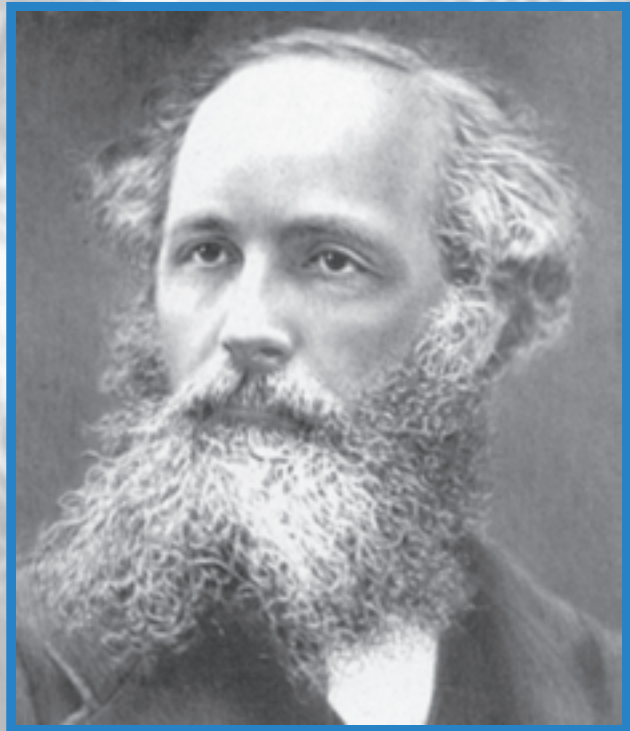


۶

موج‌های الکترو مغناطیسی



جیمز کلارک ماکسول

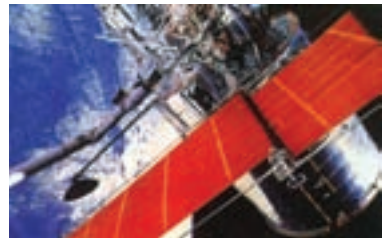
(۱۸۷۹-۱۸۳۱م)

موج های الکترو مغناطیسی

نگاهی به فصل: آیا می دانید انرژی حیاتی مورد نیاز گیاهان، جانوران، انسان و ... از چه

طریق و چگونه به زمین می رسد؟

آیا می دانید رادیو، تلویزیون، تلفن، بی سیم، ماهواره ها و ... بر چه اساسی کار می کنند؟



شکل ۱-۲

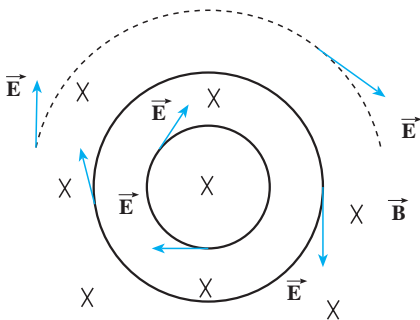
هر موجود زنده ای در زمین به انرژی خورشید نیاز دارد، به طوری که بدون انرژی خورشید حیات روی کره ی زمین از بین می رود. این انرژی از طریق موج های الکترومغناطیسی به زمین می رسد و در تمام ارتباطات راه دور این موج ها به کار گرفته می شوند. با استفاده از سرعت بالای این امواج می توان خبر رخ دادن هر حادثه را کم تر از چند دهم ثانیه به هر نقطه از زمین رساند. مایکل فارادی دانشمند انگلیسی (۱۸۶۷-۱۷۹۱ میلادی) و جیمز کلارک ماکسول فیزیک دان اسکاتلندی (۱۸۷۹-۱۸۳۱ میلادی) نقش عمده ای در کشف پدیده های الکترومغناطیسی و مطالعه بر روی آن ها 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 محرکه ای را در مدار ایجاد می کند که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار متناسب است؛

مثلاً اگر در شکل ۲-۲ میدان مغناطیسی \vec{B} تغییر کند، در اثر تغییر شار یک نیروی محرکه در مدار القا می شود.

در واقع و به طور عمیق تر می توان گفت که در اثر تغییر میدان مغناطیسی یک میدان الکتریکی القایی در فضا ایجاد می شود که خط های آن در این شکل نشان داده شده اند این



شکل ۲-۲

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 محرکه‌ی 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، هانزی و فارادی مبانی علم الکتروسیسته و مغناطیس را تدوین کرد و وجود موج‌های الکترومغناطیسی و انتشار آن‌ها در فضا را پیش‌بینی کرد. بعدها هرترز فیزیک‌دان آلمانی (۱۸۹۴-۱۸۵۷ میلادی) وجود این موج‌ها را به‌طور تجربی نشان داد.

۲-۱- چگونگی تشکیل موج‌های الکترومغناطیس

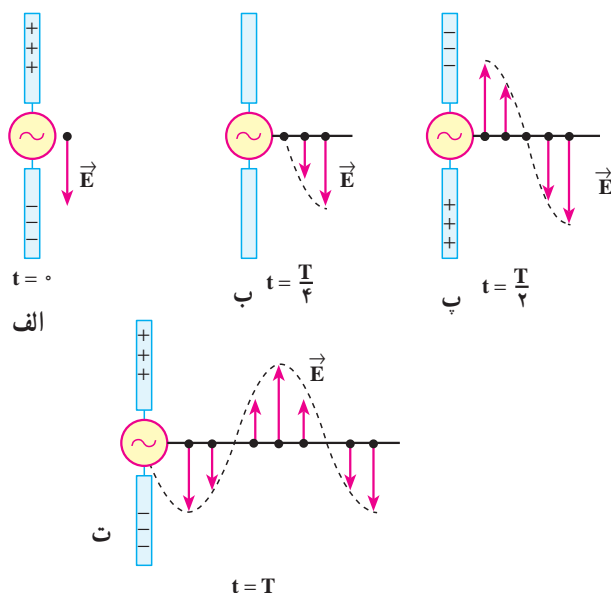
موج‌های الکترومغناطیس از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده‌اند. عامل اصلی ایجاد موج‌های الکترومغناطیسی، ذرات باردار شتاب‌دارند؛ یعنی، وقتی ذره‌ی بارداری شتاب‌دار می‌شود بخشی از انرژی خود را به‌صورت موج‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌کند، گسیل موج‌های الکترومغناطیسی توسط اجسام را تابش می‌نامند.

مطالعه‌ی آزاد

چگونگی 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 چشمه‌ی موج‌های الکترومغناطیس در ایستگاه‌های رادیویی، مخابراتی و ... استفاده می‌شود. شکل ۲-۳ نحوه‌ی تولید یک موج الکترومغناطیس را در یک آنتن نشان می‌دهد. دو میله‌ی فلزی به یک مولد متناوب (ac) متصل شده‌اند. چون ولتاژ خروجی این مولد به صورت سینوسی است، بار روی میله‌ها دائماً تغییر می‌کند. در لحظه‌ی $t = 0$ بار روی میله‌ی بالایی بیشینه و مثبت و روی میله‌ی پایینی بیشینه و منفی است. سپس بار این میله‌ها کاهش می‌یابد و در لحظه‌ی $t = \frac{T}{4}$ به صفر می‌رسد (شکل ۲-۳ ب) در ادامه‌ی این حرکت، علامت بار میله‌ها معکوس می‌شود، یعنی بار میله‌ی بالایی منفی و

بار میله‌ی پایینی مثبت می‌شود و مقدار آن نیز افزایش می‌یابد تا در لحظه‌ی $t = \frac{T}{4}$ به یک مقدار بیشینه برسد (شکل ۲-۳-پ). تغییر بار میله‌ها به همین ترتیب ادامه می‌یابد. در زمان $t = 0$ بار مثبت در میله‌ی بالایی و بار منفی در میله‌ی پایینی بیشینه است (شکل ۲-۳-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 ۲-۳- میدان الکتریکی ناشی از نوسان بارهای الکتریکی در آنتن با سرعت نور از آنتن دور می‌شود.

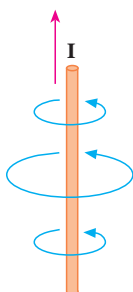
با کاهش بار روی میله‌ها، شدت میدان الکتریکی در نزدیکی میله‌ها، کاهش می‌یابد و میدان الکتریکی بیشینه‌ی رو به پایینی که در لحظه‌ی $t = 0$ تولید شده بود از میله دور می‌شود. هنگامی که بارهای مثبت و منفی روی میله‌ها صفر است (مانند شکل ۲-۳-ب) میدان الکتریکی نیز صفر است. این وضعیت $\frac{1}{4}$ دوره ($t = \frac{T}{4}$) بعد از شروع نوسان پیش می‌آید. با ادامه‌ی این عمل، میله‌ی بالایی، بعد از زمان $t = \frac{T}{4}$ ، دارای بیش‌ترین مقدار بار منفی و میله‌ی پایینی دارای بیش‌ترین بار مثبت می‌شود. در

این حالت میدان الکتریکی ایجاد شده رو به بالاست (شکل ۲-۳-پ) و با ادامه یافتن نوسان بار الکتریکی روی میله‌ها میدان الکتریکی مطابق شکل ۲-۳-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 میله‌ی بالایی مثبت است رو به پایین و وقتی میله‌ی بالایی منفی است، رو به بالاست و اندازه‌ی میدان در هر لحظه به مقدار بار روی میله در آن لحظه بستگی دارد.

با ادامه‌ی نوسان بارهای الکتریکی روی میله‌ها، میدان‌های الکتریکی ایجاد شده با سرعت نور از آنتن دور می‌شوند. در شکل ۲-۳-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 اندازه‌ی 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

آنتن‌اند (شکل ۲-۴). این خط‌ها بر میدان الکتریکی تولید شده در هر نقطه عمودند. با عوض شدن جهت جریان، جهت میدان مغناطیسی نیز وارونه می‌شود و با تغییر جریان نسبت به زمان، میدان مغناطیسی نیز همانند میدان الکتریکی در اطراف آنتن تغییر می‌کند.

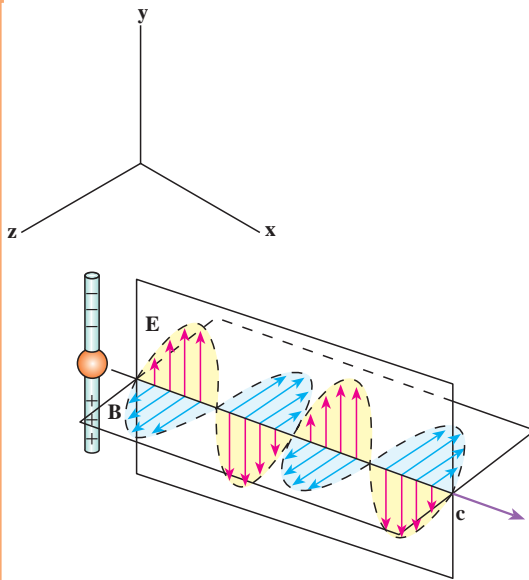


شکل ۲-۴- چگونگی تشکیل خطوط میدان مغناطیسی در اطراف یک آنتن که از آن جریان الکتریکی متغیر می‌گذرد.

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

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

ب: میدان الکتریکی متغیر با زمان - همان‌طور که ماکسول پیش‌بینی کرده بود -



شکل ۲-۵- 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.

میدان مغناطیسی ایجاد می کند. این میدان های الکتریکی و مغناطیسی القایی هم فازند؛ یعنی، در هر نقطه هر دو میدان هم زمان با هم پیشینه یا کمینه می شوند (شکل ۲-۵). علاوه بر این میدان های الکتریکی و مغناطیسی بر یک دیگر و هر دوی آنها بر راستای حرکت موج عمودند. در نتیجه ی این دو پدیده و مواردی که در بالا ذکر شد، یک موج الکترومغناطیسی ایجاد می شود که در فضا منتشر می شوند (شکل ۲-۵).

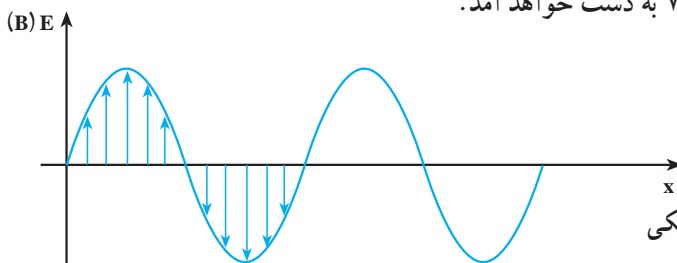
موج های الکترومغناطیسی نیز، مانند موج های مکانیکی، در زمان و مکان تغییر می کنند، با این تفاوت که در موج های مکانیکی ذره های تشکیل دهنده ی محیط نوسان می کنند و در موج های الکترومغناطیسی، میدان های الکتریکی و مغناطیسی در هر نقطه از فضا به طور نوسانی تغییر می کنند. همین موضوع سبب می شود که موج های الکترومغناطیسی برای انتشار خود، الزاماً به محیط مادی نیاز نداشته باشند و در خلأ نیز منتشر شوند.

برای بیان چگونگی انتشار موج های الکترومغناطیسی نیز می توانیم، همان طور که در مورد موج های مکانیکی انجام دادیم، از نمودارهای میدان های الکتریکی (و یا مغناطیسی) بر حسب مکان یا زمان استفاده کنیم. ابتدا تغییرات میدان الکتریکی را توصیف می کنیم.

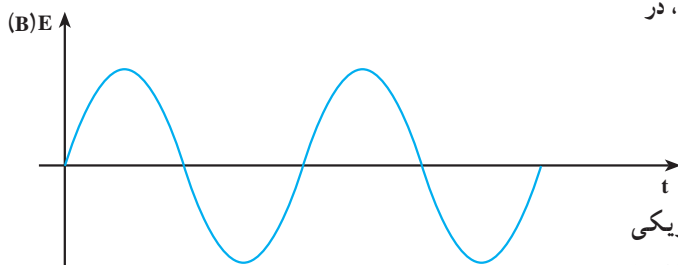
یک موج الکترومغناطیسی را در نظر می گیریم که در جهت محور x منتشر می شود. نمودار میدان الکتریکی بر حسب مکان این موج در شکل ۲-۶ رسم شده است. این نمودار، میدان الکتریکی را در تمام نقطه ها در امتداد محور x و در یک لحظه نشان می دهد. می بینید که در جهت محور x ، میدان الکتریکی افزایش می یابد تا به یک مقدار پیشینه برسد، سپس کاهش می یابد و صفر می شود 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 ۷-۲ 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 ۶-۲ و ۷-۲ به دست خواهد آمد.

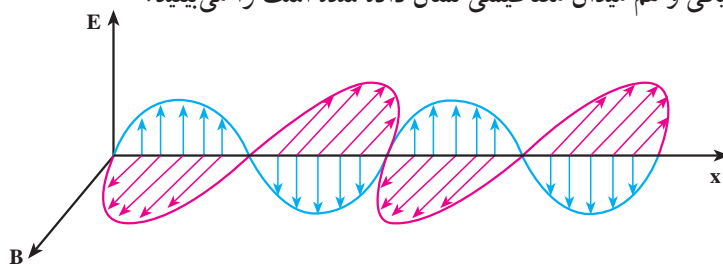


شکل ۶-۲- نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) برحسب مکان، یک موج الکترومغناطیسی در امتداد محور x ، در یک لحظه از زمان.



شکل ۷-۲- نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) برحسب زمان، یک موج الکترومغناطیسی در یک نقطه از محور x .

در شکل ۸-۲ نمودارهای میدان الکترومغناطیسی برحسب مکان که در آن هم میدان الکتریکی و هم میدان مغناطیسی نشان داده شده است را می‌بینید.



شکل ۸-۲- نمودار میدان الکترومغناطیسی برحسب 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 فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی متوالی از موج است که در آن دو نقطه میدان‌های الکتریکی (و یا مغناطیسی) هم‌فازند. سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی نیز، همچون موج‌های مکانیکی از رابطه‌ی $v = \lambda f$ به دست می‌آید.

پرسش ۱-۲

با توجه به شکل ۲-۵ توضیح دهید که موج‌های الکترومغناطیسی طولی‌اند یا عرضی؟

۲-۲- 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 «c» از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1-2)$$

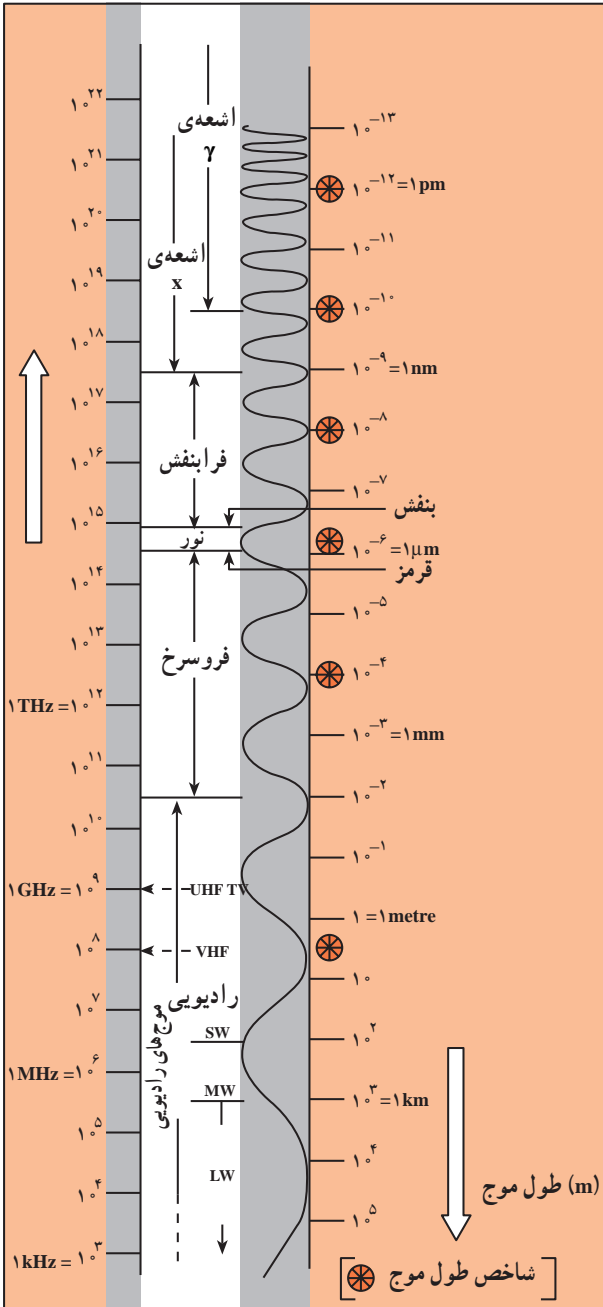
که در آن ϵ_0 ضریب گذردهی الکتریکی در خلأ و μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ است. از فیزیک ۳ و آزمایشگاه به یاد دارید که $C^2/N.m^2 = 1/8.85 \times 10^{-12}$ و $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} C^2/N.m^2$ و $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} T.m/A$ است. با قرار دادن مقادیر بالا در رابطه‌ی ۱-۲ سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی 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.

۲-۳- طیف موج‌های الکترومغناطیسی

موج‌های الکترومغناطیسی طیف گسترده‌ای از نظر بسامد (و طول موج) دارند. به نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی، نام‌هایی از قبیل: موج‌های رادیویی، نوری، تابش گرمایی، فرابنفش، X ، γ و ... اتلاق می‌شود. در هریک از این ناحیه‌ها تابش به طریق خاصی تولید و آشکار می‌شود. جدول



۲-۱ نحوه‌ی تولید، کاربرد و آشکارسازی نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد؛ مثلاً، نور که گستره‌ی کوچکی از این طیف است، مستقیماً بر شبکیه‌ی چشم اثر می‌کند و از این طریق آشکار می‌شود اما آشکارسازی موج‌های رادیویی توسط وسیله‌های الکترونیکی خاصی مانند رادیو، تلویزیون و ... صورت می‌گیرد.

شکل ۲-۹ گستره‌ی (طیف) موج‌های الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. این موج‌ها، طیف پیوسته‌ای را تشکیل می‌دهند. با وجود تفاوت بسیار زیاد در بسامد، نحوه‌ی تولید و آشکارسازی آن‌ها، ماهیت و قانون‌های حاکم بر همه‌ی آن‌ها یکسان است.

شکل ۲-۹- طیف موج‌های الکترومغناطیسی

جدول ۱-۲- نحوه‌ی تولید، آشکارسازی و کاربرد طیف موج‌های الکترومغناطیسی

نام و حدود طول موج	چشمه	وسایل آشکارسازی	بعضی از ویژگی‌های خاص و کاربرد
پرتو گاما (γ) $1\text{Pm} = 10^{-12}\text{ m}$	هسته‌ی مواد رادیواکتیو و پرتوهای کیهانی	شمارش گر گایگر- مولر و فیلم عکاسی	فوتون‌های با انرژی بسیار بالا و با قدرت نفوذ بسیار زیاد، خیلی خطرناک کاربرد: بافت‌های سرطانی را از بین می‌برد، برای پیدا کردن ترک در فلزات، برای ضد عفونی کردن تجهیزات و وسایل
پرتوی ایکس (X) $100\text{Pm} = 10^{-10}\text{ m}$	لامپ پرتو X	فیلم عکاسی و صفحه‌ی فلوروسان	فوتون‌های بسیار پر انرژی و با قدرت نفوذ زیاد، خیلی خطرناک کاربرد: استفاده در پرتو نگاری، استفاده در مطالعه‌ی ساختار بلورها، معالجه‌ی بیماری‌های پوستی، استفاده در پرتودرمانی
فرا بنفش (uv) $10\text{ nm} = 10^{-8}\text{ m}$	خورشید، جسم‌های خیلی داغ، جرقه‌ی الکتریکی، لامپ بخار جیوه	فیلم عکاسی، فوتوسل	ویژگی‌ها: توسط نیشنه جذب می‌شود، سبب بسیاری از واکنش‌های شیمیایی می‌شود، باخنه‌های زنده را از بین می‌برد. کاربرد: لامپ‌های uv در پزشکی
نور مرئی $600\text{ nm} = 6 \times 10^{-7}\text{ m}$ (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. کاربرد: در سیستم‌های مخابراتی (لیزر و تارهای نوری) مورد استفاده قرار می‌گیرد.
فروسرخ (IR) $100\text{ }\mu\text{m} = 10^{-4}\text{ m}$	خورشید، جسم‌های گرم و داغ	فیلم‌های مخصوص عکاسی	ویژگی: هنگامی که جذب می‌شود، پوست را گرم می‌کند. کاربرد: برای گرم کردن، برای فیلم برداری و عکاسی در مه و تاریکی، عکاسی توسط ماهواره‌ها
رادیویی 3 m (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 ۲-۲

با استفاده از شکل ۹-۲ موج‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی را به ترتیب افزایش طول موج، نام ببرید.

در شکل ۹-۲ 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 ۱-۲

محدوده‌ی طول موج، امواج الکترومغناطیسی مرئی از 400 میکرون ($4 \times 10^{-7} \text{ m}$) تا 700 میکرون ($7 \times 10^{-7} \text{ m}$) مربوط به طول موج بنفش تا 700 میکرون مربوط به طول موج قرمز است. محدوده‌ی بسامد نور مرئی را به دست آورید.

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی $c = \lambda f$ 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 گستره‌ی بسامد نور مرئی بین $4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$ تا $7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ است.

فعالیت ۱-۲

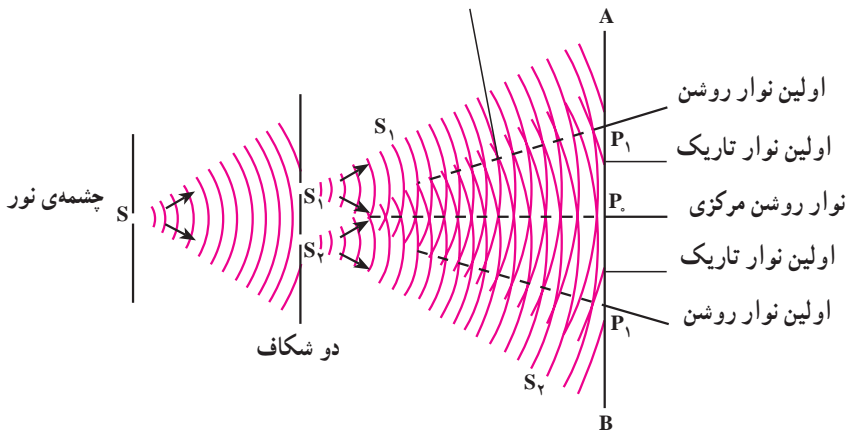
جمله‌های زیر را کامل کنید.

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

۲-۴- تداخل موج‌های نوری

در فصل نوسان و موج با تداخل موج‌های مکانیکی آشنا شدیم و در آن‌جا دیدیم که اگر دو سوزن که به فاصله‌ی 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 همه‌ی 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 پدیده‌ی تداخل در نور هم مشاهده می‌شود.

شکل ۲-۱۰ طرح آزمایش یانگ را نشان می‌دهد. در پشت شکاف باریک S یک چشمه‌ی نور تک‌رنگ (لامپ روشن) قرار می‌دهیم. این شکاف خود مانند یک چشمه‌ی نور عمل می‌کند. در فاصله‌ی 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 چشمه‌ی هم‌بسامد، هم‌دامنه و هم‌فاز عمل می‌کنند و نور را در جهت‌های مختلف گسیل می‌کنند. نورهای گسیل شده از دو چشمه‌ی S_1 و S_2 با یک‌دیگر تداخل کرده و نوارهای تداخلی روشن و تاریک را بر روی پرده‌ی AB که در مقابل شکاف‌ها قرار دارد تشکیل می‌دهند.



شکل ۲-۱۰

دو موجی که به نقطه‌ی P_0 روی محور تقارن دو شکاف می‌رسند، هم‌فازند زیرا آن‌ها دو راه مساوی S_1P_0 و S_2P_0 را تا پرده پیموده‌اند. تداخل این دو موج سازنده است و در نتیجه در محل P_0 روی پرده یک نوار روشن تشکیل می‌شود. این نوار روشن را نوار روشن مرکزی می‌نامیم. برای این که ببینیم در چه شرایطی نوار روشن و در چه شرایطی نوار تاریک تشکیل می‌شود نقطه‌ی P را در شکل ۲-۱۱ 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 π باشد؛ یعنی

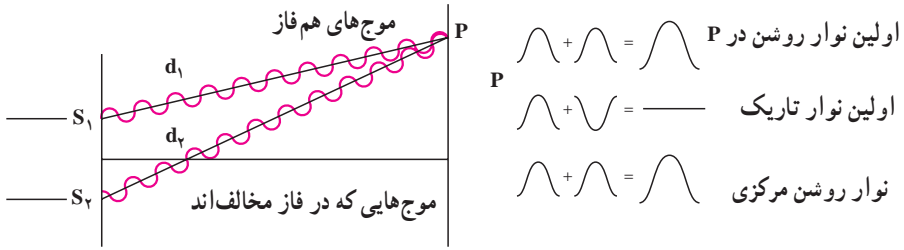
$$\Delta\phi = \pm 2n\pi, \quad n = 0, 1, \dots \quad (2-2)$$

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

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

در این صورت دو پرتویی که به پرده می‌رسند هم‌فازند و تداخل سازنده ایجاد می‌شود و در این نقطه‌ها نوار روشن تشکیل می‌شود. در رابطه‌ی ۲-۲ 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 2π 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 ۱۱-۲

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

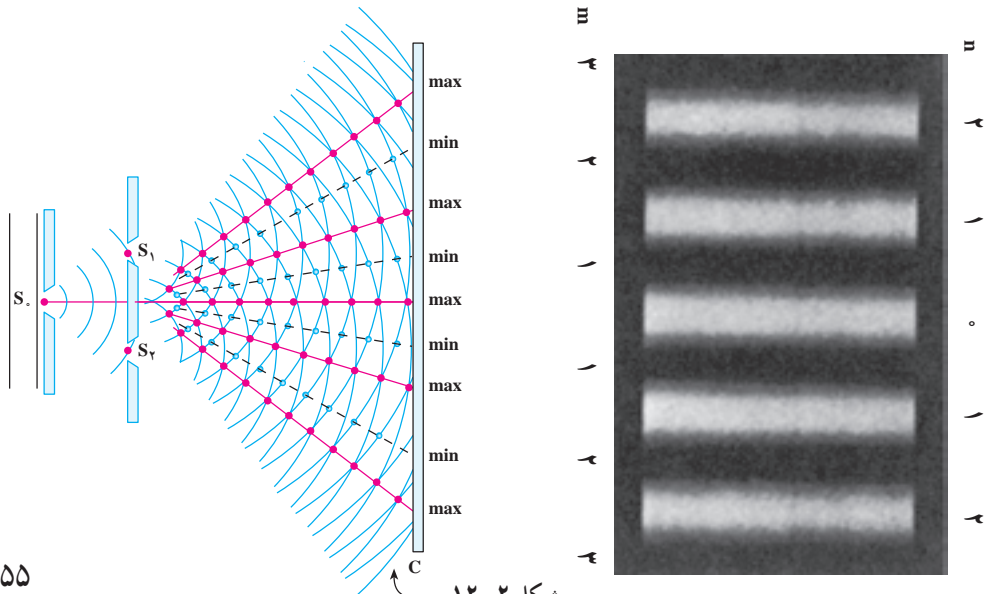
$$\Delta\phi = \pm(2m-1)\pi, \quad m=1,2,\dots \quad (3-2)$$

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

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

در این صورت دو موجی که به پرده می‌رسند در فاز مخالف هم خواهند بود و تداخل ویرانگر صورت می‌گیرد و در نتیجه در این نقاط نوار تاریک خواهیم داشت. در رابطه $m=1, 2, 3, \dots$ 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.

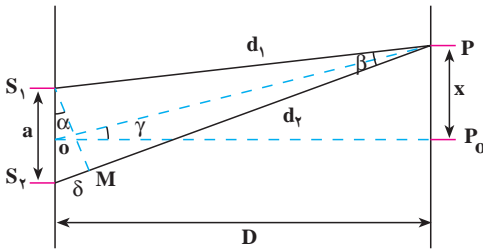
نوارهای روشن و تاریک را که روی پرده تشکیل می‌شوند، طرح تداخلی می‌نامند. شکل ۱۲-۲ طرح تداخلی دو شکاف یانگ را نشان می‌دهد. در دو طرف شکل، شماره‌ی نوارهای روشن که با مقادیر مختلف n و شماره‌ی نوارهای تاریک که با مقادیر مختلف m داده می‌شوند نیز آمده است.



شکل ۱۲-۲

تمرین ۱-۲

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



شکل ۱۳-۲

اندازه‌گیری طول موج: با استفاده

از آزمایش ینگ می‌توان طول موج نور را اندازه‌گیری کرد. در شکل ۱۳-۲ طرحی از این آزمایش رسم شده است. در این شکل، فاصله‌ی دو شکاف از هم a و فاصله‌ی شکاف‌ها از پرده D است. فرض کنید نوار روشن m ام در نقطه‌ی P در فاصله‌ی 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 نقطه‌ی 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 فاصله‌ی پرده از صفحه‌ی دو شکاف بسیار بزرگ‌تر از فاصله‌ی دو شکاف، یعنی $D > a$ باشد، زاویه‌ی γ و نیز زاویه‌ی β (بین پرتوهایی که به P می‌رسند) بسیار کوچک خواهند بود و می‌توان S_2M را عمود بر S_2P و OP در نظر گرفت. در این صورت، زاویه‌های α و γ با یک‌دیگر برابرند، در نتیجه:

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

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

چون زاویه‌ی α کوچک است:

بنابراین:

$$\frac{x}{D} = \frac{\delta}{a}$$

(۴-۲)

برای نور روشن $n\lambda$ م :

$$\frac{x}{D} = \frac{n\lambda}{a} \quad (۵-۲)$$

که از آن رابطه‌ی زیر به دست می‌آید :

$$\lambda = \frac{xa}{nD} \quad (۶-۲)$$

با اندازه‌گیری، فاصله‌ی نور روشن از نور مرکزی می‌توان طول موج را اندازه گرفت.

پرسش ۳-۲

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

مثال ۲-۲

آزمایش ینگ را با نور زرد سدیم انجام داده‌ایم. فاصله‌ی دو شکاف ینگ از یک دیگر $a = ۱/۲ \text{ mm}$ و فاصله‌ی شکاف تا پرده $۱/۲ \text{ m}$ است؛ اگر فاصله‌ی نور روشن بیستم از وسط نور مرکزی $۱۱/۸ \text{ mm}$ باشد، طول موج نور زرد سدیم چند متر است؟

پاسخ

با استفاده از رابطه‌ی ۶-۲ داریم :

$$\lambda = \frac{a x}{n D} = \frac{۱/۲ \times ۱۰^{-۳} \times ۱۱/۸ \times ۱۰^{-۳}}{۲۰ \times ۱/۲} \approx ۵/۹ \times ۱۰^{-۷} \text{ m} \\ = ۰/۵۹ \mu\text{m}$$

تمرین‌های فصل دوم

۱- شکل ۱۴-۲ طیف موج‌های الکترومغناطیسی را با یک مقیاس تقریبی نشان می‌دهد.

پرتوهای γ	پرتوهای x	P	Q	R	S
------------------	-----------	---	---	---	---

شکل ۱۴-۲

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؟

۲- چهار وجه اشتراک و دو تفاوت برای نور فرورسرخ و امواج رادیویی بیان کنید.
۳- دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آن‌ها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. آزمایش یانگ چگونه می‌تواند ما را قادر سازد تا بین این دو نظر یکی را انتخاب کنیم؟

۴- الف: از یک ایستگاه رادیویی موج الکترومغناطیسی به طول موج 75m گسیل می‌شود. بسامد این موج را حساب کنید.

ب: موج‌های رادیویی با بسامد 12MHz چه طول موجی دارند؟

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

الف: باند AM در گستره‌ی بسامدی 540 تا 1600 کیلوهرتز

ب: باند FM در گستره‌ی بسامدی 88 تا 108 مگاهرتز

۷- آزمایش یانگ را با نور تک‌رنگ سبز انجام داده و نوارهای تداخلی بر روی پرده‌ی موازی با سطح شکاف‌ها تشکیل داده‌ایم. برای این که فاصله‌ی 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) فاصله‌ی پرده از شکاف‌ها را زیاد کنیم.

(۴) فاصله‌ی دو شکاف را از هم کم کنیم.

۸- اگر آزمایش یانگ عیناً در آب انجام گیرد چه تغییری در وضعیت نوارها نسبت به هوا

حاصل می‌شود؟ توضیح دهید.

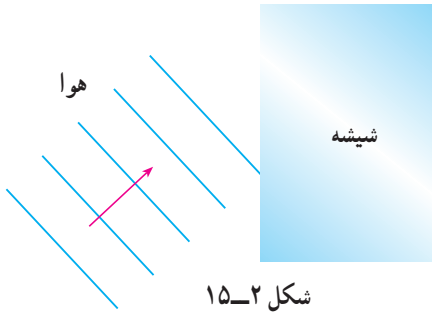
۹- یک صافی مقابل چراغ جیوه قرار می‌دهیم، به طوری که تمام طول موج‌ها به جز ناحیه‌ی

سبز آن جذب می‌شود. با این نور سبز، طرح تداخلی آزمایش یانگ را به فاصله‌ی دو شکاف

$a = 0/6\text{mm}$ روی پرده‌ای به فاصله $D = 2/5\text{m}$ از دو شکاف تشکیل می‌دهیم؛ اگر فاصله‌ی دو

نوار روشن پهلوی هم $2/27\text{mm}$ باشد، طول موج نور سبز را حساب کنید.
 ۱- در آزمایش دو شکاف یانگ، فاصله‌ی دو شکاف 4mm و فاصله‌ی پرده تا دو شکاف 80cm است؛ اگر طول موج نور $6\mu\text{m}$ باشد فاصله‌ی نوار دهم روشن از نوار مرکزی را حساب کنید.

۱۱- در شکل ۱۵-۲ 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 کدام یک از کمیت‌های زیر برای موج‌های بازتابیده و موج‌های شکسته شده یکسان است؟

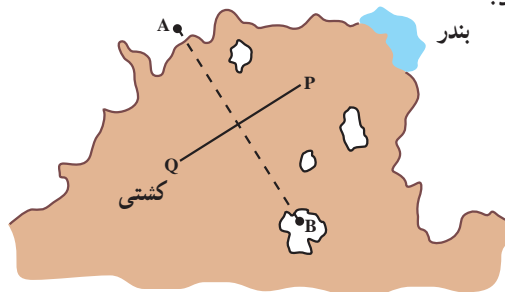
- الف : سرعت
 ب : طول موج
 پ : امتداد
 ت : شدت نور
 ث : بسامد

۱۲- در شکل ۱۶-۲ یک خط ساحلی با دو ایستگاه رادیویی دریانوردی زمینی A و B دیده می‌شود که در فاصله‌ی زیادی از هم قرار گرفته‌اند. هر دو ایستگاه پیوسته سیگنال‌های رادیویی گسیل می‌کنند که بسامد آن‌ها $1/5\text{ MHz}$ است.

الف : طول موج این سیگنال‌ها چند متر است؟

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

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



شکل ۱۶-۲