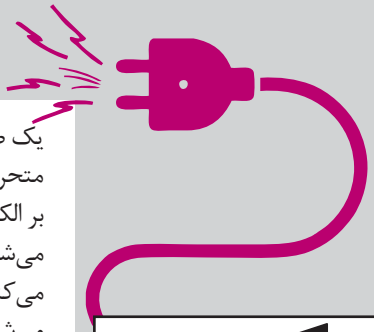


میدان الکتریکی در سیم‌های حامل جریان DC

صفورا شیرین‌نوش دبیر فیزیک استان همدان منطقهٔ لالجین
فاطمه احمدی استادیار دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

چکیده

این مقاله به بررسی منشأ تولید میدان الکتریکی درون مدار حامل جریان الکتریکی می‌پردازد. بدین منظور، ابتدا نحوهٔ تولید میدان الکتریکی در سیم‌های حامل جریان DC بررسی می‌شود. سپس با ارائه شواهدی از آشکارسازی خطوط میدان الکتریکی، برخی از مطالعاتی که در این زمینه انجام شده، مطرح می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: مدار الکتریکی، میدان الکتریکی، بارهای سطحی.

مقدمه

کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه می‌نویسد: «وقتی میدان الکتریکی در فلز ایجاد می‌شود، الکترون‌ها حرکت کاتوره‌ای خود را کمی تغییر می‌دهند و با سرعتی متوسط موسوم به سرعت سوق در خلاف جهت میدان به‌طور بسیار آهسته‌ای سوق پیدا می‌کنند که این موجب برقراری جریان الکتریکی در رسانا می‌شود»[۱]. در این بیان، به نحوه تولید میدان الکتریکی در سیم‌های حامل جریان اشاره‌ای نمی‌شود. در واقع این موضوع نه‌تنها در کتاب‌های درسی، بلکه در کتاب‌های پایه فیزیک دانشگاهی [۲] نیز بررسی نشده است. از این‌رو، این مقاله سعی دارد به شیوه ساده‌ای نحوه تولید میدان الکتریکی درون مدار را تشریح کند.

الکترون‌های آزاد در سیم حامل جریان نمی‌توانند یکدیگر را هُل بدهند.

دربارهٔ حرکت دریای الکترون‌های متحرک در یک سیم فلزی در یک جهت مشخص، (شکل ۱) غالباً چنین تصور می‌شود که الکترون‌ها شبیه تیله‌های درون لوله‌ای هستند که یکدیگر را از یک طرف به طرف دیگر هُل می‌دهند. به‌طوری‌که هر الکترون متحرک در مدار، میدان الکتریکی در اطراف خود می‌سازد که بر الکترون‌های جلویی خود تأثیر می‌گذارد و موجب دفع آن‌ها می‌شود. بدین ترتیب نیروی رانشی که الکترون‌ها بر یکدیگر وارد می‌کنند به سوق الکترون‌ها می‌انجامد و جریان در مدار برقرار می‌شود. اما چه نکته اشتباهی در این توضیح وجود دارد؟

از آنجا که هیچ‌بار اضافی در سیم رسانا وجود ندارد، پس اندازهٔ چگالی الکترون‌های متحرک در سیم فلزی باید برابر اندازه چگالی هسته‌های اتمی مثبت باشد. در نتیجه سیم رسانا از نظر الکتریکی خنثی است. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، نیروی دافعه‌ای که بر الکترون‌های سمت چپ از طرف الکترون‌های سمت راست وارد می‌شود، به‌وسیله جاذبه هسته‌های مثبتی که در همسایگی قرار دارند خنثی می‌شود. این مطلب بیانگر آن است که دریای الکترون بیشتر شبیه به گاز کامل رفتار می‌کند، به‌طوری که ذرات با یکدیگر برهم کنش ندارند. در واقع، الکترون‌ها نمی‌توانند پیوسته یکدیگر را در سیم به جلو هُل بدهند و اثری که بر یکدیگر دارند، نمی‌تواند عامل سوق آن‌ها در مدار باشد[۳].

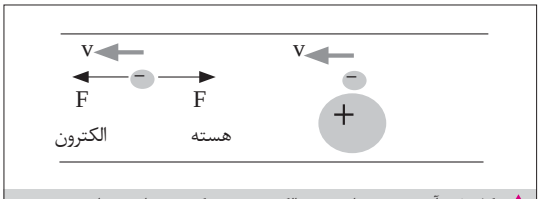
عامل سوق الکترون‌ها در مدار با دو رویکرد قابل بررسی است. از دیدگاه ماکروسکوپی، اختلاف پتانسیلی که باتری در مدار تولید می‌کند، عامل جریان بار الکتریکی در مدار است. اما از دیدگاه رویکرد میکروسکوپی عامل جریان الکترون‌ها، میدان الکتریکی است که بلافاصله بعد از اتصال کلید درون مدار برقرار شده و موجب جابه‌جایی الکترون‌ها با سرعت سوق در خلاف جهت میدان می‌شود[۴]. پرسشی که در توصیف میکروسکوپی مطرح می‌شود این است که میدان الکتریکی در مدار چگونه تولید می‌شود؟

میدان الکتریکی در یک مدار DC

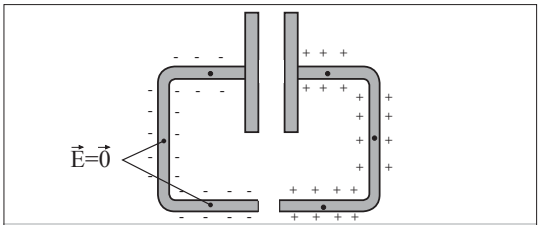
برای تشریح منشأ تولید میدان الکتریکی در مدار DC، یک خازن باردار مانند شکل (۲) در نظر می‌گیریم.

دو سیم رسانای فلزی به صفحات خازن باردار وصل شده‌اند. بنابراین بعضی از بارهای صفحات خازن روی سیم‌ها پخش می‌شوند. این نوع توزیع بارهای سطحی یک موقعیت الکترواستاتیک است که بار و میدان الکتریکی داخل رسانا باید صفر باشد. به همین دلیل نیازمند توزیع مقدار یکنواخت بارالکتریکی سطحی در دو طرف هر نقطهٔ داخل سیم هستیم تا میدان الکتریکی در آن نقطه صفر شود. بنابراین توزیع بار الکتریکی سطحی در طول سیم (به غیر از دو انتهای سیم) یکنواخت است. توزیع بار در دو انتهای سیم غیر یکنواخت است، ولی بررسی این جزئیات مورد نظر این بحث نیست.

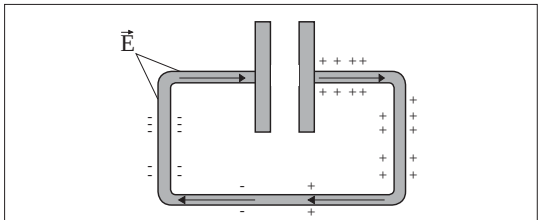
اگر دو انتهای سیم به هم وصل شوند، در زمان بسیار کوتاهی از مرتبهٔ 10^{-9} s مطابق شکل (۳) الکترون‌ها فرصت می‌یابند که از صفحه با بار منفی به طرف صفحه‌ای که الکترون از دست



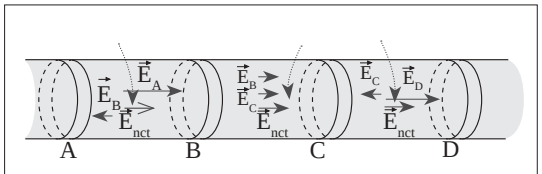
▲شکل ۱: برآیند نیروی وارد بر هر الکترون متحرک در مدار صفر است و نیروی دافعه الکترونی عامل سوق الکترون‌ها در مدار نیست.



▲شکل ۲: بارهای سطحی روی سیم‌ها قبل از اتصال آن‌ها



▲شکل ۳: بارهای سطحی روی سیم‌ها بعد از اتصال آن‌ها



▲شکل ۴: توزیع غیر یکنواخت بار الکتریکی باعث می‌شود در تمام نقاط داخل سیم، میدان الکتریکی برآیند تولید شود.

عامل سوق الکترون‌ها در مدار با دو رویکرد قابل بررسی است. از دیدگاه ماکروسکوپی، اختلاف پتانسیلی که باتری در مدار تولید می‌کند، عامل جریان بار الکتریکی است. اما از دیدگاه رویکرد میکروسکوپی عامل جریان الکترون‌ها، میدان الکتریکی است

داده و بار مثبت دارد، حرکت کنند و توزیع بارهای سطحی روی سیم به‌طور غیر یکنواخت دوباره تنظیم شود. چگالی بارهای الکتریکی سطحی روی سیم در نزدیکی صفحات خازن بیشتر است، به‌طوری‌که هر چه از صفحات باردار دور شویم اندازهٔ چگالی سطحی بار الکتریکی کاهش می‌یابد تا اینکه در نقطهٔ وسط سیم که در فاصله برابر از صفحه منفی و مثبت خازن قرار دارد از نظر الکتریکی خنثی است.

بدین ترتیب توزیع غیریکنواخت بارهای سطحی نتیجهٔ بسیار مهمی دارد که در شکل (۴) یعنی بخشی از یک سیم حامل جریان نشان داده شده است. مطابق شکل (۴) چهار حلقهٔ A تا D مدلی برای توزیع غیریکنواخت بارهای سطحی است. اندازه میدان الکتریکی که در راستای محور یک حلقهٔ باردار تولید شده، به اندازه بارالکتریکی حلقه بستگی دارد و با افزایش فاصله از حلقه کاهش می‌یابد. جهت میدان الکتریکی از حلقهٔ مثبت به حلقهٔ منفی است و از رابطهٔ $\vec{E}_{net} \cong \vec{E}_A + \vec{E}_B$ محاسبه می‌شود. به‌طور مثال در شکل (۴) در وسط فاصله بین حلقه‌های A و B میدان الکتریکی ناشی از حلقهٔ A به طرف راست و میدان الکتریکی ناشی از حلقهٔ B به طرف چپ است. ولی چون بار حلقهٔ A بیشتر است، بنابراین میدان بزرگ‌تری تولید می‌کند و میدان برآیند به طرف راست خواهد بود. همچنین، در فاصلهٔ بین حلقه‌های C و B میدان‌های ناشی از هر دو حلقه به طرف راست خواهند بود. بنابراین میدان برآیند، هم جهت با آن‌ها و به طرف راست است. بدین ترتیب در تمام نقاط، میدان برآیندی به طرف راست سیم تشکیل می‌شود.

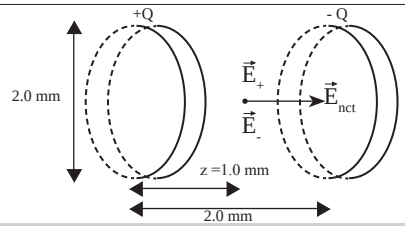
به‌طور کلی، میدان الکتریکی خالص، در نتیجهٔ توزیع غیریکنواخت بارهای سطحی تولید می‌شود. هر چند تعیین دقیق میدان الکتریکی بسیار پیچیده است، اما این مدل کمک خوبی به درک ما از میدان الکتریکی داخل سیم می‌کند. این میدان الکتریکی داخلی که جهت آن مطابق شکل ۴ از سمت نقاط مثبت‌تر به سمت نقاط منفی‌تر است، به الکترون‌های درون سیم نیرو وارد می‌کند و سرانجام جریان الکتریکی در مدار برقرار می‌شود. البته لازم به ذکر است که بارهای سطحی با بارهای متحرکی که جریان را می‌سازند، متفاوت‌اند. بارهای متحرکی که جریان را می‌سازند در سیم هستند. در حالی که میدان الکتریکی سیم به‌وسیلهٔ بارهای سطحی بی‌نهایت کوچکی تولید می‌شود که در بازه زمانی بسیار کوتاهی بعد از اتصال مدار در سطح سیم به‌وجود می‌آیند.

برای تخمین مقدار بارهای سطحی، فرض می‌کنیم در قسمتی از یک مدار، سیمی به طول ۱۰ cm و با مقاومت ۱۰Ω و حامل جریان ۱ mA داریم. در این صورت میدان الکتریکی در سیم $۱۰^{-۱}\frac{v}{m}$ است. مطابق مدل ارائه شده دو حلقه از سیم با قطر ۲ mm در فاصله ۲ mm از یکدیگر در نظر می‌گیریم. در این صورت می‌توانیم چگالی بار سطحی روی حلقه‌ها را حساب کنیم.

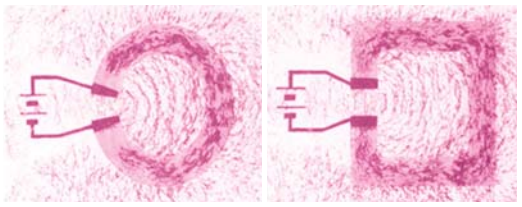
با فرض آنکه چگالی بار روی حلقه‌ها یکسان و با علامت مختلف باشد، میدان الکتریکی در وسط فاصله بین حلقه‌ها، ناشی از هر حلقه $۰/۰۰۵\frac{v}{m}$ خواهد بود. طبق رابطه $E_+ = \frac{zQ}{۴\pi\varepsilon.(z^۲+R^۲)^{\frac{۳}{۲}}}$ می‌توان بار الکتریکی روی حلقه‌ها را بدین صورت به‌دست آورد. (شکل ۵).

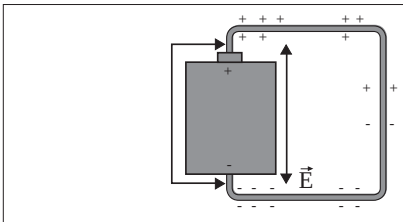
$$Q = \frac{((۰/۰۰۱)^۲+(۰/۰۰۱)^۲)^{\frac{۳}{۲}}}{۹\times۱۰^۹\times۰/۰۰۱}\times۰/۰۰۵ = ۱/۶\times۱۰^{-۱۸}\,C$$

این نتیجه نشان می‌دهد که برای تولید میدان الکتریکی به اندازه $۰/۰۱\frac{v}{m}$، بار سطحی بسیار بسیار کوچک $\pm۱/۶\times۱۰^{-۱۸}\,c$

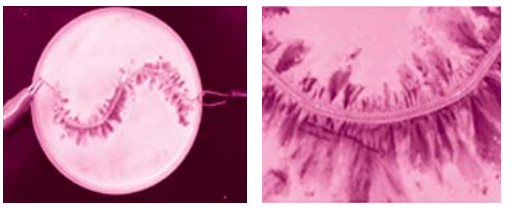


شکل ۵: میدان الکتریکی دو حلقهٔ باردار


شکل ۷: میدان الکتریکی اطراف رسانای مربع شکل و حلقوی



شکل ۶: اتصال باتری به سیمی با مقاومت R


شکل ۸: نمایش خطوط میدان الکتریکی اطراف سیم

روی هر حلقه لازم است که معادل بار ۱۰ الکترون است. میدان الکتریکی که با جابه‌جایی این تعداد الکترون به‌وجود می‌آید. برای تولید جریان در حد میلی‌آمپر در سیم یک مدار معمولی DC کافی است [۵].

به همین ترتیب اگر یک سیم با مقاومت R به دو سر یک باتری وصل شود (شکل ۶) در کسر کوچکی از ثانیه مقداری از بارهای باتری روی سطح توزیع می‌شوند (دقیقاً مانند توزیع بار در خازن) و یک میدان الکتریکی داخل سیم تولید می‌شود [۶]. این میدان بر الکترون‌های آزاد سیم رسانا نیرو وارد می‌کند و باعث حرکت الکترون‌های آزاد و برقراری جریان می‌شود.

دلیل وجود بارهای سطحی در مدار الکتریکی

زومرفلد[1] در سال ۱۹۵۲ در کتاب الکترودینامیک، میدان الکتریکی شعاعی (عمود بر سطح سیم به طرف داخل) و محوری (موازی با محور سیم) اطراف سیم حامل جریان را محاسبه کرد و از وجود مؤلفهٔ شعاعی میدان الکتریکی در خارج از سیم به این نتیجه رسید که روی سطح سیم حامل جریان، باید بارهای الکتریکی ساکنی وجود داشته باشد که منشأ تولید چنین میدانی در اطراف سیم باشند. زومرفلد این بارها را بارهای سطحی نامید. زومرفلد علت نادیده گرفتن این بارها را کوچکی اندازه آن‌ها برشمرد ولی تأکید کرد که در نظر گرفتن این بارها برای شناخت جزئیات جریان الکتریکی ضروری است.[۷].

جِفیمنکو[2] در سال ۱۹۶۲ توانست با استفاده از ولتاژ با اندازهٔ 10^4V خطوط میدان الکتریکی مدارهای الکتریکی را مطابق شکل ۷ آشکار سازد. [۸].

جَکسون[3] در سال ۱۹۹۶ سه نقش عمده برای بارهای سطحی روی سیم‌های حامل جریان DC مدار تعیین کرد.

بدین صورت که بارهای سطحی الف) پتانسیل الکتریکی در مدار به وجود می‌آورد. ب) میدان الکتریکی در فضای اطراف رسانا تولید می‌کنند. پ) میدان الکتریکی محوری درون مدار را تولید می‌کنند که باعث حرکت بارهای الکتریکی می‌شود. [۹].

در طی این سال‌ها تلاش‌های زیادی برای تعیین نحوه توزیع و محاسبه اندازه بارهای سطحی در مدارهای الکتریکی حامل جریان انجام شده است. اما آنچه که این اندازه‌گیری‌ها را پیچیده می‌کند، اندازهٔ کوچک بارهای سطحی و بستگی اندازهٔ آن‌ها به‌نحوهٔ قرار گرفتن اجزای مدار یا حتی محیط مدار است [۱۰ـ۱۲].

در سال ۲۰۱۰ میدان الکتریکی اطراف سیم به صورت ساده‌تری آشکار شد. در این شیوه، در یک بشقاب پتری مقداری روغن معدنی (mineral oil) با نوار آب‌بندی (PTFE(TeFLON) sealant) مخلوط شدند. سیم مسی به‌طول ۱۳ cm و قطر ۱ mm به شکل S در بشقاب پتری قرار گرفت. سیم مسی از یک طرف با یک مقاومت ۸ MΩ لحیم شد. این دستگاه به ۲ منبع ولتاژ ۶ kv که به‌طور سری به هم وصل شده‌اند، متصل شده است. حداکثر ولتاژ مورد استفاده به‌منظور جلوگیری از سوختن مقاومت به ۷ kv محدود می‌شود. بعد از اتصال مدار و گذشت چند دقیقه ملاحظه می‌شود که نوارهای آب‌بندی در راستای عمود بر سیم متمرکز می‌شوند (شکل ۸). این شیوه روش جدیدی برای نمایش میدان الکتریکی است که در نتیجه بارهای سطحی روی سیم به‌وجود می‌آید [۱۳].

نتیجه‌گیری

کتاب‌های فیزیک مباحث الکتریسیتهٔ ساکن و جریان الکتریکی را به‌صورت دو موضوع کاملاً مجزا از یکدیگر مطرح می‌کنند.

در حالی که بهتر است، مبحث بارهای سطحی در مدارهای الکتریکی به‌عنوان پل ارتباطی بین الکتریسیته ساکن و جاری در کتاب‌های آموزشی فیزیک در نظر گرفته شود. در این صورت فراگیران می‌توانند نگاه میکروسکوپی صحیح‌تری به بحث جریان الکتریکی داشته باشند. لذا در این مقاله سعی شده که روش ساده‌ای برای بررسی نحوه تولید میدان الکتریکی در سیم حامل جریان مطرح شود. همچنین با ارائه نمونه‌هایی از آشکارسازی خطوط میدان الکتریکی اطراف سیم حامل جریان، شواهدی عینی از وجود بارهای الکتریکی سطحی روی سیم‌ها ارائه شود. بدین منظور که این مبحث جهت آشنایی معلمان در کتاب‌های راهنمای معلم یا در کلاس‌های درس فیزیک مورد استفاده گیرد.

پی‌نوشت‌ها

1.Sommerfeld
2. Jefimenco
3. Jackson

منابع

۱.دفتر تألیف کتب درسی(۱۳۹۶). فیزیک ۳ و آزمایشگاه. شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران. (رشتهٔ تجربی ص: ۴۰ و رشتهٔ ریاضی ص: ۴۶).
2. Halliday &Resnick. (2011). Principle of physics, Night Edition, wiley plus.
3. Ruth W. Chabay and Bruce A. Sherwood. (2015). Matter& Interactions,Wiley, New York.
4. Halliday &Resnick. (2011). Principle of physics, Night Edition, wiley plus, (p: 686).
5. Knight, Randall. (2007). Physics for science and engineers. Second Edition. California polytechnic state university. P: 943, 946-947.
6. Knight, Randall. (2007). Physics for science and engineers. Second Edition. California polytechnic state university. P: 943, 958.
7. A. Sommerfeld, Electrodynamics (Academic, New York, 1952), pp. 125–130.
8. O. Jefimenko, "Demonstration of the electric fields of current-carrying conductors," Am. J. Phys. 30, 19–21 (1962).
9. J. D. Jackson, "Surface charges on circuit wires and resistors play three roles," Am. J. Phys. 64, 855–870 (1996).
10. J. A. Hernandes and A. K. T. Assis, "The potential, electric field and surface charges for a resistive long straight strip carrying a steady current, "Am. J. Phys. 71, 938–942 (2003).
11. Rainer Mu¨ ller. A semi quantitative treatment of surface charges in DC circuits, Am. J. Phys. 80 (9), P: 782-788. (2012).
12. Electric fields and charges in elementary circuits, M. A. Heald, Am. J.Phys, 52, 1984, P: 522–526.
13. Rebecca Jacobs, Alex de Salazar, and Antonio Nassar, New experimental method of visualizing the electric field due to surface charges on circuit elements. Am. J. Phys. 78, P:12(2010).