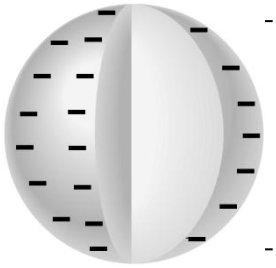
☑ بخش۹: میدان الکتریکی در داخل رساناها

اگر یک رسانای خنثی، باردار شود و یا درون یک میدان الکتریکیِ خارجی قرار بگیرد، در داخل و خارجِ آن چه اتفاقاتی روی می‌دهد؟ در این بخش می‌خواهیم نگاه دقیقتری راجع به این مسائل داشته باشیم.

❋ نحوهٔ توزیع بار الکتریکی در رسانا

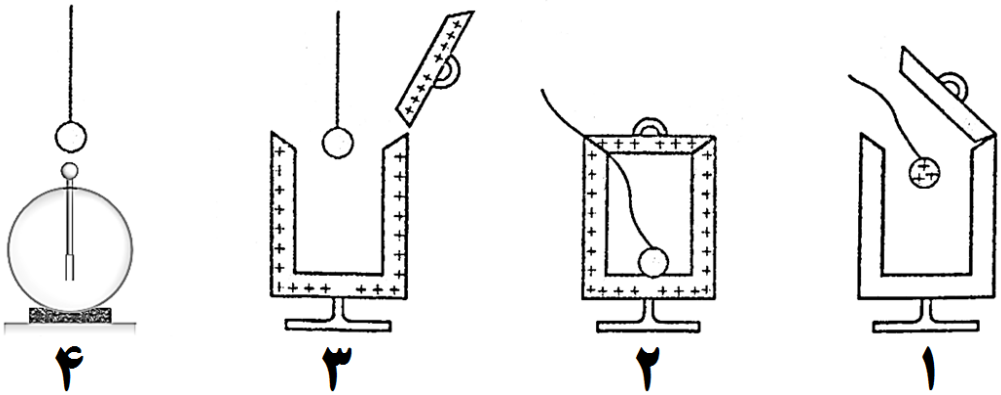
برای نشان دادن یک کرهٔ رسانا که دارای بار منفی است از شکل نمادین استفاده می‌کنیم. شاید با دیدن این شکل، گمان کنید که بارهای منفی در تمام قسمت‌های داخلی و سطح کره پراکنده شده اند. اما اگر بخواهیم تصویر واقعی‌تری از نحوهٔ توزیع بارها در این کره نشان بدهیم، می‌توانیم به شکل زیر اشاره کنیم:



چنان‌که مشاهده می‌کنید، هیچ باری در قسمت‌های داخلی کره وجود ندارد و همهٔ بارها در سطح خارجی کره توزیع شده‌اند. این پدیده، به دلیل دافعهٔ میان بارهای همنام اتفاق می‌افتد. بارها یکدیگر را می‌رانند و می‌خواهند در دورترین فاصله از هم قرار بگیرند، لذا در مدت بسیار کوتاهی در سطح کره پخش می‌شوند و در یک وضعیت تعادلی نسبت به هم قرار می‌گیرند که به آن **تعادل الکتروستاتیکی** گفته می‌شود.

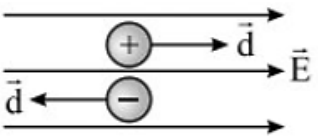
آزمایش فاراده: برای بررسی صحت این موضوع می‌توانیم از آزمایش فاراده استفاده کنیم.

۱← یک گوی رسانای باردار را که از نخ عایقی آویزان است، وارد یک ظرف رسانای خنثی(بدون بار) می‌کنیم (این ظرف دارای پایهٔ عایق است و درپوش آن نیز دسته‌ای عایق دارد) **۲←** گوی را با کف ظرف تماس می‌دهیم و درپوش فلزی را می‌بندیم. **۴←** گوی را کمی بالا می‌آوریم تا از کف ظرف جدا شود، سپس درپوش فلزی را با دستهٔ عایقش برمی‌داریم. **۳←** گوی را به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک می‌کنیم. مشاهده می‌شود که عقربهٔ آن تکان نمی‌خورد (یعنی گوی باری ندارد). سپس ظرف را به الکتروسکوپ نزدیک می‌کنیم، می‌بینیم که عقربه‌های ان حرکت می‌کنند (یعنی باردار شده است).



توضیح: پیش از این، در مبحث باردار کردن اجسام به روش تماسی ، دانستیم که اگر جسم رسانای بارداری با جسم رسانای خنثی تماس پیدا کند، مانند یک جسمِ به‌هم پیوسته می‌شوند و بارها را میان خود تقسیم می‌کنند. لذا بعد از جدایی، هر دو باردار خواهند بود. اما در آزمایش فاراده، بعد از تماس دو جسم رسانا، جسمِ باردار، همهٔ بار خود را به جسم خنثی می‌دهد و خودش بدون بار می‌شود. دلیل این اتفاق، آن است که در این آزمایش، جسم باردار در شرایطی با جسم خنثی تماس برقرار می‌کند، که جزئی از قسمت داخلیِ این جسمِ به‌هم پیوسته (مجموع جسم‌ها) می‌شود (شکل ۲)، و چون بارها در سطح خارجی رسانا توزیع می‌شوند، همهٔ بارهای گوی، به سطح خارجی ظرف منتقل شده و باری در خود گوی باقی نمی‌ماند. ← از **آزمایش فاراده** نتیجه می‌گیریم که: **بار اضافیِ داده شده به یک رسانا، روی سطح خارجی آن توزیع می‌شود.**

* میدان و پتانسیل الکتریکی در رسانای باردار



ابتدا این نکته را یادآوری کنیم که اگر بار q در **میدان الکتریکی** قرار بگیرد، به آن نیرو وارد می‌شود و بسته به اینکه بار q مثبت باشد یا منفی، در جهت طبیعی خود حرکت خواهد کرد. همچنین **اختلاف پتانسیل** بین دو نقطه، باعث شارش بار و جریان الکتریکی میان آن دو نقطه خواهد شد.

با توجه به این دو نکته، دو نتیجهٔ مهم زیر برای جسم رسانای باردار حاصل می‌شود:

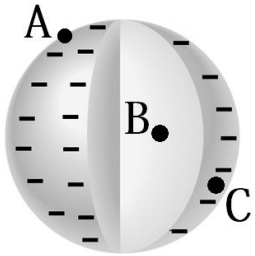
(مهم!)

۱– میدان الکتریکی در داخل رسانا: **در حالت تعادل الکتروستاتیکی، میدان الکتریکی داخل رسانا صفر است.**

دلیل: زیرا اگر این میدان صفر نباشد، بر الکترون‌های آزاد داخل رسانا (بارها)، نیرو وارد می‌کند و باعث جابه‌جایی آن‌ها و ایجاد جریان الکتریکی می‌شود. در این حالت دیگر نمی‌توان گفت که بارها در تعادل الکتروستاتیکی قرار دارند. (این استدلال را حفظ باشید.)

(مهم!)

۲– پتانسیل الکتریکی رسانا: **در حالت تعادل الکتروستاتیکی، همهٔ نقاط رسانا** (داخل و سطح خارجی)، **پتانسیل یکسان دارند.**



$V_A = V_B = V_C$

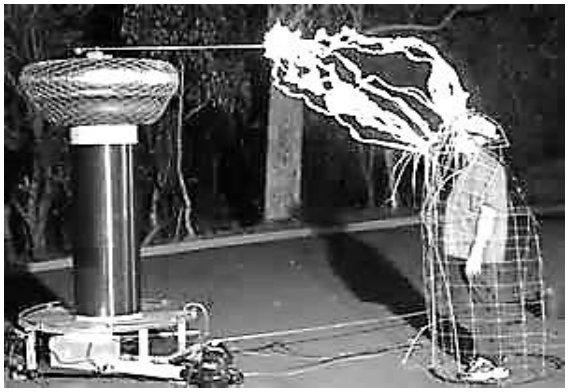
دلیل: در حالت تعادل الکتروستاتیکی، میدان الکتریکی داخل رسانا صفر است، لذا نیروی الکتریکی وارد بر ذره‌های باردار داخل رسانا نیز صفر می‌شود، در نتیجه کار نیروی الکتریکی(W_E) نیز صفر شده و طبق رابطه‌های زیر، ΔV نیز صفر خواهد شد، پس همهٔ نقاط رسانا پتانسیل یکسانی خواهند داشت.

$$F_E = 0 \Rightarrow \Delta U_E = -W_E = 0$$

$$\Delta V = \frac{\Delta U_E}{q} = 0 \Rightarrow V_2 - V_1 = 0 \Rightarrow V_1 = V_2$$

همچنین می‌توان گفت که: اگر پتانسیل الکتریکی در نقاط مختلف رسانای باردار یکسان نبود، باید جریان الکتریکی در رسانا ایجاد می‌شد اما می‌بینیم که چنین اتفاقی رخ نمی‌دهد و تعادل الکتروستاتیکی برقرار است.

فعالیت ۱– ۷ کتاب درسی **الف) در شکل، شخصی را داخل یک قفس توری فلزی می‌بینید که نوعی از قفس فاراده است. در مورد قفس فاراده و کاربردهایش تحقیق و به کلاس گزارش کنید.**

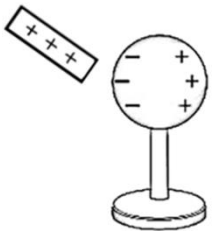


پاسخ: چنان‌که در شکل دیده می‌شود، وقتی فردی درون یک قفس کاملاً بسته قرار بگیرد، به طوری که تمام اطراف آن شخص توسط قفس احاطه شود، حتی اگر بار الکتریکی با ولتاژ بسیار زیاد روی آن قفس تخلیه شود، شخص هیچ آسیبی نمی‌بیند. به این آزمایش **قفس فاراده** می‌گویند. علت این پدیده هم این است که چون قفس فلزی، یک رسانا است، همهٔ باری که به آن می‌رسد، بر روی سطح خارجی قفس قرار می‌گیرد و چیزی از آن به داخل سرایت نمی‌کند. (محافظت الکتروستاتیک)

ب) چرا معمولاً شخصی که در داخل اتومبیل یا هواپیماست از خطر آذرخش در امان می‌ماند؟

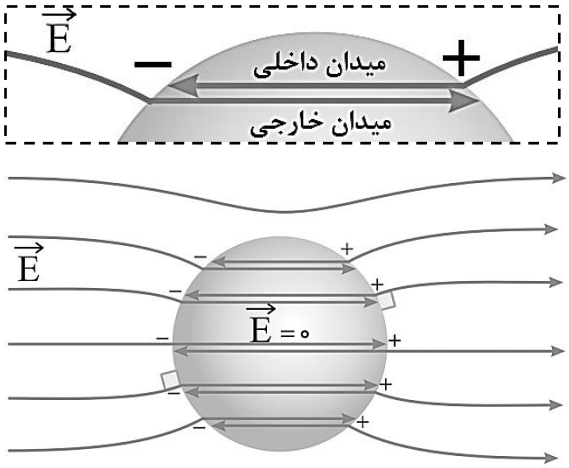
پاسخ: زیرا بدنهٔ فلزی اتومبیل یا هواپیما مانند قفس فاراده عمل می‌کند و مانع رسیدن بار الکتریکی آذرخش به سرنشینان می‌شود.

* رسانای خنثی در میدان الکتریکی



در بخش‌های قبل دیدیم که وقتی یک جسم باردار به رسانای خنثی نزدیک می‌شود، بارهای رسانای خنثی از هم جدا می‌شوند که به اصطلاح به آن عمل **القا** گفته می‌شود. حال می‌دانیم که در واقع، رسانای خنثی در میدان الکتریکی جسم باردار قرار گرفته است و نیروی ناشی از این میدان، بارهای رسانا را به حرکت در آورده است.

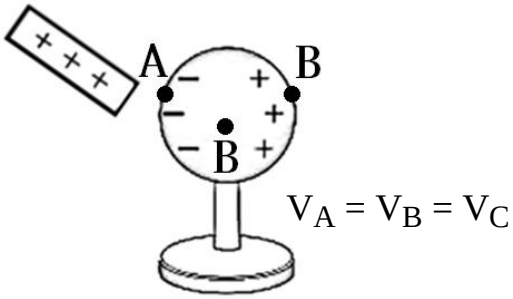
اکنون می‌خواهیم نگاه دقیقتری به این پدیده داشته باشیم، تا ببینیم با عبور میدان الکتریکی از درون یک رسانای خنثی چه می‌شود.



با قرارگیری رسانای خنثی درون یک میدان الکتریکی خارجی، بارهای جسم رسانا بر اثر نیروی ناشی از میدان خارجی، از هم جدا می‌شوند به طوری که بارهای مثبت در جهت میدان و بارهای منفی در خلاف جهت میدان الکتریکی جابه‌جا می‌شوند. پس یک طرف رسانا دارای بار مثبت و طرف دیگر دارای بار منفی می‌شود. در این حالت می‌توان وجود ۲ میدان الکتریکی را درون رسانای خنثی فرض کرد. یکی میدان خارجی که خطوط آن در شکل مقابل از چپ به راست کشیده شده است و یکی هم میدان داخلی که خطوط آن بر خلاف جهت میدان خارجی، از بارهای مثبتِ رسانا به سمت بارهای منفیِ رسانا کشیده شده‌اند.

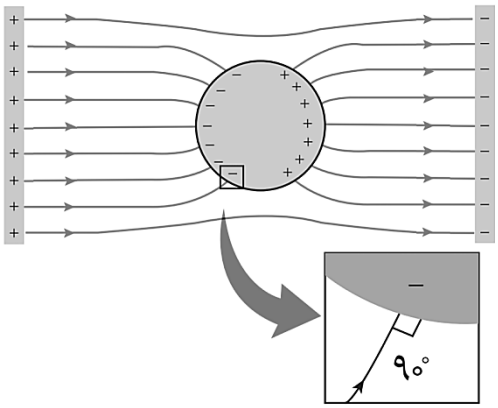
این میدان داخلی، اثر میدان خارجی را درون رسانا خنثی می‌کند و بدین ترتیب، **میدان الکتریکی خالص درون رسانا صفر می‌شود** و به بیان دیگر می‌توانیم بگوییم: اگر رسانا در تعادل الکتروستاتیکی باشد، میدان الکتریکی از جسم آن رسانا عبور نمی‌کند.

در واقع، همانند آنچه در قسمت قبل در مورد **رسانای باردار** گفتیم، در اینجا هم وقتی جسم **رسانای خنثی** درون میدان الکتریکی خارجی قرار می‌گیرد، توزیع بار بر روی جسم رسانا به گونه‌ای انجام می‌گیرد که الکترون‌های آزاد (بارهای) آن در مدت زمان بسیار کوتاهی به تعادل الکتروستاتیکی می‌رسند و بر اثر آن:



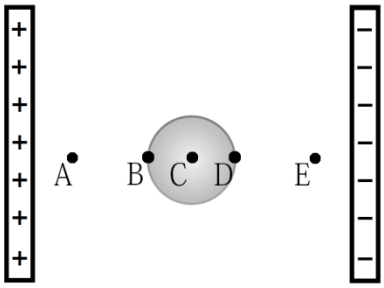
۱- **میدان الکتریکی داخل رسانا صفر می‌شود.**

۲- **همهٔ نقاط رسانا دارای پتانسیل یکسان می‌شوند.**



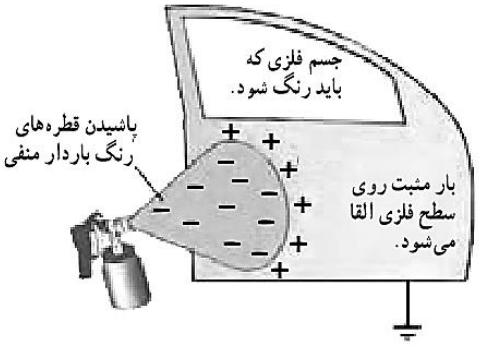
❖ **خوب است بدانید:** در تعادل الکتروستاتیکی، خطوط میدان همواره **عمود بر سطح** رسانا هستند (رسانا هر شکلی می‌تواند داشته باشد)، در غیر این‌صورت، میدان مؤلفه‌ای مماس بر سطح رسانا خواهد داشت که باعث حرکت بارهای روی سطح رسانا و ایجاد جریان الکتریکی می‌شود که در تناقض با تعادل الکتروستاتیکی است. همچنین این ویژگی سبب می‌شود که با حرکت بر سطح رسانا، همواره عمود بر میدان جابه‌جا شویم، لذا کار نیروی الکتریکی صفر شده و پتانسیل الکتریکی نیز ثابت باقی می‌ماند؛ پس پتانسیل الکتریکی در تمام نقاطِ روی سطح (و نیز داخل جسم) رسانایی که درون میدان الکتریکی قرار گرفته یکسان است.

مثال ۳۷ : در شکل مقابل، یک جسم رسانا در میدان الکتریکی یکنواخت قرار دارد و تعادل الکتروستاتیکی در آن ایجاد شده است. پتانسیل الکتریکی را برای چهار نقطهٔ مشخص شده، مقایسه کنید.



دلیل) پتانسیل در جهت میدان کاهش می‌یابد اما در تمام نقاط رسانا (سطح خارجی و داخل) پتانسیل یکسان است.

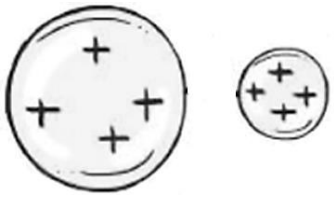
فناوری و کاربرد **رنگ‌پاشی الکتروستاتیکی:** اساس این رنگ‌پاشی مبتنی بر پدیدهٔ **القای بار الکتریکی** است.



ابتدا سطح فلزی‌ای که قرار است رنگ شود به زمین متصل می‌شود. قطره‌های ریز رنگ که هنگام خروج از دهانهٔ رنگ‌پاش، باردار شده‌اند، با نزدیک شدن به هدف فلزی، بار مخالف خود را بر روی آن القا می‌کنند و به این ترتیب میان آن‌ها جاذبه ایجاد شده و قطره‌های رنگ جذب سطح فلز می‌شوند. **این روش دو مزیت دارد:**

۱- رنگ کمتری استفاده می‌شود. ۲- رنگ یکنواختی بر روی سطح فلز ایجاد می‌شود.

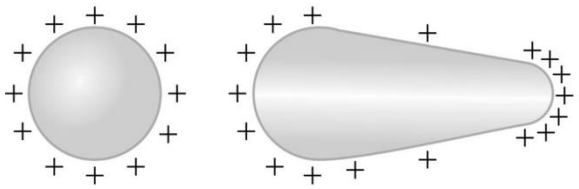
* چگالی سطحی بار



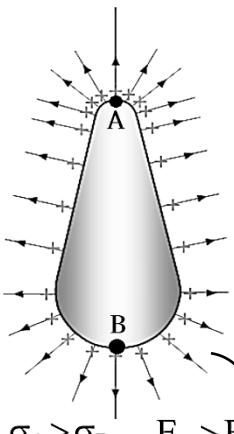
فرض کنید که به دو کرهٔ شکل مقابل، مقدار بار یکسان بدهیم. با اینکه بار آن‌ها تفاوتی با هم ندارد، اما بارهای کرهٔ کوچکتر تراکم بیشتری دارند. بر این اساس، کمیت جدیدی به نام **چگالی سطحی بار** (σ) تعریف می‌شود.

σ: حرف یونانی که **سیگما** تلفظ می‌شود (چگالی سطحی بار).
Q: همان q است که مقدار بار است (بر حسب کولن).
A: مساحت سطحی که بار روی آن توزیع شده است (بر حسب مترمربع).

$$\sigma = \frac{Q}{A} \quad \text{یکا در SI} \longrightarrow \frac{C}{m^2} \quad \begin{matrix} \rightarrow \text{کولن} \\ \rightarrow \text{مترمربع} \end{matrix}$$



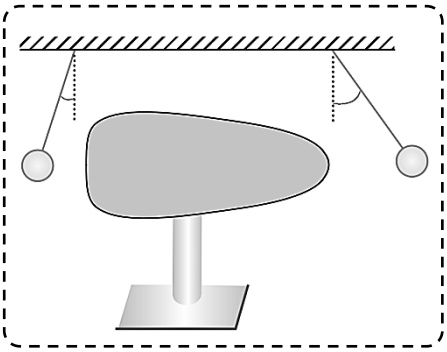
چنانکه متوجه شده‌اید، چگالی سطحی بار به تعداد بارهای موجود بر واحد سطح بستگی دارد و از طرفی می‌دانیم که بارها در اجسام رسانا، بر روی سطح توزیع می‌شوند. نکتهٔ مهمی که در این رابطه وجود دارد، این است که آزمایش‌ها نشان می‌دهند که **تراکم بار در نقاط تیز سطح جسم رسانا، بیشتر از سایر نقاط است**، لذا چگالی سطحی بار نیز در این نقاط بیشتر است.



برای کره که یک جسم کاملاً متقارن است، بارها به صورت کاملاً یکنواخت بر روی سطح توزیع می‌شوند و چگالی سطحی بار در همهٔ نقاط سطح آن یکسان است. اما برای سایر اجسام، توزیع بار در سطح جسم، یکنواخت نیست و بارها بیشتر در نقاط برجسته و نوک‌تیز تجمع می‌کنند. لذا با اینکه پتانسیل همهٔ نقاط در رسانای باردار، یکسان است و میدان در داخل آن نیز صفر است، اما **میدان الکتریکی در سطح نقاط نوک‌تیز، بزرگتر (قوی‌تر) از سایر نقاط است** و خطوط میدان که در بیرون از جسم برای آن رسم می‌شود، در این نقاط متراکم‌تر می‌باشند.

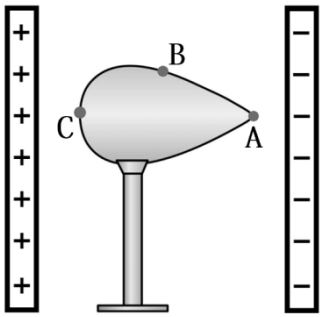
$\sigma_A > \sigma_B$ $E_A > E_B$ $V_A = V_B$

فعالیت ۱– ۸ کتاب درسی دو قطعه ورقهٔ آلومینیومی نازک به ابعاد ۳cm×۴cm را مچاله کنید و به سرهای دو تکه نخ هم اندازه به طول ۳۰cm وصل کنید. پس از آن‌که جسم فلزی دوکی‌شکل را با مولد وان‌دوگراف باردار کردید، یکی از آونگ‌ها را مقابل نوک تیز و دیگری را مقابل بخش پهن دوک بیاویزید. چه مشاهده می‌کنید؟ مشاهدهٔ خود را توجیه کنید.



پاسخ: ابتدا جسم دوکی‌شکل که باردار شده است، بار مخالف خود را در هر دو آونگ که بدون بار هستند القا می‌کند و آونگ‌ها به سمت دوک جذب می‌شوند. بعد از برخورد آونگ‌ها با سطح دوک، مقداری از بار دوک به آن‌ها منتقل شده و باری همنام با بار جسم دوکی‌شکل پیدا کرده و به همین دلیل از هم دور می‌شوند. در این هنگام مشاهده می‌کنیم آونگی که به قسمت نوک‌تیز دوک برخورد کرده است انحراف بیشتری پیدا می‌کند (بیشتر از دوک دور می‌شود). علت این است که چگالی بار در قسمت نوک تیز جسم دوکی‌شکل بیشتر است در نتیجه میدان الکتریکی در نزدیکی آن قوی‌تر بوده و نیروی دافعهٔ بیشتری به آونگ وارد می‌کند.

مثال ۳۸ (نهایی ریاضی ـ خرداد ۹۶): در شکل مقابل، جسم رسانای منزوی و خنثی که روی پایهٔ عایقی قرار دارد، بین دو صفحهٔ رسانای باردار موازی، در تعادل الکتروستاتیکی است.



الف) میدان الکتریکی خالص درون جسم رسانا چقدر است؟

ب) تراکم بار الکتریکی نقاط A و B را مقایسه کنید.

پ) پتانسیل الکتریکی نقاط A ، B و C را با هم مقایسه کنید.

توضیح الف) .....

توضیح ب) .....

توضیح پ) .....

فعالیت ۱– ۹ کتاب درسی در مورد برق‌گیرهای ساختمان تحقیق کنید و بررسی کنید آنها چگونه ساختمان‌ها را از گزند آذرخش در امان می‌دارند؟

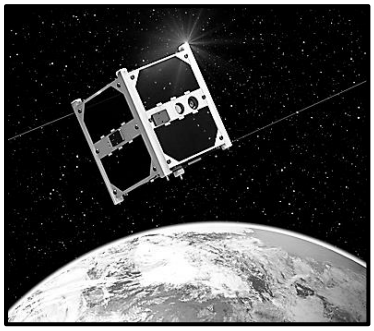
پاسخ: برق‌گیر میله‌ای فلزی است که در بالاترین نقطهٔ ساختمان و در ارتفاع بالاتر از پشت‌بام نصب می‌شود. این میله، نوک‌تیز است و این خاصیت را دارد که از فاصلهٔ دور، بارهای الکتریکی آذرخش را جذب و تخلیه می‌کند. لذا وقتی آذرخش از ابر به سمت ساختمان می‌آید، قبل از اینکه به ساختمان برخورد کند، اول جذب برق‌گیر می‌شود و سپس از طریق سیم‌های هادی به سمت زمین هدایت می‌شود و در زمین تخلیه می‌گردد. به این صورت، آسیبی به ساختمان و اهالی آن نمی‌رسد.

کتاب درسی ○ مثال ۱-۱۴

○ نکته: در مسائل چگالی سطحی بار، سطح معمولاً مربعی و یا کروی است. مساحت سطح کره برابر است با: $A = ۴\pi r^۲$

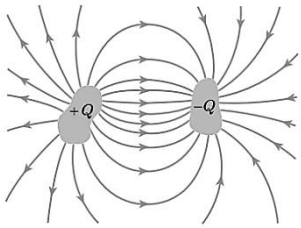
کره

مثال ۳۹ (مسائل پایانی فصل ـ مسئلهٔ ۲۳): وقتی ماهواره‌ای به دور زمین می‌چرخد بر اثر عبور از فضای اطراف زمین باردار می‌شود. این بارها ممکن است موجب آسیب رساندن به قطعات الکترونیکی ماهواره شود. فرض کنید ماهواره ای در اثر عبور از یکی از لایه‌های جو دارای بار الکتریکی $q = ۲\times۱۰^{-۹}\ C$ شود. این ماهوارهٔ مکعبی به ضلع $۴۰\ cm$ است. چگالی سطحی بار الکتریکی روی سطح این ماهواره را محاسبه کنید. (از تجمع بار بر روی لبه ها چشم‌پوشی شود.)



☑ بخش۱۰: خازِن

اگر دو جسم رسانا به هر شکل و شمایلی در اختیار داشته باشیم و میان آن‌ها یک نارسانا (مثلاً هوا) قرار دهیم، یک وسیلهٔ الکتریکی به نام **خازِن** ساخته‌ایم. اما این وسیله چه کاری انجام می‌دهد؟

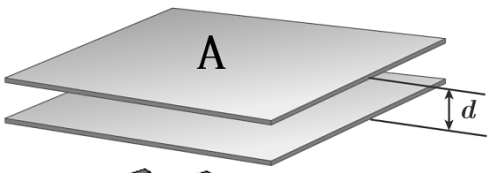


کاربرد خازن: خازن می‌تواند **بار** و **انرژی الکتریکی** را در خود ذخیره کند. (حفظ کنید!)

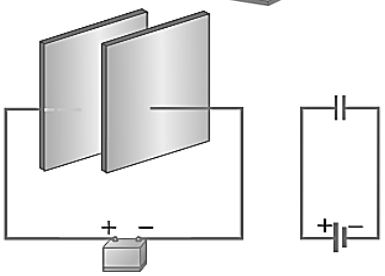
خازن بارهای الکتریکی را در دو جسم رسانای خود (که به آن‌ها صفحات خازن می‌گوییم) ذخیره می‌کند؛ و انرژی الکتریکی نیز در میدان الکتریکی میان صفحات خازن ذخیره می‌شوند.

تصویر یک خازن

تفاوت باتری و خازن: وقتی می‌گوییم که خازن، بار و انرژی الکتریکی را ذخیره می‌کند، یعنی قرار است که در جایی از این اقلامِ ذخیره‌شده استفاده کند و آن‌ها را مصرف کند. مثلاً می‌توانیم قلاش دوربین عکاسی را به وسیلهٔ خازن، برای مدت کوتاهی روشن کنیم. اما بعد از مصرفِ بارهای خازن، لامپ فوراً خاموش می‌شود. این سوال پیش می‌آید که چرا از باتری برای روشن کردن لامپ استفاده نکردیم؟ یکی از تفاوت‌های مهم میان باتری و خازن این است که **باتری، انرژی را با آهنگ نسبتاً کمی به مدار می‌دهد** که این آهنگ، برای گسیل نور از فلاش دوربین بسیار کم است، اما **خازن می‌تواند انرژی را با آهنگ بسیار زیاد به مدار بدهد** که برای به کار انداختن فلاش مناسب است.



از میان انواع خازن، ما با خازنی به نام **خازن تخت** سروکار داریم که مانند شکل مقابل، شامل دو صفحهٔ رسانای موازی با مساحت A است که به فاصلهٔ d از هم قرار گرفته‌اند.



- نمادی که برای نشان دادن **خازن** در مدار به کار می‌بریم ⊣⊢ است که از شکل خازن تخت گرفته شده است اما برای نشان دادن هر نوع خازنی استفاده می‌شود.
- نماد **باتری** نیز در مدار ⊣|+ است. (خط بلندتر قطب مثبت و خط کوتاه‌تر قطب منفی)