حلقهٔ جهنده

ام. بیلای و همکاران
ترجمهٔ احمد توحیدی

چکیده

آزمایش حلقهٔ جهنده بیلی، فورد و دیگران، بخش مهمی از نمایش‌های نیتروژن مایع است که در بخشی از فعالیت دانشگاه بات[۲] در روزهای بازدید همگانی است. اصول اساسی آزمایش و همچنین تأثیر تغییر شکل حلقه‌ها و حالت متالورژی آن‌ها توضیح داده شده است. به‌طور کلی، از حلقه‌های آلومینیمی استفاده می‌شود، اما اثر کاربرد حلقه‌های مسی به‌طور مختصر مورد بحث قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: حلقهٔ جهنده، القای الکترومغناطیس، قانون لنز

مقدمه

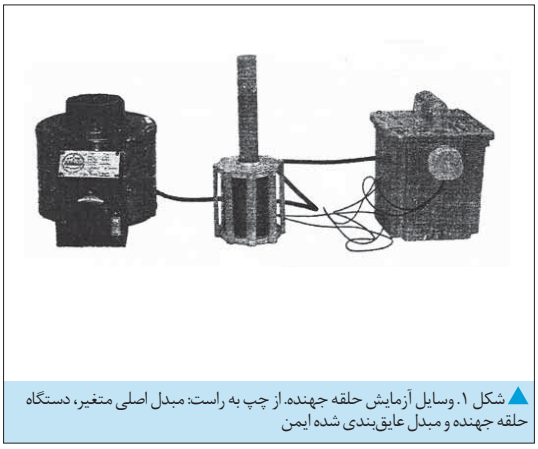
آزمایش حلقهٔ جهنده نمایش جذابی از قوانین القای الکترومغناطیسی فاراده و نیز قانون لنز است. ترتیب آزمایش در شکل ۱ و حلقهٔ جهنده واقعی در شکل ۲ نشان داده شده است. حلقهٔ آلومینیمی بالای پیچهٔ متصل به منبع تغذیهٔ اصلی قرار دارد. با کلید زدن سریع منبع تغذیه، و روشن و خاموش کردن آن یک تپ الکتریسیته به سیم‌پیچ فرستاده می‌شود که در پی آن معمولاً حلقه تا ارتفاع ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر بالا می‌جهد. آزمایش به‌ویژه وقتی جذاب‌تر می‌شود که حلقه تا دمای نیتروژن مایع سرد شده باشد تا در این صورت جهش حلقه تا ارتفاع ۲ تا ۳ متر مشاهده می‌شود. این به واسطهٔ مقاومت الکتریکی کمتر حلقه است (که مقدار آن یک مرتبهٔ بزرگی از مقاومت آن در دمای اتاق کمتر است) پس شدت جریان القایی و نیروی دافعه بسیار بیشتر است.

آزمایش حلقهٔ جهنده موضوع مهم سخنرانی‌ها و نمایش‌هایی، به‌ویژه برای دانش‌آموزان است که با مشاهدهٔ ارتفاع بیشتر جهش حلقه با اشتیاق زیادی به آن واکنش نشان می‌دهند. در طی یکی از سخنرانی‌های پیتر فورد[۳] اتفاقی غیرعادی روی داد. مثل همیشه حلقهٔ سرد شده تقریباً سه متر بالا جهید، سپس روی لبه‌اش فرود آمد، چند متری غلتید تا سرانجام در سوراخی در کف اتاق پشت صحنه‌ای که سخنرانی در آن انجام می‌شد ناپدید گشت. تلاش‌های اولیه برای بازیافت آن موفقیت‌آمیز نبود. اما این مشکلی را به وجود نیاورد. پیتر فورد با دوراندیشی غیرعادی ابعاد و جرم حلقه را اندازه گرفته بود. مسئول کارگاه بخش فیزیک به سرعت دو حلقه دیگر آماده کرد. اما در نهایت تعجب، حلقه‌های جدید پس از سرد شدن فقط نصف ارتفاع حلقهٔ اصلی بالا جهیدند. حلقه‌هایی هم که با استفاده از ورقه آلومینیمی که در کارگاه مرکزی دانشگاه ساخته شده بودند تا ارتفاع حلقه‌های بخش فیزیک بالا جهیدند. سرانجام حلقهٔ اصلی به لطف مسئولان نظافت کردن دانشگاه بیرون آورده شد، و به سرعت نشان داده شد که اگر حلقه سرد شود باز هم به همان ارتفاع قبلی بالا می‌جهد و توقف چند هفته‌ای که در زیر صحنه نمایش بوده در وضعیت آن تأثیری نگذاشته است. حلقه اصلی در سال ۱۹۹۱ م. به‌عنوان بخشی از طرح یکی از دانشجویان به مناسبت بزرگداشت ۲۰۰امین سالگرد تولد مایکل فاراده ساخته شده بود. سپس این پرسش مطرح شد که تفاوت حلقه‌های آلومینیمی در این فاصلهٔ ۱۵ ساله چه بوده است؟ این پرسش به طرح پژوهش دانشجویی دیگری منجر شد که جنبه‌های گوناگون آزمایش حلقه جهنده را مورد بررسی قرار می‌داد و برای چند سال موضوع چندین تحقیق بود.

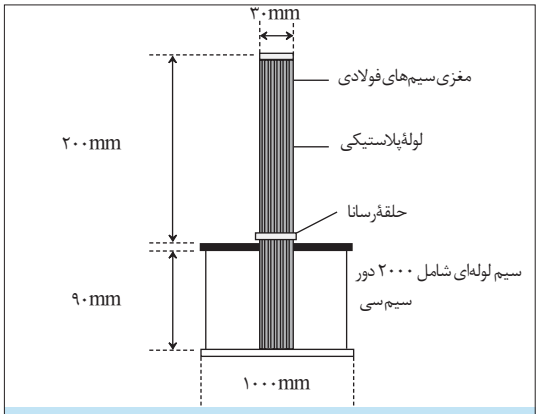
شخصی که اختراع آزمایش حلقه جهنده به او نسبت داده می‌شود الایهیو تامسون[۴] است، و گاهی از او به‌عنوان آزمایش «حلقه تامسون» یاد می‌شود. الایهیو زندگی جالبی داشت. در سال ۱۸۵۳ در منچستر متولد شد، اما خانواده‌اش پنج سال بعد از انگلستان به امریکا مهاجرت کردند. در سال ۱۸۷۹، شرکت برق تامسون - هوستون را تأسیس کرد که در سال ۱۸۸۲ با شرکت برق ادیسون ادغام شد و شرکت جنرال الکتریکی را به‌وجود آورد. تامسون مخترع فعالی بود، و در بیش از پنج دهه زندگی‌اش تقریباً موفق به ثبت ۱۷۰۰ اختراع گردید. آزمایش حلقهٔ جهنده اولین بار در ۱۸۸۷ در گردهمایی مؤسسه امریکایی مهندسان برق به نمایش درآمد، از آن پس، این آزمایش بارها نشان داده شده است، یک مورد برجستهٔ آن مربوط به لرد ریلی در سال ۱۸۹۱ در لندن است که در طی یک سخنرانی به مناسبت صدمین سال تولد مایکل فاراده را اجرا کرد.

نظریه

جریانی الکتریکی با بسامد ثابت (۵۰ هرتز) در بریتانیا به سیملوله‌ای مطابق شکل ۳ اعمال شده است. این جریان الکتریکی باعث القای میدان مغناطیسی B_s می‌شود. قدرت B_s به شدت جریان I_s اعمال شده به سیم‌پیچ و تعداد دورهای سیم‌پیچ بستگی دارد. B_s جریان I_l را در حلقه القا می‌کند. نیروی محرکه الکتریکی (emf) مربوط به این جریان که به



شکل ۱. وسایل آزمایش حلقه جهنده. از چپ به راست: مبدل اصلی متغیر، دستگاه حلقه جهنده و مبدل عایق‌بندی شده ایمن



شکل ۲. نمودار طرحواره دستگاه حلقه جهنده

کمک قانون القای مغناطیسی فاراده توصیف می‌شود برابر است با:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

در این رابطه مقدار نیروی محرکه القایی emf به آهنگ تغییر شار مغناطیسی بستگی دارد. علامت منفی، قانون لنز را در برمی‌گیرد که بیان می‌کند ... نیروی محرکه القایی emf (و جریان القایی) چنان جهتی را انتخاب می‌کنند که با آنچه آن‌ها را تولید می‌کند مخالفت کنند. البته، این شرط لازم است، زیرا اگر با جهت حرکت مخالفت نشود، اصل پایستگی انرژی نقض می‌شود. جریان القایی خود میدان B_r را در حلقه تولید می‌کند چون هدف جریان حلقه مخالفت در مقابل جریان سیملوله است، هر دو میدان مغناطیسی یکدیگر را دفع می‌کنند، که اثر آن جهش حلقه است. مقدار نیروی محرکه بین حلقه و سیملوله به شدت میدان مغناطیسی B_s جریان و ابعاد حلقه بستگی دارد.

با کاهش دمای حلقه، مقاومت الکتریکی آن کم می‌شود و در نتیجه جریان القایی حلقه افزایش می‌یابد. این به نوبهٔ خود، شدت میدان مغناطیسی B_r را افزایش می‌دهد، در نتیجه باعث می‌شود که ارتفاع جهش حلقه بیشتر شود. استفاده از نیتروژن مایع (نقطه جوش ۷۷K) به‌عنوان سرد کننده به‌معنای آن است که دمای مطلق حلقه با ضریب تقریباً چهار از دمای اتاق (۳۰۰K) کمتر شده است. در این گسترهٔ دما، مقاومت ویژه الکتریکی آلومینیم تقریباً با ضریب ده کم می‌شود. در نتیجه جریان القایی در حلقه با ضریب ده افزایش می‌یابد، بنابراین وقتی دمای حلقه تا دمای نیتروژن مایع سرد می‌شود انتظار داریم ارتفاع جهش افزایش چشمگیری پیدا کند که در واقع مشاهده شد. هیچ‌کدام از بحث‌های نظری استاندارد بالا نمی‌تواند توضیح دهد چرا ارتفاع جهش حلقه‌های جایگزین در سخنرانی پیتر فورد در مقایسه با حلقه اصلی گم شده بسیار کمتر بود.

روش آزمایش

آزمایش‌ها با گذاشتن حلقه‌ای که باید بررسی شود روی قاب چوبی سیم‌پیچ قبلی انجام شد. خط‌کشی در مقابل سیم‌پیچ روی دیوار پشتی قرار داشت. جریان الکتریکی از سیملوله می‌گذشت و همزمان حلقه بالا می‌جهید. شایان ذکر است که بدانیم جریان سیملوله باید بلافاصله پس از پریدن حلقه قطع گردد تا از سوختن سیم‌پیچ جلوگیری شود. با توجه به مشاهدات مقدماتی، منطقه فرود حلقه تعیین گردد تا بتوان دوربین ویدیو را طوری در آنجا متمرکز کرد که با دقت (در حدود نیم‌سانتی‌متر) ارتفاع بیشینه حلقه را به‌دست آورد. برای آزمایش‌های با دمای کم، از همین روش استفاده شد، در این حالت حلقه در جعبهٔ کم‌عمقی از پلی استیرین حاوی نیتروژن مایع سرد و سپس به سرعت با استفاده از انبرک روی قاب چوبی سیم‌پیچ منتقل شد.

آزمایش‌هایی نیز برای شناخت عوامل مؤثر در ارتفاع جهش حلقه‌های آلومینیمی انجام شد. در اولین مجموعه از آزمایش‌ها چگونگی تغییر شکل حلقه‌ها (تغییر ضخامت و قطر داخلی و خارجی) بررسی گردید. در دومین تحقیق اثر حالات مختلف متالورژی حلقه‌ها مورد توجه قرار گرفت. این کار با تغییر زمان سرد کردن و دما انجام شد.

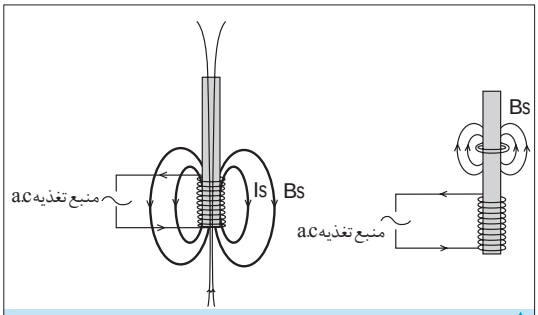
نتایج

تغییر ابعاد حلقه

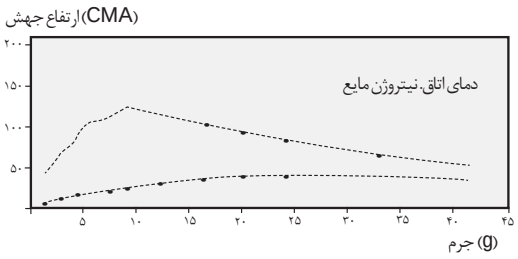
مجموعه حلقه‌هایی با جرم‌های مختلف ساخته شد. تفاوت جرم‌ها متناسب با تغییر ضخامت آن‌ها، ضمن یکسان نگه داشتن قطرهای داخلی و خارجی حلقه‌ها، بود. نتایج این تحقیق در شکل ٤ نشان داده شده است. به‌طور آشکار دیده می‌شود که در دماهای نزدیک به دمای نیتروژن مایع، ارتفاع جهش بیشینهٔ (خوش تعریفی متناظر است با جرم مناسبی که این اثر را تولید می‌کند.) در دمای اتاق (با توجه به نمودار) واکنش بسیار پهن‌تر است و ارتفاع بیشینه برای حلقه‌هایی با جرم بیشتر روی می‌دهد. دلایل این نتیجه هنوز به خوبی شناخته نشده است.

ملاحظات متالورژی

آهنگ‌های سرمایش مختلف تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی اندازه ذرات مواد دارد. در داخل فلزات، اندازه ذره متناظر



شکل ۳. نمایش نموداری الف، میدان مغناطیسی که با عبور جریان از سیم‌پیچ اطراف سیملوله تولید می‌شود و ب، میدان مربوط به جریان القایی اطراف حلقه رسانا که در میدان الف، قرار گرفته است. I_S جریان متناوب لحظه‌ای در سیملوله، B_S میدان مغناطیسی لحظه‌ای مربوط به میدان مغناطیسی حاصل از جریان I_S.
I_r جریان القایی در حلقه به‌وسیله گذشتن جریان I_S و B_S میدان مغناطیسی حلقه حاصل از جریان I_r.



شکل ٤. نمودار ارتفاع جهش برحسب جرم حلقه (با افزایش ضخامت حلقه‌ها) برای حلقه‌های آلومینیمی با قطرهای داخلی و خارجی یکسان. همه حلقه‌ها از شمش آلومینیمی یکسانی ساخته شده‌اند.

بـا اندازه هر یک از حوزه‌هایی اسـت که بـا مرزهای دانه‌ای و دررفتگی‌ها (جابه‌جایی‌ها) از یکدیگر جدا می‌شوند. سرمایش سـریع یا سخت کردن (آب دادن)، با اندازه کوچک ذره همراه اسـت. در حالی‌که سرمایش آهسـته یا تابکاری، باعث بزرگ شـدن ذره می‌شـود. ذرات کوچک در سـخت کـردن تولید می‌شوند زیرا دما با چنان آهنگی کاهش می‌یابد که اتم‌ها زمان کافی در اختیار دارند تا در یک سـاختار شـبکه بلوری کامل آرایش یابند. این به علت آن اسـت کـه اتم‌ها انرژی گرمایی کافی دارند تا بر انرژی‌های پتانسیل درون مواد غلبه کنند و در نتیجه می‌توانند جابه‌جا شوند.

در خـلال تابکاری، دما و در نتیجـه انرژی گرمایی اتم‌ها به تدریج کاهش می‌یابد، بنابراین اتم‌ها فرصت کافی دارند تا در یک شبکه بسیار کامل آرایش یابند. نرم کردن نسبت به سخت کردن به علت تعداد کمتر نقص‌های تشکیل دهنده در ساختار بلوری در کاهش مقاومت الکتریکی مواد تأثیر بیشـتری دارد. مرزهای دانه‌ای و سـطوح می‌تواننـد به‌عنوان نقص‌ها در نظر گرفته شوند زیرا باعث ترک خوردگی در ساختار شبکه بلوری می‌گردند. همچنین حضور دیگـر نقص‌ها مانند ناخالصی‌ها، مقاومـت مواد را افزایش می‌دهد که بـه علت دررفتگی‌ها در ساختار بلوری آن‌هاست. این وضعیت روی جریان الکترون‌ها و همچنیـن جهت‌گیـری اتم‌ها اثر می‌گـذارد و برخوردهای مستقیم آن‌ها را بیشتر خواهد کرد.

بنابراین با نرم کردن مناسب یک حلقه آلومینیمی توانستیم مقاومت الکتریکی آن را چنان کاهش دهیم که ارتفاع جهش آن مشابه مقدار مشاهده شده ارتفاع حلقهٔ اصلی آزمایش پیتر فورد گردید. نتیجه به دست آمده یکی از هدف‌های اصلی این تحقیق بود.

جالب توجه است که بدانیم اگرچه اثرات رفتار گرمایی فلزات برای هزاران سـال توسط آهنگران شناخته شده بود، اما درک این موضوع تنها از اوایل دهه ۱۹۳۰ شروع شد یعنی در حدود همان زمانی که فیزیک‌دان‌ها شناخت هسته اتم را آغاز کردند.

بحث

یکی از ویژگی‌های آزمایش حلقهٔ جهنده مناسـب بودن آن برای بررسـی و توسعهٔ تجربی اسـت. در وسیله اصلی، تعداد دورها و قطر سیم استفاده شده در سیم‌پیچ اختیاری بودند - قرقره بزرگ سـیم به درد نخوری بود که سال‌ها در آزمایشگاه در گوشـه‌ای افتاده بود - اما، شاید بسـیار جالب توجه باشد اگر تغییـر این عوامل مـورد توجه قرار گیـرد. همچنین در وسـیله اصلی از تعداد زیادی سـیم آهنی استفاده شده بود تا شار عبوری از حلقه افزایش یابد. مهم است که چگونگی تأثیر هسته‌های آهنی یکپارچه (جامد) با ارتفاع و قطرهای مختلف در ارتفاع جهش حلقه مورد توجه قرار گیرد.

در تحقیقات اولیه از حلقه‌هایی با مواد مختلف استفاده شد. احتمالاً مقایسه فلز مس با آلومینیم جالب است و در این مورد کارهای مختلف انجام شـد. چون چگالی مس تقریباً سه برابر آلومینیم اسـت، بنابراین حلقه‌ای از مس که ابعادش با حلقه آلومینیمی یکسان است سه برابر سنگین‌تر خواهد بود. مقاومت ویـژه الکتریکی مس و آلومینیم در دمای ۷۷K در حدود ۱۰ درصـد یکدیگرند. ترکیب جرم و مقاومت ویژه می‌تواند پیامد چشم‌گیری داشته باشد. پیتر فورد زمانی در مؤسسه انتشارات IOP در دیراک هاوس، بریسـتول، انگلیس سخنرانی کرد و آزمایش حلقه جهنده را با اسـتفاده از حلقه مسـی انجام داد. در دماهـای پایین، حلقه تا ارتفاع دو متر بالا پرید و از قوانین نیوتون پیروی کرد. حلقه روی سـطح یـک پروژکتور که در آن نزدیکی قرار داشـت، افتاد و شیشـه آن را شکسـت. این رویداد باعث افزایش اعتبار فورد در مؤسسـه انتشارات IOP نشد، اما این سخنرانی برای همیشه خاطره‌انگیز باقی ماند. اگر از حلقه آلومینیمی اسـتفاده می‌شد احتمالاً شیشه پروژکتور نمی‌شکست چون جرم کمتری داشت.

نتیجه‌گیری

آزمایش حلقه جهنده آزمایشی به یاد ماندنی از قوانین القای مغناطیسی است، وقتی که در برابر تماشاچیان اجرا شود بدون شک طرفداران بسـیاری خواهد داشت. این آزمایش می‌تواند با موادی که به آسانی در دسترس‌اند به آسانی انجام شود. در پایان، آزمایش حلقه جهنده برای تحقیقات مناسب است، مثلاً، موضوع خوبی برای تحقیقات دانش‌آموزی است.

پی‌نوشت‌ها
1. M.Baylie
2. Bath University
3. Peter Ford
4. Elihu Thomson

مرجع
* The Jumping ring experiment
* M. Baylie, PJ-Ford, GPMathlin and epalmer physics Education, January 2009