

آزمایش های ژول

زهرا اکبری، سجاد پورمنوچهری

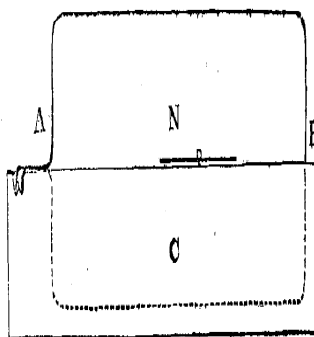
۱۹ بهمن ۱۳۹۹

مقدمه

جیمز ژول در سال ۱۸۱۸ در منچستر به دنیا آمد و توسط دالتون، دانشمندی با عقاید جسورانه که از طرفداران نظریه اتمی توپ بلیارد برای گازها بود تعلیم یافت و تبدیل به تجربی‌پیشه‌ای توانمند شد که با تلاش‌های زیاد و آزمایش‌های دقیقش در عین مخالفت اندیشمندان آن عصر، قانون اول ترمودینامیک یعنی هم‌ارزی کار و گرما را نشان داد. در این نوشته به مرور آزمایش‌ها و مقالات علمی او می‌پردازیم.

آزمایش مقاله سال ۱۸۳۹

در این مقاله ژول به بیان و بررسی یک سری از آزمایش‌ها در مورد گرمای حاصل از جریان الکتریکی در رساناهای فلزی و گرمای حاصل از الکترولیز در پیل‌های مختلف می‌پردازد. ژول برای اندازه‌گیری جریان در این آزمایش‌ها یک گالوانومتر ابداع کرد و برای راحتی، یکای اندازه‌گیری جریان در آزمایش‌هایش را نیز براساس همین وسیله در نظر گرفت. او مطابق شکل زیر یک سیم مسی را به شکل مستطیل درآورد به کمک یک قطعه چوب آن را به صورت افقی قرار داد. با قراردادن یک سوزن مغناطیسی در مرکز آن، هنگام عبور جریان از سیم‌های مسی مذکور، ژول انحراف زاویه‌ای سوزن را اندازه‌گیری و از طریق آن جریان را بدست می‌آورد.



شکل ۱: گالوانومتر ژول

بر این اساس و با اندازه‌گیری‌های مختلف، او متوجه شد که زمانی که جریانی که بتواند ۹ غلات آب را در مدت یک ساعت تحزیه کند از گالوانومتر بگذرد، سوزن $33/5$ درجه منحرف میشود. اون این مقدار از انحراف را یک «درجه» نامید و از آن به عنوان یکای جریان استفاده کرد. ژول برای اندازه‌گیری گرمای ایجاد شده توسط الکتریسیته‌ی اصطکاکی (گرمای ناشی از مقاومت رسانا) از روش زیر استفاده می‌کرد:

اون سیم‌های مختلفی که قصد اندازه‌گیری گرمایی که ایجاد می‌کنند، پس اندازه‌گیری ضخامت طول آن‌ها، سیم‌ها را حول یک لوله‌ی شیشه‌ای می‌پیچید و درون مقدار مشخصی آب قرار می‌داد. او

ادعا می کند که در این روش، هیچ مقدار قابل ملاحظه ای از گاز هیدروژن تولید نمی شود نیاز به نگرانی در مورد تجزیه آب نیست. علاوه بر این، ژول حتما از همدمای بودن سیستم با محیط اطراف قبل از ایجاد جریان مطمئن می شد.

در آزمایش اول، دو قطعه سیم مسی به ضخامت های $1/28$ و $1/50$ اینچ و هر دو به طول ۲ یارد را به طریق مذکور به پیچ تبدیل کرد. سپس جریان $1Q$ که همان واحد «درجه» ذکر شده است را، از هر دو عبور داد. بعد از گذشت یک ساعت، او مشاهده کرد که دمای طرفی که شامل سیم نازک بود $3/4$ درجه فارنهایت و دما طرف شامل سیم کلفت $1/3$ درجه فارنهایت افزایش یافت.

سپس وی ادعا می کند که با اندازه گیری مستقیم مشاهده کرده است که ۳ پا از سیم نازک معادل ۸ پا از سیم کلفت رسانندگی دارد. پس می توان نتیجه گرفت نسبت مقاومت ۲ یارد از هر کدام برابر است با نسبت $3/4$ به $1/27$ که بسیار نزدیک به اثر گرمایی مشاهده شده از این دو است.

او دو آزمایش دیگر را با جایگذاری آهن و جیوه به جای یکی از سیم های مسی در آزمایش ذکر شده در مقاله اش قید می کند و به طریق مشابه نسبت مقاومت های آن ها را اندازه می گیرد. سپس ادعا می کند که آزمایش مشابه دیگری نیز انجام داده است که نتایج کاملا به این سه آزمایش هماهنگ هستند. پس نتیجه می گیرد که: گرمای ناشی از عبور الکتریسیته از یک رسانا به مقاومت آن بستگی دارد نه به شکل و اندازه ی رسانا.

ژول بعد از این اثر افزایش شدت جریان را بررسی می کند. در ابتدا وی بیان می کند که انتظار می رود گرمای آزاد شده باید با مربع شدت جریان متناسب باشد، چراکه با افزایش شدت، هم مقدار الکتریسیته و هم سرعت عبور آن افزایش پیدا می کنند. پس باید دوبار با آن متناسب باشد.

بدین ترتیب او از همان پیچچه هایی که در آزمایش های بالا ذکر شد استفاده می کند و با عبور دادن جریان های مختلف از آن تغییر دمای حاصل را اندازه می گیرد. جدول زیر داده هایی است که در این آزمایش بدست آورده و در مقاله اش منتشر کرده است.

Mean Deviations of the Needle of the Galvanometer.	Quantities of Current Electricity expressed in Degrees (G.)	Quantities of Heat produced in half an hour by the Intensities in Column 2.	Ratio of the Squares of the Intensities in Column 2.	Quantities of Heat produced in one hour by the Intensities in Column 2.	Ratio of the Squares of the Intensities in Column 2.
16	0.43 Q	1.2	1
31 $\frac{1}{2}$	0.92 Q	3	2.9	4.7	4.55
55	2.35 Q	19.4	18.8		
57 $\frac{3}{4}$	2.61 Q	23	23.2		
58 $\frac{1}{2}$	2.73 Q	25	25.4	39.6	40.

شکل ۲: داده های آزمایش بررسی اثر جریان بر گرمای آزاد شده از یک رسانا

همانطور که واضح است، ستون اول انحراف سوزن گالوانومتری است که توضیح داده شد. ستون دوم جریان براساس واحد «درجه» است.

به عنوان مثال، اگر سطر های دوم و سوم را در نظر بگیریم، می بینیم که در سطر دوم، جریان $0/92Q$ و در سطر سوم $2/35Q$ گزارش شده اند. نسبت این دو تقریباً برابر است با $2/55 = 2/35 / 0/92$. حال اگر توان دوم این عدد را در ۳ که تغییر دمای سطر دوم برحسب فارنهایت است ضرب کنیم، $19/50 = 3 * 6/50$ که به طرز معقولی به $19/4$ گزارش شده نزدیک است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که گرمای حاصل از یک رسانا در همگام عبور جریان الکتریکی از آن متناسب است با مقاومت رسانا و مجذور شدت جریان عبوری از آن.

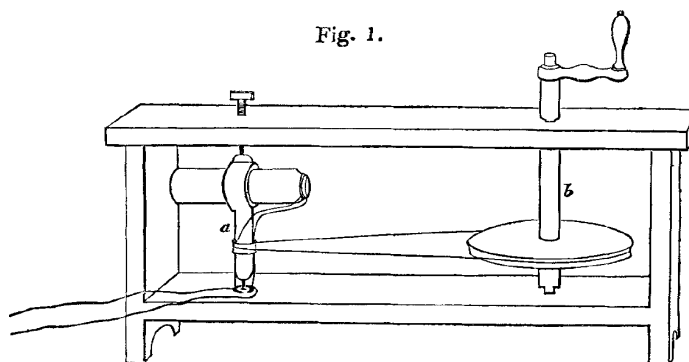
آزمایش مقاله سال ۱۸۴۱

در این مقاله ژول به بررسی گرمای حاصل از یک پیچه که در یک میدان الکتریکی قرار دارد و دوران داده می شود می پردازد.

ژول برای ساختن پیچه ی گردان، شش قطعه ی آهنی با ابعاد مشخص را کنار هم قرار داد به طوری که هرکدام از آن ها توسط یک لایه کاغذ آغشته به روغن از دیگری جدا شده بود. سپس دور همه ی این آهن ها را با یک قطعه چرم آغشته به روغن پوشاند تا محکم کنارهم قرار گیرند. بعد دور آن ها، سیم مسی با ضخامت و طول مشخص پیچید به طوری که هر دو انتها ی سیم در یک طرف باشند. سپس این آهنربا را درون یک لوله ی شیشه ای قرار داد و کل این مجموعه را با فویل و فلانل پوشاند تا از اتلاف گرما به شیوه های مختلف جلوگیری کند.

سپس در داخل این لوله آب ریخت و دمای آن را با دما سنجی که ادعا می کند می تواند تا یک در پنجاه قسمت از یک درجه فارنهایت را تشخیص دهد اندازه می گرفت. سپس این مجموعه را استفاده از دستکاه شکل زیر دوران می داد.

Fig. 1.



این مجموعه در یک میدان مغناطیسی قرار می گرفت ابتدا که توسط یک الکترو-آهنربا که از یک موتور الکترومغناطیسی به دست آمده بود، قرار می گرفت. اما به دلیل اینکه این آهنربا قدرت کافی نداشت وی یک آهنربای الکتریکی با هسته آهنی که متصل به پیل های الکتروشیمیایی می شد ساخت. ژول ادعا می کند که این آهنربا از هرکدام دیگر که تا به آن زمان دیده بوده قوی تر است. با استفاده از این آهنربا

و گالوانومترهای مخصوص خودش و با دوران دادن پیچه به مدت یک ربع ساعت، او به نتایج مطلوب رسید. ژول این آزمایش را چندبار تکرار کرد.

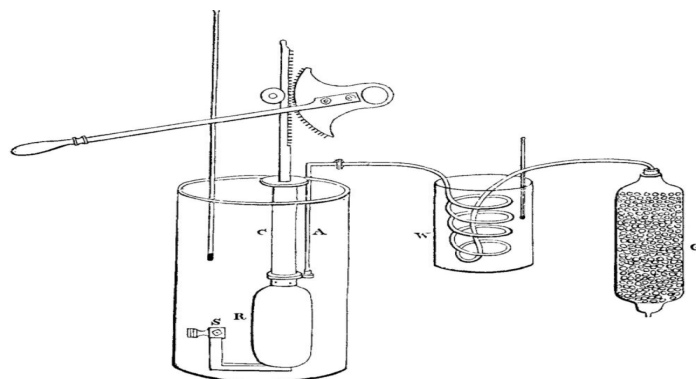
Series of Experiments,	Current Magneto-Electricity,	Heat actually evolved,	Correction for Currents in the Iron,	Corrected Heat,	Squares of Numbers proportional to those in column 2,	Heat due to Vol. rate Currents of the intensities given in col. 2,	The Numbers of column 7 multiplied by $\frac{1}{3}$.
No. 1.	0.177	0.10	0.02	0.08	0.062	0.040	0.053
No. 2.	0.902	1.84	0.28	1.56	1.614	1.040	1.386
No. 3.	0.418	0.45	0.09	0.36	0.346	0.224	0.299
No. 4.	1.019	2.39	0.28	2.11	2.060	1.327	1.769
No. 5.	0.236	0.10	0	0.10	0.109	0.071	0.091
No. 6.	0.340	0.21	0	0.21	0.229	0.148	0.197
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.

Phil. Mag. S. 3. Vol. 23. No. 152. Oct. 1843. T

ژول از این داده ها نتیجه می گیرد که گرمای به وجود آمده توسط یک پیچه در یک ماشین الکترومغناطیسی متناسب است با مجذور جریان. و همچنین اینکه گرما تولید شده در این پروسه از همان قوانینی پیروی می کند که در یک دستگاه ولتایی وجود دارد.

آزمایش مقاله‌ی ۱۸۴۵

این آزمایش که یکی از خلاقانه ترین طرحهای آزمایشی ژول بود، مفاهیم آزمایش های قبلی را در خود جمع میکرد. ژول در ابتدای مقاله خود از نتایج دکتر سالن و در باب افزایش دما هنگام تراکم گاز و کاهش دمای آن طی انبساط یاد می کند که اولین کسانی بودند که این نتایج را به دست آوردند. در ادامه از نتایج آزمایش های دالتون می گوید که اولین کسی بود که نتایجی خلاف آزمایش های قبلی به دست آورد. سپس با ارجاع به نتایج مشابه آزمایش یوری که با دماسنج بروگت انجام شده بود و آزمایش خودش که در ادامه شرح داده می شود ادعا می کند که ادعای تغییر دما در اثر تراکم اساسا نادرست بوده است. در این آزمایش دو ظرف مسی با حجم ثابت یکی خلا شده و دیگری شامل هوای فشرده، با شیری که آن ها را به هم متصل میکرد در یک گرماسنج جا داده شدند. با بازکردن شیر، اندازه گیری های معمولی دما به عمل آمد. در این مورد ژول دریافت که هیچ تغییر گرمای محسوسی حاصل نشده است. انبساط هوا در ظرف تحت فشار، اندکی سرد و جریان هوا در در ظرف خلا اندکی گرم شده، اما در کل هیچ تغییر دمای محسوسی مشاهده نشده بود. ژول در این آزمایش مقدار یک ژول را ۸۲۰، ۸۱۴ و ۷۶۰ فوت پوند بر btu به دست آورد.



به جز دماسنج‌های دقیقی که خود ژول میساخت اصلاحات و تدابیری برای دقیق تر شدن آزمایش در روند طراحی آزمایش هم انجام داده بود. مثلاً ژول در ابتدای توضیح شیوه انجام آزمایش ذکر میکند که از آنجایی که شناخت خوبی از ظرفیت گرمایی گازها وجود ندارد و نمیتوان به راحتی گرمای اندازه گیری شده را به فرآیند مورد نظر نسبت داد، پمپ‌های متراکم کننده و شیرهای متصل کننده را در ظرف‌هایی شامل آب زیاد قرار می‌دهد که دارای ظرفیت گرمایی استاندارد شناخته میشوند. ظرف‌های آب هم، خود در ظرف دو لایه‌ای آهنی با هوایی هم دمای آب در بین لایه هایش، قرار داده می‌شد تا انتقال گرما از محیط به کمترین میزان خود برسد.

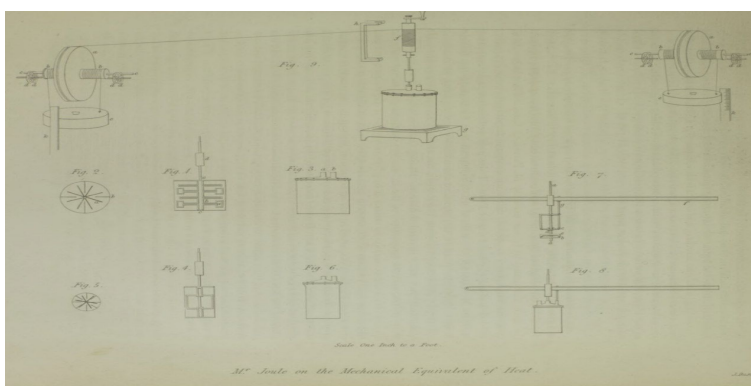
این نتایج مطابق انتظارات ژول بودند. زیرا سیستم مرکبی، شامل دو ظرف متصل به هم، مسدود بود و حجم معینی داشت، تمامی کار در درون و پشت سر هم بین دو ظرف انجام میشد. کار انجام شده توسط گاز در یک ظرف با کار انجام شده روی گاز در ظرف دیگر برابر بود، بنابراین هیچ کار اضافی انجام نشده بود. هم‌ارزی گرمایی برای کار صفر نیز صفر بود. بنابراین تصور ژول از هم‌ارزی گرمایی مکانیکی کار ایجاب می‌کرد تا همانطور که مشاهده کرده بود در این آزمایش هیچ اثر گرمایی اضافه تولید نشود.

در انتهای مقاله‌ای که ژول در آن این آزمایش می‌گوید به بند جالبی برمی‌خوریم که در آن می‌گوید: «اصولی که از آزمایش هایش به دست می‌آیند بسیار متفاوت از تئوری‌های رایج توصیف کننده ماشین بخار زمان هستند، از نظر بسیاری از دانشمندان انتقال گرما از جسم گرم به سرد باعث ایجاد انرژی مکانیکی شده به طوری که نیازی به از دست رفتن هیچ گرمایی نیست. نظری که کلاپیرون با آن موافق است... اما در این مورد من با فارادی و هرشل موافق هستم که هر نظریه‌ای که منجر به نابودی بخشی از انرژی باشد الزاماً نادرست است. اصلی که نتایج آزمایش‌های من با آن تطابق دارند.»

این مقاله‌ی ژول از این نظر قابل توجه هست که مقدار به دست آمده برای یک ژول با مقادیر آزمایش‌های قبلی سازگار هستند. از طرفی ژول تأکید داشت که گرمای خارج شده از ماشین بخار از گرمای ورودی کمتر است و اختلاف آن تبدیل به کار مکانیکی می‌شود و مشخص می‌شود که او تا سال انتشار مقاله یعنی ۱۸۴۵ میلادی با نظریات کارنو موافق بود

آزمایش مقاله سال ۱۸۵۰

این آزمایش معروف‌ترین آزمایش‌های ژول در باب اثبات هم‌ارزی گرما و کار مکانیکی ست چون همانطور که می‌دانیم دقیق‌ترین نتایج را ارائه می‌دهد. ژول این آزمایش ساده را در زیرزمین خانه‌اش انجام داد. یک محفظه استوانه‌ای شامل آب یا جیوه، زیر چرخ پره‌داری که دور یک میله ثابت عمودی می‌چرخید، جای گرفته بود که خود با طنابی می‌چرخید که به دور محوری پیچیده شده بود. طناب از آن‌جا به دو قرقره می‌رفت و به اجسام آویزانی متصل بود. کار ورودی از حاصل ضرب ارتفاع سقوط در وزن اجسام به دست می‌آمد و مقدار گرمای ایجاد شده با اندازه‌گیری افزایش دمای آب یا جیوه محاسبه می‌شد.



برای اینکه میزان تغییر دما به دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری برسد که نیم تا ۲ درجه فارنهایت بود اجسام تا بالاترین حد ممکن بالا آورده می‌شدند و آزمایش در بیشترین سرعت ممکن ۲۰ بار تکرار می‌شد. برای انجام آزمایش چرخ‌های پره‌ای زیادی از جنس‌های مختلف ساخته شد که یکی از آن‌ها در شکل زیر قابل مشاهده است که ژول از آن در آزمایش‌هایش استفاده می‌کرد و اکنون در موزه علم لندن نگهداری می‌شود.



در مقدمه مقاله ژول درباره کارهای قبلی در زمینه تئوری دینامیکی گرما صحبت میکند و در ادامه توضیحات ماشین آلات آزمایش را میدهد و در ادامه از دقت دماسنج‌هایی با دقت ۱ فارنهایت یا کمتر

میگوید که اختصاصاً برای آزمایش ساخته بود. او ادعا می کند که با تمرین قادر بود با چشم غیرمسلح یک بیستم درجه که نماینده 0.05° فارنهایت بود را بخواند. که البته با ریسک انتقاد یک تجربیکار بزرگ، کمی بیش از حد مثبت نگرانه به نظر می رسد.

بعد از توضیحات ماشین آلات آزمایش ژول به توضیف دقیق شیوهی تصحیح های لازم که مرتبط به اندازه گیری ها و میزان گرمای هدررفت از سیستم است می پردازد که برای افزایش دقت آزمایش حیاتی هستند. در ادامه تمام داده های اندازه گیری شده و همهی محاسبات آورده شده اند.

ژول پنج سری آزمایش مختلف که در جداول ثبت شده اند انجام داد. اولی با چرخ پره ای از جنس برنج که در سیلندری از جنس مس که از آب پر شده بود میچرخید و مقدار $777/692$ فوت در پوند بر btu را برای ژول نتیجه میداد. سری دوم و سوم از با پره ی آهنی و ظرف آهنی انجام میشد که نتایج $772/814$ و $775/352$ را میداد. در سری چهارم و پنجم نیز از جیوه به عنوان مایع استفاده میشد اما از قطعات آهنی متصل به پره و دیواره ها برای افزایش اصطکاک استفاده می شد که نتایج میانگین $776/045$ و $773/930$ را میداد. همخوانی نتایج قابل توجه بود.

ژول نتیجه سری اول را قابل اعتماد تر میدانست و مقاله با دو نتیجه گیری خاتمه می یابد.

(۱) مقدار گرمای ایجاد شده توسط اصطکاک تجسام چه جامد و چه مایع همیشه با مقدار انرژی داده شده رابطه مستقیم دارد.

(۲) مقدار گرمای لازم برای افزایش دمای یک پوند آب به اندازه یک درجه فارنهایت معادل است با انرژی آزاد شده توسط سقوط 772 لیب به ارتفاع یک فوت.

و در اینجا مقاله پایان میابد به طوری که به نظر هیچ حرفی از هم ارزی انرژی مکانیکی و گرما در آن زده نشده است. در واقع در نسخه اصلی ژول در نتیجهی سوم این هم ارزی را بیان می کند اما برای مخالفت نکردن مجله فلسفه جامعه سلطنتی مجبور به حذف بند میشود. بندی که در آن از اصطکاک به عنوان راهی برای حفظ پایستگی انرژی یاد می شود. در نمونه اصلی که همچنان باقی ست (چون ژول آن را در نامه ای به تامسون فرستاده بود) این بند موجود است.

آزمایش ها و محاسبات دیگر

از آزمایش های دیگر ژول گذراندن آب از بین لوله های نازک بود که باعث میشد آب گرم شود. طی انجام این آزمایش ژول مقدار یک ژول را 700 فوت پوند بر btu به دست آورد. هنگامی که در این باره می نوشت ذکر کرد که قصد ندارد آزمایش را گسترش دهد یا تکرار کند چون با نتایج آزمایش راضی شده است که عوامل اصلی طبیعت به خواست خالقش نابود ناشدنی هستند و هر گاه انرژی مکانیکی از بین برود به میزان برابر گرما به دست می آید.

از طرفی ژول باور داشت که آب در انتهای آبشار باید اندکی گرم تر از آب بالای آن باشد و کوشش های به عمل آورد تا چنین آثاری را آشکار کند. (بنابر داستان مشکوکی از قول تامسون او حتی در موقع ماه غسل در سوییچ دست از این کار بر نمی داشت.) این امر برای ژول نمونه ای از اصل پایستگی انرژی بود که به بیان خودش گرما و نیروی زنده و جاذبه در فضا متقابلاً به دیگر تبدیل پذیرند. که در آن منظور از نیروی

زنده همان انرژی جنبشی و جاذبه در فضا همان پتانسیل گرانشی ست. اما ژول هیچگاه موفق نشد که چنین اثری را اثبات کند. انتظار نداریم که بلند ترین آبشار ها هم تغییر دمایی بزرگتر از یک دهم درجه ایجاد کنند. او حتی نتوانست چنین تغییر دمایی را در کنار یک کوه آشکار سازی کند.

منابع

- 1)Joule JP. 1843 On the calorific effects of magneto-electricity and on the mechanical value of heat. Phil. Mag. 23, 263–276, 347–355, 435–443.
- 2)Joule JP. 1845 On the changes of temperature produced by the rarefaction and condensation of air. Phil. Mag. 26, 369–383.
- 3)Joule JP. 1850 On the mechanical equivalent of heat. Phil. Trans. R. Soc. 140, 61–82. (doi:10.1098/rstl.1850.0004)
- 4)Joul JP,1841 On the heat evolved by metallic conductors of electricity and in cells of battery during electrolysis
- 5):Young J. 2015 Heat, work and subtle fluids: a commentary on Joule (1850) ‘On the mechanical equivalent of heat’. Phil. Trans. R. Soc. A 373: 20140348. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0348>
- 6)Cropper W., 2001 Great Physicists: The Life and Times of Leading Physicists from Galileo to Hawking