تبدیل می‌شود. چون این اختلاف جرم در  $c^2$  ضرب می‌شود، اختلاف جرم بسیار مختصر سبب تولید انرژی قابل ملاحظه می‌شود.

**یکای جرم اتمی:** در واکنش‌های هسته‌ای، با تبدیل جرم به انرژی سروکار داریم و جرمی که به انرژی تبدیل می‌شود، بسیار کوچک است؛ بنابراین، نمی‌توان از یکاهای متداول جرم چون کیلوگرم و گرم استفاده کرد. یکای مورد استفاده در فیزیک هسته‌ای **یکای جرم اتمی** است که آن را با  $u$  نشان می‌دهند و عبارت است از  $\frac{1}{12}$  جرم اتم کربن ۱۲ که آن را طبق تعریف  $12/000000 u$  در نظر می‌گیرند. برحسب این یکا، جرم پروتون  $1/007276 u$ ، جرم الکترون  $0/000549 u$  و جرم نوترون  $1/008665 u$  است.

## مثال ۸-۱

الف) یکای جرم اتمی را برحسب کیلوگرم محاسبه کنید.

ب) اگر  $1u$  تبدیل به انرژی شود، این انرژی معادل چند الکترون ولت است؟

پاسخ

می‌دانیم که یک مول از هر ماده حاوی تعداد ذرات (اتم، مولکول یا هر چیز دیگر) مساوی زیر است :

$$N_A = 6.022137 \times 10^{23} \text{ به ازای هر مول}$$

پس یک مول کربن یعنی  $12 \text{ kg}$  نیز حاوی همین تعداد اتم کربن است؛ پس :

$$1u = \frac{1}{12} (0.012 \text{ kg}) \frac{1}{6.022137 \times 10^{23}} = 1.6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

حال انرژی معادل این جرم برابر است با :

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$E = 1u \times c^2$$

$$= (1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}) (2.99792458 \times 10^8)^2 = 1.49 \times 10^{-10} \text{ J}$$

می‌دانیم که

$$1 \text{ J} = 6.24151 \times 10^{18} \text{ eV} = 6.24151 \times 10^{12} \text{ MeV}$$

پس، انرژی معادل جرم  $1u$  برابر است با :

$$E = 931.5 \text{ MeV}$$

برای به دست آوردن انرژی آزاد شده در فرایندهای هسته‌ای کافی است اختلاف جرم دو طرف واکنش برحسب  $u$  را در  $931.5$  ضرب کنیم تا انرژی برحسب  $\text{MeV}$  به دست آید.  
در فرایندهای هسته‌ای اصل پایستگی جرم و انرژی به تنهایی برقرار نیستند بلکه در این فرایندها مجموع جرم و انرژی در برهم کنش پایسته می‌ماند.

## مثال ۸-۲

هسته دوتریم را که از یک پروتون و نوترون تشکیل شده است، «دوترون» می نامند. جرم اتمی  ${}^2\text{H}$  برابر  $2.014102\text{u}$  است. انرژی بستگی آن را محاسبه کنید. پاسخ: ابتدا جرم هسته دوتریوم را حساب می کنیم.

جرم یک الکترون - جرم اتم دو تریوم = جرم هسته دوتریوم

$$m({}^2\text{H}) = M({}^2\text{H}) - M(e)$$

$$= 2.014102\text{u} - 0.000549\text{u}$$

$$= 2.013553\text{u}$$

به این ترتیب انرژی بستگی هسته دوتریم برابر است با

$$B = [m_n + m_p - m({}^2\text{H})]c^2$$

$$= [1.008665\text{u} + 1.007276\text{u} - 2.013553\text{u}] \times 931.5 = 2.22\text{MeV}$$

## تمرین ۸-۱

انرژی بستگی  ${}^4\text{He}$  را به دست آورید. جرم اتمی  ${}^4\text{He}$  برابر  $4.002603\text{u}$  است.

ترازهای انرژی هسته: انرژی نوکلئون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم کوانتیده‌اند و نوکلئون وابسته به هسته نمی‌تواند هر انرژی دلخواهی را اختیار کند. اما اختلاف انرژی ترازهای نوکلئون در هسته بسیار بیش از این اختلاف در اتم هاست. در فصل قبل دیدیم که اختلاف انرژی ترازهای الکترون‌ها در اتم حدود چند الکترون‌ولت است. در حالی که اختلاف انرژی ترازهای نوکلئون‌ها در هسته‌های سبک حدود میلیون الکترون‌ولت (MeV) و در هسته‌های سنگین حدود کیلو الکترون‌ولت (keV) است.

همان‌گونه که الکترون‌های اتم می‌توانند با جذب انرژی از حالت پایه به حالت برانگیخته بروند، نوکلئون‌ها نیز می‌توانند با جذب انرژی به ترازهای انرژی بالاتر بروند و هسته را برانگیخته سازند.



هسته‌های برانگیخته نیز درست مانند اتم‌های برانگیخته می‌توانند با گسیل فوتون به حالت پایه برگردند. انرژی فوتون گسیل شده نیز برابر اختلاف انرژی بین حالت برانگیخته و حالت پایه یا بین دو حالت برانگیخته است. هسته برانگیخته را با گذاشتن ستاره روی نماد  ${}^A_Z X$  به صورت  ${}^A_Z X^*$  مشخص می‌کنند.

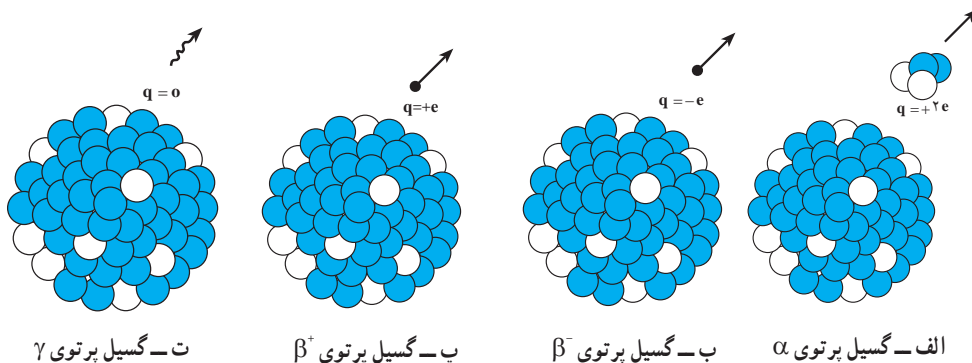
## فعالیت ۷-۸

با استفاده از طیف موج‌های الکترومغناطیسی در فصل ششم، نوع تابش گسیل شده از هسته را مشخص کنید.

همان‌گونه که دیدیم، انرژی واکنش شیمیایی در حدود چند الکترون ولت و انرژی لازم برای برانگیختگی هسته‌ها معمولاً در محدوده کیلو الکترون ولت تا میلیون الکترون ولت است؛ از این رو، هسته‌ها در واکنش‌های شیمیایی برانگیخته نمی‌شوند.

## ۹-۸- پرتوزایی

همان‌طور که قبلاً گفتیم، تحول‌هایی در فیزیک که به پیدایش فیزیک جدید و گسترش فیزیک هسته‌ای انجامید با کشف پدیده پرتوزایی شکل گرفت. در سال ۱۸۹۶ میلادی، هانری بکرل به صورت کاملاً تصادفی متوجه شد که سنگ معدن اورانیم پرتوهای نافذی را از خود گسیل می‌دارد. هسته‌های پرتوزا ناپایدارند و با گذشت زمان خود به خود و بدون تأثیرپذیری از شرایط خارجی، پرتوهایی را گسیل می‌دارند و به تدریج به هسته‌های پایدار تبدیل می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۸-۱۷ نشان داده شده است، هسته‌های پرتوزا با گسیل یکی از پرتوهای زیر واپاشیده می‌شوند.



شکل ۸-۱۷

۱- واپاشی آلفا: در این نوع واپاشی که در هسته‌های سنگین صورت می‌گیرد، هسته  ${}^A_ZX$  با گسیل ذره  $\alpha$  ( ${}^4_2\text{He}$ ) متشکل از دو پروتون و دو نوترون و می‌پاشد (شکل ۸-۱۷-الف).



هسته  $X$  را «هسته مادر» و هسته  $Y$  را «هسته دختر» می‌نامند؛ هسته  $Y$  محصول واپاشی دارای عددجرمی  $A-4$  و عدد اتمی  $Z-2$  است. این واپاشی با آزاد شدن انرژی همراه است که این انرژی بین محصولات واپاشی تقسیم می‌شود و بخش عمده آن را ذره  $\alpha$  به همراه می‌برد. ذره‌های آلفا سنگین و دارای دو بار مثبت‌اند. بُرد این ذره‌ها بسیار کوتاه است و به سرعت جذب می‌شوند ولی اگر این ذره‌ها از راه تنفس یا دستگاه گوارش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت‌های بدن می‌شوند، بنابراین، باید مواظب بود که مواد آلفا گسیل هرگز وارد بدن نشوند.

۲- واپاشی بتا: این متداول‌ترین نوع واپاشی در هسته‌هاست. در این واپاشی هسته ناپایدار با گسیل الکترون یا پوزیترون (ذره‌ای دارای جرم برابر جرم الکترون و بار مخالف آن) به هسته جدیدی تبدیل می‌شود (شکل ۸-۱۷-ب و پ).

واپاشی  $\beta^-$  بسیار شگفت‌انگیز است؛ زیرا الکترون قبلاً در هسته وجود ندارد و در حین واپاشی به وجود می‌آید. در فرایند واپاشی همراه با گسیل الکترون یک نوترون در هسته تبدیل به پروتون و الکترون می‌شود. فرایند را می‌توان به صورت زیر نوشت<sup>۱</sup>:



در فرایند گسیل پوزیترون  $\beta^+$  یک پروتون به نوترون و پوزیترون تبدیل می‌شود که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت:



محصول این نوع واپاشی هسته جدیدی است که عدد اتمی آن برخلاف مورد گسیل الکترون که عدد اتمی هسته دختر یک واحد بیشتر از هسته مادر است، یک واحد از هسته مادر کمتر است.

۳- واپاشی گاما: در این نوع واپاشی، هیچ یک از عددهای جرمی و اتمی هسته تغییر نمی‌کند بلکه هسته‌ای که در حالت برانگیخته است، با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسد (شکل ۸-۱۷-ت).

۱- در واپاشی بتا ذره دیگری (که نوترینو یا پادنوترینو نام دارد و با نماد  $\bar{\nu}$  یا  $\nu$  نشان داده می‌شود) را نیز باید در نظر گرفت که در اینجا برای سادگی از آن صرف‌نظر شده است.

این فرایند را می‌توان به صورت زیر نشان داد :



اغلب هسته‌ها پس از گسیل ذره‌های آلفا و بتا در حالت برانگیخته هستند و با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسند؛ بنابراین، گسیل پرتو گاما اغلب با گسیل آلفا و بتا همراه است. پرتو گاما همان ویژگی‌های پرتو X را دارد ولی از آن پراثری‌تر است و می‌تواند در ماده بیشتر نفوذ کند.

در تمام فرایندهای واپاشی اصول پایستگی زیر برقرار است :

۱- مجموع بار الکتریکی در دو طرف رابطه‌های (۸-۷ تا ۸-۹) یکسان است.

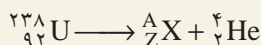
۲- مجموع عددهای جرمی در دو طرف رابطه‌های بالا یکسان است.

### مثال ۸-۳

در واپاشی هسته اورانیم - ۲۳۸  $[{}^{238}_{92}\text{U}]$  یک ذره آلفا گسیل می‌شود. معادله این واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که بر اثر این واپاشی چه عنصری تولید می‌شود.

پاسخ

معادله واپاشی به صورت زیر است :



با استفاده از پایستگی عدد جرمی داریم :

$$238 = A + 4$$

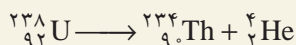
$$A = 234$$

و با بهره‌گیری از عدد اتمی دو طرف داریم :

$$92 = 2 + Z$$

$$Z = 90$$

با مراجعه به جدول تناوبی معلوم می‌شود که عنصر با  $Z=90$  توریم است؛ پس داریم :



## تمرین ۸-۲

فسفر - ۳۲  $[^{32}_{15}\text{P}]$  با گسیل الکترون و امی باشد. معادلهٔ این واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که در آن چه عنصری تولید می‌شود.

## تمرین ۸-۳

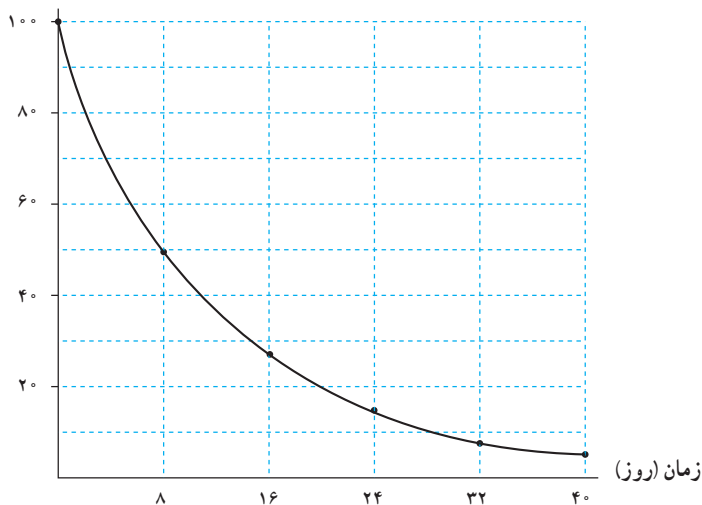
آلومینیم - ۲۵  $[^{25}_{13}\text{Al}]$  با گسیل پوزیترون و امی باشد. معادلهٔ واپاشی را بنویسید و عنصر محصول آن را مشخص کنید.

## واپاشی پرتوزا و نیمه عمر

ایزوتوپ‌های پرتوزا با گذشت زمان واپاشیده می‌شوند. احتمال واپاشی یک هسته پرتوزا در یک ثانیه با ثابت واپاشی  $\lambda$  مشخص می‌شود.  $\lambda$  فقط تابع نوع هسته‌ای است که واپاشیده می‌شود و عامل‌های خارجی مانند دما، فشار، یا میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تأثیری در آن ندارند.

اگر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های موجود در یک نمونه را برحسب زمان رسم کنیم نمودار شکل ۸-۱۸ به دست می‌آید. معمولاً سرعت واپاشی یک ایزوتوپ را با نیمه عمر مشخص می‌کنند. نیمه عمر زمانی است که طول می‌کشد تا تعداد هسته‌های پرتوزای موجود در یک نمونه به نصف برسد. اغلب ایزوتوپ‌های پرتوزا دارای نیمه عمرهای در حدود چند روز تا چند سال هستند که بسیار کوتاه‌تر از سن زمین ( $4.5 \times 10^9$  سال) است. بنابراین بیشتر این ایزوتوپ‌ها به عنصر پایدار واپاشیده‌اند. اما، برخی از آنها دارای نیمه عمرهای در حدود سن زمین هستند. این عناصر هنوز در اطراف ما وجود دارند و زمینهٔ پرتوزایی طبیعی را تشکیل می‌دهند که ما را احاطه کرده است.

تعداد هسته‌های  $^{131}\text{I}$



شکل ۸-۱۸ - نمودار واپاشی ایزوتوپ  $^{131}\text{I}$

## مثال ۸-۴

در حادثهٔ چرنوبیل یکی از ایزوتوپ‌هایی که مشکل آلودگی مواد غذایی را به وجود آورد  $^{131}\text{I}$  بود. این ایزوتوپ، فزاد است و همراه با جریان‌های جوی تا نقطه‌های دور دست حرکت کرد و با نشستن بر روی برگ گیاهان سبب آلودگی گوشت و شیر دام‌هایی شد که این گیاهان را می‌خوردند. نیمه عمر این ایزوتوپ ۸ روز است؛ پس از گذشت ۴۰ روز از حادثه، چه کسری از هسته‌های  $^{131}\text{I}$  باقی مانده بود؟

پاسخ

۴۰ روز برابر ۵ نیمه عمر  $^{131}\text{I}$  است. اگر  $N_0$  تعداد هسته‌های اولیه باشد، می‌توان

جدول زیر را تنظیم کرد.

تعداد نیمه عمرهای سپری شده	۰	۱	۲	۳	۴	۵
هسته‌های باقی مانده	$N_0$	$\frac{N_0}{2}$	$\frac{N_0}{2^2} = \frac{N_0}{4}$	$\frac{N_0}{2^3} = \frac{N_0}{8}$	$\frac{N_0}{2^4} = \frac{N_0}{16}$	$\frac{N_0}{2^5} = \frac{N_0}{32}$

بنابراین، پس از گذشت ۴۰ روز تعداد هسته‌های پرتوزای موجود و در نتیجه، فعالیت آنها به  $\frac{1}{۳۳}$  مقدار اولیه می‌رسد. نیمه عمر کوتاه  $^{۱۳۱}\text{I}$  باعث شد که خسارت وارد به محصولات کشاورزی چندان شدید نباشد.

برای تعداد نیمه‌عمرهای عدد صحیح، تعداد هسته‌های فعال باقی‌مانده را می‌توانیم از رابطه  $\frac{N_0}{۳^n}$  به دست آوریم، که در آن  $n$  از رابطه  $n = \frac{t}{T_{\frac{1}{۲}}}$  به دست می‌آید.  $t$  زمان مورد نظر برای واپاشی و  $T_{\frac{1}{۲}}$  نیز زمان نیمه عمر ایزوتوپ است.

## مطالعه آزاد

### نکته‌های ایمنی

**حفاظت در برابر پرتوها:** یکی از ویژگی‌های مهم ذرات و پرتوهایی که از مواد پرتوزا گسیل می‌شود این است که حواس معمولی ما به آنها حساس نیستند؛ مثلاً، وقتی دستان را به آتش نزدیک می‌کنیم سوزش ناشی از آن باعث می‌شود که آن را عقب بکشیم ولی این موضوع در مورد پرتوهای کیهانی و آنچه از مواد پرتوزا خارج می‌شود، صادق نیست؛ بنابراین باید به کمک دستگاه‌هایی آنها را آشکار ساخت و به وجود آنها پی برد.

ذره‌های دارای بار الکتریکی مانند ذره‌های آلفا و بتا هنگام عبور از ماده به واسطه بار الکتریکی خود باعث برانگیختگی و یونش اتم‌های محیط می‌شوند و می‌توان از این موضوع برای آشکارسازی آنها استفاده کرد. البته، این برانگیختگی و یونش تغییرهایی شیمیایی را در بدن به وجود می‌آورد که باعث آسیب‌رساندن به بافت‌های زنده می‌شود. البته هر چه این ذره‌ها انرژی خود را در مسافت کوتاه‌تری از بافت از دست بدهند، آسیب وارده شدیدتر و ترمیم آن دشوارتر خواهد بود؛ بدین سبب، آسیب ذره‌های آلفا بسیار شدیدتر از ذره‌های بتا خواهد بود.

پرتوهای بدون باری چون پرتوهای  $X$  و  $\gamma$  نیز بر اثر برهم‌کنش با ماده، ذره‌های باردار ثانویه به وجود می‌آورند و این ذره‌های ثانویه به بافت‌های زنده آسیب می‌رسانند.

از این ویژگی پرتوها برای از بین بردن غده‌های سرطانی بهره می‌گیرند؛ بدین ترتیب که با تمرکز این پرتوها بر روی غده‌ها آنها را نابود می‌سازند. این کار را «پرتودرمانی» می‌نامند. نوترون‌ها نیز گرچه بدون بارند ولی در هنگام ورود به بدن بر اثر برخورد با هیدروژن‌های آب — که بخش اعظم بدن را تشکیل می‌دهد — انرژی خود را به آن منتقل می‌کنند و باعث به حرکت درآمدن یک پروتون پرنرژی در بدن می‌شوند که اثر زیان‌بار آن بسیار شدید است؛ بنابراین، نوترون‌ها مخصوصاً وقتی سریع باشند، بسیار خطرناک‌اند.

آسیب وارد از تابش بر بدن ممکن است، یا بافت زنده را کاملاً از بین ببرد یا بدون از بین بردن آن باعث جهش در ژن‌های آن شود. یاخسته‌هایی که از این یاخسته‌های جهش یافته به وجود می‌آیند، با آن تفاوت خواهند داشت. این جهش‌ها می‌تواند به تولید بافت‌های سرطانی یا نوزادان ناقص‌الخلقه بینجامد. البته در مواردی نیز از این جهش‌ها برای تولید گیاهانی استفاده می‌شود که از گیاهان معمولی مقاوم‌ترند یا ویژگی بهتری دارند. به این ترتیب، در برخورد با مواد پرتوزا بایستی همواره احتیاط کرد تا پرتوگیری از این مواد به کمترین مقدار ممکن برسد. چشمه‌های پرتوزا باید حفاظ داشته باشند و در هنگام کار باید آنها را به کمک وسیله‌هایی در فاصله دور از بدن نگه داشت.

**فعالیت ۸-۸:** فضانوردان در معرض انواع گوناگونی از تابش‌ها، از جمله تابش‌های کیهانی و بادهای خورشیدی قرار دارند. تحقیق کنید فضانوردان چگونه خود را در برابر بخشی از این تابش‌ها مصون می‌دارند؟

## ۸-۱۰- انرژی هسته‌ای

در اواخر سال ۱۹۳۸ میلادی، دو دانشمند آلمانی، اوتوهان<sup>۱</sup> و فریتس اشتراسن<sup>۲</sup>، به طور تصادفی کشفی کردند که جهان را تغییر داد. آنها در حین بمباران نمونه‌ای از اورانیم با نوترون به وجود آوردن عناصر جدید، در نهایت تعجب متوجه تولید باریم شدند که جرمش در حدود نصف اورانیم بود. این دو تمایلی به باور نتیجه آزمایش خود نداشتند. اوتوهان خبر این کشف را برای همکار سابق خود لیزمایتنر<sup>۳</sup> که پناهنده‌ای از آلمان نازی بود و در سوئد کار می‌کرد فرستاد. او در طول تعطیلات کریسمس در این باره با خواهرزاده‌اش، اوتوفریش<sup>۴</sup>، که او هم به دانمارک پناهنده شده بود، بحث کرد. این دو

۱- Otto Hahn

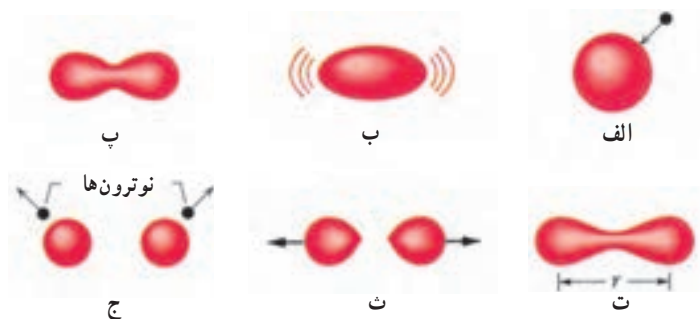
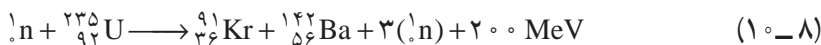
۲- Fritz Strassman

۳- Lise Meitner

۴- Otto Frisch

به اتفاق هم توصیفی برای این پدیده یافتند که بدین صورت بود؛ هسته اورانیم بر اثر بمباران نوترونی به دو قسمت تقسیم شده است. مایتنر و فریش این فرایند را با توجه به فرایند مشابه در زیست‌شناسی «شکافت» نامیدند.

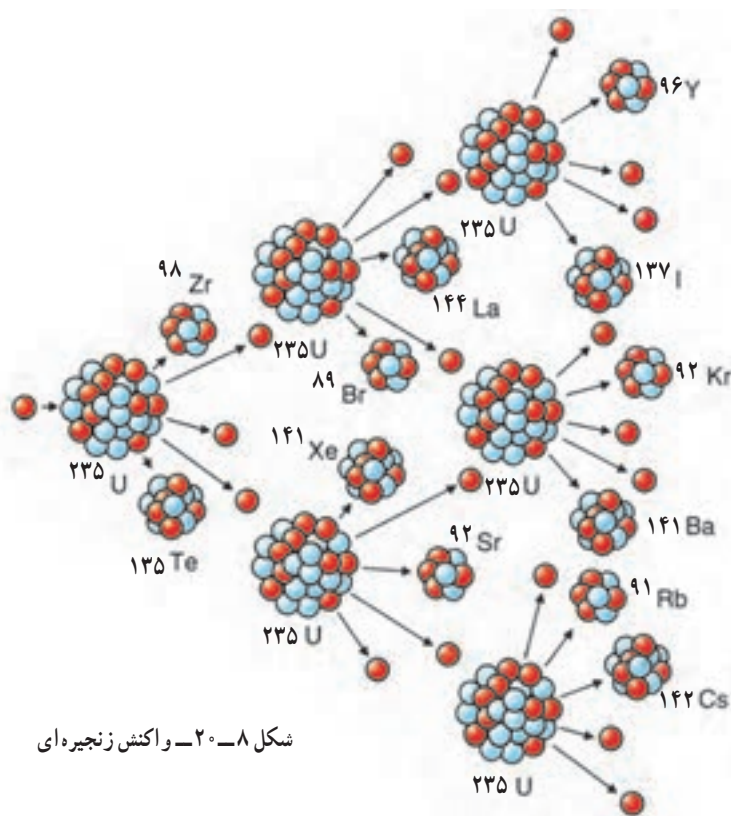
در تمام هسته‌های شناخته شده، نیروهای جاذبه هسته‌ای بر دافعه کولنی غلبه می‌کنند. در هسته اورانیم غلبه نیروی هسته‌ای بر نیروی کولنی بسیار شکننده است و با اندک اختلالی چون جذب یک نوترون که سبب تغییر شکل هسته می‌شود، از بین می‌رود. اگر هسته اورانیم اندکی کشیده شود (شکل ۸-۱۹)، نیروهای الکتریکی می‌توانند آن را کشیده‌تر کنند. اگر این کشیدگی از مرحله بحرانی بگذرد، نیروهای هسته‌ای تسلیم نیروهای الکتریکی می‌شوند و هسته به دو بخش تقسیم می‌شود. جذب نوترون در هسته اورانیم انرژی لازم جهت این کشیده شدن را تأمین می‌کند و هسته شکافته می‌شود. در فرایند شکافت، ترکیب‌های مختلفی از هسته‌های کوچک‌تر به وجود می‌آیند که یک نمونه آن را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت :



شکل ۸-۱۹- تغییر شکل هسته‌ای وقتی به وجود می‌آید که نیروی دافعه الکتریکی بر نیروی جاذبه هسته‌ای غلبه کند (شکل ت)، که در این صورت شکافت صورت می‌گیرد.

توجه کنید که در این واکنش، یک نوترون، شکافت اورانیم را آغاز می‌کند و بر اثر شکافت، سه نوترون به وجود می‌آید. چون نوترون‌ها بار الکتریکی ندارند، هسته آنها را دفع نمی‌کند و به راحتی و بدون برخورد با مانع در آن نفوذ می‌کند و در نتیجه، باعث شکافت در سه هسته اورانیم دیگر شده و نه نوترون آزاد می‌کند. اگر این نوترون‌ها نیز موفق به شکافت اتم‌های اورانیم شوند، بیست و هفت نوترون آزاد می‌شود... این رشته را «واکنش زنجیره‌ای» می‌نامند (شکل ۸-۲۰). در هر واکنش شکافت  $200,000,000$  الکترون





شکل ۸-۲- واکنش زنجیره‌ای

ولت ( $200\text{ MeV}$ ) انرژی آزاد می‌شود (برای مقایسه، در هر انفجار مولکول TNT فقط  $30$  الکترون ولت انرژی آزاد می‌شود). مجموع جرم پاره‌های شکافت و نوترون‌های تولید شده در واکنش از جرم اورانیم اولیه اندکی کمتر است. این اختلاف جرم مختصر طبق رابطه  $E=mc^2$  اینشتین به انرژی تبدیل می‌شود. بد نیست بدانید که بیشتر این انرژی به صورت انرژی جنبشی محصولات شکافت در می‌آید که همراه نوترون‌ها از محل واکنش خارج می‌شوند. بخش اندکی از این انرژی نیز به صورت پرتوهای مختلف در می‌آید. شاید این پرسش مطرح شود که چرا واکنش زنجیره‌ای هم‌اکنون به طور طبیعی در معدن‌های اورانیم رخ نمی‌دهد؟ پاسخ آن است که شکافت معمولاً فقط در ایزوتوپ کمیاب  $^{235}\text{U}$  که فقط  $0.72\%$  درصد اورانیم طبیعی را تشکیل می‌دهد، رخ می‌دهد. ایزوتوپ فراوان تر  $^{238}\text{U}$  نوترون‌ها را جذب می‌کند ولی معمولاً شکافته نمی‌شود و در نتیجه، واکنش زنجیره‌ای را ناممکن می‌سازد.

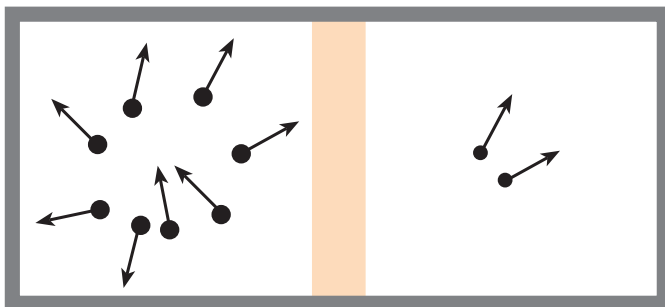
اگر واکنش زنجیره‌ای در قطعه‌ای از اورانیم به اندازه کافی بزرگ رخ دهد، به احتمال زیاد انفجاری

به وقوع می‌پیوندد اما؛ واکنش زنجیره‌ای در قطعه‌ای کوچک از اورانیم، انفجاری را به وجود نمی‌آورد؛ زیرا نوترون‌های تولید شده در فرایند شکافت در اورانیم، پیش از برخورد با هسته اورانیم باید مسافتی را طی کنند. اگر اندازه قطعه اورانیمی که در آن شکافت صورت می‌گیرد کوچک باشد، نوترون‌ها پیش از برخورد با هسته اورانیم دیگر، از قطعه فرار می‌کنند.

**جرم بحرانی :** جرمی است که برای آن هر شکافت به طور میانگین شکافت دیگری را به وجود می‌آورد. جرم زیر بحرانی، جرمی است که در آن واکنش زنجیره‌ای ادامه نمی‌یابد. جرم فوق بحرانی، جرمی است که در آن واکنش زنجیره‌ای به صورت انفجاری رشد می‌کند.

**غنی‌سازی اورانیم :** واکنش زنجیره‌ای معمولاً در اورانیم طبیعی خالص به وقوع نمی‌پیوندد؛ زیرا بخش اعظم آن (۹۹/۳ درصد) از  $^{238}\text{U}$  تشکیل شده است. برای انفجارهای هسته‌ای به  $^{235}\text{U}$  خالص نیاز داریم و برای استفاده در نیروگاه‌های هسته‌ای نیز باید فراوانی  $^{235}\text{U}$  را به صورت مصنوعی زیاد کرد که این کار را «غنی‌سازی» می‌نامند. جدا ساختن ایزوتوپ کمیاب  $^{235}\text{U}$  از ایزوتوپ فراوان  $^{238}\text{U}$  بسیار دشوار است؛ زیرا هر دو ایزوتوپ به لحاظ شیمیایی یکسان‌اند و نمی‌توان از واکنش‌های شیمیایی استفاده کرد. جداسازی این دو ایزوتوپ براساس اختلاف جرم آنها صورت می‌گیرد.

یکی از روش‌های انجام این عمل استفاده از فرایند پخش است. در این روش، اورانیم در ترکیب با فلوئور به صورت گاز هگزا فلورید اورانیم ( $\text{UF}_6$ ) در می‌آید. چون ایزوتوپ سبک‌تر  $^{235}\text{U}$  در دمای مساوی، سرعت متوسط آن کمی بیشتر از ایزوتوپ  $^{238}\text{U}$  است و با آهنگ بیشتری از غشایی نازک می‌گذرد. پخش از هزاران مرحله، سرانجام باعث تولید نمونه اورانیم با غنای مناسب می‌شود. این مقدار برای نیروگاه‌های تولید برق در حدود ۳ درصد است.



شکل ۸-۲۱ — مولکول‌های سبک‌تر در دمای یکسان سریع‌تر از مولکول‌های سنگین‌تر حرکت می‌کنند و در نتیجه، با سرعت بیشتری از غشای نازک می‌گذرند.

امروزه جداسازی اورانیم با استفاده از روش سانتریفوژ گازی راحت تر صورت می گیرد. گاز هگزافلورید اورانیم در یک استوانه با سرعت های فوق العاده زیاد از مرتبه  $1500$  کیلومتر در ساعت چرخانده می شود. مولکول های گاز حاوی  $^{238}\text{U}$  سنگین، مانند شیر در جدا کننده های لبنیات، به خارج رانده می شوند و مولکول های گاز حاوی  $^{235}\text{U}$  سبک تر، از مرکز استخراج می شوند. مشکلات مهندسی این روش در سال های اخیر برطرف شده است.

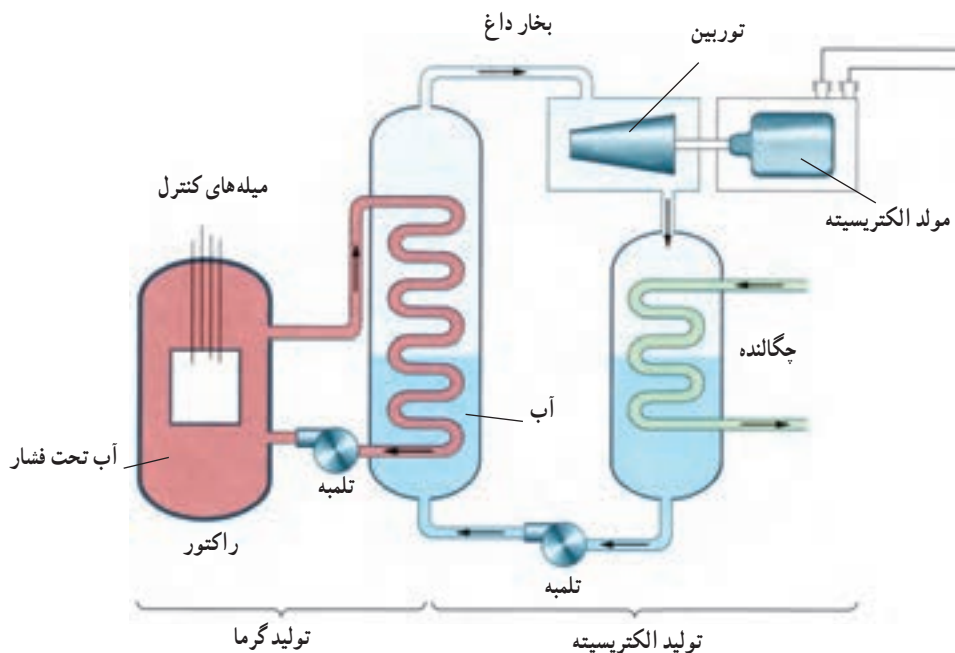
**راکتورهای شکافت هسته ای:** دیدیم که واکنش شکافت زنجیره ای معمولاً در اورانیم طبیعی خالص صورت نمی گیرد، زیرا بخش اعظم آن  $^{238}\text{U}$  است، و نوترون های آزاد شده در شکافت  $^{235}\text{U}$  که نوترون های سریع هستند را اتم های  $^{238}\text{U}$  جذب می کنند بدون اینکه باعث شکافت شوند. این واقعیت تجربی مهم که نوترون های کند را  $^{235}\text{U}$  با احتمال بیشتر از  $^{238}\text{U}$  جذب می کند اهمیت بسیار دارد. اگر نوترون ها را بتوان کُند ساخت، احتمال جذب نوترون ناشی از شکافت در یک اتم  $^{235}\text{U}$  دیگر، حتی در حضور  $^{238}\text{U}$ ، افزایش می یابد. این افزایش احتمال می تواند برای به وجود آوردن واکنش زنجیره ای کافی باشد.

در کمتر از یک سال پس از کشف شکافت هسته ای، دانشمندان متوجه شدند که اگر اورانیم به قطعه های کوچک تر تقسیم شود و در بین این قطعه ها ماده ای قرار گیرد که نوترون های حاصل از شکافت<sup>۱</sup> را کند و احتمال جذب آنها در اورانیم را زیاد سازد، می توان با استفاده از اورانیم طبیعی واکنش زنجیره ای به وجود آورد.

این روش را اولین بار انریکو فرمی در ۲ دسامبر ۱۹۴۲ میلادی (۱۳۲۱ ه.ش) در دانشگاه شیکاگو انجام داد. در اولین واکنش زنجیره ای کنترل شده، از گرافیت برای کُند کردن نوترون ها استفاده شده بود. دلیل استفاده از گرافیت این بود که نوترون در برخورد با آن، بخش قابل ملاحظه ای از انرژی خود را از دست می داد. اگر نوترون از هسته ای سنگین پس زده شود، سرعت و انرژی آن تغییر چندانی نخواهد کرد اما در برگشت از هسته سبک کربن، سرعتش به طور قابل ملاحظه ای کم می شود. می گویند گرافیت «کُند کننده» نوترون است. کل این دستگاه را «راکتور» می نامند.

راکتورهای هسته ای کنونی علاوه بر سوخت هسته ای دارای کُند کننده، میله های کنترل و شاره ای (معمولاً آب) برای خارج ساختن گرما از راکتورند. سوخت هسته ای در درجه اول  $^{238}\text{U}$  به علاوه ۳ درصد  $^{235}\text{U}$  است. چون  $^{235}\text{U}$  با  $^{238}\text{U}$  بسیار رقیق شده است، امکان انفجار هسته ای مانند بمب

۱- انرژی جنبشی متوسط این نوترون ها  $2\text{MeV}$  است.



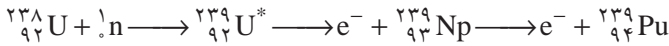
شکل ۸-۲۲- نمودار یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

در آن وجود ندارد. با وارد کردن میله‌های کنترل به داخل راکتور، آهنگ واکنش یعنی تعداد نوترون‌های موجود برای به وجود آوردن شکافت، تنظیم می‌شود. میله‌های کنترل معمولاً از مواد جذب‌کننده نوترون، مانند کادمیم یا بور، ساخته می‌شوند. آبی که سوخت هسته‌ای را احاطه کرده است معمولاً تحت فشار زیاد قرار می‌دهند تا بدون جوشیدن به دماهای زیاد برسد. آبی که بر اثر واکنش شکافت هسته‌ای گرم شده است، به دستگاهی با فشار آب کمتر منتقل می‌شود که با تولید بخار توربین و ژنراتور الکتریسیته را به کار می‌اندازد؛ از این رو، از دو دستگاه آب، به طور جداگانه، استفاده می‌شود تا مواد پرتوزا وارد توربین نشوند.

**تولید پلوتونیم:** وقتی  $^{238}\text{U}$  نوترونی را جذب می‌کند، شکافتی صورت نمی‌گیرد. هسته حاصل از جذب نوترون،  $^{239}\text{U}$ ، پرتوزاست. این هسته با نیمه عمر ۲۳ دقیقه، یک ذره بتا گسیل می‌کند و به اولین عنصر فرا اورانیومی به نام نپتونیم ( $\text{Np}$ )؛ نام اولین سیاره‌ای که از طریق قانون گرانش نیوتون کشف شد تبدیل می‌شود. این ایزوتوپ  $^{239}\text{Np}$  نیز پرتوزاست و با نیمه عمر ۲/۳ روز و گسیل ذره بتا به پلوتونیم تبدیل می‌شود ( $\text{Pu}$ )؛ نام پلوتون، دومین سیاره‌ای که به کمک قانون

گرایش نیوتون کشف شد).

نیمه عمر ایزوتوپ  $^{239}\text{Pu}$  برابر  $24000$  سال است.  $^{239}\text{Pu}$  نیز مانند  $^{235}\text{U}$  با جذب نوترون شکافته می شود. جالب توجه آنکه  $^{239}\text{Pu}$  از  $^{235}\text{U}$  شکافت پذیرتر است.



$^{238}\text{U}$  با جذب نوترون به  $^{239}\text{U}$  تبدیل می شود. این ایزوتوپ با گسیل ذره بتا به  $^{239}\text{Np}$  تبدیل می شود که آن هم با گسیل یک ذره بتای دیگر به  $^{239}\text{Pu}$  تبدیل می شود.

استفاده از شکافت در تولید انرژی: انرژی حاصل از شکافت هسته ای با انفجار بمب های هیروشیما و ناگازاکی به جهانیان معرفی شد. این تصویر هولناک هنوز از تفکری که در مورد انرژی هسته ای وجود دارد، رخت برنسته است. فاجعه انفجار چرنوبیل در سال ۱۹۸۶ میلادی (۱۳۶۵ ه.ش) نیز به این وحشت از انرژی هسته ای اضافه کرد. با وجود این، در بسیاری از کشورها بخش عمده ای از انرژی مورد نیاز از این طریق تأمین می شود. راکتور هسته ای درست مانند کوره ای معمولی، آب را به جوش می آورد و بخار تولید می کند. مهم ترین تفاوت آن، مقدار سوخت دخیل در این کار است. یک کیلوگرم سوخت اورانیم، قطعه ای کوچک تر از یک توپ تنیس، بیش از  $30$  کامیون بزرگ پر از زغال سنگ انرژی تولید می کند.

نقطه ضعف اصلی استفاده از شکافت هسته ای تولید پسماندهای پرتوزاست. همان طور که قبلاً



شکل ۸-۲۳ - نمونه ای از یک نیروگاه شکافت هسته ای

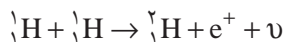
گفتیم، برای پایدار ماندن هسته باید با زیاد شدن عدد اتمی، نسبت نوترون به پروتون افزایش یابد. این نسبت برای هسته‌های سبک برابر ۱، در هسته‌های متوسط ۱/۲ و در هسته سنگینی چون سرب ۱/۵ است. وقتی هسته سنگینی چون اورانیم دو پاره می‌شود، این پاره‌ها دیگر برای پایداری به نسبت نوترون به پروتونی مانند اورانیم نیاز ندارند و باید این نسبت را کم کنند؛ بنابراین، تعدادی از نوترون‌ها مستقیماً در فرایند شکافت آزاد می‌شوند و بقیه در فرایند واپاشی پرتوزای پاره‌های شکافت به تدریج به پروتون تبدیل می‌شوند؛ بنابراین، پاره‌های شکافت پرتوزا هستند اما بیشتر آنها دارای نیمه عمر کوتاه‌اند و به سرعت از بین می‌روند. با این همه، تعدادی از آنها دارای نیمه عمرهای هزاران ساله‌اند. دور ریختن همراه با ایمنی این پسماندها و موادی که در جریان تولید سوخت‌های هسته‌ای به وجود می‌آیند به روش‌ها و استفاده از محفظه‌های خاص نیاز دارد. گرچه بیش از نیم قرن از به کارگیری انرژی هسته‌ای می‌گذرد، اما فناوری دورریزی پسماندهای هسته‌ای هنوز در مرحله‌های اولیه است.

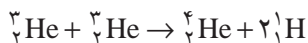
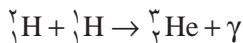
مزیت‌های توان هسته‌ای عبارت‌اند از (۱) توانایی تولید الکتریسیته فراوان با استفاده از این انرژی؛ (۲) حفظ بیلون‌ها تن زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی که عملاً هر سال به گرما و دود تبدیل می‌شود و در دراز مدت می‌توان از آنها به عنوان منابع غنی از مولکول‌های آلی گرانبها استفاده کرد؛ و (۳) حذف میلیون‌ها تن دی‌اکسید گوگرد و سایر مواد سمی و همین‌طور گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن که هر سال با سوزاندن سوخت‌های فسیلی وارد جو می‌شود و با به وجود آوردن مسئله گرم شدن گلخانه‌ای تهدیدی عظیم برای محیط زیست انسان است.

## مطالعه آزاد

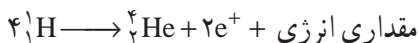
### همجوشی هسته‌ای

در واکنش شکافت هسته‌ای، دیدیم که هسته سنگین با جذب یک نوترون به دو هسته سبک‌تر شکافته می‌شود و مقداری انرژی آزاد می‌شود. یک نوع واکنش هسته‌ای دیگر نیز وجود دارد که همجوشی هسته‌ای نام دارد و در آن دو هسته سبک با یکدیگر ترکیب می‌شوند و هسته سنگین‌تری تولید می‌کنند. در این واکنش نیز جرم هسته تولید شده کمتر از جرم هسته‌های اولیه است و در نتیجه مقداری انرژی آزاد می‌شود.





کل فرایند را می‌توان به صورت زیر نوشت



در این واکنش چهار هسته‌اتم هیدروژن (یعنی چهار پروتون) با هم ترکیب می‌شوند و یک هسته‌هلیوم ۴ (یعنی یک ذره آلفا) به اضافه یک پوزیترون ( $e^+$ ) تولید می‌کنند و مقداری انرژی نیز آزاد می‌نمایند. پوزیترون پاد ذره الکترون است که جرم آن با جرم الکترون برابر و بار آن مثبت است.

واکنش همجوشی هسته‌ای با یک مشکل بزرگ همراه است و آن اینکه ذره‌هایی که در این واکنش باید با هم ترکیب شوند بار مثبت دارند و برای آنکه با هم ترکیب شوند (به هم جوش بخورند) باید بر نیروی رانشی الکتریکی غلبه کنند. برای این کار در ابتدای فرایند باید مقدار زیادی انرژی صرف کرد.

برای مثال برای اینکه دو پروتون را به اندازه کافی به هم نزدیک کنیم باید آنها را با انرژی حدود  $1 \text{ MeV}$  به طرف هم برانیم. این کار را می‌توان به کمک دستگاه‌هایی به نام شتاب دهنده انجام داد. اما انرژی لازم برای راه‌اندازی چنین دستگاهی خیلی بیشتر از انرژی حاصل از واکنش همجوشی است.

راه دیگری که برای تأمین این انرژی وجود دارد گرما دادن به هسته‌ها تا دمای  $10^8 \text{ } ^\circ\text{C}$  است. در چنین دمای انرژی جنبشی هسته‌ها برای غلبه بر رانش الکتریکی بین آنها کافی خواهد بود.

چنین دمای بالایی در ستارگان و خورشید وجود دارد. مثلاً دمای درونی خورشید در حدود  $15 \times 10^6$  درجه سلسیوس است، در نتیجه واکنش همجوشی هسته‌ای در خورشید و ستارگان به طور عادی صورت می‌گیرد.

بخش عمده انرژی خورشیدی از طریق واکنش همجوشی تأمین می‌شود. این انرژی به اندازه‌ای است که هم خورشید را داغ نگه می‌دارد و هم انرژی لازم را برای منظومه خورشیدی و از آن جمله سیاره زمین فراهم می‌کند.

## تمرین‌های فصل هشتم

- ۱- در نظریه نواری الکترون در جسم جامد، گذار درون نواری در چه صورتی روی می‌دهد؟
- ۲- آیا الکترون‌های نوارهای پر، سهمی در رسانش الکتریکی دارند؟ توضیح دهید.
- ۳- انرژی مورد نیاز الکترون، برای انجام گذار بین ترازهای مختلف انرژی در یک جسم جامد، از چه منابعی می‌تواند تأمین شود؟
- ۴- با استفاده از نظریه نواری جسم جامد، خاصیت رسانایی، نارسانایی و نیمرسانایی مواد مختلف را توضیح دهید.

- ۵- چگونه می‌توان سهم نوار ظرفیت در رسانش را برحسب حفره توضیح داد؟
- ۶- دو روش برای افزایش تعداد حاملان بار در نیمرساناها را نام ببرید.
- ۷- تفاوت نیمرسانای نوع n و نیمرسانای نوع P را شرح دهید.
- ۸- معمولاً دیود را یکسوکننده نیز می‌نامند. چرا؟
- ۹- آیا دیود یک مقاومت اهمی است؟ توضیح دهید.
- ۱۰- علاوه بر ارتعاش‌های اتمی، سازوکار دیگری نیز در جسم جامد برای ایجاد مقاومت وجود دارد. توضیح دهید این ساز و کار چه موقعی قابل تشخیص است و ناشی از چه عواملی است؟
- ۱۱- استرانسیوم  $^{90}_{38}\text{Sr}$  در اثر انفجارهای هسته‌ای تولید می‌شود و نیم عمر آن ۲۸ سال است. این ایزوتوپ را گیاهان جذب می‌کنند و از طریق غذا وارد بدن انسان می‌شود. تعداد پروتون‌ها، نوترون‌ها و الکترون‌های موجود در هراتم با هسته  $^{90}_{38}\text{Sr}$  چقدر است؟
- ۱۲- آیا ایزوتوپ  $^{25}\text{X}$  را می‌توان با روش شیمیایی از ایزوتوپ  $^{59}\text{Y}$  جدا کرد؟ از ایزوتوپ  $^{64}_{26}\text{Z}$  چگونه؟

- ۱۳- هنگامی که از ایزوتوبی یک ذره آلفا گسیل می‌شود، چه تغییری در هسته رخ می‌دهد؟ هنگام گسیل یک ذره بتا چگونه؟ هنگام گسیل پرتوی گاما چگونه؟
- ۱۴- گاهی گفته می‌شود که «جرم را نمی‌توان تولید و نابود کرد» این گفته را تحلیل کنید.
- ۱۵- گاهی گفته می‌شود که تمام منابع انرژی موجود ناشی از انرژی هسته‌ای اند. آیا سوخت‌هایی مانند زغال سنگ و نفت هم از انرژی هسته‌ای به دست آمده‌اند؟ توضیح دهید.
- ۱۶- هریک از اتم‌های زیر چند الکترون، چند پروتون و چند نوترون دارند؟  
الف) برلیوم ۹      ب) کلسیم ۴۰      پ) نقره ۱۰۷

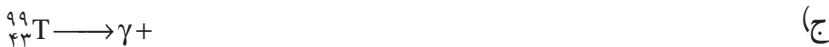


(ت) طلا ۱۹۷

(ث) سرب ۲۰۸

(ج) اورانیم ۲۳۸

۱۷- واکنش‌های زیر را کامل کنید و برای تعیین نماد ایزوتوپ‌ها از جدول تناوبی استفاده کنید.



۱۸- نیم عمر بیسموت ۲۱۲ در حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از ماده اولیه باقی مانده است؟

۱۹- آلومینیوم تنها یک ایزوتوپ پایدار  $^{27}_{13}\text{Al}$  به جرم اتمی ۲۶/۹۸۱۵۴u دارد. جرم اتمی دو ایزوتوپ ناپایدار  $^{26}_{13}\text{Al}$  و  $^{28}_{13}\text{Al}$  به ترتیب برابر ۲۵/۹۸۶۹۸۲u و ۲۷/۹۸۱۹۰۵u است. انرژی بستگی هر یک از سه ایزوتوپ را بر حسب MeV حساب کنید.

۲۰- انرژی بستگی کل، B، و انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون B/A، را برای  $^{56}_{26}\text{Fe}$  و  $^{238}_{92}\text{U}$  حساب کنید. (جرم  $^{56}_{26}\text{Fe}$  برابر  $9.29 \times 10^{-26}\text{kg}$  و جرم  $^{238}_{92}\text{U}$  برابر  $3.95 \times 10^{-25}\text{kg}$  است).

۲۱- در جریان یک حفاری باستان‌شناسی یک اجاق مخصوص پخت ویز کشف می‌شود. کربن موجود در زغال اجاق، ۱/۵۶ درصد (معادل  $\frac{1}{64}$ ) مقدار عادی کربن ۱۴ است. سن تقریبی زغال چه مقدار است؟ (نیم عمر کربن ۱۴ برابر ۵۷۳۰ سال است).

**H**  
هیدروژن  
۱

**H**  
هیدروژن  
۱

فلز شیمیایی

تلم غیرفلز

عدالتی

**He**  
هلیوم  
۲

**Li**  
لیتیم  
۳

**Be**  
بریلیم  
۴

**Na**  
سدیم  
۱۱

**Mg**  
منیزیم  
۱۲

**K**  
پتاسیم  
۱۹

**Ca**  
کلسیم  
۲۰

**Rb**  
روبیوم  
۳۷

**Sr**  
استرونسیم  
۳۸

**Cs**  
سزیم  
۵۵

**Ba**  
باریم  
۵۶

**Fr**  
فرانسیم  
۸۷

**Ra**  
رادیوم  
۸۸

**La**  
لانتان  
۵۷

**Hf**  
هافنیم  
۷۲

**Ta**  
تانتال  
۷۳

**W**  
تنگستن  
۷۴

**Re**  
رنتیم  
۷۵

**Os**  
اوسمیم  
۷۶

**Ir**  
ایریدیوم  
۷۷

**Ce**  
سرمه  
۵۸

**Pr**  
پرازیوم  
۵۹

**Nd**  
نئودیم  
۶۰

**Pm**  
پرومتیم  
۶۱

**Sm**  
ساماریوم  
۶۲

**Eu**  
یورپیم  
۶۳

**Gd**  
گادولینیم  
۶۴

**Th**  
توریم  
۹۰

**Pa**  
پروکتینیم  
۹۱

**U**  
اورانیوم  
۹۲

**Np**  
نپتونیم  
۹۳

**Pu**  
پلوتونیم  
۹۴

**Am**  
امریسیم  
۹۵

**Cm**  
کوریوم  
۹۶

**Ce**  
سرمه  
۵۸

**Pr**  
پرازیوم  
۵۹

**Nd**  
نئودیم  
۶۰

**Pm**  
پرومتیم  
۶۱

**Sm**  
ساماریوم  
۶۲

**Eu**  
یورپیم  
۶۳

**Gd**  
گادولینیم  
۶۴

فلز

شبه فلز

نافلز

جدول تناوبی عناصر

**B**  
بور  
۵

**C**  
کربن  
۶

**N**  
نیتروژن  
۷

**O**  
اکسیژن  
۸

**F**  
فلوئور  
۹

**Ne**  
نئون  
۱۰

**Al**  
آلومینیم  
۱۳

**Si**  
سیلیسیم  
۱۴

**P**  
فسفر  
۱۵

**S**  
گوگرد  
۱۶

**Cl**  
کلر  
۱۷

**Ar**  
آرگون  
۱۸

**Ga**  
گالیم  
۳۱

**Ge**  
ژرمانیم  
۳۲

**As**  
آرسنیک  
۳۳

**Se**  
سelenium  
۳۴

**Br**  
برم  
۳۵

**Kr**  
کریپتون  
۳۶

**In**  
ایندیم  
۴۹

**Sn**  
فلج  
۵۰

**Sb**  
آنتیموان  
۵۱

**Te**  
تلوریم  
۵۲

**I**  
ید  
۵۳

**Xe**  
زئون  
۵۴

**Tl**  
تالیم  
۸۱

**Pb**  
سرب  
۸۲

**Bi**  
بیسموت  
۸۳

**Po**  
پلونیوم  
۸۴

**At**  
استاتین  
۸۵

**Rn**  
رادون  
۸۶

## برخی از ثابت‌های فیزیکی

$2/988 \times 10^8 \text{ m/s}$	c	سرعت نور
$6/673 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$	G	ثابت گرانش
$6/022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$N_A$	ثابت آووگادرو
$8/314 \text{ J/mol.K}$	R	ثابت جهانی گازها
$8/854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$	$\epsilon_0$	ثابت گذردهی الکتریکی
$1/257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$	$\mu_0$	ثابت تراوایی مغناطیسی
$6/626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$	h	ثابت پلانک
$4/136 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$		
$1/381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$	k	ثابت بولتزمن
$8/617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$		
$1/602 \times 10^{-19} \text{ C}$	e	بار الکتریکی بنیادی
$9/109 \times 10^{-31} \text{ kg}$	$m_e$	جرم الکترون
$5/486 \times 10^{-4} \text{ u}$		
$0/511 \text{ MeV}$		
$1/673 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$m_p$	جرم پروتون
$1/007 \text{ u}$		
$938/272 \text{ MeV}$		
$1/675 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$m_n$	جرم نوترون
$1/008 \text{ u}$		
$939/566 \text{ MeV}$		
$3/344 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$m_d$	جرم دوتریون
$5/292 \times 10^{-11} \text{ m}$	$a_0$	شعاع بوهر
$1/097373 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$	R	ثابت ریدبرگ
$8/988 \times 10^4 \text{ N.m}^2.C^{-2}$	$1/4 \pi \epsilon_0$	ثابت کولن
$1/660 \times 10^{-27} \text{ kg}$	u	یکای جرم اتمی
$931/494 \text{ MeV}$		
$2/898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$	b	ثابت قانون جابه‌جایی وین

## برخی از ضریب‌های تبدیل واحدها

### جرم و چگالی

$$1 \text{ kg} = 1000 \text{ g} = \frac{1}{1836} \times 10^{27} \text{ u}$$

$$1 \text{ slug} = 14.59 \text{ kg}$$

$$1 \text{ u} = \frac{1}{1836} \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$1 \text{ kg/m}^3 = 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

### طول و حجم

$$1 \text{ m} = 100 \text{ cm} = \frac{39}{4} \text{ in.} = \frac{3}{28} \text{ ft}$$

$$1 \text{ mi} = \frac{1}{6} \text{ km} = 5280 \text{ ft}$$

$$1 \text{ in.} = \frac{2}{54} \text{ cm}$$

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10^9 \text{ Å}$$

$$1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m} = 1000 \text{ fm}$$

$$1 \text{ light-year} = \frac{9}{461} \times 10^{15} \text{ m}$$

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L} = \frac{35}{3} \text{ ft}^3 = 264 \text{ gal}$$

### زمان

$$1 \text{ d} = 86400 \text{ s}$$

$$1 \text{ y} = 365 \frac{1}{4} \text{ d} = \frac{3}{16} \times 10^7 \text{ s}$$

### زاویه

$$1 \text{ red} = \frac{57}{3}^\circ = \frac{1}{59} \text{ rev}$$

$$\pi \text{ rad} = 180^\circ = \frac{1}{2} \text{ rev}$$

### سرعت

$$1 \text{ m/s} = \frac{28}{3} \text{ ft/s} = \frac{2}{22} \text{ mi/h}$$

$$1 \text{ km/h} = \frac{1}{62} \text{ mi/h} = \frac{1}{2280} \text{ m/s}$$

### نیرو و فشار

$$1 \text{ N} = \frac{1}{225} \text{ lb}$$

$$1 \text{ lb} = \frac{4}{45} \text{ N}$$

$$1 \text{ ton} = 2000 \text{ lb}$$

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$= \frac{1}{45} \times 10^{-4} \text{ lb/in.}^2$$

$$1 \text{ atm} = \frac{1}{10} \times 10^5 \text{ Pa} = \frac{14}{7} \text{ lb/in.}^2$$

$$= 760 \text{ cmHg}$$

### انرژی و توان

$$1 \text{ J} = \frac{1}{2389} \text{ cal} = \frac{1}{738} \text{ ft. lb}$$

$$1 \text{ kW.h} = \frac{3}{6} \times 10^6 \text{ J}$$

$$1 \text{ cal} = \frac{4}{1868} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = \frac{1}{602} \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ hp} = 746 \text{ W} = 550 \text{ ft. lb/s}$$

### مغناطیس

$$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2 = 10^4 \text{ gauss}$$

## برخی از خواص فیزیکی

$۱/۹۹ \times ۱۰^{۳۰} \text{ kg}$	جرم خورشید
$۶/۹۶ \times ۱۰^۸ \text{ m}$	شعاع خورشید
$۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴} \text{ kg}$	جرم زمین
$۶/۳۷ \times ۱۰^۶ \text{ m}$	شعاع زمین
$۱/۵۰ \times ۱۰^{۱۱} \text{ m} = ۱ \text{ Au}$	شعاع مدار زمین
$۹/۸۰۶ \text{ m/s}^۲$	متوسط شتاب گرانشی در سطح زمین
$۸۶/۳ \text{ min}$	دوره یک ماهواره در ارتفاع یک صد کیلومتری زمین
$۱۱/۲ \text{ km/s}$	سرعت فرار از زمین
$۱۵^\circ \text{ V/m}$ ، به طرف پایین	میدان الکتریکی متوسط در سطح زمین
$۳/۸۲ \times ۱۰^۸ \text{ m}$	فاصله زمین تا ماه
$۱/۵۰ \times ۱۰^{۱۱} \text{ m}$	فاصله زمین تا خورشید
$۴/۰۴ \times ۱۰^{۱۶} \text{ m}$	فاصله زمین تا نزدیکترین ستاره به خورشید
$۲/۲ \times ۱۰^{۲۰} \text{ m}$	فاصله زمین تا مرکز کهکشان راه شیری
$\sim ۱۰^{۲۶} \text{ m}$	فاصله زمین تا لبه جهان قابل رؤیت
$۷/۳۵ \times ۱۰^{۲۲} \text{ kg}$	جرم ماه
$۱/۷۴ \times ۱۰^۶ \text{ m}$	شعاع ماه
$۳/۸۴ \times ۱۰^۸ \text{ m}$	شعاع مدار ماه
$۱/۲۱ \text{ kg/m}^۳$	چگالی هوا
$۱۰۱۰ \text{ J/kg.K}$	گرمای ویژه هوا در فشار ثابت
$۳۴۳ \text{ m/s}$	سرعت صوت در هوا
$۳ \times ۱۰^۶ \text{ V/m}$	شدت میدان الکتریکی فروشکست هوا
$۱۰۰۰ \text{ kg/m}^۳$	چگالی آب
$۱۴۶۰ \text{ m/s}$	سرعت صوت در آب
$۴۱۹۰ \text{ J/kg.K}$	گرمای ویژه آب در فشار ثابت
$۳۳۳ \text{ kJ/kg}$	گرمای نهان ذوب آب ( $^\circ \text{C}$ )
$۲۲۶۰ \text{ kJ/kg}$	گرمای نهان تبخیر آب ( $۱۰۰^\circ \text{C}$ )
$۱/۳۳$	ضریب شکست آب (در طول موج $\lambda = ۵۸۹ \text{ nm}$ )

## واژه‌نامه فارسی – انگلیسی

### آ - ا

Threshold of pain	آستانه دردناکی
Threshold of hearing	آستانه شنوایی
Disturbance	آشفتگی
Doping	آلایش
Pendulum	آونگ
Simple pendulum	آونگ ساده
Detection	آشکارسازی
Superconductor	ابررسانا
Doppler effect	اثر دوپلر
Photoelectric effect	اثر فوتوالکتریک
Maximum height	ارتفاع اوج
Bohr's model	الگوی بور
Thomson's model	الگوی تامسون
Rutherford's model	الگوی رادرفورد
Electromagnetic waves	امواج الکترومغناطیسی
Propagation	انتشار
Free end	انتهای آزاد
Fixed end	انتهای بسته
Magnitude	اندازه
Binding energy	انرژی بستگی
Potential energy	انرژی پتانسیل
Elastic potential energy	انرژی پتانسیل کشسانی
Gravitational potential	انرژی پتانسیل گرانشی
Kinetic energy	انرژی جنبشی
Ionization energy	انرژی یونش
Isotope	ایزوتوپ

## ب

Charge	بار
Resultant	برآیند
Vector	بردار
Position vector	بردار مکان
Unit vector	بردارهای یکه
Interaction	برهم کنش
Frequency	بسامد (فرکانس)
Angular frequency	بسامد زاویه‌ای
Cut - off frequency	بسامد قطع
Excited	برانگیخته
Dimension	بعد
Loud speaker	بلندگو
Loudness	بلندی (صوت)
Ellipse	بیضی

## پ

Stable	پایدار (مانا)
Atom stability	پایداری اتم
Energy conservation	پایستگی انرژی
Conservation of mechanical energy	پایستگی انرژی مکانیکی
Gamma ray	پرتو گاما
Bandwidth	پهنای نوار
Pnjunction	پیوند Pn
Junction	پیوندگاه

## ت

Black body radiation	تابش جسم سیاه
Thermal radiation	تابش گرمایی
Periodic function	تابع دوره‌ای

Sinusoidal function	تابع سینوسی
Wave function	تابع موج
Radiance	تابندگی
Mass - energy conversion	تبدیل جرم - انرژی
Pulse	تپ
Resolution of a vector	تجزیه یک بردار
Interference	تداخل
Constructive interference	تداخل سازنده
Destructive interference	تداخل ویرانگر
Energy level	تراز انرژی
Intensity level	تراز شدت (صوت)
Transistor	ترانزیستور
Resonance	تشدید
Monochromatic	تکفام
Displacement	تغییر مکان
Subtraction of vectors	تفریق بردارها

## ث

Planck's constant	ثابت پلانک
Rydberg constant	ثابت ریدبرگ
Constant of spring	ثابت فنر

## ج

Displacement	جاب‌جایی
Wave front	جبهه موج
Addition of vectors	جمع بردارها
Nuclear fusion	جوش هسته‌ای (همجوشی هسته‌ای)
Direction	جهت



## ج

Source

چشمه، منبع

## ح

Volume

حجم

Motion with constant acceleration

حرکت با شتاب ثابت

Projectile

حرکت پرتابی

Accelerating motion

حرکت تند شونده

Circular motion

حرکت دایره‌ای

Uniform circular motion

حرکت دایره‌ای یکنواخت

Rectilinear motion

حرکت روی خط راست

Motion of plane

حرکت روی یک صفحه

Decelerating motion

حرکت کند شونده

Simple harmonic motion

حرکت نوسانی ساده

Uniform motion

حرکت یکنواخت

Cavity

حفره (کاواک)

## د

Amplitude

دامنه

Wave trough

دره موج

Period

دوره

Tuning fork

دیاپازون

Dynamics

دینامیک

Diode

دیود

## ذ

Beta particle

ذره بتا

## ر

Radioactive	رادیواکتیو
Radioactivity	رادیواکتیویته
Conductor	رسانا
Series of lines	رشته خطوط
Rydberg	ریدبرگ

## س

Structure	ساختار
Velocity	سرعت
Speed of propagation	سرعت انتشار
Initial velocity	سرعت اولیه
Angular velocity	سرعت زاویه‌ای
Instantaneous velocity	سرعت لحظه‌ای
Average velocity	سرعت متوسط
Inclined plane	سطح شیب‌دار
Free falling	سقوط آزاد
Sense	سو
Planets	سیارات

## ش

Acceleration	شتاب
Radial acceleration	شتاب شعاعی
Gravity acceleration	شتاب گرانش
Instantaneous acceleration	شتاب لحظه‌ای
Average acceleration	شتاب متوسط
Tangential acceleration	شتاب مماسی
Intensity	شدت (صوت)
Wave Intensity	شدت موج
Nuclear fission	شکافت هسته

Antinode

شکم (موج)

Slope

شیب خط

## ص

Sound

صوت

## ض

Static coefficient of friction

ضریب اصطکاک حالت سکون

Kinematic coefficient of friction

ضریب اصطکاک لغزشی

Absorption coefficient

ضریب جذب

Emissivity coefficient

ضریب گسیل

Reflection coefficient

ضریب بازتاب

Transmission coefficient

ضریب عبور

## ط

Wave length

طول موج

Spectrum

طیف

Atomic spectrum

طیف اتمی

Emission spectrum

طیف نشری (گسیلی)

Absorption spectrum

طیف جذبی

Spectroscope

طیف نما

Spectroscopy

طیف نمایی

## ع

Wave number

عدد موج

Inaccuracy

عدم قطعیت

## غ

Sonic boom	غررش صوتی
Enrichment	غنی سازی

## ف

Ultraviolet	فرا بنفش
Ultrasound	فراصوت
Disintegration	فروپاشی
Infrared	فروسرخ
Subsonic	فروصوت
Spring	فنر
Atomic physics	فیزیک اتمی
Nuclear physics	فیزیک هسته ای

## ق

Wien's displacement law	قانون جابه جایی وین
Wave train	قطار موج
Reactor core	قلب راکتور
Wave's crest	قله موج
Kepler's laws	قوانین کپلر
Newton's laws	قوانین نیوتون

## ک

Quantity	کمیت اصلی
Vectorial quantity	کمیت برداری
Discrete quantity	کمیت ناپیوسته
Scalar quantity	کمیت نرده ای

## گ

Transition	گذار
Electronic intraband transition	گذار درون نواری الکترون
Electronic interband transition	گذار میان نواری الکترون
Emission	گسیل

## ل

Lyman	لیمان
-------	-------

## م

Satellite	ماهواره
Horizontal axis	محور افقی
Vertical axis	محور قائم
Bohr's model	مدل بوهر
Path	مسیر
Maxwell equations	معادله های ماکسول
Wave	موج
Standing wave	موج ایستاده
Plane wave	موج تخت
Sinusoidal wave	موج سینوسی
Longitudinal wave	موج طولی
Sound wave	موج صوتی
Transverse wave	موج عرضی
Spherical wave	موج کروی
Mechanical wave	موج مکانیکی
Components of a vector	مؤلفه های یک بردار

## ن

Discrete	ناپیوسته
----------	----------

Observer	ناظر
Relativity	نسبیت
Heliocentric theory	نظریه خورشید مرکزی
Geocentric theory	نظریه زمین مرکزی
Dark fringe	نوار تاریک
Light fringe	نوار روشن
Interference fringes	نوارهای تداخلی
Natural light	نور طبیعی
Visible light	نور مرئی
Oscillator	نوسانگر
Damped oscillation	نوسان میرا
Force	نیرو
Dynamometer	نیروسنج
Restoring force	نیروی بازگرداننده
Gravitational force	نیروی گرانشی
Centripetal force	نیروی مرکزگرا
Nuclear force	نیروی هسته‌ای
Semiconductor	نیم‌رسانا
Half life	نیمه عمر

## و

Decay	واپاشی
Reaction	واکنش
Chain reaction	واکنش زنجیره‌ای
Equilibrium state	وضع تعادل
Stopping potential	ولتاژ متوقف کننده

## هـ

Fusion	همجوشی
Nucleus	هسته (اتم)
Stable nucleus	هسته پایدار

## ی

Unit

یکا

## فهرست مراجع

- 1- Physics Raymond A. Serway Jerry S. Faughn 1999 by Holt Rinehart and Winston.
- 2- Physics for Scientists and Engineers Paul A. Tipler 1999 by W. H. Freedman and Company.
- 3- College Physics Raymond A. Serway Jerry S. Faughn 1999, 2000, Saunders College Publishing.
- 4 - Fundamentals of Physics.  
David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker 2001 John Wiley & Sons, Inc.
- 5 - Physics. principles with Applications Douglas C. Gioncoli 1999 Prentice - Hall International Editions.
- 6 - Understanding Physics Robin Millar 1994 Collins Educational.
- 7 - Physics Classical and Modern, Frederick J. Keller W. Edward Gettys, Malcolm J. Skove 1993 Mc Graw Hill.
- 8 - University Physics, Hugh D. Young, Roger A. Freedman, 2000 Addison Wesley Longman, Inc.
- 9- Contemporary College Physics. Jones / Childers 1999 by Mc Graw Hill Companies.
- 10 - Physics 2 David Sanq 2001 Cambridge University Press.
- 11 - The Physical Universe, Krauskopf / Beiser, 1993 Mc Graw Hill, Inc.
- 12 - Physics, Hugh D. Young, Eight Edition, 1992, Addison Wesley Publishing Company.
- ۱۳- پرسش‌ها و مسئله‌های تکمیلی فیزیک ۱ و ۲ پیش‌دانشگاهی، انتشارات فاطمی، ۱۳۸۷.
- ۱۴- دانش‌نامه جهان اسلام، بنیاد دایرة المعارف اسلامی، گروه نویسندگان
- ۱۵- دایرة المعارف اسلامی، مرکز دایرة المعارف بزرگ اسلامی، گروه نویسندگان



## خرید اینترنتی کتاب درسی

### والدین گرامی و دانش آموز عزیز

در راستای توسعه دولت الکترونیک و با هدف اطلاع رسانی و سهولت دسترسی دانش آموزان به کتابهای درسی، در سال تحصیلی جدید در سراسر کشور، فروش و توزیع کتابهای درسی به صورت اینترنتی و از طریق سامانه انجام می شود. [www.irtextbook.com](http://www.irtextbook.com) یا [www.irtextbook.ir](http://www.irtextbook.ir) فروش و توزیع مواد آموزشی به نشانی

### نحوه خرید کتاب درسی :

- ۱- دانش آموزانی که به اینترنت دسترسی ندارند (سفارش گروهی) :
  - مراجعه به مدرسه محل تحصیل
  - پرداخت وجه کتاب به مدرسه محل تحصیل
  - اعلام شماره تلفن همراه (فعال) اولیای دانش آموز برای دریافت پیام کوتاه از سامانه
  - ثبت سفارش گروهی دانش آموزان در سامانه فروش و توزیع مواد آموزشی توسط مدرسه
- ۲- دانش آموزانی که به اینترنت دسترسی دارند (سفارش انفرادی) :
  - ورود به سامانه فروش و توزیع مواد آموزشی
  - کلیک روی دکمه «ورود به بخش سفارش دانش آموز»
  - ثبت کد ملی دانش آموز به عنوان شناسه کاربری و شش رقم سمت راست سریال شناسنامه وی به عنوان

رمز ورود

- ثبت و پرداخت اینترنتی سفارش براساس راهنمای سامانه

نکته :

- برای پرداخت اینترنتی نیاز به کارت بانکی، رمز دوم، کد اعتبارسنجی دوم روی کارت (CVV2) و تاریخ انقضای کارت بانکی می باشد.

- پیشنهاد می شود قبل از فرا رسیدن زمان خرید، یک بار بصورت آزمایشی با شناسه کاربری و رمز عبور خود وارد سامانه فروش و توزیع مواد آموزشی شوید و با محیط سامانه آشنا شوید. در صورتی که موفق به ورود به سامانه نشدید، تصویر شناسنامه جدید دانش آموز را به مدرسه محل تحصیل وی تحویل دهید، تا مدرسه، اطلاعات شناسنامه دانش آموز (سریال شناسنامه) را در سامانه ثبت نام دانش آموزان (سناد)، اصلاح نماید.

ارائه نظرات، پیشنهادات و انتقادات ارزشمند شما در هر بخش از فعالیت های سامانه فروش و توزیع مواد آموزشی به نشانی [info@irtextbook.com](mailto:info@irtextbook.com) و دورنگار ۰۹۲۶۶۸۸۳، ما را در شناسایی نقاط قوت و ضعف خدمات و محصولات یاری خواهد رساند.