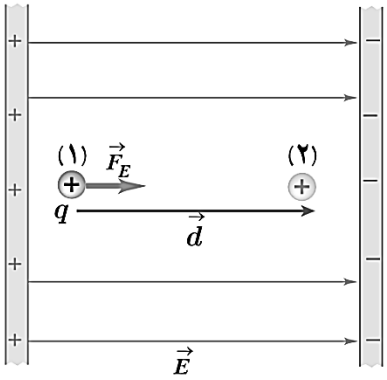
☑ بخش۸ : پتانسیل الکتریکی (V)

در همین ابتدا توجه کنید که کمیتی که در بخش قبل مورد بررسی قرار دادیم، **انرژی پتانسیل الکتریکی** بود که از سنخ انرژی است و آن را با نماد U_E نشان دادیم. اما کمیتی که در این بخش به آن می‌پردازیم، **پتانسیل الکتریکی** است و نماد آن نیز V می‌باشد.



دانستیم که اگر بار الکتریکی q همانند شکل مقابل، بین دو نقطهٔ ۱ و ۲ در میدان جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن به مقدار ΔU_E تغییر می‌کند که اندازهٔ آن طبق رابطهٔ $\Delta U_E = -|q|Ed\cos\theta$ به $|q|$ وابسته است. همچنین بسته به این‌که این بار، مثبت باشد یا منفی، علامت ΔU_E نیز متفاوت می‌شود. پس می‌توانیم بگوییم:

انرژی پتانسیل الکتریکی یک ذرهٔ باردار، به علامت و اندازهٔ آن بار بستگی دارد.

(این موضوع در مورد کار میدان الکتریکی (W_E) نیز صادق است.)

حال اگر تغییرات انرژی پتانسیل الکتریکی بین دو نقطه را، به بار q تقسیم کنیم، کمیت جدیدی ایجاد می‌شود که **مستقل** از علامت و اندازهٔ بار q است. به این نسبت، **اختلاف پتانسیل الکتریکی** آن دو نقطه می‌گوییم و آن را با ΔV نشان می‌دهیم:

$$\Delta V = \frac{\Delta U_E}{q} \qquad \textbf{یکا در SI} \longrightarrow \frac{\text{ژول } J}{\text{کولن } C} = \text{ولت } V \qquad \Rightarrow \Delta U_E = q\,\Delta V = q\,(V_2 - V_1)$$

نکته: اختلاف پتانسیل، کمیتی **نرده‌ای** با یکای J/C می‌باشد که به افتخار **الساندرو ولتا**، این یکا را **ولت** نامیده‌اند.

نکتهٔ بسیار مهم: برخلاف رابطه‌های قبلی، **این تنها رابطه‌ای در این فصل است که حتماً باید علامت (+ یا −) q را در آن لحاظ کنید.**

نکته: گرچه این رابطه را برای میدان الکتریکی یکنواخت بیان کردیم، اما برای میدان‌های الکتریکی غیر یکنواخت نیز برقرار است.

نکته‌ای در روش محاسبهٔ ΔU_E در مسائل امتحانی

با توجه به رابطهٔ بالا، از این به بعد ۲ رابطه برای محاسبهٔ ΔU_E خواهیم داشت، که استفاده از آن‌ها بستگی به نوع مسئله دارد:

- رابطهٔ $\Delta U_E = -|q|Ed\cos\theta$ ← در مسائلی استفاده می‌شود که بار(q)، میدان(E) و d داشته باشیم.
- رابطهٔ $\Delta U_E = q\,\Delta V$ ← در مسائلی استفاده می‌شود که اختلاف پتانسیل الکتریکی(ΔV) یا V_1 و V_2 داشته باشیم.

← بر این اساس، برای حالتی که فقط نیروی الکتریکی بر روی ذرهٔ باردار، کار انجام دهد (نیروی خارجی نداشته باشیم)، خواهیم داشت:

$$\Delta K = W_E = -\Delta U_E \rightarrow \Delta K = W_E = -q\,\Delta V$$

کتاب درسی ○ **مثال ۱- ۱۱** ← محاسبهٔ ΔU_E و ΔV

مثال ۲۸ (مسائل پایانی فصل ـ مسئلهٔ ۲۰): بار الکتریکی $q = -۴۰\ nC$ از نقطه‌ای با پتانسیل الکتریکی $V_۱ = -۴۰\ V$ تا نقطه‌ای با پتانسیل $V_۱ = -۱۰\ V$ آزادانه جابه‌جا می‌شود.

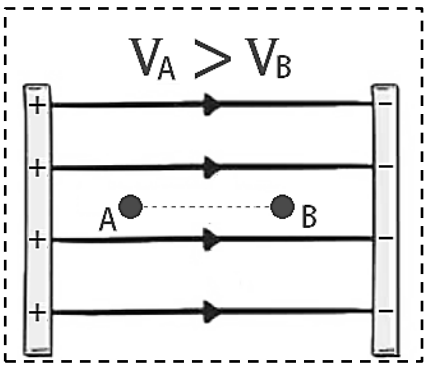
الف) انرژی پتانسیل الکتریکی بار q چه اندازه و چگونه تغییر می‌کند؟

ب) با توجه به قانون پایستگی انرژی، در مورد چگونگی تبدیل انرژی بار q در این جابه‌جایی توضیح دهید.

* مقایسهٔ پتانسیل الکتریکی نقاط مختلف میدان

دانستیم که پتانسیل الکتریکیِ یک میدان، کمیتی مستقل از بار الکتریکی q است که در آن میدان قرار گرفته است. این ویژگی، ما را به یاد میدان الکتریکی(E) می‌اندازد که کمیتی مستقل از بار الکتریکی بود و خاصیت ذاتی یک ذرهٔ باردار به حساب می‌آمد. پتانسیل الکتریکی(V) نیز خاصیت ذاتی میدان الکتریکی است و قوت و ضعف آن در هر نقطه از میدان، فقط به محل آن نقطه در میدان بستگی دارد، نه به باری که در آن نقطه قرار گرفته است.

رابطهٔ $\Delta U_E = q\,\Delta V$ نشان می‌دهد که اگر بار q مثبت باشد، ΔU_E و ΔV هم‌علامت‌اند. یعنی اگر انرژی پتانسیل(U) در حال افزایش باشد، پتانسیل الکتریکی(V) نیز در حال افزایش است (و بالعکس). اما اگر بار q منفی باشد، علامت این دو مخالف هم است. یعنی اگر یکی در حال افزایش باشد، دیگری در حال کاهش است. حال می‌خواهیم از این قاعده استفاده کنیم:



← ابتدا فرض کنید که یک **بار مثبت** در میدانِ شکل مقابل، از نقطهٔ A تا نقطهٔ B حرکت کند. ما از قبل می‌دانیم که **انرژی پتانسیل** بار مثبت در این حرکت، کاهش می‌یابد، پس طبق قاعدهٔ بالا، **پتانسیل الکتریکی** بار مثبت نیز کاهش یافته است. یعنی برای بار مثبت: $V_A > V_B$

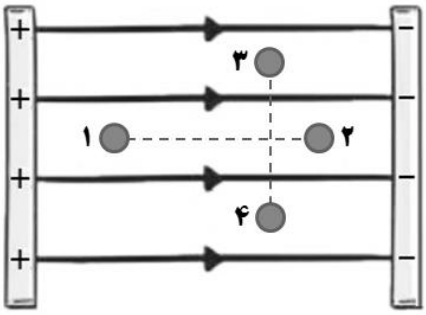
← اینبار، یک **بار منفی** را از نقطهٔ A تا نقطهٔ B حرکت دهید (چون خودش حاضر نیست برود!). می‌دانیم که **انرژی پتانسیل** بار منفی در این حرکت، افزایش می‌یابد، پس طبق قاعدهٔ بالا، **پتانسیل الکتریکی** بار منفی کاهش یافته است. یعنی برای بار منفی نیز: $V_A > V_B$

از این آزمایش نتیجه می‌گیریم: **بدون توجه به نوع بار، با حرکت در جهت خطوط میدان، پتانسیل الکتریکی کاهش می‌یابد** (وبالعکس).

پس با توجه به این واقعیت که خطوط **میدان یکنواخت**، همیشه از صفحهٔ مثبت خارج و به صفحهٔ منفی وارد می‌شوند می‌توانیم بگوییم:

در میدان یکنواخت، هر نقطه‌ای که به صفحهٔ مثبت نزدیک‌تر باشد، پتانسیل بیشتری دارد (وبالعکس).

تکنیک: برای میدان‌های غیریکنواخت نیز می‌توانید با توجه به جهت خطوط میدان، صفحات فرضی **مثبت** و **منفی** در نظر بگیرید.



در شکل مقابل، ۴ نقطه در میدان مشخص شده‌اند. برای مقایسهٔ پتانسیل الکتریکیِ نقاط ۱ و ۲ می‌توانیم بگوییم که چون نقطهٔ ۱ به قطب(صفحهٔ) مثبت نزدیک‌تر است، پتانسیل بیشتری دارد. اما در مقایسهٔ میان نقاط ۱ و ۳ یا ۳ و ۴ چه می‌توانیم بگوییم؟

آیا نقطهٔ ۳ به صفحهٔ مثبت نزدیکتر است یا نقطهٔ ۴؟ در این موارد توجه نمایید که در میدان الکتریکی یکنواخت، منظور از فاصلهٔ یک نقطه با صفحهٔ مثبت، فاصله‌ایست که در راستای خطوط میدان باشد. لذا فاصلهٔ نقاط ۳ و ۴ از صفحهٔ مثبت، یکسان است و طبق قاعده‌ای که یاد گرفتیم، پتانسیل الکتریکی آن‌ها نیز یکسان است. پس اگر از نقطهٔ ۳ به نقطهٔ ۴ خطی بکشیم و در آن مسیر حرکت کنیم، در تمام طول مسیر، پتانسیل الکتریکی ثابت می‌ماند ($\Delta V = 0$) چون فاصلهٔ ما با صفحهٔ مثبت ثابت باقی می‌ماند. پس می‌توانیم بگوییم:

در میدان الکتریکی یکنواخت، با حرکت در جهت عمود بر خطوط میدان، پتانسیل الکتریکی ثابت باقی می‌ماند.

همچنین، معلوم می‌شود که پتانسیل نقطهٔ ۱ از نقطهٔ ۳ و ۴ بیشتر است چون در راستای خطوط میدان، فاصلهٔ کمتری با صفحهٔ مثبت دارد. و پتانسیل نقاط ۳ و ۴ از پتانسیل نقطهٔ ۲ بیشتر است، چون به صفحهٔ مثبت نزدیک‌ترند. پس: $V_1 > V_3 = V_4 > V_2$

کتاب درسی ○ **تمرین ۱- ۹** ← این تمرین از شما می‌خواهد که مطالبی را که در این قسمت گفتیم با رابطه‌های این بخش اثبات کنید.

راهنمایی: الف) اگر ذرهٔ باردار در جهت میدان حرکت کند:

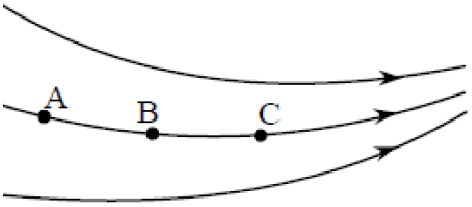
در هر دو حالت، $\Delta V = -Ed$ شد که به معنی کاهش پتانسیل است. با حرکت در خلاف جهت میدان نیز $\Delta V = +Ed$ می‌شود که به معنی افزایش پتانسیل است.

بار مثبت: $\Delta U = -|q|Ed\cos(0) = -|q|Ed \longrightarrow \Delta V = \Delta U/q = \boxed{-Ed}$

بار منفی: $\Delta U = -|q|Ed\cos(180) = |q|Ed \longrightarrow \Delta V = \Delta U/q = \boxed{-Ed}$

ب) با حرکت در جهت عمود بر خطوط میدان، $\theta = 90^\circ$ و در نتیجه $\Delta U = 0$ و از آنجا $\Delta V = 0$ می‌شود.

مثال ۲۹: در میدان‌های الکتریکی زیر، اندازهٔ میدان و همچنین پتانسیل الکتریکی نقاط A و B و C را مقایسه کنید.

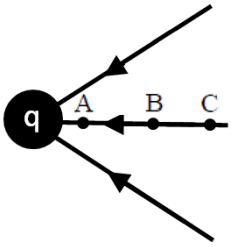


مقایسهٔ اندازهٔ میدان:

دلیل: .....

مقایسهٔ پتانسیل الکتریکی:

دلیل: .....

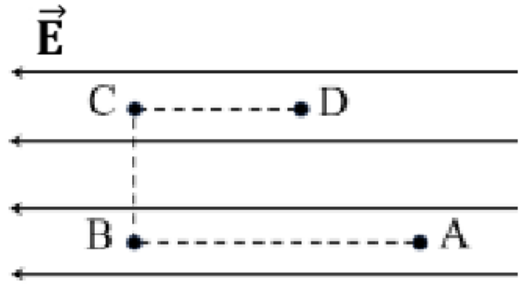


مقایسهٔ اندازهٔ میدان:

مقایسهٔ پتانسیل الکتریکی:

○ **نکته: خوب است این مقایسه را به یاد داشته باشید:** اگر یادتان باشد، نیروی الکتریکی(F) با ورود بار خارجی به میدان الکتریکی به وجود می‌آمد (وابسته به بار خارجی بود) اما میدان الکتریکی(E) مستقل از بار خارجی بود. رابطهٔ U و V نیز همین‌گونه است. انرژی پتانسیل الکتریکی نیز با حضور بار خارجی در میدان الکتریکی به وجود می‌آید (پس باید علامت و اندازهٔ آن بار را بدانیم)، اما پتانسیل الکتریکی مستقل از بار خارجی است.

مثال ۳۰ (مشابه امتحان نهایی سال‌های مختلف): مطابق شکل، بار الکتریکی q – در یک میدان الکتریکی یکنواخت از A تا D در مسیرهای نشان داده شده جابه‌جا شده است.



الف) در کدام نقطه، پتانسیل الکتریکی بیشتر از سایر نقاط است؟

ب) در کدام مسیر، پتانسیل الکتریکی کاهش می‌یابد؟

پ) در کدام مسیر، تغییرات پتانسیل الکتریکی صفر است؟

ت) در کدام مسیر، کاری که میدان بر روی بار انجام می‌دهد صفر است؟

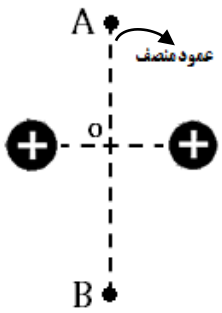
ث) در کدام مسیر، انرژی پتانسیل الکتریکی افزایش می‌یابد؟

توضیح الف) ..... **توضیح ب)** .....

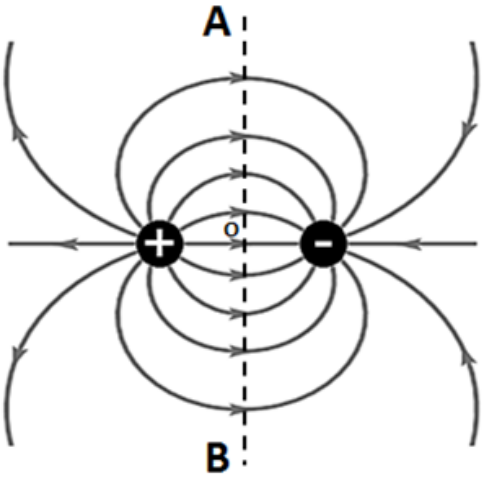
توضیح پ و ت) *تغییرات پتانسیل الکتریکی و تغییرات انرژی پتانسیل و نیز کار میدان در مسیر* ***عمود بر جهت خطوط میدان****، صفر می‌باشد.*

توضیح ث) *حرکت بار منفی در جهت میدان، باعث افزایش انرژی پتانسیل می‌شود (چون دوست ندارد در جهت میدان حرکت کند).*

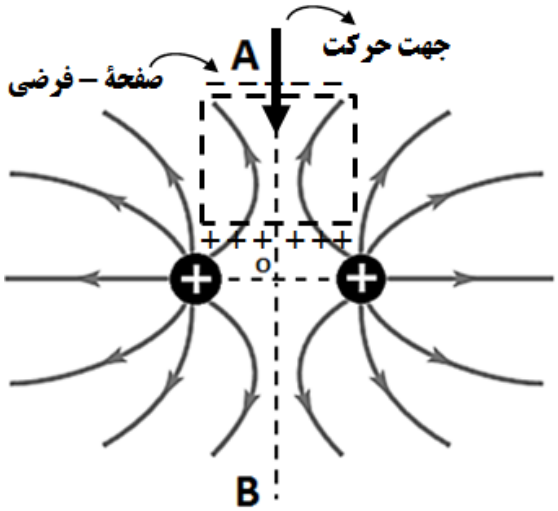
نکته: اگر دو ذرهٔ باردار را مانند شکل مقابل بدهند و بگویند که: « **اگر در مسیر عمود منصفِ خطِ واصلِ دو بار حرکت کنیم، پتانسیل الکتریکی چگونه تغییر می‌کند؟** » (*که معمولاً در سوالات کنکور با چنین حالتی مواجه می‌شوید*) باید ابتدا خطوط میدان را میان این دو بار رسم کنیم (چنان‌که در مبحث خطوط میدان الکتریکی آموختیم) و آن‌گاه ببینیم که جهتِ حرکت در مسیرِ خواسته شده، در جهت خطوط میدان در آن ناحیه است یا مخالف آن.



همچنین می‌توانیم در آن ناحیه، با توجه به خطوط میدان، صفحات مثبت و منفی فرضی رسم کنیم (مانند میدان الکتریکی یکنواخت)، و ببینیم که اگر در مسیر خواسته شده حرکت کنیم، از صفحهٔ مثبت دور می‌شویم یا نزدیک.



با حرکت از A تا B عمود بر میدان حرکت می‌کنیم، پس پتانسیل الکتریکی ثابت باقی می‌ماند. ($\Delta V = 0$)



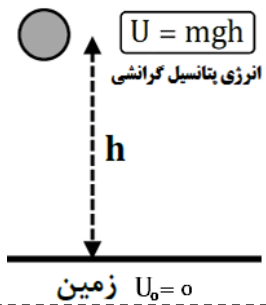
A تا O مخالف میدان ← پتانسیل الکتریکی **افزایش**

O تا B درجهت میدان ← پتانسیل الکتریکی **کاهش**

توجه: اگر به جای پتانسیل الکتریکی، نحوهٔ تغییر **انرژی پتانسیل** را خواستند، باز هم به همین صورت عمل می‌کنیم. فقط برای انرژی پتانسیل الکتریکی (چون وابسته به بار است) نیاز است که علامت باری که در مسیر حرکت می‌کند را بدهند. مثلاً اگر **بار منفی** در شکل چپ، از A تا O حرکت کند، چون خلاف جهت میدان است، انرژی پتانسیل آن کاهش می‌یابد و در شکل راست، چون عمود بر خطوط میدان حرکت می‌کند تغییرات آن ثابت است. در واقع در این حالت، زاویهٔ بین نیرو و جابه‌جایی ۹۰ درجه است. ($\Delta U_E = 0$).

* مرجع پتانسیل و پتانسیل هر نقطه از میدان

می‌دانیم که $\Delta V = V_۲ - V_۱$ و آنچه تا اینجا آموختیم این بود که چگونه اختلاف پتانسیل میان دو نقطه از میدان، یعنی $V_۲ - V_۱$ را محاسبه کنیم. در واقع، روابطی که در اختیار داریم به گونه‌ای هستند که فقط امکان اندازه‌گیری اختلاف دو نقطه را دارند اما اگر بخواهیم پتانسیل الکتریکی هر یک از این نقاط، مثلاً $V_۱$ یا $V_۲$ را محاسبه کنیم، باید چکار کنیم؟



برای فهم این موضوع، دوباره از انرژی پتانسیل گرانشی کمک می‌گیریم. در آنجا معمولاً زمین (یا هر ارتفاع دلخواهی) را به عنوان مرجع و مبنا انتخاب می‌کردیم، و انرژی پتانسیل گرانشی آن را صفر در نظر می‌گرفتیم ($U_۰ = ۰$). سپس با محاسبهٔ اختلاف انرژی پتانسیل یک جسم در نقطهٔ دلخواه با انرژی پتانسیل مرجع (که صفر است)، اندازهٔ انرژی پتانسیل همان نقطه برای جسم به دست می‌آمد زیرا: $\Delta U_g = U - U_۰ = U_۲$ (به این صورت توانستیم انرژی پتانسیل گرانشی **یک نقطه** را محاسبه کنیم).

در مورد **انرژی پتانسیل الکتریکی** و **پتانسیل الکتریکی** نیز آنچه می‌تواند توسط رابطه‌ها اندازه‌گیری شود اختلاف میان دو نقطه است. در مورد انرژی پتانسیل الکتریکی اگر نقطه‌ای را به عنوان مرجع انتخاب کنیم (نقطهٔ ۰) و انرژی پتانسیل ذرهٔ باردار را در آن را برابر صفر در نظر بگیریم تا $U_۰ = ۰$ شود، با محاسبهٔ اختلاف انرژی میان نقطهٔ دلخواه خود (U) و نقطهٔ مرجع ($U_۰$) می‌توانیم انرژی پتانسیل ذره را در نقطهٔ دلخواه خود به دست آوریم، زیرا: $\Delta U_E = U - U_۰ = U$. حال برای اینکه کار ما ساده‌تر شود، **پتانسیل الکتریکی** این نقطهٔ مرجع را نیز صفر قرار می‌دهیم ($V_۰ = ۰$) تا بتوانیم پتانسیل هر نقطه را به صورت اختلاف پتانسیل آن نقطه با مرجع پتانسیل تعریف کنیم. در این صورت می‌توانیم رابطهٔ میان V و U را نیز به این صورت بنویسیم:

$$\Delta V = V - V_۰ \xrightarrow{V_۰=۰} \Delta V = V = \frac{\Delta U_E}{q} = \frac{U_E - U_۰}{q} \xrightarrow{U_۰=۰} V = \frac{U_E - ۰}{q} \Rightarrow V = \frac{U_E}{q}$$

○ نکته: یکی از نکات مفیدی که از مطالب این صفحه به دست می‌آید این است که هرگاه اختلاف پتانسیل یک نقطه را با مرجع پتانسیل به دست آوریم، $\Delta V = V$ می‌شود. به همین دلیل [چنان‌که در فصل بعد خواهیم دید] مرسوم است که در مباحث مربوط به الکتریسیته (برق)، به جای ΔV از V استفاده می‌کنند و به V، اختلاف پتانسیل یا **ولتاژ** می‌گویند.

* اختلاف پتانسیل در باتری

معمولاً باتری‌ها را با ولتاژ آن‌ها می‌شناسیم. مثلاً شکل مقابل، یک باتری ۱/۵ ولتی است. اما این به چه معناست؟

باتری‌ها دو پایانهٔ مثبت و منفی دارند. پایانهٔ مثبت دارای پتانسیل بیشتری از پایانهٔ منفی است و اختلاف پتانسیل میان این دو پایانه، می‌شود اختلاف پتانسیل باتری یا همان **ولتاژ باتری**.

○ پس برای محاسبهٔ اختلاف پتانسیل باتری از رابطهٔ مقابل استفاده می‌کنیم: $\Delta V = V_+ - V_-$

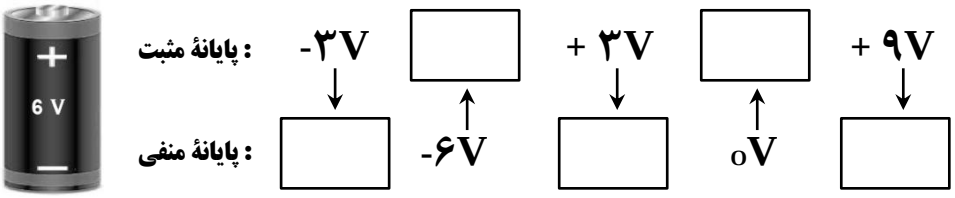
← بنابراین وقتی می‌گوییم باتری ۱/۵ ولت است، یعنی پتانسیل پایانهٔ **مثبت**، به اندازهٔ ۱/۵ ولت از پتانسیل پایانهٔ **منفیِ** آن بیشتر است.

توجه: بار دیگر به تصویر مقابل توجه کنید. مثبت بودنِ یکی از پایانه‌های باتری و منفی بودن دیگری، به این معنا نیست که یک سر باتری دارای بار مثبت و سر دیگر دارای بار منفی است؛ و همچنین به این معنا نیست که یک سر باتری دارای پتانسیل مثبت و دیگری دارای پتانسیل منفی است! بلکه فقط به این معناست که **پتانسیل پایانهٔ مثبت، از پتانسیل پایانهٔ منفی بیشتر است**. بنابراین، هر کدام از دو سر باتری می‌توانند دارای پتانسیل مثبت، صفر و یا منفی باشند.

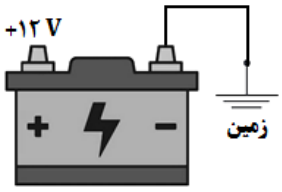
مثلاً اگر پتانسیل پایانهٔ مثبت، برابر ۱۰+ ولت و پتانسیل پایانهٔ منفی برابر ۸/۵+ ولت باشد، اختلاف پتانسیل دو سر باتری می‌شود ۱/۵ ولت زیرا $\Delta V = V_+ - V_- = ۱۰ - ۸/۵ = ۱/۵V$ (باتری ۱/۵ ولتی)؛ و اگر پتانسیل پایانهٔ مثبت، برابر ۵- ولت و پتانسیل پایانهٔ منفی برابر ۶/۵- ولت باشد، باز هم اختلاف پتانسیل دو سر باتری، ۱/۵ ولت می‌شود. پس آنچه اهمیت دارد، فقط اختلاف پتانسیل میان دو سر باتری است.

نکته: توجه کنید که هرگاه اختلاف پتانسیل، حاصل **پتانسیل بیشتر منهای پتانسیل کمتر** باشد، (مانند آنچه در باتری انجام می‌شود) اختلاف پتانسیل در هر حال، مثبت خواهد بود ($\Delta V > ۰$)، حتی اگر پتانسیل هر دو پایانه منفی باشد.

تمرین: مطابق شکل، یک باتری ۶ ولتی در اختیار داریم. با توجه به پتانسیل‌هایی که برای هر کدام از پایانه‌های باتری ذکر شده است، پتانسیل پایانهٔ دیگر را محاسبه نمایید.

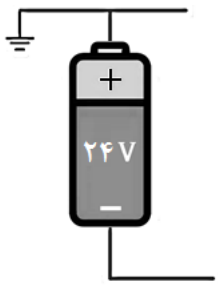


نقطهٔ زمین: در علوم مهندسی (مخصوصاً مهندسی برق) معمولاً پتانسیل زمین و یا نقطه‌ای از مدار را برابر صفر می‌گیرند و به آن نقطه، اصطلاحاً **نقطهٔ زمین** می‌گویند و پتانسیل(ولتاژ) نقطه‌های دیگر را نسبت به آن می‌سنجند. نقطهٔ زمین را در مدارهای الکتریکی با نماد ⏚ نشان می‌دهند. هر نقطه‌ای از مدار که با سیم به نقطهٔ زمین متصل باشد، دارای پتانسیل الکتریکی **صفر** خواهد بود.



البته باید توجه داشت که اصطلاح **زمین**، لزوماً به معنای زمین زیر پای ما نیست و می‌تواند به قسمتی از مدار تعلق گیرد. مثلاً در برق خودرو، بدنهٔ خودرو به عنوان نقطهٔ زمین انتخاب شده است. لذا پایانهٔ منفیِ باتریِ خودرو را (که یک باتری ۱۲ ولتی است) به بدنهٔ خودرو که همان پتانسیل مرجع (زمین) است متصل می‌کنند و پتانسیل آن پایانه را صفر در نظر می‌گیرند. بدین صورت، پتانسیل پایانهٔ مثبت باتری، ۱۲ ولت خواهد بود.

مثال ۳۱: شکل مقابل، قسمتی از یک مدار را نشان می‌دهد. پتانسیل پایانهٔ منفی باتری ۲۴ ولتی چقدر است؟



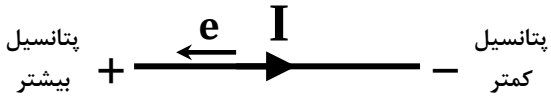
تمرین ۱– ۱۰ کتاب درسی اگر پایانهٔ مثبت یک باتری ۱۲ ولتی را مرجع پتانسیل در نظر بگیریم. پتانسیل پایهٔ منفی آن چند ولت خواهد شد؟

* شارش بار الکتریکی

وقتی بین دو نقطه، اختلاف پتانسیل الکتریکی وجود داشته باشد، بارهای مثبت از نقطهٔ دارای پتانسیل بیشتر به نقطهٔ دارای پتانسیل کمتر حرکت می‌کنند (چنانکه در میدان الکتریکی نیز بار مثبت از پتانسیل بیشتر به کمتر می‌رود) به این پدیده، **شارش بار** یا **جریان الکتریکی** گفته می‌شود و آن را با $\mathbf{I}$ نشان می‌دهند. اما نکات مهمی در این تعریف وجود دارد که به آن می‌پردازیم:

o نکته۱: جهت قراردادی جریان: می‌دانیم که فقط بارهای منفی (الکترون‌ها) در رسانا قادر به حرکت هستند و هنگامی که بارهای منفی به یک جهت حرکت می‌کنند، مانند این است که بارهای مثبت در جهت مخالف حرکت کرده باشند. در ابتدا گمان می‌کردند که این بارهای مثبت هستند که در رسانا جابه‌جا می‌شوند، لذا جهت جریان الکتریکی را همان جهت جریان بارهای مثبت تعیین کردند، و بعدها که مشخص شد این الکترون‌ها هستند که در رسانا حرکت می‌کنند، جهت جریان به همان قرار قبلی باقی ماند. لذا با اینکه جهت واقعی جریان، جهت حرکت الکترون‌ها است، اما جهت قراردادی جریان را (که جهت حرکت بارهای مثبت است)، به عنوان جهت جریان می‌شناسیم. بر این اساس می‌توانیم بگوییم:

جهت جریان، بر خلاف جهت حرکت الکترون‌ها است.



o نکته۲: تشخیص نقطهٔ دارای پتانسیل بیشتر: قطعاً هر نقطه‌ای که پتانسیل بیشتری داشته باشد، پتانسیلش بیشتر است! اما این واقعیت را می‌توان به گونه‌های دیگری نیز بیان کرد:

۱- پتانسیل بار مثبت از پتانسیل بار منفی بیشتر است.

۲- **بین دو نقطه با بار مثبت:** هر نقطه که بار **مثبت** بیشتری داشته باشد، پتانسیل بیشتری دارد.

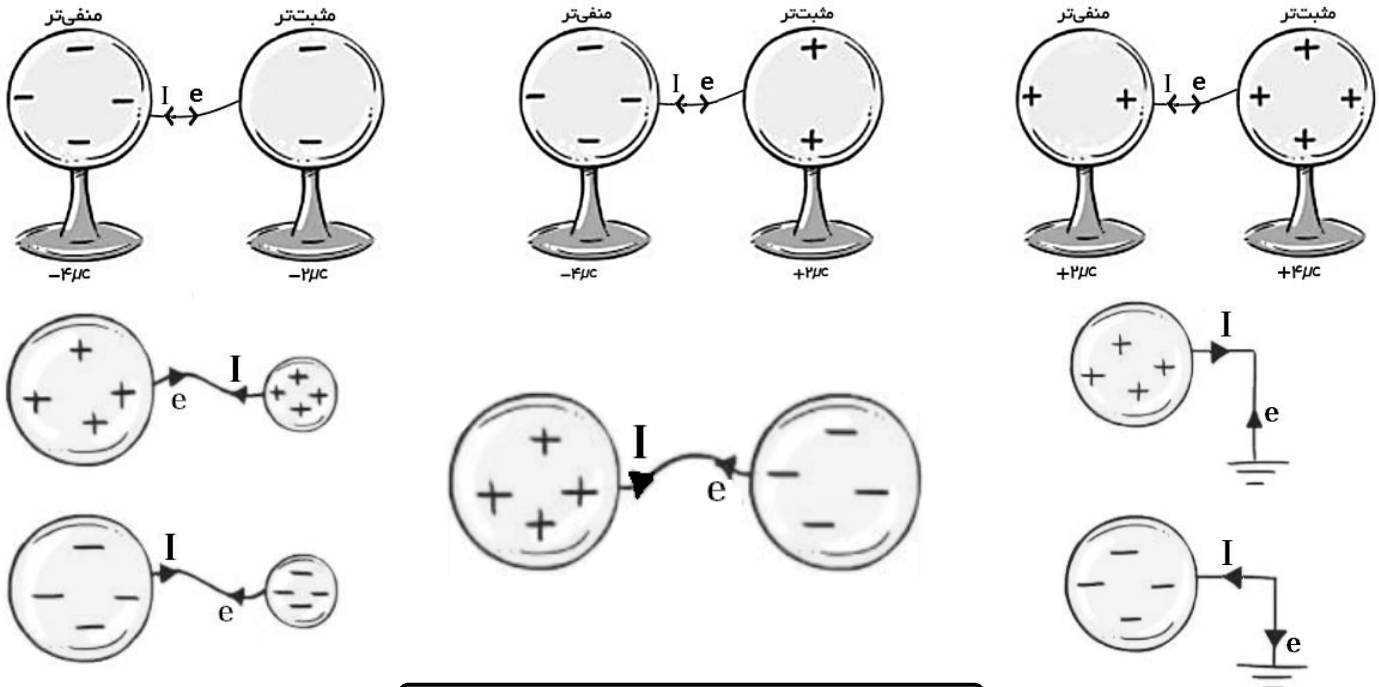
← اگر دو گوی با مقدار بار **مثبت** یکسان داشته باشیم، گویی که کوچکتر است، مثبت‌تر است (چون تراکم بیشتری دارد).

۳- **بین دو نقطه با بار منفی:** هر نقطه‌ای که بار **منفی** کمتری داشته باشد، پتانسیل بیشتری دارد.

← اگر دو گوی با مقدار بار **منفی** یکسان داشته باشیم، گویی که کوچکتر است، منفی‌تر است (چون تراکم بیشتری دارد).

توجه: پتانسیل زمین صفر است (پس هر بار مثبت، پتانسیل بیشتری از زمین دارد و هر بار منفی نیز پتانسیل کمتری از زمین دارد).

بر این اساس می‌توان جهت جریان ($\mathbf{I}$) و جهت حرکت الکترون‌ها را در شکل‌های زیر تشخیص داد:



کتاب درسی ○ **مثال ۱- ۱۲** ← سوال ترکیبی از باتری و انرژی پتانسیل الکتریکی.

راهنمایی: در مفاهیم این مثال دقت کنید. این که گفته است بار منفی، از پایانهٔ منفی به پایانهٔ مثبت جابه‌جا می‌شود به این خاطر است که **اولاً**: در واقعیت، این بار منفی است که در جریان الکتریکی جابه‌جا می‌شود و **ثانیاً**: بار منفی از پتانسیل کمتر (پایانهٔ منفی) به سمت پتانسیل بیشتر (پایانهٔ مثبت) حرکت می‌کند. همچنین وقتی بار مثبت یا منفی در جهت دلخواه خود حرکت می‌کنند، انرژی پتانسیل خود را از دست می‌دهند. لذا می‌بینیم که چون بار منفی در جهت دلخواه خود حرکت کرده، ΔU_E در نهایت منفی شده است.

* رابطهٔ ΔV و E در میدان الکتریکی یکنواخت

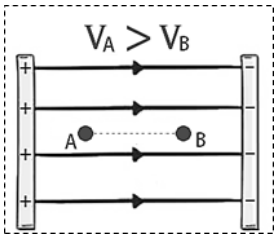
می‌خواهیم یک رابطهٔ مستقیم میان ΔV و E پیدا کنیم تا در حل مسائلی که نیاز به این رابطه دارند استفاده نماییم. اگر به یاد داشته باشید، قبلاً در تمرین ۱-۹ کتاب درسی این کار را انجام داده بودیم، اما حالا می‌خواهیم از نتیجهٔ آن استفاده کنیم.

← اگر فرض کنیم که یک بار مثبت یا منفی **در جهت میدان** حرکت می‌کند، با نوشتن مراحل زیر، نتیجه می‌گیریم: $\Delta V = -Ed$

$$\Delta U = -|q|Ed\cos(\circ) = -|q|Ed \longrightarrow \Delta V = \frac{\Delta U}{q} = \frac{-|q|Ed}{q} = \boxed{-Ed}$$

ما این مراحل را برای ذرهٔ باردار **مثبت** نوشتیم و در تمرین ۱-۹ اثبات کردیم که چون پتانسیل الکتریکی، مستقل از نوع و اندازهٔ ذرهٔ باردار است برای ذرهٔ **منفی** که در جهت میدان حرکت می‌کند نیز دقیقاً به همین نتیجه می‌رسیم.

← اگر این مراحل را برای یک ذرهٔ باردار که در **خلاف‌جهت میدان** حرکت می‌کند، تکرار کنیم نتیجه می‌گیریم: $\Delta V = Ed$



$\Delta V = -Ed$ علامت **منفی** دارد یعنی: با حرکت در جهت میدان (A→B)، پتانسیل الکتریکی کاهش می‌یابد.

$$V_B - V_A = -Ed$$

$\Delta V = Ed$ علامت **مثبت** دارد یعنی: با حرکت در خلاف‌جهت میدان (A←B)، پتانسیل الکتریکی افزایش می‌یابد.

$$V_A - V_B = Ed$$

اگر بخواهیم دو رابطهٔ بالا را در یک رابطه جمع کنیم، آن را به صورت مقابل می‌نویسیم:

$$|\Delta V| = Ed$$

← این رابطه ، اندازهٔ اختلاف پتانسیل میان دو نقطه از میدان یکنواخت را که فاصلهٔ میان آن‌ها در راستای خطوط میدان به اندازهٔ d باشد نشان می‌دهد. پس در این رابطه، علامت ΔV برای ما مهم نیست و فقط اندازهٔ آن (یعنی $|\Delta V|$) را به دست می‌آوریم. مانند باتری که در آن **پتانسیل بیشتر منهای پتانسیل کمتر** می‌شود و جواب همیشه مثبت است. اما با نگاه به مسئله می‌توانیم تشخیص دهیم که تغییرات پتانسیل (ΔV)، کاهشی بوده یا افزایشی (مثلاً با حرکت در جهت میدان، پتانسیل کاهش می‌یابد، یعنی: $\Delta V<\circ$).

توجه: اگر در مسئله، به جای اختلاف پتانسیل، از ما بخواهد مقدار عبارتی مثل $V_B - V_A$ را به دست آوریم باید علامت ΔV را هم بدانیم.

پس توصیه می‌شود: رابطهٔ میان ΔV و E را به صورت بالا حفظ کنید، اما حواستان به علامت ΔV نیز باشد، چون شاید نیاز شود.

(بخصوص در تست‌های کنکور)

نکاتی در بارهٔ رابطهٔ $|\Delta V| = Ed$

نکتهٔ۱: قبلاً در هنگام تشریح رابطهٔ $\Delta V = \frac{\Delta U_E}{q}$ گفته بودیم که چون ΔU_E در درون خود q را دارد، وقتی در این رابطه تقسیم بر q می‌شود، نتیجهٔ آن (یعنی ΔV) مستقل از q است. اما در این قسمت، این رابطه را باز کردیم و نتیجهٔ آن شد: $|\Delta V| = Ed$، و حالا می‌توانیم ببینیم که در این رابطه واقعاً هیچ بار الکتریکی (q) وجود ندارد! (اگر یادتان باشد همین کار را با نیرو(F) و میدان الکتریکی(E) نیز انجام دادیم.)

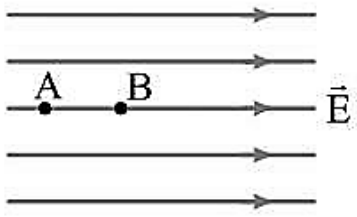
نکتهٔ۲: می‌دانیم که یکای میدان الکتریکی (E)، $\frac{N}{C}$ است. اما اگر رابطهٔ بالا را به صورت $E = \frac{|\Delta V|}{d}$ بنویسیم، خواهیم دید که یکای میدان الکتریکی به صورت $\frac{V}{m}$ ($\frac{\text{ولت}}{\text{متر}}$) می‌شود. البته این‌دو یکی هستند و اگر یکای ولت را باز کنیم، دوباره به همان یکای اصلی می‌رسیم. اما ممکن است در برخی مسائل (مخصوصاً در تست‌های کنکور)، از این یکا استفاده شود، پس حتماً باید در خاطر داشته باشید که این یکا برای میدان الکتریکی است. حتی ممکن لست یکای میدان را در یک مسئله به صورت دیگری مثل $\frac{V}{cm}$ بدهند. آن‌وقت باید این یکا را به $\frac{V}{m}$ تبدیل کنید تا در مسئله قابل استفاده باشد. پس:

یکای E (میدان الکتریکی) دو صورت دارد: $\frac{N}{C}$ و $\frac{V}{m}$

کتاب درسی ○ مثال ۱- ۱۳ ○ فعالیت ۱- ۶ ← نکات مهم این فعالیت را مشخص کنید و حفظ باشید.

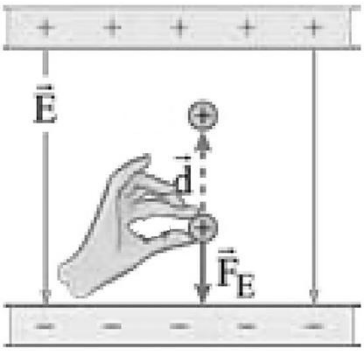
مثال ۳۲ (مسائل پایانی فصل ـ مسئلهٔ ۱۹): دو صفحهٔ رسانا با فاصلهٔ ۲ cm را موازی یکدیگر قرار می‌دهیم و آن‌ها را به اختلاف پتانسیل ۱۰۰ V وصل می‌کنیم. در نتیجه، یکی از صفحه‌ها به‌طور منفی و دیگری به‌طور مثبت باردار می‌شوند و میان دو صفحه، میدان الکتریکی یکنواختی به‌وجود می‌آید. اندازهٔ این میدان الکتریکی را حساب کنید و با توجه به جهت خطوط میدان الکتریکی در فضای بین دو صفحه، توضیح دهید که کدام‌یک از دو صفحه، پتانسیل الکتریکی بیشتری دارند؟

مثال ۳۳ (آموزش شگفت انگیز فیزیک۲): در شکل زیر، میدان الکتریکی یکنواخت $E = ۳۰۰۰ \text{ N/C}$ و فاصلهٔ AB برابر با ۲cm است. اگر پتانسیل الکتریکی نقاط A و B را به ترتیب با V_A و V_B نشان دهیم، $V_B - V_A$ چند ولت است؟



* کار انجام شده توسط نیروی خارجی

تا پیش از این، حرکت ذرهٔ باردار در میدان الکتریکی را در حالتی بررسی کردیم که تنها نیروی وارد بر ذره، **نیروی الکتریکیِ** ناشی از میدان بود(F_e). اما اگر در حین جابه‌جایی ذره، علاوه بر نیروی الکتریکی، نیرو یا نیروهای دیگری نیز بر روی ذره کار انجام دهند، این کار را در حالت کلی، کار نیروی خارجی می‌نامیم ($W_{خارجی}$). البته بسته به این‌که این نیروی خارجی چه نیرویی باشد، اندیس آن می‌تواند متفاوت باشد، اما معمولاً دو نیرو و کار خارجی در مسائل مطرح می‌شوند: ۱- کار نیروی ما: $W_{ما}$ ۲- کار نیروی گرانش: W_g



تشخیص وجود نیروی خارجی: در مسائل مربوط به این حالت، نیروی خارجی از حرکت آزادانهٔ ذره جلوگیری می‌کند که در نتیجهٔ آن، تندی حرکت ذره تغییر می‌کند و معمولاً با تندی ثابت حرکت می‌کند؛ و یا ذرهٔ باردار تغییر جهت می‌دهد و معمولاً بر خلاف جهت میل طبیعی خود در میدان حرکت می‌کند. (البته با پرتاب ذره در میدان نیز، ذره با تندیِ کند شونده بر خلاف جهت طبیعی خود حرکت می‌کند) مثلاً در شکل مقابل، نیروی دست ما مسیر حرکت ذرهٔ باردار مثبت را تغییر داده و به جای این‌که پایین برود، به سمت بالا حرکت می‌کند.

o نکته: در مسائلی که نیروی خارجی و نیروی الکتریکی، در **جهت مخالف** هم هستند، کار نیرویی که ذره را در جهت خود جابه‌جا می‌کند **مثبت** است. مثلاً در شکل بالا، کار نیروی دست مثبت است، و کار نیروی الکتریکی منفی می‌باشد.

رابطه‌های این حالت: توجه کنید که در این حالت، رابطه‌های قبلی سرجای خود هستند و فقط یک رابطه تغییر می‌کند، که آن هم مربوط به تغییرات انرژی جنبشی (ΔK) است. برای به دست آوردن آن کافیست همانند قبل، از **قضیهٔ کار و انرژی جنبشی** استفاده کنیم. در حالت قبلی، چون فقط یک نیرو (نیروی الکتریکی) کار انجام می‌داد، طبق قضیهٔ کار و انرژی، تغییرات انرژی جنبشی، برابر با کار میدان الکتریکی بود ($\Delta K = W_E$)، اما در این حالت جدید، حداقل کار یک نیروی خارجی به کارها اضافه شده است، لذا این‌بار با استفاده از قضیهٔ کار و انرژی جنبشی می‌نویسیم:

$$W_E = -\Delta U = -q\Delta V$$

$$\Delta K = W_t \rightarrow \boxed{\Delta K = W_{خارجی} + W_E} = W_{خارجی} - q\Delta V$$

ⓘ حالت ویژه: این رابطه، یک حالت ویژه نیز دارد. اگر تندی ذره در ابتدا و انتهای مسیر، **صفر** و یا **یکسان** باشد، آن‌گاه $K_1 = K_2$ می‌شود و در نتیجه $\Delta K = 0$ می‌گردد. پس رابطهٔ بالا ساده‌تر شده و به شکل زیر در می‌آید:

$$\Delta K = 0 \rightarrow W_{خارجی} + W_E = 0 \rightarrow \boxed{W_{خارجی} = -W_E} = \Delta U = q\Delta V$$

ⓘتوجه: چنان‌که پیش از این گفتیم، کار خارجی می‌تواند انواع مختلف داشته باشد و در روابط بالا عبارت « $W_{خارجی}$ » به نمایندگی از تمام انواع کارهای خارجی قرار داده شده است. در واقع می‌توانیم بگوییم که « $W_{خارجی}$ » جمع جبری کار همهٔ نیروهایی است که به ذرهٔ باردار وارد می‌شود به‌جز کار نیروی الکتریکی. پس اگر نیروی وزن و نیروی دست ما نیز بر ذرهٔ باردار وارد شوند می‌توانیم بنویسیم: $W_{خارجی} = W_{ما} + W_g$

برای چنین حالتی، از قضیهٔ کار و انرژی جنبشی به دست می‌آید:

$$\Delta K = W_{خارجی} + W_E = W_{ما} + W_g + W_E$$

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

تمام روابط کار و انرژیِ میدان الکتریکی، در یک جمع‌بندی به صورت زیر می‌شود:

همیشه:
- $\Delta U_E = -|q| E d \cos\theta$ ← تغییرات انرژی پتانسیل الکتریکی
- $W_E = -\Delta U$ ← کار میدان الکتریکی
- $\Delta U = q\Delta V$ ← تغییرات پتانسیل الکتریکی

حالت اول: فقط نیروی الکتریکی داریم ← قضیهٔ کار و انرژی: $\Delta K = W_E$ ← تغییرات انرژی جنبشی

$\Delta K = W_E = -\Delta U_E = -q\Delta V$

حالت دوم: کار نیروی خارجی داریم ← قضیهٔ کار و انرژی: $\Delta K = W_{\text{خارجی}} + W_E$

$\Delta K = W_{\text{خارجی}} - \Delta U_E$

$\Delta K = W_{\text{خارجی}} - q\Delta V$

اگر $\Delta K = 0$

$W_{\text{خارجی}} = -W_E = \Delta U = q\Delta V$

توجه: روش کلی برای حل مسائل کار و انرژی: نیازی به حفظ کردن تمام روابط بالا نیست، در واقع، خلاصهٔ تمام رابطه‌های بحث کار و انرژی در میدان الکتریکی، این است که باید **۳ رابطهٔ اصلی (همیشگی) را حفظ باشید**، سپس در هر مسئله، اول حالت مسئله را تشخیص دهید (این‌که کار خارجی داریم یا نداریم) و سپس اگر نیاز بود، برای آن قضیهٔ کار و انرژی جنبشی را بنویسید. بقیهٔ روابط خودشان به دست می‌آیند.

تمرین ۱– ۱۱ کتاب درسی با توجه به شکل مقابل:

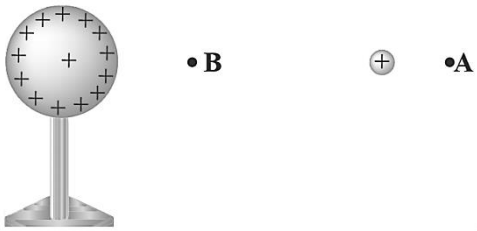
نیروی خارجی، بار q+ را در خلاف جهت میدان الکتریکی جابه‌جا می‌کند.

الف) با فرض آن‌که بار q+ در ابتدا و انتهای جابه‌جایی ساکن باشد، آیا کار نیروی خارجی، مثبت است یا منفی؟

ب) آیا بار q+ به نقطه‌ای با پتانسیل بیشتر حرکت کرده است یا به نقطه‌ای با پتانسیل کمتر؟ **توضیح دهید.**

(✍ نمونهٔ صحیح توضیح چگونگی تعیین علامت کار و مقایسهٔ پتانسیل نقاط را به شیوه‌ای که در این سوال پاسخ داده می‌شود یاد بگیرید چون کتاب درسی از شما خواسته که دلیل خود را در بارهٔ پاسخ به این دو مورد توضیح دهید. توضیح صحیح این دو مورد در امتحانات نهایی اهمیت دارد.)

مثال ۳۴ (مسائل پایانی فصل ـ مسئلهٔ ۱۷): در شکل زیر، ذرهٔ باردار مثبت و کوچکی را از حالت سکون، از نقطهٔ A به سمت کرهٔ باردار که روی پایهٔ عایقی قرار دارد، نزدیک می‌کنیم و در نقطهٔ B قرار می‌دهیم.



الف) در این جابه‌جایی، کار نیروی الکتریکی مثبت است یا منفی؟

ب) کاری که ما در این جابه‌جایی انجام می‌دهیم مثبت است یا منفی؟

پ) انرژی پتانسیل ذرّهٔ باردار در این جابه‌جایی چگونه تغییر می‌کند؟

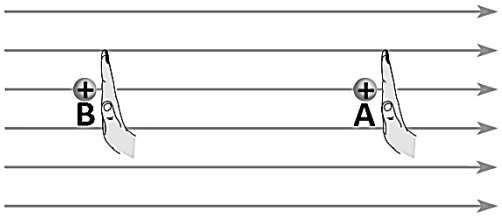
ت) پتانسیل نقطه‌های A و B را با هم مقایسه کنید.

توضیح الف و ب) .....

توضیح پ) .....

توضیح ث) .....

مثال ۳۵ (فیزیک جامع خیلی سبز): مطابق شکل، ذره‌ای با بار $q = ۲۵۰\ \mu C$ با اعمال نیروی خارجی (دست) در فضایی که میدان الکتریکی $\vec{E}$ برقرار است، جابه‌جا می‌شود. پتانسیل الکتریکی در یکی از دو نقطهٔ A و B ، ۱۵ V و در دیگری ۱- V است. اگر تندی ذره در هر دو نقطهٔ A و B ، ۱ m/s باشد، کار نیروی دست در جابه‌جایی ذره از A تا B چند ژول است؟



نکته: هرگاه در مسئله، صحبت از **پتانسیلِ** نقاط یا تغییرات پتانسیل(ΔV) شد، بدانید که باید از رابطهٔ $\Delta U = q\Delta V$ کمک بگیرید!

نکته: هرگاه در مسئله، نیاز به محاسبهٔ **کار خارجی** ($W_{خارجی}$) باشد و یا از **تندی ذره** و یا از **انرژی جنبشی** یا تغییرات آن (ΔK) صحبتی شده باشد، باید از **قضیهٔ کار و انرژی جنبشی** استفاده نمایید. چون کمیت‌های ذکر شده، فقط در این قضیه وجود دارند.

نکته: هیچ‌گاه فراموش نکنید که **کار نیروی F** (مثل کاری که نیروی دست بر روی ذرهٔ باردار انجام می‌دهد) از رابطهٔ: $W = Fd\cos\theta$ و **کار نیروی وزن**، بسته به جهت حرکت ذره، از رابطهٔ $W_g = \pm mgd$ محاسبه می‌شود (وقتی ذره به سمت بالا حرکت کند، کار نیروی وزن منفی است و بالعکس). زیرا در برخی از مسائل لازم می‌شود که کار این نیروها را خودتان محاسبه کنید.

مثال ۳۶ : در میدان الکتریکی یکنواخت نشان داده شده در شکل مقابل، به اندازهٔ $E = ۱/۳ \times ۱۰^{۵}\ N/C$ ، بار الکتریکی $q = -۲ \times ۱۰^{-۱۵}\ C$ به جرم $m = ۲ \times ۱۰^{-۱۳}\ Kg$ با نیروی خارجی $F = ۳/۶ \times ۱۰^{-۱۰}\ N$ از حال سکون از نقطهٔ A به حرکت در می‌آید. اگر تندی ذره در نقطهٔ B به ۸ m/s برسد، فاصلهٔ AB چند سانتی‌متر است؟ (از نیروی وزن چشم‌پوشی کنید و $g = ۱۰\ N/Kg$)