



Sarironline.ir

## ۶

# امواج الکترومغناطیسی

ما در عصر اطلاعات زندگی می‌کنیم و این عصر تقریباً به طور کامل بر **فیزیک امواج الکترومغناطیسی** استوار است. خوشتان بباید یا نباید، امروزه به خاطر وجود فرستنده‌های تلویزیونی، رادیویی، تلفن همراه و ... غرق در این سیگنال‌ها هستیم! همانگونه که می‌دانیم، امواج الکترومغناطیس - به خلاف امواج مکانیکی - برای انتشار به محیط مادی نیاز ندارند و در خلاء هم به راحتی منتشر می‌شوند.

فیزیکدانانی مانند مایکل فارادی، جیمز کلارک ماکسول و هاینریش هرتز، نقش عمده‌ای در کشف پدیده‌های الکترومغناطیسی و مطالعه بر روی آنها داشتند:

- بر اساس قانون القای فارادی می‌دانیم: اگر شار مغناطیسی گذردندۀ /ز یک مدار بسته تغییر کند، نیروی محرکه‌ای در مدار ایجاد می‌کند که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار مناسب است.
- ماکسول پیش بینی کرد: همان طور که در اثر تغییر میدان مغناطیسی در فضا، میدان الکتریکی تولید می‌شود، در اثر تغییر میدان الکتریکی نیز میدان مغناطیسی ایجاد خواهد شد. یعنی علاوه بر جریان الکتریکی و آهنربا، تغییر میدان الکتریکی نیز می‌تواند منشاء میدان مغناطیسی باشد.



## ۱-۶. چگونگی تشکیل موج الکترومغناطیسی

موچ های الکترومغناطیسی از میدان های الکتریکی و مغناطیسی عمود بر هم تشکیل شده اند. **عامل اصلی**

**ایجاد موج های الکترومغناطیسی، ذرات باردار شتاب دار** هستند. یعنی وقتی ذره دارای بار الکتریکی حرکت شتابدار انجام می دهد، بخشی از انرژی خود را به صورت امواج الکترومغناطیسی گسیل می کند. گسیل امواج الکترومغناطیسی توسط اجسام را تابش می نامیم.

بعضی از امواج الکترومغناطیسی، از جمله پرتوی ایکس، پرتوهای گاما و نور مرئی، از منابع دارای اندازه های اتمی یا هسته ای تابش می یابند که برای تحلیل نحوه تابش در این موارد، باید از قوانین مکانیک کوانتومی کمک گرفت.

در اینجا برای درک ساده ای سازو کار تولید امواج الکترومغناطیسی، ناحیه ای از طیف و در محدوده طول موجی حدود یک متر ( $\lambda \approx 1\text{m}$ ) را در نظر می گیریم که در این ناحیه، منبع تابش کننده، یک منبع ماکروسکوپی است که اصطلاحاً با آن **آنشن** می گوییم. از آتن ها به عنوان چشممه ای موج های الکترومغناطیسی در ایستگاه های رادیویی، مخابراتی و ... استفاده می شود.

نحوه تولید امواج الکترومغناطیس در آتن را به کمک قوانین فیزیک کلاسیک می توان بررسی کرد.

شکل مقابل، اساس مولد چنین موجی را نشان می دهد. قلب این مولد، یک نوسانگر است که با بسامد  $f$  کار می کند. بارهای الکتریکی و جریان ها در این مدار به صورت سینوسی تغییر می کنند. در این

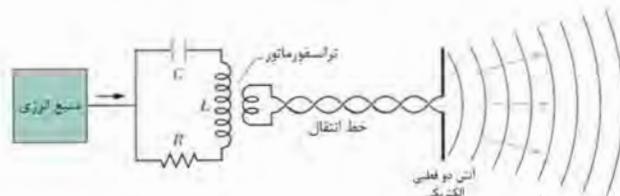
وضعیت، بارهای الکتریکی روی تیغه ها دائم تغییر می کند و ذرات دارای بار الکتریکی، بدین ترتیب حرکت شتاب دار انجام می دهند.

در لحظه  $t = 0$ ، هر دو میله بدون بار هستند. به تدریج بار میله ها افزایش می یابد و افزایش بار الکتریکی روی میله ها سبب ایجاد میدان الکتریکی در نزدیکی آن می شود.

در لحظه  $t = \frac{T}{4}$ ، بار الکتریکی روی میله های بالایی، ثابت و بار الکتریکی روی میله های پایینی، منفی است. در این لحظه، بار میله های بیشینه و در نتیجه میدان الکتریکی حاصل از این بارها نیز بیشینه است. با گذشت زمان و کاهش تدریجی بار الکتریکی روی میله ها، بزرگی میدان الکتریکی در نزدیکی میله ها کاهش می یابد و میدان الکتریکی بیشینه رو به پایینی که تولید شده بود، از میله دور می شود.

سپس بار این میله ها کاهش می یابد و در لحظه  $t = \frac{T}{3}$  مجددا به صفر می رسد و به تبع آن، میدان الکتریکی نیز صفر می شود.

در ادامه این وضعیت، علامت بار میله معکوس می شود و با گذشت



زمان، به مقدار آن افزوده می شود تا در  $t = \frac{3T}{4}$ ، مقدار بار میله ها به مقدار بیشینه رسیده و میدان الکتریکی بیشینه، در خلاف جهت میدان الکتریکی حالت قبل، ایجاد می شود. این روند همین گونه ادامه می یابد و میدان الکتریکی ایجاد شده، با سرعت نور در فضا منتشر می شود.

در تمام این مراحل، میدان نزدیک آنتن، با نوسان بار الکتریکی روی آن هم فاز است، یعنی جهت میدان الکتریکی در زمانی که میله‌ی بالایی مثبت است، رو به پایین و وقتی که میله‌ی بالایی منفی است، رو به بالا است. همچنین اندازه‌ی میدان الکتریکی ایجاد شده، به مقدار بار روی آنتن در آن لحظه بستگی دارد.

از سوی دیگر، تغییر بارهای الکتریکی در میله، سبب ایجاد یک جریان



الکتریکی متناوب در آنتن می‌شود که یک میدان مغناطیسی در اطراف آنتن تولید خواهد کرد. هنگامی که جهت جریان رو به بالا است، خطوط میدان مغناطیسی به صورت شکل مقابل در اطراف میله ایجاد می‌شود. این خطوط میدان، به صورت دایره‌های متعدد مرکز به دور آنتن هستند که با سرعت بسیار زیاد از آنتن دور می‌شوند و در هر لحظه، بر خط‌های میدان الکتریکی تولید شده در هر نقطه عمودند. با تغییر جهت جریان در آنتن، جهت میدان مغناطیسی هم وارونه می‌شود. بدین ترتیب دو میدان الکتریکی و مغناطیسی متناوب عمود بر هم تولید و در فضا منتشر می‌شود.

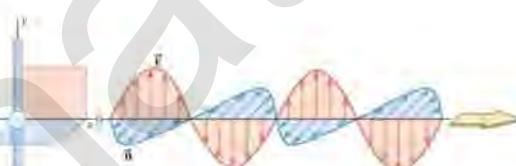
**نکته:** آنچه در مورد نحوه تولید امواج الکترومغناطیس در آنتن گفته شد را می‌توان به صورت

زیر خلاصه کرد:

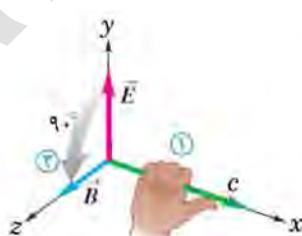
- بر طبق قانون القای فارادی - که قبلاً خوانده‌ایم، میدان مغناطیسی متغیر با زمان، باعث ایجاد میدان الکتریکی می‌شود.
- بر طبق معادلات و پیش‌بینی ماکسول، تغییر میدان الکتریکی بر حسب زمان، میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند.

**نکته:** در مورد امواج الکترومغناطیسی می‌توان نوشت:

- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی القایی، هم‌فاز هستند. یعنی هم‌زمان با یکدیگر صفر می‌شوند و کامل‌اً هم‌زمان به مقدار بیشینه می‌رسند.



- میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی بر یکدیگر و همچنین بر راستای انتشار موج هم عمودند. لذا امواج الکترومغناطیسی، جزو امواج عرضی به شمار می‌روند.



- راستای انتشار موج، در جهت  $\vec{E} \times \vec{B}$  است. یعنی اگر انگشتان دست راست به گونه‌ای در جهت میدان الکتریکی قرار بگیرد که هنگام بسته شدن انگشتان، در جهت میدان مغناطیسی قرار گیرد، جهت انتشار موج در جهت انگشت شست است.

- موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار به محیط مادی نیاز ندارند و در خلاء نیز منتشر می‌شوند.
- مفاهیمی مانند بسامد ( $f$ )، دوره ( $T$ ) و طول موج ( $\lambda$ ) که در موج‌های مکانیکی بیان شد، در مورد موج‌های الکترومغناطیس هم برقرار است.

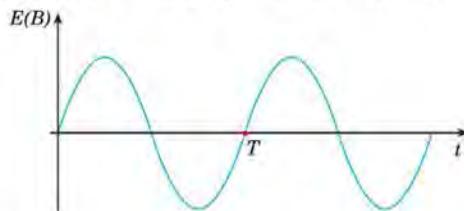
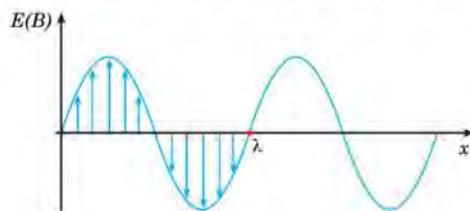


- معادلات مربوط میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر حسب زمان و مکان، طبق آنچه در مورد موج‌های مکانیکی توضیح داده شد، برای موجی که در جهت مثبت محور  $x$  حرکت می‌کند، از روابط زیر تعیین می‌شود:

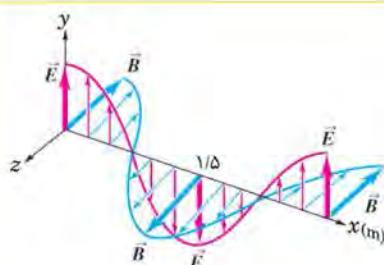
$$E = E_{\max} \sin(\omega t - kx) \quad (1-6)$$

$$B = B_{\max} \sin(\omega t - kx) \quad (2-6)$$

- نمودار تغییرات میدان الکتریکی و مغناطیسی را برابر این امواج نیز می‌توان رسم کرد.



### مثال ۱



شکل مقابل یک موج الکترومغناطیسی با بسامد  $75 \text{ MHz}$  را نشان می‌دهد. اگر بزرگی بیشینه‌ی میدان الکتریکی  $\frac{N}{C} 2 \times 10^4$  باشد، تابع میدان الکتریکی بر حسب زمان را برای آن بنویسید.

### ۲-۶. سرعت امواج الکترومغناطیسی

سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی نیز همچون موج‌های مکانیکی در محیط یکنواخت، مقدار ثابتی است. میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی به طور آنی به تمام نقاط فضا نمی‌رسند؛ بلکه با سرعت مشخصی منتشر می‌شوند. ماکسول با انجام محاسبات ریاضی نشان داد سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی در خلاء از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3-6)$$

که در آن  $\epsilon_0$  ضریب گذره‌ی خلاء ( $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$ ) و  $\mu_0$  ضریب تراوایی مغناطیسی خلاء ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$ ) همان سرعت نور در خلاء (هوای) با مقدار تقریبی  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  است.

### مثال ۲

یک موج الکترومغناطیسی در خلاء، هم‌سو با محور  $x$  منتشر می‌شود. اگر بسامد موج  $100 \text{ MHz}$  باشد، ...

(الف) معادله‌ی میدان الکتریکی آن به کدام یک از صورت‌های زیر می‌تواند باشد؟ ( $c = 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ )

$$\vec{E} = E_{\max} \sin(\pi \times 10^8 t - \frac{\pi}{3} x) \vec{j} \quad (2) \qquad \vec{E} = E_{\max} \sin(\pi \times 10^8 t - \frac{\pi}{3} x) \vec{i} \quad (1)$$

$$\vec{E} = E_{\max} \sin(2\pi \times 10^8 t - \frac{2\pi}{3} x) \vec{j} \quad (4) \qquad \vec{E} = E_{\max} \sin(2\pi \times 10^8 t - \frac{2\pi}{3} x) \vec{i} \quad (3)$$

(ب) معادله‌ی میدان مغناطیسی برای این موج به چه صورت است؟

**نکته:** سرعت انتشار موج‌های الکترومغناطیسی در سایر محیط‌ها کمتر از  $c$  است و بر طبق آنچه در مبحث نور هندسی به یاد داریم، نسبت سرعت نور در خلاء به سرعت نور در ماده‌ی مورد نظر ( $V$ ) را ضریب شکست می‌نامیم. اگر ضریب شکست را با  $N$  نمایش دهیم، می‌توان نوشت:

$$V = \frac{c}{N} \quad (4-6)$$

**نکته:** می‌دانیم هنگامی که یک موج الکترومغناطیسی از یک محیط وارد محیط دیگری می‌شود، بسامد آن (و در نتیجه اگر پرتو در ناحیه‌ی مرئی قرار داشته باشد، رنگ نور) تغییر نمی‌کند ( $f_1 = f_2$ ، زیرا بسامد از خصوصیات منبع است. اما به علت تغییر محیط و تغییر در سرعت موج، طول موج تغییر خواهد کرد و در اینصورت می‌توان نوشت:

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5-6)$$

### مثال ۳

بسامد یک پرتوی تکرنگ در خلاء  $10^{14} \text{ Hz}$  است.

(الف) طول موج این پرتو در خلا چند نانومتر است؟

(ب) طول موج و بسامد این پرتو را در محیطی به ضریب شکست  $N = \frac{5}{3}$  حساب کنید.



**نکته:** نسبت بزرگی میدان الکتریکی در هر نقطه به بزرگی میدان مغناطیسی در همان نقطه برابر سرعت موج در محیط مورد نظر است. یعنی می‌توان نوشت:

$$\frac{E}{B} = \frac{E_{\max}}{B_{\max}} = c \quad (6-6)$$

### مثال ۴

تابع میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی در SI به صورت  $\vec{E} = 1/2 \times 10^4 \sin(4\pi \times 10^8 t - \frac{4\pi}{3}x) \hat{j}$  است.

الف) جهت انتشار موج را بباید.

ب) جهت تغییر میدان الکتریکی و مغناطیسی چیست؟

ج) طول موج چند متر است؟

د) پیشینه‌ی میدان مغناطیسی را بباید و تابع میدان مغناطیسی را برای این موج بنویسید.

### مثال ۵

اگر تابع میدان مغناطیسی یک موج الکترومغناطیسی در یک محیط در SI به صورت

$$\vec{B} = 5 \times 10^{-3} \sin \pi (2 \times 10^6 t - \frac{\lambda}{900} y) \hat{i}$$

الف) سرعت انتشار موج در این محیط چقدر است؟

ب) ضریب شکست محیط را بدست آورید.

ج) اگر این موج وارد خلاء شود، طول موج آن چقدر تغییر می‌کند؟



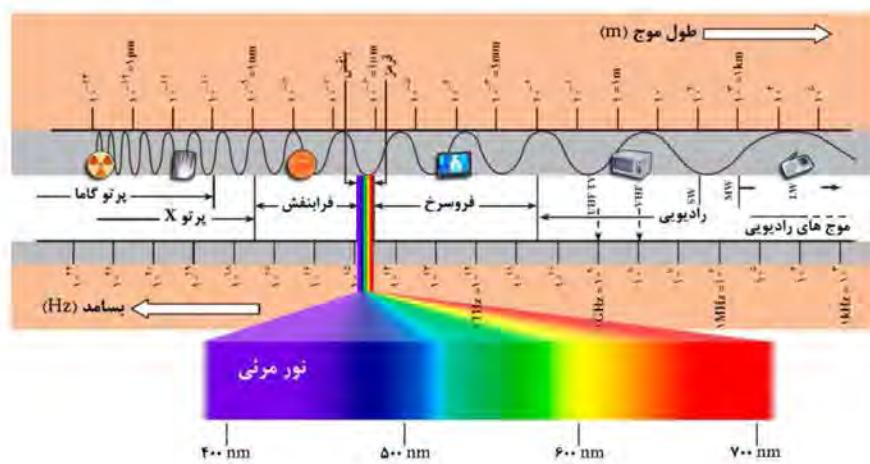
### ۳-۶. طیف امواج الکترومغناطیس

موج‌های الکترومغناطیس، از نظر بسامد و طول موج طیف گستردگی دارد. به نواحی مختلف طیف الکترومغناطیس نام‌هایی همچون امواج رادیویی، فروسرخ، مرئی، فرابنفش، ایکس، گاما و ... اطلاق می‌شود. سرعت انتشار همه‌ی موج‌های الکترومغناطیسی در خلاء برابر است، اما در محیط‌های غیر از خلاء، سرعت بخش‌های مختلف طیف با یکدیگر متفاوت است. مثلاً برای رنگ‌های مختلف نور در محیط غیر از خلاء، سرعت انتشار نور بنفش، کمتر از سرعت انتشار نور قمر است و داریم:

$$V_{\text{بنفش}} < V_{\text{قرمز}} \quad \text{و} \quad N_{\text{بنفش}} > N_{\text{قرمز}}$$

**نکته:** منابع تابش امواج و نحوه آشکارسازی و کاربرد آنها متفاوت است که در جدول زیر شرح مختصری از هر یک آمده است. (جدول را بررسی و بخاطر بسپارید)

| نام و حدود طول موج   | چشم   | وسایل                             | بعضی از ویژگی‌های خاص و کاربرد   |
|--|---|-----------------------------------|--|
| اشکارسازی  |   |                                   |  |
| برتو گاما ( $\gamma$ )<br>$10^{-12} \text{ m}$             | هسته‌ی مواد رادیواکتیو و پرتوهای کیهانی                   | شمارشگر گایگر - مولر و فیلم عکاسی | فوتون‌های بسیار بر انرژی و با قدرت نفوذ بسیار زیاد. خیلی خطرناک<br>کاربرد: بافت‌های سرطانی را از بین می‌برد، برای پیدا کردن ترک در فلزات، برای ضد سایل و تجهیزات               |
| برتوی ایکس (X)<br>$10^{-1} \text{ m} = 100 \text{ pm}$     | لامپ پرتوی X  | فیلم عکاسی و صفحه‌ی فلورسان       | فوتون‌های بسیار بر انرژی و با قدرت نفوذ زیاد. خیلی خطرناک<br>کاربرد: استفاده در پرتوگاری، استفاده در مطالعه‌ی ساختار بلورها، معالجه‌ی بیماری‌های پوستی، استفاده در پرتو درمانی |
| فرابنفش (UV)<br>$10^{-8} \text{ m} = 100 \text{ nm}$       | خورشید، جسم‌های خیلی داغ، جرقه‌ی الکتریکی، لامپ بخار جیوه | فیلم عکاسی، فوتول                 | توسط شیشه‌ی جذب می‌شود، سبب بسیاری از واکنش‌های شیمیایی می‌شود، یاخته‌های زنده را از بین می‌برد.<br>کاربرد: لامپ‌های UV در بیشکی   |
| نور مرئی<br>$6 \times 10^{-7} \text{ m} = 0.6 \mu\text{m}$ | خورشید، جسم‌های داغ، لیزرها                               | چشم، فیلم عکاسی، فوتول            | در دیدن اجسام نقش اساسی دارد، برای رشد گیاهان و عمل فتوسنتر نقص حیاتی دارد.<br>کاربرد: در سیستم‌های مخابراتی (لیزر و تارهای نوری) مورد استفاده قرار می‌گیرد.                   |
| فروسرخ (IR)<br>$10^{-4} \text{ m} = 100 \mu\text{m}$       | خورشید، جسم‌های گرم و داغ                                 | فیلم‌های مخصوص عکاسی              | هنگامی که جذب می‌شود، پوست را گرم می‌کند.<br>کاربرد: برای گرم کردن، برای فیلم برداری و عکاسی در مه و تاریکی، عکاسی IR توسط ماهواره‌ها  |
| رادیویی (VHF)<br>$3 \text{ m}$                             | اجاق‌های مایکروویو، آتن‌های رادیویی و تلویزیونی           | رادیو و تلویزیون                  | کاربرد: در آشپزی، رادیو، تلویزیون، مخابرات ماهواره‌ای و در رادارها برای آشکارسازی هواپیما، موشک و کشتی   |



**که نکته:** محدوده طول موج امواج الکترومغناطیسی مرئی، از  $\frac{1}{4} \text{nm}$  میکرون ( $400 \text{ nm}$ ) مربوط به طول موج بنفش تا  $\frac{7}{4} \text{nm}$  میکرون ( $700 \text{ nm}$ ) مربوط به طول موج قرمز است. بنابراین می‌توان محدوده بسامد نور مرئی را به صورت زیر تعیین کرد:

$$f_{\text{قرمز}} \geq f = \frac{4}{3} \times 10^{14} \text{ Hz} \quad f_{\text{بنفش}} \leq f \leq \frac{7}{5} \times 10^{14} \text{ Hz}$$

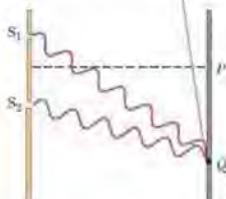
#### ۴-۶. تداخل موج‌های نوری (آزمایش یانگ)

در بخش موج‌های مکانیکی دیدیم که اگر دو موج همدامنه، هم فاز و هم بسامد امواجی روی سطح آب تولید کنند، این امواج با یکدیگر تداخل انجام می‌دهند و روی سطح آب، گره ( محل تداخل ویرانگر) و شکم ( محل تداخل سازنده) ایجاد می‌شود.

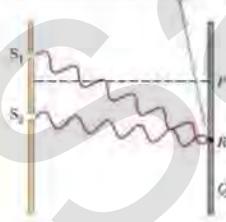
در آزمایش‌هایی که یانگ در اوایل قرن نوزدهم میلادی انجام داد، مشخص شد که تداخل امواج، برای پرتوهای نور نیز صورت می‌گیرد. آزمایش یانگ را می‌توان تاییدی بر ماهیت موجی نور به شمار آورد.

در این آزمایش، تداخل نور حاصل از دو منبع هم بسامد و هم فاز بررسی می‌شود. همان‌گونه که در شکل مقابل دیده می‌شود در پشت شکاف باریک  $S$  یک چشممه‌ی نور تک رنگ (تک‌فام) قرار دارد. این شکاف مانند یک چشممه‌ی نور عمل می‌کند. در فاصله‌ی کمی از شکاف  $S$ ، دو شکاف موازی  $S_1$  و  $S_2$  قرار دارد که با  $S$  نیز موازی هم فاصله‌اند. نور رسیده به شکاف‌های  $S_1$  و  $S_2$  مانند دو چشممه‌ی هم‌بسامد، هم‌دامنه و هم‌فاز عمل می‌کنند و نور را در جهت‌های مختلف گسیل می‌کنند. نورهای گسیل شده از این دو چشممه با یکدیگر تداخل کرده و نوارهای تداخلی تاریک و روشن را بر روی پرده‌ای که به موازات دو شکاف قرار دارد، تشکیل می‌دهند.

نوار روشن: اختلاف فاز دو موج مضرب زوچی از  $\pi$  است.



نوار تاریک: اختلاف فاز دو موج مضرب فردی از  $\pi$  است.



برطبق آنچه قبلاً آموخته‌ایم، می‌توان نتیجه گرفت:

- اگر دو موجی که به پرده می‌رسند، با یکدیگر هم فاز باشند، تداخل

موج‌ها **سازنده** است و در محل تلاقی دو موج، نوار روشن تشکیل

می‌شود.

$$\Delta\phi = (2n)\pi$$

- اگر دو موجی که به پرده می‌رسند، با یکدیگر در فاز مخالف باشند،

تداخل موج‌ها **ویرانگر** است و در محل تلاقی آنها، نوار تاریک تشکیل

می‌شود.

$$\Delta\phi = (2m-1)\pi$$

**که نکته:** اگر فاصله‌ی محل تداخل دو موج با چشممه‌های  $S_1$  و  $S_2$  را به ترتیب با  $d_1$  و  $d_2$  نشان دهیم، در اینصورت اختلاف فاصله‌ی محل تشکیل نوار روشن یا تاریک، تا دو شکاف را با  $\delta$  مشخص می‌کنیم و در اینصورت می‌توان نتیجه گرفت ...

$$\delta = |d_2 - d_1| = (2n) \frac{\lambda}{\varphi} : \text{نوار روشن (تداخل سازنده)} \quad (7-6)$$

$$\delta = |d_2 - d_1| = (2m-1) \frac{\lambda}{\varphi} : \text{نوار تاریک (تداخل ویرانگر)} \quad (8-6)$$

**نکته:** دو موج برای رسیدن از دو چشم به محل تداخل، مسافت‌های متفاوتی می‌پیمایند و با اختلاف زمانی به یکدیگر می‌رسند. برای به دست آوردن این اختلاف زمانی می‌توان از رابطه‌ی طلایی در موج کمک گرفت و نوشته:

$$\Delta t = |t_2 - t_1| = (2n) \frac{T}{\lambda} \quad (9-6)$$

$$\Delta t = |t_2 - t_1| = (2n-1) \frac{T}{\lambda} \quad (9-7)$$

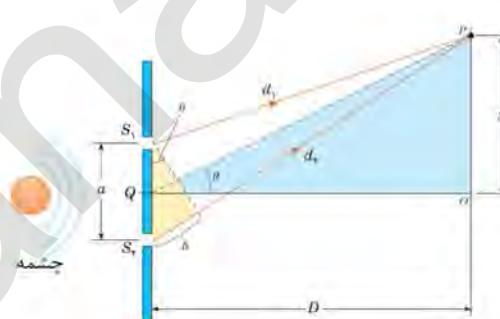
### مثال ۶

آزمایش یانگ را با پرتویی به طول موج  $600 \text{ nm}$  در خلاء انجام داده‌ایم. در محل نوار تاریک چهارم، اختلاف راه دو موج چند میکرون و اختلاف زمانی رسیدن دو موج چند ثانیه است؟

### مثال ۷

در آزمایش یانگ، اختلاف راه پرتوهایی که از دو شکاف به وسط نوار روشن سوم (از نوار روشن مرکزی) می‌رسند،

$$(c = 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}) \quad 1500 \text{ نانومتر است. بسامد نور مورد آزمایش چند هرتز است؟}$$



اندازه‌گیری طول موج به کمک آزمایش یانگ:  
با استفاده از آزمایش یانگ می‌توان طول موج نور را اندازه‌گیری کرد.

در شکل مقابل، اگر فاصله‌ی میان دو شکاف را  $a$  و فاصله‌ی دو شکاف تا پرده را  $D$  در نظر بگیریم و آزمایش یانگ را با موجی به طول موج  $\lambda$  انجام دهیم، برای حالتی که  $D \gg a$  باشد، زاویه‌ی  $\theta$  بسیار کوچک است و می‌توان نوشت:

$$\tan \theta = \frac{x}{D} \quad \tan \theta = \sin \theta = \frac{\delta}{a}$$

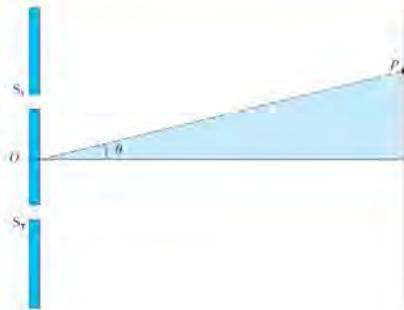
بنابراین خواهیم داشت:

$$\tan \theta \approx \frac{x}{D} = \frac{\delta}{a} \quad (11-6)$$



## مثال ۸

در آزمایش یانگ، اگر فاصله‌ی دو شکاف از یکدیگر  $10$  میلی‌متر و نقطه‌ی  $P$  محل تشکیل نوار روشن دوم باشد، زاویه‌ی تقریباً چند رادیان است؟



## مثال ۹

آزمایش یانگ را در خلاء انجام داده‌ایم و فاصله‌ی شکافها از پرده  $2000$  برابر فاصله‌ی شکافها از یکدیگر است. در نقطه‌ای به فاصله‌ی  $6$  میلی‌متر از وسط نوار روشن مرکزی، اختلاف زمان‌های رسیدن موج دو منبع چند ثانیه است؟

$$(c = 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})$$

به همین ترتیب اگر فاصله‌ی وسط نوار روشن  $n\lambda$  تا نوار روشن مرکزی را با  $x_n$  نشان دهیم، با توجه به رابطه‌ی  $\delta = n\lambda$  می‌توان نوشت:

$$x_n = \frac{n\lambda D}{a} \quad (12-6)$$

و اگر فاصله‌ی وسط نوار تاریک  $m\lambda$  تا نوار روشن مرکزی را با  $x_m$  نمایش دهیم، با توجه به رابطه‌ی  $\delta = (m - \frac{1}{2})\lambda$  می‌توان رابطه زیر را به کاربرد:

$$x_m = \frac{(m - \frac{1}{2})\lambda D}{a} \quad (13-6)$$

## مثال ۱۰

در آزمایش یانگ، فاصله‌ی وسط نوار روشن پنجم از وسط نوار روشن مرکزی  $18$  میلی‌متر است. اگر طول موج نور مورد استفاده  $600$  نانومتر باشد، فاصله‌ی شکافها از پرده چند برابر فاصله‌ی شکافها از یکدیگر است؟



## مثال ۱۱

آزمایش یانگ را در خلا با طول موج  $500\text{ nm}$  انجام داده‌ایم و فاصله نوار روشن سوم از نوار تاریک پنجم که در همان طرف نوار مرکزی است برابر  $1/5\text{ mm}$  شده است.

(الف) فاصله شکاف‌ها از پرده چند برابر فاصله شکاف‌ها از یکدیگر است؟

(ب) فاصله نوار تاریک سوم از نوار روشن دوم که در طرف دیگر نوار مرکزی است چندمی‌شود؟

## مثال ۱۲

آزمایش یانگ را در خلاء یک بار با طول موج  $\lambda_1$  و بار دیگر با طول موج  $\lambda_2$  انجام می‌دهیم. اگر محل شکاف‌ها و پرده و فاصله‌ی آن‌ها تغییر نکرده باشد و نوار روشن سوم در محل نوار تاریک پنجم آزمایش دوم تشکیل شود، بسامد پرتوی آزمایش دوم چند برابر بسامد پرتوی آزمایش اول است؟

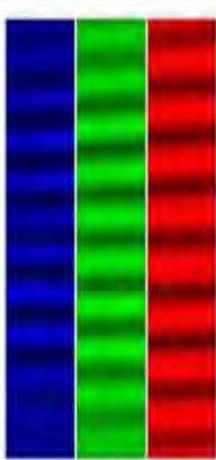
## مثال ۱۳

در آزمایش یانگ طول موج نور به کار رفته را چند برابر کنیم تا پنجمین نوار روشن جدید به محل سومین نوار تاریک قدیم منتقل شود؟

**نکته:** در آزمایش یانگ، عرض نوارهای تاریک و روشن با یکدیگر برابر است و اگر آن را با  $w$  نمایش دهیم، می‌توان نوشت:

$$w = \frac{\lambda D}{2a} \quad (14-6)$$

به عبارت دیگر اگر در طی آزمایش فاصله‌ها را تغییر ندهیم و آزمایش را با طول موج‌های مختلف انجام دهیم، عرض نوارهای تاریک روشن در آزمایش مربوط به نور قرمز، بیش از عرض نوارها در آزمایش با نور بنفش است.



## مثال ۱۴

در آزمایش یانگ، فاصله‌ی دو شکاف از یکدیگر ۱ میلی‌متر و فاصله‌ی شکاف‌ها از پرده ۵ متر است. اگر فاصله‌ی دو نوار روشن متولی  $2/5$  میلی‌متر باشد، اختلاف فاصله‌های نوار روشن سوم از دو شکاف چند میکرون است؟

**نکته:** اگر آزمایش یانگ را در محیط شفافی به ضریب شکست  $N$  که سرعت نور در آن  $V$  است انجام دهیم، طرح تداخلی متراکم‌تر می‌شود و داریم:

$$\lambda' = \frac{1}{N} \lambda \quad , \quad w' = \frac{1}{N} w \quad , \quad x'_{n,m} = \frac{1}{N} x_{n,m} \quad (15-6)$$

## مثال ۱۵

در آزمایش یانگ تأثیر کدامیک از تعییرات زیر بر فاصله‌ی نوارهای روشن از یکدیگر، مانند کاهش فاصله‌ی دو شکاف از یکدیگر است؟

- ۱) استفاده از نور آبی به جای نور قرمز
- ۲) افزایش شدت نور منبع بدون تعییر رنگ آن
- ۳) دور کردن پرده از شکاف‌ها
- ۴) انجام آزمایش در محیط شفاف دیگر به جای هوا (خلاء)

## مثال ۱۶

آزمایش یانگ را با لامپ تکرنگ زرد، در آب انجام داده‌یم. اکنون کمی فاصله‌ی پرده را از صفحه‌ی دو شکاف دور می‌کنیم. برای آنکه پهنای نوارها تعییر نکند باید ...

- ۱) آزمایش را به هوا منتقل کنیم.
- ۲) به جای لامپ زرد از قرمز استفاده کنیم.
- ۳) کمی فاصله دو شکاف را زیاد کنیم.

مثال ۱۷

آزمایش یانگ را در خلاء انجام داده‌ایم و فاصله نوار روشن دوم از نوار تاریک دوم که در طرف دیگر نوار مرکزی است  $5\text{ mm}$  شده است. اگر بدون تغییر فاصله‌ها و چشم نور آزمایش را در محیطی با ضربی شکست  $\frac{1}{3}$  تکرار کنیم، فاصله نوارهای روشن دوم و پنجم که هر دو در یک طرف نوار مرکزی هستند چند میلی‌متر خواهد شد؟

مثال ۱۸

آزمایش یانگ را با پرتویی انجام دادیم که طول موج آن در خلاء  $500\text{ nm}$  است. در هر یک از وضعیت‌های زیر اختلاف راه دو موج و اختلاف زمان‌های رسیدن دو موج را برای نوار تاریک سوم حساب کنید:

الف) آزمایش در خلاء انجام شده است.

ب) آزمایش در محیطی به ضربی شکست  $\frac{1}{3}$  انجام شده است.

مثال ۱۹

در مثال ۱۲ اگر هر دو آزمایش را در انجام می‌دادیم، جواب به دست آمده، چه تفاوتی پیدا می‌کرد؟



## مثال ۲۰

آزمایش یانگ را با طول موج  $600\text{ nm}$  انجام داده‌ایم. اگر فاصله دو شکاف از پرده  $2000$  برابر فاصله شکاف‌ها از یکدیگر باشد، از نقطه‌ای به فاصله  $2\text{ mm} / 4$  از وسط نوار روشن مرکزی، کدام نوار تشکیل می‌شود؟

## مثال ۲۱

در آزمایش یانگ، فاصله‌ی پرده از صفحه دو شکاف را  $25$  درصد افزایش می‌دهیم و سپس دستگاه آزمایش یانگ را به درون مایعی با ضربی شکست  $N$  فرو می‌بریم. در نتیجه سومین نوار تاریک جدید به محل سومین نوار روشن روی پرده منتقل می‌شود. ضربی شکست مایع را بیابید.

## مثال ۲۲

آزمایش یانگ را بار اول در هوا و بار دوم در مایعی با ضربی شکست  $\frac{11}{6}$  انجام می‌دهیم. کدام نوار تاریک درون مایع، روی محل کدامین نوار روشن در هوا قرار می‌گیرد؟



**کهنه نکته:** اگر آزمایش یانگ را با نور سفید انجام دهیم، نوارهای تداخلی حاصل از طول موج‌های مختلف، روی هم قرار می‌گیرد و طرحی مطابق شکل مقابل را مشاهده خواهیم کرد. توجه شود که عرض نوار روشن سفید مرکزی، با عرض نوار حاصل از نور بنفسن برابر است.

