



پژوهشی

غلامحسین حیدری

دانشکده علوم، دانشگاه مازان

اندازه‌گیری سرعت نور با اندازه‌گیری

سرعت نور در خلأ

(299792458 km/s) منتشر کردند

که در آن زمان از دقت مناسبی نیز برخوردار

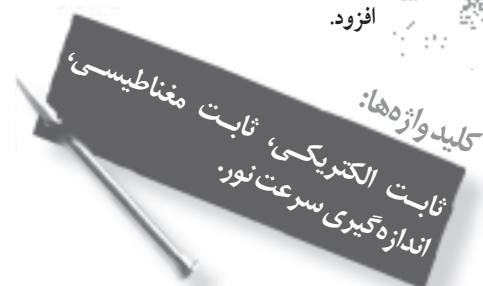
بود. در این مقاله روش آموزشی اندازه‌گیری ϵ_0 و μ_0 به صورت مجزا و از روی آن‌ها تعیین ثابت «سرعت نور در خلأ» مورد بررسی قرار گرفته است. هدف طراحی دستگاه آموزشی بود که از لحاظ نظری به آشنایی معادله‌های ماکسول نیاز دارد و در عین حال دقت مناسبی نیاز دارد، به طوری که در مواردی مثل آزمایشگاه فیزیک الکتریسته - مغناطیس و... نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. به عبارت دیگر با توجه به احساس کمبود چنین مواردی، هدف کلی، آشنا کردن تجربی دانشجویان با مفاهیمی مثل میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی در قالب ساده‌ترین چارچوب نظری و عملی است.

روش ساخت دستگاه مورد استفاده در اندازه‌گیری ϵ_0

برای اندازه‌گیری ϵ_0 از برابری نیروی وزن و نیروی الکتریکی اعمال شده بر یک ورقه‌ی آلومینیومی روی صفحه پایینی یک خازن مسطح در لحظه‌ای استفاده شد که ورقه در حال بلند شدن به واسطه نیروی الکتریکی از صفحه پایینی است، همان‌گونه که در شکل ۱ در قالب سه قسمت، نشان داده شده است. اساس عملکرد و روش اندازه‌گیری عبارت است از: اتصال صفحه‌ی پایینی خازن به قطب منفی منبع تغذیه با ولتاژ بالا (HVPS). با افزایش ولتاژ، ولت‌سنج ۱ (کلید انتخابگر ولت‌سنج بر روی هزار ولت DC انتخاب و به صورت موازی با منبع و خازن قرار گرفت) اختلاف پتانسیل دو سر منبع را نشان می‌دهد. هنگامی که ورقه آلومینیومی بر اثر نیروی الکتریکی از صفحه‌ی پایینی بلند می‌شود و دو

چکیده: در این مقاله سرعت نور در خلأ (C)، اندازه‌گیری آموزشی

ثابت الکتریکی (ϵ_0)، ثابت مغناطیسی (μ_0) تعیین می‌شود. هدف معرفی روشی آموزشی برای اندازه‌گیری این کمیت‌ها با استفاده از روش ساده و مبتنی بر آشنایی اولیه با معادله‌های ماکسول است. بر این اساس دو دستگاه برای اندازه‌گیری مجزای ϵ_0 و μ_0 طراحی و ساخته شد. اندازه‌گیری‌های به عمل آمده با استفاده از آن‌ها نشان می‌دهد که در عین حفظ سادگی و تأکید بر روش سنجی آموزشی، دقت اندازه‌گیری‌ها در حد مناسبی است، هر چند بهینه‌سازی دستگاه‌ها هم از لحاظ نظری و هم از لحاظ پیکربندی قطعاً به دقت اندازه‌گیری به میزان مناسب‌تری، خواهد افزود.



مقدمه

یکی از دقیق‌ترین اندازه‌گیری‌های حاصل ضرب ثابت الکتریکی (ϵ_0) [۱] در ثابت مغناطیسی (μ_0) [۱] در سال ۱۹۰۷ در مؤسسه ملی استاندارد آمریکا توسط ای.بی. روزا^۱ و ان.ای. دورسی^۲ انجام شده [۵-۲]. آن‌ها عکس جذر اندازه‌گیری شده‌ی این دو ثابت را به عنوان

ثابت الکتریکی و ثابت مغناطیسی

دودستگاه برای

اندازه گیری مجزای ϵ_0 و μ_0 طراحی و ساخته شد. اندازه گیری های به عمل آمده با استفاده از آن ها نشان می دهد که در عین حفظ سادگی و تأکید بر روش سنجی آموزشی، دقت اندازه گیری هادر حد مناسبی است

نیروی الکتریکی وارد بر ورقه از طرف صفحه بالایی خازن برابر است با:

$$F_e = |Q_{foil} \vec{E}_{top}| = \sigma A = \frac{\Delta V}{2d} = \frac{\epsilon_0 A (\Delta V)^2}{2d^2} \quad (2)$$

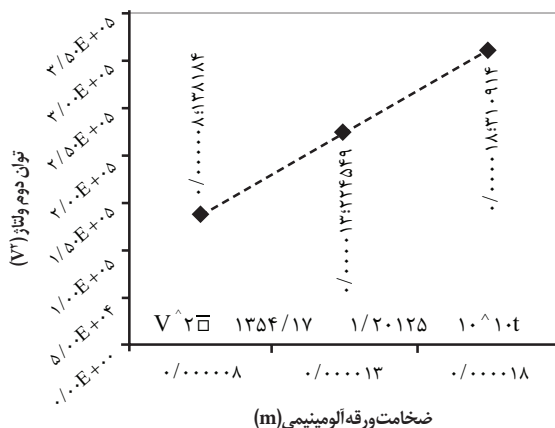
که σ ، d و ΔV به ترتیب چگالی بار سطحی ورقه (که با چگالی بار سطحی صفحه خازنی یکسان فرض شده)، فاصله بین دو صفحه خازن و اختلاف پتانسیل بین دو صفحه خازن هستند. ضریب $1/2$ به خاطر این وارد شده است که میدان صفحه بالایی نصف میدان کل برآورد شده است. از برابری دو نیرو و ساده سازی نتیجه می شود:

$$(\Delta V)^2 = \left(\frac{2d^2 \rho g}{\epsilon_0} \right) t \quad (3)$$

بنابراین از روی شیب خط $(\Delta V)^2$ بر حسب t می توان ϵ_0 را به دست آورد.

تحلیل داده های به دست آمده جهت تعیین ϵ_0

همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است با استفاده از رگرسیون خطی شیب خط ذکر شده در معادله ی ۳ با توجه به سه داده ی به دست آمده عبارت است از $1/20125 \times 1010 V^2/m$ و در نتیجه مقدار $9/91217 \times 10^{-12} kg.m/(s^2.V^2)$ برای ϵ_0 اندازه گیری شد. بنابراین با توجه به مقدار $8/8542 \times 10^{-12} C^2/(N.m^2)$ خطای نسبی آن در حدود $1/95$ درصد، است.



شکل ۲ منحنی توان دوم ولتاژ بر حسب ضخامت ورقه آلومینیمی براساس رابطه ۳، مورد استفاده برای اندازه گیری ϵ_0

صفحه

خازن را اتصال

کوتاه می کند، ولت سنسج ۲

(کلید انتخابگر ولت سنسج بر روی هزار ولت

DC انتخاب شد) ولتاژ را ثبت می کند و ولت سنسج ۱، افت ولتاژ را نشان می دهد.

بررسی دستگاه مورد استفاده در اندازه گیری ϵ_0

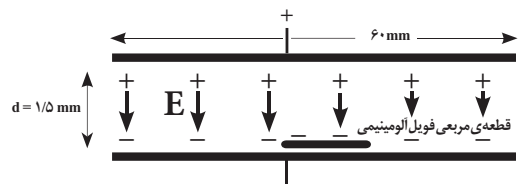
اندازه ی نیروی وزن ورقه آلومینیمی عبارت است از:

$$W_{Al} = m_{Al} g = \rho A t g \quad (1)$$

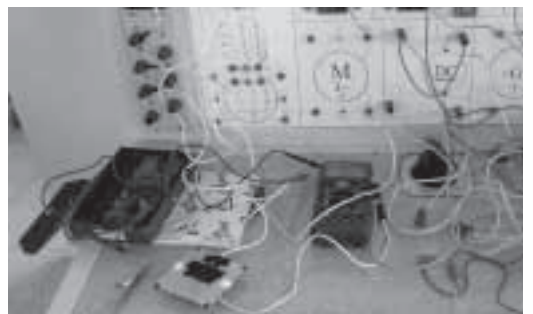
که t و A ، $g = 9.8 m/s^2$ ، $\rho = 2700 kg/m^3$ به ترتیب چگالی آلومینیم، شتاب ناشی از گرانی، مساحت و ضخامت ورقه ی آلومینیمی هستند.



شکل ۱ طرح کلی دستگاه



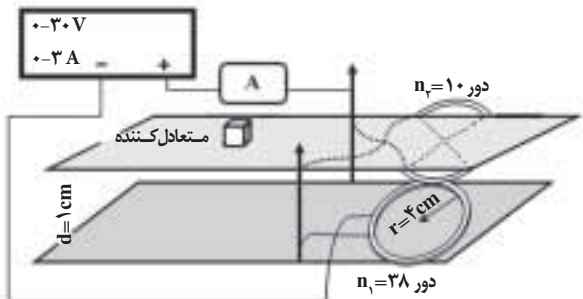
شکل ۲-۱ خازن دستگاه از نمایی دیگر



شکل ۳-۱ نمونه ای عملی از دستگاه اندازه گیری

خط I^2 بر حسب m می توان μ_0 را به دست آورد.

جدول ها، شکل ها و رابطه های ریاضی



شکل ۱-۳ طرح کلی دستگاه مورد استفاده برای اندازه گیری μ_0



شکل ۲-۳ نمونه ای عملی از دستگاه اندازه گیری

تحلیل داده های به دست آمده برای تعیین μ_0

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است با استفاده از رگرسیون خطی شیب خط ذکر شده در معادله ۵، با توجه به سه داده به دست آمده عبارت است از $4571/62 A^2/kg$ و در نتیجه مقدار N/A^2 $1/41 \times 10^{-6}$ برای μ_0 اندازه گیری شد. بنابراین با توجه به مقدار $1/2566 \times 10^{-6} T.m/A$ خطای نسبی آن در حدود $12/2$ درصد است.

ترکیب نتیجه ها و تعیین سرعت نور

با استفاده از رابطه $c_0 = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ و نتیجه های به دست آمده برای ϵ_0 و μ_0 سرعت نور $2/675 \times 10^8 m/s$ به دست می آید که با توجه به مقدار سرعت نور در خلأ

روش ساخت دستگاه مورد استفاده در اندازه گیری μ_0

این دستگاه از دو سیم پیچ دایره ای تشکیل شده است که به فاصله d از یکدیگر (در مقایسه با شعاع سیم پیچ کوچک است) قرار دارند. در تقریب اول ساختار مورد نظر را به صورت دو سیم موازی به فاصله d در نظر می گیریم. شکل ۳ طرح دستگاه مورد استفاده در اندازه گیری μ_0 را نشان می دهد. هنگامی که جریان در دو سیم پیچ که به صورت سری با یکدیگر قرار گرفته اند، در جهت مخالف برقرار می شود بر اثر نیروی دافعه سیم پیچ حلقوی پایینی (۱) به بالایی (۲) تعادل دستگاه به هم می خورد و حول محور چرخش مشخص شده، می چرخد. با اضافه کردن یک وزنه مناسب و جابه جا کردن آن و یا تغییر جریان به ازای وزنه ی مشخص، تعادل دستگاه برقرار می شود (گشتاور نیروی وزن با گشتاور نیروی مغناطیسی برابر شود). می توان وزنه های سبک (مثل ورقه های آلومینیومی کوچک) را مستقیماً بر روی مرکز حلقه بالایی قرار داد تا تعادل برقرار شود (بنابراین با توجه به مساوی فرض کردن بازوهای گشتاور، می توان مستقیماً تساوی نیروی وزن و نیروی مغناطیسی را در نظر گرفت).

بررسی دستگاه مورد استفاده در اندازه گیری μ_0

با توجه به تقریب در نظر گرفته شده نیروی مغناطیسی وارد بر حلقه ۲ از طرف حلقه ۱ عبارت است از:

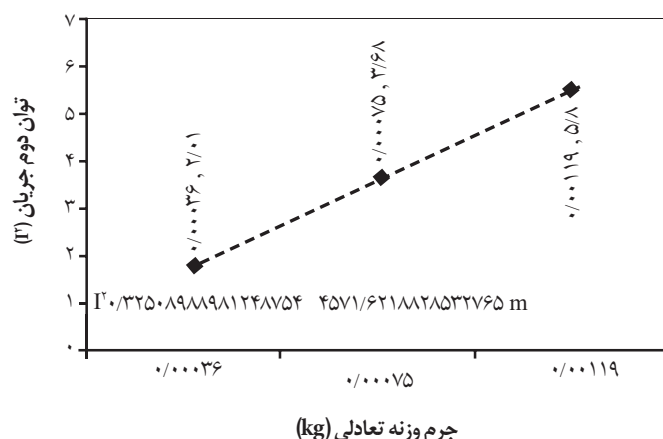
$$F_{mag} = \mu_0 \frac{n_1 n_2 I^2 r}{d} \quad (4)$$

که در آن به ترتیب n_1 ، n_2 ، I ، r و d عبارتند از: تعداد حلقه های سیم پیچ ۱، تعداد حلقه های سیم پیچ ۲، مقدار جریان، شعاع و فاصله بین حلقه ها. پس از برقراری جریان، با گذاشتن وزنه های کوچک (مثل ورقه های آلومینیومی)، می توان تعادل اولیه دستگاه را که یا چرخش حول محور مشخص می شود برقرار کرد.

از تساوی دو نیرو (با توجه به برابری بازوهای گشتاور) و ساده سازی آن، رابطه ی زیر به دست می آید:

$$I^2 = \left(\frac{gd}{\mu_0 n_1 n_2 r} \right) m \quad (5)$$

که در آن m جرم وزنه تعادلی است. بنابراین از روی شیب



خطای نسبی 299792458 m/s ،
اندازه‌گیری برای سرعت نور، ۱۱ درصد است.

شکل ۴ منحنی توان دوم جریان بر حسب جرم وزنه تعادلی براساس رابطه ۵، مورد استفاده برای اندازه‌گیری μ_0

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این بررسی، اندازه‌گیری آموزشی کمیت‌های ϵ_0 و μ_0 (به همراه تعیین c) بود به طوری که دستگاه طراحی شده با ابعاد آموزشی، سادگی نظری (در حد فیزیک پایه الکتریسیته-مغناطیس) و سادگی عملی همراه باشد. بنابراین با توجه به دستگاه‌های معرفی شده و نتیجه‌های به دست آمده، چنین به نظر می‌رسد که این بررسی با اهداف ذکر شده، مطابقت دارد.

تصمیم‌گیری در رابطه با مشخص کردن دقت نهایی روش‌های مورد استفاده به مواردی مثل: پیکربندی دقیق دستگاه‌ها، تکرار هدفمند اندازه‌گیری‌ها، بهینه‌سازی پارامترهای در دسترس و... احتیاج دارد. بنابراین نتیجه‌های ذکر شده در این بررسی، نباید به عنوان بهترین داده‌های حاصل شده با استفاده از این روش در نظر گرفته شوند. استفاده از تقریب‌های بهتر در نظریه مسئله، از دیگر مواردی است که می‌تواند دقت اندازه‌گیری‌ها را افزایش دهد. به عنوان مثال در دستگاه مورد استفاده برای اندازه‌گیری ϵ_0 در نظر گرفتن اثرهای لیه‌ای و در دستگاه مورد استفاده برای اندازه‌گیری μ_0 ، در نظر گرفتن سهم میدان مغناطیسی حلقه ۱ بر ۲ که مستقیماً در زیر حلقه‌ی ۲ قرار نگرفته است می‌تواند تقریب‌های ذکر شده در قسمت‌های قبل را بهبود بخشد و در نتیجه، مقدارهای دقیق‌تری برای مقادیر اندازه‌گیری شده به دست آورد که برای سادگی، در این‌جا مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

پی‌نوشت

1. E.B. Roza
2. N.E. Dorsey

منابع

1. <http://physics.nist.gov/>
2. R. M. Besancon. "The Encyclopedia of Physics", New York: Reinhold. (1966)
3. L. M. Brown, A. Pais and A. B. Pippard, "Twentieth Century Physics", Vol 2, IOP Publications, AIP Press Bristol and New York (1995).
4. E. B. Rosa and N. E. Dorsey, "A new determination of the ratio of the electromagnetic to the electrostatic unit of electricity", Bull. Bur. Stand. 3, (1907) 433-604.
5. A comparison of the various methods of determining the ratio of the electromagnetic to the electrostatic unit of electricity, Bull. Bur. Stand. 3, (1907) 605-622.
6. MIT open course-physics
<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Physics>
7. P. A. Tipler and P. MOSCA, "Physics for science and engineering", W. H. Freeman (2007).