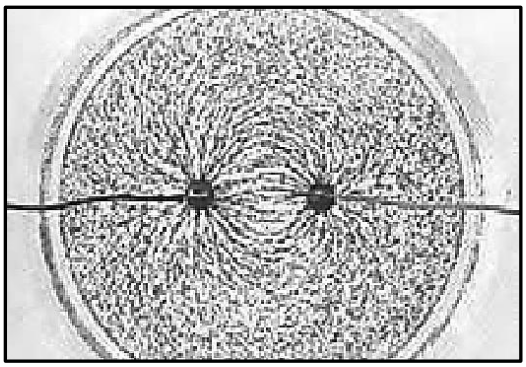
☑ بخش۶ : خطوط میدان الکتریکی



در بخش قبل دانستیم که در فضای پیرامون بارهای الکتریکی خاصیتی وجود دارد که به آن **میدان الکتریکی** می‌گویند. اما این خاصیت را نمی‌توان دید یا احساس کرد. البته اگر در آزمایشگاه، یک ظرف حاوی روغن‌کرچک یا پارافین را که درون آن مقداری بذر چمن یا خاکشیر پاشیده‌ایم، به پایانه‌های مثبت و منفی یک مولد (مثل وان‌دوگراف) متصل کنیم مشاهده می‌کنیم که بذرها میان دو پایانه، سَمت‌گیری کرده و در خطوط منظمی قرار می‌گیرند. **(فعالیت ۱-۳ کتاب درسی)**

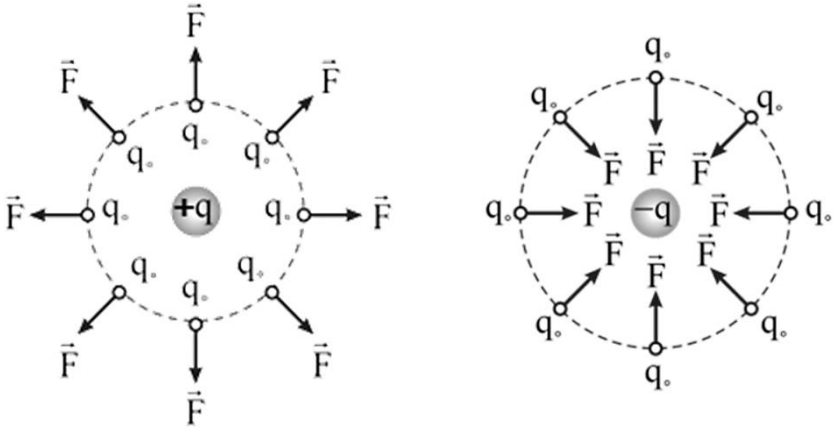
به این خطوط، **خطوط میدان الکتریکی** گفته می‌شود که البته برای این خطوط، جهتی نیز در نظر می‌گیریم و از آن برای مجسم کردن میدان الکتریکی در فضای اطراف اجسام باردار استفاده می‌کنیم.

❖ تعیین جهت خطوط میدان مغناطیسی

در بخش پیش گفتیم که چرا **بار آزمون مثبت**(q_0) یک قرارداد خوب برای سنجش جهت نیرو و میدان‌الکتریکی است. در اینجا نیز از این قرارداد بهره می‌گیریم و جهت خطوط میدان الکتریکی را بر اساس آن تعیین می‌کنیم.

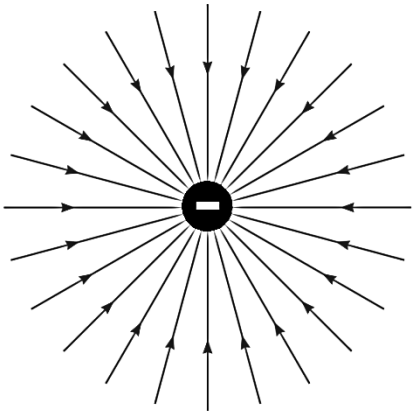
تمام میدان‌های الکتریکی، از بارهای مثبت و منفی پدید می‌آید. پس ابتدا خطوط میدانِ پیرامون این دو نوع بار را معلوم می‌کنیم.

یک بار آزمون مثبت (q_0) را در نقاط مختلفی در اطراف بارهای مثبت و منفی منزوی قرار می‌دهیم. می‌بینیم که نیروی وارد بر q_0 در اطراف **بار مثبت** در جهت دور شدن از آن است (به سمت خارج)؛ و نیروی وارد بر q_0 در اطراف **بار منفی** در جهت نزدیک شدن به آن است (به سمت داخل) است.

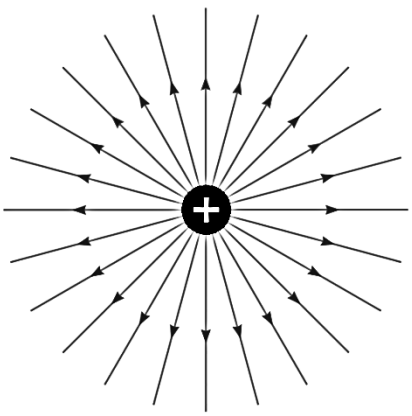


جهت **میدان الکتریکی**($\vec{E}$) در هر نقطه، هم‌جهت با **نیروی الکتریکی**($\vec{F}$) در آن نقطه است. لذا:

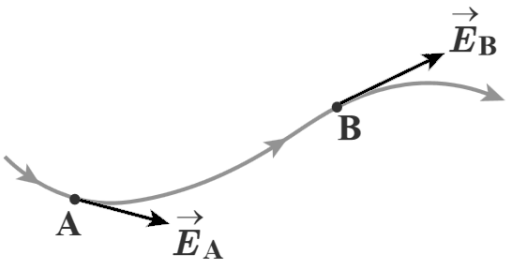
خطوط میدان الکتریکی برای بار منفی رو به داخل است.



خطوط میدان الکتریکی برای بار مثبت رو به خارج است.

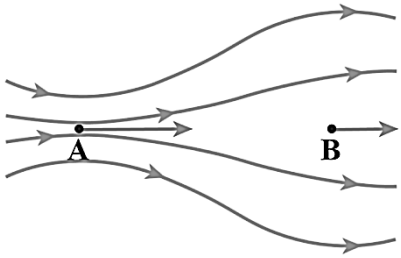


❋ قواعد رسم خطوط میدان الکتریکی



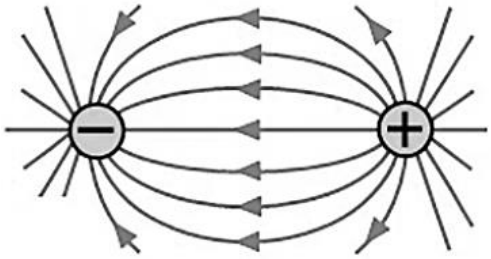
تمام خطوط میدان الکتریکی از قواعد زیر پیروی می‌کنند:

❶ میدان الکتریکی در هر نقطه، برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن خط، هم‌جهت است.



❷ در هر ناحیه که خطوط میدان متراکم‌تر (فشرده‌تر) و به هم نزدیکتر باشند، میدان قوی‌تر است.

⬅ مثلاً در شکل مقابل، در اطراف نقطهٔ A خطوط میدان به هم فشرده‌تر از اطراف نقطهٔ B است. پس اندازهٔ میدان در نقطهٔ A بیشتر است و بردار آن نیز بزرگتر رسم شده است.



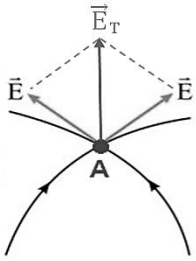
❸ وقتی بارهای ناهمنام در مجاورت یکدیگر باشند، خطوط میدان الکتریکی به صورت منحنی از بارهای مثبت شروع شده و به بارهای منفی ختم می‌شوند.

⬅ مانند شکل مقابل، همیشه جهت خطوط میدان الکتریکی از بار مثبت به سوی بار منفی رسم می‌شود.(چون خطوط میدان برای بار مثبت به سمت خارج، و برای بار منفی به سمت داخل است)

---

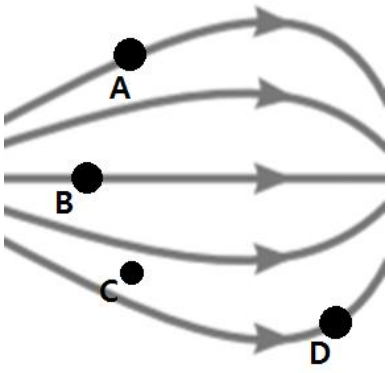
❹ خطوط میدان برایند هرگز یکدیگر را قطع نمی‌کنند. یعنی از هر نقطهٔ فضا فقط یک خط میدان الکتریکی می‌گذرد.

پرسش ۱-۴ کتاب درسی **به نظر شما چرا خطوط میدان الکتریکیِ برایند، هرگز یکدیگر را قطع نمی‌کنند؟**



پاسخ: هرچند که در هر نقطه از فضا، ممکن است میدان‌های ناشی از ذرات باردار مختلف به یکدیگر برخورد کنند اما خطوط میدان الکتریکی در هر نقطه، **برایند** همهٔ آن میدان‌ها است، پس فقط یک خط(بردار) به عنوان برایند در آن نقطه رسم خواهد شد. لذا برای یک نقطه، هیچگاه دو خط برایند رسم نمی‌شود که بخواهند یکدیگر را قطع کنند.

تمرین: شکل زیر قسمتی از خطوط یک میدان الکتریکی است. بردار میدان الکتریکی را در نقطه‌های مشخص شده رسم کنید.

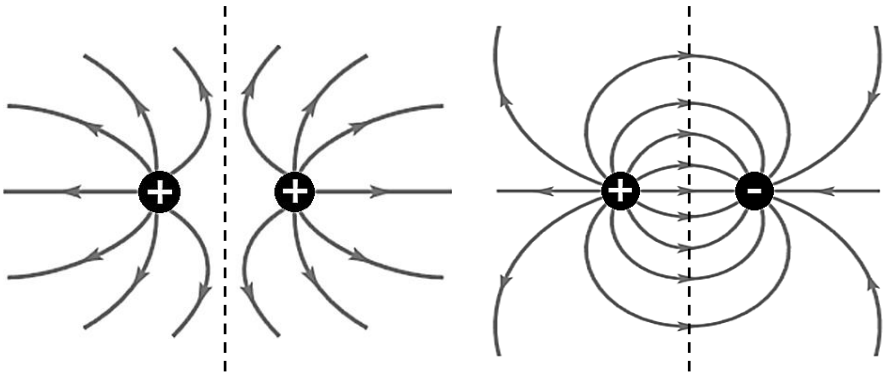


** جهت مشاوره تحصیلی رایگان و پرسیدن سوالات خود با مشاوران سایت ارتباط بگیرید**

* خطوط میدان الکتریکی برای جفت‌بارهای هم اندازه

(باید بتوانید شکل‌های این صفحه را از حفظ رسم کنید.)

چنان‌که در شکل مقابل مشاهده می‌کنید، برای بارهای هم‌اندازه، (همنام یا ناهمنام) خطوط میدان، شکلی کاملاً **متقارن** دارند.



بارهای ناهمنام
(دو قطبی الکتریکی)

بارهای همنام

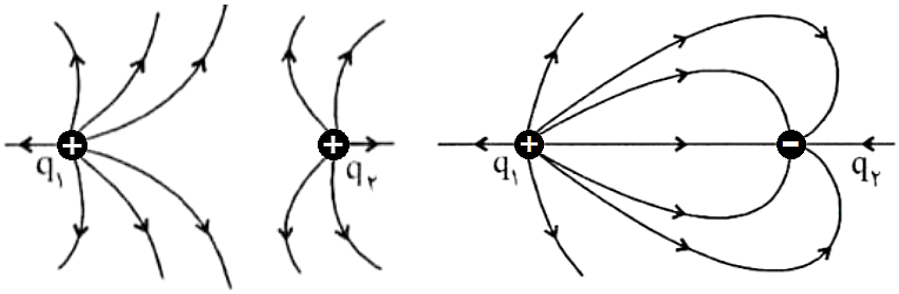
- در بارهای **ناهمنام**، به علت وجود نیروی جاذبه، خطوط میدان به هم می‌رسند و پیوسته‌اند (خطوط میدان از بار مثبت خارج و به بار منفی ختم می‌شود)؛ اما در بارهای **همنام** به علت وجود نیروی دافعه، خطوط میدان به هم نمی‌رسند و فاصله دارند (گسسته‌اند).

توجه: برای بارهای **همنام** منفی، خطوط میدان شبیه به جفت‌بارهای مثبت است و فقط جهت خطوط برعکس (به سمت داخل) می‌شود.

نکته: دوقطبی الکتریکی: به مجموعهٔ دوبار **هم‌اندازه** و **ناهمنام** که در فاصله‌ای از یکدیگر قرار گرفته‌اند دوقطبی الکتریکی گفته می‌شود.

* خطوط میدان الکتریکی برای جفت‌بارهای غیر هم اندازه

وقتی جفت‌بارها دارای اندازه‌های متفاوت باشند، تقارن خطوط میدان به هم می‌ریزد و بسته به این‌که بارها همنام یا ناهمنام باشند، ظاهری شبیه به شکل مقابل ایجاد می‌کنند.



بارهای ناهمنام
$|q_1|>|q_2|$

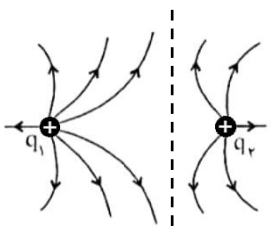
بارهای همنام
$|q_1|>|q_2|$

- از ظاهر خطوط میدان می‌توان تشخیص داد که اندازهٔ کدام ذرهٔ باردار بزرگتر یا کوچکتر است.

روش‌های مقایسهٔ اندازهٔ بارها در خطوط میدان:

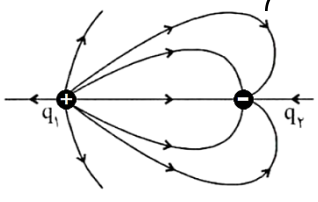
روش اصلی: تراکم و **تعداد خطوط** میدان در اطراف بار بزرگتر بیشتر است. (در امتحان باید بر اساس این روش پاسخ بدهید)

روش‌های کمکی: بار بزرگتر، محور جدایی خطوط (در بارهای همنام) و یا قلهٔ منحنی (در بارهای ناهمنام) را به سمت بار کوچکتر هل می‌دهد. و **همچنین**: خطوط میدان در اطراف بار بزرگتر، خمیدگی کمتری دارند و طبیعی‌تر هستند. (چون بار بزرگتر، زور بیشتری دارد)



$|q_1|>|q_2|$

محور جدایی به بارکوچکتر نزدیکتر است.

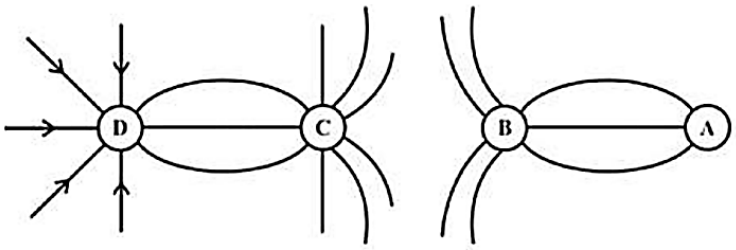


قله به بارکوچکتر نزدیکتر است

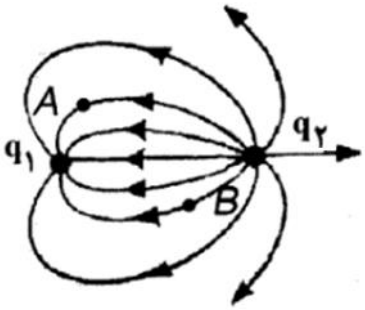
$|q_1|>|q_2|$

توجه: در برخی سوالات، اصولی که در روش کمکی بیان شد، در رسم خطوط رعایت نمی‌شود.

مثال ۲۰: مطابق شکل زیر، ۴ بار الکتریکی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. جهت خطوط میدان الکتریکی را معلوم کرده و علامت بارهای A و B و C و D را تعیین کنید.



مثال ۲۱ (مشابه مسائل پایانی فصل ـ مسئلهٔ ۱۳): شکل زیر، خطوط میدان الکتریکی در اطراف دو بار الکتریکی را نشان می‌دهد.



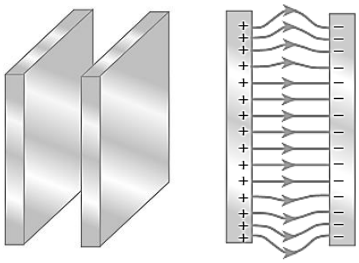
الف) نوع بارهای q_1 و q_2 را مشخص کنید.

ب) اندازهٔ کدام بار بیشتر است؟

پ) شدت(بزرگی) میدان الکتریکی را در نقطه‌های A و B مقایسه کنید.

ت) بردار میدان الکتریکی را در نقطه‌های A و B رسم کنید.

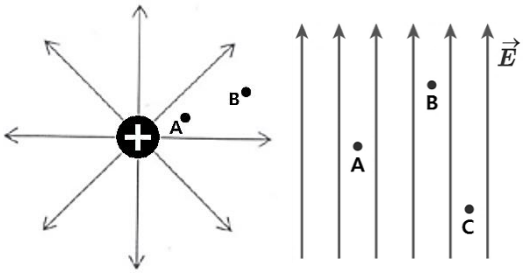
* میدان الکتریکی یکنواخت



اگر به جای دو ذرهٔ باردار، دو صفحهٔ موازی داشته باشیم که دارای بارهای **هم‌اندازه** و **ناهمنام** باشند، خطوط میدان الکتریکی در فضای میان صفحه‌ها (نه در نزدیکی لبه‌ها) به‌صورت خط‌های راست(۱)، موازی(۲) و هم‌فاصله‌اند(۳). چنین میدانی را میدان الکتریکی یکنواخت می‌نامیم.

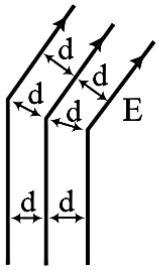
به بیان دیگر: میدانی که در تمام نقاط آن، **اندازه** و **جهت** خطوط میدان، **یکسان** باشد را میدان الکتریکی یکنواخت می‌گوییم.

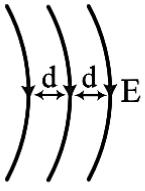
توجه: آنچه به **میدان یکنواخت** اهمیت می‌دهد یکسان بودن اندازهٔ میدان (E) در تمام نقاط آن است. برای فهم این موضوع، یک بار مثبت را در نظر بگیرید. با حرکت در نقاط مختلفِ میدانِ اطراف بار، اندازهٔ میدان تغییر می‌کند. مثلاً هرچه از آن دور می‌شویم (با حرکت از نقطهٔ A به B) اندازهٔ میدان کاهش می‌یابد. اما در یک **میدان یکنواخت**، به هر نقطه‌ای که برویم، اندازهٔ میدان ثابت است و هیچ تغییری نمی‌کند. خوبی این ویژگی آن است که دیگر نیازی نیست با تغییر مکان (فاصله)، دوباره اندازهٔ میدان محاسبه شود.

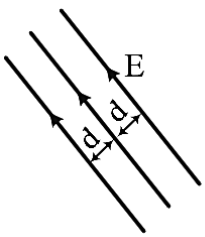


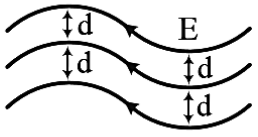
میدان یکنواخت **میدان غیریکنواخت**

تمرین: کدام‌یک از شکل‌های زیر نشان دهندهٔ یک میدان الکتریکی یکنواخت است؟









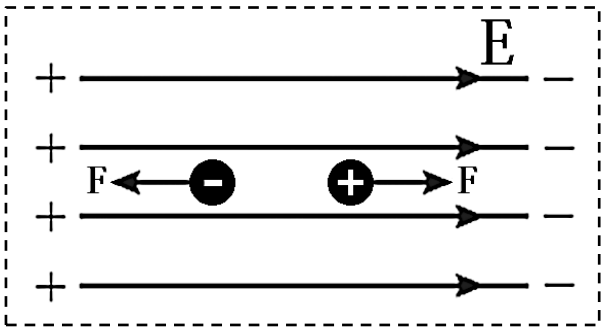
* نیروی وارد بر بار الکتریکی در یک میدان الکتریکی

دانستیم که اگر بار آزمون q_0 در میدان E قرار بگیرد به آن نیروی F وارد می‌شود. این اتفاق، فقط مخصوص بار آزمون نیست بلکه به هر بار خارجی مانند q که در یک میدان الکتریکی قرار می‌گیرد نیز نیرویی از طرف میدان وارد می‌شود.

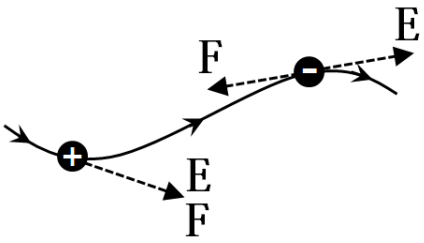
طبق روابطی که آموختیم، **اندازهٔ این نیرو** از رابطهٔ مقابل به‌دست می‌آید:

$$\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q} \Rightarrow \vec{F}=q\vec{E} \Rightarrow \boxed{F=|q|E}$$

اما **جهت نیروی وارد بر بار الکتریکی**، بستگی به نوع بار دارد:



چنانکه آموختیم، نیروی $\vec{F}$ که در میدان $\vec{E}$ به بار آزمون (که باری مثبت است) وارد می‌شود، هم‌جهت با میدان می‌باشد. این نتیجه از قانون جاذبه و دافعهٔ بارها به دست آمد. یعنی ذرهٔ دارای **بار مثبت** از قطب مثبتِ میدان دفع شده و به سمت قطب منفیِ میدان جذب می‌شود. بر این اساس می‌توان گفت که به ذرهٔ دارای **بار منفی**، نیرویی در خلاف جهت میدان وارد خواهد شد.



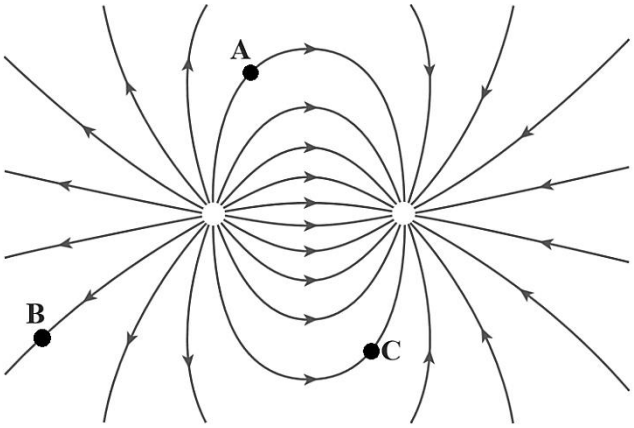
$\vec{F}=q\vec{E}$ (q: + یا −)

نیروی وارد بر **بار مثبت** از طرف میدان، در **جهت میدان** است.

نیروی وارد بر **بار منفی** از طرف میدان، در **خلاف جهت میدان** است.

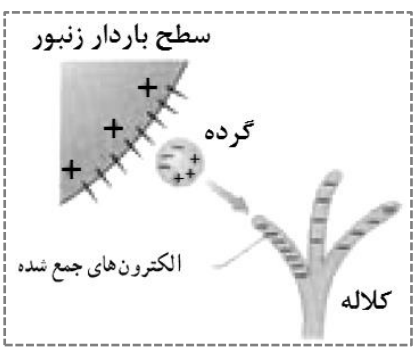
توجه: فراموش نکنید که میدان $\vec{E}$ به بار بستگی ندارد؛ لذا در هر نقطه، مماس بر خط میدان و هم جهت با میدان است. **(شکل بالا)**

پرسش ۱–۵ کتاب درسی بار $q-$ را در نقطه‌های A ، B و C از میدان الکتریکیِ غیریکنواختِ شکل زیر قرار دهید و جهت نیروی الکتریکی وارد بر این بار منفی را تعیین کنید.

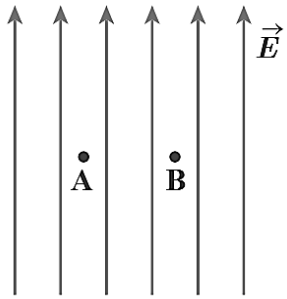


فعالیت ۱–۴ کتاب درسی تولید مثل برخی از گل‌ها به زنبورهای عسل وابسته است. گرده‌ها **به واسطهٔ میدان الکتریکی**، از یک گل به زنبور و از زنبور به گل دیگر منتقل می‌شوند. در این باره تحقیق کنید.

پاسخ: بدن زنبور در هنگام پرواز، معمولاً دارای بار مثبت می‌شود و وقتی به گردهٔ خنثی می‌رسد حالت القا در گرده رخ می‌دهد و بارهای مثبت و منفی آن تفکیک شده و گرده جذب زنبور می‌شود. سپس وقتی زنبور در اطراف کلالهٔ گل که خنثی است پرواز می‌کند، بارهای مثبت گرده که در مقابل کلاله قرار می‌گیرند، بارهای منفی را در کلاله القا می‌کنند و به سوی هم جذب می‌شوند. حال اگر نیروی الکتریکیِ وارد از کلاله، بزرگتر از نیروی الکتریکی زنبور باشد، گرده به سمت کلالهٔ گل جذب می‌شود و عمل گرده‌افشانی انجام می‌شود.

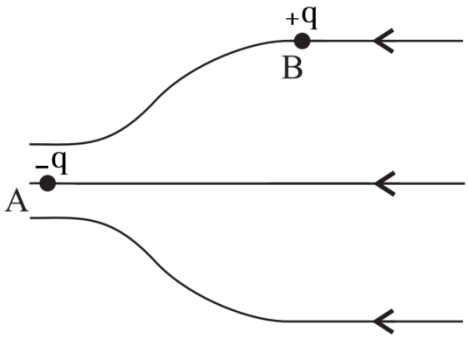


*(به خاطر بسپارید که همهٔ این اتفاقات به واسطهٔ **میدان الکتریکی** رخ می‌دهد.)*



مثال ۲۲ (مسائل پایانی فصل ـ مسئلهٔ ۸): یک ذرهٔ باردار را یک‌بار در نقطهٔ A و بار دیگر در نقطهٔ B قرار می‌دهیم. نیرویی که از طرف میدان الکتریکی بر این ذرهٔ باردار در این دو نقطه وارد می‌شود را مقایسه کنید.

مثال ۲۳: در شکل زیر، اگر اندازهٔ دو بار قرار گرفته در نقاط A و B برابر باشد:



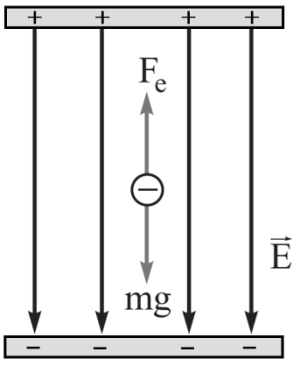
الف) میدان الکتریکی در نقطهٔ A قوی‌تر است یا نقطهٔ B؟

ب) اندازهٔ نیروی وارد بر بارها را مقایسه کنید.

پ) جهت نیروی وارد بر هرکدام از ذره‌ها را روی شکل مشخص کنید.

* جرم معلق در میدان الکتریکی

اگر یک ذره یا جسم باردار را که دارای وزن است، در یک میدان الکتریکی (معمولاً یکنواخت) قرار دهیم، دو نیرو به ذره وارد می‌شود. یکی نیروی وزن ($F_w = mg$) به سمت پایین و یکی هم نیروی الکتریکی ($F_e = |q|E$) که می‌تواند به سمت بالا یا پایین باشد.



در شکل مقابل می‌بینیم که جهت میدانِ یکنواخت به سمت پایین است، لذا نیروی وارد بر جسم بارداِر منفی، خلاف جهت میدان و به سمت بالا می‌باشد. در این حالت چون نیروی وزن همواره به سمت پایین(زمین) است، اگر این دو نیرو برابر شوند، جسم به صورت ساکن در هوا معلق می‌ماند.

در این حالت (تعادل)، نیروی خالص (یا همان نیروی برایند) صفر است و می‌توانیم بنویسیم:

$$F_T = 0 \Rightarrow \boxed{F_e = mg} \Rightarrow |q|E = mg$$

نکته: جرم شتاب‌دار در میدان الکتریکی: اگر نیروها متوازن نباشند، یا فقط نیروی الکتریکی داشته باشیم، آنگاه جسم ساکن نمی‌ماند و شتاب (a) خواهد داشت. در این حالت، بنابر قانون دوم نیوتون می‌نویسیم:

$$\boxed{F_T = ma}$$

مثال: اگر در شکل بالا، نیروی الکتریکی F_e قوی‌تر از نیروی وزن باشد، جسم به سمت بالا شتاب می‌گیرد و خواهیم داشت:

$$F_e - mg = ma \rightarrow |q|E = m.(a-g)$$

F_e: نیروی بزرگتر — mg: نیروی کوچکتر

مثال: اگر تنها نیروی وارد بر ذره (جسم)، نیروی الکتریکی ناشی از میدان باشد، پس $F_T = F_e$ آنگاه خواهیم داشت:

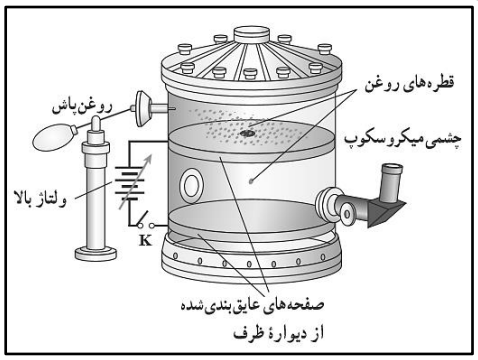
$$F_e = ma \rightarrow |q|E = ma$$

مثال ۲۴ (مسائل پایانی فصل ـ مسئلهٔ ۱۱): در یک میدان الکتریکی یکنواخت به بزرگی $۴/۹ \times ۱۰^{۵}\ N/C$ که جهت آن قائم و رو به پایین است، ذرهٔ بارداری به جرم $۲\ g$ معلق و به‌حال سکون قرار دارد. اگر $g = ۹/۸\ N/kg$ باشد، اندازه و نوع بار الکتریکی ذره را مشخص کنید.

تمرین ۱-۷ کتاب درسی روی سطح بادکنکی به جرم $۱۰\ g$، بار الکتریکی $-۲۰۰\ nC$ ایجاد می‌کنیم و آن را در یک میدان الکتریکی قرار می‌دهیم. بزرگی و جهت این میدان الکتریکی را در صورتی که بادکنک معلق بماند، تعیین کنید. اندازهٔ نیروی شناوریِ رو به بالای وارد بر بادکنک را $۰/۰۵\ N$ فرض کنید.

* آزمایش قطره روغن میلیکان

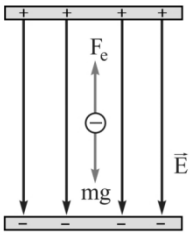
(مثال ۱-۹ کتاب درسی)



هدف از این آزمایش: اثبات کوانتیده بودن بار الکتریکی

کاربرد در مسائل امتحانی: محاسبهٔ بار الکتریکی(q) و تعداد بار الکتریکی(n)

در این آزمایش، قطره‌های ریز روغن را که باردار شده‌اند، وارد دستگاه مقابل می‌کنیم که دارای دو صفحهٔ باردار فلزی موازی با میدان الکتریکی یکنواخت است. با بررسی چگونگی حرکت قطره‌ها (در حالت معلق یا شتابدار) در میدان میان صفحات، به روشی که در مبحث قبل (جرم معلق در میدان) گفتیم، اندازهٔ بار (q) قطره‌های روغن را اندازه گیری می‌کنیم:



$$F_e = mg \Rightarrow |q|E = mg \Rightarrow |q| = \frac{mg}{E}$$

(مثبت یا منفی بودن بار را باید با تحلیل مسئله متوجه شوید.)

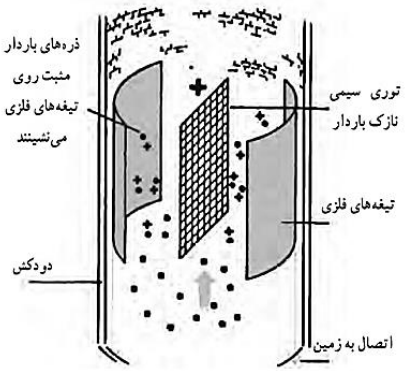
سپس با استفاده از رابطهٔ $q = \pm ne$ تعداد بارهای موجود در قطرهٔ روغن را محاسبه می‌کنیم: $n = \left|\frac{q}{e}\right|$

در نهایت معلوم می‌شود که این تعداد بارِ به‌دست آمده، مضرب صحیحی از بار بنیادی e می‌باشد.

کتاب درسی ○ مثال ۱-۹ ← معرفی آزمایش میلیکان و محاسبهٔ تعداد بار قطرهٔ روغن و نوع بار آن

** جهت مشاوره تحصیلی رایگان و پرسیدن سوالات خود با مشاوران سایت ارتباط بگیرید **

فعالیت ۱-۵ کتاب درسی **رسوب دهندهٔ الکتروستاتیکی (ESP)** دود و غبار را از گازهای زائدی که از دودکش کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها بالا می‌آید جدا می‌سازد و در کاهش آلودگی هوای ناشی از دودکش نقش دارد. رسوب دهنده‌ها انواع مختلفی دارند. در مورد اساس کار این رسوب دهنده‌ها تحقیق کنید.



پاسخ: رسوب‌دهندهٔ الکتریکی از توری فلزی نازکی با بار الکتریکی مثبت و دو تیغهٔ فلزی که به زمین متصل هستند و دارای بار الکتریکی منفی هستند، تشکیل شده است. ذرات دود هنگام عبور از میان توری فلزی دارای بار مثبت می‌شوند و به همین دلیل توسط تیغه‌های دارای بار منفی جذب می‌شوند و بار آن‌ها به زمین تخلیه می‌شود (بدین صورت، **تخلیهٔ الکتریکی** بین توری و تیغه‌های متصل به زمین اتفاق می‌افتد) و دوده‌ها روی تیغه‌ها رسوب می‌کنند و به این ترتیب از هوا جدا می‌گردند. تیغه‌ها را هر چند روز یکبار با ضربه زدن می‌تکانند و دوده‌ها را جدا می‌کنند تا دوباره آماده به کار شوند.

☑ بخش۷ : انرژی پتانسیل الکتریکی (U_E)

می‌خواهیم دربارهٔ انرژی پتانسیل الکتریکی صحبت کنیم اما لازم است که پیش از آن، مروری بر مفهوم انرژی پتانسیل گرانشی و برخی مفاهیم از مبحث کار و انرژی که در پایهٔ دهم آموختید داشته باشیم. (**یادآوری**: یکای انواع انرژی و همچنین کار در SI، **ژول**(J) است.)

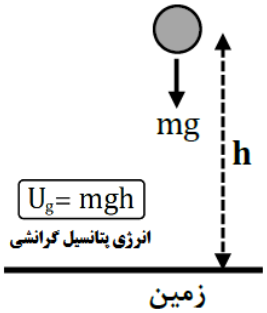
«**انرژی** » توانایی انجام کار است و به دو حالت کلی وجود دارد: ۱- انرژی جنبشی(K) ۲- انرژی پتانسیل(U).

به انرژی‌ای که اجسام به سبب حرکتشان دارند، **انرژی جنبشی** گفته می‌شود. انرژی جنبشی جسمی به جرم m که با تندی v حرکت می‌کند، از رابطهٔ مقابل به‌دست می‌آید:

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

اما **انرژی پتانسیل**، داستان متفاوتی دارد. این انرژی‌ای است که در اجسام یک سامانه به سبب وضعیت خاصی که نسبت به یکدیگر دارند ذخیره می‌شود. برای محاسبهٔ این نوع انرژی، رابطه (فرمول) یکتایی وجود ندارد و بسته به این‌که منشأ این انرژی چه چیزی باشد، رابطهٔ متفاوتی برای آن تعریف می‌شود. در پایهٔ دهم، یکی از انواع این انرژی با منشأ گرانشی به شما معرفی شد.

انرژی پتانسیل گرانشی(U_g): می‌دانیم که هر جسمی به جرم m را اگر به حال خود رها کنیم، تمایل دارد بر روی زمین بماند و اگر بخواهیم آن را از سطح زمین جدا کنیم و به ارتفاع h ببریم، باید بر روی آن کار انجام دهیم (در واقع باید زور بزنیم تا جسم را بر خلاف میلش از زمین جدا کنیم و به ارتفاع ببریم). تمام انرژی‌ای که صرف این کار می‌شود درون سامانهٔ زمین ـ جسم ذخیره می‌شود. این انرژیِ ذخیره شده، همان انرژی پتانسیل گرانشی است که تغییرات آن از رابطهٔ $\Delta U_g = mgh$ به‌دست می‌آید. تا وقتی که جسم در حال بالا رفتن باشد انرژی پتانسیلِ آن نیز در حال افزایش است لذا تغییرات انرژی پتانسیل گرانشی در هنگام بالا رفتن، مثبت است: $\Delta U_g > 0$



اما کاری که نیروی گرانش (نیروی وزن: mg) در هنگام بالا رفتن این جسم انجام داده است، برابر است با: $W_g = -mgh$ که مقداری منفی دارد زیرا جسم بر خلاف جهت نیروی گرانش، به سمت بالا حرکت کرده است. می‌بینیم که کار نیروی گرانشی، برابر منفی تغییرات انرژی پتانسیل گرانشی است. لذا می‌توانیم این نتیجهٔ بسیار مهم را بنویسیم: $W_g = -\Delta U_g \leftarrow \Delta U_g = -W_g$

حال اگر جسم را از ارتفاعی که دارد رها کنیم، خود به خود به سمت زمین حرکت می‌کند. اینجا دیگر نیازی به زور زدن و صرف انرژی نداریم چون جسم تمایل دارد به سمت زمین برود. لذا شروع به مصرف کردنِ انرژی ذخیره شدهٔ خود کرده و سرعت می‌گیرد. هرچه به سطح زمین نزدیکتر می‌شود از انرژی پتانسیل گرانشی جسم کم شده (تغییرات آن منفی است: $\Delta U_g < 0$) و به انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود و سرعت بیشتری پیدا می‌کند تا به زمین برسد. در این حالت انرژی پتانسیل گرانشی آن صفر می‌شود. کار نیروی گرانشی نیز در این حالت مثبت است.