

مقدمه‌ای بر

الکترو دینامیک

نویسنده:

دیوید. جی. گریفیس

برگردان:

محمد بهتاج - ابوترا ب یغمایی

نیاز دانش

۱۳۹۳

سرشناسه	: گریفیتس، دیوید جفری، ۱۹۴۲ - م.
عنوان و نام پدیدآور	: Griffiths.David J.(David Jeffery) مقدمه‌ای بر الکترودینامیک/نویسنده دیوید جی. گریفیتس؛ برگردان محمد بهتاج، ابوتراب یغمایی.
مشخصات نشر	: تهران: نیاز دانش، ۱۳۹۲.
مشخصات ظاهری	: ۷۲۸ص: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۹-۶-۶۴۸۱-۶۰۰-۹۷۸
وضعیت فهرست‌نویسی	: فیپا
یادداشت	: عنوان اصلی: Introduction to electrodynamics. Fourth edition. 2013.
یادداشت	: ویراست قبلی کتاب حاضر تحت عنوان "آشنایی با الکترودینامیک" ترجمه حسین فرمان توسط مرکز نشر دانشگاهی در سال ۱۳۸۶ منتشر شده است.
یادداشت	: کتابنامه.
یادداشت	: نمایه.
عنوان دیگر	: آشنایی با الکترودینامیک.
موضوع	: الکترودینامیک
شناسه افزوده	: بهتاج لجبینی، محمد، ۱۳۵۷- مترجم
شناسه افزوده	: یغمایی، ابوتراب، ۱۳۶۱- مترجم
رده‌بندی کنگره	: ۱۳۹۲ ۴۱۵ ق / QC۶۸۰
رده‌بندی دیویی	: ۵۳۷/۶
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۳۳۰۵۳۷



نام کتاب	: مقدمه‌ای بر الکترودینامیک
پدیدآوردگان	: دیوید جی. گریفیتس
برگردان و گردآوری	: محمد بهتاج - ابوتراب یغمایی
مدیر اجرایی - ناظر بر چاپ	: حمیدرضا محمد شیرازی - محمد شمس
طراح جلد	: کیانا آراین
ناشر	: نیاز دانش
صفحه‌آرا	: واحد تولید انتشارات نیاز دانش
لیتوگرافی / چاپ	: گنجینه
نوبت چاپ	: اول - ۱۳۹۳
شمارگان	: ۱۰۰۰
قیمت	: ۲۵۰۰۰۰ ریال

شابک: ۹-۶-۶۴۸۱-۶۰۰-۹۷۸ ISBN:978-600-6481-60-9

هرگونه چاپ و تکثیر (اعم از زیراکس، بازنویسی، ضبط کامپیوتری و تهیه‌ی CD) از محتویات این اثر بدون اجازه کتبی ناشر ممنوع است، متخلفان به موجب بند ۵ از ماده ۲ قانون حمایت از مؤلفان، مصنفان، و هنرمندان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

کلیه حقوق این اثر برای ناشر محفوظ است.

تماس با انتشارات: ۰۹۱۲-۷۰۷۳۹۳۵ ۰۹۱۲-۷۰۷۳۹۳۵ ۰۶۶۴۷۸۱۰۸-۶۶۴۷۸۱۰۶-۶۶۴۷۸۱۰۶-۶۶۴۷۸۱۰۶-۶۶۴۷۸۱۰۶

www.Niaze -Danesh.com

مشاوره جهت نشر: ۰۹۱۲-۲۱۰۶۷۰۹

پیشگفتار

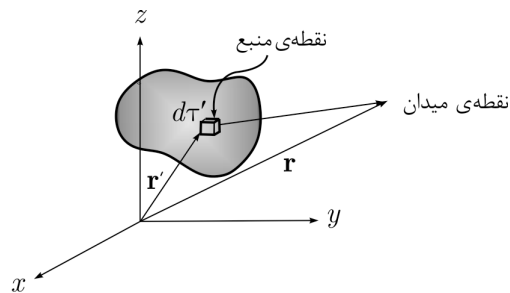
این کتابی درسی در مورد الکتریسیته و مغناطیس است که برای دوره‌ی کارشناسی در سطح پایه یا پیشرفته طراحی شده است. حتی با در نظر گرفتن مباحث ویژه (مدارهای AC، روش‌های عددی، فیزیک پلاسما، خطوط انتقال، نظریه‌ی آنتن و سایر مباحث) به راحتی می‌توان آن را در دو نیم‌سال پوشش داد. معقول است که یک دوره‌ی نیم‌ساله پس از فصل ۷ پایان یابد. در تدریس الکتروپدینامیک و برخلاف مکانیک کوانتومی یا فیزیک گرما (به عنوان مثال)، توافق نسبتاً عمومی‌ای وجود دارد. مطالب مورد بحث و حتی ترتیب ارائه‌ی آن‌ها چندان چالش برانگیز نیستند و تفاوت کتاب‌های درسی تنها در شیوه و بیان است. نگرش من از سایر شیوه‌ها کمتر صوری است. به نظر من این باعث می‌شود که ایده‌های سخت، جالب‌تر و دست‌یافتنی‌تر شوند.

در این ویرایش تعدادی زیادی تغییر کوچک داده‌ام که به نفع شفافیت و جذابیت بوده است. در چندین جا خطاهای جدی را تصحیح کرده‌ام. تعدادی مسأله و مثال اضافه کرده‌ام (و تعدادی را که اثربخش نبوده‌اند، حذف کرده‌ام). همچنین مراجع بیشتری را به ادبیات سهل‌الوصول (مخصوصاً از *American Journal of Physics*) اضافه کرده‌ام. البته می‌دانم که اغلب خوانندگان زمان یا تمایل چندانی برای مراجعه به این منابع ندارند، با این حال آن را ارزشمند می‌دانم. به این دلیل که موجب می‌شود تا حیات الکتروپدینامیک، علی‌رغم سن قابل احترامش، با کشف‌های جدید و اغواکننده‌اش در تمامی زمان‌ها، مورد تأکید قرار گیرد. امیدوارم که گاهی اوقات مسأله‌ای حس کنجکاوی شما را تحریک کند و باعث شود که به منابع رجوع کنید. برخی از آن‌ها واقعاً که جواهرند.

من بر سه مورد از نمادنگاری نامرسوم خود باقی مانده‌ام:

- بردارهای واحد دکارتی با \hat{x} ، \hat{y} و \hat{z} نوشته می‌شوند (و در کل، تمامی بردارهای واحد حرف مختصه‌ی متناظرشان را به ارث می‌برند).
- در مختصات استوانه‌ای، فاصله از محور z با s بیان می‌شود تا با r (فاصله از مبدا و مختصه‌ی شعاعی در مختصات کروی) اشتباه نشود.
- حرف دستی \mathbf{r} بیان‌گر بردار از نقطه‌ی منبع \mathbf{r}' تا نقطه‌ی میدان \mathbf{r} است (شکل را ببینید). برخی از نویسندگان شکل صریح $(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$ را ترجیح می‌دهند. اما این نمادنگاری باعث می‌شود که بسیاری از معادلات به نحو گیج‌کننده‌ای بدریخت شوند. این امر مخصوصاً زمانی رخ می‌دهد که بردار واحد \hat{r} درگیر موضوع شود. من می‌دانم که خوانندگان بی‌احتیاط در تعبیر \mathbf{r} به عنوان فریب می‌خورند. به هر حال این تعبیر انتگرال‌ها را بسیار ساده می‌کند! لطفاً نسخه بردارید و به حافظه بسپارید که $\hat{r} \equiv (\mathbf{r} - \mathbf{r}')$ ، یعنی این‌که آن با \mathbf{r}

معادل نیست. به نظر من که نمادنگاری خوبی ست، با این حال باید با مراقبت با آن برخورد کرد.^۱



همانند ویرایش‌های پیشین، دو نوع مسأله را تفکیک کرده‌ام. برخی از آن‌ها هدف آموزشی خاصی را دنبال می‌کنند و باید پس از مطالعه‌ی بخشی که به آن تعلق دارند، فوراً کار شوند. من آن‌ها را در مکان مقتضی فصل قرار داده‌ام. (در چند مورد، حل مسأله پس از متن آمده است. این نوع مسائل را با گلوله‌ای (●) که در سمت چپ حاشیه آمده است، مشخص کرده‌ام.) مسائل طولانی‌تر یا آن‌هایی که ماهیت کلی‌تری دارند، در پایان هر فصل آمده‌اند. من وقتی موضوعی را درس می‌دهم، برخی از آن‌ها را تکلیف و تعداد کمی از آن‌ها را در کلاس کار می‌کنم. مسائل چالش برانگیز غیرمعمول، با علامت تعجبی که در حاشیه آمده است، مشخص شده‌اند. بسیاری از خوانندگان از من خواسته‌اند که پاسخ آن‌ها را در آخر کتاب بیاورم که بدبختانه مانند بسیاری از درخواست‌ها با آن شدیداً مخالفت شده است. من توافق کرده‌ام که پاسخ‌ها را فراهم کنم که به نظر امری پسندیده است. انتشارات حل‌المسائل کامل را (برای مدرسان) فراهم کرده است که می‌توانید با رفتن به سایت Pearson نسخه‌ای از آن را سفارش دهید.

دیوید. جی. گریفینس

۱. در MS Word، همان "Kaufmann font" است، اما نصب آن در TeX بسیار سخت است. کاربران TeX می‌توانند آن را به آسانی از وب‌سایت من نسخه‌برداری کنند.

آگهی

الکترو دینامیک چیست و چگونه در قالب کلی فیزیک می‌گنجد؟

چهار قلمروی مکانیک

در طرح ذیل، چهار قلمروی بزرگ مکانیک را ترسیم کرده‌ام:

مکانیک کوانتومی (بور، هایزنبرگ، شرودینگر و دیگران)	مکانیک کلاسیک (نیوتن)
نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی (دیراک، پائولی، فاینمن، شوینگر و دیگران)	نسبیت خاص (اینشتین)

مکانیک نیوتنی برای اغلب اهداف «زندگی روزمره» کفایت می‌کند، اما برای اشیائی که با سرعت‌های بالا (نزدیک سرعت نور) حرکت می‌کنند، نادرست است. از این رو باید با نسبیت خاص (ارائه شده توسط اینشتین در سال ۱۹۰۵) جایگزین شود. مکانیک نیوتنی در مورد اشیائی که خیلی کوچک (نزدیک اندازه‌ی اتم‌ها) هستند نیز، به دلایل دیگر، شکست می‌خورد و جای خود را به مکانیک کوانتومی (ارائه شده توسط بور، شرودینگر، هایزنبرگ و بسیاری دیگر غالباً در دهه‌ی ۱۹۲۰) می‌دهد. برای اشیائی که بسیار سریع و بسیار کوچک هستند (که در فیزیک ذرات جدید امری مرسوم است) مکانیکی کار می‌کند که ترکیب اصول نسبیت و کوانتوم است. این مکانیک کوانتومی نسبیتی با نام نظریه میدان کوانتومی شناخته می‌شود. این نظریه از دهه‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ شروع به کار کرد، اما حتی امروزه نمی‌توان ادعا کرد که سیستمی کاملاً اقتناع‌کننده است. در این کتاب، به غیر از فصل آخر، منحصراً در حوزه‌ی مکانیک کلاسیک کار خواهیم کرد. البته این در حالی است که الکترو دینامیک با سادگی منحصر به فردی در سه قلمرو دیگر نیز نفوذ دارد. (در واقع نظریه‌ی الکترو دینامیک در اغلب جهات، به نحو خودکاری با نسبیت خاص سازگار است. این نظریه به لحاظ تاریخی محرک اصلی نسبیت بود.)

چهار نوع نیرو

مکانیک از چگونگی رفتار یک سیستم که در معرض نیرویی معین است، خبر می‌دهد. چهار نیروی "بنیادی" وجود دارند که (تاکنون) برای فیزیک شناخته شده‌اند. من آن‌ها را به ترتیب کاهش شدت‌شان در ذیل آورده‌ام:

۱- قوی

۲- الکترومغناطیسی

۳- ضعیف

۴- گرانشی

اختصار این سیاهه احتمالاً شما را شگفت‌زده کند. پس نیروی «اصطکاک» کجاست؟ نیروی «عمودی» کجاست که مانع سقوط شما بر روی کف اطاق می‌شود؟ نیروهای شیمیایی کجا هستند که مولکول‌ها را در کنار یکدیگر نگاه می‌دارند؟ نیروی ضربه مابین دو توپ بیلیارد برخورد کننده کجاست؟ پاسخ این است که تمامی این نیروها، نیروی الکترومغناطیسی هستند. در واقع گزارف نگفته‌ایم اگر بگوییم که در جهان الکترومغناطیسی زندگی می‌کنیم. تقریباً هر نیرویی، به جز نیروی گرانش، که در زندگی روزمره تجربه می‌کنیم، منشاء الکترومغناطیسی دارد.

نیروهای قوی، که پروتون‌ها و نوترون‌ها را در هسته‌ی اتم کنار یکدیگر نگاه می‌دارند، بسیار کوتاه برد هستند و بنابراین علی‌رغم آن‌که صدها برابر قوی‌تر از نیروهای الکتریکی هستند، «حس»شان نمی‌کنیم. نیروهای ضعیف نیز که مسؤول انواع مشخصی از فروپاشی رادیواکتیو هستند، کوتاه برد و از نیروهای الکترومغناطیسی به مراتب ضعیف‌ترند. گرانش (در مقایسه با سایر نیروها) آن‌قدر ضعیف است که تنها به واسطه‌ی تجمعی عظیم از جرم (همانند زمین و خورشید) متوجه‌اش می‌شویم. دفع الکتریکی میان دو الکترون 10^{42} برابر جذب گرانشی‌شان است. بنابراین اگر اتم‌ها (به‌جای نیروهای الکتریکی) از طریق نیروهای گرانشی در کنار یکدیگر قرار می‌گرفتند، یک اتم هیدروژن از جهانی که می‌شناسیم بسیار بزرگ‌تر بود.

نیروهای الکترومغناطیسی نه تنها در زندگی روزمره غالب مطلق هستند، بلکه تنها نیروهایی هستند که تا به امروز کاملاً شناخته شده‌اند. البته نظریه‌ی کلاسیک گرانش (قانون گرانش عمومی نیوتن) و نظریه‌ی نسبیتی آن (نسبیت عام اینشتین) وجود دارند، اما هنوز هیچ نظریه‌ی کوانتومی‌ای از گرانش ساخته نشده است که کاملاً اقناع‌کننده باشد (البته بسیاری از مردم روی آن کار می‌کنند). در حال حاضر نظریه‌ای بسیار موفق (هرچند سخت و بدریخت) برای برهم‌کنش‌های ضعیف و نامزد بسیار جذابی (با نام کرومودینامیک) برای برهم‌کنش‌های قوی وجود دارد. تمامی این نظریه‌ها برآمده از الکترودینامیک هستند. هیچ‌کسی نمی‌تواند ادعا کند که نظریه‌های مذکور در این مرحله، تحقیق تجربی قاطع دارند. بنابراین الکترودینامیک، نظریه‌ای به‌غایت زیبا و موفق، برای فیزیکدانان در حکم الگو و پارادایم است؛ مدلی ایده‌آل که سایر نظریه‌ها مقلدش هستند.

قوانین الکترودینامیک کلاسیک خرده خرده توسط فرانکلین، کولن، آمپر، فارادی و دیگران کشف شدند. اما کسی که کار را تمام و در قالبی فشرده، سازگار و امروزین بسته‌بندی کرد، کسی نبود جز جیمز کلارک ماکسول. این نظریه حالا ۱۵۰ سال سن دارد.

وحدت نظریه‌های فیزیکی

در آغاز، الکتریسیته و مغناطیس موضوع‌های کاملاً جداگانه‌ای بودند. در حالی که یکی به میله‌های شیشه‌ای، خز گربه، گلوله‌های باردار، جریان‌ها، الکترولیز و آذرخش مربوط می‌شد، دیگری با آهن‌رباها، براده‌های آهن، عقربه‌های قطب‌نما و قطب شمال درگیر بود. اما اورستد در سال ۱۸۲۰ متوجه شد که جریان الکتریکی می‌تواند عقربه‌ی قطب‌نما را منحرف کند. چندی پس از آن، آمپر علت تمامی پدیده‌های مغناطیسی را به درستی بارهای الکتریکی در حرکت پیشنهاد کرد. پس از آن یعنی در سال ۱۸۳۱، فارادی کشف کرد که آهن‌ربای متحرک جریان الکتریکی تولید می‌کند. در نهایت، ماکسول و لورنتس نظریه را نهایی کردند و بدین ترتیب، الکتریسیته و مغناطیس به نحو تفکیک‌ناپذیری درهم تنیده شدند. آن‌ها دیگر نمی‌توانستند موضوع‌های مجزایی فرض شوند، بلکه دو وجه از یک موضوع پنداشته شدند. این موضوع الکترومغناطیس نام گرفت.

فارادی ماهیت نور را نیز الکتریکی فرض کرد. نظریه‌ی ماکسول توجیه خیره‌کننده‌ای برای این فرضیه فراهم آورد و چیزی نگذشت که نورشناسی، یعنی علم مطالعه‌ی عدسی‌ها، آینه‌ها، منشورها، تداخل و پراش، درون الکترومغناطیس گنجانده شد. هرگز در سال ۱۸۸۸ تأیید تجربی قاطعی برای نظریه‌ی ماکسول ارائه نمود و چنین نوشت: «ارتباط میان نور و الکتریسیته اکنون تصدیق شد. در هر آتشی و هر ذره‌ی نورانی‌ای، شاهد فرآیندی الکتریکی هستیم. بنابراین، دامنه‌ی الکتریسیته به کل طبیعت گسترش می‌یابد. این موضوع حتی بر خودمان نیز عمیقاً تأثیرگذار است. ما به داشتن اندامی الکتریکی که همان چشم باشد، آگاهی پیدا می‌کنیم.» بدین ترتیب در سال ۱۹۰۰، سه شاخه‌ی عمده‌ی فیزیک، یعنی الکتریسیته، مغناطیس و نورشناسی در یک نظریه‌ی وحدت‌یافته ادغام شدند. (چندی بعد معلوم شد که نور مرئی در طیف گسترده‌ی تابش الکترومغناطیسی تنها «پنجره‌ای» کوچک را می‌گشاید. این طیف از امواج رادیویی گرفته، تا مایکروویو، فروسرخ، فرابنفش، پرتوهای x و پرتوهای گاما را شامل می‌شود.)

اینستین رویای وحدت دیگری در سر داشت که به ترکیب گرانش و الکترودینامیک مربوط می‌شد؛ درست همان‌طور که یک قرن پیش الکتریسیته و مغناطیس ترکیب شده بودند. اگرچه نظریه‌ی میدان وحدت‌یافته‌ی وی چندان توفیقی نداشت، در سال‌های اخیر همان انگیزه سلسله‌ای از طرح‌های وحدت‌جاءطلبانه (و مبتنی بر گمانه‌زنی) فزاینده را به‌راه انداخته است. این طرح‌ها در سال‌های ۱۹۶۰ و با نظریه‌ی الکتروضعیف گلاشو، واینبرگ و سلام (که نیروهای ضعیف و الکترومغناطیس را مربوط کرد) آغاز شدند و در دهه‌ی ۱۹۸۰ با نظریه‌ی ابررسمان (که به زعم مدافعان‌اش تمامی چهار نیرو را در یک «نظریه‌ی همه‌چیز» می‌گنجانند) به اوج خود رسیدند. در هر مرحله از این سلسله، مصائب ریاضیاتی پیش آمد و شکاف میان حدس‌های ملهم شده و آزمون‌های تجربی عمیق‌تر شد. با این وجود، وحدت نیروها، که از الکترودینامیک آغاز شد، به تدریج غالب در پیشرفت فیزیک بدل شد.

فرمول بندی میدانی از الکترو دینامیک

دغدغه اصلی یک نظریه‌ی الکترومغناطیس امید به حل این مسأله است: دسته‌ای بار الکتریکی در این جا قرار داده‌ایم (شاید آن‌ها را پیرامون این جا حرکت دهیم). سؤال این است که در مورد باری که آن جا قرار دارد، چه اتفاقی می‌افتد؟ جواب کلاسیک به این سؤال صورتی دارد که در یک نظریه‌ی میدان می‌گنجد. بر اساس این نظریه، فضای پیرامون بار الکتریکی از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی پر شده است (به بیانی «عطر» الکترومغناطیسی ناشی از بار حضور دارد). بار دومی که در معرض این میدان‌ها قرار دارد، نیرویی را تجربه می‌کند. بنابراین، میدان اثر یک بار را به بار دیگر منتقل می‌کند. به بیان دیگر، میدان «واسطه‌ی» برهم‌کنش است.

وقتی بار شتاب می‌گیرد، بخشی از میدان خودش را جدا کرده و با سرعت نور حرکت می‌کند. در این میان، انرژی، تکانه و تکانه‌ی زاویه‌ای را نیز حمل می‌کند. ما این را تابش الکترومغناطیسی می‌نامیم. وجود تابش‌های الکترومغناطیسی ما را به این دعوت می‌کند (اگر مجبور نکند) که میدان‌ها را موجودات دینامیکی مستقل و متکی به خود در نظر بگیریم. هر قدر از آن‌ها، همان‌اندازه «واقعی» است که اتم و توپ بیس‌بال واقعی است. بدین ترتیب، توجه ما از مطالعه‌ی نیروهای میان بارها به خود نظریه‌ی میدان‌ها معطوف می‌شود. با این حال، باری باید وجود داشته باشد که میدان الکترومغناطیسی تولید شود و باز بار دیگری باید وجود داشته باشد که میدان را آشکار کند. بنابراین، کار را با مرور ویژگی‌های اساسی بار الکتریکی آغاز می‌کنیم.

بار الکتریکی

۱. بارهای الکتریکی دو نوع هستند آن‌ها را «مثبت» و «منفی» خطاب می‌کنیم، چراکه تمایل دارند اثر یکدیگر را خنثی کنند (اگر شما $+q$ و $-q$ را در یک نقطه داشته باشید، به لحاظ الکتریکی مانند آن است که اصلاً باری ندارید). شاید واضح به نظر برسد، اما شما را به این تشویق می‌کنم که در مورد امکان‌های دیگر کمی تأمل کنید. اگر ۸ یا ۱۰ نوع بار گوناگون وجود داشت، چه می‌شد؟ (در کرومودینامیک چنین است. در آن جا سه کمیت شبیه به بار الکتریکی داریم که هر یک ممکن است مثبت یا منفی باشند). یا اگر دو بار تمایلی به خنثی کردن یکدیگر نداشتند، چه می‌شد؟ واقعیت عجیب آن است که بارهای مثبت و منفی در جسم مادی با دقت شگفت‌انگیزی دقیقاً معادل هستند و بنابراین، اثر ناشی از آن‌ها با تقریب خوبی کاملاً خنثی است. اگر چنین نبود، دست‌خوش نیروهای شدیدی بودیم. اگر بارهای الکتریکی در سیب‌زمینی تنها به اندازه‌ی یک در 10^{10} یکدیگر را خنثی نمی‌کردند، سیب‌زمینی با شدت منفجر می‌شد.

۲. بار پایسته است. به بیان دیگر، بار خلق یا نابود نمی‌شود، و آنچه اکنون وجود دارد، وجود

داشته است. (بار مثبت ممکن است که بار منفی معادلی را «فنا» کند، اما به خودی خود نمی‌تواند نابود شود. باید چیزی باشد که با بار الکتریکی برهم‌کنش کند.) در نتیجه، بار کل عالم در طول زمان ثابت است. این را پایستگی کلی بار می‌نامیم. در واقع می‌توانم چیزی قوی‌تر از این هم ادعا کنم. مبتنی بر پایستگی کلی، باری در نیویورک می‌تواند غایب شود و هم‌زمان در سان فرانسیسکو ظاهر شود (که در این صورت، بار کل تغییری نمی‌کند). البته می‌دانیم که چنین اتفاقی نمی‌افتد. اگر بار در نیویورک باشد و به سان فرانسیسکو برود، پس باید مسیری پیوسته را میان این دو شهر طی کند. این را پایستگی موضعی بار می‌نامیم. در آینده به صورت‌بندی ریاضی و دقیقی خواهیم پرداخت که بیان‌گر پایستگی موضعی بار است. آن را معادله‌ی پیوستگی می‌نامیم.

۳. بار کوانتیده است. اگرچه در الکترودینامیک کلاسیک ضرورتی بر این امر وجود ندارد، واقعیت این است که بار الکتریکی تنها مقادیر گسسته دارد. به عبارت دیگر، بار مضربی صحیح از واحد پایه‌ی بار است. اگر بار پروتون را با $+e$ نشان دهیم، بار الکترون $-e$ خواهد بود. بار نوترون صفر است. بار مزون پای $+e$ ، 0 و $-e$ است. هسته‌ی کربن بار $+6e$ دارد و به همین ترتیب (بار $7,392e$ یا حتی $1/2e$ هرگز وجود ندارد).^۱ واحد بنیادی بار بسیار کوچک است. در نتیجه، برای اهداف عملی بهتر است که اصلاً قید کوانتش را بزنیم. آب هم «در حقیقت» از تکه‌های گسسته (مولکول‌ها) تشکیل شده است. با این حال، اگر با مقادیری بزرگ از آن سروکار داشته باشیم، می‌توانیم آن را شارهای پیوسته در نظر بگیریم. این نظر بسیار به دیدگاه ماکسول نزدیک است. او هیچ چیزی از الکترون و پروتون نمی‌دانسته است. پس باید بار را نوعی «ژله» می‌پنداشته است که می‌تواند به بخش‌هایی با اندازه‌های دل‌خواه تقسیم و بخش شود.

یگاها

الکترودینامیک با سیستم‌های یکای رقیب دچار درد سر شده است. این سیستم‌های رقیب ارتباط میان فیزیکدانان را دچار مشکل کرده‌اند. وضعیت از آن‌چه در مکانیک اتفاق می‌افتد بدتر است، چراکه اگرچه انسان‌های قدیمی هنوز از پوند و فوت صحبت می‌کنند، حداقل معادلات بدون توجه به واحدهای اندازه‌گیری شبیه به هم هستند. به‌عنوان مثال، معادله‌ی نیوتن $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ است، حال می‌خواهد فوت-پوند-ثانیه واحدها باشند یا کیلوگرم-متر-ثانیه یا هر چیز دیگری. اما در الکترومغناطیس چنین نیست. به‌عنوان مثال، قانون کولن می‌تواند شکل‌های متنوعی داشته باشد:

۱- در حقیقت، پروتون‌ها و نوترون‌ها از کوارک‌ها تشکیل شده‌اند که حامل بارهای کسری ($\pm 2/3e$ و $\pm 1/3e$) هستند. با این حال، کوارک آزاد در طبیعت وجود ندارد. به هر روی، این موضوع کوانتیده بودن بار را زیر سؤال نمی‌برد و تنها مقدار واحد پایه را کم می‌کند.

$$\mathbf{F} = \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (\text{گوسی}) \quad \mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (\text{SI}) \quad \mathbf{F} = \frac{1}{4\pi} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (\text{HL})$$

از میان سیستم‌های مورد استفاده، سیستم‌های گوسی (cgs) و SI (mks) رایج‌ترین‌ها هستند. با این حال، نظریه پردازان فیزیک ذرات سیستم سومی را با نام هویساید-لورنتس ترجیح می‌دهند. اگرچه سیستم یکاهای گوسی امتیازهای نظری منحصر به فردی دارد، اغلب مدرسان دوره‌ی کارشناسی سیستم SI را ترجیح می‌دهند که فکر می‌کنم به خاطر یکاهای خانگی آشناست (ولت، آمپر و وات) که این سیستم را شامل می‌شوند. بنابراین، در این کتاب یکاهای SI را استفاده خواهم کرد. ضمیمه‌ی C «لغت‌نامه‌ای» را برای تبدیل نتایج اصلی به یکاهای گوسی فراهم می‌کند.

فهرست مطالب

۳	پیشگفتار.....
۵	آگهی.....

فصل ۱/ آنالیز برداری ۱۹

۱۹	۱-۱ ■ جبر برداری.....
۱۹	۱-۱-۱ ■ عمل‌های برداری.....
۲۳	۲-۱-۱ ■ جبر برداری: صورت مؤلفه‌ای.....
۲۶	۳-۱-۱ ■ حاصل ضرب‌های سه‌گانه.....
۲۸	۴-۱-۱ ■ بردارهای مکان، جابه‌جایی و جدایی.....
۳۰	۵-۱-۱ ■ بردارها چگونه تبدیل می‌شوند.....
۳۳	۲-۱ ■ حساب دیفرانسیل.....
۳۳	۱-۲-۱ ■ مشتق‌های «معمولی».....
۳۴	۲-۲-۱ ■ گرادیان.....
۳۷	۳-۲-۱ ■ عملگر دل.....
۳۸	۴-۲-۱ ■ دیورژانس.....
۴۰	۵-۲-۱ ■ کرل.....
۴۲	۶-۲-۱ ■ قواعد حاصل ضرب.....
۴۴	۷-۲-۱ ■ مشتق‌های دوم.....
۴۷	۳-۱ ■ حساب انتگرال.....
۴۷	۱-۳-۱ ■ انتگرال‌های خط، سطح و حجم.....
۵۲	۲-۳-۱ ■ قضیه‌ی بنیادی حساب.....
۵۳	۳-۳-۱ ■ قضیه‌ی بنیادی برای گرادیان.....
۵۶	۴-۳-۱ ■ قضیه‌ی بنیادی برای دیورژانس.....
۵۹	۵-۳-۱ ■ قضیه‌ی بنیادی برای کرل.....
۶۲	۶-۳-۱ ■ انتگرال‌گیری جزء به جزء.....
۶۴	۴-۱ ■ مختصات منحنی‌الخط.....
۶۴	۱-۴-۱ ■ مختصات کروی.....
۷۰	۲-۴-۱ ■ مختصات استوانه‌ای.....

۷۲	۵-۱	تابع دلتای دیراک
۷۲	۱-۵-۱	دیورژانس $\hat{\mathbf{r}}/r^2$
۷۳	۲-۵-۱	تابع دلتای دیراک یک-بعدی
۷۸	۳-۵-۱	تابع دلتای سه-بعدی
۸۱	۶-۱	نظریه میدان‌های برداری
۸۱	۱-۶-۱	قضیه هلمهولتز
۸۲	۲-۶-۱	پتانسیل‌ها
۸۴		مسائل بیشتر فصل ۱

فصل ۲/مقدمه‌ای بر الکترودینامیک ۹۱

۹۱	۱-۲	میدان الکتریکی
۹۱	۱-۱-۲	مقدمه
۹۲	۲-۱-۲	قانون کولن
۹۴	۳-۱-۲	میدان الکتریکی
۹۶	۴-۱-۲	توزیع‌های بار پیوسته
۱۰۰	۲-۲	دیورژانس و کرل میدان‌های برداری
۱۰۰	۱-۲-۲	خطوط میدان، شار و قانون گاوس
۱۰۵	۲-۲-۲	دیورژانس \mathbf{E}
۱۰۶	۳-۲-۲	کاربردهای قانون گاوس
۱۱۳	۴-۲-۲	کرل \mathbf{E}
۱۱۴	۳-۲	پتانسیل الکتریکی
۱۱۴	۱-۳-۲	مقدمه‌ای بر پتانسیل
۱۱۶	۲-۳-۲	نکاتی در مورد پتانسیل
۱۲۰	۳-۳-۲	معادله پواسون و معادله لاپلاس
۱۲۱	۴-۳-۲	پتانسیل توزیع بار جایگزیده
۱۲۶	۵-۳-۲	شرایط مرزی
۱۲۹	۴-۲	کار و انرژی در الکتروستاتیک
۱۲۹	۱-۴-۲	کار انجام شده برای حرکت بار
۱۳۰	۲-۴-۲	انرژی توزیع بار نقطه‌ای
۱۳۳	۳-۴-۲	انرژی توزیع بار پیوسته

۱۳۵.....	۴-۴-۲ ■ نکاتی پیرامون انرژی الکتروستاتیک.....
۱۳۷.....	۵-۲ ■ رساناها.....
۱۳۷.....	۱-۵-۲ ■ ویژگی‌های پایه.....
۱۳۹.....	۲-۵-۲ ■ بارهای القایی.....
۱۴۴.....	۳-۵-۲ ■ بار سطحی و نیروی وارد بر رسانا.....
۱۴۶.....	۴-۵-۲ ■ خازن‌ها.....
۱۴۹.....	مسائل بیشتر فصل ۲.....

فصل ۳/ پتانسیل‌ها ۱۵۷

۱۵۷.....	۳-۱ ■ معادله‌ی لاپلاس.....
۱۵۷.....	۱-۱-۳ ■ مقدمه.....
۱۵۸.....	۲-۱-۳ ■ معادله‌ی لاپلاس در یک-بعد.....
۱۶۰.....	۳-۱-۳ ■ معادله‌ی لاپلاس در دو-بعد.....
۱۶۱.....	۴-۱-۳ ■ معادله‌ی لاپلاس در سه بعد.....
۱۶۴.....	۵-۱-۳ ■ شرایط مرزی و قضایای یکتایی.....
۱۶۷.....	۶-۱-۳ ■ رساناها و قضیه‌ی دوم یکتایی.....
۱۷۰.....	۲-۳ ■ روش تصاویر.....
۱۷۰.....	۱-۲-۳ ■ مسأله‌ی تصویری کلاسیک.....
۱۷۲.....	۲-۲-۳ ■ بار سطحی القایی.....
۱۷۳.....	۳-۲-۳ ■ نیرو و انرژی.....
۱۷۴.....	۴-۲-۳ ■ سایر مسائل تصویری.....
۱۷۷.....	۳-۳ ■ جداسازی متغیرها.....
۱۷۸.....	۱-۳-۳ ■ مختصات دکارتی.....
۱۸۹.....	۲-۳-۳ ■ مختصات کروی.....
۲۰۰.....	۴-۳ ■ بسط چندقطبی.....
۲۰۰.....	۱-۴-۳ ■ پتانسیل‌های تقریبی در فواصل زیاد.....
۲۰۴.....	۲-۴-۳ ■ جملات تک‌قطبی و دوقطبی.....
۲۰۷.....	۳-۴-۳ ■ مبداء مختصات در بسط‌های چندقطبی.....
۲۰۸.....	۴-۴-۳ ■ میدان الکتریکی دوقطبی.....
۲۱۱.....	مسائل بیشتر فصل ۳.....

فصل ۴/ میدان‌های الکتریکی در ماده..... ۲۲۱

۲۲۱.....	۱-۴ ■ قطبش.....
۲۲۱.....	۱-۱-۴ ■ دی‌الکتریک‌ها.....
۲۲۲.....	۲-۱-۴ ■ دوقطبی‌های القایی.....
۲۲۵.....	۳-۱-۴ ■ هم‌راستایی مولکول‌های قطبی.....
۲۲۸.....	۴-۱-۴ ■ قطبش.....
۲۲۹.....	۲-۴ ■ میدان شیء قطبیده.....
۲۲۹.....	۱-۲-۴ ■ بارهای مقید.....
۲۳۲.....	۲-۲-۴ ■ تعبیر فیزیکی بارهای مقید.....
۲۳۶.....	۳-۲-۴ ■ میدان در درون دی‌الکتریک.....
۲۳۸.....	۳-۴ ■ جابه‌جایی الکتریکی.....
۲۳۸.....	۱-۳-۴ ■ قانون گاوس در حضور دی‌الکتریک‌ها.....
۲۴۲.....	۲-۳-۴ ■ شباهت فریبده.....
۲۴۳.....	۳-۳-۴ ■ شرایط مرزی.....
۲۴۴.....	۴-۴ ■ دی‌الکتریک‌های خطی.....
۲۴۴.....	۱-۴-۴ ■ پذیرفتاری، نفوذپذیری و ثابت دی‌الکتریک.....
۲۵۱.....	۲-۴-۴ ■ مسائل مقدار مرزی با دی‌الکتریک‌های خطی.....
۲۵۷.....	۳-۴-۴ ■ انرژی در سیستم‌های دی‌الکتریک.....
۲۶۳.....	۴-۴-۴ ■ نیروی وارد بر دی‌الکتریک‌ها.....
۲۶۷.....	مسائل بیشتر فصل ۴.....

فصل ۵/ مغناطوستاتیک..... ۲۷۳

۲۷۳.....	۱-۵ ■ قانون نیروی لورنتس.....
۲۷۳.....	۱-۱-۵ ■ میدان‌های مغناطیسی.....
۲۷۵.....	۲-۱-۵ ■ نیروهای مغناطیسی.....
۲۸۰.....	۳-۱-۵ ■ جریان‌ها.....
۲۸۸.....	۲-۵ ■ قانون بیو-ساوارا.....
۲۸۸.....	۱-۲-۵ ■ جریان‌های پایا.....
۲۸۹.....	۲-۲-۵ ■ میدان مغناطیسی ناشی از جریان پایا.....

۲۹۵.....	۳-۵ ■ دیورژانس و کرل B
۲۹۵.....	۱-۳-۵ ■ جریان‌های مستقیم‌الخط
۲۹۷.....	۲-۳-۵ ■ دیورژانس و کرل B
۳۰۰.....	۳-۳-۵ ■ قانون آمپر
۳۰۸.....	۴-۳-۵ ■ مقایسه‌ی مغناطوستاتیک و الکتروستاتیک
۳۱۱.....	۴-۵ ■ پتانسیل برداری مغناطیسی
۳۱۱.....	۱-۴-۵ ■ پتانسیل برداری
۳۱۸.....	۲-۴-۵ ■ شرایط مرزی
۳۲۰.....	۳-۴-۵ ■ بسط چندقطبی پتانسیل برداری
۳۲۶.....	مسائل بیشتر فصل ۵

فصل ۶/ میدان‌های مغناطیسی در ماده ۳۳۷

۳۳۷.....	۱-۶ ■ مغناطش
۳۳۷.....	۱-۱-۶ ■ دیامغناطیس‌ها، پارامغناطیس‌ها و فرومغناطیس‌ها
۳۳۸.....	۲-۱-۶ ■ گشتاورهای نیرو و نیروهای وارد بر دوقطبی‌های مغناطیسی
۳۴۳.....	۳-۱-۶ ■ اثر میدان مغناطیسی بر مدارهای اتمی
۳۴۵.....	۴-۱-۶ ■ مغناطش
۳۴۶.....	۲-۶ ■ میدان شیء مغناطیده
۳۴۶.....	۱-۲-۶ ■ جریان‌های مقید
۳۵۰.....	۲-۲-۶ ■ تعبیر فیزیکی جریان‌های مقید
۳۵۳.....	۳-۲-۶ ■ میدان مغناطیسی در درون ماده
۳۵۳.....	۳-۶ ■ میدان کمکی H
۳۵۳.....	۱-۳-۶ ■ قانون آمپر در موارد مغناطیده
۳۵۸.....	۲-۳-۶ ■ شباهت فرینده
۳۵۹.....	۳-۳-۶ ■ شرایط مرزی
۳۶۰.....	۴-۶ ■ محیط‌های خطی و غیرخطی
۳۶۰.....	۱-۴-۶ ■ پذیرفتاری و تراوایی مغناطیسی
۳۶۴.....	۲-۴-۶ ■ فرومغناطیس
۳۷۰.....	مسائل بیشتر فصل ۶

فصل ۷/الکترو دینامیک ۳۷۵

۳۷۵	۱-۷ ■ نیروی محرکه‌ی الکتریکی
۳۷۵	۱-۱-۷ ■ قانون اهم
۳۸۳	۲-۱-۷ ■ نیروی محرکه‌ی الکتریکی
۳۸۶	۳-۱-۷ ■ نیروی محرکه‌ی القایی حرکتی
۳۹۴	۲-۷ ■ القای الکترومغناطیسی
۳۹۴	۱-۲-۷ ■ قانون فارادی
۴۰۰	۲-۲-۷ ■ میدان الکتریکی القایی
۴۰۶	۳-۲-۷ ■ القاء
۴۱۴	۴-۲-۷ ■ انرژی در میدان‌های مغناطیسی
۴۱۹	۳-۷ ■ معادلات ماکسول
۴۱۹	۱-۳-۷ ■ الکترو دینامیک پیش از ماکسول
۴۲۱	۲-۳-۷ ■ ماکسول چگونه قانون آمپر را تعمیر کرد
۴۲۵	۳-۳-۷ ■ معادلات ماکسول
۴۲۶	۴-۳-۷ ■ بار مغناطیسی
۴۲۸	۵-۳-۷ ■ معادلات ماکسول در ماده
۴۳۱	۶-۳-۷ ■ شرایط مرزی
۴۳۳	مسائل بیشتر فصل ۷
۴۴۶	میان برده

فصل ۸/قوانین پایستگی ۴۴۷

۴۴۷	۱-۸ ■ بار و انرژی
۴۴۷	۱-۱-۸ ■ معادله‌ی پیوستگی
۴۴۸	۲-۱-۸ ■ قضیه‌ی پوینتینگ
۴۵۳	۲-۸ ■ تکانه
۴۵۳	۱-۲-۸ ■ قانون سوم نیوتن در الکترو دینامیک
۴۵۴	۲-۲-۸ ■ تانسور تنش ماکسول
۴۶۰	۳-۲-۸ ■ پایستگی تکانه
۴۶۴	۴-۲-۸ ■ تکانه‌ی زاویه‌ای

- ۳-۸ ■ نیروهای مغناطیسی کار انجام نمی‌دهند ۴۶۸
 مسائل بیشتر فصل ۸ ۴۷۴

فصل ۹ / امواج الکترومغناطیسی ۴۷۹

- ۱-۹ ■ امواج در یک بعد ۴۷۹
 ۱-۱-۹ ■ معادله‌ی موج ۴۷۹
 ۲-۱-۹ ■ امواج سینوسی ۴۸۳
 ۳-۱-۹ ■ شرایط مرزی: بازتاب و تراگیل ۴۸۶
 ۴-۱-۹ ■ قطبش ۴۹۰
 ۲-۹ ■ امواج الکترومغناطیسی در خلاء ۴۹۲
 ۱-۲-۹ ■ معادله‌ی موج برای E و B ۴۹۲
 ۲-۲-۹ ■ امواج تخت تک‌فام ۴۹۴
 ۳-۲-۹ ■ انرژی و تکانه در امواج الکترومغناطیسی ۴۹۸
 ۳-۹ ■ امواج الکترومغناطیسی در ماده ۵۰۱
 ۱-۳-۹ ■ انتشار در محیط‌های خطی ۵۰۱
 ۲-۳-۹ ■ بازتاب و تراگیل در فرود عمودی ۵۰۳
 ۳-۳-۹ ■ بازتاب و تراگیل در فرود مایل ۵۰۶
 ۴-۹ ■ جذب و پاشندگی ۵۱۳
 ۱-۴-۹ ■ امواج الکترومغناطیسی در رساناها ۵۱۳
 ۲-۴-۹ ■ بازتاب در صفحه‌ی رسانا ۵۱۸
 ۳-۴-۹ ■ وابستگی نفوذپذیری به بسامد ۵۲۰
 ۵-۹ ■ امواج هدایت شده ۵۲۹
 ۱-۵-۹ ■ موج‌برها ۵۲۹
 ۲-۵-۹ ■ امواج در موج‌بر مستطیلی ۵۳۲
 ۳-۵-۹ ■ خط تراگیل هم‌محور ۵۳۶
 مسائل بیشتر فصل ۹ ۵۳۷

فصل ۱۰ / پتانسیل‌ها و میدان‌ها ۵۴۳

- ۱-۱۰ ■ صورت‌بندی پتانسیلی ۵۴۳
 ۱-۱-۱۰ ■ پتانسیل‌های اسکالر و برداری ۵۴۳

۵۴۷	.....	تبدیل‌های پیمانه‌ای	۲-۱-۱۰
۵۴۸	.....	پیمانه‌ی کولن و پیمانه‌ی لورنتز	۳-۱-۱۰
۵۵۱	.....	قانون نیروی لورنتس در شکل پتانسیلی	۴-۱-۱۰
۵۵۳	.....	توزیع‌های پیوسته	۲-۱۰
۵۵۳	.....	پتانسیل‌های تأخیری	۱-۲-۱۰
۵۵۸	.....	معادلات جفیمنکو	۲-۲-۱۰
۵۶۱	.....	بارهای نقطه‌ای	۳-۱۰
۵۶۱	.....	پتانسیل‌های لینارد-ویشرت	۱-۳-۱۰
۵۶۸	.....	میدان‌های بار نقطه‌ای متحرک	۲-۳-۱۰
۵۷۵	.....	مسائل بیشتر فصل ۱۰	

فصل ۱۱ / تابش ۵۷۹

۵۷۹	.....	تابش دوقطبی	۱-۱۱
۵۷۹	.....	تابش چیست؟	۱-۱-۱۱
۵۸۱	.....	تابش دوقطبی الکتریکی	۲-۱-۱۱
۵۸۸	.....	تابش دوقطبی مغناطیسی	۳-۱-۱۱
۵۹۲	.....	تابش از منبع دل‌خواه	۴-۱-۱۱
۵۹۸	.....	بارهای نقطه‌ای	۲-۱۱
۵۹۸	.....	توان تابشی از بار نقطه‌ای	۱-۲-۱۱
۶۰۵	.....	واکنش تابشی	۲-۲-۱۱
۶۱۰	.....	مکانیسم عامل واکنش تابشی	۳-۲-۱۱
۶۱۵	.....	مسائل بیشتر فصل ۱۱	

فصل ۱۲ / الکترودینامیک و نسبیت ۶۲۳

۶۲۳	.....	نظریه‌ی نسبیت خاص	۱-۱۲
۶۲۳	.....	بن‌انگاره‌های اینشتین	۱-۱-۱۲
۶۳۱	.....	هندسه‌ی نسبیت	۲-۱-۱۲
۶۴۴	.....	تبدیلات لورنتس	۳-۱-۱۲
۶۵۱	.....	ساختار فضا زمان	۴-۱-۱۲
۶۶۱	.....	مکانیک نسبیتی	۲-۱۲

۶۶۱	.....	۱-۲-۱۲	■	زمان مرجح و سرعت مرجح
۶۶۴	.....	۲-۲-۱۲	■	انرژی و تکانه‌ی نسبی
۶۶۷	.....	۳-۲-۱۲	■	سینماتیک نسبی
۶۷۳	.....	۴-۲-۱۲	■	دینامیک نسبی
۶۸۲	.....	۳-۱۲	■	الکترودینامیک نسبی
۶۸۲	.....	۱-۳-۱۲	■	مغناطیس به‌منابه‌ی پدیده‌ای نسبی
۶۸۵	.....	۲-۳-۱۲	■	میدان‌ها چگونه تبدیل می‌شوند
۶۹۶	.....	۳-۳-۱۲	■	تانسور میدان
۶۹۹	.....	۴-۳-۱۲	■	الکترودینامیک بر حسب نمادنگاری تانسوری
۷۰۳	.....	۵-۲-۱۲	■	پتانسیل‌های نسبی
۷۰۶	.....	۱۲		مسائل بیشتر فصل ۱۲

فصل ۱

آنالیز برداری

۱-۱ ■ جبر برداری

۱-۱-۱ ■ عمل‌های برداری

اگر شما ۴ مایل به سمت شمال و سپس ۳ مایل به سمت شرق بروید (شکل ۱-۱)، در مجموع ۷ مایل حرکت کرده‌اید. با این حال شما در ۷ مایلی مکانی که ایستاده بودید قرار ندارید، بلکه در ۵ مایلی آن‌جا هستید. ما به حسابی نیاز داریم که چنین کمیت‌هایی را توصیف کند. روشن است که کمیت‌ها در این حساب، به شیوه‌ی معمول جمع نمی‌شوند. جابه‌جایی‌ها (یا قطعات مستقیم‌الخط میان نقاط) علاوه بر مقدار (طول) جهت نیز دارند. بنابراین هنگام ترکیب آن‌ها، باید هر دوی آن‌ها را در نظر بگیریم. چنین موجوداتی بردار نام دارند. سرعت، شتاب، نیرو و تکانه همگی بردار هستند. برخلاف بردارها، کمیت‌هایی که صرفاً مقدار دارند و جهت ندارند، اسکالر نامیده می‌شوند. جرم، بار، چگالی و دما نمونه‌هایی از کمیت‌های اسکالر هستند.

من از حروف ضخیم (**A** و **B** و غیره) برای نشان دادن بردارها و از حروف معمولی برای نمایش اسکالر‌ها استفاده می‌کنم. مقدار بردار **A** با $|A|$ یا به نحوی ساده‌تر با A نوشته می‌شود. بردارها در نمودارها، با پیکان نمایش داده می‌شوند. در این صورت، طول پیکان متناسب با مقدار بردار و نوک پیکان نشان‌گر جهت آن خواهد بود. منهای **A** ($-A$) برداری هم‌مقدار با **A** است که جهت‌اش بر خلاف جهت آن است (شکل ۱-۲). به این نکته توجه داشته باشید که بردارها مقدار و جهت دارند، اما موضع^۱ ندارند. جابه‌جایی ۴ مایلی از واشنگتن^۲ به سمت شمال، با همان برداری نمایش داده می‌شود که جابه‌جایی ۴ مایلی از بالتی‌مور^۳ به سمت شمال را نمایش می‌دهد (البته با چشم‌پوشی از انحنای

1. Location
2. Washington
3. Baltimore