جزوه آموزشی درس فیزیک

پایه یازدهم

فصل اول : الکتریسیته ساکن

فصل دوم : جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم

فصل سوم : مغناطیس

فصل چهارم : القای الکترومغناطیس

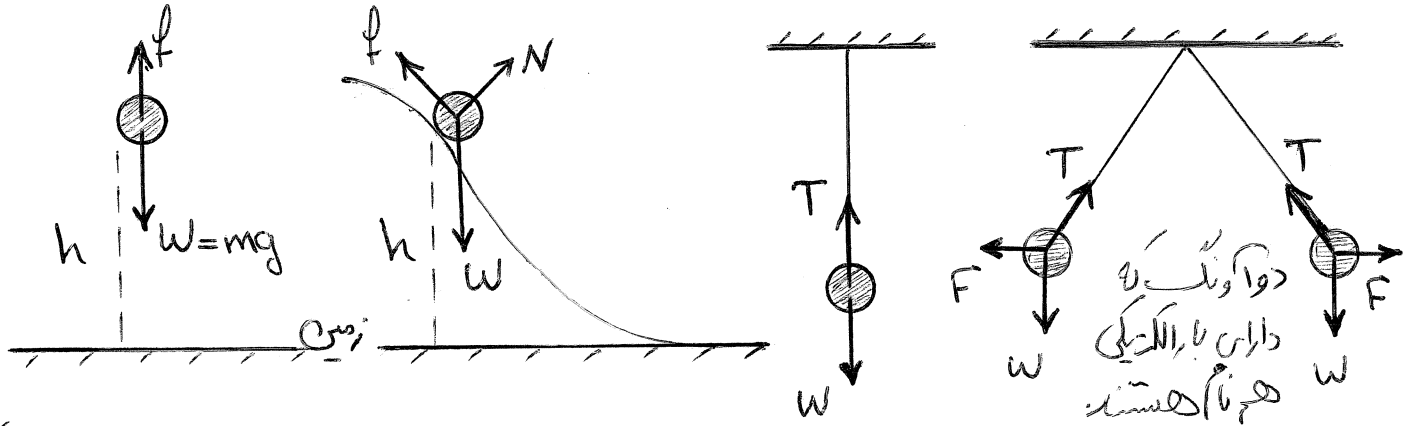
دبیرستان نمونه دولتی باقرالعلوم

تهیه و تنظیم : محمد رضایی

فصل اوّل : الکتریسیتهٔ ساکن

مقدمه

در طبیعت اجسام از طریق نیروهایی که با هم وارد می‌کنند، روی حرکت یکدیگر اثر گذار هستند.



شکل‌های بالا جسمی با جرم m را نشان می‌دهد که تحت تأثیر نیروهایی با منشاءهای متفاوت، حرکت یا تمایل‌های متفاوت دارد.

اجسام هم می‌توانند در اثر تماس و از طریق یک محیط مادی با هم نیرو وارد کنند مثل نیروی اصطکاک، نیرو کشسانی فنر و... و هم می‌توانند بدون تماس و نیاز به محیط مادی با هم وارد کنند. مثل نیروی گرانشی که بین تمام اجرام وجود دارد، نیروی الکتریکی که اجسام دارای بار الکتریکی با هم وارد می‌کنند و نیروی مغناطیسی که اجسام دارای خاصیت مغناطیسی با هم وارد می‌کنند.

در این فصل ابتدا با بار الکتریکی آشنا می‌شویم و خواهیم دید که اجسام دارای بار الکتریکی روی یکدیگر اثر می‌گذارند، در واقع با هم نیرو وارد می‌کنند که این نیرو، نیروی الکتریکی نامیده می‌شود.

در ادامه با خاصیت میدان الکتریکی آشنا می‌شویم و از طریق آن و با تعریف کمیت پتانسیل الکتریکی و اختلاف پتانسیل الکتریکی، از دیدگاه کار و انرژی حرکت و تعادل بارهای الکتریکی در میدان را بررسی می‌کنیم.

در نهایت با یک وسیلهٔ الکتریکی با نام خازن و برخی کاربردهای آن آشنا می‌شویم.

بخش اول: بار الکتریکی

① تعریف بار الکتریکی

مواد از ذرات ریزی با نام اتم تشکیل شده‌اند و اتم‌ها نیز خود از سه نوع ذره ساخته شده‌اند. (البته ذرات ریزتری هم شناخته شده‌اند) این ذرات عبارتند از پروتون، نوترون و الکترون. پروتون‌ها و نوترون‌ها در فضای مرکزی اتم که هسته نامیده می‌شود در کنار هم قرار دارند و الکترون در فضای اطراف هسته و به دور آن می‌چرخند.

به پروتون بار الکتریکی مثبت، به الکترون بار الکتریکی منفی نسبت داده شده و نوترون بدون بار الکتریکی در نظر گرفته می‌شود.

در یک اتم در حالت عادی تعداد الکترون‌ها و پروتون‌ها برابرند و اتم از نظر الکتریکی خنثی (بدون بار) است و جسمی که اتم‌های آن دارای این حالت باشند نیز، بار الکتریکی خالص ندارد و خنثی می‌باشد.

* هنگامی که اتم‌های جسمی به طریق (مالش، القا یا تماس) تعدادی الکترون از دست داده و یا تعدادی الکترون بگیرند، دارای بار الکتریکی خالص شده و می‌گوییم جسم باردار شده است.

② اصل پایستگی بار الکتریکی

در یک دستگاه منزوی، همواره تعداد الکترون‌ها و پروتون‌ها ثابت و برابرند. یعنی ممکن است اجسام موجود در این دستگاه به هر طریقی با هم مبادله الکترون داشته باشند اما این الکترون‌ها از بین نمی‌روند و البته تولید هم نمی‌شوند.

بیان دیگر اصل پایستگی بار الکتریکی: بار الکتریکی از بین نمی‌رود و تولید هم نمی‌شود، فقط می‌تواند از جسمی به جسم دیگر منتقل شود.

- تعریف دستگاه منزوی: در بحث الکتریسیته، منظور از دستگاه منزوی، مجموعه‌ای چند جسم است که از لحاظ الکتریکی با محیط اطراف خود ارتباط نداشته باشند.

* تعریف بار بنیادی

برای بار الکتریکی الکترون و پروتون می‌توان یک اندازه بدست آورد. اندازه‌گیری این بار برای اولین دفعه توسط رابرت میلیکان (دانشمند آمریکایی) انجام شد. (البته این اندازه‌گیری هم مانند تمام اندازه‌گیری‌های ما، کاملاً دقیق نیست!)

اندازه بار الکتریکی منفی یک الکترون با اندازهٔ بار مثبت یک پروتون برابر بوده و بار آن بار بنیادی گفته می‌شود. نماد بار بنیادی e می‌باشد. $\boxed{e = 1,6 \times 10^{-19}\ C}$

نکته: یکای بار الکتریکی در SI، کولن نامیده شده و با C نمایش داده می‌شود. باید دقت داشت که $1C$ مقدار بار بسیار بزرگی است، برای مثال یک آذرخش می‌تواند باری در حدود $10C$ را منتقل کند. وقتی اجسام در اثر مبادلهٔ الکترون دارای بار الکتریکی می‌شوند بار آن‌ها از مرتبهٔ 10^{-6}، 10^{-9} و ... خواهد بود. ... ، nC ، μC

(۳) اصل کوانتیده بودن بار الکتریکی

بعضی کمیت‌ها پیوسته بوده و می‌توانند هر اندازه‌ای داشته باشند. مثل زمان رخ دادن یک پدیده یا حرم یک جسم

اما بعضی کمیت‌ها از یک مقدار معین کوچکتر نخواهند بود. مثلاً اگر کمیت مورد اندازه‌گیری تعداد دانش‌آموزان یک کلاس باشد. می‌گوییم: ۱۲ نفر، ۲۸ نفر یا حتی ۴۰ نفر! اینگونه کمیت‌ها کوانتیده هستند.

★ همان‌گونه که یک جسم در اثر مبادله الکترون، دارای بار الکتریکی خالص می‌شود، می‌توان گفت اندازه بار الکتریکی آن همواره مضرب صحیحی از بار بنیادی خواهد شد. یعنی بار الکتریکی جزء کمیت‌های کوانتیده دسته‌بندی می‌شود.

بار بنیادی با e نمایش داده شده اما به طور کلی بار خالص یک جسم با q نمایش داده می‌شود.

$$q = \pm ne \quad \text{یا} \quad |q| = ne$$

$e = 1,6 \times 10^{-19} C$

زمانی که جسم الکترون می‌گیرد

زمانی که جسم الکترون از دست می‌دهد

n تعداد الکترون‌هایی است که جسم مبادله کرده.

مثال ۱: یک سکه فلزی در نظر بگیرید که از طریق تبادل الکترون با اجسام اطراف خود، دارای بار الکتریکی $+1\mu C$ شده است. تعیین کنید این سکه چه تعداد الکترون و چگونه مبادله کرده است؟ ($e = 1,6 \times 10^{-19} C$)

مثال ۲: یک اتم اورانیوم در نظر بگیرید که در حالت عادی خود قرار دارد. ($Z = 92$)

الف) بار الکتریکی هسته اتم چند کولن است؟

ب) مجموع بار الکتریکی الکترون‌های اتم چند کولن می‌شود؟

پ) بار خالص این اتم چند کولن می‌باشد؟

مثال ۳: اگر روی فرش راه بروید، ممکن است بدنتان بار الکتریکی پیدا کند، در این شرایط اگر با دست خود دست بدهید، در اثر جابجایی حدوداً $1nC$ بار الکتریکی بین شما رشد کی جابجا خواهد شد. در این صورت در این شما چند الکترون جابجا شده است؟

بخش دوم : روش های ایجاد بار الکتریکی خالص در اجسام

① روش مالشی

این روش به طور معمول برای باردار کردن اجسام عایق (نارسانا) استفاده می‌شود. هرچند که می‌توان رسانا‌ها را نیز با این روش باردار کرد.

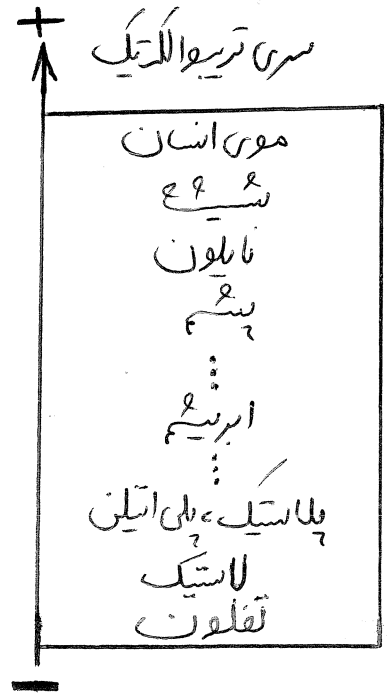
اجسام عایق برخلاف رسانا‌ها، الکترون آزاد ندارند. در واقع در اتم‌های اجسام عایق الکترون‌ها در قید هسته اتم بوده و برای جدا کردن آن‌ها نیاز به نیروهای با نسبت قوی‌تر از نیروی الکتریکی است.

وقتی دو جسم روی هم مالش داده می‌شوند، در اثر نیروی اصطکاک شکل گرفته بین آن‌ها و براساس تمایل اجسام در گرفتن الکترون (الکترون خواهی)، تعدادی الکترون بین آن‌ها مبادله می‌شود. جسمی که الکترون از دست می‌دهد، دارای بار خالص مثبت شده و جسمی که الکترون می‌گیرد، بار خالص منفی پیدا می‌کند.

نکته: باید دقت داشت که وقتی قسمتی از یک جسم عایق در اثر مالش با جسم دیگری الکترون مبادله می‌کند، بار خالص مشکل گرفته، در همان قسمت مالش باقی می‌ماند.

★ سری تریبوالکتریک

بر حسب اجسام براساس میزان الکترون خواهی آن‌ها نسبت به هم که به صورت تجربی سنجیده شده است، در یک جدول با ترتیب و پشت سر هم، ظاهر شده اند. به این ظاهر، اصطلاحاً «سری تریبوالکتریک» گفته می‌شود.



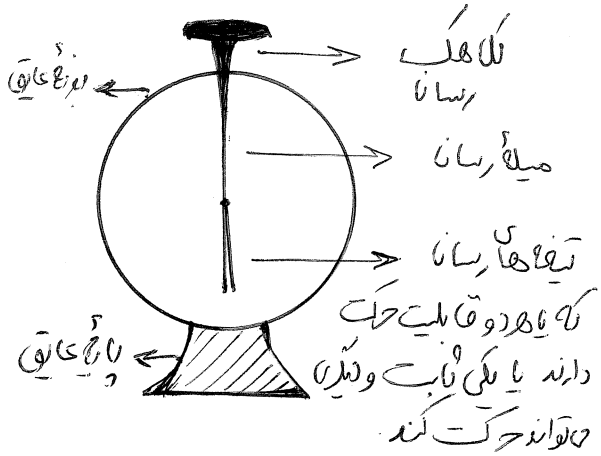
نکته: در سری تریبوالکتریک، موادی که در ردیف‌های پایین‌تری قرار گرفته‌اند، الکترون خواهی بیشتری دارند.

برای مثال اگر یک میلهٔ پلاستیکی را با یک پارچهٔ پشمی مالش دهیم، میله بار منفی و پارچه بار مثبت پیدا می کند.

و یا اگر یک میلهٔ شیشه‌ای را با یک پارچهٔ ابریشمی مالش دهیم، میله بار مثبت و پارچه بار الکتریکی منفی پیدا می کند.

مثال ۴: یک خط‌کش پلاستیکی را با موی سر یک انسان مالش داده‌ایم. در اثر این کار ۳۲۰ الکترون بین آن‌ها مبادله شده است. بار الکتریکی خط‌کش و موی سر را تعیین کنید.

نکته: نوع بار یک جسم، بار دار بودن آن و اینکه رسانا هست یا عایق را با وسیله‌ای به نام الکتروسکوپ (برق نما) می توان تشخیص داد.



الف) تشخیص بار دار بودن یک جسم

کافیست، جسم را به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک کرده یا با آن تماس دهیم، اگر زاویهٔ تیغه‌ها بیشتر شد، یعنی جسم بار دار است.

ب) تشخیص رسانا یا عایق بودن یک جسم

باید یک الکتروسکوپ باردار داشته باشیم (نوع بار آن مهم نیست). در این صورت باید جسم را به کلاهک الکتروسکوپ تماس دهیم، اگر فاصلهٔ تیغه‌ها کم شد، جسم رسانا است ولی اگر فاصله تغییر نکرد، جسم عایق خواهد بود.

پ) تشخیص نوع بار یک جسم

باید یک الکتروسکوپ باردار که نوع بار آن مشخص است داشته باشیم. در صورتی که جسم را به الکتروسکوپ نزدیک کنیم و فاصلهٔ تیغه‌ها زیاد شود، جسم باردار هم‌نام با الکتروسکوپ دارد، در غیر این صورت بار آن‌ها مخالف است. (چرا؟ راهنمایی: حرکت اولیهٔ تیغه‌ها مشخص است)

② روش تماس

این روش فقط برای باردار کردن اجسام رسانا کاربرد دارد.

در این روش وقتی یک جسم رسانای باردار، به جسم رسانای دیگری تماس داده شود، به راحتی بار الکتریکی بین آن‌ها مبادله شده و هر دو جسم باردار می‌شوند. البته به طور کلی باید گفت وقتی دو جسم رسانای باردار را با هم تماس دهیم، آن قدر الکترون بین آن‌ها مبادله می‌شود که با یکدیگر هم پتانسیل شوند.

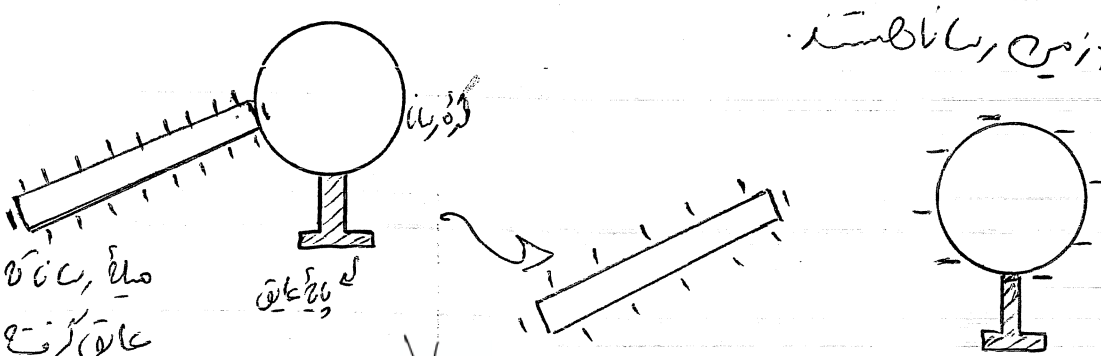
تعریف جسم رسانا: اجسامی که دارای الکترون آزاد باشند، رسانای الکتریکی هستند.

در واقع در این اجسام، هر اتم دارای یک یا چند الکترون است که پیوند ضعیفی با هسته دارند و می‌توانند به راحتی از قید آن خارج شده و در فضای اطراف اتم و بین اتم‌های دیگر حرکت کنند که البته حرکتی کاتوره‌ای و نامنظم است را انجام دهند.

* اگر یک جسم رسانا دارای بار خالص باشد، این بار در خارجی‌ترین سطح آن قرار می‌گیرد.

البته این مطلب را مایکل فاراده به صورت تجربی اثبات کرده است (در ادامه مفصل توضیح داده خواهد شد)

* با توجه به ویژگی‌های یک جسم رسانا، می‌توان یک جسم رسانا را با روش مالشی باردار کرد، فقط باید توجه داشت که حتماً آن را با یک دستکش عایق در دست گرفت، چون هم بدن ما و هم زمین رسانا هستند.

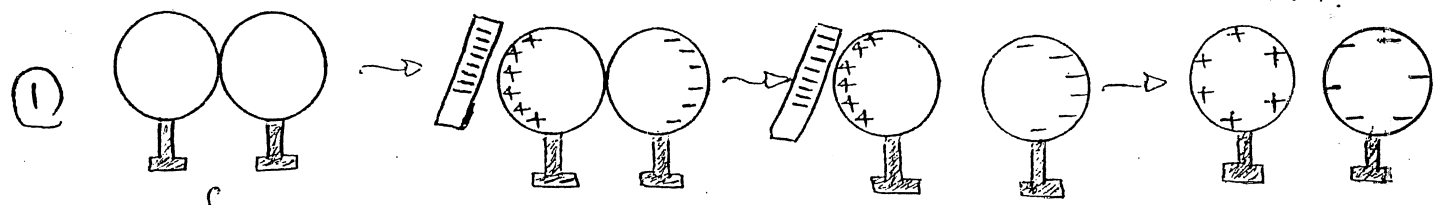


مثال ۵) دو کرهٔ رسانای مشابه A و B در نظر بگیرید که $q_A = -12\mu C$ و $q_B = +24\mu C$ دارند.
اگر دو کره را با هم تماس داده، سپس آن‌ها را از هم جدا کنیم، الف) بار هر کدام از کره‌ها را تعیین کنید.
ب) چه تعداد الکترون و چگونه بین آن‌ها مبادله شده است؟

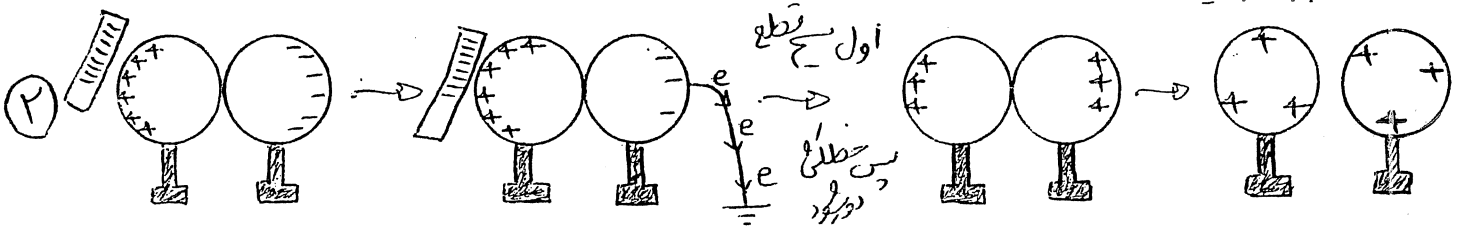
۳) روش القا

* چند مثال

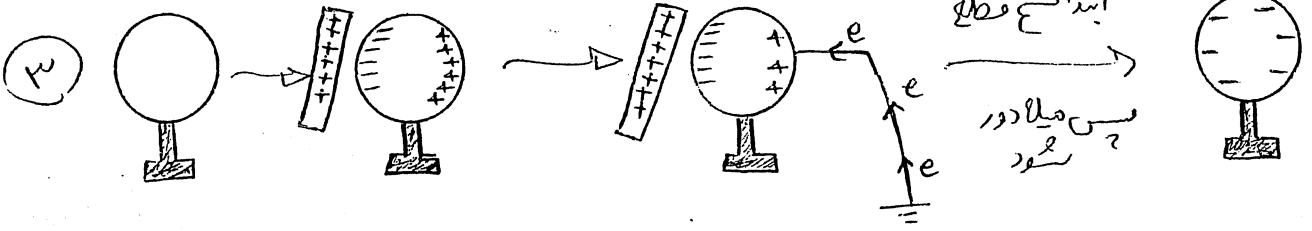
دو جسم با بار مخالف



دو جسم با بار یکسان

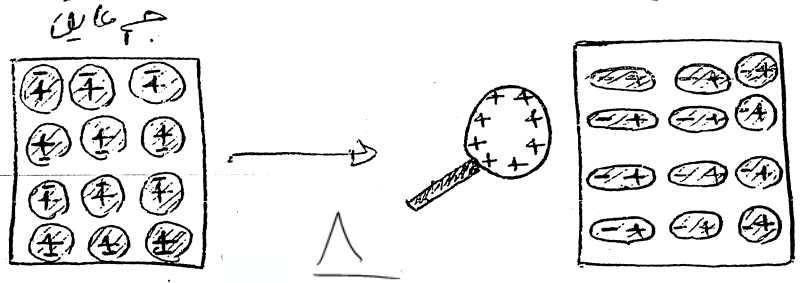


یک جسم باردار



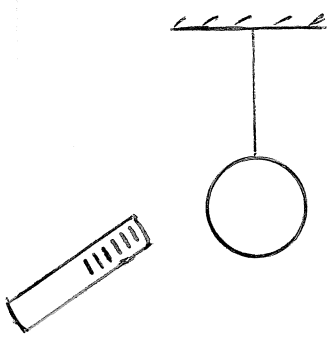
* اجسام باردار یک رسانا، بدون تماس آن با یک جسم باردار را القای بار گویند.

* روش القا فقط برای باردار کردن اجسام رسانا کاربرد دارد. اجسام عایق را نمی‌توان با روش القا باردار کرد. اما اگر یک جسم باردار را به آن‌ها نزدیک کنیم اتم‌های آن‌ها قطبیده می‌شوند یعنی مکان بارهای مثبت و منفی اتم از هم جدا می‌شوند.

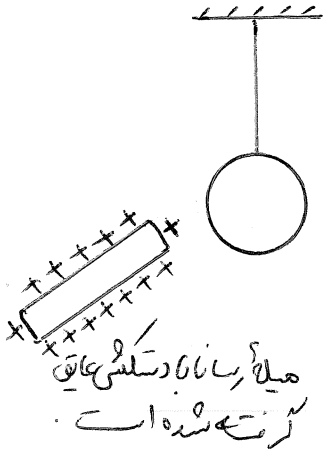


از آن جا که اجسام عایق الکترون آزاد ندارند، نمی‌توان آن‌ها را با روش القا با روش تماس باردار کرد. (فقط روش مالشی)

مثال ۶: با توجه به شکل مقابل توضیح دهید اگر یک میلهٔ عایق باردار را در نزدیکی کرهٔ رسانا تکان دهیم، چه اتفاقی می‌افتد؟

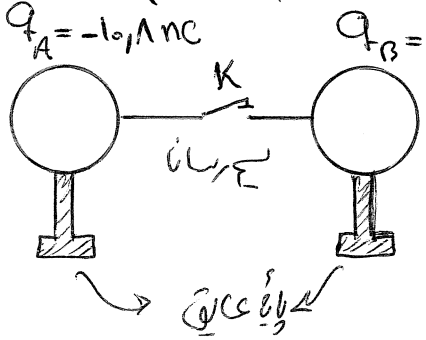


مثال ۷: با توجه به شکل مقابل توضیح دهید اگر یک میلهٔ رسانا باردار را در نزدیکی کرهٔ رسانا قرار دهیم، چه می‌شود؟



مثال ۸: توضیح دهید، چرا وقتی یک میلهٔ باردار (چه عایق و چه رسانا) را به مقداری تکه کاغذ نزدیک می‌کنیم آن را جذب می‌کند؟

مثال ۹: با توجه به شکل زیر، با بستن کلید و پس از برقراری تعادل الکتروستاتیک بین مجموعه،
الف) بار هر کدام از کره‌ها چند نانوکولن می‌شود؟ (کره‌ها رسانا و مشابه هم هستند)
ب) جهت حرکت الکترون‌ها چگونه است؟
پ) چه تعداد الکترون بین کره‌ها جابجا شده است؟



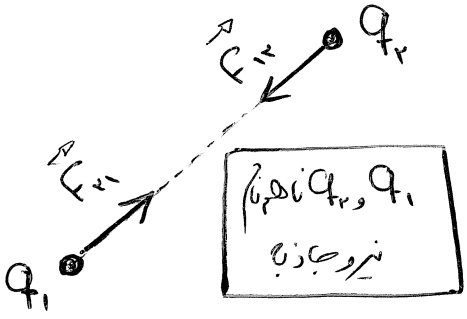
بخش سوم: نیرو، میدان و انرژی پتانسیل الکتریکی

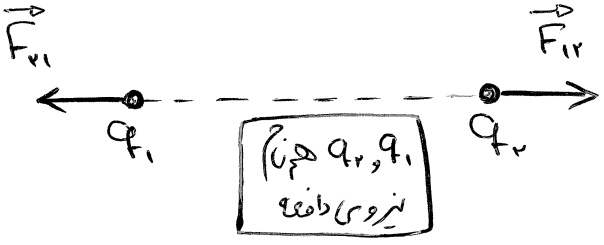
① نیروی الکتریکی و قانون کولن

نیرویی که بارهای الکتریکی در نتیجه اجسام باردار به هم وارد کنند، نیروی الکتریکی نامیده می‌شود. بارهای الکتریکی هم‌نام به یکدیگر نیروی دافعه‌ای (راننده) و بارهای ناهم‌نام به هم نیروی جاذبه‌ای (پایه) وارد می‌کنند.

* نیروی الکتریکی را در حالت خاص بررسی می‌کنیم که ذره‌ی باردار داشته باشیم، یا اگر جسم گسترده باردار داریم، آن را با صورت بار نقطه‌ای فرض کنیم، به طوری که تمام بار الکتریکی آن در یک نقطه متمرکز باشد.

نکته مهم: نیروی الکتریکی بین دو ذره‌ی باردار یا دو بار نقطه‌ای، در راستای خط واصل آن‌ها بوده و جهت نیرو با توجه به هم‌نام بودن (دافعه) یا ناهم‌نام بودن (جاذبه) بار الکتریکی ذرات مشخص می‌شود.





نکته: طبق قانون سوم نیوتن نیروی بین دو ذره‌ی باردار، عمل و عکس‌العمل بوده، از نظر اندازه با هم برابر هستند ولی در خلاف جهت یکدیگرند (قرینه یکدیگر می‌باشند)

— قانون کولن: اندازه‌ی نیروی الکتریکی که دو جسم باردار به هم وارد می‌کنند، با اندازه‌ی حاصل‌ضرب بارها رابطه‌ی مستقیم و با مجذور فاصله‌ی آن‌ها از هم رابطه‌ی معکوس دارد.

اگر دو ذره‌ی باردار یا دو بار نقطه‌ای داخل باشیم، می‌توان اندازه‌ی نیروی الکتریکی را از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$F_{12} = F_{21} = F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

k: ثابت کولن بوده که برحسب یک ضریب ثابت دیگر به نام ضریب گذردهی خلأ (ε_0) نیز تعریف می‌شود

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \xrightarrow{\varepsilon_0 = 8.85\times10^{-12}\ \frac{C^2}{N.m^2}} k = 9\times10^9\ \frac{N.m^2}{C^2}$$

★ بنابراین اندازه‌ی نیروی الکتریکی که دو ذره یا دو بار نقطه‌ای باردار وارد می‌کنند از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

- F: اندازه‌ی نیروی الکتریکی (N)
- k: ثابت کولن، $k = 9\times10^9\ \frac{N.m^2}{C^2}$
- r: فاصله‌ی دو بار از هم (m)
- q_1, q_2: اندازه‌ی بار (C)
- ε_0: ضریب گذردهی خلأ، $\left(\varepsilon_0 = 8.85\times10^{-12}\ \frac{C^2}{N.m^2}\right)$

چند نکته:

۱- باید دقت داشت که هنگام استفاده از این رابطه، چون می‌خواهیم اندازه‌ی بردار نیروی الکتریکی را حساب کنیم، باید اندازه‌ی بارهای q_1 و q_2 را قرار داد (یعنی اگر منفی بودند از علامت آن‌ها صرف نظر شود)

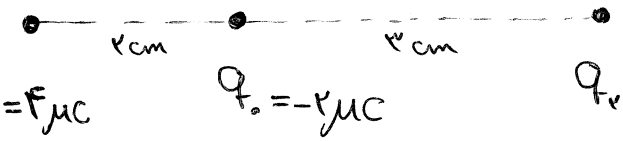
۲- هنگام استفاده‌ی دقیق از این رابطه برای محاسبه‌ی اندازه‌ی نیرو، باید اندازه‌ی بارهای نقطه‌ای را برحسب کولن (C) و فاصله‌ی آن‌ها از هم را برحسب متر (m) جایگذاری کنیم.

۳- اگر بحث دو نیروی الکتریکی یا مقایسه‌ی دو نیروی الکتریکی مطرح باشد، کافی است یکاها همانند و یکسان باشند و نیازی نیست که حتماً یکاها اصلی جایگذاری شود.

۴- اگر دو کره با توزیع بار یکنواخت هم داخل باشیم، می‌توان از رابطه‌ی بالا استفاده کرد. فقط باید دقت داشت، r، فاصله‌ی دو مرکز خواهد بود.

مثال ۱۰: با توجه به شکل زیر و اطلاعات آن پاسخ دهید. (فرض کنید بارها در مکان خود ثابت شده‌اند)

الف) اندازه و جهت نیروی الکتریکی که از طرف q_1 و q_2 وارد می‌شود را تعیین کنید.



ب) اندازه و جهت نیرویی را که q_2 و q_0 وارد می‌کند را تعیین کنید.

پ) اندازهٔ نیروی الکتریکی برآیندی که q_0 وارد می‌شود را تعیین و جهت آن را مشخص کنید.

مثال ۱۱: دو بار الکتریکی در فاصلهٔ 5cm از هم ثابت شده و به یکدیگر نیروی الکتریکی F وارد می‌کنند. اگر دو بار را 3cm به هم نزدیک کنیم، نیروی بین آن‌ها چند F می‌شود؟

مثال ۱۲: دو بار مساوی با هم نیروی F وارد می‌کنند. اگر نصف یکی از بارها را برداشته و به دیگری اضافه کنیم، در همان فاصلهٔ قبلی نیروی F چند برابر می‌شود؟

مثال ۱۳: دو کلاهک فلزی کوچک (رسانا) و هم اندازه، با بارهای $q_1=8nC$ و $q_2=-2nC$ در فاصلهٔ 2 از هم قرار داشته و به هم نیرو وارد می‌کنند. دو کلاهک را با هم متصل کرده پس از اتصال آن‌ها را قطع و در همان فاصله 2 از یکدیگر می‌دهیم. در این صورت نیروی بین آن‌ها از چه نوعی و چند برابر می‌شود؟

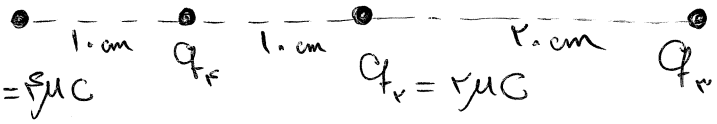
مثال ۱۴: نیرویی که دو بار نقطه‌ای q در فاصلهٔ r به هم وارد می‌کنند، $F=900\ N$ است. اگر به اندازهٔ $2\ \mu C$ بار، از یکی کم کرده و به دیگری اضافه کنیم و فاصلهٔ r را تغییر ندهیم، $F'=400\ N$ می‌شود. بار q چند μC است؟

مثال ۱۵: دو بار الکتریکی $+q$ و $+4q$ در فاصلهٔ $30\ cm$ از هم ثابت شده‌اند. بار سوم Q را در چه فاصله‌ای از بار بزرگ‌تر وارد کنیم، تا در حال تعادل قرار گیرد؟

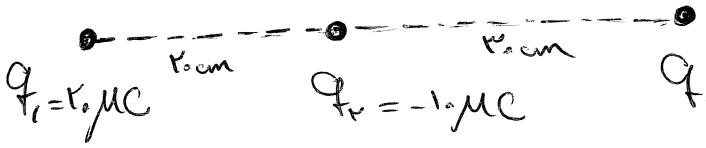
مثال ۱۶: دو بار الکتریکی $+5q$ و $-5q$ در فاصلهٔ $r=40\ cm$ از هم ثابت شده‌اند. بار سوم Q را در چه مکانی از خط واصل دو بار قرار دهیم تا تعادل داشته باشد؟

مثال ۱۷: بارهای الکتریکی $+q$ و $-4q$ در فاصلهٔ $50\ cm$ از هم ثابت شده‌اند. بار سوم Q را در چه فاصله‌ای از بار با اندازهٔ کوچک‌تر قرار دهیم تا تعادل داشته باشد؟

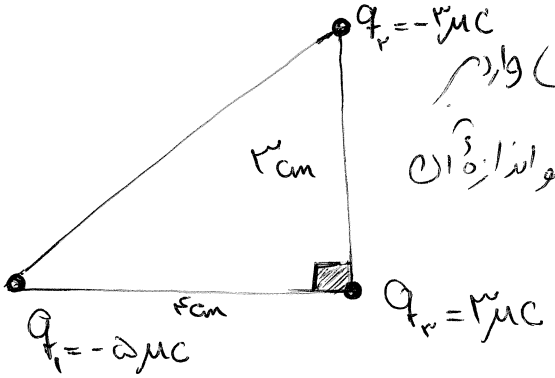
مثال ۱۸ در شکل زیر فرض کنید ذرات باردار در حال تعادل خود ثابت باشند. اگر برآیند نیروهای الکتریکی وارد بر q_4 صفر باشد، بار q_3 چند μC است؟



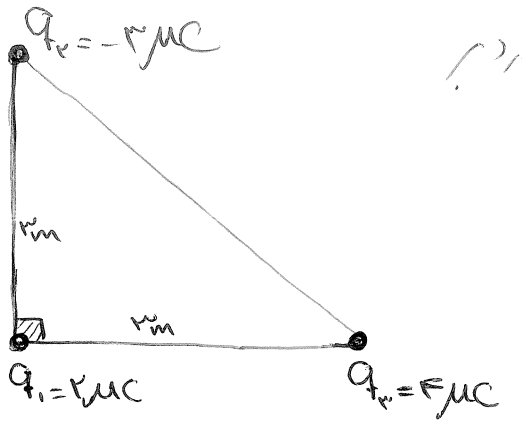
مثال ۱۹ با توجه به شکل زیر و اطلاعات آن اگر q_1 و q_3 در حال تعادل خود ثابت باشند برآیند نیروهای الکتریکی وارد بر q_2 را بر حسب بردارهای یکه بنویسید.



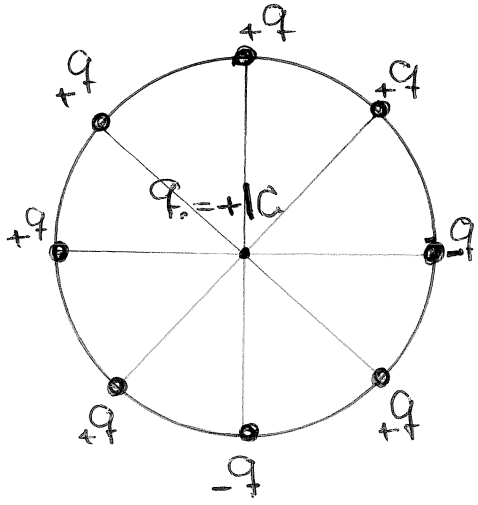
مثال ۲۰ با توجه به شکل مقابل، برآیند نیروهای الکتریکی وارد بر q_3 را بر حسب بردارهای یکه $(\vec{i}, \vec{j})$ نوشته و اندازه آن را تعیین کنید.



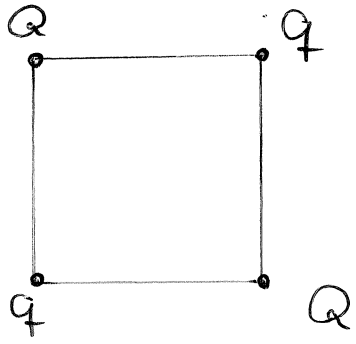
مثال ۲۱ باتوجه به شکل مقابل، اندازهٔ نیروی الکتریکی وارد بر بار q_0 را محاسبه و آن را رسم کنید.



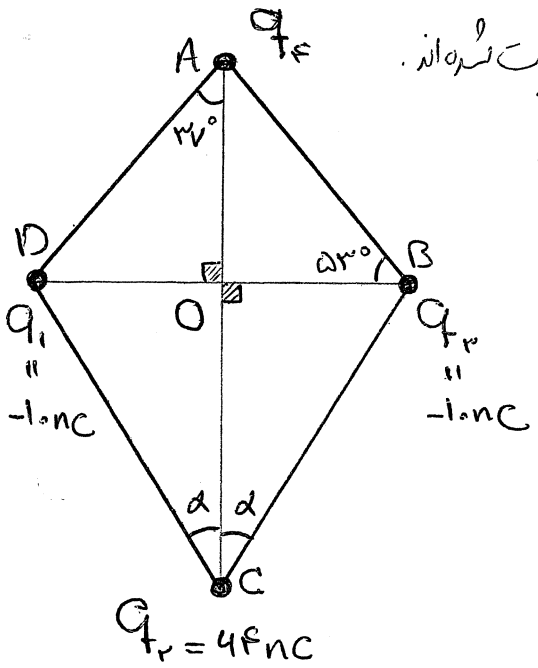
مثال ۲۲ مطابق شکل مقابل هشت بار نقطه‌ای با اندازه‌های برابر $q = 5nC$ در فاصله‌های مساوی از هم روی محیط دایره‌ای با شعاع $r = 30\,cm$ ثابت شده‌اند. اندازه و جهت نیروی وارد بر بار $q_0 = +1C$ واقع بر مرکز دایره را تعیین کنید.



مثال ۲۳ مطابق شکل زیر، بارهای الکتریکی q و Q در چهار رأس یک مربع قرار دارند. اگر برآیند نیروهای وارد بر بارهای Q صفر باشد. نوع بارهای q و Q را مشخص کرده و نسبت $\frac{Q}{q}$ را با ذکر علت بیابید.

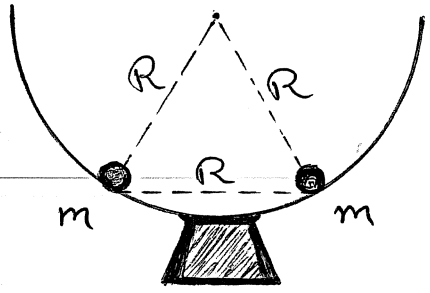


مثال ۲۴: چهار ذره باردار مطابق شکل مقابل در یک رویه خودنگاه شده‌اند. اگر نیروی الکتریکی وارد بر بار q_4 از طرف بارهای دیگر صفر باشد، زاویه α را تعیین کنید. $(OA = 4cm, \sin 37^\circ = 0.6)$



۱) 37° ۲) 53° ۳) $\arctan 2$ ۴) $\arctan \frac{1}{2}$

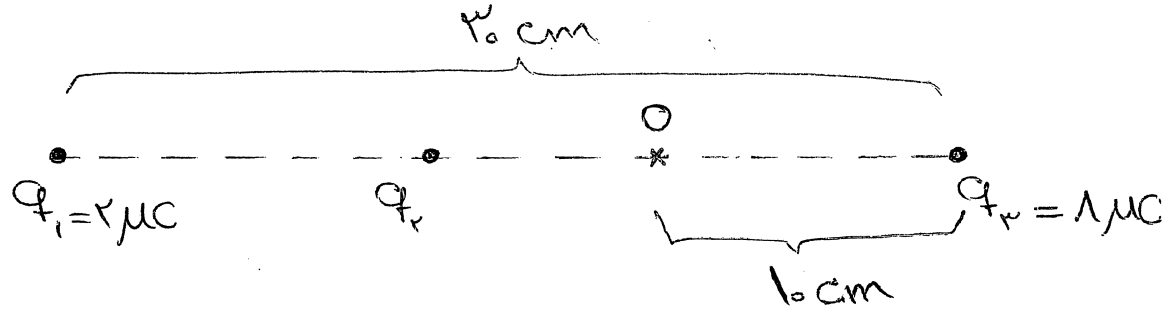
مثال ۲۵: مطابق شکل زیر، دو گلوله به جرم هریک برابر با m و با هریک برابر با q است، درون یک ظرف نیم‌کره‌ای با شعاع R که دیواره داخلی آن بدون اصطکاک و نارسانا است، در یک سطح افقی در حال تعادل قرار دارند. جرم هرکدام از گلوله‌ها برابر با کدام است؟



۱) $\frac{\sqrt{3}kq^2}{3R^2g}$ ۲) $\frac{3kq^2}{R^2g}$

۳) $\frac{kq^2}{R^2g}$ ۴) $\frac{\sqrt{3}kq^2}{R^2g}$

مثال ۲۶ در شکل زیر، برآیند نیروهای الکتریکی وارد بر هریک از بارها صفر است. اگر بار $q_4 = 1\mu C$ در نقطهٔ O قرار گیرد، نیروی الکتریکی وارد بر آن چند نیوتون می‌شود؟



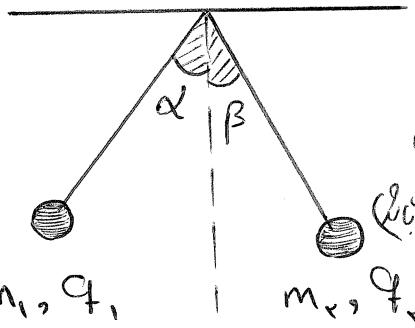
مثال ۲۷ بارهای الکتریکی $q_1 = +q$ و $q_2 = q_3 = +3q$ در رأس‌های یک مثلث متساوی‌الاضلاع قرار دارند و بار الکتریکی $q_4 = -q$ در مرکز ثقل مثلث قرار داده شده است. اگر نیروی برآیند وارد بر q_4 از طرف q_1 و q_2 وارد شود، $0.15\ N$ باشد، اندازهٔ برآیند نیروهای وارد بر q_4 چند نیوتون می‌شود؟

نکته (آونگ الکتریکی)

جسمی را در نظر بگیرید که با نخ متصل بوده و نخ از نقطه‌ای آویزان باشد. به این مجموعه آونگ گفته می‌شود. حال اگر جسم دارای بار الکتریکی خالص باشد، به مجموعه آونگ الکتریکی می‌گوییم.

- بررسی یک مثال خاص در مورد آونگ الکتریکی

دو آونگ الکتریکی هم طول در نظر بگیرید که دارای بارهای هم نام q_1 و q_2 و جرم‌های m_1 و m_2 بوده و از یک نقطه آویزان هستند. از آن جا که بارها هم نام هستند، با هم نیروی دافعه وارد کرده، از هم فاصله گرفته و در وضعیتی با تعادل می‌رسند. در توصیف وضعیت قرارگیری آونگ‌ها چه می‌توان مطالب زیر را مطرح کرد؟



۱- اندازهٔ نیروی الکتریکی که دو گلوله با هم وارد می‌کنند، طبق قانون سوم نیوتون، همواره با هم برابر است. (حتی اگر جرم و بار گلوله‌ها متفاوت باشد) اثبات این مطلب به صورت تئوری و تجربی قابل اثبات است.

۲- زاویهٔ انحراف آونگ‌ها از راستای قائم با بار الکتریکی آن‌ها رابطه دارد. به طوری که هر چه اندازهٔ بار آن‌ها بزرگ‌تر باشد، نیروی الکتریکی که به هم وارد می‌کنند بزرگ‌تر شده و زاویهٔ انحراف افزایش می‌یابد.

* مهم باید دقت داشت که اگر بخواهیم زاویهٔ انحراف آونگ‌ها را با هم مقایسه کنیم، فقط باید جرم‌ها را مقایسه کنیم. در واقع باید گفت آن چه در انحراف آونگ‌ها مؤثر است هم بار آن‌ها بوده و هم جرم آن‌ها، اما آن چه باعث تفاوت در زاویهٔ انحراف آونگ‌ها می‌شود، فقط جرم آونگ‌هاست.

۳- در مقایسهٔ انحراف آونگ‌ها فقط مقایسهٔ جرم‌ها مهم است.

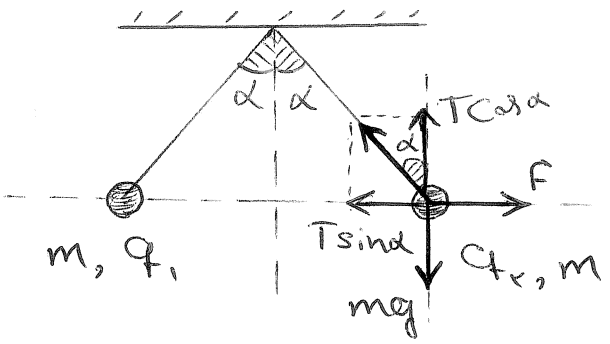
* زاویهٔ انحراف یک آونگ با جرم آن رابطهٔ عکس دارد.

اگر $m_1 < m_2 \rightarrow \alpha > \beta$

اگر $m_1 = m_2 \rightarrow \alpha = \beta$

اگر $m_1 > m_2 \rightarrow \alpha < \beta$

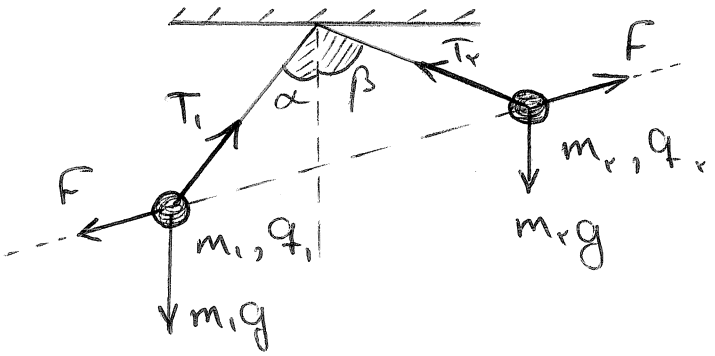
۴- اگر جرم آونگ‌ها برابر باشد، زاویه‌ی انحراف‌ها نیز برابر است و در تعادل داریم:



$$\begin{cases} T\sin\alpha = F \\ T\cos\alpha = mg \end{cases} \Rightarrow \tan\alpha = \frac{F}{mg}$$

$$\begin{cases} \boxed{F = mg\tan\alpha} \\ F = \dfrac{kq_1q_2}{r^2} \end{cases}$$

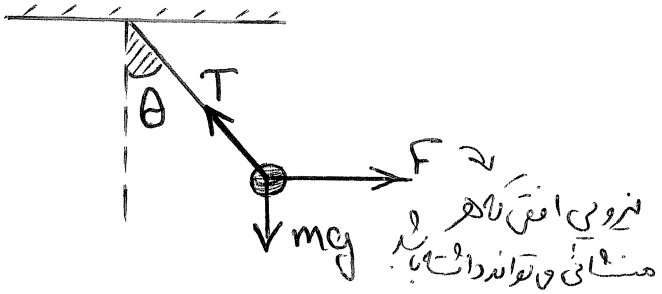
۵- اگر جرم آونگ‌ها یکسان نباشد، زاویه‌ی انحراف‌ها متفاوت خواهد بود.



در تعادل داریم:

$$\boxed{\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{T_2}{T_1}}$$

نکته مهم و کاربردی: مطابق شکل زیر، در صورتی که یک آونگ تحت تأثیر فقط سه نیروی کشش نخ، وزن و نیروی افقی (ناهمسانی) منحرف شده باشد، زاویه‌ی انحراف از رابطه زیر بدست می‌آید:



$$\boxed{F = mg\tan\theta}$$

مثال ۲۸ دو گلوله‌ی مشابه فلزی، هر کدام به وزن ۰٫۳N، دارای بار هم‌نام و هم اندازه بوده و توسط دو نخ هم طول ۱ متری از نقطه‌ای آویزان شده‌اند. اگر فاصله‌ی گلوله‌ها بعد از برقراری تعادل ۱٫۲m شده باشد، بار الکتریکی آن‌ها چند کولن می‌باشد؟

② میدان الکتریکی ($\vec{E}$)

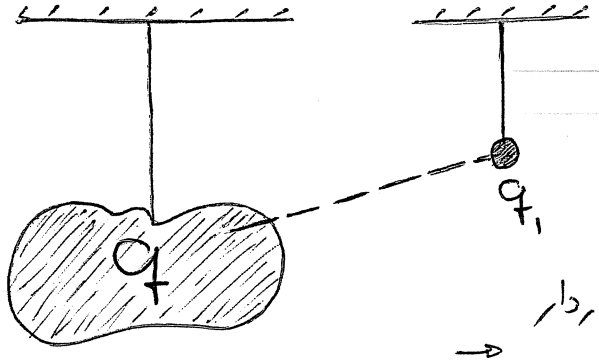
خاصیت است در فضای اطراف اجسام باردار که از طریق آن می‌توانند بر اجسام باردار دیگری که در این فضا وارد می‌گیرند اثر گذار باشند یا در واقع با آن‌ها نیرو (الکتریکی) وارد کنند.

مفهوم میدان الکتریکی در مورد اجسام باردار، از آن جا سرچشمه می‌گیرد که این اجسام بدون تماس با یکدیگر، می‌توانند با هم نیرو وارد کنند.

* این خاصیت که برای تک تک نقاط در فضای اطراف اجسام باردار تعریف می‌شود، کمیت برداری است. یعنی اندازه، راستا و جهت این کمیت در یک نقطه در تأثیر یا بهتر است بگوییم در نیروی الکتریکی که با یک بار در این نقطه وارد می‌شود مورد توجه خواهد بود.

* میدان الکتریکی با $\vec{E}$ نمایش داده می‌شود و یکای آن $\frac{N}{C}$ (نیوتون بر کولن) یا $\frac{V}{m}$ (ولت بر متر) می‌باشد

مطابق شکل زیر، فرض کنید بخواهیم، میدان الکتریکی جسمی با بار الکتریکی q را در نقطه‌ای دلخواه از فضای اطراف آن تعیین کنیم.



۱- در نقطه مورد نظر یک بار نقطه‌ای q_1 قرار می‌دهیم تا تأثیر جسم باردار q را روی آن بررسی کنیم.

۲- این تأثیر در واقع نیرویی است که از طرف جسم باردار q بر آن وارد شده، پس باید این نیرو را پیدا کنیم ($\vec{F}_1$)

۳- اگر بجای بار q_1 بارهای دیگری قرار دهیم و نیروی وارد بر آن‌ها را بیابیم، خواهیم دید که نسبت نیروی وارد شده بر بار در یک نقطه خاص همواره یکسان خواهد بود. $\frac{\vec{F}_1}{q_1} = \frac{\vec{F}_2}{q_2} = \frac{\vec{F}_3}{q_3} = \dots$

۴- این نسبت که مستقل از بار q_1 و q_2 و q_3 یا هر بار دیگری است و با فاصله نقطه مورد نظر از جسم باردار و بار الکتریکی آن بستگی دارد میدان الکتریکی ($\vec{E}$) گفته می‌شود.

→ راه کلی بدست آوردن میدان الکتریکی در یک نقطه $\boxed{\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}}$

* اگر بتوان نیروی $\vec{F}$ را که جسم باردار q بر بارهای اطراف خود وارد می‌کند بدست آورد، می‌توان با یک

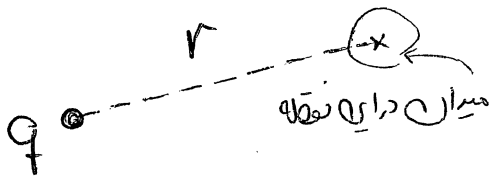
رابطه برای محاسبه میدان الکتریکی رسید. با توجه به اطلاعات ریاضی ما در دوره دبیرستان فقط قطعه توان رابطه ای برای محاسبه میدان الکتریکی یک بار نقطه ای حاصل کرد.

* (مهم) میدان الکتریکی بارهای نقطه ای

اندازه میدان الکتریکی یک ذره باردار الکتریکی q، در نقطه ای به فاصله r از آن از رابطه مقابل بدست می آید:

$$E = k\frac{|q|}{r^2} \quad (c)$$

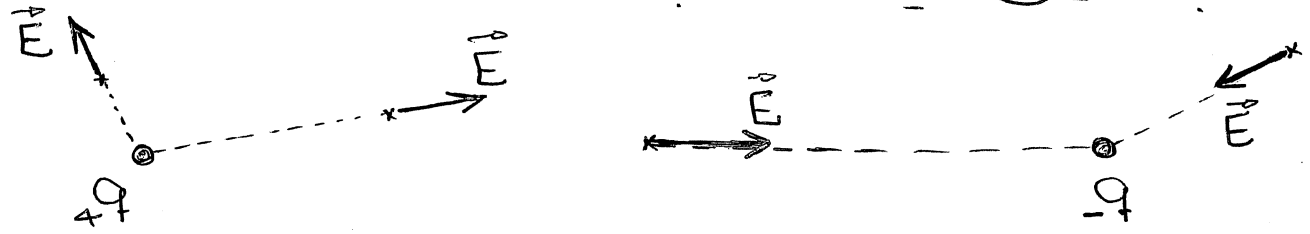
- E: اندازه میدان در نقطه مورد نظر $\left(\frac{N}{C}\right)$
- k: ثابت کولن $9\times10^9 \frac{N\cdot m^2}{C^2}$
- r: فاصله نقطه مورد نظر از بار (m)
- $|q|$: اندازه باری که می خواهیم میدان آن را بیابیم، باید همواره با علامت مثبت جایگذاری شود.



نکته: میدان الکتریکی حاصل از بار q در یک نقطه از فضای اطراف آن، با اندازه بار رابطه مستقیم و با مجذور فاصله بار از نقطه رابطه عکس دارد.

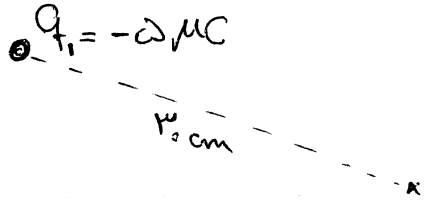
نکته مهم: برای تعیین جهت میدان طبق قاعده زیر عمل می کنیم:

«جهت میدان در یک نقطه، در جهت نیروی وارد بر یک بار مثبت فرضی در آن نقطه است»

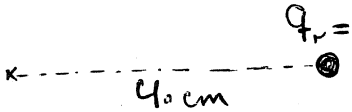


مثال ۲۹: در هر یک از شکل های زیر، اندازه و جهت میدان الکتریکی در نقطه نشان داده شده از بار مورد نظر را تعیین کنید.

الف)



ب)



مثال ۳۰ دو ذره باردار با بارهای $q_1 = +4\mu C$ و $q_2 = -6\mu C$ در فاصله $25\,cm$ از یکدیگر ثابت شده‌اند. بزرگی میدان الکتریکی را الف) در وسط خط واصل دو بار و ب) روی خط واصل در نقطه‌ای با فاصله $25\,cm$ از بار q_2 و $50\,cm$ از بار q_2 تعیین کنید.

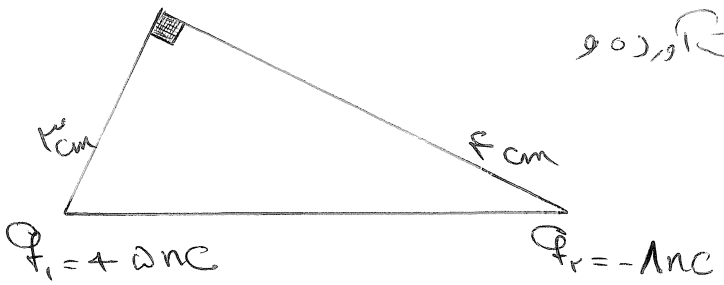
مثال ۳۱ دو بار نقطه‌ای $+1\mu C$ و $+4\mu C$ در فاصله $9\,cm$ از یکدیگر ثابت شده‌اند. در چه فاصله‌ای از بار بزرگتر میدان الکتریکی صفر خواهد شد؟

مثال ۳۲ مثال قبل را با فرض اینکه بارها $+1\mu C$ و $-4\mu C$ باشند، حل کنید.

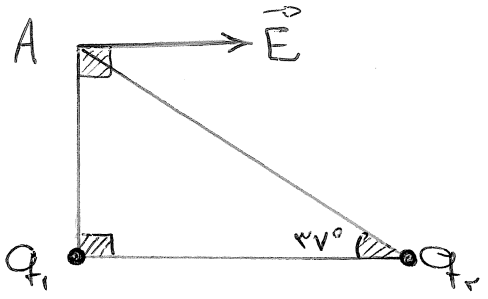
مثال ۳۳ دو بار نقطه‌ای $+8\mu C$ و $-8\mu C$ را در نظر بگیرید که در فاصله $20\,cm$ از هم ثابت شده‌اند. الف) در چه نقطه‌ای میدان صفر خواهد شد؟
ب) اگر بارها هم نام بودند چطور؟

مثال ۳۴ با توجه به شکل زیر، بردار میدان الکتریکی در نقطه نشان داده شده را محاسبه و برحسب $\vec{i}$ و $\vec{j}$ بنویسید.

مثال ۳۵ با توجه به شکل مقابل و اطلاعات آن، بردار میدان الکتریکی در رأس قائمه را به دست آورده و اندازهٔ آن را تعیین کنید.



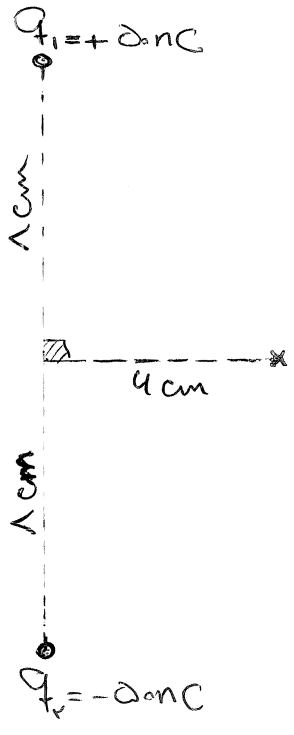
مثال ۳۶ در شکل زیر، بردار برآیند میدان‌های الکتریکی در نقطهٔ A ناشی از دو بار نقطه‌ای q_1 و q_2 برابر $\vec{E}$ است. نسبت $\frac{q_1}{q_2}$ کدام است؟



۱) $-\frac{۳}{۵}$ ۲) $+\frac{۳}{۵}$ ۳) $-\frac{۲۷}{۱۲۵}$ ۴) $+\frac{۲۷}{۱۲۵}$

مثال ۳۷ دو ذره باردار به بارهای $+۵۰nC$ و $-۵۰nC$ در فاصلهٔ ۱۴cm از هم ثابت شده‌اند. میدان الکتریکی را روی عمود منصف خط واصل بارها و در فاصلهٔ ۴cm از وسط خط واصل بیابید.

(نکته: ۸ حجره‌ها دو به دو هم‌اندازه ولی ناهم‌نام دو قطبی الکتریکی می‌سازند)



* خطوط میدان الکتریکی : میدان الکتریکی در فضای اطراف اجسام باردار را با خطوطی فرض نمایش می دهیم تا با استفاده از ویژگی هایی که برای این خطوط تعریف می کنیم، بتوان میدان موجود در فضای اطراف اجسام باردار را توصیف کرد.

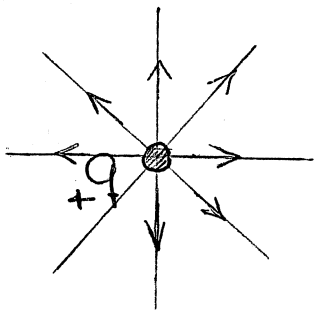
نکته : اگر بخواهیم طرح خطوط میدان در اطراف اجسام باردار را به صورت تقریبی رسم کنیم، جز در چند حالت خاص و ساده، در بقیه موارد کار سخت و پیچیده ای خواهیم داشت. راه کلی برای رسیدن به طرح خطوط میدان الکتریکی در اطراف اجسام باردار، به صورت تجربی و با انجام آزمایش است.

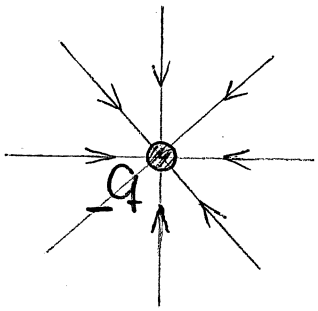
- ویژگی ها

۱- جهت خطوط میدان را طوری در نظر می گیریم که همواره از بارهای مثبت خارج و به بارهای منفی وارد شوند. (قراردادی)

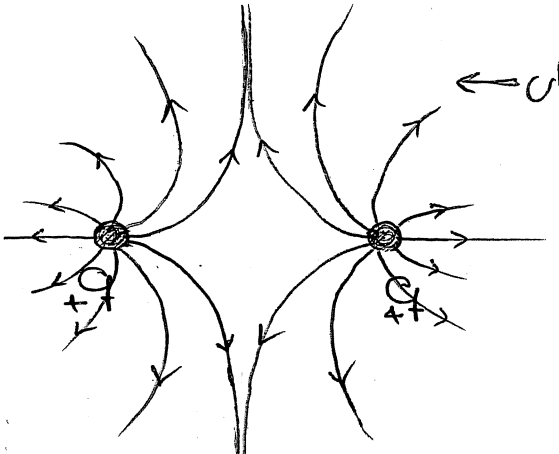
در چند حالت خاص و توان طرح خطوط میدان در فضای اطراف بارهای الکتریکی که به طور تجربی بدست آمده را به صورت زیر

تک بار نقطه ای ←

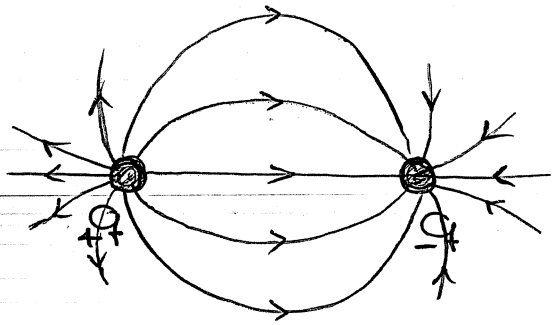




دو بار نقطه ای ←



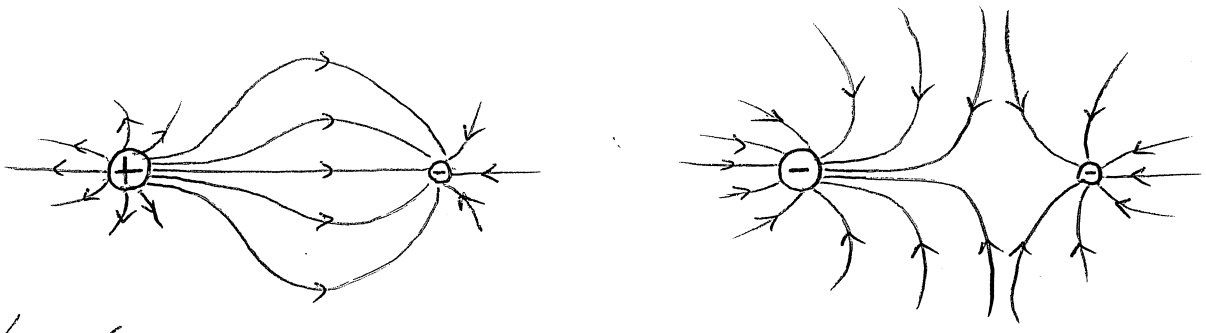
بارها هم نام و هم اندازه



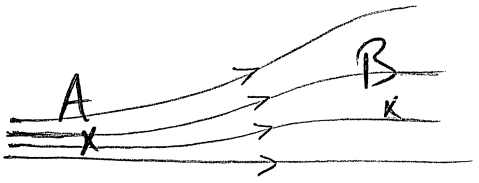
بارها نا هم نام ولی هم اندازه

در شکل که دو بار نقطه ای هم اندازه داشته باشیم خطوط مستقیم خواهند بود.

در صورتی که اندازه دو بار الکتریکی برابر نباشند، تراکم خطوط در نزدیکی بار بزرگتر بیشتر می‌شود.



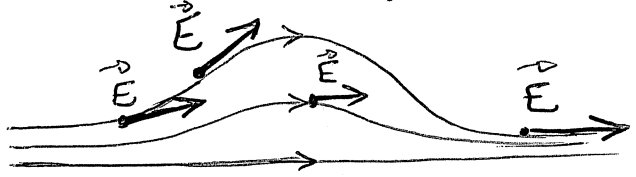
۲- در قسمت هایی از فضا که میدان قوی‌تر باشد، خطوط میدان به هم نزدیکتر و متراکم‌ترند.



$E_A > E_B$

۳- خطوط میدان الکتریکی هیچ‌گاه یکدیگر را قطع نمی‌کنند و از هر نقطه فقط یک خط می‌گذرد. این بیان معنای که در هر نقطه از فضا فقط یک میدان منحصر به آن نقطه وجود دارد که همان میدان برآیند است.

نکته: اگر راستای خطوط میدان در ناحیه‌ای از فضا مشخص باشد، می‌توان گفت: بردار میدان در هر نقطه از آن فضا، بردارهای مماسی بر خط گذرنده از آن نقطه و با آن خط هم‌جهت است.



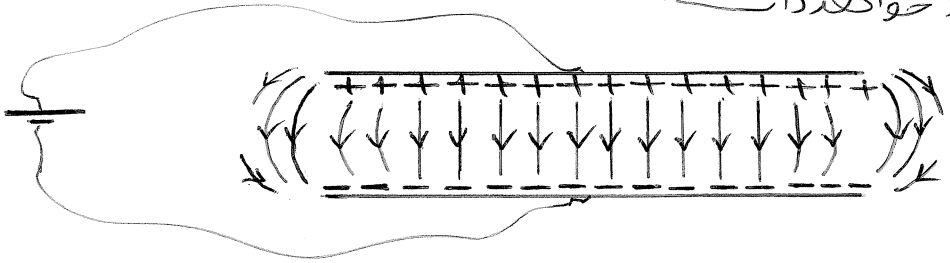
نکته مهم (میدان الکتریکی یکنواخت)

میدانی است که در آن، اندازه، راستا و جهت بردار میدان در هر نقطه یکسان باشد.

در چنین میدانی، خطوط میدان موازی، مستقیم، هم‌جهت و دارای فاصله‌های مساوی هستند.

در صورتی که دو صفحه رسانای باردار، با بارهای مخالف با موازات یکدیگر قرار گیرند، می‌توان گفت در ناحیه‌ای از فضای بین آن (دور از لبه‌ها و سطح آن‌ها) میدان یکنواخت ایجاد خواهد شد.

درعمل برای ایجاد و آشتی میدان الکتریکی یکنواخت می‌توان دو صفحه رسانا را با موازات هم قرار داده و آن‌ها را با قطب‌های یک مولد وصل کنیم، درصورتی که فاصلهٔ صفحات نسبت با بعد آن‌ها به اندازهٔ کافی کم باشد، می‌توان گفت بادت خوب در بخش وسیعی از فضای بین صفحات میدان یکنواخت وجود خواهد داشت.



نکته مهم نیروی وارد بر یک بار نقطه‌ای در میدان الکتریکی

زمانی که یک بار نقطه‌ای مثل q در میدان الکتریکی قرار گیرد، با توجه به امکان بار و میدانی که در آن مکان وجود دارد، نیرویی از طرف میدان به آن وارد می‌شود، که اندازهٔ این نیرو از رابطهٔ مقابل بدست می‌آید.

$$F = qE$$

- F: اندازهٔ نیرو (N)
- q: اندازهٔ بار الکتریکی (C) — بار بدون علامت جایگذاری می‌شود
- E: اندازهٔ میدان در محل قرارگیری بار $\left(\frac{N}{C}\right)$

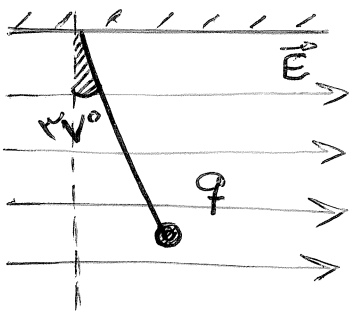
* مهم: برای تعیین جهت نیرو طبق قاعده زیر عمل می‌کنیم:

«بارهای مثبت در جهت میدان و بارهای منفی در خلاف جهت میدان نیرو وارد می‌شود»

مثال ۳۸ ذره‌ای به جرم $10\,gr$ و بار $-200\,nC$ در یک میدان الکتریکی یکنواخت قرار دارد به طوری که نیروی وزن و نیروی الکتریکی به آن وارد شده و در تعادل است. اندازه و جهت میدان الکتریکی را تعیین کنید. $(g = 9.8\,\frac{m}{s^2})$

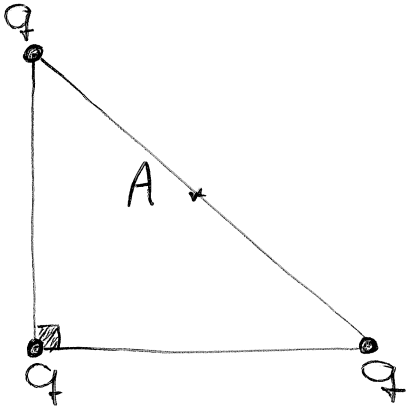
مثال ۳۹ برای تعیین میدان الکتریکی در نقطه‌ای از فضا بار $+20\ nC$ را در آن نقطه قرار داده‌ایم. اگر نیروی الکتریکی $5\times10^{-3}\ N$ به طرف شمال بر بار وارد شده باشد، بزرگی و جهت میدان در آن نقطه را تعیین کنید.

مثال ۴۰ مطابق شکل مقابل، گلوله‌ی کوچک فلزی به جرم $80\ gr$ و بار الکتریکی q با نخی متصل بوده و در یک میدان یکنواخت $\vec{E}$ با اندازه‌ی $2\times10^{5}\ \frac{N}{C}$ به حال تعادل قرار دارد. بار q چند μC است؟



۱) $\frac{1}{3}$ ۲) $-\frac{1}{3}$ ۳) ۳ ۴) -3

مثال ۴۱ سه بار الکتریکی نقطه‌ای مشابه q در سه رأس یک مثلث قائم‌الزاویه‌ی متساوی الساقین قرار دارند و اندازه‌ی برآیند میدان‌های الکتریکی ناشی از آن‌ها در نقطه‌ی A (وسط وتر) برابر با E است. اگر فقط علامت یکی از بارهایی که در دو سر وتر قرار دارند، تغییر کند، اندازه‌ی برآیند میدان‌های الکتریکی در نقطه‌ی A چند برابر E خواهد شد؟

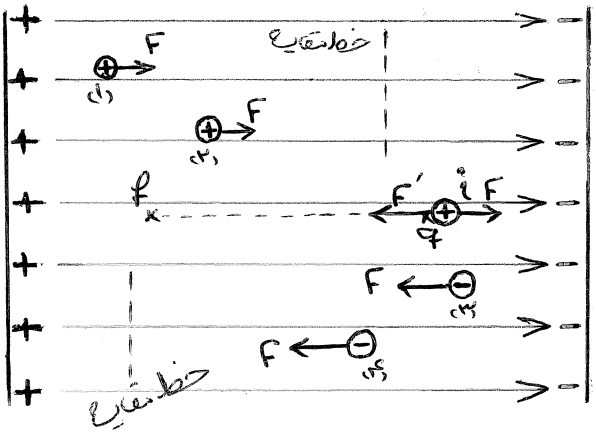


(۳۰) انرژی پتانسیل الکتریکی

هنگامی که یک بار الکتریکی در میدان الکتریکی رها شود، شروع به حرکت کرده و رفته رفته سرعت و در نتیجه انرژی جنبشی آن افزایش می‌یابد. با توجه به قانون پایستگی انرژی می‌توان گفت حتماً یک انرژی با صورت ذخیره شده در جسم یا ذره باردار وجود داشته که با انرژی جنبشی تبدیل می‌شود.

«یک جسم باردار با توجه به موقعیتی که در یک میدان الکتریکی دارد، دارای انرژی ذخیره شده در خود می‌باشد که با انرژی ذخیره شده در جسم دارای بار الکتریکی، انرژی پتانسیل الکتریکی گفته می‌شود»

* بنابراین انرژی پتانسیل الکتریکی، برای یک جسم باردار در میدان الکتریکی تعریف می‌شود.



شکل مقابل یک میدان الکتریکی یکنواخت را نشان می‌دهد که در آن چند بار الکتریکی با اندازه‌های یکسان از مکان‌های مختلف در میدان رها شده‌اند و می‌خواهیم انرژی پتانسیل الکتریکی اولیه آن‌ها را با هم مقایسه کنیم.

هنگامی که این ذرات رها می‌شوند، آزادانه و در جهت نیروی الکتریکی که از آن‌ها وارد می‌شود، شروع به حرکت و جابجایی می‌کنند. کار نیروی الکتریکی روی آن‌ها مثبت بوده و رفته رفته حرکت آن‌ها و در نتیجه انرژی جنبشی (حرکتی) آن‌ها افزایش و انرژی پتانسیل آن‌ها کاهش می‌یابد. پس می‌توان گفت ذره باردار که جابجایی بیشتری داشته باشد، دارای انرژی جنبشی بیشتری شده یا به عبارتی انرژی پتانسیل اولیه آن بیشتر بوده است. پس می‌توان گفت اجسام باردار با توجه به مکانی که در میدان الکتریکی دارند دارای یک انرژی پتانسیل الکتریکی هستند.

در شکل بالا اگر بار q را با یک نیروی خارجی (F') از نقطه‌ی i به f منتقل کنیم، حتماً انرژی پتانسیل الکتریکی در آن افزایش یافته است (دقت کنید که در جابجایی کار نیروی الکتریکی منفی است)

به طور کلی می‌توان گفت، با جابه‌جایی یک جسم باردار در میدان الکتریکی، آن جا در کاهش یا افزایش انرژی پتانسیل الکتریکی ذخیره در جسم تأثیرگذار است، نیروی الکتریکی وکار آن می‌باشد. تا اگر کار نیروی الکتریکی مثبت باشد، مطمئناً انرژی پتانسیل کاهش یافته و برعکس.

در واقع نیروی الکتریکی، از جمله نیروهای پایستار بوده و کار آن با مسیر حرکت بستگی ندارد و می‌توان یک انرژی پتانسیل برای جسمی که این نیرو با آن وارد شده تعریف کرد و در نظر گرفت.

نکته مهم: همواره و تحت هر شرایطی (بار ثابت، متغیر، میدان یکنواخت یا غیر یکنواخت)

رابطه‌ی قابل بررسی است:

$$\Delta U = -W_E$$

ΔU: تغییرات انرژی پتانسیل الکتریکی

W_E: منظور کار برآیند نیروی الکتریکی وارده از طرف میدان انجام می‌دهد

$W_E = W_{F_E}$

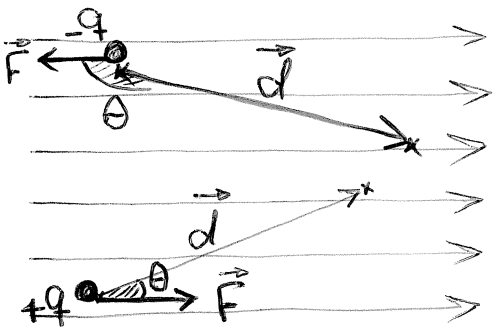
W_E: کار میدان

W_{F_E}: کار نیروی الکتریکی

* می‌توان برای محاسبه تغییرات انرژی پتانسیل (ΔU) در میدان الکتریکی یکنواخت، رابطه‌ی مصالح کرد.

همان طور که بحث شد، یک ذره‌ی باردار با توجه به مکانی که در میدان الکتریکی دارد، یک انرژی پتانسیل خواهد داشت، بنابراین اگر ذره جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن تغییر خواهد کرد.

حال برای ذره‌ی باردار که در میدان الکتریکی یکنواخت جابه‌جا می‌شود می‌توان تغییرات انرژی پتانسیل را از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد.



$$\Delta U = -W_E = -|q|Ed\cos\theta$$

زاویه‌ی بین بردار جابه‌جایی و نیروی الکتریکی وارده $(\vec{F}, \vec{d})$

ΔU: J

q: (C)

E: $(\frac{N}{C}$ یا $\frac{V}{m})$

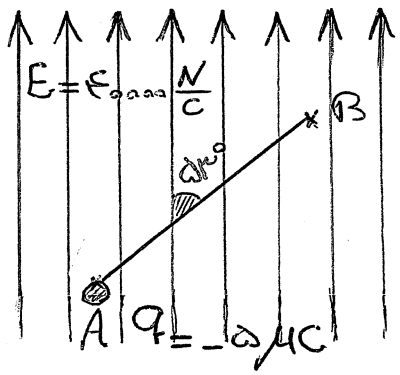
d: (m)

$W_E = W_{F_E} = F_E d\cos\theta$

$F_E = |q|E$ اندازه نیروی الکتریکی

$\Delta U = -W_E$ ⟶ $\Delta U = -|q|Ed\cos\theta$

مثال ۴۰ بار q_1 به جرم m با شتاب ثابت a در راستای خط واصل دو بار q_1 و q_2 از نقطه A به نقطه B می‌رود. اگر $AB = 30\,cm$ باشد، فاصله بار q_1 از A در لحظه‌ای که سرعت آن نصف سرعت متوسط آن در مسیر AB است، چقدر است؟



④ پتانسیل الکتریکی

فضایی را در نظر بگیرید که میدان الکتریکی در آن محسوس است. یک جسم باردار با توجه به مکانی که در میدان دارد، دارای انرژی پتانسیل خواهد بود؛ انرژی پتانسیل الکتریکی یک جسم باردار، هم به بار الکتریکی آن و هم به موقعیت یا مکانی که در میدان دارد بستگی خواهد داشت.

پس باید گفت هر نقطه در میدان دارای یک توانایی در انرژی دادن به جسمی است که در آن نقطه قرار می‌گیرد. مطلقاً نمی‌گوییم این توانایی در انرژی دادن به اجسام، فقط با موقعیت نقطه در میدان بستگی دارد. به توانایی نقاط میدان در انرژی دادن به اجسام، پتانسیل نقاط گفته می‌شود.

نکته: پتانسیل الکتریکی برای یک نقطه در میدان الکتریکی تعریف می‌شود.

نکته: پتانسیل الکتریکی یک کمیت نسبی است، یعنی باید یک مبدا پتانسیل اختیار کرد تا بتوان پتانسیل نقاط مختلف درون میدان را نسبت به آن سنجید.

* برای یافتن پتانسیل یک نقطه، باید ابتدا راهی برای یافتن اختلاف پتانسیل یا تغییرات پتانسیل نقاط پیدا کنیم.
* تغییرات انرژی پتانسیل یک ذره باردار در جابجایی بین دو نقطه در میدان، با بار الکتریکی جابجا شده رابطه مستقیم دارد. بنابراین می‌توان گفت نسبت $\frac{\Delta U}{q}$ در یک جابجایی معین بین دو نقطه مستقل از بار الکتریکی جابجا شده بوده و همواره ثابت است.

«نسبت تغییرات انرژی پتانسیل یک بار الکتریکی در جابجایی بین دو نقطه در میدان به بار الکتریکی جابجا شده، اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه گفته می‌شود»

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q}$$

- ΔV: اختلاف پتانسیل دو نقطه در میدان (V)
- ΔU: تغییرات انرژی پتانسیل باری که (J) بین دو نقطه جابجا می‌شود.
- q: بار (C) که بین دو نقطه جابجا می‌شود.

$1\,V = 1\,\frac{J}{C}$ ولت

نکته مهم: در این رابطه بار الکتریکی باید با علامت جبری وارد شود.

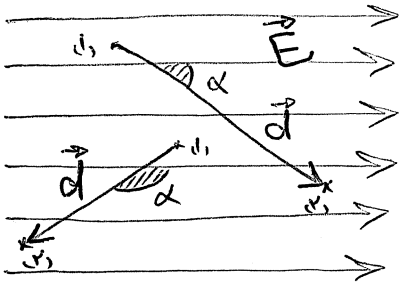
مثال ۴۳ در یک میدان الکتریکی، بار الکتریکی $q=-2\mu C$ از نقطهٔ A تا B جابه‌جا می‌شود. اگر انرژی پتانسیل بار در نقاط A و B به ترتیب $-4\times10^{-5}J$ و $5\times10^{-5}J$ باشد، V_B-V_A را حساب کنید.

مثال ۴۴ در یک میدان الکتریکی، اگر پتانسیل الکتریکی دو نقطهٔ A و B به ترتیب $30V$ و $-10V$ باشد، تغییرات انرژی پتانسیل بار $-3\mu C$ در جابه‌جایی از نقطهٔ A تا B را بدست آورید.

همان‌طور که مطرح شد، پتانسیل و انرژی پتانسیل کمیت‌هایی نسبی هستند، حال اگر در میدان یک مبدأ پتانسیل در نظر بگیریم که در آن پتانسیل و انرژی پتانسیل صفر هستند، می‌توان پتانسیل نقاط دیگر را نسبت به آن به صورت مقابل تعریف کرد:

$$V=\frac{U}{q}$$

* می‌توان برای تغییرات پتانسیل الکتریکی در میدان الکتریکی یکنواخت رابطه‌ای بیان کرد. همان‌طور که بین دو نقطه در یک میدان یکنواخت جابه‌جا شویم، می‌توان تغییرات پتانسیل الکتریکی (ΔV) را از رابطهٔ زیر حساب کرد:

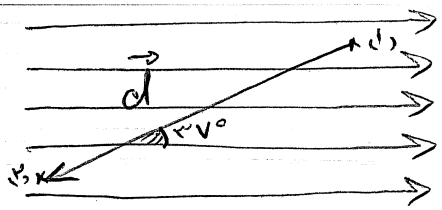


$$\Delta V=-E\,d\cos\alpha$$

زاویهٔ بین بردار جابه‌جایی و میدان الکتریکی $(\vec{E},\vec{d})$ — (m) — $(\frac{N}{C}$ یا $\frac{V}{m})$ — (V)

نکته: یکاهای میدان الکتریکی $\frac{N}{C}$ و $\frac{V}{m}$ می‌باشند که یکای $\frac{V}{m}$ از رابطهٔ بالا نتیجه می‌شود.

مثال ۴۵ با توجه به شکل زیر پاسخ دهید.



$(E=5\times10^{5}\ \frac{V}{m}$, $d=10\,cm)$

الف) V_2-V_1 چند ولت است؟

ب) اگر بار $q=+2\mu C$ از نقطهٔ ۱ به ۲ جابه‌جا شود، کاری که میدان روی آن انجام می‌دهد چند ژول است؟

نکته مهم در یک میدان الکتریکی، هنگامی که جابه‌جایی با آن هم‌جهت باشد که در کل در جهت میدان جابه‌جا شده باشیم، پتانسیل الکتریکی کاهش و اگر در خلاف جهت میدان جابه‌جا شویم پتانسیل افزایش می‌یابد.

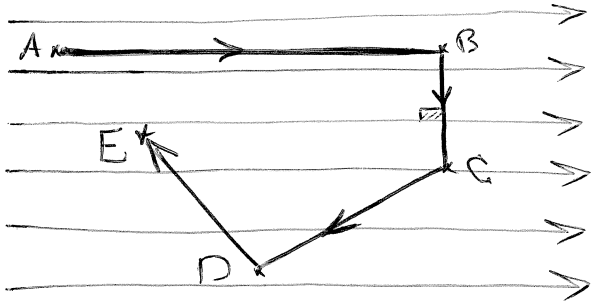
نکته: هنگامی که بین دو نقطه در میان الکتریکی یکنواخت (در راستای خطوط میدان) جابه‌جا شویم یا زمانی که بین دو صفحهٔ رسانای (موازی) با بارهای ناهم‌نام جابه‌جا شویم، اندازهٔ تغییرات پتانسیل یا اندازهٔ اختلاف پتانسیل دو نقطه از رابطهٔ مقابل به دست می‌آید:

$$|\Delta V| = E d$$

نکته: با توجه به اینکه در یک میدان الکتریکی خطوط میدان از بارهای مثبت خارج و به بارهای منفی وارد می‌شود و با توجه به اینکه اگر در جهت خطوط میدان حرکت کنیم پتانسیل کاهش می‌یابد می‌توان گفت، پتانسیل الکتریکی نزدیک بارهای مثبت همواره بیشتر از پتانسیل نقاط نزدیک به بارهای منفی است.

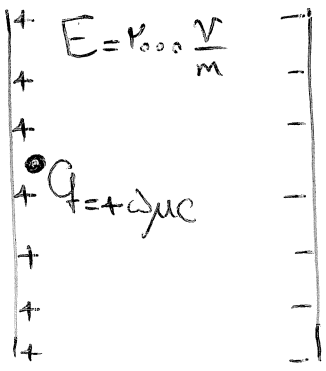
نقاط

مثال ۴ با توجه به شکل زیر، که حرکت یک الکترون در یک میدان الکتریکی یکنواخت را نشان می‌دهد، جدول را با کلمات «افزایش - ثابت - کاهش» پر کنید.



تغییرات / مسیر	انرژی پتانسیل الکتریکی U	پتانسیل الکتریکی V	میدان الکتریکی E
A → B			
B → C			
C → D			
D → E			

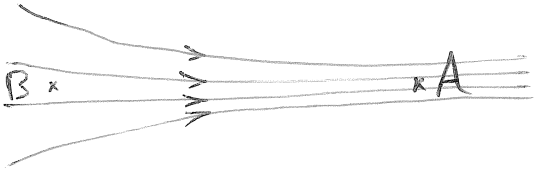
مثال ۵ مطابق شکل مقابل اگر اندازهٔ اختلاف پتانسیل دو صفحه ۱۰۰V باشد به سؤالات زیر پاسخ دهید.



الف) فاصلهٔ صفحات از هم چند cm است؟

ب) در صورتی که بار شارش داده شده در شکل از مجاورت صفحهٔ مثبت رها شود، انرژی جنبش آن در لحظهٔ رسیدن به صفحهٔ منفی چند ژول خواهد بود؟

مثال ۴۸: با توجه به شکل زیر E_A و E_B و همچنین V_A و V_B را با هم مقایسه کنید.



نکته: هنگامی که یک ذره باردار بین دو نقطه در میدان الکتریکی جابجا می‌شود، ممکن است علاوه بر نیروی الکتریکی یک نیروی خارجی از طرف الکترنی و معمولاً توسط نیروی خارجی نیز بر آن وارد شود. بنابراین می‌توان گفت یک کار نیروی الکتریکی (W_E) (کار میدان) و یک کار خارجی روی آن انجام می‌شود.

قضیه کار و انرژی جنبشی $W_t = \Delta K$

$W_t = W_E + W_{خارجی}$ $\Rightarrow \Delta K = W_E + W_{خارجی}$

$\Delta U = -W_E \longrightarrow$ $\boxed{\Delta K + \Delta U = W_{خارجی}}$

$\boxed{\Delta U = -W_E}$

مهم: دقت کنید کار این دو رابطه همواره برقرار است.

*اگر حرکت باردار با سرعت ثابت انجام شود، در این شرایط داریم: $\boxed{\Delta U = W_{خارجی} = -W_E}$

نکته: در جابجایی‌ها و حرکت‌هایی که بار الکتریکی به طور آزاد و خود به خود انجام می‌دهد، حتماً انرژی پتانسیل الکتریکی ذره آزاد شده و کاهش می‌یابد ($\Delta U < 0$)

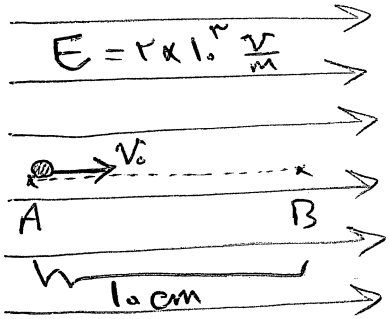
مثال ۴۹: در صورتی که بار الکتریکی $q = +5\mu C$ از نقطه‌ای با پتانسیل $3V$ به نقطه‌ای با پتانسیل $-17V$ جابجا شود، کار نیروی میدان در این جابجایی انجام می‌دهد چند ژول خواهد بود؟

مثال ۵۰: در انتقال بار $+8C$ از نقطه A به B به میزان $3.2\ KJ$ انرژی پتانسیل الکتریکی آزاد شده است. اگر $V_B = 1000V$ باشد، V_A را بیابید.

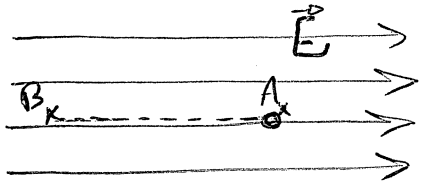
مثال ۵۱: برای انتقال بار $+2mC$ باریکی از نقطهٔ A به B در یک میدان الکتریکی $1J$ کار خارجی روی بار انجام شده است. $V_B - V_A$ را بیابید.

مثال ۵۲: در میدان الکتریکی یکنواخت نشان داده شده در شکل مقابل، الکترون با سرعت V_0 از نقطهٔ A پرتاب شده تا آرایی الکترون در نقطهٔ B توقف لحظه‌ای داشته باشد. الف) تغییرات انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون در این جابجایی (از A تا B) چند ژول است؟

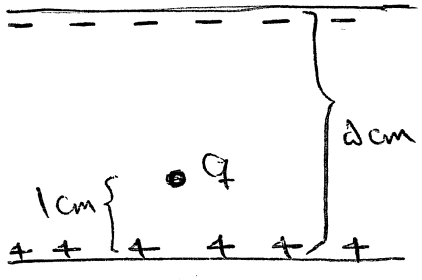
ب) سرعت پرتاب الکترون را بیابید. $(e = 1.6 \times 10^{-19} C \quad , \quad m = 9.1 \times 10^{-31} kg)$



مثال ۵۳: بار الکتریکی $q = -4\mu C$ مطابق شکل زیر، در میدان الکتریکی یکنواخت با بزرگی $10^5 \frac{V}{m}$ رها می‌شود. در جابجایی بار q از A تا B، انرژی جنبشی بار $8mJ$ افزایش می‌یابد. $V_B - V_A$ چند کیلوولت است؟



مثال ۵۴: یک ذرهٔ غبار که دارای بار الکتریکی $2 \times 10^{-10} C$ و جرم $3 \times 10^{-8} gr$ است از نقطه‌ای داده شده در میدان یکنواخت رها می‌شود. چه مدت طول می‌کشد تا ذره به صفحهٔ بالایی برسد؟



$(E = 18 \times 10^4 \frac{V}{m})$

* (خلاصه) اکثر مسائل مبحث انرژی پتانسیل و پتانسیل الکتریکی را می‌توان با روابط و نکات زیر حل کرد.

۱- روابط مقابل همواره برقرارند.

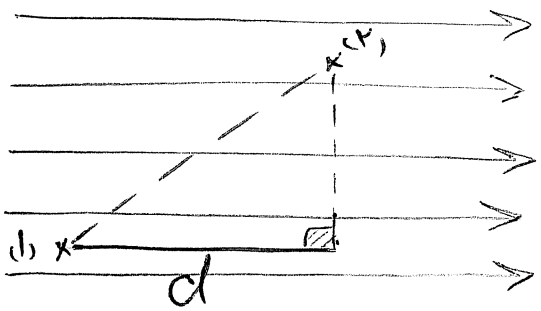
$$\Delta U + \Delta K = W_{\text{خارجی}}$$

$$\Delta U = -W_E$$

$$\Delta U = q.\Delta V \quad \text{یا} \quad \Delta V = \frac{\Delta U}{q}$$

q همراه با علامت حتماً جایگذاری شود.

۲- در محاسبهٔ اختلاف پتانسیل دو نقطه در میدان الکتریکی یکنواخت، بهتر است از رابطهٔ زیر به همراه این نکته استفاده کنیم که «اگر در جهت خطوط میدان حرکت کنیم پتانسیل نقاط کاهش و اگر در خلاف جهت خطوط حرکت کنیم پتانسیل نقاط افزایش می‌یابد».



$$|\Delta V| = E\,d$$

d: فاصلهٔ دو جایی که در راستای خطوط میدان است.

⑤ توزیع بار الکتریکی در اجسام رسانا

وقتی یک جسم عایق (نارسانا) باردار می‌شود، بار در همان جایی ایجاد شده باقی می‌ماند.
اما در اجسام رسانا به دلیل وجود الکترون‌های آزاد، وقتی بار الکتریکی ایجاد می‌شود، بارها طوری توزیع می‌شوند که در بیشترین فاصله از هم قرار گیرند.

نکته ۱: بار الکتریکی خالص (داده شده، اضافی) یک رسانا، روی خارجی‌ترین سطح آن قرار می‌گیرد.

* زمانی هم که یک جسم رسانا در میدان الکتریکی قرار گیرد، می‌توان گفت بار الکتریکی القا شده در آن روی خارجی‌ترین سطح رسانا قرار می‌گیرد.

البته در هر دو حالت، یک زمان خیلی کوتاه (از مرتبهٔ $10^{-9}\,s$) طول می‌کشد تا بارها به سطح خارجی جسم بروند. بعد از آن بارها ساکن شده و یا متعادل می‌شوند. در این حالت اصطلاحاً گفته می‌شود، جسم در تعادل الکترواستاتیکی قرار دارد.

نکته ۲: زمانی که یک رسانای باردار در تعادل الکترواستاتیکی باشد (خیلی ریز این اتفاق می‌افتد) میدان الکتریکی در داخل آن صفر می‌باشد.

* ما در دورهٔ دبیرستان فقط با اجسام رسانای باردار سروکار داریم که در تعادل الکترواستاتیکی هستند بنابراین هر وقت بحث از جسم رسانای باردار باشد، میدان الکتریکی در داخل آن را صفر می‌گیریم.

نکته ۳: یک جسم رسانای باردار که در تعادل الکترواستاتیکی است، هم در فضای اطراف خود میدان الکتریکی ایجاد می‌کند، مثل تمام اجسام باردار دیگر. با این تفاوت که خطوط میدان در تمام نقاط جسم رسانا حتماً بر سطح آن عمود هستند.

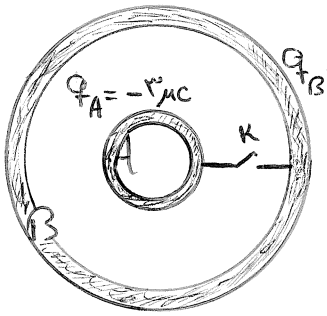
* در توجیه نکته ۳ می‌توان گفت اگر میدان بر سطح رسانا عمود نباشد، حتماً یک مؤلفهٔ مماس بر سطح خواهد داشت که این مؤلفه باعث وارد شدن نیرو به بارهای سطح شده و آن را به حرکت درمی‌آورد. که این با تعادل الکترواستاتیکی جسم رسانا در تناقض است.

نکته ۴: درجه رسانایی کره رسانا، متقابل الکترواستاتیکی است. تمام نقاط داخل و روی سطح رسانا هم پتانسیل هستند

* چون میدان در داخل رسانا، صفر بوده و روی سطح رسانا بر آن عمود است، پس توان نیرو در جابجایی، $W_E = 0$ خواهد بود. در نتیجه؛

$$\Delta U = -W_E = 0 \rightarrow \Delta V = V_2 - V_1 = \frac{\Delta U}{q} = 0 \rightarrow V_2 = V_1$$

مثال ۵۳: باتوجه به شکل مقابل، بعد از بستن کلید و رسیدن مجموعه به تعادل، بار الکتریکی هر کدام از پوسته‌های A و B را تعیین کنید.



* چگالی سطحی بار الکتریکی رسانا

همان طور که بحث شده، بار خالص یک رسانا روی سطح خارجی آن قرار می‌گیرد.

چگالی سطحی بار که با σ نمایش داده می‌شود، عبارت است از مقدار بار قرار گرفته روی سطح به مساحت سطح و واحد آن $\frac{C}{m^2}$ می‌باشد.

نکته: اگر یک جسم رسانا کروی شکل داشته باشیم، توزیع بار در سطح آن یکنواخت و چگالی سطحی بار آن نیز در تمام قسمت‌ها یکسان است. برای محاسبه چگالی سطحی بار از رابطه زیر استفاده می‌کنیم.

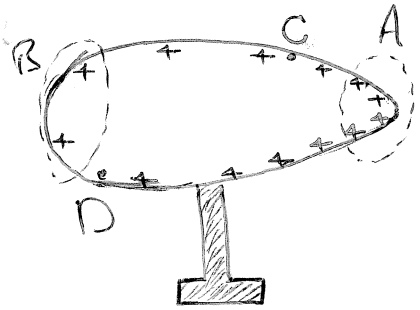
$$\sigma = \frac{q}{A}$$

q ← بار جسم رسانا
A ← مساحت سطح

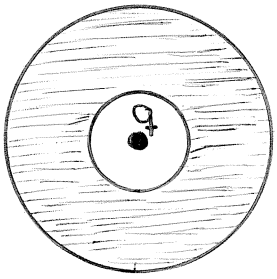
نکته مهم: اگر جسم شکل دلخواه و نامتقارن یا به عبارتی جسمی داشته باشیم که انحنای قسمت‌های مختلف آن متفاوت باشد، دیگر توزیع بار یکنواخت نیست و چگالی سطحی بار در قسمت‌های مختلف، متفاوت خواهد بود و می‌توان گفت:

«چگالی سطحی بار در قسمت‌هایی که انحنای بیشتری دارند (نوک تیزتر هستند) بزرگتر بوده و در این قسمت‌های جسم رسانا، بار بیشتری جمع می‌شود.»

مثال ۵۴ با توجه به شکل مقابل که یک جسم رسانای باردار را روی یک پایهٔ عایق را نشان می‌دهد، چگالی سطحی بار در نقاط A و B و همچنین پتانسیل نقاط C و D را با هم مقایسه کنید.



مثال ۵۵ شکل مقابل یک کرهٔ رسانای توخالی را نشان می‌دهد که شعاع داخلی آن ۲cm و شعاع خارجی آن ۵cm است و یک بار الکتریکی نقطه‌ای $q=+3\mu C$ در مرکز آن قرار داده شده است. اندازهٔ چگالی سطحی بار در سطح داخلی چند برابر سطح خارجی کره است؟



بخش چهارم: خازن

① معرفی خازن

خازن وسیله‌ای الکتریکی است که می‌تواند بار الکتریکی و انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند.

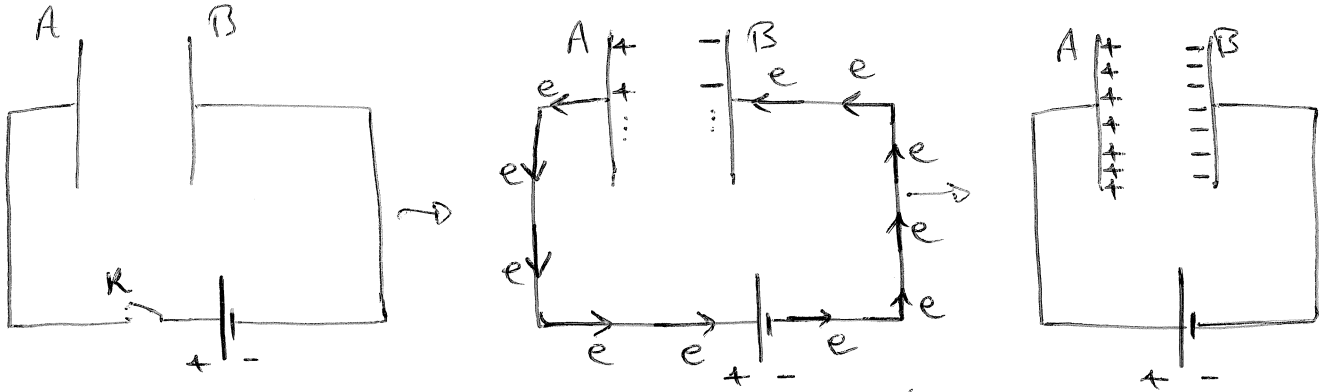
ساختار داخلی خازن به این گونه است که از دو سطح (یا صفحه) رسانا با هر شکل دلخواه مقابل هم قرار گیرند، تشکیل خازن را می‌دهند. و اگر یک اختلاف پتانسیل برای آن صفحات ایجاد کنیم، می‌توان روی آن‌ها بار الکتریکی ذخیره کرد.

اما معمولاً خازن‌ها با شکل‌های متقارن و معقول ساخته شده و براساس همان شکل و ساختاری که دارند نام گذاری می‌شوند. مثل خازن تخت، خازن استوانه‌ای و...

نکته: صرف نظر از نوع خازن‌ها و ساختارشان، از نماد ⊣⊢ برای نشان دادن خازن در مدارهای الکتریکی استفاده می‌شود.

نکته (باردار شدن یا تخلیه شدن خازن)

خازن‌ها چگونگی حرکت بارهای الکتریکی (الکترون‌ها) در مدار را برقرار می‌کنند.



حرکت بارها تا زمانی ادامه دارد که پتانسیل صفحات خازن با پتانسیل قطب‌های مثبت و منفی باتری برابر شود که در واقع باید گفت بعد از شارژ کامل خازن، اختلاف پتانسیل دو سر خازن با اختلاف پتانسیل دو سر مولد یا باتری برابر می‌شود.

$$\text{بعد از شارژ کامل} \begin{cases} V_A = V_+ \\ V_B = V_- \end{cases} \rightarrow V_A - V_B = V_+ - V_- \rightarrow \Delta V_{\text{خازن}} = \Delta V_{\text{باتری}}$$

نکته: بارهای روی صفحات خازن ناهم‌نام ولی هم اندازه هستند.

نکته: در بحث خازن‌ها، اختلاف پتانسیل دو سر خازن (ولتاژ دو سر خازن) را با ΔV یا V و بار ذخیره شده روی صفحات خازن را، اندازهٔ بار ذخیره شده روی یکی از صفحات در نظر گرفته و با q نمایش می‌دهیم.

ظرفیت خازن (C)

نسبت بار ذخیره شده روی صفحات یک خازن به اختلاف پتانسیل دو سر آن مقدار ثابتی است که ظرفیت خازن نامیده شده و با C نمایش داده می‌شود. واحد ظرفیت خازن فاراد نام دارد و با F نشان داده می‌شود.

$$C = \frac{q}{V} \rightarrow q = CV$$

$$1F = 1\frac{C}{V}$$

نکته مهم: ظرفیت خازن با صورت نسبت بار به ولتاژ تعریف می‌شود، اما از q و V مستقل بوده و با ابعاد و مشخصات ساختمانی خازن بستگی دارد.

خازن تخت

این نوع خازن‌ها از دو صفحهٔ رسانای مستطیل شکل مشابه که مساحت هرکدام از آن‌ها A می‌باشد و به موازات یکدیگر در فاصلهٔ d از هم قرار دارند، تشکیل و ساخته شده است. و معمولاً بین صفحات آن را با یک مادهٔ عایق که به آن دی الکتریک گفته می‌شود، پُر می‌کنند.

ظرفیت یک خازن تخت را می‌توان از رابطهٔ زیر محاسبه کرد:

$$C = k\varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

- C: ظرفیت (F)
- k: ثابت دی الکتریک (بدون واحد)
- ε_0: ضریب گذردهی خلاء $8,85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N.m^2}$
- A: مساحت یکی از صفحات (m^2)
- d: فاصلهٔ صفحات (m)

$$\begin{cases} K = 1 & \text{برای خلاء (یا تقریباً هوا)} \\ K > 1 & \text{برای محیط‌های نارسانا} \end{cases}$$

مثال: صفحات خازنی را به پایانه‌های مولدی با اختلاف پتانسیل $24V$ وصل می‌کنیم. اگر بار ذخیره شده در خازن $120\mu C$ شود. الف) ظرفیت خازن را بدست آورید.

ب) انرژی خازن را با اختلاف پتانسیل $36V$ وصل کنیم، بار ذخیره در آن چند μC می‌شود؟

مثال ۵۷ دو صفحهٔ مربعی شکل رسانا به ضلع ۱۶ cm در فاصلهٔ ۲ mm از هم قرار دارند. فضای بین دو صفحه از پارافین با ضریب دی الکتریک ۲٫۵ پر شده است. ظرفیت این خازن را بیابید.

مثال ۵۸ یک خازن تخت بدون دی الکتریک را در نظر بگیرید که با اختلاف پتانسیل V مدار است و بار Q روی صفحات آن ذخیره شده است. در هریک از حالت های زیر بگویید ظرفیت خازن چند برابر می شود؟

الف) اختلاف پتانسیل دو سر خازن را دو برابر کنیم.

ب) فاصلهٔ صفحات خازن را دو برابر و یک دی الکتریک با ثابت $K=5$ بین صفحات آن وارد کنیم.

مثال ۵۹ خازن تخت را در نظر بگیرید که فاصلهٔ صفحات آن از هم 1mm بوده و بین صفحات آن دی الکتریک با ثابت $K=5$ قرار دارد. اگر بخواهیم ظرفیت این خازن 1F باشد، مساحت صفحات آن حدوداً چند m^2 باید باشد؟

نکته: فاراد در عمل واحد بزرگی است، به همین دلیل ظرفیت خازن ها معمولاً در رنج 10^{-6} تا 10^{-12} فاراد می باشد. μF ، nF ، pF

نکته: هنگامی که روی صفحات خازن بار الکتریکی ذخیره می شود، بین صفحات آن یک میدان الکتریکی یکنواخت ایجاد می شود. می توان گفت رابطهٔ زیر بین اختلاف پتانسیل دو صفحهٔ خازن و میدان ایجاد شده در آن برقرار است:

$$V = Ed$$

این رابطه در حالت بیان دقیق در آستانهٔ دوره سنجش هم برقرار است: $V_{\text{ضربه}} = E_{\text{استقامت}}\, d$

مثال ۶۰ مساحت هریک از صفحات خازن تخت $200\ cm^2$ و فاصلهٔ میان صفحات آن $0.15\ mm$ می باشد. اگر بین صفحات خازن دی الکتریک با ثابت $K=5$ وجود داشته باشد:

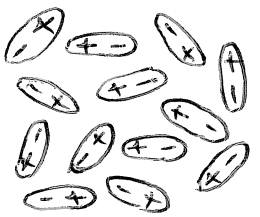
الف) ظرفیت آن چند nF است؟

ب) در صورتی که خازن با یک اختلاف پتانسیل شارژ شده و بار $17.7\ nC$ روی آن ذخیره شود، میدان بین صفحات را حساب کنید.

- علت افزایش ظرفیت خازن در اثر وارد کردن دی الکتریک

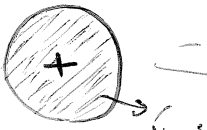
دی الکتریک ها دو نوع هستند: قطبی و غیر قطبی

دی الکتریک های قطبی مثل آب، NH_3 و HCl که مولکول های آن

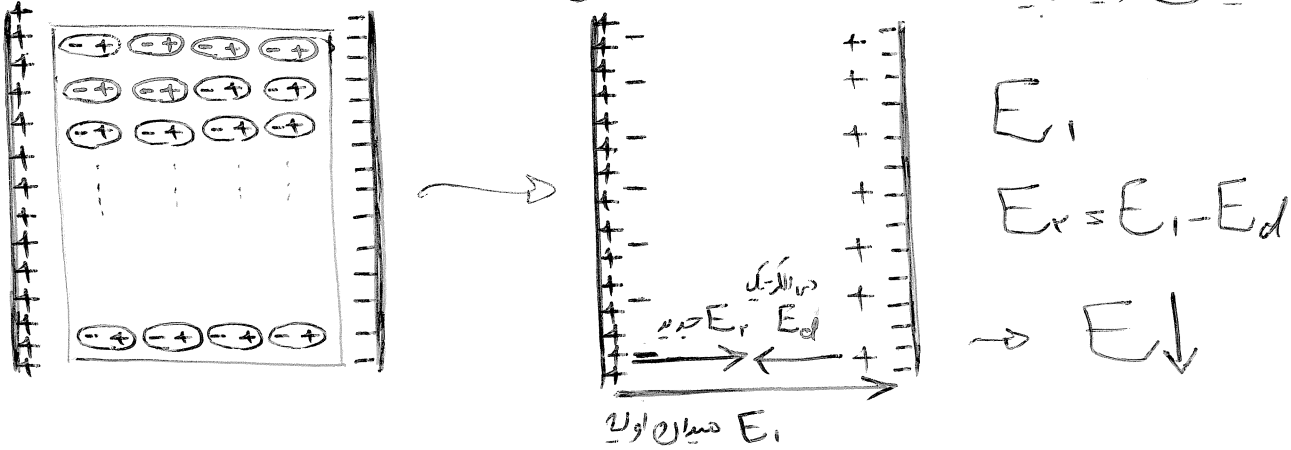


دارای دو قطب مثبت و منفی به صورت ⊖⊕ هستند و در غیاب میدان به صورت نامنظم قرار گرفته اند.

دی الکتریک های غیر قطبی مثل متان، بنزین و... دارای مولکول هایی هستند که در غیاب میدان به صورت ⊕ بوده و در حضور میدان به صورت ⊕ در آمده و اصطلاحاً قطبیده می شود.



دلیل افزایش ظرفیت خازن را می توان اینگونه توجیه کرد که: فرض کنید یک خازن توسط یک باتری شارژ شده و پس از آن جدا شود. در این صورت اگر در ساختمان خازن تغییری ایجاد کنیم، بار ذخیره شده در آن تغییری نمی کند. حال اگر یک دی الکتریک قطبی یا غیر قطبی در بین صفحات خازن وارد شود مولکول های آن منظم شده یا قطبیده شده و بعد منظم می شوند و به صورت شکل داده شده در شکل زیر قرار می گیرند. در این حالت در کنار صفحه مثبت خازن بار منفی اضافه و در کنار صفحه منفی آن بار مثبت اضافه جمع می شود. به واسطه این بارهای اضافی یک میدان ایجاد شده که میدان اولیه در بین صفحات خازن را کاهش می دهد.



$$E_1$$

$$E_2 = E_1 - E_d$$

$$\rightarrow E \downarrow$$

$$V = Ed \xrightarrow{E\downarrow} V\downarrow$$

$$C = \frac{q}{V} \xrightarrow[V\downarrow]{q\ \text{ثابت}} C\uparrow$$

$$\Big\} \rightarrow C\uparrow$$

- فروریزش در الکتریک

منظور از ظرفیت یک خازن (C) این است که برای ذخیره سازی بار روی صفحات آن محدودیتی وجود دارد. چرا که با توجه به رابطه $q = CV$ با افزایش ولتاژ خازن (اختلاف پتانسیل دو سر آن) می‌توان بار بیشتری روی آن ذخیره کرد.

نکته اینجاست که با توجه به اینکه در الکتریک بالا رفتن ولتاژ خازن، ولتاژ آن را تا مقدار محدودی می‌توان افزایش داد. به نوعی می‌توان برای ذخیره سازی بار در خازن محدودیت قائل شد که این محدودیت در اصل به توانایی و تحمل در الکتریک خازن در برابر افزایش اختلاف پتانسیل بستگی دارد.

* منظور از فروریزش این است که: وقتی ولتاژ زیاد می‌شود طبق رابطه $V = Ed$، چون d ثابت است، میدان (E) افزایش می‌یابد. حال اگر میدان از یک حدی بزرگتر شود، الکترون‌های اتم‌های دی الکتریک کنده شده و برای لحظاتی در الکتریک تبدیل بار رسانا شده و بار خازن تخلیه و جریان الکتریکی برقرار می‌شود. این لحظه همراه با جرقه زدن و سوختن دی الکتریک و خازن بوده و اصطلاحاً گفته می‌شود برای دی الکتریک فروریزش اتفاق افتاده است.

- تعریف (قدرت یا استقامت دی الکتریک)

بیشترین میدانی که یک دی الکتریک می‌تواند تحمل کند تا برای آن فروریزش اتفاق نیافتد.

- تعریف (پتانسیل فروریزش)

بیشترین اختلاف پتانسیلی که می‌توان به دو سر یک خازن اعمال کرد، تا برای آن فروریزش اتفاق نیافتد.

* در اکثر موارد فروریزش نیز مثل قبل از آن رابطه مقابل برقرار است: $V = E \cdot d$ (پتانسیل فروریزش = قدرت یا استقامت فروریزش × d)

مثال ۱۱: فاصله جدایی صفحات خازنی 1 mm بوده و دی الکتریک آن کاغذی باشد. پتانسیل فروریزش این خازن چند KV است؟ ($14 \frac{KV}{mm}$ = قدرت دی الکتریک)

۲) انرژی خازن

همانطور که یک خازن با یک مولد (اختلاف پتانسیل) وصل می‌شود، مولد برای شارژ کردن خازن انرژی مصرف می‌کند. که بخشی از این انرژی در خازن ذخیره و بخش دیگر آن به شکل انرژی گرمایی در سیم‌ها و دیگر اجزای رسانای مدار مصرف می‌شود. می‌توان گفت انرژی ذخیره شده در خازن از یکی از روابط زیر بدست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} qV \xrightarrow{q=CV} \boxed{U = \frac{1}{2} CV^2}$$

$$\boxed{U = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}}$$

هر ۳ رابطه گفته شده صحیح هستند و در مسائل با توجه به شرایط موجود، یکی از آن‌ها کاربرد بهتری دارد.

نکته مهم

۱) همانطور که یک خازن با باتری (مولد) وصل باشد، ولتاژ یا اختلاف پتانسیل دو سر آن (V) همواره ثابت است. مگر اینکه ولتاژ آن را بدست خودمان تغییر دهیم.

۲) همانطور که یک خازن شارژ شده را از باتری یا از مدار آن جدا کنیم، بار ذخیره شده روی صفحات آن (q) همواره ثابت خواهد ماند. مگر اینکه خازن را با خازن دیگری وصل یا دوباره در مدار قرار دهیم.

مثال ۴۲) دو سر یک خازن $0.05\mu F$ را با ولتاژ $12V$ وصل کرده‌ایم. بار و انرژی ذخیره شده در آن را بیابید.

مثال ۴۳) دو صفحه خازن را که با یک مولد وصل است، از هم دور می‌کنیم، هر کدام از موارد زیر چه تغییری می‌کند؟ ۱) ولتاژ خازن ۲) ظرفیت ۳) بار خازن ۴) میدان بین صفحات ۵) انرژی خازن

مثال ۴۴ یک خازن را به باتری وصل کرده تا شارژ شود. بعد شارژ خازن را از باتری جدا می‌کنیم. اگر در این شرایط یک دی‌الکتریک وارد خازن کنیم، هریک از موارد زیر چه تغییری می‌کند؟

۱) بار خازن ۲) ظرفیت ۳) ولتاژ خازن ۴) میدان بین صفحات ۵) انرژی خازن

مثال ۴۵ یک خازن را که شارژ شده است، از مدار جدا کرده پس فاصلهٔ صفحات آن را زیاد می‌کنیم، در این صورت میدان بین صفحات چه تغییری می‌کند؟

مثال ۴۶ یک خازن متصل به باتری را در نظر بگیرید. اگر بدون جدا کردن خازن از باتری، فاصلهٔ صفحات آن را نصف کنیم، هرکدام از موارد زیر چه تغییری می‌کند؟

۱) بار خازن ۲) میدان بین صفحات ۳) انرژی خازن

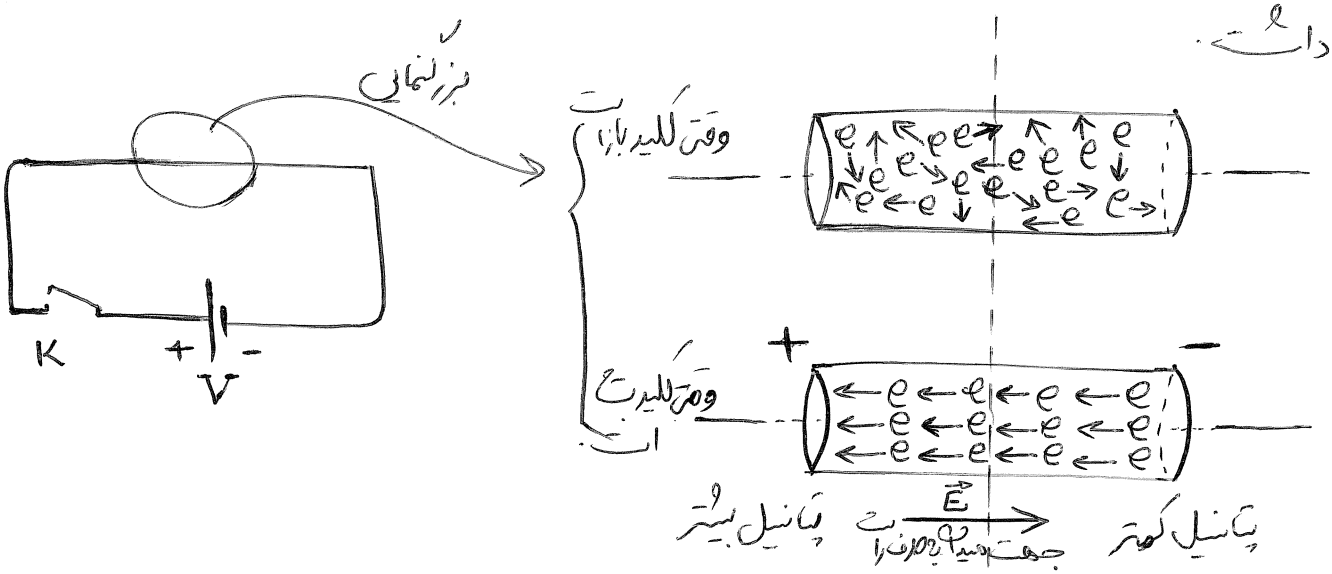
مثال ۴۷ ظرف خازن $12\,\mu F$ و بار الکتریکی آن 9 است. فرض کنید $+3\,mC$ بار صفحهٔ مثبت آن جدا و به صفحهٔ منفی منتقل کنیم و با این کار انرژی ذخیره شده در خازن $8\,J$ زیاد شود. 9 را تعیین کنید.

فصل دوم : جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم

① جریان الکتریکی

اتم‌های اجسام رسانا دارای الکترون‌های آزاد هستند. در حالت عادی این الکترون‌ها دارای حرکت نامنظم و کاتوره‌ای هستند. (تندی این حرکت نامنظم از مرتبهٔ $10^6 \frac{m}{s}$ است)

در یک سیم رسانا نیز در شرایط عادی، یعنی وقتی که برای نقاط درون سیم اختلاف پتانسیل وجود ندارد و میدان الکتریکی خارجی در سیم وجود ندارد، الکترون‌ها به صورت نامنظم حرکت می‌کنند. در این حالت اگر مقطعی از سیم را در نظر بگیریم، هیچ شارش خالص الکترونی از آن نخواهیم داشت.

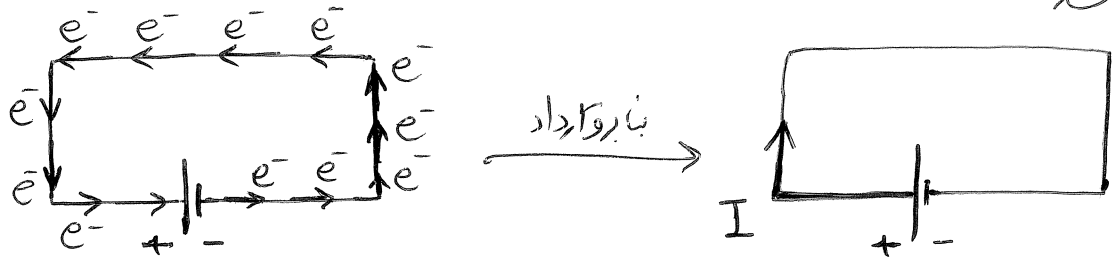


★ جریان الکتریکی هنگامی در یک سیم رسانا برقرار می‌شود که یک حرکت هماهنگ الکترونی یا اصطلاحاً یک شارش خالص الکترونی از هر مقطع سیم وجود داشته باشد.

با توجه به شکل بالا، بعد از بسته شدن کلید می‌توان گفت تفاضلی از بار که با مقطب مثبت مولد تر دیکتر هستند، جذب قسمت دارای پتانسیل بیشتری خواهند شد. بدین ترتیب یک میدان خارجی در سیم شکل می‌گیرد و از آن جایی که وقتی در جهت میدان حرکت کنیم پتانسیل کاهش می‌یابد می‌توان جهت میدان و در نتیجه جهت نیروی وارد شده به الکترون‌ها و جهت حرکت آن‌ها را تعیین کرد.

بعد از برقراری اختلاف پتانسیل توسط باتری و شکل گیری میدان الکتریکی در سیم، الکترون‌ها در خلاف جهت میدان نیرو وارد شده و الکترون‌ها همراه با اینکه حرکت نامنظم دارند در خلاف جهت میدان سوق پیدا کرده و منتقل می‌شوند.

نکته: سرعت متوسط حرکت انتقالی الکترون‌ها، سرعت سوق نامیده شده و در حدود $1\ \frac{mm}{s}$ می‌باشد.



نکته: جریان الکتریکی که با I نمایش داده می‌شود، بار برقرار شد در خلاف جهت حرکت الکترون‌ها در سطح کنتاکت شده و در یک مولد در حالت معمول (بعداً توضیح داده خواهد شد)، جریان از قطب مثبت آن خارج می‌شود.

- جریان الکتریکی متوسط: با مقدار بار عبوری از یک مقطع رسانا با مدت زمان عبور بار جریان الکتریکی متوسط گفته می‌شود.

$$\overline{I} = \frac{q}{t}$$

(q: اندازه بار عبوری از یک مقطع، t: مدت زمان عبور بار)

نکته مهم: در این فصل جریان الکتریکی مستقیم (ثابت) را بررسی می‌کنیم. جریان‌هایی که با یک اختلاف پتانسیل ثابت یعنی با یک مولد ولتاژ مستقیم (ثابت) برقرار می‌شوند (D.C) جریان مستقیم نامگذاری شده‌اند که جهت و اندازه آن در مدت زمانی که برقرار است تغییر نکرده، ثابت بوده و می‌توان مقدار لحظه‌ای و متوسط آن را برابر دانست.

$$\rightarrow \boxed{\overline{I} = I = \frac{q}{t}} \quad \begin{matrix} \rightarrow (C) \\ \rightarrow (S) \end{matrix}$$

($\overline{I}$ و I: (A) آمپر)

$$1A = 1\frac{C}{s}$$

در حالتی که عبور بار از هر مقطع با آهنگ ثابت اتفاق بیافتد، یعنی جریان مستقیم داشته باشیم.

نکته: مولدهای DC طی فرایندی شیمیایی اختلاف پتانسیل ایجاد کرده و چون فرایند باری به ثبات اتفاق افتاده، جریانی خواهد ثابت باشد.

② قانون اهم و مقاومت

وقتی از طریق اعمال یک اختلاف پتانسیل (ولتاژ) به دو سر یک جسم رسانا یا نیمه رسانا جریان الکتریکی ورد واقع حرکت الکترون های آزاد برقرار شود، الکترون های آزاد در حین حرکت با دیگر الکترون های اتم های جسم برخورد کرده و دمای جسم بالا رفته گرم می شود. (بخشی از انرژی جنبشی الکترون های آزاد به انرژی گرمایی تبدیل می شود)

پس می توان گفت هر جسم در مقابل عبور جریان الکتریکی از خود، یک مقاومت نشان می دهد که به آن مقاومت الکتریکی هم گفته می شود.

همانطور که وسایل الکتریکی به یک ولتاژ یا یک مدار وصل می شوند، جریان الکتریکی عبوری از اجزای رسانا و نیمه رسانای آن ها مقاومت دارد. چون جنس و مقدار ماده رسانا یا نیمه رسانا بکار رفته در آن ها فرق داشته و در واقع باید گفت مقاومت الکتریکی آن ها متفاوت است.

* انواع مقاومت ها عبارتند از: ① مقاومت های پیچه ای که کاربردهای متفاوتی دارند و اغلب یکی از اجزای وسایل الکتریکی مثل پنکه، مخلوط کن و ... می باشند.
② مقاومت های ترکیبی که برای کنترل جریان و ولتاژ در برد های الکتریکی مثل برد کامپیوتر استفاده می شوند
③ مقاومت های خاص مثل ترمیستور، مقاومت نوری و دیود

* بیشتر مقاومت ها از نوع یک و دو بوده و نماد آن ها در مدارهای الکتریکی می باشد. اما مقاومت های خاص، کاربرد خاص و نماد خاص خود را دارند. (توضیحات بیشتر در کتاب درسی)

قانون اهم: برای اکثر رساناهای فلزی و غیرفلزی در دمای ثابت، نسبت اختلاف پتانسیل اعمال شده به دو سر رسانا با شدت جریان عبوری از آن مقدار ثابتی است که به آن مقاومت رسانا گفته می‌شود.

$$R = \frac{V}{I}$$

V → (V)

I → (A)

R ↓ مقاومت (Ω)

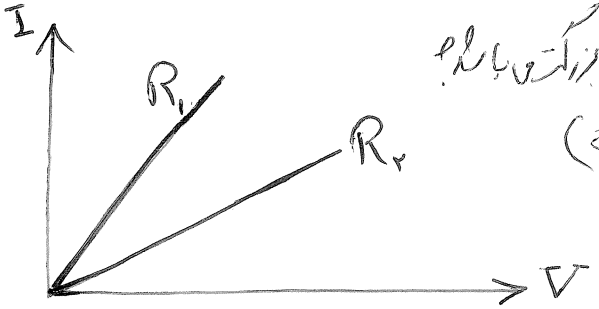
$$1\Omega = 1\frac{V}{A}$$

این گونه رساناها که I و V آن‌ها با هم رابطهٔ خطی دارند، رساناهای اهمی نامیده می‌شوند.

نکته: قانون اهم به صورت تجربی و با انجام آزمایش قابل اثبات است.

مثال ۱: نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل اعمالی با دو مقاومت $(I-V)$ به صورت مقابل است. تعیین کنید کدام مقاومت بزرگ‌تر باشد؟

(نمودار با فرض اینکه دمای مقاومت‌ها ثابت شده باشد رسم شده است)



✳ عوامل مؤثر بر مقاومت رساناهای اهمی

مقاومت رساناهای اهمی در دمای ثابت با طول، سطح مقطع (مساحت مقطع) و جنس رسانا بستگی دارد.

برای جسم رسانایی که در طولی مشخص، سطح مقطع آن تغییر نکند (مثل سیم‌های رسانا) می‌توان ثابت کرد که مقاومت از رابطهٔ زیر به دست می‌آید.

$$R = \rho\frac{l}{A}$$

l → طول رسانا (m)

A → مساحت مقطع (m^2)

R ↓ مقاومت (Ω)

ρ ↓ مقاومت ویژه ($\Omega.m$)

نکته: این رابطه نیز به صورت تجربی و با انجام آزمایش اثبات می‌شود.

نکته: ρ، کمیتی است با نام مقاومت ویژه که به جنس و دمای رسانا بستگی دارد.

مثال ۲: مقاومت یک سیم مسی به طول ۹۰m و سطح مقطع با قطر ۲mm در یک دمای مشخص که در آن $\rho_{مس} = 1.7 \times 10^{-8}\ \Omega.m$ است، چند اهم می‌شود؟ $(\pi = 3)$

نکته مهم: همانطور که مطرح شد، مقاومت ویژه، به جنس و دما بستگی دارد. در مورد یک رسانای فلزی با جنس معلوم، می‌توان گفت با افزایش دما مقاومت ویژه افزایش می‌یابد. در این رساناها مقاومت ویژه با دما تقریباً رابطهٔ خطی دارد.

بنابراین در مورد فلزات با افزایش دما، در کل مقاومت افزایش می‌یابد.

می‌توان به صورت تجربی و با انجام آزمایش به رابطهٔ زیر بین مقاومت ویژهٔ یک رسانای فلزی با تغییر دمای آن رسید:

$$\rho_2 = \rho_1(1 + \alpha \Delta T)$$

ΔT: تغییرات دما (K یا $^\circ C$)

α: ضریب دمایی مقاومت ویژه ($\frac{1}{K}$ یا $\frac{1}{^\circ C}$)

* این رابطه فقط برای رساناها برقرار است.

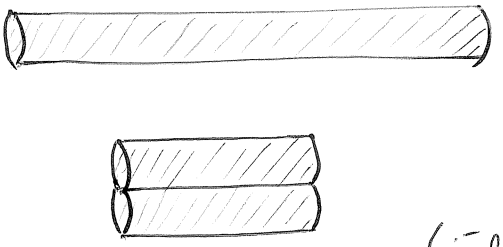
* α ثابتی است با نام ضریب دمایی مقاومت ویژه که در مورد رساناهای فلزی مثبت می‌باشد، در واقع تغییرات دما با ضریب مثبت در تغییر مقاومت ویژه و در نتیجه مقاومت رسانا تأثیرگذار است. یعنی اگر افزایش دما داشته باشیم، افزایش مقاومت ویژه و اگر کاهش دما داشته باشیم کاهش مقاومت خواهیم داشت.

* برای نیم‌رساناها هم یک ضریب دمایی تعریف می‌شود که منفی است. البته برای مقاومت ویژهٔ نیم‌رساناها رابطهٔ بالا صادق نیست اما می‌توان گفت در نیم‌رساناها با افزایش دما مقاومت ویژه کاهش می‌یابد و برعکس.

نکته مهم: در مورد این مبحث و مسائل آن با سه دسته سؤال روبارو هستیم.

یک) مسائلی که در یک دمای ثابت، طول و سطح مقطع سیم تغییر کند. در این دسته از سؤال‌ها فقط از رابطه $R=\rho\frac{L}{A}$ استفاده می‌کنیم.

مثال ۳) مطابق شکل اگر سیمی با مقاومت R را نصف کرده و دوتکه را با هم جمع بسته و سیم جدید بسازیم، مقاومت سیم جدید چند R خواهد شد؟ (سیم‌ها بدون روکش هستند)



مثال ۴) در یک دمای ثابت، سیمی با مقاومت R توسط دستگاهی کشیده شده و بدون تغییر حجم، قطرش نصف می‌شود. با این کار مقاومت سیم جدید چند برابر خواهد شد؟

مثال ۵) طول سیم A دو برابر طول سیم B و قطر مقطع آن نصف قطر مقطع B است. اگر مقاومت سیم‌ها یکسان باشد، مقاومت ویژه سیم A چند برابر مقاومت ویژه سیم B می‌شود؟

دو) مسائلی که فقط دمای سیم تغییر کند. در این دسته با توجه به شرایط و خواسته سؤال از یکی از روابط $\Delta R=R_1\alpha\Delta T$ یا $R_2=R_1(1+\alpha\Delta T)$ یا $\rho_2=\rho_1(1+\alpha\Delta T)$ استفاده می‌کنیم.

مثال ۶) رسانایی با مقاومت $100\,\Omega$ در نظر بگیرید که ضریب دمایی مقاومت ویژه آن برابر با $4\times10^{-3}\frac{1}{°C}$ باشد. اگر دمای رسانا را $20\,K$ افزایش دهیم، مقاومت آن چند درصد افزایش می‌یابد؟

مثال ۷) در دمای ۲۰°C مقاومت فلز پلاتین بکار رفته در ساختار یک دماسنج مقاومتی برابر با ۱۵۰Ω است. برای اندازه گیری دمای یک محلول، این دماسنج را درآن قرار می دهیم. اگر مقاومت دماسنج ۱۸۰Ω شود، دمای محلول چند درجهٔ سلسیوس است؟ ($\alpha_{\text{پلاتین}} = 4\times10^{-3}\frac{1}{K}$)

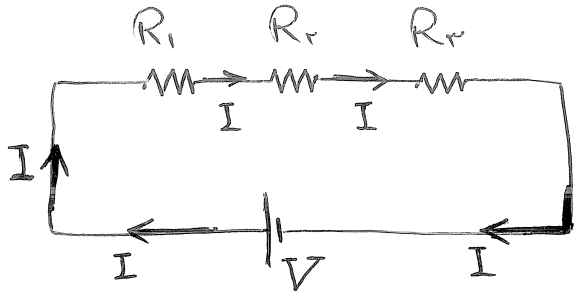
سه) مسائلی که هم دما و هم طول و سطح مقطع تغییر کند. در این دسته از سؤالات از ترکیب دو رابطهٔ $R=\rho\frac{L}{A}$ و $\rho_2=\rho_1(1+\alpha\Delta T)$ استفاده می‌کنیم.

مثال ۸) اگر توسط دستگاهی طول یک سیم بدون تغییر حجم، پنج برابر شده و همزمان دمای سیم ۵۰°C افزایش داده شود، مقاومت سیم چند برابر خواهد شد؟ ($\alpha = 4\times10^{-3}\frac{1}{K}$)

مثال ۹) سیمی به طول 1m و سطح مقطع $3\times10^{-6}\,m^2$ در نظر بگیرید. مقاومت ویژهٔ مادهٔ سازندهٔ سیم در دمای ۳۰°C برابر با $4\times10^{-5}\,\Omega.m$ و ضریب دمایی مقاومت ویژهٔ آن $2\times10^{-3}\,K^{-1}$ می باشد. مقاومت این سیم را در دمای ۴۰°C تعیین کنید.

(راه حل مسأله مربوط به آلیاژ نیکروم می باشد)

(۳) بستن مقاومت‌ها به هم

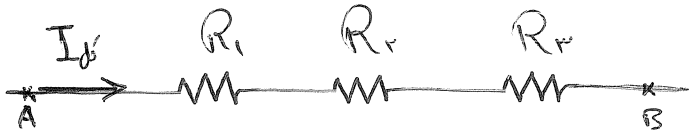


حالت اول: اتصال متوالی (سری)

اگر چند مقاومت پشت سر هم ببندیم و از محل اتصال آن‌ها جریان گرفته نشود می‌توان گفت نوع اتصال آن‌ها متوالی است.

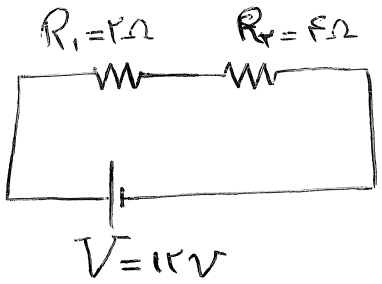
* جریان کلی که وارد مجموعه می‌شود با جریان عبوری از تک تک مقاومت‌ها برابر است.
* ولتاژ کل مجموعه متوالی (اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه) برابر با جمع ولتاژ تک تک مقاومت‌ها است.
* می‌توان به جای مجموعه مقاومت‌های متوالی، یک مقاومت تحت عنوان مقاومت معادل در نظر گرفت.

شکل زیر قسمتی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد و مشاهده می‌کنید که در آن چند مقاومت به صورت متوالی به هم بسته شده‌اند:



$$I_{کل} = I_1 = I_2 = I_3 \quad ، \quad V_{BA} \text{ یا } V_{کل} = V_1 + V_2 + V_3 \quad ، \quad R_T \text{ یا } R_{کل} = R_1 + R_2 + R_3$$

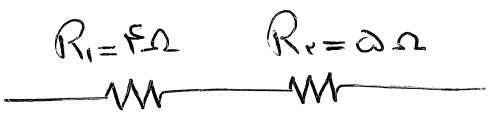
مثال ۱۰ با توجه به مدار مقابل پاسخ دهید.

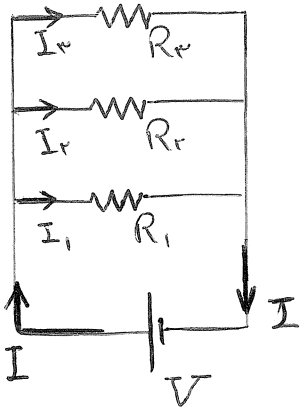


الف) مقاومت معادل چند اهم است؟

ب) اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت R_2 را تعیین کنید.

مثال ۱۱ با توجه به شکل زیر که قسمتی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد، اگر $V_2 = 10V$ باشد اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه چند ولت می‌شود؟





حالت دوم: اتصال موازی

در این نوع اتصال دو سر مقاومت‌ها به هم وصل است.

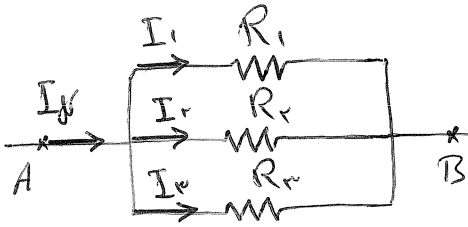
* ولتاژ یا اختلاف پتانسیل تمام خازن‌ها با هم برابر بوده و برابر با اختلاف پتانسیل دو نقطه‌ای است که مجموعه با آن‌ها وصل شده باشد (یعنی دو سر مجموعه)

* جریان کلی که وارد مجموعه موازی می‌شود، بین شاخه‌ها تقسیم خواهد شد و شاخه‌ها با توجه به مقاومتی که دارد، سهمی از این جریان را می‌برد.

* می‌توان به جای مجموعه مقاومت‌های موازی، یک مقاومت با عنوان مقاومت معادل قرار داد.

شکل زیر قسمتی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد که در آن چند مقاومت با صورت موازی کنار هم و به هم بسته شده‌اند.

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

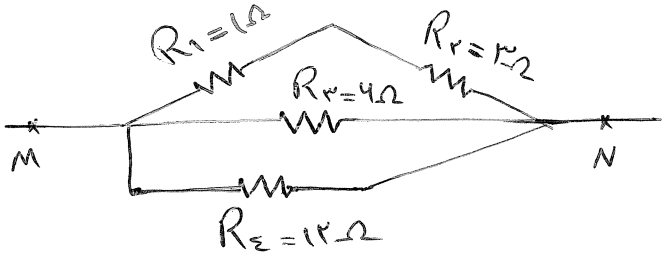


$$V_{BA} = V_T = V_1 = V_2 = V_3$$

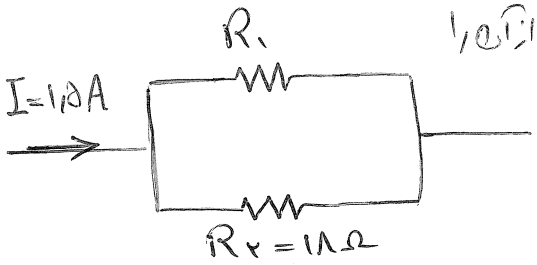
$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

نکته: منظور از اتصال موازی این است که سیم‌های اتصال‌دهنده حتماً موازی هم باشند.

مثال ۱۲) با توجه به شکل زیر مقاومت معادل بین دو نقطه M و N را تعیین کنید.



مثال ۱۳) با توجه به شکل زیر که قسمتی از یک مدار را نشان می‌دهد، اگر اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه ۹V باشد. الف) مقاومت R_1 و ب) جریان عبوری از آن را تعیین کنید.



نکته: ۱) در محاسبه مقاومت معادل دو مقاومت موازی می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

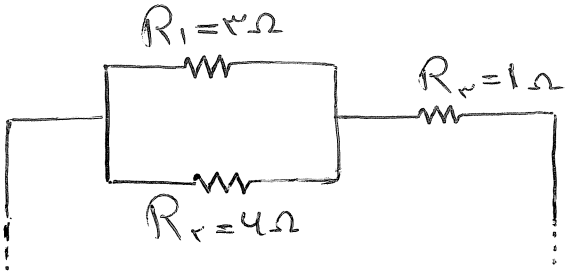
$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

۲) در اتصال موازی مقاومت‌ها، هرچه تعداد شاخه‌ها بیشتر شود، مقاومت معادل کوچکتر خواهد شد.

۳) در اتصال موازی مقاومت‌ها، مقاومت معادل از تک تک مقاومت‌ها کوچکتر خواهد بود ولی در اتصال متوالی از تک تک آن‌ها بزرگتر است.

۴) در اتصال موازی مقاومت‌ها وقتی جریان وارد مجموعه شده و بین شاخه‌های موازی تقسیم شود، شاخه‌ای که مقاومت کمتری داشته باشد سهم بیشتری از جریان دارد.

مثال ۱۴: با توجه به شکل زیر، اگر جریان عبوری از مقاومت R_3 برابر با 4A باشد.



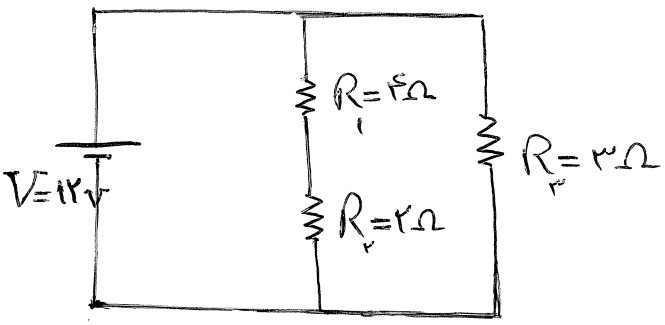
الف) جریان عبوری از R_1 و R_2 را تعیین کنید.

ب) اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه چند ولت است؟

مثال ۱۵: با توجه به مدار مقابل،

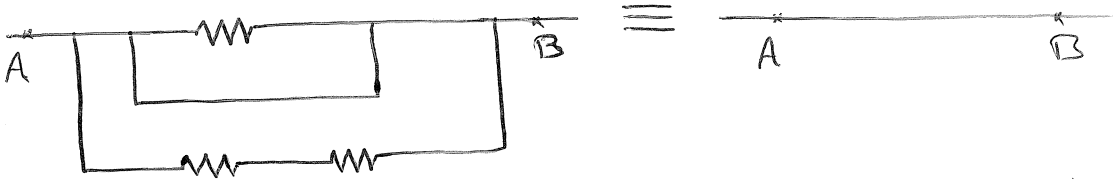
الف) جریان الکتریکی عبوری از R_3 و

ب) ولتاژ مقاومت R_1 را تعیین کنید.

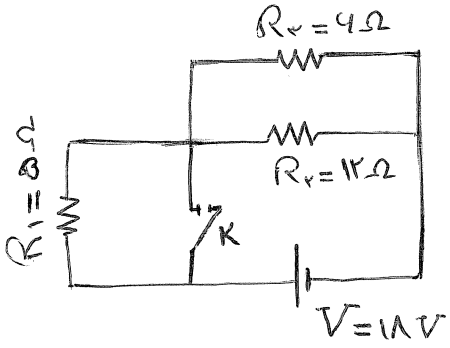


نکته مهم (اتصال کوتاه)

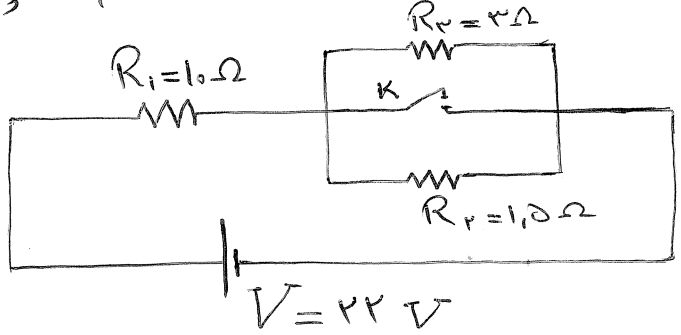
اگر دو سر یک مقاومت با یک سیم بدون مقاومت به هم وصل شده باشند، به طوری که سیم از وسایل الکتریکی دیگری عبور نکرده باشد، برای مقاومت اصطلاحاً اتصال کوتاه اتفاق افتاده و می‌توان آن را از مدار خارج و به جای آن یک سیم در نظر گرفت.



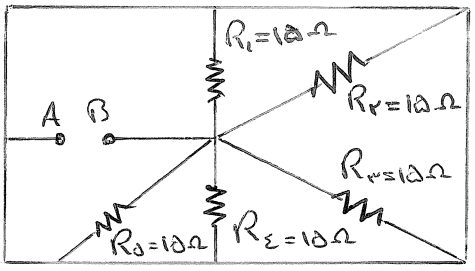
مثال ۱۶ با توجه به مدار مقابل اگر کلید باز شود، اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت R_2 چند ولت تغییر می‌کند؟

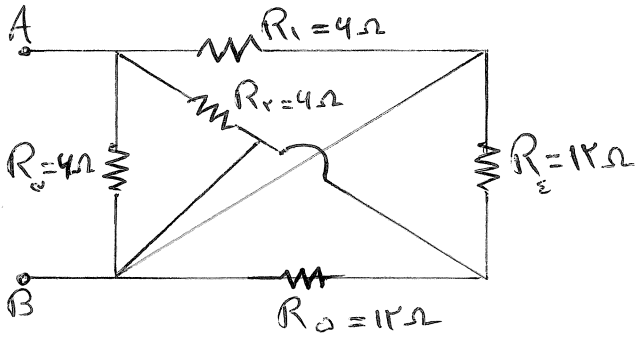


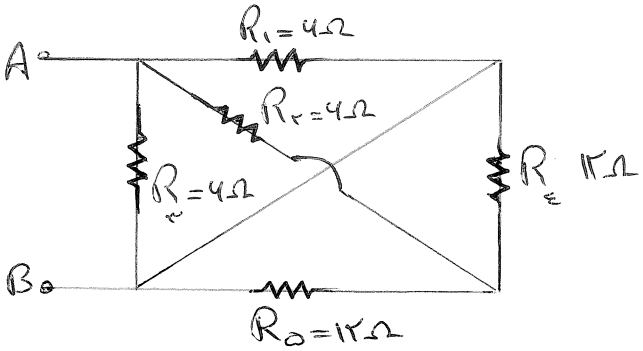
مثال ۱۷ با توجه به مدار زیر، با بستن کلید، جریان عبوری از مقاومت R_1 چند آمپر و چگونه تغییر می‌کند؟

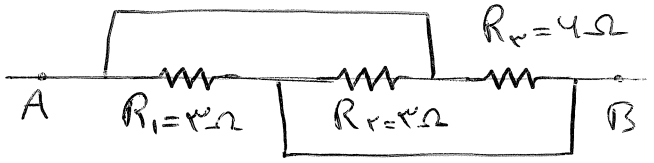


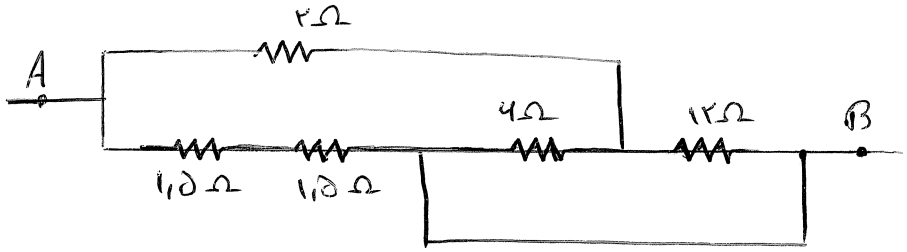
مثال ۱۸: در هریک از شکل زیر، مقاومت معادل بین دو نقطهٔ A و B را بیابید.

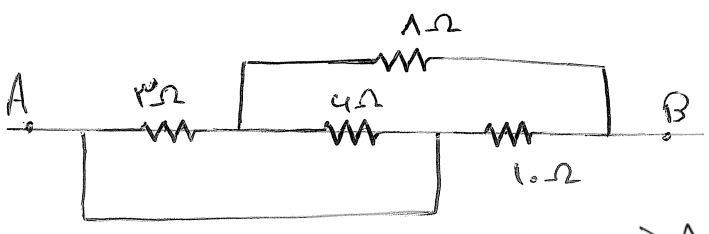








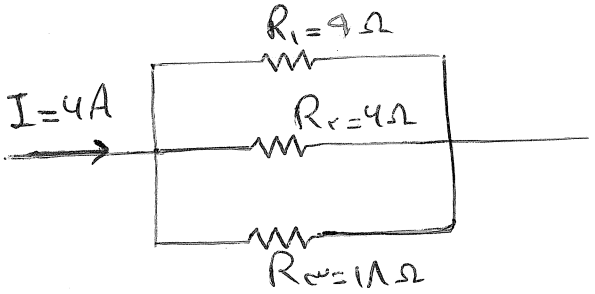


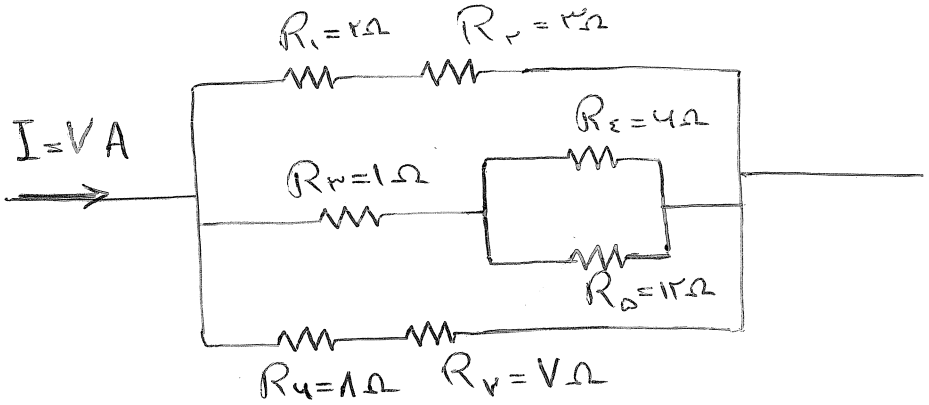


نکته (تقسیم جریان الکتریکی بین شاخه‌های موازی)

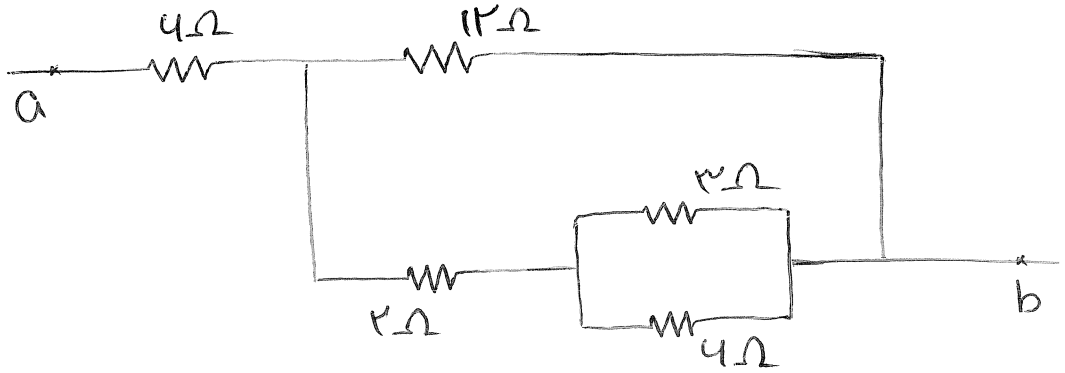
همان‌طور که قبلاً مطرح شد وقتی یک جریان وارد مجموعه‌ای از مقاومت‌ها که به صورت موازی به هم بسته شده‌اند می‌شود، شاخه‌ای که مقاومت بزرگ‌تری دارد سهم کمتری از جریان را عبور می‌دهد. می‌توان به این شاخه جریان کمتری نسبت داده و جریان شاخه‌های دیگر را به آن تقسیم کرد.

مثال ۱۹ درصدهای زیر، جریان عبوری از هر مقاومت را تعیین کنید.





مثال ۲۰ درصدار شکل زیر، اگر از مقاومت ۳ اهمی جریان ۲ آمپر عبور کند، اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت ۴ اهمی که به a وصل است را بیابید.

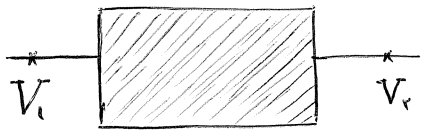


④ انرژی الکتریکی مصرفی

همانطور که قبلاً توضیح داده شد، اگر برای دو نقطه از یک رسانا اختلاف پتانسیل بوجود آید، در اثر میدان الکتریکی ایجاد شده، الکترون‌های آزاد هنگام برخورد با حرکت انتقالی کرده و انرژی جنبشی در رسانا برداشته شود. این حرکت الکترون‌ها آزادانه است، بنابراین انرژی پتانسیل الکترون‌ها باید کاهش پیدا کرده و انرژی جنبشی آن‌ها افزایش یابد و سرعت حرکت آن‌ها مدام در حال افزایش باشد. اما در رسانا یک کار خارجی انجام می‌شود تا حرکت الکترون‌ها با سرعت ثابت و در نتیجه جریان ثابت برقرار شود که می‌توان گفت این کار خارجی را اتم‌های رسانا و الکترون‌های آن‌ها انجام می‌دهند. در واقع الکترون‌های آزاد در حین حرکت با اتم‌ها برخورد کرده و سرعت آن‌ها کنترل می‌شود. بدین ترتیب در اثر این برخورد دمای اتم‌ها بالا رفته و بدلیل اختلاف دمایی که با محیط اطراف بوجود می‌آید، انرژی گرفته شده از الکترون‌های آزاد به شکل انرژی گرمایی به محیط داده می‌شود. این انرژی در واقع همان انرژی است که به آن انرژی مصرفی در رسانا گفته می‌شود و از رابطه اندازه‌ی کار خارجی انجام شده توسط اتم‌های رسانا یا تغییر انرژی پتانسیل الکترون‌های آزاد برابر است. $\text{انرژی الکتریکی مصرفی در رسانا} = |\Delta U| = |W_{\text{خارجی}}|$

بنابراین قرارداد این انرژی الکتریکی مصرفی با W یا U نمایش داده می‌شود.

شکل زیر یک رسانا را نشان می‌دهد که برای دو سر آن یک اختلاف پتانسیل ΔV ایجاد شده است.



این رسانا می‌تواند یک وسیله الکتریکی مثل لامپ یا هریک از اجزای مدار مثل باتری (مولد)، سیم، مقاومت، کلید و ... باشد. که الته برای تمام آن‌ها یک مقاومت در نظر گرفته می‌شود.

$$|\Delta V| = \frac{|\Delta U|}{q} = \frac{|W_{\text{خارجی}}|}{q}$$

اندازه اختلاف پتانسیل دو سر رسانا (ولتاژ) را نیز با V نمایش می‌دهیم:

$$\rightarrow V = \frac{U}{q} \rightarrow U = qV \quad \left.\begin{array}{l} \\ q = It \end{array}\right\} \rightarrow W \text{ یا } U = VIt$$

q_0

حال اگر برای رسانا سطح شده یک مقاومت R در نظر بگیریم:

$$V=RI \longrightarrow U=VIt = RI^2t = \frac{V^2}{R}t$$ طبق قانون اهم

قضیه: انرژی الکتریکی مصرفی در یک رسانا در مدت زمان t را با وسیله یکی از روابط زیر توان حساب کرد.

$$\boxed{U = RI^2t = \frac{V^2}{R}t = VIt}$$

نکته: این انرژی الکتریکی مصرفی یک رسانا، با توجه به نوع رسانا و شرایط کار آن، انرژی گرمایی یا انرژی تلف شده نیز گفته می‌شود.

نکته مهم (توان مصرفی)

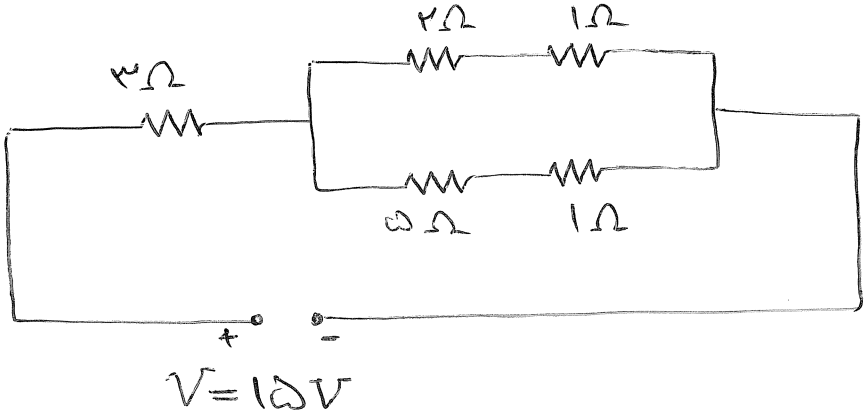
به انرژی مصرف شده در واحد زمان، توان یا آهنگ مصرف انرژی گفته می‌شود. با دانستن توان مصرفی یک وسیله می‌توان گفت آن وسیله در هر ثانیه چند ژول انرژی مصرف کرده است.

$$P=\frac{U}{t} \quad U:(J),\ t:(S) \rightarrow 1W = 1\frac{J}{S}$$

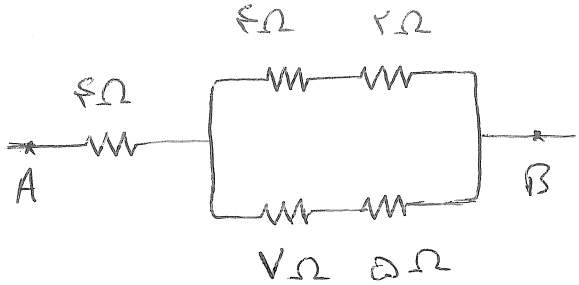
(W) وات — رابطه اصلی توان — روابط دیگر

$$\boxed{P = RI^2 = \frac{V^2}{R} = VI}$$

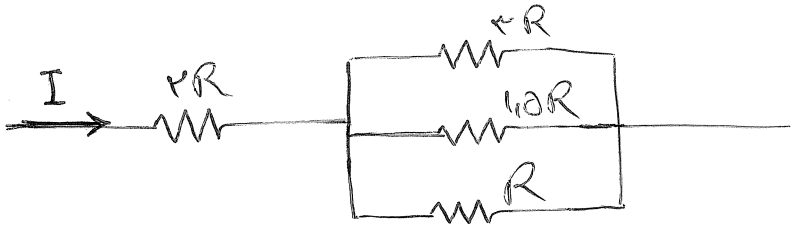
مثال ۲۱) با توجه به مدار زیر، الف) انرژی مصرفی در مقاومت ۳ اهمی را در مدت ۰/۵ دقیقه محاسبه کنید. ب) توان مصرفی مقاومت ۵ اهمی را بیابید.



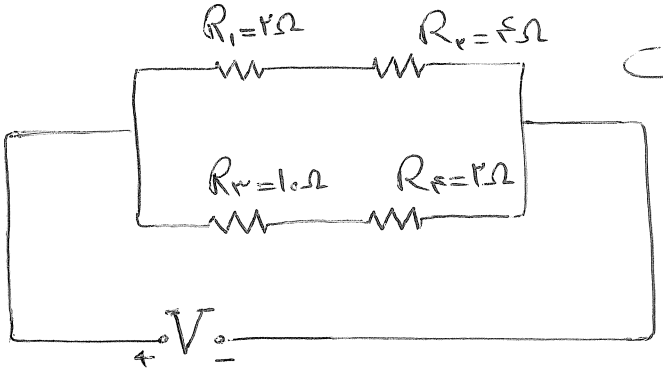
مثال ۲۲: با توجه به مدار مقابل، اگر توان مصرفی در مقاومت ۲ اهمی برابر با ۸W باشد، اختلاف پتانسیل دو نقطه A و B چند ولت می‌شود؟



مثال ۲۳: با توجه به مدار شکل زیر، توان مصرفی مقاومت ۲R چند برابر توان مصرفی مقاومت ۳R می‌شود؟



مثال ۲۴: با توجه به مدار مقابل، در کدام مقاومت گرمای بیشتری تولید می‌شود؟



نکته (توان اسمی، ولتاژ اسمی)

معمولاً روی وسایل الکتریکی دو عدد نوشته می‌شود. یکی با واحد V (ولت) و دیگری با واحد W (وات) که ولتاژ اسمی و توان اسمی وسیله را مشخص می‌کنند.

* مناسب‌ترین ولتاژی که یک وسیله را می‌توان با آن وصل کرد ولتاژ اسمی نام دارد که وقتی وسیله را با ولتاژ اسمی آن وصل کنیم، با توانی کار کرده و انرژی مصرف می‌کند که توان اسمی نام دارد.

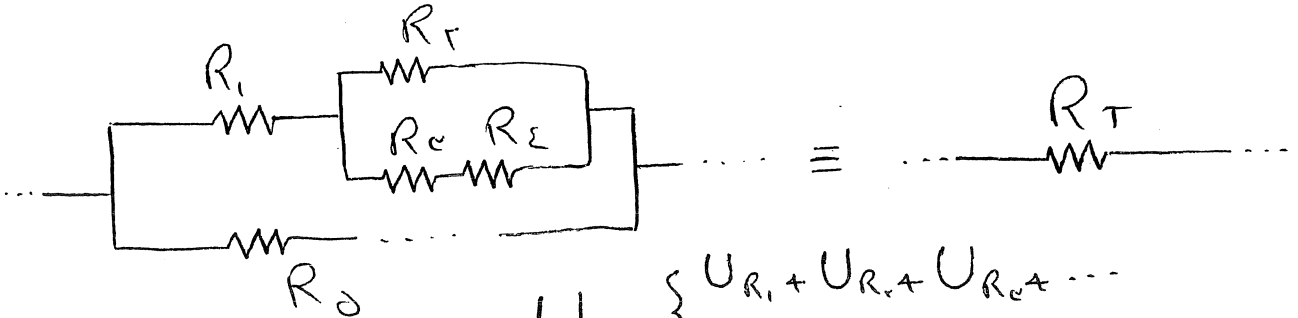
توان مصرفی یک وسیله، لزوماً با توان اسمی آن برابر نیست. این زمانی اتفاق می‌افتد که وسیله با ولتاژ اسمی خود وصل شود.

اگر وسیله‌ای با ولتاژی کوچکتر از ولتاژ اسمی خود وصل شود یا کار نمی‌کند یا با توان مصرفی کوچکتر از توان اسمی کار می‌کند و اگر با ولتاژی بزرگتر از ولتاژ اسمی وصل شود آسیب می‌بیند (می‌سوزد).

مثال ۲۵: لامپی با مشخصات ۱۲V ، ۳۶W را به منبع برق ۸V وصل کنیم. اگر مقاومت الکتریکی لامپ را ثابت نگه داریم، توان مصرفی آن چند وات خواهد شد؟

مثال ۲۶: از خاصیت گرمادهی یک سیم رسانا، در ساخت یک بخاری برقی استفاده شده است به طوری که مشخصات اسمی آن ۲۲۰V و ۱۱۰۰W می‌باشد. اگر طول سیم ۲۲cm و سطح مقطع آن $0.2\ mm^2$ باشد، مقاومت ویژه‌ی آن در حالتی که وسیله روشن باشد چند Ω.m می‌شود؟

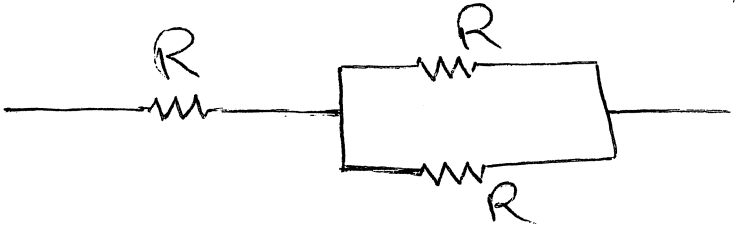
نکته: اگر بخواهیم توان مصرفی یا انرژی مصرفی در مجموعه‌ای از مقاومت‌ها را بدست آوریم یا باید این کمیت‌ها را برای تک تک مقاومت‌ها بدست آورده و با هم جمع کنیم، یا توان مصرفی و انرژی مصرفی در مقاومت معادل را بدست آوریم.



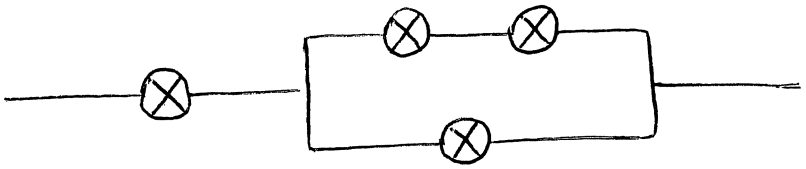
$$U_T = \begin{cases} U_{R_1} + U_{R_2} + U_{R_3} + \cdots \\ U_{R_T} \end{cases}$$

$$P_T = \begin{cases} P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3} + \cdots \\ P_{R_T} \end{cases}$$

مثال ۲۷ مقاومت های موجود در شکل زیر، همگی مشابه بوده و حداکثر ولتاژی که می‌توان به آن‌ها اعمال کرد تا آسیب نبینند ۱۲۷ است. حداکثر ولتاژی که می‌توان به دو سر مجموعه اعمال کرد تا هیچ‌کدام از مقاومت‌ها آسیب نبینند، چند ولت است؟



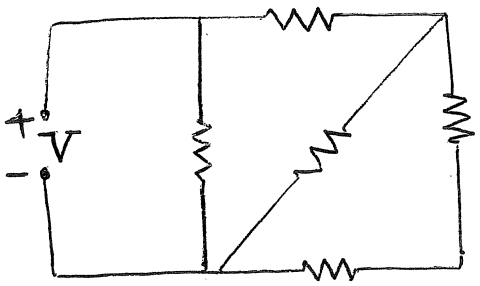
مثال ۲۸ در شکل زیر، لامپ‌ها مشابه هستند و حداکثر توان الکتریکی هر لامپ که می‌تواند با آن نور دهد ۱۲W است. حداکثر توان مجموعه در نور دادن چند وات می‌تواند باشد به طوری که هیچ‌کدام از لامپ‌ها نسوزد؟



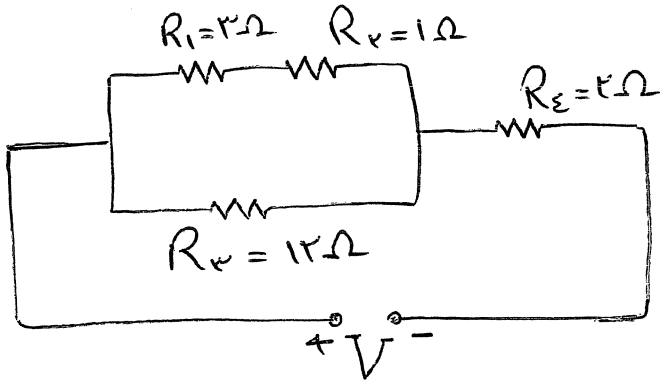
نکته (جلوگیری از آسیب دیدگی وسایل الکتریکی)

در حل سؤالاتی مانند مثال ۲۷ و ۲۸ ابتدا با تحلیل جریان یا ولتاژ، وسیله‌ای را که احتمال آسیب دیدگی آن از همه بیشتر است پیدا کرده، سپس فرض می‌کنیم که این وسیله با حداکثر جریان عبوری یا ولتاژ اعمالی و یا بیشترین توان خود کار می‌کند (یعنی در آستانه آسیب دیدن است) و در نهایت شرایط کلی مدار را طبق شرایط آن وسیله بررسی می‌کنیم.

مثال ۲۹: در مدار شکل زیر، همهٔ مقاومت‌ها مشابه هستند و هر مقاومت حداکثر می‌تواند با توان ۲۰ W کار کند. حداکثر توانی که این مجموعه می‌تواند با آن کار کند تا هیچ مقاومتی آسیب نبیند، چند وات است؟



مثال ۳۰: با توجه به مدار زیر، اگر ولتاژ قابل تحمل هریک از مقاومت‌ها ۶V باشد، حداکثر توان مجموعه در صورت اتزای الکتریکی به طوری که هیچ مقاومتی آسیب نبیند، چند وات می‌شود؟



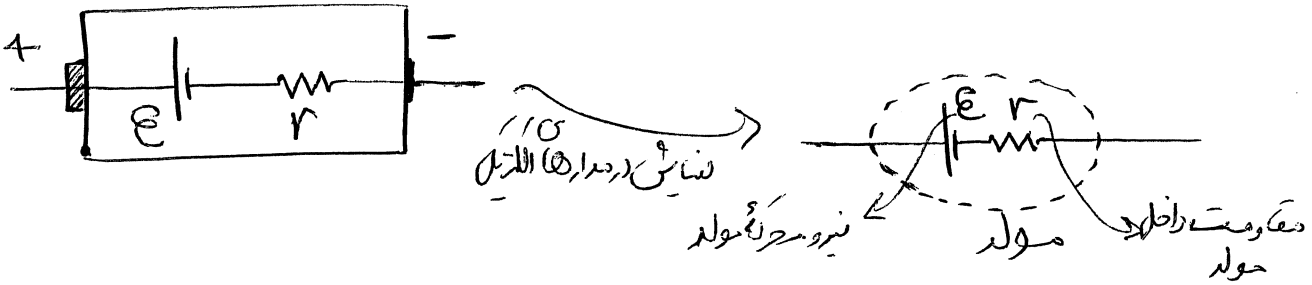
⑤ نیروی محرکهٔ الکتریکی (emf)

روی هر باتری یا مولد عددی واحد ولت نوشته شده است که نیروی محرکهٔ الکتریکی آن باشد.

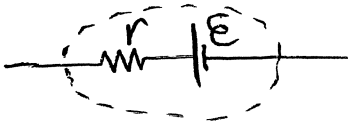
نام دیگر باتری یا مولد، منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی است.

نیروی محرکهٔ الکتریکی که با $\mathcal{E}$ نمایش داده می‌شود از جنس ولتاژ (اختلاف پتانسیل الکتریکی) بوده و در واقع هر مولد (باتری) می‌خواهد با نیروی محرکهٔ خود، یک اختلاف پتانسیل برای دو نقطه‌ای از مدار که با آن متصل است ایجاد کند. اما هنگامی که مولد در مدار قرار می‌گیرد، در صورتی که اختلاف پتانسیل دو سر آن را با ولت‌سنج اندازه بگیریم، از عددی که روی آن نوشته شده یعنی نیروی محرکهٔ مولد کمتر است و این به دلیل وجود مقاومت داخلی در مولد است که باعث یک افت پتانسیل برای دو سر آن می‌شود.

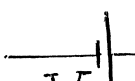
* تمام وسایل الکتریکی دارای یک مقاومت بوده و این به دلیل قسمت‌هایی از وسیله است که جریان از آن‌ها عبور می‌کند (اجزای رسانا یا سیم‌های رسانا). برای مولد هم باید یک مقاومت در نظر بگیریم که با آن مقاومت داخل مولد گفته و با r نمایش داده می‌شود.



باید دقت داشت که با مجموعهٔ $\mathcal{E}$ و r با هم مولد گفته می‌شود و اینکه مقاومت داخلی در کدام سمت نیروی محرکه نمایش داده شود تفاوتی نمی‌کند.



در مسائلی که تا قبل از این مطرح بود اختلاف پتانسیل دو سر مولد یعنی ولتاژ خالص که مولد می‌تواند برای دو نقطه از مداری که به آن متصل می‌شود تأمین کند



* محاسبهٔ اختلاف پتانسیل دو نقطه در مدارهای الکتریکی

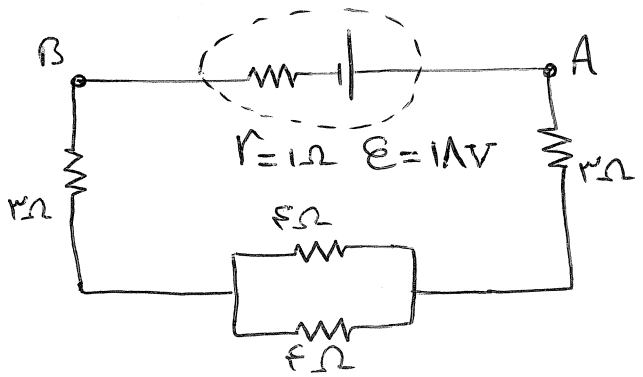
اگر بخواهیم اختلاف پتانسیل دو نقطه در مدارهای الکتریکی (تک حلقه یا چند حلقه) را پیدا کنیم، باید بین آن دو نقطه حرکت کنیم. در این حرکت اجزای مختلف از مدار سر راه قرار می‌گیرند که با عبور از آن‌ها یا پتانسیل کاهش و یا افزایش می‌یابد. اینکه عبور از یک وسیله باعث افت یا افزایش پتانسیل شود را می‌توان با نکات زیر تعیین کرد:

۱) هنگام عبور از مقاومت (داخلی یا خارجی)، اگر در جهت جریان حرکت کنیم، می‌نویسیم $-RI$ یا $-rI$ (یعنی پتانسیل به اندازهٔ RI یا rI کاهش می‌یابد)

و اگر در خلاف جهت جریان حرکت کنیم، می‌نویسیم $+RI$ یا $+rI$ (در واقع پتانسیل به اندازهٔ RI یا rI افزایش می‌یابد)

۲) هنگام عبور از یک مولد، جهت جریان مهم نیست، اگر جهت حرکت ما با قوهٔ محرکه‌ای باشد که از قطب مثبت به منفی بروم، افزایش پتانسیل داشته و می‌نویسیم $+\mathcal{E}$ و اگر از قطب مثبت به منفی بروم، کاهش پتانسیل داشته و می‌نویسیم $-\mathcal{E}$.

مثال ۳۱) با توجه به مدار شکل زیر، اختلاف پتانسیل $V_B - V_A$ را تعیین کنید.

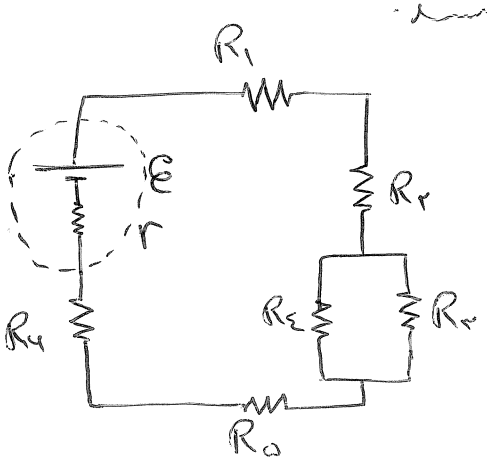


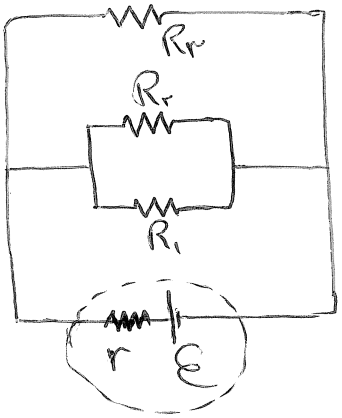
۹) مدارهای الکتریکی تک حلقه و چند حلقه

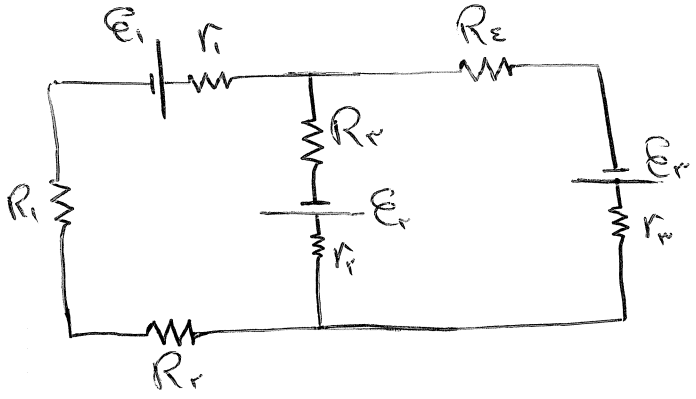
در یک نوع دسته بندی، مدارهای الکتریکی به تک حلقه و چند حلقه تقسیم می‌شوند.

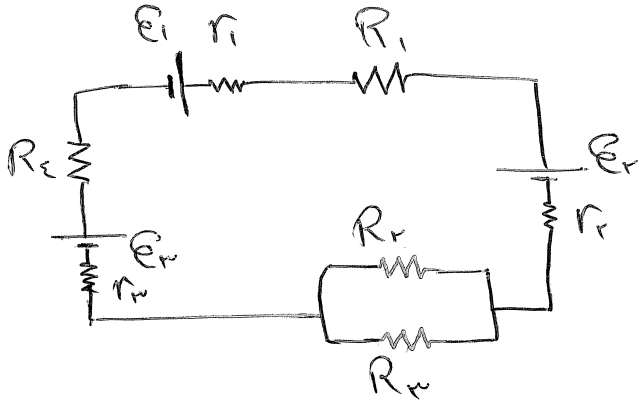
یک مدار الکتریکی را در نظر بگیرید که دارای چند مقاومت (وسیله الکتریکی) می‌باشد. اگر بتوان این مدار را معادل سازی کرد، به طوری که همه اجزای آن روی یک حلقه قرار گیرند، به آن مدار تک حلقه و در غیر این صورت به آن مدار چند حلقه می‌گوییم.

مثال ۳۵: تعیین کنید کدام یک از مدارهای زیر تک حلقه هستند.





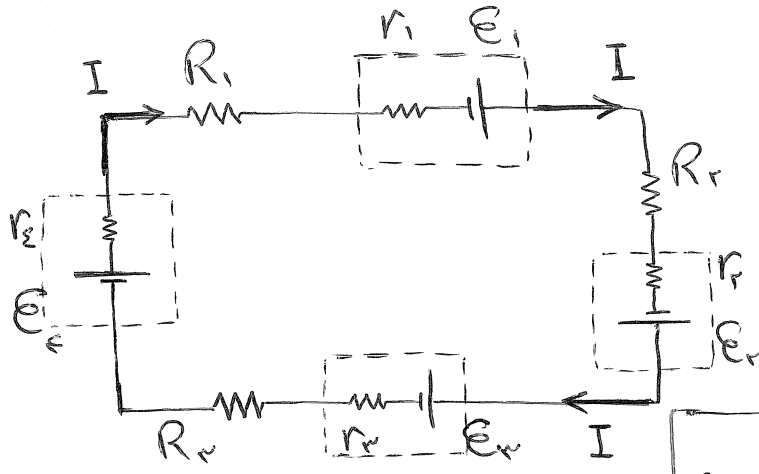




نکته: باید دقت داشت در مدارهای الکتریکی (اعم از تک حلقه یا چند حلقه) می‌توان چند مولد داشت که البته ممکن است بعضی از آن‌ها حالت مصرف کننده داشته باشند که بعداً توضیح داده خواهد شد.

✱ مدارهای الکتریکی تک حلقه

در تمام مدارهای الکتریکی، محاسبه‌ی کمیت جریان الکتریکی حائز اهمیت است. در مدار تک حلقه می‌توان جریان را از رابطه‌ی زیر به دست آورد.



$$I = \frac{\sum \varepsilon - \sum \varepsilon'}{\sum r + R_T}$$

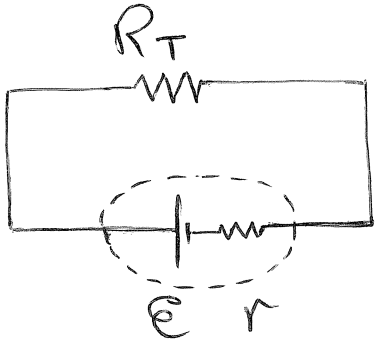
کمان مثبت گرفته شود

در مدارهای الکتریکی تک حلقه به طور کلی ممکن است چند مولد داشته باشیم که می‌توان آن‌ها را با دو دسته‌ی مهم جهت تقسیم کرد. در رابطه‌ی بالا $\sum \varepsilon$ مجموع نیروی محرکه‌هایی است که مرتب‌اند با جهت جریان. این دسته از نیروی محرکه‌ها تعیین‌کننده‌ی جهت جریان هستند، به طوری که جریان مثل حالت عادی یک مولد، از قطب مثبت آن‌ها خارج می‌شود.

جمله‌ی $\sum \varepsilon'$ جمع نیروی محرکه‌هایی است که برعکس شده باشند. این نیروی محرکه‌ها حالت مصرف‌کننده دارند و جریان به قطب مثبت آن‌ها وارد می‌شود.

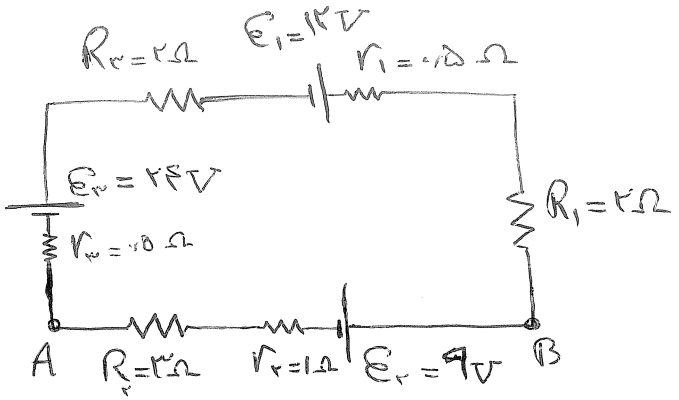
اثبات رابطه‌ی بالا:

✱ در رابطه‌ای که فقط یک مولد در مدار تک حلقه دارد:



$$I = \frac{\varepsilon}{r + R_T}$$

مثال ۳۳ با توجه به مدار مقابل پاسخ دهید:



الف) اندازه و جهت جریان را تعیین کنید.

ب) $V_B - V_A$ را بدست آورید.

نکته (منبع نیرو محرکه آرمانی یا مولدهای آرمانی)

در واقعیت تمام مولدها دارای مقاومت داخلی بوده و هنگامی که جریان از آن‌ها عبور می‌کند اندازه اختلاف پتانسیل آن‌ها با نیرو محرکه متفاوت است.

دو رابطه مقابل، اندازه اختلاف پتانسیل را می‌دهند و بیشتر در مسائل کیفی کاربرد دارند.

$V = \mathcal{E} - rI$ ← اندازه اختلاف پتانسیل دو سر مولدی که جریان از آن خارج می‌شود.

$V = \mathcal{E} + rI$ ← اندازه اختلاف پتانسیل دو سر مولد هنگامی که جریان به قطب مثبت آن وارد می‌شود.

حال مقاومت مولد آرمانی، مولدی است که مقاومت داخلی آن صفر باشد که در این صورت تحت هر جریانی اندازه اختلاف پتانسیل دو سر مولد با نیرو محرکه آن برابر خواهد بود.

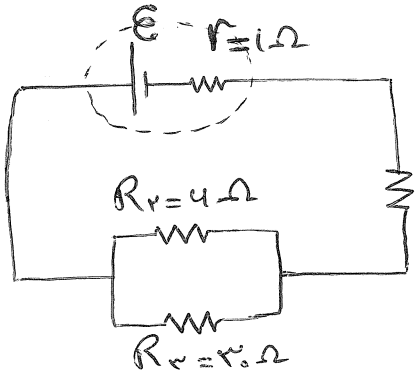
نکته: هنگامی جریان از قطب مثبت باتری (مولد) خارج می‌شود (مثل حالت عادی)، کمیت تحت عنوان افت پتانسیل برای مولد تعریف می‌شود که مقدار آن برابر است با:

$$\text{افت پتانسیل} = rI$$

فقط برای مولدهایی که جریان از آن هنگام خروج می‌شود.

مثال ۳۴ وقتی یک مولد را در مداری ببندیم، در صورتی که اختلاف پتانسیل دو سر آن با ولت‌سنج اندازه‌گیری شود با عددی که روی مولد نوشته شده متفاوت است، دلیل چیست؟

مثال ۳۵ در چه صورتی امکان دارد اختلاف پتانسیل دو سر مولد با نیرو محرکه آن برابر باشد؟

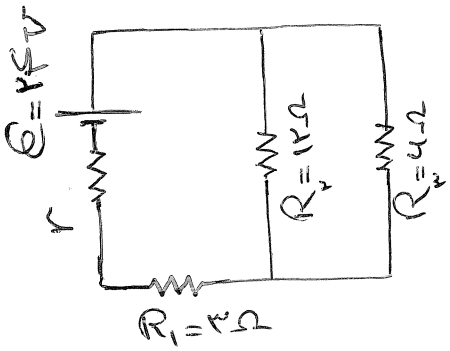


مثال ۳۶ پاسخ جامدار مقابل، اگر توان مصرفی در مقاومت ۴ اهمی برابر با ۲۴W باشد، پاسخ دهید.

الف) نیروی محرکهٔ مولد چند ولت است؟

ب) اُفت پتانسیل مولد را تعیین کنید.

مثال ۳۷ پاسخ جامدار مقابل، اگر افت پتانسیل در مولد ۳V باشد:



الف) مقاومت r چند اهم است؟

ب) اندازهٔ اختلاف پتانسیل دوسر مولد را بیابید.

چند تعریف مهم

- توان تولیدی مولد (توان کل): توان مولد در تولید یا وادار کردن ارزش مورد نیاز بارها برای ایکه در مدار حرکت کرده و جریان برقرار شود را توان تولیدی می‌نامند.

$$P_{\text{تولیدی}} = \varepsilon I$$

- توان اتلافی مولد (آهنگ اتلاف انرژی در مولد): مقدار توان مصرفی در مقاومت داخلی مولد می‌باشد.

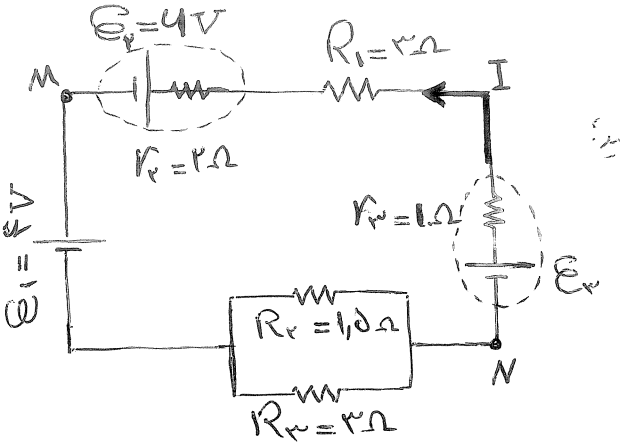
$$P_{\text{اتلافی}} = rI^2$$

توان اتلافی یا آهنگ اتلاف انرژی

- توان خروجی یا توان مفید: مقدار توان مفید مولد در خارج کردن انرژی از آن و دادن انرژی به بارها برای برقراری جریان است.

$$P_{\text{خروجی}} = P_{\text{تولیدی}} - P_{\text{اتلافی}}$$

$$\Rightarrow P_{\text{خروجی}} = \varepsilon I - rI^2$$



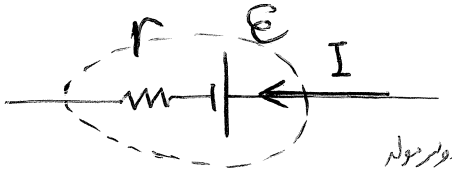
مثال ۳۸ با توجه به مدار مقابل اگر جریان در جهت نشان داده شده برابر با $2A$ باشد، به سوالات پاسخ دهید:

الف) نیروی محرکهٔ $\mathcal{E}_3$ را تعیین کنید.

ب) توان خروجی منبع ۳ چند وات است؟

پ) $V_M - V_N$ چند ولت می‌باشد؟

نکتهٔ مهم: در مدارهایی که چند مولد بسته شده‌اند ممکن است به بعضی از مولدها جریان وارد شود (یعنی برخلاف حالت عادی جریان به قطب مثبت آن وارد شود). اینگونه مولدها حالت مصرف کننده دارند و برای آن‌ها یک توان ورودی تعریف می‌شود.



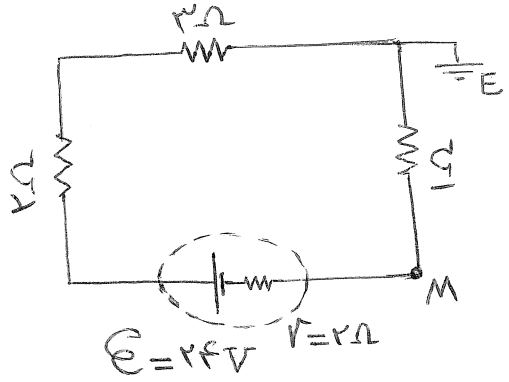
$P=VI$ ⇒ $\boxed{P_{\text{ورودی یا مصرفی}} = \mathcal{E}I + rI^2}$

اختلاف پتانسیل دو سر مولد

باید دقت داشت توان تولیدی، توان اتلافی و توان خروجی فقط برای یک مولد در حالت عادی یعنی وقتی جریان از قطب مثبت آن خارج شود، تعریف می‌شود. برای مولدی که جریان به قطب مثبت آن وارد شود، تنها یک توان ورودی (یا توان مصرفی) تعریف می‌شود.

مثال ۳۹ با توجه به مدار مثال قبلی، توان ورودی هریک از مولدهای ۱ و ۲ را تعیین کنید.

مثال ۴۰ با توجه به مدار مقابل پاسخ دهید:



الف) پتانسیل نقطهٔ M چند ولت است؟

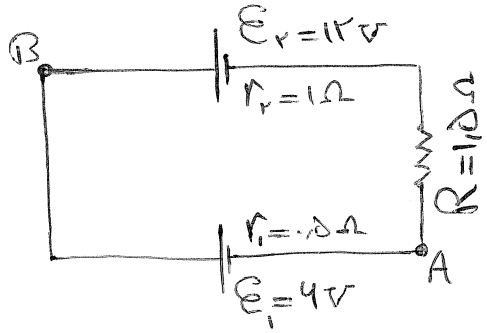
ب) اُفت پتانسیل باتری را تعیین کنید.

پ) توان خروجی باتری را بدست آورید.

ت) مقاومت‌های خارجی در مجموع در مدت ۱ دقیقه چند ژول انرژی مصرف می‌کنند؟

نکته: اگر در مسائل پتانسیل یک نقطه خواسته شود، حتماً یک نقطه با پتانسیل معلوم داده خواهد شد که معمولاً یک نقطه تحت عنوان زمین در نظر گرفته می‌شود که همان پتانسیل بودن و $V_E=0$ می‌باشد.

مثال ۴۱ با توجه به مدار مقابل پاسخ دهید:

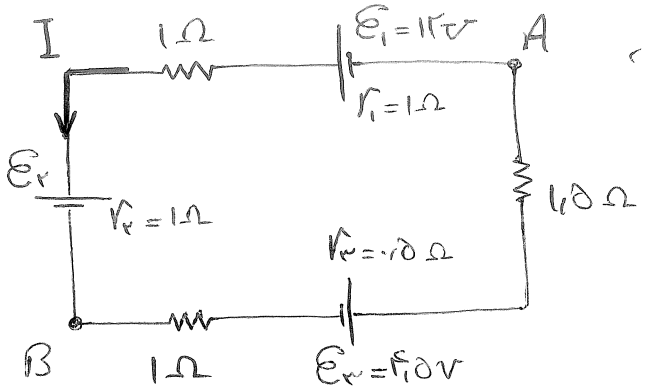


الف) $V_A - V_B$ چند ولت است؟

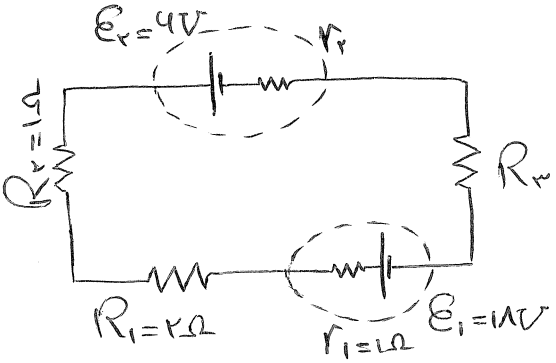
ب) آهنگ اتلاف انرژی در مولد ۲ را تعیین کنید.

پ) توان مفید مولد ۱ چند وات است؟

مثال ۴۲ در مدار مقابل اگر $V_B - V_A = 15V$ باشد، $\mathcal{E}_2$ را تعیین کنید.



مثال ۴۳ با توجه به مدار مقابل، اگر مجموع مقاومت های خارجی در مدت 30s، معادل 480J انرژی مصرف کند، و توان خروجی مولد 1 برابر با 32W باشد، توان ورودی مولد 2 چند وات خواهد بود؟

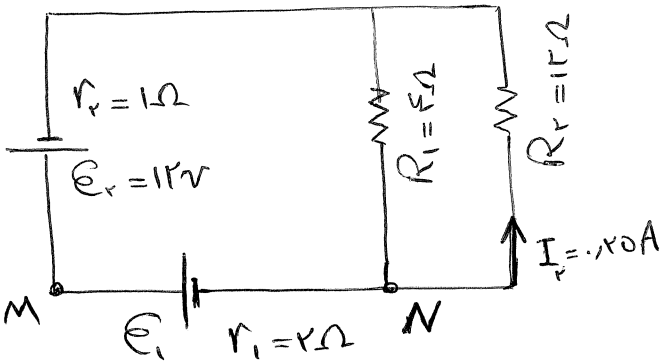


مثال ۴۴ با توجه به مدار مقابل پاسخ دهید:

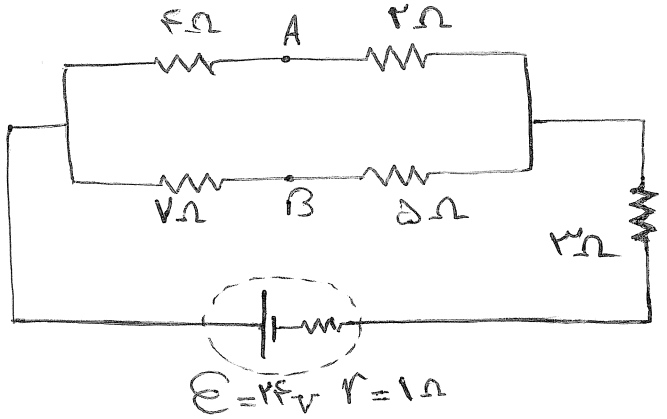
الف) $V_M - V_N$ را بیابید.

ب) آهنگ اتلاف انرژی در مولد 2 را تعیین کنید.

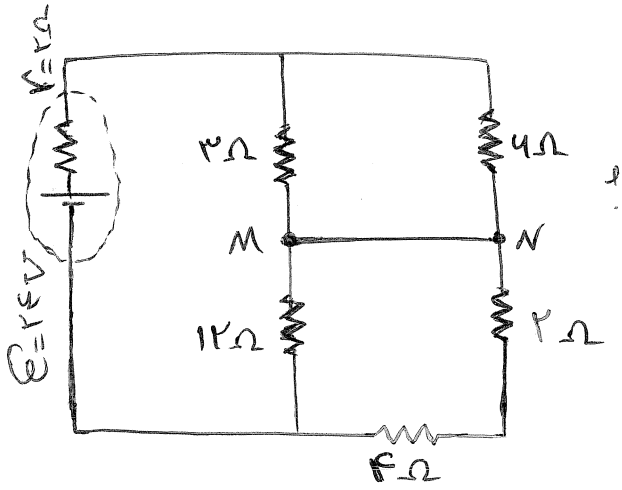
پ) توان مصرفی مولد 1 را بدست آورید.



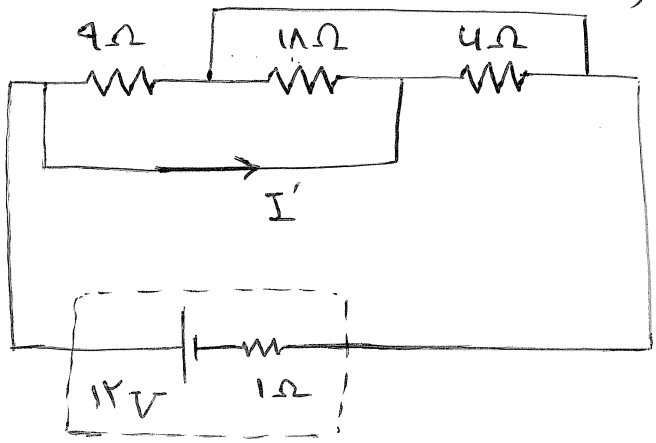
مثال ۴۵ باتری با مدار مقابل،
اختلاف پتانسیل $V_B - V_A$ را تعیین کنید.



مثال ۴۶ باتری با مدار مقابل، جریان عبوری از سیم اتصال M و N چند آمپر و با چه جهتی است؟

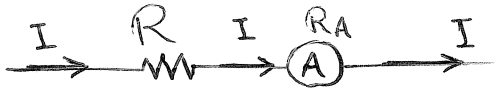


مثال ۴۷ باتری با مدار زیر I' چند آمپر است؟



(۷) وسایل اندازه‌گیری

الف) آمپرسنج: برای اندازه‌گیری جریان عبوری از یک شاخهٔ مدار یا در واقع وسیله‌ای که در آن شاخه قرار گرفته از آمپرسنج استفاده می‌شود. به طوری که باید آن را به طور متوالی (سری) با وسیله ببندیم.



نکته: آمپرسنج هم مانند تمام وسایل الکتریکی دیگر دارای مقاومت است. بنابراین وقتی در شاخه از مدار به طور متوالی با یک وسیله بسته شود، مقاومت کل آن شاخه را افزایش و باعث کاهش جریان می‌شود. (نسبت به حالت بدون آمپرسنج) پس عدد آمپرسنج کمی از مقدار واقعی جریان کوچکتر خواهد بود و باید حساسیت برای آمپرسنج در نظر گرفت.

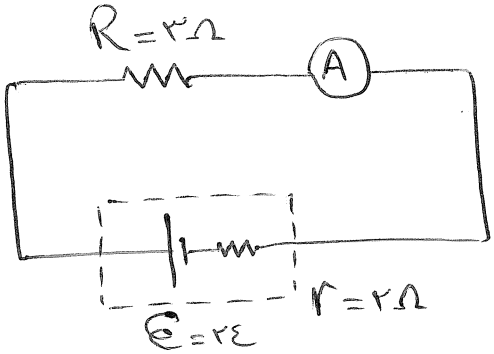
نکته: آمپرسنج جریان عبوری از خود را نشان می‌دهد، بنابراین اگر مقاومت آمپرسنج R_A باشد، در یک مسألهٔ تئوری عدد آمپرسنج خواسته شود، باید جریان عبوری از R_A را به دست آورد.

نکته: در مسائل معمولاً آمپرسنج‌ها ایده‌آل فرض می‌شوند، یعنی مقاومت آن‌ها را صفر در نظر می‌گیریم. اگر در مسأله‌ای حرف از مقاومت آمپرسنج زده نشود باید آن را ایده‌آل در نظر گرفت. و اگر در چنین سؤال‌هایی عدد آمپرسنج خواسته شود می‌توان آمپرسنج در شاخهٔ مورد نظر را نادیده گرفت، جریان شاخه را به دست آورد و به عنوان عدد آمپرسنج بیان کرد.

نکته: در ساخت آمپرسنج‌ها سعی بر این است که تا حد امکان مقاومت داخلی کم باشد تا تأثیر کمتری روی جریان داخل شاخه و خیلی آن را کاهش ندهد. بنابراین هر چه مقاومت آمپرسنج کوچکتر باشد، حساسیت اندازه‌گیری آن کمتر خواهد بود.

نکته: اگر در یک مسألهٔ واقعی یا به صورت تئوری، آمپرسنجی ایده‌آل موازی با یک وسیله بسته شود، برای آن وسیله اتصال کوتاه اتفاق می‌افتد. (البته این کار اصولی نیست)

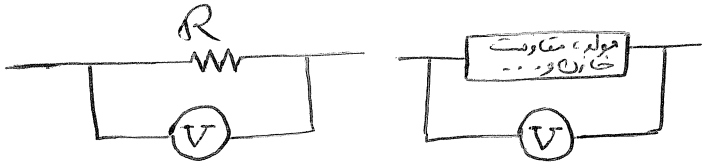
مثال ۴۸ با توجه به مدار مقابل پاسخ دهید:



الف) اگر آمپرسنج ایده‌آل باشد چه جریانی را نشان می‌دهد؟

ب) در صورتی که آمپرسنج دارای مقاومت ۱Ω باشد چند آمپر را نشان خواهد داد؟

ب) ولت‌سنج: وسیله‌ای است که برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل دو نقطه از مدار یا دو سر یک وسیلهٔ الکتریکی استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری ولتاژ یا اختلاف پتانسیل دو سر یک وسیله، باید ولت‌سنج را به طور موازی با آن ببندیم.

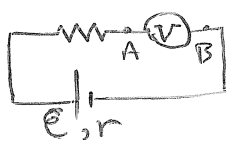


ولت‌سنج نیز دارای مقاومت است ولی برعکس آمپرسنج، در ساخت ولت‌سنج سعی بر این است که تا جایی که امکان دارد مقاومت ولت‌سنج بزرگ باشد. زیرا هر چه مقاومت ولت‌سنج بیشتر باشد عدد آن با مقدار واقعی نزدیک‌تر خواهد بود.

در واقع هر چه مقاومت ولت‌سنج بزرگ‌تر باشد، سهم کمتری از جریان را خواهد گرفت و اختلاف پتانسیل دو سر یک وسیله (مثل یک مقاومت) در اثر قرارگیری موازی ولت‌سنج با آن، تغییر کمتری خواهد داشت.

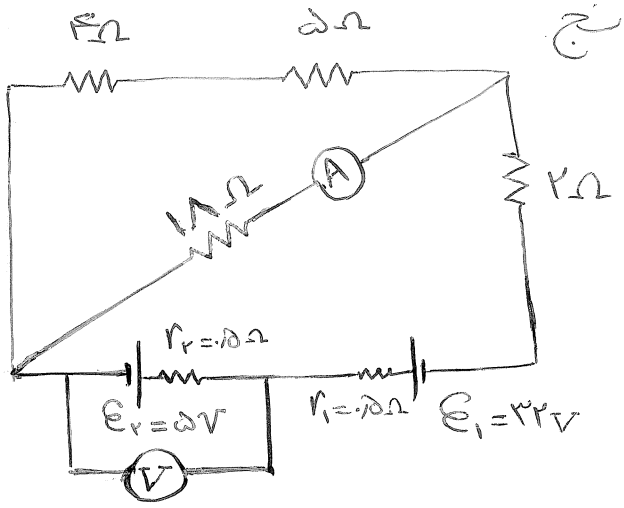
نکته: در مسائل، ولت‌سنج‌ها ایده‌آل در نظر گرفته می‌شوند. یعنی فرض می‌کنیم که مقاومت آن‌ها بی‌نهایت بزرگ باشد.

نکته: اگر در یک مسألهٔ شکور، ولت‌سنج در یک شاخه و به طور سری با یک وسیله بسته شود (که البته غیر اصولی است) باعث قطع جریان آن شاخه خواهد شد. و اگر در این مسائل اختلاف پتانسیل دو سر ولت‌سنج خواسته شود (یعنی عددی که نشان می‌دهد) کافی است بین دو سر آن در مدار حرکت کرده و اختلاف پتانسیل را بنویسید.

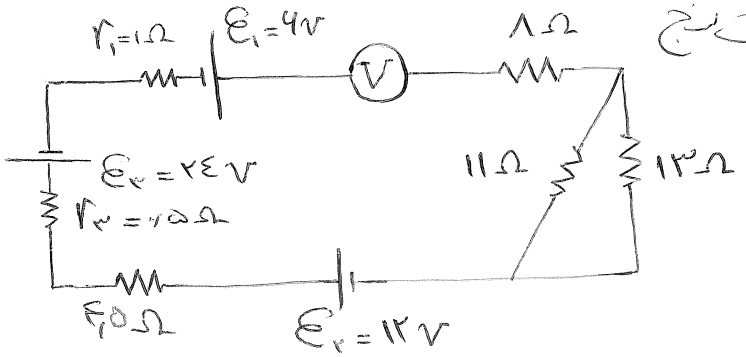


مثل ← $\begin{cases} I=0 \\ |V_{AB}|=\varepsilon \end{cases}$

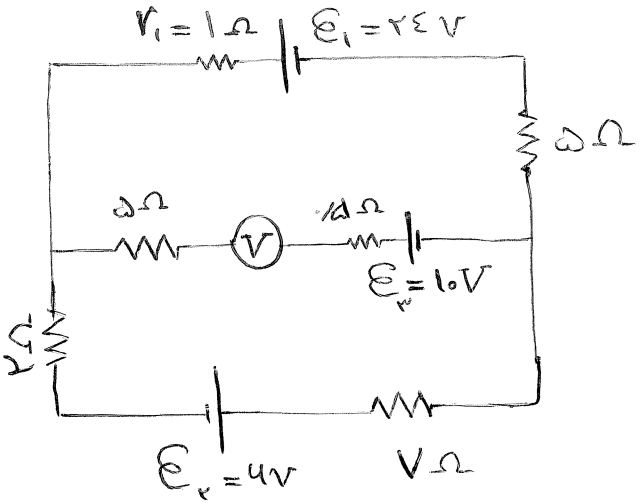
مثال ۴۹: با توجه به مدار مقابل اعداد گالوانومتر و آمپرسنج شان داده شده را تعیین کنید.



مثال ۵۰: با توجه به مدار مقابل، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد را تعیین کنید.

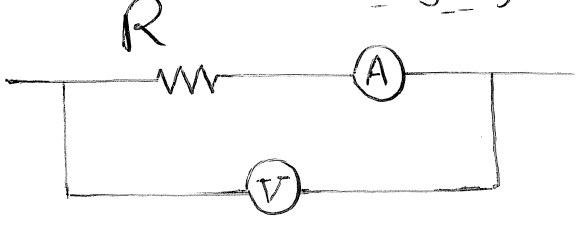


مثال ۵۱: با توجه به شکل مقابل، عدد ولت‌سنج چه‌قدر خواهد بود؟



مثال ۵۲: شکل زیر قسمتی از یک مدار الکتریکی می‌باشد، اگر دو سر قسمت ولت‌سنج عدد V و آمپرسنج عدد 0.2A را نشان دهند، تقریباً مقدار مقاومت R را تعیین کنید.

$(R_A=1\Omega \text{ و } R_V=1000000\Omega)$

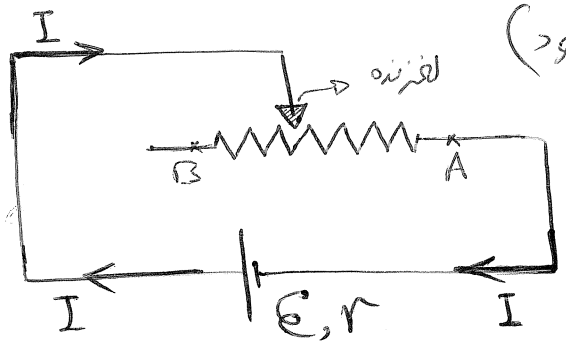


نکته: مقاومت متغیر (رئوستا - پتانسیومتر)

رئوستا نوعی مقاومت پیچه‌ای و از انواع متغیرهاست. (توضیحات بیشتر در کتاب درسی)

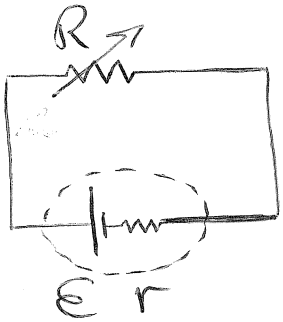
پتانسیومتر هم با توجه به ساختاری که دارد، یک مقاومت متغیر است.

از این مقاومت‌های متغیر برای تنظیم شدت جریان در یک مدار یا وسیله الکتریکی استفاده می‌شود. (در مدارهای الکترونیکی از پتانسیومتر استفاده می‌شود)



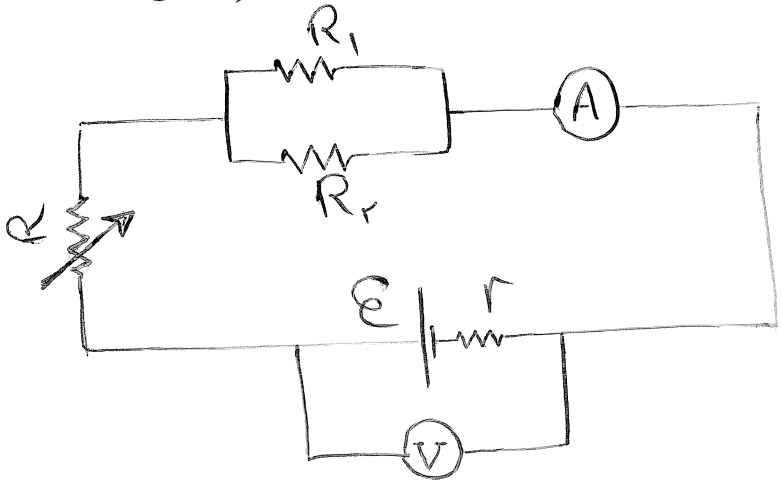
شکل مقابل نمایی ساده از یک رئوستا یا پتانسیومتر می‌باشد.
برای مثال اگر در این شکل، لغزنده به طرف راست حرکت کند مقاومت خارجی کاهش و جریان افزایش می‌یابد و اگر لغزنده به طرف چپ حرکت کند مقاومت خارجی افزایش و جریان کاهش می‌یابد.

* نماد مقاومت‌های متغیر در مدارهای الکتریکی می‌باشد.



مثال ۳۵ در مدار مقابل اندازه مقاومت متغیر روی ۲۲ تنظیم شده است. اگر مقاومت متغیر را کاهش داده و به ۲ برسانیم اختلاف پتانسیل دو سر لامپ چند برابر می‌شود؟

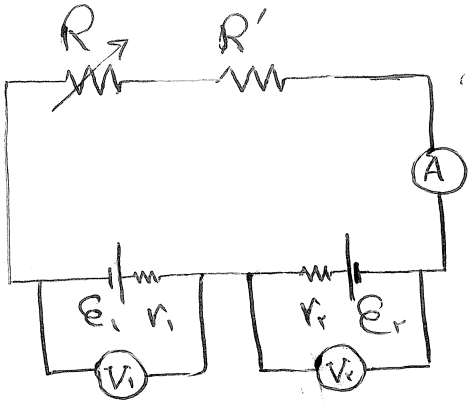
مثال ۳۶ با توجه به شکل زیر، اگر مقاومت رئوستا را افزایش دهیم، اعداد آمپرسنج و ولتسنج چگونه تغییر می‌کند؟



قانون اهم

در مجموعه مقاومت‌هایی که در یک مدار تک حلقه با هم بسته شده‌اند اگر یکی از مقاومت‌ها تغییر کند، می‌توان ثابت کرد که مقاومت معادل نیز در همان جهت تغییر می‌کند.

مثال ۵۵ با توجه به شکل مقابل اگر مقاومت R را کاهش دهیم، اعداد ولت‌سنج‌ها و آمپرسنج چگونه تغییر می‌کند؟ $(\varepsilon_2 > \varepsilon_1)$

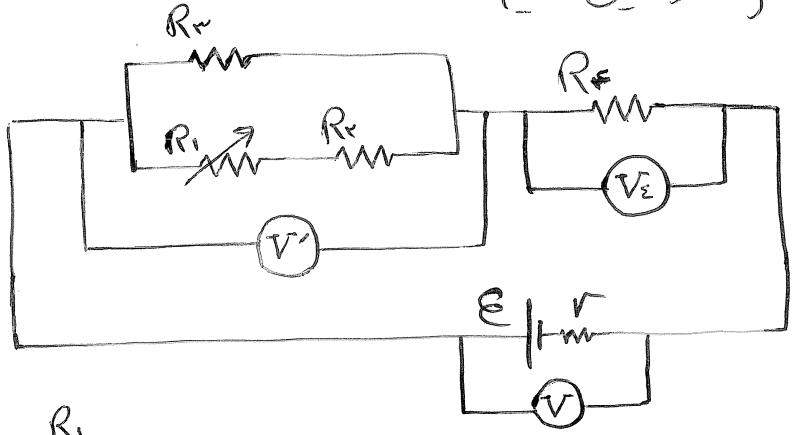


A :

V_1 :

V_2 :

مثال ۵۶ با توجه به مدار زیر، اگر R_1 را افزایش دهیم، اعداد ولت‌سنج‌ها چگونه تغییر می‌کند؟

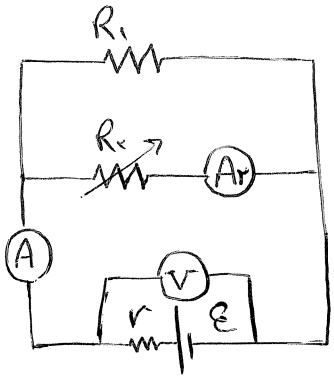


V :

V_4 :

V' :

مثال ۵۷ با توجه به مدار مقابل اگر R_2 را کاهش دهیم، اعداد آمپرسنج‌ها و ولت‌سنج چه تغییری می‌کند؟

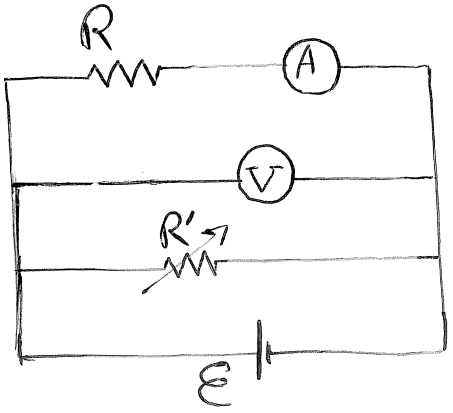


A :

A_2 :

V :

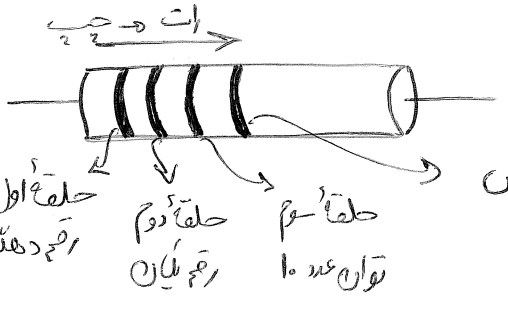
مثال ۵۸ با توجه به مدار زیر، با افزایش مقاومت R'، اعداد آمپرسنج و ولت‌سنج چگونه تغییر می‌کنند؟



نکته (مقاومت های ترکیبی)

ساختار داخلی مقاومت های ترکیبی با کولر ای است که معمولاً از کربن، ورق سیم پیچ شده و لایه های نازک فلزی ساخته شده اند. مقدار این مقاومت ها یا روی آن ها نوشته شده یا عدداً با چند حلقهٔ رنگی روی آن ها مشخص می شود.

هر حلقهٔ رنگی معرف یک رقم یا یک عدد است که در کنار هم و با توجه به جهت اصلاح، اندازهٔ مقاومت را مشخص می کنند:



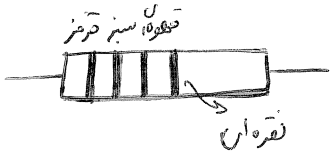
$$R = \overline{ab} \times 10^{n}$$

حلقهٔ سوم ← n

$\overline{ab}$: a ← حلقهٔ اول، b ← حلقهٔ دوم

برای استفاده از رابطهٔ بالا، باید مقاومت را با کولر در دست گرفت که سری از مقاومت که با حلقه های رنگی زیگزاگ در سمت چپ قرار گیرد و در این حالت عدد هر رنگ را با ترتیب از چپ به راست در رابطه جایگذاری کنیم.

مثال ۵۹) با توجه به شکل مقابل و اطلاعات داده شده اندازهٔ مقاومت را تعیین کنید.

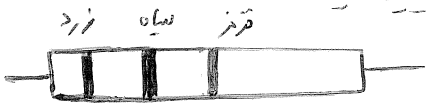


(۱۰٪ = تلرانس نقره‌ای، ۲ = عدد قرمز، ۵ = عدد سبز، ۱ = عدد قهوه‌ای)

نکته (تلرانس): در مقاومت های ترکیبی حلقهٔ چهارم یا نقره‌ای است یا طلایی و یا اصلاً حلقهٔ چهارم وجود نداشته و منتهای حلقه های رنگی داریم.

حلقهٔ چهارم، تلرانس مقاومت یعنی مقدار مجاز انحراف از مقدار دقیق را برحسب درصد مشخص می کند. منظور رنگ یا حلقهٔ رنگی چهارم همین آن است که تلرانس مقاومت ۲۰٪ می باشد.

مثال ۶۰) با توجه به شکل و اطلاعات داده شده، تلرانس مقاومت را تعیین کنید.



(۴ = عدد زرد، ۳ = عدد قرمز، ۰ = عدد سیاه)

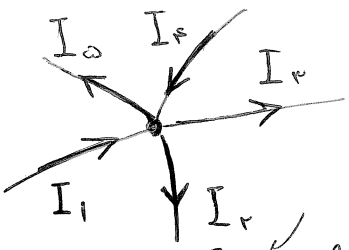
✱ مدارهای الکتریکی چند حلقه

در صورتی که نتوان با معادل سازی، عمل اجرای یک مدار را روی یک حلقه قرار داد، اصطلاحاً گفته می‌شود مدار چند حلقه‌ای است.

در مدارهای تک حلقه همواره می‌توان از رابطه $I=\frac{\sum\varepsilon-\sum\varepsilon'}{\sum r+R_T}$ جریان را بدست آورد. اما در مدارهای چند حلقه دیگر این رابطه کاربرد ندارد. در مدارهای چند حلقه از قوانین کیرشهوف برای بدست آوردن جریان‌هایی که در مدار هستند، استفاده شده و مدار تحلیل می‌شود.

- قاعدهٔ حلقهٔ کیرشهوف: در یک دور کامل در هر حلقهٔ مدار، جمع جبری اختلاف پتانسیل دوسر اجزای مدار صفر می‌باشد. (این قاعده از قانون پایستگی انرژی نتیجه می‌شود)

- قاعدهٔ انشعاب کیرشهوف: مجموع جریان‌های ورودی به یک گره با مجموع جریان‌های خروجی از آن برابر است. (این قاعده از قانون پایستگی بار نتیجه می‌شود)



$$I_1+I_4=I_2+I_3+I_5$$

نکته (گره): نقطه‌ای از مدار که حداقل ۳ جریان به آن وارد یا از آن خارج شود، گره نام دارد.

✱ در مدارهای چند حلقه، یک جریان نقاط و یا چند جریان سروکار داریم.

می‌توان گفت تعداد جریان‌های متفاوت در مدار برابر با مجهول بوده و باید چند معادله (رابطه) بین این مجهولات پیدا و یک دستگاه چند معادله چند مجهول تشکیل داد و آن را حل کرد. این معادلات با قوانین کلی مقابل تشکیل می‌شوند.

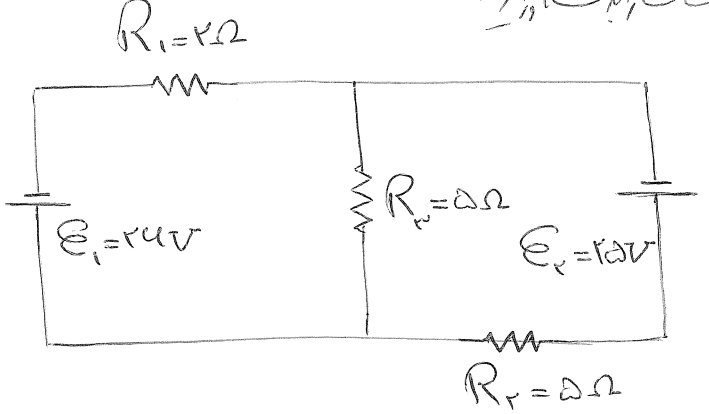
تعداد شدت جریان‌ها = تعداد مجهولات = تعداد معادلات

معادلات موجود: بقیهٔ معادلات از قاعدهٔ حلقه نوشته می‌شود + $(n-1)$ معادله از قاعدهٔ انشعاب بدست می‌آید.

n تعداد گره‌ها

✱ دو معادله از قاعدهٔ حلقه + یک معادله از قاعدهٔ انشعاب: در مدار دو حلقه

مثال ۴۱) در مدار مقابل، شدت جریان‌های شاخه‌ای را بیابید.

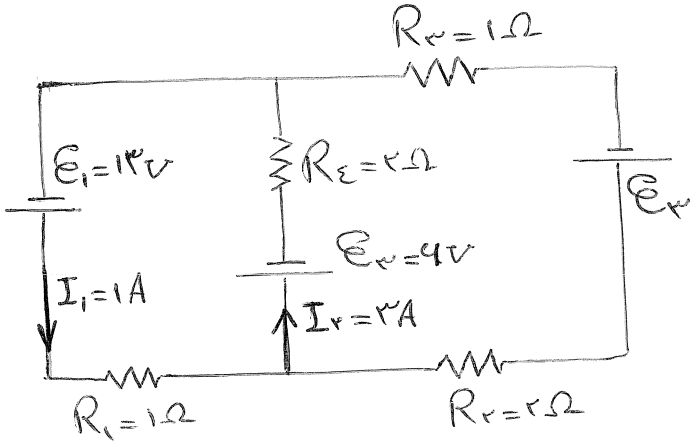


مثال ۴۲) با توجه به مدار مقابل، پاسخ دهید.

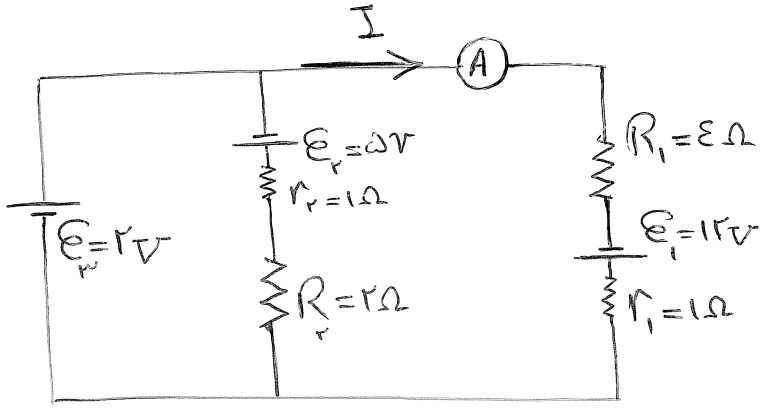
الف) نیروی محرکهٔ $\mathcal{E}_3$ را تعیین کنید.

ب) کدام مولد مصرف کننده بوده و از مدار انرژی می‌گیرد؟

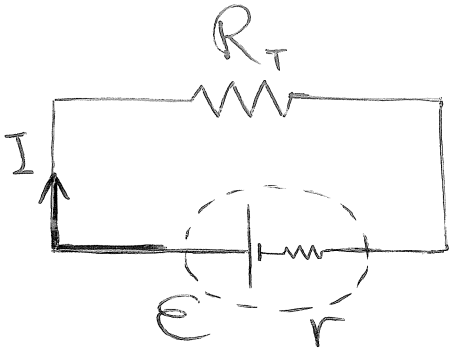
(در مورد این مولد توان ورودی (مصرفی) چند وات است؟



مثال ۴۳) با توجه به مدار زیر، آمپرسنج چند آمپر نشان می‌دهد؟



نکته (مدار تک حلقه با یک مولد)

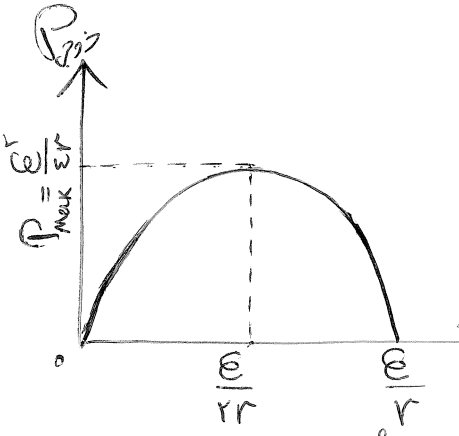


$$I=\frac{\varepsilon}{r+R_T}\ ,\quad V=\varepsilon-rI \quad \text{یا} \quad \boxed{V=\frac{\varepsilon R_T}{r+R_T}}$$

$$P_{\text{خروجی مولد}}=\varepsilon I-rI^2 \quad \text{یا} \quad \boxed{P_{\text{خروجی مولد}}=P_{\text{مصرف‌کننده}}=R_T I^2=\frac{V^2}{R_T}=VI}$$

V اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت خارجی یا دو سر مولد

* نمودار توان خروجی مولد برحسب جریان عبوری از آن



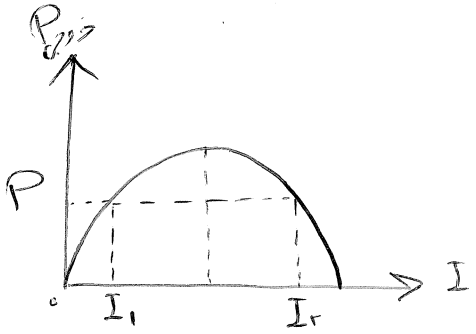
اگر مقاومت خارجی را تغییر دهیم، طبق رابطه $I=\frac{\varepsilon}{r+R_T}$ جریان تغییر کرده و طبق رابطه $P_{\text{خروجی}}=\varepsilon I-rI^2$ توان خروجی تغییر می‌کند. نمودار توان خروجی برحسب جریان به صورت یک سهمی می‌باشد.

چند نکته مهم: (می‌توان این نکات را با استفاده از فرمول‌های مشتق در ریاضیات اثبات کرد)

۱- توان خروجی زمانی بیشینه (ماکزیمم) می‌شود که $R_T=r$ شود.

$$\boxed{R_T=r} \longrightarrow \begin{cases} I=\frac{\varepsilon}{2r} \\ P_{max}=\frac{\varepsilon^2}{4r} \end{cases}$$

۲- با توجه به تابع $P=\varepsilon I-rI^2$ که برحسب جریان یک سهمی می‌باشد می‌توان گفت به ازای دو جریان مختلف می‌توان یک توان خروجی یکسان داشت.

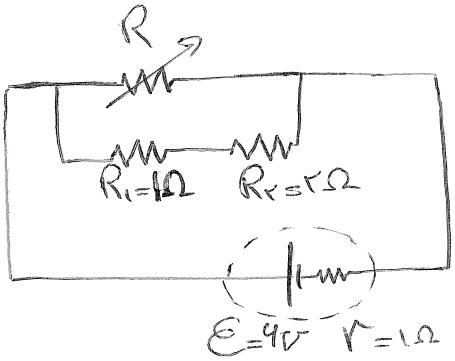


دو مقاومت خارجی مختلف

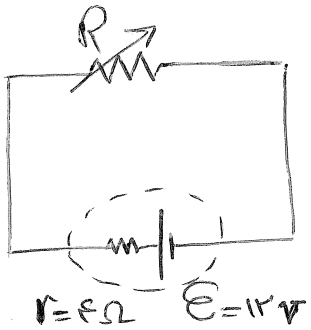
$$R_1 \to I_1 \\ R_2 \to I_2 \Big\} \text{توان یکسان} \quad \boxed{R_1R_2=r^2}$$

مقاومت‌هایی که به ازای آن‌ها توان خروجی یکسان می‌شود.

۴۴) با توجه به مدار مقابل، مقاومت رئوستا را روی چند اُهم تنظیم کنیم تا توان خروجی مولد بیشینه شود؟ این توان بیشینه چند وات است؟



۴۵) در مدار مقابل زمانی که مقاومت رئوستا روی ۲Ω تنظیم شده باشد، توان خروجی مولد P_1 می‌شود. مقاومت رئوستا را چند اُهم برسانیم تا توان خروجی مولد، مجدداً برابر با P_1 شود؟ نمودار توان خروجی مولد برحسب جریان را رسم کنید.

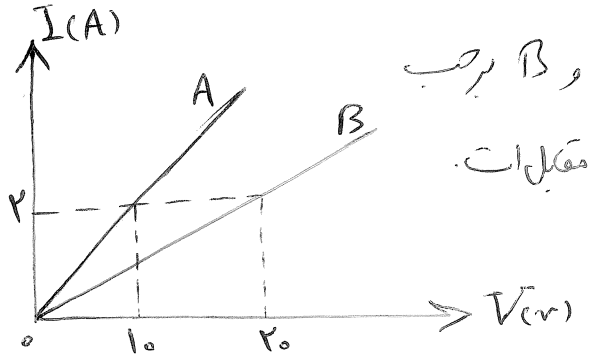


✱ تمرینات فصل دوم

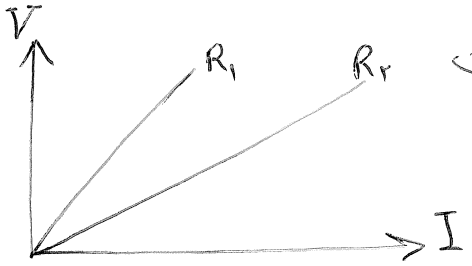
۱- دو سیم رسانا با اختلاف پتانسیل ۱۲ V وصل و در شرایطی که دمای آن ثابت شده است در هر ساعت ۷۲۰۰ C بار الکتریکی از هر مقطع آن عبور می‌کند.
مقاومت این سیم چند اهم است؟

۲- اگر با ثابت نگاه داشتن دمای یک قطعه سیم، اختلاف پتانسیل دو سر آن را ۴ برابر کنیم، هر یک از موارد الف) مقاومت سیم ب) جریان عبوری از آن چه تغییری می‌کند؟

۳- نمودار شدت جریان عبوری از دو مقاومت A و B برحسب ولتاژ دو سر مقاومت A و B (در دمای ثابت) مطابق شکل مقابل است.
نسبت $\frac{R_B}{R_A}$ را تعیین کنید.



۴- با توجه به نمودار مقابل که برای دو مقاومت رسانای فلزی در دمای ثابت رسم شده، تعیین کنید کدام مقاومت بزرگتر است؟



۵- مقاومت قطعه سیمی به طول ۱۲,۵۴m و قطر مقطع ۰,۴mm و مقاومت ویژه $1,7\times10^{-8}\ \Omega.m$ (در دمای مشخص) چند اهم است؟

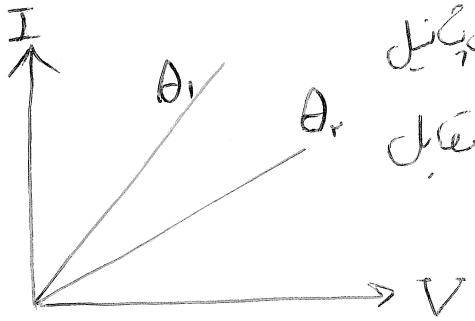
۶- از سیم بلندی به طول ۴Km و مقاومت ۲Ω، جریان ۵A عبور می‌کند.
اختلاف پتانسیل دو نقطه از سیم که به فاصله ۱۰m از هم قرار دارند، چند ولت است؟

۷- در یک دمای مشخص، مقاومت ویژه‌ٔ فلز A نصف مقاومت ویژه‌ٔ فلز B است. اگر دمای دما، طول سیمی از جنس فلز A، سه برابر طول سیمی از جنس فلز B بوده و مساحت مقطع آن نصف مساحت مقطع سیم B باشد $\frac{R_A}{R_B}$ را تعیین کنید.

۸- دو کابل رسانا هم طول A و B داریم. کابل A توپر بوده و شعاع آن ۲mm می‌باشد. کابل B توخالی بوده به طوری که شعاع خارجی آن ۲mm و شعاع داخلی آن ۱mm است. $\frac{R_A}{R_B}$ را بدست آورید.

۹- مقاومت الکتریکی یک مقطع سیم مسی در دمای معلوم R است. اگر با کاهش مانند حجم، طول سیم را ۵ برابر کنیم، مقاومت آن در همان دما چند R خواهد شد؟

۱۰- نمودار جریان عبوری از یک رسانای اهمی برحسب اختلاف پتانسیل دو سر آن، در دماهای مختلف اما ثابت θ_1 و θ_2 به شکل مقابل است. دماهای θ_1 و θ_2 را با هم مقایسه کنید.



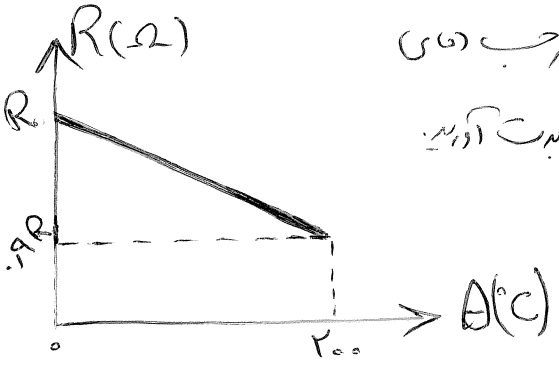
۱۱- مقاومت ویژه‌ٔ یک سیم رسانا در دمای ۸۰°C افزایش دما، ۱۲ درصد تغییر می‌کند. ضریب دمایی مقاومت ویژه‌ٔ این رسانا را بدست آورید.

۱۲- لامپ یک چراغ قوه معمولی با ولتاژ ۳ V و جریان ۰/۳A روشن شده و نور می‌دهد. مقاومت رشته تنگستنی این لامپ در دمای اتاق (۲۰°C) برابر با ۱Ω می‌باشد. دمای این رشته را وقتی که لامپ روشن است بیابید. ($\alpha_{\text{تنگستن}} = 4/5 \times 10^{-3} \frac{1}{K}$)

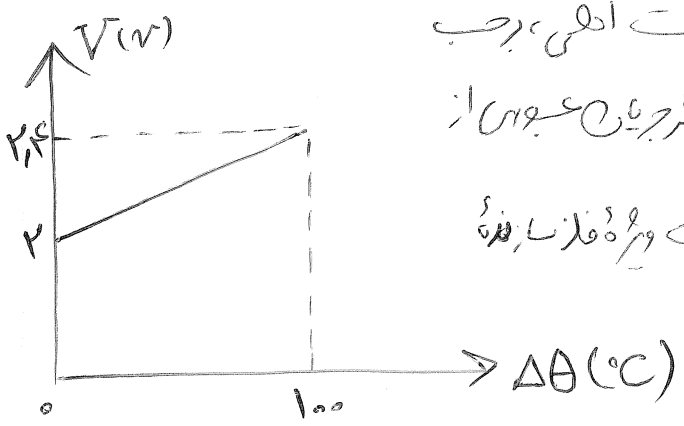
۱۳- ضریب دمایی مقاومت ویژه یک فلز $\alpha = \frac{1}{250} K^{-1}$ است. در چه دمایی مقاومت فلز دو برابر مقاومت آن در دمای ۰°C است؟

۱۴- مقاومت الکتریکی یک سیم پلاتین در دمای ۵۰°C برابر با R است. اگر با ابزار نگاه داشتن حجم سیم، طول آن را پنج برابر کرده و دمایش را به ۳۰°C برسانیم، مقاومت آن چند R می‌شود؟ ($\alpha_{\text{پلاتین}} = 4 \times 10^{-3} \frac{1}{K}$)

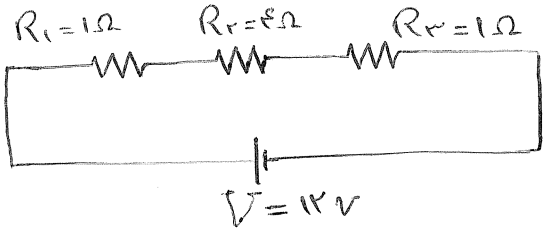
۱۵- شکل مقابل، نمودار مقاومت الکتریکی یک سیم برحسب دمای آن را نشان می‌دهد. ضریب دمایی مقاومت ویژه فلز سازنده سیم را بدست آورید.



* ۱۶- نمودار اختلاف پتانسیل دو سر یک مقاومت اهمی، برحسب تغییرات دمای آن مطابق شکل مقابل است. اگر جریان عبوری از مقاومت مقدار ثابتی باشد، ضریب دمایی مقاومت ویژهٔ فلز سازندهٔ این مقاومت را بدست آورید.

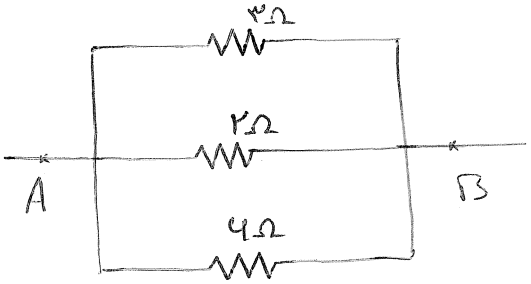


۱۷- با توجه به مدار مقابل، اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت R_2 را تعیین کنید.

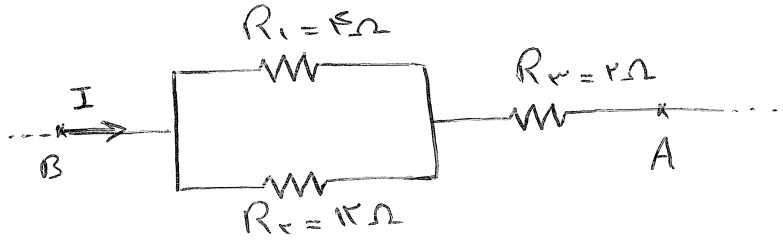


۱۸- شکل مقابل قسمتی از یک مدار الکتریکی را نشان داده، اگر جریان عبوری از مقاومت ۳ اهمی برابر ۲ آمپر باشد، الف) اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه (دو نقطهٔ A و B) را

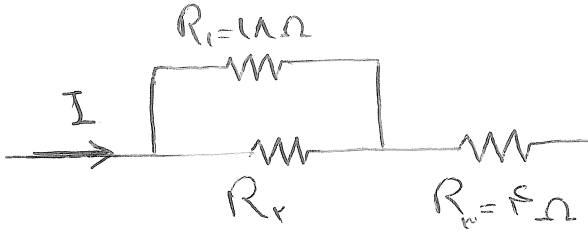
ب) جریان کلی که وارد مجموعه می‌شود را بدست آورید.



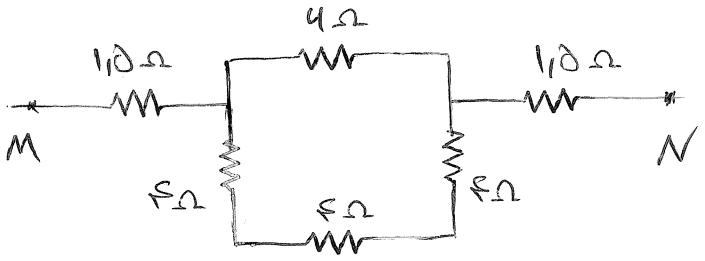
۱۹- با توجه به شکل مقابل اگر $V_1 = 9V$ باشد، الف) V_3 و ب) V_{AB} را بدست آورید.



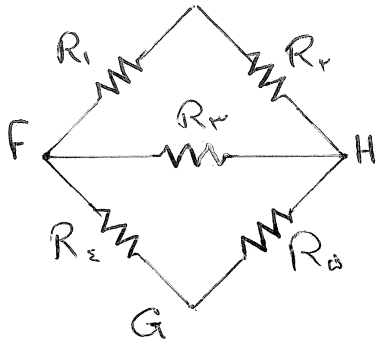
۲۰- اگر $V_{ab}=۱۲V$ و اختلاف پتانسیل دو سر مجموعهٔ ۳۰V باشد. مقاومت $R_۲$ چند اُهم خواهد بود؟



۲۱- با توجه به شکل زیر، مقاومت معادل بین دو نقطهٔ M و N را بیابید.



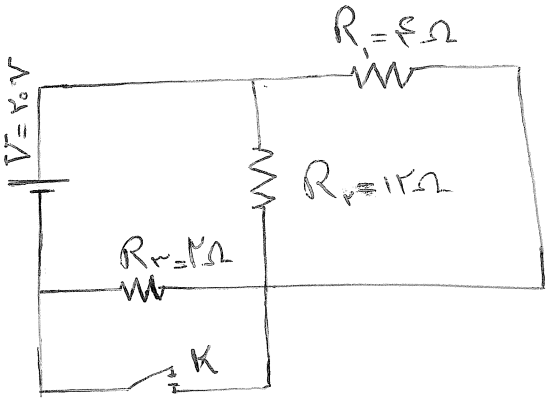
۲۲- شکل مقابل، پنج مقاومت ۸ اُهمی را نشان می‌دهد. مقاومت معادل این مجموعه را در هر یک از حالت‌های مطرح شده بیابید.



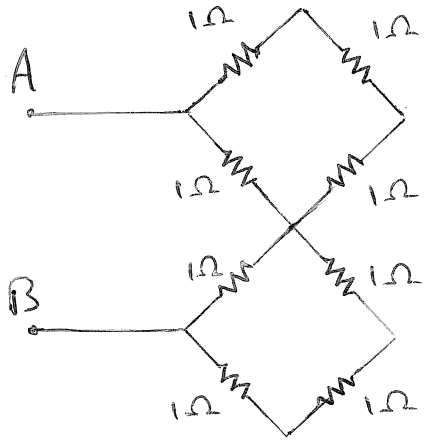
الف) جریان بخواهد از F وارد و از H خارج شود.
(یعنی F و H را با دو سیم به مولد وصل کنیم)

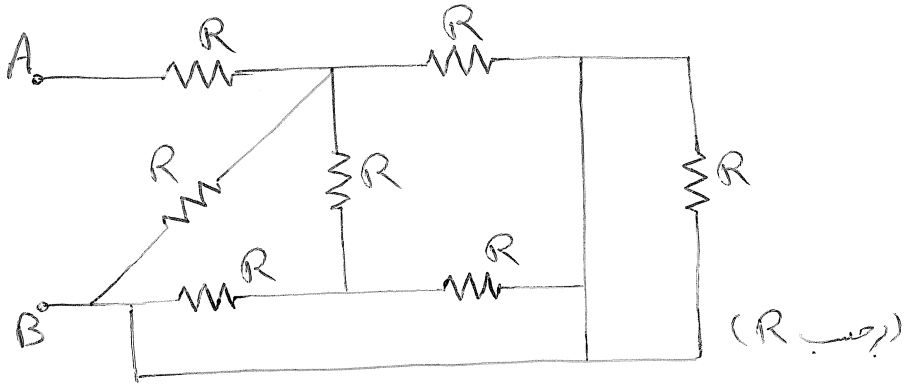
ب) جریان از F وارد و از G خارج شود.
(یعنی F و G را به یک مولد وصل کرده یا برای آن‌ها یک اختلاف پتانسیل ایجاد کنیم)

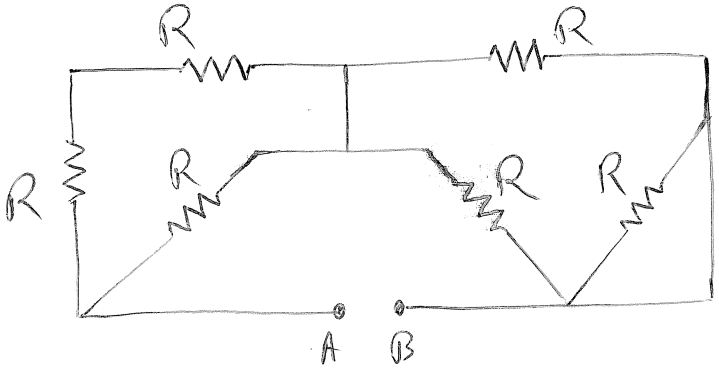
۲۳- با توجه با مدار مقابل، اگر کلید K بسته شود، اختلاف پتانسیل دو سر R_1 چندبرابر تغییر می‌کند؟



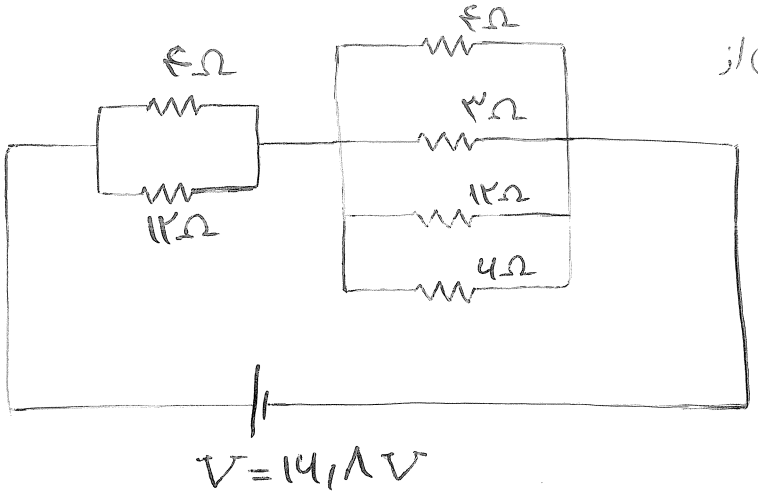
۲۴- در هر یک از شکل های زیر مقاومت معادل بین دو نقطه A و B را تعیین کنید.



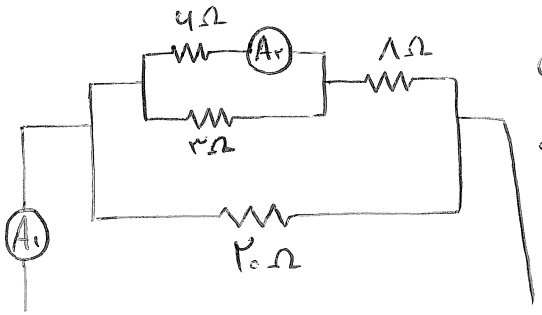




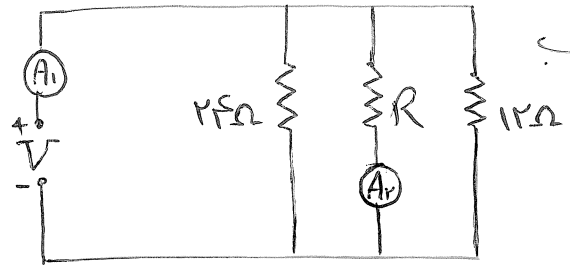
۲۵- با توجه به مدار مقابل، جریان عبوری از هر مقاومت را بدست آورید.



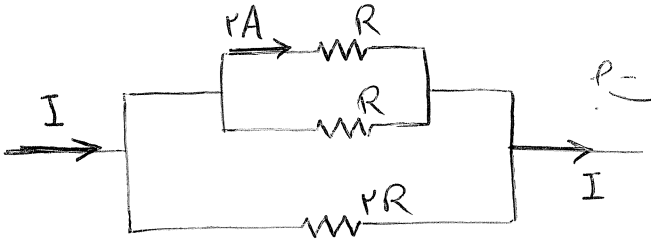
۲۶- با توجه به شکل مقابل که قسمتی از یک مدار را نشان داده، اگر آمپرسنج ۲ جریان ۰,۸A را نشان دهد، آمپرسنج ۱ چه عددی را نشان می‌دهد؟



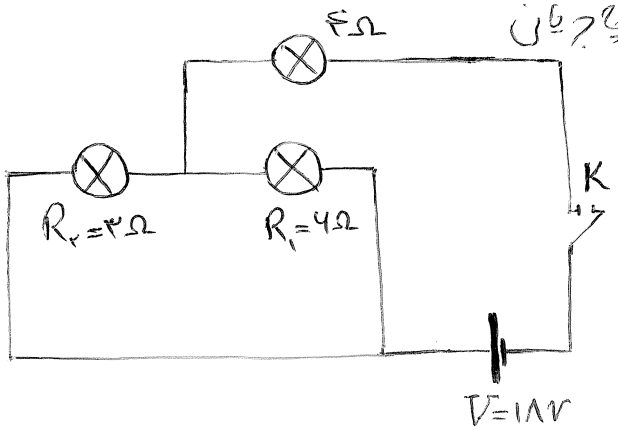
۲۷- در مدار شکل مقابل، آمپرسنج‌های ۱ و ۲ به ترتیب اعداد ۷A و ۴A را نشان می‌دهند. مقاومت R چند اهم است؟



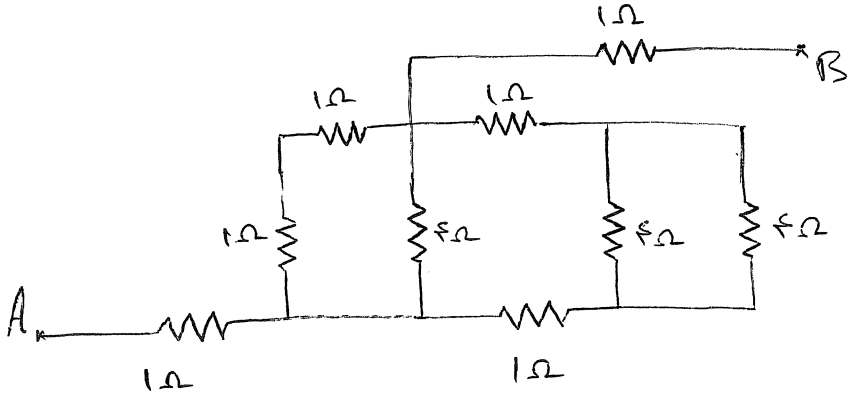
۲۸- با توجه به مدار مقابل، جریان I چند آمپر است؟

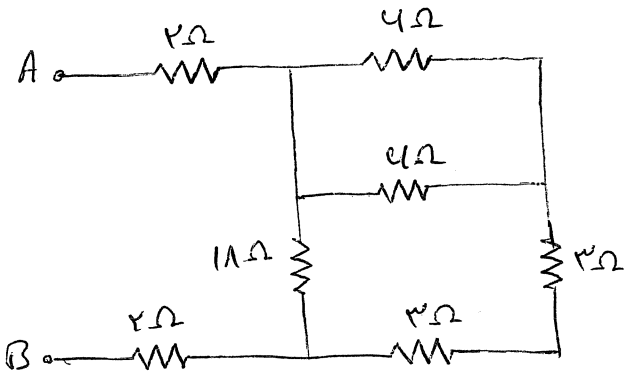


۲۹- در مدار مقابل بلافاصله بعد از بستن کلید، چه جریانی از هر لامپ می‌گذرد؟
نور لامپ‌ها را با هم مقایسه کنید.

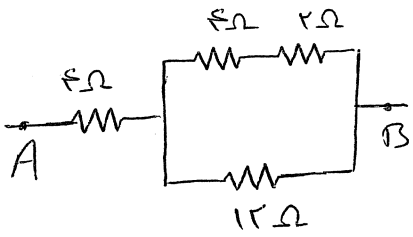


۳۰- با توجه به شکل زیر، مقاومت معادل بین دو نقطه A و B چند اهم می‌شود.

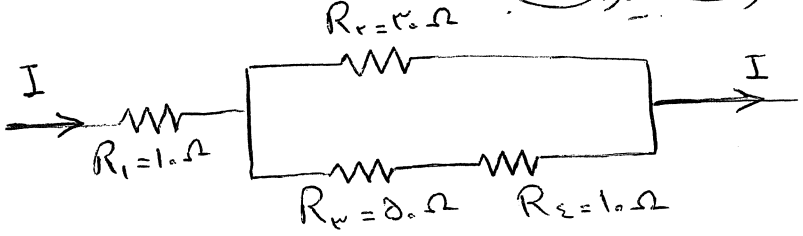




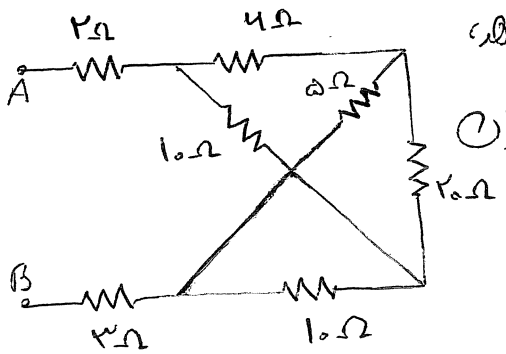
۳۱- با توجه به شکل مقابل که قسمتی از یک مدار را نشان می‌دهد، اگر اختلاف پتانسیل A و B برابر با ۲۴V باشد، توان مصرفی مقاومت ۲ اهمی چند وات می‌شود؟



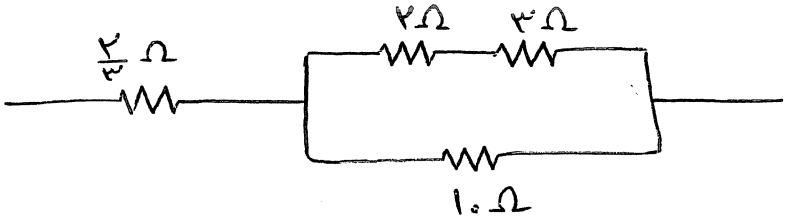
۳۲- با توجه به شکل زیر توان مصرفی کدام مقاومت بیشتر است؟



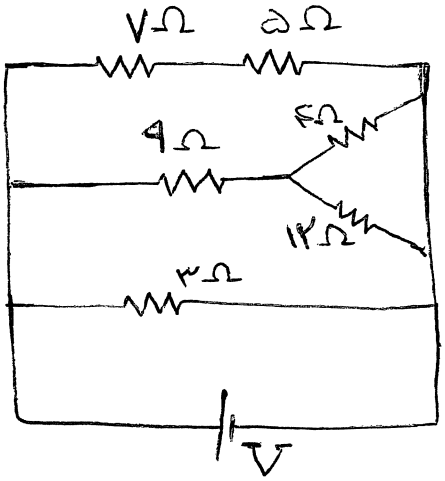
۳۳- با توجه به شکل مقابل که قسمتی از یک مدار را نشان می‌دهد، اگر جریان عبوری از مقاومت ۲۰ اهمی برابر با ۰/۵A باشد، توان مصرفی مقاومت ۲ اهمی چند وات می‌شود؟



۳۴- با توجه به شکل زیر، اگر حداکثر توان قابل تحمل برای هریک از مقاومت‌های ۴۰W باشد، بیشترین توانی که مجموعه می‌تواند تحمل کند، تا هیچ مقاومتی آسیب نبیند چند وات می‌شود؟



۳۵- با توجه به مدار مقابل، اگر حداکثر ولتاژ قابل تحمل هر مقاومت ۹V باشد. مجموعه حداکثر با چه توانی کار کند تا هیچ مقاومتی آسیب نبیند؟



۳۶- روی یک لامپ اعداد ۱۰۰ W و ۲۰۰ V نوشته شده است. اگر به علت افت ولتاژ، توان مصرفی لامپ ۱۹ درصد کاهش پیدا کند، افت ولتاژ چند ولت خواهد بود؟

۳۷- روی لامپی اعداد ۲۲۰V و ۱۰۰W نوشته شده‌است. اگر آن را مدت ۰٫۵ ساعت با ولتاژ ۱۱۰V وصل کنیم، چند کیلوژول از انرژی مصرف می‌کند؟ (مقاومت لامپ را ثابت فرض کنید)

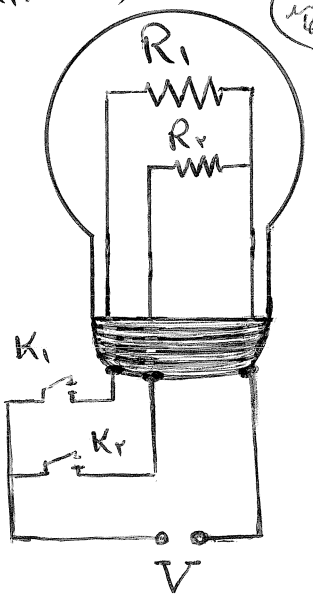
۳۸- یک لامپ با اعداد ۲۲۰V (اسمی) که دورشته فیلامان (مقاومت) دارد برای کار در توان ساخته شده‌است. با طوری که کمترین و بیشترین توان اسمی لامپ ۱۰W و ۵۰W می‌شود. در صورتی که لامپ با ولتاژ ۱۱۰V وصل شود، در هر کدام از حالت‌های زیر توان چقدر انرژی مصرف می‌کند؟ $(R_1 > R_2)$

(مسأله را با این فرض حل کنید که مقاومت‌ها ثابت‌اند)

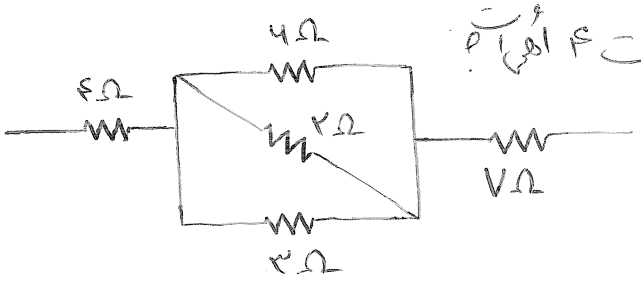
الف) هر دو کلید باز باشند.

ب) K_1 بسته و K_2 باز

پ) K_1 باز و K_2 بسته باشد.



۳۹- با توجه به شکل مقابل که قسمتی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد. توان مصرفی مقاومت ۶ اهمی چند برابر توان مصرفی مقاومت ۴ اهمی است؟

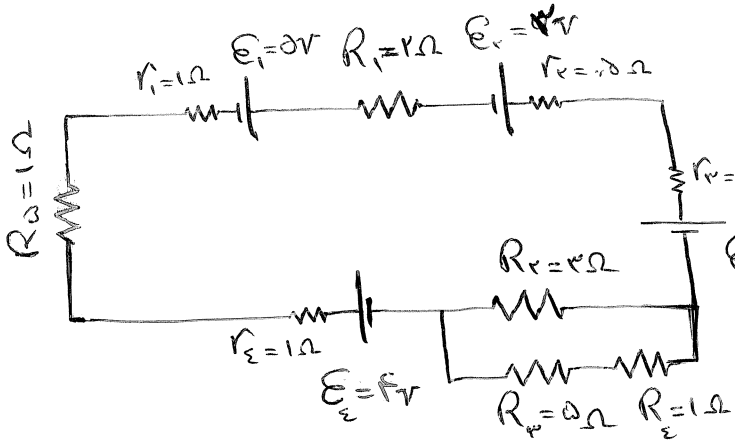


۴۰- یک لامپ رشته‌ای ۱۱۰W، یک سشوار ۸۸۰W، یک دستگاه پخش صوت ۳۳۰W و یک اتو ۱۱۰۰W در نظر بگیرید. (توان اسمی‌ها داده شده است و ولتاژ اسمی‌ها ۲۲۰V می‌باشد) فرض کنید در یک واحد مسکونی که منبع مدار تغذیه‌ی آن ۲۰A است (یعنی مدار آن حداکثر می‌تواند جریان ۲۰A را تحمل کند) تمام وسایل هم‌زمان با هم به برق وصل شده و کار کنند. ولتاژ شهر را هم ۲۲۰V در نظر بگیرید.

الف) آیا منبع خواهد پرید؟

ب) نشان دهید توان مقاومت معادل برابر با مجموع توان مقاومت‌هاست.

۴۱- با توجه به مدار رسم شده پاسخ دهید:



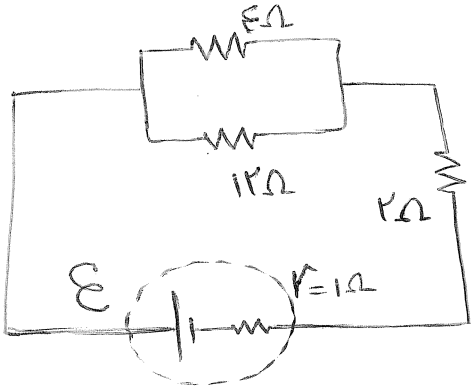
الف) مدار تک حلقه‌ای است یا چند حلقه‌ای؟

ب) اندازه و جهت جریان در این مدار را تعیین کنید.

پ) اندازه اختلاف پتانسیل دو سر مولد (۱) چقدر است؟

ت) اگر پتانسیل مولد (۳) چند ولت است؟

۴۲- با توجه به مدار شکل زیر، اگر توان مصرفی مقاومت ۴Ω برابر با ۹W باشد، پاسخ دهید:



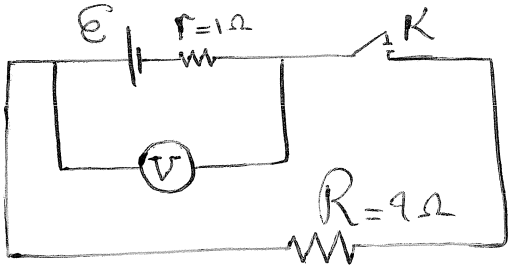
الف) جریان مدار چند آمپر است؟

ب) نیروی محرکهٔ مولد را تعیین کنید.

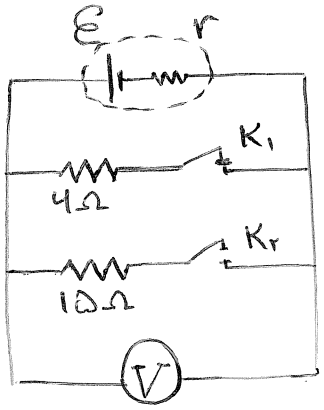
پ) اگر پتانسیل مولد چند ولت است؟

ت) انرژی مصرفی در مجموع مقاومت‌های خارجی در مدت یک دقیقه چند ژول می‌شود؟

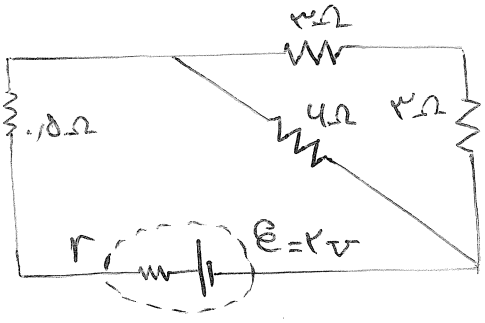
۴۳- در مدار زیر، وقتی کلید باز است، ولت‌سنج عدد ۲V را نشان می‌دهد، در صورتی که کلید بسته شود عدد ولت‌سنج چه خواهد بود؟



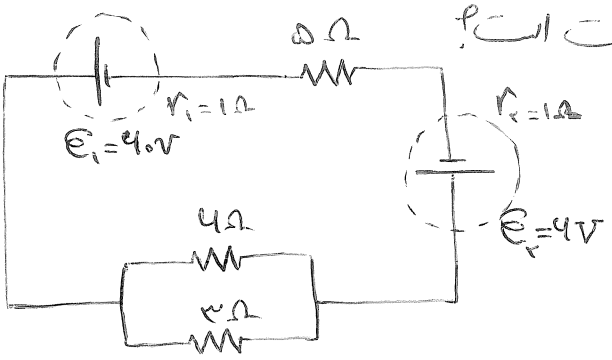
۴۴- در مدار شکل مقابل، کلید K_1 بسته بوده و ولت‌سنج عدد ۱۲V را نشان می‌دهد. اگر K_1 را باز و K_2 را ببندیم، ولت‌سنج ۱۵V را نشان می‌دهد. نیروی محرکهٔ و مقاومت درونی منبع را محاسبه کنید.



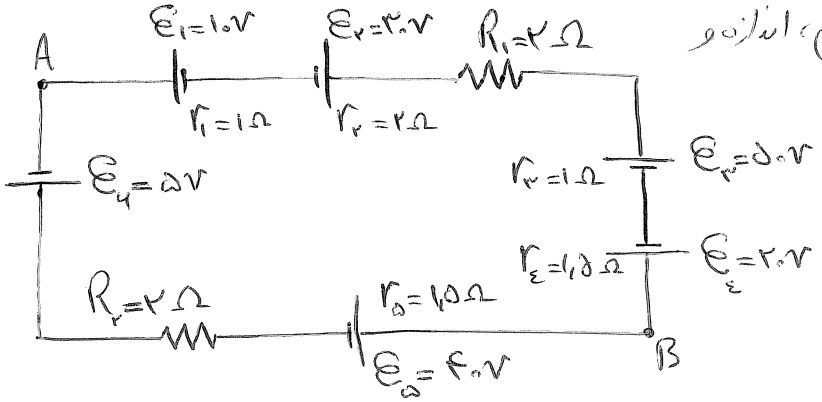
۴۵- با توجه به مدار زیر، اگر توان تولیدی مولد ۱W باشد، الف) توان الکتریکی (مولد و ب) توان خروجی مولد را بدست آورید.



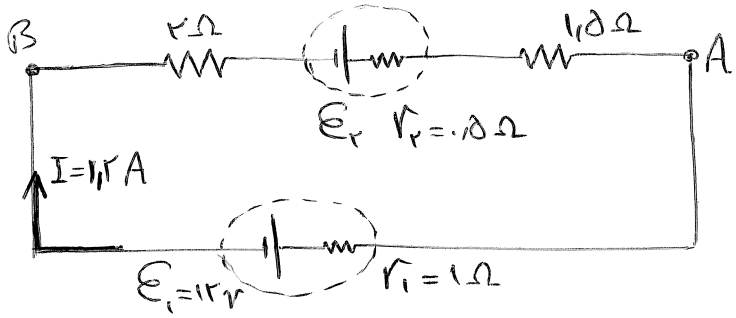
۴۶ـ با توجه به مدار زیر، الف) توان خروجی مولد (۱)، ب) توان ورودی (توان مصرفی) مولد (۲) و پ) توان مصرفی در مجموع مقاومت‌های خارجی چندوات است؟



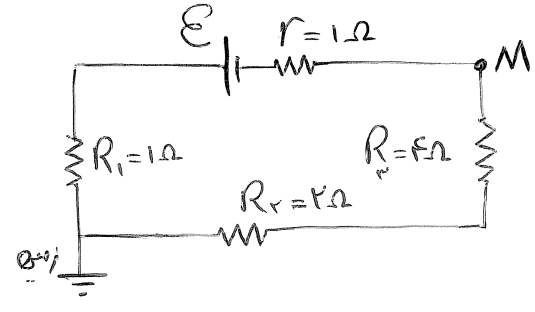
۴۷ـ با توجه به مدار رسم شده در شکل مقابل، اندازه و جهت جریان را تعیین کنید. V_A-V_B را بدست آورید.



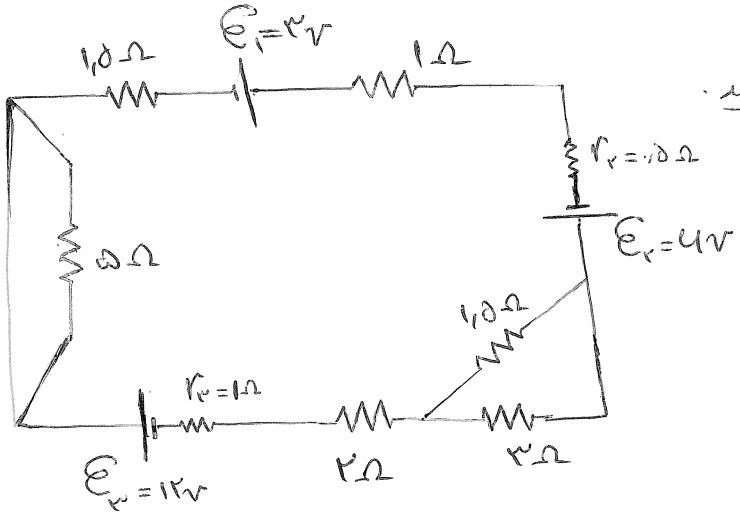
۴۸ـ با توجه به مدار زیر که در آن اندازه و جهت جریان نشان داده شده، الف) V_B-V_A و ب) نیروی محرکهٔ $\mathcal{E}_2$ چند ولت است؟



۴۹ـ با توجه به مدار زیر، اگر شدت جریان مدار 1.5A باشد، پتانسیل نقطهٔ M چند ولت خواهد بود؟



۵۰ـ با توجه به مدار مقابل پاسخ دهید.

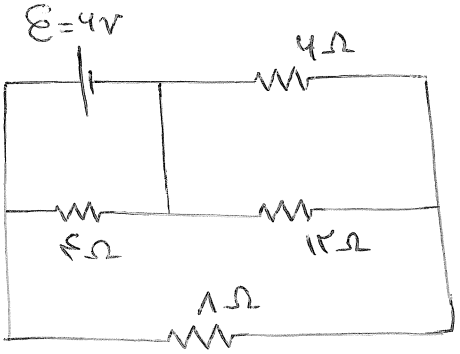


الف) توان خروجی مولد ۲ چندوات است؟

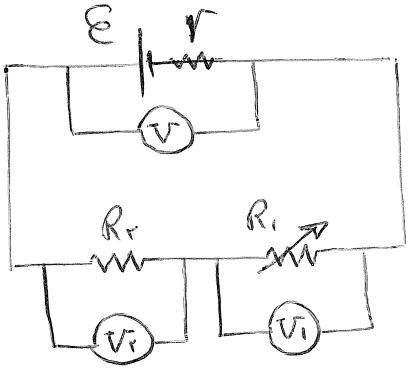
ب) آهنگ اتلاف انرژی در مولد ۳ را تعیین کنید.

پ) توان تولیدی مولد ۱ را بیابید.

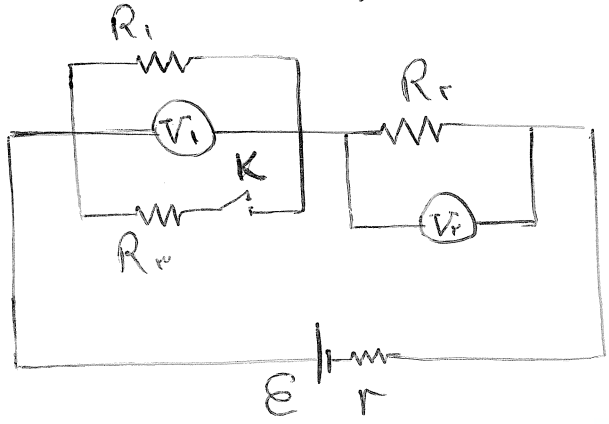
۵۱ـ با توجه به مدار مقابل جریانی که از مولد خارج می‌شود، چند آمپر است؟



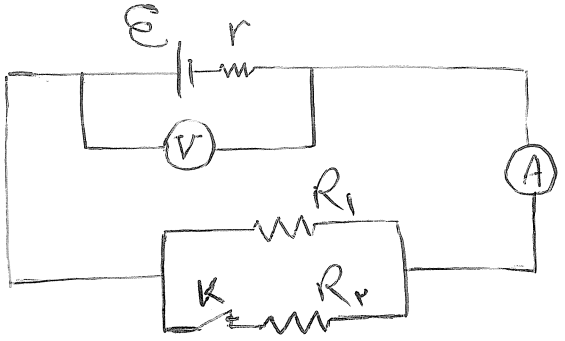
۵۲ـ با توجه به شکل مقابل، اگر مقاومت متغیر R_1 را کاهش دهیم، عدد هریک از ولت سنج‌ها چگونه تغییر می‌کند؟



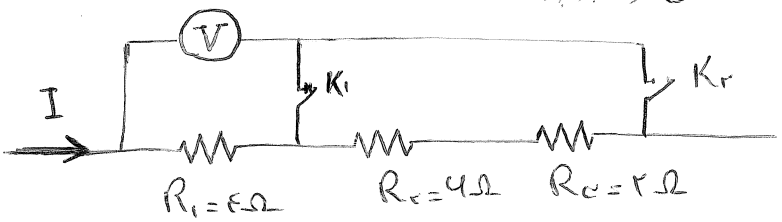
۵۳ـ با توجه به مدار زیر اگر کلید بسته شود، عددهای سنج‌ها چگونه تغییر می‌کند؟



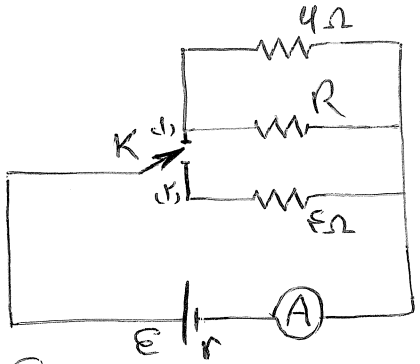
۵۴- با توجه به مدار زیر، اگر کلید باز شود، عددوولت سنج و آمپرسنج چگونه تغییر می‌کند؟



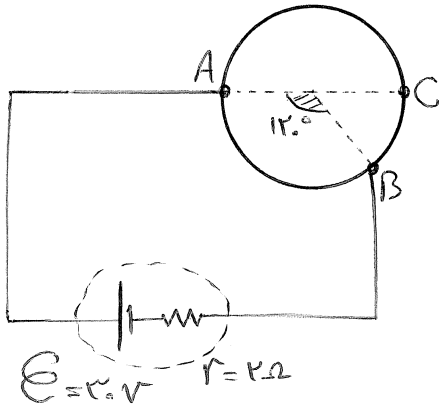
۵۵- در مدار شکل زیر که قسمتی از یک مدار کامل می‌باشد، ولت سنج عددی را نشان می‌دهد. اگر کلید K_1 را باز و K_2 را ببندیم، عددوولت سنج چند برابر می‌شود؟



۵۶- در مدار شکل زیر، کلید K روی هرکدام از خانه‌های ۱ یا ۲ قرار گیرد، جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد یک نانوآمپر است. مقاومت R را بیابید.



۵۷- سیم یکنواختی با مقاومت ۳۶Ω را مانند شکل زیر به صورت حلقه‌ای دایره‌ای درآورده و از نقاط A و B با کمک سیم‌های دیگری که مقاومت ناچیزی (صفر) دارند، به یک مولد وصل می‌کنیم. اگر AC قطر حلقه باشد، $V_C - V_B$ چند ولت است؟



فصل سوم : مغناطیس

مقدمه : در طبیعت اجسامی وجود دارند که می‌توانند به یکدیگر نیروی ربایشی (جاذبه) یا نیروی رانشی (دافعه) وارد کنند. همچنین می‌توانند با اجسام دیگر از جنس آهن و... (در این فصل به بررسی این اجسام می‌پردازیم) نیروی ربایشی وارد کنند. این اجسام به آهنربا معروف هستند. برای مثال ماده‌ی کانی Fe_3O_4 یک آهنربا است.

در اطراف هر آهنربا خاصیتی وجود دارد که از طریق آن می‌تواند بر مواد مغناطیس و آهنرباهای دیگر اثر گذار باشد. به این خاصیت میدان مغناطیسی گفته می‌شود. علاوه بر این که در اطراف آهنرباها میدان مغناطیسی به طور طبیعی وجود دارد، می‌توان به کمک جریان الکتریکی هم میدان مغناطیسی ایجاد کرد. یعنی در اطراف سیم‌های حامل جریان الکتریکی نیز میدان مغناطیسی وجود دارد.

در این فصل ابتدا با آهنربا که به طور طبیعی در اطراف خود میدان مغناطیسی دارد آشنا شویم. سپس روش‌های ایجاد میدان مغناطیسی با وسیله‌ی جریان الکتریکی را بررسی خواهیم کرد. در ادامه با نیروهای مغناطیسی آشنا شویم و در نهایت مواد مغناطیسی را معرفی کرده و آن‌ها را دقیق‌تر بررسی کنیم.

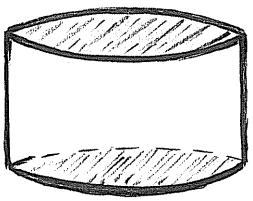
بخش اول: آشنایی با آهنربا و بررسی چند تعریف

- آهنربا: جسمی است که به واسطهٔ داشتن ویژگی‌های خاص در اتم‌های خود می‌تواند به جسم مثل آهن (نیکل، کبالت و...) نیروی ربایشی (جاذبه) وارد کند.

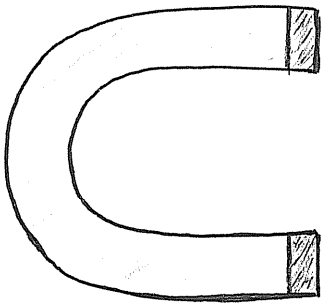
- قطب‌های آهنربا: در هر آهنربا دو مکان وجود دارد که خاصیت آهنربایی یا اصطلاحاً خاصیت مغناطیسی در اطراف آن‌ها بیشتر و قوی‌تر است. به این مکان‌ها قطب‌های مغناطیسی یا قطب‌های آهنربا گفته می‌شود.

به طور کلی راه تشخیص قطب‌های یک آهنربا با شکلی دلخواه، تجربی بوده و از طریق انجام آزمایشی می‌باشد. اگر یک آهنربا را در ظرفی که حاوی براده‌های آهنی است فرو ببریم، در دو قسمت از آهنربا که همان قطب‌ها باشند، براده‌های بیشتری جمع می‌شود.

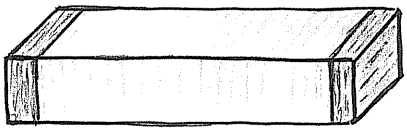
نکته: شکل‌های زیر چند آهنربای معروف و پرکاربرد را به همراه قطب‌هایشان نشان می‌دهد، که محل و آرایش قطب‌های این آهنرباها نیز برای اولین بار از طریق انجام آزمایش مشخص شده است.



آهنربای استوانه‌ای
(صرف نظر از ارتفاع استوانه
قطب‌ها در سطح بالا و پایین هستند)



آهنربای نعل شکل
یا آهنربای C شکل



آهنربای میله‌ای

قطب‌های یک آهنربا را با حرف N یعنی قطب شمال آهنربا و حرف S یعنی قطب جنوب نام‌گذاری می‌کنند.

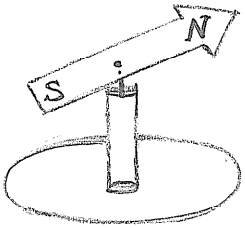
- با نوشتن حاصل آزمایش، توضیح دهید چگونه می‌توان با وسیلهٔ یک ریسمان قطب‌های یک آهنربای میله‌ای را نام‌گذاری کرد؟

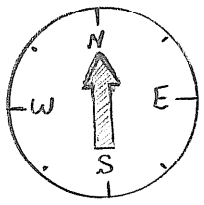
نکته: به صورت تجربی و از طریق انجام آزمایش می‌توان گفت قطب‌های هم‌نام آهربا‌ها یکدیگر را دفع (نیرو دافعه به هم وارد می‌کنند) و قطب‌های ناهم‌نام آن‌ها همدیگر را جذب می‌کنند. پس راه دیگر نام‌گذاری قطب‌های یک آهربا، استفاده از آهربایی با قطب‌های N و S معلوم است.

مثال ۱) دو میلهٔ کاملاً مشابه در اختیار داریم که یکی از آن‌ها آهن بوده و دیگری آهربا است. راهی برای تشخیص آهربا پیشنهاد کنید.

- تعریف عقربهٔ مغناطیسی یا قطب‌نما

یک آهربای میله‌ای باریک و سبک است که روی پایه‌ای سوار شده و می‌تواند آزادانه حول آن بچرخد و جهت تقریبی شمال و جنوب جغرافیایی والبته میدان مغناطیسی در یک مکان را نشان دهد.

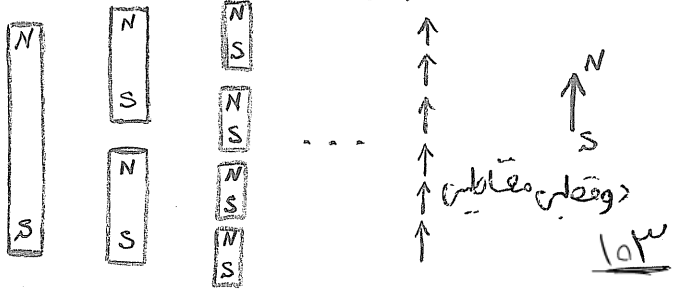




نماد عقربهٔ مغناطیسی ⊖→ می‌باشد که فلش، جهت قرار آهربای بکار رفته را نشان می‌دهد.

- تعریف تجربی دوقطبی مغناطیسی

اگر یک آهربا را تکه‌های خیلی ریز تبدیل شود، هر تکه خود یک آهربا بوده و دارای دو قطب N و S است. بدین ترتیب می‌توان گفت کوچکترین جزء سازندهٔ آهربا‌ها یعنی اتم‌های آن‌ها خاصیت مغناطیسی دارند و آهربا هستند و همچنین می‌توان گفت در طبیعت تک قطبی مغناطیسی وجود ندارد.



کوچکترین جزء سازندهٔ مواد مغناطیسی یعنی اتم‌ها آن‌ها دوقطبی مغناطیسی می‌گویند. (دقیق‌تر در جلسات بعد خواهیم گفت)

* میدان مغناطیسی

در فضای اطراف آهن‌ربا‌ها و سیم‌های حامل جریان الکتریکی خاصیتی وجود دارد که این اجسام از طریق آن بر مواد مغناطیسی (آهن، نیکل، کبالت و آلیاژهای آن‌ها و...) و ذرات باردار متحرک، اثر گذار خواهند بود و در واقع با مواد مغناطیسی و ذرات باردار متحرک نیرو وارد می‌کنند. به این خاصیت میدان مغناطیسی گفته می‌شود. (مشابه تعریف میدان گرانش و الکتریکی)

فضایی را در نظر بگیرید که میدان مغناطیسی در آن محسوس باشد. وقتی یک ماده مغناطیسی در این فضا قرار گیرد با توجه به موقعیتی که دارد، اندازه و جهت نیروی وارد شده بر آن متفاوت خواهد بود. یعنی خاصیت میدان مغناطیسی در هر نقطه از این فضا دارای اندازه و جهت خاص آن نقطه است.

نکته: میدان مغناطیسی کمیتی برداری بوده و با $\vec{B}$ نمایش داده می‌شود. یکای SI میدان مغناطیسی، تسلا (T) نام دارد. البته از یکای دیگری با نام گاوس (G) هم برای بیان اندازهٔ میدان مغناطیسی استفاده می‌شود.

$$\begin{cases} 1\,T = 10^{4}\,G \\ \text{یا} \\ 1\,G = 10^{-4}\,T \end{cases}$$

(واحد تسلا از واحد گاوس بزرگتر است)

* خطوط میدان مغناطیسی

برای آن‌که بتوان از میدان مغناطیسی ایجاد شده یا موجود در یک فضا تصویر داشت باید برای آن میدان شکلی رسم کرد. برای رسم شکل از خطوطی استفاده می‌شود که خطوط میدان نام دارند.

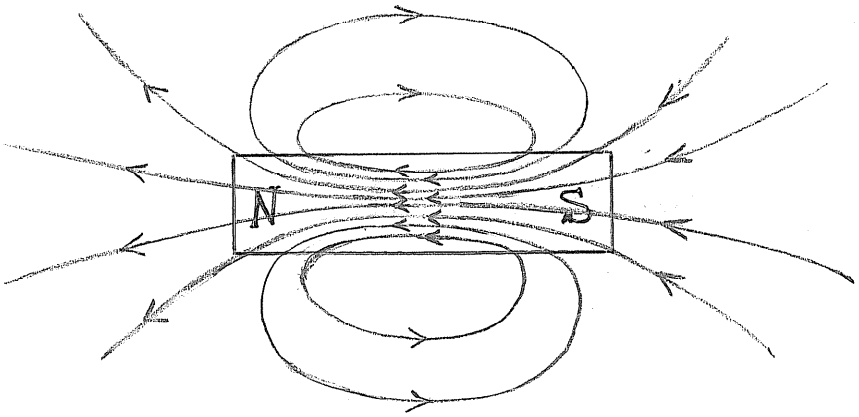
نکته: خطوط میدان، خطوطی فرضی هستند که راه اصلی و کلی برای رسیدن به طرح این خطوط انجام آزمایش است.

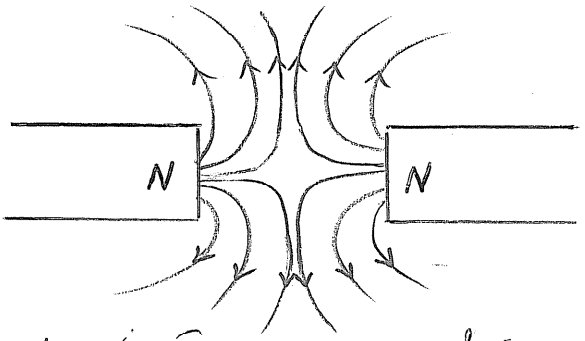
برای خطوط میدان مغناطیسی ویژگی‌هایی تعریف می‌شود تا با استفاده از آن‌ها بتوان میدان مغناطیسی یک فضا را توصیف کرد.

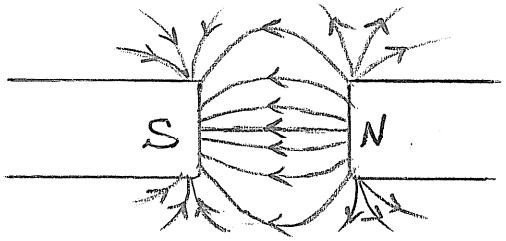
- ویژگی های خطوط میدان مغناطیسی

۱- خطوط میدان مغناطیسی هم در درون و هم در بیرون آهنربا وجود دارند. به طوری که در بیرون آهنربا جهت آن ها از قطب N به S است، یعنی از N خارج و به S وارد می شوند و در داخل آهنربا برعکس.

طرح خطوط میدان مغناطیسی برای آهنربا ها در چند حالت خاص به صورت زیر است. این طرح ها برای اولین بار با انجام آزمایشی و به صورت تجربی مشخص شده اند.







۲- تراکم خطوط میدان در هر ناحیه، نشان دهندهٔ شدت میدان در آن ناحیه است. به طوری که هر چه خطوط متراکم تر باشند میدان قوی تر خواهد بود.

۳- هر خط میدان مغناطیسی به صورت یک حلقهٔ یا منحنی بسته بوده و دو طرف آن به هم وصل است. (در طبیعت تک قطبی مغناطیسی وجود ندارد)

۴- خطوط میدان مغناطیسی یکدیگر را قطع نمی کنند.

نکته (تعیین جهت بردار میدان مغناطیسی)

فضایی را در نظر بگیرید که میدان مغناطیسی در آن محسوس باشد و بخواهیم جهت بردار میدان مغناطیسی در نقطه‌ای از این فضا را مشخص کنیم.

۱- استفاده از عقربهٔ مغناطیسی یا قطب نما: به طوری که جهت گیری عقربهٔ مغناطیسی، جهت میدان در نقطهٔ مورد نظر را نشان می‌دهد.

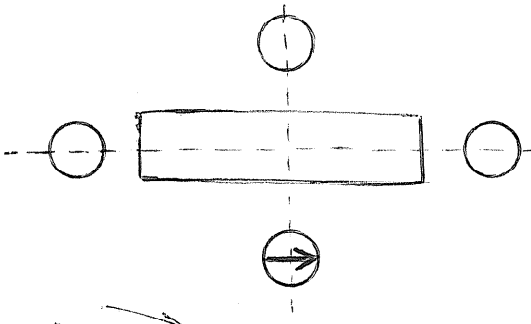
۲- خطوط میدان مغناطیسی: در صورتی که خطوط میدان مغناطیسی در ناحیه‌ای از فضا رسم شده باشد می‌توان گفت بردار میدان مغناطیسی در هر نقطه، بردار مماس بر خط گذرنده از آن نقطه و با آن خط هم جهت است.

۳- استفاده از یک قاعده یا قانون: برای تعیین جهت بردار میدان مغناطیسی در نقاط فضای اطراف سیم‌های حامل جریان الکتریکی قاعده‌ای تعریف می‌شود و می‌توان از آن استفاده کرد (بعداً توضیح داده خواهد شد)

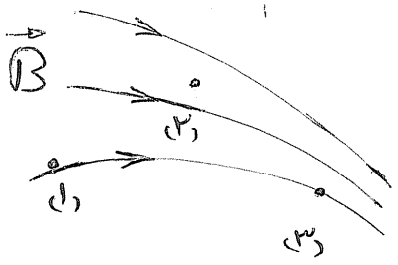
مثال ۲: شکل مقابل یک آهنربای میله‌ای و چهار عقربهٔ مغناطیسی را نشان می‌دهد که جهت گیری یکی از آن مشخص شده است.

الف) قطب‌های آهنربا و ب) جهت گیری عقربه‌های دیگر را تعیین کنید.

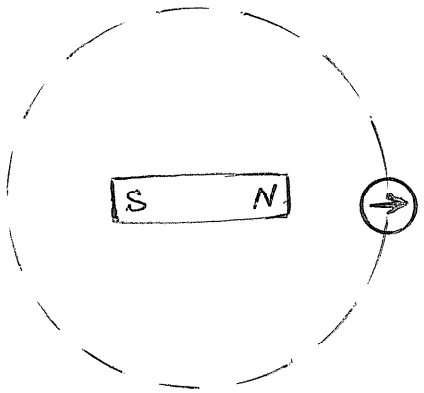
عمود منصف محور آهنربا



مثال ۳: شکل مقابل خطوط میدان مغناطیسی در ناحیه‌ای از فضا را نشان می‌دهد. الف) بردار میدان را در نقاط (۱)، (۲) و (۳) با چه روشی تعیین رسم کنید. ب) اندازهٔ میدان در این نقاط را مقایسه کنید.



مثال ۴: شکل مقابل یک آهنربای میله‌ای را نشان می‌دهد که در یک صفحهٔ افقی قرار دارد. اگر یک عقربهٔ مغناطیسی را روی مسیر نشان داده شده یک دور کامل حرکت دهیم و به مکان اولیه برگردانیم، عقربهٔ آن چند دور چرخیده؟

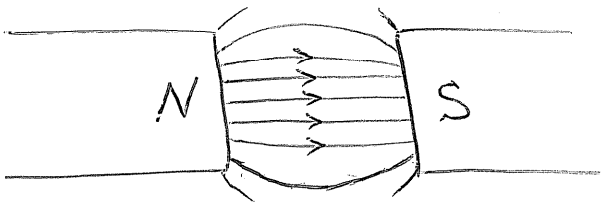


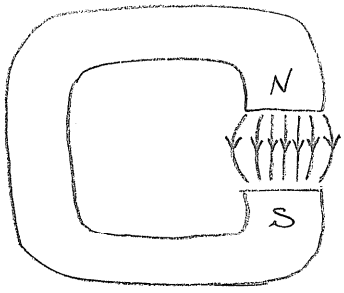
- تعریف میدان مغناطیسی یکنواخت

فضایی را در نظر بگیرید که در آن میدان مغناطیسی محسوس است. اگر در تمام نقاط قسمتی از این فضا اندازه، راستا و جهت بردار میدان مغناطیسی یکسان باشد، می‌توان گفت میدان مغناطیسی آن قسمت یکنواخت است.

در این صورت خطوط میدان در آن قسمت موازی، مستقیم، هم فاصله و هم جهت خواهند بود.

در صورتی که قطب‌های ناهمنام دو آهنربا را کنار هم قرار دهیم می‌توان در فضای بین آن‌ها میدان یکنواخت تقریبی ایجاد کرد. به طوری که هرچه فاصلهٔ آهنرباها نسبت به ابعاد آن‌ها کمتر باشد دقت یکنواخت بودن میدان بیشتر است. همچنین بین قطب‌های یک آهنربای C شکل نیز می‌توان یک میدان یکنواخت در نظر گرفت که بازهم توان گفت هرچه فاصلهٔ قطب‌ها نسبت به ابعاد آن‌ها کمتر باشد، محدودهٔ میدان یکنواخت بیشتر خواهد شد.





* الکترومغناطیس‌ها نیز به نام سیملوله هم می‌توان برای ایجاد میدان مغناطیسی یکنواخت استفاده کرد. به گونه‌ای که در اداره فصل با این وسیله آشنا شوید.

- تعریف القای مغناطیسی

برخی اجسام وقتی در یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند و یا با یک آهنربا تماس پیدا می‌کنند، خود تبدیل به آهنربا شده و خاصیت مغناطیسی پیدا می‌کنند. به این پدیده القای مغناطیسی گفته می‌شود.

نکته: القای خاصیت مغناطیسی در بعضی مواد مغناطیسی یعنی آهن، نیکل، کبالت و آلیاژهای آن‌ها بهتر و راحت‌تر اتفاق می‌افتد.

* در آزمایش‌های فصل با مواد مغناطیسی آشنا و آن‌ها را دقیق‌تر بررسی خواهیم کرد.

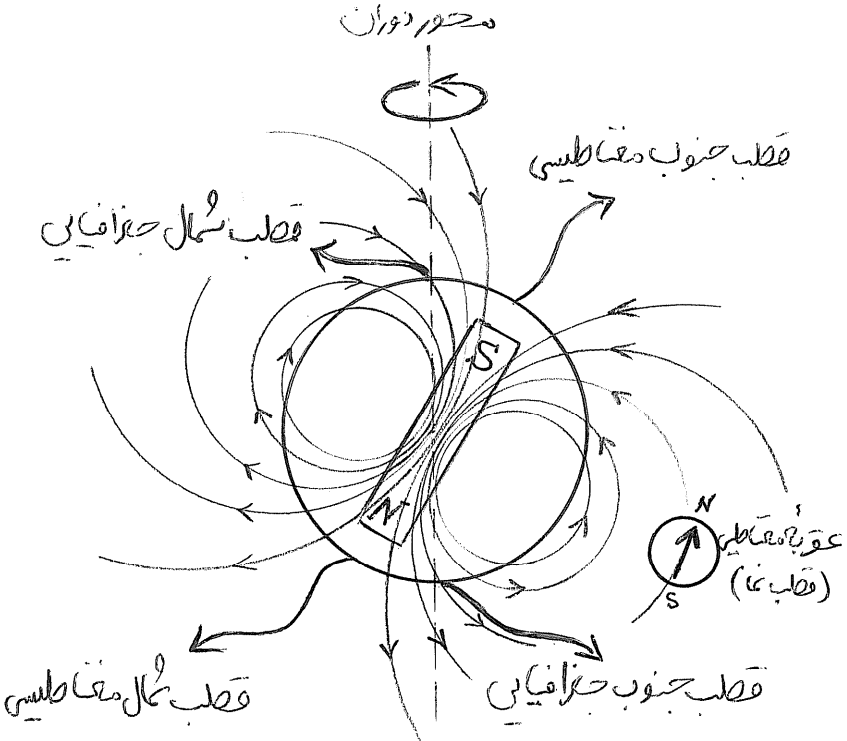
- میدان مغناطیسی کرهٔ زمین

کرهٔ زمین دارای خاصیت مغناطیسی است و می‌توان در اطراف آن یک میدان مغناطیسی در نظر گرفت. میدانی که خطوط آن شبیه به خطوط یک آهربای میله‌ای می‌باشد

یعنی می‌توان یک آهربای میله درون کرهٔ زمین فرض کرد که باعث ایجاد این میدان مغناطیسی شده است.

نکته: قطب های مغناطیسی زمین عکس قطب های جغرافیایی آن بوده و دقیقا بر هم منطبق نیستند. در واقع قطب های مغناطیسی و جغرافیایی در فاصلهٔ نسبتاً زیادی از هم قرار دارند. مثلاً فاصلهٔ قطب جنوب مغناطیسی از قطب شمال جغرافیایی تقریباً ۱۸۰۰ Km است.

نکته: با توجه به نکتهٔ قبل می‌توان گفت قطب جهت دقیق و واقعی شمال جغرافیایی را نشان نمی‌دهد و تا حدودی انحراف دارد. اندازهٔ این انحراف با مکان ما در کرهٔ زمین رابطه دارد.



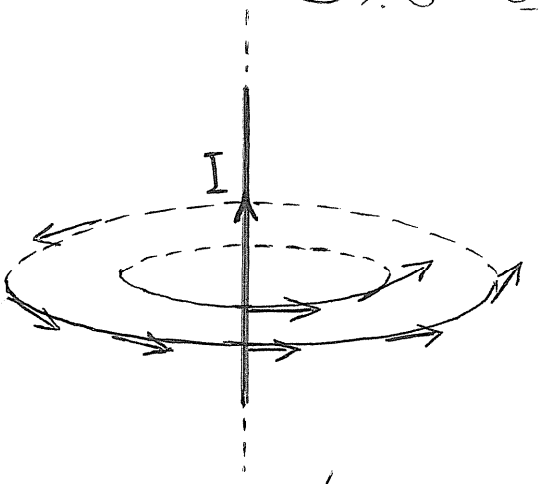
- تعریف شیب مغناطیسی: وقتی یک سوزن مغناطیس شده را به وسیلهٔ یک نخ از وسط آن از نقطه‌ای آویزان کنیم، به طور افقی قرار نمی‌گیرد و امتداد آن با سطح افق زمین زاویه می‌سازد. به این زاویه، شیب مغناطیسی گفته می‌شود.

بخش دوم : بررسی میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی (حرکت الکترون‌ها)

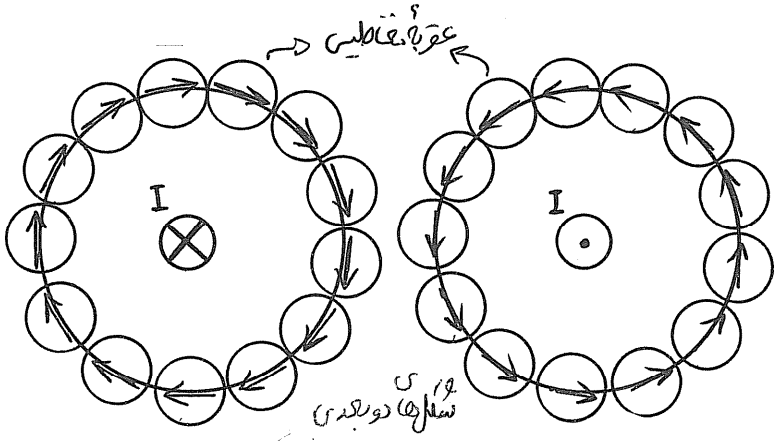
علاوه بر اینکه در فضای اطراف بعضی اجسام (آهن‌ربا‌ها) به صورت طبیعی میدان مغناطیسی وجود دارد، در فضای اطراف سیم‌های رسانا نیز با برقراری جریان الکتریکی در آن‌ها می‌توان میدان مغناطیسی ایجاد کرد. این مطلب را می‌توان با آزمایش ساده و به صورت تجربی تحقیق و نتیجه‌گیری کرد.

در این بخش میدان مغناطیسی حاصل از سیم‌های حامل جریان الکتریکی را در حالت‌های خاصی بررسی می‌کنیم. (البته با این گفت حالت‌های پیچیده کاربرد چندانی ندارند!)

① میدان مغناطیسی حاصل از یک سیم راست و طویل حامل جریان



شکل سه بعدی



سیم متقیم و عمود بر صفحه
جهت جریان رو به بیرون

سیم متقیم و عمود بر صفحه
جهت جریان به درون صفحه

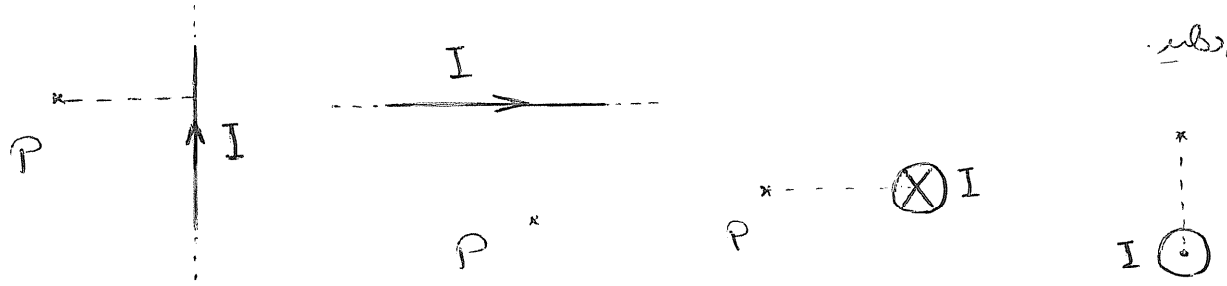
نکته مهم (تعیین جهت میدان سیم متقیم حامل جریان)

اگر بخواهیم جهت میدان مغناطیسی را در نقطه‌ای از فضای اطراف سیم متقیم حامل جریان تعیین کنیم، می‌توان از قاعده دست راست به شرح زیر استفاده کرد:

چهار انگشت دست راست را در جهت جریان قرار داده به طوری که کف دست رو به نقطه مورد نظر باشد، در این صورت انگشت باز شده شست، جهت میدان در آن نقطه را نشان می‌دهد.

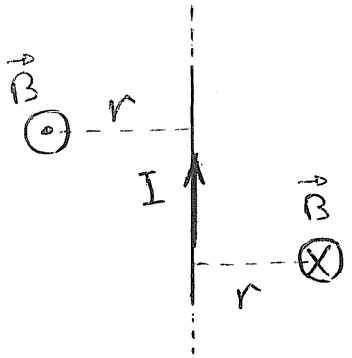
نکته: در صفحهٔ دوبعدی، برای نشان دادن خطی که عمود بر صفحه است و جهت آن رو به بیرون صفحه است از علامت ⊙ تحت عنوان بیرون سو و برای نشان دادن خطی عمود بر صفحه که جهت آن به درون صفحه است، از علامت ⊗ با عنوان درون سو استفاده می‌کنیم.

مثال: شکل‌های زیر در صفحه (دوبعدی) می‌باشند. در هر شکل جهت میدان مغناطیسی در نقطهٔ P را نشان دهید.



نکته (اندازهٔ میدان مغناطیسی)

اندازهٔ میدان مغناطیسی حاصل از یک راست و طویل حامل جریان I در نقطه‌ای با فاصلهٔ r از آن از رابطهٔ زیر بدست می‌آید.



$$B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{r}$$

B: اندازهٔ میدان (T)

I: شدت جریان عبوری از سیم (A)

r: فاصلهٔ یک نقطه از سیم (m)

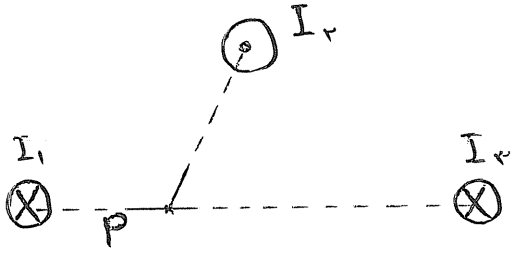
μ_0: تراوایی مغناطیسی خلأ؛ نام دارد و مقدار آن در SI برابر با $4\pi \times 10^{-7}\ \frac{T.m}{A}$ می‌باشد.

* نیازی به حفظ کردن رابطهٔ بالا نیست فقط در نظر داشته باشید که میدان در نقاط اطراف سیم، با شدت جریان عبوری از سیم رابطهٔ مستقیم و با فاصلهٔ نقطه از سیم رابطهٔ عکس دارد.

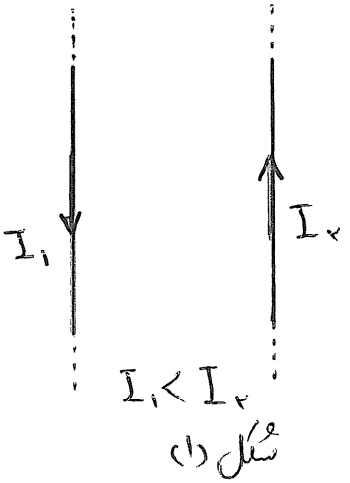
$$\begin{cases} B \propto I \\ B \propto \frac{1}{r} \end{cases}$$

نکته: اگر چند سیم راست و حامل جریان الکتریکی داشته و بخواهیم میدان مغناطیسی را در نقطه‌ای از فضای اطراف آن‌ها پیدا کنیم، ابتدا باید میدان حاصل از هرکدام را پیدا کرده، سپس برآیند بردارهای میدان را بیابیم. پس ممکن است در برخی نقاط در فضای اطراف سیم‌ها، میدان مغناطیسی صفر شود.

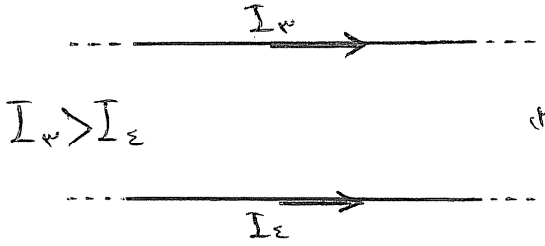
مثال ۶) با توجه به شکل مقابل، اگر $I_1 < I_2$ باشد، بردار میدان مغناطیسی برآیند (حاصل) را در نقطه P به طور تقریبی رسم کنید.



مثال ۷) در هریک از شکل‌های زیر، دو سیم موازی و مستقیم حامل جریان الکتریکی نشان داده شده‌اند. می‌توان خطی را در فضای اطراف این سیم‌ها پیدا کرد به طوری که در تمام نقاط روی این خط میدان مغناطیسی صفر باشد. در هر شکل موقعیت تقریبی این خط را تعیین کنید.



شکل (۱)

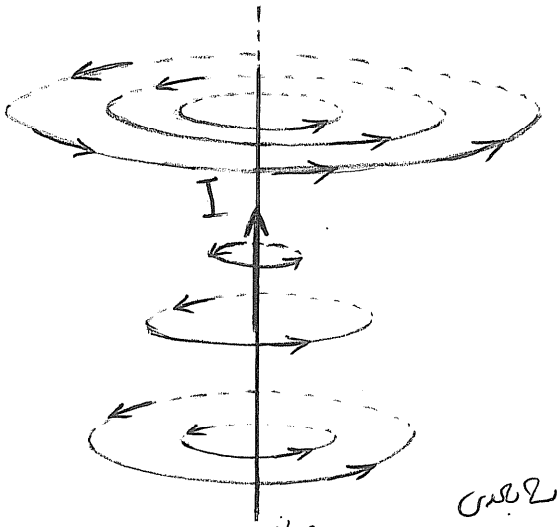


شکل (۲)

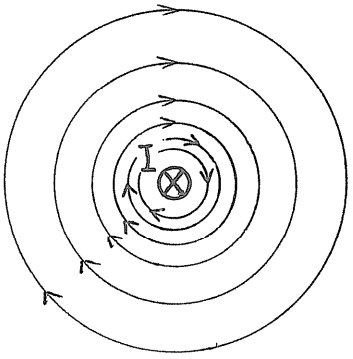
سؤال) در شکل (۱)، اگر $I_1 = I_2$ باشد چه می‌توان گفت؟

سؤال) در شکل (۲)، اگر $I_3 = I_4$ باشد، چه می‌توان گفت؟

نکته مهم: خطوط میدان مغناطیسی در فضای اطراف سیم راست حامل جریان الکتریکی، دایره‌های هم‌مرکزی هستند که سیم از مرکز آن‌ها گذشته و بر سطح آن‌ها عمود است.



شکل سه‌بعدی
برخی از خطوط میدان رسم شده‌اند.



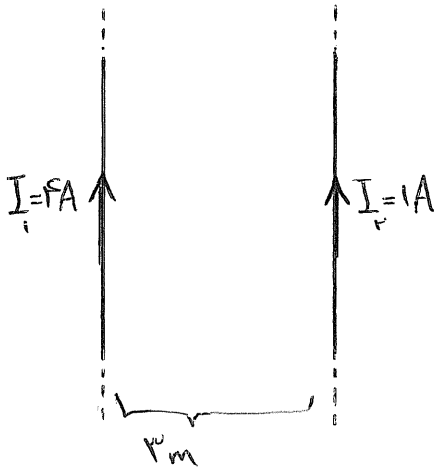
شکل دوبعدی
هرچه با سیم نزدیک‌تر شویم اندازه میدان بزرگ‌تر بوده و تراکم خطوط باید بیشتر باشد.

* چندمسأله کلی (عددی و محاسباتی) ← این قسمت خارج از بحث کتاب درسی بوده و صرفاً برای آشنایی و آمادگی آن‌هاست.

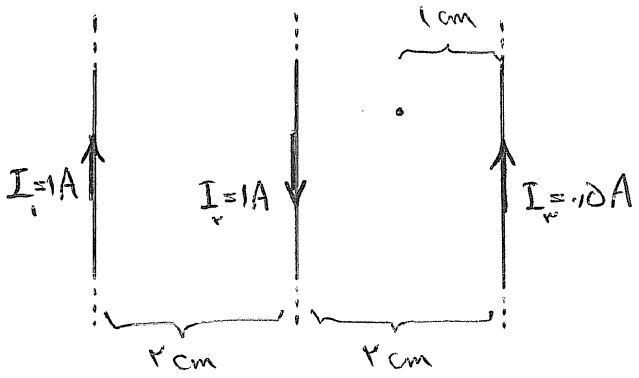
مثال ۸ اندازه میدان مغناطیسی را در نقطه‌ای با فاصله ۱۰ cm از سیم راست و بلند و حامل جریان الکتریکی ۲A بدست آورید.

مثال ۹ سیم مستقیم و بلندی حامل جریان ۱A است. بزرگی میدان مغناطیسی حاصل از این جریان در چه فاصله‌ای از سیم برابر با $0.5\,G$ می‌شود؟

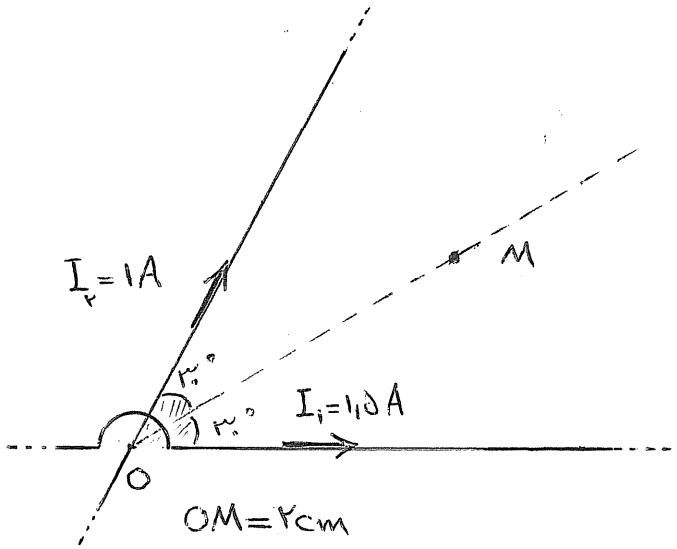
مثال ۱۰ با توجه به شکل زیر و اطلاعات آن، میدان مغناطیسی در چند متری سیم حامل جریان I_2 صفر می‌شود؟

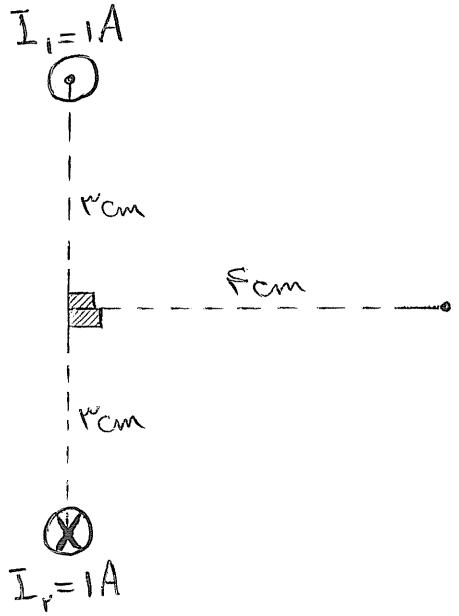


مثال ۱۱: با توجه به شکل زیر، میدان مغناطیسی در نقطه‌ای که داده شده را تعیین کنید (اندازه و جهت)



مثال ۱۲: در هر یک از شکل‌های زیر، بردار میدان مغناطیسی را در نقطه‌ای که داده شده تعیین کنید.

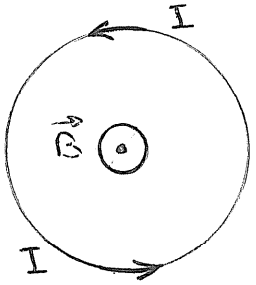




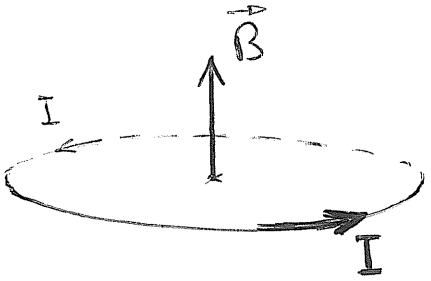
(۲) میدان مغناطیسی حاصل از حلقهٔ حامل جریان (میدان پیچهٔ مسطح)

همان طور که مطرح شد، در اطراف جریان های الکتریکی میدان مغناطیسی وجود خواهد داشت. هنگامی که یک حلقهٔ حامل جریان داشته باشیم نیز، در اطراف آن میدان مغناطیسی ایجاد می شود.

* در حالت خاصی که حلقه دقیقاً دایره ای باشد، میدان آن را از بررسی خطوط میدان و فقط در مرکز حلقه برای محاسبهٔ اندازه، راستا و جهت بردار میدان رابطه و قاعده ای تعریف می کنیم.



دو بعدی

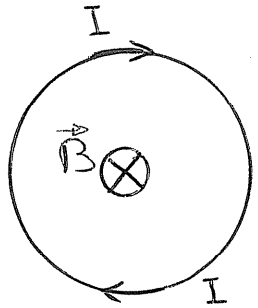


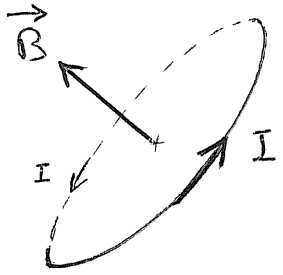
سه بعدی

نکتهٔ مهم (تعیین جهت بردار میدان مغناطیسی در مرکز حلقهٔ حامل جریان)

برای تعیین جهت میدان در مرکز حلقه از قاعدهٔ دست راست به شرح زیر استفاده می کنیم:

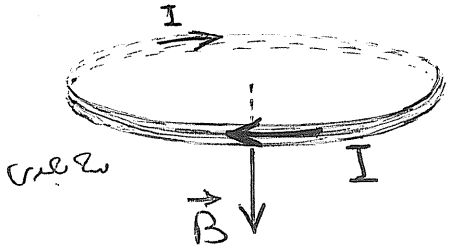
چهار انگشت دست راست را در جهت جریان قرار داده به طوری که کف دست رو به مرکز حلقه باشد، در این وضعیت انگشت باز شده شست، جهت میدان را نشان می دهد.





- تعریف پیچهٔ مسطح: اگر حلقه دارای N دور باشد به طوری که همهٔ دورهای آن به صورت فشرده به هم و تقریباً در یک صفحه (در یک سطح) قرار گیرند، به آن پیچهٔ مسطح می گویند.

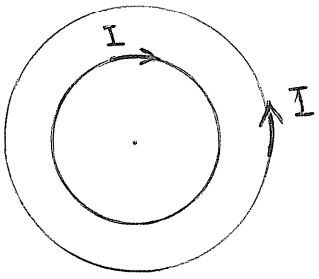
تعیین جهت میدان در مرکز پیچه ها مانند حلقه است.



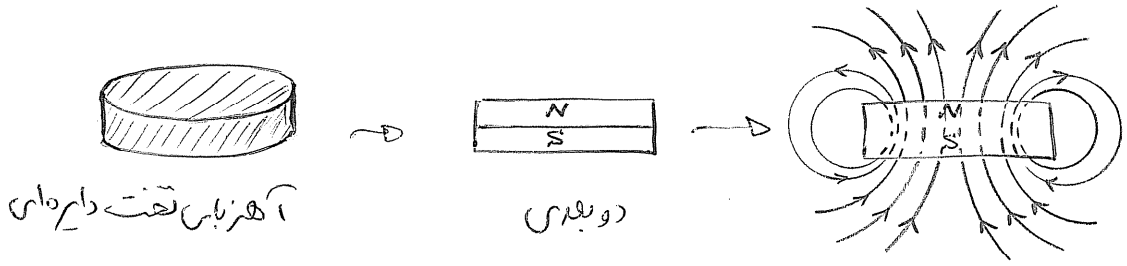
سه بعدی

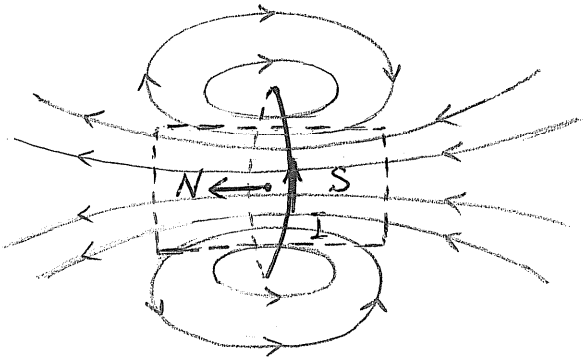
* از پیچه برای ایجاد میدان مغناطیسی در بسیاری از وسایل الکتریکی (برق) استفاده می شود.

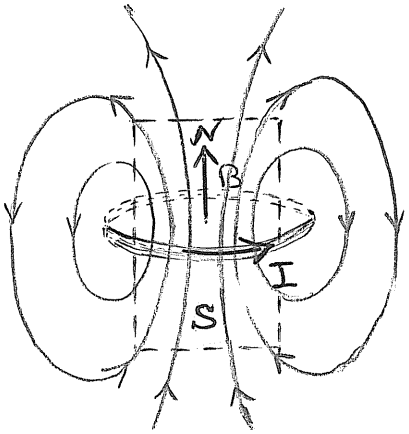
مثال ۱۳: شکل مقابل دو حلقهٔ حامل جریان‌های برابر و هم‌مرکز را نشان می‌دهد. در این لحظه میدان مغناطیسی برآیند در مرکز حلقه‌ها به چه سمتی خواهد بود؟



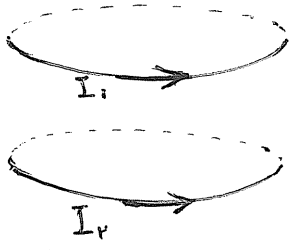
نکته: می‌توان با انجام آزمایشی با طرح خطوط میدان مغناطیسی در فضای اطراف یک پیچهٔ حامل جریان رسید. این طرح خطوط همانند خطوط میدان یک آهربای تخت دایره‌ای است.



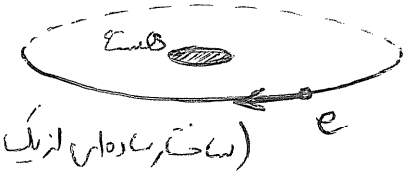




مثال ۱۴: مطابق شکل مقابل دو حلقهٔ حامل جریان موازی هم قرار دارند. نوع نیرویی که دو حلقه به هم وارد می‌کنند را تعیین کنید. (دافعه یا جاذبه)



نکته: با توجه به نتایج تجربی به دست آمده در مورد حلقهٔ حامل جریان، می‌توان گفت اتم‌ها (هسته‌ها) هم می‌توانند شبیه یک آهربای کوچک رفتار کنند و دارای قطب N و S باشند (دو قطبی مغناطیسی)



(ساختار ساده‌ای از یک اتم)

نکته (اندازه میدان در مرکز پیچه)

اندازه میدان مغناطیس در مرکز پیچه مسطح با N حلقه و شعاع R که حامل جریان I باشد، از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$B = \frac{\mu_0}{2}\frac{NI}{R}$$

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \frac{T.m}{A}$ — تراوایی خلأ

N — تعداد حلقه‌ها

I — اندازه جریان عبوری از پیچه (A)

R — شعاع پیچه (m)

B — اندازه میدان در مرکز پیچه (T)

$$N = \frac{L}{2\pi R}$$

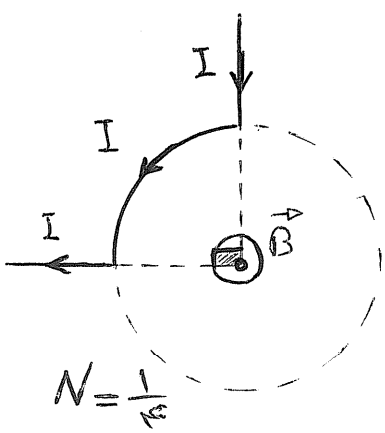
در صورتی که با سیمی به طول L، پیچه‌ای به شعاع R ساخته شود، N یعنی تعداد حلقه‌ها را از رابطه بالا بدست آورید.

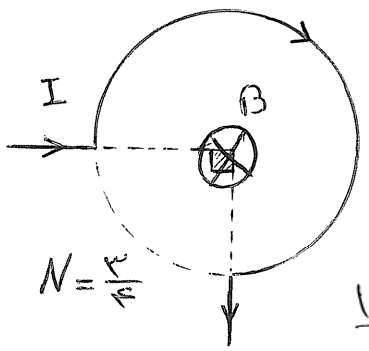
مثال ۱۵ از پیچه مسطحی به شعاع $4{,}28\ cm$ که از 1000 دور سیم نازک ساخته شده است، جریان الکتریکی $0{,}2\ A$ عبور می‌کند. میدان مغناطیس در مرکز پیچه چند تسلا است؟ $(\pi = 3{,}14)$

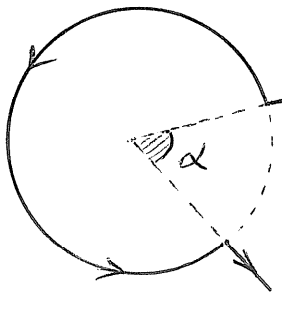
مثال ۱۶ سیمی به طول $1{,}256\ m$ را به شکل پیچه‌ای مسطح با شعاع $5\ cm$ پیچیده‌ایم. اگر از پیچه جریان $2\ A$ عبور دهیم، میدان مغناطیس در مرکز آن چند تسلا خواهد شد؟ $(\pi = 3{,}14)$

نکته (حلقه ناقص)

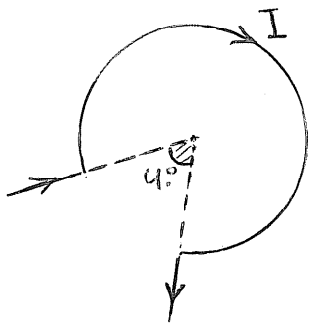
اگر یک حلقه ناقص داشته و بخواهیم میدان مغناطیسی در مرکز آن را محاسبه کنیم، در رابطه $B = \frac{\mu_0}{2}\frac{NI}{R}$ بجای N، کسری از یک حلقه کامل را قرار دهیم.



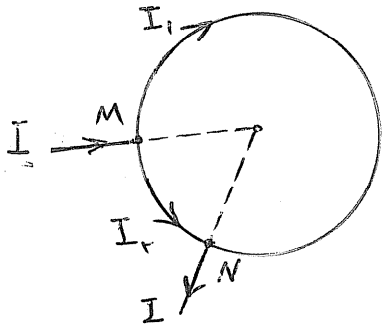




مثال ۱۷: مطابق شکل مقابل حلقهٔ ناقص به شعاع π cm داریم. اگر جریان 0.3 A از این حلقه عبور کند، میدان مغناطیسی در مرکز آن چند تاسلا خواهد شد؟

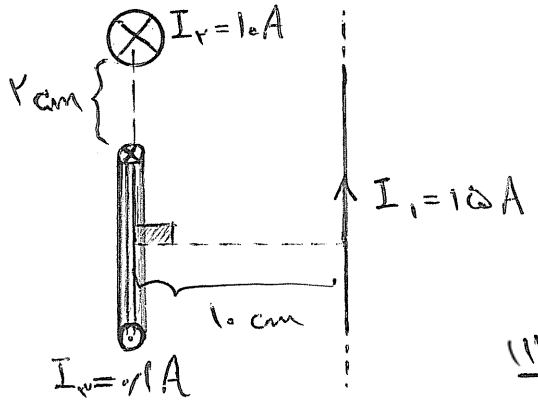


مثال ۱۸: شکل زیر حلقه‌ای را نشان می‌دهد که از دو قطعه سیم مستقیم ساخته شده است. اگر شعاع حلقه 5 cm بوده و جریان 0.4 A از نقطهٔ M وارد و از N خارج شود، میدان مغناطیسی در مرکز حلقه را تعیین کنید. ($\pi=3.14$ و کمان MN بزرگتر پنج برابر کمان MN کوچکتر است)



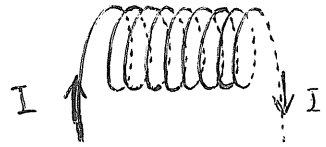
مثال ۱۹: دو حلقهٔ هم‌مرکز به شعاع‌های 10 cm و 5 cm که عمود بر هم بوده و جریان عبوری از آن‌ها یکسان و برابر با 0.5 A است. بزرگی میدان مغناطیسی در مرکز حلقه‌ها چند تاسلا است؟ ($\mu_0=12\times10^{-7}\frac{T.m}{A}$)

مثال ۲۰: با توجه به شکل زیر و اطلاعات آن، میدان مغناطیسی (خالص) در مرکز پیچه را تعیین کنید. ($\pi=3$ ، $R=4$ cm و $N=50$ دور پیچه)



(۳) میدان مغناطیسی حاصل از سیملوله حامل جریان

تعریف سیملوله: چند حلقه سیم که شبیه به یک فنر پیچیده شده باشد سیملوله نام دارد.
(مثل اینکه سیم دور یک لوله پیچیده شده است)

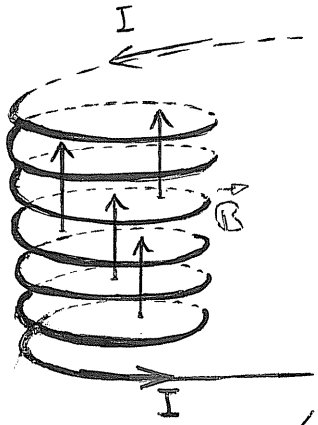


* در فضای اطراف سیملوله حامل جریان هم میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. ما بردار میدان مغناطیسی (اندازه و جهت) را فقط در فضای داخلی سیملوله بررسی می‌کنیم.

نکته: میدان مغناطیسی در فضای داخلی سیملوله تقریباً یکنواخت و هرچه از لوله‌های سیملوله فاصله گرفته و به سمت مرکزی سیملوله نزدیک‌تر شویم، دقت یکنواخت بودن بیشتر است. البته ما در تمام فضای داخلی سیملوله میدان را یکنواخت فرض می‌کنیم. با این شرایط اندازه و جهت میدان در تمام نقاط داخلی یکسان خواهد بود. و خطوط میدان در این فضا، خطوطی موازی، هم‌فاصله و هم‌جهت خواهند بود.

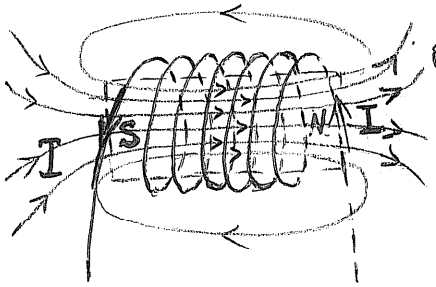
نکته مهم: یکی از راه‌های ایجاد و داشتن میدان مغناطیسی یکنواخت، استفاده از سیملوله حامل جریان الکتریکی می‌باشد.

نکته مهم (تعیین جهت بردار میدان مغناطیسی در داخل سیملوله)



چهار انگشت دست راست را در جهت جریان گرفته، طوری که کف دست به سمت داخل سیملوله باشد، در این صورت انگشت باز شده شست جهت میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد.

نکته: اگر بخواهیم خطوط میدان مغناطیسی در فضای اطراف سیملوله را رسم کنیم، می‌توانیم آن را شبیه به یک آهنربای میله‌ای فرض کرده، پس این کار را انجام دهیم.



(میدان در خارج سیملوله غیریکنواخت بوده و از میدان مغناطیسی داخل آن ضعیف‌تر است)

* سیملوله‌ی آرمانی: اگر حلقه‌های سیملوله خیلی با هم نزدیک باشند و طول آن با قطر حلقه‌ها در مقایسه با طول، بسیار کوچک باشد، سیملوله آرمانی است. یعنی می‌توان میدان مغناطیسی در فضای داخلی آن را با دقت بسیار خوبی یکنواخت در نظر گرفت.

در فضای داخلی سیملوله‌ی آرمانی چون میدان یکنواخت است می‌توان گفت اندازه‌ی میدان در تمام نقاط این فضا برابر بوده و می‌توان اثبات کرد از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$B = k\mu_0 \frac{N}{l} I$$

N: تعداد دورها
I: جریان عبوری (A)
B: اندازه‌ی میدان (T)
k: ضریب ثابت بدون واحد
μ_0: تراوایی مغناطیسی خلا $4\pi \times 10^{-7} \frac{T.m}{A}$
l: طول سیملوله (m)

$$n = \frac{N}{l} \quad \& \quad N = \frac{L}{2\pi R}$$

n: تعداد دور در واحد طول
L: طول سیم‌ای که با آن ساخته شده
R: شعاع سیملوله

$$\Rightarrow B = k\mu_0 nI$$

نکته: با وارد کردن یک استوانه‌ی توپر آهنی (میله‌ی آهن) در داخل سیملوله، میدان مغناطیسی ایجاد شده تقویت می‌شود. با این استوانه‌ها هسته‌ی سیملوله گفته می‌شود، و k ضریب ثابت می‌باشد. اگر داخل سیملوله خلا، یا به طور تقریبی هوا وجود داشته باشد $k = 1$ و برای مواد مغناطیسی مثل آهن k تا چندصد برابر بزرگتر می‌شود.

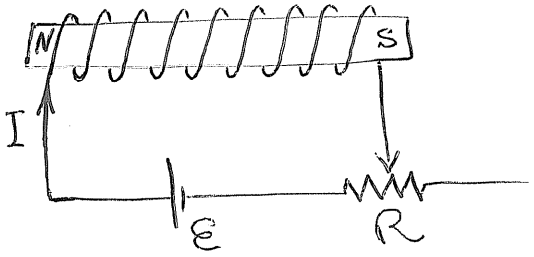
مثال ۲۱) با ۱۸۰m سیم، سیملوله با قطر ۱/۵cm و طول ۳۰cm ساخته شده‌است. اگر سیملوله را آرمانی فرض کنیم و جریان ۵A از آن عبور دهیم، اندازه‌ی میدان مغناطیسی در نقاط داخلی آن چند تسلا خواهد شد؟ ($\pi = 3$)

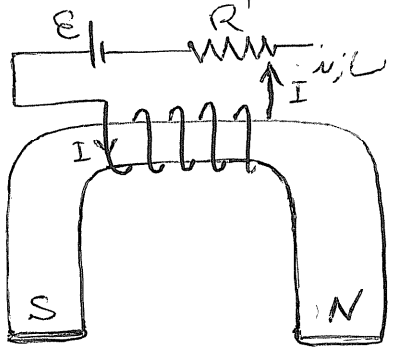
مثال ۲۲: با سیمی به طول ۳۰m و قطر ۲mm، سیملوله ای آرمانی به قطر ۲cm ساخته شده است. اگر جریان ۰٫۶A از این سیملوله عبور کند، میدان در نقاط داخل آن چند گاوس خواهد شد؟ ($\pi=3$)

نکته (آهنربای الکتریکی)

وقتی از یک سیملوله جریان الکتریکی عبور میکند، در آن میدان مغناطیسی ایجاد میشود. حال اگر هسته‌ای که قابلیت القای مغناطیسی دائمی باشد را درون آن قرار دهیم، این خاصیت در آن القا شده و تبدیل به آهنربا میشود. به مجموعهٔ سیملوله و هستهٔ داخل آن آهنربای الکتریکی میگویند که البته نام دیگر آن آهنربای غیرذاتی است.

* معمولاً از مواد فرومغناطیس نرم (آهن، نیکل و کبالت خالص باشد) هستهٔ آهنربای غیرذاتی (آهنربای الکتریکی) را می‌سازند.





مثال ۲۳: چه مواردی در قدرت یک آهنربای الکتریکی (غیرذاتی) تأثیر دارد؟

۱- تعداد دور در واحد سیملوله، که هرچه بیشتر باشد آهنربا قوی‌تر خواهد بود.

۲- شدت جریان عبوری از سیملوله، که هرچه بیشتر باشد، آهنربا قوی‌تر میشود.

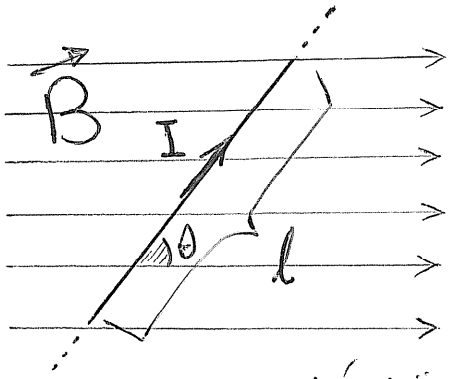
۳- شکل و جنس هستهٔ فرومغناطیس نرمی که فضای داخل سیملوله را پر میکند.

بخش سوم: نیروهای مغناطیسی

در بخش‌های قبلی مطرح شد که وقتی یک ماده‌ٔ مغناطیسی، در میدان مغناطیسی قرار گیرد، به آن نیرو وارد می‌شود. در این بخش می‌خواهیم تأثیر میدان مغناطیسی بر ذرات باردار متحرک را بررسی کنیم. می‌توان گفت بر ذرات باردار متحرک و در نتیجه سیم‌های حامل جریان الکتریکی که در میدان مغناطیسی قرار داشته باشند، نیرو وارد می‌شود.

(۱) نیروی وارد بر سیم حامل جریان الکتریکی در میدان مغناطیسی

از طریق انجام آزمایش و به صورت تجربی می‌توان دریافت که به سیم حامل جریان الکتریکی در میدان مغناطیسی نیرو وارد می‌شود. (یک دانشمند انگلیسی به نام اورستد برای اولین بار به این نتیجه رسید. وجود میدان مغناطیسی در اطراف جریان‌های الکتریکی هم از اکتشفات اورستد بود. آزمایش‌های ۲ و ۳ از فصل سوم کتاب درسی)



با توجه به نتایج به دست آمده از انجام آزمایش‌ها می‌توان گفت نیروی مغناطیسی وارد بر سیم مستقیم حامل جریان از طرف میدان مغناطیسی یکنواخت از رابطه‌ٔ زیر تعیین می‌شود:

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}$$ رابطه‌ٔ برداری

$$F = I\,l\,B\sin\theta$$

- F: اندازه‌ٔ نیروی مغناطیسی (N)
- I: اندازه‌ٔ جریان عبوری از سیم (A)
- l: طول آن قسمت از سیم که در میدان قرار داده می‌شود (m)
- B: اندازه‌ٔ میدان مغناطیسی یکنواخت (T)
- θ: زاویه‌ٔ بین خطوط میدان و جهت جریان الکتریکی

* اندازه‌ٔ این نیرو از رابطه‌ٔ مقابل محاسبه می‌شود:

* جهت نیرو با قاعده‌ٔ دست راست به شرح زیر تعیین می‌شود:

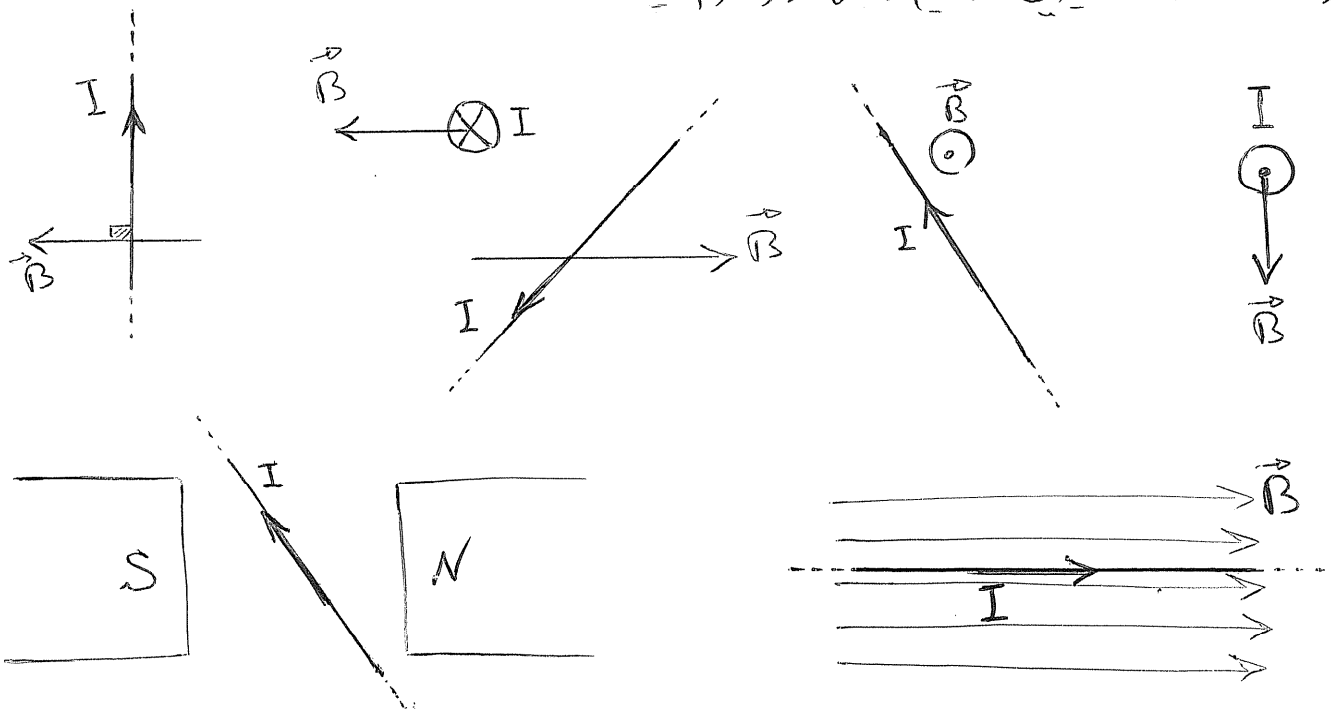
در رابطه‌ای که سیم حامل جریان بر خطوط میدان مغناطیسی عمود است، چهار انگشت دست راست را در جهت جریان قرار داده طوری که کف دست رو به میدان باشد. در این صورت انگشت باز شده‌ٔ شست، جهت نیرو را نشان می‌دهد.

اگر سیم بر خطوط میدان عمود نبود، یکی از آن‌ها را بر یکدیگر عمود فرض کرده، سپس قاعده را پیاده می‌کنیم.

نکته: باید دقت داشت که هر سیمی با شکل دلخواه که حامل جریان الکتریکی باشد و در میدان مغناطیسی قرار گیرد، از طرف میدان نیروی مغناطیسی وارد می‌شود اما رابطه و توضیحاتی که مطرح شد، برای حالت خاصی است که سیم حامل جریان، یک سیم مستقیم بوده و در میدان مغناطیسی یکنواخت قرار داشته باشد.

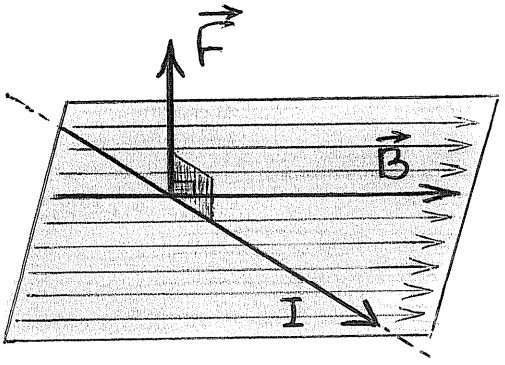
مثال ۲۴: یک سیم حامل جریان الکتریکی، در یک میدان مغناطیسی یکنواخت و به بزرگی $0.5\,G$ در راستای قرار دارد که جهت جریان آن با خطوط میدان زاویهٔ 37° می‌سازد. اگر جریان عبوری از سیم $4A$ باشد، نیروی وارد بر واحد طول سیم (یک متر از آن) را حساب کنید.

مثال ۲۵: در هر یک از شکل‌های زیر، سیم حامل جریانی نشان داده شده که در یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد. نیرویی که به سیم وارد می‌شود را رسم کنید.



نکته مهم: نیرویی که از طرف میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان وارد می‌شود، هم بر خطوط میدان و هم بر سیم عمود است.

با توجه به این نکته بردار نیرو بر صفحهٔ گذرنده از بردار میدان و سیم حامل جریان عمود است.



نکته: طبق رابطه $F=IlB\sin\theta$ که اندازه نیروی وارد بر سیم حامل جریان در یک میدان مغناطیسی یکنواخت را نشان می‌دهد، می‌توان گفت:

۱) اگر $\theta=0$ یا $\theta=180^\circ$ ← زمانی که سیم در امتداد یا راستای خطوط میدان باشد $\rightarrow F=F_{min}=0$

۲) اگر $\theta=90^\circ$ ← یعنی سیم عمود بر خطوط میدان باشد. $\rightarrow F=F_{max}=IlB$

$$\Rightarrow 0\leq F\leq IlB$$

بنابراین هنگامی که یک سیم در میان مغناطیس، نیروی مغناطیسی وارد می‌شود که اولاً حامل جریان الکتریکی باشد (حرکت هدفمند الکترون‌ها) ثانیاً در راستای خطوط میدان وارد نگردد ($\theta\neq0$ یا $\theta\neq180^\circ$)

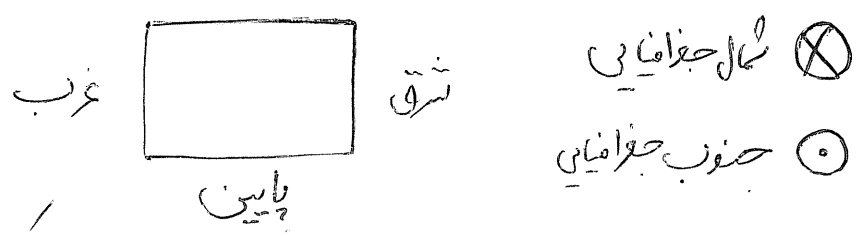
مثال ۲۶) سیملوله‌ای در نظر بگیرید که تعداد دور در واحد طول آن ۴۰۰ بوده و حامل جریان ۰٫۵A باشد. اگر سیم حامل جریانی از فضای داخلی این سیملوله عبور کرده باشد، در هریک از حالت‌های زیر اندازه نیروی مغناطیسی وارد بر آن چند نیوتون می‌شود؟ ($\mu_0=12\times10^{-7}\frac{V}{A}\frac{T.m}{A}$)

الف) جهت جریان سیم با محور سیملوله زاویه 30° بسازد.

ب) سیم در راستای محور سیملوله قرار گرفته باشد.

نکته: هنگامی که در طرح یک سؤال جهت‌های جغرافیایی مطرح و حرف از جهت بالا و پایین در راستای قائم زده شود باید جهت یک کمیت که مورد سؤال است نیز به طریقی صورت بگیرد.

برای تحلیل این مسائل می‌توان از شکل زیر استفاده کرد:



مثال ۲۷) سیم راستی قائم از نقطه‌ای آویخته شده است و جریانی از پایین به بالا از آن عبور می‌کند. نیروی وارد بر سیم از طرف میدان مغناطیسی کره زمین به کدام سمت است؟

الف) جنوب ب) شمال ج) شرق د) غرب

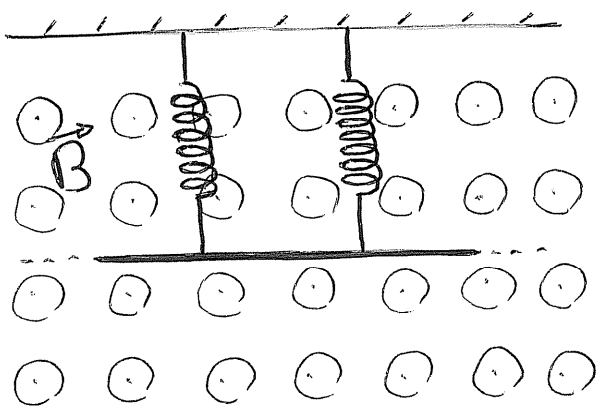
مثال ۲۸) سیم مستقیم و حامل جریان، در یک میدان مغناطیسی یکنواخت افقی که جهت آن از شمال به جنوب است قرار دارد. جهت نیروی وارد بر سیم را در هر یک از حالت‌های زیر تعیین کرده و بگویید در کدام حالت نیرو بیشینه است؟

الف) سیم در راستای غرب ـ شرق بوده و جریان عبوری از آن از غرب به شرق باشد.

ب) سیم در راستای شمال ـ جنوب بوده و جریان از شمال به جنوب باشد.

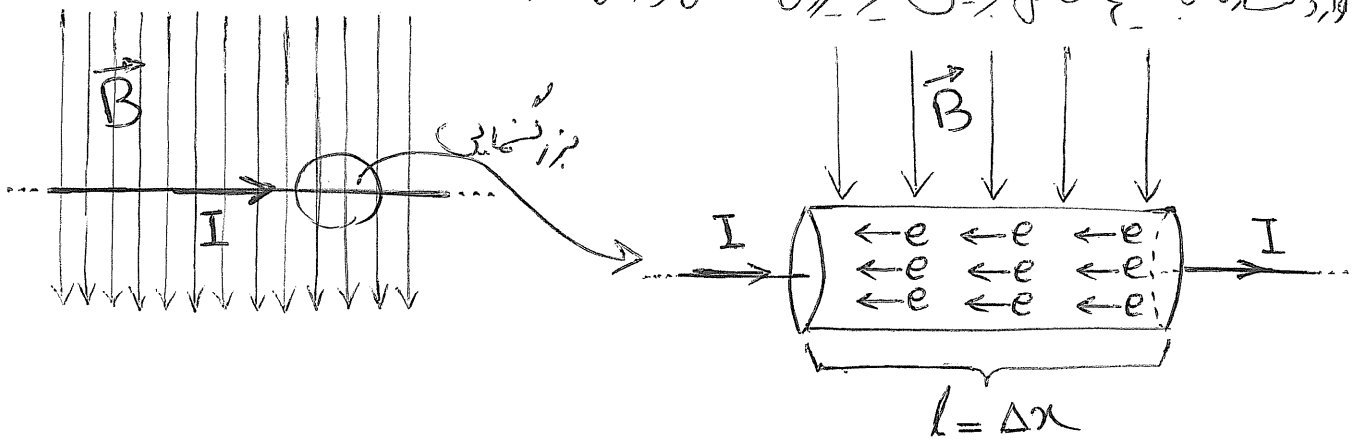
مثال ۲۹) در قسمتی از دیوار یک خانه، یک سیم مستقیم با طول ۲٫۵m قرار دارد که در بازه‌های زمانی معین، حامل جریان ۱٫۵A از شرق به غرب می‌باشد. اگر بزرگی میدان مغناطیسی زمین در محل قرارگیری سیم ۰٫۵G باشد، اندازه و جهت نیروی مغناطیسی وارد بر سیم را تعیین کنید.

مثال ۳۰) مطابق شکل زیر، سیمی با چگالی خطی $0.2\frac{gr}{m}$ در حالت افقی به دو فنر متصل بوده و آویزان است. فرض کنید شدت میدان مغناطیسی یکنواخت در اطراف سیم ۰٫۰۴T باشد. اندازه و جهت جریانی را تعیین کنید که اگر از سیم عبور کند، فنرها تغییر طول نداشته باشند.



(۲) نیروی وارد بر ذره‌ٔ باردار متحرک در میدان مغناطیسی

همان طور که بحث شد، به صورت تجربی و با انجام آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که وقتی یک سیم در میان مغناطیس قرار گیرد، در صورتی که جریان الکتریکی از آن عبور کند، از طرف میدان به آن نیروی مغناطیس وارد می‌شود. شرط وارد شدن نیرو به سیم، برقراری جریان و شرط برقراری جریان، حرکت هماهنگ الکترون های آزاد در سیم است. پس در واقع باید گفت بعد از برقراری جریان از آن جا که تمام الکترون های آزاد به صورت هماهنگ و در یک جهت نیرو وارد شده به سیم حامل جریان نیز نیروی خالص وارد می‌شود.



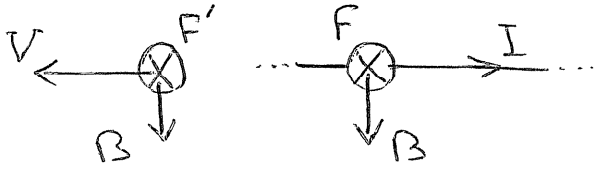
نیروی وارد بر l متر (Δx) از سیم حامل جریان I

$$F = IlB\sin\theta \xrightarrow{l=\Delta x} F = I\Delta x B\sin\theta \xrightarrow{\Delta x = vt} F = Ivt B\sin\theta$$

$$\xrightarrow{q=It} F = qvB\sin\theta \xrightarrow[q=ne]{F=nF'} nF' = nevB\sin\theta$$

$$\xrightarrow{\text{نیروی وارد بر یک الکترون}} F' = evB\sin\theta$$

v: تندی حرکت الکترون



به طور کلی می‌توان گفت به یک ذره‌ٔ باردار متحرک با بار الکتریکی q و تندی حرکت v در میدان مغناطیسی از طرف میدان نیرو وارد می‌شود. که در میدان مغناطیسی یکنواخت این نیرو از رابطه‌ٔ زیر تعیین می‌شود:

$$\vec{F} = q\vec{v}\times\vec{B}$$

* اگر ذرهٔ باردار q با تندی v وارد یک میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ شود، به طوری که راستای حرکت آن یا به عبارتی بردار سرعت آن ($\vec{v}$) با خطوط میدان زاویهٔ θ بسازد، اندازهٔ نیروی مغناطیسی وارد بر آن از رابطهٔ زیر قابل محاسبه است:

$$F = qvB\sin\theta$$

- F: اندازهٔ نیرو (N)
- q: اندازهٔ بار ذره (C)
- v: تندی حرکت ذره (m/s)
- B: اندازهٔ میدان مغناطیسی یکنواخت (T)
- θ: زاویهٔ بین بردار سرعت و خطوط میدان

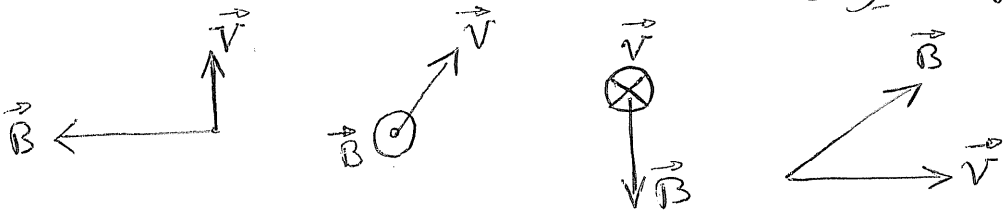
* جهت نیروی وارد شده با قاعدهٔ دست راست به شرح زیر تعیین می‌شود:

اگر بار ذرهٔ متحرک مثبت بوده و بردار سرعت بر خطوط میدان عمود باشد چهار انگشت دست راست را جهت سرعت گرفته به طوری که کف دست به طرف میدان مغناطیسی باشد، در این صورت انگشت باز شدهٔ شست جهت نیرو را نشان می‌دهد.

- اگر بردار سرعت و میدان بر هم عمود نبودند (حالت کلی) یکی از آن‌ها را بر دیگری عمود فرض کرد.
- اگر ذره دارای بار منفی باشد، می‌توان قاعده را با دست چپ بکار برد.

مثال ۳۱) در هر یک از شکل‌های زیر، نیروی مغناطیسی وارد بر ذرهٔ باردار متحرک از طرف میدان را رسم کنید.

الف) شکل‌های مقابل مربوط به ذره‌ای با بار $q+$ است.



ب) شکل‌های مقابل مربوط به ذره‌ای با بار $q-$ است.

مثال ۳۲) بر الکترونی که با زاویهٔ 53° نسبت به یک میدان مغناطیسی یکنواخت به بزرگی $3.5\,G$ وارد میدان می‌شود، نیرویی به اندازهٔ $5.6\times10^{-15}\,N$ وارد شده است. تندی حرکت این الکترون را بیابید. ($e = 1.6\times10^{-19}\,C$)

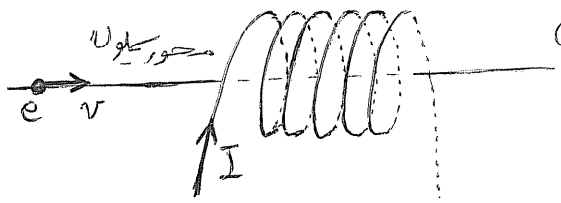
نکته: با توجه به رابطه $F = qVB\sin\theta$ که اندازه نیروی وارد بر ذره باردار متحرک در یک میدان مغناطیسی از آن بدست می‌آید، می‌توان گفت:

۱. اگر ذره در میدان مغناطیسی حرکت نداشته باشد ($V=0$) یا در صورت حرکت در راستای خطوط میدان حرکت کند ($\theta=0$ یا $\theta=180^\circ$) میدان مغناطیسی بر آن اثر نکرده و نیروی مغناطیسی بر آن وارد نمی‌شود.

۲. اگر یک ذره باردار متحرک به صورت عمود بر خطوط میدان ($\theta=90^\circ$) وارد آن شود بزرگترین نیروی ممکن بر آن وارد می‌شود.

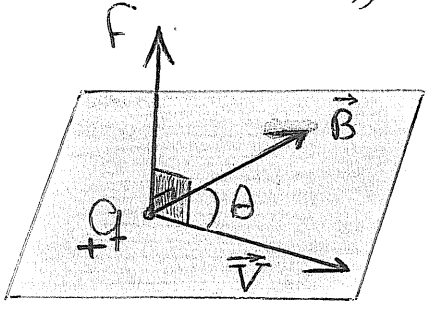
$$\left.\begin{array}{l}\theta=0^\circ \text{ یا } 180^\circ \longrightarrow F=F_{min}=0\\ \theta=90^\circ \longrightarrow F=F_{max}=qVB\end{array}\right\} \Rightarrow 0 \le F \le qVB$$

مثال ۳۳ با توجه به شکل مقابل، سیملوله حامل جریان چه تأثیری در حرکت الکترون دارد؟



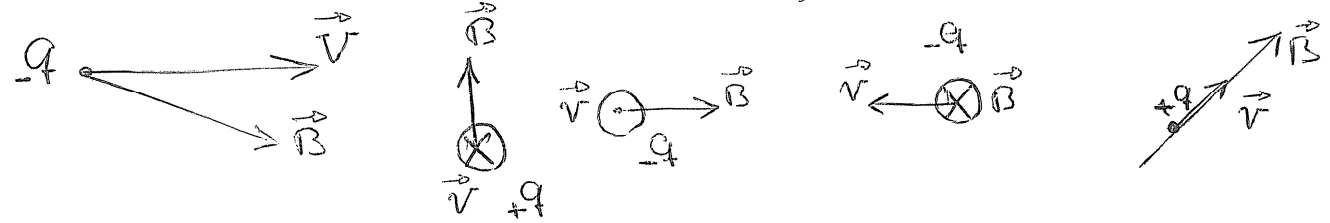
نکته: برای بردارها دو نوع ضرب تعریف می‌شود. ضرب داخلی و ضرب خارجی، که هرکدام توضیحات خاص خود را دارند و در بعضی از روابط فیزیک می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. در مورد این دو نوع ضرب در درس ریاضی بحث خواهد شد. فقط اینکه در مورد تعیین جهت نیروی مغناطیسی وارد بر ذره باردار متحرک از یکی از خواص ضرب خارجی استفاده کرد:

حاصل ضرب خارجی دو بردار $\vec{a}$ و $\vec{b}$ یک بردار مانند $\vec{c}$ است و اگر $\vec{c}=\vec{a}\times\vec{b}$ برای تعیین جهت $\vec{c}$ باید چهار انگشت دست راست را در جهت بردار اول یعنی $\vec{a}$ گرفته و به طرف بردار دوم یعنی $\vec{b}$ بچرخانیم که در این صورت انگشت باز شده شست جهت بردار حاصل ضرب یعنی $\vec{c}$ را نشان می‌دهد. این بردار بر $\vec{a}$ و $\vec{b}$ یا به عبارتی بر صفحه گذرنده از آن‌ها عمود است.

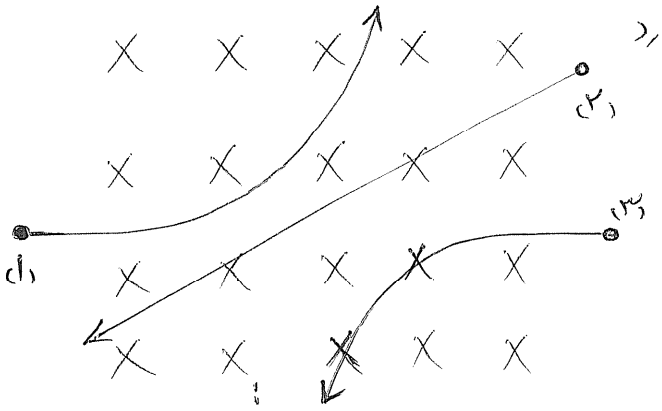


طبق توضیحات مطرح شده و اینکه $\vec{F}=q\vec{V}\times\vec{B}$ است، می‌توان گفت بردار نیروی $\vec{F}$ بر بردارهای سرعت و میدان یا به عبارتی بر صفحه گذرنده از آن‌ها عمود است.

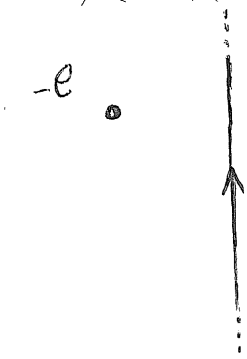
مثال ۳۴ در هریک از شکل های زیر، بردار نیروی مغناطیسی وارد بر ذرهٔ باردار متحرک را رسم کنید.



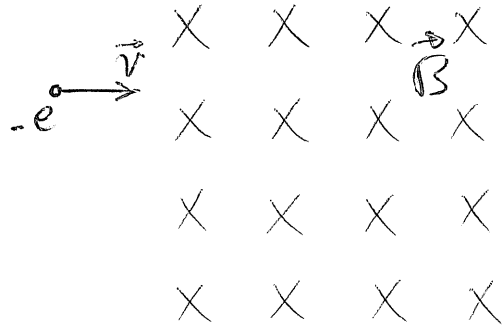
مثال ۳۵ شکل مقابل، مسیر حرکت سه ذره که وارد میدان مغناطیسی باردار شده را نشان می دهد. نوع بار این ذرات را تعیین کنید.



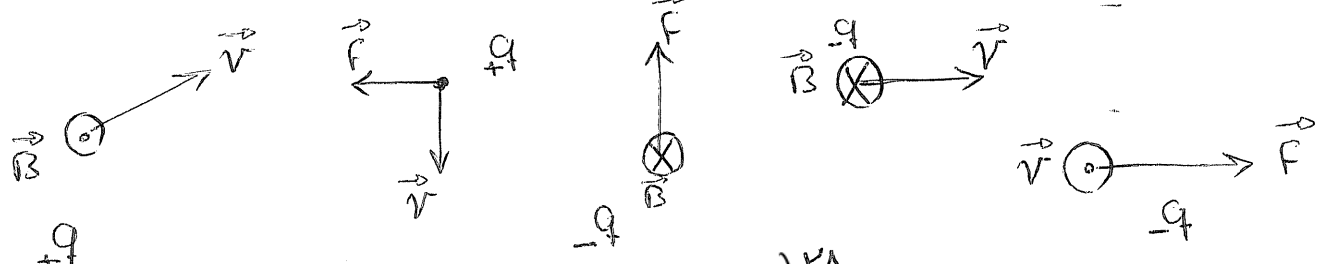
مثال ۳۶ مسیر حرکت الکترون در شکل مقابل را رسم کنید. فرض کنید الکترون درون رابطه حامل جریان از حال سکون رها شده است.



مثال ۳۷ شکل زیر الکترون را نشان می دهد که با سرعت $3\times10^{3}\ m/s$ وارد یک میدان مغناطیسی یکنواخت با شدت 4000 G می شود. الف) اندازه و جهت نیروی مغناطیسی وارد بر الکترون ب) مسیر تقریبی حرکت آن را تعیین کنید.



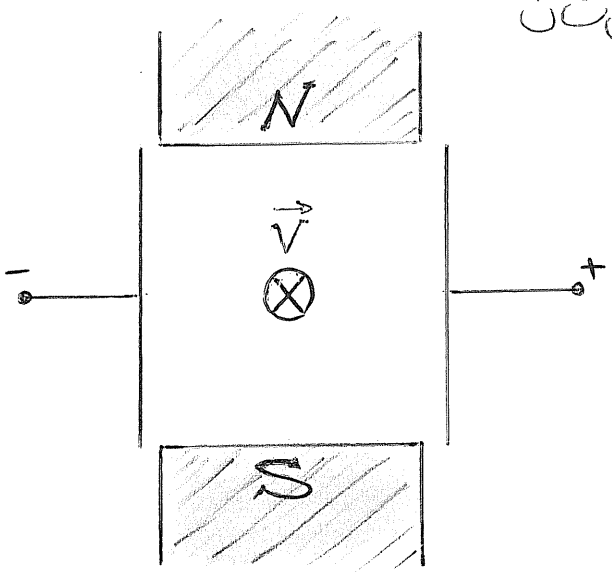
مثال ۳۸ در هریک از شکل های زیر، دو بردار از سه بردار $\vec{V}$، $\vec{B}$ و $\vec{F}$ که در رابطه با ذرهٔ باردار متحرک در یک میدان مغناطیسی حاصل طستند، رسم شده است. جهت بردار دیگر را تعیین کنید.



مثال ۳۹ فضایی را در نظر بگیرید که در آن یک میدان مغناطیسی یکنواخت با اندازه‌ی B در راستای قائم، به طرف بالا و یک میدان الکتریکی با اندازه‌ی E در راستای افق به طرف شرق وجود دارد. ذره‌ای با بار $+q$ با چه سرعتی (تندی و جهت) وارد این فضا شود تا بتواند بدون انحراف از آن خارج شود؟ (جرم ذره را ناچیز فرض کنید)

مثال ۴۰ با توجه به شکل زیر، اگر در فضای نشان داده شده، شدت میدان الکتریکی $E=10^4 \frac{N}{C}$، شدت میدان مغناطیسی $B=0.1\,T$ و شدت میدان گرانش $g=10\,m/s^2$ باشد و ذره‌ای با بار الکتریکی $q=+2\mu C$ و جرم $m=3gr$ با تندی $V=10^6\,m/s$ به صورت درون سو وارد این فضا شود، اندازه‌ی برآیند نیروهای وارد بر ذره (نیروی خالص) چند نیوتون خواهد شد؟

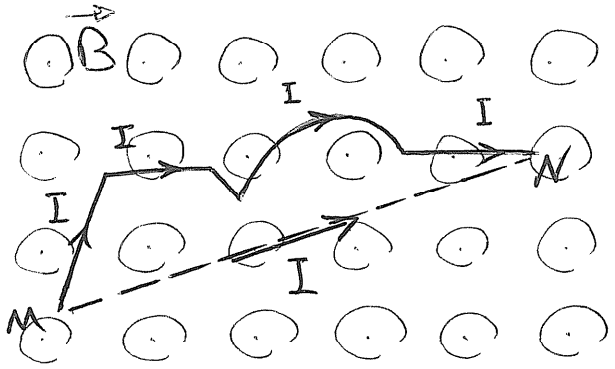
(فرض کنید ذره در راستای افق در حال حرکت بوده و در فضای نشان داده شده، میدان‌ها یکنواخت باشند)



نکته: شکل زیر سیم حامل جریان الکتریکی در یک میدان مغناطیسی یکنواخت را نشان می‌دهد.

نیروی وارد بر کل سیم، با نیروی وارد بر سیمی فرضی که ابتدا و انتهای سیم اصلی را به هم وصل می‌کند برابر است.

و در صورت امکان می‌توان نیروی وارد بر این سیم فرضی را حساب کرد.



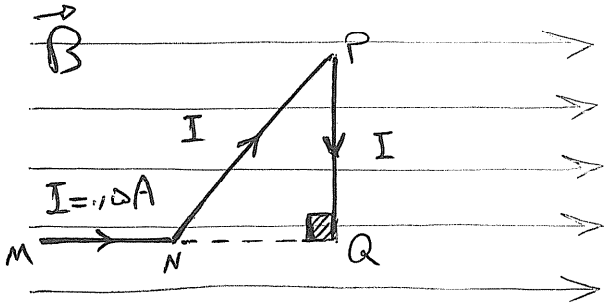
برآیند نیروهای وارد بر تک تک قسمت‌های سیم = نیروی وارد بر کل سیم

یا

نیروی وارد بر سیم فرضی MN = نیروی وارد بر کل سیم

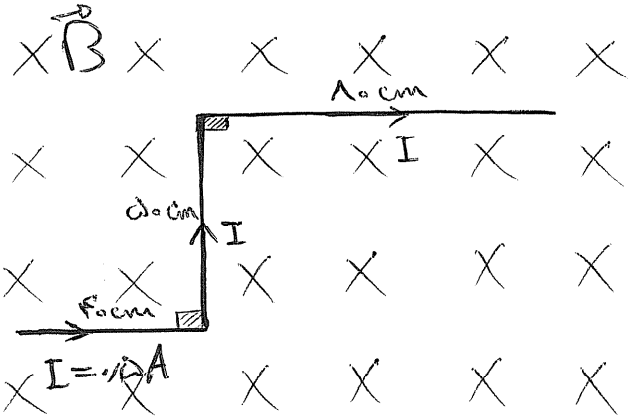
* باید توجه داشت در صورتی که بتوان اندازه‌ی فرضی MN و زاویه‌ای که با میدان مغناطیسی می‌سازد را حساب کرد، یادآوری استفاده از این نکته مناسب است.

مثال ۴۱: با توجه به شکل زیر، نیروی مغناطیسی وارد بر کل سیم را بدست آورید.



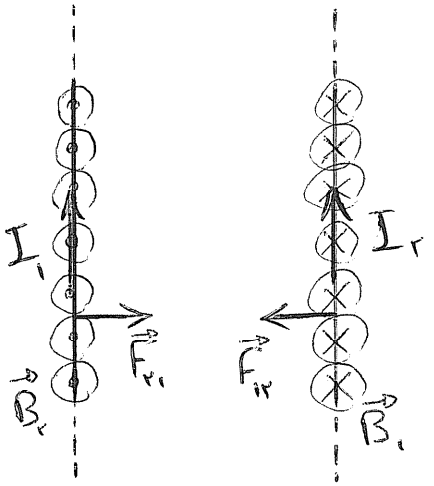
$(B=۲۰G \;,\; MN=۱m \;,\; NP=۲m \;,\; PQ=\sqrt{۳}m)$

مثال ۴۲: قطعه سیم مطابق شکل زیر در یک میدان مغناطیسی یکنواخت به بزرگی ۲۰۰G قرار دارد، نیروی مغناطیسی وارد بر کل سیم را محاسبه کنید. $(I=۱۰A)$



نکته مهم (بررسی نیروی بین دو سیم موازی حامل جریان)

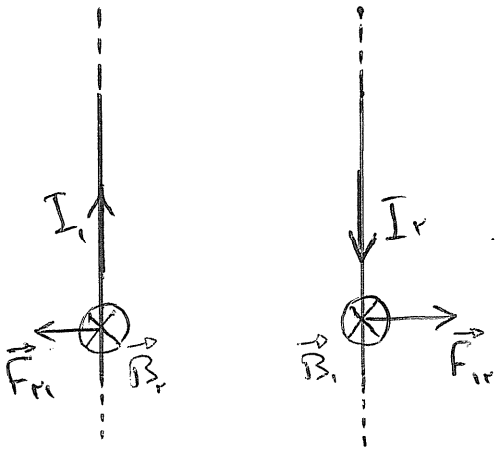
حالت اول) جریان ها هم جهت باشند.



در این حالت سیم ها با هم نیروی جاذبه وارد می کنند و طبق قانون عمل و عکس العمل میتوان ثابت کرد که:

$$|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}|$$

حالت دوم) جریان سیم ها در خلاف جهت هم باشد.



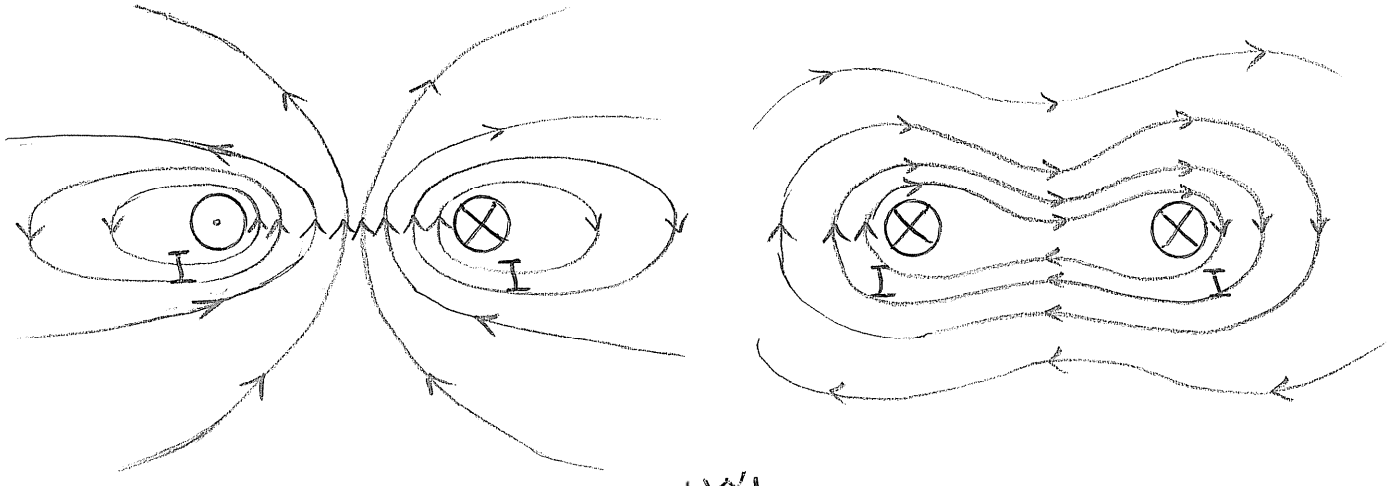
در این حالت سیم ها با هم نیروی دافعه وارد می کنند که باز هم می توان ثابت کرد که نیروی که سیم ها با هم وارد می کنند عمل و عکس العمل اند.

$$|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}|$$

* بنابراین اگر جریان ها هم جهت باشند، نیرو از نوع جاذبه (رباینده) و اگر جریان ها در خلاف جهت هم باشند، نیرو از نوع دافعه (رانشی) خواهد بود.

نکته (طرح خطوط میدان در اطراف دو سیم موازی حامل جریان)

طرح خطوط در شکل های زیر مشخص شده است. این طرح ها به صورت تجربی بدست آمده اند.

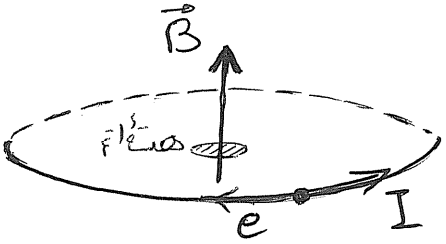


بخش چهارم : بررسی مواد مغناطیسی

با توجه به مباحثی که در بخش های قبلی مطرح شد، می توان دلیل و توجیحی برای خاصیت آهربایی یا مغناطیسی مواد مطرح کرد. به طور کلی می توان گفت آن چه باعث ایجاد میدان مغناطیسی در فضای اطراف سیم های حامل جریان و آهربا ها می شود، حرکت الکترون ها است. یعنی با توجه به نتایج تجربی بدست آمده از حلقه حامل جریان، که در نتیجه حرکت الکترون ها است، و همان دلیل رفتار مغناطیسی آهربا ها یا ایجاد خاصیت مغناطیسی در برخی مواد مثل آهن یا آلومینیم (با شدت زیاد یا کم) را توضیح داد و اینکه چرا در برخی مواد مثل پلاستیک نمی توان خاصیت مغناطیسی را القا کرد.

(۱) تعریف مواد مغناطیسی

شکل زیر یکی از الکترون های یک اتم را نشان می دهد که در فضای اطراف هسته در حال دوران است. دوران الکترون باعث ایجاد یک میدان مغناطیسی در مرکز اتم می شود.



حال اگر جهت دوران الکترون های دیگر با این الکترون ها هماهنگ باشد، این اتم در کل یک میدان مغناطیسی خالص خواهد داشت و می توان آن را مثل یک آهربای کوچک تصور کرد. اتم های مواد مغناطیسی چنین حالتی دارند. اما اگر جهت دوران الکترون ها هماهنگ نباشد یا میدان مغناطیسی اتم صفر می شود یا به قدری خیلی ضعیف خواهد بود. اتم های موادی مثل پلاستیک اینگونه هستند.

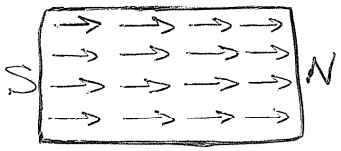
* تعریف مواد مغناطیسی: موادی که اتم ها یا مولکول های آن ها خود یک آهربای کوچک بوده و دارای خاصیت مغناطیسی باشند.

* تعریف دوقطبی مغناطیسی: کوچکترین جزء سازنده مواد مغناطیسی (اتم ها) هرکدام مثل یک آهربای کوچک رفتار می کنند و به آن ها دوقطبی مغناطیسی گفته می شود.

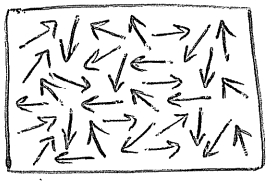
نماد دوقطبی مغناطیسی: S → N

۲) دسته بندی مواد مغناطیسی

مواد مغناطیس را با توجه به نحوه ٔ قرارگیری و جهت گیری دوقطبی های آن ها تقسیم بندی می کنند. الف) آهنرباها ب) پارامغناطیس ها پ) دیامغناطیس ها ت) فرومغناطیس ها



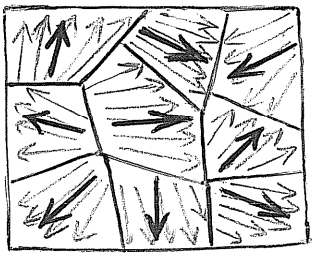
الف) آهنرباها: در این مواد اثر ٔ دوقطبی های مغناطیس به صورت ذاتی هم جهت هستند. شکل مقابل قسمتی از یک آهنربا را نشان می دهد.



ب) مواد پارامغناطیس: این مواد دارای دوقطبی مغناطیس هستند اما دوقطبی های آن ها کاملاً نامنظم و اصطلاحاً کاتوره ای قرار گرفته اند. مثل: آلومینیم، اورانیوم، پلاتین و...

* در مواد پارامغناطیس در حضور یک میدان مغناطیسی قوی یک خاصیت مغناطیسی ضعیف و موقت القا می شود.

پ) مواد دیامغناطیس: این مواد دارای دوقطبی مغناطیسی ذاتی و طبیعی نیست، اما در حضور میدان یعنی وقتی در میدان مغناطیسی قرار گیرند، اثر میدان بر آن ها باعث می شود تا اتم های آن تبدیل به دوقطبی مغناطیسی شوند. پس در واقع این مواد در حضور میدان مغناطیسی یک ماده ٔ مغناطیس هستند. مثال ها: مس، نقره، برنج و...



ت) مواد فرومغناطیس: برای این مواد می توان حوزه های مغناطیسی فرض کرد، به طوری که در هر حوزه دوقطبی ها تقریباً هم جهت بوده ولی جهت گیری دوقطبی ها در حوزه های مختلف متفاوت باشد.

همانطور که یک فرومغناطیس در میدان مغناطیسی قرار می گیرد مرز حوزه هایی که با میدان هم جهت اند بزرگتر می شود. در واقع این حوزه دوقطبی های موجود در مرز حوزه های دیگر را با خود هم جهت می کنند و بدین ترتیب در ماده خاصیت مغناطیسی القا می شود. مثال ها: آهن، نیکل، کبالت و آلیاژهای آن ها

* مواد فرومغناطیس خود به دو نوع فرومغناطیس نرم و سخت تقسیم می‌شوند.

فرومغناطیس نرم: آهن، نیکل و کبالت خالص

فرومغناطیس سخت: آلیاژهای آهن، نیکل و کبالت مثل فولاد (آهن به اضافه ۲ درصد کربن)

۱) فرومغناطیس نرم: این مواد به راحتی و حتی در یک میدان مغناطیسی ضعیف هم تبدیل به آهربا می‌شوند. اما در صورت حذف میدان خارجی، خیلی سریع خاصیت مغناطیسی القا شده در آن‌ها از بین می‌رود.

از مواد فرومغناطیس نرم برای ساختن آهربای الکتریکی (آهربای غیر دائم) استفاده می‌شود.

۲- فرومغناطیس سخت: برای اینکه خاصیت مغناطیسی در آن‌ها القا شده و تبدیل به آهربا شوند، نیاز به یک میدان مغناطیسی قوی دارند. اما در صورت حذف میدان تا مدت زیادی خاصیت القا شده در آن‌ها باقی مانده و آهربا می‌مانند.

از مواد فرومغناطیس سخت برای ساختن آهربای دائمی استفاده می‌شود.

نکته: در القای خاصیت مغناطیسی در مواد فرومغناطیس یک حالت اشباع یا به عبارتی بیشینه وجود دارد. حالت اشباع زمانی رخ می‌دهد که در حضور میدان مغناطیسی خارجی (و با قوی) حوزه‌ها هم جهت با میدان به بیشترین مقدار خود برسد.

فصل چهارم : القای الکترومغناطیس و جریان متناوب

مقدمه : بار الکتریکی و حرکت آن دارای آثاری است که در فصل‌های قبلی به طور ساده و خاص و ایده‌آل، برخی از این آثار را بررسی کردیم.

در بحث الکتریسیته ساکن دیدیم که توسط یک جسم باردار می‌توان در اجسام رسانا بار الکتریکی القا کرد. در بحث مغناطیس مطرح شد که وقتی یک ماده مغناطیسی در میدان مغناطیسی قرار گیرد، خاصیت مغناطیسی با شدت کم یا زیاد در آن القا می‌شود و دیدیم علت این پدیده و به طور کلی منشأ تمام پدیده‌های مغناطیسی حرکت بارهای الکتریکی است.

همانطور که بحث شد، می‌توان با کمک برقراری حرکت هماهنگ الکترون (جریان الکتریکی) میدان مغناطیسی ایجاد کرد.

مایکل فاراده، دانشمند انگلیسی کشف کرد که با کمک میدان مغناطیسی و تغییر شار خاص (حرکت نسبی) می‌توان در یک محیط رسانا حرکت هماهنگ الکترون (جریان الکتریکی) ایجاد کرد.

در این فصل خواهیم دید که یک پیچه، سلونوئید یا هر حلقه و مداری از این جنس‌ها رسانا در یک میدان مغناطیسی قرار گیرد، در صورت حرکت نسبی آن‌ها با آن‌گونه‌ای که محدوده میدان عمودی از مدار تغییر کند، در مدار یک جریان الکتریکی القا می‌شود به طوری که انگار مدار به یک مولد وصل است و نیروی محرکه این مولد، جریان الکتریکی را برقرار کرده است.

همچنین خواهیم دید اساس کار مولدهای ولتاژ متناوب و ایجاد جریان متناوب و در نهایت برق شهری، قانون القای فاراده است.

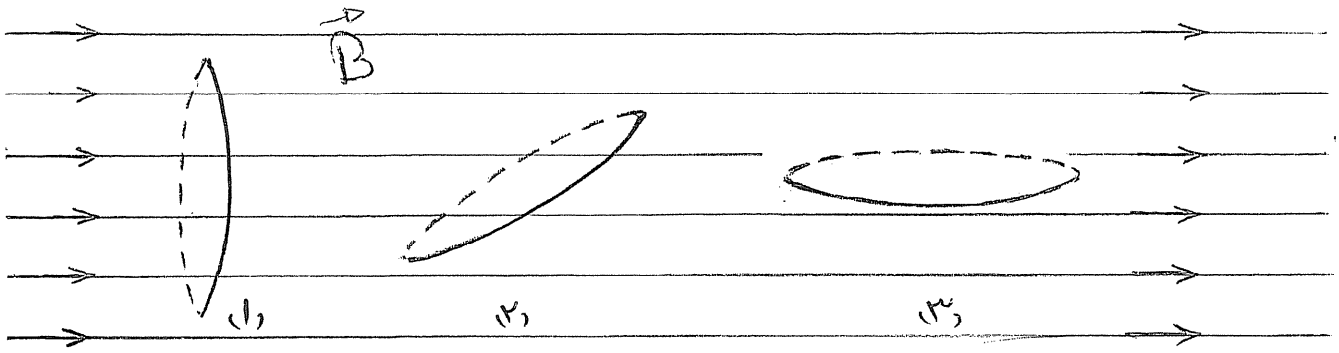
بخش اول: آشنایی با کمیت شار مغناطیسی

برای نمایش میدان مغناطیسی موجود در یک فضا، با خطوط میدان فرضی نمایش داده می‌شود.

کمیت شار برای یک سطح که در میدان قرار گرفته باشد تعریف می‌شود.

- تعریف شار مغناطیسی (Φ)

محدوده یا مقداری از میدان مغناطیسی که خطوط آن به طور عمود از یک سطح می‌گذرند، شار مغناطیسی عبوری از سطح را تعیین می‌کند.



* کمیت شار مغناطیسی با Φ نمایش داده شده و یکای آن در SI، وبر نامیده می‌شود.

شکل بالا یک حلقهٔ سیمی را در سه حالت مختلف در میدان مغناطیسی یکنواخت نشان می‌دهد. با توجه به تعریف شار مغناطیسی می‌توان گفت شار مغناطیسی گذرنده از حلقه در حالت (1) از بقیه حالت‌ها بزرگتر است.

$$\Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3$$

* شار مغناطیسی گذرنده از یک سطح در میدان مغناطیسی با عوامل زیر بستگی دارد:

۱- شدت میدان مغناطیسی: هرچه میدان بزرگتر باشد تراکم خطوط آن بیشتر و تعداد بیشتری از خطوط از سطح عبور می‌کنند.

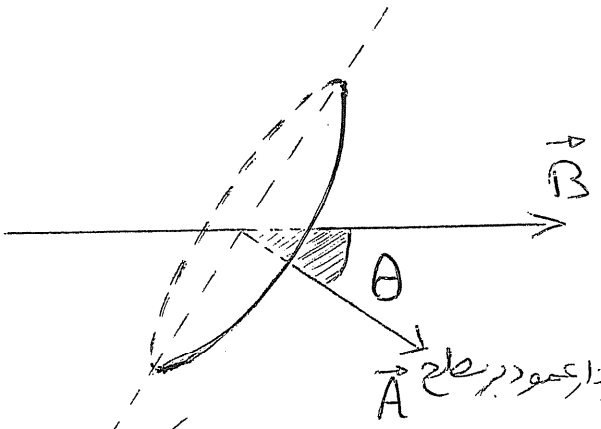
۲- مساحت سطح: هرچه مساحت بزرگتر باشد، محدودهٔ بیشتری از خطوط از سطح می‌گذرند.

۳- جهت قرارگیری سطح: می‌توان یک بردار عمود بر سطح تعریف کرد و زاویه‌ای که این بردار با خطوط میدان می‌سازد را در شار عبوری دخیل دانست.

* شار مغناطیسی کمیتی اسکالر (عددی) بوده که با توجه به موارد مطرح شده، می‌توان گفت از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\Phi = \vec{B}.\vec{A} \longrightarrow \boxed{\Phi = BA\cos\theta} \qquad \boxed{1\,wb = 1\,T.m^2}$$

Φ: شار مغناطیسی گذرنده از سطح (wb)
B: اندازه میدان مغناطیسی (T)
A: مساحت سطح (m^2)



* در رابطه مطرح شده، θ زاویه بین بردار عمود بر سطح و بردار میدان یا خطوط میدان مغناطیسی است.

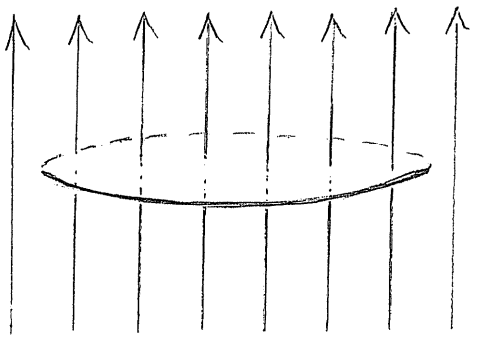
باریکی برای یک سطح با مساحت معلوم و در میدان مشخص، با توجه به اینکه $-1 \leq \cos\theta \leq 1$، اندازه شار عبوری زمانی بیشینه است که $\cos\theta = 1$ باشد، یا به عبارتی $\theta = 0$، که این زمانی اتفاق می‌افتد که سطح عمود بر خطوط میدان قرار گیرد.

مثال ۱: یکای شار مغناطیسی (wb) را بر حسب یکاهای اصلی در SI بنویسید.

مثال ۲: سیمی به طول 40 cm را به شکل قابی مربع درآورده و در یک میدان مغناطیسی یکنواخت با بزرگی 5000 گاوس (G) قرار می‌دهیم. الف) در صورتی که بردار میدان با سطح قاب زاویه ۳۰° بسازد شار عبوری از قاب چند و بر حواهد بود؟ ب) در چه حالت شار کمینه می‌شود؟ پ) در چه حالتی شار بیشینه می‌شود؟ مقدار آن را بدست آورید.

مثال ۳: یک حلقهٔ مسی به قطر ۲۰ cm در یک میدان مغناطیسی یکنواخت با بزرگی ۰٫۲ T قرار دارد به طوری که زاویهٔ بین بردار عمود بر سطح آن و خطوط میدان ۳۰° است. اگر شدت میدان به ۰٫۴ T برسد، شار عبوری از حلقه چند برابر تغییر می‌کند؟ (n=۲)

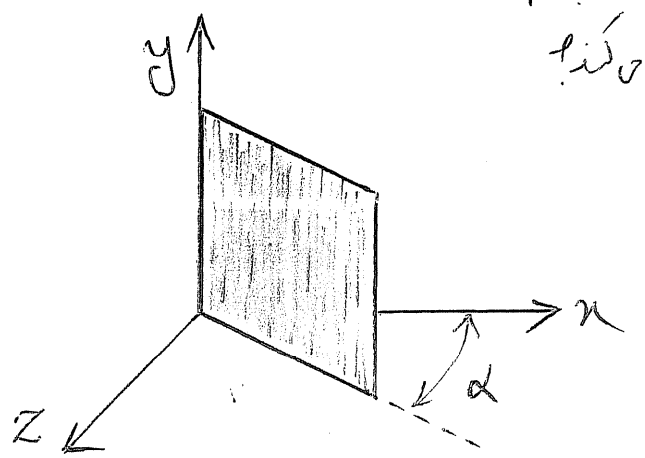
مثال ۴: مطابق شکل زیر، حلقه‌ای به مساحت ۵۰ cm² در یک میدان مغناطیسی یکنواخت با شدت ۰٫۲ T قرار دارد، به طوری که خطوط میدان بر سطح حلقه عمود هستند.



الف) اگر اندازهٔ میدان بدون تغییر جهت به ۰٫۳ T افزایش یابد، شار مغناطیسی عبوری از حلقه چند برابر تغییر می‌کند؟

ب) در صورتی که حلقه حول یکی از قطرهای آن ۱۸۰° دوران داده شود، شار عبوری از آن چقدر تغییر خواهد کرد؟

مثال ۵: پیچه‌ای مربعی شکل به ضلع ۵ cm را مطابق شکل زیر در راستای محور y ها قرار داده‌ایم. در این فضا یک میدان مغناطیسی به بزرگی ۵۰۰ G در راستای محور x ها وجود دارد. اگر پیچه را حول محور y ها طوری بچرخانیم که α (زاویهٔ بین پیچه و صفحهٔ xy) از ۳۰° به ۶۰° کاهش یابد، شار عبوری از پیچه چه تغییری می‌کند؟

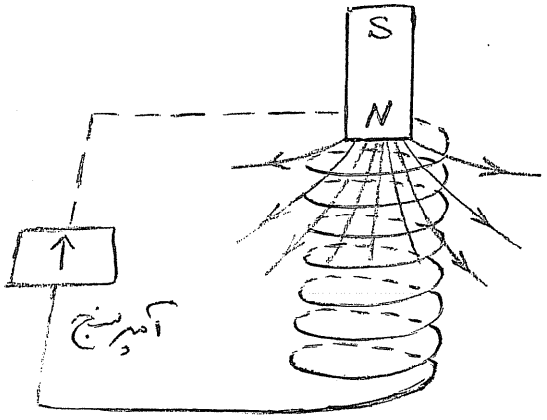


بخش دوم : قانون القای فاراده و قانون لنز

① قانون القای فاراده

اگر شار مغناطیسی عبوری از یک مدار بسته تغییر کند، در آن یک نیروی محرکهٔ القایی پدید می‌آید که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار نسبت به زمان متناسب است. به واسطهٔ این نیروی محرکهٔ القایی یک جریان القایی در مدار شکل می‌گیرد.

- با استفاده از وسایل زیر، طرح آزمایشی را بنویسید که با آن درستی قانون القای فاراده نتیجه گیری شود. « میلی آمپرسنج صفر وسط (گالوانومتر) - سیم‌های رابط - آهنربای میله‌ای - سیملوله یا پیچه »



نکته: این آزمایش برای اولین بار توسط مایکل فاراده (انگلیسی) و تقریباً همزمان با او جوزف هانری (آمریکایی) انجام شد.

نکته: طبق قانون القای فاراده، زمانی نیروی محرکه و در نتیجهٔ آن جریان الکتریکی در یک مدار بسته القا می‌شود که، شار عبوری از مدار تغییر کند. تغییر شار از یکی از راه‌های زیر امکان‌پذیر است؟

۱- تغییر اندازهٔ میدان مغناطیسی (تغییر B)

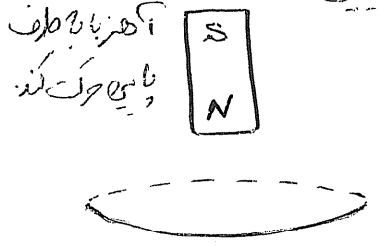
۲- تغییر سطح مدار بسته (تغییر A)

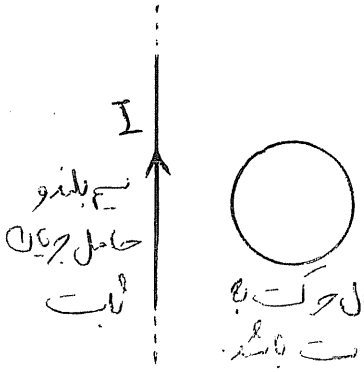
۳- تغییر نحوهٔ قرارگیری مدار در میدان (دوران مدار و تغییر θ)

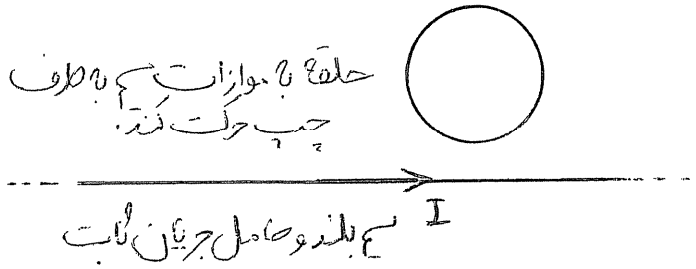
(۲) قانون لنز: جهت جریان القایی در یک مدار بسته به گونه‌ای است که با عامل تغییر شار مغناطیسی مخالفت می‌کند.

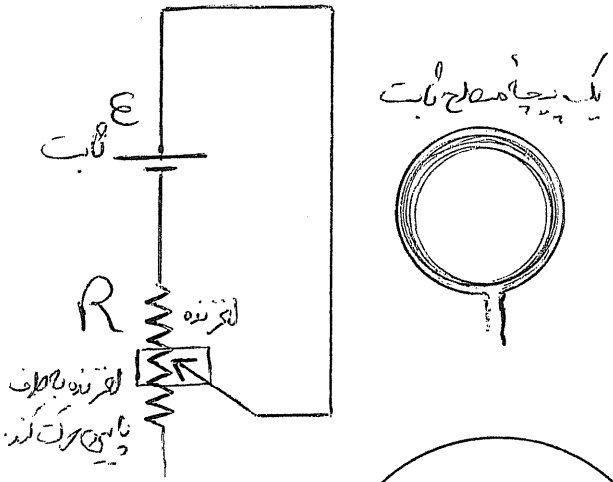
* این قانون به صورت تجربی و با انجام آزمایش نتیجه می‌شود.

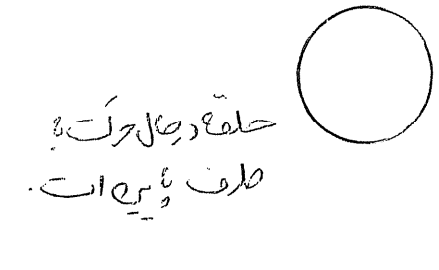
مثال ۱۴: در هریک از شکل‌های زیر، جهت جریان القایی را تعیین کنید.

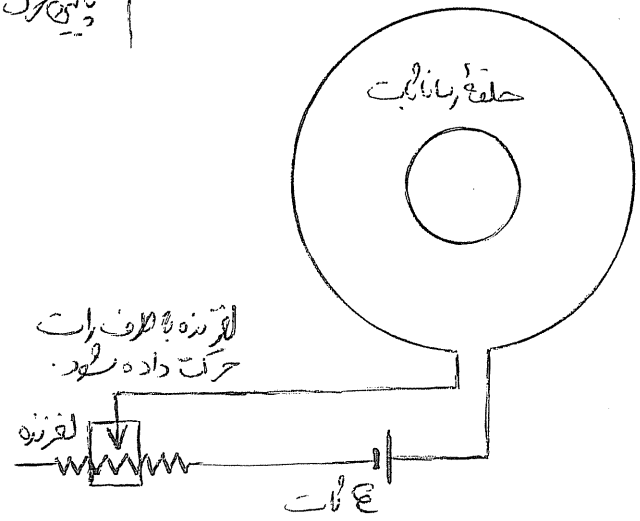




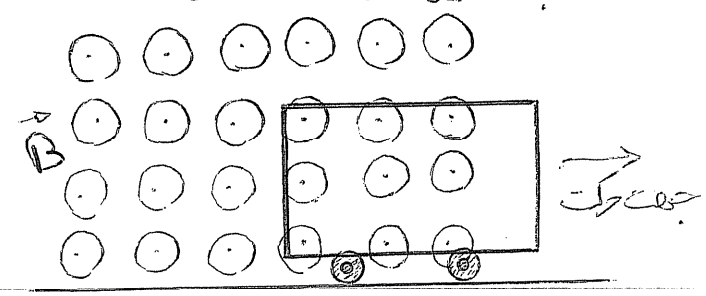


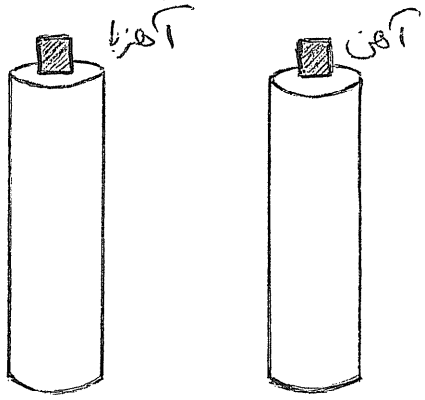




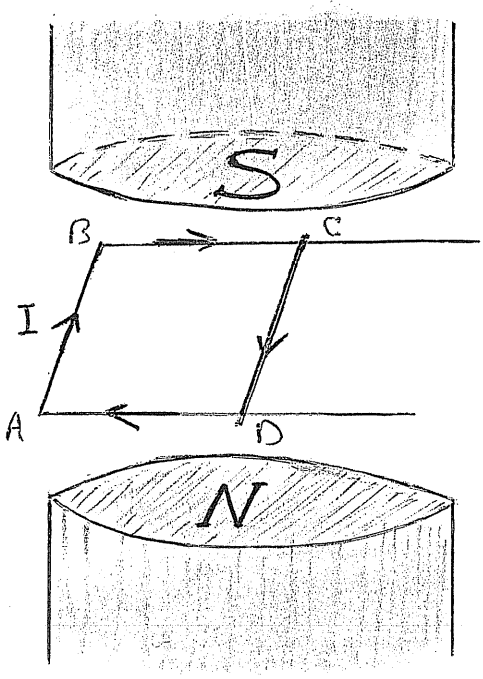


قاب مستطیل شکلی که در حال خروج از میدان یکنواخت است.



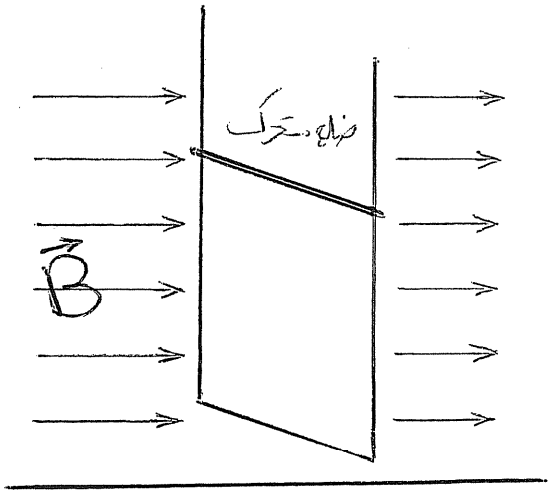


مثال ۷: مطابق شکل مقابل یک قطعه آهن و یک آهنربا که جرم و شکل یکسان دارند، از داخل دو لوله مشابه و بلند مسی، همزمان با هم رها می‌شوند. تعیین کنید کدام قطعه زودتر از لوله‌ها خارج می‌شوند؟



مثال ۸: در شکل مقابل، جهت جریان القایی در یک قاب مستطیل شکل که ضلع CD آن متحرک می‌باشد نشان داده شده است. جهت حرکت ضلع CD را تعیین کنید.

مثال ۹: مطابق شکل زیر یک قاب مستطیل شکل در راستای قائم و در یک میدان مغناطیسی یکنواخت افقی قرار دارد. یکی از اضلاع این قاب قابلیت حرکت روی اضلاع دیگر را دارد. اگر این ضلع رها شود، جهت جریان القایی چگونه خواهد شد؟



شتاب حرکت میله در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی را با هم مقایسه کنید.

(۳) اندازهٔ نیروی محرکهٔ القایی و جریان القایی

مدار بسته‌ای را در نظر بگیرید که شار مغناطیسی از آن عبور می‌کند و این شار با زمان در حال تغییر باشد؛ می‌توان گفت:

«اندازهٔ نیروی محرکهٔ القایی در مدار بسته، با آهنگ تغییر شار مغناطیسی نسبت به زمان متناسب است»

$$\underset{\text{لحظه‌ای}}{\mathcal{E}} = -N\frac{d\Phi}{dt} \quad \longrightarrow \quad \underset{\text{لحظه‌ای}}{I} = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

* در روابط بالا منظور از $\frac{d\Phi}{dt}$، مشتق تابع شار نسبت به زمان یا آهنگ تغییر شار نسبت به زمان است. با تعریف ریاضی مشتق و محاسبات آن در درس ریاضی آشنا خواهید شد.

* در حال حاضر با توجه به اطلاعات ریاضی که داریم، مقصد ما توان نیروی محرکهٔ متوسط و در نتیجه جریان القایی متوسط در مدار را حساب کنیم.

$$\overline{\mathcal{E}} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

- $\overline{\mathcal{E}}$: نیروی محرکهٔ القایی متوسط (V)
- N: تعداد دورهای مدار (پیچه یا سیملوله)
- $\Delta\Phi$: تغییرات شار مغناطیسی (Wb) عبوری از مداری که در میدان قرار دارد.
- Δt: بازهٔ زمانی یا مدت زمانی (s) که شار مغناطیسی در حال تغییرات است.

$$1\,V = 1\,\frac{Wb}{s}$$

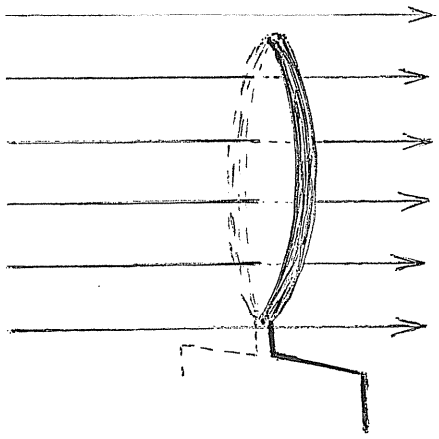
$$\Rightarrow \quad \overline{I} = \frac{\overline{\mathcal{E}}}{R}$$

- $\overline{I}$: جریان القایی متوسط (A)
- R: مقاومت مدار (Ω)

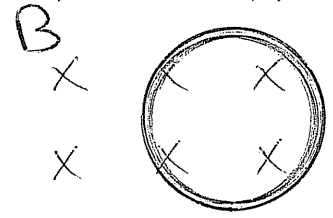
رابطهٔ مقابل نشان می‌دهد که با واسطهٔ نیروی محرکهٔ القا شده در مدار، یک جریان القایی در آن شکل می‌گیرد که طبق قانون اهم قابل محاسبه است.

نکته: علامت منفی در رابطهٔ نیروی محرکهٔ القایی، معرف قانون لنز است و بیان می‌کند که نیروی محرکهٔ القا شده می‌خواهد با تغییر شار مخالفت کند.

مثال ۱۰ پیچه‌ای شامل ۴۰۰ دور که مساحت سطح آن $25\,cm^2$ است مطابق شکل زیر در یک میدان مغناطیسی یکنواخت طوری قرار گرفته که خطوط میدان بر سطح آن عمود هستند. اگر شدت میدان در مدت $5\,ms$ از $0.13\,T$ به $0.18\,T$ برسد، الف) اندازهٔ نیروی محرکهٔ القایی متوسط در پیچه چند ولت می‌شود؟ ب) اگر مقاومت کل پیچه $1.0\,\Omega$ باشد، اندازهٔ جریان القایی متوسط چند آمپر می‌شود؟



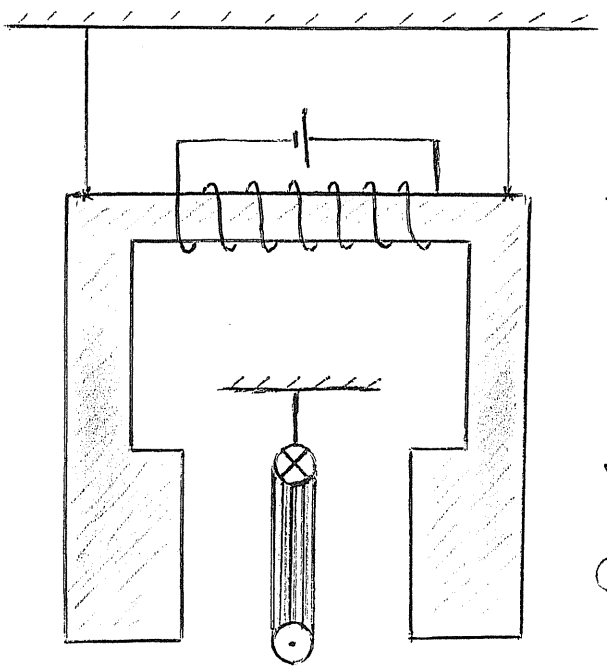
مثال ۱۱ پیچه‌ای با مساحت $25\,cm^2$ در یک میدان مغناطیسی یکنواخت با شدت $0.4\,T$ قرار گرفته طوری که سطح آن بر خطوط میدان عمود است.



الف) اگر طی مدت پیچه را در بازهٔ زمانی $0.2\,s$ با $10\,cm^2$ برسانیم، آهنگ متوسط تغییر شار عبوری از آن چند $\frac{Wb}{s}$ خواهد شد؟

ب) اگر تعداد دورهای پیچه ۵۰۰ بوده و مقاومت آن $2.0\,\Omega$ باشد، اندازهٔ جریان القایی متوسط در آن چند آمپر می‌شود؟

مثال ۱۲: در مسأله قبل اگر پیچه در مدت $0.2\ s$، نیم دور حول یکی از قطرهای آن دوران داده شود، اندازهٔ نیروی محرکهٔ القایی متوسط در آن چند ولت خواهد شد؟



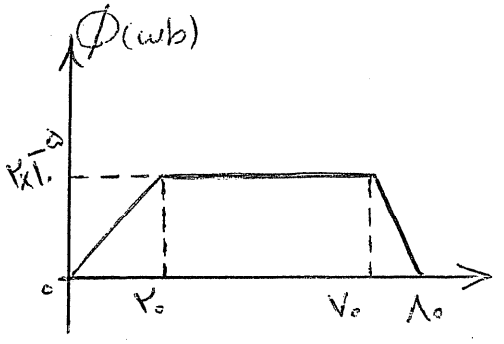
مثال ۱۳: مطابق شکل زیر داده شده یک پیچه و یک آهربای الکتریکی در راستای قائم آویخته شده‌اند. مساحت سطح پیچه $30\ cm^2$ و تعداد دورهای آن ۵۰ تا و میدان مغناطیسی ناشی از آهربا که یکنواخت فرض می‌شود $400\ G$ می‌باشد. پیچه دوران داده می‌شود: اگر در مدت $2\ s$ به اندازهٔ $\frac{11\pi}{2}$ رادیان دوران کند. الف) اندازهٔ نیروی محرکهٔ القایی متوسط در پیچه چند ولت می‌شود؟ ب) در صورتی که مقاومت پیچه $5\ \Omega$ باشد، اندازهٔ جریان القایی متوسط در آن، چند آمپر خواهد شد؟

مثال ۱۴ پیچه‌ای با سطح مقطع $40\,cm^2$ و متشکل از ۵۰۰ حلقه در نظر بگیرید که از نقطه‌ای آویزان بوده و در راستای غرب-شرق جغرافیایی قرار دارد. فرض کنید اندازه میدان مغناطیس کره‌ی زمین در محل قرارگیری این پیچه $0.5\,G$ باشد. اگر پیچه دوران داده شود به طوری که در مدت $0.25\,s$ به راستای شمال-جنوب جغرافیایی برسد، در این بازه‌ی زمانی نیروی محرکه‌ی القایی متوسط در آن چند ولت می‌شود؟

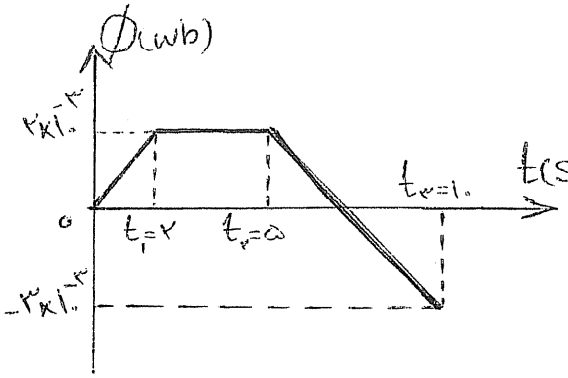
مثال ۱۵ حلقه‌ای در یک فضا که در آن یک میدان مغناطیس یکنواخت افقی با بزرگی $0.3\,T$ وجود دارد، در راستای قائم آویزان است. شعاع حلقه را $5\,cm$ و سطح آن را عمود بر خطوط میدان فرض کنید. اگر در مدت $0.1\,s$ میدان به $0.2\,T$ در خلاف جهت اولیه تغییر کند، و در صورتی که مقاومت حلقه $2\,\Omega$ باشد، اندازه‌ی جریان القایی متوسط در آن چند آمپر می‌شود؟ ($\pi = 3$)

مثال ۱۶ نمودار تغییرات شار مغناطیس گذرنده از یک حلقه برحسب زمان به صورت مقابل است.

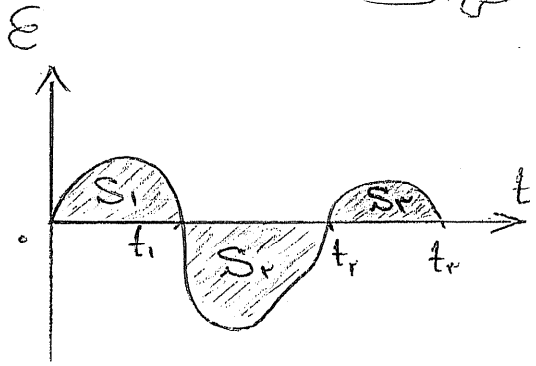
نمودار نیروی محرکه‌ی القا شده در حلقه برحسب زمان را رسم کنید.



مثال ۱۷) اگر نمودار شار عبوری از یک پیچه ($N=50$) برحسب زمان به صورت مقابل باشد، نمودار $\varepsilon - t$ آن را رسم کنید.

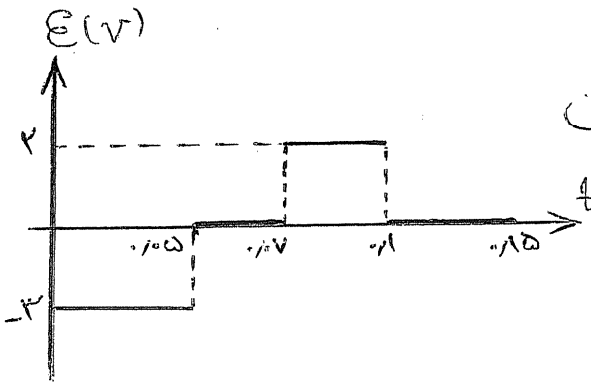


نکته: با نکات ریاضی می‌توان گفت مساحت زیر نمودار $\varepsilon - t$ برابر با $\Delta\Phi$ یعنی تغییرات شار مغناطیسی، البته با علامت مقرر.



مثال:
$0 \le t \le t_1 \rightarrow \Delta\Phi = -S_1$
$t_1 \le t \le t_2 \rightarrow \Delta\Phi = -S_2$ ← البته خود S_2 را اگر حساب نکنیم مثبت است.
$0 \le t \le t_3 \rightarrow \Delta\Phi_{\text{کل}} = -(S_1 + S_2 + S_3)$
یعنی کل بازهٔ زمان

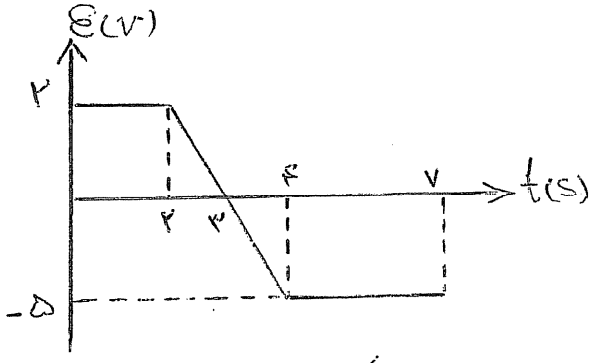
مثال ۱۸) نمودار تغییرات نیروی محرکهٔ القایی برحسب زمان برای حلقه‌ای به صورت مقابل است.



الف) اگر شار عبوری اولیه از حلقه $0/65\,wb$ باشد، شار عبوری از آن در لحظهٔ $t=0/15\,s$ چند وبر می‌شود؟

ب) در چه بازه زمانی که در نمودار مشخص شده است، شار عبوری از حلقه بیشینه است؟

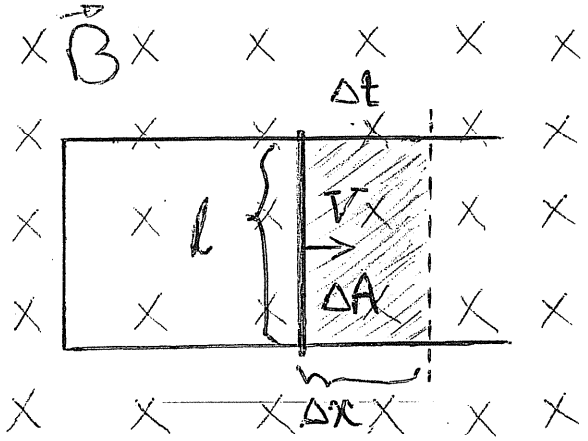
مثال ۱۹ نمودار $\mathcal{E}-t$ برای حلقه‌ای در ناحیه‌ای تغییرات شار مغناطیسی عبوری از آن به صورت مقابل است. اگر شار اولیه عبوری صفر باشد، شار گذرنده از حلقه در لحظه $t=4s$ چند وبر خواهد بود؟



در چه لحظاتی از بازه‌ی زمانی نشان داده شده در نمودار شار عبوری از حلقه کمینه است؟

نکته (یک مسأله خاص)

در شکل زیر، میله‌ای فلزی به طول l روی یک ریل فلزی که سطح آن بر خطوط میدان مغناطیسی یکنواخت اطراف عمود است، با تندی ثابت V حرکت می‌کند. چون تندی حرکت ثابت است، می‌توان گفت تندی حرکه‌ای و تندی حرکه‌ای متوسط در هر لحظه و در هر بازه‌ی زمانی با هم برابر هستند و در این حالت مجموعه با هم تشکیل یک مولد ولتاژ ثابت می‌دهند.



تندی حرکت ثابت ← $\mathcal{E}_{\text{لحظه‌ای}} = \bar{\mathcal{E}}$

فرض کنید در یک بازه‌ی زمانی (مدت زمان) Δt میله با اندازه‌ی Δx جابه‌جا شده و مساحت مدار به اندازه‌ی ΔA تغییر کند.

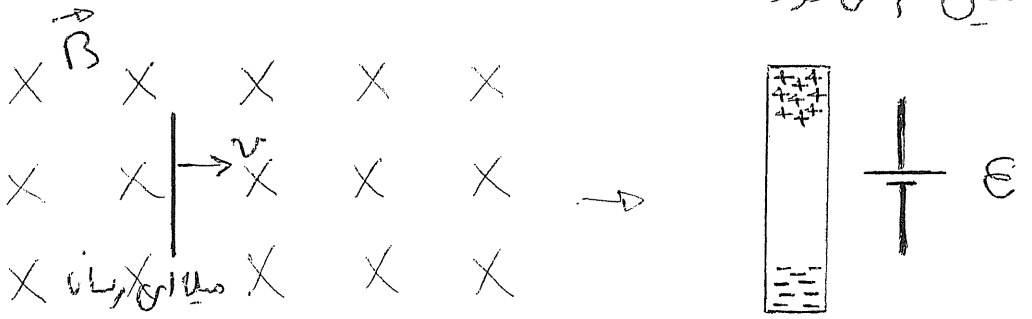
$$\Delta A = l\,\Delta x \xrightarrow{\Delta x = V\Delta t} \Delta\phi = Bl V\Delta t$$

$$\left.\begin{array}{l}\Delta\phi = B(\Delta A)\cos 0^\circ \\ \bar{\mathcal{E}} = -N\dfrac{\Delta\phi}{\Delta t}\end{array}\right\} \longrightarrow \bar{\mathcal{E}} = -BlV$$

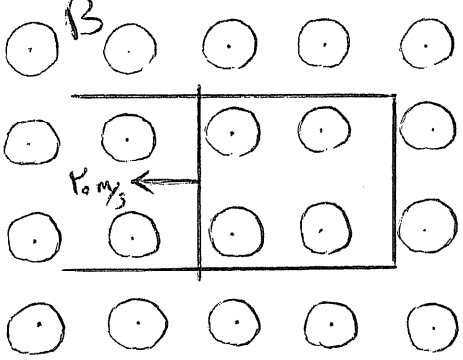
* جهت نیروی حرکه‌ی و جریان القایی با قانون لنز تعیین می‌شود. در شکل بالا، جهت جریان پادساعتگرد است.

$$\boxed{|\mathcal{E}| = BlV}$$

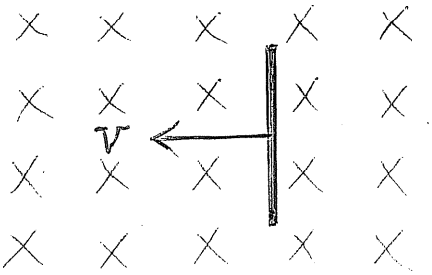
* می‌توان گفت بار آزاد هر جسم رسانا، مثلاً یک قطعه سیم، در میدان مغناطیسی یا دور آن یک اختلاف پتانسیل القا می‌شود (نیروی محرکهٔ القایی) که در شرایط خاص حاصل شده از رابطهٔ اثبات شده می‌توان اندازهٔ این نیروی محرکه را بدست آورد. حال اگر این قطعه سیم جزئی از یک مدار بسته باشد، باعث ایجاد جریان القایی هم می‌شود.



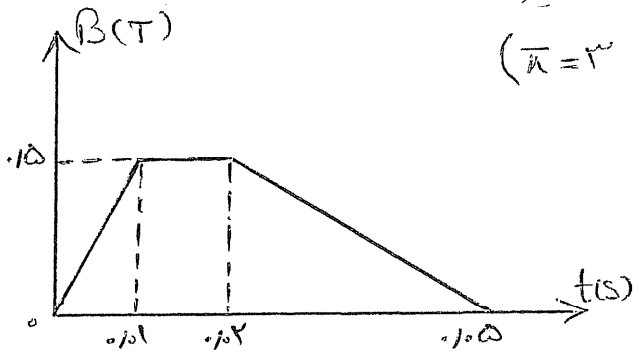
مثال ۲۰ مطابق شکل زیر، یک رسانای U شکل در یک میدان مغناطیسی یکنواخت با گونه‌ای قرار دارد که سطح آن بر خطوط میدان عمود است. یک سیم رسانا با طول ۳۰ cm با رسانای U شکل اتصال و در جهت نشان داده شده با تندی ثابت ۲۰ m/s حرکت داده می‌شود. اگر بزرگی میدان یکنواخت ۰/۵T باشد، اندازهٔ نیروی محرکهٔ القایی را تعیین کنید. تا زمانی که بتوان مقاومت مدار بسته ایجاد شده را تقریباً ثابت و برابر با ۵Ω در نظر گرفت، اندازه و جهت جریان القایی چگونه خواهد شد؟



مثال ۲۱ میله‌ای رسانا به طول ۰/۵m عمود بر خطوط یک میدان مغناطیسی یکنواخت با بزرگی ۰/۴T با تندی ثابت ۱۰ m/s حرکت داده می‌شود. با توجه به شکل زیر، اندازه و جهت نیروی محرکهٔ القایی در میله را تعیین کنید.

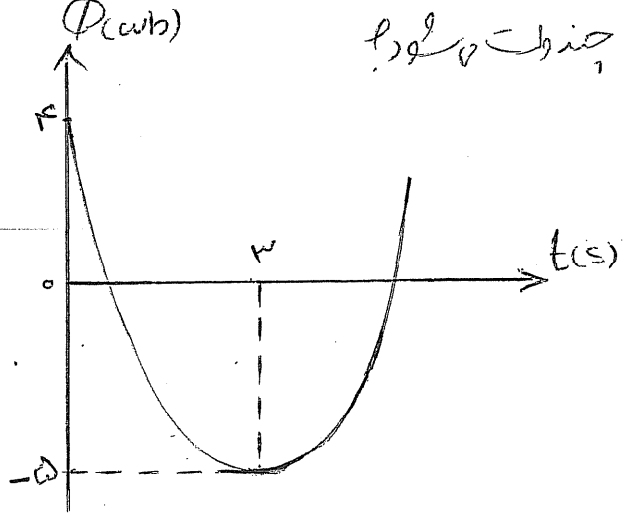


مثال ۲۲ نمودار تغییرات میدان مغناطیسی برحسب زمان که بر سطح یک حلقهٔ رسانای دایره‌ای به شعاع $10\,cm$ عمود است، مطابق شکل زیر باشد. نمودار آهنگ انرژی گرمایی تولید شده در حلقه برحسب زمان را رسم کنید. ($\pi = 3$)



مثال ۲۳ شار مغناطیسی گذرنده از پیچهٔ مسطحی در SI طبق $\Phi = (3t^2 - 2t + 5) \times 10^{-2}$ با زمان تغییر می‌کند. اگر مقاومت پیچه $10\,\Omega$ و اندازهٔ جریان القایی متوسط در آن در دومین نیم تغییرات برابر با $1.4\,A$ باشد، تعداد دورهای پیچه چند تا است؟

مثال ۲۴ نمودار $\Phi - t$ برای یک حلقهٔ رسانا به صورت زیر است. اندازهٔ نیروی محرکهٔ القایی متوسط در حلقه در بازهٔ زمانی $t = 3\,s$ تا $t = 8\,s$ چند ولت می‌شود؟
(نمودار $\Phi(t)$ را سهمی در نظر بگیرید)

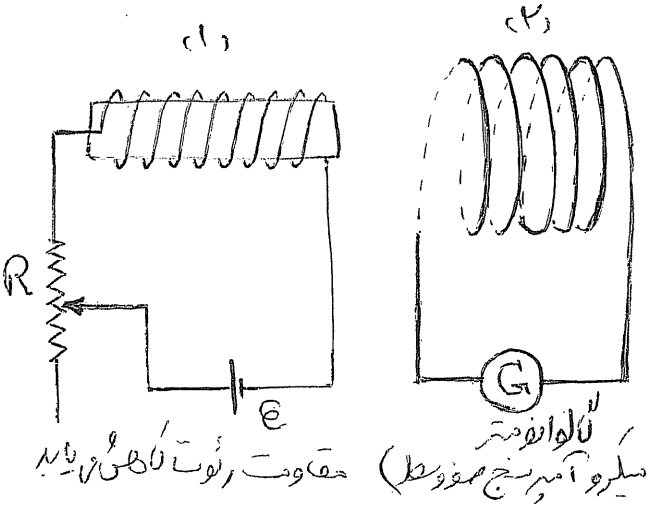


بخش سوم: اثر خود القاوری و بررسی القاگرها

① بررسی پدیده خود القاوری و تعریف القاگرها

یک سیم پیچ (یا مدار یا سیملوله) در نظر بگیرید که در یک بازه زمانی جریان الکتریکی در آن برقرار شده به طوری که در این بازه، جریان از صفر به یک مقدار نهایی و ثابت رسیده و ثابت می‌شود. می‌توان گفت در مدت زمان تغییر جریان عبوری از سیم پیچ، در خود سیم پیچ یک نیروی محرکه القایی ایجاد می‌شود، که به آن نیروی محرکه خود القایی و به این پدیده خود القاوری گفته می‌شود.

مثال: با توجه به شکل مقابل، اگر مقاومت رئوستا کاهش داده شود، جهت جریان القایی در سیملوله (۲) چگونه خواهد بود؟
آیا در خود سیملوله (۱) نیز نیروی محرکه القایی ایجاد می‌شود؟



وقتی مقاومت رئوستا تغییر کند، جریان مدار و جریان عبوری از سیملوله (۱) تغییر خواهد کرد، تغییر جریان عبوری از سیملوله (۱) باعث تغییر میدان مغناطیسی در فضای داخل و خارج آن خواهد شد. چون سیملوله (۲) در فضایی با میدان مغناطیسی متغیر قرار می‌گیرد، شار مغناطیسی عبوری از آن تغییر کرده و طبق قانون القا فارادی یک نیروی محرکه القایی و به واسطه آن یک جریان القایی شکل می‌گیرد.

با این پدیده می‌توان با تغییر جریان در سیم پیچ در سیم پیچ مقابل آن جریان القا کرد، **القای متقابل** گفته می‌شود، با کمک این پدیده می‌توان انرژی را از یک مدار به مدار دیگر منتقل کرد.

جهت جریان القایی در سیملوله (۲) را می‌توان با قانون لنز تعیین کرد.

اما همان طور که گفته شد جریان عبوری از سیملوله (۱) نیز در حال تغییر و در نتیجه شار مغناطیسی عبوری از خود سیملوله (۱) نیز تغییر می‌کند، پس می‌توان گفت در خود این سیملوله نیز نیروی محرکه القا خواهد شد. با این پدیده **خود القایی** گفته می‌شود.

- نکته: پدیده خود القاوری (خودالقایی) در هر سیم پیچی، اعم از سیملوله یا سیم مستقیم در اثر تغییرات جریان عبوری از آن ها، اتفاق می افتد. اما این پدیده بیشتر برای سیملوله ها (القاگرها) بررسی می شود.

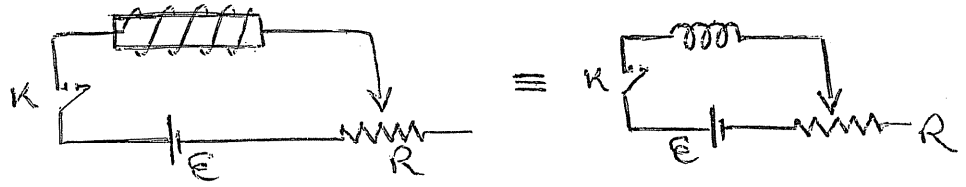
* تعریف القاگر —ꕥꕥꕥ—

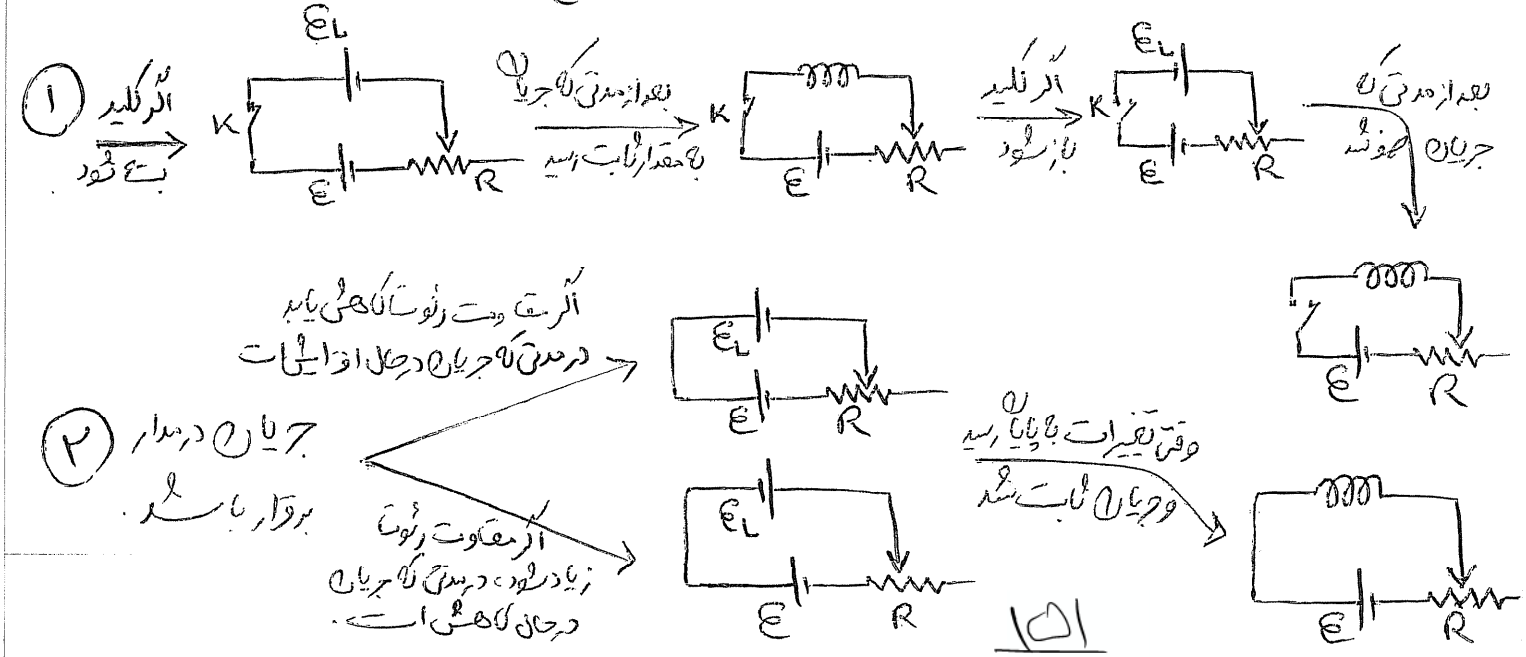
القاگر یک سیملوله با هسته غیرمغناطیسی است که در مدارهای الکتریکی کاربرد دارد. به طوری که در مدت تغییر جریان مدار یک نیروی محرکه القایی (ε_L) تحت عنوان نیروی محرکه القایی در آن ایجاد می شود.

نماد القاگر در مدارهای الکتریکی به صورت —ꕥꕥꕥ— می باشد.

- نکته مهم (طرز کار القاگر در مدارهای الکتریکی):

هنگامی که پدیده خودالقایی در القاگری اتفاق می افتد می توان آن را همانند یک مولد با نیروی محرکه ε_L فرض کرد که {در جهت / در خلاف جهت} مولد اصلی وارد می کند تا با تولید جریان القایی در مقابل تغییر جریان مدار مخالفت کند. البته این پدیده تا زمانی اتفاق می افتد که جریان در حال تغییر باشد، در واقع القاگر در این بازه زمانی خواهد آهنگ (رعت) تغییر جریان را کاهش دهد.





(۲) ضریب القاوری (ضریب خودالقایی)

هر القاگر یا دو سیملوله‌ای با مشخصات معلوم در نظر گیرید. طول (l)، سطح مقطع (A) و تعداد دور (N) معلوم که هسته‌ای دو مغناطیس با ضریب تراوایی مغناطیسی K در آن‌ها قرار دارد.

وقتی این القاگرها در یک مدار قرار می‌گیرند، آن‌ها باعث ایجاد نیروی محرکهٔ خودالقایی در آن‌ها می‌شود، تغییرات جریانی است که از خود القاگر عبور می‌کند.

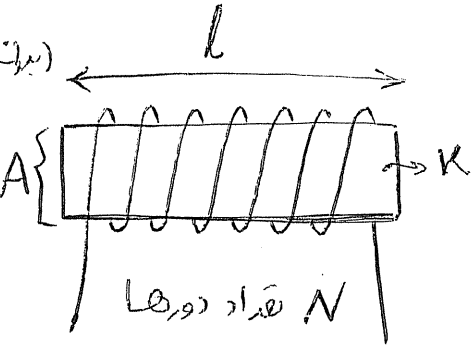
به صورت تجربی و با انجام آزمایشی می‌توان مشاهده کرد که اگر آهنگ تغییر جریان عبوری از القاگرها یکسان باشد، اندازهٔ نیروی محرکهٔ خودالقایی در آن‌ها متفاوت است. پس باید گفت:

«آهنگ تغییر جریان عبوری از یک القاگر با زمان با یک ضریب در اندازهٔ نیروی محرکهٔ خودالقایی متوازن است که با این ضریب، ضریب القاوری گفته می‌شود.»

★ ضریب القاوری یک القاگر به ساختار آن بستگی دارد یعنی با طول، سطح مقطع، تعداد دور و جنس هستهٔ داخل آن. می‌توان به صورت تئوری اثبات کرد که در حالت ایده‌آل، ضریب القاوری یک القاگر از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$L = K\mu_0 \frac{N^2 A}{l}$$

- L: ضریب القاوری (H)
- K: ضریب تراوایی هسته (بدون واحد) (اگر سیملوله بدون هسته بود یعنی هوا یا خلاء $K=1$ است)
- μ_0: تراوایی مغناطیسی خلاء $4\pi \times 10^{-7} \frac{T.m}{A}$
- N: تعداد دورها (بدون واحد)
- A: مساحت سطح مقطع (m^2)
- l: طول سیملوله (m)



یکای ضریب القاوری، هانری (H) نامیده می‌شود که می‌توان ثابت کرد:

$$1\,H = 1\,\frac{V.s}{A} = 1\,\Omega.s$$

مثال ۲۵ ضریب القاوری سیملولهٔ بدون هسته‌ای با طول $6.28\,cm$ و سطح مقطع $10\,cm^2$ که شامل ۲۰۰۰ حلقه است، چند هانری می‌باشد؟ $(\pi = 3.14)$

مثال ۲۶ تعداد دورهای یک سیملولهٔ بدون هسته با طول $3\,cm$ و سطح مقطع $10\,cm^2$ چند تا باشد تا ضریب القاوری آن $1\,H$ شود؟ $(\pi = 3)$

مثال ۲۷ دو سیملولهٔ (۱) و (۲) در نظر بگیرید که تمام مشخصات آن‌ها به غیر از طول سیملوله‌ها یکسان است. اگر طول سیملولهٔ (۱)، ۴ برابر طول سیملولهٔ (۲) باشد، ضریب القاوری آن چند برابر می‌شود؟

مثال ۲۸ با سیمی به طول $5.0\,m$ سیملوله‌ای ساخته شده که حلقه‌های آن به هم چسبیده هستند اگر طول سیملولهٔ حاصل شده $20\,cm$ باشد، ضریب القاوری آن چند هانری می‌شود؟

مثال ۲۹ دو سیملولهٔ A و B را در نظر بگیرید که هسته آن‌ها، طول و سطح مقطعشان یکسان بوده و حلقه‌های آن‌ها به هم چسبیده باشد. اگر قطر سیم سازندهٔ سیملولهٔ A، دو برابر سیملولهٔ B باشد، $\frac{L_A}{L_B}$ چه خواهد شد؟

(۳) انرژی ذخیره شده در القاگر

القاگرها مثل تمام وسایل الکتریکی دیگر، دارای یک مقاومت اند. هنگامی که یک مولد باعث انرژی، یک اختلاف پتانسیل برای نقاط مدار ایجاد و جریان الکتریکی را برقرار می‌کند، هنگام عبور جریان از القاگر، این وسیله همانند وسایل دیگر بخشی از انرژی را در مقاومت خود تلف می‌کند با این تفاوت که مقداری انرژی نیز در خود ذخیره می‌کند.

انرژی ذخیره شده در یک القاگر با ضریب القاوری L که جریان I از آن عبور می‌کند از رابطه زیر (که یک رابطه تجربی است) بدست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} L I^2$$

چند نکته مهم

۱- همان طور در الکتریسیته ساکن بحث شد، از خازن برای ایجاد میدان الکتریکی یکنواخت و ذخیره انرژی در این میدان استفاده می‌شود. باید دقت داشت که وقتی خازن انرژی را در خود ذخیره می‌کند، با عبور بار الکتریکی انرژی ذخیره شده، جریان در شاخه خازن کاهش یافته تا اینکه بعد از مدتی جریان قطع شود.

در مغناطیس بحث شد که از سیملوله برای ایجاد میدان مغناطیسی یکنواخت استفاده می‌شود و در این فصل (الکترومغناطیسی) فهمیدیم که می‌توان انرژی را در میدان مغناطیسی سیملوله (القاگر) ذخیره کرد. باید دقت داشت فقط در بازه‌های زمانی که جریان عبوری از القاگر در حال افزایش باشد، در آن انرژی ذخیره می‌شود و وقتی جریان ثابت شد، هیچ انرژی برقرار خواهد بود و دیگر با انرژی ذخیره شده در القاگر اضافه نمی‌شود.

۲- در مدارهای جریان مستقیم، القاگر با پایا نگه داشتن جریان در برابر افت و خیزهای emf (نیروی محرکه) اعمال شده کمک می‌کند.

۳- در مدارهای جریان متناوب، القاگر می‌تواند دامنهٔ تغییرات را کاهش دهد.

۴- (تفاوت رفتار مقاومت و القاگر)

مقاومت‌ها همواره حالت مصرف‌کننده دارند و انرژی در آن‌ها مصرف می‌شود. چه در حالتی که جریان عبوری از آن‌ها پایا (ثابت یا مستقیم) باشد و چه در حالتی که جریان عبوری از آن‌ها متغیر باشد. این انرژی مصرفی به صورت انرژی گرمایی از مقاومت و مدار خارج و به محیط داده می‌شود یا طوری که دیگر به مدار برنمی‌گردد.

اما یک القاگر آرمانی (مقاومت صفر) یا یک القاگر با مقاومت ناچیز تنها وقتی مصرف‌کننده انرژی است که جریان عبوری از آن در حال افزایش باشد و باید گفت این انرژی از دید مدار تلف نمی‌شود بلکه در میدان مغناطیسی القاگر ذخیره شده و هنگامی که جریان عبوری از آن بخواهد کاهش یابد آزاد شده و به مدار برمی‌گردد.

و باید دقت داشت در بازه‌های زمانی که جریان عبوری از القاگر پایا باشد، نه انرژی مصرف می‌کند (به آن وارد می‌شود) نه انرژی از آن آزاد خواهد شد (خارج می‌شود).

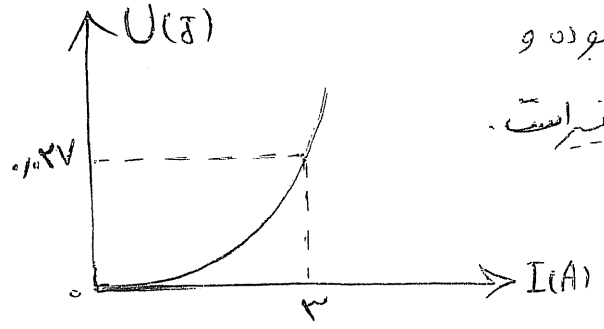
مثال ۳۰ سیملولهٔ آرمانی بدون هسته‌ای با طول ۲۲ cm و سطح مقطع ۰/۴۴ cm² در نظر بگیرید که شامل ۱۰۰۰ دور سیم نزدیک به هم بوده و حامل جریان ۲A است.

الف) ضریب القاوری

ب) انرژی ذخیره شده در سیملوله را حساب کنید.

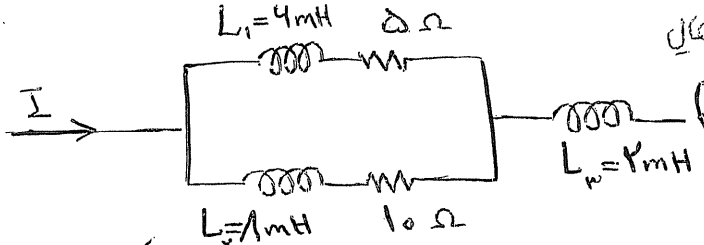
مثال ۳۱ سطح مقطع سیملوله‌ای $40\ cm^2$ و طول آن $0.5\ m$ و شامل ۲۰۰۰ حلقه سیم نزدیک به هم تشکیل شده که بین آن خلأ وجود دارد ($\mu_0 = 12 \times 10^{-7} \frac{T.m}{A}$)
چه جریانی باید در سیملوله برقرار شده باشد تا انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی آن $1\ J$ شود؟

مثال ۳۲ جریان عبوری از سیملوله‌ای در حال افزایش بوده و انرژی ذخیره شده در آن مطابق نمودار مقابل در حال تغییر است.
ضریب القاوری سیملوله را تعیین کنید.



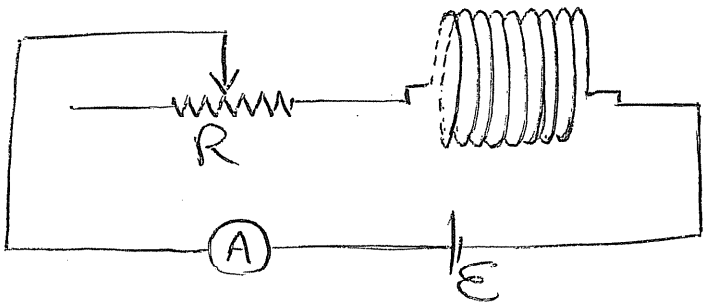
مثال ۳۳ از سیملوله‌ای به ضریب القاوری $4\ H$ جریان متناوبی با معادلهٔ $I = 5\sin(50\pi t)$ در SI عبور می‌کند. بیشینهٔ انرژی ذخیره شده در سیملوله چند ژول می‌شود؟

مثال ۳۴ شکل مقابل قسمتی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد که جریان عبوری از آن با مقدار ثابت خود رسیده است. (القاگرها آرمانی هستند)



اگر مجموع انرژی مغناطیسی القاگرها $425\ mJ$ باشد،
کمترین انرژی مغناطیسی مربوط به کدام القاگر بوده و در صورتی که جریان بخواهد کاهش پیدا کند، این القاگر حداکثر چند ژول انرژی می‌تواند به مدار برگرداند؟

مثال ۳۵ شکل زیر مداری را نشان می‌دهد که شامل یک القاگر (سیملوئید)، مولد، رئوستا و آمپرسنج است. اگر بخواهیم بدون تغییر ولتاژ مولد، انرژی ذخیره شده در القاگر را زیاد کنیم، چه راهی پیشنهاد می‌کنید؟



مثال ۳۶ در مدار مسأله قبل اگر بخواهیم انرژی ذخیره شده در القاگر را دو برابر کنیم، مقاومت رئوستا باید چند درصد و چگونه تغییر کند؟ ($\sqrt{2} \simeq 1.4$)

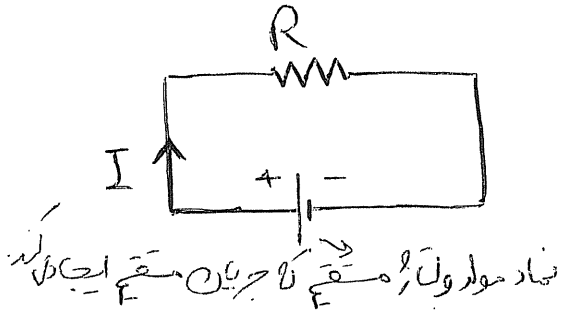
مثال ۳۷ اگر جریان عبوری از یک القاگر ۵A زیاد شود، انرژی ذخیره شده در آن ۲۱٪ و اگر جریان ۵A کم شود، انرژی ذخیره شده ۱۹٪ تغییر می‌کند. جریان گذرنده از سیملوئید چند آمپر است؟

بخش چهارم : جریان متناوب (جریان ac)

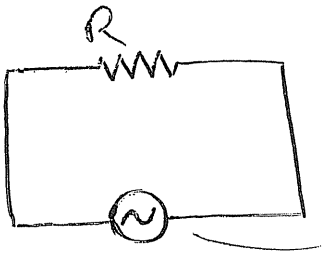
جریان متناوب، جریانی است که اندازه و جهت آن تغییر کرده و این تغییر با نظم خاص تکرار می‌شود.

جریان متناوب نوع جریان القایی است که از تغییر شار عبوری از یک پیچه حاصل می‌شود.

در واقع این مولدهای ولتاژ متناوب هستند که جریان متناوب می‌دهند. (همان طور که مولد ولتاژ مستقیم، جریان مستقیم (dc) ایجاد می‌کند)



نماد مولد ولتاژ مستقیم که جریان مستقیم ایجاد می‌کند

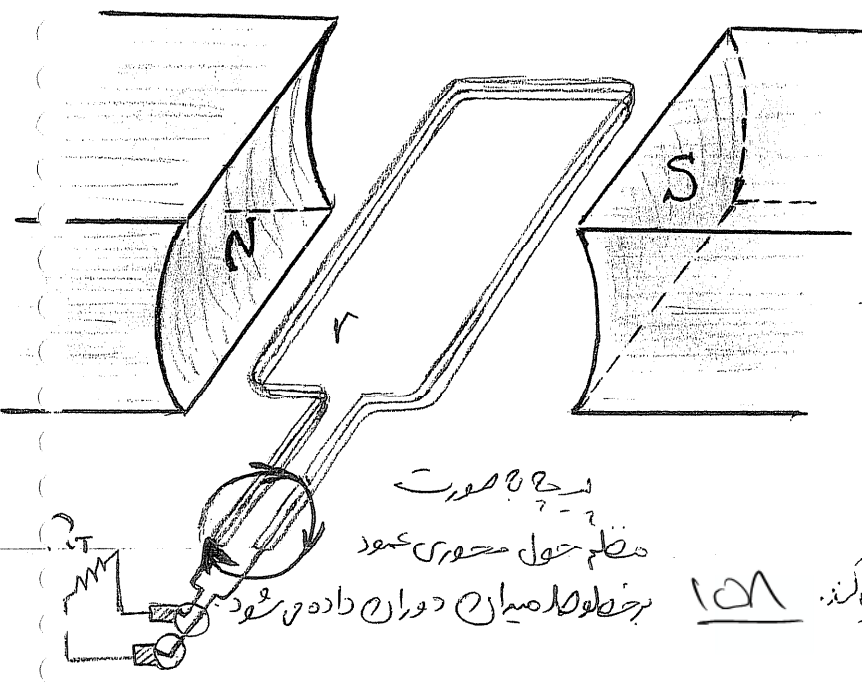


نماد مولد ولتاژ متناوب که جریان متناوب می‌دهد

در مولدهای ولتاژ متناوب، اساس کار قانون القای فاراده بوده و در این مولدها تغییر شار مغناطیسی عبوری از پیچه‌ات که باعث ایجاد جریان القایی می‌شود.

* برای اینکه تغییرات شار مغناطیسی باعث شکل‌گیری نیروی محرکه القایی متناوب و در نتیجه جریان القایی متناوب شود، باید به صورت منظم صورت گیرد.

* متداول‌ترین روشی برای تغییر شار مغناطیسی عبوری از پیچه، تغییر زاویه θ است. (θ زاویه‌ای بین خط عمود بر سطح پیچه‌ای است که در یک میدان مغناطیسی، با خطوط میدان حاصل می‌شود)



- شکل مقابل طرح ساده‌ای از یک مولد ولتاژ متناوب (مولد ac) است که ژنراتور نامیده می‌شود.
- فرض کنید زاویه θ با دوران پیچه تغییر کند.
- البته باید دقت داشت که در مولدهای صنعتی، پیچه ثابت و آهنربا دوران می‌کند و به این ترتیب زاویه θ و شار عبوری از پیچه تغییر می‌کند.

زاویه‌ی بردار عمود بر سطح پیچه و خطوط میدان ← θ ← $\Phi = BA\cos\theta$ ← شار مغناطیسی عبوری از پیچه

با این کار با دوران منظم پیچه، شار عبوری از پیچه در اثر تغییر θ، تغییر کرده و طبق قانون القای فاراده، در پیچه جریان القایی متناوب ایجاد می‌شود.

* دوران پیچه حول محور خود، دوره‌ای و متناوب با صورت منظم انجام می‌شود، یعنی دوران به صورت یکنواخت و با سرعت زاویه‌ای ثابت انجام شده و در حال تکرار است.

* زمان یک دور چرخش کامل پیچه (یعنی به اندازه 2π رادیان) را با T نمایش می‌دهند و آن دوره یا زمان تناوب می‌گویند.

زمان T ← 2π یک دور کامل
زمان t ← θ دوران به اندازه‌ی θ

$$\theta = \frac{2\pi}{T}t$$

$$\Phi = BA\cos\frac{2\pi}{T}t$$ ← تابع شار - زمان

از قانون القای فاراده ثابت کرد

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin\frac{2\pi}{T}t$$

تابع نیروی محرکه‌ی القایی متناوب برحسب زمان که در هر زمان دلخواه t نیروی محرکه‌ی القایی را می‌دهد.

- $\mathcal{E}$: نیروی محرکه‌ی القایی متناوب
- $\mathcal{E}_m$: نیروی محرکه‌ی القایی ماکزیمم یا بیشینه
- T: دوره یا زمان تناوب (s)
- t: یک زمان دلخواه (s)

از قانون اهم $I = \frac{\mathcal{E}}{R}$

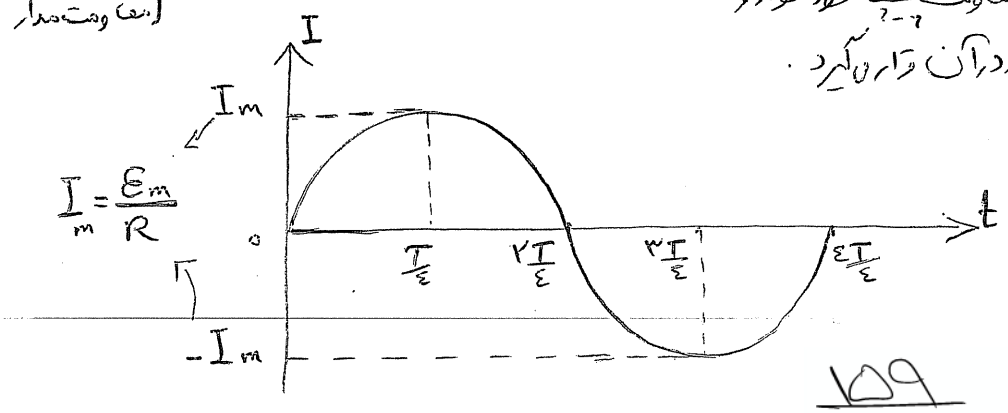
$$I = I_m \sin\frac{2\pi}{T}t$$

تابع جریان القایی متناوب برحسب زمان که در هر زمان دلخواه t، جریان القایی را نشان می‌دهد.

- I: جریان القایی متناوب
- I_m: جریان القایی ماکزیمم
- R: مقاومت پیچه + مقاومت مدار

* مهم: دقت کنید که R مجموع مقاومت پیچه خود مولد و مقاومت مداری است که مولد در آن جاری می‌کند.

* نمودار جریان متناوب ایجاد شده توسط مولد AC در یک مدار در یک زمان تناوب



نکته: در نیروگاه‌های تولید برق، برای ایجاد جریان متناوب از مولدهای خاصی استفاده می‌شود که مولد صنعتی متناوب نام دارند. در مولدهای صنعتی پیچه ساکن بوده و آهربای اطراف آن که آهربای الکتریکی است می‌چرخد.

در نیروگاه‌های کشور ما ایران، آهربای الکتریکی در هر ثانیه ۵۰ دور، درون پیچه‌ای می‌چرخد. به تعداد دور در ثانیه برای یک حرکت دورانی، بسامد گفته می‌شود که یکای آن در SI با صورت s^{-1} یا $\frac{1}{s}$ است که هرتز (Hz) نامیده می‌شود. $1Hz = 1s^{-1} = \frac{1}{s}$

برای مثال اگر بسامد یک حرکت دورانی ۲۰ Hz باشد، یعنی در این حرکت در یک ثانیه ۲۰ دوران کامل انجام می‌شود.

مثال ۳۸ معادله جریان - زمان یک مولد AC، در SI با صورت زیر است:

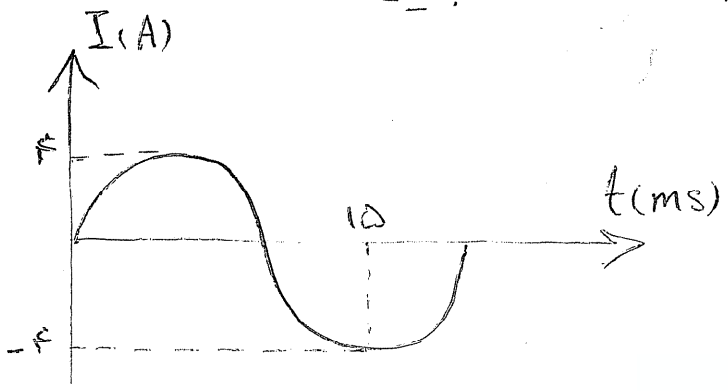
$I = 2\times10^{-3}\sin 120\pi t$

الف) مقدار جریان در لحظه $t=\frac{1}{30}s$ را تعیین کنید.

ب) دوره این جریان متناوب چند ثانیه است؟

پ) نمودار این جریان را برحسب زمان در یک دوره رسم کنید.

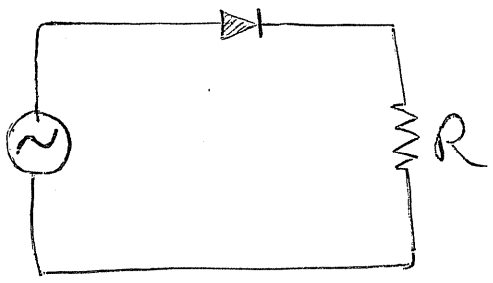
مثال ۳۹ شکل زیر، نمودار یک جریان متناوب سینوسی را نشان می‌دهد که یک مولد جریان متناوب آن را ایجاد کرده است. معادله جریان - زمان را بنویسید.



مثال ۴۰ جریان متناوبی با معادله $I = 5\sin(100\pi t)$ در SI از القاگری با ضریب القاوری $0.2\,H$ عبور می‌کند. الف) زمان تناوب این جریان را تعیین کنید.
ب) بیشینهٔ انرژی ذخیره شده در القاگر چند ژول می‌شود؟
پ) اگر مقاومت یک مولد ac که جریان را از آن خارج می‌شود $15\,\Omega$ باشد، معادلهٔ نیروی محرکهٔ متناوب برحسب زمان را بنویسید و نمودار آن را رسم کنید.

مثال ۴۱ جریان متناوب سینوسی که بیشینهٔ آن $2\,A$ و زمان تناوب آن $0.2\,s$ است، از یک رسانا 5 اهمی می‌گذرد. الف) در چهار لحظه‌ای جریان بیشینه است؟
ب) در این لحظات، اندازهٔ نیروی محرکهٔ القایی چند ولت می‌شود؟
پ) در لحظهٔ $t = \frac{1}{400}\,s$ جریان چند آمپر می‌شود؟

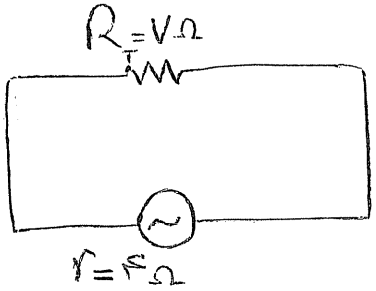
مثال ۴۲ یک منبع ولتاژ متناوب سینوسی مطابق شکل زیر در مداری، جریان الکتریکی برقرار می‌کند. نمودار تغییرات جریان برحسب زمان را رسم کنید.



* دقت کنید دیود جریان را در یک جهت از خود عبور داده، با طی دو نیم دوره آن یکسو کننده نیز می‌گویند.

مثال ۴۳: معادله ی شار مغناطیسی عبوری از پیچه ی یک مولد ac به صورت $\Phi = 0.05\cos(200\pi t)$ می باشد. اگر در یک مدار بیرونی جریان خروجی از مولد $0.2\,A$ و مجموع مقاومت پیچه و مقاومت خارجی مدار $50\,\Omega$ باشد، معادله ی نیروی محرکه ی متناوب برحسب زمان را بنویسید.

مثال ۴۴: معادله ی نیروی محرکه ی یک مولد ac به صورت $\varepsilon = 22\sin(20\pi t)$ می باشد. اگر مقاومت پیچه ی این مولد $4\,\Omega$ و مقاومت معادل مداری تک حلقه که مولد با آن وصل است $7\,\Omega$ باشد، ماکزیمم توان تولیدی مولد و ماکزیمم توان خروجی آن را حساب کنید.

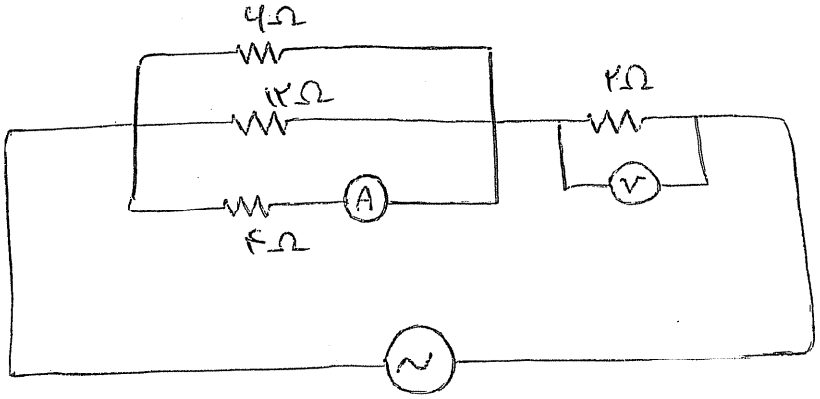


معادله ی اختلاف پتانسیل دو سر مولد برحسب زمان را بنویسید.

معادله ی توان خروجی مولد برحسب زمان چه خواهد بود؟

مثال ۴۵: مساحت سطح پیچه ی یک مولد ac $400\,cm^2$ و در میان مغناطیسی یکنواخت با اندازه ی $100\,G$ با دوره ی $0.2\,s$ دوران متناوب انجام می دهد. اگر در شروع دوران (مبدا زمان) سطح پیچه عمود بر خطوط میدان باشد، در چه لحظه ای برای اولین بار شار مغناطیسی $3\times10^{-4}\,wb$ از آن عبور می کند؟

مثال ۴۶: با توجه به مدار زیر، الف) نمودار عدد نمایش ولت‌سنج برحسب زمان و ب) نمودار عدد نمایش آمپرسنج برحسب زمان را رسم کنید.

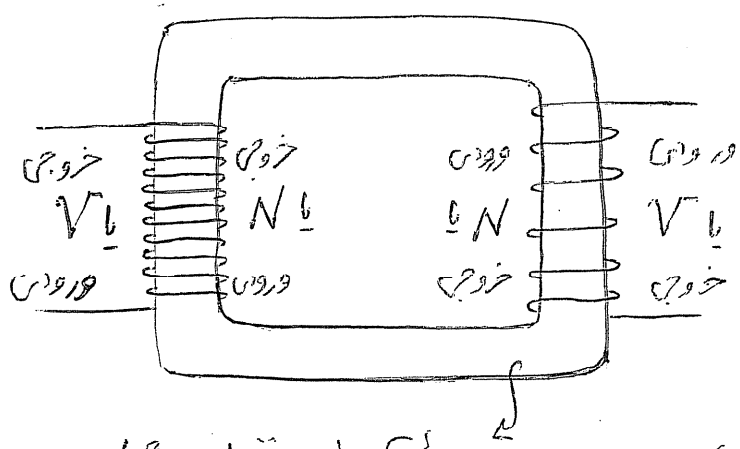


$r=4\Omega \quad \mathcal{E}=24\sin(20\pi t)$

* مبدل

یکی از مزیت‌های مهم نیروی محرکهٔ متناوب (ac) به نیروی محرکهٔ مستقیم (dc) این است که با وسیلهٔ به اسم مبدل می‌توان آن را افزایش یا کاهش داد.

شکل زیر، طرح ساده‌ای از ساختار یک مبدل آرمانی را نشان می‌دهد که شامل دو پیچه با تعداد دورهای متفاوت است که دور یک هستهٔ آهنی (فرومغناطیس نرم) پیچیده شده‌اند.



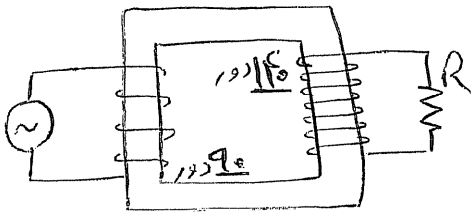
$$\frac{V_{\text{خروجی}}}{V_{\text{ورودی}}} = \frac{N_{\text{خروجی}}}{N_{\text{ورودی}}}$$

* یکی از پیچه‌ها ورودی بوده و درواقع با منبع ولتاژ متناوب (ac) از دیگرات و دیگری خروجی خواهد بود.

* اگر $\frac{N_{\text{خروجی}}}{N_{\text{ورودی}}} > 1$ باشد، مبدل افزاینده و اگر $\frac{N_{\text{خروجی}}}{N_{\text{ورودی}}} < 1$ باشد، مبدل کاهنده خواهد بود.

مثال ۴۷: یک مبدل ۲۲۰V به ۱۲V را در نظر بگیرید که با منبع برق شهری وصل بوده و پیچ ورودی آن ۸۸۰۰ دور دارد. با فرض آرمانی بودن مبدل تعداد دورهای پیچ ثانویه را تعیین کنید.

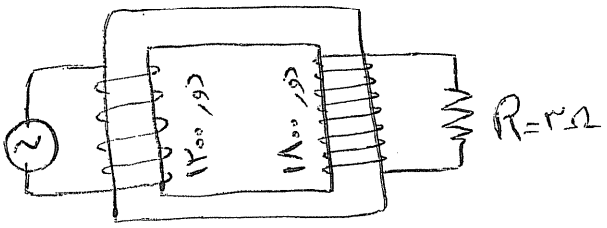
مثال ۴۸: در مبدل آرمانی نشان داده شده در شکل مقابل، اگر بیشینه ولتاژ دوسر مقاومت R برابر با ۷V باشد، بیشینه ولتاژ مولد چند ولت است؟



مثال ۴۹: در مبدل آرمانی شکل زیر، جریان متناوبی با معادله $I = 2\sin(200\pi t)$ در SI از دو سر مقاومت $R = 3\Omega$ عبور می‌کند.

الف) زمان تناوب این جریان چند ثانیه است؟

ب) بیشینه ولتاژ دوسر مولد چند ولت است؟



مثال ۵۰: در یک نیروگاه برق، ولتاژ ۱۰۰۰۰V توسط مبدل A به ۴۰۰۰۰V تبدیل شده و بعد از انتقال با یک شبکه، توسط مبدل B با ولتاژ ۵۰۰۰V تبدیل می‌شود. اگر تعداد دور سیم پیچ ثانویه‌ی مبدل A را K_A و مبدل B را K_B در نظر بگیرید، $\frac{K_A}{K_B}$ را بدست آورید.