

موج‌های الکترومغناطیسی

پیش از آن که در مورد امواج الکترومغناطیسی صحبت کنیم، لازم می‌دانم که یک یادآوری هرچند مختصر از بعضی از مطالب فیزیک ۳ داشته باشیم:

- ۱- در فضای اطراف هر بار (ماهیت مادی) خاصیتی وجود دارد به نام میدان الکتریکی (ماهیت غیرمادی). به طوری که اگر باردیگری در آن فضا قرار گیرد از طرف این میدان به آن نیرو وارد می‌شود یعنی اگر بار q در میدان الکتریکی \vec{E} قرار بگیرد به آن نیرو $\vec{F} = \vec{E}q$ وارد می‌شود به طوری که اگر $q > 0$ باشد \vec{F} و \vec{E} هم‌جهت و اگر $q < 0$ باشد در خلاف جهت یکدیگر هستند. ولی در هر صورت \vec{F} و \vec{E} هم‌راستا هستند. بردار میدان الکتریکی در هر نقطه مماس بر خطوط میدان الکتریکی است.
- ۲- در یک مدار الکتریکی، هنگامی جریان الکتریکی برقرار می‌شود که به کمک یک اختلاف پتانسیل بتوان در مدار میدان الکتریکی ایجاد نمود تا این میدان طبق رابطه $\vec{F} = \vec{E}q$ بر بارهای آزاد نیرو وارد کرده و آنها را به حرکت درآورد طبق قرارداد جهت جریان در مدار، جهت حرکت بارهای مثبت است از پتانسیل بیش‌تر به کم‌تر ولی در داخل پیل از پتانسیل کم‌تر به بیش‌تر است.
- ۳- در فضای اطراف بارهای متحرک (ماهیت مادی) علاوه بر میدان الکتریکی خاصیتی وجود دارد به نام میدان مغناطیسی (ماهیت غیرمادی). در نتیجه در اطراف سیم حامل جریان میدان مغناطیسی وجود دارد.
- ۴- مطابق قانون فارادی هرگاه شار مغناطیسی گذرنده از یک مدار بسته با گذشت زمان تغییر کند در مدار جریان الکتریکی ایجاد می‌شود. علت ایجاد جریان آن است که نیروی محرکه القایی ایجاد شده در اثر تغییر شار که از رابطه $\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt}$ پیروی می‌کند، سبب می‌شود که بر بارهای آزاد موجود در مدار نیرو وارد شود و آنها را به حرکت درآورد و جهت جریان مطابق قانون لنز به گونه‌ای است که با عامل به وجود آورنده خود یعنی تغییرات شار مخالفت کند. یعنی اگر شار در حال افزایش است با افزایش شار و اگر در حال کاهش است با کاهش شار مخالفت کند.

خوب حالا این‌جا این سؤال مطرح می‌شود که چطور تغییر شار باعث ایجاد جریان شده است؟

می‌دانیم که فارادی آهنربایی را به یک حلقه (مدار بسته) نزدیک و یا از آن دور کرد و مشاهده کرد که در حلقه جریان ایجاد شد. می‌دانیم که فارادی با این عمل خود، میدان مغناطیسی عبوری از حلقه را تغییر داده است از طرفی می‌دانیم هنگامی در یک مدار، جریان برقرار می‌شود که بارهای آزاد تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار بگیرند. پس نتیجه می‌گیریم که فارادی با تغییر دادن میدان مغناطیسی باعث ایجاد یک میدان الکتریکی شده تا این میدان طبق رابطه $F = Eq$ بر بارهای آزاد نیرو وارد کرده (که در واقع نیروی محرکه‌ی القایی مذکور نتیجه آن است) و جریان برقرار شود. در نتیجه قانون فارادی را می‌توان این‌گونه بیان کرد که:

«میدان مغناطیسی متغیر با زمان باعث به وجود آمدن میدان الکتریکی می‌شود یعنی: $E \propto \frac{dB}{dt}$ القایی»



۱- پس میدان الکتریکی را فقط بارهای الکتریکی ایجاد نمی‌کنند بلکه در اثر تغییر میدان مغناطیسی نیز به وجود می‌آیند و به چنین میدان الکتریکی ایجاد شده‌ای، میدان الکتریکی القایی گفته می‌شود.

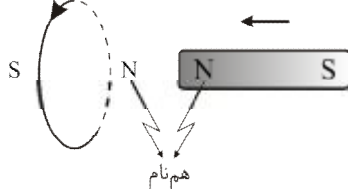
۲- چون جهت جریان همان جهت حرکت بارهای مثبت است و بارهای مثبت نیز هم جهت میدان الکتریکی حرکت می‌کنند پس: جهت جریان همان جهت میدان الکتریکی است.

۳- ثابت می‌شود که $E \propto \frac{dB}{dt}$ (میدان الکتریکی القایی)



مثال ۱: مطابق شکل آهنربایی را در مقابل حلقه رسانایی قرار داده‌ایم با دور و نزدیک کردن آهنربا، جهت میدان الکتریکی القایی را در حلقه مشخص کنید.

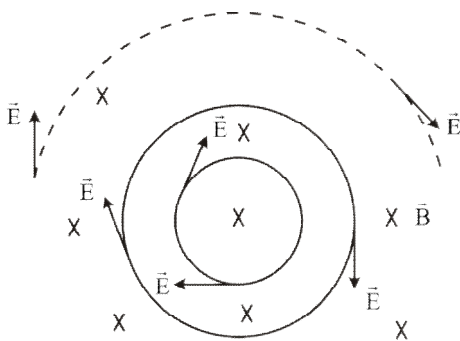
پاسخ: با نزدیک کردن آهنربا میدان مغناطیسی عبوری از حلقه (و در نتیجه شار مغناطیسی عبوری از حلقه) تغییر می‌کند و در حلقه جریان القایی ایجاد می‌شود که مطابق قانون لنز جهت آن به گونه‌ای است که با افزایش شار، یعنی با نزدیک شدن آهنربا مخالفت کند در نتیجه:



و چون جهت جریان همان جهت میدان الکتریکی است پس جهت میدان الکتریکی نیز در شکل نشان داده شده است. هنگام دور کردن آهنربا جهت جریان یا جهت میدان الکتریکی برعکس حالت اول است.



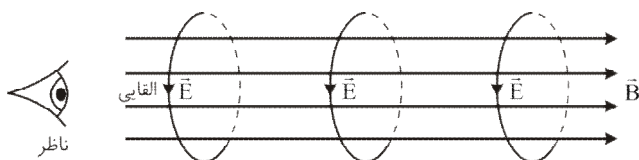
پس نتیجه می‌گیریم: میدان الکتریکی القایی، حتی هنگامی که مدار (یعنی رسانا) نیز وجود ندارد ایجاد می‌شود.



مثال ۲: در شکل زیر میدان مغناطیسی درون سو تغییر کرده و در نتیجه تغییر آن میدان الکتریکی القایی (حلقه‌های بسته) تشکیل شده است. تغییرات میدان مغناطیسی چگونه بوده است؟ یعنی افزایش یافته بوده یا کاهش؟

پاسخ: این شکل در کتاب رسم شده است اما متأسفانه کمی گمراه کننده است. دوائر رسم شده که همان خطوط میدان الکتریکی القایی هستند در واقع همگی هم اندازه هستند. (گول شکل را نخورید) زیرا این دوائر پشت سرهم هستند یعنی وقتی از روبرو به آنها نگاه کنیم فقط دایره

اولی را می‌بینیم. برای درک بهتر به شکل زیر توجه کنید. در حقیقت شکل این گونه بوده:



و همان طور که قبلاً خوانده‌اید، بردار میدان الکتریکی بر این خطوط مماس است.

خوب برویم سراغ پاسخ؛ خطوط میدان الکتریکی القایی مانند حلقه جریان می‌باشند (به مثال ۱ مراجعه کنید) یعنی دوائر این خطوط را می‌توانند حلقه جریان در نظر گرفت و به جای \vec{E} ، جهت جریان را در نظر گرفت، در نتیجه با استفاده از قانون دست راست ملاحظه می‌کنید که میدان مغناطیسی ناشی از این حلقه‌ها در درون آنها درون سو است یعنی میدان مغناطیسی آنها میدان مغناطیسی نشان داده شده در شکل را تقویت کرده‌اند یعنی نتیجه می‌گیریم که با توجه به قانون لنز این میدان در حال کاهش بوده است.



قانون ماکسول

ماکسول نشان داده که در حین باردارشدن خازن، جریان، بار هر دو صفحه را افزایش می‌دهد و در نتیجه: میدان الکتریکی بین دو صفحه افزایش می‌یابد یعنی تغییر می‌کند، با قراردادن یک عقربه مغناطیسی در نزدیکی خازن، مشاهده کرد که در اطراف خازن میدان مغناطیسی ایجاد شده است، یعنی مانند این بود که بین دو صفحه خازن جریانی برقرار شده است (زیرا قبلاً خوانده‌ایم که میدان‌های مغناطیسی در اطراف بارهای متحرک مانند سیم حامل جریان، ایجاد می‌شوند)، یعنی تغییر میدان الکتریکی مانند برقراری جریان عمل کرده بود. بنابراین ماکسول ثابت کرد که:

یک میدان الکتریکی متغیر می‌تواند در منطقه‌ای از فضا میدان مغناطیسی ایجاد کند، پس هر یک از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌توانند منبع دیگری باشند.



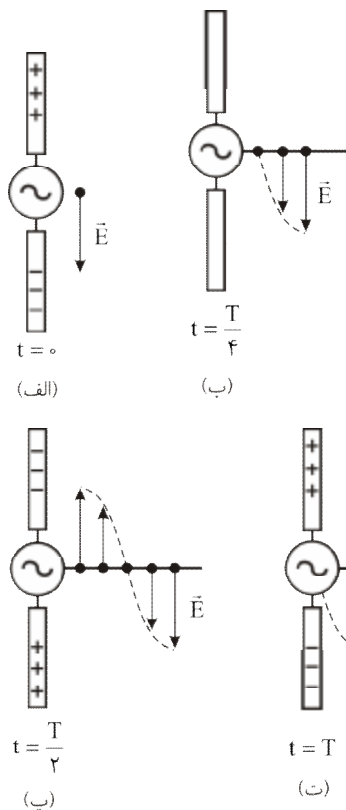
۱- به میدان مغناطیسی ایجاد شده در اثر تغییر میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی القایی گفته می‌شود.

۲- تغییرات میدان الکتریکی باید نسبت به زمان باشد یعنی: $B \propto \frac{dE}{dt}$ القایی

موج الکترومغناطیسی

آشفتگی‌های ناشی از تغییرات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌توانند در فضا از منطقه‌ای به منطقه دیگر منتشر شوند که این آشفتگی‌ها را امواج الکترومغناطیسی گوئیم. این امواج از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (ماهیت غیرمادی) تشکیل شده‌اند و این امواج هنگامی تشکیل می‌شوند که ذره بارداری شتاب بگیرد، در این صورت این ذره قسمتی از انرژی خود را به صورت امواج الکترومغناطیسی گسیل می‌کند که به گسیل امواج الکترومغناطیسی توسط اجسام، تابش گفته می‌شود.

ایجاد امواج الکترومغناطیسی (ویژه‌ی رشته‌ی ریاضی)



یکی از راه‌های ایجاد امواج الکترومغناطیسی، استفاده از آنتن است. دو میله فلزی را در نظر بگیرید که به مولد متناوب متصل‌اند یعنی ولتاژ ایجاد شده از معادله $V = V_{\max} \sin(\omega t + \phi)$ پیروی می‌کند. چون ولتاژ خروجی مولد به صورت سینوسی با زمان تغییر می‌کند پس بار روی میله‌ها نیز دائماً به صورت سینوسی تغییر می‌کند یعنی ذره باردار شتاب‌دار داریم، (مانند حرکت نوسانی ساده). فرض می‌کنیم در لحظه $t = 0$ بار روی میله بالایی بیشینه و مثبت و روی میله پایینی بیشینه و منفی است و با توجه به این که میدان الکتریکی به بار بستگی دارد در نتیجه میدان الکتریکی حاصل از بارها نیز بیشینه است و میدان الکتریکی در نزدیکی آنتن به شکل (الف) است.

از لحظه $t = 0$ تا لحظه $t = \frac{T}{4}$ (دوره نوسان بارهاست) ولتاژ و در نتیجه بار روی میله‌ها و در

نتیجه شدت میدان الکتریکی در نزدیکی آنتن کاهش می‌یابد به طوری که در لحظه $t = \frac{T}{4}$ بار و در نتیجه میدان صفر می‌شود و دقت کنید که میدان‌های الکتریکی ایجاد شده با سرعت نور از آنتن دور می‌شوند!!!

حال از لحظه $t = \frac{T}{4}$ تا $t = \frac{T}{2}$ علامت بار میله‌ها عوض شده و مقدار آن‌ها در حال افزایش است. در نتیجه میدان الکتریکی در نزدیکی آنتن



تغییر جهت داده و اندازه آن روبه‌افزایش است به طوری که در لحظه $t = \frac{T}{4}$ به بیشینه مقدار خود می‌رسد و مجدداً از لحظه $t = \frac{T}{2}$ تا $t = \frac{3T}{4}$ ولتاژ، بار و میدان در نزدیکی آنتن کاهش می‌یابد و ... (شکل‌های پ و ت)



- ۱- در تمام لحظات میدان الکتریکی نزدیک آنتن با نوسان بار الکتریکی روی آن هم‌فاز است. یعنی جهت میدان الکتریکی در زمانی که میله بالایی مثبت است روبه پایین و هنگامی که میله بالایی منفی است روبه بالاست، یعنی همواره به سمت میله‌ای است که دارای بار منفی است و هم‌چنین دقت کنید که اندازه میدان در هر لحظه به مقدار بار روی میله‌ها بستگی دارد.
- ۲- در طول یک دوره از نوسان بار، میدان الکتریکی ایجادشده در لحظه $t = 0$ به اندازه یک طول موج کامل جلورفته‌است.

بحث در مورد میدان مغناطیسی

تغییر بار روی میله‌ها که به صورت نوسانی می‌باشد باعث ایجاد یک جریان متغیر می‌شود بنابراین در فضای اطراف میله‌ها یک میدان مغناطیسی متغیر نیز ایجاد می‌شود که جهت خطوط میدان مغناطیسی مطابق قانون آمپر با استفاده از دست راست تعیین می‌شوند و به شکل دایره‌های متحدالمرکز دور میله می‌باشند و در هر لحظه بردار میدان مغناطیسی که مماس بر خطوط میدان مغناطیسی است، بر بردار میدان الکتریکی عمود است.



- ۱- جهت جریان در میله‌ها مانند جهت جریان در داخل پیل یا مولد از پتانسیل کمتر به بیش‌تر است یعنی از میله منفی به سمت میله مثبت.
- ۲- میدان‌های مغناطیسی ایجادشده نیز مانند میدان الکتریکی با سرعت نور از آنتن دور می‌شوند.



در نزدیکی آنتن هم میدان‌های ناشی از نوسان بار و هم میدان‌های القایی وجود دارند اما در فواصل دور از آنتن فقط میدان‌های القایی وجود دارند.

ویژگی‌های امواج الکترومغناطیسی

- ۱- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هر دو نوسانی هستند و دوره نوسان و بسامد آن‌ها با دوره نوسان و بسامد منبع (یعنی بارها) برابر است.
- ۲- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی القایی با یکدیگر هم‌فازند یعنی در هر نقطه هر دو میدان هم‌زمان با هم بیشینه و یا کمینه می‌شوند و یا با هم تغییر جهت می‌دهند.
- ۳- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یکدیگر عمودند و هر دوی آن‌ها بر راستای انتشار موج نیز عمودند بنابراین امواج الکترومغناطیسی، عرضی می‌باشند.
- ۴- پدیده تداخل، شکست و بازتابش مانند سایر امواج در مورد آن‌ها صورت می‌گیرد.
- ۵- تفاوت امواج الکترومغناطیسی با امواج مکانیکی در این است که در امواج مکانیکی ذرات تشکیل‌دهنده محیط نوسان می‌کنند و در امواج الکترومغناطیسی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در هر نقطه از فضا به‌طور نوسانی تغییر می‌کنند پس این امواج برای انتشار به محیط مادی نیاز ندارند.

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

۶- ماکسول نشان داد که سرعت پیشروی یا انتشار این امواج در خلأ از رابطه زیر به دست می‌آید:



که در آن ϵ_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ و μ_0 ضریب تراوایی مغناطیسی خلأ است با توجه به این که $\frac{C^2}{Nm^2} = 1/(\epsilon_0 \mu_0)$ و

$$C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8.85 \times 10^{-12} \times 4\pi \times 10^{-7}}} \approx 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

که در نتیجه: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$

که برابر سرعت انتشار نور در خلأ است.

۷- در محیطهای مادی سرعت انتشار این امواج نسبت به خلأ کاهش می یابد یعنی بیشترین سرعت انتشار این امواج در خلأ است.



به یاد دارید که اگر چند موج مکانیکی با بسامدهای مختلف ولی در یک محیط منتشر شوند سرعت انتشار یکسانی دارند اما در مورد امواج الکترومغناطیسی، بسامدهای مختلف آنها فقط در خلأ با سرعت یکسان منتشر می شوند و در محیطهای دیگر بسامدهای مختلف سرعت های مختصر متفاوتی دارند.



اگر چهار انگشت دست راست را در جهت \vec{E} قرار داده و در جهت \vec{B} خم کنیم، انگشت شست، جهت انتشار را نشان می دهد.

۸- تعاریفی که قبلاً در مورد امواج مکانیکی بیان کردیم در مورد امواج الکترومغناطیسی نیز به کار می روند:

$$\lambda = \frac{v}{f} \xrightarrow{\text{در خلأ}} \lambda = \frac{c}{f}$$

طول موج

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} \xrightarrow{\text{در خلأ}} k = \frac{\omega}{c}$$

عدد موج

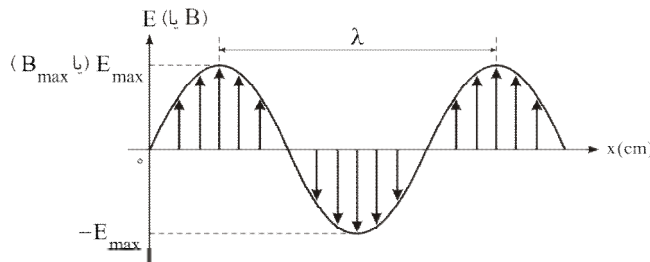
۹- تابع موج برای یک موج الکترومغناطیسی نیز مانند یک موج مکانیکی است، مثلاً برای موجی که هم جهت محور x منتشر می شود:

$$U_E = E_{\max} \sin(\omega t - kx)$$

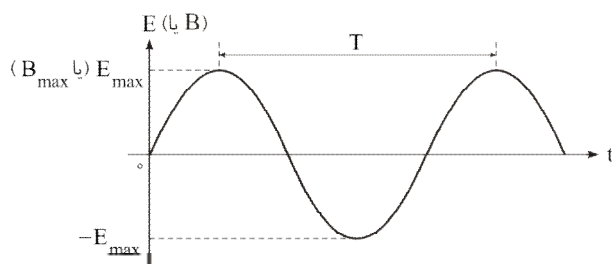
$$U_B = B_{\max} \sin(\omega t - kx)$$

همان طور که گفته شد می بینیم میدان های الکتریکی و مغناطیسی هم فازند. E_{\max} و B_{\max} به ترتیب دامنه نوسان میدان های الکتریکی و مغناطیسی هستند به مفهوم U_E و U_B دقت کنید. در فصل قبل U_p یا U_p داشتیم زیرا در آنجا فشار یا چگالی بر اثر انتشار موج به طور سینوسی با زمان تغییر می کرد اما در این جا میدان های الکتریکی و مغناطیسی.

۱۰- مانند امواج مکانیکی برای نشان دادن چگونگی انتشار امواج الکترومغناطیسی می توان از نمودارهای میدان الکتریکی (و یا مغناطیسی) بر حسب مکان یا زمان استفاده کنیم.



این نمودار، میدان الکتریکی (یا مغناطیسی) را در یک لحظه ولی در تمام نقاط محور x نشان می دهد.



این نمودار، تغییرات میدان الکتریکی (یا مغناطیسی) را در لحظات مختلف ولی در یک نقطه از فضا (روی محور x) نشان می دهد.



۱۱- این امواج حامل انرژی هستند، که این انرژی، الکتریکی و مغناطیسی است.



می‌دانیم که میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی طبق روابط $F_E = Eq$ و $F_B = qVB\sin\alpha$ به ذرات باردار نیرو وارد می‌کنند و آن‌ها را منحرف می‌کنند. امواج الکترومغناطیسی چون حامل بار الکتریکی نیستند در نتیجه در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی منحرف نمی‌شوند.