اتلاف انرژی
در اتصال دو خازن

حسن اتحاد مهراباد
دبیر فیزیک دبیرستان نمونه دولتی ملاصدرا عجب‌شیر

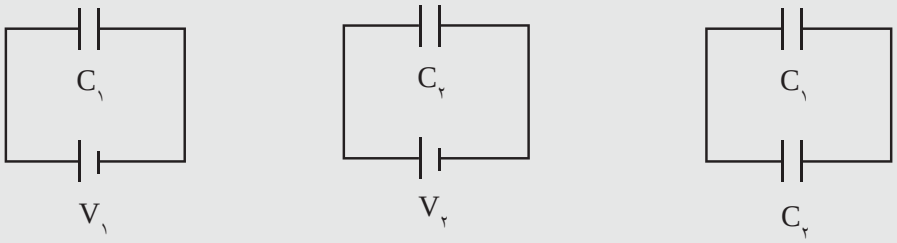
در کتاب فیزیک سال سوم تمرین‌های آخر فصل الکتریسیته ساکن در تمرین شماره ۱۴ مسئله اتصال دو خازن پر شده به همدیگر مطرح و در انتهای مسئله کاهش انرژی خواسته شده است.

اما علت این کاهش چیست؟ در این مورد جواب‌های مختلفی داده شده است در این مقاله ضمن تشریح مسئله درصدد آن هستیم که مفهوم آن را به شیوه مناسبی بیان کنیم.

۱۴. خازنی به ظرفیت $C_1=5\mu F$ با اختلاف پتانسیل ۱۲۰۰V و خازنی به ظرفیت $C_2=10\mu F$ با اختلاف پتانسیل ۷۵۰ ولت پر شده‌اند. اگر این خازن‌های پر را از مدار اصلی آن‌ها جدا و صفحه‌های همنام آن‌ها را به هم وصل کنیم، (الف) ـ اختلاف پتانسیل بین دو صفحه و بار ذخیره شده در هر خازن چه اندازه می‌شود؟

(ب) ـ مجموع انرژی ذخیره شده در دو خازن را قبل و بعد از اتصال به یک‌دیگر محاسبه و با هم مقایسه کنید.

هرگاه خازن C_1 را با اختلاف پتانسیل V_1 و خازن C_2 را با اختلاف پتانسیل V_2 پر کرده و دو سر آن‌ها را به همدیگر وصل کنیم یک اختلاف پتانسیل جدید و مشترکی حاصل می‌گردد و بار الکتریکی و انرژی آن‌ها تغییر می‌کند.



$$\begin{cases} q_1 = C_1 V_1 \\ q_2 = C_2 V_2 \end{cases} \Rightarrow V_T = \frac{q_1 \pm q_2}{C_1 + C_2} \Rightarrow \begin{cases} q'_1 = C_1 V_T \\ q'_2 = C_2 V_T \end{cases}$$

$$U_T = \frac{1}{2} C_1 V_1^2 + \frac{1}{2} C_2 V_2^2 \quad U'_T = \frac{1}{2}(C_1 + C_2) V_T^2$$

$$U_T > U'_T$$

در این اتصال چه صفحه‌های همنام به همدیگر وصل می‌شوند و چه صفحه‌های ناهمنام، در هر صورت دو خازن به‌صورت موازی به هم وصل می‌شوند زیرا در اتصال صفحه‌های ناهمنام، بعد از مدت بسیار کوتاهی بارهای الکتریکی از یکی از دو خازن به دیگری جریان می‌یابد و پس برقراری حالت تعادل هر دو هم پتانسیل شده و صفحه‌های همنام به هم متصل می‌گردند.

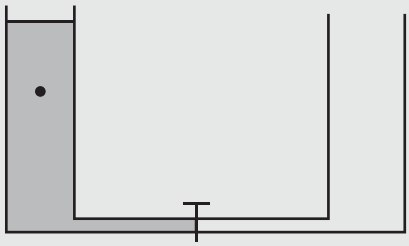
اما چرا انرژی مجموعه دو خازن بعد از اتصال کمتر از حالت قبل از اتصال است؟

آن‌چه از نظرات برخی از همکاران در جلسات گروه‌های درسی به‌دست می‌آید این است که به استناد توضیح برخی کتاب‌های فیزیک، مقداری انرژی به‌صورت گرما و انرژی درونی در سیم‌های رابط دو خازن تلف می‌شود!!

اما اگر این استدلال درست باشد دقیقاً مثل مسئله کارآیی انرژی باید بتوانیم با انتخاب مقاومت کمتر برای سیم‌های رابط مقدار انرژی تلف شده را کاهش دهیم! در صورتی‌که چنین نیست چون همیشه مقدار مشخصی انرژی تلف می‌شود و این مقدار مستقل از مقاومت سیم‌های رابط است. به‌طور مثال در اتصال این خازن پر شده به خازن مشابه خالی همیشه نصف انرژی تلف می‌گردد.

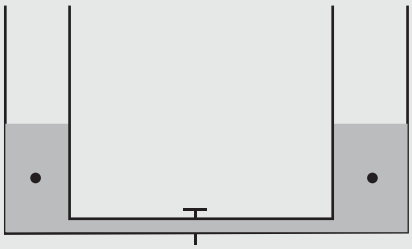
این مسئله را می‌توان با شبیه‌سازی جاری شدن آب بین دو ظرف به روش ساده‌ای حل نمود.

دو ظرف مشابه که به‌وسیله یک لوله رابط و شیر اتصال به هم وصل شده‌اند را در نظر می‌گیریم موقعی که شیر اتصال قطع است ظرف ۱ را تا ارتفاع h پر از آب می‌کنیم (ارتفاع h فاصله مرکز جرم آن از سطح زمین است) و انرژی پتانسیل گرانشی آن را نسبت به سطح زمین حساب می‌کنیم حال اگر شیر اتصال را باز کنیم آب در آن جاری شده و در هر دو ظرف تا یک ارتفاع یکسانی آب قرار می‌گیرد. طبق محاسبه‌های شکل زیر اگر در این حالت انرژی پتانسیل گرانشی آبِ مجموعه دو ظرف را حساب کنیم برابر نصف مقدار قبل از اتصال دو ظرف می‌شود. و درست نصف انرژی



$$U_T = U_1 + U_2 = mgh + 0 = mgh$$

$$U'_T = \frac{U_T}{2}$$



$$U'_T = U'_1 + U'_2 = \frac{m}{2}g\frac{h}{2} + \frac{m}{2}g\frac{h}{2} = \frac{mgh}{2}$$

تلف شده است.

اما چرا؟

وقتی شیر بین دو ظرف باز است نیروی برایندی بر آب وارد می‌شود که نتیجه آن جریان شتاب‌دار آب مخزن به طرف پایین است و تا وقتی که آب به حال تعادل برسد این نیروی برایند غیرصفر است. جهت آن در ظرفِ اول پایین‌سو و در ظرف دوم به طرف بالاست به عبارت دیگر سطح آب در ظرف اول پایین و در ظرف دوم بالا می‌رود.

اما وقتی سطح آب در دو ظرف برابر شد، حرکت در این مرحله پایان نمی‌یابد بلکه ادامه پیدا می‌یابد تا سطح آب در ظرف دوم بالاتر از ظرف اول شود و آب شتاب منفی پیدا کند و در نهایت جهت جریان تغییر خواهد کرد و جریان باعث خواهد شد سطح آب در مخزن اول بالا رفته و در ظرف دوم پایین بیاید تا به وضع تعادل برسید اگر به کنترل خود ادامه دهیم می‌بینیم که سطح‌های آب در دو ظرف به بالا و پایین حرکت نوسانی دارند. در اینجا حتی اگر هیچ مقاومتی در مقابل حرکت نبود باز هم آب با حرکت هماهنگ ساده نوسان می‌کرد. مقدار این انرژی تلف شده برابر همان انرژی جنبشی آب در حال نوسان است. چون مسیر دارای مقاومت است به مرور زمان با کاهش دامنه نوسان‌ها به میرایی نوسان و حالت تعادل آب خواهیم رسید. در صورتی‌که مقاومت مسیر کمتر باشد میرایی در زمان طولانی صورت می‌گیرد و اگر مقاومت مسیر بیشتر باشد میرایی زودتر و در یک یا چند نوسان اتفاق می‌افتد.

اگر حجم آب ظرف‌ها را به مقدار بار هر خازن، ارتفاع آب هر ظرف را به اختلاف پتانسیل الکتریکی هر خازن، نوسان بارهای الکتریکی بین دو خازن را به نوسان آب بین دو ظرف و اصطکاک در لوله رابط را به مقاومت سیم‌های رابط بین خازن‌ها تشبیه کنیم، می‌توان گفت که انرژی در طی گذارهای زیادی تلف می‌شود و این فکر که تمام انرژی در یک گذار تلف شده و تعادل مستقیماً و بلافاصله رخ داده است قابل قبول نیست. بلکه نوسان بارهای الکتریکی با تابش موج الکترومغناطیسی در چند گذار منجر به اتلاف انرژی می‌شوند.

اگر خازن پر شده را به یک خازن خالی با ظرفیت n برابر ظرفیت خازن پر وصل کنیم انرژی ذخیره شده در دو خازن پس از اتصال $\frac{1}{n+1}$ برابر انرژی ذخیره شده ابتدایی در خازن اول است که در این حالت نیز شبیه‌سازی برای دو ظرف یکی با سطح مقطع A و دیگری با سطح مقطع nA صورت می‌گیرد.

منابع

۱. احمد احمدی، (۱۳۸۰). فیزیک ۳ و آزمایشگاه. تهران. شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران.

۲. رشد آموزش فیزیک شماره ۵۲ صفحات ۵۱-۴۸

۳. رشد آموزش فیزیک شماره ۸۳ صفحات ۱۶-۸

۴. رشد آموزش فیزیک شماره ۵۵ صفحات ۱۶-۱۴