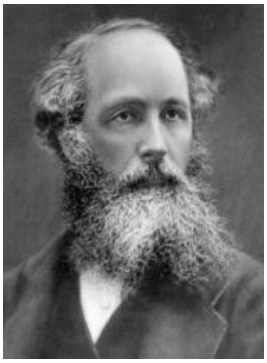
فصل اول- مدل الکترومغناطیس


تصویر ۱- جیمز کلارک ماکسول

۱-۱-مقدمه

پیشتر فرض می‌شد اثری که پس از مالش یک شانهٔ پلاستیکی به موی سر می‌تواند تکه‌های کوچک کاغذ را به خود جذب کند (**نیروی الکتریکی**) با اثری که یک آهنربای مغناطیسی می‌تواند میخ آهنی را به خود جذب کند (**نیروی مغناطیسی**) متفاوت است. اما اکنون می‌دانیم که این دو نیرو در واقع دو روی یک سکه هستند و دیگر نمی‌توان آن‌ها را به راحتی از هم تمایز داد. این اثر دوگانه نمایی که امروزه **الکترومغناطیس** نامیده می‌شود، نشأت گرفته شده از تلاش‌های بی دریغ دانشمندان فراوانی همچون ماکسول، بیوساوار، رادرفورد، هانری و..... است.

همان طور که از قبل می‌دانید هرگاه بتوان بار الکتریکی را به عنوان مضرب صحیحی از یک کوانتای بار الکتریکی، $q = ne$ که در آن، n مضربی صحیح، $e = ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹} C$ کوانتای بار الکتریکی و c یکای بار کولمب است به صورت ذره‌ای ساکن در نظر گرفت (چه مثبت و چه منفی) این ذره باردار در فضای اطراف خود میدان الکتریکی تولید می‌کند که می‌تواند بر هر ذره باردار دیگری نیروی کولنی الکترواستاتیکی وارد کند. در حالی که اگر این ذره باردار بتواند حرکت کند در فضای اطراف خود میدان مغناطیسی تولید کرده که می‌تواند بر ذرات باردار دیگر نیرویی وارد کند که جهتش بر نیروی کولنی الکترواستاتیکی مذکور عمود است. این دو نیرو که به طرق متفاوت با هم در ارتباطتند بیانگر ذات یگانه‌ای هستند که اثرات خود را در نمونه‌هایی همچمون آنتن‌ها، رادارها، لیزر و غیره به ظهور می‌رسانند.

الکترومغناطیس از نظر فیزیکدان‌ها، مهندسین برق و کامپیوتر دارای اهمیت ویژه‌ای است که در تفهیم اصول شکافنده‌های اتمی، نوسانگرهای پرتو کاتودی، رادارها، مخابرات ماهواره‌ای، اخترشناسی رادیویی و غیره اجتناب پذیر است.

۱-۲- مدل الکترومغناطیس:

کمیات مدل الکترومغناطیس به طور کلی به دو گروه کمیات **چشمه**[1] و کمیات **میدان**[2] تقسیم می‌شوند که در آن چشمه یک میدان الکترومغناطیسی همواره بارهای الکتریکی در حال سکون یا متحرک است که اغلب با نمادهای q و یا Q نمایش داده می‌شوند. هرچند یک میدان الکترومغناطیسی می‌تواند باعث توزیع دوبارهٔ بارهای شود که آن نیز به نوبه خود باعث تغییر میدان می‌گردد. بنابراین تفکیک بین علت و معلول همیشه چندان واضح نیست.

۱-۲-۱- اصل بقاء بار الکتریکی:

علاوه براین، یکی از اصول بسیار مهم در الکترومغناطیس **اصل بقای بار الکتریکی** است که مانند اصل بقای اندازهٔ حرکت، یک فرضیه یا قانون بنیادی در فیزیک است. این قانون بیان می‌دارد که بار الکتریکی نه می‌تواند تولید شود و نه نابود گردد. این یک قانون طبیعت است و آن را نمی‌توان از اصول و یا روابط دیگر استخراج کرد.

بارهای الکتریکی می‌توانند از یک محل به محل دیگر حرکت کنند و تحت تاثیر میدان الکترومغناطیسی دوباره توزیع گردند؛ اما جمع جبری بارهای مثبت و منفی در یک سیستم بسته (منزوی شده) ثابت باقی می‌ماند. **اصل بقای بار الکتریکی در تمام زمان‌ها و تحت هر شرایطی برقرار است و بررسی ریاضی آن توسط معادلهٔ پیوستگی امکان پذیر است.**

از نتایج این اصل می‌توان به قانون کیرشهف اشاره کرد که بیان می‌داشت: **مجموع تمام بارهای خروجی با مجموع تمامی بارهای ورودی به یک گره برابر است، یعنی انباشتگی بار الکتریکی در اتصالات وجود ندارد.**

۱-۲-۲- توزیع بار:

هرگاه نتوان بار الکتریکی را در نقطه‌ای خاص متصور شد می‌بایست از توزیع بار برای آن استفاده نمود. این توزیع بار می‌تواند به صورت حجمی، سطحی و یا خطی مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور مفهوم چگالی بار که برای حل مسائل کاربردی است را تعریف می کنیم،

---
[1] *source*
[2] *field*

$$\rho = \lim_{\Delta v \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta v} \quad (C/m^3) \qquad \text{چگالی حجمی بار الکتریکی} \qquad (۱-۱)$$

$$\sigma = \lim_{\Delta s \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta s} \quad (C/m^2) \qquad \text{چگالی سطحی بار الکتریکی} \qquad (۱-۲)$$

$$\lambda = \lim_{\Delta L \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta L} \quad (C/m) \qquad \text{چگالی طولی (خطی) بار الکتریکی} \qquad (۱-۳)$$

قابل به ذکر است که در حل مسائل، بنابر شکلی که بار الکتریکی بر روی آن توزیع شده است می‌توان از روابط فوق استفاده نمود اما باید دقت نمود که آیا توزیع بار پیوسته است و یا از ناحیه‌ای به ناحیه‌ای دیگر این توزیع بار متفاوت است؟ به طور مثال اگر یک کره نارسانا که بار الکتریکی به طور کاملاً یکنواخت در آن توزیع شده باشد در اختیار داشته باشیم بهتر است از چگالی حجمی بار برای آن استفاده نموده و دستگاه مختصات آن را نیز کروی فرض کنیم. اما اگر یک کره فلزی رسانا داشته باشیم که دارای بار الکتریکی باشد چون در فلزات بار الکتریکی در خارجی ترین لایه فلز قرار می گیرد بهتر است از چگالی سطحی بار (۱-۲) برای محاسبات استفاده کنیم هرچند که همچنان بهتر است که دستگاه مختصات کروی برای حل مسائل بهره گرفته شود.

۱-۲-۳- جریان الکتریکی:

جریان الکتریکی به جاری شدن بار الکتریکی گفته می‌شود. **نرخ تغییر بار نسبت به زمان را جریان الکتریکی می‌نامیم،** یعنی

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (C/s \text{ یا } A) \qquad (۱-۴)$$

که در آن I می‌تواند وابسته به زمان باشد. در یک مدار الکتریکی این بار اغلب توسط الکترون‌هایی که در سیم حرکت می‌کنند حمل می‌شود. این بار همچنین می‌تواند توسط یون‌ها در الکترولیت‌ها حمل شود یا توسط هر دو عامل یون و الکترون مثلاً در پلاسما حمل شود.

در دستگاه بین‌المللی یکاها واحد اندازه‌گیری مقدار جریان، **آمپر** نام دارد که برابر است با **میزان جاری شدن بار الکتریکی در یک سطح بر حسب کولن بر ثانیه**. جریان الکتریکی با وسیله‌ای به نام آمپرمتر اندازه‌گیری می‌شود.

در الکترومغناطیس علاوه بر جریان الکتریکی I که یک مشخصه برای اجسام رسانا است و مانند جرم ، زمان و ... یک کمیت اصلی محسوب می‌شود، کمیت چگالی جریان الکتریکی J یک کمیت برداری است و **مقدار**

جریان گذرنده از واحد سطح و عمود بر مسیر جریان را اندازه می‌گیرد. براین اساس هرگاه جریان الکتری در سطح مقطع یک هادی بطور یکنواخت جاری باشد، چگالی جریان برای تمام نقاط این مقطع عبارت است از

$$\vec{\boldsymbol{J}} = \frac{I}{A}\hat{n} \qquad (۵-۱)$$

که در آن $\hat{n}$ معرف راستای چگالی جریان و $\boldsymbol{A}$ مساحت سطح مقطع عمود بر جریان عبوری است. بردار $\boldsymbol{J}$ در هر نقطه به طرفی که بار الکتریکی مثبت در آن نقطه حرکت می‌کند، متوجه است و بدین ترتیب یک الکترون در آن نقطه در خلاف جهت $\boldsymbol{J}$ حرکت خواهد کرد.

در هادی‌های خوب جریان‌های متناوب فرکانس بالا به جای عبور از داخل هادی، محدود به عبور از لایهٔ سطحی آن است. در این موارد لازم است $\boldsymbol{J}_s$ **چگالی سطحی جریان** را تعریف کنیم که جریان در واحد پهنا در سطح هادی عمود بر جهت عبور جریان بوده و دارای واحد آمپر بر متر (A/m) است.

۱-۲-٤- کمیت های اصلی:

چهار کمیت اصلی برداری در الکترومغناطیس وجود دارد که در جدول ۱-۱ بیان شده است.

جدول ۱-۱

حوزه عملکرد	کمیت میدان	نماد	یکا (واحد)
الکتریکی	شدت میدان الکتریکی[۳]	$\boldsymbol{E}$	V/m
	جابجایی الکتریکی[۴] یا چگالی شار الکتریکی[۵]	$\boldsymbol{D}$	C/m^2
مغناطیسی	چگالی شار مغناطیسی[۶]	$\boldsymbol{B}$	T
	شدت میدان مغناطیسی[۷]	$\boldsymbol{H}$	A/m

این چهار کمیت توابع نقطه‌ای هستند که در هر نقطه از فضا تعریف شده و عموما توابعی از مختصات فضایی هستند. خواص مواد (یا محیط) رابطهٔ بین $\boldsymbol{E}$ و $\boldsymbol{D}$ و بین $\boldsymbol{B}$ و $\boldsymbol{H}$ را تعیین می‌کند. این روابط را روابط اساسی یک محیط گویند که در آینده به آن‌ها بیشتر خواهیم رسید.

---

[3] *Electric Field Intensity*
[4] *Electric Displacement*
[5] *Electric Flux Density*
[6] *Magnetic Flux Density*
[7] *Magnetic Field Intensity*

منظور اصلی از مطالعهٔ الکترومغناطیس، درک صحیح تأثیر متقابل بین بارهای الکتریکی و جریان‌های قرار گرفته در فاصله‌ای از آن‌ها، بر اساس مدل الکترومغناطیسی است. میدان‌ها و امواج (میدان‌های وابسته به زمان و مکان) کمیت‌های اصلی ادراکی این مدل هستند و فرضیه‌های اساسی $\boldsymbol{E}$، $\boldsymbol{D}$، $\boldsymbol{B}$ و $\boldsymbol{H}$ و کمیت‌های چشمه را به هم ارتباط دهند و روابط حاصل از آن‌ها به توضیح و پیش‌بینی پدیده‌های الکترومغناطیس منجر خواهد شد.

۱-۳- واحدهای *SI* و ثوابت جهانی:

اندازه‌گیری هر کمیت فیزیکی باید با یک عدد و به دنبال آن یک واحد بیان گردد. در مدل الکترومغناطیسی علاوه بر کمیت‌های میدان درج شده در جدول ۱-۱ سه ثابت جانی[8] وجود دارد که به ویژگی‌های فضای آزاد (خلأ) مربوط هستند که عبارتند از:

۱- سرعت امواج الکترومغناطیس (از جمله نور) در فضای آزاد ($c \cong ۳\times ۱۰^{۸} \quad m/s$)

۲- گذردهی[9] فضای آزاد ($C^{۲}/Nm^{۲} \quad \varepsilon_{۰} = \frac{۱}{\mu_{۰} c^{۲}} \cong \frac{۱}{۳۶\pi}\times ۱۰^{-۹} \cong ۸/۸۵\times ۱۰^{-۱۲}$)

۳- نفوذپذیری[10] (تراوائی) فضای آزاد ($H/m \quad \mu_{۰} = ۴\pi \times ۱۰^{-۷}$ که H معرف یکای هانری است)

$\varepsilon_{۰}$ ثابت تناسب بین چگالی شار الکتریکی $\boldsymbol{D}$ و شدت میدان الکتریکی $\boldsymbol{E}$ در فضای آزاد است، به طوری که

$$\vec{D} = \varepsilon_{۰}\vec{E} \qquad \text{در فضای آزاد} \tag{۱-۶}$$

$\mu_{۰}$ ثابت تناسب بین چگالی شارمغناطیسی $\boldsymbol{B}$ و شدت میدان مغناطیسی $\boldsymbol{H}$ در فضای آزاد است، به طوری که

$$\vec{H} = \frac{۱}{\mu_{۰}}\vec{B} \qquad \text{در فضای آزاد} \tag{۱-۷}$$

مقادیر $\varepsilon_{۰}$ و $\mu_{۰}$ با انتخاب سیستم یکاها قابل تعیین بوده و مستقل از یکدیگر نیستند.

حال که کمیات اصلی و ثابت‌های جهانی مدل الکترومغناطیس را تعریف کردیم، می‌توانیم موضوعات متنوع الکترومغناطیس را بنا گذاریم. اما، قبل از انجام این کار باید با ابزارهای ریاضی مناسب مجهز شویم. در فصل بعد قصد داریم با این ابزارها بیشتر آشنا شویم.

---

[8] *Universal Constant*
[9] *Permittivity*
[10] *Permeability*