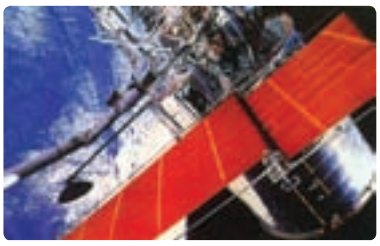
# موج‌های الکترومغناطیسی

## فصل ۶

# موج‌های الکترومغناطیسی

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

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

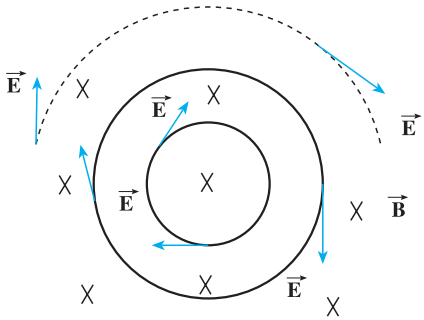


شکل ۶ــ۱

هر موجود زنده‌ای در زمین به انرژی خورشید نیاز دارد، به‌طوری که بدون انرژی خورشید حیات روی کرهٔ 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 (۱۸۶۷ــ۱۷۹۱میلادی) و جیمز کلارک ماکسول فیزیک‌دان اسکاتلندی (۱۸۷۹ــ۱۸۳۱میلادی) نقش عمده‌ای در کشف پدیده‌های الکترومغناطیسی و مطالعه بر روی آنها داشتند.

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 ۶ــ۲ میدان مغناطیسی $\vec{B}$ تغییر کند، در اثر تغییر شار یک نیروی محرکه در مدار القا می‌شود. درواقع و به‌طور عمیق‌تر می‌توان گفت که




شکل ۶ــ۲

در اثر تغییر میدان مغناطیسی یک میدان‌الکتریکی 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 به‌وجود می‌آید. در فیزیک (۳) و آزمایشگاه هم‌چنین دیدیم که هنگامی که میدان الکتریکی داخل یک رسانا وجود دارد، در آن اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد می‌کند درنتیجه می‌توان گفت : «نیروی محرکهٔ القایی از این میدان الکتریکی القایی حاصل می‌شود.» ماکسول پیش‌بینی کرد **همان‌طورکه در اثر تغییر میدان مغناطیسی در فضا، میدان الکتریکی تولید می‌شود، در اثر تغییر میدان الکتریکی نیز میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود؛** یعنی، علاوه‌بر 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 هرتز فیزیک‌دان آلمانی (۱۸۹۴ـ۱۸۵۷میلادی) وجود این موج‌ها را به‌طور تجربی نشان داد.

## ۶ـ۱ـ چگونگی 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 ذرّهٔ بارداری شتاب‌دار می‌شود بخشی از انرژی خود را به‌صورت موج‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌کند، گسیل موج‌های الکترومغناطیسی توسط اجسام را **تابش** می‌نامند.

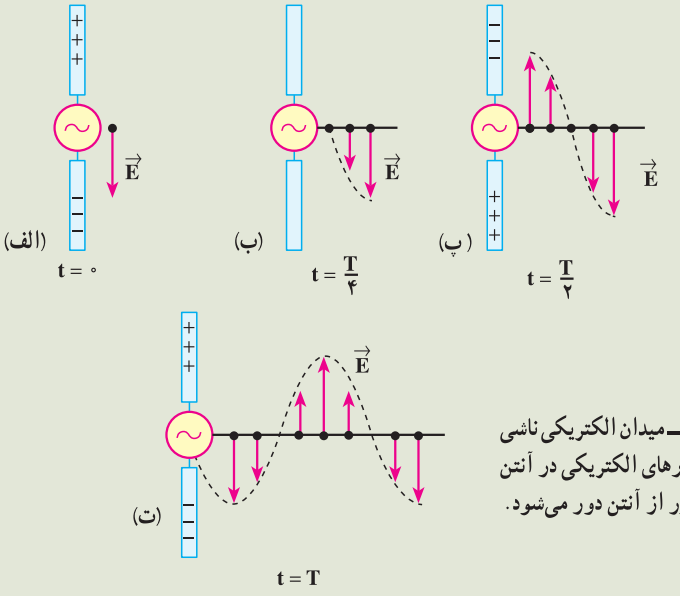
مطالعهٔ آزاد

### چگونگی تولید موج‌های الکترو مغناطیسی توسط آنتن

در آنتن، یک منبع ولتاژ متناوب برای ایجاد نوسان بار الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد و این شیوه‌ای مرسوم برای شتاب‌دارکردن ذرّات است. از آنتن‌ها به‌عنوان چشمهٔ موج‌های الکترومغناطیس در ایستگاه‌های رادیویی، مخابراتی و... استفاده می‌شود. شکل ۶ـ۳ نحوهٔ تولید یک موج الکترومغناطیس را در یک آنتن نشان می‌دهد. دو میلهٔ فلزی به یک مولد متناوب (ac) متصل شده‌اند. چون ولتاژ خروجی این مولد به صورت سینوسی است،بار روی میله‌ها دائماً تغییر می‌کند. در لحظهٔ $t = 0s$ بار روی میلهٔ بالایی بیشینه و مثبت و روی میلهٔ پایینی بیشینه و منفی است. سپس بار این میله‌ها کاهش می‌یابد

و در لحظهٔ $t = \frac{T}{۴}$ به صفر می‌رسد (شکل ۶ــ۳ــ ب) در ادامهٔ این حرکت، علامت بار میله‌ها معکوس می‌شود، یعنی بار میلهٔ بالایی منفی و بار میلهٔ پایینی مثبت می‌شود و مقدار آن نیز افزایش می‌یابد تا در لحظهٔ $t = \frac{T}{۲}$ به یک مقدار بیشینه برسد (شکل ۶ــ۳ــ پ). تغییر بار میله‌ها به همین ترتیب ادامه می‌یابد.

در زمان $t = ۰\,s$ بار مثبت در میلهٔ بالایی و بار منفی در میلهٔ پایینی بیشینه است (شکل ۶ــ۳ــالف). 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.



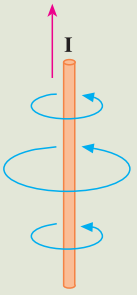

شکل ۶ــ۳ــ میدان الکتریکی ناشی از نوسان بارهای الکتریکی در آنتن با سرعت نور از آنتن دور می‌شود.

با کاهش بار روی میله‌ها، شدت میدان الکتریکی در نزدیکی میله‌ها، کاهش می‌یابد و میدان الکتریکی بیشینهٔ رو به پایینی که در لحظهٔ $t = ۰\,s$ تولید شده بود از میله دور می‌شود. هنگامی که بارهای مثبت و منفی روی میله‌ها صفر است (مانند شکل ۶ــ۳ــ ب) میدان الکتریکی نیز صفر است. این وضعیت $\frac{۱}{۴}$ دوره ($t = \frac{T}{۴}$) بعد از شروع نوسان پیش می‌آید. با ادامهٔ این عمل، میلهٔ بالایی، بعد از زمان $t = ۲\frac{T}{۴}$، دارای بیشترین مقدار بار منفی و میلهٔ پایینی دارای بیشترین بار مثبت می‌شود. در این حالت میدان الکتریکی ایجاد شده

رو به بالاست (شکل ۶ــ۳ــ پ) و با ادامه یافتن نوسان بار الکتریکی روی میله‌ها میدان الکتریکی مطابق شکل ۶ــ۳ــ ت تشکیل می‌شود. در تمام این مراحل میدان الکتریکی نزدیکِ آنتن با نوسان بار الکتریکی روی آن هم فاز است؛ یعنی، جهت میدان الکتریکی در زمانی که میلهٔ بالایی مثبت است رو به پایین و وقتی میلهٔ بالایی منفی است، رو به بالاست و اندازهٔ میدان در هر لحظه به مقدار بار روی میله در آن لحظه بستگی دارد.

با ادامهٔ نوسان بارهای الکتریکی روی میله‌ها، میدان‌های الکتریکی ایجاد شده با سرعت نور از آنتن دور می‌شوند. در شکل ۶ــ۳ الگویی 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 اندازهٔ 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 به‌صورت دایره‌هایی هم‌مرکز به دور آنتن‌اند (شکل ۶ــ۴).این خط‌ها بر میدان الکتریکی تولید شده در هر نقطه عمودند.




شکل ۶ــ۴ــ چگونگی تشکیل خطوط میدان مغناطیسی در اطراف یک آنتن که از آن جریان الکتریکی متغیر می‌گذرد.

با عوض‌شدن 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 علاوه‌بر اینها دو پدیدهٔ دیگر نیز رخ می‌دهد. همان‌طورکه دیدیم:

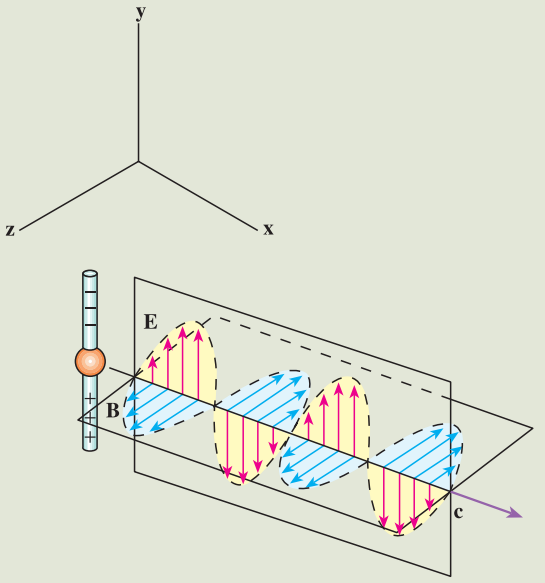
الف) میدان مغناطیسی متغیر با زمان، میدان الکتریکی تولید می‌کند.

ب) میدان الکتریکی متغیر با زمان ــ همان‌طور که ماکسول پیش‌بینی کرده بود ــ میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند.

مطالعهٔ آزاد

این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی القایی هم‌فازند؛ یعنی، در هر نقطه هر دو میدان هم‌زمان با هم بیشینه یا کمینه می‌شوند (شکل ۶ــ۵). علاوه بر این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یکدیگر و هر دوی آنها بر راستای حرکت موج عمودند.

درنتیجهٔ این دو پدیده و مواردی که در بالا ذکر شد، یک موج‌الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود که در فضا منتشر می‌شوند (شکل ۶ــ۵).




شکل ۶ــ۵ــ 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.

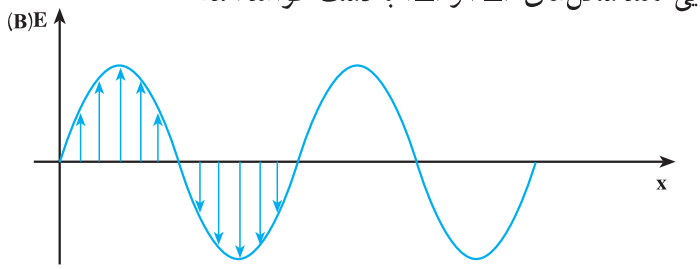
موج‌های الکترومغناطیسی نیز، مانند موج‌های مکانیکی، در زمان و مکان تغییر می‌کنند، با این تفاوت که در موج‌های مکانیکی ذرّه‌های تشکیل‌دهندهٔ محیط نوسان می‌کنند و در موج‌های الکترومغناطیسی، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در هر نقطه از فضا به‌طور نوسانی تغییر می‌کنند. همین موضوع سبب می‌شود که موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار خود، الزاماً به محیط مادّی 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) برحسب مکان یا زمان استفاده کنیم. ابتدا تغییرات میدان الکتریکی را توصیف می‌کنیم.

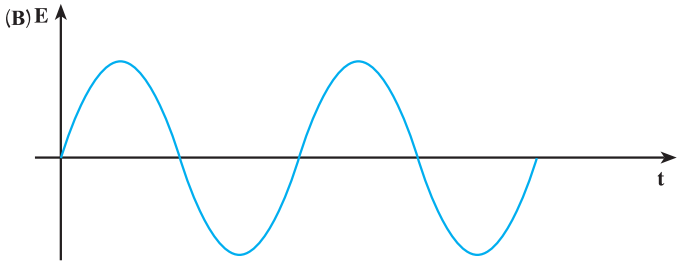
یک موج الکترومغناطیسی را در نظر می‌گیریم که در جهت محور x منتشر می‌شود. نمودار میدان الکتریکی برحسب مکان این موج در شکل ۶ــ۶ رسم شده است. این نمودار، میدان الکتریکی را در تمام نقطه‌ها در امتداد محور x و **در یک لحظه** نشان می‌دهد. می‌بینید که در جهت محور x، میدان

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 برحسب زمان نشان داد. این نمودار در شکل ۶ــ۷ 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 برحسب مکان و میدان مغناطیسی برحسب زمان را نیز می‌توان مانند نمودارهای مربوط به میدان الکتریکی رسم کرد که باز هم نمودارهایی مانند شکل‌های ۶ــ۶ و۶ــ۷ به دست خواهد آمد.

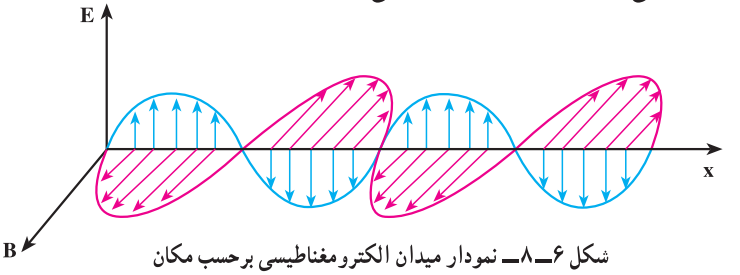



شکل ۶ــ۶ــ نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) برحسب مکان، یک موج الکترومغناطیسی در امتداد محور x، در یک لحظه از زمان.




شکل ۶ــ۷ــ نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی)برحسب زمان، یک موج الکترومغناطیسی در یک نقطه از محور x.

در شکل ۶ــ۸ نمودارهای میدان الکترومغناطیسی برحسب مکان که در آن هم میدان الکتریکی و هم میدان مغناطیسی نشان داده شده است را می‌بینید.




شکل ۶ــ۸ــ نمودار میدان الکترومغناطیسی برحسب مکان

تعریف‌هایی که قبلاً در مورد موج‌های مکانیکی بیان کردیم، در مورد موج‌های الکترومغناطیسی هم به‌کار 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** فاصلهٔ بین دو نقطهٔ متوالی از موج است که در آن دو نقطه میدان‌های الکتریکی (و یا مغناطیسی) هم‌فازند. سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی نیز، همچون موج‌های مکانیکی از رابطهٔ $v = \lambda f$ به‌دست می‌آید.

**پرسش ۶ـ۱**

با توجه به شکل ۶ـ۵ توضیح دهید که موج‌های الکترومغناطیسی طولی‌اند یا عرضی؟

## ۶ـ۲ـ سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی

میدان مغناطیسی و الکتریکی حاصل از جریان نوسانی در یک آنتن به‌طور 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 رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \qquad (۶ـ۱)$$

که در آن $\varepsilon_0$ ضریب گذردهی الکتریکی در خلأ و $\mu_0$ تراوایی مغناطیسی خلأ است. از فیزیک (۳) و آزمایشگاه به یاد دارید که $\varepsilon_0 \simeq 8/85 \times 10^{-12}\ C^2/N.m^2$ و $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ T.m/A$ است.

با قرار دادن مقادیر بالا در رابطهٔ ۶ـ۱ سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیس در خلأ به‌دست می‌آید :

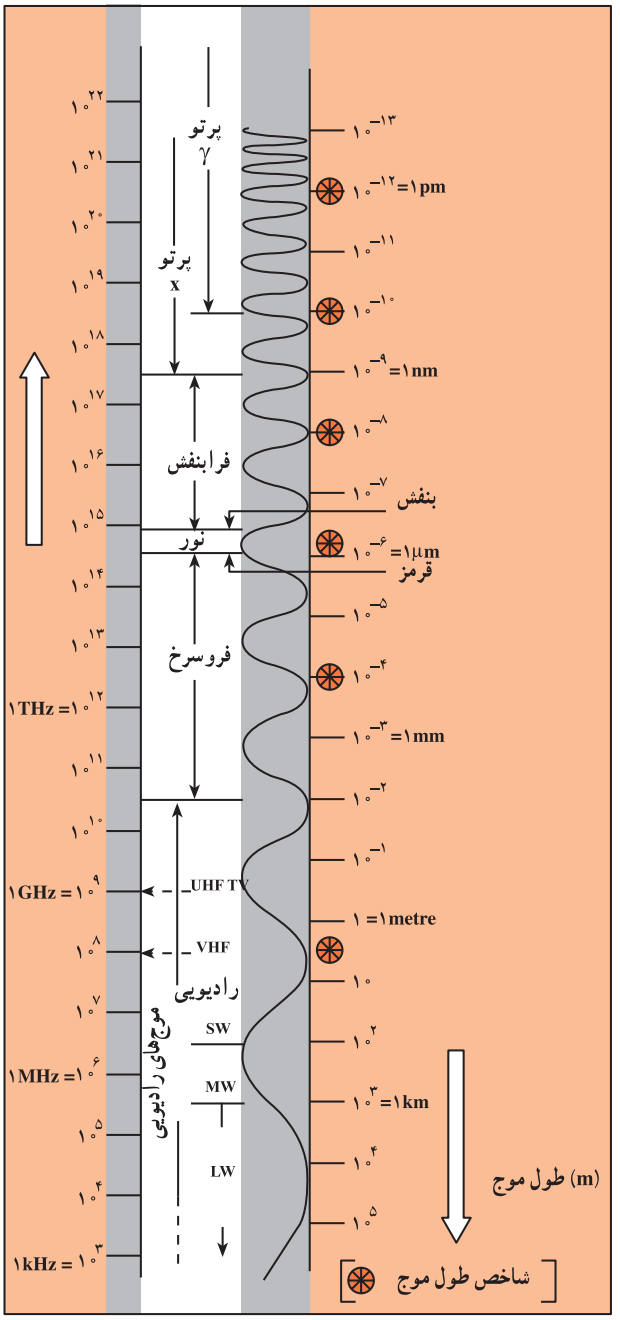
$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8/85 \times 10^{-12} \times 4\pi \times 10^{-7}}} \simeq 3 \times 10^8\ m/s$$

که این مقدار برابر سرعت انتشار نور در خلأ است.

## ۶ـ۳ـ طیف موج‌های الکترومغناطیسی

موج‌های الکترومغناطیسی طیف گسترده‌ای از نظر بسامد (و طول موج) دارند. به نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی، نام‌هایی از قبیل : موج‌های رادیویی، نوری، تابش گرمایی، فرابنفش، $\gamma$، X و... اتلاق می‌شود. در هریک از این ناحیه‌ها تابش به طریق خاصی تولید و آشکار می‌شود. جدول ۶ـ۱ نحوهٔ تولید، کاربرد و آشکارسازی نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد؛ مثلاً، نور که گسترهٔ کوچکی از این طیف است، مستقیماً بر شبکیهٔ چشم اثر می‌کند و از این طریق آشکار می‌شود اما آشکارسازی موج‌های رادیویی توسط وسیله‌های الکترونیکی خاصی مانند رادیو، تلویزیون و ... صورت می‌گیرد.

شکل ۶ـ۹ گسترهٔ (طیف) موج‌های الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. این موج‌ها، طیف پیوسته‌ای را تشکیل می‌دهند. با وجود تفاوت بسیار زیاد در بسامد، نحوهٔ تولید و آشکارسازی آنها، ماهیت و قانون‌های حاکم بر همهٔ آنها یکسان است.




شکل ۶ـ۹ـ طیف موج‌های الکترومغناطیسی

## جدول ۶ــ۱ــ نحوهٔ تولید، آشکارسازی و کاربرد طیف موج‌های الکترومغناطیسی

| نام و حدود طول موج | چشمه | وسایل آشکارسازی | بعضی از ویژگی‌های خاص و کاربرد |
|---|---|---|---|
| پرتو گاما ($\gamma$)<br>$1pm = 10^{-12}m$ | هستهٔ مواد رادیواکتیو و پرتوهای کیهانی | شمارش‌گر گایگرــ مولر و فیلم عکاسی | فوتون‌های با انرژی بسیار بالا و با قدرت نفوذ بسیار زیاد، خیلی خطرناک<br>کاربرد : بافت‌های سرطانی را ازبین می‌برد، برای پیداکردن ترک در فلزات، برای ضدعفونی‌کردن تجهیزات و وسایل |
| پرتوی ایکس (X)<br>$100pm = 10^{-10}m$ | لامپ پرتو X | فیلم عکاسی و صفحهٔ فلوئورسان | فوتون‌های بسیار پرانرژی و با قدرت نفوذ زیاد، خیلی خطرناک<br>کاربرد : استفاده در پرتونگاری، استفاده در مطالعهٔ ساختار بلورها، معالجهٔ بیماری‌های پوستی، استفاده در پرتودرمانی |
| فرابنفش (UV)<br>$10nm = 10^{-8}m$ | خورشید، جسم‌های خیلی داغ، جرقهٔ الکتریکی، لامپ بخار جیوه | فیلم عکاسی، فوتوسل | ویژگی‌ها : توسط شیشه جذب می‌شود، سبب بسیاری از واکنش‌های شیمیایی می‌شود، یاخته‌های زنده را از بین می‌برد.<br>کاربرد : لامپ‌های UV در پزشکی |
| نور مرئی<br>$0/6\mu m = 6 \times 10^{-7}m$<br>(سبز) | خورشید، جسم‌های داغ، لیزرها | چشم، فیلم عکاسی، فوتوسل | ویژگی‌ها : در دیدن اجسام نقش اساسی دارد، برای رشد گیاهان و عمل فتوسنتز نقش حیاتی دارد.<br>کاربرد : در سیستم‌های مخابراتی (لیزر و تارهای نوری) مورد استفاده قرار می‌گیرد. |
| فروسرخ (IR)<br>$100\mu m = 10^{-4}m$ | خورشید، جسم‌های گرم و داغ | فیلم‌های مخصوص عکاسی | ویژگی :هنگامی که جذب می‌شود، پوست را گرم می‌کند.<br>کاربرد : برای گرم‌کردن، برای فیلم‌برداری و عکاسی در مه و تاریکی، عکاسی IR توسط ماهواره‌ها |
| رادیویی<br>3m (VHF) | اجاق‌های مایکروویو، آنتن‌های رادیویی و تلویزیونی | رادیو و تلویزیون | کاربرد : در آشپزی، رادیو، تلویزیون، مخابرات ماهواره‌ای و در رادارها برای آشکارسازی هواپیما، موشک و کشتی |

**پرسش ۶ـ۲**

با استفاده از شکل ۶ـ۹ موج‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی را به ترتیب افزایش طول موج، نام ببرید.

در شکل ۶ـ۹ 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 $۱۰^{-۱۳}$ متر است و بر عکس بلندترین طول موج مربوط به موج‌های رادیویی است که در حدود $۱۰^{۵}$ متر است.

**مثال ۶ـ۱**

محدودهٔ طول موج، امواج الکترومغناطیسی مرئی از ۰/۴ میکرون ($۱۰^{-۶}m$ = ۱ میکرون) مربوط به طول موج بنفش تا ۰/۷ میکرون مربوط به طول موج نور قرمز است. محدودهٔ بسامد نور مرئی را به‌دست آورید.

**پاسخ**

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

$$f_{\text{بنفش}} = \frac{c}{\lambda_{\text{بنفش}}} = \frac{۳ \times ۱۰^{۸}}{۴ \times ۱۰^{-۷}} = ۷/۵ \times ۱۰^{۱۴}\,Hz$$

$$f_{\text{قرمز}} = \frac{c}{\lambda_{\text{قرمز}}} = \frac{۳ \times ۱۰^{۸}}{۷ \times ۱۰^{-۷}} \simeq ۴/۳ \times ۱۰^{۱۴}\,Hz$$

یعنی گسترهٔ بسامد نور مرئی بین $۴/۳ \times ۱۰^{۱۴}Hz$ تا $۷/۵ \times ۱۰^{۱۴}Hz$ است.

**فعالیت ۶ـ۱**

جمله‌های زیر را کامل کنید.

۱ــ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یکدیگر ...

۲ــ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هر دو بر ..... عمودند. بنابراین موج‌های الکترومغناطیسی از نوع موج‌های .....

۳ــ نوسان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با یکدیگر .....

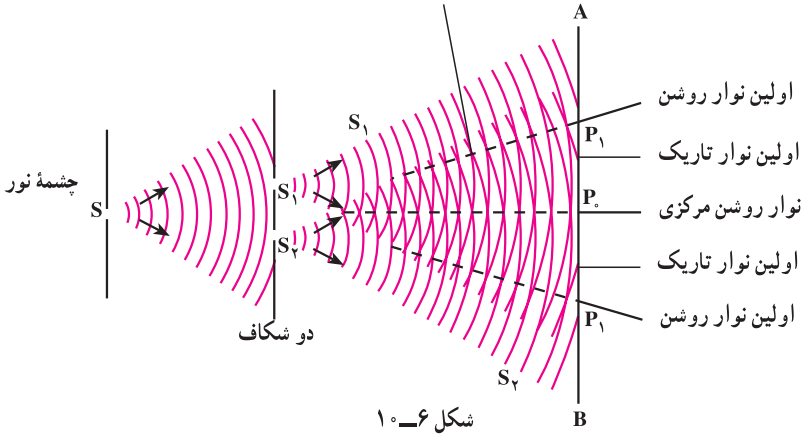
۴ــ موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار نیاز به ..... و انرژی را از محلی به محل دیگر منتقل می‌کنند.

۵ــ همهٔ موج‌های الکترومغناطیسی با سرعت ..... منتشر می‌شوند.

## ۶ــ۴ــ تداخل موج‌های نوری

در فصل نوسان و موج با تداخل موج‌های مکانیکی آشنا شدیم و در آن‌جا دیدیم که اگر دو سوزن که به فاصلهٔ نزدیکی از هم قرار دارند با بسامد معیّنی بر سطح آب درون یک ظرف همزمان ضربه بزنند، موج‌هایی در سطح آب به‌وجود 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 ۶ــ۱۰ 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 $S_1$ و $S_2$ 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.




شکل ۶ــ۱۰

دو موجی که به نقطهٔ $P_0$ روی محور تقارن دو شکاف می‌رسند، هم‌فازاند زیرا آنها دو راه مساوی $S_1P_0$ و $S_2P_0$ را تا پرده پیموده‌اند. تداخل این دو موج سازنده است و درنتیجه در محل $P_0$ روی پرده یک نوار روشن تشکیل می‌شود. این نوار روشن را نوار روشن مرکزی می‌نامیم. برای اینکه ببینیم در چه شرایطی نوار روشن و در چه شرایطی نوار تاریک تشکیل می‌شود نقطهٔ P را در شکل ۶ــ۱۱ 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.

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

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

$$\Delta\varphi = \pm 2n\pi,\ n = 0,1,\ldots \qquad (۶ــ۲)$$

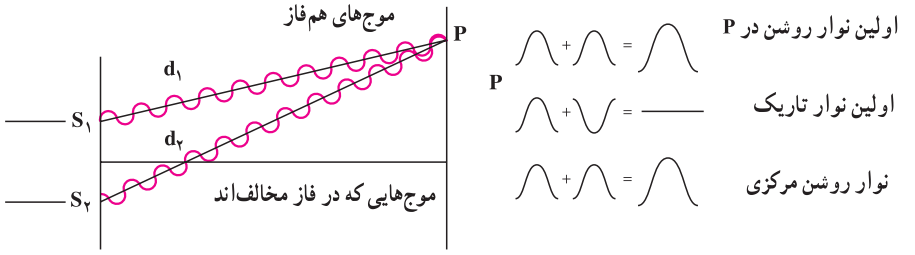
یا :

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

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

در این صورت دو پرتویی که به پرده می‌رسند هم‌فازند و تداخل سازنده ایجاد می‌شود و در این نقطه‌ها نوار روشن تشکیل می‌شود. در رابطهٔ ۶ــ۲ 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 $n = 2,3,\ldots$ به‌دست آورد.




شکل ۶ــ۱۱

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

$$\Delta\varphi = \pm(2m-1)\pi \quad , \quad m = 1,2,\ldots \qquad (۶ــ۳)$$

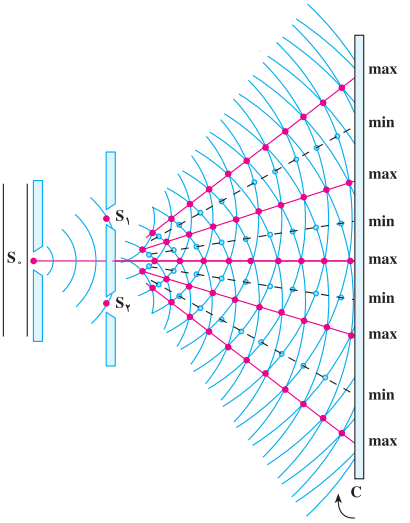
یا :

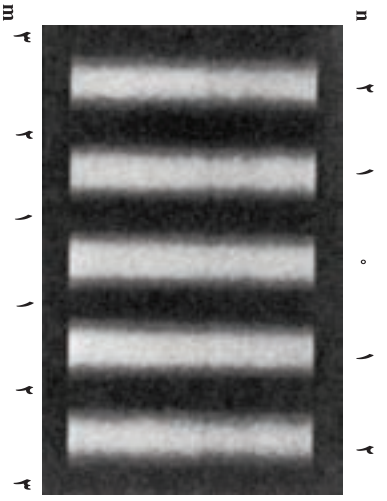
$$\frac{2\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) = \pm(2m-1)\pi$$

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

در این صورت دو موجی که به پرده می‌رسند در فاز مخالف هم خواهند بود و تداخل ویرانگر صورت می‌گیرد و درنتیجه در این نقاط نوار تاریک خواهیم داشت. در رابطهٔ ۶ــ۳، $m = 1$ مربوط به اولین نوار تاریک است که در دو طرف نوار روشن مرکزی قرار می‌گیرد. این نوار تاریک میان نوار روشن مرکزی و اولین نوار روشن قرار دارد.

نوارهای روشن و تاریک را که روی پرده تشکیل می‌شوند، طرح تداخلی می‌نامند. شکل ۶ــ۱۲ طرح تداخلی دو شکاف یانگ را نشان می‌دهد. در دو طرف شکل، شمارهٔ نوارهای روشن که با مقادیر مختلف n و شمارهٔ نوارهای تاریک که با مقادیر مختلف m داده می‌شوند نیز آمده است.



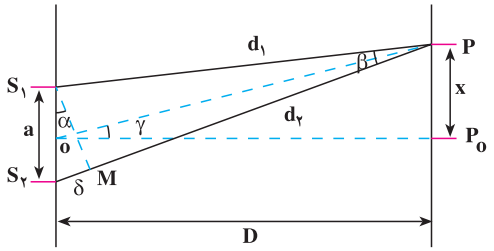




شکل ۶ــ۱۲

**تمرین ۷ـ۱**

نشان دهید اختلاف راه برای مکان‌هایی که نوار تداخلی روشن داریم، مضرب زوجی از نصف طول موج، $\delta = ۲n\frac{\lambda}{۲}$ ، و برای مکان‌هایی که نوار تاریک داریم، مضرب فردی از نصف طول موج، $\delta = (۲m-۱)\frac{\lambda}{۲}$ ، است

**اندازه‌گیری طول موج :** با استفاده از آزمایش یانگ می‌توان طول موج نور را اندازه‌گیری کرد. در شکل ۶ـ۱۳ طرحی از این آزمایش رسم شده است. در این شکل، فاصلهٔ دو شکاف از هم a و فاصلهٔ شکاف‌ها از پرده D است. فرض کنید نوار روشن nام در نقطهٔ P در فاصلهٔ x از نوار مرکزی روی پرده تشکیل شده است. دایره‌ای به مرکز P و به شعاع $PS_۱$ رسم می‌کنیم، دایره، $PS_۲$ را در نقطهٔ M قطع می‌کند. اختلاف راه نوری بین دو پرتو $PS_۲$ و $PS_۱$ برابر است با :



شکل ۶ـ۱۳

$$\delta = S_۲M = d_۲ - d_۱$$

اگر فاصلهٔ پرده از صفحهٔ دو شکاف بسیار بزرگتر از فاصلهٔ دو شکاف، یعنی $D >> a$ باشد، زاویهٔ $\gamma$ و نیز زاویهٔ $\beta$ (بین پرتوهایی که به P می‌رسند) بسیار کوچک خواهند بود و می‌توان $S_۱M$ را عمود بر $S_۲P$ و OP در نظر گرفت. در این صورت، زاویه‌های $\alpha$ و $\gamma$ با یکدیگر برابرند، درنتیجه :

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

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

چون زاویهٔ $\alpha$ کوچک است :

بنابراین :

$$\frac{x}{D} = \frac{\delta}{a} \qquad (۶ـ۴)$$

برای نوار روشن nام :

$$\frac{x}{D} = \frac{n\lambda}{a} \qquad (۶ـ۵)$$

که از آن رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\lambda = \frac{xa}{nD} \qquad (۶_۶)$$

با اندازه‌گیری، فاصلهٔ نوار روشن از نوار مرکزی می‌توان طول موج را اندازه گرفت.

**پرسش ۶ـ۳**

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

**مثال ۶ـ۲**

آزمایش یانگ را با نور زرد سدیم انجام داده‌ایم. فاصلهٔ دو شکاف یانگ از یکدیگر $a = ۱/۲mm$ و فاصلهٔ شکاف تا پرده $۱/۲m$ است؛ اگر فاصلهٔ نوار روشن بیستم از وسط نوار مرکزی $۱۱/۸mm$ باشد، طول موج نور زرد سدیم چند متر است؟

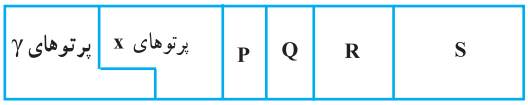
**پاسخ**

با استفاده از رابطهٔ ۶ـ۶ داریم :

$$\lambda = \frac{a}{n}\frac{x}{D} = \frac{۱/۲\times۱۰^{-۳}\times۱۱/۸\times۱۰^{-۳}}{۲۰\times۱/۲} \simeq ۵/۹\times۱۰^{-۷}\,m$$

$$= ۰/۵۹\mu m$$

۱ــ شکل ۶ــ۱۴ طیف موج‌های الکترومغناطیسی را با یک مقیاس تقریبی نشان می‌دهد.




شکل ۶ــ۱۴

الف) نام قسمت‌هایی از طیف را که تنها با حروف علامت‌گذاری شده‌اند، بنویسید.

ب) اگر در طول طیف از چپ به راست (از پرتوهای γ به طرف S) حرکت کنیم، چه خاصیتی از پرتوها افزایش، کاهش و یا ثابت می‌ماند؟

۲ــ چهار وجه اشتراک و دو تفاوت برای نور فروسرخ و امواج رادیویی بیان کنید.

۳ــ الف) از یک ایستگاه رادیویی موج الکترومغناطیسی به طول موج ۷۵m گسیل می‌شود. بسامد این موج را حساب کنید.

ب) موج‌های رادیویی با بسامد ۱۲MHz چه طول موجی دارند؟

۴ــ الف) طول موج نور نارنجی $۶/۴۲ \times ۱۰^{-۷}m$ است، بسامد این نور چند هرتز است؟

ب) بسامد نور قرمز در حدود $۴/۲۸ \times ۱۰^{۱۴}Hz$ است، طول موج این نور در هوا و آب را حساب کنید. (سرعت نور را در هوا $۳ \times ۱۰^{۸}m/s$ و در آب را $۲/۲۵ \times ۱۰^{۸}m/s$ فرض کنید.)

۵ــ گسترهٔ طول موج‌های رادیویی زیر را به‌دست آورید.

الف) باند AM در گسترهٔ بسامدی ۵۴۰ تا ۱۶۰۰ کیلوهرتز

ب) باند FM در گسترهٔ بسامدی ۸۸ تا ۱۰۸ مگاهرتز

۶ــ آزمایش یانگ را با نور تک‌رنگ سبز انجام داده و نوارهای تداخلی بر روی پردهٔ موازی با سطح شکاف‌ها تشکیل داده‌ایم. برای این‌که فاصلهٔ 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) فاصلهٔ پرده از شکاف‌ها را زیاد کنیم.

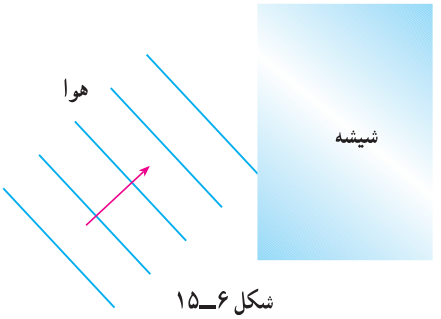
۴) فاصلهٔ دو شکاف را از هم کم کنیم.

۷ــ اگر آزمایش یانگ عیناً در آب انجام گیرد چه تغییری در وضعیت نوارها نسبت به هوا حاصل می‌شود؟ توضیح دهید.

۸ــ یک صافی مقابل چراغ جیوه قرار می‌دهیم، به‌طوری که تمام طول موج‌ها به جز ناحیهٔ سبز آن جذب می‌شود. با این نور سبز، طرح تداخلی آزمایش یانگ را به فاصلهٔ دو شکاف $a = ۰/۶mm$ روی پرده‌ای به فاصله $D = ۲/۵m$ از دو شکاف تشکیل می‌دهیم؛ اگر فاصلهٔ دو نوار روشن پهلوی هم $۲/۲۷mm$ باشد، طول موج نور سبز را حساب کنید.

۹ــ در آزمایش دو شکاف یانگ، فاصلهٔ دو شکاف $۰/۴mm$ و فاصلهٔ پرده تا دو شکاف $۸۰cm$ است؛ اگر طول موج نور $۰/۶\mu m$ باشد فاصلهٔ نوار دهم روشن از نوار مرکزی راحساب‌کنید.

۱۰ــ در شکل ۶ــ۱۵ موج‌های نور فرودی از هوا وارد شیشه می‌شوند. بعضی از آنها در سطح جدایی دو محیط بازتابیده و بعضی شکسته شده وارد شیشه می‌شوند. با استدلال توضیح دهید کدام‌یک از کمیت‌های زیر برای موج‌های بازتابیده و موج‌های شکسته شده یکسان است؟



شکل ۶ــ۱۵

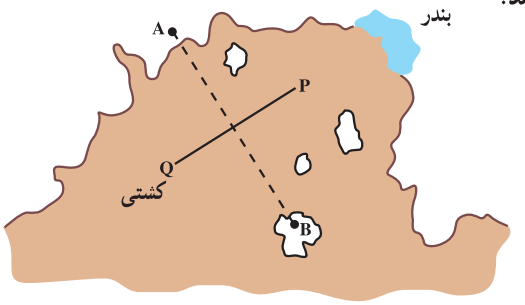
الف) سرعت ب) طول موج
پ) امتداد ت) شدت نور
ث) بسامد

۱۱ــ در شکل ۶ــ۱۶ یک خط ساحلی با دو ایستگاه رادیویی دریانوردی زمینی A و B دیده می‌شود که در فاصلهٔ زیادی از هم قرار گرفته‌اند. هر دو ایستگاه پیوسته سیگنال‌های رادیویی هم‌فاز گسیل می‌کنند که بسامد آنها $۱/۵MHz$ است.

الف) طول موج این سیگنال‌ها چند متر است؟

ب) یک کشتی از مسیر QP به‌سوی بندر در حرکت است. هنگامی که این کشتی به نقطه‌ای درست در وسط خط فرضی AB می‌رسد، سیگنالی دریافت می‌کند که دامنهٔ آن درست دو برابر دامنهٔ هر موجی است که از یک ایستگاه به‌تنهایی دریافت می‌کرد. این مشاهده چه موضوعی را دربارهٔ سیگنال‌های گسیل شده از A و B نشان می‌دهد؟

پ) توضیح دهید در شرایط هوای مه‌آلود چگونه می‌توان از این سیگنال‌های رادیویی برای ادامهٔ مسیر استفاده کرد؟



شکل ۶ــ۱۶