فصل ششم

موج‌های الکترومغناطیسی

جیمز کلارک ماکسول در ۳ نوامبر ۱۸۳۱ میلادی در ادینبورگ اسکاتلند به دنیا آمد، که این درست همان سالی بود که مایکل فارادی کشف مهم و جالب خود در مورد القاءِ الکترومغناطیسی را ارائه کرد. در ۱۶ سالگی وارد دانشگاه ادینبورگ شد و پس از آن در سال ۱۸۵۰ راهی دانشگاه کمبریج گشت. ماکسول پس از فارغ‌التحصیلی از کمبریج، دو سال را در ترینیتی کالج گذراند و وقت خود را صرف مطالعاتی دربارهٔ نور نمود. او در این سال‌ها به کارهای فارادی نیز علاقه‌مند شد و نخستین کتاب خود را نیز دربارهٔ کارهای او نگاشت. در سال ۱۸۵۶ استاد کالج مریچال آبردین شد و مطالعات خود را از الکترومغناطیس معطوف به نظریهٔ جنبشی گازها کرد و با بررسی آماری حرکت مولکول‌های گاز به حصول رابطه‌ای دقیق برای فشار گازها نائل آمد. ماکسول در ۱۸۶۰ استاد کینگز کالج لندن شد ودوباره توجه خود را معطوف به الکتریسیته و مغناطیس نمود. او با ارائهٔ مدلی نشان داد که نه تنها می‌توان میدان الکتریکی را از میدان مغناطیسی متغیر به‌دست آورد، بلکه همچنین می‌توان میدان مغناطیسی را نیز از میدان الکتریکی متغیر به‌دست آورد. او به کمک مدل خود توانست دفع دو سیم با جریان موازی و جذب دو سیم با جریان پاد موازی را نیز نشان دهد. ولی هنوز کار ماکسول با مدل خود تمام نشده بود. ماکسول نشان داد که گرچه در اجسام عایق جریان الکتریکی نمی‌تواند آزادانه حرکت کند، ولی می‌تواند به‌طور محدود و درجا رخ دهد. او آن را مشابه کشتی‌ای دانست که در طوفان لنگر انداخته و گرچه حرکتی (به معنای عادی) ندارد، ولی در محّل خود جابه‌جا می‌شود. او سپس دریافت که آشفتگی‌های الکترومغناطیسی و نور دارای سرشت یکسانی هستند و نتیجهٔ اندیشه‌های خود را در کتاب مهمی تحت عنوان «در باب نظریهٔ دینامیکی میدان الکترومغناطیسی» در سال ۱۸۶۴ منتشر کرد و در آنجا برای نخستین بار مفهوم میدان را که آن را **اتریا** می‌خواند، پیش کشید. ماکسول با دلبستگی و شوق تمام به کار خود مداومت داد تا اینکه معادلات معروف چهارگانهٔ خود را به‌دست آورد. ماکسول سرانجام در سال ۱۸۷۷ در پی یک بیماری سخت جان سپرد. برای اطلاعات بیشتر در مورد جیمز کلارک ماکسول به دانستنی ۶ــ۱ در CD همراه یا سایت گروه فیزیک مراجعه کنید.

هدف‌های آموزشی

الف) چگونگی تشکیل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی القاییده را بشناسند.

ب) چگونگی تشکیل موج‌های الکترومغناطیسی توسط یک آنتن را بشناسند و بتوانند شکل این امواج را برای یک آنتن دوقطبی ساده در فواصل دور رسم و تحلیل کنند.

پ) مشخصه‌های بارز امواج الکترومغناطیسی را توضیح دهند و از تفاوت این امواج با موج‌های مکانیکی آگاه باشند.

ت) از طیف موج‌های الکترومغناطیسی آگاه باشند، نواحی اصلی آن را بشناسند، نحوهٔ تولید، آشکارسازی و ویژگی‌های هریک را بدانند و از برخی از کاربردهای آنها مطلع باشند.

ث) با تداخل موج‌های نوری و شرایط ایجاد تداخل سازنده و ویرانگر، و آزمایش دو شکاف یانگ آشنا باشند و برخی از کاربردهای تداخل را بشناسند.

موج‌های الکترومغناطیسی

نگاهی به فصل

خورشید که تابش‌های آن به محیطی می‌تابد که ما به‌عنوان گونه‌هایی از حیات در آن تکامل یافته‌ایم چشمهٔ غالب امواج الکترومغناطیسی است. عصر اطلاعاتی که ما در آن زندگی می‌کنیم تقریباً به‌طور کامل مبتنی بر فیزیک امواج الکترومغناطیسی است. امروزه از طریق تلویزیون، تلفن‌ها و اینترنت به‌طور جهانی به یکدیگر متصل شده‌ایم و چه بخواهیم و چه نخواهیم همواره در احاطهٔ سیگنال‌های حاصل از فرستنده‌های تلویزیونی، رادیویی و تلفنی هستیم. میکروموج‌های حاصل از دستگاه‌های رادار و نیز دستگاه‌های رلهٔ تلفن نیز ممکن است به ما برسند. همچنین ما در احاطهٔ امواج الکترومغناطیسی حاصل از لامپ‌های روشنایی، قطعات گرم شدهٔ اتومبیل، ماشین‌های پرتوی X، اجاق‌های میکروموج، و مواد پرتوزای هسته‌ای هستیم. به این‌ها اضافه کنید تابش حاصل از ستارگان و سایر اجرام در کهکشان‌ها و کهکشان‌های دیگر را.

موج های الکترو مغناطیسی

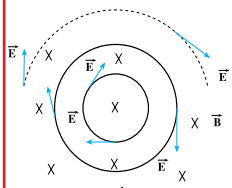
نگاهی به فصل : آیا می‌دانید انرژی حیاتی مورد نیاز گیاهان، جانوران، انسان و ... از چه طریق و چگونه بهزمین می‌رسد؟

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.



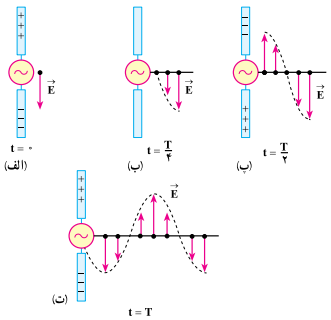
شکل ۶ــ۲

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 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، 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 (۱۸۹۴ــ۱۸۵۷میلادی) وجود این موج‌ها را به‌طور تجربی نشان داد.

۶ــ۱ــ چگونگی تشکیل موج‌های الکترومغناطیس توسط یک آنتن

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



(الف) (ب) (پ) (ت)

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

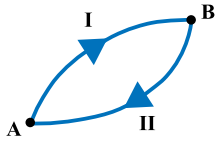
در آنتن، یک منبع ولتاژ متناوب برای ایجاد نوسان بار الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد و این شیوه‌ای مرسوم برای شتاب‌دارکردن ذرات است. از آنتن‌ها به‌عنوان چشمهٔ موج‌های الکترومغناطیس در ایستگاه‌های رادیویی، مخابراتی و...

تا ۲۰ سال پیش، بیشتر پردازشگرهای اطلاعاتی برای ارتباطات بینابینی حتی برای خیال‌پردازانه‌ترین مهندسان نیز قابل تصور نبود. چالش مهندسان امروزی تلاش برای تصور آن است که ۲۰ سال بعد این ارتباطات به چه صورتی درخواهد آمد. نقطهٔ شروع برای مواجهه با این چالش، درک مبنای فیزیکی امواج الکترومغناطیسی است که مایکل فارادی دانشمند انگلیسی و جیمز کلارک ماکسول فیزیکدان اسکاتلندی نقش عمده‌ای در آن داشتند. با این حال، این فیزیکدان آلمانی هانریش هرتز بود که در سال ۱۸۷۷ برای نخستین بار موجی الکترومغناطیسی با طول موج ماکروسکوپی ساخت. هرتز امواج ساکن الکترومغناطیسی را نیز تولید کرد و فاصلهٔ بین گره‌های مجاور آن را که برابر نیم‌طول موج است اندازه گرفت و سپس با توجه به بسامد مدار، سرعت امواج را از رابطهٔ $v = \lambda f$ محاسبه کرد. او نشان داد که این سرعت برابر سرعت نور است و به این ترتیب پیش‌بینی نظری ماکسول به‌طور عملی تأیید شد. البته به‌نظر نمی‌رسد کاربرد امواج الکترومغناطیسی برای ارتباطات راه دور به فکر هرتز رسیده بود. این شوقِ مارکونی و دیگران بود که ارتباطات رادیویی را به یک تجربهٔ آشنای همگانی تبدیل کرد.

در این بخش بر آنیم که نشان دهیم وجود امواج الکترومغناطیسی چه ارتباطی با اصول علم الکترومغناطیس دارد و خواص آنها چیست. به این منظور از تعریف نیروی محرکهٔ الکتریکی شروع می‌کنیم.

نیروی محرکهٔ الکتریکی

نیرویی را که کار آن به مسیر بستگی ندارد، نیروی پایستار می‌نامند و کار انجام شده توسط این نیرو در یک مسیر رفت‌وبرگشت برابر با صفر است. مثلاً شکل زیر را درنظر بگیرید که در آن دو مسیر I و II از نقطهٔ A به نقطهٔ B مشخص شده است.



شکل ۱

از تعریف نیروی پایستار داریم :

$$W_{AB,I} = W_{AB,II}$$

که با توجه به اینکه $W_{AB,II} = -W_{BA,II}$ است، خواهیم داشت :

$$W_{AB,I} + W_{BA,II} = 0$$

یعنی کار نیروی پایستار در یک مسیر بسته برابر صفر است که این را در ریاضیات به‌صورت $\oint \vec{F}.\vec{dl} = 0$ نشان می‌دهند، که علامت $\oint$ نشان‌دهندهٔ انتگرال‌گیری بر روی یک مسیر بسته است. می‌خواهیم نشان دهیم که یک میدان الکتریکی ایستا نمی‌تواند در یک مسیر بسته جریان الکتریکی ایجاد کند. با نوشتن $F = qE$، این رابطه به‌صورت $q\oint \vec{E}.\vec{dL}$ درمی‌آید. $\oint \vec{E}.\vec{dl}$ را اصطلاحاً نیروی محرکهٔ الکتریکی می‌نامند (که البته نام نیرو گمراه‌کننده است) و آن را با emf یا ε نشان می‌دهند. می‌بینیم که کار انجام شده برای جابه‌جایی بار روی یک مسیر بسته برابر صفر می‌شود. می‌دانیم اگر میدان الکتریکی بر یک رسانا اثر کند طبق قانون اهم $\int Edl = \Delta V = RI$ می‌شود که در اینجا l مسیری در طول رسانا و R مقاومت الکتریکی بین دو نقطه از رساناست که مسیر l آنها را به هم وصل می‌کند. همچنین می‌دانیم که حفظ و برقراری جریان بین دو نقطه از یک رسانا مستلزم فراهم کردن انرژی از طریق یک چشمهٔ اختلاف پتانسیل است. حال پرسشی که در اینجا مطرح می‌شود این است که آیا می‌توان جریانی را در یک رسانای بسته یا مدار الکتریکی برقرار کرد؟ وقتی معادلهٔ بالا را برای رسانایی بسته می‌نویسیم $\oint \vec{E}.\vec{dl} = RI$ می‌شود. درحالی‌که دیدیم $\oint \vec{E}.\vec{dl}$ برای میدانی ایستا برابر با صفر است. پس اگر رسانا در میدان الکتریکی ایستایی قرار گیرد $I = 0$ می‌شود؛ به‌عبارتی، میدان الکتریکی ایستا نمی‌تواند در مداری بسته جریان الکتریکی ایجاد کند. از دید میکروسکوپی، یک بار الکتریکی که در داخل رسانا حرکت می‌کند انرژی دریافتی از میدان الکتریکی را به شبکهٔ بلوری انتقال دهد، ولی این شبکه انرژی گرفته شده را به الکترون‌ها پس نمی‌دهد. درنتیجه، برای برقراری جریان در مداری بسته لازم است به مدار انرژی تغذیه شود. این منابع انرژی را مولّدهای انرژی می‌نامند. راه‌های زیادی برای تولید نیروی محرکهٔ الکتریکی وجود دارد. روش معمول

استفاده از واکنش‌های شیمیایی (مثلاً استفاده از باتری‌ها) است که در آنها انرژی حاصل از واکنش‌های شیمیایی به الکترون‌ها انتقال می‌یابد. روش مهم‌تر دیگر پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی است. مثلاً اگر آهنربایی را در نزدیکی یک مدار بسته به‌گونه‌ای جابه‌جا کنیم که شار مغناطیسی Φ_B داخل مدار تغییر کند، نیروی محرکهٔ الکتریکی ایجاد می‌شود :

$$emf = \oint \vec{E}.\vec{dl} = -\frac{d}{dt}\Phi_B$$

که همان قانون القای فارادی است و همان‌طور که در فیزیک ۳ و آزمایشگاه دیدید، علامت منفی نشانی از قانون لنز است که بیان می‌دارد جریان به‌گونه‌ای در مدار القأ می‌شود که با تغییر شار مخالفت کند.

دانستنی ۶ــ۲

بررسی میکروسکوپی قانون لنز

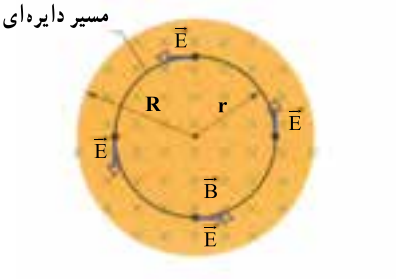
قانون لنز با بررسی میکروسکوپی این قانون تحقیق می‌شود. در این دانستنی با ارائه آزمایشی ساده به بررسی چرایی این قانون می‌پردازیم.

میدان‌های الکتریکی القاییده

دیدیم که میدان مغناطیسی متغیر با زمان می‌تواند منبع میدان الکتریکی باشد، آن هم میدانی که هیچ توزیع بار ساکنی نمی‌تواند آن را ایجاد کند. عجیب است، ولی طبیعت چنین می‌کند. اگر در ذهن خود کوچک‌ترین شکی نسبت به میدان‌های الکتریکی القایی دارید، چند نمونه از کاربردهای آن را معرفی می‌کنیم. در هر ضبط‌صوت با عبور نوار، که نواحیِ با مغناطش متفاوتی دارد، از جلوی پیچک ساکن آن جریانی در پیچک القا می‌شود. دیسک‌های رایانه نیز بر همین اساس کار می‌کنند. در گیتارهای الکتریکی نیز سیم‌های فرّومغناطیس لرزان در پیچهٔ گیتار جریان القا می‌کنند. در دینام اکثر اتومبیل‌ها آهنربای چرخانی وجود دارد که در پیچه‌ای ساکن جریان القا می‌کند. این فهرست تمامی ندارد. حتی اگر القای میدان الکتریکی توسط میدان مغناطیسی را درک نکنیم، باز این اثر نقش مهم خود را در زندگی روزمرهٔ ما ایفا می‌کند.

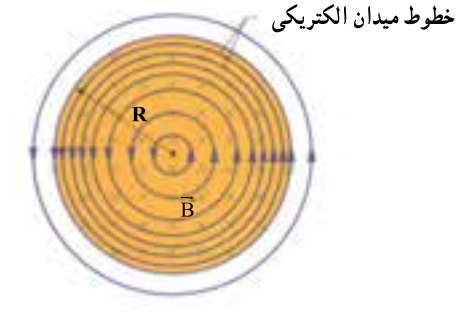
مشخصهٔ بارز قانون القای فارادی آن است که حتی اگر حلقه‌ای رسانا وجود نداشته باشد، باز هم با تغییر میدان مغناطیسی، میدانی الکتریکی ایجاد می‌شود. به این منظور شکل ۲ را درنظر بگیرید که در آن مسیری دایره‌ای به شعاع r در میدان مغناطیسی B مشخص شده است.

فرض می‌کنیم بزرگی میدان مغناطیسی $\vec{B}$ با آهنگ ثابت



شکل ۲

$d\vec{B}/dt$ در حال افزایش است. بنا بر تقارن، میدان الکتریکی القا شده در نقاط مختلف دور مسیر دایره‌ای باید مماس بر دایره باشند. بنابراین مسیر دایره‌ای یک خطّ میدان الکتریکی است. دایرهٔ مشخص شده به شعاع r هیچ ویژگی خاصی ندارد و بنابراین خطوط میدان الکتریکی حاصل از میدان مغناطیسی متغیر باید، مانند شکل ۳، دسته‌دایره‌های هم‌مرکزی باشند.



شکل ۳

تا وقتی که میدان مغناطیسی با زمان درحال افزایش باشد، میدان الکتریکی نشان داده شده نیز وجود خواهد داشت. اگر میدان مغناطیسی نسبت به زمان ثابت می‌بود، هیچ میدان الکتریکی القایی و درنتیجه هیچ خطّ میدان الکتریکی‌ای وجود نمی‌داشت.

اگر میدان مغناطیسی با زمان با آهنگ ثابتی در حال کاهش باشد، خطوط میدان الکتریکی مانند شکل ۳ همچنان هم‌مرکز باقی می‌مانند، ولی اکنون جهت مخالفی خواهند داشت.

مثال پیشنهادی

فرض کنید در ناحیه‌ای از فضا میدان مغناطیسی برون‌سویی وجود دارد که بزرگی آن با آهنگ ثابتی درحال کاهش است. جهت میدان الکتریکی القایی چگونه خواهد بود؟

پاسخ : میدان الکتریکی در مسیرهایی دایره‌ای به‌گونه‌ای القا می‌شود که با کاهش میدان مغناطیسی برون‌سو مخالفت می‌کند. یعنی در جهتی القا می‌شود که این میدان را تقویت کند. پس، مانند شکل ۳، در جهت پادساعتگرد القا می‌شود.

دانستنی ۶ــ۳

جریان‌های گردابی (ادی)

یکی از جلوه‌های میدان‌های الکتریکی القایی، جریان‌های گردابی (ادی) است که در رساناها ایجاد می‌شود. در این دانستنی ضمن تشریح این جریان‌ها به برخی از کاربردهای عملی آن می‌پردازیم.

میدان‌های مغناطیسی القاییده

دیدیم شار مغناطیسی متغیر، میدانی الکتریکی القا می‌کند و از آنجا به قانون القای فارادی رسیدیم

$$\oint \vec{E}.\vec{dl} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

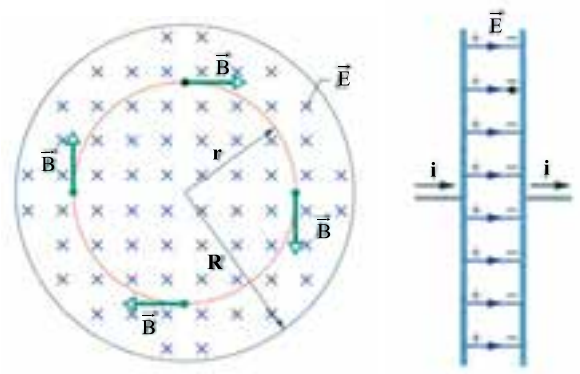
که در آن $\vec{E}$ میدان الکتریکی القا شده در طول یک مسیر بسته بر اثر تغییر شارمغناطیسی Φ_B عبوری از مسیر است. براساس تقارن، قاعدتاً باید به این فکر بیفتیم که آیا ممکن است القایش به روش مخالفی نیز رخ دهد؟ یعنی، آیا ممکن است یک شارالکتریکی متغیر، میدانی مغناطیسی القا کند؟ پاسخ مثبت است، تغییر شارالکتریکی Φ_E در یک ناحیه از فضا می‌تواند میدان مغناطیسی $\vec{B}$ را در طول مسیر بسته‌ای در آن ناحیه القا کند. این قانون اغلب به افتخار جیمز کلارک ماکسول، قانون القای ماکسول خوانده می‌شود :

$$\oint \vec{B}.\vec{dl} = \mu_0\varepsilon_0\frac{d\Phi_E}{dt}$$

که در آن ضریب $\mu_0\varepsilon_0$ برای هم‌بُعد شدن دو طرف معادله وارد شده است و نقشی در بحث ما ندارند.

به‌عنوان مثالی از این نوع القایش، باردار شدن یک خازن تخت با صفحه‌های دایره‌ای را درنظر بگیرید (شکل ۴ــ الف). گرچه خود را روی این آرایش متمرکز می‌کنیم، ولی همان‌طور که اشاره شد، یک شارالکتریکی متغیر همواره میدانی مغناطیسی ایجاد می‌کند. فرض می‌کنیم که بار روی خازن بر اثر جریان ثابت i در سیم‌های رسانا با آهنگ پایایی افزایش می‌یابد. آنگاه بزرگی میدان الکتریکی میان صفحه‌ها نیز با آهنگ پایایی افزایش می‌یابد. شکل ۴ــ ب نمایی از صفحهٔ راست شکل ۴ــالف را از دید میان صفحه‌ها نشان می‌دهد. جهت میدان الکتریکی به سمت داخل صفحهٔ شکل است. یک حلقهٔ دایره‌ای را درنظر بگیرید از نقطهٔ ۱ شکل‌های ۴ــالف و ب می‌گذرد. حلقه‌ای که هم‌مرکز با صفحه‌های دایره‌ای و دارای شعاع کوچک‌تری از شعاع صفحه‌هاست. چون میدان الکتریکی عبوری از حلقه متغیر است، شارالکتریکی عبوری از حلقه نیز باید متغیر باشد. این تغییر شارالکتریکی، میدانی مغناطیسی به دور حلقه ایجاد می‌کند

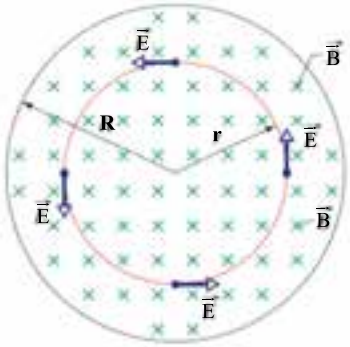
و آزمایش نیز نشان می‌دهد که واقعاً یک میدان مغناطیسی $\vec{B}$ به دور چنین حلقه‌ای، در جهت نشان داده شده، القا می‌شود. این میدان مغناطیسی تقارنی دایره‌ای دارد.



(ب) (الف)

شکل ۴

حال اگر حلقهٔ بزرگ‌تری را درنظر بگیریم، درمی‌یابیم که میدان مغناطیسی به دور این حلقه نیز القا می‌شود. گرچه تغییر شارالکتریکی به میدان مغناطیسی و تغییر شارمغناطیسی به میدان الکتریکی می‌انجامد، ولی در اینجا سوای ضریب‌ها، تفاوت دیگری هم وجود دارد. قانون القای ماکسول فاقد علامت منفی قانون القای فارادی است و بنابراین میدان الکتریکی القاییدهٔ $\vec{E}$ و میدان مغناطیسی القاییدهٔ $\vec{B}$ در وضعیت‌های مشابه، جهت‌های مخالفی دارند. برای مشاهدهٔ این اختلاف جهت، شکل ۵ را درنظر بگیرید که در آن میدان مغناطیسی افزایشی $\vec{B}$ که جهت آن رو به داخل صفحهٔ شکل است، میدان الکتریکی $\vec{E}$ را القا کرده است که جهت آن پادساعتگرد است، که این در خلاف جهت میدان مغناطیسی $\vec{B}$ القاییدهٔ شکل ۴ــب است.



شکل ۵

استفاده می‌شود. شکل ۶ــ۳ 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 $t = 0$ بار روی میلهٔ بالایی بیشینه و مثبت و روی میلهٔ پایینی بیشینه و منفی است. سپس بار این میله‌ها کاهش می‌یابد و در لحظهٔ $t = T/4$ 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 $t = T/2$ به یک مقدار بیشینه برسد (شکل۶ــ۳ــ پ). تغییر بار میله‌ها به همین ترتیب ادامه می‌یابد.

در زمان $t = 0$ 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.

با کاهش بار روی میله‌ها، شدت میدان الکتریکی در نزدیکی میله‌ها، کاهش می‌یابد و میدان الکتریکی بیشینهٔ رو به پایینی که در لحظهٔ $t = 0$ 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 $\frac{1}{4}$ دوره ($t = T/4$) بعد از شروع نوسان پیش می‌آید. با ادامهٔ این عمل، میلهٔ بالایی، بعد از زمان $t = 2T/4$، 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.

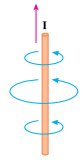
با ادامهٔ نوسان بارهای الکتریکی روی میله‌ها، میدان‌های الکتریکی ایجاد شده با سرعت نور از آنتن دور می‌شوند. در شکل ۶ــ۳ الگویی از میدان الکتریکی را در لحظه‌های مشخص از نوسان مشاهده می‌کنید. همان‌گونه که می‌بینید در طول یک دوره از نوسان بار، میدان الکتریکی ایجاد شده در ابتدای دوره به اندازهٔ یک طول موج 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

۶ــ۱ و ۶ــ۲ چگونگی تشکیل موج‌های الکترومغناطیسی توسط یک آنتن و سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی

وسیله‌ای که یک توزیع بار یا جریانی نوسانی را به تابش الکترومغناطیسی تبدیل می‌کند، آنتن نام دارد. در فرستنده‌های رادیویی بارهای الکتریکی در امتداد آنتن به نوسان واداشته می‌شوند تا میدان‌هایی نوسانی ایجاد شود. چون در آنتن بارهای متعددی نوسان می‌کنند، اغتشاشات قوی‌تری از یک بار نوسانی ایجاد می‌شود و می‌توان آن را در فاصله‌ای دور آشکار کرد. آنتن گیرنده نیز رساناست و بنابراین میدان موج رسیده به آنتن گیرنده به بارهای آزاد این آنتن نیرو وارد می‌کند و جریان‌هایی را ایجاد می‌کند که توسط مدارهای گیرنده آشکار و تقویت می‌شود. مثلاً در شکل ۶ امواج نوسانی حاصل از یک فرستندهٔ رادیویی، نیروهایی بر بارهای آنتن اتومبیل وارد می‌کنند و جریان ضعیف متناوبی با بسامد همان امواج به‌وجود می‌آورند.

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 ۶ـ۴). این خط‌ها بر میدان الکتریکی تولید شده در هر نقطه عمودند. 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.



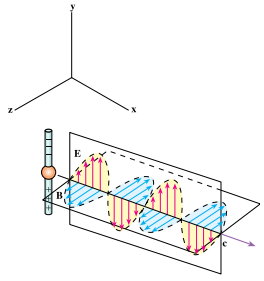
شکل ۶ـ۴ـ چگونگی تشکیل خطوط میدان مغناطیسی در اطراف یک آنتن که از آن جریان الکتریکی متغیر می‌گذرد.

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

این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی القایی هم‌فازند؛ یعنی، در هر نقطه هر دو میدان هم‌زمان با هم بیشینه یا کمینه می‌شوند (شکل ۶ـ۵). علاوه‌بر این میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یکدیگر و هر دوی آنها بر راستای حرکت موج عمودند.



شکل ۶ـ۵ـ 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.

درنتیجهٔ این دو پدیده و مواردی که در بالا ذکر شد، یک موج الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود که در فضا منتشر می‌شوند (شکل ۶ـ۵).

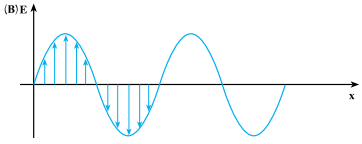
موج های الکترومغناطیسی نیز، مانند موج‌های مکانیکی، در زمان و مکان تغییر می‌کنند، با این تفاوت که در موج‌های مکانیکی ذره‌های تشکیل دهندهٔ محیط نوسان می کنند و در موج‌های الکترومغناطیسی، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در هر نقطه از فضا به‌طور نوسانی تغییر می‌کنند. همین موضوع سبب می‌شود که

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

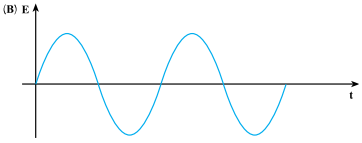
برای بیان چگونگی انتشار موج‌های الکترومغناطیسی نیز می‌توانیم، همان‌طور که در مورد موج‌های مکانیکی انجام دادیم، از نمودارهای میدان‌های الکتریکی (و یا مغناطیسی) برحسب مکان یا زمان استفاده کنیم. ابتدا تغییرات میدان الکتریکی را توصیف می‌کنیم.

یک موج الکترومغناطیسی را در نظر می‌گیریم که در جهت محور x منتشر می‌شود. نمودار میدان الکتریکی برحسب مکان این موج در شکل ۶ـ۶ 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 ۶ـ۷ 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 ۶ـ۶ و ۶ـ۷ به دست خواهد آمد.



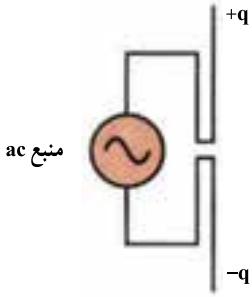
شکل ۶ـ۶ـ نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) برحسب مکان، یک موج الکترومغناطیسی در امتداد محور x، در یک لحظه از زمان.



شکل ۶ـ۷ـ نمودار میدان الکتریکی (مغناطیسی) برحسب زمان، یک موج الکترومغناطیسی در یک نقطه از محور x.

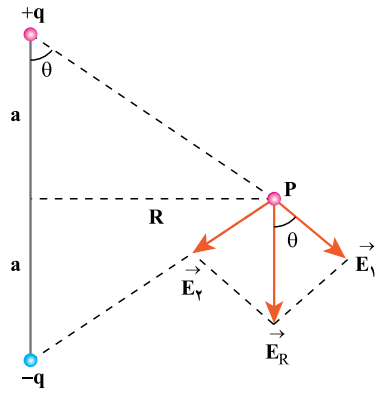
شکل ۶

دوقطبی الکتریکی نوسانی نمونهٔ ساده‌ای از یک آنتن است. این آنتن یک زوج بار الکتریکی است که به‌طور سینوسی تغییر می‌کند و در هر لحظه بارها هم‌اندازه و دارای علامت مخالف هستند. یک بار می‌تواند $q=Q\sin\omega t$ و بار دیگر می‌تواند $-q=-Q\sin\omega t$ باشد. آنتن دوقطبی را به شیوه‌های مختلفی می‌توان ساخت. یک راه که برای بسامدهای رادیویی خوب کار می‌کند اتصال دو سیم رسانا به پایانه‌های یک منبع ac مطابق شکل ۷ است. در این شکل، هر پایانهٔ منبع ac به یک سیم راست متصل شده است و دو سیم رسانا با هم آنتن را تشکیل داده‌اند. با نوسان ولتاژ منبع، بار روی دو رسانا نیز به نوسان درمی‌آید.



شکل ۷

اما پیش از آنکه به نقش امواج حاصل از این آنتن بپردازیم، خوب است میدان الکتریکی یک دوقطبی الکتریکی ساکن را در نقطه‌ای از فضا واقع بر عمودمنصف خطّ واصل دو بار به‌دست آوریم. شکل ۸ دو بار الکتریکی با بزرگی و علامت مخالف را نشان می‌دهد که به فاصله $d = 2a$ از یکدیگر قرار گرفته‌اند. می‌خواهیم میدان الکتریکی را در نقطهٔ P به فاصلهٔ R از مرکز دوقطبی محاسبه کنیم.



شکل ۸

همان‌طور که از تقارن شکل مشخص است، مؤلفه‌های افقی میدان الکتریکی یکدیگر را خنثی می‌کنند و میدان الکتریکی در سوی منفی محور y قرار دارد. می‌خواهیم بزرگی این میدان برایند را محاسبه کنیم. بدیهی است که بزرگی میدان‌های $\vec{E}_1$ و $\vec{E}_2$ حاصل از بارهای q+ و q− برابر هم است و از روی شکل داریم :

$$|\vec{E}_1| = |\vec{E}_2| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0(a^2+R^2)}$$

و از آنجا میدان الکتریکی برایند که جمع مؤلفه‌های عمودی این دو میدان است، چنین می‌شود :

$$E_R = 2E_y = 2E_1\cos\theta$$

که در آن از روی شکل $\cos\theta = a/\sqrt{a^2+R^2}$ است. درنتیجه بزرگی میدان الکتریکی برایند چنین می‌شود :

$$E_R = \frac{2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{(a^2+R^2)}\frac{a}{\sqrt{a^2+R^2}}$$

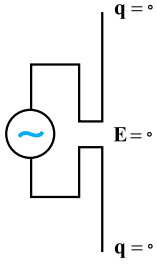
$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2aq}{(a^2+R^2)^{3/2}}$$

که مرسوم است 2aq را با P نمایش دهند و آن را بزرگی گشتاور دوقطبی الکتریکی می‌نامند (جهت گشتاور دوقطبی الکتریکی از سوی بار منفی به سمت بار مثبت است). بنابراین اگر R>>a باشد (یعنی در فواصل دور)، میدان الکتریکی برایند چنین می‌شود :

$$E \cong \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{P}{R^3}$$

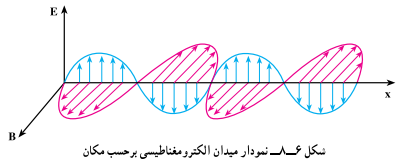
که همان‌طور که دیدیم جهت آن رو به پایین، در سوی منفی محور y است.

اکنون می‌خواهیم از این رابطه برای بررسی نقش امواج حاصل از یک آنتن دوقطبی استفاده کنیم. در اینجا باید به چند نکته اشاره کنیم. نخست، و مهم‌ترین آنها، این است که رابطهٔ بالا به‌ازای R >> a به‌دست آمد. یعنی ما تحلیل خود را در نقاط دور از آنتن (دور در مقایسه با ابعاد آنتن) متمرکز کنیم. نقش تابشی حاصل از یک آنتن دوقطبی درحالت کلی بسیار پیچیده می‌شود (دانستنی ۶ــ۴ را ببینید). دوم آنکه تغییر بزرگی میدان الکتریکی حاصل از آنتن در R ثابت بررسی می‌شود. یعنی تغییر بزرگی میدان‌های الکتریکی ناشی از تغییر R نیست، بلکه ناشی از تغییر بار q است که به‌طور سینوسی تغییر می‌کند (به معادلهٔ میدان الکتریکی نگاه کنید. E متناسب با q است). با این اوصاف به تحلیل خود می‌پردازیم. در لحظهٔ t = ۰، بار برابر با صفر است و بنابراین میدان الکتریکی نیز برابر با صفر است و چنین شکلی داریم :



شکل ۹ــ الف

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 ۶ــ۱

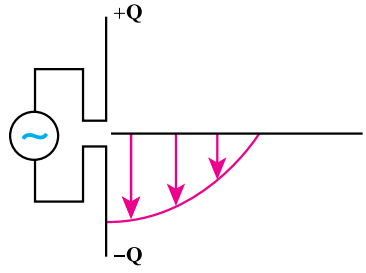
با توجه به شکل ۶ــ۵ توضیح دهید که موج‌های الکترومغناطیسی طولی‌اند یا عرضی؟

۶ــ۲ــ 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 :

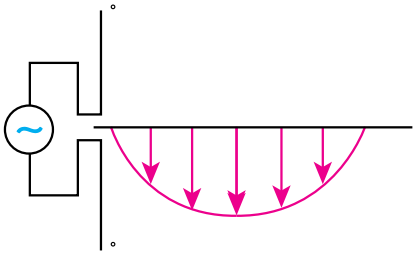
$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \qquad (۶ــ۱)$$

مقدار $\sin\omega T$ پس از $\frac{۱}{۴}$ دورهٔ تناوب (T/۴) به بیشینهٔ خود می‌رسد و بنابراین شکل میدان الکتریکی از $t = ۰$ تا $t = T/۴$ چنین می‌شود :



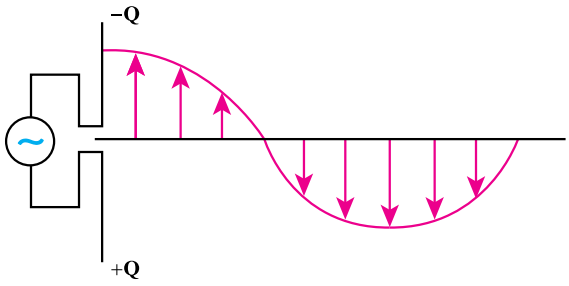
شکل ۹ــ ب

در زمان $t = T/۲$ مقدار $\sin\omega t$ دوباره به صفر می‌رسد. بنابراین مقدار بار (و درنتیجه میدان الکتریکی) از لحظهٔ $t = T/۴$ تا $t = T/۲$ به سمت صفر میل می‌کند :



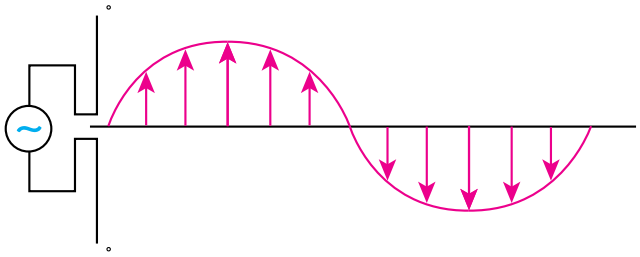
شکل ۹ــ پ

در زمان $t = ۳T/۴$ مقدار $\sin\omega t$ دوباره به مقدار بیشینهٔ خود می‌رسد. ولی توجه کنید که در این وضعیت به‌دلیل تغییر بارها، جهت میدان الکتریکی عوض می‌شود :



شکل ۹ــ ت

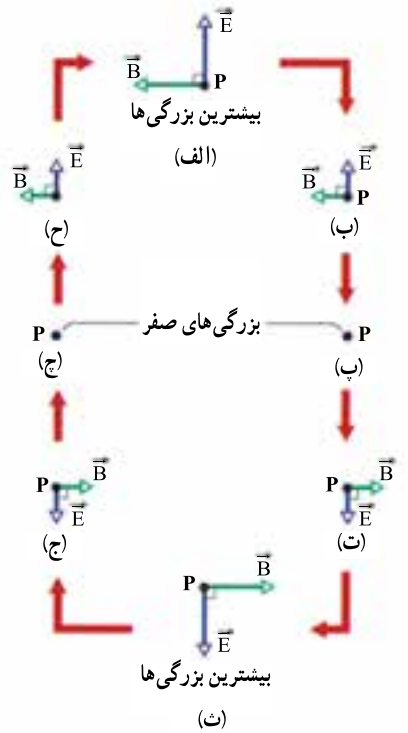
و بالاخره در $t = T$ مقدار $\sin\omega t$ دوباره صفر می‌شود و بنابراین شکل کلی میدان الکتریکی در یک دورهٔ تناوب کامل چنین می‌شود.



شکل ۹ــ ث

بنابراین، نتیجه یک موج پیشرونده است. توجه کنید که شکل‌های کتاب با یک اختلاف فاز $\pi/۲$ رسم شده‌اند، ولی تحلیل ساده‌تر همان است که در اینجا اشاره شد و درنتیجهٔ کلی هیچ تفاوتی حاصل نمی‌شود.

همان‌طور که دیدیم، چون بزرگی و جهت گشتاور دوقطبی الکتریکی تغییر می‌کند، بزرگی و جهت میدان الکتریکی حاصل از آن نیز تغییر می‌کند. همچنین، چون جریان تغییر می‌کند، بزرگی و جهت میدان مغناطیسی حاصل از جریان نیز تغییر می‌کند. تغییر توأمانِ این میدان‌ها تشکیل موجی الکترومغناطیسی را می‌دهد که با سرعت نور c از آنتن دور می‌شود. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که چگونه میدان الکتریکی $\vec{E}$ و میدان مغناطیسی $\vec{B}$ با زمان تغییر می‌کنند.



شکل ۱۰

چند مشخصهٔ بارز این شکل به این قرارند :

۱ــ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی $\vec{E}$ و $\vec{B}$ همواره عمود بر جهتی هستند که موج حرکت می‌کند. بنابراین، موج عرضی است.

۲ــ میدان الکتریکی همواره عمود بر میدان مغناطیسی است.

۳ــ ضریب برداری $\vec{E}\times\vec{B}$ جهت حرکت موج را نشان می‌دهد.

۴ــ میدان‌ها به‌طور سینوسی تغییر می‌کنند. به‌علاوه میدان‌ها با بسامد یکسان و همفاز تغییر می‌کنند.

با توجه به این مشخصه‌ها، مثلاً در دستگاه مختصاتی راستگرد می‌توانیم فرض کنیم که موج الکترومغناطیسی در سوی مثبت محور x حرکت می‌کند، درحالی که میدان الکتریکی در جهت موازی محور y و درنتیجه میدان مغناطیسی در جهت موازی محور z نوسان می‌کند. آنگاه می‌توانیم میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را به‌صورت توابعی سینوسی از مکان x (در طول مسیر موج) و زمان t چنین بنویسیم :

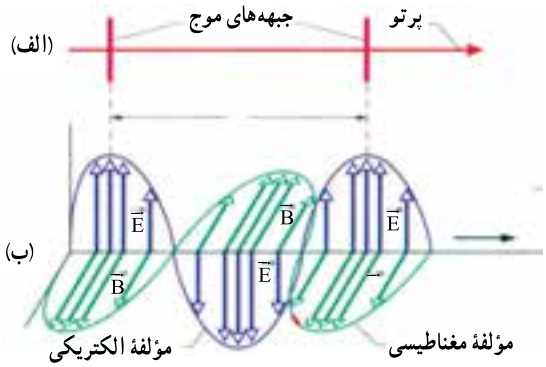
$$E = E_m \sin(kx - \omega t)$$

$$B = B_m \sin(kx - \omega t)$$

که در آن E_m و B_m دامنهٔ میدان‌ها، و ω و k به‌ترتیب بسامد زاویه‌ای و عدد موج هستند. درواقع معادلهٔ اول، مؤلفهٔ میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی و معادلهٔ دوم مؤلفهٔ مغناطیسی این موج است که البته همان‌طور که پیشتر دیدیم این دو مؤلفه نمی‌توانند به‌طور مستقل وجود داشته باشند، چرا که تغییر هرکدام دیگری را القا می‌کند. نشان داده می‌شود که یک موج الکترومغناطیسی با سرعت $c = 1/\sqrt{\varepsilon_\circ \mu_\circ}$ حرکت می‌کند که برابر با نسبت دامنهٔ میدان‌های الکترومغناطیسی نیز هست.

مانند شکل ۱۱ موج الکترومغناطیسی را می‌توانیم با یک پرتو (یک خطّ جهت‌مند که جهت حرکت موج را نشان می‌دهد) یا جبهه‌های موج (سطوح مجازی‌ای که روی آنها موج دارای بزرگی میدان الکتریکی یکسانی است)، و یا با هر دو نمایش دهیم.

در شکل ۱۱ــالف یک موج الکترومغناطیسی با یک پرتو و دو جبههٔ موج نشان داده شده است. جبهه‌های موج به اندازهٔ یک طول موج λ از هم فاصله دارند. همچنین می‌توانیم موج را مانند شکل ۱۱ــب نمایش دهیم که بردارهای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی موج را در یک لحظهٔ معین نشان می‌دهد. منحنی‌هایی که از نوک بردارها می‌گذرند نوسان‌های سینوسی را نمایش می‌دهند. مؤلفه‌های موج‌های $\vec{E}$ و $\vec{B}$ همفاز، عمود بر یکدیگر، و عمود بر جهت حرکت موج هستند.



شکل ۱۱

در تعبیر شکل (ب) باید توجه کنید که شکل با موج عرضی یک طناب تفاوت‌هایی دارد. در لحظهٔ نشان داده شده، هریک از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی دارای بزرگی و جهت معینی در هر نقطه از محور x هستند (ولی همواره عمود بر این محورند). برای این کمیت‌های برداری از جفت پیکان‌هایی در هر نقطه استفاده کرده‌ایم و بنابراین برای نقاط مختلف، پیکان‌هایی با طول‌های متفاوت رسم شده است که همگی در جهت دور شدن از محور x هستند. ولی پیکان‌ها فقط مقادیر میدان را در نقاط روی محور x نشان می‌دهند. نه پیکان‌ها، نه منحنی‌های سینوسی، و نه پیکان‌هایی که نقاط روی محور x را به نقاطی بیرون از این محور متصل می‌کنند، حرکت جانبی چیزی را نشان نمی‌دهند.

شکل‌هایی مانند شکل ۱۱ به ما کمک می‌کنند که تصوری از چیزی داشته باشیم که در واقع وضعیت پیچیده‌ای است. نخست میدان مغناطیسی را درنظر بگیرید. چون این میدان به‌طور سینوسی تغییر می‌کند، یک میدان الکتریکی متعامد القا می‌کند که آن نیز به‌طور سینوسی تغییر می‌کند. ولی چون این میدان الکتریکی به‌طور سینوسی تغییر می‌کند، یک میدان مغناطیسی متعامد القا

می‌کند که آن نیز به‌طور سینوسی تغییر می‌کند و الی آخر. این دو میدان دائماً از طریق القا یکدیگر را خلق می‌کنند. تغییرات سینوسی حاصل در میدان‌ها به‌صورت یک موج حرکت می‌کند که همان موج الکترومغناطیسی (EM) است. بدون چنین نتیجهٔ شگفت‌انگیزی نمی‌توانستیم ببینیم؛ درواقع چون برای حفظ دمای کرهٔ زمین به امواج الکترومغناطیسی حاصل از خورشید نیاز داریم، بدون این نتیجه حتی نمی‌توانستیم وجود داشته باشیم.

امواج مکانیکی به یک محیط (مقداری ماده) نیاز دارند که از طریق آن یا در راستای آن حرکت کنند. موج‌های عبوری در هوا و در طول یک ریسمان از این دسته‌اند. ولی یک موج الکترومغناطیسی به طرز شگفت‌انگیزی متفاوت است، چرا که برای حرکت خود نیاز به محیط ندارد. درواقع، گرچه این موج می‌تواند در محیطی مانند هوا یا شیشه حرکت کند، با این حال می‌تواند در فضای خلأ بین یک ستاره و ما نیز در حرکت باشد. سرعت امواج الکترومغناطیسی (یا امواج نوری یا به‌طور ساده‌تر نور) صرف‌نظر از چارچوب مرجعی که در آن اندازه‌گیری می‌شود، مقدار یکسانی دارد. اگر باریکهٔ نوری را در راستای یک محور گسیل کنید و از چند ناظر بخواهید که سرعت آن را درحالی که با سرعت‌های مختلف در جهت نور و یا در خلاف جهت آن حرکت می‌کنند، اندازه بگیرند همگی سرعت یکسانی برای نور به‌دست می‌آورند که این نتیجه‌ای شگفت‌انگیز و کاملاً متفاوت با چیزی است که ناظرها برای نوع موج دیگری به‌دست می‌آورند. برای سایر امواج، تندی ناظرها نسبت به موج، روی اندازه‌گیری آنها تأثیر می‌گذارد.

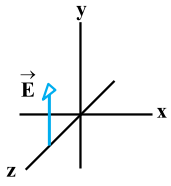
امروزه متر به‌گونه‌ای تعریف شده است که سرعت نور (هر موج الکترومغناطیسی) در خلأ دارای مقدار دقیق زیر باشد :

$$c = ۲۹۹۷۹۲۴۵۸ \, m/s$$

که می‌شود از آن به‌عنوان یک معیار استفاده کرد. در واقع، اگر بخواهید زمان حرکت یک پالس (تپ) نوری را از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر اندازه بگیرید، واقعاً لازم نیست سرعت نور را اندازه‌گیری کنید؛ کافی است مسافت بین آن دو نقطه را اندازه بگیرید.

مثال پیشنهادی

شکل ۱۲ میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی را در یک نقطهٔ معین و یک زمان خاص نشان می‌دهد. موج، در سوی منفی محور z حرکت می‌کند. جهت میدان مغناطیسی موج در آن نقطه و آن لحظه چگونه است؟



شکل ۱۲

پاسخ : با توجه به این که میدان الکتریکی در سوی مثبت محور y قرار دارد، میدان مغناطیسی باید در سوی مثبت محور x باشد تا موج الکترومغناطیسی در سوی منفی محور z حرکت کند. چرا که جهت انتشار موج از ضرب خارجی $\vec{E}\times\vec{B}$ حاصل می‌شود.

مثال پیشنهادی

بسامد f، طول موج λ و سرعت انتشار هر موج الکترومغناطیسی با رابطهٔ آشنای $c = \lambda f$ به‌هم مربوط می‌شوند. به ازای بسامد برق شهر $f = ۵۰ \, Hz$، بسامد نوعی امواج رادیویی FM (۱۰۰MHz)، و بسامد نوعی امواج تلفن همراه (۸۵۰MHz)، طول موج آنها را محاسبه کنید.

پاسخ : طول موج به ازای $f = ۵۰ \, Hz$ برابر است با :

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{۳\times۱۰^{۸} \, m/s}{۵۰ \, s^{-۱}} = ۶\times۱۰^{۶} \, m = ۶۰۰۰ \, km$$

که این در حدود شعاع کرهٔ زمین است! برای موجی با این بسامد، حتی فواصل چند کیلومتری نیز کسر کوچکی از طول موج است. در حالی که به ازای بسامد $f = ۱۰^{۸}Hz$ امواج رادیویی داریم :

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{۳\times۱۰^{۸} m/s}{۱۰^{۸} s^{-۱}} = ۳m$$

که در فاصله‌ای متوسط، چند طول موجِ کامل جای می‌گیرند. و به همان ترتیب برای بسامد $f = ۸/۵ \times ۱۰^{۸}Hz$ امواج تلفن همراه داریم :

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{۳\times۱۰^{۸} m/s}{۸/۵\times۱۰^{۸} Hz} = ۰/۳۵m$$

دانستنی ۶ــ۴

نقش تابشی آنتن دوقطبی الکتریکی در حالت کلی

نقش تابشی آنتن دوقطبی الکتریکی که در کتاب بحث شده است برای نقاط دور از آنتن است و نیز فرض می‌شود میدان صرفاً در نقاط عمود بر محور مرکزی آنتن وجود دارد. در این دانستنی نقش تابش آنتن دوقطبی الکتریکی در حالت کلی بررسی می‌شود.

دانستنی ۶ــ۵

امواج الکترومغناطیسی ایستاده

امواج الکترومغناطیسی نیز، می‌توانند مانند هر موجی بازتابیده شوند و با امواج ورودی تشکیل امواج ایستاده بدهند. در این دانستنی به چگونگی تشکیل امواج الکترومغناطیسی ایستاده و یکی از کاربردهای آن در اجاق‌های مایکروویو (میکروموج) می‌پردازیم.

۶ــ۳ــ طیف موج‌های الکترومغناطیسی

همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، امروزه یک طیف گسترده از امواج الکترومغناطیسی را می‌شناسیم. در مقیاس طول موج نشان داده شده در شکل (و نیز در مقیاس بسامد متناظر آن)، هر نشانهٔ مقیاس نشان‌دهندهٔ یک تغییر با ضریب ۱۰ در طول موج (و بسامد متناظر) آن است. این مقیاس از دو انتها باز است. امواج الکترومغناطیسی هیچ محدودهٔ ذاتی بالا و پایینی ندارند. طیف امواج الکترومغناطیسی، شامل امواج رادیویی و تلویزیونی، میکروموج، نور مرئی، تابش‌های فروسرخ و فرابنفش، پرتوهای X و گاما است. تمام این امواج به رغم تفاوت فراوان در کاربردها و روش‌های تولیدشان، امواجی الکترومغناطیسی هستند و همگی با سرعت نور در خلأ حرکت می‌کنند. هیچ گافی در طیف امواج الکترومغناطیس وجود ندارد.

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 $\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}\ T.m/A$ و $\varepsilon_0 \simeq 8/85\times10^{-12}\ C^2/N.m^2$ است.
با قرار دادن مقادیر بالا در رابطهٔ ۶ــ۱ سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیس در خلأ به‌دست می‌آید :

$$c = \frac{۱}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = \frac{۱}{\sqrt{۸/۸۵\times۱۰^{-۱۲}\times۴\pi\times۱۰^{-۷}}} \simeq ۳\times۱۰^{۸} m/s$$

که این مقدار برابر سرعت انتشار نور در خلأ است.

۶ــ۳ــ 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 ۶ــ۱ 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 ۶ــ۹ 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.

۱۶۸

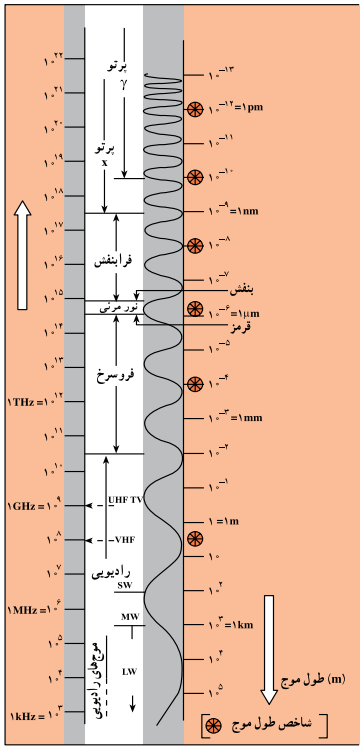
جدول ۶ــ۱ نمونه تولید، آشکارسازی و کاربرد طیف موج‌های الکترومغناطیسی

نام و حدود طول موج	چشمه	وسایل آشکارسازی	بعضی از ویژگی‌های خاص و کاربرد
پرتو گاما (γ) $1\,Pm = 10^{-12}\,m$	هسته مواد رادیواکتیو و پرتوهای کیهانی	شمارش‌گر گایگر-مولر و فیلم عکاسی	فوتون‌های با انرژی بسیار بالا و با قدرت نفوذ بسیار زیاد، خیلی خطرناک کاربرد: باقتهای سرطانی را از بین می‌برد، برای پیداکردن ترک در فلزات، برای ضدعفونی‌کردن تجهیزات و وسایل
پرتو ایکس (X) $100\,Pm = 10^{-10}\,m$	لامپ پرتو X	فیلم عکاسی و صفحهٔ فلوئورسان	فوتون‌های بسیار پرانرژی و با قدرت نفوذ زیاد، خیلی خطرناک کاربرد: استفاده در پرتونگاری، استفاده در مطالعهٔ ساختار بلورها، معالجهٔ بیماری‌های پوستی، استفاده در پرتو درمانی
فرابنفش (UV) $10\,nm = 10^{-8}\,m$	خورشید، جسم‌های خیلی داغ، جرقهٔ الکتریکی، لامپ بخار جیوه	فیلم عکاسی، فوتوسل	ویژگی‌ها: توسط شیشه جذب می‌شود، سبب بسیاری از واکنش‌های شیمیایی می‌شود، باخته‌های زنده را از بین می‌برد. کاربرد: لامپ‌های UV در پزشکی
نور مرئی $400\,nm = 4\times10^{-7}\,m$ (میز)	خورشید، جسم‌های داغ، لیزرها	چشم، فیلم عکاسی، فوتوسل	ویژگی‌ها: در دیدن اجسام نقش اساسی دارد، برای رشد گیاهان و عمل فوتوسنتز نقش حیاتی دارد. کاربرد: در سیستم‌های مخابراتی (لیزر و تارهای نوری) مورد استفاده قرار می‌گیرد.
فروسرخ (IR) $100\,\mu m = 10^{-4}\,m$	خورشید، جسم‌های گرم و داغ	فیلم‌های مخصوص عکاسی	ویژگی: همگامی که جذب می‌شود، پوست را گرم می‌کند. کاربرد: برای گرم‌کردن، برای فیلم‌برداری و عکاسی در مه و تاریکی، عکاسی IR 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

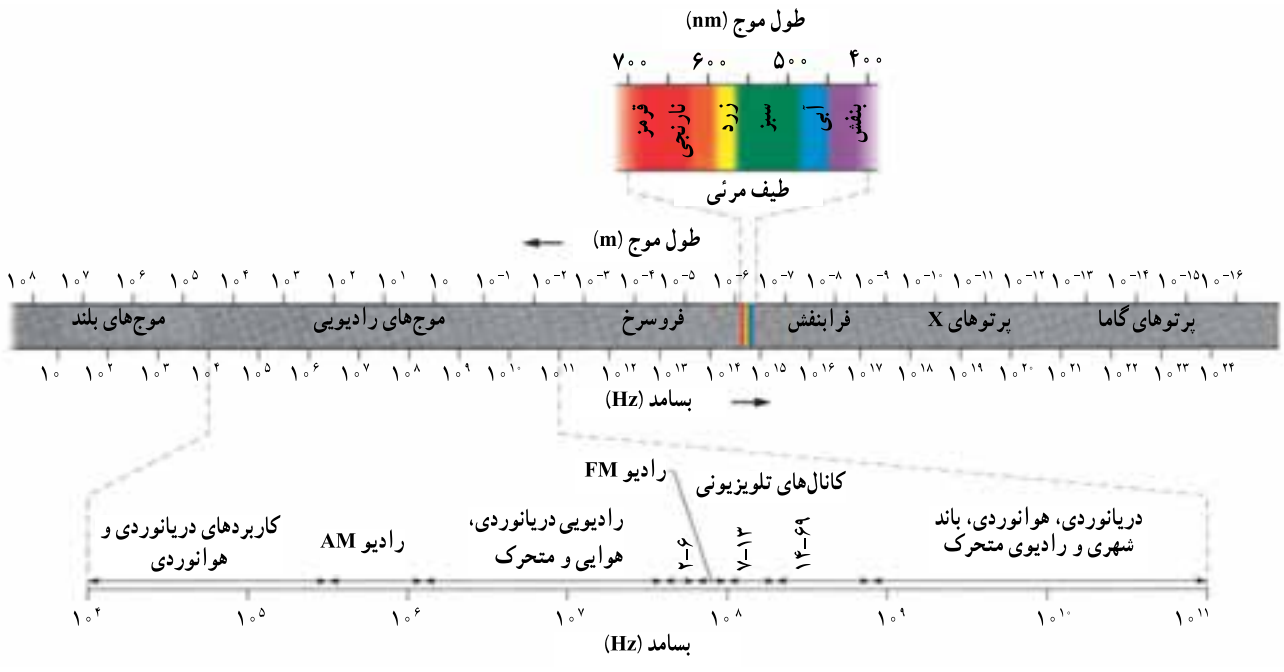
پرسش ۶ــ۲

با استفاده از شکل ۶ــ۹ موج‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی را به ترتیب افزایش طول موج، نام ببرید.

در شکل ۶ــ۹ 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.

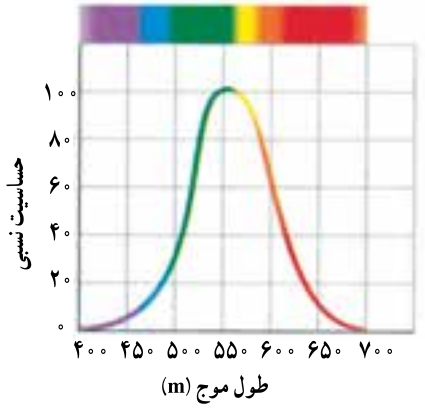


شکل ۶ــ۹ــ طیف موج‌های الکترومغناطیسی



شکل ۱۳

حس بینایی تنها بخش بسیار کوچکی از این طیف را می‌تواند تشخیص دهد. این بخش، همان نور مرئی است که طول موج آن حدوداً بین ۴۰۰nm و ۷۰۰nm است و بسامدهای متناظر آن $۷/۵ \times ۱۰^{۱۴}Hz$ و $۴/۳ \times ۱۰^{۱۴}Hz$ می‌شود. بخش‌های مختلف طیف مرئی رنگ‌های مختلفی را به انسان القا می‌کنند. شکل ۱۴ حساسیت نسبی چشم انسان به نور را برای طول موج‌های مختلف نشان می‌دهد. مرکز ناحیهٔ مرئی حدوداً ۵۵۵nm است که حساسیتی موسوم به زرد ــ سبز را ایجاد می‌کند. همان‌طور که می‌بینیم منحنی حساسیت چشم در هر دو طوح موج بلند و کوتاه به‌طور مجانبی به صفر میل می‌کند، ولی اگر شدت‌ها به حدّ کافی زیاد باشد چشم می‌تواند آن‌ها را آشکار کند. نور سفید معمولی تمام طول موج‌های مرئی را در بر دارد. با استفاده از چشمه‌ها یا صافی‌های مخصوصی می‌توان نوار باریکی از طول موج‌ها را انتخاب کرد که به چنین نوری تکفام گفته می‌شود. نور کاملاً تکفام که تنها یک طول موج خاص را دارد یک ایده‌آل دست نیافتنی است. وقتی در یک آزمایش از نور تکفامی با مثلاً $\lambda = ۵۰۰nm$ صحبت می‌کنیم، منظورمان نوار باریکی حول ۵۰۰nm است. نور لیزر از نورهای دیگر تکفام‌تر است.



شکل ۱۴

اکنون می‌خواهیم نواحی اصلی طیف الکترومغناطیسی را بررسی کنیم.

نواحی اصلی طیف الکترومغناطیسی

رادیویی AM : پایین‌ترین بسامدهایی که در عمل به‌کار رفته‌اند در فرستندهٔ رادیویی به‌کار می‌روند. این بسامدها که به راحتی تولید می‌شوند، از لحاظ تاریخی جزء اولین بسامدهای تولید شده هستند. امواج الکترومغناطیسی با بسامدهای بسیار پایین و طول موج‌های بسیار بلند را خطوط انتقال نیروی ac تولید می‌کنند و یکی از علل اتلاف انرژی در این خطوط هستند.

رادیویی موج کوتاه : این نوع ارسال امواج را به این دلیل که طول موج امواج مورد استفادهٔ آنها کوتاه‌تر از طول موج مورد استفادهٔ رادیویی تجارتی است موج کوتاه گفته‌اند. این امواج EM برای هدف‌های ارتباطی مختلفی (از قبیل رادیو پلیس، باند خدمات خصوصی شهری و جزء آن) به‌کار می‌روند. برد مؤثر رادیویی موج کوتاه گاهی کوچکتر از رادیو AM است، زیرا هرچه طول موج کوتاه‌تر باشد موانع راحت‌تر آن را سد می‌کنند. طول موج‌های بلندتر به وسیلهٔ موانع بزرگ آسان‌تر پراشیده می‌شوند. اما امواج کوتاه رادیویی گاهی با بازتاب از لایهٔ بالایی جو می‌توانند به فواصل دور برسند بدون این که موانع زمینی مزاحمتی برای آنها ایجاد کنند.

مثال ۶ــ۱

محدودهٔ طول موج، امواج الکترومغناطیسی مرئی از ۰/۴ میکرون ($۱ \text{ میکرون} = ۱۰^{-۶}m$) 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 $4/3 \times 10^{14}Hz$ تا $7/5 \times 10^{14}Hz$ است.

فعالیت ۶ــ۱

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 معینی بر سطح آب درون یک ظرف همزمان ضربه بزنند،

رادیویی FM و تلویزیونی: بسامدهای تمامی باند رادیویی الکترومغناطیسی بین بسامدهای کانال‌های تلویزیونی ۶و۷ قرار می‌گیرد. امواج تلویزیونی از آنتن‌های بسیار بلند استفاده می‌کنند زیرا یک خط دید مستقیم وواضح بین آنتن پخش و گیرنده‌ها مورد نیاز است. در اینجا نیز مسئله از این قرار است که طول موج امواج تلویزیونی آنقدر کوتاه است که بیشتر مانند پرتوهای مستقیم عمل می‌کنند. این طول موج‌های کوتاه ساختمان‌ها را دور نمی‌زنند و از فراز کوه‌ها نمی‌گذرند، ولی به راحتی بازمی‌تابند و می‌توان تداخل حاصل از بازتاب‌های ناشی از یک هواپیمای عبوری و سایر موانع را به کمک آن‌ها مشاهده کرد.

میکروموج‌ها: دلیل میکروموج نامیدن این موج‌ها این است که طول موج آنها در مقایسه با طول موج امواج AM رادیو بسیار کوتاه است. از این امواج نیز برای ارتباطات نظیر ارتباط به‌وسیلهٔ تلفن راه دور استفاده می‌شود. سیستم‌های راداری، با اندازه‌گیری زمان پژواک موج، میکروموج‌ها را برای تعیین فواصل اجسام، مانند ابرها یا هواپیماها، به‌کار می‌برند. سرعت اجسامی چون اتومبیل را نیز می‌توان با مشاهدهٔ انتقال دوپلری میکروموج های بازتابیده اندازه گیری کرد. کاربرد جدیدتر این امواج، پختن غذا در اجاق‌های میکروموجی (مایکروویو) است. مولکول‌های آب موادغذایی با بسامدهای ناحیهٔ میکروموجی به تشدید درمی‌آیند. بنابراین غذا ترجیحاً انرژی میکروموج را جذب می‌کند و با روش بسیار مؤثرتری پخته می‌شود.

تابش فروسرخ: فروسرخ به معنی «زیر قرمز» و بسامد تابش فروسرخ کمتر از بسامد نور قرمز است. این تابش که عموماً براثر حرکت گرمایی تولید می‌شود یکی از مهم‌ترین امواج الکترومغناطیسی است که گرما را از طریق تابش انتقال می‌دهد. پوست بدن انسان تقریباً همهٔ امواج فروسرخ را که بر آن فرود می‌آید جذب و وجود آن را از طریق گرمای ایجاد شده احساس می‌کند. بخش عمده‌ای از تابش الکترومغناطیسی خورشیدی تابش فروسرخ است.

نورمرئی: نورمرئی، نواربارریکی ازامواج الکترومغناطیسی است که چشم عادی در مقابل آن واکنش می‌کند. در واقع شبکیه پایین‌ترین بسامدهای فرابنفش را احساس می‌کند. اما این بسامد قبل از رسیدن به شبکیه به وسیلهٔ قرنیه و عدسی چشم جذب می‌شوند. نور قرمز پایین‌ترین بسامد و بلندترین طول موج نور مرئی و نور بنفش بیشترین بسامد و کوتاه‌ترین طول موج نور مرئی را دارند. پرشدت‌ترین امواج الکترومغناطیسی که از خورشید گسیل می‌شوند در وسط طیف مرئی قرار دارند. طول موج نور مرئی به قدری کوچک است که نور به هنگام برهم‌کنش با اجسام ماکروسکوپیک مانند پرتو رفتار می‌کند.

تابش فرابنفش: این نوع تابش موجب قهوه‌ای شدن پوست، آفتاب سوختگی، و تقریباً تمامی انواع سرطان‌های پوست می‌شود. این تابش همچنین یک واکنش شیمیایی را در پوست برمی‌انگیزد و باعث تولید ویتامین D می‌شود. تابش فرابنفش (UV) می‌تواند یک عامل ضدعفونی مؤثر نیز باشد. بیشتر تابش فرابنفش گسیل شده از خورشید در لایهٔ اوزون قسمت بالای جو جذب می‌شود.

پرتوهای X: این پرتوها در گازهای فوق‌العاده داغ مانند سطح خورشید، و نیز در لامپ‌های پرتو کاتدی (CRT) به هنگام برخورد باریکهٔ الکترون با پرده تولید می‌شوند. چون پرتوهای X از لحاظ زیست‌شناختی خطرناک‌اند، تلویزیون، اسیلوسکوپ، پایانه‌های کامپیوتر و مانند آن را طوری می‌سازند که استفاده‌کنندگان در مقابل آنها حفاظت شوند. انجام این کار بسیار راحت است زیرا پرتوهای X ایجاد شده در این وسایل کم انرژی هستند و زیاد نافذ نیستند.

پرتوهای پرانرژی X در لامپ‌های پرتوX تولید می‌شوند و بسیار نافذند. بیشترین کاربرد آنها در تشخیص و درمان‌های پزشکی و آزمودن مواد در وسایلی چون آشکارسازهای شکستگی هواپیماست. لامپ‌های پرتو X نوعی CRT هستند با این تفاوت که باریکهٔ الکترون‌ها با ولتاژ بسیار بالاتری شتاب می‌گیرند و به‌جای یک پردهٔ پوشیده شده از فسفر، به‌سوی یک هدف فلزی پرتاب می‌شوند. خواص موجی پرتوهای X تنها زمانی اهمیت پیدا می‌کند که با اجسامی به اندازهٔ اتم یا مولکول برهم کنش می‌کنند و به همین دلیل است که آنها را به جای موج X، پرتو X می‌نامند.

پرتوهای گاما : این پرتوها تنها نوع امواج الکترومغناطیسی هستند که در هسته‌های اتم‌ها تولید می‌شوند و می‌توانند بسامدهای بالاتر و طول موج‌های کوتاه‌تری از پرتوهای X داشته باشند. خواص فیزیکی و خطرات زیست شناختی آن‌ها شباهت زیادی به پرتوهای X دارد، زیرا (به‌جز در مورد چشمه) در بسامدهای یکسان شبیه یکدیگرند. پرتوهای گاما در ستارگان، رآکتورهای هسته‌ای، بمب‌های هسته‌ای، و توسط برخی مواد پرتوزا تولید می‌شوند. این پرتوها گاهی در تشخیص و درمان پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تا اینجا تعدادی از ویژگی‌های تابش الکترومغناطیسی و ماهیت آنها را بررسی کردیم. در دانستنی ۶ــ۶ به کاربردهای پزشکی این امواج می‌پردازیم.

دانستنی ۶ــ۶

کاربردهای پزشکی امواج الکترومغناطیسی

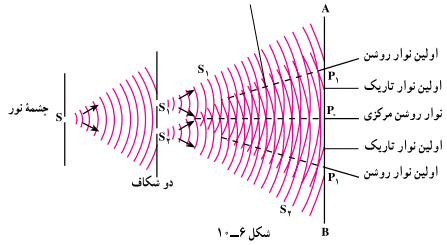
امواج الکترومغناطیسی کاربردهای فراوانی دارند که یکی از مهم‌ترین آنها در موارد پزشکی است. در این دانستنی به برخی از این کاربردها پرداخته شده است.

۶ــ۴ــ تداخل موج‌های نوری

وقتی چیزی را موج می‌نامیم منظور ما از موج چیست؟ همهٔ امواج از امواج صوتی گرفته تا امواج آب و نوسان‌های سیم گیتار، رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهند. یکی از مشخصه‌های یگانهٔ امواج، تداخل سازنده یا ویرانگر آنها به هنگام برهم نهش است. تداخل امواج آب، مانند شکل ۱۵ منظره‌ای عادی است. در بعضی جاها ستیغ‌ها (قله‌ها) بر ستیغ‌ها (قله‌ها) نهاده می‌شوند و در جاهایی دیگر پاستیغ‌ها (دره‌ها) بر پاستیغ‌ها (دره‌ها) قرار می‌گیرند.

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 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.



شکل ۶ــ۱۰

دو موجی که به نقطهٔ P روی محور تقارن دو شکاف می‌رسند، هم‌فازاند. زیرا آنها دو راه مساوی S_1P و S_2P را تا پرده پیموده‌اند. تداخل این دو موج سازنده است و درنتیجه 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 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 π باشد یعنی :

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

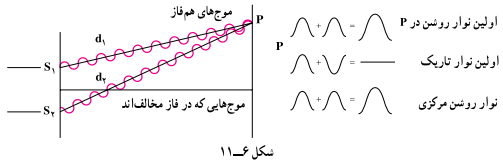
یا :

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

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

در این صورت دو پرتوی که به پرده می‌رسند هم‌فازاند 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 2π است و اولین نوار روشن در دو طرف نوار مرکزی به‌دست می‌آید و به همین ترتیب می‌توان نوارهای روشن بعدی را به‌ازای $n = 2, 3, \ldots$ به‌دست آورد.



شکل ۶ــ۱۱

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

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

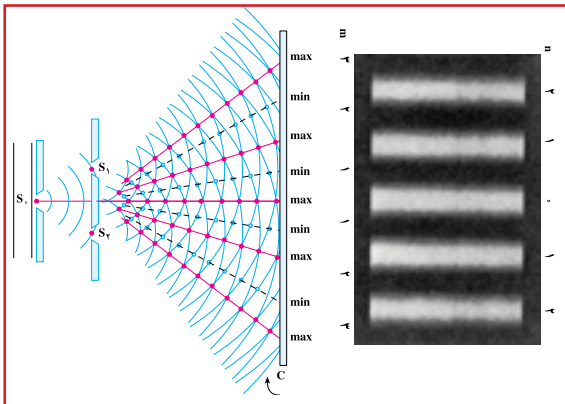
یا :

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

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

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.

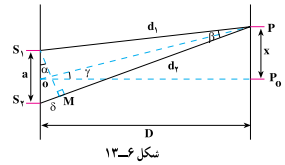
نوارهای روشن و تاریک را که روی پرده تشکیل می‌شوند طرح تداخلی می‌نامند. شکل ۶ــ۱۲ طرح تداخلی دو شکاف یانگ را نشان می‌دهد. در دو طرف شکل، شمارهٔ نوارهای روشن که با مقادیر مختلف n و شمارهٔ نوارهای تاریک که با مقادیر مختلف m داده می‌شوند نیز آمده است.



شکل ۶ـ۱۲

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_1 رسم می‌کنیم، دایره PS_2 را در نقطهٔ M قطع می‌کند. اختلاف راه نوری بین دو پرتو PS_2 و PS_1 برابر است با :

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



شکل ۶ـ۱۳

اگر فاصلهٔ پرده از صفحهٔ دو شکاف بسیار بزرگ‌تر از فاصلهٔ دو شکاف یعنی $D >> a$ باشد، زاویهٔ γ و نیز زاویهٔ β (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 α و γ با یکدیگر برابرند، درنتیجه :

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

چون زاویهٔ α کوچک است، داریم :

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

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 :

$$\lambda = \frac{xa}{nD} \qquad (۶ـ۶)$$

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

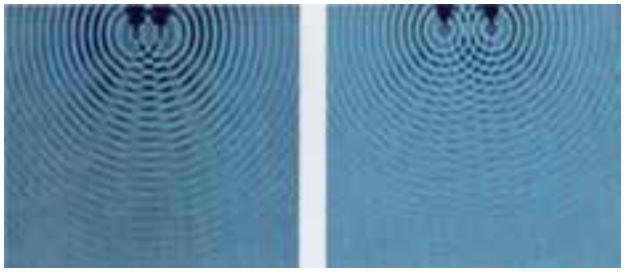
آزمایش یانگ را با نور زرد سدیم انجام داده‌ایم. فاصلهٔ دو شکاف یانگ از یکدیگر $a = ۱/۲mm$ و فاصلهٔ شکاف تا پرده ۱/۲m است. اگر فاصلهٔ نوار روشن بیستم از وسط نوار مرکزی ۱۱/۸ mm باشد، طول موج نور زرد سدیم چند متر است؟

پاسخ

با استفاده از رابطهٔ ۶ـ۶ داریم :

$$\lambda = \frac{ax}{nD} = \frac{۱/۲\times۱۰^{-۳}\times۱۱/۸\times۱۰^{-۳}}{۲۰\times۱/۲} \simeq ۵/۹\times۱۰^{-۷}m = ۰/۵۹\mu m$$

شکل ۱۵



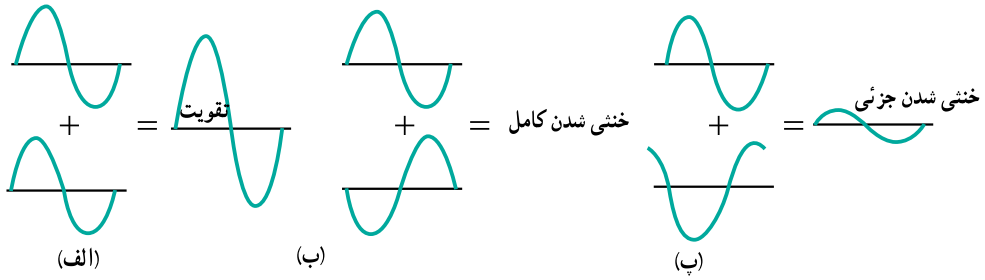
شکل ۱۶

یک جفت منبع موج که کنار هم قرار گرفته‌اند در شرایط کنترل شده، نقش‌های جالبی ایجاد می‌کنند. مثلاً نقش‌های شکل ۱۶ که از بالا عکسبرداری شده‌اند ناشی از قطره‌های آبی هستند که با بسامد کنترل‌شده در مخزن‌های کم‌عمق آب (تشتک‌های موج) فرومی‌ریزند. توجه کنید که ناحیه‌های تداخل سازنده و ویرانگر تا لبه‌های راست تشتک‌های موج گسترش یافته‌اند، که تعداد و اندازهٔ آنها به فاصلهٔ دو منبع از یکدیگر و طول موج آنها بستگی دارد.

تداخل‌های سازنده و ویرانگر در شکل ۱۷ مرور شده‌اند.

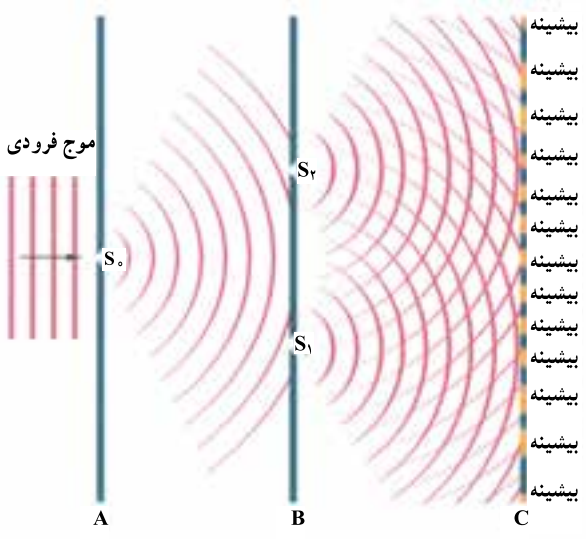
مشاهده می‌کنیم که برهم‌نهی یک جفت موج مشابه و همفاز بر یکدیگر موجی با همان بسامد و دامنه‌ای دو برابر ایجاد می‌کند. اگر امواج به اندازهٔ نیم طول موج اختلاف فاز داشته باشند، برهم‌نهی آنها باعث خنثی شدن کامل می‌شود و اگر اختلاف فاز آنها مقادیر دیگری باشد، خنثی شدن جزئی صورت می‌گیرد.

گرچه ماهیت موجی نور قرن‌ها فکر بشر را به خود مشغول کرده بود، اما نخستین بار این توماس یانگ فیزیکدان و پزشک انگلیسی بود که در سال ۱۸۰۱ با آزمایش تداخلی معروف خود، سرشت موجی نور را به‌طور قانع‌کننده‌ای نشان داد. یانگ دریافت



شکل ۱۷

نور با عبور از دو سوراخ ریز نزدیک به هم، بازترکیب می‌شود و فریزها(نوارها)ی تاریک و روشنی را روی پردهٔ پشت آن به‌وجود می‌آورد. فریزهای روشن وقتی تشکیل می‌شوند که ستیغ(قله) موج نور حاصل از یک سوراخ با ستیغ(قله) نور حاصل از سوراخ دیگر به‌طور همزمان به پرده برسند. فریزهای تاریک وقتی تشکیل می‌شوند که ستیغ (قله) یک موج با پاستیغ(دره) موج دیگر به‌طور همزمان به پرده برسند. شکل ۱۸ آرایش اصلی آزمایش یانگ را نشان می‌دهد. نور حاصل از یک چشمهٔ تکفام دور، شکاف S_0 را روی صفحهٔ A روشن می‌کند. سپس نور خروجی از این شکاف گسترده می‌شود و دو شکاف S_1 و S_2 را روی صفحهٔ B روشن می‌کند. گسترش نور حاصل از این دو شکاف، موج‌های دایره‌ای همپوشانی را به سمت پردهٔ C می‌فرستند، که در آن‌جا موج‌های حاصل از یک شکاف با موج‌های حاصل از شکاف دیگر تداخل می‌کنند. نقطه‌های تداخلی بیشینه ردیف‌هایی روشن ــ موسوم به نوارهای روشن یا فریزهای روشن ــ را تشکیل می‌دهند که روی پرده (به سمت داخل و بیرون صفحهٔ شکل) امتداد دارند. نقطه‌های تداخلی کمینه ردیف‌هایی تاریک ــ موسوم به نوارهای تاریک یا فریزهای تاریک ــ را تشکیل می‌دهند که در بین نوارهای روشن مجاور قرار دارند.

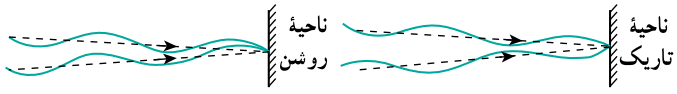


شکل ۱۸

شکل ۱۹

نقش فریزهای روشن و تاریک روی پرده را نقش تداخلی می‌نامند. شکل ۱۹ عکس بخشی از یک نقش تداخلی است که توسط ناظری دیده می‌شود که در سمت چپ پردهٔ C آرایش شکل ۱۸ ایستاده است.

در واقع فریزهای روشن وقتی به‌وجود می‌آیند که امواجی که از دو شکاف به نقطه روی پرده می‌رسند همفاز باشند. فریزهای تاریک ناشی از برهم‌نهی امواج ناهمفاز است (شکل ۲۰)



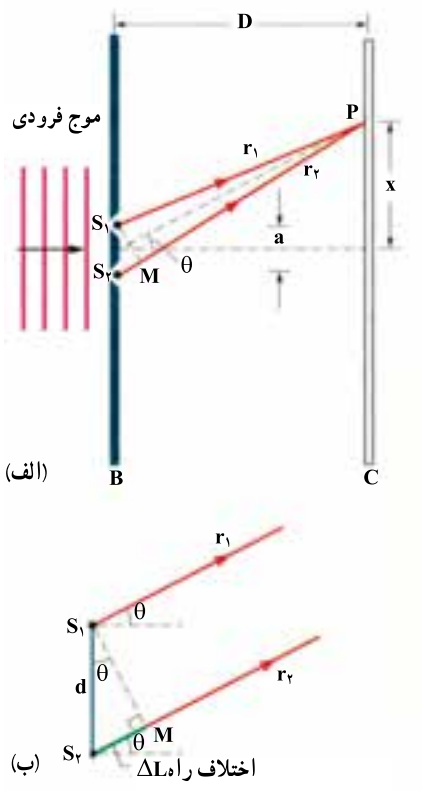
شکل ۲۰

مکان فریزها (نوارهای تداخلی)

چگونه می‌توان مکان فریزها را به دقت تعیین کرد؟ برای پاسخ به این پرسش از آرایش شکل ۲۱ الف استفاده می‌کنیم. موج تختی از نوری تکفام بر دو شکاف S_1 و S_2 روی صفحهٔ B می‌تابد. نور در شکاف‌ها گسترده می‌شود و نقشی تداخلی روی پردهٔ C ایجاد می‌کند. یک محور مرکزی از نقطهٔ وسط بین شکاف‌ها تا پردهٔ C به عنوان خطّ مرجع رسم می‌کنیم. سپس نقطهٔ دلخواه P را روی پرده در زاویهٔ θ نسبت به محور مرکزی، درنظر می‌گیریم. در این نقطه، موج پرتوی r_1 حاصل از شکاف پایین و موج پرتوی r_2 حاصل از شکاف بالا یکدیگر را قطع می‌کنند. این موج‌ها در هنگام عبور از دو شکاف همفازند، زیرا در محلّ شکاف‌ها آنها دقیقاً بخش‌هایی از موج فرودی یکسانی هستند. ولی وقتی آنها از شکاف‌ها گذشتند، باید مسیرهای متفاوتی را تارسیدن به نقطهٔ P طی کنند. اگر دو موج مسیرهایی با طول‌های متفاوت را طی کنند، اختلاف فاز بین این دو موج می‌تواند تغییر کند. این تغییر در اختلاف فاز ناشی از اختلاف راه ΔL در مسیرهایی است که موج‌ها طی می‌کنند. دو موج را که در ابتدا دقیقاً همفازند درنظر بگیرید که در مسیرهایی با اختلاف طول ΔL حرکت می‌کنند، و سپس به یک نقطهٔ مشترک می‌رسند. وقتی ΔL برابر با صفر یا مضرب درستی از طول موج‌ها باشد، موج‌ها دقیقاً به‌طور همفاز به نقطهٔ مشترک می‌رسند و در آن‌جا تداخلی کاملاً سازنده انجام می‌دهند. اگر این برای موج‌های پرتوهای r_1 و r_2 شکل ۳۴ برقرار باشد، آنگاه نقطهٔ P بخشی از یک فریز روشن است. ولی اگر ΔL مضرب فردی از نیم‌طول موج باشد، این موج‌ها دقیقاً به‌طور ناهمفاز به نقطهٔ مشترک می‌رسند و در آنجا تداخلی کاملاً ویرانگر انجام می‌دهند. اگر این برای موج‌های پرتوهای r_1 و r_2 شکل ۲۱ برقرار باشد، آنگاه نقطهٔ P بخشی از یک فریز تاریک است (البته همان‌طور که در شکل ۱۷ دیدیم، ممکن است وضعیت‌های میانه‌ای از تداخل هم داشته باشیم که در این وضعیت‌ها روشنایی در نقطهٔ P حالتی بینابینی دارد.) در هرحال، آنچه که در یک آزمایش دو شکاف تداخلی روی پرده دیده می‌شود، با اختلاف راه ΔL پرتوهایی که به آن نقطه می‌رسد، تعیین می‌شود.

مکان هر فریز روشن و هر فریز تاریک روی پرده را می‌توان با زاویهٔ θ نسبت به محور مرکزی آن فریز مشخص کرد. برای یافتن θ، باید رابطهٔ آن را با ΔL پیدا کنیم. این کار را با یافتن نقطهٔ M در امتداد پرتو r_1 شکل ۲۱ الف انجام می‌دهیم، طوری که طول مسیر از b تا P با طول مسیر از S_1 تا P برابر باشد. آنگاه اختلاف طول (راه) مسیر ΔL بین دو پرتو برابر با فاصلهٔ S_2M می‌شود. برای آنکه به چرایی این موضوع پی‌ببرید دایره‌ای به مرکز P و شعاع S_1P رسم کنید. این دایره مسیر S_2P را در نقطهٔ M قطع می‌کند. بنابراین S_1P و bM هر دو شعاع یک دایره هستند و اختلاف راه نوری دو پرتو S_1P و S_2P برابر S_2M می‌شود.

رابطهٔ بین S_2M و زاویهٔ θ پیچیده است، ولی اگر ترتیبی دهیم که فاصلهٔ D شکاف‌ها تا پرده خیلی بزرگ‌تر از فاصلهٔ a شکاف‌ها باشد، این رابطه را می‌توانیم به‌طور قابل ملاحظه‌ای ساده کنیم. آن‌گاه می‌توانیم پرتوهای r_1 و r_2 را تقریباً موازی با یکدیگر و در زاویهٔ θ نسبت به محور مرکزی درنظر بگیریم. همچنین می‌توانیم مثلث تشکیل شده از S_1 ، S_2 و M را با یک مثلث قائم‌الزاویه فرض کنیم و زاویهٔ داخل این مثلث در S_1 را تقریباً θ بگیریم (شکل ۲۱ــ ب).



شکل ۲۱

بنابراین، در این مثلث $\sin\theta = \Delta L/d$ است و داریم $\Delta L = d \sin\theta$. دیدیم که برای فریز روشن، ΔL باید صفر یا مضرب درستی از طول موج‌ها باشد. بنابراین شرط داشتن فریزهای روشن چنین می‌شود :

$$a \sin\theta = m\lambda \qquad m = ۰, ۱, ۲, \ldots$$

(فریزهای روشن ــ بیشینه‌ها)

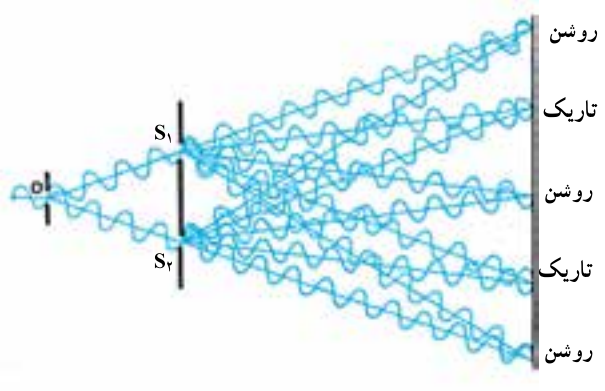
برای فریزهای تاریک، ΔL باید مضرب فردی از نصف طول موج باشد. بنابراین شرط داشتن فریزهای تاریک چنین می‌شود :

$$a \sin\theta = (m + \frac{۱}{۲})\lambda \qquad m = ۰, ۱, ۲, \ldots$$

(فریزهای تاریک ــ کمینه‌ها)

با این دو معادله می‌توان زاویهٔ θ تا هر فریز و در نتیجه مکان آن را تعیین کرد. افزون بر این، می‌توان از مقادیر m برای مشخص کردن فریزها استفاده کرد. مثلاً $m = ۰$ در معادلهٔ اول حاکی از آن است که یک فریز روشن در $\theta = ۰$ و بنابراین روی محور مرکزی وجود دارد. این بیشینهٔ مرکزی نقطه‌ای است که در آن موج‌هایی که از دو شکاف می‌رسند اختلاف راه $\Delta L = ۰$ و در نتیجه اختلاف فاز صفر دارند. یا به ازای $m = ۲$، فریزهای روشن در زاویهٔ $\theta = \sin^{-۱}(\frac{۲\lambda}{a})$ بالا و پایین محور مرکزی قرار دارند. موج‌ها با اختلاف راه $\Delta L = ۲\lambda$ و اختلاف فاز دو طول موج به این فریز می‌رسند. این دو فریز را «فریزهای روشن مرتبهٔ دوم» یا بیشینهٔ دوم می‌گویند. همچنین به ازای $m = ۱$ در معادلهٔ دوم به $\theta = \sin^{-۱}(\frac{۱/۵\lambda}{a})$ می‌رسیم. یعنی فریزهای تاریک در این زاویه، در بالا و پایین محور مرکزی قرار دارند. موج‌ها از دو شکاف با $\Delta L = ۱/۵\lambda$ و با اختلاف فاز ۱/۵ طول موج به این فریز می‌رسند. این فریزها را «فریزهای تاریک مرتبهٔ دوم» یا کمینهٔ دوم می‌گویند. زیرا آن‌ها فریز تاریک دوم نسبت به محور مرکزی هستند.

در شکل ۲۲ می‌بینیم که چگونه فاصلهٔ متفاوت شکاف‌ها تا پرده، نوارهای روشن و تاریک را به‌وجود می‌آورد. فاصلهٔ بیشینهٔ روشن مرکزی تا دو شکاف یکسان است. امواج به‌طور همفاز به آن می‌رسند و یکدیگر را تقویت می‌کنند. فریزهای تاریک دوطرف فریز مرکزی از آن‌رو به‌وجود می‌آیند که طول یک مسیر از مسیر دیگر نیم‌طول موج بلندتر (یا کوتاه‌تر) است. بنابراین امواج به اندازهٔ نیم‌طول موج ناهمفازند. دیگر فریزهای تاریک وقتی به‌وجود می‌آیند که اختلاف طول مسیرها مضرب فردی از نیم طول موج، یعنی $\frac{۳}{۲}$، $\frac{۵}{۲}$ و الی آخر باشند.



شکل ۲۲

مثال پیشنهادی

در شکل ۲۱ــ الف، ΔL (برحسب مضربی از طول موج) برای دو پرتو چقدر است، اگر نقطهٔ P الف) یک بیشینهٔ سوم و ب) یک کمینهٔ سوم باشد؟

پاسخ : توجه کنید که $m = ۰$ مربوط به فریز روشن مرتبهٔ اول نیست. بلکه صرفاً بیشینهٔ مرکزی است. بنابراین بیشینهٔ سوم به ازای $m = ۳$ به‌دست می‌آید و در نتیجه اختلاف راه دو پرتو $\Delta L = ۳\lambda$ است. ولی توجه کنید که فریزهای تاریک مرتبهٔ اول در $m = ۰$ ظاهر می‌شود. پس سومین کمینه مربوط به $m = ۲$ است و اختلاف راه مربوط به آن $(m + \frac{۱}{۲})\lambda = ۲/۵\lambda$ می‌شود.

اندازه‌گیری طول موج

با استفاده از آزمایش یانگ می‌توان طول موج نور را نیز اندازه‌گیری کرد. از هندسهٔ شکل ۲۱ــ الف درمی‌یابیم که فاصلهٔ یک بیشینهٔ فرضی که در ارتفاع x از محور مرکزی قرار گرفته است را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد :

$$\tan\theta = \frac{x}{D}$$

از طرفی برای بیشینه‌ها به رابطهٔ $d\sin\theta = m\lambda$ رسیدیم و از آنجا داریم :

$$\sin\theta = \frac{m\lambda}{d}$$

با توجه به اینکه زاویهٔ θ کوچک است $\sin\theta \approx \tan\theta$ است و داریم :

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

و از آنجا

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

بدیهی است که این رابطه برای کمینه ها به صورت زیردرمی‌آید :

$$\lambda = \frac{xa}{(m+\frac{1}{2})D}$$

مثال پیشنهادی

در شکل ۲۱ــ الف فاصلهٔ بین بیشینه‌های مجاور چقدر است؟ طول موج λ نور ۵۴۶nm، فاصلهٔ a شکاف‌ها ۰/۱۲mm، و فاصلهٔ D شکاف تا پرده ۵۵cm است. فرض کنید θ به حدّی کوچک است که بتوان از تقریب $\sin\theta \approx \tan\theta$ استفاده کرد.

پاسخ : دیدیم که در زاویه‌های کوچک به رابطهٔ $\lambda = \frac{xa}{mD}$ رسیدیم که در این رابطه x فاصلهٔ یک بیشینهٔ نوعی از مرکز نوار است. برای آن که بین دو بیشینهٔ مجاور تمایز قائل شویم یکی را با x_m و دیگری را با x_{m+1} نشان می‌دهیم. بنابراین برای x_m و x_{m+1} به ترتیب داریم :

$$x_m = \frac{mD\lambda}{a} \quad , \quad x_{m+1} = \frac{(m+1)D\lambda}{a}$$

فاصلهٔ بین بیشینه‌های مجاور از کم کردن این دو معادله حاصل می‌شود :

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{\lambda D}{a}$$

$$= \frac{(546\times10^{-9}\,m)(55\times10^{-2}\,m)}{0/12\times10^{-3}\,m} = 2/50\times10^{-3}\,m = 2/5mm$$

تا وقتی که a و θ کوچک هستند، فاصلهٔ فریزهای تداخلی مستقل از m است، یعنی تنها در این وضعیت است که فاصلهٔ فریزها از یکدیگر مساوی است.

توجه کنید، روابطی که در بالا به‌دست آوردیم به ازای $D >> a$ است. ولی اگر یک عدسی همگرا بین شکاف‌ها و پرده قرار دهیم و سپس پرده را به شکاف ها نزدیک کرده و به طرف کانون عدسی حرکت دهیم نیز این معادله ها برقرارند (در این صورت گفته می‌شود که پرده در فاصلهٔ کانونی قرار دارد؛ یعنی در صفحهٔ عمود بر محور مرکزی در کانون است.) یک خاصیت عدسی همگرا این است که تمام پرتوهایی را که موازی یکدیگرند در یک نقطه روی صفحهٔ کانونی خود متمرکز می‌کند. بنابراین، پرتوهایی که اکنون به هر نقطهٔ پرده (در صفحهٔ کانونی) می‌رسند، در هنگام ترک شکاف‌ها دقیقاً (و نه تقریباً) موازی هستند.

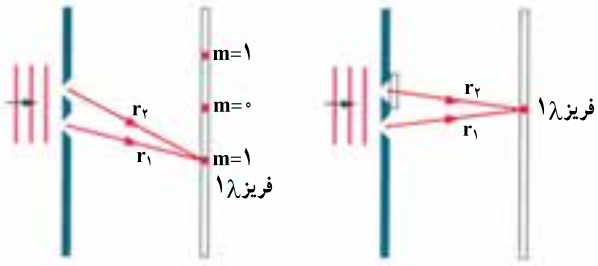
اکنون می خواهیم با بیان مثالی، تأثیر پوشاندن یکی از شکاف‌ها با ورقه‌ای با ضریب شکست n را بررسی کنیم.

مثال پیشنهادی

آزمایش دو شکاف یانگ را با نوری تکفام با طول موج ۶۰۰nm انجام می‌دهیم. ولی این بار نواری از پلاستیک شفاف با ضریب شکست $n = ۱/۵۰$ را روی یکی از شکاف‌ها قرار می‌دهیم. حضور این نوار، تداخل بین موج‌های نوری حاصل از دو شکاف را تغییر می‌دهد و موجب می‌شود نقش تداخلی حاصل نسبت به نقش تداخلی اولیه جابه‌جا شود. شکل ۲۳ ــ الف مکان‌های اولیهٔ فریز روشن مرکزی ($m = ۰$) و نخستین فریز روشن ($m = ۱$) بالا و پایین فریز مرکزی را نشان می‌دهد. حضور نوار پلاستیکی باعث جابه‌جا شدن نقش به طرف بالا شده است، طوری که فریز روشن پایینی $m = ۱$ به مرکز نقش جابه‌جا شده است. آیا پلاستیک باید روی شکاف بالایی قرار داده شود (که در شکل ۲۳ــ ب به‌طور دلخواه چنین کشیده شده است) یا روی شکاف پایینی، و ضخامت آن باید چقدر باشد؟

پاسخ : شکل ۲۳ــ الف پرتوهای $r_۱$ و $r_۲$ را تا رسیدن به فریز روشن $m = ۱$ نشان می‌دهد. توجه کنید که موج‌ها به‌طور همفاز از شکاف‌ها شروع می‌کنند ولی با اختلاف فاز دقیقاً یک طول موج به فریز می‌رسند. برای آنکه این مشخصهٔ فریز را به‌خاطر بسپاریم آن را فریز ۱λ می‌نامیم. اختلاف فاز یک طول موج ناشی از اختلاف راه یک طول موج بین پرتوهایی است که به فریز می‌رسند؛ یعنی در امتداد پرتو $r_۲$ دقیقاً یک طول موج بیشتر نسبت به امتداد پرتو $r_۱$ وجود دارد.

شکل ۲۳ــ ب، فریز ۱λ را نشان می‌دهد که در حضور پوشش پلاستیکی روی شکاف بالایی، نسبت به مرکز نقش جابه‌جا شده است (هنوز نمی‌دانیم پلاستیک باید روی شکاف بالایی باشد یا شکاف پایینی). این شکل همچنین سمتگیری جدید پرتوهای $r_۱$ و $r_۲$ را تا رسیدن به آن فریز نشان می‌دهد. همچنان باید در امتداد $r_۲$ یک طول موج بیشتر نسبت به امتداد $r_۱$ وجود داشته باشد (زیرا فریز ۱λ را ایجاد می‌کنند)، ولی اکنون بنا به فرض مسئله اختلاف راه بین این پرتوها صفر است، که از هندسهٔ شکل ۲۳ــ ب می‌توان به آن پی‌برد. با این حال توجه کنید که پرتو $r_۲$ اکنون از پلاستیک عبور کرده است. می‌دانیم که $\lambda_n = \lambda/n$ است که در آن n ضریب شکست ماده و λ_n طول موج نور در آن ماده است. به عبارتی، طول موج نور در ماده‌ای با ضریب شکست n از طول موج نور در خلأ کوچکتر است. بنابراین پرتویی که از پلاستیک می‌گذرد نسبت به پرتویی که فقط از هوا می‌گذرد طول موج کوچکتری دارد. پس با گذاشتن پلاستیک روی شکاف بالایی، همان‌طور که در شکل ۲۳ــ ب رسم شده است، به یک طول موج اضافی در امتداد پرتو $r_۲$ نیاز داریم.



(الف) شکل ۲۳ (ب)

برای تعیین ضخامت L پلاستیک، نخست توجه می‌دهیم که موج‌ها در ابتدا همفازند و فاصلهٔ مساوی L را در مواد مختلف (پلاستیک و هوا) می‌پیمایند. بدیهی است که تعداد طول موج‌های موجود در طول L از رابطهٔ $N = L/\lambda$ به‌دست می‌آید و بنابراین :

$$N_۲ - N_۱ = \frac{L}{\lambda}(n_۲ - n_۱)$$

می‌دانیم $N_۲ - N_۱$ برای اختلاف فازی برابر با یک طول موج برابر با ۱، ضریب شکست $n_۲$ برای پلاستیک جلوی شکاف بالایی برابر با ۱/۵، ضریب شکست $n_۱$ برای هوای جلوی شکاف پایینی برابر ۱، و λ برابر $۶۰۰ \times ۱۰^{-۹}m$

است. آنگاه با حل معادلهٔ بالا برای L خواهیم داشت :

$$L=\frac{\lambda(N_2-N_1)}{n_2-n_1}=\frac{(600\times10^{-9}m)(1)}{1/5-1/00}=1/2\times10^{-6}m$$

همان‌طور که در دو مثال بعد خواهیم دید این نتیجه را به طریق راحت‌تری با استفاده از $\Delta\varphi=2\pi m$ نیز می‌توان به‌دست آورد.

مثال پیشنهادی

در آزمایش دو شکاف یانگ، فاصلهٔ بین شکاف‌ها 5/0mm و فاصلهٔ شکاف‌ها از پرده 1/0 m است. دو نقش تداخلی روی پرده دیده می‌شود : یکی ناشی از نور با طول موج 480nm و دیگری ناشی از نور با طول موج 600nm. فاصلهٔ بین فریزهای روشن مرتبهٔ سوم (m = 3) دو نقش تداخلی روی پرده چقدر است؟

پاسخ : رابطهٔ تقریبی‌ای را که برای آزمایش دو شکافی به‌دست آوردیم، به ترتیب برای هر دو طول موج به‌کار می‌گیریم. بنابراین اگر طول موج اول را با λ_1 و طول موج دوم را با λ_2 نشان دهیم، با توجه به اینکه مرتبهٔ فریزها یکسان است، خواهیم داشت :

$$\Delta x=x_2-x_1=m(\frac{D}{a})(\lambda_2-\lambda_1)$$
$$=3(\frac{1/0m}{5/0\times10^{-3}m})(600\times10^{-9}m-480\times10^{-9}m)$$
$$=7/2\times10^{-5}m$$

مثال پیشنهادی

پوستهٔ نازکی از میکا (n = 1/58) برای پوشاندن یکی از شکاف‌های آرایش تداخلی دو شکاف یانگ به‌کار رفته است. نقطهٔ مرکزی روی پرده توسط هفتمین (m = 7) فریز روشن قبلی اشغال می‌شود. اگر $\lambda=550nm$ باشد، ضخامت میکا چقدر است؟

پاسخ : با همان استدلالی که در مثال اول بیان کردیم به رابطهٔ زیر می‌رسیم :

$$N_2-N_1=\frac{L}{\lambda}(n_2-n_1)$$

که در اینجا N_2-N_1 برابر 7 می‌شود. زیرا دو موج در محل شکاف‌ها همفازند و برای رسیدن به هفتمین فریز روشن مسافت‌های متفاوتی را طی می‌کنند. $n_1=1$ و $n_2=1/58$ است و بنابراین به ازای $\lambda=550nm$ داریم :

$$L=\frac{7\lambda}{n_2-n_1}=\frac{7(550\times10^{-9}m)}{1/58-1}=6/64\times10^{-6}m$$

روش دیگر و شاید ساده‌تر آن است که بگوییم موج‌ها با اختلاف فاز $\Delta\phi=2\pi m=14\pi$ به هفتمین فریز روشن (m = 7) پرده می‌رسند. حال با قرار دادن ورقهٔ میکا به ضخامت L در جلوی یکی از شکاف‌ها، یک اختلاف فاز اضافی ایجاد می‌شود و داریم :

$$\Delta\phi=\frac{2\pi L}{\lambda_n}-\frac{2\pi L}{\lambda}=\frac{2\pi L}{\lambda}(n-1)$$

که در آن از $\lambda_n=\lambda/n$ استفاده کردیم. با برابر قرار دادن رابطهٔ بالا با 14π به همان نتیجهٔ قبل می‌رسیم.

مثال پیشنهادی

در آزمایش دو شکاف یانگ، فریزهایی تداخلی برای نور سدیم ($\lambda = 589nm$) ایجاد می‌شود که فاصلهٔ زاویه‌ای آن‌ها $0/20^\circ$ است. اگر کلّ آرایش در آب ($n = 1/33$) فروبرده شود، فاصلهٔ زاویه‌ای فریزها چقدر می‌شود؟

پاسخ : در خلأ، مکان زاویه‌ای نخستین بیشینهٔ مرکزی با $a\sin\theta = \lambda$ داده می‌شود. این رابطه در محیطی دیگر به‌صورت $a\sin\theta' = \lambda_n$ درمی‌آید که در آن $\lambda_n = \lambda/n$ است. حال از رابطهٔ نخست a را محاسبه می‌کنیم و سپس آن را در رابطهٔ دوم قرار می‌دهیم و از آن‌جا θ' را به‌دست می‌آوریم :

$$\sin\theta' = \frac{\lambda}{na} = \frac{\lambda}{n(\lambda/\sin\theta)} = \frac{\sin\theta}{n} = \frac{\sin 0/20^\circ}{1/33} = 0/00262$$

و از آن‌جا $\theta' = 0/15^\circ$ می‌شود.

دانستنی ۶ــ۷

همدوسی

نقش تداخلی حاصل از آزمایش دو شکاف یانگ با این فرض که اختلاف فاز امواج نوری که به پرده می‌رسند با زمان تغییر نکند (اصطلاحاً امواج همدوس باشند) حاصل می‌شود. در این دانستنی به تعریف همدوسی و چگونگی تحقق آن در آزمایش دو شکاف می‌پردازیم.

دانستنی ۶ــ۸

کاربردهایی از تداخل امواج نوری

تداخل نوری کاربردهای فراوانی دارد که در این دانستنی به برخی از جذاب‌ترین این کاربردها در علوم زیستی و نیز برای ضدّ جعل‌سازی اسکناس‌ها اشاره می‌شود.

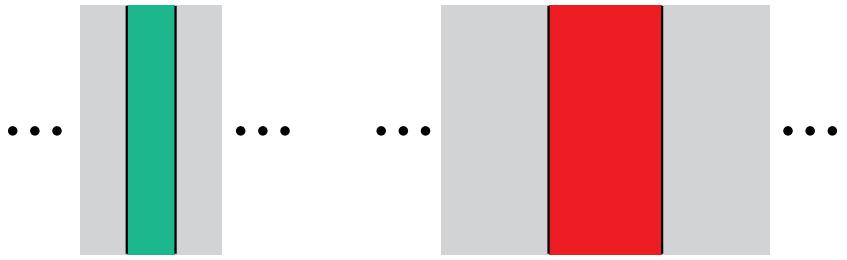
مثال پیشنهادی

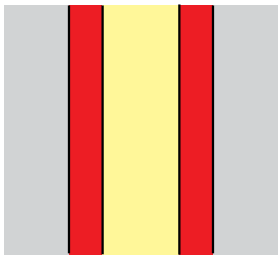
دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آن‌ها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. آزمایش یانگ چگونه می‌تواند ما را قادر سازد بین این دو نظر، یکی را انتخاب کنیم؟

پاسخ :

عملاً نور زرد می‌تواند از هر دو نوع باشد و این‌آزمایش یانگ است که می‌تواند به این پرسش پاسخ گوید. البته روش دیگر (و ساده‌تر) استفاده از منشور است، ولی چون در اینجا خواسته شده است با استفاده از آزمایش یانگ پاسخ گوییم، سراغ این آزمایش می‌رویم. می‌دانیم که آزمایش یانگ با نور تکفام انجام می‌شود و حاصل آن نوارهای تداخلی روشن و تیره‌ای است. پس اگر نور زرد به‌کار رفته در آزمایش یانگ تکفام باشد، ما نوارهای تداخلی یک درمیان روشن (زرد) و تیره‌ای خواهیم داشت. ولی اگر این نور زرد، ترکیبی از دو نور قرمز و سبز باشد، دیگر چنین نوارهای واضحی نخواهیم داشت و نتیجهٔ کار از برهم‌نهی امواج تداخلی قرمز و سبز حاصل می‌شود. به عبارتی،

توجه کنید که اگر نور سبز را نداشتیم، نوارهای تداخلی یک در میانی از قرمز و تیره حاصل می‌شد. و اگر نور قرمز را نداشتیم، نوارهای تداخلی یک درمیانی از سبز و تیره حاصل می‌شد. حال در حضور این دو نور، نوارهای تداخلی آنها بر روی هم می‌افتد. ولی توجه کنید که این برهم افتادن به‌طور متقارن صورت نمی‌گیرد، یعنی نوارهای تیره بر روی هم، و نوارهای سبز و قرمز بر روی هم نمی‌افتند. چرا که در آن صورت باز به نوارهای یک در میان زرد و تیره می‌رسیم و آزمایش یانگ نمی‌توانست مشکل ما را در تمیز این نور زرد خالص از نور زرد ترکیبی حل کند. پس، کلک کار در کجاست؟ ماجرا این است، طول نوارها به طول موج به‌کار رفته مربوط است و هرچه طول موج بزرگتر باشد، آنها نیز عریض‌ترند. پس چون طول موج قرمز بزرگتر از طول موج سبز است، نوارهای تداخلی آن عریض‌ترند. پس همپوشانی نوارها کاملاً بر هم منطبق نمی‌شوند. مثلاً شکل‌های نوعی زیر را در نظر بگیرید. توجه کنید که این شکل‌ها به مقیاس نیستند. فرض کنید شکل‌ها نوارهای تداخلی برای نورهای قرمز و سبز را نشان می‌دهند :





شکل‌ها طوری رسم شده‌اند که نوارهای تداخلی حاصل از نور قرمز عریض‌تر باشند. حال بیایید شکل سمت چپ را روی شکل سمت راست قرار دهید. ببینید چه می‌شود؟ کلّ نوار سبز به نوار زرد تبدیل می‌شود، ولی اطراف آن تا سر نوارهای تاریک حاشیه‌های قرمز رنگی خواهند داشت. بنابراین نتیجه می‌گیریم که نوار زرد ترکیبی باعث نوارهای تداخلی‌ای می‌شود که عرض نوار زرد مرکزی آن کمتر از عرض نوار زرد مرکزی حاصل از یک نور زرد خالص است، ضمن آنکه اطراف آن نیز ته‌رنگ قرمزی می‌گیرد. یعنی چیزی شبیه شکل روبرو خواهیم داشت (دوباره اشاره می‌شود که شکل به مقیاس نیست).

بنابراین به نظر می‌رسد که اگر آزمایش یانگ را با نوری سفید انجام دهیم، همچنان حاشیه‌های نوار مرکزی قرمز خواهد بود، زیرا پهنای این نوار از همه بیشتر است و در میانهٔ نوار مرکزی هم نواری کاملاً سفید خواهیم داشت که از همپوشانی سه رنگ اصلی ایجاد شده است و در بین آنها نواری با ته‌رنگ زرد از تلفیق نوارهای قرمز و سبز داریم.

راهنمای پاسخ‌یابی تمرین‌های فصل ششم

۱ــ الف) اگر به شکل ۲ــ۹ کتاب رجوع کنید درمی‌یابید که در واقع شکل ۲ــ۱۴ براساس افزایش طول موج یا کاهش بسامد از چپ به راست مرتب شده است و بنابراین P، Q، R و S به‌ترتیب معادل ناحیه‌های فرابنفش، مرئی، فروسرخ و رادیویی هستند.

ب) همان‌طورکه در قسمت الف گفتیم، طول موج‌ها افزایش و بسامد (یا همان انرژی) کاهش می‌یابد. بدیهی است که سرعت امواج ثابت است.

۲ــ در هر حال هم نور فروسرخ و هم امواج رادیویی، امواجی الکترومغناطیسی هستند و بنابراین وجوه اشتراک آنها بیشتر به این ویژگی آنها برمی‌گردد. یعنی، چون امواج الکترومغناطیسی هستند، سرعت انتشار هر دو در خلأ برابر c است، امواجی عرضی هستند، انتشار آنها به محیط نیاز ندارد، و انرژی را انتقال می‌دهند. وجه افتراق این دو موج به نحوهٔ تولید و نحوهٔ آشکارسازی آنها برمی‌گردد. چشمهٔ تولید امواج فروسرخ، خورشید و جسم‌های گرم و داغ است و توسط فیلم‌های مخصوص عکاسی و دمانگارها آشکارسازی می‌شوند. درحالی که چشمهٔ تولید امواج رادیویی چیزهایی مثل آنتن‌های رادیویی و تلویزیونی و یا اجاق‌های میکروموج (مایکروویو)است و توسط وسایلی چون رادیو، تلویزیون و رادارها آشکارسازی می‌شوند. ضمن اینکه کاربردهای این دو موج نیز متفاوت است.

۳ــ الف) از رابطهٔ $f = c/\lambda$ استفاده می‌کنیم :

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{۳\times۱۰^{۸}\ m/s}{۷۵m} = ۴\times۱۰^{۶}\ Hz = ۴MHz$$

ب) از رابطهٔ $\lambda = c/f$ استفاده می‌کنیم :

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{۳\times۱۰^{۸}\ m/s}{۱۲\times۱۰^{۶}\ s^{-۱}} = ۲۵m$$

۴ــ الف)

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{۳\times۱۰^{۸}\ m/s}{۶/۴۲\times۱۰^{-۷}\ m} = ۴/۶۷\times۱۰^{۱۴}\ Hz$$

ب) طول موج در هوا چنین می‌شود :

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{۳\times۱۰^{۸}\ m/s}{۴/۲۸\times۱۰^{۱۴}\ s^{-۱}} = ۷\times۱۰^{-۷}\ m$$

و در آب

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{۲/۲۵\times۱۰^{۸}\ m/s}{۴/۲۸\times۱۰^{۱۴}\ s^{-۱}} = ۵/۲۵\times۱۰^{-۷}\ m$$

(در طرح این مسئله بهتر بود به جای سرعت نور در آب، ضریب شکست آب داده می‌شد)

۵ــ الف)

حدّ بالا $\lambda_۱ = \frac{c}{f_۱} = \frac{۳\times۱۰^{۸}\ m/s}{۵۴۰\times۱۰^{۳}\ s^{-۱}} = ۵/۵۵\times۱۰^{۲}\ m$

حدّ پایین $\lambda_۲ = \frac{c}{f_۲} = \frac{۳\times۱۰^{۸}\ m/s}{۱۶۰۰\times۱۰^{۳}\ s^{-۱}} = ۱/۸۷\times۱۰^{۲}\ m$

پس $۱/۸۷\times۱۰^{۲}\ m < \lambda < ۵/۵\times۱۰^{۲}\ m$ است.

ب)

حدّ بالا $\lambda_۱ = \frac{c}{f_۱} = \frac{۳\times۱۰^{۸}\ m/s}{۸۸\times۱۰^{۶}\ s^{-۱}} = ۳/۴۱m$

حدّ پایین $\lambda_۲ = \frac{c}{f_۲} = \frac{۳\times۱۰^{۸}\ m/s}{۱۰۸\times۱۰^{۶}\ s^{-۱}} = ۲/۷۸\ m$

پس $۲/۷۸m < \lambda < ۳/۴۱m$ است.

۶ــ در زوایای کوچک فاصلهٔ بیشینهٔ mاُم از نوار مرکزی برابر است با :

$$x_m = \frac{mD\lambda}{a}$$

و بنابراین فاصلهٔ بیشینهٔ $m+1$ اُم از نوار مرکزی چنین می‌شود :

$$x_{m+1} = \frac{(m+1)D\lambda}{a}$$

و از آنجا $\Delta x = \lambda D/a$ می‌شود (توجه کنید که در روابط بالا و نیز در این راهنمای معلم به جای n کتاب از m استفاده کرده‌ایم تا با ضریب شکست n که در بعضی قسمت‌ها ظاهر می‌شود تمایزی ایجاد شود). از این رابطه درمی‌یابیم برای آنکه Δx زیاد شود، سه راه داریم؛ یکی آنکه λ را زیاد کنیم، دیگر اینکه فاصلهٔ شکاف‌ها تا پرده (D) را زیاد کنیم و یا اینکه فاصلهٔ شکاف‌ها a را کم کنیم. با این اوصاف موارد ۳،۱ و ۴ درست‌اند، ولی مورد ۲ که به کاهش طول موج می‌انجامد نادرست است.

۷ــ با توجه به اینکه در آب طول موج کم می‌شود $(\lambda' = \lambda/n)$، بنابراین فاصلهٔ نوارهای روشن متوالی (و درنتیجه کلیهٔ نوارها) هم کم می‌شود (به مسئله ۶ نگاه کنید)

۸ــ در مسئله ۶ نشان دادیم که $\Delta x = \lambda D/a$ می‌شود. بنابراین برای طول موج داریم :

$$\lambda = \frac{a\Delta x}{D} = \frac{(۰/۶\times۱۰^{-۳}\,m)(۲/۲۷\times۱۰^{-۳}\,m)}{۲/۵m} = ۵/۴۴\times۱۰^{-۷}\,m$$

۹ــ از $\lambda = xa/mD$ که در آن m شمارهٔ نوار روشن را مشخص می‌کند استفاده می‌کنیم. از آنجا داریم :

$$x = \frac{mD\lambda}{a} = \frac{(۱۰)(۸۰\times۱۰^{-۲}\,m)\,(۰/۶\times۱۰^{-۶}\,m)}{۰/۴\times۱۰^{-۳}\,m} = ۰/۰۱۲m = ۱/۲cm$$

۱۰ــ به جز بسامد (و درنتیجه دورهٔ تناوب) موج‌ها، بقیه متفاوت‌اند. چرا که سرعت و طول موج در محیط به ضریب شکست بستگی دارد. امتداد پرتوها هم براثر شکست، تفاوت پیدا می‌کند. شدت نور هم تغییر می‌کند، زیرا بخشی از نور جذب محیط جدید می‌شود.

۱۱ــ الف) با استفاده از $\lambda = c/f$ داریم :

$$\lambda = \frac{۳\times۱۰^{۸}\,m/s}{۱/۵\times۱۰^{۶}\,s^{-۱}} = ۲۰۰m$$

ب) با صرفنظر از پاشندگی احتمالی موج‌ها، این به معنی آن است که تداخلی سازنده رخ داده است و ستیغ(قله) موج‌ها بر هم افتاده است.

پ) همانطور که اشاره شد در امتداد مسیر QP تداخلی سازنده داریم و بنابراین صدای دریافتی بیشینه است. پس اگر کشتی هرگاه سیگنال‌هایی تضعیف شده را دریافت دارد به معنی آن است که از مسیر QP اندکی منحرف شده و باید با تصحیح مسیر خود سعی کند که همان سیگنال بیشینه را دریافت دارد. دریافت سیگنال بیشینه در کلّ مسیر، کشتی را به مقصد می‌رساند.

برای دیدن نمونه آزمون تشریحی و چهارگزینه‌ای فصل به CD ضمیمه‌ی کتاب راهنما معلم مراجعه کنید.