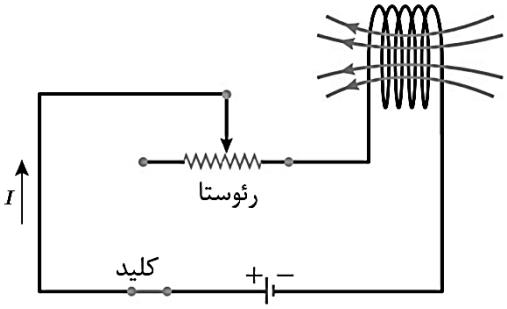
☑ بخش چهارم: القاگرها

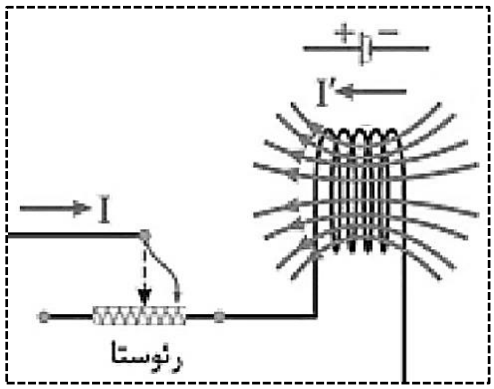
القاگری، خصوصیتی است که در اجزای الکترونیکی نظیر سیم‌پیچ، پیچه و سیم‌لوله ایجاد می‌شود. این خاصیت به خاطر میدان مغناطیسی‌ای که در اثر عبور جریان در این اجزاء ایجاد می‌شود، پدید می‌آید و کاربردهای بسیار جالب و مهمی در مدارهای الکترونیکی دارد.

← نماد القاگر در مدار:

* خود ــ القاوری



مداری مطابق شکل مقابل را در نظر بگیرید. در این مدار، یک سیملوله به یک باتری و یک رئوستا(مقاومت متغیر) به صورت متوالی متصل شده است. تا وقتی که لغزندهٔ رئوستا را حرکت نداده‌ایم، جریان ثابتی از مدار می‌گذرد و سیملوله نیز یک میدان مغناطیسی به وجود می‌آورد. در این حالت، هرچند که از درون سیملوله شار مغناطیسی عبور می‌کند، اما چون این شار ثابت است و تغییر نمی‌کند($\Delta\Phi = 0$)، القای الکترومغناطیسی هم رخ نمی‌دهد و هیچ نیروی محرکه و یا جریانی از طرف سیملوله به مدار القا نمی‌شود. در نتیجه، سیملوله مانند یک سیم عادی عمل کرده و جریان مدار($\mathbf{I}$) را از خود عبور می‌دهد.

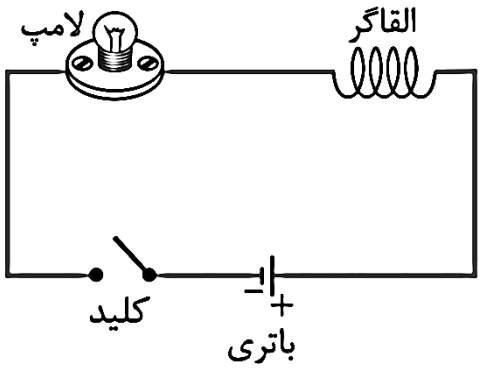


حال اگر لغزندهٔ رئوستا را همانند شکل مقابل به سمت راست بکشیم، مقاومت رئوستا کاهش یافته و جریان در مدار افزایش می‌یابد. با افزایش جریان، میدان مغناطیسی سیملوله نیز قوی‌تر می‌شود (بر اساس رابطهٔ $B = \frac{\mu . NI}{\ell}$ برای سیملولهٔ آرمانی که در فصل قبل خواندیم) لذا شار مغناطیسی گذرنده در سیملوله افزایش می‌یابد. با تغییر شار مغناطیسی و افزایش آن، نیروی محرکه‌ای در سیملوله القا می‌شود که بنابر قانون لنز، می‌خواهد با عامل این افزایشِ شار مخالفت کند. از آنجا که عامل افزایش شار در اینجا افزایش جریان در مدار است، پس سیملوله، همانند باتری‌ای که در خلاف جهت جریان بسته شده است عمل کرده، و جریانی در خلاف جهت جریان اصلیِ مدار ایجاد خواهد کرد ($\mathbf{I'}$). (چنانکه در شکل بالا نشان داده شده است)

← **نکتهٔ مهم:** البته این جریان القائی، در حدی نیست که جریان اصلی را کاملاً خنثی سازد اما باعث می‌شود که جریان اصلی مدار، با آهنگ کندتری افزایش یابد. **این موضوع می‌تواند به صورت برعکس نیز اتفاق افتد،** یعنی اگر جریان در مدار کم شود، سیملوله با کم شدن جریان نیز مخالفت می‌کند و آهنگ کاهش جریان اصلی مدار را با القاء یک جریان مخالف، کند می‌کند. پس یکی از خاصیت‌های مهم در اجزائی مانند سیملوله، **مخالفت با تغییر ناگهانی جریان در مدار** است و باعث می‌شود که این تغییرات به صورت نرم‌تر و آهسته‌تری انجام شوند و از همین خاصیت برای تعدیل نوسانات مدار و محافظت از وسایل الکترونیکی استفاده می‌شود.

← نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که نیروی محرکه و جریان القائیِ ایجاد شده در این حالت، ــ بر خلاف حالتی که در بخش قبل دیدیم ــ در اثر وجود یک میدان مغناطیسی خارجی(مثل آهنربایی که بیرون از سیملوله قرار دارد) ایجاد نشده، بلکه در اثر تغییر میدان مغناطیسی در خودِ سیملوله پدید آمده است، لذا این پدیده را **خود ــ القاوَری** (خود القایی) نامیده‌اند و اجزای الکترونیکی مانند سیم‌پیچ و سیملوله که این خاصیت را دارا هستند نیز به نام **القاگر** شناخته می‌شوند.

* شرح عملکرد القاگرها در هنگام قطع و وصل کردن مدار:

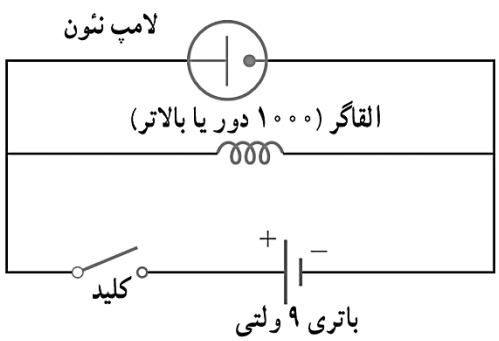


دانستیم که القاگرها (سیملوله یا سیم‌پیچ) با تغییر جریان در مدار مخالفت می‌کنند. اما اگر این تغییر در جریان از نوع قطع و وصل کردن (خاموش و روشن کردن) مدار باشد چه؟ شکل مقابل یک مدار ساده را نشان می‌دهد:

➔ هنگام **وصل کردن مدار**، جریان می‌خواهد که به ناگهان از صفر به یک مقدار معین افزایش یابد (که این مقدار معین بستگی به نیروی محرکهٔ باتری و مقاومت مدار دارد). اما القاگری که در مدار قرار دارد با این تغییر ناگهانی مخالفت می‌کند و باعث می‌شود که جریان با شیب ملایمی از مقدار صفر، تا به آن مقدار معین افزایش یابد، در نتیجه لامپی که در مدار وجود دارد با کمی تأخیر روشن می‌شود. تا قبل از آنکه شدت جریان به این حد معین برسد، جریان در حال افزایش است، لذا شدت میدان مغناطیسی در القاگر نیز در حال افزایش است، و این باعث می‌شود که القاگر در حال القاء جریان مخالف به مدار باشد تا جریان اصلی را تعدیل کند. اما وقتی که جریان به آن حد معین نهایی رسید، دیگر تغییر شدت جریان در مدار متوقف می‌شود (تغییر شار مغناطیسی صفر می‌شود و القای الکترومغناطیسی متوقف می‌شود) و دیگر القاگر، جریان مخالفی به مدار القا نمی‌کند. از اینجا به بعد القاگر(سیملوله یا سیم‌پیچ) مانند یک سیم عادی عمل می‌کند.

➔ اما هنگام **قطع کردن مدار**، جریان می‌خواهد که به ناگهان از مقداری مشخصی که دارد به صفر کاهش یابد. طبق آنچه از خاصیت القاگرها دانستیم، انتظار داریم که القاگری که در مدار قرار دارد با این تغییر ناگهانی نیز مخالفت می‌کند و باعث شود که جریان با شیب ملایمی از مقدار مشخص خود، تا حد صفر کاهش یابد. اما در اینجا سوالی پیش می‌آید: وقتی مدار قطع شود، دیگر جریانی وجود ندارد که القاگر بخواهد آن را تعدیل کند. به عبارت دیگر، القاگر برای اینکه جریان را به آهستگی کم کند تا به صفر برساند، نیاز به مقداری زمان دارد تا جریان را در آن بازهٔ زمانی، به تدریج کاهش دهد. اما وقتی مدار قطع می‌شود دیگر جریانی هم در مدار نیست که بخواهیم به تدریج آن را کاهش دهیم. در اینجا باید توجه داشت که القاگرها قابلیت دیگری نیز دارند که در بخش بعدی به آن می‌پردازیم اما در اینجا نیاز داریم که به آن اشاره کنیم. این قابلیت، **توانایی ذخیرهٔ انرژی مغناطیسی** است. همانند آنچه در خازن نیز دیدیم، القاگرها در هنگام وصل بودن مدار، مقداری انرژی در خود ذخیره می‌کنند و در صورت قطع شدن مدار، آن انرژی را با تولید نیروی محرکه و جریان القائی در مدار مصرف می‌کنند. لذا در مدار شکل بالا، هنگامی که کلید مدار قطع شود، با اینکه جریان اصلی مدار حذف می‌شود اما جریانی از سوی القاگر در مدار القا می‌شود و باعث می‌شود که جریان مدار به صورت ناگهانی قطع نشود و مدتی(هرچند کوتاه) زمان ببرد. همین امر باعث می‌شود که بعد از قطع کردن کلید، لامپی که در مدار وجود دارد با کمی تأخیر خاموش شود.

❑ **مثال۲ (آزمایش ۴-۲ کتاب درسی):** مدار شکل مقابل شامل باتری، کلید و یک لامپ و یک القاگر است.



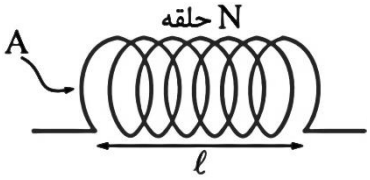
الف) اگر کلید را وصل کنیم، آیا لامپ روشن می‌شود؟ توضیح دهید.

ب) اگر کلید را قطع کنیم، چه اتفاقی رخ می‌دهد؟

* ضریب القاوری

همانگونه که برای خازن، کمیتی به نام ظرفیت (C) داشتیم که به مشخصات ساختمانی خازن بستگی داشت، برای القاگرها نیز کمیتی به نام **ضریب القاوری** وجود دارد که آن را با نماد $\mathbf{L}$ نشان می‌دهند. هرچه ضریب القاوری بیشتر باشد، مخالفت القاگر با تغییر جریان، شدیدتر خواهد بود و همچنین می‌تواند انرژی بیشتری ذخیره کند.

ضریب القاوری برای یک سیملولهٔ آرمانی (یعنی سیملوله‌ای که حلقه‌های نزدیک به هم و مقاومت صفر دارد) و بدون هسته، که دارای طول ℓ، سطح مقطع A و N حلقهٔ نزدیک به هم است. از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:



$$L = \mu_{\circ} \frac{AN^{2}}{\ell}$$

- یکای L (ضریب القاوری) در SI ، اُهم.ثانیه ($\Omega.s$) می‌باشد که **هانری** نام دارد و با نماد H نشان داده می‌شود.

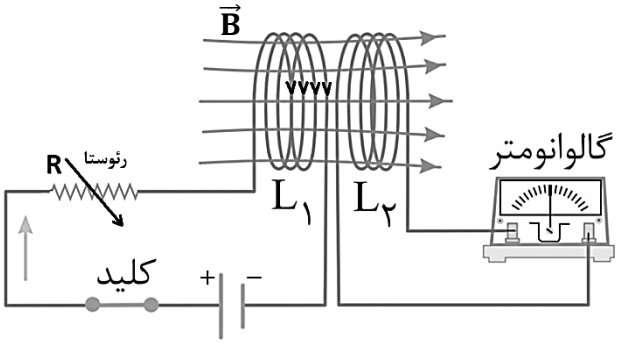
← نکته: توجه داشته باشید که ℓ طول سیملوله است نه طول سیم(شکل را ببینید). همچنین مواظب باشید که $\mathbf{L}$ را با ℓ اشتباه نگیرید.

← رابطهٔ مقایسه‌ای برای ضریب القاوری: با توجه به اینکه $\mu_{\circ}$ (تراوایی مغناطیسی خلاء) مقداری ثابت است، رابطهٔ مقایسه‌ای برای ضریب القاوری به صورت مقابل خواهد بود:

$$\frac{L_{1}}{L_{2}} = \left(\frac{A_{1}}{A_{2}}\right)\left(\frac{N_{1}}{N_{2}}\right)^{2}\left(\frac{\ell_{2}}{\ell_{1}}\right)$$

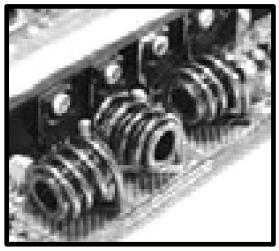
کتاب درسی ○ **مثال ۴–۵** (بررسی شود) ○ **تمرین ۴–۳** (حل شود)

* القــای متقــابل



در شکل مقابل، دو مدار دارای سیملوله را مشاهده می‌کنید. مدار ۱ (سمت چپ) دارای باتری است که در آن جریانی را ایجاد می‌کند. اما مدار ۲ (سمت راست) باتری ندارد و فقط به یک گالوانومتر متصل است. عبور جریان از سیملولهٔ ۱ باعث پدید آمدن میدان مغناطیسی $\vec{B}$ می‌شود. بخشی از خطوطِ این میدان مغناطیسی از سیملولهٔ ۲ نیز می‌گذرد.

حال اگر مقاومت رئوستا را در مدار ۱ تغییر دهیم، جریان مدار ۱ تغییر خواهد کرد و بر اثر آن، میدان مغناطیسی سیملولهٔ ۱ و در نتیجه، شار عبوری از سیملولهٔ ۲ نیز تغییر خواهد کرد. بنابر قانون فاراده، این تغییر شار، نیروی محرکه‌ای را در سیملولهٔ ۲ القا می‌کند که به ایجاد جریان القایی در این سیملوله می‌انجامد (انحراف عقربهٔ گالوانومتر، وجود این جریان را نشان می‌دهد). اما موضوع به همین‌جا ختم نمی‌شود زیرا جریان سیملولهٔ ۲ در اثر تغییر جریانِ سیملولهٔ ۱، در حال تغییر است و این باعث می‌شود که از جانب سیملولهٔ ۲ نیز نیروی محرکه‌ای در سیملولهٔ ۱ القا شود. این فرایند **القای متقابل** نامیده می‌شود و **به کمک آن می‌توان انرژی را از یک القاگر به القاگر دیگر منتقل کرد.**



← نکته: در مدارهایی که دارای چندین القاگر هستند، تغییر جریان در یک القاگر می‌تواند باعث القای نیروی محرکهٔ ناخواسته به دیگر القاگرهای مجاور شود. لذا برای هرچه کمتر کردن این مزاحمت، سطح حلقه‌های القاگرهای مجاورِ هم را به طور **عمود بر یکدیگر** قرار می‌دهند تا اثر القای متقابل، تا حد امکان کوچک شود (شکل مقابل).

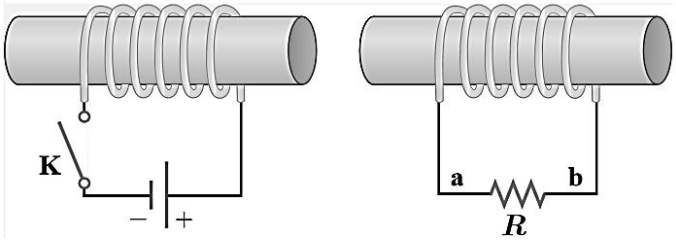
← نکته: جهت جریان سیملوله‌ها در القای متقابل

بر اساس قانون لنز، جهت جریان القایی در مدار و سیملولهٔ ۲، در جهتی است که با تغییر شار گذرنده از آن مخالفت کند. این تغییر شار در سیملولهٔ ۲، معمولاً به واسطهٔ دو چیز اتفاق می‌افتد: ❶ جریان در مدار ۱ تغییر کند. ❷ فاصلهٔ میان مدار ۱ و ۲ تغییر کند.
(دو علت دیگر برای تغییر شار مغناطیسی عبارت بودند از: چرخش سیملوله در میدان مغناطیسی و تغییر سطح سیملوله که در اینجا کاربردی ندارند)

← حالت ۱: اگر جریان در مدار ۱ افزایش یابد یا فاصلهٔ دو مدار کم شود، شار مغناطیسی عبوری از سیملولهٔ ۲ زیاد می‌شود. لذا جهت میدان مغناطیسی و جهت جریان در مدار ۲، برعکس جهت میدان و جریان در مدار ۱ می‌شود تا از زیاد شدن شار جلوگیری کند.

← حالت ۲: اگر جریان در مدار ۱ کاهش یابد یا فاصلهٔ دو مدار زیاد شود، شار مغناطیسی عبوری از سیملولهٔ ۲ کم می‌شود. لذا جهت میدان مغناطیسی و جهت جریان در مدار ۲، هم‌جهت با جهت میدان و جریان در مدار ۱ می‌شود تا از کم شدن شار جلوگیری کند.

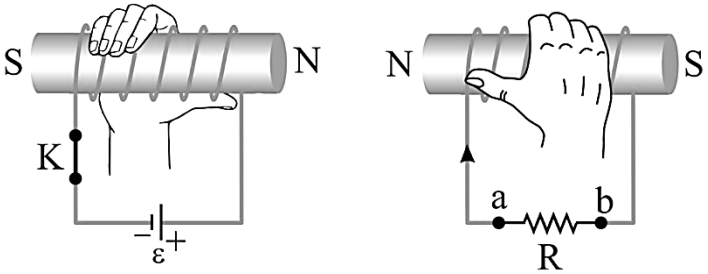
□ مثال ۳ (مسئلهٔ ۱۴ از مسائل پایان فصل ۴): در مدار نشان داده شده در شکل زیر، جهت جریان القایی را در مقاومت R در هریک از دو حالت زیر با ذکر دلیل پیدا کنید:



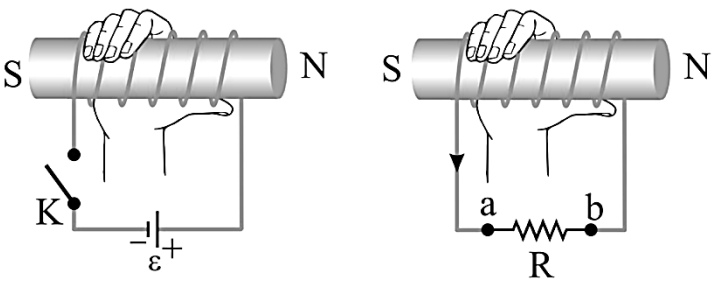
الف) در لحظهٔ بستن کلید K

ب) در لحظهٔ باز کردن کلید K

← حل و تشریح مسئله:



الف) وقتی کلید بسته می‌شود، جریان سیملولهٔ سمت چپ که در ابتدا صفر بود، افزایش می‌یابد. لذا شار عبوری از سیملولهٔ سمت راست، بیشتر می‌شود. در نتیجه، جهت میدان مغناطیسی در سیملولهٔ راست، عکسِ جهت میدان در سیملولهٔ چپ خواهد شد تا از افزایش شار جلوگیری کند. جهت میدان (و قطب‌های N و S) و جهت جریان در هر دو سیملوله، با قاعدهٔ دست راست به دست می‌آید (جهت چرخش چهار انگشت در جهت جریان، و انگشت شست در جهت میدان). بر این اساس، ابتدا با توجه به جهت جریان در سیملولهٔ چپ (که از قطب + باتری به سمت قطب - است)، جهت میدانِ آن را معلوم می‌کنیم و سپس جهت میدانِ سیملولهٔ راست را برعکس در نظر می‌گیریم(انگشت شست دست راست را در جهت عکس سیملولهٔ چپ قرار می‌دهیم)، در نتیجه، جهت جریان در سیملولهٔ راست به دست می‌آید (در جهت گردش چهار انگشت). پس جریان در مقاومت R از b به a خواهد بود.



ب) مشابه روش قسمت الف، در اینجا با باز کردن کلید، جریان در سیملولهٔ چپ کاهش می‌یابد. لذا شار کم شده و جهت میدان مغناطیسی در سیملولهٔ راست، هم‌جهت با میدان مغناطیسیِ سیملولهٔ چپ می‌شود تا از کاهش شار جلوگیری کند. حال با استفاده از قاعدهٔ دست راست می‌توان جهت میدان‌ها و در نتیجه، جهت جریان در سیملولهٔ سمت راست را پیدا کرد. با توجه به شکل می‌بینیم که در این حالت جریان در مقاومت R از a به b خواهد بود (**توجه کنید که جهت جریان و میدان در سیملولهٔ چپ تغییر نمی‌کند، بلکه فقط شدت جریان و میدانِ آن تغییر می‌کند**).

* انرژی ذخیره شده در القاگر

وقتی القاگر به مولد (باتری) وصل می‌شود، جریانی در القاگر برقرار می‌شود و مولد به القاگر انرژی می‌دهد. بخشی از این انرژی به خاطر مقاومت الکتریکیِ سیم‌های القاگر، به صورت گرما تلف شده، و بقیهٔ آن در میدان مغناطیسیِ القاگر ذخیره می‌شود.

مقدار انرژی ذخیره شده در میدان القاگر با ضریب القاوری L، از رابطهٔ مقابل به‌دست می‌آید:

$$U = \frac{۱}{۲} LI^{۲}$$

- **U: انرژی ذخیره شده در القاگر بر حسب ژول (J)**

← **از این رابطه معلوم می‌شود:** هرچه جریان عبوری از سیملوله یا ضریب‌القاوری آن بزرگتر باشد، انرژی بیشتری در آن ذخیره می‌شود (وبالعکس).

← **نکته:** اگر یکای انرژی(U) را بر حسب **KWh** دادند، کافی است که آن را به **Ws** تبدیل کنید. چون **Ws** برابر با ژول(J) است.

$$U = ۱\,kWh = (۱\times۱۰^{۳}\ W)\times(۳۶۰۰\,s) = ۳/۶\times۱۰^{۶}\ J$$

تفاوت میان القاگر و مقاومت:

با عبور هر جریانی (چه پایا و چه متغیر) از **مقاومت**، انرژی به آن وارد می‌شود اما به صورت گرما تلف می‌شود (انرژی ذخیره نمی‌شود).

اما در یک **القاگر** آرمانی (با مقاومت صفر)، انرژی تلف نمی‌شود، بلکه بسته به نوع جریان، سه حالت پیش می‌آید:

❶ **وقتی جریان در حال افزایش باشد:** انرژی به القاگر وارد می‌شود و در آن ذخیره می‌گردد (**انرژیِ ذخیره شده، افزایش می‌یابد**).

❷ **وقتی جریان در حال کاهش باشد:** انرژیِ ذخیره شده، از القاگر خارج می‌شود و آزاد می‌گردد (**انرژیِ ذخیره شده، کاهش می‌یابد**).

❸ **وقتی جریان پایا باشد:** انرژی به القاگر وارد یا از آن خارج **نمی‌شود** (**انرژیِ ذخیره شده، ثابت می‌ماند**).

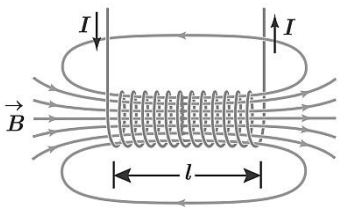
← **نکته:** هنگام کاهش جریان، انرژیِ القاگر در مدار آزاد می‌شود تا با کاهش جریان مخالفت کند (وبالعکس).

← **نکته:** انرژی **خازن** در میدان الکتریکی بین دو صفحهٔ آن ذخیره می‌شود؛ اما انرژی **القاگر** در میدان مغناطیسی آن ذخیره می‌شود.

کتاب درسی ○ **مثال ۴–۶** (بررسی شود) ○ **تمرین ۴–۴** (حل شود)

❑ **مثال ۴:** القاگری به ضریب القاگری ۰/۴ هانری و مقاومت ۶ اهم را به اختلاف پتانسیل ۱۲ ولت وصل می‌کنیم. انرژی ذخیره شده در القاگر چند ژول است؟

❑ **مثال ۵ (مسئلهٔ ۱۸ از مسائل پایان فصل ۴):** مساحت هر حلقه و طول سیملولهٔ شکل مقابل به‌ترتیب $۲۰\,cm^{۲}$ و $۸۰\,cm$ است. اگر این سیملوله از ۱۰۰۰ حلقهٔ نزدیک به هم تشکیل شده باشد:



الف) ضریب القاوری آن را پیدا کنید.

ب) چه جریانی از سیملوله بگذرد تا در میدان مغناطیسی آن ۰/۴ mJ انرژی ذخیره شود؟