

# موج‌های الکترومغناطیسی



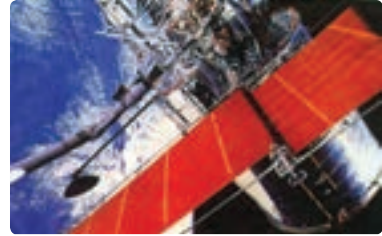
## فصل

## موج‌های الکترومغناطیسی

**نگاهی به فصل:** آیا می‌دانید انرژی حیاتی مورد نیاز گیاهان، جانوران، انسان و ... از چه طریق

و چگونه به زمین می‌رسد؟

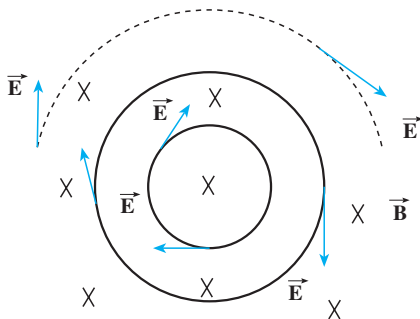
آیا می‌دانید رادیو، تلویزیون، تلفن، بی‌سیم، ماهواره‌ها و ... بر چه اساسی کار می‌کنند؟



شکل ۱-۶

هر موجود زنده‌ای در زمین به انرژی خورشید نیاز دارد، به طوری که بدون انرژی خورشید حیات روی کره زمین از بین می‌رود. این انرژی از طریق موج‌های الکترومغناطیسی به زمین می‌رسد و در تمام ارتباطات راه دور این موج‌ها به کار گرفته می‌شوند. با استفاده از سرعت بالای این امواج می‌توان خبر رخ دادن هر حادثه را کمتر از چند دهم ثانیه به هر نقطه از زمین رساند.

مایکل فارادی دانشمند انگلیسی (۱۸۶۷-۱۷۹۱ میلادی) و جیمز کلارک ماکسول فیزیک‌دان اسکاتلندی (۱۸۷۹-۱۸۳۱ میلادی) نقش عمده‌ای در کشف پدیده‌های الکترومغناطیسی و مطالعه بر روی آنها داشتند.



شکل ۲-۶

در فیزیک (۳) و آزمایشگاه با قانون فارادی آشنا شدیم و دیدیم که اگر شار مغناطیسی گذرنده از یک مدار بسته تغییر کند، نیروی محرکه‌ای را در مدار ایجاد می‌کند که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار متناسب است؛ مثلاً اگر در شکل ۲-۶ میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  تغییر کند، در اثر تغییر شار یک نیروی محرکه در مدار القا می‌شود. در واقع و به طور عمیق‌تر می‌توان گفت که

در اثر تغییر میدان مغناطیسی یک میدان الکتریکی القایی در فضا ایجاد می‌شود که خط‌های آن در این شکل نشان داده شده‌اند این میدان حتی هنگامی که مدار نیز وجود ندارد ایجاد می‌شود؛ یعنی، میدان الکتریکی را تنها بارهای الکتریکی تولید نمی‌کنند، بلکه در اثر تغییر میدان مغناطیسی نیز به وجود می‌آید. در فیزیک (۳) و آزمایشگاه هم چنین دیدیم که هنگامی که میدان الکتریکی داخل یک رسانا وجود دارد، در آن اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد می‌کند در نتیجه می‌توان گفت: «نیروی محرکه القایی از این میدان الکتریکی القایی حاصل می‌شود.» ماکسول پیش‌بینی کرد همان‌طور که در اثر تغییر میدان مغناطیسی در فضا، میدان الکتریکی تولید می‌شود، در اثر تغییر میدان الکتریکی نیز میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود؛ یعنی، علاوه بر جریان الکتریکی و آهنربا تغییر میدان الکتریکی نیز می‌تواند منشأ میدان مغناطیسی باشد. ماکسول با توجه به کارهای اورستد، آمپر، هانری و فارادی مبانی علم الکتریسیته و مغناطیس را تدوین کرد و وجود موج‌های الکترومغناطیسی و انتشار آنها در فضا را پیش‌بینی کرد. بعدها هرتر فیزیک‌دان آلمانی (۱۸۹۴-۱۸۵۷ میلادی) وجود این موج‌ها را به‌طور تجربی نشان داد.

## ۶-۱- چگونه تشکیل موج‌های الکترومغناطیس توسط یک آنتن

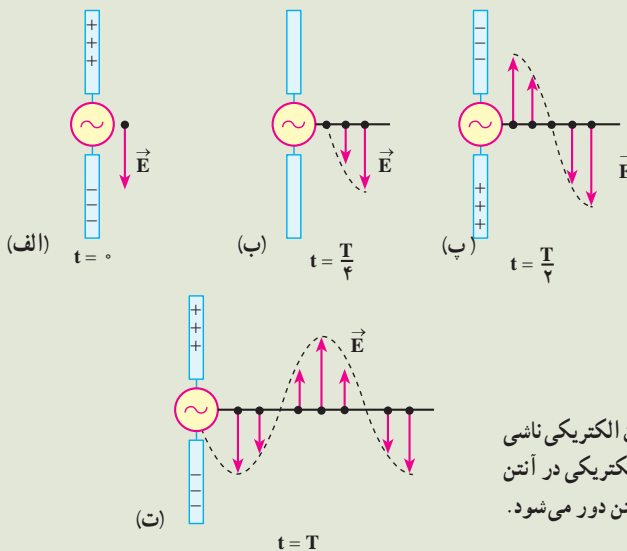
موج‌های الکترومغناطیس از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده‌اند. عامل اصلی ایجاد موج‌های الکترومغناطیسی، ذرات باردار شتاب‌دارند؛ یعنی، وقتی ذره باردار شتاب‌دار می‌شود بخشی از انرژی خود را به‌صورت موج‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌کند، گسیل موج‌های الکترومغناطیسی توسط اجسام را تابش می‌نامند.

### چگونه تولید موج‌های الکترومغناطیسی توسط آنتن

در آنتن، یک منبع ولتاژ متناوب برای ایجاد نوسان بار الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد و این شیوه‌ای مرسوم برای شتاب‌دار کردن ذرات است. از آنتن‌ها به‌عنوان چشمه موج‌های الکترومغناطیس در ایستگاه‌های رادیویی، مخابراتی و ... استفاده می‌شود. شکل ۶-۳ نحوه تولید یک موج الکترومغناطیس را در یک آنتن نشان می‌دهد. دو میله فلزی به یک مولد متناوب (ac) متصل شده‌اند. چون ولتاژ خروجی این مولد به صورت سینوسی است، بار روی میله‌ها دائماً تغییر می‌کند. در لحظه  $t = 0$  s بار روی میله بالایی بیشینه و مثبت و روی میله پایینی بیشینه و منفی است. سپس بار این میله‌ها کاهش می‌یابد

و در لحظه  $t = \frac{T}{4}$  به صفر می‌رسد (شکل ۳-۶-ب) در ادامه این حرکت، علامت بار میله‌ها معکوس می‌شود، یعنی بار میله بالایی منفی و بار میله پایینی مثبت می‌شود و مقدار آن نیز افزایش می‌یابد تا در لحظه  $t = \frac{T}{2}$  به یک مقدار بیشینه برسد (شکل ۳-۶-پ). تغییر بار میله‌ها به همین ترتیب ادامه می‌یابد.

در زمان  $t = 0$  بار مثبت در میله بالایی و بار منفی در میله پایینی بیشینه است (شکل ۳-۶-الف). پس میدان الکتریکی حاصل از این بارها نیز بیشینه است. میدان الکتریکی ایجاد شده در نزدیکی آنتن، در این لحظه، در این شکل نشان داده شده است.

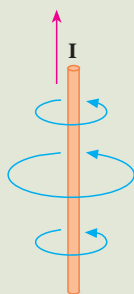


شکل ۳-۶- میدان الکتریکی ناشی از نوسان بارهای الکتریکی در آنتن با سرعت نور از آنتن دور می‌شود.

با کاهش بار روی میله‌ها، شدت میدان الکتریکی در نزدیکی میله‌ها، کاهش می‌یابد و میدان الکتریکی بیشینه رو به پایینی که در لحظه  $t = 0$  تولید شده بود از میله دور می‌شود. هنگامی که بارهای مثبت و منفی روی میله‌ها صفر است (مانند شکل ۳-۶-ب) میدان الکتریکی نیز صفر است. این وضعیت  $\frac{1}{4}$  دوره ( $t = \frac{T}{4}$ ) بعد از شروع نوسان پیش می‌آید. با ادامه این عمل، میله بالایی، بعد از زمان  $t = \frac{T}{2}$  دارای بیشترین مقدار بار منفی و میله پایینی دارای بیشترین بار مثبت می‌شود. در این حالت میدان الکتریکی ایجاد شده

رو به بالاست (شکل ۶-۳-پ) و با ادامه یافتن نوسان بار الکتریکی روی میله‌ها میدان الکتریکی مطابق شکل ۶-۳-ت تشکیل می‌شود. در تمام این مراحل میدان الکتریکی نزدیک آنتن با نوسان بار الکتریکی روی آن هم فاز است؛ یعنی، جهت میدان الکتریکی در زمانی که میله بالایی مثبت است رو به پایین و وقتی میله بالایی منفی است، رو به بالاست و اندازه میدان در هر لحظه به مقدار بار روی میله در آن لحظه بستگی دارد.

با ادامه نوسان بارهای الکتریکی روی میله‌ها، میدان‌های الکتریکی ایجاد شده با سرعت نور از آنتن دور می‌شوند. در شکل ۶-۳-گویی از میدان الکتریکی را در لحظه‌های مشخص از نوسان مشاهده می‌کنید. همان‌گونه که می‌بینید در طول یک دوره از نوسان بار، میدان الکتریکی ایجاد شده در ابتدای دوره به اندازه یک طول موج کامل جلو رفته است. تغییر بارهای الکتریکی در میله‌ها سبب ایجاد جریان الکتریکی در میله‌ها و در نتیجه تولید یک میدان مغناطیسی در اطراف میله‌ها می‌شود. وقتی جریان در میله‌ها رو به بالاست (همان‌طور که در فیزیک ۳ و آزمایشگاه در مورد میدان حاصل از جریان در یک سیم دیدیم) خطوط میدان مغناطیسی تولید شده به صورت دایره‌هایی هم‌مرکز به دور آنتن اند (شکل ۶-۴). این خط‌ها بر میدان الکتریکی تولید شده در هر نقطه عمودند.



شکل ۶-۴- چگونگی تشکیل خطوط میدان مغناطیسی در اطراف یک آنتن که از آن جریان الکتریکی متغیر می‌گذرد.

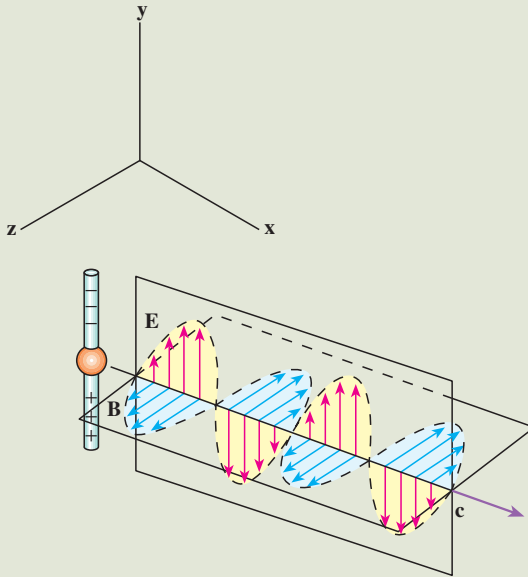
با عوض شدن جهت جریان، جهت میدان مغناطیسی نیز وارونه می‌شود و با تغییر جریان نسبت به زمان، میدان مغناطیسی نیز همانند میدان الکتریکی در اطراف آنتن تغییر می‌کند.

تا اینجا دیدیم که نوسان بارهای الکتریکی روی میله‌ها، در فضا میدان الکتریکی و مغناطیسی متغیر تولید می‌کند. اما علاوه بر اینها دو پدیده دیگر نیز رخ می‌دهد. همان‌طور که دیدیم:

(الف) میدان مغناطیسی متغیر با زمان، میدان الکتریکی تولید می‌کند.

(ب) میدان الکتریکی متغیر با زمان - همان‌طور که ماکسول پیش بینی کرده بود-

میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند.



شکل ۵-۶- یک موج الکترومغناطیسی گسیل شده از یک آنتن در یک لحظه از زمان. توجه کنید که میدان الکتریکی بر میدان مغناطیسی و هر دو بر راستای انتشار موج عمودند.

این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی القایی هم فازند؛ یعنی، در هر نقطه هر دو میدان هم‌زمان با هم بیشینه یا کمینه می‌شوند (شکل ۵-۶). علاوه بر این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یکدیگر و هر دوی آنها بر راستای حرکت موج عمودند.

در نتیجه این دو پدیده و مواردی که در بالا ذکر شد، یک موج الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود که در فضا منتشر می‌شود (شکل ۵-۶).

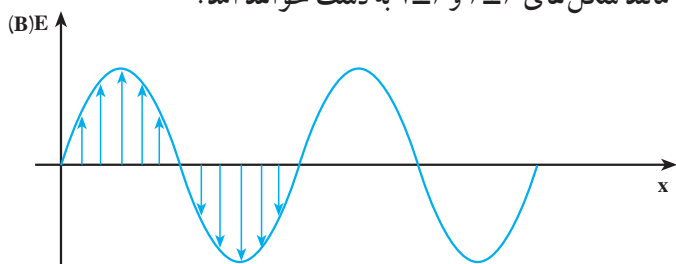
موج‌های الکترومغناطیسی نیز، مانند موج‌های مکانیکی، در زمان و مکان تغییر می‌کنند، با این تفاوت که در موج‌های مکانیکی ذره‌های تشکیل دهنده محیط نوسان می‌کنند و در موج‌های الکترومغناطیسی، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در هر نقطه از فضا به‌طور نوسانی تغییر می‌کنند. همین موضوع سبب می‌شود که موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار خود، الزاماً به محیط مادی نیاز نداشته باشند و در خلأ نیز منتشر شوند.

برای بیان چگونگی انتشار موج‌های الکترومغناطیسی نیز می‌توانیم، همان‌طور که در مورد موج‌های مکانیکی انجام دادیم، از نمودارهای میدان‌های الکتریکی (و یا مغناطیسی) بر حسب مکان یا زمان استفاده کنیم. ابتدا تغییرات میدان الکتریکی را توصیف می‌کنیم.

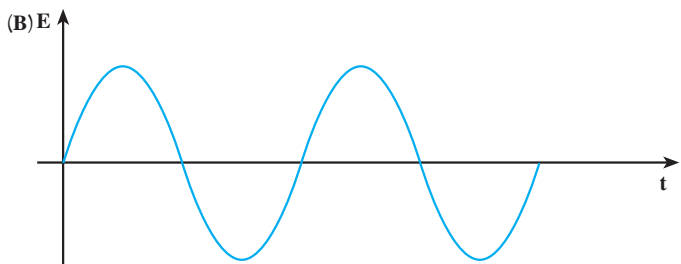
یک موج الکترومغناطیسی را در نظر می‌گیریم که در جهت محور  $x$  منتشر می‌شود. نمودار میدان الکتریکی بر حسب مکان این موج در شکل ۶-۶ رسم شده است. این نمودار، میدان الکتریکی را در تمام نقطه‌ها در امتداد محور  $x$  و در یک لحظه نشان می‌دهد. می‌بینید که در جهت محور  $x$ ، میدان

الکتریکی افزایش می‌یابد تا به یک مقدار بیشینه برسد، سپس کاهش می‌یابد و صفر می‌شود و در ادامه، همین تغییرات در جهت عکس صورت می‌گیرد.

تغییرات میدان الکتریکی در یک نقطه از فضا را نیز می‌توان با استفاده از نمودار میدان الکتریکی بر حسب زمان نشان داد. این نمودار در شکل ۶-۷ رسم شده است. مشاهده می‌کنید که مقدار میدان در این نقطه، از صفر تا مقدار بیشینه افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد و دوباره به صفر می‌رسد. پس از آن جهت میدان معکوس می‌شود. در این جهت نیز میدان از صفر تا مقدار بیشینه افزایش می‌یابد و دوباره کاهش می‌یابد تا به صفر برسد و این نوسان‌ها به همین ترتیب ادامه می‌یابد. نمودار میدان مغناطیسی بر حسب مکان و میدان مغناطیسی بر حسب زمان را نیز می‌توان مانند نمودارهای مربوط به میدان الکتریکی رسم کرد که باز هم نمودارهایی مانند شکل‌های ۶-۶ و ۶-۷ به دست خواهد آمد.

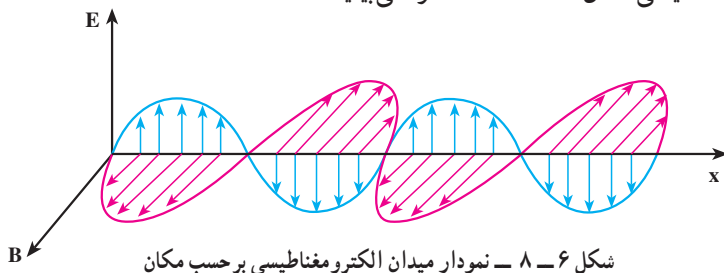


شکل ۶-۶ - نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) بر حسب مکان، یک موج الکترومغناطیسی در امتداد محور  $x$ ، در یک لحظه از زمان.



شکل ۶-۷ - نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) بر حسب زمان، یک موج الکترومغناطیسی در یک نقطه از محور  $x$ .

در شکل ۶-۸ نمودارهای میدان الکترومغناطیسی بر حسب مکان که در آن هم میدان الکتریکی و هم میدان مغناطیسی نشان داده شده است را می‌بینید.



شکل ۶-۸ - نمودار میدان الکترومغناطیسی بر حسب مکان

تعریف‌هایی که قبلاً در مورد موج‌های مکانیکی بیان کردیم، در مورد موج‌های الکترومغناطیسی هم به کار می‌روند؛ مثلاً، تعداد نوسان‌های میدان الکتریکی (و یا مغناطیسی) در واحد زمان و در هر نقطه از فضا، بسامد و زمانی که طول می‌کشد تا میدان الکتریکی (و یا مغناطیسی) یک نوسان کامل انجام دهد، دوره نامیده می‌شود. به همین ترتیب، طول موج فاصله بین دو نقطه متوالی از موج است که در آن دو نقطه میدان‌های الکتریکی (و یا مغناطیسی) هم‌فازند. سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی نیز، همچون موج‌های مکانیکی از رابطه  $v = \lambda f$  به دست می‌آید.

### پرسش ۱-۴

با توجه به شکل ۶-۵ توضیح دهید که موج‌های الکترومغناطیسی طولی اند یا عرضی؟

### ۶-۲- سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی

میدان مغناطیسی و الکتریکی حاصل از جریان نوسانی در یک آنتن به طور هم‌زمان به تمام نقاط نمی‌رسد، بلکه با سرعت مشخصی منتشر می‌شوند. ابتدا این میدان‌ها در نقاط نزدیک و سپس به نقاط دورتر می‌رسند. ماکسول نشان داد که سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی در خلأ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (۶-۱)$$

که در آن  $\epsilon_0$  ضریب گذردهی الکتریکی در خلأ و  $\mu_0$  تراوایی مغناطیسی خلأ است. از فیزیک (۳) و

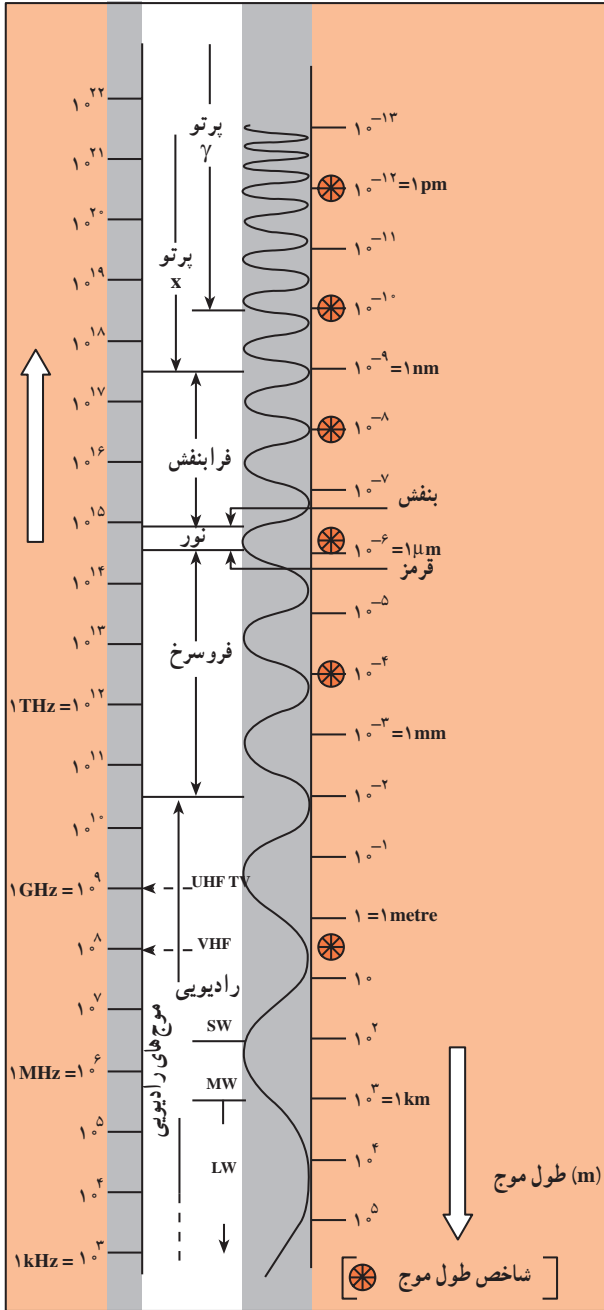
آزمایشگاه به یاد دارید که  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$  و  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$  است. با قرار دادن مقادیر بالا در رابطه ۶-۱ سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی در خلأ به دست می‌آید:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8.85 \times 10^{-12} \times 4\pi \times 10^{-7}}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

که این مقدار برابر سرعت انتشار نور در خلأ است.



## ۳-۶- طیف موج های الکترومغناطیسی



شکل ۳-۶-۹- طیف موج های الکترومغناطیسی

موج های الکترومغناطیسی طیف گسترده ای از نظر بسامد (و طول موج) دارند. به نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی، نام هایی از قبیل: موج های رادیویی، نوری، تابش گرمایی، فرابنفش،  $\gamma$ ، X، ... و اتلاق می شود. در هریک از این ناحیه ها تابش به طریق خاصی تولید و آشکار می شود. جدول ۳-۶-۱ نحوه تولید، کاربرد و آشکارسازی نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی را نشان می دهد؛ مثلاً، نور که گستره کوچکی از این طیف است، مستقیماً بر شبکه چشم اثر می کند و از این طریق آشکار می شود اما آشکارسازی موج های رادیویی توسط وسیله های الکترونیکی خاصی مانند رادیو، تلویزیون و ... صورت می گیرد.

شکل ۳-۶-۹ گستره (طیف) موج های الکترومغناطیسی را نشان می دهد. این موج ها، طیف پیوسته ای را تشکیل می دهند. با وجود تفاوت بسیار زیاد در بسامد، نحوه تولید و آشکارسازی آنها، ماهیت و قانون های حاکم بر همه آنها یکسان است.

جدول ۶-۱- نحوه تولید، آنسکارسازی و کاربرد طیف موج های الکترومغناطیسی

نام و حدود طول موج	چشمه	وسایل آنسکارسازی	بعضی از ویژگی های خاص و کاربرد
پرتو گاما (γ) $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$	هسته مواد رادیواکتیو و پرتوهای کیهانی	شماسرش گر گایگر- مولر و فیلم عکاسی	فوتون های با انرژی بسیار بالا و با قدرت نفوذ بسیار زیاد، خیلی خطرناک کاربرد: بافت های سرطانی را از بین می برد، برای پیدا کردن ترک در فلزات، برای ضد عفونی کردن تجهیزات و وسایل
پرتوی ایکس (X) $10^0 \text{ pm} = 10^{-10} \text{ m}$	لامپ پرتو X	فیلم عکاسی و صفحه فلوروسان	فوتون های بسیار پر انرژی و با قدرت نفوذ زیاد، خیلی خطرناک کاربرد: استفاده در پرتونگاری، استفاده در مطالعه ساختار بلورها، معالجه بیماری های پوستی، استفاده در پرتودرمانی
فرا بنفش (UV) $10^0 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$	خورشید، جسم های خیلی داغ، جرقه الکتریکی، لامپ بخار جیوه	فیلم عکاسی، فوتوسل	ویژگی ها: توسط شیشه جذب می شود، سبب بسیاری از واکنش های شیمیایی می شود، باخته های زنده را از بین می برد. کاربرد: لامپ های UV در پزشکی
نور مرئی $0.4 \text{ } \mu\text{m} = 4 \times 10^{-7} \text{ m}$ (سبز)	خورشید، جسم های داغ، لیزرها	چشم، فیلم عکاسی، فوتوسل	ویژگی ها: در دیدن اجسام نقش اساسی دارد، برای رشد گیاهان و عمل فتوسنتز نقش حیاتی دارد. کاربرد: در سیستم های مخابراتی (لیزر و تارهای نوری) مورد استفاده قرار می گیرد.
فروسرخ (IR) $10^0 \text{ } \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$	خورشید، جسم های گرم و داغ	فیلم های مخصوص عکاسی	ویژگی: هنگامی که جذب می شود، پوست را گرم می کند. کاربرد: برای گرم کردن، برای فیلم برداری و عکاسی در مه و تاریکی، عکاسی IR توسط ماهواره ها
رادیویی $2 \text{ m}$ (VHF)	اجاق های مایکروویو، آنتن های رادیویی و تلویزیونی	رادیو و تلویزیون	کاربرد: در آشپزی، رادیو، تلویزیون، مخابرات ماهواره ای و در رادارها برای آنسکارسازی هواپیما، موشک و کشتی

با استفاده از شکل ۹-۶ موج‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی را به ترتیب افزایش طول موج، نام ببرید.

در شکل ۹-۶ بیشترین بسامد در بالای طیف و کمترین بسامد در پایین طیف قرار دارد. کوتاه‌ترین طول موج در بالای طیف، مربوط به پرتوهای گاما که در حدود  $10^{-13}$  متر است و برعکس بلندترین طول موج مربوط به موج‌های رادیویی است که در حدود  $10^5$  متر است.

## مثال ۱-۷

محدوده طول موج، امواج الکترومغناطیسی مرئی از  $400$  نانومتر (میکرون  $10^{-6}$  m) تا  $700$  نانومتر (میکرون  $10^{-6}$  m) مربوط به طول موج بنفش تا  $700$  نانومتر (میکرون  $10^{-6}$  m) مربوط به طول موج قرمز است. محدوده بسامد نور مرئی را به دست آورید.

## پاسخ

با استفاده از رابطه  $c = \lambda f$  داریم:

$$f_{\text{بنفش}} = \frac{c}{\lambda_{\text{بنفش}}} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 10^{-7}} = 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$f_{\text{قرمز}} = \frac{c}{\lambda_{\text{قرمز}}} = \frac{3 \times 10^8}{7 \times 10^{-7}} \approx 4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

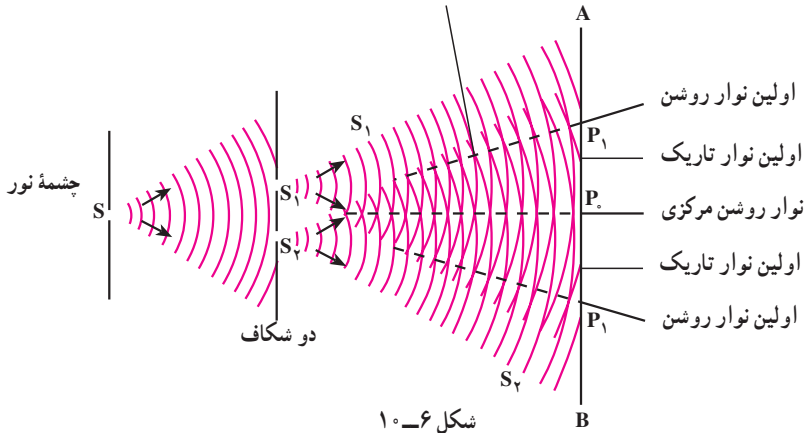
یعنی گستره بسامد نور مرئی بین  $4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$  تا  $7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$  است.

- جمله‌های زیر را کامل کنید.
- ۱- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یکدیگر ...
  - ۲- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هر دو بر ..... عمودند. بنابراین موج‌های الکترومغناطیسی از نوع موج‌های .....
  - ۳- نوسان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با یکدیگر .....
  - ۴- موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار نیاز به ..... و انرژی را از محلی به محل دیگر منتقل می‌کنند.
  - ۵- همهٔ موج‌های الکترومغناطیسی با سرعت ..... منتشر می‌شوند.

### ۴-۶- تداخل موج‌های نوری

در فصل نوسان و موج با تداخل موج‌های مکانیکی آشنا شدیم و در آن جا دیدیم که اگر دو سوزن که به فاصلهٔ نزدیکی از هم قرار دارند با بسامد معینی بر سطح آب درون یک ظرف هم‌زمان ضربه بزنند، موج‌هایی در سطح آب به وجود می‌آید که در همهٔ جهت‌ها منتشر می‌شود. برهم‌نهی این موج‌ها را تداخل نامیدیم و گفتیم در نقطه‌هایی که دو موج هم‌فاز باشند تداخل سازنده و در نقاطی که دو موج در فاز مخالف باشند تداخل ویرانگر به وجود می‌آید. همین آزمایش را با نور نیز می‌توان انجام داد. یانگ، فیزیک‌دان انگلیسی، در آزمایش‌هایی که بین سال‌های ۱۸۰۲ تا ۱۸۰۴ انجام داد، دریافت که پدیدهٔ تداخل در نور هم مشاهده می‌شود.

شکل ۶-۱۰ طرح آزمایش یانگ را نشان می‌دهد. در پشت شکاف باریک  $S$  یک چشمهٔ نور تک‌رنگ (لامپ روشن) قرار می‌دهیم. این شکاف خود مانند یک چشمهٔ نور عمل می‌کند. در فاصلهٔ کمی از شکاف  $S$ ، دو شکاف موازی  $S_1$  و  $S_2$  که با  $S$  نیز موازی و هم‌فاصله‌اند، قرار می‌دهیم. نور رسیده به شکاف‌های  $S_1$  و  $S_2$  همانند دو چشمهٔ هم‌بسامد، هم‌دامنه و هم‌فاز عمل می‌کنند و نور را در جهت‌های مختلف گسیل می‌کنند. نورهای گسیل شده از دو چشمهٔ  $S_1$  و  $S_2$  با یکدیگر تداخل کرده و نوارهای تداخلی روشن و تاریک را بر روی پردهٔ  $AB$  که در مقابل شکاف‌ها قرار دارد تشکیل می‌دهند.



دو موجی که به نقطه  $P$  روی محور تقارن دو شکاف می‌رسند، هم‌فازند زیرا آنها دوراه مساوی  $S_1P_1$  و  $S_2P_1$  را تا پرده پیموده‌اند. تداخل این دو موج سازنده است و در نتیجه در محل  $P_1$  روی پرده یک نوار روشن تشکیل می‌شود. این نوار روشن را نوار روشن مرکزی می‌نامیم. برای اینکه ببینیم در چه شرایطی نوار روشن و در چه شرایطی نوار تاریک تشکیل می‌شود نقطه  $P$  را در شکل ۶-۱۱ در نظر می‌گیریم. پرتوهایی که از  $S_1$  و  $S_2$  به این نقطه می‌رسند، دو راه نامساوی  $S_1P$  و  $S_2P$  را می‌پیمایند. اختلاف فاز پرتوها را می‌توان از روی اختلاف راه آنها تعیین کرد.

$$\Delta\phi = k(d_2 - d_1) = \frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1)$$

اگر  $\Delta\phi$  مضرب زوجی از  $\pi$  باشد؛ یعنی

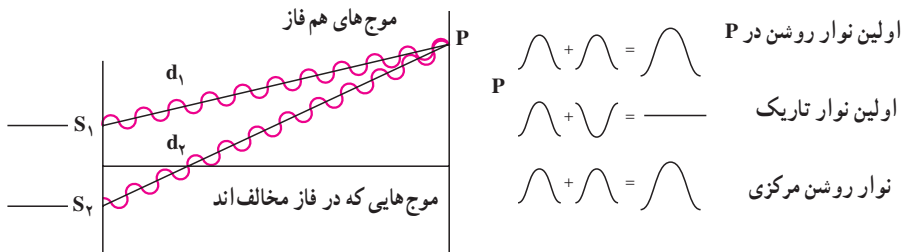
$$\Delta\phi = \pm 2n\pi, \quad n = 0, 1, \dots \quad (2-6)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) = \pm 2n\pi \quad \text{یا:}$$

$$\Rightarrow d_2 - d_1 = \pm n\lambda = \pm 2n \frac{\lambda}{2}$$

در این صورت دو پرتویی که به پرده می‌رسند هم‌فازند و تداخل سازنده ایجاد می‌شود و در این نقطه‌ها نوار روشن تشکیل می‌شود. در رابطه ۶-۲ به‌ازای  $n = 0$ ، اختلاف راه و اختلاف فاز صفر است و نوار روشنی که تشکیل می‌شود همان نوار مرکزی است.

به‌ازای  $n = 1$ ، اختلاف فاز  $2\pi$  است و اولین نوار روشن در دو طرف نوار مرکزی به‌دست می‌آید و به همین ترتیب می‌توان نوارهای روشن بعدی را به‌ازای  $n = 2, 3, \dots$  به‌دست آورد.



شکل ۱۱-۶

حال اگر  $\Delta\phi$  مضرب فردی از  $\pi$  باشد؛ یعنی :

$$\Delta\phi = \pm(2m-1)\pi, \quad m = 1, 2, \dots \quad (3-6)$$

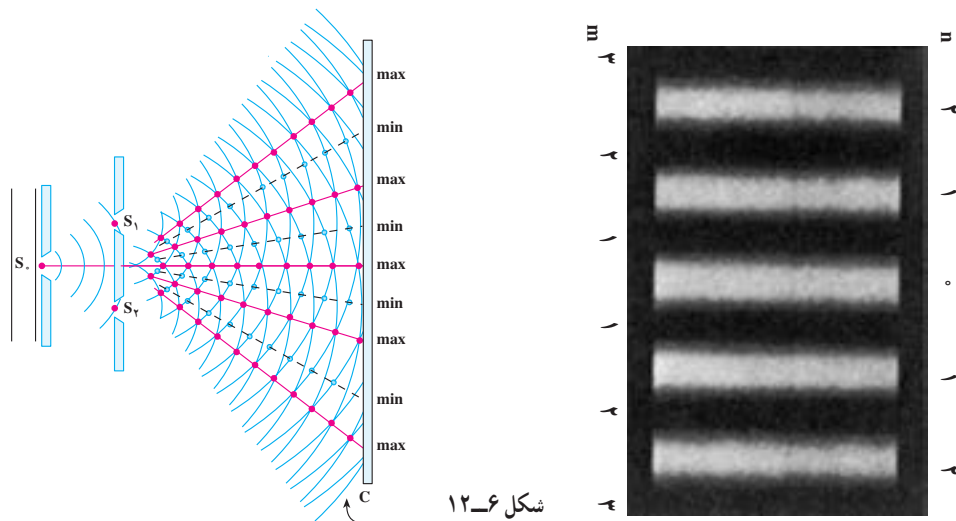
$$\frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) = \pm(2m-1)\pi$$

یا :

$$d_2 - d_1 = \pm(2m-1)\frac{\lambda}{2}$$

در این صورت دو موجی که به پرده می‌رسند در فاز مخالف هم خواهند بود و تداخل ویرانگر صورت می‌گیرد و در نتیجه در این نقاط نوار تاریک خواهیم داشت. در رابطه  $m = 1, 3, 5, \dots$  مربوط به اولین نوار تاریک است که در دو طرف نوار روشن مرکزی قرار می‌گیرد. این نوار تاریک میان نوار روشن مرکزی و اولین نوار روشن قرار دارد.

نوارهای روشن و تاریک را که روی پرده تشکیل می‌شوند، طرح تداخلی می‌نامند. شکل ۱۲-۶ طرح تداخلی دو شکاف یانگ را نشان می‌دهد. در دو طرف شکل، شماره نوارهای روشن که با مقادیر مختلف  $n$  و شماره نوارهای تاریک که با مقادیر مختلف  $m$  داده می‌شوند نیز آمده است.



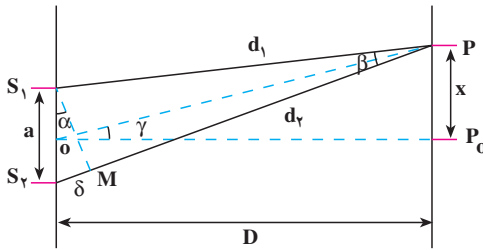
شکل ۱۲-۶

نشان دهید اختلاف راه برای مکان‌هایی که نوار تداخلی روشن داریم، مضرب

زوجی از نصف طول موج،  $\delta = 2n \frac{\lambda}{2}$ ، و برای مکان‌هایی که نوار تاریک داریم، مضرب

فردی از نصف طول موج،  $\delta = (2m-1) \frac{\lambda}{2}$ ، است

**اندازه‌گیری طول موج:** با استفاده از آزمایش ینگ می‌توان طول موج نور را اندازه‌گیری



شکل ۶-۱۳

کرد. در شکل ۶-۱۳ طرحی از این آزمایش

رسم شده است. در این شکل، فاصله دو

شکاف از هم  $a$  و فاصله شکاف‌ها از پرده  $D$

است. فرض کنید نوار روشن  $n$ ام در نقطه  $P$

در فاصله  $x$  از نوار مرکزی روی پرده تشکیل

شده است. دایره‌ای به مرکز  $P$  و به شعاع  $PS_1$

رسم می‌کنیم، دایره  $PS_2$  را در نقطه  $M$  قطع می‌کند. اختلاف راه نوری بین دو پرتو  $PS_1$  و  $PS_2$  برابر

است با:

$$\delta = S_2M = d_2 - d_1$$

اگر فاصله پرده از صفحه دو شکاف بسیار بزرگتر از فاصله دو شکاف، یعنی  $D \gg a$  باشد، زاویه  $\gamma$

و نیز زاویه  $\beta$  (بین پرتوهایی که به  $P$  می‌رسند) بسیار کوچک خواهند بود و می‌توان  $S_1M$  را عمود بر  $S_2P$

و  $OP$  در نظر گرفت. در این صورت، زاویه‌های  $\alpha$  و  $\gamma$  با یکدیگر برابرند، در نتیجه:

$$\tan \alpha = \tan \gamma \quad \text{و} \quad \tan \gamma = \frac{x}{D}$$

$$\tan \alpha = \sin \alpha = \frac{\delta}{a}$$

چون زاویه  $\alpha$  کوچک است:

بنابراین:

$$\frac{x}{D} = \frac{\delta}{a} \quad (۴-۶)$$

برای نوار روشن  $n$ ام:

$$\frac{x}{D} = \frac{n\lambda}{a} \quad (۵-۶)$$

که از آن رابطه زیر به دست می آید :

$$\lambda = \frac{xa}{nD} \quad (6-6)$$

با اندازه گیری فاصله نوار روشن از نوار مرکزی می توان طول موج را اندازه گرفت.

### پرسش ۳-۷

به نظر شما اگر آزمایش یانگ را با نور سفید انجام دهیم، طرح تداخلی چگونه خواهد بود؟

### مثال ۲-۷

آزمایش یانگ را با نور زرد سدیم انجام داده ایم. فاصله دو شکاف یانگ از یکدیگر  $a = 1/2 \text{ mm}$  و فاصله شکاف تا پرده  $1/2 \text{ m}$  است؛ اگر فاصله نوار روشن بیستم از وسط نوار مرکزی  $11/8 \text{ mm}$  باشد، طول موج نور زرد سدیم چند متر است؟

**پاسخ**

با استفاده از رابطه ۶-۶ داریم :

$$\lambda = \frac{ax}{nD} = \frac{1/2 \times 10^{-3} \times 11/8 \times 10^{-3}}{20 \times 1/2} = 5/9 \times 10^{-7} \text{ m}$$
$$= 0.59 \mu\text{m}$$



۱- شکل ۶-۱۴ طیف موج‌های الکترومغناطیسی را با یک مقیاس تقریبی نشان می‌دهد.

پرتوهای $\gamma$	پرتوهای x	p	Q	R	S
------------------	-----------	---	---	---	---

شکل ۶-۱۴

الف) نام قسمت‌هایی از طیف را که تنها با حروف علامت‌گذاری شده‌اند، بنویسید.  
 ب) اگر در طول طیف از چپ به راست (از پرتوهای  $\gamma$  به طرف S) حرکت کنیم، چه خاصیتی از پرتوها افزایش یا کاهش می‌یابد و یا ثابت می‌ماند؟

۲- چهار وجه اشتراک و دو تفاوت برای نور فروسرخ و امواج رادیویی بیان کنید.  
 ۳- الف) از یک ایستگاه رادیویی موج الکترومغناطیسی به طول موج  $75\text{m}$  گسیل می‌شود. بسامد این موج را حساب کنید.

ب) موج‌های رادیویی با بسامد  $12\text{MHz}$  چه طول موجی دارند؟

۴- الف) طول موج نور نارنجی  $10^{-7}\text{m} \times 6/42$  است، بسامد این نور چند هرتز است؟  
 ب) بسامد نور قرمز در حدود  $10^{14}\text{Hz} \times 4/28$  است، طول موج این نور در هوا و آب را حساب کنید. (سرعت نور در هوا را  $3 \times 10^8\text{m/s}$  و در آب را  $2/25 \times 10^8\text{m/s}$  فرض کنید.)

۵- گستره طول موج‌های رادیویی زیر را به دست آورید.

الف) باند AM در گستره بسامدی  $540$  تا  $1600$  کیلوهرتز

ب) باند FM در گستره بسامدی  $88$  تا  $108$  مگاهرتز

۶- آزمایش ینگ را با نور تک‌رنگ سبز انجام داده و نوارهای تداخلی را بر روی پرده موازی با سطح شکاف‌ها تشکیل داده‌ایم. برای این که فاصله دو نوار روشن متوالی را زیاد کنیم می‌توانیم:

(۱) به جای نور سبز از نور تک‌رنگ قرمز استفاده کنیم.

(۲) به جای نور سبز از نور تک‌رنگ بنفش استفاده کنیم.

(۳) فاصله پرده از شکاف‌ها را زیاد کنیم.

(۴) فاصله دو شکاف را از هم کم کنیم.

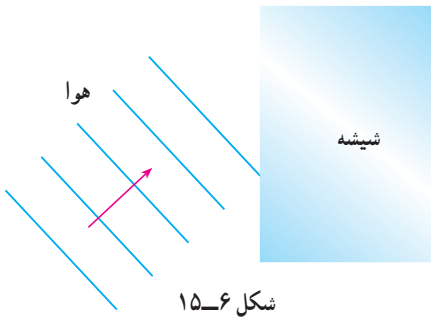
۷- اگر آزمایش ینگ عیناً در آب انجام گیرد چه تغییری در وضعیت نوارها نسبت به هوا حاصل

می‌شود؟ توضیح دهید.

۸- یک صافی مقابل چراغ جیوه قرار می دهیم، به طوری که تمام طول موج ها به جز ناحیه سبز آن جذب می شود. با این نور سبز، طرح تداخلی آزمایش یانگ را به فاصله دو شکاف  $a = 0.6 \text{ mm}$  روی پرده ای به فاصله  $D = 2.5 \text{ m}$  از دو شکاف تشکیل می دهیم؛ اگر فاصله دو نوار روشن پهلوی هم  $2.7 \text{ mm}$  باشد، طول موج نور سبز را حساب کنید.

۹- در آزمایش دو شکاف یانگ، فاصله دو شکاف  $0.4 \text{ mm}$  و فاصله پرده تا دو شکاف  $80 \text{ cm}$  است؛ اگر طول موج نور  $600 \text{ nm}$  باشد فاصله نوار دهم روشن از نوار مرکزی را حساب کنید.

۱۰- در شکل ۱۵-۶ موج های نور فرودی از هوا وارد شیشه می شوند. بعضی از آنها در سطح



شکل ۱۵-۶

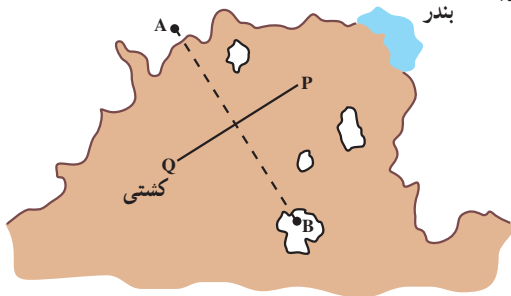
جدایی دو محیط بازتابیده و بعضی شکسته شده وارد شیشه می شوند. با استدلال توضیح دهید کدام یک از کمیت های زیر برای موج های بازتابیده و موج های شکسته شده یکسان است؟

- الف) سرعت
- ب) طول موج
- پ) امتداد
- ت) شدت نور
- ث) بسامد

۱۱- در شکل ۱۶-۶ یک خط ساحلی با دو ایستگاه رادیویی دریانوردی زمینی A و B دیده می شود که در فاصله زیادی از هم قرار گرفته اند. هر دو ایستگاه پیوسته سیگنال های رادیویی هم فاز گسیل می کنند که بسامد آنها  $1.5 \text{ MHz}$  است.

الف) طول موج این سیگنال ها چند متر است؟

ب) یک کشتی از مسیر QP به سوی بندر در حرکت است. هنگامی که این کشتی به نقطه ای درست در وسط خط فرضی AB می رسد، سیگنالی دریافت می کند که دامنه آن درست دو برابر دامنه هر موجی است که از یک ایستگاه به تنهایی دریافت می کرد. این مشاهده چه موضوعی را درباره سیگنال های گسیل شده از A و B نشان می دهد؟



پ) توضیح دهید در شرایط هوای مه آلود چگونه می توان از این سیگنال های رادیویی برای ادامه مسیر استفاده کرد؟

شکل ۱۶-۶