



موج های الکترو مغناطیسی

نگاهی به فصل: آیا می دانید انرژی حیاتی مورد نیاز گیاهان، جانوران، انسان و ... از چه طریق و چگونه به زمین می رسد؟

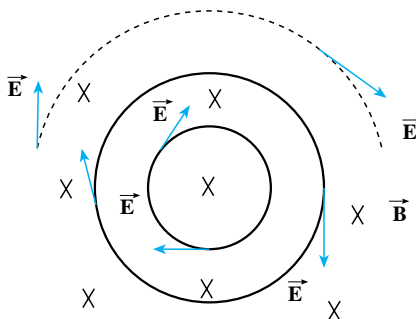
آیا می دانید رادیو، تلویزیون، تلفن، بی سیم، ماهواره ها و ... بر چه اساسی کار می کنند؟



شکل ۱-۶

هر موجود زنده ای در زمین به انرژی خورشید نیاز دارد، به طوری که بدون انرژی خورشید حیات روی کره زمین از بین می رود. این انرژی از طریق موج های الکترومغناطیسی به زمین می رسد و در تمام ارتباطات راه دور این موج ها به کار گرفته می شوند. با استفاده از سرعت بالای این امواج می توان خبر رخ دادن هر حادثه را کمتر از چند دهم ثانیه به هر نقطه از زمین رساند.

مایکل فارادی دانشمند انگلیسی (۱۸۶۷-۱۷۹۱ میلادی) و جیمز کلارک ماکسول فیزیک دان اسکاتلندی (۱۸۷۹-۱۸۳۱ میلادی) نقش عمده ای در کشف پدیده های الکترومغناطیسی و مطالعه بر روی آنها داشتند.



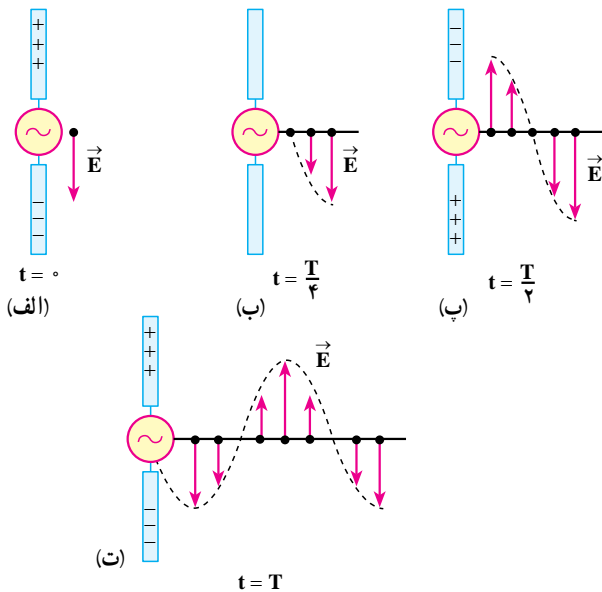
شکل ۲-۶

در فیزیک ۳ و آزمایشگاه با قانون فارادی آشنا شدیم و دیدیم که اگر شار مغناطیسی گذرنده از یک مدار بسته تغییر کند، نیروی محرکه ای را در مدار ایجاد می کند که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار متناسب است. مثلاً اگر در شکل ۲-۶ میدان مغناطیسی \vec{B} تغییر کند، 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 میدان حتی هنگامی که مدار نیز وجود ندارد ایجاد می شود یعنی میدان الکتریکی را تنها بارهای الکتریکی تولید نمی کنند، بلکه در اثر تغییر میدان مغناطیسی نیز به وجود می آید. در فیزیک ۳ و آزمایشگاه همچنین دیدیم، هنگامی که میدان الکتریکی داخل یک رسانا وجود دارد، در آن اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد می کند در نتیجه می توان گفت، «نیروی محرکه القایی از این میدان الکتریکی القایی حاصل می شود.» ماکسول پیش بینی کرد همان طور که در اثر تغییر میدان مغناطیسی در فضا، میدان الکتریکی تولید می شود، در اثر تغییر میدان الکتریکی نیز میدان مغناطیسی ایجاد می شود. یعنی علاوه بر جریان الکتریکی و آهنربا تغییر میدان الکتریکی نیز می تواند منشأ میدان مغناطیسی باشد. ماکسول با توجه به کارهای اورستد، آمپر، هانری و فارادی مبانی علم الکتریسیته و مغناطیس را تدوین کرد و وجود موج های الکترومغناطیسی و انتشار آنها در فضا را پیش بینی کرد. بعدها هرتز فیزیک دان آلمانی (۱۸۹۴-۱۸۵۷ میلادی) وجود این موج ها را به طور تجربی نشان داد.

۶-۱- چگونگی تشکیل موج های الکترومغناطیس توسط یک آنتن

موج های الکترومغناطیس از میدان های الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده اند. عامل اصلی ایجاد



موج های الکترومغناطیسی، ذرات

باردار شتاب دارند یعنی وقتی ذره بارداری شتاب دار می شود بخشی از انرژی خود را به صورت موج های الکترومغناطیسی گسیل می کند، گسیل موج های الکترومغناطیسی توسط اجسام را تابش می نامند.

در آنتن، یک منبع ولتاژ متناوب برای ایجاد نوسان بار الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرد و این شیوه ای مرسوم برای شتاب دار کردن ذرات است. از آنتن ها به عنوان

چشمه موج های الکترومغناطیس در ایستگاه های رادیویی، مخابراتی و ...

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

استفاده می‌شود. شکل ۳-۶ نحوه تولید یک موج الکترومغناطیس را در یک آنتن نشان می‌دهد. دو میله فلزی به یک مولد متناوب (ac) متصل شده‌اند. چون ولتاژ خروجی این مولد به صورت سینوسی است، بار روی میله‌ها دائماً تغییر می‌کند. در لحظه $t = 0$ بار روی میله بالایی بیشینه و مثبت و روی میله پایینی بیشینه و منفی است. سپس بار این میله‌ها کاهش می‌یابد و در لحظه $t = T/4$ به صفر می‌رسد (شکل ۳-۶-ب) در ادامه این حرکت، علامت بار میله‌ها معکوس می‌شود، یعنی بار میله بالایی منفی و بار میله پایینی مثبت می‌شود و مقدار آن نیز افزایش می‌یابد تا در لحظه $t = T/2$ به یک مقدار بیشینه برسد (شکل ۳-۶-پ). تغییر بار میله‌ها به همین ترتیب ادامه می‌یابد.

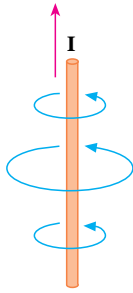
در زمان $t = 0$ بار مثبت در میله بالایی و بار منفی در میله پایینی بیشینه است (شکل ۳-۶-الف). پس میدان الکتریکی حاصل از این بارها نیز بیشینه است. میدان الکتریکی ایجاد شده در نزدیکی آنتن در این لحظه، در این شکل نشان داده شده است.

با کاهش بار روی میله‌ها، شدت میدان الکتریکی در نزدیکی میله‌ها، کاهش می‌یابد و میدان الکتریکی بیشینه رو به پایینی که در لحظه $t = 0$ تولید شده بود از میله دور می‌شود. هنگامی که بارهای مثبت و

منفی روی میله‌ها صفر است (مانند شکل ۳-۶-ب) میدان الکتریکی نیز صفر است. این وضعیت $\frac{1}{4}$ دوره ($t = T/4$) بعد از شروع نوسان پیش می‌آید. با ادامه این عمل، میله بالایی، بعد از زمان $t = 2T/4$ ، دارای بیشترین مقدار بار منفی و میله پایینی دارای بیشترین بار مثبت می‌شود. در این حالت میدان الکتریکی ایجاد شده رو به بالاست (شکل ۳-۶-پ) و با ادامه یافتن نوسان بار الکتریکی روی میله‌ها میدان الکتریکی مطابق شکل ۳-۶-ت تشکیل می‌شود. در تمام این مراحل میدان الکتریکی نزدیک آنتن با نوسان بار الکتریکی روی آن هم فاز است، یعنی، جهت میدان الکتریکی در زمانی که میله بالایی مثبت است رو به پایین و وقتی میله بالایی منفی است، رو به بالاست و اندازه میدان در هر لحظه به مقدار بار روی میله در آن لحظه بستگی دارد.

با ادامه نوسان بارهای الکتریکی روی میله‌ها، میدان‌های الکتریکی ایجاد شده با سرعت نور از آنتن دور می‌شوند. در شکل ۳-۶-گویی از میدان الکتریکی را در لحظه‌های مشخص از نوسان مشاهده می‌کنید. همان‌گونه که می‌بینید در طول یک دوره از نوسان بار، میدان الکتریکی ایجاد شده در ابتدای دوره به اندازه یک طول موج کامل جلو رفته است.

تغییر بارهای الکتریکی در میله‌ها سبب ایجاد جریان الکتریکی در میله‌ها و در نتیجه تولید یک میدان مغناطیسی در اطراف میله‌ها می‌شود. وقتی جریان در میله‌ها رو به بالاست (همان‌طور که در فیزیک



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

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 ۴-۶). این خط‌ها بر میدان الکتریکی تولید شده در هر نقطه عمودند. با عوض شدن جهت جریان، جهت میدان مغناطیسی نیز وارونه می‌شود و با تغییر جریان نسبت به زمان، میدان مغناطیسی نیز همانند میدان الکتریکی در اطراف آنتن تغییر می‌کند.

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

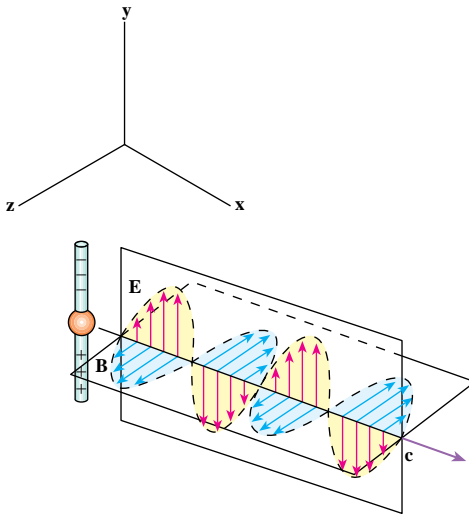
ب) میدان الکتریکی متغیر با زمان - همان‌طور که ماکسول پیش‌بینی کرده بود - میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند.

این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی القایی هم‌فازند؛ یعنی، در هر نقطه هر دو میدان هم‌زمان با 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 می‌شوند (شکل ۵-۶).

موج‌های الکترومغناطیسی نیز، مانند موج‌های مکانیکی، در زمان و مکان تغییر می‌کنند، با این تفاوت که در موج‌های مکانیکی ذره‌های تشکیل‌دهنده محیط نوسان می‌کنند و در موج‌های الکترومغناطیسی، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در هر نقطه از فضا به‌طور نوسانی تغییر می‌کنند. همین موضوع سبب می‌شود که



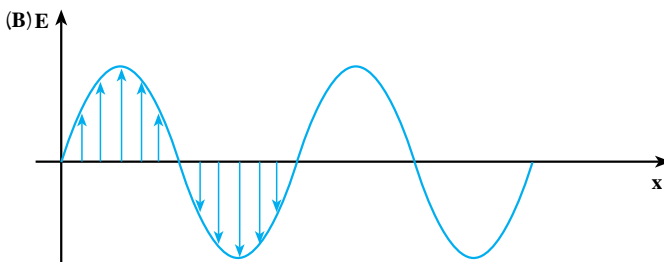
شکل ۵-۶ - یک موج الکترومغناطیسی گسیل شده از یک آنتن در یک لحظه از زمان. توجه کنید که میدان الکتریکی بر میدان مغناطیسی و هر دو بر راستای انتشار موج عمودند.

موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار خود الزاماً به محیط مادی نیاز نداشته باشند و در خلأ نیز منتشر شوند.

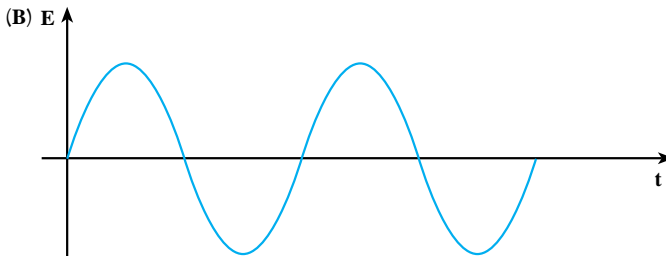
برای بیان چگونگی انتشار موج‌های الکترومغناطیسی نیز می‌توانیم، همان‌طور که در مورد موج‌های مکانیکی انجام دادیم، از نمودارهای میدان‌های الکتریکی (و یا مغناطیسی) برحسب مکان یا زمان استفاده کنیم. ابتدا تغییرات میدان الکتریکی را توصیف می‌کنیم.

یک موج الکترومغناطیسی را در نظر می‌گیریم که در جهت محور x منتشر می‌شود. نمودار میدان الکتریکی برحسب مکان این موج در شکل 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 برحسب 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 برحسب مکان و میدان مغناطیسی برحسب زمان را نیز می‌توان مانند نمودارهای مربوط به میدان الکتریکی رسم کرد که باز هم نمودارهایی مانند شکل‌های ۶-۶ و ۶-۷ به دست خواهد آمد.

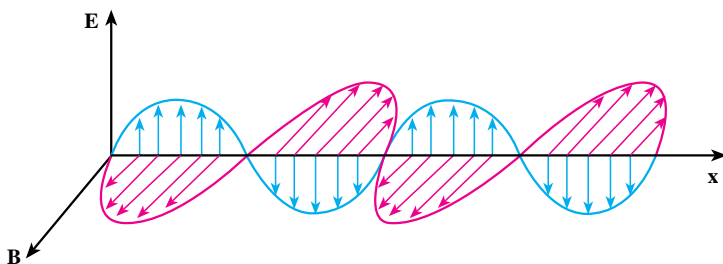


شکل ۶-۶- نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) برحسب مکان، یک موج الکترومغناطیسی در امتداد محور x ، در یک لحظه از زمان.



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

در شکل ۸-۶ نمودارهای میدان الکترومغناطیسی برحسب مکان که در آن هم میدان الکتریکی و هم میدان مغناطیسی نشان داده شده است را می بینید.



شکل ۸-۶ 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 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 $\lambda f = v$ به دست می‌آید.

پرسش ۱-۶

با توجه به شکل ۵-۶ توضیح دهید که موج‌های الکترومغناطیسی طولی‌اند یا

عرضی؟

۲-۶- 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 رابطه زیر به دست می‌آید:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

(۱-۶)

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 $\epsilon_0 \approx 8/85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$ و $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$ است. با قرار دادن مقادیر بالا در رابطه ۶-۱ سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیس در خلأ به دست می‌آید:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8/85 \times 10^{-12} \times 4\pi \times 10^{-7}}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

که این مقدار برابر سرعت انتشار نور در خلأ است.

۳-۶- طیف موج‌های الکترومغناطیسی

موج‌های الکترومغناطیسی طیف گسترده‌ای از نظر بسامد (و طول موج) دارند. به نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی، نام‌هایی از قبیل موج‌های رادیویی، نوری، تابش گرمایی، فرابنفش، γ ، X و ... اتلاق می‌شود. در هر یک از این ناحیه‌ها تابش به طریق خاصی تولید و آشکار می‌شود. جدول ۶-۱ نحوه تولید، کاربرد و آشکارسازی نواحی مختلف طیف الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. مثلاً نور که گستره کوچکی از این طیف است، مستقیماً بر شبکیه چشم اثر می‌کند و از این طریق آشکار می‌شود اما آشکارسازی موج‌های رادیویی توسط وسیله‌های الکترونیکی خاصی مانند رادیو، تلویزیون و ... صورت می‌گیرد.

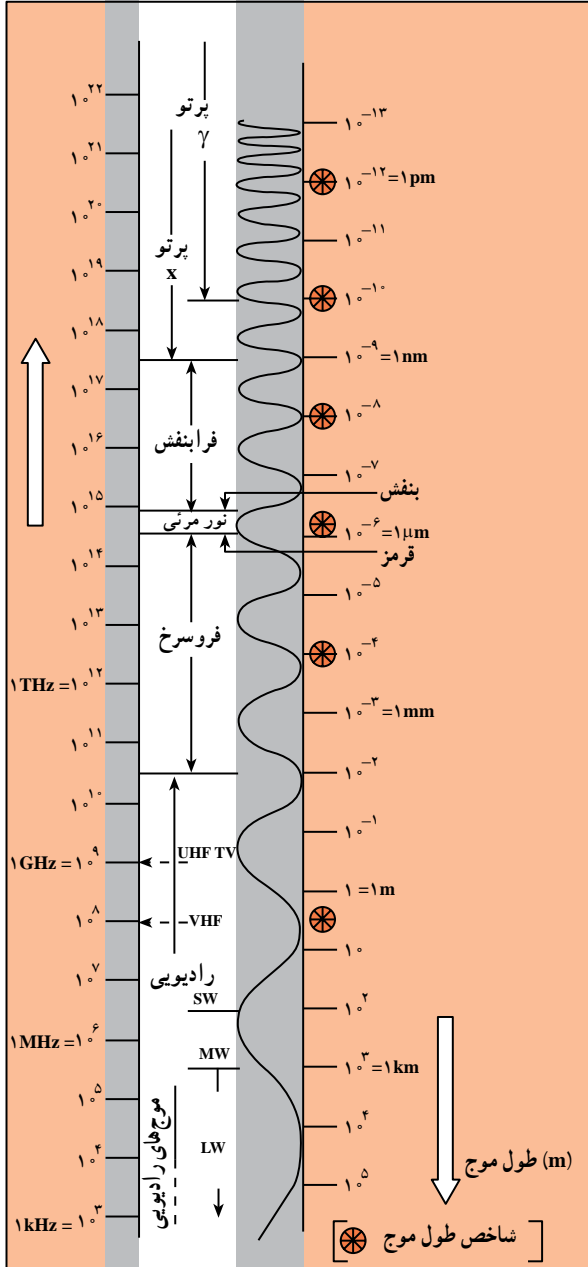
شکل ۶-۹ گستره (طیف) موج‌های الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. این موج‌ها، طیف پیوسته‌ای را تشکیل می‌دهند. با وجود تفاوت بسیار زیاد در بسامد، نحوه تولید و آشکارسازی آنها، ماهیت و قانون‌های حاکم بر همه آنها یکسان است.

جدول ۱-۱ نحوه تولید، آشکارسازی و کاربرد طیف موج‌های الکترومغناطیسی

نام و حدود طول موج	چشمه	وسایل آشکارسازی	بعضی از ویژگی‌های خاص و کاربرد
پرتو گاما (γ) $1 \text{ Pm} = 10^{-12} \text{ m}$	هسته 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
پرتو ایکس (X) $1 \text{ Pm} = 10^{-10} \text{ m}$	لامپ پرتو X	فیلم عکاسی و صفحه فلوروسان	فوتون‌های بسیار پر انرژی و با قدرت نفوذ زیاد، خیلی خطرناک کاربرد: استفاده در پرتو نگاری، استفاده در مطالعه ساختار بلورها، معالجه بیماری‌های پوستی، استفاده در پرتو درمانی
فرا بنفش (UV) $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$	خورشید، جسم‌های خیلی داغ، جرقه الکتریکی، لامپ بخار جیوه	فیلم عکاسی، فوتوسل	ویژگی‌ها: توسط شیشه جذب می‌شود، سبب بسیاری از واکنش‌های شیمیایی می‌شود، پخته‌های زنده را از بین می‌برد کاربرد: لامپ‌های UV در پزشکی
نور مرئی $400 \text{ nm} = 4 \times 10^{-7} \text{ m}$ (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) $1 \text{ }\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$	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 IR توسط ماهواره‌ها
رادیویی $1 \text{ m} \text{ (VHF)}$	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 ۲-۶

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



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

شکل ۹-۶- طیف موج‌های الکترومغناطیسی

مثال ۶-۱

محدوده طول موج، امواج الکترومغناطیسی مرئی از $4/10^6$ میکرون (10^6 m) میکرون) مربوط به طول موج بنفش تا $7/10^6$ میکرون مربوط به طول موج نور قرمز است. محدوده بسامد نور مرئی را به دست آورید.

پاسخ

با استفاده از رابطه $\lambda f = c$ 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 4.3×10^{14} Hz تا 7.5×10^{14} Hz است.

فعالیت ۶-۱

جمله‌های زیر را کامل کنید.

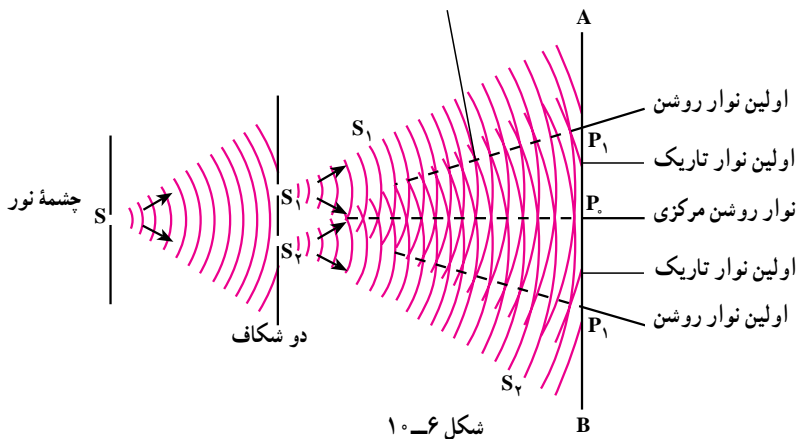
- ۱- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یکدیگر
- ۲- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هر دو بر عمودند بنابراین موج‌های الکترومغناطیسی از نوع موج‌های
- ۳- نوسان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با یکدیگر
- ۴- موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار نیاز به و انرژی را از محلی به محل دیگر منتقل می‌کنند.
- ۵- همه موج‌های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

۶-۴- تداخل موج‌های نوری

در فصل نوسان و موج با تداخل موج‌های مکانیکی آشنا شدیم و در آنجا دیدیم که اگر دو سوزن که به فاصله نزدیکی از هم قرار دارند با بسامد معینی بر سطح آب درون یک ظرف همزمان ضربه بزنند،

موج‌هایی در سطح آب به وجود می‌آید که در همه جهت‌ها منتشر می‌شود. برهم‌نهی این موج‌ها را تداخل نامیدیم و گفتیم در نقطه‌هایی که دو موج هم‌فاز باشند تداخل سازنده و در نقاطی که دو موج در فاز مخالف باشند تداخل ویرانگر به وجود می‌آید. همین آزمایش را با نور نیز می‌توان انجام داد. یانگ، فیزیک‌دان انگلیسی، در آزمایش‌هایی که بین سال‌های ۱۸۰۲ تا ۱۸۰۴ انجام داد، دریافت که پدیده تداخل در نور هم مشاهده می‌شود.

شکل ۱۰-۶ طرح آزمایش یانگ را نشان می‌دهد. در پشت شکاف باریک S یک چشمه نور تک‌رنگ (لامپ روشن) قرار می‌دهیم. این شکاف خود مانند یک چشمه نور عمل می‌کند. در فاصله کمی از شکاف S، دو شکاف موازی S_۱ و S_۲ که با S نیز موازی و هم‌فاصله‌اند، قرار می‌دهیم. نور رسیده به شکاف‌های S_۱ و S_۲ همانند دو چشمه هم‌بسامد، هم‌دامنه و هم‌فاز عمل می‌کنند و نور را در جهت‌های مختلف گسیل می‌کنند. نورهای گسیل شده از دو چشمه S_۱ و S_۲ با یکدیگر تداخل کرده و نوارهای تداخلی روشن و تاریک را بر روی پرده AB که در مقابل شکاف‌ها قرار دارد تشکیل می‌دهند.



دو موجی که به نقطه P روی محور تقارن دو شکاف می‌رسند، هم‌فازند. زیرا آنها دوراه مساوی S_۲P و S_۱P را تا پرده پیموده‌اند. تداخل این دو موج سازنده است و در نتیجه در محل P روی پرده یک نوار روشن تشکیل می‌شود. این نوار روشن را نوار روشن مرکزی می‌نامیم. برای اینکه ببینیم در چه شرایطی نوار روشن و در چه شرایطی نوار تاریک تشکیل می‌شود نقطه P را در شکل ۱۱-۶ در نظر می‌گیریم. پرتوهایی که از S_۲ و S_۱ به این نقطه می‌رسند، دو راه نامساوی S_۲P و S_۱P را می‌پیمایند. اختلاف فاز پرتوها را می‌توان از روی اختلاف راه آنها تعیین کرد.

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

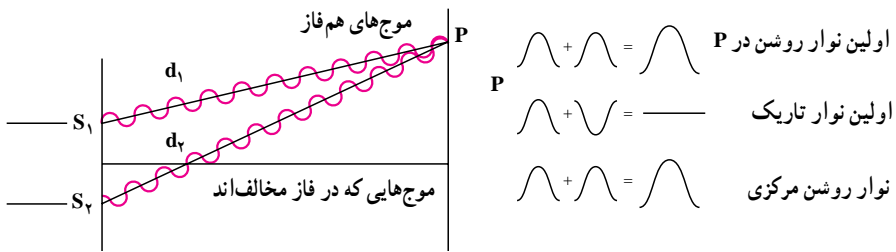
اگر $\Delta\varphi$ مضرب زوجی از π باشد یعنی :

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

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

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

در این صورت دو پرتوی که به پرده می‌رسند هم‌فازند و تداخل سازنده ایجاد می‌شود و در این نقطه‌ها نوار روشن تشکیل می‌شود. در رابطه ۲-۶ 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 ۱۱-۶

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

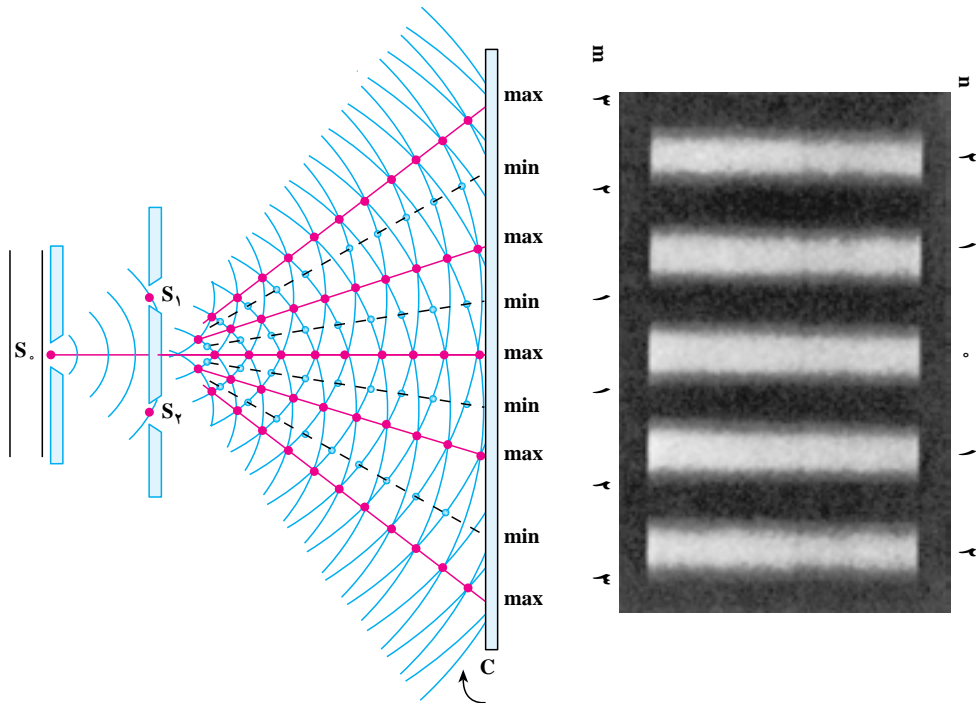
$$\Delta\varphi = \pm (2m - 1)\pi, m = 1, 2, \dots \quad (3-6)$$

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

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

در این صورت دو موجی که به پرده می‌رسند در فاز مخالف هم خواهند بود و تداخل ویرانگر صورت می‌گیرد و در نتیجه در این نقاط نوار تاریک خواهیم داشت. در رابطه ۳-۶، $m = 1, 2, 3, \dots$ 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.

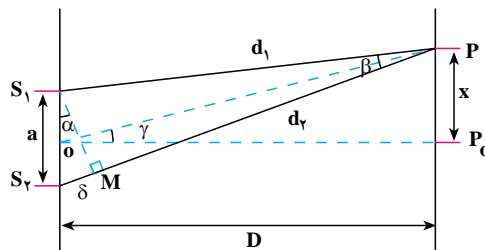
نوارهای روشن و تاریک را که روی پرده تشکیل می‌شوند طرح تداخلی می‌نامند. شکل ۱۲-۶ طرح تداخلی دو شکاف یانگ را نشان می‌دهد. در دو طرف شکل، شماره نوارهای روشن که با مقادیر مختلف n و شماره نوارهای تاریک که با مقادیر مختلف m داده می‌شوند نیز آمده است.



شکل ۱۲-۶

اندازه‌گیری طول موج : با استفاده از آزمایش یانگ می‌توان طول موج نور را اندازه‌گیری کرد. در شکل ۱۳-۶ طرحی از این آزمایش رسم شده است. در این شکل فاصله دو شکاف از هم a و فاصله شکاف‌ها از پرده D است. فرض کنید نور روشن n ام در نقطه P در فاصله x از نواری مرکزی روی پرده تشکیل شده است. دایره‌ای به مرکز P و به شعاع PS_1 رسم می‌کنیم، دایره PS_2 را در نقطه M قطع می‌کند. اختلاف راه نوری بین دو پرتو PS_1 و PS_2 برابر است با :

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



شکل ۱۳-۶

اگر فاصله پرده از صفحه دو شکاف بسیار بزرگتر از فاصله دو شکاف یعنی $D \gg a$ باشد، زاویه γ و نیز زاویه β (بین پرتوهایی که به P می‌رسند) بسیار کوچک خواهند بود و می‌توان S_1M را عمود بر S_1P و OP در نظر گرفت. در این صورت زاویه‌های α و γ با یکدیگر برابرند، در نتیجه:

$$\tan \alpha = \tan \gamma, \tan \gamma = \frac{x}{D}$$

چون زاویه α کوچک است، داریم:

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

بنابراین:

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

(۴-۶)

برای نوار روشن $m\lambda$:

$$\frac{x}{D} = \frac{n\lambda}{a}$$

(۵-۶)

که از آن رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\lambda = \frac{xa}{nD}$$

(۶-۶)

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

پرسش ۳-۶

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

خواهد بود؟

مثال ۲-۶

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

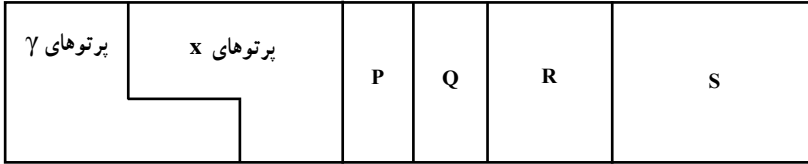
پاسخ

با استفاده از رابطه ۶-۶ داریم:

$$\lambda = \frac{ax}{nD} = \frac{1/2 \times 10^{-3} \times 11/8 \times 10^{-3}}{20 \times 1/2} = 5/9 \times 10^{-7} \text{ m} = 590 \text{ nm}$$

تمرین‌های فصل ششم

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



شکل ۱۴-۶

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

ب) اگر در طول طیف از چپ به راست (از پرتوهای 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 فرسرخ و امواج رادیویی بیان کنید.

۳- الف) از یک ایستگاه رادیویی موج الکترومغناطیسی به طول موج ۷۵m گسیل می‌شود.

بسامد این موج را حساب کنید.

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

۴- الف) طول موج نور نارنجی $6.42 \times 10^{-7} \text{ m}$ 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 $2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$ 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 یانگ را با نور تک‌رنگ سبز انجام داده و نوارهای تداخلی بر روی پرده موازی با

سطح شکاف‌ها تشکیل داده‌ایم. برای اینکه فاصله دو نوار روشن متوالی را زیاد کنیم می‌توانیم:

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

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

(۳) فاصله پرده از شکاف‌ها را زیاد کنیم.

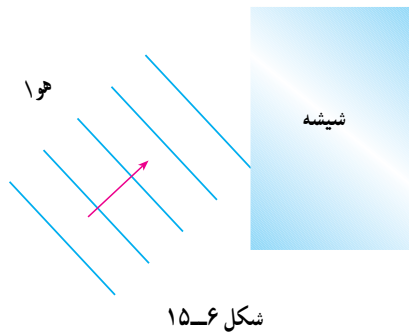
(۴) فاصله دو شکاف را از هم کم کنیم.

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

می‌شود؟ توضیح دهید.

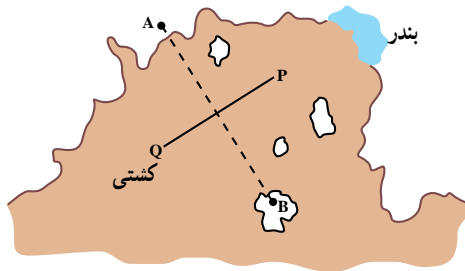
۸- یک صافی مقابل چراغ جیوه قرار می‌دهیم، به طوری که تمام طول موج‌ها به جز ناحیه سبز آن جذب شود. با این نور سبز طرح تداخلی آزمایش یانگ را به فاصله دو شکاف 0.6 mm روی پرده‌ای به فاصله 2.5 m از دو شکاف تشکیل می‌دهیم. اگر فاصله دو نوار روشن پهلوئی هم 2.27 mm باشد، طول موج نور سبز را حساب کنید.

۹- در آزمایش دو شکاف یانگ، فاصله دو شکاف 0.4 mm و فاصله پرده تا دو شکاف 80 cm است. اگر طول موج نور $0.6 \mu\text{m}$ باشد فاصله نوار دهم روشن از نوار مرکزی را حساب کنید.



۱۰- در شکل ۱۵-۶ موج‌های نور فرودی از هوا وارد شیشه می‌شوند. بعضی از آنها در سطح جدایی دو محیط بازتابیده و بعضی شکسته شده و وارد شیشه می‌شوند. 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



۱۱- در شکل ۱۶-۶ یک خط ساحلی با دو ایستگاه رادیویی دریانوردی زمینی A و B دیده می‌شود که در فاصله زیادی از هم قرار گرفته‌اند. هر دو ایستگاه پیوسته سیگنال‌های رادیویی هم‌فاز گسیل می‌کنند که بسامد آنها 1.5 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 دامنه آن درست دو برابر دامنه هر موجی است که از یک ایستگاه به تنهایی دریافت می‌کرد. این مشاهده چه موضوعی را درباره سیگنال‌های گسیل شده از A و B نشان می‌دهد؟

(پ) توضیح دهید در شرایط هوای مه‌آلود چگونه می‌توان از این سیگنال‌های رادیویی برای ادامه مسیر استفاده کرد.