مشاهدهٔ مدارهای الکتریکی با دوربین‌های تصویربرداری حرارتی

نویسنده: پیتر کاچوفسکی
مترجمان: فرانک لاهورپور، مژده پرمحمد، مهرنوش بادامیان و عزیز خدادادی

اشاره

دوربین‌های تصویربرداری حرارتی با دادن بازخورد بصری سریع خود، نه‌تنها در کاربردهای صنعتی بلکه در آموزش فیزیک هم بیش از پیش در حال تبدیل شدن به ابزاری متداول هستند. کاهش مداوم قیمت‌های نمونه‌های سازگار با دستگاه‌های قابل حمل هوشمند و عملکرد بصری آن‌ها، اندازه‌گیری حرارتی را در مدارس امکان‌پذیر و برای دانش‌آموزان جذاب می‌کند. این مقاله به آزمایش‌های عمدتاً کیفی IR (مادون قرمز) می‌پردازد که برای دانش‌آموزان دبیرستانی یا حتی دانشجویان طراحی شده است. تمام آزمایش‌ها فرآیندهای حرارتی مربوط به عبور جریان از مدارهای الکتریکی را نشان می‌دهند که مکرراً توسط دانش‌آموزان دبیرستانی استفاده می‌شود. آزمایش‌های پیشنهادی می‌توانند به‌طور جداگانه، یا به‌عنوان یک دنبالهٔ کامل درسی که خلاصه‌ای از دانش مربوط به قانون اهم، قوانین مدار کیرشهف و گرمایش ژول هستند، در دروس فیزیک گنجانده شوند.

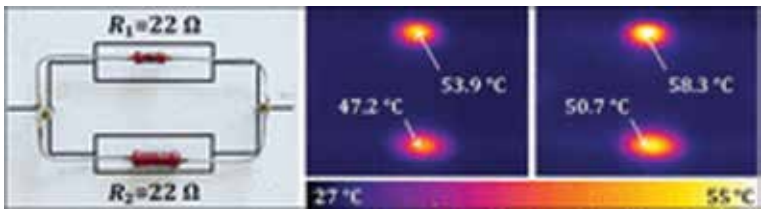
در سال‌های اخیر، تعداد مقالات منتشر شده‌ای که شامل ایده‌های آموزش با استفاده از دوربین‌های مادون قرمز و همچنین مطالعاتی در مورد تأثیر آن‌ها بر دانش‌آموزان است رو به افزایش گذاشته است. در بیشتر موارد این پیشنهادها بر روی مباحث مفهومی دشوار مانند انتقال فاز، فرآیندهای اتلافی (اصطکاک، برخوردهای غیرکشسان) یا هدایت گرمایی متمرکز هستند که بر روی درک ذهنی ما از دما تأثیرگذار است. با این حال، توجه بسیار کمتری در زمینهٔ آموزش الکتریسیته و مغناطیس صورت می‌گیرد. وولمر (Vollmer) و مولمان (Möllmann) آزمایش‌هایی را شرح می‌دهند که اثرات ترموالکتریک، وجود جریان‌های گردابی، تغییرات دما در اجاق‌های مایکروویو و گرمایش ژول در مدارهای موازی و سری ساده را نشان می‌دهند. مورد آخر همچنین توسط نتزل و همکارانش (Netzell et al) یا ونگ (Wong) و سوبرامانیام (Subramaniam) به همین ترتیب مورد بررسی قرار گرفته است. ایرینهاک (Ayrinhac) نیز استفادهٔ بصری جذابی را از دوربین‌های IR برای حل شبکه‌های پیچیده رسانای الکتریکی پیشنهاد می‌دهد. هدف از این مقاله، شرح پدیده گرمایش ژول در فعالیت‌های درسی واقعی است که عمدتاً توسط خود دانش‌آموزان به منظور کمک به درک آن‌ها از پدیده‌های حرارتی و الکتریکی طراحی شده‌اند.

همهٔ آزمایش‌ها با استفاده از دوربین مادون قرمز FLIR i7 ثبت شده‌اند و در تمام نمودارها، مقادیر عددی دما مربوط به گرم‌ترین نقطهٔ سطح مورد مطالعه است.

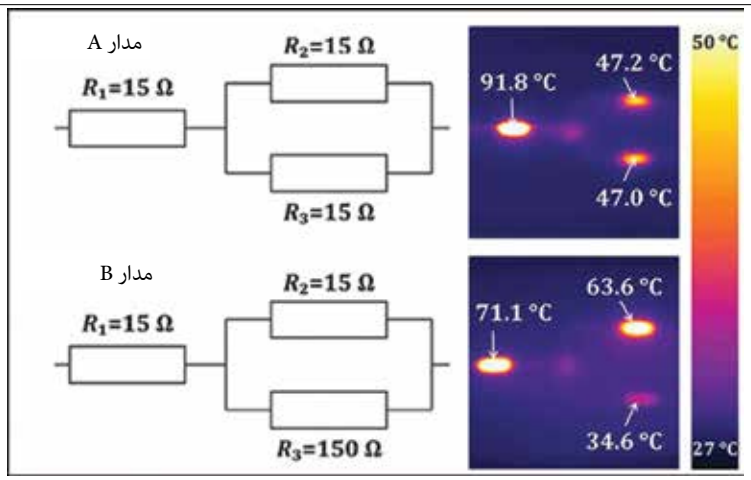
این مطلب می‌تواند به‌عنوان یک مسئله برای دانش‌آموزان مطرح شود و آن‌ها می‌توانند در کار بعدی پیش‌بینی کنند که کدام‌یک از مقاومت‌ها سریع‌تر خنک می‌شود

ظرفیت گرمایی متفاوت مقاومت‌ها؛ استدلال کیفی

دانش‌آموزان به سادگی حدس می‌زنند که اگر دو مقاومت همسان را به‌صورت موازی به منبع تغذیه وصل کنند از هر دو مقاومت جریان‌های یکسانی عبور خواهد کرد و سرعت گرمایش آن‌ها (که توسط دوربین تصویربرداری حرارتی به راحتی قابل مشاهده است) یکسان خواهد بود. با این حال، کلمهٔ «همسان» در اینجا فقط به معنای مقاومت یکسان نیست، بلکه به اندازهٔ یکسان، هندسه و سطوح مؤثر یکسان نیز اشاره دارد که متضمن تابش یکسان از مقاومت‌هاست. اگر این الزامات را نادیده بگیریم، حتی این آزمایش ساده می‌تواند نتایج غیرمنتظره‌ای به بار آورد. در شکل ۱، تصاویر یک جفت مقاومت ۲۲Ω با اندازه‌های مختلف نشان داده شده است که ۱۰ و ۲۰ ثانیه پس از اتصال آن‌ها به باتری ۳V گرفته شده است. با توجه به ظرفیت گرمایی بیشتر، مقاومت بزرگ‌تر دمای خود را کندتر تغییر می‌دهد، حتی اگر گرمای منتشر شده از آن به اندازهٔ مقاومت کوچک‌تر باشد. این مطلب می‌تواند به‌عنوان یک مسئله برای دانش‌آموزان مطرح شود و آن‌ها می‌توانند در کار بعدی پیش‌بینی کنند که کدام‌یک از مقاومت‌ها سریع‌تر خنک می‌شود.



▲ شکل ۱. دو مقاومت ۲۲Ω با اندازه‌های مختلف به‌طور موازی. از سمت چپ: در نور مرئی، در IR (مادون قرمز) ۱۰ ثانیه پس از اتصال منبع تغذیه و در IR (مادون قرمز) ۲۰ ثانیه پس از اتصال منبع تغذیه.



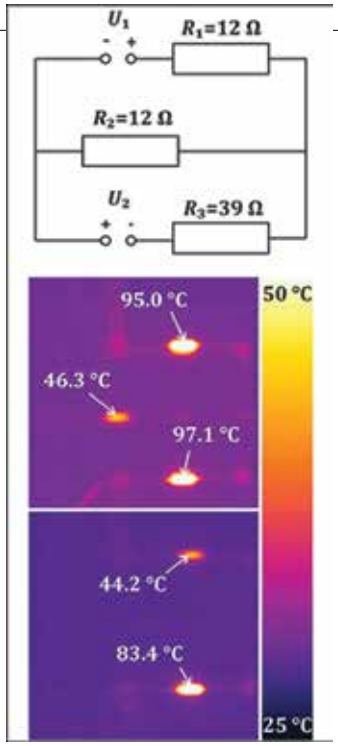
▲ شکل ۲. مدارهای A و B در یک عکس IR گرفته شده ۶۰ ثانیه پس از اتصال یک باتری ۴/۵ V.

قانون‌های کیرشهف

حال اجـازه دهید آزمایشـی را در نظر بگیریـم که برای مقاومت‌های هم‌اندازه ضروری اسـت. برای نشان دادن قانون جریان کیرشـهف دو مدار سـادهٔ A و B در نظر گرفته شده است که شـامل مقاومت‌های ۱۵Ω و ۱۵۰Ω هستند (شکل ۲ را ببینید). در مدار A، مقاومت R_1 جریان دوبرابر و گرمای آزادشده چهاربرابر را در مقایسه با دو مقاومت دیگر که دمای آن‌ها به‌طور یکسان اما با شدت کمتری نسبت به R_1 افزایش می‌یابند، تجربه می‌کند. براساس آزمایش‌های مکرر، پیش‌بینی این نتیجه برای دانش‌آموزان آسان است. در حالی‌که در مورد وضعیت B نمی‌توان چنین گفت. در این حالت جریان در دو شاخه (با مقاومت‌های R_2 و R_3) به نسبت ۱۰:۱ تقسیم می‌شود که نسبت گرمای آزادشده نیز چنین است. برای مقایسه، در شـکل ۲ مقاومت R_1 متصل شده اسـت تا نشان دهد دمای $t(R_2)$ مقاومت R_2 کمی پایین‌تر از $t(R_1)$ است، اما به‌طور قابل توجهی بالاتر از $t(R_3)$ است.

گفته می‌شود که دانش‌آموزان به‌طور شهودی قانون جریان کیرشهف را می‌پذیرند، در حالی‌که قانون ولتاژ وی (کیرشهف) به دلیل فرمول‌بندی ریاضی آن که نیازمند بررسی سیستمی با بیش از دو معادله خطی است، بسیار انتزاعی‌تر و غیرمحبوب است. حل چنین سیستمی برای مدار «پایه» با دو منبع تغذیه و سه شاخه (شکل ۳) از دانش‌آموزان وقت زیادی می‌گیرد و همین‌طور سختی به دست آوردن مقادیر جریان‌ها و ولتاژها دانش‌آموزان را سـزاوار ارزیابی تجربـی می‌کند تا از نتیجهٔ صحیـح خود لذت ببرند. با مقایسـهٔ گرمایش ژول از عناصر مقاومت، دوربین تصویربرداری حرارتی تأیید ظریفی را ارائه می‌دهد که آیا محاسبات صحیح بوده است یا خیر؛ البته اعداد دقیق را تأیید نمی‌کند اما تخمین بصری رضایت‌بخشی ارائه می‌دهد.

طرح شـکل ۳ نمونه‌ای از یک مدار اسـتفاده شده توسط دانش‌آموزان را نشان می‌دهد که به آن‌ها این امکان را می‌دهد تـا دو منبع تغذیهٔ مختلف را به سـه مقاومت انتخابی ثابت وصل کنند. به‌عنوان مثال، برای $U_1=U_2=4/5V$، محاسـبه نظری براسـاس قانون ولتاژ کیرشـهف تـوان را در مقاومت اول $P(R_1)=0/83W$ و به‌طـور مشـابه $P(R_2)=0/15W$ و $P(R_3)=0/88W$ به دسـت می‌دهد. تصویر مادون قرمز این مدار واقعی نشـان می‌دهد که دمـای مقاومت‌ها به خوبی با انتظارات مبتنی بر محاسبه مطابقت دارد. در شکل ۳، نمونهٔ دیگری برای $U_1=1/5V$ و $U_2=4/5V$ نشان داده شده است.



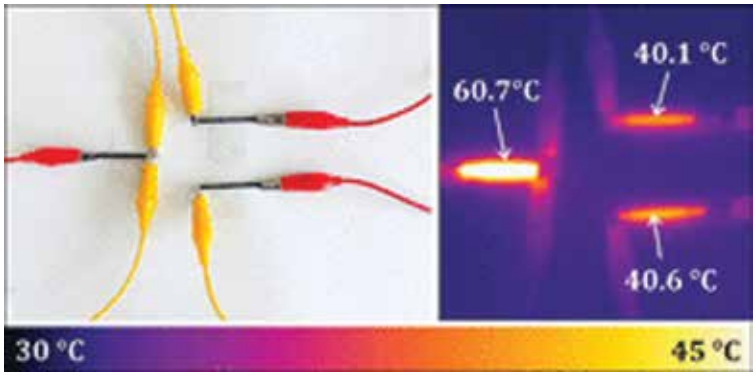
شکل ۳. در بالا: مدار با سه مقاومت ثابت ۱۲ اهم، ۱۲ اهم و ۳۹ اهم. در وسط: مدار ۵۰ ثانیه پس از اتصال به $U_1=U_2=4/5v$. در نتیجه , $P(R_2)=0/15w$ $P(R_1)=0/83w$ و $P(R_3)=0/88w$.
در پایین: مدار ۴۵ ثانیه پس از اتصال $U_1=1/5v$ و $U_2=4/5v$ در نتیجه $P(R_1)=0/18w$, $P(R_2)=0w$ و $P(R_3)=0/53w$. در این حالت بدیهی است که مقاومت R_2 جریان صفر را تجربه می‌کند. زیرا دمای آن همان دمای محیط باقی می‌ماند.

مغـز مدادها: مقاومت‌هـای ایده‌آل برای آزمایش‌های IR

بعضی از آزمایش‌های مدار حتی بدون مقاومت‌های مناسب قابل انجام هستند ـ مغز مدادهای مورد استفاده در مدادهای مکانیکی (مدادهای فشـاری) می‌توانـد به‌عنوان جایگزینی ارزان‌قیمت برای آن‌ها باشـد. مقاومت یـک مغز مداد HB ضخیم‌تر (طول ۱۰cm و قطر ۲mm) در حدود ۱۰Ω اسـت و از آنجایی که این مقاومت با طول میلهٔ گرافیتی متناسـب اسـت، با کوتاه کردن میلهٔ گرافیتی به راحتی می‌توان آن را کاهش داد. به این ترتیب، هر دانش‌آموز می‌تواند به سـرعت مدار خود را بسـازد و در صورت لـزوم فوراً پارامترهای آن را تغییر دهد. در رابطه با تصویربرداری حرارتی، چنین مدارهایی دارای یک مزیت هسـتند زیرا در واقع آن‌ها تابش یکسان از همهٔ مقاومت‌ها (= مغز مدادها) را تضمین می‌کنند. در شکل مادون قرمز ۴، یک «مدار گرافیتی» به شکل مشابه با مدار A

با مقایسهٔ گرمایش ژول از عناصر مقاومت، دوربین تصویربرداری حرارتی تأیید ظریفی را ارائه می‌دهد که آیا محاسبات صحیح بوده است یا خیر؛ البته اعداد دقیق را تأیید نمی‌کند اما تخمین بصری رضایت‌بخشی ارائه می‌دهد

قبل از آماده‌سازی هریک از فعالیت‌های توصیف شده برای دانش‌آموزان، لازم است که معلم جریان و توان هر عنصر مدار را به منظور استفاده از مقاومت‌های قوی و منبع تغذیه مناسب محاسبه کند



▲ شکل ۴. «مدار گرافیتی» با مغز مداد چسبیده به یک صفحه پلاستیکی به وسیله نوارچسب؛ تصویر مرئی و IR گرفته شده ۲۰ ثانیه پس از اتصال یک باتری ۴/۵ V.

از شکل ۲ وجود دارد. برای جلوگیری از تأثیر نواحی سطحی مختلف و ظرفیت‌های گرمایی مختلف، فقط بایستی مداری از عناصر هم‌اندازه ساخته شود.

نوسانات توان در مدارهای AC

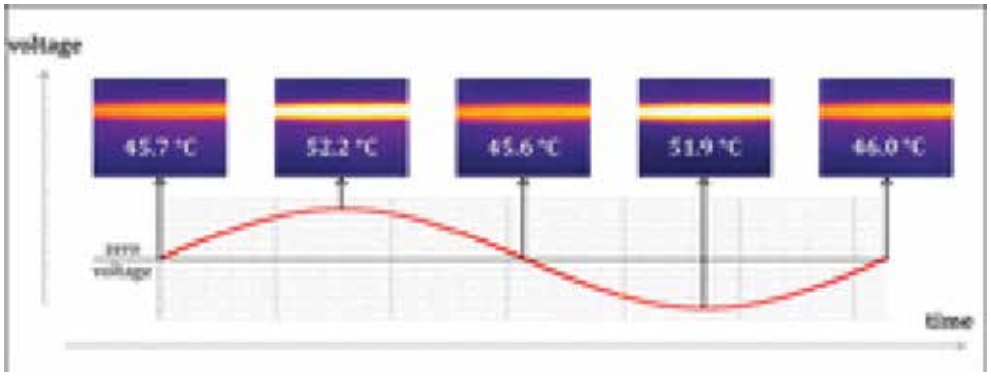
از مغز مدادها به دلیل مزیت دیگرشان، یعنی ظرفیت گرمایی بسیار کم آن‌ها، می‌توان برای آخرین آزمایش نیز استفاده کرد. این کار، دوربین تصویربرداری حرارتی را قادر می‌سازد تا تغییرات سریع دما همراه با تغییر شار جریان الکتریکی را نیز تشخیص دهد. در حقیقت مشاهدهٔ این اثر در یک مدار با سیگنال AC متداول ۵۰HZ تا ۶۰HZ غیرممکن است، اما برای فرکانس‌های کمتر از ۰/۲HZ دما به‌صورت دوره‌ای افزایش می‌یابد و باعث کاهش رسانایی می‌شود. برای نشان دادن این مسئله، از یک مغز مداد نازک HB (طول ۶cm و قطر ۰/۵mm) استفاده شده که به منبع تغذیه AC در حدود ۲V و ۰/۱HZ متصل شده است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، دو بیشینه و سه کمینهٔ دمایی در طی یک دوره مشاهده می‌شود که پیش‌بینی آن ممکن است برای دانش‌آموزان دشوار باشد؛ زیرا اغلب آن‌ها حداقل ولتاژ (دامنه منفی ولتاژ) را به‌عنوان حداکثر توان تفسیر نمی‌کنند. آنچه برای نویسندهٔ این مقاله شگفت‌آور بود این واقعیت است که دامنه‌های ولتاژ و جریان با لحظاتی که بیشترین دما اندازه‌گیری شده به خوبی مطابقت دارد؛ تقریباً بدون هیچ تأخیری.

محدودیت‌ها

در بعضی از قسمت‌های این مقاله برخی ساده‌سازی‌های جزئی انجام شده است. اولاً در محاسبات از مقاومت داخلی باتری‌های استفاده شده و همچنین از تغییر مقاومت‌ها با افزایش دما صرف‌نظر شده است. علاوه بر این، یک مقدار پیش‌فرض تابش (ε=۰/۹۵) برای همه اندازه‌گیری‌ها لحاظ شده است، که ممکن است برای انواع مختلف پوشش سطح مقاومت‌ها کمی متفاوت باشد.

همچنین لازم به ذکر است که افزایش دمای اندازه‌گیری شدهٔ مقاومت‌ها، دقیقاً با توان الکتریکی تولید شده متناسب نیست. به‌عنوان مثال، در مدار A در شکل ۲، مقاومت R_1 گرمای تابش شده چهاربرابر را در مقایسه با R_2 و R_3 تجربه می‌کند، در حالی‌که افزایش درجه حرارت آن فقط سه‌برابر بالاتر از دو مقاومت دیگر است. همچنین سایر اندازه‌گیری‌های ارائه شده، ناسازگاری‌های مشابهی را نشان می‌دهند که ناشی

ساخت مدارها با لحیم‌کاری می‌تواند به‌عنوان بخشی از فعالیت‌های دانش‌آموزان قبل از انجام آزمایش‌های IR باشد



▲شکل ۵. تغییر دمای یک قطعه گرافیتی ۰/۵ میلی‌متری که یک جریان متناوب را تجربه می‌کند. تصاویر IR قسمت وسط قطعه را نشان می‌دهد.

از ماهیت بسیار پیچیدهٔ فرآیندهای مؤثر در دمای اندازه‌گیری شدهٔ نهایی است. در حین گرمایش ژول، مقاومت‌ها توسط تابش انرژی را از دست می‌دهند (قانون استفان ـ بولتزمن) و براساس قانون سرمای نیوتن خنک می‌شوند، مقداری از انرژی، توسط رسانش، برای گرم کردن بقیهٔ مدار خارج شده و پس از مدتی با محیط تعادل پویا برقرار می‌شود و غیره. این موارد همراه با اثرات ذکر شده در پاراگراف قبل، دلایلی هستند که نویسنده استفاده از آزمایش‌های پیشنهادی به‌صورت نمونه‌های کیفی را توصیه می‌کند.

قبل از آماده‌سازی هریک از فعالیت‌های توصیف شده برای دانش‌آموزان، لازم است که معلم جریان و توان هر عنصر مدار را به منظور استفاده از مقاومت‌های قوی و منبع تغذیه مناسب محاسبه کند؛ در غیر این صورت، خطر واقعی سوختن و از بین رفتن مدار وجود دارد. از آنجایی که به‌ویژه عناصر مقاومت تا حدود ۱۰۰°C گرم می‌شوند، لازم است به دانش‌آموزان اخطار شود که به قسمت‌های داغ دست نزنند؛ یا اینکه از ولتاژهای پایین استفاده کنند.

خلاصه

مطالعهٔ مدارهای الکتریکی با دوربین تصویربرداری حرارتی یک روش غیرمتعارف برای بررسی موضوعاتی مانند قانون اهم و قوانین مدار کیرشهف است. با استفاده از گرمایش ژول، اندازه‌گیری‌های مادون قرمز یک بازخورد کیفی بصری از توان الکتریکی تولید شده بر روی عناصر مدار خاص را بدون نیاز به استفاده از وسایل اندازه‌گیری معمولی (آمپرسنج، ولت‌سنج) نشان می‌دهند. با در نظر گرفتن محدودیت‌های ذکر شده در بالا، فعالیت‌های تجربی پیشنهادی و تأیید شده نتایج رضایت‌بخش و قابل تکراری را ارائه می‌دهند. علاوه بر این، مدارها با لحیم‌کاری ساخته شده‌اند، یک فعالیت دستی که قطعاً برای دانش‌آموزان با طراوت و جالب است. بنابراین، ساخت مدارها با لحیم‌کاری می‌تواند به‌عنوان بخشی از فعالیت‌های دانش‌آموزان قبل از انجام آزمایش‌های IR باشد.

سپاسگزاری

این کار توسط مرکز تحقیقات دانشگاه چارلز (شماره UNCE/HUM/24) پشتیبانی شده است.

منبع

Phys. Teach. 57, 597 (2019) by Petr Kácovský