

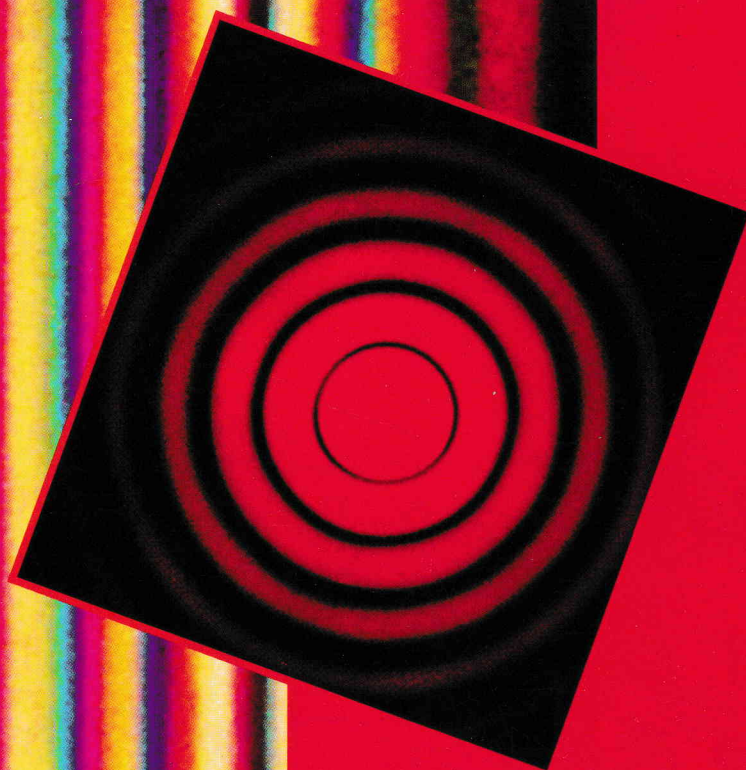
کتابهای

موضوعی

فیزیک

# امواج مکانیکی و الکترومغناطیسی

اسفندیار معتمدی



انتشارات فاطمی

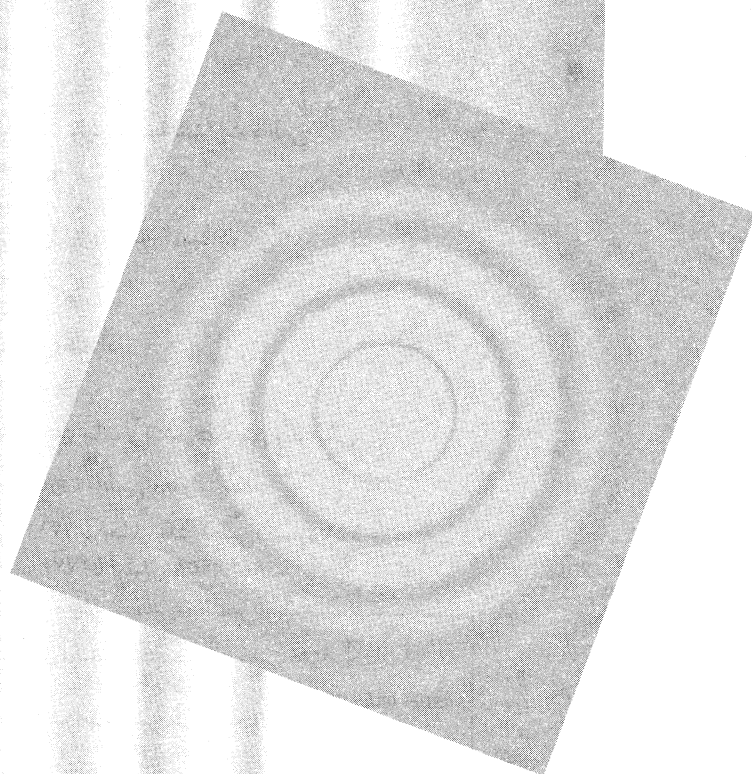
کتابهای

موضوعی

فیزیک

# امواج مکانیکی و الکترومغناطیسی

اسفندیار معتمدی



## کتابهای موضوعی فیزیک امواج مکانیکی و الکترومغناطیسی

مؤلف: اسفندیار معتمدی

ویراستار: ناصر مقبلی

ناشر: مؤسسه انتشارات فاطمی

چاپ اول، ۱۳۷۸

شابک ۹۶۴-۳۱۸-۲۵۵-X

ISBN 964-318-255-X

تیراژ: ۵۰۰۰ نسخه

آماده‌سازی پیش از چاپ: واحد تولید مؤسسه انتشارات فاطمی

- مدیر تولید: فرید مصلحی

- طراح جلد: نینا وحیدی

- حروفچینی و صفحه‌بندی (T<sub>E</sub>X-پاک): آناهیتا کاویانی

- صفحه‌آرا: حسین ابراهیمی

- نمونه‌خوان: فاطمه ثقفی

- نظارت بر چاپ: علیرضا رضائزاد

لیتوگرافی: نقش سبز

چاپ و صحافی: چاپخانه سازمان چاپ و انتشارات علمی و فرهنگی

کلیه حقوق برای مؤسسه انتشارات فاطمی محفوظ است.

تهران، کدپستی ۱۴۱۴۶ - خیابان دکتر فاطمی، شماره ۱۵۹

تلفن: ۶۵۱۴۲۲ - ۶۵۴۷۷۰ - ۸۸۶۶۲۵۸



معتمدی، اسفندیار، ۱۳۷۸ -  
امواج مکانیکی و الکترومغناطیسی / اسفندیار معتمدی. - تهران: فاطمی، ۱۳۷۸.  
هشت، ۱۳۲ ص: مصور، جدول. - (کتابهای موضوعی فیزیک)  
ISBN 964-318-255-X  
فهرستویسی بر اساس اطلاعات فیبا (فهرستویسی پیش از انتشار).  
کتابنامه: ص: [۱۳۰].  
۱. امواج الکترومغناطیسی. الف. عنوان.

۵۳۹/۲

Q۴۶۶۱/۶ الف ۸  
کتابخانه ملی ایران

۷۷-۱۵۵۳۰ م

## فهرست

۳۲	خلاصه فصل	۵	سخن ناشر
۳۲	هدفهای آموزشی	۵	پیشگفتار مؤلف
۳۳	خود را بیازمایید		
۳۳	پرسشها		
۳۳	پرسشهای چهارگزینه‌ای		
۳۶	تمرینها		
	<b>فصل ۳ امواج صوتی</b>		<b>فصل ۱ حرکت نوسانی</b>
۳۸	۱-۳ تولید امواج صوتی	۱	۱-۱ مقدمه
۳۹	۲-۳ شدت صوت	۱	۲-۱ حرکت تناوبی
۴۰	۳-۳ تراز شدت صوت	۳	۳-۱ حرکت هماهنگ ساده
۴۲	۴-۳ اثر دوپلر	۶	۴-۱ محاسبه دوره در حرکت نوسانی
۴۴	خلاصه فصل	۸	۵-۱ انرژی مکانیکی نوسانگر ساده
۴۴	هدفهای آموزشی	۱۰	۶-۱ تشدید
۴۵	خود را بیازمایید	۱۱	۷-۱ میدانهای الکتریکی و مغناطیسی نوسانی
۴۵	پرسشها	۱۲	خلاصه فصل
۴۵	پرسشهای چهارگزینه‌ای	۱۳	هدفهای آموزشی
۴۸	تمرینها	۱۳	خود را بیازمایید
	<b>فصل ۴ امواج الکترومغناطیسی</b>	۱۳	پرسشها
۵۰	۱-۴ مقدمه	۱۴	پرسشهای چهارگزینه‌ای
۵۱	۲-۴ قانون کولن	۱۶	تمرینها
۵۳	۳-۴ قانون گاوس		
۵۵	۴-۴ قانون فارادی		<b>فصل ۲ امواج مکانیکی</b>
	۵-۴ پیدایش میدان الکتریکی بر اثر	۱۸	۱-۲ موج چیست؟
۵۵	تغییر میدان مغناطیسی	۱۹	۲-۲ انواع موج
۵۶	۶-۴ جریان جابه‌جایی	۲۱	۳-۲ مشخصات امواج
		۲۲	۴-۲ تابع موج
		۲۵	۵-۲ برهم‌نهی امواج
		۲۷	۶-۲ تداخل امواج سینوسی
		۲۹	۷-۲ بازتاب موج



۸۶	خلاصه فصل
۸۷	هدفهای آموزشی
۸۸	خود را بیازماید
۸۸	پرسشها
۸۸	پرسشهای چهارگزینه‌ای
۹۱	تمرینها
	فصل ۶ نور کوانتومی - فیزیک جدید
۹۳	۱-۶ مقدمه
۹۴	۲-۶ اثر فوتوالکتریک
۹۵	۳-۶ نظریه انیشتین، فوتون
۹۶	۴-۶ طیف اتم هیدروژن
۱۰۰	۵-۶ مدل اتمی رادرفورد
۱۰۱	۶-۶ نظریه بور
۱۰۲	۷-۶ اندازه انرژی الکترون
۱۰۴	۸-۶ امواج ماده
۱۰۵	خلاصه فصل
۱۰۶	هدفهای آموزشی
۱۰۷	خود را بیازماید
۱۰۷	پرسشها
۱۰۷	پرسشهای چهارگزینه‌ای
۱۰۸	تمرینها
۱۱۱	خودآزمایی کلی
۱۱۱	پرسشهای چهارگزینه‌ای از شش فصل کتاب
۱۱۷	پرسشهای کلی
۱۱۸	تمرینهای کلی
۱۲۳	پاسخنامه پرسشهای چهارگزینه‌ای
۱۲۴	پاسخنامه پرسشهای چهارجوابی کلی
۱۲۵	فرهنگ اصطلاحات
۱۳۰	فهرست منابع
۱۳۱	نمایه

۵۷	۷-۴ معادلات ماکسول
۵۹	۸-۴ امواج هرتز
۶۱	۹-۴ انرژی امواج الکترومغناطیسی
۶۴	۱۰-۴ طیف امواج الکترومغناطیسی
۶۵	۱۱-۴ پرتوهای گاما
۶۵	۱۲-۴ پرتوهای ایکس
۶۶	۱۳-۴ پرتوهای فرابنفش
۶۶	۱۴-۴ پرتوهای نوری
۶۷	۱۵-۴ پرتوهای فروسرخ
۶۷	۱۶-۴ امواج رادیویی
	۱۷-۴ مقایسه امواج مکانیکی و الکترومغناطیسی
۶۸	خلاصه فصل
۶۸	هدفهای آموزشی
۶۹	خود را بیازماید
۶۹	پرسشها
۶۹	پرسشهای چهارگزینه‌ای
۷۱	تمرینها

# فصل ۵ نور موجی - تداخل، پراش و قطبش نور

۷۲	۱-۵ مقدمه
۷۳	۲-۵ اصل هویگنس
۷۴	۳-۵ تداخل نور
۷۷	۴-۵ پراش نور
۷۸	۵-۵ پراش فرنل و فرانوفر
۸۰	۶-۵ توری پراش
۸۱	۷-۵ قطبش نور
۸۲	۸-۵ قطبش به وسیله جذب انتخابی
۸۴	۹-۵ قطبش بر اثر پدیده دوشکستی
۸۴	۱۰-۵ قطبش به وسیله بازتابش
۸۶	۱۱-۵ کاربردهای نور قطبیده

به نام خدا

## سخن ناشر

سالها پیش مؤسسه انتشارات فاطمی به منظور ارتقاء سطح علمی علاقه‌مندان به‌ویژه دانش‌آموزان دبیرستانها اقدام به انتشار مجموعه کتابهایی با عنوان گنجینه دانش در زمینه مباحث فیزیک، شیمی، و ریاضی کرد که با استقبال فراوان علاقه‌مندان روبه‌رو شد. اگر چه این مؤسسه در خلال این سالها مجدّانه در ترجمه و نشر بسیاری از کتابهای مهم درسی آموزش علوم در کشورهای پیشرفته کوشیده است ولی همواره در صدد بازنگری و روزآمد کردن کتابهای تألیفی در انطباق با نظام جدید آموزش و پرورش بوده است. اکنون این تلاش به انتشار مجموعه‌ای از کتابهای تألیفی موضوعی در مباحث فیزیک، شیمی، ریاضی و زیست‌شناسی دبیرستانی و پیشدانشگاهی انجامیده است. منظور از موضوعی بودن این کتابها این است که مطالب هر کتاب شامل مبحث خاصی از یک شاخه علمی است.

تألیف این کتابها با همکاری مدرسان دانشگاهی و دبیرستانی و براساس نیاز و اظهار نظرهای دانش‌آموزان دبیرستانها به عمل آمده است. مؤلفان علاوه بر شرح مبسوط مطالب به بالا بردن سطح فهم علمی دانش‌آموزان و آماده‌سازی آنان برای توفیق در امتحانات و آزمونهای ورودی دانشگاهها و داوطلبان المپیادها نیز توجه داشته‌اند. به علاوه مطالب این کتابها در مواردی فراتر از سطح کتابهای درسی است و تمرینها و پرسشهای آن حاوی نکات جدیدی است که می‌تواند برای دبیران ارجمند نیز قابل استفاده باشد.

سپاسگزاری

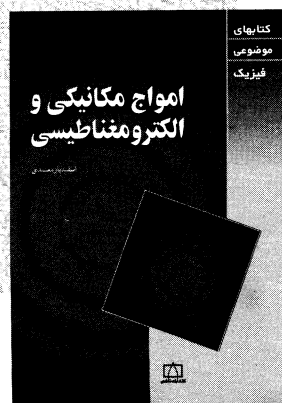
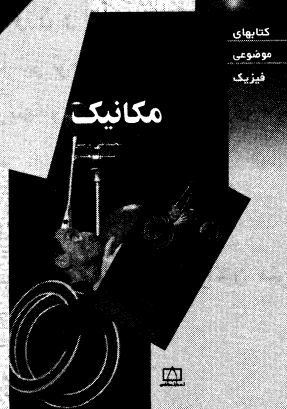
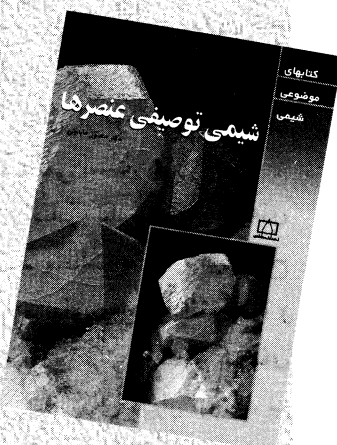
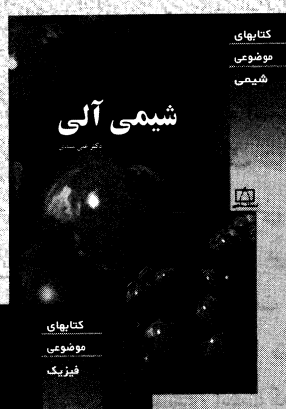
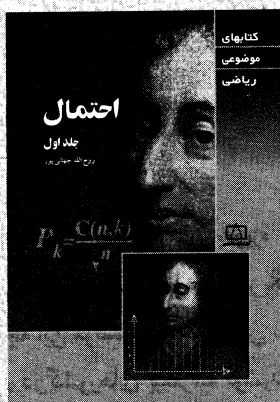
از سرکار خانم دکتر منیژه رهبر که با خواندن متن این کتاب نظرهای اصلاحی زیادی را یادآور شدند صمیمانه قدردانی می‌شود.

# کتابهای موضوعی انتشارات فاطمی

در زمینه های

## ریاضی، فیزیک، شیمی و زیست شناسی

منتشر می شود.



## پیشگفتار مؤلف

موضوع امواج مکانیکی و الکترومغناطیسی از مباحث مهم علم فیزیک است. شناخت موج، انواع و چگونگی تولید و انتشار آن ما را با بسیاری از پدیده‌های جهان آشنا می‌کند. صوت و نور دو پدیده مهمی هستند که ما را با محیط اطراف خود پیوند می‌دهند و ماهیت هر دو موج‌اند. صوت موجی است مکانیکی و نور موجی است الکترومغناطیسی و این هر دو بخشهای کوچکی از حرکت‌های نوسانی و امواج حاصل از آنها هستند که همواره وسیله‌ای برای ارتباط آدمی و جهان پیرامون او بوده است.

این کتاب شامل مباحثی است برای شناختن مفاهیم حرکت نوسانی، امواج مکانیکی، امواج الکترومغناطیسی و نیز بحثی است درباره نور کوانتومی و فیزیک جدید که در کتابهای فیزیک دبیرستان و پیشدانشگاهی بررسی می‌شود. مطالب کتاب مطابق با برنامه فیزیک رشته‌های علوم تجربی و ریاضی در شش فصل به شرح زیر تنظیم شده است.

فصل اول: حرکت‌های نوسانی که اساس پیدایش هر نوع موج است.

فصل دوم: موج، انواع و چگونگی تولید و انتشار آن.

فصل سوم: صوت و مشخصات آن به عنوان یکی از پدیده‌های موج مکانیکی.

فصل چهارم: امواج الکترومغناطیسی که طیفی بسیار گسترده دارند و اساس کار ارتباطات در جهان امروز است.

فصل پنجم: نور و پدیده‌های نوری که براساس نظریه موجی نور قابل توجیه است.

فصل ششم: نور کوانتومی و فیزیک جدید.

هر فصل کتاب شامل چند بخش است. به دنبال هر بخش یک پرسش و یک مثال آمده است. هدفهای آموزشی به دنبال خلاصه فصل است. خود را بیازمایید موضوع پایانی هر فصل و شامل پرسشهای تشریحی، پرسشهای چهارگزینه‌ای و تمرینهایی است که مشابه آنها در امتحانات آخر نیم سال یا کنکورهای سراسری دانشگاهها مطرح می‌شود. این پرسشها دانش آموزان را هم در درک مطالب درسی و هم در کسب مهارت برای حل مسئله و آمادگی برای آزمونهای دانشگاهی آماده می‌کند.

اسفندیار معتمدی







## حرکت نوسانی

### ۱-۱ مقدمه

ما به کمک صوت و نور با دنیای اطراف خود در ارتباط هستیم. صوت و نور انرژی‌هایی هستند که به ترتیب بر گوش و چشم ما اثر می‌کنند و سبب شنیدن و دیدن می‌شوند. اما در پدیده‌های انتقال انرژی صوتی به گوش، و انرژی نوری به چشم، مشخص شده است که از چشمه صوت یا چشمه نور ماده‌ای به اطراف منتقل نمی‌شود تا به گوش و چشم ما برسد، بلکه انرژی این چشمه‌ها بدون انتقال ماده انتشار می‌یابد. این نوع انتقال انرژی را موج می‌نامند.

پدیده‌های موجی در جهان فراوان‌اند. گذشته از صوت و نور، زمین‌لرزه، آشفته‌گی‌های ایجاد شده بر آب دریا و اقیانوس و پرتوهای گاما، ایکس، رادیویی و تلویزیونی موج هستند. اما موج چیست؟ چگونه تولید می‌شود؟ چگونه منتشر می‌شود؟ چه نوع موج‌هایی وجود دارد؟

امروزه شناختن مفهوم موج و ویژگی‌ها و اثرهای آن برای هر دانش‌پژوهی لازم است، و چون اساس پیدایش و انتشار هر موجی به حرکت تناوبی و نوسانی مربوط است، به معرفی این حرکتهای می‌پردازیم.

### ۱-۲ حرکت تناوبی

هر حرکتی که در بازه‌های (فاصله‌های) زمانی منظم تکرار شود، حرکت تناوبی<sup>۱</sup> نام دارد. حرکت تکراری آونگ ساعت، وزنه‌ای که به انتهای فنری آویزان است، شاخه‌های دیابازن مرتعش و سیم ویولن نمونه‌هایی از حرکتهای تناوبی‌اند. حرکت زمین به دور محورش، حرکت ماه به دور زمین و حرکت زمین به دور خورشید، که تکرار می‌شوند نیز حرکتهای تناوبی‌اند. به حرکتی که روی یک مسیر معینی به پیش و پس صورت گیرد، نظیر حرکت آونگ یا سیم ویولن، حرکت ارتعاشی<sup>۲</sup> یا نوسانی<sup>۳</sup> نیز گفته می‌شود. به این ترتیب هر حرکت نوسانی، تناوبی نیز هست ولی هر حرکت تناوبی الزاماً نوسانی نیست.

1- periodic motion    2- vibratory motion    3- oscillatory motion

مدت زمانی که یک چرخه کامل به انجام می‌رسد دوره<sup>۱</sup> (یا دوره تناوب) نامیده می‌شود. دوره را با  $T$  نشان می‌دهند. تعداد چرخه‌های کامل در واحد زمان را بسامد یا فرکانس می‌نامند و با حرف یونانی  $\nu$  نشان می‌دهند. رابطه بسامد و دوره با استفاده از یک تناسب به صورت زیر به دست می‌آید

$$\begin{array}{ccc} \text{بسامد } \nu & \text{۱} & \text{واحد زمان} \\ x & 1 & \end{array} \quad x = T = \frac{1}{\nu}$$

یا

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

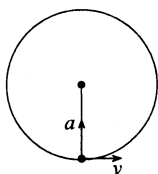
در دستگاه بین‌المللی یکاها (SI)، یکای دوره، ثانیه (s) و یکای بسامد، هرتز (Hz) است. زاویه‌ای که در یک ثانیه توسط متحرک پیموده می‌شود، بسامد زاویه‌ای،  $\omega$ ، نام دارد و یکای آن رادیان بر ثانیه است.

□ پرسش ۱. یک آونگ ساده در هر دقیقه ۴۵ چرخه کامل طی می‌کند. دوره و بسامد آن چقدر است؟

$$\begin{array}{ll} \text{الف) } \frac{4}{3} \text{ s}, 45 \text{ Hz} & \text{ب) } 0.75 \text{ s}, \frac{4}{3} \text{ Hz} \\ \text{پ) } \frac{1}{4} \text{ s}, \frac{1}{4} \text{ Hz} & \text{ت) } \frac{1}{3} \text{ s}, \frac{1}{3} \text{ Hz} \end{array}$$

مثال ۱. گلوله کوچکی را به انتهای ریسمانی به طول  $a$  می‌بندیم و آن را مطابق شکل ۱-۱ حول انتهای دیگر ریسمان با سرعت ثابت می‌گردانیم. اگر گلوله در هر ثانیه ۵ دور کامل بگردد، مطلوب است

الف) نوع حرکت و دوره آن ( $T$ ).  
 ب) بسامد زاویه‌ای متحرک ( $\omega$ ).  
 پ) زاویه پیموده شده توسط گلوله در مدت  $0.4$  ثانیه ( $\theta$ ).



شکل ۱-۱ حرکت دایره‌ای  
یکنواخت.

حل: الف) نوع حرکت تناوبی است. بسامد آن ۵ هرتز و دوره آن برابر است با

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{5} = 0.2 \text{ s}$$

ب) چون هر دور گردش برابر  $2\pi$  رادیان است، برای  $\nu$  بار گردش، این زاویه برابر است با

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi\nu = 2\pi \times \frac{1}{T} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \times 5 \\ &= 10\pi \text{ رادیان بر ثانیه} \end{aligned}$$

ب) در این حرکت یکنواخت دایره‌ای، زاویه پیموده شده برابر است با

$$\theta = \omega t = \frac{2\pi}{T}t = 2\pi \nu t = 2\pi \times 5 \times 0,4$$

$$= 4\pi \text{ رادیان}$$



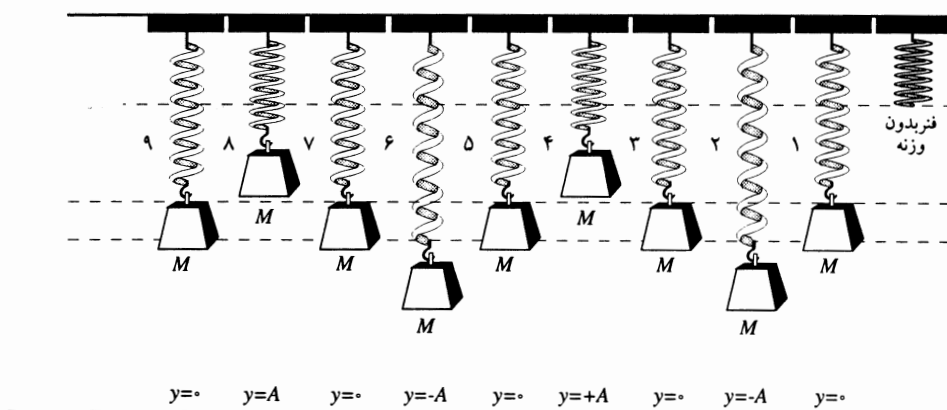
### ۳-۱ حرکت هماهنگ ساده<sup>۱</sup>

فتری را به نقطه ثابتی می‌آویزیم و وزنه‌ای به جرم  $M$  را به آن متصل می‌کنیم (شکل ۲-۱). اگر وزنه را در امتداد قائم کمی، به اندازه  $y = -A$ ، پایین بکشیم و رها کنیم، مشاهده می‌کنیم که وزنه مرتب به بالا و پایین حرکت می‌کند. حرکت این وزنه متصل به فنر نمونه‌ای از حرکت نوسانی است که دارای ویژگیهای زیر است:

۱. مسیر متحرک یک پاره‌خط است و نوسانگر از ابتدای پاره‌خط به انتهای آن می‌رود و همین راه را برمی‌گردد. موضع تعادل متحرک، در وسط این پاره‌خط است.
۲. مدت زمان یک رفت و برگشت کامل، یا دوره نوسان، برای همه نوسانها برابر است.
۳. نیرویی که بر وزنه اثر می‌کند و سبب ادامه حرکت آن می‌شود،  $F$ ، بنابر قانون هوک<sup>۲</sup> از رابطه زیر به دست می‌آید

$$F = -ky \quad (2-1)$$

در این رابطه  $y$  جابه‌جایی وزنه نسبت به وضع تعادل و  $k$  ثابت فنر است. علامت منها نشان می‌دهد که جهت نیروی  $F$  همواره در خلاف جهت جابه‌جایی  $y$  است.



شکل ۲-۱ حرکت وزنه متصل به فنر حرکتی است نوسانی.

۴. معادله حرکت، که رابطه جابه جایی  $y$  و زمان  $t$  است، تابعی سینوسی از زمان و به شکل زیر است

$$y = A \sin \theta$$

$$= A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \theta_0\right) \quad (3-1)$$

$A$  که بیشترین جابه جایی تا وضع تعادل است دامنه حرکت،  $\theta = \frac{2\pi}{T}t + \theta_0$  فاز حرکت،  $\theta_0$  فاز اولیه و  $\frac{2\pi}{T}$  را که با  $\omega$  نشان می دهند بسامد زاویه ای می نامند. حدود تغییرات جابه جایی از  $-A$  تا  $+A$  و طول پاره خط مسیر  $2A$  است. این نوع حرکت را که در واقع حالت خاص بسیار مهمی از حرکت تناوبی و در واقع ساده ترین نوع حرکت نوسانی است حرکت هماهنگ ساده می نامند. این نوع حرکت را می توان با یک تابع سینوسی یا کسینوسی ساده نمایش داد. نتایج این حرکت با استفاده از روشهای ریاضی که به تحلیل فوریه<sup>۱</sup> معروف است به تمام حرکت های تناوبی قابل تعمیم است.

□ پرسش ۲. معادله مکان - زمان نوسانگری در SI به شکل  $y = 0.02 \sin(20\pi t + \frac{\pi}{6})$  است. طول پاره خط مسیر و بسامد نوسانگر چقدر است؟

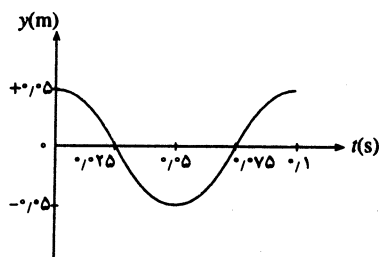
الف) صفر،  $10 \text{ Hz}$       ب)  $4 \text{ cm}$ ،  $20 \text{ Hz}$       پ)  $4 \text{ cm}$ ،  $10 \text{ Hz}$       ت)  $8 \text{ cm}$ ،  $20 \text{ Hz}$

مثال ۲. معادله حرکت هماهنگ ساده متحرکی در SI به شکل  $y = 0.05 \sin(20\pi t + \frac{\pi}{4})$  است. نمودار تغییرات آن را رسم کنید.

حل: دامنه این متحرک  $0.05$  متر و فاز اولیه آن  $\frac{\pi}{4}$  است و دوره اش از رابطه زیر به دست می آید

$$20\pi t = \frac{2\pi}{T}t \Rightarrow T = 0.1 \text{ s}$$

اکنون با روش نقطه یابی تغییرات  $y$  را بر حسب  $t$  رسم می کنیم (شکل ۳-۱).



شکل ۳-۱



در حرکت هماهنگ سرعت متحرک به طور دائم تغییر می‌کند. می‌دانیم که سرعت در هر لحظه مشتق مکان نسبت به زمان است. بنابراین معادله سرعت چنین است

$$y = A \sin(\omega t + \theta_0)$$

$$v = \frac{dy}{dt} = A\omega \cos(\omega t + \theta_0)$$

و چون

$$\cos(\omega t + \theta_0) = \pm \sqrt{1 - \sin^2(\omega t + \theta_0)}$$

پس داریم

$$v = \pm A\omega \sqrt{1 - \left(\frac{y}{A}\right)^2}$$

$$= \pm \omega \sqrt{A^2 - y^2} \quad (4-1)$$

رابطه ۴-۱ نشان می‌دهد که سرعت به مکان جسم بستگی دارد. در مکان  $y = 0$  سرعت حداکثر و برابر  $A\omega$  و در مکان  $y = \pm A$  سرعت متحرک صفر است.

در حرکت هماهنگ شتاب متحرک به طور دائم تغییر می‌کند. می‌دانیم که شتاب در هر لحظه مشتق سرعت نسبت به زمان است. بنابراین معادله شتاب چنین است

$$y = A \sin(\omega t + \theta_0)$$

$$v = A\omega \cos(\omega t + \theta_0)$$

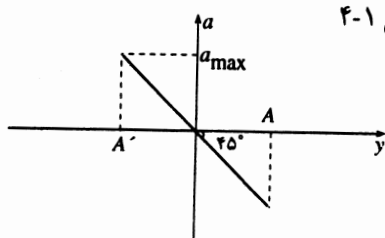
$$a = -A\omega^2 \sin(\omega t + \theta_0) \quad (5-1)$$

$$= -\omega^2 y$$

در هر حرکت هماهنگ شتاب  $a$  متناسب با مکان و دارای علامت مخالف با آن است.

❑ پرسش ۳. نمودار شتاب - مکان نوسانگری مطابق شکل ۴-۱

است. بسامد زاویه‌ای این نوسانگر چند رادیان بر ثانیه است؟



شکل ۴-۱

الف)  $\pi$

ب) ۱

پ)  $\frac{\sqrt{2}}{4}$

ت) داده‌ها کافی نیست

مثال ۳. در هر حرکت نوسانی نیرویی که بر جسم متحرک به جرم  $m$  اثر می‌کند با فاصله جسم از وضع تعادل آن،  $y$ ، متناسب و با علامت منفی است،  $F = -ky$ . با استفاده از این رابطه، معادله مکان-زمان را در حرکت نوسانی به دست آورید.



حل: بنابر قانون دوم نیوتون وقتی نیروی  $F$  بر جرم  $m$  اثر کند، در آن شتاب  $a$  به وجود می‌آید و رابطه  $F = ma$  برقرار است. داریم

$$\begin{aligned} F &= -ky \\ \Rightarrow ma &= -ky \\ F &= ma \end{aligned} \quad (۶-۱)$$

از سوی دیگر می‌دانیم که شتاب مشتق دوم مکان نسبت به زمان است، پس

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dy}{dt} \right) = \frac{d^2 y}{dt^2}$$

بنابر این رابطه ۶-۱ را به صورت زیر می‌نویسیم

$$ma = -ky \Rightarrow m \frac{d^2 y}{dt^2} = -ky$$

یا

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{k}{m} y = 0 \quad (۷-۱)$$

معادله ۷-۱ معادله دیفرانسیل حرکت نوسانی است. در این معادله مشتق دوم تابع  $y$  با خود تابع  $y$  ولی با علامت منفی متناسب است. می‌دانیم که توابع  $\sin \omega t$  و  $\cos \omega t$  دارای چنین ویژگی هستند و جواب معادله ۷-۱ به صورت کلی زیر است

$$y = A \sin \left( \sqrt{\frac{k}{m}} t + \theta \right) \quad (۸-۱)$$

در این رابطه،  $\sqrt{\frac{k}{m}}$  همان  $\omega$  یعنی بسامد زاویه‌ای است و  $A$  دامنه حرکت و  $\theta$  فاز اولیه حرکت است. بنابر این معادله مکان - زمان در حرکت نوسانی به شکل کلی زیر است

$$y = A \sin(\omega t + \theta)$$



## ۴-۱ محاسبه دوره در حرکت نوسانی

با استفاده از رابطه شتاب در حرکت نوسانی، دوره نوسان از رابطه کلی زیر به دست می‌آید

$$a = -\omega^2 y$$

$$\omega = \sqrt{-\frac{a}{y}} = \frac{2\pi}{T}$$

$$T = 2\pi \sqrt{-\frac{y}{a}} \quad (۹-۱)$$

در این رابطه  $y$  مکان متحرک و  $a$  شتاب متحرک در آن مکان و در آن لحظه و  $T$  دوره نوسان است. در فتر با استفاده از رابطه ۶-۱ می‌توان نوشت

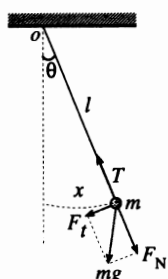
$$ma = -ky \Rightarrow \frac{-y}{a} = \frac{m}{k}$$

بنابراین دوره نوسان فنر برابر است با

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (۱۰-۱)$$

□ پرسش ۴. وزنه‌ای به جرم  $1\text{ kg}$  را که روی سطح افقی بی‌اصطکاک قرار دارد به انتهای فنر سبکی با ثابت  $400 \frac{\text{N}}{\text{m}}$  می‌بندیم. سر دیگر فنر ثابت است. هرگاه وزنه را از وضع تعادل بکشیم و رها کنیم، دوره نوسانهای فنر چند ثانیه می‌شود؟

الف)  $0,314$  (ب)  $3,14$  (پ)  $40\pi$  (ت)  $4\pi$



مثال ۴. وزنه کوچکی به جرم  $m$  را به انتهای نخ سبکی به طول  $l$  می‌بندیم و انتهای دیگر نخ را به نقطه ثابتی وصل می‌کنیم و یک آونگ ساده می‌سازیم (شکل ۵-۱). وزنه را از حالت تعادل دور و رها می‌کنیم. ثابت کنید اگر زاویه انحراف این آونگ از وضع تعادل کوچک باشد، حرکت وزنه نوسانی است. در این صورت دوره آونگ را حساب کنید.

حل: نیروهایی که بر وزنه  $m$  اثر می‌کنند عبارت‌اند از نیروی وزن،  $mg$  و نیروی کشش نخ،  $T$ . هرگاه  $mg$  را در امتداد نخ و عمود بر آن تجزیه کنیم، نیروهای  $F_t = mg \sin \theta$  و  $F_N = mg \cos \theta$  به دست می‌آیند. نیروی  $F_N$  با کشش نخ خنثا می‌شود ولی نیروی  $F_t = mg \sin \theta$  نیرویی است که همواره جسم را به وضع تعادل برمی‌گرداند و اگر زاویه  $\theta$  کوچک باشد ( $\theta < 60^\circ$ ) می‌توان نوشت

$$F_t = mg \sin \theta = mg\theta = mg \frac{x}{l}$$

$x$  مکان جسم نسبت به وضع تعادل است و با توجه به آنکه  $x$  و  $F_t$  دارای علامتهای مختلف‌اند، داریم

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

به‌طوری که ملاحظه می‌شود نیرو با مکان وزنه متناسب ولی با علامت مخالف است. بنابراین حرکت وزنه نوسانی است و داریم

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

پس

$$-\frac{x}{a} = \frac{l}{g}$$

دوره آونگ برابر است با

$$\begin{aligned} T &= 2\pi\sqrt{-\frac{x}{a}} \\ &= 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \end{aligned} \quad (۱۱-۱)$$

## ۵-۱ انرژی مکانیکی نوسانگر ساده

گلوله یک آونگ ساده، وزنه‌ای که به فنری آویخته شده و به طور کلی هر جرم یا ذره در حال نوسان، دارای انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل است. این انرژیها به طور دائم به یکدیگر تبدیل می‌شوند و جمع اینها، انرژی مکانیکی جسم است. وقتی فقط نیروی پاستار<sup>۱</sup> بر جسم اثر کند، انرژی مکانیکی پایسته و برابر است با

$$E = K + U$$

انرژی جنبشی نوسانگر

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m \left[ A\omega \cos(\omega t + \theta_0) \right]^2 \\ &= \frac{1}{2}mA^2\omega^2 \cos^2(\omega t + \theta_0) \end{aligned} \quad (12-1)$$

انرژی پتانسیل نوسانگر

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2}ky^2 = \frac{1}{2}kA^2 \sin^2(\omega t + \theta_0) \\ k &= m\omega^2 \implies U = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \theta_0) \end{aligned} \quad (13-1)$$

انرژی مکانیکی جسم جمع انرژیهای جنبشی و پتانسیل و برابر است با

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 = 2\pi^2 mA^2 \nu^2 \quad (14-1)$$

ملاحظه می‌شود که انرژی مکانیکی نوسانگر به کمیت‌های زیر بستگی دارد

(الف) با مجذور دامنه نوسان نسبت مستقیم دارد،  $E \propto A^2$ .

(ب) با مجذور بسامد نسبت مستقیم دارد،  $E \propto \nu^2$ .

(پ) با جرم نوسانگر نسبت مستقیم دارد،  $E \propto m$ .

□ پرسش ۵. انرژی پتانسیل نوسانگری در لحظه  $t$ ، یک چهارم انرژی مکانیکی آن است. در این

لحظه نسبت  $\frac{U}{K}$  چقدر است؟

الف)  $\frac{3}{4}$       ب)  $\frac{4}{3}$       پ)  $\frac{1}{3}$       ت) ۳

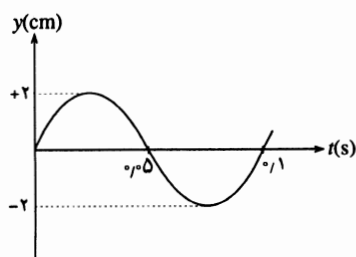
مثال ۵. جسمی به جرم ۵ گرم با بسامد ۱۰ Hz و دامنه ۲ سانتیمتر نوسان می‌کند. اگر در مبدأ نوسان، نوسانگر در وضع تعادل باشد، مطلوب است

الف) معادله حرکت و نمودار مکان - زمان نوسانگر.

ب) معادلات انرژی جنبشی و پتانسیل این نوسانگر و نمودار انرژی - زمان آن.

۱- نیروی پاستار نیرویی است که کار آن در جابه‌جایی میان دو نقطه، به مسیر پیموده شده بستگی ندارد و تنها به نقطه‌های ابتدا و انتهای مسیر وابسته است.

(ب) رابطه انرژی - مکان نوسانگر و نمودار آن.



حل: الف) معادله کلی هر حرکت نوسانی را می توان به صورت

$y = A \sin(\omega t + \theta_0)$  نوشت. داریم

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}, A = 2\text{cm} = 2 \times 10^{-2}\text{m}$$

چون در لحظه  $t = 0$  مقدار  $y$  مساوی صفر است پس

$\theta_0 = 0$  و در نتیجه

شکل ۶-۱

$$y = 2 \times 10^{-2} \sin 2\pi t$$

نمودار مکان - زمان نوسانگر در شکل ۶-۱ نشان داده شده است.

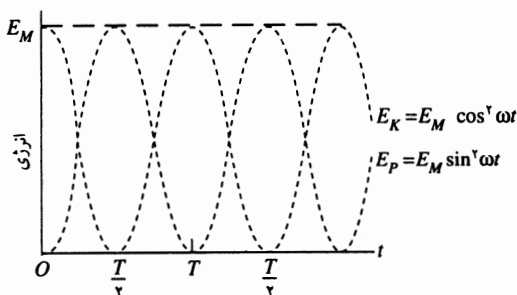
(ب) برای انرژی جنبشی و پتانسیل داریم

$$K = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2 \omega t = \frac{1}{2} \times 0.1 \times 2^2 \times 5 \times 10^{-2} \times 2\pi^2 \cos^2 2\pi t$$

$$= 0.1\pi^2 \cos^2 2\pi t$$

$$U = \frac{1}{2} m A^2 \omega^2 \sin^2 \omega t = 0.1\pi^2 \sin^2 2\pi t$$

در هر دوره دوبار انرژی جنبشی و دوبار انرژی پتانسیل حداکثر و صفر خواهند شد (شکل ۷-۱).



شکل ۷-۱

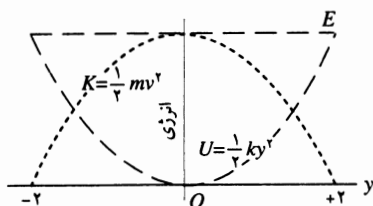
$$U = \frac{1}{2} k y^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 y^2 \quad (\text{ب})$$

$$= \frac{1}{2} \times 0.1 \times 5 \times 2\pi^2 y^2$$

$$= 1.57 y^2$$

$$K = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 (A^2 - y^2)$$

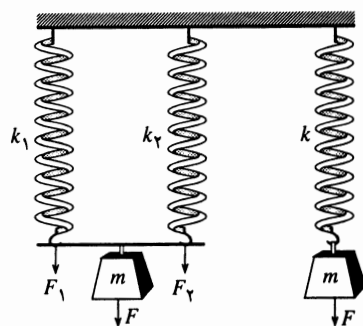
$$= 1.57 (0.04 - y^2)$$



شکل ۸-۱

نمودار تغییرات انرژی و جابه جایی مطابق شکل ۸-۱ است.

مثال ۶. جرم  $m$  را به دو فنر به ثابتهای  $k_1$  و  $k_2$  مطابق شکل ۹-۱ می‌بندیم، و آن را کمی از وضع تعادل دور و رها می‌کنیم به طوری که در امتداد قائم نوسان کند. دوره نوسان جرم  $m$  را در دو حالت حساب کنید:



شکل ۹-۱

الف) وقتی دو فنر موازی باشند.

ب) وقتی دو فنر به طور متوالی به هم بسته شوند.

حل: الف) اگر دو فنر موازی بسته شوند، نیروی  $F$  ناشی از وزن بین دو فنر تقسیم می‌شود، به طوری که می‌توان نوشت

$$F = F_1 + F_2$$

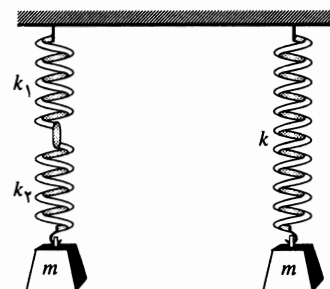
طبق قانون هوک داریم

$$k = k_1 + k_2 \quad \text{و} \quad ky = k_1 y + k_2 y$$

دوره نوسان برابر است با

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k_1 + k_2}}$$

ب) اگر دو فنر به طور متوالی مطابق شکل ۱۰-۱ به یکدیگر بسته شوند، نیروی مؤثر بر آنها برابر و افزایش طول مجموعه مساوی افزایش طول فنرهاست. می‌توان نوشت



شکل ۱۰-۱

$$y = y_1 + y_2$$

$$\frac{F}{k} = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2} \Rightarrow \frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$$

دوره نوسان برابر است با

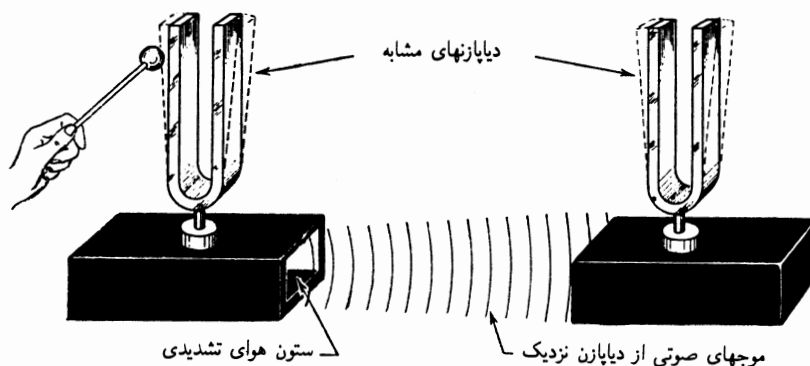
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{m\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right)}$$

در نتیجه هنگامی که فنرها موازی بسته شوند ثابت آنها با هم جمع می‌شود و وقتی متوالی باشند ثابت فنر مجموع از کوچکترین ثابت فنر، کمتر خواهد بود.



## ۱-۶ تشدید

هر آونگ با طول مشخص دوره معینی دارد ( $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ ) و هر فنر با سختی و جرم معین، دارای دوره مشخصی است ( $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ ). به طور کلی هر جسمی که بتواند نوسان کند، بسامد معینی



شکل ۱۱-۱ پدیده تشدید میان دو دیاپازن با بسامد یکسان.

دارد. این بسامد معین را، بسامد طبیعی آن نوسانگر می‌نامند. مثلاً هرگاه شیشه پنجره به لرزش درآید، همواره با بسامد طبیعی خود ارتعاش می‌کند، یا اگر به سیم ویولنی ضربه بزنیم همیشه آن سیم با بسامد معینی به صدا درمی‌آید. تخته شیرجه، پل معلق، میز و صندلی هر یک با بسامد طبیعی خود ارتعاش می‌کنند.

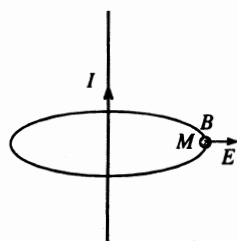
هرگاه دو دیاپازن را که بسامد طبیعی یکسان دارند در کنار یکدیگر قرار دهیم و با ضربه‌ای یکی از آن دو را به نوسان درآوریم، مشاهده می‌کنیم که دیگری نیز به نوسان در می‌آید. این پدیده را تشدید (یا بازآوایی) می‌نامند (شکل ۱-۱۱). علت به ارتعاش درآمدن دیاپازن دیگر آن است که وقتی به یک دیاپازن ضربه می‌زنیم، هوای اطراف آن با همان دوره به نوسان درمی‌آید و هر بار این هوای مرتعش به دیاپازن دوم ضربه‌ای می‌زند، آن را به ارتعاش درمی‌آورد. ابتدا دامنه نوسان بسیار کم است و به تدریج دامنه آن افزایش می‌یابد. پدیده تشدید وقتی به وجود می‌آید که ضربه‌ها با آهنگی منظم و در لحظه‌های معین بر جسم نوسانگری با همان بسامد برخورد کنند.

پدیده تشدید را در موارد بسیار می‌توان مشاهده کرد. اگر گویان را به دهانه لوله یا لیوانی نزدیک کنید، صدایی از درون آن می‌شنوید. پدایش این صدا مربوط به ارتعاشهای صوتی است که هوای درون لوله را به ارتعاش درآورده است. نظر به اینکه انواع بسامدهای صوتی در اطراف لوله موجود است هوای درون هر لوله می‌تواند با بسامد طبیعی خود به ارتعاش درآید و صدا تولید کند. اگر در پیانویی را باز کنیم و در برابر آن ساز دیگری را به صدا در آوریم، سیمهای پیانو بر اثر پدیده تشدید به ارتعاش درمی‌آیند و صدا تولید می‌کنند. پدیده تشدید در صنعت و پزشکی کاربردهای فراوانی دارد.

## ۷-۱ میدانهای الکتریکی و مغناطیسی نوسانی

خاصیتی که در فضای اطراف هر بار الکتریکی ساکن موجود است میدان الکتریکی نامیده می‌شود. این میدان را با  $E$  نشان می‌دهند. چنانچه بار الکتریکی جابه‌جا شود، ضمن جابه‌جایی، علاوه بر میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی  $B$  نیز به وجود می‌آید. بنابراین در نقطه مشخصی مانند  $M$ ، اطراف هر سیم

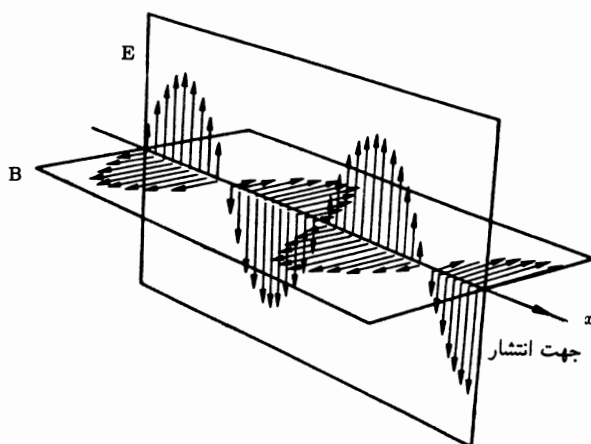




شکل ۱۲-۱ میدان الکتریکی  $E$  و مغناطیسی  $B$  حاصل از جریان  $I$  در نقطه  $M$  بر یکدیگر عمودند.

حامل جریان الکتریکی میدانهای  $E$  و  $B$  خواهیم داشت (شکل ۱۲-۱). هرگاه جریان الکتریکی ثابت باشد میدانهای  $E$  و  $B$  ثابت اند، ولی اگر جریان، متناوب و به معادله  $I = I_{\max} \sin \omega t$  باشد، در اطراف سیم میدان متناوب الکتریکی، به معادله  $E = E_{\max} \sin(\omega t + \theta_1)$  و میدان متناوب مغناطیسی به معادله  $B = B_{\max} \sin(\omega t + \theta_2)$  به دست می‌آید. این دو میدان الکتریکی و مغناطیسی متناوب بر هم عمودند و با هم موج الکترومغناطیسی را تشکیل می‌دهند (شکل ۱۳-۱).

لازم به یادآوری است که حرکت نوسانی ذره با میدان نوسانی تفاوت دارد. میدان یک مفهوم کاملاً ذهنی است ولی حرکت نوسانی ذره یک پدیده قابل مشاهده است. اگر ذره بارداری در میدان الکتریکی یا مغناطیسی نوسانی قرارگیرد بر آن نیروی نوسانی اثر می‌کند و در نتیجه این ذره باردار حرکت نوسانی خواهد داشت. بنابر این میدان الکتریکی و مغناطیسی نوسانی می‌توانند انرژی را با خود منتشر کنند و ذره‌های باردار را به نوسان درآورند.



شکل ۱۳-۱ میدانهای الکتریکی  $E$  و مغناطیسی  $B$ ، موج الکترومغناطیسی ایجاد می‌کنند که انرژی را در امتداد محور  $x$  منتشر می‌کند.

## خلاصه فصل

پدیده‌های موجی در طبیعت فراوانند. برای شناختن موج و چگونگی تولید و انتشار آن لازم است حرکت هماهنگ ساده را بشناسیم. حرکت نوسانی هماهنگ حرکتی است که نیروی خالص مؤثر در راستای حرکت، از نوع نیروی قانون هوک باشد، یعنی نیرو با جابه‌جایی متناسب و با علامت منفی باشد. مدت زمان یک نوسان کامل را دوره  $(T)$ ، و تعداد نوسانهای کامل در هر

ثانیه بسامد  $(\nu)$ ، و  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  را بسامد زاویه‌ای می‌نامند.

معادله مکان - زمان برای هر نوسانگر تابعی سینوسی از زمان است،  $y = A \sin(\omega t + \theta_0)$ .  
معادله سرعت تابعی از زمان به شکل  $v = A\omega \cos(\omega t + \theta_0)$  و تابعی از مکان جسم به شکل  $v = \pm \omega \sqrt{A^2 - y^2}$  و معادله شتاب به صورت  $a = -\omega^2 y$  است.

انرژی مکانیکی هر نوسانگر به صورت  $E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$  و انرژی پتانسیل نوسانگر به صورت  $U = E \sin^2(\omega t + \theta_0)$  و انرژی جنبشی آن  $K = E \cos^2(\omega t + \theta_0)$  است.

## اهداف آموزشی

اکنون که این فصل را به پایان رسانده‌اید باید بتوانید

- چند پدیده طبیعی را که ماهیت موجی دارند نام ببرید.
- حرکت دوره‌ای را تعریف کنید.
- حرکت هماهنگ ساده را تعریف کنید.
- اصطلاحات دوره، بسامد و دامنه را تعریف کنید.
- معادله حرکت هماهنگ ساده را بنویسید و تحلیل کنید.
- رابطه سرعت - مکان را در حرکت نوسانی بنویسید.
- رابطه دوره را به دست آورید؟
- دوره فنر را به دست آورید و روی آن بحث کنید.
- انرژی یک ذره در حال نوسان را حساب کنید.
- تبدیل انرژی جنبشی به پتانسیل و برعکس آن را توضیح دهید.
- پدیده تشدید را شرح دهید.
- شرط پیدایش تشدید را بیان کنید.

## خود را پیاورمایید

### پرسشها

۱. چند نمونه از حرکت تناوبی را نام ببرید و حدود دوره هریک را بنویسید.
۲. جسمی با دامنه  $A$  نوسان می‌کند. جابه‌جایی این جسم و مسافت طی شده در یک دوره چقدر است؟
۳. بسامد یک نوسانگر  $10 \text{ Hz}$ ، دامنه آن  $2 \text{ cm}$  و فاز اولیه آن  $\frac{\pi}{4}$  است. نمودار مکان - زمان و سرعت -



- زمان این نوسانگر را روی یک دستگاه مختصات رسم و آنها را با هم مقایسه کنید.
۴. آونگ ساده‌ای مطابق شکل ۱۴-۱ نوسان می‌کند. تغییرات کمیت‌های زیر بین سه نقطه A و B و C چگونه است؟ توضیح دهید.
- مکان، سرعت، شتاب، نیرو، انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل.
۵. مشخصه‌های حرکت هماهنگ ساده را شرح دهید.

شکل ۱۴-۱

### پرسش‌های چهارگزینه‌ای

۱. معادله حرکت نوسانگری به شکل  $x = 0.02 \sin \pi t$  است. سرعت متوسط این نوسانگر در ثانیه اول چقدر است؟

الف) صفر (ب) ۰/۰۲ (پ) ۰/۰۱ (ت) ۰/۰۵

۲. دامنه نوسان نوسانگری ۲ cm و بسامد آن ۲۰ Hz است. اگر در لحظه  $t = 0$ ، جابه‌جایی  $y = 1 \text{ cm}$  باشد، معادله حرکت آن کدام است؟

الف)  $y = 2 \sin \left( 40\pi t + \frac{\pi}{6} \right)$

ب)  $y = 2 \sin \left( 20\pi t + \frac{\pi}{6} \right)$

پ)  $y = 2 \sin \left( 40\pi t + \frac{\pi}{4} \right)$

ت)  $y = 2 \sin \left( 20\pi t + \frac{\pi}{4} \right)$

۳. معادله حرکت نوسانی نوسانگری در SI به صورت  $y = 4 \times 10^{-2} \sin \left( 25\pi t + \frac{\pi}{4} \right)$  است. سرعت نوسانگر در لحظه  $t = 0$  چند متر بر ثانیه است؟

الف) ۳/۱۴ (ب) ۱/۵۷ (پ) ۳۱۴ (ت) ۱۵۷

۴. دامنه یک نوسانگر هماهنگ ۱ cm و حداکثر شتاب حرکت آن  $\pi^2$  متر بر مجذور ثانیه است. دوره حرکت این نوسانگر چند ثانیه است؟

الف) ۰/۱ (ب) ۰/۲ (پ) ۰/۳ (ت) ۰/۴

۵. انرژی کل یک نوسانگر با کدام عامل زیر بستگی ندارد؟

الف) دامنه (ب) جرم نوسانگر

پ) بسامد (ت) زمان و وضعیت حرکت جسم

۶. معادله حرکت نوسانگری  $y = a \sin \omega t$  است. در چه لحظه‌ای از دوره اول، انرژی جنبشی نوسانگر صفر است؟

الف)  $t = 0$  (ب)  $\frac{T}{4}$  (پ)  $\frac{T}{2}$  (ت)  $T$

۷. معادله نوسانگری به شکل  $y = 0.01 \sin \left( 10\pi t + \frac{\pi}{4} \right)$  است. پس از چه مدت  $y = -0.01 \text{ m}$  است؟

الف) ۰/۲ s (ب) ۰/۱ s (پ) ۰/۱۲۵ s (ت) ۰/۲۵ s

۸. معادله نوسانگری به شکل  $y = A \cos \omega t$  است. بین  $t_1 = 0$ ,  $t_2 = \frac{T}{4}$  نوع حرکت چیست؟

(الف) تندشونده با شتاب ثابت. (ب) کندشونده با شتاب ثابت.

(ب) کندشونده با شتاب متغیر. (ت) کندشونده با شتاب متغیر.

۹. معادله نوسانگری به شکل  $y = 4 \sin(100\pi t + \frac{\pi}{4})$  است. در کدام لحظه از دوره اول، نیروی مؤثر بر نوسانگر صفر است؟

(الف)  $\frac{1}{100}s$  (ب)  $\frac{1}{200}s$  (پ)  $\frac{1}{300}s$  (ت)  $\frac{3}{400}s$

۱۰. معادله نوسانگری به شکل  $y = 2 \sin 10\pi t$  است. در چه لحظه‌ای از نخستین دوره، انرژی جنبشی و پتانسیل این نوسانگر با هم برابرند؟

(الف)  $\frac{1}{10}s$  (ب)  $\frac{1}{20}s$  (پ)  $\frac{1}{30}s$  (ت)  $\frac{1}{40}s$

۱۱. مکان نوسانگری  $\frac{3}{5}$  مکان بیشینه آن است. نسبت سرعت نوسانگر در این مکان به بیشینه سرعتش چقدر است؟

(الف)  $\frac{5}{4}$  (ب)  $\frac{4}{5}$  (پ)  $\frac{3}{5}$  (ت)  $\frac{4}{25}$

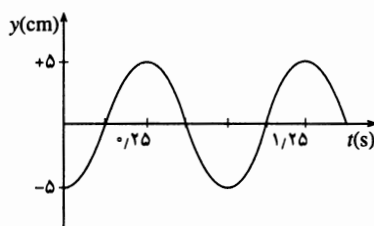
۱۲. نمودار مکان - زمان در یک حرکت نوسانی مطابق شکل ۱-۱۵ است. معادله حرکت این نوسانگر در SI کدام است؟

(ب)  $y = 5 \times 10^{-2} \sin(2\pi t + \frac{3}{4}\pi)$

(الف)  $y = 5 \times 10^{-2} \sin 2\pi t$

(ت)  $y = 5 \sin(\pi t + \frac{3}{4}\pi)$

(پ)  $y = 5 \times 10^{-2} \sin(2\pi t + \frac{\pi}{4})$



شکل ۱-۱۵

۱۳. دوره یک نوسانگر  $3/14$  ثانیه و بیشترین سرعت آن  $0.72 \frac{m}{s}$  است. بیشترین شتاب نوسانگر چند متر بر مجذور ثانیه است.

(الف)  $0.4$  (ب)  $0.2$  (پ)  $0.3$  (ت)  $0.1$

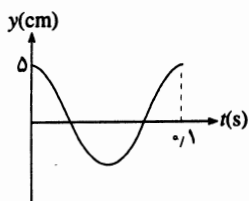
۱۴. معادله حرکت نوسانی یک ذره به صورت  $y = 0.1 \sin(100\pi t + \frac{\pi}{6})$  است. مکان ذره در مبدأ زمان کدام است؟

(الف)  $0.01$  (ب)  $0.02$  (پ)  $0.05$  (ت)  $0.1$

۱۵. در لحظه‌ای که اندازه سرعت یک نوسانگر بیشینه است، شتاب و جابه‌جایی آن نسبت به وضع تعادل به ترتیب چگونه است؟

(الف) بیشینه-بیشینه (ب) بیشینه-صفر (پ) صفر-بیشینه (ت) صفر-صفر

۱۶. نمودار مکان - زمان نوسانگری مطابق شکل ۱۶-۱ است. معادله سرعت در SI کدام است؟



الف)  $v = 5 \cos 20\pi t$

ب)  $v = 5\pi \times 10^{-2} \cos 20\pi t$

پ)  $v = 5\pi \times 10^{-2} \sin(20\pi t + \frac{\pi}{4})$

ت)  $v = \pi \times 10^{-2} \cos(20\pi t + \frac{\pi}{4})$

شکل ۱۶-۱

۱۷. نمودار مکان - سرعت یک نوسانگر ساده به چه شکل است؟

الف) دایره      ب) بیضی      پ) سهمی      ت) هذلولی

۱۸. در یک حرکت نوسانی ساده مشخص کدامیک از کمیت‌های مربوط به نوسانگر ثابت است؟

الف) سرعت      ب) شتاب      پ) نیرو      ت) دامنه

۱۹. در لحظه‌ای که انرژی جنبشی یک نوسانگر  $\frac{1}{3}$  انرژی مکانیکی آن است، نسبت  $\frac{K}{U}$  چقدر است؟

الف)  $\frac{1}{3}$       ب) ۳      پ)  $\frac{2}{3}$       ت)  $\frac{3}{4}$

۲۰. یک وزنه یک کیلوگرمی را به انتهای فنری که روی سطح افقی بی‌اصطکاکی قرار دارد متصل می‌کنیم. اگر ثابت این فنر که به نقطه ثابتی بسته شده است  $200 \frac{N}{m}$  باشد و وزنه با دامنه ۵cm

نوسان کند، بیشینه انرژی جنبشی آن چند ژول است؟

الف) ۰٫۲۵      ب) ۰٫۵      پ) ۱      ت) ۲

### تمرینها

۱. جرم گلوله‌ای ۰٫۳۰ کیلوگرم است و با دوره ۲٫۵ ثانیه و دامنه ۰٫۰۴ متر نوسان می‌کند. مطلوب است

الف) بیشترین سرعت گلوله      ب) بیشترین شتاب گلوله      پ) انرژی مکانیکی گلوله

پاسخ: الف)  $0.1 \frac{m}{s}$       ب)  $0.25 \frac{m}{s}$       پ)  $15 \times 10^{-4} J$

۲. یک طرف فنر سبک وزنی را به نقطه ثابتی می‌آویزیم و به طرف دیگر آن وزنه‌ای را به جرم ۰٫۴۰ کیلوگرم متصل می‌کنیم. طول فنر ۰٫۰۶ متر افزایش می‌یابد. هرگاه وزنه را ۰٫۰۶ متر دیگر در امتداد

قائم پایین بکشیم و رها کنیم، حرکت نوسانی خواهد داشت. مطلوب است

الف) معادله حرکت وزنه. مبدأ لحظه‌ای است که وزنه را پایین کشیده و رها کنیم.

ب) بیشترین انرژی جنبشی وزنه.

پاسخ: الف)  $y = 0.06 \sin 14.2t$       ب) ۰٫۱۱ J

۳. صفحه یک بلندگو، صوتی با بسامد ۲٫۵ کیلوهرتز تولید می‌کند. اگر دامنه ارتعاش آن ۲ میلی‌متر باشد،

مطلوب است

الف) بیشترین سرعت صفحه.      ب) بیشترین شتاب صفحه.

پاسخ: الف)  $31.4 \frac{m}{s}$       ب)  $5 \times 10^5 \frac{m}{s^2}$

۴. گلوله‌ای به جرم ۲ گرم با دامنه ۲ سانتیمتر و با بسامد ۲۰ هرتز نوسان می‌کند. سرعت متوسط این نوسانگر در یک دوره کامل چقدر است؟ اگر فاز اولیه این متحرک  $\theta = \frac{\pi}{3}$  باشد، در چه لحظه‌هایی از دوره اول، انرژی جنبشی و پتانسیل این گلوله برابرند.

پاسخ: صفر،  $\frac{1}{160}$  s و  $\frac{3}{160}$  s

۵. یک جریان الکتریکی به شدت  $I = 10 \sin 100\pi t$  از سیم راستی می‌گذرد. معادله میدان مغناطیسی حاصل از این جریان را در نقطه‌ای به فاصله ۱۰ سانتیمتر از سیم بنویسید. (میدان مغناطیسی در اطراف هر سیم راست از رابطه  $B = 2 \times 10^{-7} \frac{I}{d}$  به دست می‌آید).

۶. گلوله‌ای به جرم ۰٫۵ کیلوگرم را به انتهای فنری با ثابت  $20 \frac{N}{m}$  می‌بندیم. اگر گلوله و فنر بر سطح افقی بی‌اصطکاکی قرار گیرند و گلوله را به اندازه ۳ سانتیمتر در امتداد فنر دور و رها کنیم، به طوری که حرکت نوسانی داشته باشد، مطلوب است

الف) حداکثر سرعت گلوله و انرژی کل ذخیره شده در آن.

ب) وقتی گلوله به اندازه ۲٫۰ سانتیمتر از وضع تعادل خود دور باشد سرعت آن چقدر است؟

پ) در حالت اخیر نسبت انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل گلوله چقدر است؟

پاسخ: الف)  $0.18 \frac{m}{s}$ ،  $8 \times 10^{-3} J$  ب)  $0.13 \frac{m}{s}$  پ)  $\frac{5}{4}$

۷. معادله ارتعاشی یک ذره به صورت  $y = 2 \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right)$  است.

الف) حداقل پس از چه مدت، بر حسب دوره، سرعت ذره حداکثر خواهد بود.

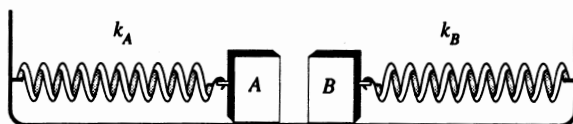
ب) هنگامی که انرژی جنبشی دو برابر انرژی پتانسیل باشد نسبت  $\frac{y}{A}$  چقدر است؟

۸. هرگاه انرژی مکانیکی در دو فنر A و B شکل ۱-۱۷ برابر و معادلات نوسانی آنها به ترتیب

$x_A = 2 \sin 6t$  و  $x_B = 2\sqrt{3} \sin \left( 4t + \frac{\pi}{3} \right)$  باشد، نسبت ثابت فنر A به ثابت فنر B چقدر است؟

اگر جرم وزنه متصل به فنر A، ۱۰۰ گرم باشد، جرم وزنه متصل به فنر B چقدر است؟

پاسخ: ۳ و ۷۵



شکل ۱۷-۱

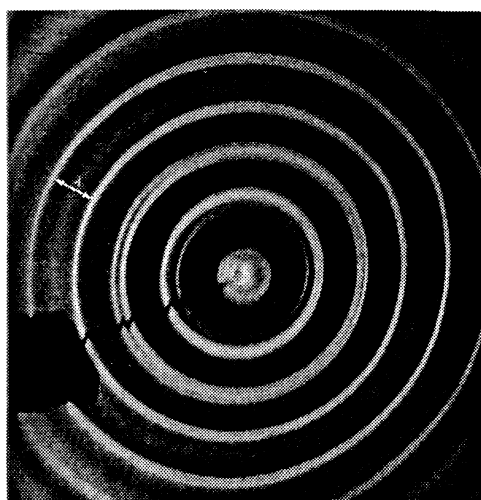


## ۲

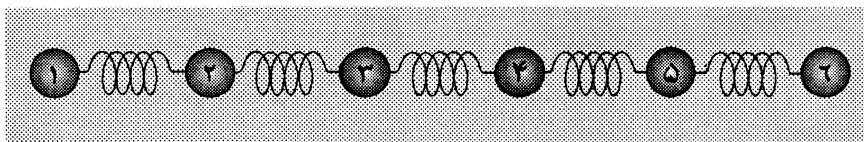
## امواج مکانیکی

## ۱-۲ موج چیست؟

سنگی را در آب یک استخر پرتاب کنید، مشاهده خواهید کرد که وقتی سنگ به سطح آب می‌رسد ضربه‌ای بر آب می‌زند و در آن نقطه تغییر شکل یا آشفتگی به وجود می‌آورد. سپس این آشفتگی در سطح آب به صورت دایره‌ای ظاهر و هر لحظه بزرگتر می‌شود تا به دیواره استخر برسد. هرگاه به کمک قطره‌های آبی که از شیر آب فرو می‌افتند یا وسیله دیگری ضربه‌های متوالی بر سطح آب وارد کنیم، مشاهده می‌شود که امواج دایره‌ای هم‌مرکزی با فاصله ثابت روی آب نمایان می‌شوند و با سرعت ثابت بر سطح آب حرکت می‌کنند (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲ ضربه‌های متوالی بر سطح آب امواجی به شکل دایره‌های هم‌مرکز پدید می‌آورد.



شکل ۲-۲ یک محیط قابل ارتعاش از ذره‌هایی تشکیل شده است که بر یکدیگر نیرو وارد می‌کنند.

در این آزمایش قطره‌های آب که انرژی را به‌طور متناوب منتقل می‌کنند و عامل آشفستگی می‌شوند، چشمه موج<sup>۱</sup> و آب استخر که آشفستگی در آن منتشر می‌شود محیط<sup>۲</sup> و موجی که در هر لحظه ناحیه کوچکی از فضا را اشغال می‌کند، تپ موج<sup>۳</sup> می‌نامند. چند تپ موج به دنبال هم را قطار موج<sup>۴</sup> و خطی را که مسیر حرکت انرژی چشمه به هر نقطه باشد امتداد انتشار موج می‌گویند.

علت پیدایش و انتشار موج در یک محیط، تغییر نیرو یا فشاری است که بر اثر انرژی چشمه موج، در ذره‌های محیط به وجود می‌آید. یک محیط قابل ارتعاش را می‌توان مجموعه‌ای از ذرات فرض کرد که توسط فنرهایی به یکدیگر متصل‌اند. در شکل ۲-۲ نمونه‌ای از یک محیط قابل ارتعاش نشان داده شده است.

اگر ذره شماره ۱ را با صرف انرژی به جلو بکشیم و آن را از وضع تعادل دور کنیم، بر ذره شماره ۲ نیرویی وارد می‌کند که این نیرو ضمن آنکه این ذره را از وضع تعادل دور می‌کند، واکنشی بر ذره شماره ۱ وارد می‌آورد و آن را به وضع اولیه باز می‌گرداند. جابه‌جایی ذره شماره ۲، ذره شماره ۳ را جابه‌جا می‌کند و خود نیز به وضع اولیه باز می‌گردد. این کنش و واکنش به تدریج به ذره‌های ۴ و ۵ و ۶ اثر می‌کند و سبب می‌شود تغییر شکل ابتدای ذره به انتهای آن منتقل شود.

## ۲-۲ انواع موج

به‌طور کلی دو نوع موج در طبیعت یافت می‌شود؛ امواج مکانیکی<sup>۵</sup> و امواج الکترومغناطیسی<sup>۶</sup>. امواج مکانیکی، امواجی هستند که فقط در محیطهای مادی منتشر می‌شوند. محیط انتشار این نوع موج می‌تواند یک بعدی مانند طناب، دوبعدی مانند سطح آب، و سه بعدی مانند فضا باشد. صوت و زلزله و امواج سطح آب نمونه‌هایی از امواج مکانیکی‌اند.

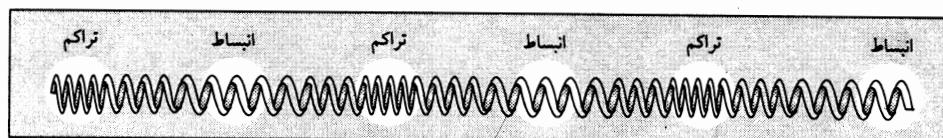
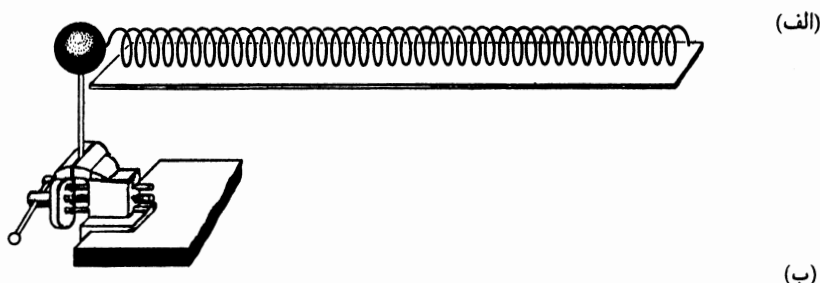
امواج الکترومغناطیسی، امواجی هستند که علاوه بر بعضی محیطهای مادی که برای آنها شفاف‌اند از خلأ نیز عبور می‌کنند. سرعت این امواج نسبت به امواج مکانیکی بسیار زیاد و در خلأ  $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$  است. امواج الکترومغناطیسی طیف گسترده‌ای را تشکیل می‌دهند و شامل پرتوهای گاما، ایکس، فرابنفش، نور، فروسرخ و امواج رادیویی‌اند. این امواج از دو میدان نوسانی الکتریکی و مغناطیسی عمود بر هم تشکیل شده‌اند.

1- source of wave    2- medium    3- pulse of wave    4- train of wave    5- mechanical waves  
6- electromagnetic waves

موجها را علاوه بر تقسیم‌بندی به مکانیکی و الکترومغناطیسی که مربوط به ماهیت جداگانه آنهاست، به امواج طولی، عرضی، رونده، ایستاده (یا ساکن)، تخت، کروی، و قطبیده (یا پلاریزه) دسته‌بندی می‌کنند.

### امواج طولی<sup>۱</sup>

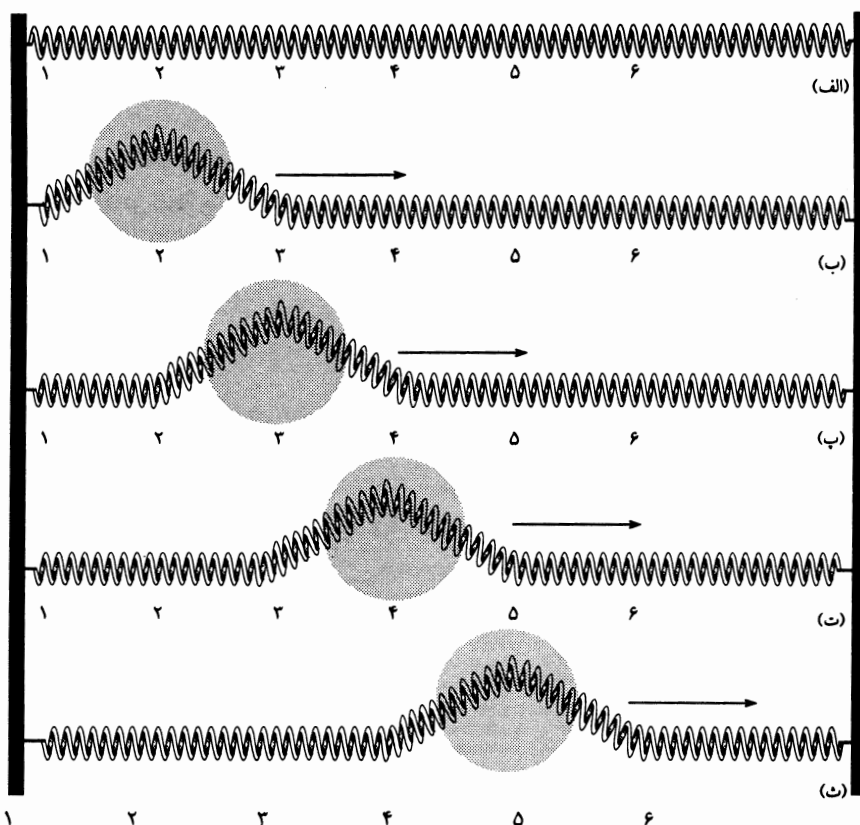
یک طرف فنری را به نقطه‌ای ثابت کنید و طرف دیگر آن را در دست بگیرید و بکشید. اکنون اگر چند حلقه‌ای از فنر را متراکم و یکباره رها کنید مشاهده خواهید کرد که این حالت تراکم در طول فنر منتشر می‌شود. علت انتشار تراکم آن است که حلقه‌های متراکم شده فنر پس از آزاد شدن بر اثر نیروی برگرداننده‌ای که حلقه‌های مجاور بر آنها وارد می‌کنند منبسط می‌شوند و انبساط آنها سبب متراکم شدن تعدادی از حلقه‌های بعدی خواهد شد و این تراکم و انبساط در طول فنر منتشر می‌شود. شکل ۲-۳ ابزار تولید موج طولی را در فنر نشان می‌دهد. چنانچه هر یک از حلقه‌های فنر را در نظر بگیریم، حرکتی نوسانی خواهند داشت که امتداد این حرکت در راستای انتشار موج است. چنین موجی را، موج طولی می‌نامند. بنابراین در موج طولی نوسان ذره‌ها در امتداد راستای انتشار موج است.



شکل ۲-۳ الف) فنر و ابزار تولید موج طولی در آن. ب) در موج طولی انبساط و تراکم منتشر می‌شود.

### امواج عرضی<sup>۲</sup>

فنر نسبتاً بلندی را بین دو نقطه، مطابق شکل ۲-۴، می‌بندیم. اگر ضربه‌ای در نقطه ۲ در جهت پایین به بالا بر فنر وارد کنیم، ملاحظه می‌کنیم که در این نقطه موجی به وجود می‌آید که در امتداد فنر منتشر می‌شود ولی، امواج به هر بخشی از فنر برسد آن بخش عمود بر راستای انتشار موج حرکت می‌کند. چنین موجی را که راستای نوسان بر راستای انتشار موج عمود باشد موج عرضی می‌نامند.



شکل ۲-۴ موج عرضی که در فنر منتشر می‌شود. در این حالت آشفتگی که در هر جزء به وجود می‌آید کنش و واکنشهایی در اجزای مجاور ایجاد می‌کند که سبب انتقال آشفتگی به آنها می‌شود.

## ۳-۲ مشخصات امواج

هر موجی دارای دوره تناوب  $T$ ، بسامد  $\nu$ ، دامنه  $A$ ، سرعت  $V$  و طول موج  $\lambda$  است که در این بخش به معرفی آنها می‌پردازیم.

بسامد یا فرکانس، تعداد دوره‌های کاملی است که چشمه موج در هر ثانیه دارد. دوره تناوب، زمان هر دور است. دوره و بسامد عکس یکدیگر و از مشخصات چشمه موج‌اند و داریم

$$T = \frac{1}{\nu}, \nu = \frac{1}{T}, T\nu = 1 \quad (۱-۲)$$

سرعت موج، جابه‌جایی موج در یکای زمان است. سرعت موج از مشخصات محیط است و به نوع موج و طولی و عرضی بودن آن بستگی دارد. در یک محیط همگن سرعت موج ثابت است. سرعت انتشار موج مستقل از سرعت ذره‌های مرتعش محیط است. سرعت این ذره‌ها متغیر و تابع سینوسی از زمان است.

طول موج، فاصله‌ای است که موج در یک دوره طی می‌کند. طول موج به دوره تناوب چشمه و سرعت موج در محیط بستگی دارد و داریم

$$\lambda = \frac{V}{\nu} \quad \text{یا} \quad \lambda = VT \quad (۲-۲)$$

طول موج فاصله دو نقطه همفاز متوالی از محیط است. طول موج در موجهای عرضی فاصله دو قله متوالی موج، و در موجهای طولی، فاصله دو نقطه با حداکثر تراکم است.

□ پرسش ۱. در رابطه  $\nu = \frac{V}{\lambda}$ ، کدام کمیت، هم به ویژگیهای محیط و هم به چشمه موج بستگی دارد؟

الف)  $\nu$       ب)  $\lambda$       پ)  $V$       ت)  $\lambda, \nu$

مثال ۱. یک فرستنده رادیویی امواجی با طول موج ۷۵ متر منتشر می‌کند. بسامد امواج چند هرتز است؟ سرعت نور  $3 \times 10^8$  متر بر ثانیه است.

حل:

$$\lambda = \frac{V}{\nu} \rightarrow \nu = \frac{V}{\lambda}$$

$$\nu = \frac{3 \times 10^8}{75} = 4 \times 10^6 \text{ Hz} = 4 \text{ MHz}$$

▲

بیشترین جابه‌جایی ذره‌های مرتعش محیط تا وضع تعادل را دامنه موج گویند. اگر دامنه موج به تدریج کاهش یابد، موج را میرا و اگر دامنه ثابت باشد موج را نامیرا می‌نامند.

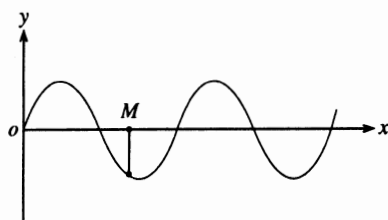
## ۲-۴ تابع موج

هرگاه انتهای طناب کشیده‌ای را بالا و پایین ببریم، مشاهده می‌کنیم که موجی در طناب به وجود می‌آید که با سرعت  $V$  به طرف انتهای دیگر طناب پیش می‌رود. اگر جابه‌جایی انتهای طناب را که چشمه موج است از وضع تعادل در امتداد  $y$  با  $U_y$  نشان دهیم، داریم

$$U_y = A \sin \omega t = A \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (۳-۲)$$

می‌خواهیم معادله نوسان نقطه‌ای مانند  $M$  را که به فاصله  $x$  از چشمه  $O$  واقع است (شکل ۲-۵)، در لحظه  $t$  مشخص کنیم. چنین معادله‌ای که رابطه جابه‌جایی ذره  $M$ ، یعنی  $y_m$ ، نسبت به مکان  $x$  و زمان  $t$  است تابع موج نامیده می‌شود.

آزمایش نشان می‌دهد که وقتی نقطه  $O$  به ارتعاش درآید نقاط دیگر محیط یکی پس از دیگری به ارتعاش درمی‌آیند و پس از مدتی برابر  $t_1$  موج به نقطه  $M$  خواهد رسید و نوسان این نقطه در لحظه  $t$  به شکل نوسانی است که چشمه  $O$ ،  $t_1$  ثانیه زودتر داشته است. بنابراین اگر در معادله نوسان نقطه



شکل ۵-۲ منحنی  $U_y$  بر حسب مکان  $x$  در لحظه  $t = 0$ .

$O$  به جای  $t$  مقدار  $t - t_1$  را قرار دهیم، معادله موج در نقطه  $M$  به صورت زیر خواهد بود

$$U_y(x, t) = A \sin \omega(t - t_1)$$

از سوی دیگر می دانیم که موج حرکتی یکنواخت دارد و  $t_1 = \frac{x}{V}$  است. پس می نویسیم

$$U_y = A \sin \left( \omega t - \omega \frac{x}{V} \right) = A \sin \left( \omega t - \frac{2\pi x}{VT} \right)$$

چون  $VT = \lambda$ ، برابر طول موج است، تابع موج به صورت زیر درمی آید

$$U_y(x, t) = A \sin \left( \omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \quad (۴-۲)$$

$\frac{2\pi}{\lambda}$  را با  $k$  نشان می دهند و آن را عدد موج می نامند، پس تابع موج به صورت زیر است

$$U_y(x, t) = A \sin(\omega t - kx) \quad (۵-۲)$$

در این رابطه  $A$  دامنه موج و  $\omega t - kx$  فاز موج در لحظه  $t$  در مکان  $x$  است. منحنی این تابع در لحظه  $t = 0$  به صورت شکل ۵-۲ است. برای نقاط مختلف  $M$ ، نقاط خاصی باید مورد توجه قرار گیرند که عبارت اند از:

#### الف) نقاط همفاز

اگر در کلیه لحظه ها، جابه جایی نقطه ای مثل  $M$  نسبت به وضع تعادل برابر جابه جایی نقطه  $O$  باشد، این دو نقطه، همفازند. در این صورت  $x$  از رابطه زیر به دست می آید

$$U_M = U_O$$

$$A \sin \left( \omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right) = A \sin \omega t$$

$\frac{2\pi x}{\lambda}$  را به  $\varphi$  نشان می دهند و آن را اختلاف فاز می نامند، که در این صورت

$$x = k\lambda, \quad \varphi = \frac{2\pi x}{\lambda} = 2k\pi \quad (۶-۲)$$

بنابراین کلیه نقاطی از محیط که فاصله آنها از چشمه موج (مبدأ) ضریب درستی از طول موج یا ضریب زوجی از نصف طول موج باشند با چشمه موج همفازند. مکان هندسی این نقاط برای محیط یک بعدی مانند طناب، نقطه، و برای محیط دو بعدی مانند سطح آب، دایره، و برای محیط سه بعدی مانند هوای همگن، کره خواهد بود.



(ب) نقاط متقابل

نقاطی هستند که جابه‌جایی آنها نسبت به وضع تعادل با جابه‌جایی مبدأ موج با علامت منفی برابر باشد. فاصله این نقاط از مبدأ از رابطه‌های زیر به دست می‌آید

$$U_M = -U_O \Rightarrow A \sin \left( \omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right) = A \sin \omega t$$

$$\varphi = \frac{2\pi x}{\lambda} = (2k - 1)\pi$$

$$x = (2k - 1) \frac{\lambda}{2} \quad (7-2)$$

کلیه نقاطی از محیط که فاصله آنها از چشمه موج ضریب فردی از نصف طول موج باشند با چشمه در فاز متقابل‌اند. نقطه  $M$  با نقطه  $O$  هم‌فاز است.

هرگاه موج طولی باشد جابه‌جایی ذره در امتداد انتشار موج است و چنانچه هر دو امتداد را روی محور  $x$  ها در نظر بگیریم، تابع موج به صورت زیر خواهد بود

$$U_x = A \sin \omega t \quad (\text{برای چشمه موج}) \quad (8-2)$$

$$U_x = A \sin t(\omega t - kx) \quad (\text{برای نقطه } M) \quad (9-2)$$

□ پرسش ۲. معادله نوسانی چشمه موجی  $y = 4 \sin 10\pi t$  است. اگر سرعت موج  $60 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$  باشد، تابع موج در فاصله  $18 \text{ cm}$  از مبدأ کدام است؟

$$U(t, x) = 4 \sin(10\pi t - 3\pi) \quad (\text{ب})$$

$$U(t, x) = 4 \sin(10\pi t - 2\pi) \quad (\text{الف})$$

$$U(t, x) = 4 \sin(10\pi t - 6\pi) \quad (\text{ت})$$

$$U(t, x) = 4 \sin(10\pi t - 4\pi) \quad (\text{پ})$$

مثال ۲. از سوراخ ظرفی که در بالای یک استخر قرار دارد هر ثانیه ۵ قطره آب بر سطح استخر فرود می‌آید و امواجی به وجود می‌آورد که با سرعت  $0.5$  متر بر ثانیه بر سطح آب منتشر می‌شوند. اگر دامنه نوسان موج تولید شده  $4 \text{ mm}$  باشد، مطلوب است

الف) طول موج      ب) عدد موج      پ) معادله موج در مبدأ

ت) تابع موج در نقطه‌ای به فاصله  $62.5$  سانتیمتر از مبدأ

ث) جابه‌جایی این نقطه در لحظه  $t = 2 \text{ s}$ .

$$\lambda = \frac{V}{\nu} = \frac{0.5}{5} = 0.1 \text{ m} \quad (\text{حل: الف})$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{0.1} = 20\pi \text{ rad/m} \quad (\text{ب})$$

$$U_y(t, 0) = A \sin \omega t = 4 \times 10^{-2} \sin 10\pi t \quad (\text{پ})$$

$$U_y(t, x) = A \sin(\omega t - kx) \quad (\text{ت})$$

$$= 4 \times 10^{-2} \sin(10\pi t - 20\pi \times 62,5 \times 10^{-2})$$

$$U_y(2s, 0,625m) = 4 \times 10^{-2} \sin(10\pi \times 2 - 12,5\pi) \quad (\text{ث})$$

$$U_y(2s, 0,625m) = 4 \times 10^{-2} \sin 7,5\pi = 0$$

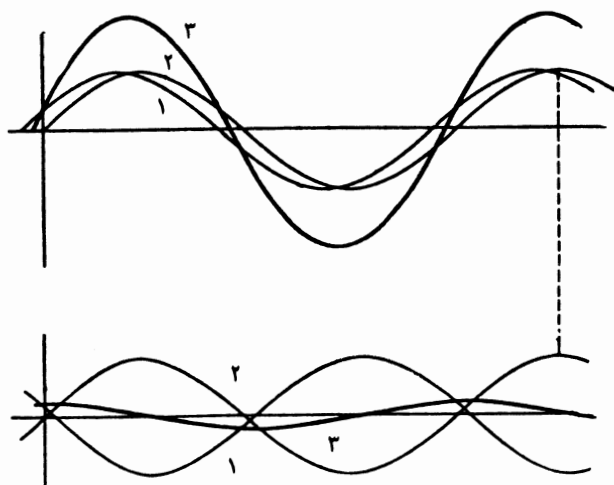
▲

## ۵-۲ برهم نهی امواج

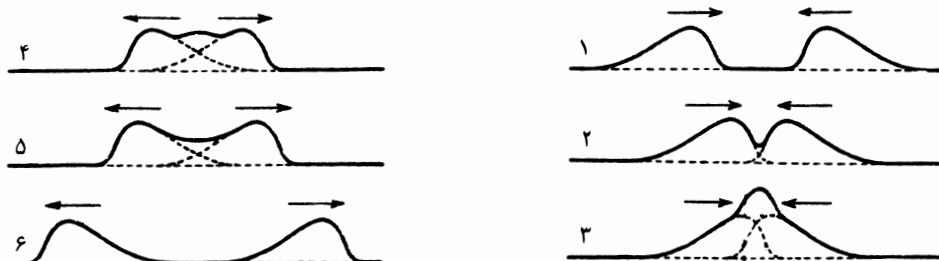
آیا تاکنون شاهد برخورد امواج دریا با هم بوده‌اید؟ وقتی موجی به ساحل می‌رسد با همان سرعت باز می‌گردد و با موجهایی که به سوی ساحل در حرکت‌اند برخورد می‌کند. برخورد این امواج اغلب دیدنی است. در جایی که دو قله موج به هم برخورد می‌کنند قله بزرگتری از موج به وجود می‌آید و جایی که قله یک موج با دره موج دیگر به هم می‌رسند آب ساکن می‌شود. پدیده برخورد دو یا چند موج در یک نقطه را برهم نهی امواج<sup>۱</sup> می‌نامند. آزمایش نشان می‌دهد که دو اصل زیر در برخورد دو یا چند موج کم‌دامنه صادق است:

اصل برهم نهی امواج- در نقطه‌ای که امواج به هم می‌رسند، جابه‌جایی کل آن نقطه، برآیند جابه‌جایی‌هایی است که هر یک از امواج به تنهایی در آن نقطه ایجاد می‌کنند (شکل ۶-۲). اصل برهم نهی موجها را به شکل زیر می‌نویسند

$$U_i = U_1 + U_2 + U_3 + \dots \quad (۱۰-۲)$$



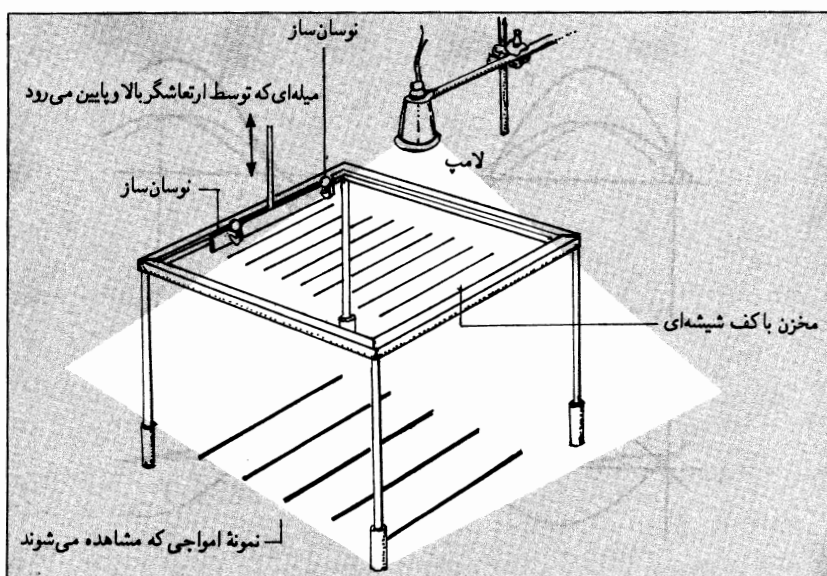
شکل ۶-۲ موج ۳ از برهم نهی دو موج ۱ و ۲ در هر نقطه به وجود می‌آید.



شکل ۷-۲ دوپ به تدریج به یکدیگر نزدیک و برهم نهاده می شوند و سپس با حفظ جهت و شکل خود از هم فاصله می گیرند.

اصل استقلال امواج- دو یا چند موج که در یک محیط در جهتهای مختلف منتشر می شوند پس از آنکه بر یکدیگر نهاده شدند، بدون تغییر شکل و در همان جهت و امتداد اولیه حرکت خود را ادامه می دهند (شکل ۷-۲).

برای مطالعه پدیده برهم نهی امواج از موج نما یا تشتک موج<sup>۱</sup> استفاده می شود. موج نما ظرفی است شیشه ای که روی پایه هایی قرار دارد. در این ظرف بین یک تا دو سانتیمتر آب می ریزند. چشمه موج، یک دستگاه الکتریکی است که می تواند یک تیغه فلزی را به ارتعاش درآورد. به این تیغه یک یا چند سوزن متصل است. حرکت فنر سبب می شود که این سوزن یا سوزنها بر سطح آب به طور عمودی ضربه بزنند و موج یا امواجی را پدید آورند. برای مشاهده این امواج از یک چراغ الکتریکی استفاده می شود. این چراغ تصویری از شکل امواج بر صفحه زیر دستگاه موج نما یا سقف آزمایشگاه (بسته به جای چراغ) تشکیل می دهد (شکل ۸-۲).



شکل ۸-۲ موج نما

## ۶-۲ تداخل امواج سینوسی

هرگاه در دستگاه موج‌نما، دو سوزن هم‌طول، عمود بر سطح آب ضربه‌های یکسان وارد کنند دو موج سینوسی، هم‌دامنه و هم‌بسامد تولید می‌شود که در سطح منتشر می‌شوند و پس از برخورد با یکدیگر وضع تقریباً ثابتی بر سطح آب نمایان می‌شود (شکل ۹-۲ الف). در این پدیده که تداخل امواج<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، بعضی از نقاط دارای حداکثر دامنه ارتعاش‌اند و بعضی دیگر همواره ساکن‌اند. مکان هندسی نقاط با حداکثر دامنه هذلولی و مکان هندسی نقاط ساکن نیز هذلولی است.

برای بررسی ریاضی وضعیت نقطه‌ای مانند  $M$  که به فاصله  $d_1$  و  $d_2$  از دو چشمه موج قرار دارد، می‌توان تابع موج نقطه  $M$  را برای هر دو موج نوشت و با استفاده از اصل برهم‌نهی امواج، تابع موج کلی نقطه  $M$  را به صورت زیر به دست آورد

$$U_1 = A_1 \sin \left( \omega t - \frac{2\pi d_1}{\lambda} \right) = A_1 \sin \theta_1, \quad U_2 = A_1 \sin \left( \omega t - \frac{2\pi d_2}{\lambda} \right) = A_1 \sin \theta_2$$

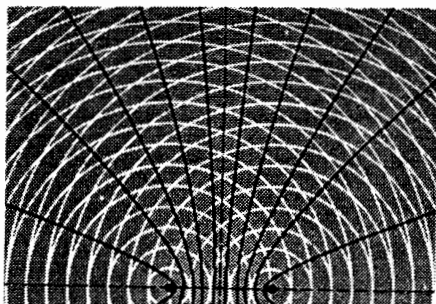
$$\begin{aligned} U_t &= U_1 + U_2 = A_1 \sin \theta_1 + A_1 \sin \theta_2 = 2A_1 \cos \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \sin \left( \frac{\theta_2 + \theta_1}{2} \right) \\ &= 2A_1 \cos \pi \left( \frac{d_2 - d_1}{\lambda} \right) \sin \left[ \omega t + \pi \left( \frac{d_2 + d_1}{\lambda} \right) \right] \end{aligned}$$

تابع موج در نقطه  $M$  از دو جزء تشکیل شده است. جزء اول که تابع زمان نیست دامنه موج  $U_t$  است که آن را با  $A$  نشان می‌دهیم

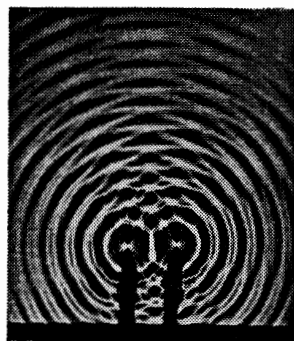
$$A = 2A_1 \cos \pi \left( \frac{d_2 - d_1}{\lambda} \right) \quad (۱۱-۲)$$

دامنه  $A$  تابع مکان نقطه است و در نقاطی حداکثر و برابر  $2A_1$  است که

$$\cos \pi \left( \frac{d_2 - d_1}{\lambda} \right) = \pm 1 \Rightarrow \pi \left( \frac{d_2 - d_1}{\lambda} \right) = n\pi$$



(ب)



(الف)

شکل ۹-۲ تداخل حاصل از دو موج دایره‌ای هم‌دامنه و هم‌بسامد.

یا

$$d_2 - d_1 = n\lambda \quad (۱۲-۲)$$

کلیه نقاطی که اختلاف راه آنها از دو چشمه موج ضریب درستی از طول موج باشد تداخل سازنده<sup>۱</sup> دارند و دارای بیشترین دامنه نوسان هستند. مکان هندسی این نقاط در محیط دایره‌ای، مانند سطح آب، هذلولی است. برای نقاطی که دامنه<sup>۲</sup>  $A = 0$  باشد، داریم

$$\cos \frac{\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) = 0 \Rightarrow \frac{\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) = (2n - 1)\frac{\pi}{2}$$

یا

$$\frac{2\pi d_2}{\lambda} - \frac{2\pi d_1}{\lambda} = (2n - 1)\pi$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi = (2n - 1)\pi \quad (۱۳-۲)$$

$$d_2 - d_1 = (2n - 1)\frac{\lambda}{2} \quad (۱۴-۲)$$

یعنی اختلاف فاز نقطه  $M$  از دو چشمه ضریب فردی از  $\pi$  و اختلاف راه فردی از نصف طول موج باشد. در چنین حالتی این دو موج در فاز مخالف‌اند و دامنه آنها صفر است و تداخل ویرانگر<sup>۲</sup> دارند. مکان هندسی این نقاط در موج‌ها هذلولیهایی ساکن است (شکل ۹-۲ ب).

□ پرسش ۳. هرگاه دو موج سینوسی در نقطه‌ای با هم تداخل کنند، نقاطی دارای تداخل سازنده‌اند که

الف) اختلاف فازشان برابر  $(2n - 1)\pi$  باشد.

ب) اختلاف فازشان برابر  $2n\pi$  باشد.

پ) اختلاف راهشان برابر  $(2n - 1)\frac{\lambda}{2}$  باشد.

ت) اختلاف راهشان برابر  $(2n + 1)\lambda$  باشد.

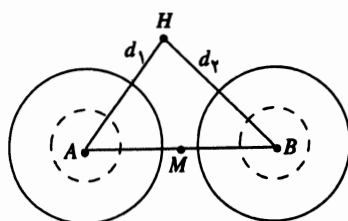
مثال ۳. دو چشمه موج  $A$  و  $B$  به فاصله  $20\text{ cm}$  از یکدیگر واقع‌اند و نوسانهایی یکسان و عمود بر سطح آب تولید می‌کنند (شکل ۱۰-۲). اگر معادله نوسان چشمه‌ها به صورت  $y_1 = y_2 = 0.10 \sin 100\pi t$  و سرعت انتشار موج  $4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  باشد، مطلوب است

الف) تابع موج هر یک از دو چشمه در نقطه  $M$  وسط  $AB$  و دامنه و فاز دو موج بر هم نهاده.

ب) دامنه و فاز تابع موج در نقطه  $H$  به فاصله  $19\text{ cm}$  از  $A$  و  $21\text{ cm}$  از  $B$ .

حل: الف) تابع موج در نقطه  $M$  عبارت است از

$$\lambda = \frac{V}{\nu} = \frac{4}{50} = 0.08\text{ m}, \quad AM = \frac{AB}{2} = \frac{20}{2} = 10\text{ cm} = d_1 = d_2$$



شکل ۱۰-۲ دو چشمه موج A و B امواج یکسان بر سطح آب منتشر می‌کنند.

پس

$$\begin{aligned}
 U_1 &= A_1 \sin \left( \omega t - \frac{\varphi_1 d_1}{\lambda} \right) = 0,01 \sin \left( 100\pi t - \frac{2\pi \times 0,1}{0,08} \right) \\
 &= 0,01 \sin(100\pi t - 2,5\pi) \\
 U_2 &= 0,01 \sin(100\pi t - 2,5\pi) \\
 U_t &= 2A \cos \frac{\Delta\varphi}{2} \sin \left( \omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) \\
 &= 2 \times 0,01 \cos 0 \sin(100\pi t - 2,5\pi) \\
 &= 0,02 \sin(100\pi t - 2,5\pi)
 \end{aligned}$$

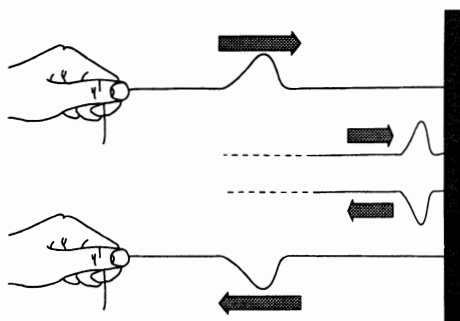
(ب) تابع موج در نقطه H (شکل ۱۰-۲) عبارت است از

$$\begin{aligned}
 U'_t &= 2A \cos \frac{\pi}{\lambda} (d_2 - d_1) \sin \left[ \omega t - \frac{\pi}{\lambda} (d_1 + d_2) \right] \\
 &= 2 \times 0,01 \cos \frac{\pi}{0,08} (0,21 - 0,19) \sin \left[ 100\pi t - \frac{\pi}{0,08} (0,21 + 0,19) \right] \\
 &= \sqrt{2} \sin(100\pi t - 5\pi)
 \end{aligned}$$

▲

## ۷-۲ بازتاب موج

پرتوهای نور که به آینه بتابند بازتابیده می‌شوند. صدایی که به دیوار یا کوه برخورد کند یا موج آب دریا پس از رسیدن به ساحل باز می‌گردند. به‌طور کلی امواجی که در یک محیط منتشر می‌شوند پس از برخورد به محیط دیگر، بخشی از موج در مرز مشترک بازتابیده می‌شود و بخشی دیگر از مرز مشترک می‌گذرد و وارد محیط دیگر می‌شود. نسبت انرژی بازتابیده به کل انرژی موج به شرایط مرزی دو محیط، زاویه تابش و بسامد موج بستگی دارد. شکل موج بازتابیده به سختی و نرمی محیط دوم نسبت به محیط اول یا ثابت و آزاد بودن مرز دو محیط مربوط است. در این بخش این حالتها را بررسی می‌کنیم.



شکل ۱۱-۲ شکل تپ بازتابیده وارون تپ تابیده است.

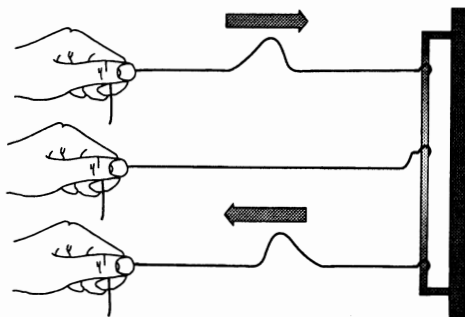
۱- بازتاب موج از مانع سخت- انتهای طنابی را به دیوار محکم کنید و در حالتی که طناب کشیده شده است به نقطه‌ای از آن ضربه‌ای وارد کنید به طوری که تغییر شکلی مثلاً رو به بالا ایجاد شود. مشاهده خواهید کرد که این تپ در طناب انتشار می‌یابد و به دیوار می‌رسد. پس از آن که تپ به دیوار رسید بازتابیده می‌شود. مقایسه تپ تابیده و بازتابیده نشان می‌دهد که الف) سرعت انتشار دو تپ برابر و در خلاف جهت یکدیگر است.

ب) بر اثر برخورد به مانع سخت، شکل تپ بازتابیده کاملاً وارون شکل تپ تابیده است (شکل ۱۱-۲). به طور کلی اگر معادله نوسان ذره مرزی بر اثر موج تابیده به صورت  $y = A \sin \omega t$  باشد، معادله نوسان این نقطه بر اثر موج بازتابیده عبارت است از

$$y_r = -A \sin \omega t = A \sin(\omega t - \pi)$$

بنابراین مانع سخت اختلاف فازی برابر  $\pi$  در موج بازتابیده به وجود می‌آورد. این اختلاف فاز برای همه موجهای طولی و عرضی و مکانیکی و الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود و مربوط به واکنش نیرویی است که از طرف مانع بر محیط اثر می‌کند.

۲- بازتاب موج از مانع نرم- هرگاه مطابق شکل ۱۲-۲ انتهای طنابی را به جسمی ببندیم به طوری که بتواند حرکت کند، یا انتهای طناب آزاد باشد مشاهده می‌کنیم که تپ ورودی پس از رسیدن به نقطه



شکل ۱۲-۲ بازتاب یک تپ در طنابی که انتهایش آزاد است.

مرزی بدون تغییر شکل بازتابیده می‌شود. بازتاب در این حالت بدون اختلاف فاز صورت می‌گیرد.

□ پرسش ۴. هرگاه در یک طناب که انتهای آن بسته است تپی ایجاد کنیم، تپ بازتابیده چه مشخصاتی دارد؟

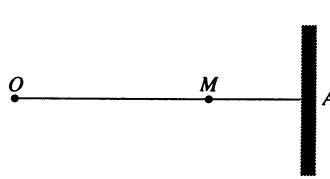
(الف) دارای همان اندازه و جهت سرعت تپ تابیده است.

(ب) نسبت به تپ تابیده وارون می‌شود و اختلاف فاز  $\pi$  دارد.

(پ) با تپ تابیده هم‌فاز است.

(ت) هم‌شکل و هم‌سرعت با تپ تابیده است.

مثال ۴. در سیمی که آن را به نقطه‌ای محکم کرده‌ایم، موجهای متوالی می‌فرستیم. اگر معادله موج فرودی به مانع سخت در نقطه  $A$ ، برابر  $U_A = A \sin \omega t$  باشد، تابع موج برآیند در نقطه  $M$ ، به فاصله  $x$  از این مانع را بنویسید و در مورد دامنه این موج ایستاده بحث کنید (شکل ۱۳-۲).



شکل ۱۳-۲

حل: فرض کنید سیم موردنظر، سیم  $OA$  است. می‌دانیم که نقطه  $M$  تحت تأثیر دو موج فرودی و بازتابیده قرار می‌گیرد. موج فرودی  $t_1$  ثانیه پیش از  $A$  و موج بازتابیده  $t_1$  ثانیه پس از  $A$  به نقطه  $M$  می‌رسند. بنابراین تابع این دو موج چنین است

$$U_{1-A} = A \sin \omega t, \quad U_{1-M} = A \sin(\omega t + kx) \quad \text{برای موج فرودی:}$$

$$U_{2-A} = -A \sin \omega t, \quad U_{2-M} = -A \sin(\omega t - kx) \quad \text{برای موج بازتابیده:}$$

در لحظه‌ای که این دو موج برهم نهاده می‌شوند، تابع موج طبق اصل برهم‌نهی امواج چنین است

$$\begin{aligned} U_M &= U_{1-M} + U_{2-M} = A \sin(\omega t + kx) - A \sin(\omega t - kx) \\ &= 2A \sin kx \cos \omega t \end{aligned} \quad (15-2)$$

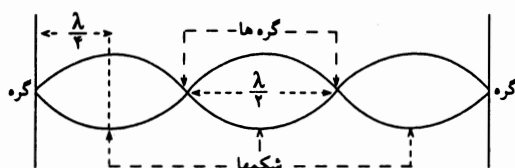
در این رابطه  $A' = 2A \sin kx$ ، دامنه موج ایستاده است که اندازه آن به  $x$ ، یعنی فاصله نقطه  $M$  تا مانع بستگی دارد. این دامنه بین صفر تا  $2A$  تغییر می‌کند.

نقاطی که دامنه آنها صفر است همیشه ساکن هستند و گره نامیده می‌شوند (شکل ۱۴-۲).

فاصله این نقاط تا مانع سخت برابر است با

$$\begin{aligned} A' = 2A \sin kx = 0 &\implies kx = n\pi, \quad \frac{2\pi}{\lambda} x = n\pi \\ x &= n \frac{\lambda}{2} \end{aligned} \quad (16-2)$$





شکل ۱۴-۲

نقاطی که دامنه آنها بیشینه است شکم نامیده می‌شوند. فاصله این نقاط تا مانع سخت برابر است با

$$A' = 2A \sin kx = 2A, \quad \sin kx = 1, \quad kx = (2n - 1)\frac{\pi}{2}$$

یا

$$x = (2n - 1)\frac{\lambda}{4} \quad (۱۷-۲)$$

▲

### خلاصه فصل

موج عبارت است از نوعی آشفتگی در یک محیط که هنگام انتشار، بدون انتقال ماده، انرژی را منتقل کند. هر موجی دارای دامنه  $A$ ، بسامد  $\nu$ ، طول موج  $\lambda$  و سرعت انتشار  $V$  است. امواج را به دو نوع کلی، مکانیکی و الکترومغناطیسی تقسیم می‌کنند. امواج مکانیکی فقط در محیطی که ماده موجود باشد می‌توانند منتشر شوند. امواج را به طولی، عرضی، رونده، ایستاده، قطبیده، تخت، کروی و استوانه‌ای نیز دسته‌بندی می‌کنند.

تابع موج در فاصله  $x$  از چشمه به صورت  $U = A \sin(\omega t - kx)$  است که  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  را عدد موج و  $(\omega t - kx)$  را فاز موج می‌نامند. امواج طبق اصل برهم نهی، تداخل می‌کنند و جابه‌جایی محیط ناشی از اثر همزمان دو موج، عبارت از جمع برداری جابه‌جایی ناشی از هر موج به‌طور جداگانه است. موج بر اثر برخورد به سطح جدایی دو محیط بازتابیده می‌شود. بازتاب روی مانع سخت با تأخیر فاز  $\pi$  صورت می‌گیرد.

### اهداف آموزشی

اکنون که این فصل را به پایان رسانده‌اید باید بتوانید

- حرکت موجی را توضیح دهید.
- برای تولید موج مثالهایی بیان کنید.
- انواع امواج را نام ببرید.
- موج طولی و عرضی را تعریف کنید.
- طول موج را تعریف کنید.

- رابطه طول موج با سرعت و بسامد را بنویسید.
- تابع موج در هر نقطه را به دست آورید.
- نقاط همفاز و متقابل را شرح دهید.
- برهم‌نهی امواج را شرح دهید.
- تداخل موجهای سینوسی را شرح دهید.
- هذلولیهای ساکن و متحرک را تحلیل کنید.
- بازتاب امواج را شرح دهید.

### خود را پیاژه‌ها پید

#### پرسشها

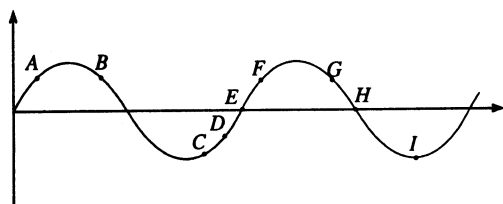
۱. هر یک از اصطلاحهای زیر را تعریف کنید.  
تپ موج، قطار موج، طول موج.
۲. چه تفاوتی بین موج مکانیکی و موج الکترومغناطیسی موجود است؟
۳. چه تفاوتی بین موج طولی و موج عرضی موجود است؟
۴. سرعت انتشار موج با سرعت ارتعاش ذره‌های محیط چه تفاوتی دارد؟
۵. تابع موج در نقطه‌ای به فاصله  $x$  از چشمه موج را به دست آورید.
۶. برهم‌نهی امواج چیست و بیان اصل برهم‌نهی کدام است؟
۷. تداخل موجهای سینوسی را محاسبه و در نتیجه بحث کنید.
۸. بازتاب موج را شرح دهید و در تفاوت موج بازتابیده از مانع سخت و نرم بحث کنید.
۹. موج ایستاده چیست و گره‌ها و شکمها چه نقاطی هستند؟
۱۰. معادله موج ایستاده در یک سیم کشیده را به دست آورید و آن را تحلیل کنید.

#### پرسشهای چهارگزینه‌ای

۱. سرعت انتشار موج در یک محیط قابل ارتعاش به چه عاملی بستگی دارد؟  
(الف) بسامد چشمه  
(ب) دامنه موج  
(پ) انرژی موج  
(ت) شرایط فیزیکی محیط
۲. کدام گزینه تعریف طول موج را به طور کامل بیان می‌کند؟  
(الف) در امواج عرضی، فاصله دو قله موج است.  
(ب) در امواج طولی فاصله دو نقطه با بیشترین تراکم است.

- (پ) در امواج طولی فاصلهٔ بیشترین تراکم تا بیشترین انبساط است.  
 (ت) فاصلهٔ بین دو نقطهٔ متوالی است که در هر زمان دقیقاً در یک وضع ارتعاشی هستند.  
 ۳. در شکل ۱۵-۲ کدام نقطه با نقطهٔ A همفاز است؟

(الف) B (ب) D (پ) F (ت) G



شکل ۱۵-۲

۴. تابع موجی به صورت  $U_y = A_y \sin(\omega t - kx)$  است. نوع موج کدام است؟  
 (الف) طولی (ب) عرضی (پ) ایستاده (ت) می‌تواند طولی یا عرضی باشد
۵. یکای عدد موج کدام است؟  
 (الف)  $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$  (ب)  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  (پ)  $\frac{\text{m}}{\text{rad}}$  (ت)  $\frac{\text{rad}}{\text{m}}$
۶. موجی با سرعت  $20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  و بسامد زاویه‌ای  $80 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$  در محیطی منتشر می‌شود. عدد موج چند رادیان بر ثانیه است؟  
 (الف) ۱ (ب) ۲ (پ) ۳ (ت) ۴
۷. بر طبق اصل برهم‌نهی امواج، در نقطه‌ای که امواج به هم می‌رسند کدام رابطهٔ زیر برقرار است؟  
 (الف)  $A_t = A_1 + A_2 + A_3 + \dots$  (ب)  $\nu_t = \nu_1 + \nu_2 + \nu_3$  (پ)  $U_t = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$  (ت)  $U_t = U_1 + U_2 + U_3$
۸. در یک محیط همگن که در آن موج مکانیکی منتشر می‌شود  
 (الف) سرعت همه ذره‌ها همواره یکسان است.  
 (ب) سرعت انتشار موج ثابت است.  
 (پ) سرعت هر ذره همواره ثابت است.  
 (ت) سرعت انتشار به بسامد چشمه بستگی دارد.
۹. در کدامیک از محیطهای زیر موج مکانیکی می‌تواند به صورت طولی و عرضی منتشر شود؟  
 (الف) درون آب (ب) هوا (پ) خط راه‌آهن (ت) گاز اکسیژن

۱۰. ارتعاشی فاصله بین دو نقطه از محیط قابل ارتعاش را در مدت  $0.3T$  طی می‌کند. اختلاف فاز بین این دو نقطه چند رادیان است؟

الف)  $3/14$  (ب)  $6/28$  (پ)  $18/8$  (ت)  $1/88$

۱۱. معادله ارتعاشی چشمه  $O$  در محیطی به صورت  $y_o = 2 \sin(100\pi t + \frac{\pi}{4})$  است. تابع موج در نقطه  $M$  که به فاصله  $0.3m$  از این چشمه قرار دارد  $y_M = 2 \sin(100\pi t - \frac{\pi}{4})$  است. سرعت انتشار موج در این محیط چند متر بر ثانیه است؟

الف)  $20$  (ب)  $30$  (پ)  $40$  (ت)  $50$

۱۲. طول موج با کدام کمیت نسبت عکس دارد؟

الف) سرعت موج در محیط. (ب) بسامد چشمه.

(پ) دوره تناوب چشمه. (ت) دامنه ارتعاش.

۱۳. موج ایجاد شده در تار مرتعش و موج صوتی حاصل از آن در هوا به ترتیب از چه نوع‌اند؟

الف) طولی-عرضی (ب) طولی-طولی (پ) عرضی-عرضی (ت) عرضی-طولی

۱۴. تابع موجی در SI به صورت  $x = 0.25 \sin 2\pi t$  است. اگر سرعت انتشار موج در محیط  $5 \frac{m}{s}$  باشد، طول موج آن چند متر بر ثانیه است؟

الف)  $5$  (ب)  $0.05$  (پ)  $0.25$  (ت)  $0.15$

۱۵. تابع دو موج که در جهت محور  $x$  منتشر می‌شوند به صورت  $U_1 = 4 \sin(20\pi t - 3x)$  و

$U_2 = 4 \sin(20\pi t - 3x + \frac{\pi}{4})$  است. تابع موج برآیند کدام است؟

الف)  $U_t = 4\sqrt{2} \sin(20\pi t - 3x + \frac{\pi}{4})$

(ب)  $U_t = 8\sqrt{2} \sin(10\pi t - 3x + \frac{\pi}{4})$

(پ)  $U_t = 4\sqrt{2} \sin(20\pi t - 3x - \frac{\pi}{4})$

(ت)  $U_t = 8\sqrt{2} \sin(20\pi t - 3x - \frac{\pi}{4})$

۱۶. موج ایستاده بر اثر برهم‌نهی دو موجی به وجود می‌آید که

الف) هم‌بسامد و هم‌جهت باشند.

(ب) هم‌دامنه و هم‌جهت باشند.

(پ) در دو سوی مختلف منتشر شوند.

(ت) هم‌بسامد، هم‌راستا و هم‌دامنه باشند و در دو سوی مختلف منتشر شوند.

۱۷. در موج ایستاده هر گره تا هر شکم برابر است با

الف)  $n \frac{\lambda}{4}$  (ب)  $n \frac{\lambda}{4}$  (پ)  $(2n-1) \frac{\lambda}{4}$  (ت)  $n\lambda$

۱۸. در پدیده تداخل جای هذلولیهای با بیشینه دامنه در نقاطی است که اختلاف راه برابر باشد با

الف)  $n\lambda$  (ب)  $(2n-1) \frac{\lambda}{4}$  (پ)  $n \frac{\lambda}{4}$  (ت)  $(2n-1) \frac{\lambda}{4}$

۱۹. اختلاف فاز دو موج ویرانگر در لحظه  $t$  و در یک نقطه مشخص چقدر است؟

الف)  $n\pi$       ب)  $(2n-1)\pi$       پ)  $(2n-1)\frac{\pi}{4}$       ت)  $n\frac{\pi}{4}$

۲۰. هرگاه دو انتهای ریسمان کشیده‌ای را به دو نقطه ثابت ببندیم و بر اثر یک موج ایستاده در آن ۵

شکم موجود باشد، رابطه طول ریسمان ( $l$ ) با طول موج ایستاده ( $\lambda$ ) کدام است؟

الف)  $l = 3\lambda$       ب)  $l = \frac{5}{4}\lambda$       پ)  $l = 9\frac{\lambda}{4}$       ت)  $l = 4\lambda$

### تمرینها

۱. یک موج متناوب سینوسی در طنابی منتشر می‌شود. در زمان  $t_1$  جابه‌جایی ذره‌ای که در  $10$  سانتیمتری مبدأ قرار گرفته  $4\sqrt{2}$  و جابه‌جایی ذره‌ای که در  $25$  سانتیمتری مبدأ واقع است  $4$  سانتیمتر است. جهت حرکت هر دو ذره یکی و دامنه موج  $8\text{cm}$  است. بیشترین طول موج این حرکت ارتعاشی چقدر است؟

پاسخ:  $360\text{cm}$

۲. در یک محیط قابل ارتعاش امواجی با بسامد  $100\text{Hz}$  و دامنه  $2\text{cm}$  منتشر می‌شوند. اگر در مبدأ زمان جابه‌جایی ارتعاشی چشمه نصف جابه‌جایی بیشینه باشد مطلوب است الف) معادله ارتعاشی چشمه موج.

ب) تابع موج نقطه‌ای به فاصله  $50$  سانتیمتر از این چشمه. سرعت انتشار موج  $50\frac{\text{m}}{\text{s}}$  است.

پاسخ:  $U_y = 2 \times 10^{-2} \sin\left(200\pi t - \frac{11\pi}{6}\right)$ ,  $y = 2 \times 10^{-2} \sin\left(200\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$

۳. سرعت موج عرضی در تارهای مرتعش از رابطه  $V = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$  به دست می‌آید.  $F$  نیروی کشش تار و  $\mu$  جرم واحد طول تار است. رابطه سرعت با چگالی تار چگونه است؟

پاسخ:  $V = \sqrt{\frac{F}{A\rho}} = \frac{2}{d}\sqrt{\frac{F}{\rho\pi}}$

۴. معادله ارتعاش نقطه‌ای از سطح آب به صورت  $U = 4 \sin 100\pi t$  است. اگر موج حاصل با سرعت  $6\frac{\text{m}}{\text{s}}$  از چشمه دور شود مطلوب است الف) طول موج.

ب) تابع موج نقطه‌ای که به فاصله  $2$  متر از این چشمه قرار دارد.

پاسخ:  $U = 4 \sin\left(100\pi t - \frac{100\pi}{3}\right)$  و  $12\text{cm}$

۵. ذره‌ای به جرم یک گرم روی پاره‌خطی به طول  $10$  سانتیمتر در هر دقیقه  $300$  نوسان انجام می‌دهد. معادله حرکت آن را بنویسید. در صورتی که در مبدأ زمان در نصف جابه‌جایی بیشینه باشد، حداکثر

شتاب این متحرک چقدر است؟

پاسخ:  $a = 50\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ,  $y = 5 \times 10^{-2} \sin\left(10\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$

۶. معادله حرکت ارتعاشی چشمه یک موج در SI به صورت  $U_y = 2 \times 10^{-2} \sin 100\pi t$  است. ارتعاشها با سرعت  $V$  در محیط منتشر می شود و تابع موج در نقطه ای به فاصله  $x$  از چشمه به صورت  $U_y = 2 \times 10^{-2} \sin \left( 100\pi t - \frac{4\pi x}{3} \right)$  است. مقدار  $V$  را به دست آورید.

۷. معادله چشمه موج در مبدأ،  $U_x = 2 \sin 314t$  (بر حسب میلیمتر) است. نقاط  $M'$  و  $M$  به ترتیب در فاصله های  $50^\circ$  و  $25^\circ$  سانتیمتری مبدأ قرار دارند. در یک لحظه جابه جایی  $M$  برابر  $2$  میلیمتر و جابه جایی  $M'$  برابر  $1$  میلیمتر است. مطلوب است طول موج و سرعت انتشار موج.

پاسخ:  $150^\circ \text{cm}$  و  $75 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

۸. دو موج به معادله های  $y_1 = 6 \sin \left( 10\pi t + \frac{\pi}{6} \right)$  و  $y_2 = 10 \sin \left( 10\pi t + \frac{\pi}{6} \right)$  همزمان به نقطه ای می رسند. معادله موج بر هم نهاده در آن نقطه را محاسبه کنید.

پاسخ:  $y = 15.96 \sin(10\pi t + 0.22\pi)$

۹. دو موج که تابع موج آنها  $U_1 = 0.04 \sin(20\pi t - 6x)$  و  $U_2 = 0.04 \sin(20\pi t - 6x + \frac{\pi}{4})$  است در یک نقطه برهم نهی دارند. تابع موج برآیند را به دست آورید.

پاسخ:  $U_z = 0.056 \sin \left( 20\pi t - 6x + \frac{\pi}{4} \right)$

۱۰. تابع دو موج در نقطه  $A$  به صورت  $U_y = 3 \sin(100\pi t - 6)$  و  $U_x = 3 \sin(100\pi t + 6)$  است. دامنه موج ایستاده در نقطه  $A$  حاصل از برهم نهی این دو موج را به دست آورید.

پاسخ:  $6 \cos 6$

۱۱. تابع یک موج در نقطه  $A$  در مبدأ  $O$  به فاصله  $d_1$  به صورت  $U_A = 5 \sin \left( 100\pi t - \frac{\pi}{6} \right)$  و در نقطه  $B$  به فاصله  $d_2$  از همان مبدأ که در همان امتداد  $OA$  قرار دارد به صورت  $U_B = 5 \sin \left( 100\pi t - \frac{\pi}{12} \right)$  است. اگر سرعت انتشار موج در محیط  $48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  باشد، کمترین طول  $AB$  چقدر است؟

پاسخ:  $0.4 \text{m}$

۱۲. ارتعاشهای هم امتدادی به معادلات  $y_O = 2 \sin 20\pi t$  و  $y_{O'} = 2\sqrt{3} \cos 20\pi t$  در دو نقطه  $O$  و  $O'$  از محیط قابل ارتعاشی تولید می شود. معین کنید:

(الف) طول موج ارتعاشها را در صورتی که سرعت انتشار در محیط  $6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  باشد.

(ب) تابع موج را در نقطه  $M$  به فاصله  $120 \text{cm}$  از  $O$  و  $30 \text{cm}$  از  $O'$ .

(پ) معادله موج حاصل از ترکیب این دو موج را در نقطه  $M$ .

پاسخ:  $2 \sin 20\pi t$ ،  $60 \text{cm}$  و  $2\sqrt{3} \sin \left( 20\pi t - \frac{\pi}{4} \right)$  و  $4 \sin \left( 20\pi t - \frac{\pi}{4} \right)$



## امواج صوتی

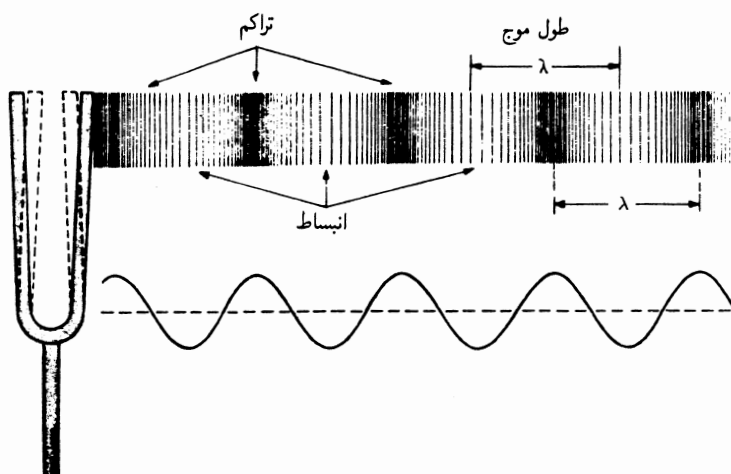
### ۳-۱ تولید امواج صوتی

چشمه‌های صوتی اجسام مرتعشی هستند که در محیط اطراف خود امواجی به وجود می‌آورند. این امواج، انرژی مکانیکی را از چشمه به گوش منتقل می‌کنند و پرده گوش را به ارتعاش در می‌آورند و سبب احساس شنوایی می‌شوند.

امواج مکانیکی با بسامدهای متفاوت می‌توانند در محیط کشسان منتشر شوند، ولی گوش سالم انسان فقط بسامدهای بین  $20\text{ Hz}$  تا  $20000\text{ Hz}$  را می‌شنود. ارتعاشهایی که بسامد آنها بیش از  $20000$  هرتز باشد امواج فراصوتی<sup>۱</sup> و ارتعاشهای با بسامد کمتر از  $20$  هرتز را امواج فروصوتی<sup>۲</sup> می‌نامند. امواج بین  $20$  تا  $20000$  هرتز امواج شنیدنی<sup>۳</sup> هستند. امواج صوتی در هوا و درون آب، به صورت طولی، منتشر می‌شوند ولی در محیطهای جامد می‌توانند به صورت عرضی هم انتشار یابند. سرعت صوت به شرایط و حالت آن بستگی دارد و مستقل از دامنه و بسامد صوت است.

برای بررسی چگونگی تولید صوت، حرکت ارتعاشی یک دیافازن را در نظر می‌گیریم. دیافازن دو شاخه فلزی دارد که بر اثر ضربه ارتعاش می‌کنند. ارتعاش این شاخه‌ها هوای اطراف آنها را مطابق شکل ۳-۱ آشفته می‌کند. وقتی که شاخه به طرف راست منحرف می‌شود مولکولهای هوا در جلو آن فشرده می‌شوند. زیاد شدن چگالی مولکولی، یا بیش از حد عادی شدن فشار را تراکم می‌نامند. وقتی شاخه دیافازن به طرف چپ منحرف می‌شود، مولکولها پخش می‌شوند و فشار هوا در طرف راست شاخه دیافازن کمتر از حد عادی می‌شود؛ این حالت را انبساط می‌نامند. هنگامی که دیافازن ارتعاش می‌کند، تراکمها و انبساطهای متوالی تولید و از دیافازن دور می‌شوند. چنانچه گوش شنونده‌ای در مسیر این تراکمها و انبساطها قرار گیرد ممکن است صدا را احساس کند.

1- ultrasons    2- infrasons    3- audible



شکل ۱-۳ وقتی دیابازن ارتعاش می‌کند تراکمها و انبساطها به طرف خارج دیابازن حرکت می‌کنند. قله‌های موج متناظر با تراکمها و دره‌های موج متناظر با انبساطها هستند.

### ۲-۳ شدت صوت

هنگامی که شاخه‌های دیابازن، یا هر چشمه صوتی دیگر به ارتعاش در می‌آیند بر محیط مجاور نیرو وارد می‌کنند و آن را به ارتعاش در می‌آورند. بنابراین چشمه کار انجام می‌دهد. توان هر چشمه صوتی مقدار کاری است که در هر ثانیه انجام می‌دهد، و از این رو،

$$P = \frac{W}{t} \quad (۱-۳)$$

در این رابطه  $P$ ، توان چشمه برحسب وات،  $W$  کار انجام شده برحسب ژول و  $t$  زمان برحسب ثانیه است. کاری که چشمه صوتی انجام می‌دهد به صورت انرژی صوتی در هوا یا هر محیط دیگر انتشار می‌یابد. مقدار انرژی که در واحد زمان از واحد سطح عمود بر راستای انتشار می‌گذرد شدت صوت نامیده می‌شود. شدت صوت را با  $I$  نشان می‌دهند و داریم

$$I = \frac{P}{A} \quad (۲-۳)$$

$P$  توان صوتی گذرنده از سطح به مساحت  $A$  برحسب وات و یکای شدت صوت، وات بر متر مربع  $\left(\frac{W}{m^2}\right)$  است. شدت صوت در هر نقطه با مجذور دامنه نوسان  $(A^2)$  و مجذور بسامد موجهای صوتی  $(\nu^2)$  نسبت مستقیم دارد. اگر چشمه صوت کوچک و محیط انتشار صوت سه بعدی و همگن باشد، شدت صوت در هر نقطه با مجذور فاصله آن نقطه تا چشمه صوت  $(R^2)$  نسبت عکس دارد، به طوری که می‌توان نوشت

$$I = k \frac{A^2 \nu^2}{R^2} \quad (۳-۳)$$

$k$  ضریبی است که به جنس محیط بستگی دارد.



ضعیفترین صدایی که انسان می‌تواند با بسامد ۱۰۰۰ هرتز بشنود دارای شدت  $10^{-12} \frac{W}{m^2}$  است. این شدت را آستانه شنوایی می‌نامند. بلندترین صدایی که گوش انسان می‌تواند تحمل کند دارای شدت  $1 \frac{W}{m^2}$  است، که آستانه دردناکی نامیده می‌شود.

□ پرسش ۱. یکای  $k$  در رابطه  $I = k \frac{A^2 \nu^2}{R^2}$  چیست؟

الف)  $\frac{J.s}{m^2}$       ب)  $\frac{W}{m^2}$       پ)  $\frac{W.s}{m^2}$       ت) J.s

مثال ۱. یک چشمه صوتی امواجی با توان یکنواخت ۶۰ وات در همه امتدادها گسیل می‌کند. در چه فاصله‌ای شدت صوت از آستانه دردناکی کمتر و از آستانه شنوایی بیشتر است؟

حل: رابطه توان با شدت و فاصله چنین است

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2}, \quad r = \sqrt{\frac{P}{4\pi I}}$$

برای نزدیکترین فاصله  $I_{\max} = 1 \frac{W}{m^2}$  و  $r_1 = \sqrt{\frac{60}{4 \times 3.14 \times 1}} = 2.2 \text{ m}$  و برای دورترین فاصله  $I_{\min} = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$  داریم

$$r_2 = \sqrt{\frac{60}{4 \times 3.14 \times 10^{-12}}} = 2.2 \times 10^6 \text{ m}$$

پس  $2.2 \times 10^6 \text{ m} \geq r \geq 2.2 \text{ m}$

▲

### ۳-۳ تراز شدت صوت

نسبت شدت بلندی صوت قابل شنیدن (آستانه دردناکی) به شدت ضعیفترین صوت (آستانه شنوایی) عدد بسیار بزرگ  $10^{12}$  است و از این رو برای مقایسه صوتها از لگاریتم این نسبت استفاده می‌شود. به این ترتیب تراز شدت بلندترین صوت، یعنی لگاریتم نسبت شدت آن به شدت صوت مبنا (ضعیفترین صوت) برابر ۱۲ بل (B) خواهد بود

$$\beta = \log \frac{I}{I_0} \quad (۴-۳)$$

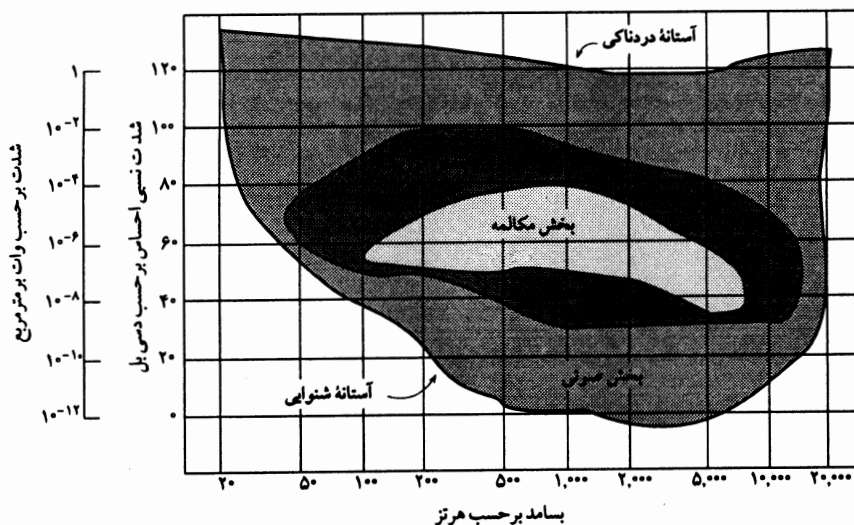
$$\beta = \log \frac{1}{10^{-12}} = 12 \text{ B}$$

نظر به اینکه بل یکای نسبتاً بزرگی است، یکای دسی بل (dB) را که برابر  $\frac{1}{10}$  بل است به کار

می‌برند و در نتیجه رابطه ۳-۴ به صورت زیر نوشته می‌شود

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (\text{بر حسب dB}) \quad (۵-۳)$$

امواج صوتی / ۴۱



شکل ۲-۳ نمودار شنوایی گوش انسان

جدول ۱-۳ شدت و تراز برخی اصوات معمولی

شدت صوت		بر حسب میکرووات بر متر مربع	نوع صوت
بل	دسی بل		
۰	۰	۱۰ <sup>-۶</sup>	استانه شنوایی
۱۰	۱	۱۰ <sup>-۵</sup>	صدای نفس کشیدن معمولی
۲۰	۲	۱۰ <sup>-۴</sup>	صدای خش خش برگ درختان در نسیم
۴۰	۴	۱۰ <sup>-۲</sup>	صحبت کردن (از فاصله یک متر)
۶۰	۶	۱۰ <sup>۰</sup>	همهمه در فروشگاه یا دفتر کار
۷۰	۷	۱۰ <sup>۱</sup>	ترافیک شلوغ
۱۰۰	۱۰	۱۰ <sup>۲</sup>	قطار زیرزمینی
۱۲۰	۱۲	۱۰ <sup>۴</sup>	استانه دردناکی
۱۳۰	۱۳	۱۰ <sup>۵</sup>	مسلسل
۱۴۰	۱۴	۱۰ <sup>۸</sup>	غرش هواپیمای جت معمولی در موقع بلند شدن
۱۷۰	۱۷	۱۰ <sup>۱۱</sup>	موشک فضایی موقع بلند شدن از زمین

در شکل ۲-۳ نمودار شنوایی گوش انسان و در جدول ۱-۳ شدت و تراز شدت برخی از اصوات معمولی آمده است.

□ پرسش ۲. یک چشمه صوتی به طور یکنواخت در همه جهتها ارتعاشهای صوتی گسیل می‌دارد. اگر شدت صوت در فاصله ۱۰ m از چشمه ۶۰ dB باشد، شدت صوت در فاصله ۱۰۰ m چند دسی بل است؟

۲۰ (ت)

۳۰ (پ)

۴۰ (ب)

۵۰ (الف)

مثال ۲. توان متوسط صدای شخصی در حالت عادی  $10^{-5} \text{ W}$  و در حالت فریاد زدن  $3 \times 10^{-2} \text{ W}$  است. اگر این شخص در بالای برجی قرار گیرد، شدت صوت و تراز شدت صوت آن برای کسی که در ۵ متری از او قرار دارد در این دو حالت چقدر است؟

حل: در حالت عادی شدت صوت برابر است با

$$I_1 = \frac{P_1}{A} = \frac{P_1}{4\pi R_1^2} = \frac{10^{-5}}{314} = 3.18 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

و تراز شدت صوت

$$\beta_1 = 10 \log \frac{I_1}{I_0} = 10 \log \frac{3.18 \times 10^{-8}}{10^{-12}} = 45 \text{ dB}$$

در حالت فریاد زدن شدت صوت برابر است با

$$I_2 = \frac{P_2}{A} = \frac{3 \times 10^{-2}}{314} = 9.55 \times 10^{-5} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

و تراز شدت صوت

$$\beta_2 = 10 \log \frac{9.55 \times 10^{-5}}{10^{-12}} = 80 \text{ dB}$$



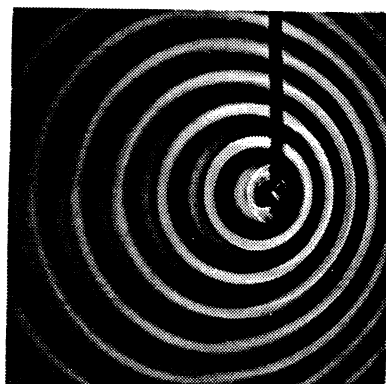
### ۴-۳ اثر دوپلر

هنگامی که شنونده به سوی یک چشمه ساکن صوت حرکت کند، بسامد صوتی که دریافت می‌کند بیشتر از حالتی است که شخص ساکن باشد ( $\nu_o > \nu_s$ ). چنانچه شنونده از چشمه صوت ساکن دور شود، ضمن حرکت بسامد صوتی را که می‌شنود کمتر از بسامد چشمه صوت است ( $\nu_o < \nu_s$ ). در صورتی که شخص شنونده و چشمه صوت نسبت به هم ساکن باشند، بسامد صوتی که شخص دریافت می‌کند برابر بسامد واقعی چشمه است. این پدیده را اثر دوپلر می‌نامند. اثر دوپلر هنگامی ظاهر می‌شود که شنونده و چشمه صوت نسبت به یکدیگر حرکت کنند.

علت تغییر بسامد صوت دریافتی آن است که وقتی شنونده و چشمه به یکدیگر نزدیک می‌شوند تعداد امواجی که شنونده در هر ثانیه دریافت می‌کند بیشتر از بسامد چشمه است. برعکس در هنگام دور شدن شنونده از چشمه تعداد امواج دریافتی کمتر از بسامد چشمه خواهد بود (شکل ۳-۳). اندازه‌گیری و محاسبه نشان می‌دهد که میان  $\nu_s$  بسامد چشمه،  $\nu_o$  بسامد دریافتی،  $V$  سرعت انتشار صوت در محیط،  $V_s$  سرعت حرکت چشمه و  $V_o$  سرعت شنونده، رابطه زیر برقرار است

$$\frac{\nu_o}{V - V_s} = \frac{\nu_s}{V - V_o} \quad (۶-۳)$$

دوپلر فیزیکدان اتریشی، در مقاله‌ای که به سال ۱۸۴۲/۱۲۲۱ نوشته است، توجه خود را به رنگ اجسام لومینسانس یعنی اجسامی که در دمای عادی از خود تابش مرئی گسیل می‌دارند معطوف



شکل ۳-۳ وقتی مولد موج در سطح موج‌نا حرکت کند، امواج در جلو چشمه به یکدیگر نزدیک و در پشت آن از هم دور می‌شوند.

داشته و نوشته است که رنگ اجسام متحرک مانند صوت حاصل از آنها به نسبت سرعتی که با بیننده یا شنونده دارند تغییر می‌کند. دوپلر مشخص کرد که این پدیده، که به نام او «پدیده دوپلر» شهرت یافت، برای همه امواج مکانیکی و الکترومغناطیسی روی می‌دهد.

در رابطه ۳-۶ جهت سرعت صوت را مثبت اختیار می‌کنیم و سوی سرعت چشمه یا ناظر را با آن مقایسه می‌کنیم. اگر هریک در همان جهت انتشار صوت حرکت کنند، سرعت آنها مثبت و در غیر این صورت منفی خواهد بود.

□ پرسش ۳. هواپیمایی با سرعت صوت به شهری نزدیک می‌شود. صوت هواپیما را مردم ساکن شهر با چه بسامدی می‌شنوند؟

$$\text{الف) } \nu_o = 2\nu_s \quad \text{ب) } \nu_o = \infty \quad \text{پ) } \nu_o = 0 \quad \text{ت) } \nu_o = 4\nu_s$$

مثال ۳. دو اتومبیل A و B بوق‌زنان با سرعت‌های  $20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  و  $30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  در یک جاده راست حرکت می‌کنند. اگر بسامد صدای بوق دو اتومبیل برابر و هریک  $1000$  هرتز باشد، بسامد صوتی را که راننده A و راننده B می‌شنوند تعیین کنید،  $V = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

حل: این مثال دارای چهار حالت است و فرمول کلی  $\frac{\nu_s}{V - \nu_o} = \frac{\nu}{V - V_s}$  را در حالت‌های مختلف به‌کار می‌بریم.

الف) راننده اتومبیل A شنونده است. هرگاه دو اتومبیل به سوی یکدیگر حرکت کنند داریم

$$\nu_B = 1000 \text{ Hz}, \quad V_A = +20 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad V_B = +30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\nu_A = \nu_B \frac{V - V_A}{V - V_B} = 1000 \times \frac{340 - (-20)}{340 - (+30)} = 1161 \text{ Hz}$$

هرگاه دو اتومبیل در خلاف هم حرکت کنند  $V_A = +20 \frac{m}{s}$  و  $V_B = -30 \frac{m}{s}$  داریم

$$\nu'_A = 1000 \times \frac{340 - (+20)}{340 - (-30)} = 864 \text{ Hz}$$

ب) راننده B شنونده است. هرگاه دو اتومبیل به سوی یکدیگر حرکت کنند،  $V_A = +20 \frac{m}{s}$  و

$$V_B = -30 \frac{m}{s} \text{ پس}$$

$$\nu_B = \nu_A \frac{V - V_B}{V - V_A} = 1000 \times \frac{340 - (-30)}{340 - (+20)} = 1156 \text{ Hz}$$

هرگاه دو اتومبیل در خلاف جهت هم حرکت کنند،  $V_A = +20 \frac{m}{s}$  و  $V_B = -30 \frac{m}{s}$  داریم

$$\nu'_B = 1000 \times \frac{340 - (+30)}{340 - (-20)} = 861 \text{ Hz}$$

▲

## خلاصه فصل

امواج صوتی، امواجی مکانیکی‌اند که در هوا به‌طور طولی منتشر می‌شوند. بسامد امواج شنیدنی میان ۲۰ هرتز و ۲۰ کیلو هرتز است. امواج فروصوتی بسامدی کمتر از ۲۰ هرتز و امواج فراصوتی بسامدی بیشتر از ۲۰ هرتز دارند. سرعت صوت به جنس، حالت و دمای محیط بستگی دارد و در یک محیط همگن سرعت ثابت و انتشار صوت یکنواخت است.

شدت صوت انرژی است که توسط صوت در واحد زمان از واحد سطح عبور می‌کند. شدت صوت با مجذور بسامد و مجذور دامنه نسبت مستقیم دارد. واحد شدت صوت وات بر متر مربع  $\frac{W}{m^2}$  است. شدت امواج شنیدنی میان  $10^{-12} \frac{W}{m^2}$  (آستانه شنوایی) تا  $1 \frac{W}{m^2}$  (آستانه دردناکی) است. تراز شدت هر صوت برابر است با لگاریتم نسبت شدت آن صوت ( $I$ ) به شدت صوتی ( $I_0$ ) که به‌عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود. یکای شدت صوت بل ( $B$ ) و دسی‌بل ( $dB$ ) است.

اثر دوپلر تغییری است که در بسامد موج چشمه و موج دریافتی حاصل می‌شود. هنگامی که چشمه یا دریافت‌کننده یا هر دو حرکت کنند، رابطه دوپلر به‌صورت زیر است

$$\frac{\nu'}{V - V_s} = \frac{\nu}{V - V_o}$$

## هدفهای آموزشی

اکنون که این فصل را به پایان رسانده‌اید باید بتوانید

- چگونگی تولید صوت را شرح دهید.
- مشخصات امواج صوتی را بیان کنید.
- امواج صوتی، فروصوتی و فراصوتی را تعریف کنید.
- سرعت صوت در جامدات، مایعات و گازها را باهم مقایسه کنید.

- شدت صوت را تعریف کنید.
- تراز شدت صوت را تعریف کنید.
- دسی بل را تعریف کنید.
- آستانه شنوایی و آستانه دردناکی را تعریف کنید.
- اثر دوپلر را تحلیل کنید.

## خود را پیاژه‌ها پید

### پرسشها

۱. می‌دانیم که صوت بر اثر ارتعاش اجسام به وجود می‌آید. چه شرایطی لازم است تا ارتعاش یک جسم، صوت به وجود آورد؟
۲. تفاوت امواج صوتی، فروصوتی و فراصوتی چیست؟
۳. سرعت صوت با حالت محیط، جنس، دما و انرژی چشمه، چه رابطه‌ای دارد؟
۴. شدت صوت چیست، به چه عواملی بستگی دارد و یکای آن کدام است؟
۵. نسبت آستانه دردناکی به آستانه شنوایی چقدر است؟
۶. تراز شدت صوت چیست؟
۷. یکای تراز شدت صوت و یکای شدت صوت کدام است؟
۸. اثر دوپلر چیست، آن را شرح دهید و تحلیل کنید.
۹. در رابطه دوپلر یکای هر یک از کمیتها چیست؟
۱۰. پدیده دوپلر درباره کدام امواج درست است. آیا شامل نور هم می‌شود؟

### پرسشهای چهارگزینه‌ای

۱. صوت چیست؟
  - الف) موجی است مکانیکی، عرضی با بسامد ۲۰ کیلومتر.
  - ب) موجی است الکتریکی، طولی درگستره بسامدهای شنوایی.
  - پ) موجی است که شدت آن بیش از یک میکرووات بر متر مربع است.
  - ت) موجی است که در برخورد با پرده گوش سبب احساس شنیدن می‌شود.
۲. کمترین و بیشترین طول موجی که برگوش انسان اثر می‌کند چقدر است؟  $V = 340 \frac{m}{s}$ 
  - الف) ۱۷ میلیمتر - ۱۷ متر
  - ب)  $\frac{1}{17}$  متر -  $\frac{100}{17}$  متر
  - پ) ۱۷ سانتیمتر - ۱۷۰ متر
  - ت) ۱۷ متر - ۱۷۰ متر

۳. صدای بوق اتومبیلی از رادیو شنیده می‌شود. نوع موج از بوق تا گوش شنونده چیست؟

(الف) مکانیکی، مکانیکی، الکترومغناطیسی.

(ب) مکانیکی، الکترومغناطیسی، مکانیکی.

(پ) الکترومغناطیسی، مکانیکی، مکانیکی.

(ت) الکترومغناطیسی، مکانیکی، الکترومغناطیسی.

۴. کلید یک زنگ الکتریکی را که در زیر یک ظرف شیشه‌ای خالی از هوا قرار دارد می‌بندیم. در این

صورت برخورد چکش به کاسه زنگ را می‌بینیم و صدای آن را نمی‌شنویم. نتیجه می‌گیریم که

(الف) هر نوع موجی می‌تواند از خلأ بگذرد.

(ب) هر نوع موجی نمی‌تواند از خلأ بگذرد.

(پ) امواج مکانیکی از خلأ می‌گذرند و الکترومغناطیسی نمی‌گذرند.

(ت) امواج الکترومغناطیسی از خلأ می‌گذرند و مکانیکی نمی‌گذرند.

۵. در کدام دسته مواد زیر، مواد به ترتیب افزایش سرعت صوت منظم‌اند؟

(الف) هوای خشک، سرب، الکل، هیدروژن.

(ب) هیدروژن، الکل، سرب، هوای خشک.

(پ) هوای خشک، هیدروژن، الکل، سرب.

(ت) سرب، الکل، هیدروژن، هوای خشک.

۶. بار الکتریکی  $+q$  روی پاره خط  $ABC$  نوسان می‌کند (شکل ۳-۴). در نقطه  $D$

کدام میدان تغییر می‌کند؟

(الف) فقط میدان الکتریکی.

(ب) فقط میدان مغناطیسی.

(پ) میدان الکتریکی و مغناطیسی.

(ت) میدان گرانشی.

C  
A  
B  
D

شکل ۳-۴

۷. هرگاه شدت موج در یک نقطه را به  $I$  و بسامد آن موج را با  $\nu$  و دامنه موج را با  $A$  و فاصله این

نقطه تا چشمه را با  $R$  نشان دهیم، کدام رابطه معرف شدت موج خواهد بود؟

$$I = k \frac{A^2 \nu^2}{R} \quad (\text{ب})$$

$$I = k \frac{A^2 \nu^2}{R^2} \quad (\text{ت})$$

$$I = k \frac{A \nu}{R} \quad (\text{الف})$$

$$I = k \frac{A^2 \nu}{R^2} \quad (\text{پ})$$

۸. شدت موج در یک نقطه با کدام عامل نسبت مستقیم دارد؟

(ب) مجذور دامنه.

(الف) دامنه موج.

(ت) مجذور فاصله تا چشمه موج.

(پ) بسامد موج.

۹. شدت صوتی در یک نقطه  $\frac{W}{m^2} \times 10^{-8}$  است. اگر بسامد، دامنه و فاصله از چشمه نقطه‌ای دو برابر شوند، شدت صوت چند وات بر متر مربع خواهد شد؟

الف)  $2 \times 10^{-8}$  (ب)  $4 \times 10^{-8}$  (پ)  $8 \times 10^{-8}$  (ت)  $10^{-9}$

۱۰. شدت صوتی  $\frac{W}{m^2} \times 10^{-7}$  است، تراز شدت آن چند دسی‌بل است؟

الف) ۷۰ (ب) ۶۰ (پ) ۵۰ (ت) ۴۰

۱۱. فاصله خود را از یک چشمه صوتی ۳ برابر می‌کنیم، در این حالت تراز شدت احساس نسبی تقریباً چند دسی‌بل کاهش می‌یابد؟

الف) ۱ (ب) ۳ (پ) ۹ (ت) ۱۰

۱۲. تراز شدت صدای آذیری که در فاصله ۳۰ متری قرار دارد ۱۰۰ دسی‌بل است. شدت صوت این آذیر در همان نقطه چند وات بر متر مربع است؟

الف)  $10^{-5}$  (ب)  $3 \times 10^{-6}$  (پ)  $2 \times 10^{-2}$  (ت)  $10^{-2}$

۱۳. اگر چشمه صوتی ساکن باشد و شنونده با سرعت صوت به چشمه نزدیک شود، نسبت بسامد صوتی که می‌شنود به بسامد ارتعاشی چشمه برابر است با

الف)  $\frac{1}{4}$  (ب)  $\frac{3}{4}$  (پ) ۱ (ت) ۲

۱۴. قطاری سوت زنان با سرعتی برابر  $\frac{1}{15}$  سرعت صوت به شخصی که کنار ریلها ایستاده است نزدیک و سپس از او دور می‌شود. اگر بسامد صوت دریافتی را هنگام نزدیک شدن با  $\nu_1$  و دور شدن با  $\nu_2$  نشان دهیم نسبت  $\frac{\nu_1}{\nu_2}$  کدام است؟

الف)  $\frac{7}{8}$  (ب)  $\frac{8}{7}$  (پ)  $\frac{14}{16}$  (ت)  $\frac{16}{15}$

۱۵. یک چشمه صوتی با سرعت  $\frac{1}{5}$  سرعت صوت و شنونده‌ای با سرعت  $\frac{1}{4}$  سرعت صوت در خلاف جهت هم حرکت می‌کنند و از هم دور می‌شوند. نسبت طول‌موج چشمه صوت به طول موجی که شنونده دریافت می‌کند کدام است؟

الف)  $\frac{19}{24}$  (ب)  $\frac{19}{25}$  (پ)  $\frac{24}{19}$  (ت)  $\frac{25}{19}$

۱۶. شخصی در کنار ریل راه آهن ایستاده است و قطاری از کنار او می‌گذرد. اگر بسامد سوت قطار به بسامد صوتی که شخص می‌شنود  $\frac{5}{4}$  باشد، سرعت قطار چقدر است؟ سرعت صوت  $340 \frac{m}{s}$  است.

الف)  $85 \frac{m}{s}$  (ب)  $58 \frac{m}{s}$  (پ)  $24 \frac{m}{s}$  (ت)  $42 \frac{m}{s}$

۱۷. بسامد یک سوت الکتریکی ۵۰۰ Hz است. آن را به انتهای ریسمانی به طول یک متر می‌بندیم و با سرعت ثابت ۴۰۰ دور بر دقیقه حول انتهای دیگر ریسمان به گردش درمی‌آوریم. سطح دوران سوت با امتداد مرکز دوران و شنونده چه زاویه‌ای باید بسازد تا بسامد صوتی که شنونده، از فاصله



دور می‌شنود همان  $500 \text{ Hz}$  باشد؟

الف) صفر      ب)  $60^\circ$       پ)  $90^\circ$       ت)  $180^\circ$

۱۸. شنونده‌ای با سرعت  $V_s$  به دنبال یک چشمه صوتی متحرک با بسامد  $1000$  هرتز، و سرعت  $V_s$  در همان جهت، حرکت می‌کند. اگر سرعت صوت برابر  $V$  و  $V_s = V_o = V$  باشد، بسامد صوتی که شنونده دریافت می‌کند چقدر است؟

الف)  $500 \text{ Hz}$       ب)  $1000 \text{ Hz}$       پ)  $2000 \text{ Hz}$       ت)  $400 \text{ Hz}$

۱۹. شخصی در کنار خیابان ایستاده است و اتومبیلی با سرعت  $36$  کیلومتر بر ساعت بوق زنان از مقابل او می‌گذرد. اگر بسامد بوق اتومبیل  $1360 \text{ Hz}$  و سرعت صوت در محیط  $330 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  باشد، تغییر بسامد بوق برای شنونده چقدر است؟

الف)  $30$  هرتز افزایش.      ب)  $82$  هرتز کاهش.

پ)  $60$  هرتز کاهش.      ت)  $20$  هرتز افزایش.

۲۰. در کدامیک از موارد زیر از پدیده تشدید استفاده می‌شود؟

الف) سونوگرافی (عکسبرداری با امواج صوتی).

ب) رادیوگرافی (عکسبرداری با امواج الکترومغناطیسی).

پ) سنگ شکن کلیه.

ت) سونار (تشخیص مانع با صوت).

### تمرینها

۱. یک چشمه کوچک، امواج صوتی را با توان  $100$  وات گسیل می‌دارد.

الف) شدت صوت در  $4$  متری این چشمه چقدر است؟

ب) در چه فاصله‌ای از چشمه تراز صوتی  $50$  دسی‌بل است؟

پاسخ:  $8888 \text{ m}$  و  $\frac{1}{4} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

۲. یک چشمه صوتی امواجی با توان  $20$  وات گسیل می‌کند. از چه فاصله‌ای دورتر شدت صوت از

آستانه شنوایی کمتر است؟

پاسخ:  $1/25 \text{ m}$

۳. تراز صوتی یک چشمه در مکانی حدود  $30$  دسی‌بل و تراز صوتی مکالمه عادی در آن مکان تقریباً

$50$  دسی‌بل است. چند چشمه می‌توانند شدتی مساوی با شدت مکالمه عادی تولید کنند؟

پاسخ:  $100$  چشمه

۴. دو چشمه صوتی کوچک یکسان به فاصله‌های  $10$  متر و  $20$  متر از شنونده قرار دارند. اگر تراز

صوتی چشمه نزدیکتر  $40$  دسی‌بل باشد، مطلوب است

الف) توان هریک از دو چشمه.

ب) تراز صوتی چشمه دورتر.

پاسخ:  $3/14 \times 10^{-6} W$  و  $36$  دسی بل

۵. بسامد آذیر یک ماشین آتش‌نشانی  $1200 \text{ Hz}$  است. تغییر بسامد صوتی برای شنونده ساکنی که در

کنار خیابان ایستاده است چند هرتز است؟ ابتدا ماشین با سرعت  $30$  متر بر ثانیه به شخص نزدیک

و سپس از آن دور می‌شود. سرعت صوت در هوا  $330 \frac{m}{s}$  است.

پاسخ:  $220 \text{ Hz}$

۶. آمبولانسی آذیر کشان با سرعت  $108 \frac{km}{h}$  در جاده‌ای حرکت می‌کند. اگر بسامد آذیر  $3000 \text{ Hz}$

باشد، طول موج صوت در جلو و عقب آمبولانس چقدر است؟ سرعت صوت  $330 \frac{m}{s}$  است.

پاسخ: طول موج در جلو آمبولانس،  $0/1 \text{ m}$  و در عقب آن،  $0/12 \text{ m}$  است.



## امواج الکترومغناطیسی

### ۱-۴ مقدمه

امواج مکانیکی بر اثر ارتعاش ذره‌های ماده به وجود می‌آیند و در محیطی که ذره‌های ماده موجود باشند منتشر می‌شوند. بنابر این پیدایش و انتشار آنها به وجود ماده وابسته است. به سخن دیگر، در فضای خلأ امواج مکانیکی نه به وجود می‌آیند و نه منتشر می‌شوند.

امواج الکترومغناطیسی را بارهای الکتریکی شتابدار به وجود می‌آورند و برای انتشار به هیچ ماده مرتعشی نیاز ندارند و می‌توانند در فضای خالی از ماده هم حرکت کنند. ارتعاش این امواج مربوط به وجود اتمها و مولکولها و ذره‌های مادی دیگر نیست، بلکه ترکیبی از دو میدان نوسانی الکتریکی  $E$  و مغناطیسی  $B$  است که برهم عمودند.

برای روشن شدن چگونگی پیدایش این میدانها به اختصار به معرفی این میدانها می‌پردازیم. اورستد<sup>۱</sup> در سال ۱۸۲۰/۱۱۹۹ نشان داد که در اطراف سیم حامل جریان الکتریکی میدان مغناطیسی به وجود می‌آید و عقربه قطب‌نما در این میدان همواره عمود بر راستای جریان می‌ایستد (شکل ۱-۴). آمپر<sup>۲</sup> مشخص کرد که جهت میدان مغناطیسی به جهت جریان مربوط است. سپس معلوم شد که بزرگی میدان مغناطیسی به مقدار جریان بستگی دارد و چنانچه جریان متناوب باشد، میدان نیز متناوب است. اگر معادله جریان در یک رسانا به صورت  $I = I_{\max} \sin \omega t$  باشد، معادله میدان مغناطیسی در یک نقطه در اطراف سیم به صورت  $B = B_{\max} \sin \omega t$  است.  $B_{\max}$  به جریان و فاصله نقطه مورد نظر تا رسانای حامل جریان بستگی دارد.

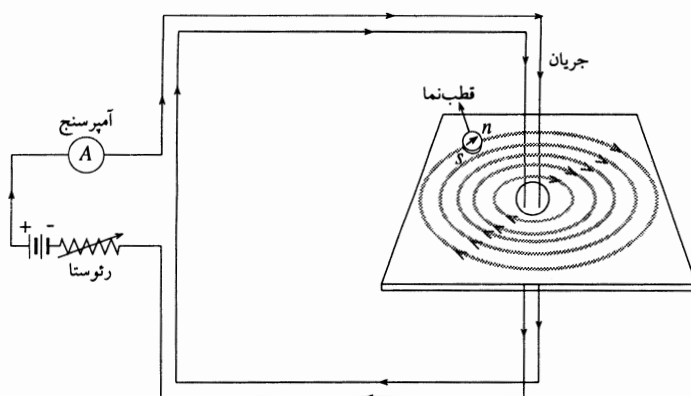
فارادی<sup>۳</sup>، در سال ۱۸۳۱/۱۲۱۰ به دنبال آزمایشهای متعدد دریافت که اگر آهنربایی را در برابر سیم‌پیچی حرکت دهیم، در آن سیم پیچ الکتریسته تولید می‌شود. پیش از فارادی و اورستد، کولن<sup>۴</sup>

1- Orsted, Hans Christian

2- Ampère, Andre Marie

3- Faraday, Michael

4- Coulomb, Charles Augustin de



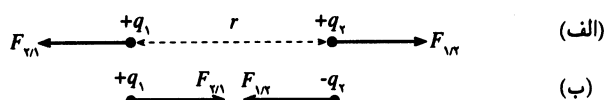
شکل ۱-۴ میدان مغناطیسی حاصل از عبور جریان در یک سیم راست.

دانشمند فرانسوی اثر دوبار الکتریکی برهم و نیز اثر دومغناطیس بر یکدیگر را شناخته بود و به وجود میدان الکتریکی در اطراف هر بار الکتریکی پی برده بود. فارادی اثر نیروهای الکتریکی و مغناطیسی را مربوط به وجود خطهای نیرو در اطراف هر بار الکتریکی و هر آهنربا می دانست. او فضای اطراف هر بار الکتریکی را که در آنجا اثر نیروی الکتریکی می تواند ظاهر شود میدان الکتریکی نامید. میدان الکتریکی هر ذره باردار ثابت،  $q$ ، در هر نقطه برابر  $E$  و ثابت است ولی اگر ذره باردار حرکت کند و حرکت آن نوسانی باشد این میدان نیز نوسانی و به معادله  $E = E_{\max} \sin(\omega t + \theta_0)$  خواهد بود. فارادی بر این باور بود که میدانهای الکتریکی و مغناطیسی متغیر به یکدیگر مربوط اند و به صورت موج منتشر می شوند. او این موج را موج الکترومغناطیسی نامید. فارادی به دنبال آن بود که ارتباطی میان نور و الکتریسیته و مغناطیس به وجود آورد ولی نتوانست این ارتباط را به طور دقیق مشخص کند تا آنکه ماکسول<sup>۱</sup>، فیزیکدان اسکاتلندی موضوع امواج را به طور جدی مورد مطالعه قرار داد و به نتایج جالبی رسید. نظریه الکترومغناطیسی ماکسول یکی از پایه های اصلی فیزیک است. موضوع این نظریه حرکت بارهای الکتریکی و آثار حاصل از حرکت آنهاست. این نظریه از قانونهایی مایه گرفته است که به وسیله اوریستد، آمپر، کولن، فارادی و گاوس<sup>۲</sup> بیان شده بود. ماکسول این قانونها را عمومیت داد و نظریه خود را به صورت معادلاتی ریاضی که روابط میدانهای الکتریکی و مغناطیسی را آشکار می کنند ارائه داد. این روابط چهارگانه به معادلات ماکسول معروف اند. در این فصل قانونهای کولن، فارادی و گاوس را به عنوان اساس کار ماکسول به اختصار بررسی می کنیم.

## ۲-۴ قانون کولن

کولن، با استفاده از تجربه های دانشمندان درباره بارهای الکتریکی و نیروهای ربایش و رانش آنها، یک نوع ترازوی پیچشی را که خود اختراع کرده بود به کار برد و اثر بارهای الکتریکی بر یکدیگر را اندازه

1- Maxwell, James Clerk    2- Gause, Karl Friedrich



شکل ۲-۴ الف) بارهای همنام، ب) بارهای ناهمنام

گرفت و قانونی شبیه قانون نیوتون دربارهٔ گرانش جهانی به دست آورد. بنابر قانون کولن، نیرویی که دوبار الکتریکی نقطه‌ای،  $q_1$  و  $q_2$  بر یکدیگر وارد می‌کنند با حاصلضرب آنها نسبت مستقیم و با مربع فاصلهٔ آنها،  $r$ ، نسبت عکس دارد. اگر دوبار همنام باشند نیرو رانشی و اگر ناهمنام باشند نیرو، ربایشی خواهد بود (شکل ۲-۴). قانون کولن را با رابطهٔ زیر نشان می‌دهند

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (۱-۴)$$

در این رابطه  $k$  ثابت تناسب و مقدار آن در  $SI$  برابر  $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$  است.  $k$  از رابطهٔ  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  به دست می‌آید که  $\epsilon_0$  را ثابت گذردهی خلأ می‌نامند و مقدار آن برابر است با

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$$

برهم کنش دو بار الکتریکی از راه میدان الکتریکی صورت می‌گیرد. هربار الکتریکی در اطراف خود میدان الکتریکی به وجود می‌آورد. جهت این میدان به مثبت یا منفی بودن بار بستگی دارد. شدت میدان در هر نقطه به فاصلهٔ  $r$  از بار  $+q_1$ ، که به  $E$  نشان داده می‌شود، برابر نیرویی است که بر یکای بار مثبت در آن نقطه اثر می‌کند. پس اگر بار مثبت  $q_2$  در میدان  $E$  حاصل از بار  $q_1$  قرار گیرد داریم

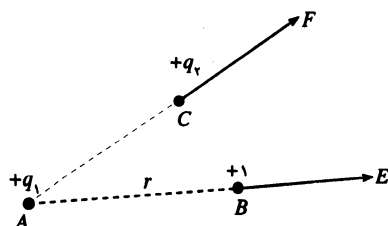
$$F = Eq_2 \Rightarrow E = \frac{F}{q_2} = \frac{kq_1 q_2}{r^2 q_2}$$

و از آنجا

$$E = \frac{kq_1}{r^2} \quad (۲-۴)$$

به طوری که ملاحظه می‌شود میدان با بار  $q_1$  نسبت مستقیم و با  $r^2$  نسبت عکس دارد (شکل ۳-۴).

□ پرسش ۱. الکترونی در اتم به دور هسته می‌گردد. جهت نیرو و میدان مؤثر بر الکترون از طرف



شکل ۳-۴ میدان بار  $+q_1$  در نقطهٔ B و نیروی مؤثر بر بار  $q_2$  در نقطهٔ C از طرف میدان.

هسته به ترتیب کدام است؟

(الف) در امتداد شعاع اتم، به سوی هسته و به سوی خارج از هسته.

(ب) در امتداد شعاع اتم، به سوی خارج از هسته و به سوی هسته.

(پ) در امتداد شعاع و هر دو به سوی هسته.

(ت) در امتداد شعاع و هر دو به سوی خارج از هسته.

مثال ۱. در اتم هیدروژن یک الکترون به دور هسته می‌گردد. چه نیرویی از طرف هسته بر آن اثر می‌کند و میدان هسته در مکان الکترون چقدر است؟ شعاع اتم هیدروژن  $0.5$  آنگستروم است.

حل: بار هر الکترون و بار هر پروتون برابر  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  است و نیروی میان آن دو رانشی و برابر است با

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{1.6 \times 10^{-19}}{(0.5 \times 10^{-10})^2}$$

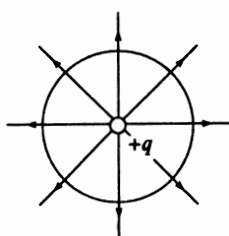
$$= 92.16 \times 10^{-9} \text{ N}$$

$$E = \frac{kq}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{1.6 \times 10^{-19}}{(0.5 \times 10^{-10})^2}$$

$$= 57.6 \times 10^{10} \text{ N/C}$$

▲

### ۳-۴ قانون گاوس



قانون گاوس رابطه شار الکتریکی<sup>۱</sup> است که از هر سطح بسته می‌گذرد با بار خالصی که درون آن سطح قرار دارد. می‌دانیم که در اطراف هر بار الکتریکی میدانی موجود است. این میدان را با خطهای نیرو نشان می‌دهیم. جهت این میدان نیرو به مثبت یا منفی بودن بار بستگی دارد. بنابر قرارداد تعداد

کل خطهای نیرو که از بار  $q$  آغاز می‌شود، یعنی شار میدان الکتریکی این بار،  $\varphi$ ، با اندازه  $q$  متناسب است (شکل ۴-۴).

هرگاه بار نقطه‌ای  $+q$  را در نظر بگیریم، شار کل  $N$ ، از آن آغاز می‌شود و  $n$  تعداد خطی که از واحد سطح کره‌ای به شعاع  $r$  و به سطح  $A$  و به مرکز بار نقطه‌ای می‌گذرد، یعنی چگالی خطوط میدان برابر است با

$$n = \frac{\varphi}{A} = \frac{\varphi}{4\pi r^2} \quad (3-4)$$

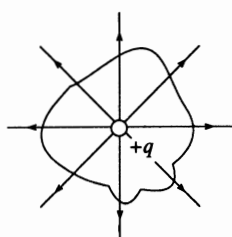
۱- خطهای میدان الکتریکی را که از یک سطح مشخص می‌گذرند شار الکتریکی می‌نامند.

به طوری که ملاحظه می شود با  $r^2$  نسبت عکس دارد. میدان الکتریکی بار  $+q$  در نقطه ای به فاصله  $r$  از بار  $q$  نیز با  $r^2$  نسبت عکس دارد. بنابر این چگالی خطوط میدان با شدت میدان متناسب است. اگر شدت میدان  $E$  را در مساحت کره یعنی  $4\pi r^2$  ضرب کنیم، خواهیم داشت

$$4\pi r^2 E = 4\pi r^2 \frac{kq}{r^2} = 4\pi kq$$

$$\varphi = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (4-4)$$

این رابطه نشان می دهد که شار الکتریکی  $\varphi$  که از سطح کره می گذرد با بار الکتریکی موجود در آن کره متناسب است (قانون گاوس).



شکل ۵-۴

اگر سطحی که بار  $q$  درون آن است کره نباشد (مانند شکل ۵-۴) خطوط میدان بر این سطح عمود نیستند. اگر سطح را به عناصر بینهایت کوچک با مساحت  $ds$  تقسیم کنیم و میدان الکتریکی را که از این سطح می گذرد با  $E$  نشان دهیم، کمیت نزده ای  $E ds$  شاری است که از این سطح می گذرد. برای محاسبه شاری که از همه سطح بسته اطراف بار می گذرد می توان  $\varphi$  را از رابطه زیر به دست آورد

$$\varphi = \oint E ds \quad (5-4)$$

علامت دایره روی انتگرال نشان می دهد که سطح انتگرال گیری یک سطح بسته است. با استفاده از رابطه های ۴-۴ و ۵-۴ معادله زیر به دست می آید

$$\epsilon_0 \oint E ds = q \quad (6-4)$$

این معادله یکی از چهار معادله ماکسول است که معادلات اساسی الکترومغناطیسی به شمار می آیند.

□ پرسش ۲. چگالی شار حاصل از بار  $q$ ، روی سطح کره ای به مرکز بار و به شعاع  $r$ ، با  $q$  و  $r$  چه نسبتی دارد؟

(الف) با  $q$  و  $r^2$  نسبت مستقیم.

(ب) با  $q$  نسبت مستقیم و با  $r^2$  نسبت معکوس.

(پ) با  $q$  و  $r$  نسبت مستقیم.

(ت) با  $q$  و  $r$  نسبت عکس.

مثال ۲. الف) شاری که از هسته اتم هیدروژن می گذرد چقدر است؟

ب) چگالی شاری که از سطح کره ای به شعاع  $0.5$  آنگستروم در اطراف هسته اتم هیدروژن می گذرد چقدر است؟

$$\varphi = \frac{q}{\varepsilon_0} = \frac{1,6 \times 10^{-19}}{8,19 \times 10^{-12}} \approx 1,8 \times 10^{-8} \text{ V.m} \quad (\text{حل: الف})$$

$$n = \frac{\varphi}{A} = \frac{\varphi}{4\pi r^2} \quad (\text{ب})$$

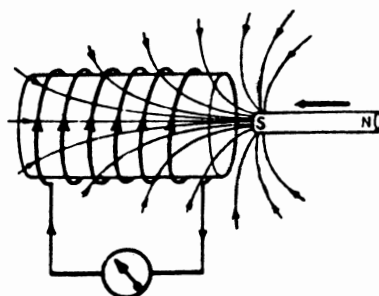
$$= \frac{1,8 \times 10^{-8}}{4 \times 3,14 \times (0,5 \times 10^{-10})^2} = 5,7 \times 10^{12} \text{ V/m}$$

#### ۴-۴ قانون فارادی

فارادی شیمی فیزیکدان انگلیسی و هانری<sup>۱</sup> فیزیکدان امریکایی با چند آزمایش ساده به قانون القای الکترومغناطیسی که یکی از معادلات اساسی ماکسول است دست یافتند.

فارادی با حرکت دادن یک آهنربا در یک سیملوله، جریان الکتریکی القایی را در آن سیملوله به وجود آورد (شکل ۶-۴) و نتیجه گرفت که هرگاه شار مغناطیسی  $\varphi$  که از سیملوله یا هر مدار دیگر می‌گذرد تغییر کند، آن سیملوله یا مدار مانند یک مولد دارای نیروی محرکه الکتریکی خواهد شد. بنابر قانون القای فارادی، نیروی محرکه القایی،  $\mathcal{E}$ ، در هر مدار برابر است با آهنگ تغییر شار در مدار یعنی  $\frac{d\varphi_B}{dt}$  ولی با علامت مخالف. معادله این نیروی محرکه عبارت است از

$$\mathcal{E} = -\frac{d\varphi_B}{dt} \quad (۷-۴)$$



شکل ۶-۴

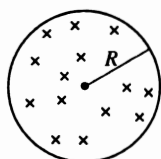
قانون فارادی نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی متغیر نسبت به زمان که شار مغناطیسی را تغییر می‌دهد می‌تواند در یک مدار جریان الکتریکی به وجود آورد. ماکسول دریافت که میدان مغناطیسی متغیر نسبت به زمان، میدان الکتریکی نیز به وجود می‌آورد.

#### ۴-۵ پیدایش میدان الکتریکی بر اثر تغییر میدان مغناطیسی

حلقه‌ای به شعاع  $R$  را در صفحه در نظر می‌گیریم که در میدان مغناطیسی یکنواخت  $B$ ، عمود بر سطح حلقه قرار دارد و از آن شار  $\varphi_B$  می‌گذرد (شکل ۷-۴). هرگاه این شار با زمان تغییر کند، یک نیروی

1- Henry, Joseph





شکل ۷-۴ حلقه در

میدان مغناطیسی

یکنواخت قرار دارد.

محرکه القایی در حلقه به وجود می آید که از رابطه  $\mathcal{E} = -\frac{d\varphi}{dt}$  به دست می آید. این نیروی محرکه سبب می شود که بر بار ساکن  $q$  نیروی  $F$  اثر کند و آن را در حلقه به حرکت درآورد. مقدار کاری که بر اثر نیروی مؤثر بر بار  $q$  در هر دور کامل انجام می شود از رابطه زیر به دست می آید

$$W = \mathcal{E}q = -q \frac{d\varphi}{dt} \quad (۸-۴)$$

از سوی دیگر می توان کار انجام شده را از رابطه زیر محاسبه کرد

$$W = F \cdot l = F \times 2\pi R \quad (۹-۴)$$

$F$  نیروی مؤثر بر بار  $q$  است و می توان آن را اثر وجود میدان الکتریکی  $E$  مماس بر حلقه در نظر گرفت که اندازه آن همواره ثابت است. در نتیجه چون  $F = Eq$ ، رابطه ۹-۴ به صورت زیر نوشته می شود

$$W = Eq \times 2\pi R \quad (۱۰-۴)$$

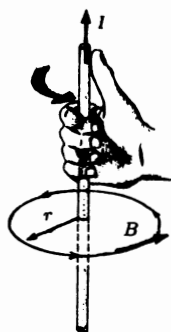
میدان الکتریکی  $E$  از رابطه زیر به دست می آید

$$Eq \times 2\pi R = -q \frac{d\varphi}{dt}$$

$$E \times 2\pi R = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (۱۱-۴)$$

این رابطه نشان می دهد که تغییر شار مغناطیسی می تواند میدان الکتریکی به وجود آورد. در حالت کلی قانون القای فارادی را به صورت زیر می نویسند

$$\oint E \cdot dl = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (۱۲-۴)$$



علامت دایره روی انتگرال نشان می دهد که انتگرال گیری در یک مسیر بسته است. رابطه ۱۲-۴ یکی دیگر از چهار معادله اساسی الکترومغناطیس است.

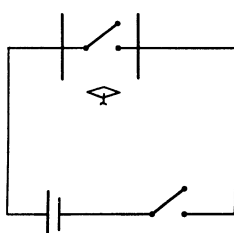
#### ۴-۶ جریان جابه جایی<sup>۱</sup>

اگرستد به خاصیت مغناطیسی جریان الکتریکی پی برد و آمپر رابطه میان میدان مغناطیسی و جریان را به دست آورد و مشخص کرد که اگر جریان به شدت  $I$  از سیم بلندی بگذرد (جریان رسانش<sup>۲</sup>)، میدان مغناطیسی در فاصله  $r$  از آن برابر  $\frac{\mu I}{2\pi r} = 2 \times 10^{-7} \frac{I}{r}$  است. خطوط میدان به شکل دایره اند و جهت آنها را می توان با روشهای گوناگون مشخص کرد (شکل ۸-۴).

شکل ۸-۴ جریان الکتریکی در اطراف مدار خود میدان مغناطیسی تولید می کند.

هرگاه دو صفحه خازنی را مطابق شکل ۹-۴ به دو قطب یک باتری ببندیم، ملاحظه می کنیم که وقتی کلید مدار بسته و جریان برقرار است، عقربه مغناطیسی منحرف می شود. ولی هنگامی که

1- displacement current      2- conduction current



شکل ۹-۴

صفحه‌ها بار دارند و آنها را توسط سیمی که در شکل نشان داده شده به هم مربوط می‌کنیم، ضمن آنکه جریان الکتریکی در یک لحظه از سیم می‌گذرد، عقربه مغناطیسی منحرف نمی‌شود.

ماکسول با بررسی این آزمایش به این نتیجه رسید که وقتی دو صفحه خازن را به باتری متصل می‌کنیم، بارهای الکتریکی روی دو صفحه ذخیره می‌شود و بین دو صفحه میدان  $E$  به وجود می‌آید که ضمن افزایش بارها تغییر

می‌کند. این تغییر میدان الکتریکی سبب پیدایش میدان مغناطیسی می‌شود. در حالتی که سیم بین دو صفحه را متصل کنیم، جریانی بین دو صفحه برقرار می‌شود که میدان مغناطیسی به وجود خواهد آورد ولی همزمان چون میدان الکتریکی بین دو صفحه کاهش می‌یابد آن هم میدانی ایجاد می‌کند که اثر میدان حاصل از جریان را خنثا می‌کند.

ماکسول بیان کرد که تغییر میدان الکتریکی که می‌تواند میدان مغناطیسی ایجاد کند را می‌توان مشابه یک جریان الکتریکی فرض کرد. این جریان فرضی را جریان جابه‌جایی می‌نامند. رابطه این جریان با تغییر شار الکتریکی چنین است

$$I_d = \epsilon \cdot \frac{d\varphi_E}{dt} \quad (۱۳-۴)$$

در این رابطه  $\epsilon$  خاصیت گذردهی خلأ و  $\frac{d\varphi_E}{dt}$  آهنگ تغییر شار الکتریکی و  $I_d$  جریان جابه‌جایی است. میدان مغناطیسی در نقطه‌ای که جریان جابه‌جایی به فاصله  $r$  از آن می‌گذرد برابر است با

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_d}{r}$$

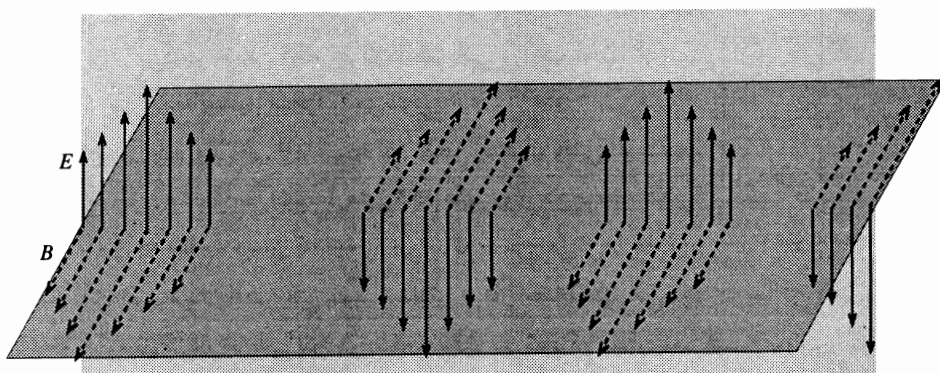
$$B = \frac{\mu_0 \epsilon}{2\pi r} \frac{d\varphi_E}{dt} \quad (۱۴-۴)$$

رابطه بالا نشان می‌دهد که میدان الکتریکی متغیر نسبت به زمان میدان مغناطیسی به وجود می‌آورد. باید در نظر داشت که جریان رسانش فقط از سیم حامل جریان می‌گذرد، در صورتی که جریان جابه‌جایی از همه سطح دو صفحه که در برابر یکدیگرند می‌گذرد.

#### ۷-۴ معادلات ماکسول

ماکسول با مطالعه دقیق قانونهای کولن، آمپر، فارادی و گاوس به بررسی خطوط نیرو پرداخت و سرانجام چهار معادله ساده را بیان کرد و با آنها همه پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی را توضیح داد. معادلات ماکسول نشان می‌دهند که پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی را نمی‌توان از یکدیگر جدا کرد. هرگاه میدان الکتریکی متغیری وجود داشته باشد، باید میدان مغناطیسی نیز وجود داشته باشد که عمود بر میدان الکتریکی است و برعکس (شکل ۱۰-۴). در واقع فقط یک میدان الکترومغناطیسی<sup>۱</sup> وجود دارد.

1- electromagnetic field



شکل ۴-۱۰ موج الکترومغناطیسی از دو میدان الکتریکی و مغناطیسی عمود برهم تشکیل شده است.

معادلات ماکسول نشان‌دهندهٔ چهار پدیدهٔ زیر است:

۱. جریان الکتریکی از یک رسانا، میدان مغناطیسی تولید می‌کند. خط‌های این میدان رسانا را دور می‌زنند.
۲. حرکت رسانا در یک میدان مغناطیسی به‌طوری‌که منجر به قطع خط‌های میدان شود، در آن رسانا جریان الکتریکی القا می‌کند.
۳. تغییر میدان الکتریکی در فضا، سبب ایجاد میدان مغناطیسی می‌شود.
۴. تغییر میدان مغناطیسی در فضا، سبب ایجاد میدان الکتریکی می‌شود.

ماکسول بیان کرد که نوسان بار الکتریکی یا عبور جریان متناوب از یک رسانا سبب انتشار مقداری انرژی در فضا خواهد شد. انتشار این انرژی به شکل موج صورت می‌گیرد. این موج از یک میدان متناوب الکتریکی،  $E$ ، و یک میدان متناوب مغناطیسی،  $B$ ، تشکیل شده است و اگر این امواج در مسیر خود به جسم رسانایی برسند می‌توانند انرژی خود را به آن منتقل کنند و در آن جریان متناوب به‌وجود آورند. این موضوع اساس گیرنده‌های رادیویی است.

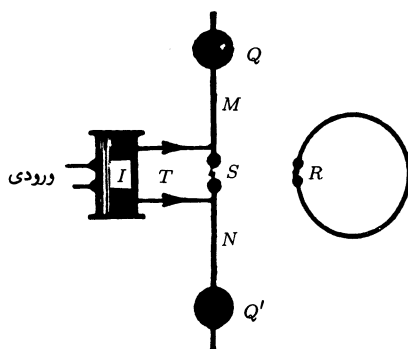
ماکسول پیش‌بینی کرد که این امواج می‌توانند بر اثر برخورد با یک محیط، بازتابیده یا شکسته شوند. سرعت این امواج در خلأ برابر سرعت نور است. از این‌رو ماکسول اعلام داشت که نور نوعی موج الکترومغناطیسی است و این امواج طیفی گسترده دارند. در زیر چهار معادلهٔ ماکسول داده شده‌اند.

۱. قانون گاوس در الکتریسیته- شار الکتریکی که از یک سطح بسته می‌گذرد متناسب با بار خالص درون آن سطح است

$$\oint E ds = \frac{q}{\epsilon_0}$$

۲. قانون گاوس در مغناطیس- شار مغناطیسی که از یک سطح بسته می‌گذرد همواره صفر است

$$\oint B ds = 0$$



شکل ۱۱-۴ طرح ساده نوسان ساز هرتز برای تولید امواج الکترومغناطیسی.

۳. قانون القای فارادی- میدان مغناطیسی متغیر نسبت به زمان میدان الکتریکی به وجود می آورد

$$\int E dl = -\frac{d\varphi_B}{dt}$$

۴. قانون جابه جایی فارادی- میدان الکتریکی متغیر نسبت به زمان، میدان مغناطیسی به وجود می آورد

$$\int B dl = \mu_0 \left( i + \epsilon_0 \frac{d\varphi_E}{dt} \right)$$

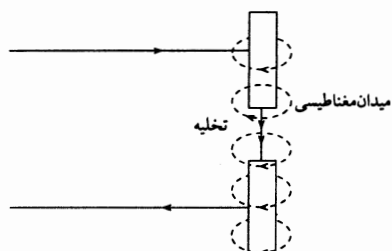
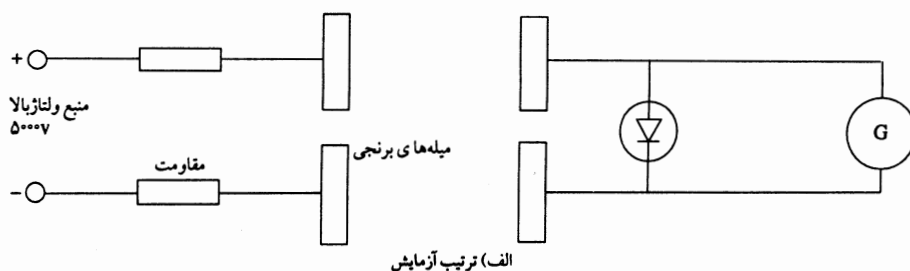
#### ۸-۴ امواج هرتز

ده سال پس از درگذشت ماکسول، در سال ۱۸۸۸/۱۲۶۷ امواج الکترومغناطیسی توسط هرتز<sup>۱</sup> دانشمند آلمانی تولید و آشکار شد. هرتز با استفاده از وسایل ساده‌ای، مانند آنچه در شکل ۱۱-۴ دیده می شود، برای اولین بار امواج رادیویی را به وجود آورد. دستگاه فرستنده اواز دو میله کوتاه ساخته شده بود که در دو سر هریک دو کره بزرگ و کوچک قرار داشتند. گیرنده هرتز یک حلقه ساده فلزی شکافدار بود.

امروزه در وسایل آزمایش هرتز تغییراتی داده شده است. فرستنده آن دو میله کوتاه برنجی است که به فاصله کمی از یکدیگر و در یک راستا قرار دارند (شکل ۱۲-۴ الف). این دو میله به اختلاف پتانسیلی حدود ۵۰۰۰ ولت متصل می شوند. دو میله دیگر به فاصله چند متر از آنها به گالوانومتر حساسی متصل می شوند و مدار گیرنده را تشکیل می دهند. به دو طرف گالوانومتر یکسوکننده‌ای متصل است که جریان الکتریکی را فقط در یک جهت برقرار می کند. هنگامی که در فاصله شکاف دو میله اول جرقه الکتریکی زده شود، عقربه گالوانومتر عبور جریانی را در مدار دوم نشان می دهد.

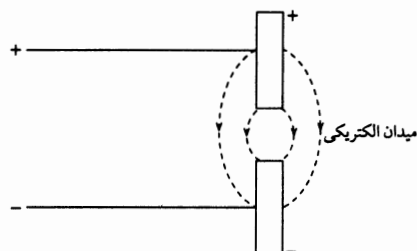
علت پیدایش جریان در مدار دوم به این ترتیب است که وقتی دو میله اول به اختلاف پتانسیل الکتریکی متصل شدند، در یکی بار الکتریکی مثبت و در دیگری بار الکتریکی منفی ذخیره می شود و یک میدان الکتریکی مطابق شکل ۱۲-۴ ب بین آنها به وجود می آید. افزایش بار الکتریکی و بزرگ شدن میدان سبب می شود که هوای بین دو میله یونیده شود و در نتیجه بین آنها جرقه الکتریکی به وجود آید. علت ایجاد این جرقه عبور بار الکتریکی بین دو میله است. در نتیجه پرش بار الکتریکی و پیدایش

1- Hertz, Heinrich Rudolf



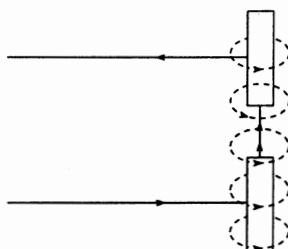
هنگامی که میله‌ها بار الکتریکی نداشته باشند میدان الکتریکی وجود ندارد.  
هنگامی که جریان الکتریکی برقرار باشد میدان مغناطیسی وجود دارد.

پ) تخلیه

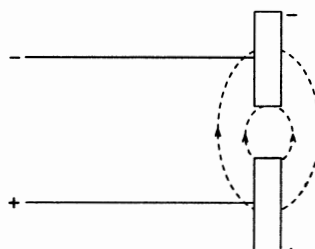


هنگامی که میله‌ها باردار باشند میدان الکتریکی وجود دارد.  
هنگامی که جریان الکتریکی برقرار نباشد میدان مغناطیسی وجود ندارد.

ب) باردار شدن میله‌ها



ث) جریان در خلاف جهت برقراری شود.



ت) بار میله‌ها عوض می‌شود.

شکل ۱۲-۴ ایجاد جرقه الکتریکی و تولید امواج الکترومغناطیسی.

جریان سریع، میدان مغناطیسی در اطراف دو میله به وجود می‌آید (شکل ۱۲-۴ پ). در همین لحظه میدان الکتریکی بر اثر تخلیه بار به صفر می‌رسد. اما عبور جریان از میله‌ها و تغییر شار مغناطیسی که از میله‌ها می‌گذرد سبب پیدایش جریان القایی در میله‌ها خواهد شد که جهت آن طبق قانون لنز در خلاف جهت جریان تخلیه شده است و سبب باردار شدن دوباره میله‌ها می‌شود. بار الکتریکی میله‌ها، میدان الکتریکی در خلاف جهت میدان اولی ایجاد می‌کند (شکل ۱۲-۴ ت). پر شدن میله‌ها از بار الکتریکی سبب پیدایش جرقه الکتریکی و برقرار شدن جریان در خلاف جهت قبلی می‌شود و در نتیجه میدان مغناطیسی در اطراف میله به وجود می‌آید. جهت این میدان مغناطیسی نیز خلاف جهت میدان در مرحله اول است (شکل ۱۲-۴ ث).

این چرخه پیدایش میدان نوسانی الکتریکی و مغناطیسی ادامه می‌یابد. جرقه‌ها به دنبال یکدیگر

زده می‌شوند و مقداری انرژی در فضا انتشار می‌یابد تا آنکه میدان الکتریکی ضعیف می‌شود و دیگر تخلیهٔ نوسانی صورت نمی‌گیرد. در همین موقع مولد ۵۰۰۰ ولتی میله‌ها را دوباره باردار می‌کند و عمل ادامه می‌یابد و مرتب میدانهای الکتریکی و مغناطیسی نوسانی ایجاد می‌شوند. این میدانهای نوسانی که حامل انرژی‌اند امواج الکترومغناطیسی نامیده می‌شوند که با سرعت نور انرژی را منتشر می‌کنند.

#### ۹-۴ انرژی امواج الکترومغناطیسی

هر چشمهٔ موجی مقداری انرژی در محیط منتشر می‌کند. بلندگو انرژی را به صورت موج مکانیکی و لامپ روشن انرژی را به صورت نور، که موج الکترومغناطیسی است، انتشار می‌دهند. انرژی امواج مکانیکی مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل ذره‌های محیط است، ولی انرژی امواج الکترومغناطیسی از نوع انرژی میدانهای الکتریکی و مغناطیسی است.

در الکتریسیته، در مبحث میدانهای الکتریکی، معمولاً انرژی ذخیره شده در خازن محاسبه می‌شود. اندازه این انرژی از رابطه زیر به دست می‌آید

$$U_E = \frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} q \cdot V \quad (۱۵-۴)$$

که  $C$  ظرفیت و  $V$  اختلاف پتانسیل و  $q$  بار الکتریکی خازن است. از سوی دیگر می‌دانیم رابطهٔ میدان الکتریکی در فضای بین صفحه‌های خازن باردار (با سطح  $A$  و فاصلهٔ  $d$ ) از رابطهٔ  $E = \frac{q}{\epsilon \cdot A}$  و

$$E = \frac{V}{d} \text{ به دست می‌آید. بنابراین برای انرژی خازن داریم}$$

$$U_E = \frac{1}{2} qV = \frac{1}{2} (E\epsilon \cdot A)(Ed) = \frac{1}{2} \epsilon \cdot (Ad)E^2 \quad (۱۶-۴)$$

این رابطه نشان می‌دهد که انرژی الکتریکی ذخیره شده به میدان الکتریکی و حجم فضایی که در آن میدان موجود است ( $Ad$  حجم خازن است) بستگی دارد. چگالی انرژی الکتریکی ما بین صفحه‌های خازن برابر است با

$$U_E = \frac{U}{Ad} = \frac{1}{2} \epsilon \cdot E^2 \quad (۱۷-۴)$$

رابطهٔ بالا کلی است و برای هر میدان الکتریکی صدق می‌کند.

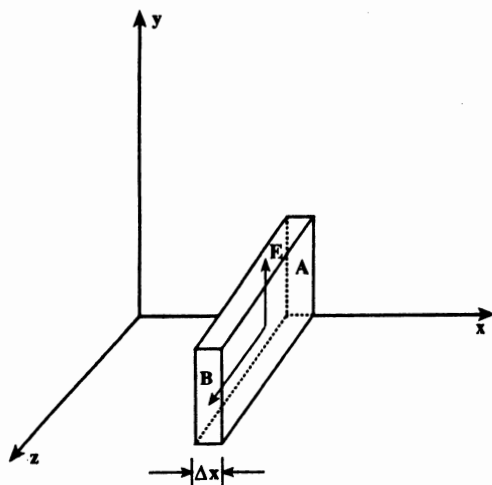
میدان مغناطیسی  $B$  نیز مانند میدان الکتریکی  $E$  انرژی ذخیره می‌کند. چگالی انرژی مغناطیسی برای خلأ از رابطه زیر به دست می‌آید

$$U_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (۱۸-۴)$$

انرژی امواج الکترومغناطیسی در واحد حجم فضا، جمع چگالی انرژی مغناطیسی و چگالی انرژی الکتریکی است، یعنی

$$U = U_E + U_B = \frac{1}{2} \epsilon \cdot E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (۱۹-۴)$$

مقدار انرژی که از سطحی برابر  $A$  در مدت  $\Delta t$  می‌گذرد (شکل ۴-۱۳)، با توجه به سرعت این‌گونه



شکل ۴-۱۳

امواج،  $c$ ، برابر است با

$$\Delta U = U A \Delta x = U A c \Delta t$$

$$\Delta U = A c \Delta t \left( \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2 \mu_0} B^2 \right) \quad (۴-۲۰)$$

رابطه بین میدان الکتریکی نوسانی  $E$ ،  $\left[ E = E_0 \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right]$  و مغناطیسی  $B$ ،  $\left[ B = B_0 \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right]$  در هر لحظه به صورت زیر است

$$E = cB \quad (۴-۲۱)$$

که  $c$  ضریبی ثابت و برابر سرعت نور است. چگالی انرژی الکتریکی و مغناطیسی با یکدیگر برابرند، یعنی

$$U_B = U_E \Rightarrow \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2 \mu_0} B^2 \quad (۴-۲۲)$$

در نتیجه مقدار انرژی امواج الکترومغناطیسی که عمود بر سطح  $A$  در مدت  $\Delta t$  می‌گذرد برابر است با

$$AU = A c \epsilon_0 E^2 \Delta t$$

و شدت این موج که آهنگ عبور انرژی از واحد سطح عمود بر راستای انتشار موج است، برابر است با

$$S = \frac{1}{A} \frac{\Delta U}{\Delta t} = c \epsilon_0 E^2 \quad (۴-۲۳)$$

$E$  میدان الکتریکی است که برای موج الکترومغناطیسی نوسانی بوده و در هر لحظه از رابطه  $E = E_0 \sin \theta$  به دست می‌آید و می‌توان نوشت

$$S = c \epsilon_0 E_0^2 \sin^2 \theta$$

در یک بازه زمانی که نسبت به دوره موج بزرگ باشد مقدار متوسط  $\sin^2 \theta$  برابر  $\frac{1}{2}$  است و شدت متوسط انرژی امواج الکترومغناطیسی برابر خواهد بود با

$$\bar{S} = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E^2 \quad (۲۴-۴)$$

□ پرسش ۳. رابطه بین میدان نوسانی الکتریکی و میدان نوسانی مغناطیسی در هر نقطه در هر لحظه کدام است؟

$$B = \frac{E}{c} \text{ (الف)} \quad B = \frac{E}{c} \text{ (ب)} \quad BE = c \text{ (پ)} \quad BE = 1 \text{ (ت)}$$

مثال ۳. بسامد یک فرستنده امواج رادیویی  $\nu = 10^7 \text{ Hz}$  و توان آن  $P = 2 \times 10^6 \text{ W}$  است. این فرستنده امواج را در همه فضا می‌فرستد. یک حلقه فلزی به شعاع  $40 \text{ cm}$  را به‌طور عمود بر میدان مغناطیسی قرار می‌دهیم و از آن به‌عنوان آنتن گیرنده استفاده می‌کنیم. در فاصله یک کیلومتری از فرستنده حداکثر نیروی محرکه القایی در حلقه چقدر است؟

حل: آنتن فرستنده مانند یک دوقطبی نوسانی است و آنتن گیرنده به شکل یک حلقه به موازات آن است. انرژی آنتن در یک سطح نیمکره توزیع می‌شود.

شدت موج یعنی آهنگ عبور انرژی از واحد سطح، در محلی که حلقه قرار دارد از رابطه زیر به‌دست می‌آید

$$S = \frac{P}{A} = \frac{P}{2\pi R^2} = \frac{2 \times 10^6}{2 \times 3.14 \times (1000)^2} \approx 0.32 \text{ W/m}^2$$

از رابطه شدت موج، میدان الکتریکی به‌صورت زیر حساب می‌شود

$$S = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E^2, \quad E = \sqrt{\frac{2S}{\epsilon_0 c}} = \sqrt{\frac{2 \times 0.32}{8.85 \times 10^{-12} \times 3 \times 10^8}} \approx 11 \text{ W/m}$$

شدت میدان مغناطیسی در محل حلقه برابر است با

$$B = \frac{E}{c} = \frac{11}{3 \times 10^8} \approx 3.63 \times 10^{-8} \text{ تسلا}$$

تغییر شار مغناطیسی در مدت  $\frac{T}{2}$  برابر است با

$$\Delta\varphi = 2\varphi = 2AB \cos \alpha = 2B(\pi r^2) \cos 90^\circ$$

$$= 2 \times 3.63 \times 10^{-8} (3.14 \times 0.4^2) = 3.64 \times 10^{-8} \text{ وبر}$$

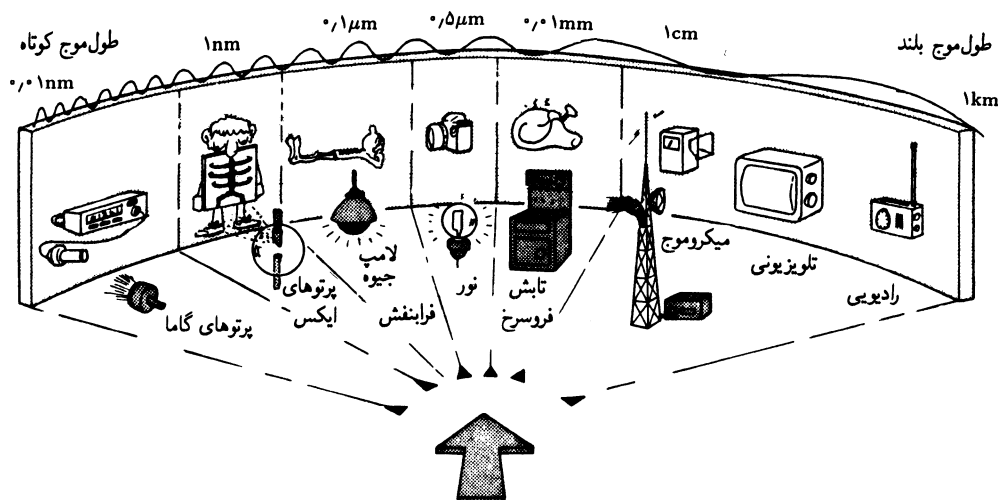
نیروی محرکه القایی برابر خواهد بود با

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{\Delta\varphi}{T/2} = \Delta\varphi \times 2\nu = 3.64 \times 10^{-8} \times 2 \times 10^7$$

$$= 0.728 \text{ ولت}$$







شکل ۴-۱۴ طیف امواج الکترومغناطیسی و چشمه تولید و کاربرد هر بخش آن.

#### ۴-۱۰ طیف امواج الکترومغناطیسی

امواج الکترومغناطیسی گستره بسیار وسیعی دارند. طول موج این امواج از حدود  $10^{-14}$  متر تا  $10^5$  متر و بسامد آنها از حدود  $10^{22}$  هرتز تا  $10^3$  هرتز است. انسان به طور طبیعی فقط نسبت به بخش بسیار کوچکی از این امواج حساس است. این بخش کوچک شامل نور با طول موج میان دو حد  $0.4$  تا  $0.8$  میکرون است. البته همین محدوده بسیار کوچک این همه تنوع رنگها را سبب شده است به طوری که نمی توان برای انواع رنگها شماره یا نامی مشخص کرد. مطالعاتی که در یکی دو قرن اخیر روی امواج صورت گرفته بسیار زیاد است و اکنون انسان به چگونگی تولید و خواص و کاربرد هر بخش جزئی از این دامنه وسیع پی برده است. هر ناحیه از طیف امواج الکترومغناطیسی دارای نام و ویژگیهای خاصی است که به ترتیب از طول موجهای کوتاه به بلند عبارت اند از پرتوهای گاما، ایکس، فرابنفش، نور، فروسرخ، میکروموج و رادیویی. مشخصات کلی این امواج در جدول ۴-۱ و کاربرد آن در شکل ۴-۱۴ آمده

جدول ۴-۱ انواع تابشهای الکترومغناطیسی

نوع تابش	بسامد، Hz	طول موج، m	چشمه	کاربرد
گاما	$10^{22}$ تا $5 \times 10^{18}$	$10^{-17}$ تا $6 \times 10^{-10}$	واکنشهای هستهای	پرتو درمانی
ایکس	$10^{20}$ تا $10^{16}$	$10^{-12}$ تا $3 \times 10^{-8}$	برخورد الکترون با هدف	عکسبرداری
فرابنفش	$10^{16}$ تا $7.5 \times 10^{14}$	$10^{-8}$ تا $4 \times 10^{-7}$	لامپهای ویژه	ضد عفونی
نور	$10^{14}$ تا $4.3 \times 10^{14}$	$10^{-8}$ تا $7 \times 10^{-7}$	خورشید- چراغ	دیدن
فروسرخ	$10^{14}$ تا $3 \times 10^{11}$	$10^{-7}$ تا $7 \times 10^{-3}$	اجسام داغ	گرمادرمانی
میکروموج	$10^{11}$ تا $3 \times 10^9$	$10^{-3}$ تا $0.3$	لوله های خلاء	رادار و مخابرات
رادیویی FM	$10^8$ تا $4 \times 10^7$	$10^5$ تا $7.5$	الکترونیکی	رادیو و تلویزیون
رادیویی AM و تلویزیونی	$10^7$ تا $5 \times 10^5$	$1500$ تا $6$	الکترونیکی	رادیو

است. ماهیت فیزیکی و سرعت همه امواج الکترومغناطیسی یکسان است. تنها تفاوت یک قسمت با قسمت دیگر در بسامد و طول موج آنهاست. نامهایی که برای هر قسمت انتخاب شده به چشمه‌های تولید آنها مربوط است. خاصیت هر بخش از طیف با بخش دیگر متفاوت است که به اختصار به شرح هریک می‌پردازیم.

#### ۴-۱۱ پرتوهای گاما

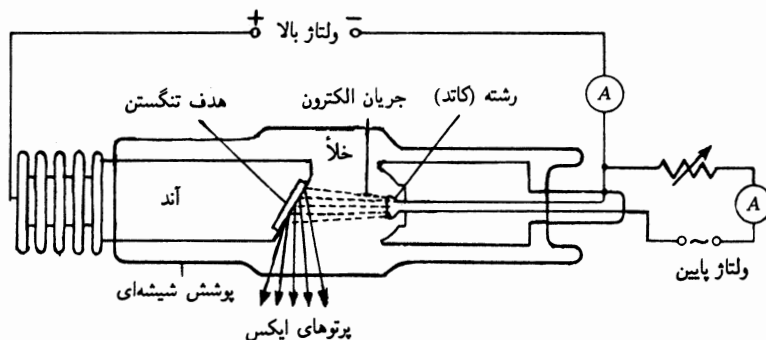
پرتوهای گاما دارای طول موج کوتاه، حدود  $10^{-10}$  انگستروم‌اند. این پرتوها بر اثر واپاشی هسته مواد پرتوزا (رادیواکتیو) تولید می‌شوند. در ابتدا آنها را در تجزیه و آشکارسازی تابشهای مواد پرتوزا کشف کردند و سپس در پرتوژی مصنوعی نیز به آنها دست یافتند. اکنون مشخص شده است که ذره‌های درون هسته بر اثر جابه‌جایی و کاهش انرژی از خود فوتونهای پر انرژی تابش می‌کنند.

پرتوهای گاما دارای قدرت نفوذ بسیار زیادند و حتی می‌توانند از ورقه‌های سرب به کلفتی چند سانتیمتر بگذرند. این پرتوها روی بافتهای زنده اثر می‌کنند و از این رو در پرتودرمانی به کار می‌روند. همچنین بر اثر برخورد با بعضی اجسام نور تولید می‌کنند (خاصیت فلوروسانس). جذب آنها در بعضی بلورها سبب آزاد شدن الکترون می‌شود. روی فیلم عکاسی نیز اثر می‌کنند و آشکارسازی آنها معمولاً به کمک فیلم عکاسی صورت می‌گیرد.

#### ۴-۱۲ پرتوهای ایکس

منشأ تولید پرتوهای ایکس الکترونیایی هستند که به دور هسته اتمهای سنگین می‌گردند. هر الکترون که به دور هسته می‌گردد دارای انرژی مشخصی است (تراز انرژی الکترون). چنانچه الکترون به تراز انرژی پایینی بیاید مقدار مشخصی انرژی به صورت فوتون از دست می‌دهد که به صورت پرتو ایکس از اتم گسیل می‌شود.

پرتوهای ایکس توسط رنتگن<sup>۱</sup> در سال ۱۸۹۵/۱۲۷۴ کشف شد. این پرتوها بر اثر تابش پرتوهای کاتدی به یک فلز سنگین مانند تنگستن تولید می‌شوند. برای این منظور لوله‌ای مطابق شکل ۴-۱۵ را از



شکل ۴-۱۵ لامپ مولد پرتو ایکس با کاتد منتهب

هوا خالی و یک رشتهٔ سیم تنگستن را با عبور جریانی با ولتاژ کم ملتهب می‌کنند، به‌طوری که الکترون از آن خارج شود. با اختلاف پتانسیل بالایی که بین کاتد و آند برقرار می‌کنند الکترونهاى خارج شده از کاتد ملتهب سرعت می‌گیرند و در مسیر خود به آنتی‌کاتد که از تنگستن است برخورد می‌کنند و متوقف می‌شوند. بر اثر ضربه‌هایی که الکترونهاى سریع به اتمهای تنگستن وارد می‌کنند، اتمها برانگیخته می‌شوند و از خود پرتو ایکس تابش می‌کنند. طول موج پرتو ایکس تولید شده به اختلاف پتانسیل بین کاتد و آند بستگی دارد. هرچه اختلاف پتانسیل بیشتر باشد انرژی که الکترون دریافت می‌کند زیاده‌تر و طول موج پرتو ایکس کوتاه‌تر است.

طول موج پرتوهای ایکس بین  $20 \text{ \AA}$  تا  $0.05 \text{ \AA}$  است. این پرتوها بر اثر برخورد با بعضی مواد تولید نور می‌کنند (خاصیت فلورسانس). روی فیلم عکاسی اثر شیمیایی دارند و در سلولهای جانوری تغییراتی به وجود می‌آورند. قدرت نفوذ این پرتوها نسبت به پرتوهای گاما کمتر است. پرتوهای ایکس را در پزشکی و صنعت و نیز در پرتو نمایی و پرتونگاری به کار می‌برند.

#### ۱۳-۴ پرتوهای فرابنفش

عکسبرداری از طیف نور سفید نشان می‌دهد که فیلم عکاسی در قسمتهایی که امواج آبی و مخصوصاً بنفش وجود دارد زودتر سیاه می‌شود. در حالی که در بخش سبز و زرد طیف تأثیر روی فیلمها کمتر است و در طرف بنفش، در جایی که نور دیده نمی‌شود، عمل سیاه کردن فیلم بسیار قویتر است. این پدیده مشخص می‌کند که امواجی در طرف نور بنفش موجود است که بر چشم اثر نمی‌کند ولی بر فیلم عکاسی مؤثر است. چنین امواجی را که دانشمندان در اوایل قرن نوزدهم کشف کردند پرتوهای فرابنفش نامیدند. امروزه علاوه بر روش عکسبرداری با استفاده از خاصیت فلورسانس و فسفرسانس و نیز سلولهای نوری می‌توان پرتوهای فرابنفش را آشکار کرد.

بسامد پرتوهای فرابنفش تقریباً از  $8 \times 10^{14} \text{ Hz}$  تا  $3 \times 10^{17} \text{ Hz}$  است و انرژی فوتونها در این گستره بین  $3/2 \text{ eV}$  تا  $10^3 \text{ eV}$  است. این امواج می‌توانند اتمهای موجود در جو زمین را یونیده کنند و بسیاری از واکنشهای شیمیایی را سبب شوند.

#### ۱۴-۴ پرتوهای نور

ناحیهٔ بسیار محدودی از طیف بسیار گستردهٔ امواج الکترومغناطیسی روی چشم اثر می‌کند. بسامد این پرتوها بین  $3/84 \times 10^{14} \text{ Hz}$  تا حدود  $7/69 \times 10^{14} \text{ Hz}$  و طول موجشان بین حدود  $0.4 \mu$  تا  $0.76 \mu$  است. بعضی از افراد می‌توانند امواجی را که قدری کوتاهتر (تا حدود  $0.37 \mu$  میکرون) یا قدری بلندترند (تا حدود  $0.8 \mu$  میکرون) ببینند. هر جزء این محدوده رنگ معینی را ظاهر می‌کند و همهٔ این طول موجها نوری به رنگ سفید را به وجود می‌آورند.

منشأ تابش نور الکترونهاى بیرونی در اتمها و مولکولها هستند. این اتمها و مولکولها اگر در یک مادهٔ ملتهب، مانند رشتهٔ فلزی داخل لامپ یا خورشید و هر جسم داغ دیگر تابش کنند طیف حاصل

از آنها پیوسته و رنگی خواهد بود. اگر آنها و مولکولها بر اثر تخلیه الکتریکی نور تابش کنند، طیف حاصل به صورت خطهای مجزا از یکدیگر (طیف خطی) دیده می شود. پرتوهای نور دارای اثر گرمایی و اثر شیمیایی هستند. هرچه طول موج نور بیشتر باشد اثر گرمایی آن زیادتر و اثر شیمیایی آن کمتر است. برعکس هرچه به طول موجهای کوتاهتر، یعنی به رنگ بنفش نزدیکتر شویم اثر شیمیایی نور بیشتر می شود. حس بینایی انسان و جانوران نیز عملی فوتوشیمیایی است. نوری که بر شبکه می تابد توسط مواد حساس به نور جذب می شود. انرژی این نور جریان عصبی به وجود می آورد و این جریان پس از رسیدن به مغز احساس بینایی را حاصل می کند.

#### ۴-۱۵ پرتوهای فروسرخ

در سال ۱۸۰۰/۱۱۷۹ نخستین بار هرشل<sup>۱</sup> اخترشناس مشهور انگلیسی آلمانی تبار پرتوهای فروسرخ را آشکار کرد. بسامد این امواج از  $3 \times 10^{11} \text{ Hz}$  تا  $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$  است. وجود این امواج را با پیل ترموالکتریک مشخص کرده اند. هرگاه بخش حساس پیل را که از دو قطعه فلز به هم لحیم شده تشکیل شده است در ناحیه بنفش قرار دهیم و آن را به آرامی به طرف ناحیه سرخ و بالاتر حرکت دهیم، عقربه آمپرسنج مدار ترموالکتریک عبور جریانی را نشان می دهد. بیشینه شدت این جریان وقتی است که بخش حساس پیل بالاتر از ناحیه نور سرخ قرار گیرد. هرگاه به دور کردن بخش حساس پیل از ناحیه رنگ سرخ ادامه دهیم به جایی می رسیم که جریان الکتریکی به صفر می رسد. این آزمایش نشان می دهد که در طرف نور سرخ امواجی موجود است که روی چشم اثر ندارند. این امواج را پرتوهای فروسرخ می نامند.

#### ۴-۱۶ امواج رادیویی

بسامد این امواج از چند هرتز تا حدود  $10^9$  هرتز و طول موج آنها از چند کیلومتر تا حدود  $10^3$  متر است. امواج رادیویی توسط جریان متناوب با بسامدهای مختلف تولید و به وسیله آنتن در فضا منتشر می شوند. دستگاه آشکارساز این امواج رادیو و تلویزیون است. به طوری که می دانیم هر اندازه بسامد امواج بیشتر باشد انتشار آنها به خط راست نزدیکتر است، بنابراین طول موجهای کوتاه که بسامد بیشتری دارند به خط راست منتشر می شوند، در صورتی که طول موجهای بلند می توانند پراشیده شوند و موانع را دور بزنند. در تلویزیون از امواج با بسامد زیاد استفاده می شود، از این رو آنتن گیرنده و آنتن فرستنده باید در دید مستقیم یکدیگر قرار گیرند. چون زمین کروی است و موانعی مانند کوه نیز در مسیر این امواج واقع می شود، از این رو نمی توان مستقیماً امواج تلویزیونی را به فاصله دور ارسال داشت و لازم است از ایستگاههای تقویت امواج زمینی یا از ماهواره ها استفاده کرد.

برای استفاده از ماهواره ها معمولاً از ناحیه میکروموجها استفاده می شود. بسامد میکروموجها از  $10^9 \text{ Hz}$  تا حدود  $3 \times 10^{11} \text{ Hz}$  و طول موجهای وابسته به آن از  $30 \text{ cm}$  تا  $170 \text{ mm}$  است. امواج الکترومغناطیسی که بسامد آنها از  $10^4 \text{ Hz}$  تا  $10^6 \text{ Hz}$  باشد به وسیله لایه های باردار الکتریکی که در

1- Herschel, William

بالای جو زمین وجود دارد به خوبی بازتابیده می‌شوند. این بازتابش وسیله‌ای است تا امواج رادیویی را در فاصله‌های بسیار دور از چشمه آشکار کنیم.

#### ۴-۱۷ مقایسه امواج مکانیکی و الکترومغناطیسی

امواج الکترومغناطیسی و مکانیکی در پدیده‌های بازتابش، شکست، تداخل، پراش و قطبیدگی با یکدیگر تشابه دارند و در موارد زیر باهم متفاوت‌اند

۱. امواج الکترومغناطیسی از ارتعاش یا جابه‌جایی بارهای الکتریکی به وجود می‌آیند، ولی امواج مکانیکی توسط ارتعاش اجسام، بدون توجه به بار الکتریکی آنها، تولید می‌شوند.
۲. امواج مکانیکی فقط در محیط‌های مادی کشسان منتشر می‌شوند، در صورتی که امواج الکترومغناطیسی علاوه بر محیط‌های شفاف در خلأ نیز منتشر می‌شوند.
۳. سرعت امواج الکترومغناطیسی نسبت به امواج مکانیکی بسیار زیاد است.
۴. امواج مکانیکی می‌توانند طولی، عرضی، پیچشی باشند، ولی امواج الکترومغناطیسی فقط به صورت امواج عرضی‌اند.
۵. در امواج مکانیکی، ذرات و به‌طور کلی ماده به ارتعاش در می‌آید و موج منتقل می‌شود، در صورتی که در امواج الکترومغناطیسی میدان‌های الکتریکی و میدان مغناطیسی نوسان می‌کنند و انتقال می‌یابند.

### خلاصه فصل

انرژی خورشید به صورت امواج الکترومغناطیسی به زمین می‌رسد. امواج الکترومغناطیسی طیف گسترده‌ای دارند که شامل پرتوهای گاما، ایکس، نور، امواج رادیویی و غیره است. وجود امواج الکترومغناطیسی توسط ماکسول پیش‌بینی شد. او با استفاده از قانونهای کولن، گaus، آمپر و فارادی توانست مبانی نظری الکتریسیته و مغناطیس را به وسیله چهار معادله نشان دهد.

ماکسول ثابت کرد که امواج الکترومغناطیسی از دو میدان الکتریکی و مغناطیسی عمود برهم تشکیل شده‌اند. این میدان‌های نوسانی انرژی موج را با سرعت نور گسیل می‌کنند. نور هم موج الکترومغناطیسی است. پس از ده سال از درگذشت ماکسول، هرتز توانست امواج الکترومغناطیسی را تولید کند. هرتز دریافت که امواج الکترومغناطیسی مانند نور بازتابیده و شکسته می‌شوند. شدت لحظه‌ای موج الکترومغناطیسی در هر نقطه معین از فضا از رابطه زیر به دست می‌آید

$$S = c \epsilon_0 E^2 \sin^2 \pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

و شدت متوسط برابر است با

$$\bar{S} = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E^2$$

## اهداف آموزشی

- اکنون که این فصل را به پایان رسانیده‌اید باید بتوانید
- به اهمیت کار ماکسول پی ببرید.
  - قانون فارادی را شرح دهید و نتیجه آن را بیان کنید.
  - جریان جابه‌جایی را شرح دهید و نتیجه آن را بیان کنید.
  - معادلات ماکسول را توضیح دهید و قانونهایی که اساس نظریه ماکسول را تشکیل می‌دهند شرح دهید.
  - امواج الکترومغناطیسی را شرح دهید.
  - چگونگی ایجاد امواج الکترومغناطیسی را بیان کنید.
  - ویژگیهای امواج الکترومغناطیسی را توضیح دهید.
  - طیف امواج الکترومغناطیسی را مورد بحث قرار دهید.
  - آزمایش هرتز برای تولید امواج را شرح دهید.
  - انرژی امواج را محاسبه کنید و شرح دهید.

## خود را پیازمایید

### پرسشها

۱. قانون فارادی را بیان کنید.
۲. نتیجه قانون فارادی را شرح دهید.
۳. رابطه بین میدان الکتریکی و شار مغناطیسی را بنویسید و شرح دهید.
۴. جریان جابه‌جایی چیست و چه اثری دارد؟
۵. تفاوت جریان رسانش با جریان جابه‌جایی چیست؟
۶. معادلات ماکسول براساس چه قانونهایی است و چه چیزی را توضیح می‌دهند؟
۷. امواج الکترومغناطیسی حاصل از یک دوقطبی نوسانی را شرح دهید.
۸. معادله دو میدان الکتریکی نوسانی را که در امتداد محور  $x$  منتشر می‌شوند بنویسید.
۹. آزمایش هرتز را شرح دهید.
۱۰. انرژی امواج الکترومغناطیسی را شرح دهید و رابطه‌های ریاضی مربوط را بنویسید و تحلیل کنید.

### پرسشهای چهارگزینه‌ای

۱. کدام موج برای انتشار به ماده نیاز ندارد؟
 

الف) صوت	ب) موج رادیویی	پ) موج طولی	ت) موج مکانیکی
----------	----------------	-------------	----------------

۲. یک فرستنده، امواجی با طول موج  $30$  متر منتشر می‌کند. بسامد امواج چند هرتز است؟  
 الف)  $100\text{ KHz}$  (ب)  $100\text{ MHz}$  (پ)  $10\text{ MHz}$  (ت)  $1\text{ MHz}$
۳. طول موج نور سرخ  $600\text{ nm}$  است. بسامد این نور چند هرتز است؟  
 الف)  $5 \times 10^{14}$  (ب)  $10^{14}$  (پ)  $10^{12}$  (ت)  $5 \times 10^{15}$
۴. کدام دسته امواج زیر به ترتیب افزایش بسامد نوشته شده‌اند  
 الف) فرابنفش، رادیویی، نور، گاما  
 ب) رادیویی، نور، فرابنفش، گاما  
 پ) گاما، فرابنفش، نور، رادیویی  
 ت) نور، فرابنفش، گاما، رادیویی
۵. مفهوم میدان را کدام دانشمند عرضه کرد؟  
 الف) اورستد (ب) آمپر (پ) ماکسول (ت) فارادی
۶. قانونی که بیان می‌کند «شار خطوط میدان مغناطیسی که از یک سطح بسته می‌گذرد برابر صفر است» به نام کدام دانشمند است؟  
 الف) کولن (ب) گاوس (پ) فارادی (ت) ماکسول
۷. کدام قانون زیر قانون فارادی است؟  
 الف) تغییر شار مغناطیسی نسبت به زمان، یک میدان الکتریکی القایی به وجود می‌آورد.  
 ب) هر جریان الکتریکی، یک میدان مغناطیسی به وجود می‌آورد.  
 پ) بارهای الکتریکی، میدان الکتریکی به وجود می‌آورند.  
 ت) شار خطوط میدان مغناطیسی که از یک سطح بسته می‌گذرد برابر صفر است.
۸. در چه صورت میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود؟  
 الف) فقط با جریان الکتریکی.  
 ب) فقط با میدان الکتریکی ثابت.  
 پ) فقط با میدان الکتریکی متغیر.  
 ت) یک جریان الکتریکی یا یک میدان الکتریکی متغیر وجود داشته باشد.
۹. کدامیک از عوامل زیر امواج الکترومغناطیسی گسیل می‌کنند؟  
 الف) اجسام مرتعش. (ب) بارهای الکتریکی متحرک.  
 ب) بارهای الکتریکی شتابدار. (ت) اتمها و مولکولها.
۱۰. تفاوت امواج الکترومغناطیسی که توسط هرتز تولید و آشکار شد با نور، تنها در مورد زیر بود  
 الف) بازتابش (ب) تداخل (پ) سرعت (ت) اثر بر چشم
۱۱. گرمایی که از خورشید حاصل می‌شود عمدتاً مربوط به کدام تابش است؟  
 الف) فرابنفش (ب) فروسرخ (پ) میکروموج (ت) نور

۱۲. هرگاه گزردهی الکتریکی را با  $\varepsilon$  و پذیرفتاری مغناطیسی را با  $\mu$  نشان دهیم، سرعت انتقال پیام در محیط از کدام رابطه به دست می آید؟

الف)  $\sqrt{\varepsilon\mu}$       ب)  $\varepsilon\mu$       پ)  $\frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$       ت)  $\sqrt{\frac{1}{\varepsilon\mu}}$

تمرینها

۱. جریانی به شدت ۲A از سیملوله بلندی که در واحد طول ۵۰۰ حلقه دارد و دارای سطح مقطعی به قطر ۲۰cm است می گذرد. مطلوب است

الف) شدت میدان مغناطیسی درون سیملوله.

ب) شار مغناطیسی که از درون سیملوله می گذرد.

پ) چگالی انرژی مغناطیسی درون سیملوله.

پاسخ:  $B = 4\pi \times 10^{-4} \text{ T}$

$\varphi \simeq 0.08 \text{ Wb}$

$U_E = 0.08\pi \text{ J/m}^2$

۲. جریانی به شدت ۵A از سیملوله بلندی که قطر سطح مقطع آن ۱۰cm است می گذرد. اگر سیملوله

دارای ۲۰۰ حلقه در واحد طول باشد و جریان در آن با آهنگ  $\frac{di}{dt} = 0.5 \text{ A/s}$  تا صفر کاهش یابد،

میدان الکتریکی القایی برحسب  $r$ ، فاصله از محور سیملوله، درون و بیرون سیملوله از چه رابطه ای

حساب می شود؟

۳. میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی در SI به صورت زیر است

$E = 50 \cos(5y + 20 \times 10^8 t) i$

معین کنید

الف) جهت انتشار موج      ب) دوره موج      پ) دامنه میدان مغناطیسی

پاسخ:  $50 \text{ N/C}$  و  $3.14 \times 10^{-9} \text{ s}$

۴. شدت موج یک فرستنده در فاصله ۵۰ متری آن در همه امتدادها  $0.1 \text{ W/m}^2$  است. مطلوب است

الف) توان چشمه.

ب) دامنه میدان الکتریکی و مغناطیسی آن در فاصله ۵۰ متری.

پ) دامنه میدان الکتریکی و دامنه میدان مغناطیسی چشمه در فاصله ۵۰ متری از فرستنده.

پاسخ:  $3140 \text{ W}$





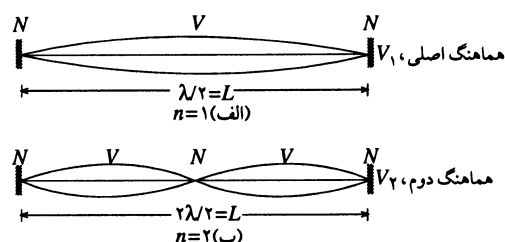
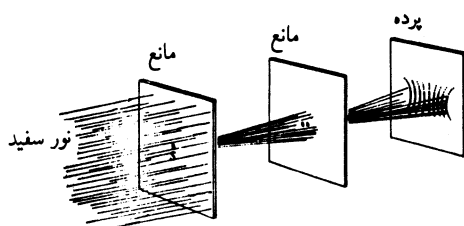
## نور موجی - تداخل، پراش و قطبش نور

### ۱-۵ مقدمه

شاید حرکت و برخورد امواج را در دریا دیده باشید. وقتی موجی به ساحل برخورد می‌کند به دریا باز می‌گردد و با موجهایی که به سوی ساحل در حرکت‌اند برخورد می‌کند. برخورد این امواج اغلب دیدنی است. در جایی که دو قله موج به هم برخورد می‌کند، قله بزرگتری از موج به وجود می‌آید. در بعضی از نقاط هم وقتی دو موج به هم می‌رسند آب آرام می‌گیرد و امواج در آن نقطه ناپدید می‌شوند. ممکن است همین پدیده را با یک طناب یا فنر بلند، به شکل دیگری خودتان به وجود آورید و آزمایش کنید. یک طرف طناب را به نقطه‌ای از دیوار ببندید و طرف دیگر را، درحالی که طناب کشیده شده است، با سرعت به راست و چپ حرکت دهید. چه می‌بینید؟

ملاحظه می‌کنید که طناب به شکل یک یا دو یا چند دوک درمی‌آید به طوری که بعضی نقاط همواره ساکن هستند و بعضی دیگر از نقاط با حداکثر دامنه حرکت می‌کنند (شکل ۱-۵). این پدیده را که درست شبیه برخورد دو موج بر سطح آب است تداخل دو موج می‌نامند. علت به وجود آمدن شکلهای دوکی آن است که وقتی یک طرف طناب را به نوسان درمی‌آوریم امواجی در طناب به وجود می‌آیند و منتشر می‌شوند. این امواج پس از رسیدن به انتهای طناب بازتابیده می‌شوند و در طول طناب و در خلاف جهت موج تابیده باز می‌گردند. در همین هنگام با موج تابشی جدید برخورد می‌کنند و از ترکیب آن دو موج، نقاط با حداکثر دامنه (شکم موج) و نقاط با حداقل دامنه یا ساکن (گره موج) به وجود می‌آید. آزمایشهای دیگری که بر سطح آب یا با دو بلندگو انجام شده مشخص کرده است که اگر دو موج مکانیکی که با بسامد یکسان در یک محیط منتشر می‌شوند به یکدیگر برخورد کنند، می‌توانند به نحوی با هم ترکیب شوند که توزیع انرژی آنها در محیط یکسان نباشد، به طوری که در بعضی نقاط این انرژی بیشینه و در بعضی نقاط این انرژی کمینه (یا صفر) باشد. این پدیده را تداخل گویند.

نور موجی - تداخل، پراش و قطبش نور / ۷۳



شکل ۲-۵ آزمایش یانگ با استفاده از نور سفید که از سوراخ  $s$  می‌گذرد و سپس از دو سوراخ  $s_1$  و  $s_2$  عبور می‌کند و روی پرده نقش تداخلی را به وجود می‌آورد.

شکل ۱-۵ امواج ایستاده که در یک طناب به وجود می‌آید بر اثر تداخل موج تابیده و موج بازتابیده است.

یانگ<sup>۱</sup>، دانشمند انگلیسی با انجام آزمایشهایی، نور خورشید را از سوراخ یک صفحه عبور داد و سپس صفحه دیگری که دارای دو سوراخ بود در مسیر این نور قرار داد و متوجه شد که همان اثر تداخل که برای امواج مکانیکی مشاهده می‌شود برای نور نیز به وجود می‌آید. یعنی بر اثر برخورد پرتوهای دو چشمه با هم، روی پرده نقاطی دارای حداکثر روشنایی و نقاط دیگری دارای حداقل روشنایی خواهند بود (شکل ۲-۵). یانگ با آزمایشهایی که درباره نور انجام داد، نظریه موجی بودن نور را که هویگنس<sup>۲</sup> دانشمند هلندی بیان کرده بود با شواهد تجربی تأیید کرد و توانست این پدیده را با استفاده از اصل هویگنس شرح دهد و برای اولین بار طول موج نور را اندازه‌گیری کند.

## ۲-۵ اصل هویگنس

هویگنس همزمان با نیوتون، فیزیکدان انگلیسی می‌زیست. او یکی از پایه‌گذاران نظریه موجی نور بود. اگرچه نظریه او در زمان حیاتش مورد توجه قرار نگرفت و گسترش نیافت ولی در قرن نوزدهم نظریه او رونق یافت و بسیاری از یافته‌های او تأیید شد. یکی از اجزای نظریه او کوششی بود که در تفسیر چگونگی حرکت جبهه موج به عمل آورده است. این موضوع به عنوان اصل هویگنس معروف است. این اصل که برای تفسیر رفتارهای هرگونه موجی به کار می‌رود از دو فرض زیر تشکیل شده است

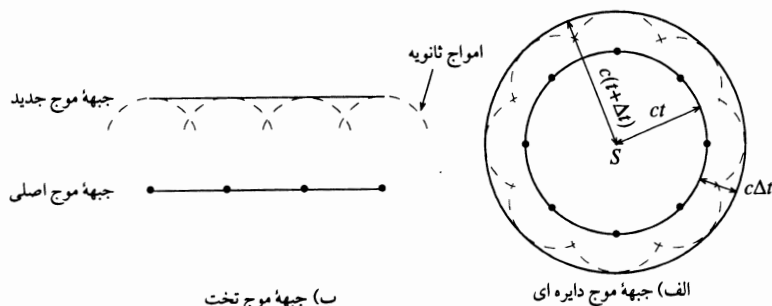
۱. هر نقطه واقع بر جبهه موج مانند یک چشمه ثانوی موج عمل می‌کند.

۲. در هر لحظه جبهه جدید موج، سطحی مماس بر این امواج ثانوی خواهد بود.

در شرایط ساده‌ای که چشمه موج نقطه‌ای و محیط همسانگرد<sup>۳</sup> (ایزوتروپ) باشد اصل هویگنس را شرح می‌دهیم. در شکل ۳-۵ الف،  $S$  چشمه‌ای نقطه‌ای است و موجی دایره‌ای ایجاد می‌کند. جبهه این موج در لحظه  $t$  نشان داده شده است. برای آنکه بخواهیم جبهه موج را در لحظه  $\Delta t$  بعد مشخص

1- Young, Thomas 2- Huygens, Christian

۳- محیط همسانگرد محیطی است که در آن خواص فیزیکی در جهتهای مختلف یکسان است، مثل آب و شیشه. ولی در محیطهای ناهمسانگرد، مثل بلورها، خواص فیزیکی در جهتهای مختلف متفاوت است.



شکل ۳-۵ الف) جبهه موج دایره ای، ب) جبهه موج تخت.

کنیم، برطبق اصل هویگنس موجهای ثانوی را رسم می‌کنیم. شعاع هر یک از این دایره‌های موجی  $v\Delta t$  و مرکز آنها روی جبهه موج اولی است. امواج با کمانهای خط چین نشان داده شده‌اند. جبهه جدید موج سطحی است که مماس بر همه این امواج ثانوی است. شعاع این جبهه موج دایره ای  $v(t + \Delta t)$  است. اصل هویگنس را می‌توان برای ترسیم جبهه موج تخت نیز به کار برد. در شکل ۳-۵ ب یک جبهه موج تخت نشان داده شده است. جبهه موج بعدی نیز که مماس بر موجهای ثانوی است یک موج تخت است.

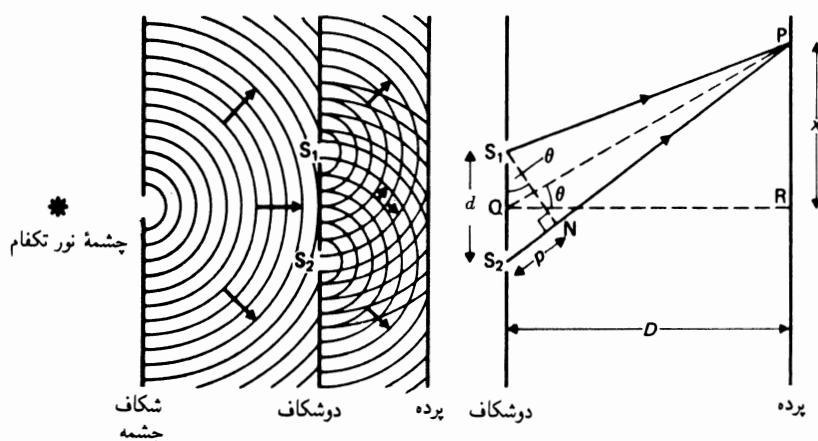
با استفاده از نظریه هویگنس پدیده‌های بازتابش، شکست، تداخل، پراش و قطبیدگی نور را به سهولت می‌توان توضیح داد.

□ پرسش ۱. وقتی دو موج شبیه به یکدیگر بر هم نهاده شوند و تداخل کنند چه می‌شود؟

- الف) در نقاطی که دو موج همفاز باشند، دامنه موج حاصل صفر است.  
 ب) در نقاطی که دو موج در فاز مخالف باشند، دامنه موج حاصل بیشینه است.  
 پ) در نقاطی که دو موج همفاز باشند تداخل سازنده به وجود می‌آید.  
 ت) در نقاطی که دو موج در فاز مخالف باشند، تداخل سازنده به وجود می‌آید.

### ۳-۵ تداخل نور<sup>۱</sup>

مفهوم ترکیب امواج، توسط نیوتون در قرن هفدهم به مرحله عمل رسید. او هنگام بحث در مورد مدهای غیرعادی دریا، امواج آب را مورد مطالعه قرار داد. اما تا ابتدای قرن نوزدهم آزمایشی روی ترکیب نور صورت نگرفته بود، تا آنکه یانگ اعلام کرد که نور به صورت امواجی عرضی منتشر می‌شود و به این وسیله نظریه موجی نور را از نو مطرح کرد. او در سال ۱۸۰۱/۱۸۰۲ نور خورشید را از دو سوراخ کوچک یک صفحه کدر عبور داد و پدیده تداخل را مشاهده کرد. در این بخش ما آزمایش تداخل را به کمک دو شکاف یانگ شرح می‌دهیم. چگونگی انجام این آزمایش در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. چشمه نور، لامپ بخار سدیم است که نوری تقریباً تکفام گسیل می‌دارد. پرتوهای نور از یک شکاف



شکل ۴-۵ آزمایش دو شکاف یانگ و چگونگی تشکیل نقش تداخلی.

می‌گذرند و به صفحه‌ای که روی آن دو شکاف قرار دارد می‌رسند. این دو شکاف دو چشمه جدید نورند که پرتوهای نور همدوس را به سطح پرده‌ای که در مقابل آنها قرار دارد می‌تابانند. همدوسی به این معناست که پرتوهای این دو شکاف با یکدیگر همفازند و برخلاف دو چشمه مستقل که فازشان به طور مرتب با زمان تغییر می‌کند، اختلاف فاز دو چشمه نسبت به هم ثابت است.

حال فرض کنیم که نقطه  $P$  روی پرده از دو شکاف پرتوهای  $S_1P$  و  $S_2P$  را دریافت می‌کند. خط  $S_1N$  را عمود بر  $S_2P$  رسم می‌کنیم. اگر زاویه  $\theta$  کوچک باشد،  $S_1P$  با  $NP$  تقریباً برابر خواهد بود. بنابراین اختلاف راه پرتوهایی که از دو شکاف به نقطه  $P$  می‌رسند برابر  $S_2N$  است و داریم

$$\sin \theta = \frac{S_2N}{S_1S_2}$$

از طرف دیگر زاویه  $\theta$  از مثلث  $QPR$  برابر است با

$$\sin \theta = \frac{PR}{PQ}$$

در نتیجه خواهیم داشت

$$\frac{S_2N}{S_1S_2} = \frac{PR}{PQ} \Rightarrow S_2N = S_1S_2 \frac{PR}{PQ}$$

اگر نقطه  $P$  دارای حداکثر شدت باشد تداخل سازنده و اختلاف فاصله آن از دو چشمه موج یعنی  $S_2N$  ضریب درستی از  $\lambda$  یعنی  $k\lambda$  است. در این صورت در  $P$  نوار روشن  $k$ ام قرار دارد و داریم

$$k\lambda = d \frac{x}{D}$$

یا

$$\lambda = \frac{dx}{kD} \quad (۱-۵)$$

$\lambda$  طول موج نور و  $d$  فاصله دو شکاف و  $D$  فاصله بین پرده و صفحه دو شکاف و  $x$  فاصله نوار روش  $k$ ام از مرکز است

$$x = k\lambda \frac{D}{d} \quad (۲-۵)$$

برای نوار روشن مرکزی  $k = 0$  است و برای نوارهای بعدی  $k$  برابر ۱، ۲، ... است. فاصله مرکز دو نوار در یک طرف نوار مرکزی برابر است با

$$x_p - x_1 = \Delta x = (k_p - k_1)\lambda \frac{D}{d} \quad (۳-۵)$$

و اگر دو نوار در دو طرف نوار مرکزی باشند، فاصله مرکز دو نوار برابر است با

$$x_p + x_1 = (k_p + k_1)\lambda \frac{D}{d}$$

اگر نقطه  $P$  تاریک یعنی دارای کمینه شدت باشد، اختلاف فاصله آن از دو چشمه موج یعنی

$S_p N$  ضریب فردی از نصف طول موج و تداخل ویرانگر است و داریم

$$S_p N = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} = d \frac{x}{D}$$

$$\lambda = \frac{2dx}{(2k + 1)D} \quad (۴-۵)$$

فاصله این نقطه تا نوار مرکزی ( $k = 0$ ) برابر است با

$$x = (2k + 1) \frac{\lambda D}{2d} \quad (۵-۵)$$

به این ترتیب روی صفحه مشاهده نوارهای تقریباً موازی روشن و تاریکی دیده می‌شود که به آن

طرح یا نقش تداخلی یا فریزهای تداخلی می‌گویند (شکل ۵-۵). با نور سفید این فریزها رنگی‌اند.



شکل ۵-۵ شکل فریزهای تداخلی دو شکاف.

□ پرسش ۲. در شکل ۴-۵ نور از دو شکاف  $S_1$  و  $S_2$  به نقطه  $P$  می‌رسد. اختلاف فاز در نقطه  $P$

چقدر باشد تا نوار روشن در آنجا به وجود آید؟  $n$  و  $m$  اعداد صحیح‌اند.

الف)  $\varphi = m\pi$       ب)  $\varphi = 2m\pi$       پ)  $\varphi = (2n - 1)\frac{\pi}{2}$       ت)  $\varphi = (2n - 1)\pi$

مثال ۱. نور تکفامی به طول موج  $5/5 \times 10^{-7} \text{m}$  به دو شکاف که فاصله آنها از هم  $1/1 \text{mm}$  است می‌تابد. فاصله مرکز هر یک از نوارهای تداخلی زیر را از نوار مرکزی حساب کنید. فاصله صفحه مشاهده از صفحه دو شکاف  $1/5$  متر است.

الف) اولین نوار روشن  
ب) دهمین نوار روشن  
پ) اولین نوار تاریک  
ت) چهارمین نوار تاریک

حل:

$$x_1 = \frac{k\lambda D}{d} = 1 \times \frac{5/5 \times 10^{-7} \times 1/5}{1/1 \times 10^{-3}} = 7/5 \times 10^{-4} \text{m} \quad \text{الف)}$$

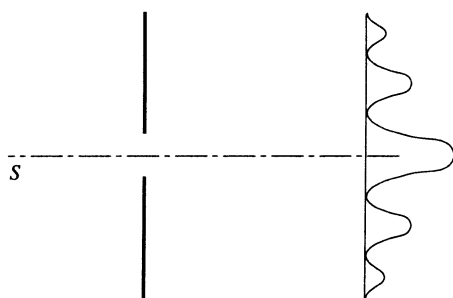
$$x_2 = \frac{k\lambda D}{d} = 10 \times \frac{5/5 \times 10^{-7} \times 1/5}{1/1 \times 10^{-3}} = 7/5 \times 10^{-3} \text{m} \quad \text{ب)}$$

$$x_3 = \frac{(2k+1)\lambda D}{2d} = \frac{(2 \times 0 + 1) \times 5/5 \times 10^{-7} \times 1/5}{2 \times 1/1 \times 10^{-3}} = 3/75 \times 10^{-4} \text{m} \quad \text{پ)}$$

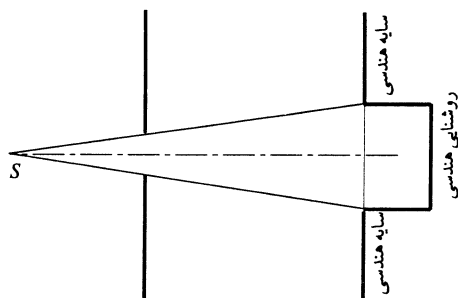
$$\blacktriangle x_4 = \frac{(2k+1)\lambda D}{2d} = \frac{(2 \times 4 + 1) \times 5/5 \times 10^{-7} \times 1/5}{2 \times 1/1 \times 10^{-3}} = 33/75 \times 10^{-4} \text{m} \quad \text{ت)}$$

## ۴-۵ پراش نور

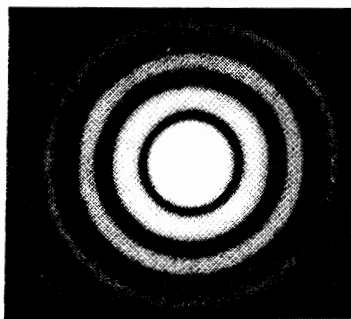
پراش نور پدیده‌ای است که به علت محدود کردن سطح عبور نور، برخلاف قانونهای نور هندسی، که بر انتشار راستخط نور مبتنی است، پیش می‌آید. مثلاً اگر (مطابق شکل ۵-۶) شکاف باریکی را مقابل یک چشمه نقطه‌ای نور قرار دهیم، از نظر نور هندسی، توزیع شدت روی صفحه مشاهده به ترتیبی است که در شکل نشان داده شده است. ولی اگر شکاف را به تدریج باریکتر کنیم، ملاحظه می‌کنیم که توزیع شدت دیگر از قانونهای نور هندسی پیروی نمی‌کند و بسته به پهنای شکاف، مثلاً ممکن است توزیع شدت نور مطابق شکل ۵-۷ باشد. به این انحراف توزیع شدت از نور هندسی، که به علت موجی بودن



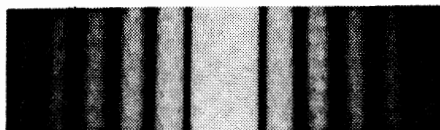
شکل ۵-۷ توزیع شدت ناشی از یک شکاف باریک براساس نور موجی.



شکل ۵-۶ توزیع شدت ناشی از یک شکاف براساس نور هندسی.



شکل ۵-۹ نقش پراش یک روزنه دایره‌ای.



شکل ۵-۸ نقش پراش یک شکاف.

نور صورت می‌گیرد، پراش گفته می‌شود. پراش یک شکاف، مانند شکل ۵-۸ است و اگر محدودکننده نور به شکل روزنه دایره‌ای کوچکی باشد نقش پراش مانند شکل ۵-۹ است.

توضیح پدیده پراش به کمک اصل هویگنس، که در بند ۵-۲ بیان شد، صورت می‌گیرد. بنابراین اصل، چشمه  $S$  یک سطح موج کروی ایجاد می‌کند که انرژی نوری در یک لحظه معین روی این سطح قرار دارد. وقتی این سطح موج به شکاف یا روزنه دایره‌ای محدود کننده این سطح موج رسید، هر نقطه شکاف یا روزنه خود یک چشمه ثانوی نور می‌شود و سطح موجی را پس از شکاف یا روزنه ایجاد می‌کند. حال بسته به اینکه این سطح موجهای ثانوی پراشیده شده از نقاط مختلف شکاف یا روزنه در نقطه‌ای از صفحه مشاهده با چه اختلاف فازی با هم تداخل کنند می‌توانند شدت معینی را که می‌تواند بیشینه یا کمینه هم باشد به وجود آورند. به این ترتیب توزیع شدتی به وجود می‌آید که به آن نقش پراش یا فریزهای پراش می‌گویند.

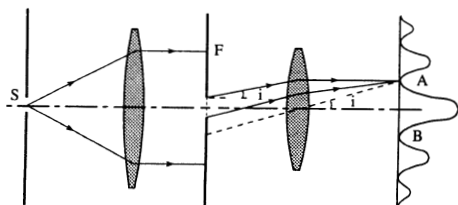
## ۵-۵ پراش فرنل و فرانیهوفر<sup>۱</sup>

در پدیده پراش اگر فاصله چشمه نور تا شکاف و فاصله شکاف تا صفحه مشاهده مقادیر محدودی باشند، پراش را محدود یا فرنل می‌نامند و اگر فاصله چشمه نور تا شکاف و فاصله شکاف تا صفحه مشاهده مقادیر نامحدودی داشته باشند پراش را نامحدود یا فرانیهوفر می‌نامند. در حالت اول سطح موج استوانه‌ای و در حالت دوم تخت است. برای ایجاد پراش نامحدود یا فرانیهوفر باید قبل از شکاف یک عدسی قرار داد و با قرار دادن چشمه نور در کانون این عدسی نور را موازی کرد. هم‌چنین باید پشت شکاف نیز، مانند شکل ۵-۱۰ عدسی دیگری قرار داد و سطح مشاهده را سطح کانونی این عدسی در نظر گرفت. توزیع شدت در پراش نامحدود یا فرانیهوفر در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است.

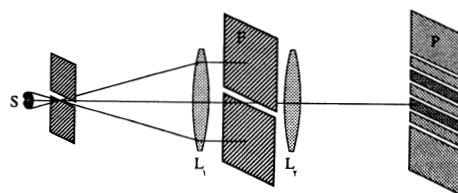
می‌توان ثابت کرد که زاویه پراش  $i'$  مربوط به کمینه اول پراش از رابطه  $\sin i' = \frac{\lambda}{b}$  به دست می‌آید که در آن  $\lambda$  طول موج نوری است که چشمه گسیل می‌دارد و  $b$  پهنای شکاف است. ملاحظه می‌شود که هر چه  $b$  کوچکتر باشد زاویه پراش  $i'$  بزرگتر و نور بیشتر پراشیده می‌شود. همانطور که از

1- Fresnel and Fraunhofer diffraction

نور موجی - تداخل، پراش و قطبش نور / ۷۹



شکل ۱۱-۵ چگونگی توزیع شدت در پراش فرانیهوفر یک شکاف.

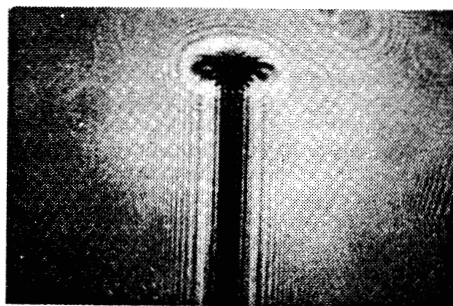


شکل ۱۰-۵ آرایش مربوط به پراش فرانیهوفر یک شکاف.

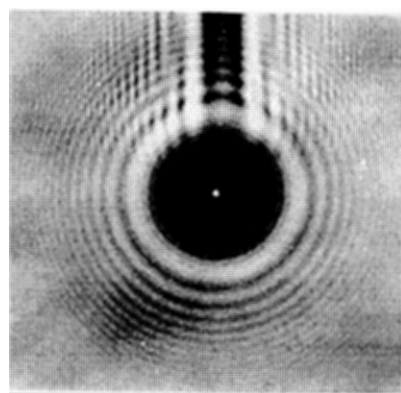
رابطه بالا برمی آید پراش طول موجهای بزرگتر بیشتر از طول موجهای کوچکتر است، یعنی مثلاً نور سرخ نسبت به نور بنفش بیشتر پراشیده می شود.

پدیده پراش به روزنه و شکاف منحصر نیست، بلکه هر نوع مانعی که درمقابل یک چشمه نور قرار گیرد و سطح موج حاصل از چشمه را محدود کند روی صفحه مشاهده یک نقش پراش ایجاد می کند. مثلاً شکل ۱۲-۵ نقش پراش حاصل از یک مانع دایره ای، شکل ۱۳-۵ نقش پراش حاصل از یک سنجاق و شکل ۱۴-۵ نقش پراش حاصل از لبه یک پرده است.

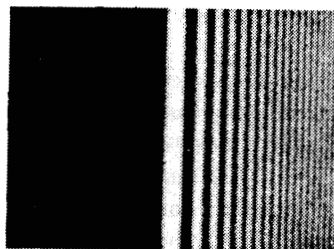
حال اگر به جای پراش فرانیهوفر یک شکاف، پراش فرانیهوفر دو شکاف، یعنی دو روزنه یانگ را تشکیل دهیم، یعنی به کمک عدسی  $L_1$  به شکافها نور موازی بتابانیم و صفحه مشاهده را در سطح



شکل ۱۳-۵ نقش پراش حاصل از یک سنجاق.

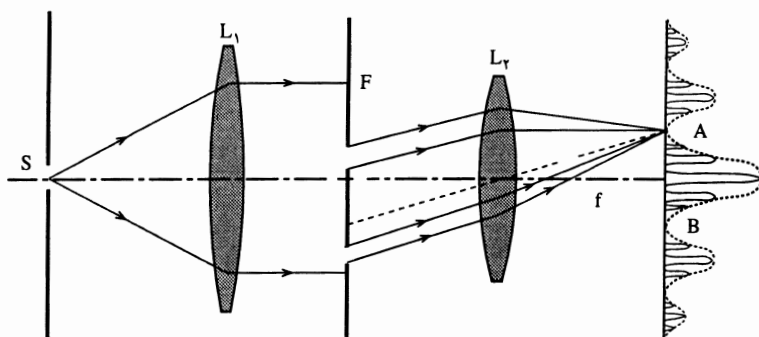


شکل ۱۲-۵ نقش پراش حاصل از یک مانع دایره ای.



شکل ۱۴-۵ نقش پراش حاصل از لبه پرده.





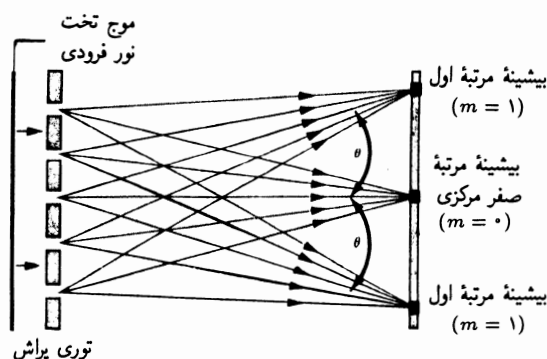
شکل ۱۵-۵. نقش پراش فرانیهوفر حاصل از دو شکاف.

کانونی عدسی  $L_2$  در نظر بگیریم، هر یک از شکافها شکل پراشی به دست می‌دهند و همانطور که در شکل ۱۵-۵ مشاهده می‌شود نورهای پراشیده از دو شکاف در یک جهت خاص در یک نقطه مثل  $A$  جمع می‌شوند. بسته به اختلاف راه پرتوهای پراشیده شده از یک شکاف این نقطه می‌تواند بیشینه یا کمینه یعنی روشن یا تاریک باشد. به این ترتیب دو شکل پراش حاصل از دو شکاف بر هم منطبق‌اند (منحنی نقطه‌چین در شکل ۱۵-۵). ولی دو شکاف یک شکل تداخلی، ناشی از دو شکاف، که به صورت دو چشمه هم‌دوس عمل می‌کنند، نیز به دست می‌دهند که این فریزهای تداخلی تاریک و روشن به صورت خط‌پر در شکل ۱۵-۵ نشان داده شده‌اند.

## ۵-۶ توری پراش<sup>۱</sup>

توری پراش یک شیشه تخت است که با ماشین تقسیمه‌ای بسیار دقیق و با کمک نوک الماس بسیار ظریف تعداد بسیار زیادی خطوط موازی هم و با فاصله خیلی کم روی آن کشیده می‌شود. این خطوط نمی‌توانند نور را از خود عبور دهند ولی فاصله دو خط که شیشه است به صورت یک شکاف عمل می‌کند. به این ترتیب توری پراش درواقع از تعداد بسیار زیادی قسمتهای شکاف مانند تشکیل شده است. حال اگر این توری را درمقابل نور موازی قرار دهیم و پراش فرانیهوفر این  $N$  شکاف را تشکیل دهیم، هرکدام از این شکافها نور را پراشیده می‌کند ضمن این که  $N$  شکاف توری به منزله  $N$  شکاف هم‌دوس عمل می‌کنند و یک طرح تداخلی نیز تشکیل می‌شود. حاصل آنکه نوارهای روشن تیزی در مرتبه‌های مختلف دیده می‌شود (شکل ۱۶-۵). این نوارهای روشن در نقاطی تشکیل می‌شوند که پرتوهای نوری رسیده به آن نقاط هم‌فاز باشند. اگر نور تابیده به توری تک‌فاز نباشد و از چند طول موج تشکیل شده باشد، چون زاویه پراش نظیر بیشینه‌ها به طول موج نیز بستگی دارد پس نوارهای روشن مربوط به طول موجهای مختلف در نقاط مختلفی تشکیل خواهد شد، یعنی رنگها از هم جدا می‌شوند و طیف آن نور مرکب تشکیل می‌شود. در طیف‌سنجی، از توری برای اندازه‌گیری طول موج استفاده می‌شود. هر قدر تعداد کل شکافها بیشتر و فاصله آنها از هم کمتر باشد دقت اندازه‌گیری طول موج بیشتر است.

1- diffraction grating

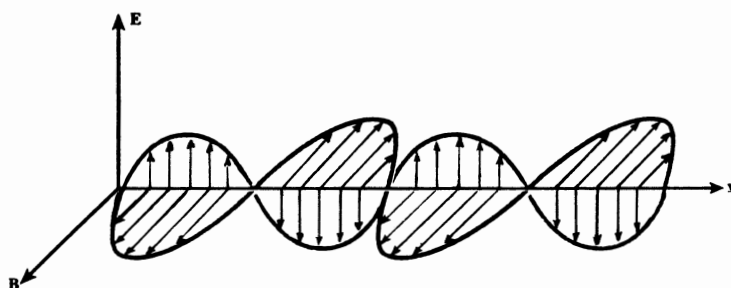


شکل ۱۶-۵ توری پراش.

چون بلورها موادی هستند که از آرایه منظمی از اتمها تشکیل شده‌اند، بلورها در واقع توریهای پراش سه‌بعدی در طبیعت‌اند. ولی چون فاصله اتمها در یک بلور حدود دهم نانومتر است ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ) پرتوهای نور مرئی که حدود ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر هستند نمی‌توانند برای مطالعه ساختار اتمها به کار روند، ولی پرتوهای ایکس که طول موج بسیار کوتاهتری دارند وسیله بسیار مناسبی برای مطالعه ساختار اتمها و نیز مطالعه مولکولهای بیولوژیکی پیچیده نظیر پروتئینها و DNA به حساب می‌آیند.

## ۷-۵ قطبش نور

با مطالعه بخشهای پیشین به این نتیجه رسیدیم که نور ماهیت موجی دارد. با مطالعه این بخش و انجام آزمایشهایی درمی‌یابیم که نور، موجی عرضی است، یعنی امتداد ارتعاش بر امتداد انتشار عمود است. نور بخشی از طیف گسترده امواج الکترومغناطیسی است. هر موج الکترومغناطیسی از دو میدان وابسته به یکدیگر الکتریکی ( $E$ ) و مغناطیسی ( $B$ ) که بر هم عمودند تشکیل شده است. امتداد انتشار نور بر سطح این دو میدان عمود است (شکل ۱۷-۵). بیشتر خواص نور از جمله اثر بر چشم مربوط به



شکل ۱۷-۵

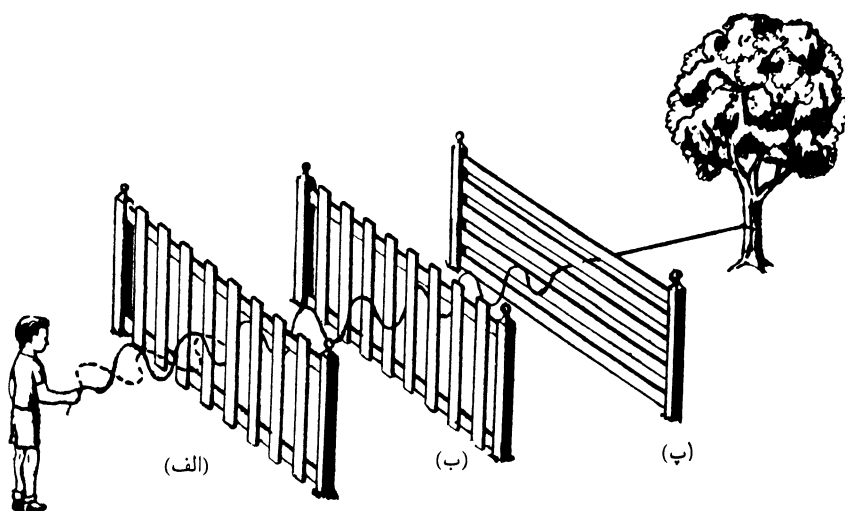
میدان الکتریکی است. در نور طبیعی امتداد بردار الکتریکی به طور کاتوره‌ای تغییر می‌کند زیرا انتهای مختلف چشمه نور به طور کاتوره‌ای در امتدادهای مختلف این ارتعاشها را گسیل می‌دارند. ارتعاش میدان الکتریکی یا مغناطیسی، که همواره بر امتداد انتشار عمود است ممکن است، در هر کسر کوچکی از ثانیه در امتداد بخصوصی ارتعاش کند و نیز ممکن است این ارتعاش هر لحظه روی دایره و بیضی بخصوصی باشد، ولی احتمال وقوع هر کدام از این حالت‌های ارتعاشی با هم مساوی است. ولی در نور قطبیده ارتعاش الکتریکی یا مغناطیسی وضع مشخصی را دائماً حفظ می‌کند. اگر ارتعاش همواره روی امتداد ثابتی قرار داشته باشد یعنی امتداد ارتعاش ثابت باشد ولی دامنه آن تغییر کند نور را قطبیده خطی و اگر ارتعاش همواره روی یک دایره قرار داشته باشد، یعنی جهت ارتعاش تغییر کند ولی دامنه ثابت باشد نور را قطبیده دایره‌ای و اگر ارتعاش روی یک بیضی باشد یعنی جهت و دامنه هر دو تغییر کند نور را قطبیده بیضوی می‌نامند.

امواج رادیویی و راداری که توسط جریان الکتریکی پربسامد از یک آنتن تولید می‌شوند قطبیده‌اند، زیرا امتداد بردار الکتریکی این امواج موازی آنتن و ثابت است.

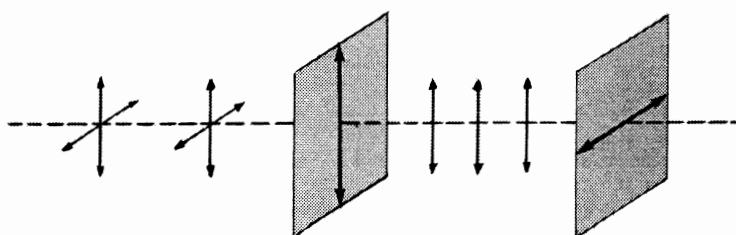
نور طبیعی را می‌توان به چند روش به نور قطبیده تبدیل کرد. این روشها عبارت‌اند از قطبش به وسیله جذب انتخابی، قطبش بر اثر پدیده دو شکستی، قطبش به وسیله بازتابش و قطبش بر اثر پراکندگی.

### ۵-۸ قطبش به وسیله جذب انتخابی

طنابی را مطابق شکل ۵-۱۸ از سه زرده بگذرانید، یک طرف آن را به نقطه ثابتی ببندید و انتهای دیگرش را در دست بگیرید. هرگاه انتهای طناب را در امتداد قائم بالا و پایین ببرید یک موج عرضی در آن



شکل ۵-۱۸ قطبش امواج مکانیکی.



شکل ۵-۱۹ قطبیده شدن نور در بلور تورمالین.

ایجاد می‌شود که امتداد ارتعاش هر ذره و امتداد انتشار موج در یک سطح ثابت قرار دارند. این موج را موج قطبیده در سطح قائم گویند و می‌تواند از نرده «الف» و «ب» به خوبی بگذرد، ولی نرده «پ» مانع از عبور آن می‌شود. اگر طناب را در امتداد افقی به راست و چپ ببریم موج قطبیده افقی تولید کرده‌ایم که نرده «الف» مانع از عبور آن می‌شود ولی اگر نرده «پ» جلوتر از نرده «الف» بود این موج از آن می‌گذشت.

اگر دست در امتدادهای مختلف حرکت نوسانی داشته باشد، امواج حاصل در طناب هم در امتدادهای مختلف به وجود می‌آید به طوری که سطح حاصل از ارتعاش هر ذره و انتشار موج می‌تواند افقی، قائم یا در هر راستای دیگری باشد. در این حالت نیز نرده الف و ب فقط مولفه‌های قائم ارتعاش را از خود عبور می‌دهند و امواج مکانیکی طناب را قطبیده می‌کنند.

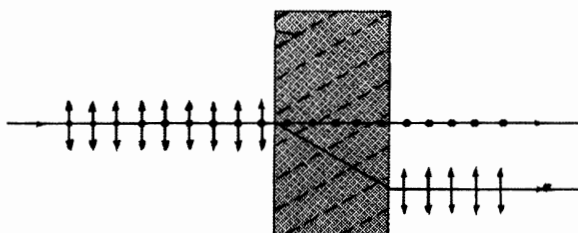
نور طبیعی ناقطبیده است و مثلاً میدان الکتریکی  $E$  در لحظه‌های مختلف در همه امتدادهای عمود بر راستای انتشار ارتعاش می‌کند. هرگاه در مسیر یک دسته پرتو نور طبیعی که به چشم ناظر می‌رسد دو بلور تورمالین<sup>۱</sup>، مطابق شکل ۵-۱۹ قرار دهیم، ملاحظه می‌شود که با چرخاندن یکی از بلورها شدت نور تغییر می‌کند. چنانچه این بلور را یک دور کامل بچرخانیم شدت نور دوبار حداکثر و دوبار حداقل خواهد شد.

علت تغییر شدت نور آن است که تورمالین ساختمان مولکولی ویژه‌ای دارد که وقتی نور طبیعی از آن بگذرد این نور قطبیده می‌شود و فقط ارتعاشهای میدان الکتریکی در امتداد مشخصی، که محور عبور نامیده می‌شود، از آن می‌گذرد. چنانچه این نور قطبیده به بلور دیگری برخورد کند اگر محورهای عبور دو بلور موازی باشند نور از بلور دوم خواهد گذشت و شدت نور بیشینه است. ولی اگر این دو امتداد بر هم عمود باشند، همه پرتوهای نوری که از بلور اول گذشته‌اند توسط بلور دوم جذب می‌شوند. برای تهیه ورقه‌های بزرگی که بتوانند نور را قطبیده کنند در قرن نوزدهم کوشش بسیار صورت گرفت و ادامه یافت تا آنکه در سال ۱۳۱۱/۱۹۳۲ لندن<sup>۲</sup> امریکایی پلاروید<sup>۳</sup> را اختراع کرد. پلاروید ورقه نازکی است از پلاستیک معروف به استات سلولز که در آن هزاران بلور سوزن مانند هراپاتیت را چنان جایگزین کرده‌اند که محورهای آنها به موازات یکدیگر قرار دارند. این ورقه‌ها را می‌توانند به آسانی با

هر ابعادی که بخواهند ببرند و مورد استفاده قرار دهند. اکنون انواع پلاروید برای هر ناحیه نوری ساخته شده ولی اساس کار آن تغییر نیافته است و از همان بلورهای سوزنی شکل موازی ساخته شده‌اند.

### ۹-۵ قطبش بر اثر پدیده دوشکستی<sup>۱</sup>

هرگاه یک باریکه نوری به بلوری مانند کلسیت یا کوارتز برخورد کند، به دو باریکه نوری شکسته می‌شود و از بلور می‌گذرد (شکل ۵-۲۰). این پدیده را پدیده دوشکستی می‌نامند. اگر پرتو نوری به‌طور عمود بر یک وجه بلور بتابد، بخشی از آن بدون انحراف عبور می‌کند که آن را پرتو عادی<sup>۲</sup>، یا پرتو  $O$  می‌نامند زیرا این پرتو از قانونهای اسنل - دکارت تبعیت می‌کند و بخشی دیگر شکسته می‌شود که آن را پرتو غیرعادی<sup>۳</sup> یا پرتو  $E$  می‌نامند زیرا این پرتو از قانونهای اسنل - دکارت تبعیت نمی‌کند. هر دو پرتو به‌طور کامل قطبیده‌اند و بردار الکتریکی آنها بر هم عمود است. در این‌گونه بلورها فقط یک امتداد و گاهی دو امتداد مخصوص وجود دارد که اگر پرتوهای نوری در یکی از این امتدادها بتابد پدیده دوشکستی روی نمی‌دهد. این امتدادهای مخصوص را محور نوری بلور می‌نامند. به این ترتیب بلورها به دو دسته تک‌محوری و دو محوری تقسیم می‌شوند. هرگاه پرتو نور عمود بر محور نوری به بلور بتابد زاویه بین پرتو  $O$  و پرتو  $E$  بیشینه خواهد بود و اگر در امتداد محور نوری بلور بتابد این زاویه صفر است.



شکل ۲۰-۵ پدیده دوشکستی.

### ۱۰-۵ قطبش به وسیله بازتابش

هرگاه یک باریکه نوری با زاویه تابش  $i$  بر سطح یک قطعه شیشه بتابد، بخشی از آن با همان زاویه  $i$  بازتابیده می‌شود و بخشی دیگر شکسته شده و با زاویه  $r$  در شیشه منتشر می‌شود. به کمک یک قطعه پلاروید می‌توان نشان داد که هر یک از پرتوهای بازتابیده یا شکسته تا حدودی قطبیده‌اند.

مالوس<sup>۴</sup>، فیزیکدان فرانسوی، برای اولین بار به قطبش نور بر اثر بازتابش پی‌برد. بروستر<sup>۵</sup> فیزیکدان اسکاتلندی با انجام آزمایشهای متعدد به این نتیجه رسید که اگر نور از هوا با زاویه  $۵۷/۱۷^\circ$  درجه به سطح شیشه‌ای به ضریب شکست  $۱/۵۵$  برخورد کند، نور بازتابیده قطبیده کامل خواهد بود. مالوس با

1- polarization by double refraction

2- ordinary ray

3- extraordinary ray

4- Malus, Etienne 5- Brewster, Sir David

استفاده از قانون اسنل - دکارت زاویه شکست را به شکل زیر به دست آورد

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

$$i = 57,17, \quad n_2 = 1,55, \quad n_1 = 1$$

پس داریم

$$\sin r = \frac{n_1}{n_2} \sin i = \frac{1}{1,55} \sin 57,17$$

$$\sin r = \frac{0,8403}{1,55} = 0,5421 \Rightarrow r = 32,83^\circ$$

و نتیجه اندازه گیری آن است که مجموع زاویه تابش و زاویه شکست برابر  $90^\circ$  درجه است، یعنی

$$i + r = 57,17 + 32,83 = 90^\circ$$

بروستر با نتیجه گیری از این آزمایش، قانونی را که به قانون بروستر معروف است بیان کرد. بنابراین قانون، در هر جسم شفاف، نور بازتابیده وقتی کاملاً قطبیده است که پرتو بازتابیده و پرتو شکسته بر هم عمود باشند.

وقتی پرتو بازتابیده قطبیده کامل باشد، زاویه تابش را زاویه قطبش (یا زاویه بروستر) می نامند. زاویه قطبش نور را می توان با توجه به قانون بروستر و شکل ۵-۲۱ به صورت زیر حساب کرد. طبق قانون بروستر داریم

$$\hat{i} + \hat{r} = 90^\circ$$

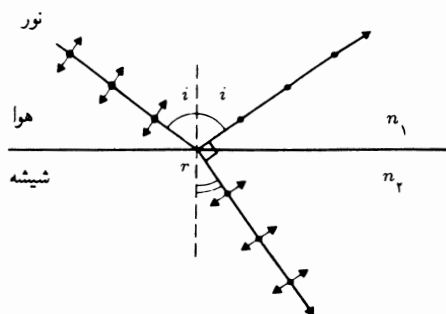
$$\hat{r} = 90^\circ - \hat{i}$$

طبق قانون اسنل - دکارت

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

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin i}{\cos i} \Rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \tan i$$

$$i = \text{Arctan} \frac{n_2}{n_1}$$



شکل ۵-۲۱ برای زاویه قطبش، نور بازتابیده کاملاً قطبیده است.

یعنی زاویه قطبش زاویه‌ای است که تانژانت آن برابر ضریب شکست محیط دوم نسبت به محیط اول باشد.

## ۱۱-۵ کاربردهای نور قطبیده

همانطور که بیان شد اگر دو ورقه پلاروید را در مقابل یکدیگر قرار دهیم، به طوری که محورهای عبور آن دو با هم موازی باشند نور تابیده به آنها تقریباً با همان شدت می‌گذرد و اگر یکی را ثابت و دیگری را بگردانیم شدت نور عبوری کاهش می‌یابد و در حالتی که محورهای عبور دو ورقه برهم عمود باشند شدت نور عبوری تقریباً صفر می‌شود.

شدت نور خروجی از دو ورقه پلاروید از رابطه  $E = E_0 \cos^2 \theta$  به دست می‌آید.  $E$  شدت نور خروجی و  $E_0$  شدت نور ورودی و  $\theta$  زاویه محورهای دو پلاروید است. با تنظیم مناسب دو پلاروید می‌توان نور را به طور مطلوب عبور داد.

با پلارویدها می‌توان پرتوهای مزاحم را حذف کرد. در عینکهای آفتابی از این خاصیت استفاده می‌شود. نور خیره‌کننده‌ای که از سطح جاده‌های آسفالت بازتابیده می‌شود تقریباً قطبیده است و معمولاً امتداد ارتعاش آنها تا حدودی افقی است. اگر شیشه‌های عینک آفتابی از ورقه پلاروید و محور عبورشان قائم باشد این پرتوهای بازتابیده از آن عبور نمی‌کنند. کاربرد دیگر پلاروید کاهش شدت نور چراغ اتومبیلها در شب است. چراغهای بزرگ اتومبیل را با ورقه‌های پلاروید که محور از عبورشان  $45^\circ$  با خط قائم زاویه دارد می‌پوشانند. بر شیشه جلوی بعضی از اتومبیلها چنین ورقه‌ای که محور عبورش عمود بر محور عبور ورقه پلاروید چراغ باشد قرار می‌دهند. در این صورت وقتی دو اتومبیل در جهت مخالف یکدیگر حرکت می‌کنند نور چراغ هراتومبیل به چشم راننده دیگر بسیار ضعیف می‌رسد. برای مشاهده عکسهای سه‌بعدی و نیز متحرک دیدن تصویرهای ثابت می‌توان از قطبش استفاده کرد. از نور قطبیده و دوران سطح قطبش در نمایشگرهای بلور مایع در ماشین‌حسابهای الکترونیکی، ساعت‌های رقمی، رایانه‌های قابل حمل و بسیاری موارد دیگر استفاده می‌شود.

## خلاصه فصل

هویگنس نظریه موجی بودن نور را بیان کرد و یانگ آزمایشهایی درباره نور انجام داد که با نظریه هویگنس قابل توجیه بود. بنابر نظریه هویگنس انرژی نور به صورت موج در فضا منتشر می‌شود و هر نقطه واقع بر جبهه موج مانند یک چشمه ثانوی نور عمل می‌کند. با قبول نظریه موجی نور پدیده‌های تداخل، پراش و قطبش نور شرح داده می‌شوند.

موجهای گسیل شده از دو یا چند چشمه با هم ترکیب می‌شوند. پدیده تداخل حالت خاصی از ترکیب امواج است. با استفاده از پدیده تداخل و آزمایش دو شکاف یانگ طول موج نور از رابطه

$\lambda = \frac{dx}{kD}$  به دست می‌آید. در این رابطه  $\lambda$  طول موج نور،  $d$  فاصله دو شکاف،  $D$  فاصله بین دو شکاف و صفحه مشاهده و  $x$  فاصله  $k$  امین بیشینه شدت نور تا بیشینه مرکزی است.

پراش نور پدیده‌ای است که به علت محدود کردن سطح عبور نور برخلاف قانونهای نور هندسی پیش می‌آید. زاویه پراش مربوط به کمینه اول در یک شکاف باریک از رابطه  $\sin i' = \frac{\lambda}{a}$  به دست می‌آید. هر اندازه  $d$ ، یعنی عرض شکاف کمتر و  $\lambda$  بیشتر باشد  $\sin i'$  و در نتیجه  $i'$  بزرگتر است و نور بیشتر پراشیده می‌شود.

برای امواج نوری پراش ناچیز است و در نتیجه نور کمتر منحرف می‌شود، ولی برای امواج صوتی و امواج رادیویی، که طول موج آنها بلند است زاویه  $i'$  نسبتاً بزرگ است و صوت و امواج رادیویی بر اثر برخورد با مانع کاملاً از امتداد خود منحرف می‌شوند.

توری پراش یک شیشه تخت است که روی آن با وسایل خاصی تعداد بسیار زیادی خطوط ظریف موازی هم کشیده می‌شود. هرگاه یک دسته نور موازی بر توری پراش بتابد، روی پرده‌ای که در پشت یک عدسی کوژ قرار دارد نوارهای روشنی در بیشینه‌های تداخلی دیده می‌شوند. اگر نور تابیده به توری نور مرکب باشد، طول موجهای مختلف از هم جدا می‌شوند و این نوارها رنگی‌اند.

در طبیعت بلورها مانند توری پراش سه بعدی عمل می‌کنند. اگر بلوری در مسیر پرتوهای ایکس قرار گیرد، پرتوها را پراشیده می‌کند. با عکسبرداری از نقش پراش می‌توان ساختار بلور را مورد بررسی قرار داد.

پدیده قطبش نور نشان می‌دهد که نور موج عرضی است. به طور کلی همه امواج الکترومغناطیسی از نوع عرضی‌اند. با روشهای مختلف می‌توان نور طبیعی را به نور قطبیده تبدیل کرد یعنی به میدان الکتریکی و نیز میدان مغناطیسی امتداد خاصی را نسبت داد. روشهای تبدیل عبارتند از قطبش به وسیله جذب انتخابی، قطبش بر اثر بازتابش نور و قطبش بر اثر پدیده دوشکستی.

## هدفهای آموزشی

اکنون که این فصل را به پایان رسانیده‌اید باید بتوانید

- تداخل نور را تعریف کنید.
- گره‌ها و شکمها در امواج ایستاده را شرح دهید.
- اصل هویگنس را بیان کنید و توضیح دهید.
- آزمایش ینگ را شرح دهید.
- طول موج نور را محاسبه کنید.
- رابطه مربوط به طول موج نور در دو شکاف ینگ را شرح دهید.
- پدیده پراش را شرح دهید.



- توری پراش را شرح دهید.
- چند نقش پراش را مقایسه کنید.
- پدیده قطبش نور را شرح دهید.
- قطبش به وسیله جذب انتخابی را شرح دهید.
- قطبش بر اثر پدیده دوشکستی را شرح دهید.
- قطبش بر اثر بازتابش را شرح دهید.
- کاربرد نور قطبیده را بیان کنید.

## خود را پیازمایید

### پرسشها

۱. چه دلیلی بر عرضی بودن امواج نور موجود است؟
۲. با چه روشهایی می توان نور طبیعی را قطبیده کرد و چگونه می توان نور قطبیده را تشخیص داد؟
۳. هر یک از اصطلاحهای زیر را تعریف کنید.  
نور قطبیده، سطح قطبش، پدیده دوشکستی، محور نوری، پرتوهای عادی و غیرعادی
۴. کاربردهای نور قطبیده را شرح دهید.
۵. دو پلاروید طوری قرار گرفته اند که حداکثر شدت نور از آنها می گذرد. هرگاه پلاروید دوم را  $30^\circ$  درجه،  $45^\circ$  درجه، و  $60^\circ$  درجه دوران دهیم چه شدتی از نور در هر حالت از آنها می گذرد؟  
پاسخ:  $0/25$ ،  $0/5$ ،  $0/75$

### پرسشهای چهارگزینه ای

۱. ماهیت نور چیست؟  
(الف) نور موج است.  
(ب) نور ذره است.  
(پ) نور هم ذره و هم موج است.  
(ت) نور ماهیت دوگانه ذره و موج را دارد.
۲. هنگامی که دو موج بر هم نهاده شوند، چه می شود؟  
(الف) تداخل ویرانگر به وجود می آید.  
(ب) تداخل سازنده به وجود می آید

نور موجی - تداخل، پراش و قطبش نور / ۸۹

پ) در نقاطی که دو موج در فاز مخالف باشند، تداخل ویرانگر است.

ت) در نقاط همفاز تداخل ویرانگر است.

۳. در آزمایش یانگ در نقاطی نوار روشن تشکیل می‌شود که اختلاف فاز دو موج در آن نقطه ضریب درستی باشد از

الف)  $\pi$       ب)  $\frac{\pi}{4}$       پ)  $2\pi$       ت)  $\frac{\pi}{4}$

۴. در آزمایش یانگ اختلاف فاز برای دو پرتوی که نوار روشن مرکزی را تشکیل می‌دهند چقدر است؟

الف)  $2\pi$       ب)  $\pi$       پ)  $\frac{\pi}{4}$       ت) صفر

۵. در کدام نوع موج پدیده قطبش ممکن است روی دهد

الف) فقط مکانیکی طولی.

ب) فقط مکانیکی عرضی.

پ) فقط الکترومغناطیسی.

ت) مکانیکی عرضی و الکترومغناطیسی

۶. برای آنکه فاصله نوارهای روشن در نقش تداخلی زیاد شود چه باید کرد؟

الف) باید فاصله صفحه مشاهده از دو چشمه نور را زیادتر کنیم.

ب) باید از نوری با طول موج کوچکتر استفاده کنیم.

پ) باید فاصله دو چشمه نور را زیادتر کنیم.

ت) باید فاصله صفحه مشاهده از دو چشمه نور را کمتر کنیم.

۷. در آزمایش یانگ اختلاف فاز دو پرتوی که سومین نوار روشن پس از نوار روشن مرکزی را تشکیل می‌دهند چقدر است؟

الف)  $2\pi$       ب)  $4\pi$       پ)  $6\pi$       ت)  $8\pi$

۸. در آزمایش یانگ فاصله پنجمین نوار روشن از نوار مرکزی  $2/5$  میلی‌متر است. اگر فاصله دو شکاف

$2$  میلی‌متر و فاصله صفحه مشاهده از دو شکاف  $2m$  باشد، طول موج به کار رفته چند نانومتر است؟

الف)  $500$       ب)  $5000$       پ)  $600$       ت)  $6000$

۹. در آزمایش یانگ اگر فاصله صفحه مشاهده از شکافها  $750$  برابر فاصله دو شکاف و طول موج

نور مورد آزمایش  $600nm$  باشد، فاصله وسط ششمین نوار روشن از وسط نوار روشن مرکزی چند

میلی‌متر خواهد بود؟

الف)  $2$       ب)  $3/6$       پ)  $3$       ت)  $1$

۱۰. اگر آزمایش یانگ را در آب انجام دهیم، چه تغییری در نقش تداخلی به وجود می‌آید؟

الف) نوارها به یکدیگر نزدیک می‌شوند.      ب) عرض نوارها بیشتر می‌شود.

پ) نوارها روشنتر می‌شوند.      ت) در آب تداخل صورت نمی‌گیرد.

۱۱. برای آنکه در پدیده پراش با توری فاصله بیشینه‌ها بیشتر شود، طول موج نور و تعداد شکافها به ترتیب چگونه باید باشند؟

الف) بزرگتر، بیشتر (ب) بزرگتر، کمتر (پ) کوچکتر، بیشتر (ت) کوچکتر، کمتر

۱۲. کدامیک از پرتوهای زیر موقع عبور از روزنه بیشتر پراشیده می‌شوند؟

الف) ایکس (ب) گاما (پ) صوت (ت) نور

۱۳. با یک الماس بسیار نوک تیز از یک قطعه شیشه توری پراش ساخته‌ایم. چشمه‌های نور کدام است؟  
الف) خراشهای موازی روی شیشه.

ب) قسمت‌های دست نخورده شیشه.

پ) همه شیشه.

ت) هم خراشها و هم جاهای دست نخورده.

۱۴. تفاوت نقش تداخلی با دو شکاف موازی و نقش پراش با یک شکاف چیست؟

الف) فاصله دو نوار روشن متوالی در نقش پراش برابر و در نقش تداخلی متفاوت است.

ب) فاصله دو نوار روشن در نقش تداخلی برابر و در نقش پراش متفاوت است.

پ) در طرح تداخلی هر چه از نوار مرکزی دورتر شویم روشنایی نوارها بیشتر می‌شود و در نقش پراش عکس آن است.

ت) در نقش تداخلی نوارهای تاریک و روشن و در نقش پراش حلقه‌های تاریک و روشن به وجود می‌آید.

۱۵. برای کدام نوع موج پدیده قطبش روی می‌دهد؟

الف) هر نوع موج عرضی.

ب) موج طولی مکانیکی.

پ) فقط موج مکانیکی.

ت) فقط موج الکترومغناطیسی.

۱۶. نور قطبیده خطی نوری است که

الف) میدانهای الکتریکی و مغناطیسی بر هم منطبق‌اند.

ب) میدان الکتریکی ندارد.

پ) میدان مغناطیسی ندارد.

ت) میدانهای الکتریکی و مغناطیسی آن در راستاهای ثابتی نوسان می‌کنند.

۱۷. میدان الکتریکی نوری که به یک پلاروید برخورد کند وقتی کاملاً جذب می‌شود که

الف) به موازات محور عبور بلور باشد.

ب) عمود بر محور عبور بلور باشد.

پ) با محور عبور بلور زاویه  $45^\circ$  سازد.

ت) با محور عبور بلور زاویه  $60^\circ$  بسازد.

۱۸. ضریب بازتاب به کدام عامل بستگی دارد؟

الف) فقط ضریب شکست محیط اول.

ب) فقط زاویه تابش.

پ) فقط ضریب شکست محیط دوم.

ت) زاویه تابش و ضریب شکست دو طرف سطح جدایی.

۱۹. ضریب شکست محیط شفاف  $\sqrt{3}$  است. زاویه پروستر برای یک پرتو نور که از هوا به این محیط می‌رسد تقریباً چند درجه است؟

الف)  $30^\circ$       ب)  $45^\circ$       پ)  $60^\circ$       ت)  $90^\circ$

### تمرینها

۱. در آزمایش یانگ فاصله دو شکاف ۴ میلی‌متر و فاصله پرده‌ای که نوارهای تداخلی روی آن تشکیل می‌شوند از سطح دو شکاف ۳ متر و طول موج نور تکفام مورد آزمایش ۶۶۰۰ آنگستروم است.

الف) فاصله دو نوار روشن متوالی چقدر است؟

ب) اگر این آزمایش را با نور تکفام دیگری انجام دهیم، به طوری که نوار پانزدهم تاریک آن بریستمین نوار روشن قبلی منطبق شود، طول موج نور مورد آزمایش در حالت دوم چقدر است؟ این طول موج در چه ناحیه‌ای قرار دارد؟

پاسخ: الف)  $0.495 \text{ mm}$ ، ب)  $9103.5 \text{ \AA}$

۲. در آزمایش یانگ فاصله دو شکاف ۲ میلی‌متر و فاصله صفحه مشاهده تا دو شکاف یک متر است.

طول موج نور به کار رفته  $0.6^\circ$  میکرون است. مطلوب است

الف) فاصله دو نوار متوالی در هوا.

ب) فاصله دو نوار متوالی در آب (ضریب شکست آب  $n = \frac{4}{3}$ )

پاسخ: الف)  $0.3 \text{ mm}$ ، ب)  $0.225 \text{ mm}$

۳. در آزمایش یانگ در مسیریکی از پرتوهای نوری تیغه نازکی به ضریب شکست  $1.73$  قرار می‌دهیم.

نوار مرکزی به اندازه ۶ برابر فاصله دو نوار روشن متوالی جابه‌جا می‌شود.

الف) ضخامت تیغه را معین کنید.

ب) پرتو نور را با چه زاویه‌ای باید به سطح این تیغه بتابانیم تا پرتوهای بازتابیده و شکسته بر هم عمود باشند. طول موج نور مورد آزمایش  $7300 \text{ \AA}$  است.

پاسخ: الف)  $e = 6 \times 10^{-6} \text{ m}$ ، ب)  $i = 60^\circ$

۴. آزمایش یانگ را با نور تکفامی که طول موج آن در خلأ  $0.6^\circ$  میکرون است در آب انجام می‌دهیم. اگر

فاصله دو شکاف  $2/5$  میلی‌متر و فاصله صفحه مشاهده از سطح دو شکاف ۱ متر و فاصله وسط

سومین نوار تاریک از وسط نوار روشن مرکزی  $0.45^\circ$  میلیمتر باشد، ضریب شکست آب چقدر است.

پاسخ:  $n = \frac{4}{3}$

۵. دو چشمه نور هم‌دوس  $S_1$  و  $S_2$  به فاصله  $2\text{mm}$  از یکدیگر قرار دارند و نوری با طول موج  $0.6^\circ$  میکرون گسیل می‌کنند. صفحه مشاهده موازی دو چشمه و به فاصله  $2$  متر از دو چشمه قرار گرفته است.

الف) فاصله دو نوار روشن متوالی را به دست آورید.

ب) اگر فاز یکی از دو چشمه  $\frac{\pi}{4}$  تغییر کند، نوار مرکزی چقدر جابه‌جا می‌شود؟

پاسخ: الف)  $0.6\text{mm}$ ، ب)  $0.15\text{mm}$

۶. در آزمایش یانگ فاصله صفحه مشاهده از شکافها  $2$  متر و فاصله شکافها  $0.6^\circ$  میلیمتر است. اگر نور تکفام به طول موج  $0.48\mu$  از شکافها گسیل شود، فاصله سومین نوار تاریک از نوار مرکزی چند میلیمتر است؟ هرگاه آزمایش در مایعی تکرار شود به طوری که فاصله نوارها  $\frac{5}{6}$  مقدار آن در هوا شود، ضریب شکست مایع چقدر است؟

پاسخ:  $1.2, 4\text{mm}$

۷. تیغه نازکی را در مقابل یکی از شکافهای آزمایش یانگ قرار می‌دهیم. نوار مرکزی به محل نوار روشن دهم منتقل می‌شود. اگر طول موج نور مورد آزمایش  $5000\text{\AA}$  و  $n = 1.5$  باشد، ضخامت تیغه شیشه‌ای چقدر بوده است؟

پاسخ:  $10$  میکرون

۸. در آزمایش یانگ طول موج نور تکفام  $0.6\mu$  و فاصله صفحه مشاهده از سطح شکافها  $1.2\text{m}$  و فاصله دو شکاف از یکدیگر  $1.8\text{mm}$  است. مطلوب است

الف) فاصله هفتمین نوار روشن از نوار مرکزی.

ب) فاصله پنجمین نوار تاریک طرف راست از چهارمین نوار روشن طرف چپ.

پاسخ:  $3.6\text{mm}, 2.8\text{mm}$

۹. در آزمایش یانگ طول موج نور مورد آزمایش  $6000\text{\AA}$  است.

الف) بسامد نور چقدر است؟

ب) اگر تیغه نازکی به ضریب شکست  $n$  و به ضخامت  $3\mu$  را در سر راه یکی از پرتوها قرار دهیم، نوار روشن مرکزی به محل اولین نوار روشن منتقل می‌شود. مقدار  $n$  چقدر است؟

پاسخ:  $1.2$  و  $5 \times 10^{14}\text{Hz}$



## نور کوانتومی - فیزیک جدید

### ۱-۶ مقدمه

در مبحث نور هندسی، نظریه نیوتون درباره ماهیت ذره‌ای نور بیان می‌شود و بازتابش و شکست نور مورد بحث قرار می‌گیرد. در فصلهای قبل ماهیت موجی نور و نظریه هویگنس را بررسی کردیم و بر اساس آن پدیده‌های تداخل، پراش و قطبش نور را شرح دادیم. اما پدیده‌های دیگر مربوط به نور هم وجود دارند که آنها را نمی‌توان با نظریه‌های یاد شده بیان کرد. مثلاً توضیح پدیده فوتوالکتریک، که آزاد شدن الکترون از سطح خارجی اجسام از طریق جذب نور است، ناپیوسته بودن طیف تابشی و جذبی گازها، و نیز تابش جسم سیاه به نظریه جدیدی از انرژی و ماهیت نور نیاز دارند. این نظریه جدید توسط پلانک<sup>۱</sup> و اینشتین<sup>۲</sup> بیان شد و علم فیزیک به مرحله جدیدی رسید که به فیزیک جدید معروف است. در اواخر قرن نوزدهم دانشمندان به این نتیجه رسیدند که ماده ماهیتی ناپیوسته دارد و چنانچه ماده‌ای را تقسیم کنیم سرانجام به مولکولها و اتمهایی مجزا می‌رسیم. در سالهای بعد نیز مشخص شد که هر اتم از ذره‌های ناپیوسته و بنیادی تشکیل شده است. اما درباره انرژی، نظریه پیوستگی مورد قبول بود و چنین فرض می‌شد که وقتی انرژی با ماده برهم‌کنش می‌کند هر میزان قابل تصویری از انرژی می‌تواند جذب یا گسیل شود. با قبول پیوستگی انرژی و نظریه موجی نور، پدیده‌هایی مثل فوتوالکتریک و طیف تابشی و جذبی گازها قابل تفسیر نبود تا آنکه پلانک اصل زیر را بیان کرد

گسیل یا جذب انرژی به وسیله ماده به طور ناپیوسته و در مقادیر معینی صورت می‌گیرد که کوانتوم‌های انرژی نام دارند و مقدار آنها از رابطه  $E = h\nu$  به دست می‌آید. در این رابطه  $h$  ثابت پلانک و  $\nu$  بسامد موج جذب شده یا گسیل شده است.

بنابراین اصل، انرژی هم مانند ماده حالت ناپیوسته دارد و هر جسمی که انرژی گسیل یا دریافت

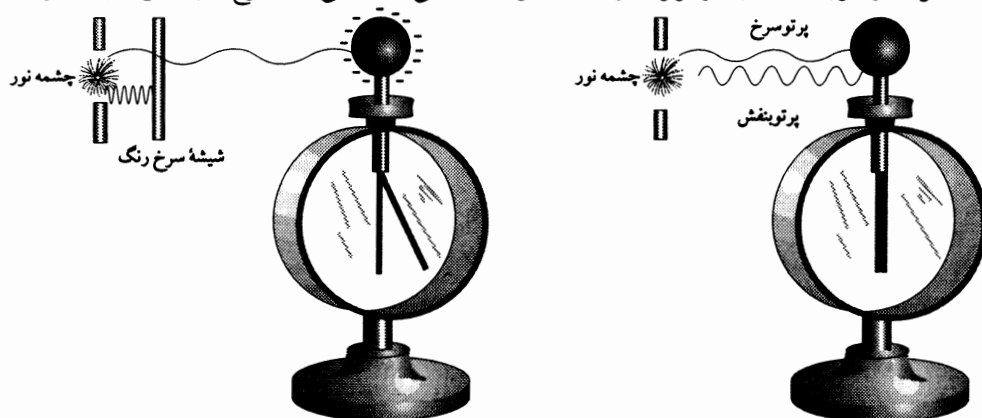
1- Planck, Max Karl Ernst Ludwig    2- Einstein, Albert

می‌کند تعدادی از این بسته‌های انرژی را از دست می‌دهد یا جذب می‌کند. پلانک با ارائه این نظریه که به نظریه کوانتومی معروف است توانست به آسانی تابش جسم سیاه را توجیه کند. اینشتین با استفاده از این نظریه پدیده فوتوالکتریک را تعبیر کرد. بور<sup>۱</sup>، مدل اتمی را براساس کوانتومی بودن انرژی بیان کرد و طیف عناصر و به خصوص طیف عنصر هیدروژن را توضیح داد.

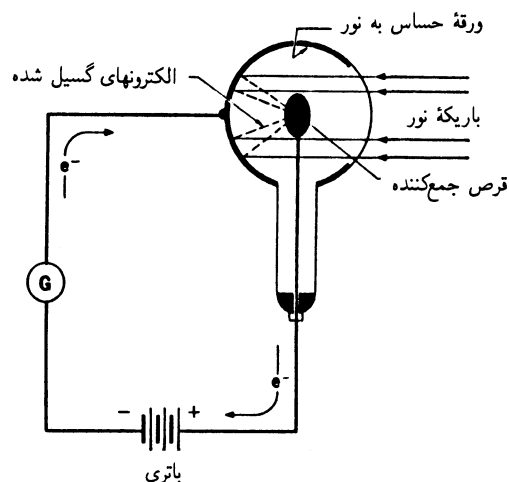
## ۲-۶ اثر فوتوالکتریک

اثر فوتوالکتریک را اولین بار هرتز در سال ۱۸۸۷/۱۲۶۶ کشف کرد. او برحسب تصادف متوجه شد که وقتی به دوکرة فلزی تا نزدیک حد جرقه‌زدن بار الکتریکی بدهیم و به آنها نور بتابانیم، تخلیه الکتریکی بین آنها زودتر برقرار می‌شود. در این آزمایش به نظر می‌رسد که نور خروج الکترون را از سطح جسم آسانتر می‌کند.

هرتز با مشاهده این پدیده به آزمایشهایی دیگری دست زد. او در برابر یک قوس الکتریکی، که مقدار زیادی پرتوهای فرابنفش تابش می‌کرد، الکتروسکوپ بارداری را قرار داد و مشاهده کرد که وقتی پرتوهای فرابنفش قوس الکتریکی به صفحه روی تمیزی که متصل به کلاهک الکتروسکوپ است برخورد کند، الکتروسکوپ خالی می‌شود و اگر در برابر پرتوها، یک تیغه شیشه‌ای که برای پرتوهای فرابنفش کدر باشد قرار دهیم الکتروسکوپ تخلیه نمی‌شود. هرتز با تکرار آزمایش مشاهده کرد که نور بسیار شدید سرخ نمی‌تواند الکترون‌ها را از صفحه فلزی خارج کند، اما نور ضعیف آبی یا بنفش به آسانی الکتروسکوپ را تخلیه می‌کند (شکل ۶-۱). هرتز از این آزمایش دریافت که هرگاه نوری با طول موج کوتاه بر یک صفحه فلزی بتابد، بارهای الکتریکی از آن سطح خارج می‌شوند. چون در این عمل هم نور و هم الکتریسیته دخالت داشتند این پدیده را اثر فوتوالکتریک نامیدند. مطالعات بعدی نشان داد که همه مواد در شرایط مناسب اثر فوتوالکتریک از خود نشان می‌دهند ولی با سطوح فلزی این کار آسانتر



شکل ۶-۱



شکل ۶-۲ سلول فوتوالکتریک، هنگامی که نور به سلول بتابد، جریان الکتریکی در مدار برقرار می‌شود.

است. علاوه بر این مشخص شد که برای گسیل الکترون از هر فلز مشخص طول موج تابشی باید از یک حد معین  $\lambda$  کوتاه‌تر باشد.  $\lambda$  را حد حساسیت یا طول موج آستانه می‌نامند.

با استفاده از اثر فوتوالکتریک، سلول فوتوالکتریک ساخته شده است که کاربردهای فراوان در چشم الکتریکی، سینمای ناطق و نورسنج دارد. سلول فوتوالکتریک حبابی است خالی از هوا که به بخشی از سطح درونی آن یک ورقه بسیار نازک فلزی از پتاسیم یا سزیم چسبانده شده و در مقابل آن (مطابق شکل ۶-۲) قرصی فلزی نصب شده است. ورقه نازک و قرص توسط دو رشته سیم به ترتیب به قطب منفی و مثبت یک باتری متصل‌اند. اگر دستگاه در تاریکی باشد جریانی از گالوانومتر نمی‌گذرد ولی اگر ورقه یا کاتد در مسیر نور قرار گیرد جریانی از گالوانومتر می‌گذرد. شدت جریان به اختلاف پتانسیل، طول موج نور و شدت آن و نیز جنس کاتد بستگی دارد.

### ۶-۳ نظریهٔ اینشتین، فوتون

اثر فوتوالکتریک و اینکه چرا پرتوهای نوری با بسامد کم (کمتر از بسامد آستانه) ولی با شدت زیاد نمی‌تواند الکترون‌ها را از صفحهٔ کاتد جدا کند ولی پرتوهایی با شدت کم و با بسامد زیاد می‌تواند الکترون گسیل کند، با نظریهٔ موجی نور قابل توجیه نبود. اینشتین در سال ۱۹۰۵/۱۲۸۴ با بسط نظریهٔ پیشنهادی پلانک که دو سال پیش از آن بیان شده بود نظریهٔ فوتونی نور را اعلام کرد و به حل این مشکل دست یافت.

اینشتین فرض کرد که انرژی نور در بسته‌هایی جدا از هم متمرکز است. مقدار انرژی تابشی در هر بسته یک کوانتوم انرژی است. کوانتوم انرژی نور بعدها فوتون نامیده شد. اندازهٔ انرژی هر فوتون متناسب با بسامد نور،  $\nu$ ، است یعنی

$$E = h\nu \quad (۱-۶)$$



$E$  انرژی فوتون،  $\nu$  بسامد نور و  $h$  ضریب ثابتی است که ثابت پلانک نامیده می‌شود و مقدار آن برابر است با  $h = ۶.۶ \times ۱۰^{-۳۴} \text{ Js}$ .

ایشنتین چنین توضیح داد که در صورتی یک الکترون از سطح فلزی خارج می‌شود که انرژی دریافت کند. الکترون اگر در مسیر تابش نور قرار گیرد می‌تواند همه انرژی یک فوتون را جذب کند یا از آن هیچ انرژی دریافت نکند. هرگاه الکترونی یک فوتون را جذب کند، انرژی آن به اندازه  $h\nu$  افزایش می‌یابد. این افزایش انرژی ممکن است الکترون را از سطح فلز بیرون براند. برای بیرون راندن الکترون از صفحه مقداری کار انجام می‌شود، زیرا هر الکترون در میدان جاذبه ذره‌های دیگر قرار دارد. بنابراین انرژی الکترون که از فوتون دریافت شده از دو قسمت تشکیل شده است، یعنی

$$h\nu = W + \frac{1}{2}mv^2 \quad (۲-۶)$$

$m$  جرم الکترون،  $v$  سرعت خروج الکترون،  $\frac{1}{2}mv^2$  انرژی جنبشی الکترون هنگام خروج از سطح، و  $W$  کار مصرف شده برای پرتاب الکترون است.

بنابر این رابطه هر اندازه بسامد نور تابشی بیشتر باشد انرژی فوتون زیادتر است و الکترون با سرعت بیشتری از صفحه خارج می‌شود. اگر انرژی فوتون کمتر از کار لازم برای خروج الکترون باشد، الکترون از صفحه گسیل نمی‌شود. مشخص است که هر اندازه انرژی فوتون بیشتر باشد نفوذ آن به درون جسم بیشتر و سرعت خروج الکترونها زیادتر است.

## ۴-۶ طیف اتم هیدروژن

در ابتدای قرن نوزدهم طیف‌نما به وسیله فرانیهوفر و انگستروم ساخته شد. این دستگاه، که براساس آزمایشهای نیوتون درباره تجزیه نور در منشور قرار داشت، با سرعت مورد استفاده دانشمندان قرار گرفت. اساس کار بعضی از طیف‌نماهای جدید، پراش نور است.

یکی از کارهایی که توجه دانشمندان را به خود جلب کرد، بررسی طیف مواد بود. در این بررسیها هر یک از مواد ساده یا مرکب، جامد یا گاز را برمی‌انگیختند به طوری که نور تابش کند یا آنکه هر یک را در مسیر تابش نور چشمه دیگری قرار می‌دادند، و سپس این پرتوها را به طیف‌نما هدایت می‌کردند و تصویر حاصل را در دوربین آن می‌دیدند. گاز هیدروژن از موادی بود که بیشتر مورد توجه قرار گرفت و پرتوهای تابش شده از آن را زودتر مورد بررسی قرار دادند.

طیف هیدروژن از مجموعه‌ای از خطهای مجزا تشکیل شده است. این خطها به طرف طول موجهای کوتاهتر به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند. بالمر<sup>۱</sup> در سال ۱۸۸۵/۱۲۶۴ بین طول موج چهارخط از طیف هیدروژن که توسط انگستروم اندازه‌گیری شده بود، رابطه ریاضی زیر را کشف کرد

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (۳-۶)$$

در این رابطه  $n$  عدد درست بزرگتر از ۲ است ( $n = ۳, ۴, ۵, \dots$ ) و  $R$  عددی ثابت موسوم به ثابت ریذبرگ<sup>۱</sup> و برابر  $۱,۰۹۶۷۸ \times ۱۰^۷ \text{m}^{-۱}$  است. مجموعه طول موجهایی را که با قرار دادن  $n$  در رابطه بالمر به دست می‌آید سری بالمر می‌نامند.

مثال ۱. بیشترین و کمترین طول موج مربوط به سری بالمر را حساب کنید.

حل: به ازای  $n = ۳$  داریم

$$\begin{aligned}\frac{1}{\lambda} &= R \left( \frac{1}{۲^2} - \frac{1}{n^2} \right) = ۱,۰۹۶۷۸ \times ۱۰^۷ \left( \frac{1}{۲^2} - \frac{1}{۳^2} \right) \\ \frac{1}{\lambda} &= ۱,۰۹۶۷۸ \times ۱۰^۷ \left( \frac{1}{۴} - \frac{1}{۹} \right) = ۱,۰۹۶۷۸ \times ۱۰^۷ \times \frac{۵}{۳۶} \\ \lambda &= \frac{۳۶}{۵,۴۸۳۹۰} \times ۱۰^{-۷} \text{m} = ۶,۵۶۴۶۷ \times ۱۰^{-۷} \text{m}\end{aligned}$$

و به ازای  $n = \infty$  داریم

$$\begin{aligned}\frac{1}{\lambda} &= ۱,۰۹۶۷۸ \times ۱۰^۷ \left( \frac{1}{۲^2} - \frac{1}{\infty^2} \right) = ۰,۲۷۴۱۹۵ \times ۱۰^۷ \text{m} \\ \lambda &= ۳,۶۴۷۰۴ \times ۱۰^{-۷} \text{m}\end{aligned}$$

به طوری که ملاحظه می‌شود سری بالمر بین دو حد  $۰,۳۶$  میکرون و  $۰,۶۵$  میکرون است.



به دنبال مشاهدات بالمر بسیاری از دانشمندان دیگر به بررسی طیف اتم هیدروژن پرداختند و تعدادی از آنها توانستند روابط مشابهی را با روش تجربی به دست آورند و در طیف هیدروژن مجموعه خطهایی را به نام خود مشخص سازند. از جمله این افراد لیمان<sup>۲</sup> استاد دانشگاه هاروارد و پاشن<sup>۳</sup>، فیزیکدان آلمانی بودند. روابط پیشنهادی آنها به ترتیب چنین است

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{۱^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{سری لیمان} \quad (۴-۶)$$

$$n = ۲, ۳, ۴, ۵, \dots$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{۳^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{سری پاشن} \quad (۵-۶)$$

$$n = ۴, ۵, ۶, \dots$$

روابطی که سایر دانشمندان به دست آوردند این نتیجه را حاصل کرد که می‌توان طول موج هر خط طیفی

توسط اتم هیدروژن را از رابطه کلی زیر به دست آورد

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (۶-۶)$$

بسامد مربوط به آن برابر است با

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = cR \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (۷-۶)$$

که در آن  $c$  سرعت نور است.

در سری لیمان  $n_1$  برابر ۱، در سری بالمر برابر ۲ و در سری پاشن برابر ۳ است. طول موج چند خط که توسط رابطه بالمر حساب شده و طول موج همان خطها که توسط آنگستروم مشاهده شده در جدول ۱-۶ نشان داده شده است.

جدول ۱-۶ طول موج،  $10^{-7}$  متر

محاسبه و پیش‌بینی	مشاهده و اندازه‌گیری
۶,۵۶۴۶۷	۶,۵۶۲۱۰
۴,۸۶۲۷۲	۴,۸۶۰۷۴
۴,۳۴۱۷۱	۴,۳۴۰۱
۴,۱۰۲۹۲	۴,۱۰۱۲

تاکنون انواع خط‌هایی که در طیف هیدروژن موجود است مشاهده و اندازه‌گیری شده است و توانسته‌اند سریهای متعددی را به دست آورند.

اکنون با توجه به نظریه کوانتومی، به این نتیجه می‌رسیم که هر خط در مجموعه طیف، مربوط به یک نوع فوتون است و می‌توان انرژی فوتونها را با استفاده از رابطه زیر به دست آورد

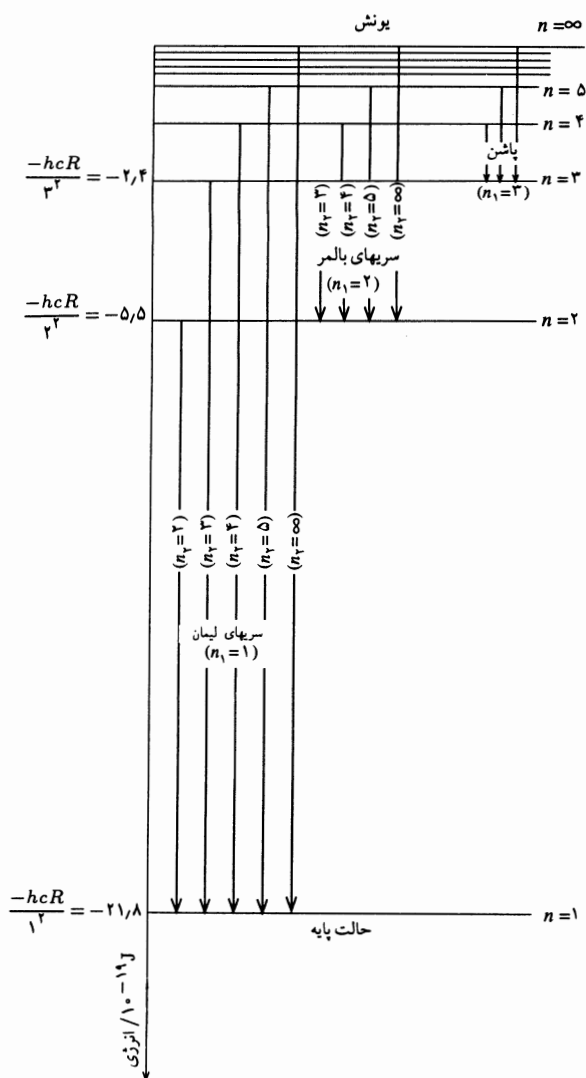
$$E = h\nu = hcR \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (۸-۶)$$

$E$  انرژی فوتون،  $\nu$  بسامد موج تابشی و  $h$  ثابت پلانک است و  $n_1$  و  $n_2$  شماره‌های دو حالت اتم تابش کننده‌اند. انرژی یک فوتون مشخص، که مربوط به تغییر وضع اتم از  $n_1$  به  $n_2$  باشد، از رابطه زیر حساب می‌شود

$$E = \frac{hcR}{n_1^2} - \frac{hcR}{n_2^2}$$

$$E = E_{n_1} - E_{n_2} \quad (۹-۶)$$

بنابراین می‌توان تصور کرد که گسیل فوتون مربوط به تغییر انرژی اتم در دو وضع مختلف است. انرژی هر وضع را تراز انرژی می‌نامند. برای  $n_1 = 1$  تراز انرژی  $10^{-19} \times 21.8$  و برای  $n_2 = \infty$  تراز انرژی صفر است.



جدول ۲-۶ روابط سریه‌های هیدروژن

پاشن	بالمر	لیمان
$(n_1 = 3)$	$(n_1 = 2)$	$(n_1 = 1)$
$hcR \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$hcR \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$hcR \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$
$hcR \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2} \right)$	$hcR \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)$	$hcR \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right)$
$hcR \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{5^2} \right)$	$hcR \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2} \right)$	$hcR \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2} \right)$
$hcR \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{6^2} \right)$	$hcR \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2} \right)$	$hcR \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{4^2} \right)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$hcR \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{\infty} \right)$	$hcR \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{\infty} \right)$	$hcR \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{\infty} \right)$

شکل ۳-۶ طیف هیدروژن. سریه‌های لیمان، بالمر و پاشن.

انرژی فوتونهای تابش شده در سریه‌های لیمان، بالمر و پاشن را می‌توان از روی جدول ۲-۶ و شکل

۳-۶ مشخص کرد.

پس از اختراع طیف‌نما و بررسی طیف اتمها و اعلام رابطه‌های تجربی توسط بالمر، لیمان، پاشن

و دیگران، پرسشهای بسیار مهمی مطرح شد. نمونه این پرسشها چنین بود:

تابش و جذب نور توسط اتم چگونه صورت می‌گیرد؟ رابطه بین طول موجها را چگونه تفسیر

کنیم؟ چرا طیف تابشی یک عنصر با طیف جذبی آن یکسان است؟

برای پاسخ به این پرسشها مدلها و نظریه‌هایی برای بیان ساختار اتم بیان شد. رادرفورد<sup>۱</sup> و بور مدل‌هایی ارائه دادند.

## ۵-۶ مدل اتمی رادرفورد

در سال ۱۹۱۱/۱۲۹۰ گایگر<sup>۲</sup> و مارسدن<sup>۳</sup> ورقه‌های نازکی از طلا را به وسیله پرتو آلفا بمباران کردند. تحلیلی که روی پراکندگی و انحراف این پرتوها صورت گرفت سبب شد که رادرفورد مدل زیر را برای ساختمان اتم پیشنهاد کند.

۱. هر اتم از بارهای مثبت و منفی برابر تشکیل شده است و مجموع این بارها اتم خنثا را می‌سازد.

۲. بارهای مثبت که قسمت عمده جرم اتم را شامل می‌شود، در بخش مرکزی

اتم به نام هسته جای دارد.

۳. الکترون‌ها با بار منفی روی مدارهای دایره‌ای به دور هسته حرکت می‌کنند (شکل ۴-۶).

۴. نیروی عامل حرکت الکترون روی مدارش نیروی جاذبه کولنی بین الکترون و هسته است.

۵. شعاع هسته اتم حدود  $10^{-14}$  متر و شعاع اتم حدود  $10^{-10}$  متر است. رادرفورد شکل ۴-۶ مدل اتمی

با توجه به آنکه در این مدل، نیروی مرکزی مؤثر بر الکترون نیروی جاذبه کولنی است، رابطه بین سرعت حرکت الکترون ( $v$ ) و شعاع مسیر آن ( $r$ ) از رابطه‌های زیر به دست می‌آید

نیروی کولنی مؤثر از هسته با بار  $q = ze$  بر الکترون با بار  $q' = e$

$$F_e = k \frac{qq'}{r^2} = k \frac{(ze)e}{r^2}$$

نیروی مرکزگرای مؤثر بر جرم الکترون،  $m$ ، برابر است با

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

پس

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

یا

$$v^2 = \frac{kze^2}{mr} \quad (۱۰-۶)$$

بنابر نظریه الکترومغناطیسی ماکسول، هر ذره باردار شتابدار از خود انرژی به صورت موج الکترومغناطیسی تابش می‌کند. بنابراین تابش اتم مربوط به حرکت الکترون به دور هسته است. اشکالی که بر این نظریه وارد است آن است که مدار الکترون بر اثر از دست دادن انرژی کوچکتر می‌شود و

سرانجام بر هسته سقوط می‌کند. دیگر آنکه هیچ یک از آنها در حالت تعادل پایدار نیستند.

## ۶-۶ نظریهٔ بور

بور فیزیکدان دانمارکی در سال ۱۹۱۳/۱۲۹۲ نظریهٔ جدیدی را دربارهٔ ساختمان اتم پیشنهاد کرد. این نظریه به بسیاری از پرسشهایی که تا آن زمان وجود داشت پاسخ داد. بور نظریهٔ خود را براساس فرضهای زیر بیان کرد

۱. هر الکترون می‌تواند فقط در مدارهای مشخصی به دور هسته حرکت کند، که تکانهٔ (اندازه حرکت) زاویه‌ای آنها ضریب درستی از  $\frac{h}{2\pi}$  باشد، این مدارها را مدارهای مانا می‌نامند. یعنی

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (۱۱-۶)$$

در این رابطه  $m$  جرم الکترون،  $v$  سرعت و  $r$  شعاع مسیر آن است.  $h$  ثابت پلانک و  $n$  عدد درستی برابر ۱، ۲، ۳، ... است که آن را عدد کوانتومی می‌نامند.

۲. تا زمانی که الکترون در مدار مانا قرار دارد انرژی تابش نمی‌کند.

۳. هنگامی که الکترونی از یک مدار مانا به مداری با تراز انرژی کمتر انتقال یابد، مقدار مشخصی انرژی تابش می‌کند. این انرژی برابر تفاوت انرژی در دو مدار اولیه و بعدی است.

اکنون با استفاده از دو رابطه (۱۰-۶) و (۱۱-۶) سرعت الکترون و شعاع مدار آن را به دست

می‌آوریم

$$v^2 = \frac{kze^2}{mr} \Rightarrow mv^2 r = kze^2$$

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

از تقسیم این دو رابطه داریم

$$\frac{mv^2 r}{mvr} = \frac{kze^2}{nh/2\pi}$$

و

$$v = \frac{2\pi kze^2}{nh} \quad (۱۲-۶)$$

با قرار دادن  $v$  در رابطه (۱۲-۶) شعاع مدار الکترون برابر است با

$$r = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 kze^2 m} \quad (۱۳-۶)$$

مثال ۲. با توجه به داده‌های  $z = ۱$ ،  $m = ۹.۱ \times 10^{-۳۱} \text{ kg}$ ،  $n = ۱$ ،  $e = ۱.۶ \times 10^{-۱۹} \text{ C}$

$h = ۶.۶ \times 10^{-۳۴} \text{ Js}$  و  $k = ۹ \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$

(الف) سرعت الکترون را در اولین مدارش در اتم هیدروژن حساب کنید.

(ب) شعاع این مدار را به دست آورید.

حل: سرعت الکترون در مدار  $n = 1$  برابر است با

$$v = \frac{2\pi kze^2}{nh} = \frac{2 \times 3,14 \times 9 \times 10^9 \times 1 \times 1,6 \times 10^{-19}}{1 \times 6,6 \times 10^{-34}} = 2,18768 \times 10^6 \frac{m}{s}$$

$$r = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 kze^2 m} = \frac{1 \times (6,6 \times 10^{-34})^2}{4 \times 3,14^2 \times 9 \times 10^9 \times (1,6 \times 10^{-19})^2 \times 9,1 \times 10^{-31}} = 0,529 \times 10^{-10} m$$

باید توجه داشت که شعاع مدار  $n$  به اندازه  $n^2$  برابر شعاع اولین مدار و سرعت الکترون در آن  $\frac{1}{n}$  سرعت در اولین مدار است

$$r_n = n^2 r_1$$

$$v_n = \frac{v_1}{n}$$

▲

## ۷-۶ اندازه انرژی الکترون

برای محاسبه انرژی الکترون، سطح مقایسه را بینهایت دور در نظر می‌گیریم. بنابراین فرض، انرژی الکترونی که کاملاً از اتم دور شده صفر است و هنگامی که در یکی از مدارها به دور هسته می‌گردد انرژی آن منفی است. انرژی هر الکترون مجموع انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل آن است، یعنی

$$E = E_k + E_p \quad (14-6)$$

انرژی پتانسیل الکترون که تحت تأثیر میدان هسته با بار  $ze$  قرار دارد برابر است با

$$E_p = -\frac{kqq'}{r} = -k\frac{ze^2}{r} \quad (15-6)$$

شکل ۵-۶ انرژی پتانسیل الکترون را برحسب فاصله آن تا مرکز اتم نشان می‌دهد. انرژی پتانسیل الکترون برابر است با

$$E_p = -\frac{k^2 \pi z^2 e^4 m}{n^2 h^2} \quad (16-6)$$

انرژی جنبشی الکترون روی مدار  $n$  برابر است با

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{k^2 \pi z^2 e^4 m}{n^2 h^2} \quad (17-6)$$

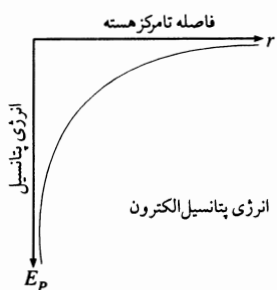
شکل ۵-۶ انرژی پتانسیل الکترون.

انرژی کل الکترون برابر است با

$$E_T = E_k + E_p = -\frac{k^2 \pi z^2 e^4 m}{n^2 h^2} = -R\frac{z^2}{n^2} \quad (18-6)$$

$$R = \frac{2\pi^2 me^4 k^2}{h^2} = \frac{2 \times 3,14^2 \times 9,1 \times 10^{-31} (1,6 \times 10^{-19})^4 \times (9 \times 10^9)^2}{(6,62 \times 10^{-34})^2}$$

$$\approx 2,18 \times 10^{-18} J$$



یکایی که برای مقدار انرژی ذرات اتمی به کار می رود الکترون ولت است، داریم

$$1\text{eV} = 1/6 \times 10^{-19}\text{J}$$

یا

$$1\text{J} = 6/2 \times 10^{18}\text{eV}$$

بنابراین ضریب ثابت  $R$  برحسب الکترون ولت برابر است با

$$\begin{aligned} R &= 2/18 \times 10^{-18} \times 6/2 \times 10^{18}\text{eV} \\ &= 13/6\text{eV} \end{aligned}$$

انرژی الکترون واقع در مدار  $n$  در اتمی با عدد  $z$  برحسب ژول و الکترون ولت برابر است با

$$E_T = -R \frac{Z^2}{n^2} = -2/18 \times 10^{-18} \frac{z^2}{n^2}\text{J} = -13/6 \frac{z^2}{n^2}\text{eV}$$

هرگاه الکترونی از مدار  $n_1$  به مدار  $n_2$  انتقال یابد، انرژی فوتون جذب شده برابر است با

$$\Delta E = E_2 - E_1 = -R \frac{z^2}{n_2^2} + R \frac{z^2}{n_1^2} = Rz^2 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

این فوتون مربوط به باریکه‌ای نوری است که بسامد و طول موج آن برابر است با

$$\Delta E = h\nu = Rz^2 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

$$\nu = \frac{Rz^2}{h} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}, \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{Rz^2}{hc} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

**مثال ۳.** کوتاهترین طول موج و بسامد وابسته به فوتونی که اتم هیدروژن می تواند جذب یا گسیل کند چقدر است؟

حل: رابطه کلی طول موج تابشی یا جذبی در هراتم به صورت زیر است

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{Rz^2}{hc} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

در اتم هیدروژن  $z = 1$  است و قویترین فوتون جذب شده مربوط به حالتی است که الکترون از مدار  $n_1 = 1$  به مدار  $n_2 = \infty$  انتقال یابد، یعنی فوتون جذب شده اتم هیدروژن را یونیده کند. انرژی، بسامد و طول موج این فوتون به ترتیب عبارت اند از

$$\begin{aligned} \Delta E &= Rz^2 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = 2/18 \times 10^{-18} \times 1^2 \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{\infty^2} \right) \\ &= 2/18 \times 10^{-18}\text{J} = 13/6\text{eV} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\nu &= \frac{Rz^2}{h} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = \frac{2,18 \times 10^{-18} \times 1^2}{6,6 \times 10^{-34}} \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{\infty^2} \right) \\ &= 3,1303 \times 10^6 \text{ Hz} \\ \lambda &= \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^8}{3,1303 \times 10^{16}} = 9,582 \times 10^{-12} \text{ m} = 9,582 \text{ \AA}\end{aligned}$$

▲

## ۸-۶ امواج ماده

دوبروی<sup>۱</sup>، فیزیکدان فرانسوی در سال ۱۹۲۴/۱۳۰۳ در پایان نامه دکترای خود این پرسش را مطرح کرد: چون نوری که تصور می‌کردیم موج پیوسته است دارای ماهیت فوتونی نیز هست، از کجا معلوم که ذره‌های مادی دارای خاصیت موجی نباشند؟ پیشنهاد دوبروی خارج از محدوده اندیشه و آزمایش بود، اما او برای این موج مربوط به ماده طول موجی نیز وضع کرد. دوبروی اعلام کرد که هر ذره با اندازه حرکت  $p$  طول موج  $\lambda$  را به همراه دارد که رابطه زیر بین آنها برقرار است

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (۱۹-۶)$$

یا

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (۲۰-۶)$$

$m$  جرم ذره و  $v$  سرعت آن و  $h$  ثابت پلانک است.

مثال ۴. الکترونی با جرم  $9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$  با سرعت  $2 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  حرکت می‌کند. طول موج دوبروی آن چقدر است؟ در صورتی که  $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}$  باشد.

حل:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}}{9,1 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 2 \times 10^6 \text{ m/s}} = 3,6 \times 10^{-10} \text{ m}$$

جالب است که اگر رابطه دوبروی را بپذیریم، از روی آن می‌توانیم رابطه انرژی فوتون و بسامد آن را به صورت زیر به دست آوریم

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (\text{طول موج دوبروی})$$

$$E = mc^2 \quad (\text{رابطه انرژی و جرم فوتون})$$

$$\lambda = \frac{h}{mc} \Rightarrow \frac{c}{\nu} = \frac{h}{mc} \quad (\text{طول موج وابسته به فوتون})$$

$$mc^2 = h\nu$$

$$E = h\nu \quad (\text{رابطه انرژی فوتون و بسامد موج وابسته به آن})$$

▲

برای تأیید درستی فرضیهٔ دوبروی، که در ابتدا عده‌ای آن را کم‌دی فرانسوی نامیده بودند، دانشمندان در کشورهای مختلف جهان دست به آزمایش زدند تا آنکه در سال ۱۹۲۷/۱۳۰۶ فرضیهٔ دوبروی تأیید شد. دیویسون<sup>۱</sup> و گرمر<sup>۲</sup> با بمباران رویهٔ یک بلور نیکل با باریکه‌ای از الکترونهای با سرعت یکنواخت نشان دادند که پراش باریکه‌های الکترون از بلور همانند پراش پرتوهای نور توسط یک توری بازتابی است. در سال ۱۹۳۰/۱۳۰۹ به کمک پدیدهٔ پراش رفتارهای موجی اتمهای هلیوم و مولکولهای هیدروژن با عبور از بلورها تأیید و مشخص شد که الکترونها، پروتونها و فوتونها، همان‌طور که خواص ذرات را دارند، خواص امواج را نیز دارا هستند.

یکی دیگر از نتایج جالب فرضیهٔ دوبروی به دست آوردن تکانهٔ زاویه‌ای الکترون است که اساس نظریهٔ بور را تشکیل می‌دهد. هرگاه موج الکترونی که به دور هستهٔ اتم می‌گردد همهٔ مدار آن را اشغال کند، لازم است چنین موجی ایستاده باشد و طول مسیرش که محیط دایره است برابر ضریب درستی از طول موج یعنی  $n\lambda$  باشد. پس باید داشته باشیم

$$2\pi r = n\lambda$$

$$\lambda = \frac{h}{p} \Rightarrow 2\pi r = n \frac{h}{p} \Rightarrow pr = n \frac{h}{2\pi}$$

یا

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

این همان رابطهٔ ۶-۱۱ است که در بیان اولین فرض بور ذکر کردیم و به این ترتیب شرط موج ایستادهٔ دوبروی همان شعاع اتمی ناشی از نظریهٔ بور را به دست می‌دهد.

## خلاصهٔ فصل

پلانک اصل کوانتومی بودن انرژی را بیان کرد. بر طبق این اصل انرژی هم مانند ماده کمیتی ناپیوسته دارد. پلانک با بیان نظریهٔ کوانتومی، تابش جسم سیاه را توجیه کرد. اینشتین پدیدهٔ فوتوالکتریک و بور طیف عناصر، به‌ویژه طیف هیدروژن، را توضیح دادند. در پدیدهٔ فوتوالکتریک، تابش الکترومغناطیسی سبب گسیل الکترون از سطح جسم می‌شود. برای گسیل الکترون از هر فلز مشخص، طول موج تابشی باید از طول موج آستانه کوچکتر باشد.

اینشتین اعلام کرد که هر باریکهٔ نور مانند جریانی از ذره‌های ریز انرژی عمل می‌کند. او هر یک از این ذره‌ها را فوتون نامید. انرژی هر فوتون در باریکهٔ نور ساده به طول موج  $\lambda$  و بسامد  $\nu$  از رابطهٔ  $h\nu$  یا  $h\frac{c}{\lambda}$  به دست می‌آید.

بور با استفاده از مدل اتمی رادرفورد، مدل اتمی جدیدی را بیان کرد که بر مبنای آن هر الکترون می‌تواند در یک اتم در تراز انرژی معینی پایدار باشد. هرگاه اتمها در مسیر فوتونهایی قرار گیرند، می‌توانند برانگیخته شوند و الکترون اتم می‌تواند در ترازهای بالاتر انرژی قرار گیرد. هر الکترون فوتونهایی را گسیل یا تابش می‌کند که انرژی آنها برابر تفاوت دو تراز معین است.

پیش از اعلام مدل بور، مطالعه‌ای که روی طیف اتم هیدروژن صورت گرفته بود سبب کشف رابطه‌هایی بین طول موجهای گسیل شده از اتم شده بود. مدل اتمی بور توانست این رابطه‌ها را به شکل کلی زیر نشان دهد و سریهای خطوط طیفی هیدروژن را بیان کند

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

الکترونیایی که روی مدار  $n_1 = 1$  باز می‌گردند سری لیمان، آنها که به مدار  $n_2 = 2$  باز می‌گردند سری بالمر، و الکترونیایی که بر مدار  $n_2 = 3$  سقوط می‌کنند سری پاشن را تابش می‌کنند.

## اهدافهای آموزشی

اکنون که این فصل را به پایان رسانیده‌اید باید بتوانید

- نارساییهای فیزیک کلاسیک را بیان کنید.
- مفهوم کوانتوم را توضیح دهید.
- پایه‌گذاران نظریه کوانتومی را نام ببرید.
- اثر فوتوالکتریک را شرح دهید.
- فوتون و اندازه انرژی آن را شرح دهید.
- حدود طول موجها و انرژی نور سفید را بیان کنید.
- رابطه بالمر را بنویسید و توضیح دهید.
- رابطه ریدبرگ را بنویسید و توضیح دهید.
- رابطه کلی طول موجهای تابشی از اتم هیدروژن را بنویسید و توضیح دهید.
- مدل اتمی رادرفورد را شرح دهید.
- نظریه بور را شرح دهید و سرعت و شعاع مسیر الکترون را حساب کنید.
- اندازه انرژی الکترون را محاسبه کنید.
- رابطه انرژی فوتون تابشی و تغییر مدار الکترون را توضیح دهید.
- رابطه بین طیف تابشی و جذبی را توضیح دهید.
- امواج ماده را شرح دهید.

## خود را پیازمایید

### پرسشها

۱. نظریه کوانتومی پلانک را شرح دهید.
۲. فرضیه‌های بور را بنویسید و توضیح دهید.
۳. موارد نارساییهای فرضیه بور را بنویسید.
۴. تفاوت بین نور مرئی و پرتو گاما را شرح دهید.
۵. کوتاهترین طول موجی که اتم هیدروژن می‌تواند جذب کند چقدر است؟
۶. توضیح دهید که چرا طول موجهای تابشی یک عنصر با طول موجهای جذبی آن برابرند.

### پرسشهای چهارگزینه‌ای

۱. فوتون کدامیک از پرتوهای زیر پر انرژیتر است؟  
الف) ایکس      ب) گاما      پ) گرمایی      ت) فرابنفش
۲. نور تکفامی، که طول موج آن در خلأ  $7 \times 10^{-7}$  متر است، از محیطی عبور می‌کند. این محیط برای جذب  $3/0$  ژول انرژی، چند فوتون باید جذب کند؟  $c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$  و  $h = 6.6 \times 10^{-34} Js$   
الف)  $10^{15}$       ب)  $10^{11}$       پ)  $10^{23}$       ت)  $10^{29}$
۳. الکترونی در یک مسیر دایره‌ای به شعاع  $1/0 \text{ \AA}$  به دور هسته‌ای که  $10$  پروتون دارد می‌چرخد. نیروی وارد بر این الکترون چند نیوتون است؟  $e = 1.6 \times 10^{-19} C$  و  $k = 9 \times 10^9 Nm^2/C^2$   
الف)  $3/2 \times 10^{-5}$       ب)  $2/3 \times 10^{-7}$   
پ)  $3/0 \times 10^{-10}$       ت)  $2/0 \times 10^{-18}$
۴. طول موج پرتو الکترومغناطیسی A چهار برابر طول موج پرتو B است. در این صورت انرژی پرتو A چند برابر انرژی پرتو B است؟  
الف) ۴      ب) ۱      پ)  $\frac{1}{4}$       ت)  $\frac{1}{4}$
۵. در خلأ فوتون فرابنفش، نسبت به فوتون فروسرخ، دارای  
الف) انرژی بیشتر و طول موج بلندتر است.  
ب) سرعت بیشتر و طول موج کوتاهتر است.  
پ) سرعت کمتر و طول موج بلندتر است.  
ت) طول موج کوتاهتر و سرعت یکسان است.
۶. در اتم هیدروژن الکترون از تراز  $n = 1$  به تراز  $n = 2$  می‌رود. شعاع مدار الکترون نسبت به حالت

قبل چند برابر می شود و انرژی الکترون چه تغییری می کند؟

الف) ۲ و کمتر (ب) ۲ و بیشتر (پ) ۴ و بیشتر (ت) ۴ و کمتر

۷. یک دسته پرتو نور تکفام به سلول فوتوالکتریکی می تابد ولی الکترون گسیل نمی شود. برای آنکه الکترون گسیل شود کدام کمیت را باید افزایش داد؟

الف) شدت نور (ب) بسامد نور (پ) طول موج نور (ت) دوره تناوب نور

۸. یک فرستنده رادیویی FM امواجی با طول موج ۳ متر پخش می کند. انرژی هر فوتون آن چقدر است؟

الف)  $6.6 \times 10^{-26} \text{ J}$  (ب)  $6.6 \times 10^{-26} \text{ eV}$

(پ)  $6.6 \times 10^{-26} \text{ W}$  (ت)  $6.6 \times 10^{-23} \text{ J}$

۹. طول موج پرتو گاما که انرژی هر فوتون آن  $10^{12}$  الکترون ولت است، چند انگستروم است؟

الف)  $12 \times 10^7$  (ب)  $12 \times 10^9$  (پ)  $12 \times 10^{-9}$  (ت)  $18 \times 10^{-9}$

۱۰. بسامد پرتو ایکس که هر فوتون آن ۴۰۰۰۰ الکترون ولت انرژی دارد تقریباً چند هرتز است؟

الف)  $10^{18}$  (ب)  $10^{11}$  (پ)  $10^{20}$  (ت)  $10^{21}$

### تمرینها

در همه این تمرینها  $c = 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  سرعت نور،  $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ Js}$  ثابت پلانک و  $C = 3 \times 10^{-2} \text{ m}^{\circ}\text{K}$  ثابت ویلهم-وین است.

۱. انرژی وابسته به فوتون مربوط به طول موج  $6000 \text{ Å}$  را حساب کنید. در چه دمایی تابش بیشینه و مربوط به این طول موج است؟

پاسخ:  $5000^{\circ}\text{K}$ ,  $3.7 \times 10^{-19} \text{ J}$

۲. کوتاهترین طول موجی که اتم لیتیم می تواند جذب کند چند انگستروم است؟ انرژی فوتون آن را حساب کنید.

پاسخ: تقریباً  $1200 \text{ Å}$ ، تقریباً  $5 \times 10^{-19} \text{ J}$

۳. یک چشمه پرتوهای گاما در هر ثانیه  $10^{14}$  فوتون تابش می کند. اگر انرژی هر فوتون گاما،  $2 \times 10^{-13}$  ژول باشد توان چشمه و طول موج و بسامد پرتو گسیل شده را حساب کنید.

پاسخ:  $20 \text{ W}$ ،  $10^{-12} \text{ m}$  و  $3 \times 10^{20} \text{ Hz}$

۴. یک فرستنده قوی رادیویی VHF در هر ثانیه  $2 \times 10^{20}$  فوتون با بسامد  $90 \text{ MHz}$  گسیل می کند. توان فرستنده چند وات است؟

پاسخ: تقریباً  $1.2 \times 10^5 \text{ W}$

۵. جرم فوتونی را حساب کنید که نور سبز با طول موج  $5.7 \times 10^{-7} \text{ m}$  گسیل می کند.

پاسخ:  $m = 4 \times 10^{-35} \text{ kg}$

۶. اتم هیدروژن وقتی از حالت اول و دوم برانگیختگی به حالت عادی باز می‌گردد پرتوهایی به طول موجهای  $۱۲۱,۵\text{nm}$  و  $۱۰۲,۵\text{nm}$  ( $۱\text{nm} = ۱۰^{-9}\text{m}$ ) گسیل می‌کند. مطلوب است

الف) انرژی فوتونهای گسیل شده

ب) طول موجی که تابش می‌شود وقتی اتم از حالت دوم برانگیختگی به حالت اول بازگردد.

پاسخ:  $۱,۶۶۴ \times ۱۰^{-۱۹}\text{J}$ ,  $۱,۶۴ \times ۱۰^{-۱۹}\text{J}$ ,  $۱,۹۴ \times ۱۰^{-۱۹}\text{J}$ ,  $۶۶,۳\text{nm}$

۷. شبکیه چشم انسان شدت نوری را تشخیص می‌دهد که توان آن  $۱۰^{-۱۲}\text{W}$  باشد. اگر پرتوهایی با

طول موج  $۶۰۰\text{nm}$  با همین توان به چشم برسند، تعداد فوتونهایی را که در هر ثانیه به چشم می‌رسند و فاصله متوسط بین آنها را حساب کنید.

پاسخ:  $۳ \times ۱۰^۶$  فوتون در ثانیه و به فاصله ۹۹ متر از یکدیگر.



## خودآزمایی کلی

پرسشهای چهارگزینه‌ای از شش فصل کتاب

۱. یک چرخه کامل چیست؟

الف) بازه زمانی بین دو وضعیت یکسان در یک پدیده دوره‌ای است.

ب) همان بسامد است.

پ) مجموعه رویدادهایی است که بین دو وضعیت یکسان روی می‌دهد.

ت) همان دوره است.

۲. دوره با بسامد چه نوع بستگی دارد؟

الف) نسبت مستقیم دارد.

ب) با جذر آن نسبت مستقیم دارد.

پ) نسبت معکوس دارد.

ت) با جذر آن نسبت معکوس دارد.

۳. در حرکت نوسانی رابطه شتاب با نیرو چگونه است؟

الف) قانون دوم دینامیک برقرار است.

ب) شتاب با نیرو متناسب و در خلاف جهت آن است.

پ) قانون اول دینامیک برقرار است.

ت) جهت شتاب با نیرو یکسان است.

۴. در حرکت نوسانی هنگامی که جابه‌جایی متحرک نسبت به موضع تعادل حداکثر باشد، کدام کمیت

مربوط به آن صفر است؟

الف) شتاب

ب) نیرو

پ) سرعت

ت) انرژی

۵. یکای  $\sqrt{\frac{k}{m}}$  برای فیزیکی که ثابت آن  $k$  باشد، چیست؟

الف) ثانیه

ب) هرتز

پ) رادیان

ت) عکس رادیان

۶. در حرکت نوسانی اختلاف فاز شتاب و جابه‌جایی چقدر است؟

الف) صفر

ب)  $\frac{\pi}{4}$

پ)  $\frac{\pi}{2}$

ت)  $\pi$

۷. در حرکت نوسانی، در یک چرخه کامل سرعت متوسط چقدر است؟

الف)  $A\omega$

ب)  $\frac{4A}{T}$

پ)  $\frac{A\omega}{4}$

ت) صفر

۸. وزنه‌ای به فیزیکی آویزان و در حالت نوسان است. اگر جرم وزنه را دوبرابر کنیم، بسامد نوسان چند

برابر می‌شود؟

الف) ۲

ب)  $\frac{1}{2}$

پ)  $\sqrt{2}$

ت)  $\frac{\sqrt{2}}{2}$



۹. معادله نوسانگری  $x = 0.4 \sin\left(10\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$  است. جابه جایی متحرک میان دو لحظه  $0.10\text{ s}$  و  $0.15\text{ s}$  چقدر است؟

الف)  $4\sqrt{2}$  (ب)  $-4\sqrt{2}$  (پ)  $\frac{0.4\sqrt{2}}{4}$  (ت)  $-\frac{4\sqrt{2}}{4}$

۱۰. معادله حرکت نوسانگری به صورت  $y = A \sin \omega t$  است. در چه لحظه هایی از نخستین دوره، انرژی پتانسیل نوسانگر صفر است؟

الف)  $\frac{T}{4}$  و  $\frac{3T}{4}$  (ب)  $\frac{T}{4}$  و  $\frac{3T}{4}$  (پ)  $\frac{T}{4}$  و  $T$  (ت)  $\frac{T}{4}$  و  $\frac{3T}{4}$

۱۱. دامنه و جرم نوسانگر  $A$  دوبرابر دامنه و جرم نوسانگر  $B$  است،  $\frac{E_B}{E_A}$  چقدر است؟

الف) ۴ (ب) ۸ (پ)  $\frac{1}{4}$  (ت)  $\frac{1}{8}$

۱۲. برای یک نوسانگر ساده کدام کمیت با زمان بستگی ندارد؟

الف) انرژی جنبشی (ب) انرژی مکانیکی (پ) انرژی پتانسیل (ت) اندازه حرکت

۱۳. دامنه یک نوسانگر هماهنگ ساده  $1\text{ cm}$  و بیشینه شتاب آن  $\pi^2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  است. دوره حرکت این نوسانگر چند ثانیه است؟

الف)  $0.4$  (ب)  $0.3$  (پ)  $0.2$  (ت)  $0.1$

۱۴. بسامد نوسانگری  $10\text{ Hz}$  و طول مسیر آن  $0.2\text{ m}$  است. اگر در مبدأ زمان  $x = 0.1\text{ m}$  باشد، معادله حرکت نوسانگر کدام است؟

الف)  $x = 0.1 \sin\left(20\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$  (ب)  $x = 0.2 \sin(10\pi t + \pi)$

(پ)  $x = 0.1 \sin\left(20\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$  (ت)  $x = 0.2 \sin\left(10\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$

۱۵. در یک فنر فلزی کدام نوع موج می تواند منتشر شود؟

الف) مکانیکی (ب) الکترومغناطیسی

(پ) فقط عرضی (ت) فقط طولی

۱۶. یک نوسانگر امواجی به معادله  $y = 0.2 \sin 20\pi t$  با سرعت  $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  در محیطی منتشر می کند. عدد موج در این محیط چقدر است؟

الف)  $4\pi$  رادیان (ب)  $4\pi$  رادیان بر متر (پ)  $2\pi$  رادیان (ت)  $2\pi$  رادیان بر متر

۱۷. معادله حرکت نوسانگری به جرم  $m$  به صورت  $y = A \sin\left(10\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$  است. در مبدأ زمان  $\frac{U}{K}$  چقدر است؟

الف) ۱ (ب) ۲ (پ) ۳ (ت) ۴

۱۸. نمودار مکان-سرعت در حرکت هماهنگ ساده کدام است؟

الف) خط (ب) دایره (پ) بیضی (ت) سهمی

۱۹. در یک حرکت نوسانی ساده بیشترین اندازه سرعت  $0.4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  و بیشترین اندازه شتاب  $0.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  است.

دوره نوسان چقدر است؟

الف)  $1/57s$       ب)  $3/14s$       پ)  $6/28s$       ت)  $15/7s$

۲۰. وزنه‌ای به فنر قائمی آویخته شده و دارای حرکت هماهنگ ساده است. در حالتی که وزنه از وضع تعادل به بالاترین ارتفاع می‌رود، انرژی جنبشی، پتانسیل گرانشی، پتانسیل کشسانی وزنه فنر به ترتیب چه تغییری می‌کند؟

الف) کم، زیاد، کم می‌شود      ب) کم، کم، زیاد می‌شود

پ) کم، زیاد، زیاد می‌شود      ت) زیاد، کم، کم می‌شود

۲۱. در انتشار حرکت یک موج پیشرونده در یک محیط مشخص، سرعت موج و سرعت ذره‌های نوسانگر به ترتیب چگونه‌اند؟

الف) ثابت، ثابت      ب) متغیر، متغیر      پ) ثابت، متغیر      ت) متغیر، ثابت

۲۲. وقتی یک تب موج در ریسمانی منتشر می‌شود و به انتهای بسته آن می‌رسد چه می‌شود؟

الف) تب موج به طور مستقیم بازتابیده می‌شود.

ب) تب بازتابیده نسبت به تب فرودی وارون است.

پ) انرژی تب موج جذب می‌شود.

ت) سرعت تب بازتابیده همان سرعت تب فرودی است.

۲۳. دو قطعه ریسمان کلفت و باریک را به دنبال هم می‌بندیم. اگر یک موج عرضی در بخش باریک طناب به وجود آوریم، پس از رسیدن این موج به بخش کلفت طناب کدام کمیت مربوط به آن تغییر نمی‌کند؟

الف) سرعت      ب) طول موج      پ) بسامد      ت) دامنه

۲۴. معادله نوسانی موجی به صورت  $y = A \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$  است. تابع موج در نقطه‌ای به فاصله  $x$  از چشمه کدام است؟

الف)  $U_{(x,t)} = A \sin(\omega t - kx)$

ب)  $U_{(x,t)} = A \sin(\omega t + kx)$

پ)  $U_{(x,t)} = A \sin\left(\omega t - kx + \frac{\pi}{4}\right)$

ت)  $U_{(x,t)} = A \sin\left(\omega t + kx - \frac{\pi}{4}\right)$

۲۵. تابع موج در نقطه‌ای به فاصله  $24\text{cm}$  از چشمه موجی با بسامد  $20\text{Hz}$  و دامنه  $1\text{cm}$  در SI کدام است؟ سرعت انتشار موج  $0.48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  است.

ب)  $U_{(x,t)} = 0.01 \sin(40\pi t - 20\pi)$

الف)  $U_{(x,t)} = 0.01 \sin(40\pi t - 10\pi)$

ت)  $U_{(x,t)} = 0.01 \sin(20\pi t - 20\pi)$

پ)  $U_{(x,t)} = 0.01 \sin(20\pi t - 10\pi)$

۲۶. یکای شدت موج چیست؟

الف) وات (ب) ژول (پ) ژول بر مترمربع (ت) وات بر مترمربع  
۲۷. شدت موج با کدام عامل نسبت مستقیم دارد؟

الف) دامنه (ب) بسامد (پ) سرعت انتشار (ت) دوره  
۲۸. دو موج سینوسی با دامنه، بسامد، فاز اولیه و بعدهای به ترتیب  $A_1, \nu_1, \varphi_1$  و  $A_2, \nu_2, \varphi_2$  همزمان در نقطه‌ای برهم نهاده می‌شوند. کدام رابطه بین دامنه  $A$ ، بسامد  $\nu$ ، فاز اولیه  $\varphi$ ، و بعد  $y$  موج حاصل و هریک از موجها برقرار است؟

الف)  $A = A_1 + A_2$  (ب)  $\nu = \nu_1 + \nu_2$  (پ)  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$  (ت)  $y = y_1 + y_2$   
۲۹. دو موج سینوسی در نقطه‌ای باهم تداخل می‌کنند. اختلاف فاز دو موج در نقطه‌ای چقدر باید باشد تا دامنه موج برهم نهاده حداکثر باشد؟

الف)  $\Delta\varphi = n\pi$  (ب)  $\Delta\varphi = 2n\pi$   
(ب)  $\Delta\varphi = (2n-1)\pi$  (ت)  $\Delta\varphi = (2n-1)\frac{\pi}{4}$   
۳۰. در موج ایستاده اختلاف فاز تمام نقطه‌های واقع بین دو گره با نقاط بین دو گره بعدی چقدر است؟  
الف) صفر (ب)  $\frac{\pi}{4}$  (پ)  $\pi$  (ت)  $2\pi$   
۳۱. در موج ایستاده اختلاف فاز در گره‌ها چقدر است؟

الف)  $\Delta\varphi = 2n\pi$  (ب)  $\Delta\varphi = (2n-1)\pi$   
(ب)  $\Delta\varphi = n\pi$  (ت)  $\Delta\varphi = (2n-1)\frac{\pi}{4}$   
۳۲. در موج ایستاده فاصله گره‌ها از مانع سخت چقدر است؟

الف)  $x = n\frac{\lambda}{4}$  (ب)  $x = n\frac{\lambda}{2}$   
(ب)  $x = (2n-1)\frac{\lambda}{4}$  (ت)  $x = (2n-1)\frac{\lambda}{2}$

۳۳. تابع دو موج که در یک نقطه برهم نهاده می‌شوند به صورت  $U_{y_1} = 3\sin(100\pi t - 6)$  و  $U_{y_2} = 3\sin(100\pi t + 6)$  است. تابع موج برهم نهاده کدام است؟

الف)  $U_y = 6\cos 6\sin 100\pi t$  (ب)  $U_y = 3\sin 6\cos 100\pi t$   
(ب)  $U_y = 6\sin 6\cos 100\pi t$  (ت)  $U_y = 6\cos 6\cos 100\pi t$

۳۴. بر اثر تداخل دو موج سینوسی ساده که از دو چشمه نقطه‌ای در محیط دایره‌ای مانند سطح آب منتشر می‌شوند، کدام نقاط هذلولی‌اند؟

الف) نقاطی که دارای حداکثر دامنه ارتعاش‌اند.  
ب) نقاطی که دارای حداقل دامنه ارتعاش‌اند.  
پ) نقاطی که دارای دامنه یکسان هستند.  
ت) نقاطی که به یک فاصله از دو چشمه‌اند.

۳۵. در موجهای ایستاده، زمان لازم برای انتشار موج از یک گره تا نزدیکترین شکم چقدر است؟

۳۶. بسامد یک چشمه صوتی  $\nu_1$  است. هرگاه شخصی با سرعت صوت  $V$  به این چشمه صوتی که ساکن است نزدیک شود، بسامد صوتی که می‌شنود چقدر است؟

- الف)  $\frac{T}{\frac{1}{4}}$  (ب)  $\frac{T}{\frac{1}{6}}$  (پ)  $\frac{T}{\frac{1}{8}}$  (ت)  $\nu_1$  (الف)  $\frac{4}{3}\nu_1$  (ب)  $\frac{3}{4}\nu_1$  (پ)  $2\nu_1$  (ت)

۳۷. شخصی به فاصله  $d$  از یک چشمه صوتی، با شدت  $\frac{W}{m^2} \times 10^{-7}$  می‌شنود. اگر شخص در فاصله  $5d$  قرار گیرد، همان صوت با چه شدتی شنیده خواهد شد؟

۳۸. در مثال بالا تراز شدت صوت چند دسی‌بل کمتر شنیده می‌شود؟

- الف) ۱۰ تا ۲۰ (ب) ۲۰ تا ۳۰ (پ) ۳۰ تا ۴۰ (ت) ۴۰ تا ۵۰

۳۹. شدت صوتی برای یک شنونده  $\frac{W}{m^2} \times 10^{-5}$  است. تراز شدت این صوت چند دسی‌بل است؟

- الف) ۵۰ dB (ب) ۶۰ dB (پ) ۷۰ dB (ت) ۹۰ dB

۴۰. بسامد سوت قطاری  $\nu = 1120 \text{ Hz}$  است. اگر سرعت این قطار  $22 \frac{m}{s}$  و سرعت صوت در محیط  $330 \frac{m}{s}$  باشد، تغییر بسامد صوتی که شخص هنگام عبور قطار از مقابلش می‌شنود چقدر است؟

- الف) ۱۰۰ Hz (ب) ۱۲۵ Hz (پ) ۱۵۰ Hz (ت) ۲۰۰ Hz

۴۱. بر اثر پدیده دوبلر، هنگامی که قطاری سوت‌زنان به شنونده ساکن ایستگاه نزدیک و بلافاصله دور می‌شود بسامد صوتی که شنونده می‌شنود نسبت به وضع ساکن بودن قطار چگونه است؟

- الف) زیرتر، بمتر (ب) بمتر، زیرتر (پ) زیرتر، زیرتر (ت) بمتر، بمتر

۴۲. دو نفر به فاصله  $d_1$  و  $d_2 = 10d_1$  از یک چشمه صوت قرار دارند. تراز شدت صوت برای شخص نزدیکتر ۸۰ dB است. این تراز برای شخص دورتر چقدر است؟

- الف) ۷۰ dB (ب) ۶۰ dB (پ) ۴۰ dB (ت) ۲۰ dB

۴۳. ماهیت نور چیست؟

الف) ذره است.

ب) موج است.

پ) هم ذره و هم موج است.

ت) گاهی رفتار ذره‌ای و گاهی رفتار موجی از خود نشان می‌دهد.

۴۴. در آزمایش دوشکاف یانگ، اختلاف فاز دو موج در نقطه‌ای چقدر باشد تا در آنجا نوار تاریک به وجود آید؟

الف)  $\phi = n\pi$

ب)  $\phi = 2n\pi$

ت)  $\phi = (2n - 1)\pi$

پ)  $\phi = (2n - 1)\frac{\pi}{4}$

۴۵. نقش تداخلی چیست؟

الف) تداخل موجهای نور است.

ب) نوارهای تاریک و روشن روی پرده است.

پ) ترکیب امواج نوری است.

ت) برهم نهی امواج است.

۴۶. چه امواجی با هم تداخل می‌کنند؟

الف) فقط امواج مکانیکی.

ب) فقط امواج الکترومغناطیسی.

پ) فقط امواج عرضی.

ت) هر نوع موج می‌تواند تداخل داشته باشد.

۴۷. در آزمایش یانگ فاصله دو نوار روشن متوالی با کدام کمیت نسبت عکس دارد؟

الف) طول موج نور.

ب) فاصله شکاف تا پرده.

پ) فاصله دو شکاف.

ت) فاصله دو شکاف و طول موج نور.

۴۸. اگر آزمایش یانگ را با نور سفید انجام دهیم چه می‌شود؟

الف) نقش تداخلی تشکیل نمی‌شود.

ب) به‌ازای هر رنگ در نور سفید یک نقش تداخلی تشکیل می‌شود.

پ) نوارهای روشن و تاریک همه رنگها برهم منطبق‌اند

ت) نقش تداخلی شامل خطهای سفید و سیاه است.

۴۹. برای آنکه فاصله نوارها در نقش تداخلی زیاد شود چه می‌توان کرد؟

الف) فاصله دو شکاف را زیادتر می‌کنیم.

ب) طول موج نور را کم می‌کنیم.

پ) فاصله پرده از دو شکاف را کم می‌کنیم.

ت) فاصله پرده از دو شکاف را زیاد می‌کنیم.

۵۰. برای تعیین فاصله آنها در یک ساختار بلوری از چه پدیده‌ای استفاده می‌شود؟

الف) تداخل پرتوهای نور.

ب) تداخل پرتوهای ایکس.

پ) پراش پرتوهای نور.

ت) پراش پرتوهای ایکس.

۵۱. اگر تعداد شکافهای توری پراش را زیادتر کنیم در نوارها چه تغییری روی می‌دهد؟

الف) فاصله نوارها کمتر و کم‌رنگ‌تر خواهد شد.

ب) فاصله نوارها بیشتر و کم‌رنگ‌تر خواهد شد.

پ) فاصله نوارها کمتر و پررنگ‌تر خواهد شد.

ت) فاصله نوارها بیشتر و پررنگ‌تر خواهد شد.

۵۲. نقش پراشی که از حلقه‌های تاریک و روشن هم‌مرکز تشکیل شده مربوط به چه مانعی است؟

الف) روزنه یا شکاف. ب) روزنه یا یک مانع بزرگ.

پ) روزنه یا یک مانع دایره‌ای کوچک. ت) یک نخ یا یک مانع بزرگ.

۵۳. آزمایش پراش را با نور قرمز و نور بنفش انجام می‌دهیم. تعداد شکافهای توری و فاصله آنها از یکدیگر در این دو آزمایش چگونه است؟

الف) برای هر دو یکسان است.

ب) برای نور قرمز بیشتر و فاصله کمتر است.

پ) برای نور بنفش تعداد شکافها بیشتر و فاصله آنها کمتر است.

ت) برای نور بنفش تعداد شکافها کمتر و فاصله بیشتر است.

۵۴. در آزمایش یانگ فاصله دو نوار تاریک یا روشن متوالی  $0.4$  میلی‌متر و فاصله صفحه نوارها از

صفحه شکافها  $1000$  برابر فاصله دو شکاف است. طول موج نور مورد آزمایش چند انگستروم است؟

الف)  $4000$  ب)  $5000$  پ)  $6000$  ت)  $7000$

۵۵. موجی با دوره  $s \cdot \frac{1}{4}$  با سرعت  $300 \frac{m}{s}$  در محیطی منتشر می‌شود. اگر اختلاف فاز بین دو نقطه

از محیط  $\frac{\pi}{3}$  باشد، حداقل فاصله بین آن دو نقطه چند متر است؟

الف)  $\frac{1}{3}$  ب)  $2$  پ)  $3$  ت)  $\frac{1}{4}$

### پرسشهای کلی

۱. ویژگیهای حرکت هماهنگ ساده کدام است؟ شرح دهید.

۲. چه رابطه‌ای میان حرکت دایره‌ای یکنواخت و حرکت نوسانی موجود است؟ شرح دهید.

۳. حرکت وزنه متصل به فنر را تحلیل کنید.

۴. هر یک از اصطلاحهای بسامد، دوره، دامنه، تشدید را تعریف کنید.

۵. هر یک از اصطلاحات زیر را تعریف کنید. چنانچه رابطه‌ای مربوط به آنها وجود دارد آن را شرح دهید.

موج، تپ‌موج، قطار موج، طول موج، موج طولی، موج عرضی، عدد موج.

۶. تابع موج در نقطه‌ای به فاصله  $x$  از یک چشمه موج را بنویسید و مکان نقاط هم‌فاز و متقابل با چشمه را مشخص کنید.

۷. بازتاب موج در چه شرایطی صورت می‌گیرد؟ تفاوت بازتاب موج از مانع سخت و مانع نرم چیست؟

۸. اصل برهم‌نهی امواج چیست؟ شرح دهید.

۹. موج ایستاده کدام است؟ معادله موج ایستاده را بنویسید و آن را تحلیل کنید.
۱۰. تداخل امواج در محیطی دوبعدی چگونه است؟ جای هذلولیهای ساکن و متحرک را مشخص کنید.
۱۱. مشخصات امواج صوتی کدام است؟ (بسامد، نوع، شدت، سرعت، محیط انتشار)
۱۲. آستانه شنوایی و آستانه دردناکی را تعریف و باهم مقایسه کنید.
۱۳. تراز شدت صوت چیست و برحسب کدام یکا اندازه گیری می شود؟
۱۴. اثر دوپلر را شرح دهید.

### تمرینهای کلی

۱. ذره ای به فاصله ۱۵ cm از مرکز صفحه گرمی قرار دارد. هرگاه این صفحه در هر دقیقه ۳۳٫۳ دور با حرکت یکنواخت بگردد، (الف) معادله مکان، سرعت و شتاب این ذره را نسبت به زمان بر محور  $y$  ها به دست آورید. (ب) بیشینه هریک از اندازه های یادشده در SI چقدر است؟

پاسخ: (الف)  $a_z = -۱٫۸۳ \sin \omega t$ ,  $v_y = ۰٫۵۲۳ \cos \omega t$ ,  $y = ۰٫۱۵ \sin ۳٫۴۹t$

(ب)  $a_{\max} = +۱٫۸ \frac{m}{s^2}$  و  $v_{\max} = ۰٫۵۲۳ \frac{m}{s}$ ,  $y_{\max} = ۰٫۱۵ m$

۲. وزنه ای به جرم ۳ kg را به فنری آویخته ایم. اگر وزنه را ۴ cm پایین بکشیم و رها کنیم، با دوره ۲ s نوسان می کند. مطلوب است: (الف) ثابت فنر. (ب) بیشترین انرژی جنبشی و سرعت وزنه.

پاسخ: (الف)  $k = ۲۹٫۶ \frac{N}{m}$  (ب)  $K = ۲٫۳۷ \times ۱۰^{-۲} J$  و  $V_{\max} = ۰٫۱۲۶ \frac{m}{s}$

۳. وزنه ای به جرم ۲ kg را به فنری که ضریب ثابت آن  $k = ۵۰۰۰ \frac{N}{m}$  است آویزان می کنیم. وزنه را از وضع تعادل ۱۰ cm پایین می کشیم و رها می کنیم. مطلوب است: (الف) بسامد نوسانی وزنه. (ب) دوره و دامنه نوسان. (پ) بیشترین سرعت و شتاب وزنه. (ت) پس از چه مدت برای نخستین بار وزنه از وضع تعادل می گذرد؟

پاسخ: (الف) ۷٫۹۶ Hz، (ب) ۰٫۱۲۶ s و ۱۰ cm، (پ)  $۵ \frac{m}{s}$  و  $۲۵۰ \frac{m}{s^2}$ ، (ت) ۰٫۳۱۴ s

۴. وزنه ای به جرم ۲ kg را به فنری می آویزیم. طول فنر ۳ cm افزایش می یابد و وزنه به نوسان درمی آید.

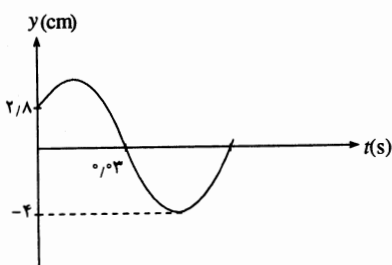
مطلوب است: (الف) ثابت فنر. (ب) بسامد وزنه.

پاسخ: (الف)  $۶۵۳ \frac{N}{m}$  (ب) ۲٫۸۸ Hz

۵. نمودار مکان - زمان یک نوسانگر مطابق شکل است. معادله حرکت آن را در SI بنویسید و بیشترین شتاب آن را محاسبه کنید.

پاسخ:  $y = ۴ \times ۱۰^{-۲} \sin \left( ۲۵\pi t + \frac{\pi}{4} \right)$

$a_{\max} = ۶۲٫۵ \frac{m}{s^2}$

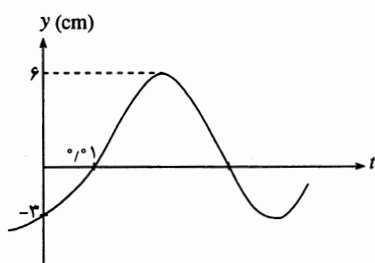


۶. ذره‌ای به جرم ۲ گرم روی خط راستی حرکت نوسانی ساده انجام می‌دهد. اگر طول این خط ۱۲cm باشد و ذره در هر ثانیه ۴۰ بار طول مسیر را طی کند و در مبدأ زمان در فاصله ۳cm+ از مبدأ نوسان و جهت سرعت مثبت باشد، مطلوب است: (الف) معادله حرکت نوسانگر. (ب) معادله انرژی جنبشی آن.

پاسخ: (الف)  $y = 6 \times 10^{-2} \sin\left(40\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$  و (ب)  $K = 5,76 \cos^2\left(40\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$

۷. دامنه یک نوسانگر هماهنگ ساده ۴m/۰ و دوره آن ۰۲s/۰ است. اگر در مبدأ زمان سرعت آن بیشینه و در جهت منفی باشد، معادله نوسانگر را به دست آورید.

پاسخ:  $y = 0,4 \sin(100\pi t + \pi)$



۸. نمودار مکان - زمان نوسانگری به جرم یک گرم مطابق شکل است. معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید و انرژی مکانیکی آن را حساب کنید.

پاسخ:  $y = 6 \times 10^{-2} \sin\left(\frac{5}{6}\pi t + \frac{5\pi}{6}\right)$  و

$12,5 \times 10^{-4} \text{ J}$

۹. وزنه‌ای به جرم m را به فنر قائمی با ثابت  $1800 \frac{\text{N}}{\text{m}}$  آویزان کرده‌ایم. هرگاه آن را ۵cm/۲ پایین بکشیم و رها کنیم با بسامد ۵۵Hz/۰ به نوسان درمی‌آید. (الف) m چقدر است؟ (ب) وقتی وزنه از وضع تعادل می‌گذرد، طول فنر چند سانتیمتر بلندتر از طول آن بدون وزنه است؟ معادله حرکت، سرعت و شتاب این متحرک را نسبت به زمان در SI بنویسید.

پاسخ: (الف) ۱,۵۱kg، (ب) ۰,۸۲cm، (پ)  $x = 2,5 \times 10^{-2} \sin\left(11\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$

و  $a = -29,9 \sin\left(11\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$  و  $v = +0,864 \cos\left(11\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$

۱۰. دامنه یک نوسانگر  $A = 10 \text{ cm}$  و دوره آن ۸s است. اگر در مبدأ زمان متحرک در بعد بیشینه باشد، معین کنید معادله حرکت، و جابه‌جایی متحرک را در ثانیه اول، ثانیه دوم، ثانیه سوم و ثانیه چهارم بعد از مبدأ زمان.

پاسخ:  $y = 0,1 \sin\left(\frac{\pi}{8}t + \frac{\pi}{2}\right)$ ، ۲,۹۳cm، ۷,۰۷cm، ۷,۰۷cm، ۲,۹۳cm و ۲,۹۳cm

۱۱. جسمی به وزن W به فنری با ثابت k آویزان است و حرکت نوسانی ساده دارد.

(الف) وقتی بعد آن نصف دامنه باشد، نسبت انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل وزنه متصل به فنر چقدر است؟

(ب) وقتی فنر در حال تعادل باشد، طول آن به اندازه  $\Delta l$  بیش از طول آزاد فنر است. ثابت کنید که

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

پاسخ:  $\frac{K}{U} = 3$



۱۲. معادله ارتعاشی چشمه موجی بر سطح آب  $y = 2 \sin 100\pi t$  است. اگر امواج چشمه با سرعت  $\frac{6}{5} \frac{m}{s}$  از این نقطه به اطراف منتشر شوند، مطلوب است: (الف) طول موج این امواج. (ب) تابع موج در نقطه‌ای که به فاصله  $2m$  از این نقطه قرار دارد. (پ) عدد موج.

پاسخ: (الف)  $\lambda = 12cm$ ، (ب)  $U_y = 2 \sin \left( 100\pi t - \frac{100\pi}{3} \right)$ ، (پ)  $k = \frac{100}{6}\pi$

۱۳. معادله نوسانی دو چشمه  $O_1$  و  $O_2$  در یک محیط قابل ارتعاش به ترتیب  $y_1 = a \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{4} \right)$  و  $y_2 = a \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{3} \right)$  است. مطلوب است تابع موج نقطه  $M$  به فاصله  $d_1$  از  $O_1$  و  $d_2$  از  $O_2$ . چه شرطی لازم است تا  $M$  همواره ساکن باشد، یا آنکه با بیشترین دامنه نوسان کند؟

پاسخ:  $U_M = 2a \cos \left[ \frac{\pi}{12} + \frac{\pi(d_2 - d_1)}{\lambda} \right] \sin \left[ \omega t + \frac{5\pi}{12} - \frac{\pi(d_1 + d_2)}{\lambda} \right]$

نقاط ساکن  $\lambda \frac{12k - 7}{12}$ ،  $d_2 - d_1 = \frac{12k - 7}{12} \lambda$ ، مکان نقاط با حداکثر دامنه  $\lambda \frac{1}{12}$ ،  $d_2 - d_1 = k\lambda - \frac{1}{12} \lambda$ ، سه ارتعاش هم‌امتداد

$$y_1 = 4 \sin 100\pi t$$

$$y_2 = 4 \sin \left( 100\pi t + \frac{\pi}{3} \right)$$

$$y_3 = 4 \sin \left( 100\pi t + \frac{2\pi}{3} \right)$$

در یک لحظه از زمان به نقطه  $M$  در یک محیط قابل ارتعاش می‌رسند. معین کنید، معادله موج برهم نهاده را در این نقطه.

پاسخ:  $y = 8 \sin \left( 100\pi t + \frac{\pi}{3} \right)$

۱۵. دو موج به معادله‌های  $y_1 = 2 \sin 100\pi t$  و  $y_2 = 2 \sin 110\pi t$  همزمان به نقطه‌ای می‌رسند و

برهم نهاده می‌شوند. معادله موج برهم نهاده چیست؟

پاسخ:  $y = 4 \cos 5\pi t \sin 105\pi t$

۱۶. دو فنر یکسان را به‌طور متوالی به هم می‌بندیم و به آنها وزنه‌ای به جرم  $1kg$  می‌آویزیم. یکی از فنرها  $10cm$  و دیگری  $5cm$  افزایش طول می‌یابند. هرگاه وزنه آویخته به فنرها را کمی پایین بکشیم و رها کنیم، دوره وزنه متصل به فنر چقدر خواهد شد؟

پاسخ:  $2.43s$

۱۷. در مثال بالا اگر فنرها را به‌طور متوالی به هم ببندیم و همان جرم  $1kg$  را به آنها بیاویزیم، دوره وزنه هنگام نوسان چقدر خواهد شد؟

پاسخ:  $1.15s$

۱۸. ذره‌ای روی خط راستی به طول  $20cm$  دارای حرکت نوسانی ساده است. اگر بسامد آن  $\frac{25}{\pi} Hz$  و

در مبدأ زمان  $\frac{\sqrt{2}}{4}$  بعد بیشینه (در جهت مثبت) باشد (الف) معادله حرکت آن را بنویسید. (ب)

هنگامی که بعد حرکت آن ۶ سانتیمتر است، اندازه سرعت آن چقدر است؟

پاسخ:  $V = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  و  $y = 0.1 \sin\left(50\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$

۱۹. یک نوسان کننده به جرم  $10 \text{ g}$  در هر دقیقه  $60$  بار مسیر  $AB$  را مطابق

شکل طی می کند. اگر متحرک در مبدأ زمان در  $1.5$  سانتیمتری نقطه

$A$  در جهت مثبت محور در حرکت باشد، معادله نیرو - زمان متحرک

را بنویسید و اندازه نیرو پس از یک ثانیه از حرکت را به دست آورید

$(BA = 6 \text{ cm})$

پاسخ:  $F_1 = 0.05 \text{ N}$ ,  $F = -0.1 \sin\left(\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$

۲۰. بسامد موجی  $500 \text{ Hz}$  و سرعت آن  $250 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  است. (الف) اختلاف فاز میان دو نقطه به فاصله

$12.5 \text{ cm}$  چقدر است؟ (ب) فاصله دو نقطه که اختلاف فاز میان آنها  $\frac{\pi}{6}$  است چند سانتیمتر

است؟ (پ) اختلاف فاز دو نقطه که موج، فاصله میان آنها را در یک هزارم ثانیه طی می کند چقدر

است؟

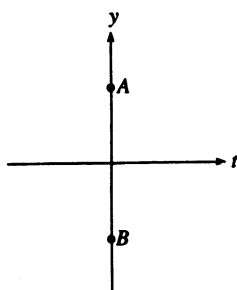
پاسخ: (الف)  $\frac{\pi}{4}$  (ب)  $4.16 \text{ cm}$  (پ)  $\pi$

۲۱. دو موج هم امتداد  $y_1 = 2 \cos\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right)$  و  $y_2 = a_1 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$  در نقطه  $M$  به هم

می رسند و ترکیب می شوند. اگر معادله ارتعاش نقطه  $M$  به صورت  $y_M = 2 \sin(\omega t + \theta)$  باشد،

$a_1$  و  $\theta$  چقدر است ( $y_M$  و  $y_1$  بر حسب سانتیمتر است).

پاسخ:  $\theta = \frac{\pi}{4}$  و  $a_1 = 2\sqrt{3}$





### باسخنامه پرسشهای چهارگزینه‌ای

فصل اول							
ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ
۱	الف	۶	ب	۱۱	ب	۱۶	ت
۲	الف	۷	پ	۱۲	پ	۱۷	ب
۳	ب	۸	پ	۱۳	پ	۱۸	ت
۴	ب	۹	ت	۱۴	ت	۱۹	الف
۵	ت	۱۰	ت	۱۵	ت	۲۰	الف
فصل دوم							
ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ
۱	ت	۶	ت	۱۱	پ	۱۶	ت
۲	ت	۷	ت	۱۲	ب	۱۷	پ
۳	پ	۸	ب	۱۳	ت	۱۸	الف
۴	ب	۹	پ	۱۴	الف	۱۹	پ
۵	ت	۱۰	ت	۱۵	الف	۲۰	ب
فصل سوم							
ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ
۱	ت	۶	پ	۱۱	الف	۱۶	الف
۲	الف	۷	ت	۱۲	ت	۱۷	پ
۳	ب	۸	ب	۱۳	ت	۱۸	ب
۴	ت	۹	ب	۱۴	پ	۱۹	ب
۵	پ	۱۰	پ	۱۵	الف	۲۰	پ
فصل چهارم							
ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ
۱	ب	۴	ب	۷	الف	۱۰	ت
۲	پ	۵	ت	۸	ت	۱۱	ب
۳	الف	۶	ب	۹	ب	۱۲	ت
فصل پنجم							
ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ
۱	ت	۶	الف	۱۱	الف	۱۶	ت
۲	پ	۷	پ	۱۲	پ	۱۷	ب
۳	پ	۸	الف	۱۳	ب	۱۸	ت
۴	ت	۹	ب	۱۴	ب	۱۹	پ
۵	ت	۱۰	الف	۱۵	الف		
فصل ششم							
ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ
۱	ب	۴	ت	۷	ب		
۲	ب	۵	ت	۸	الف		
۳	ب	۶	ت	۹	پ		

## پاسخنامه پرسشهای چهار جوابی کلی

ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ	ردیف	پاسخ
۱	پ	۱۵	الف	۲۹	ب	۴۳	ت
۲	پ	۱۶	ب	۳۰	پ	۴۴	ت
۳	الف	۱۷	الف	۳۱	ب	۴۵	ب
۴	پ	۱۸	پ	۳۲	ب	۴۶	ت
۵	پ	۱۹	ب	۳۳	الف	۴۷	پ
۶	ت	۲۰	پ	۳۴	پ	۴۸	ب
۷	ت	۲۱	پ	۳۵	ب	۴۹	ب
۸	ت	۲۲	ب	۳۶	ت	۵۰	ت
۹	ب	۲۳	پ	۳۷	ت	۵۱	ت
۱۰	ب	۲۴	پ	۳۸	الف	۵۲	پ
۱۱	ت	۲۵	ب	۳۹	پ	۵۳	پ
۱۲	ب	۲۶	ت	۴۰	ب	۵۴	الف
۱۳	پ	۲۷	پ	۴۱	الف	۵۵	ت
۱۴	الف	۲۸	ت	۴۲	ب		

## فرهنگ اصطلاحات

### اثر دوپلر (Doppler Effect)

تغییر در بسامد ظاهری یک چشمه نوری یا صوتی به علت حرکت نسبی چشمه و ناظر است. مثلاً نور ستاره‌های کهکشانه‌ای دور، وقتی از زمین رصد می‌شوند، یک انتقال به سرخ نشان می‌دهد زیرا این کهکشانها در حال دور شدن از ما هستند.

### اثر فوتوالکتریک (Photoelectric Effect)

به گسیل الکترون از یک جسم بر اثر تابش نور به آن جسم گفته می‌شود. برای هر جسم معین بسامد نور باید از حد معینی بیشتر باشد تا الکترون از جسم گسیل شود.

### اصل برهم‌نهی (Principle of Superposition)

بنابر این اصل جابه‌جایی هر نقطه بر اثر اجتماع چند موج در آن، مساوی برآیند جابه‌جاییهای حاصل از هر یک از موجهاست. این اصل اساس نظریه تداخل و پراش امواج را تشکیل می‌دهد.

### الکترون‌ولت (Electron Volt)

واحد انرژی در فیزیک هسته‌ای است. یک الکترون ولت برابر است با مقدار انرژی که یک الکترون می‌گیرد وقتی تحت تأثیر اختلاف پتانسیل یک ولت قرار گیرد. یک الکترون ولت برابر  $1.6 \times 10^{-19}$  ژول است.  $10^6$  الکترون ولت مساوی با یک مگا الکترون ولت (MeV) است.  $10^9$  الکترون ولت (GeV) و  $10^6$  الکترون ولت مساوی با یک مگا الکترون ولت (MeV) است.

### امواج الکترومغناطیسی (Electromagnetic Waves)

گستره وسیعی است از امواجی که از دو میدان نوسانی الکتریکی و مغناطیسی عمود برهم تشکیل شده‌اند و می‌توانند در خلأ هم منتشر شوند. این امواج با سرعت نور حرکت می‌کنند و برحسب افزایش طول موج عبارت‌اند از پرتوهای گاما، ایکس، فرابنفش، مرئی، فروسرخ و امواج هرتز.

امواج زمینی (امواج سطحی) (Ground Waves)  
 امواج رادیویی که پس از ارسال از فرستنده، بدون آنکه توسط لایه یونکره بازتابیده شوند مستقیماً توسط گیرنده دریافت می‌شوند.

امواج طولی (Longitudinal Waves)  
 امواجی که در آنها راستای نوسان یا جابه‌جایی ذرات محیط در راستای انتشار صورت می‌گیرد، مانند امواج صوتی در هوا.

امواج عرضی (Transverse Waves)  
 امواجی که در آنها راستای ارتعاش یا جابه‌جایی در سطحی عمود بر راستای انتشار صورت می‌گیرد، مانند امواج الکترومغناطیسی.

امواج هرتزی (Hertzian Waves)  
 بخشی از امواج الکترومغناطیسی که بسامد آنها بین  $10^{10} \times 3$  هرتز (امواج با طول موج یک سانتیمتر یعنی کوتاهترین امواج رادار) و  $10^5 \times 1/5$  هرتز (امواج بلند رادیویی با طول موج ۲۰۰۰ متر) است.

بسامد (فرکانس) (Frequency)  
 در حرکت تناوبی، تعداد دوره‌های تناوب در مدت یک ثانیه است و برحسب دور بر ثانیه یا هرتز سنجیده می‌شود.

بسامد بالا (High Frequency (H.F))  
 امواج رادیویی است که بسامد آنها بین  $10^6 \times 3$  تا  $10^7 \times 3$  هرتز یا طول موج آنها بین ۱۰۰ متر تا ۱۰ متر باشد.

بسامد طبیعی (Natural frequency)  
 بسامدی است که با آن یک دستگاه، وقتی نیروهای خارجی بر آن اثر نمی‌کنند، به‌طور آزاد حول وضعیت تعادل پایدار خود نوسان می‌کند.

پخش نور (Diffusion of Light)  
 تغییر جهت پرتوهای نور در یک محیط مانند عبور نور از مه است. برخورد نور با مولکولهای یک گاز نیز سبب پخش نور می‌شود.

پراش (Diffraction)  
 پدیده انحراف مثلاً امواج نوری از خط راست ضمن عبور از نزدیک لبه یا موانع است که برخلاف قوانین نور هندسی صورت می‌پذیرد. این پدیده در مورد امواج وابسته به ماده نظیر الکترون و پروتون نیز صادق است.

پراکندگی (Scattering)  
 انحرافی است که هر تابشی در نتیجه برخورد با ماده حاصل می‌کند. رنگ آبی آسمان به‌علت پراکندگی نور توسط مولکولهای هواست.

پرتو درمانی (Radiotherapy)  
درمان بیمارها از راه تابش پرتوهاست.

پرتونگاری (Radiography)  
ایجاد تصویر بر صفحه عکاسی به وسیله تابشهای با طول موج کوتاه، مانند پرتو ایکس است.

پرتوهای کیهانی (Cosmic Rays)  
پرتوهایی فوق العاده پرانرژی اند که از خارج جو به زمین می‌رسند. بخش بزرگی از آنها را ذره‌های باردار تشکیل می‌دهند که بیشتر آنها پروتون است، ولی الکترونها و ذرات آلفا نیز در میان آنها وجود دارند. انرژیهای تا حدود  $10^{19}$  الکترون‌ولت در پرتوهای کیهانی دیده شده است.

پرتوهای گاما (Gamma Rays)  
تابشی الکترومغناطیسی با طول موج کمتر از پرتوهای ایکس است که در واپاشی هسته، از اتمهای پرتوزا گسیل می‌شود. قابلیت نفوذ آن از پرتوهای آلفا و بتا بیشتر است و در میدان مغناطیسی منحرف نمی‌شود.

پلاروید (Polaroid)  
اسم تجاری ورقه پلاستیکی نازک و شفافی است که نور طبیعی را قطبیده خطی و فقط نور قطبیده خطی به موازات محور عبور خود را رد می‌کند. پلاروید از بلورهای کوچک سوزنی شکل یدوسولفات کینن که نام صنعتی آن هراپاتیت است ساخته می‌شود.

پیچه القا (Induction Coil)  
اسبابی است که به وسیله آن از جریان مستقیم با ولتاژ کم می‌توان ولتاژ متناوب بسیار بالا تولید کرد. از دو پیچه تشکیل شده است، در پیچه اول، که شامل چند دور سیم پیچ است، جریان مستقیم توسط یک کلید قطع و وصل می‌شود و در پیچه دوم، که شامل تعداد بسیار زیادی سیم پیچ است، نیروی محرکه القایی خیلی زیادی به وجود می‌آید.

تابش (Radiation)  
نوعی انرژی است که به صورت امواج الکترومغناطیسی یا ذره‌های ریز به نام فوتون منتشر می‌شود و برای انتشار به محیط مادی نیاز ندارد.

تابش جسم سیاه (Black Body Radiation)  
تابشی است که شامل همه طول موجهای گرمایی، فروسرخ و نوری است. جسم سیاه تمام تابشهایی را که گسیل می‌کند می‌تواند جذب کند. تابش گسیل شده از جسم سیاه فقط تابع دماست.

تابش فرابنفش (Ultraviolet Radiation)  
تابش الکترومغناطیسی است که طول موج آن حدود  $4 \times 10^{-7}$  تا  $5 \times 10^{-9}$  متر و بین پرتو مرئی و پرتو ایکس است.

تابش فروسرخ (Infrared Radiation)  
تابش الکترومغناطیسی است که طول موج آن بین  $0.8$  تا  $100$  میکرون است. این نوع تابش می‌تواند بر



نوعی صفحه عکاسی اثر کند و حامل انرژی گرمایی است.

تداخل (Interference)

جمع یا ترکیب امواج و اثری است که از این ترکیب حاصل می‌شود.

جبهه موج (Wave Front)

مکان هندسی نقاط همفاز در مسیر انتشار یک حرکت موجی است.

حرکت موجی (Wave Motion)

انتشار یک آشفته‌گی تناوبی است که با خود انرژی منتقل می‌کند. صوت و تمام تابشهای الکترومغناطیسی از جمله نور انرژی خود را به صورت موج منتشر می‌کنند.

خطوط فرانیهوفر (Fraunhofer Lines)

خطوط ظریف سیاهی در طیف پیوسته خورشید است. این خطوط به نورهایی از نور سفید که از رنگین کره خورشید (قسمت درونی خورشید) منتشر می‌شود مربوط‌اند که به وسیله عنصرهایی که قسمت بیرونی کره خورشید را تشکیل داده‌اند، جذب می‌شوند. تعدادی از این خطوط نیز ناشی از جذب نور در جو زمین‌اند.

دامنه (Amplitude)

بیشترین مقداری است که یک کمیت متناوب نسبت به وضع تعادل خود دارد.

راد (Rad)

واحد اندازه جذب‌شده تابش یونیده است. یک راد مقدار انرژی برابر  $0.706$  ژول بر کیلوگرم است که به وسیله جسم واقع در معرض تابش جذب می‌شود.

زاویه قطبیدگی (Angle of polarization)

زاویه تابش پرتوهای نوری است که پس از بازتاب از یک سطح، قطبیده کامل شوند. به آن زاویه بروستر نیز گفته می‌شود.

سال نوری (Light Year)

واحد طول در نجوم و برابر مسافتی است که نور در مدت یکسال طی می‌کند و حدود  $9.46 \times 10^{12}$  کیلومتر است.

سرعت زاویه‌ای (Angular velocity)

سرعت تغییر زاویه چرخش دور یک محور است که برحسب رادیان بر ثانیه بیان می‌شود.

سلول فوتوالکتریک (Photoelectric cell; Photocell)

حبابی است خالی از هوا که دارای یک صفحه فلزی و حساس به نور به نام کاتد و یک میله مسی به نام آنود است. هنگامی که نور بر کاتد بتابد الکترون گسیل و جذب آنود می‌شود.

**طول موج (Wavelength)**

فاصله‌ای که موج در یک دوره تناوب طی می‌کند، و به عبارت دیگر فاصله بین دو نقطه متوالی همفاز در یک موج است.

**طیف (Spectrum)**

توزیع خاصی از تابش الکترومغناطیسی به ترتیب بسامد یا طول موج است. نور سفید ضمن عبور از منشور یا توری پراش به صورت طیف تجزیه می‌شود. رنگ طیف حاصل به ترتیب کاهش طول موج عبارت است از سرخ، نارنجی، زرد، سبز، آبی، نیلی و بنفش.

**طیف پیوسته (Continuous Spectrum)**

طیفی است که در آن، در یک ناحیه نسبتاً گسترده، همه طول موجهای مربوط به آن ناحیه وجود دارند. چنین طیفی مثلاً توسط نوری به دست می‌آید که از اجسام جامد یا مایع ملتهب یا گازهای پرفشار منتشر می‌شود.

**طیف جذبی (Absorption Spectrum)**

طیفی است که در آن برخی از پرتوهای نور ضمن عبور از محلول یا گاز جذب شده باشند. در نتیجه در طیف خطوط یا نوارهای سیاهی که معرف عناصر موجود در آن جسم اند ظاهر می‌شود.

**طیف‌نما (Spectroscope)**

وسیله‌ای است که برای تجزیه نور و مشاهده و بررسی طیف حاصل از آن به کار می‌رود. در طیف‌نما از منشور یا توری پراش جهت ایجاد طیف استفاده می‌شود.

**فاز (Phase)**

زاویه‌ای است که جلو یا عقب بودن یک حرکت نوسانی را نسبت به حرکت نوسانی دیگری که هم‌بسامد با اولی است و مبدأ فاز نامیده می‌شود بیان می‌کند.

**فرا بسامد بالا (Ultra-high Frequency (U.H.F))**

امواج رادیویی است که بسامد آنها بین  $3 \times 10^8$  تا  $3 \times 10^9$  هرتز یا طول موج آنها بین ۱ تا ۰٫۸ متر باشد.

**قطبشگر (پلاریزور) (Polarizer)**

وسیله‌ای است که نور را قطبیده می‌کند، مثل ورقه پلاریوید یا منشور نیکول.

**قطبش نور (Polarization of Light)**

نور طبیعی از ارتعاشهای عمود بر هم میدانهای الکتریکی  $E$  و مغناطیسی  $B$  تشکیل شده است. این ارتعاشها در همه امتدادهای عمود بر پرتو که در جهت انتشار است صورت می‌گیرند. هرگاه بعضی از این امتدادها حذف شود نور را قطبیده جزئی، و اگر ارتعاش  $E$  یا  $B$  فقط در امتداد ثابتی قرار داشته باشد نور را قطبیده کامل گویند. عمل تبدیل نور طبیعی به نور قطبیده را قطبش نور می‌نامند. قطبش نور توسط بازتاب، شکست، دوشکستی، دورنگی و پراکندگی صورت می‌گیرد.

## فهرست منابع

در تألیف این کتاب از منابع زیر استفاده شده است:

۱. دیوید هالیدی، رابرت رزنیک، فیزیک (جلد چهارم، نورو مبانی فیزیک کوانتومی)، ترجمه محمدرضا بهاری، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۲.
۲. یوجین هشت، آلفرد زایاک، نور شناخت، ترجمه پروین بیات مختاری، حبیب مجیدی ذوالبنین، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۶.
۳. آجوی گاتاک، نورشناسی، ترجمه ناصر مقبلی، مهرانگیز طالب زاده، انتشارات فاطمی، ۱۳۷۰.
۴. سیرز، زیمانسکی، یانگ، نورو فیزیک مدرن، ترجمه فضل الله فروتن، نشر علوم دانشگاهی، ۱۳۷۱.
۵. بیوکی، فردریک، فیزیک، ترجمه محمدابراهیم ابوکاظمی، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۰.
۶. فرانک ج. بلت، فیزیک پایه (جلد دوم، سیالات، حرارت و امواج)، ترجمه محمد خرمی، انتشارات فاطمی، ۱۳۷۵.
۷. فرانک ج. بلت، فیزیک پایه (جلد چهارم، نور و فیزیک نوین)، ترجمه ناصر مقبلی، انتشارات فاطمی، ۱۳۷۵.
۸. محمود قرآن نویس، پرویز امین پور، آزمایشهای فیزیک، انتشارات فاطمی، ۱۳۷۴.
9. Wave Physics, Edward Arnold, R. E. I (1990).
10. Modern Physics, William and Trinklein and Metcalfe, Holt Rinehart and Winston (1984).
11. Optics, Khanna - Gulati, R. Chand & Co, New Dehli (1984).

## نمایه

- آستانه دردناکی، ۴۰  
 آستانه شنوایی، ۴۰  
 اثر دوپلر، ۴۲  
 اثر فوتوالکتریک، ۹۴  
 اصل هویگنس، ۷۳  
 الکترون ولت، ۱۰۳  
 امواج  
 اصل برهم نهی، ۲۵  
 ~الکترومغناطیسی، ۱۲، ۵۰  
 انرژی، ۶۱  
 طیف، ۶۴  
 برهم نهی، ۲۵  
 تداخل ~ سینوسی، ۲۷  
 ~رادیویی، ۶۷  
 ~صوتی، ۳۸  
 ~طولی، ۲۰  
 ~عرضی، ۲۰  
 ~فراصوتی، ۳۸  
 ~فروصوتی، ۳۸  
 ~ماده، ۱۰۴  
 ~مکانیکی، ۱۹  
 ~هرتز، ۵۹  
 انرژی  
 اندازه ~الکترون، ۱۰۲  
 ~پتانسیل، ۸  
 تراز، ۹۸  
 کوانتوم، ۹۳  
 ~مکانیکی، ۸  
 بسامد، فرکانس، ۲  
 پراش  
 توری، ۸۰  
 ~فرنل و فرانیهوفر، ۷۸  
 ~نور، ۷۷  
 پرتوهای  
 ~ایکس، ۶۵  
 ~فرابنفش، ۶۶  
 ~فروسرخ، ۶۷  
 ~گاما، ۶۵  
 ~نوری، ۶۶  
 پلاروید، ۸۳  
 تداخل  
 ~سازنده، ۲۸، ۷۵  
 ~نور، ۷۴  
 ~ویزانگر، ۲۸، ۷۶  
 تشدید، ۱۰  
 جریان جابه جایی، ۵۶  
 حرکت  
 ~ارتعاشی، ۱  
 ~تناوبی، ۱  
 ~نوسانی، ۱  
 ~هماهنگ ساده، ۳  
 دوره تناوب، ۲  
 زاویه بروستر، ۸۵  
 سری  
 ~بالم، ۹۷، ۹۹  
 ~پاشن، ۹۷، ۹۹  
 ~لیمان، ۹۷، ۹۹  
 شدت صوت، ۳۹  
 تراز، ۴۰

محیط همسانگرد، ۷۳  
مدل اتمی رادرفورد، ۱۰۰  
معادلات ماکسول، ۵۷  
موج  
بازتاب ~، ۲۹  
تابع ~، ۲۲  
تپ ~، ۱۹  
چشمه ~، ۱۹  
قطار ~، ۱۹  
میکروموج، ۶۴، ۶۷  
نظریه  
~ اینشتین، ۹۵  
~ بور، ۱۰۱  
~ فوتونی، ۹۵  
نور کوانتومی، ۹۳  
نیروی پایستار، ۸

طیف اتم هیدروژن، ۹۶  
فریزهای تداخلی، ۷۶  
فوتون، ۹۵  
قانون  
~ فارادی، ۵۳  
~ کولن، ۵۱  
~ گاوس، ۵۳  
~ لنتز، ۶۰  
قطبش  
~ بر اثر پدیده دوشکستی، ۸۴  
~ به وسیله بازتابش، ۸۴  
~ به وسیله جذب انتخابی، ۸۲  
~ نور، ۸۱  
کاربردهای نور قطبیده، ۸۶  
محور نوری، ۸۴

# کتابهای

## موضوعی

### فیزیک

ما ارتعاشهای حاصل از آلات موسیقی را می‌شنویم ، نور و جلوه‌های زیبای مربوط به آن را می‌بینیم و گرمای آتش را حس می‌کنیم . همه این پدیده‌ها از یک نظر مشترک‌اند : انتقال انرژی به صورت حرکت موجی . این کتاب کوششی است برای شناختن مفاهیم کلی امواج که آنها را با عنوان **امواج مکانیکی و الکترومغناطیسی** مورد بحث قرار داده‌ایم .

مطالب این کتاب مطابق برنامه فیزیک رشته‌های علوم تجربی ، ریاضی و پیش‌دانشگاهی تنظیم شده است . ضمناً در فصل آخر کتاب ، نور کوانتومی و فیزیک جدید در همین سطح مورد بحث قرار گرفته است .

کتاب دارای خلاصه فصل ، پرسشهای تشریحی ، چهارگزینه‌ای و تمرینهایی است که دانش‌آموزان عزیز را در درک مطالب درسی و کسب مهارت در آزمونهای دانشگاهی و المپیادهای فیزیک یاری می‌کند .