



## بررسی تأثیر عبور جریان الکتریکی در موقعیت‌دهی زاویه‌ای به وسیله هلمهولتز کوئل

مسعود نظری<sup>1</sup>، یوسف حجت<sup>2\*</sup>، وحید صابرمنند<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 143-14115، y.hojjat@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 08 مرداد 1394

پذیرش: 07 شهریور 1394

ارائه در سایت: 05 اسفند 1394

کلید واژگان:

هلمهولتز کوئل

مکسول کوئل

گشتاور مغناطیسی

میدان مغناطیسی گرادینان

### چکیده

در این مقاله، با استفاده از دو جفت هلمهولتز کوئل سعی بر موقعیت‌دهی دقیق و چرخش پیوسته یک آهن‌ریا به وسیله یک جفت سیم‌پیچ بوده است. ابتدا سیستم توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی گردید و تأثیر عبور جریان‌های الکتریکی مختلف از سیم‌پیچ‌ها و میدان‌های مغناطیسی که در فضای بین آن‌ها به وجود می‌آوردند، مشاهده گردید. سپس تجهیزات و سیم‌پیچ‌های لازم برای موقعیت‌دهی مغناطیسی زاویه‌ای و انجام آزمایشات طراحی گردید و ساخته شد. مدارهای الکتریکی و نرم‌افزار کامپیوتری و میکروکنترلر وظیفه اعمال ولتاژ مورد نیاز و در نتیجه جریان مورد نیاز، جهت موقعیت دادن به ربات مورد نظر را که شامل ذرات براده، عقربه قطب‌نما و آهن‌ریای کوچک می‌باشند را بر عهده دارند. پس از اعمال جریان‌های الکتریکی مختلف به سیم‌پیچ‌ها، موقعیت آهن‌ریا با استفاده یک انکودر دورانی مشخص گردید و در نهایت مقادیر به دست آمده از انجام آزمایش‌ها با مقایسه‌ای که از روابط تئوری به دست می‌آید مقایسه شده و خطای سیستم در جریان‌های مختلف مشخص گردید. در مرحله دیگر آهن‌ریا با اعمال جریان‌های سینوسی و کسینوسی به صورت پیوسته به چرخش در آمد. سرعت چرخش تا یک هرتز اندازه‌گیری شد.

## Investigation of the effect of current in angular positioning by Helmholtz coils

Masoud Nazari<sup>1</sup>, Yousef Hojjat<sup>1\*</sup>, Vahid Sabermend<sup>1</sup>

1-Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, yhojjat@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 30 July 2015  
Accepted 29 August 2015  
Available Online 24 February 2016

**Keywords:**  
Helmholtz coil  
Maxwell coil  
Magnetic torque  
Gradient magnetic field

### ABSTRACT

In this paper, it has been tried to position and rotate a magnet using two pairs of Helmholtz coils. First the system was simulated by software and the impact of electric current flowing through the coils and magnetic fields that create the space between them, was observed. Next, the required equipment and coils for magnetic angular positioning and testing was designed and built. Electrical circuits, computer software and microcontroller are responsible for exerting the required voltage, and as a result the necessary current to position the proposed robot, which includes chip particles, compass and a small magnet. After applying various electric currents to the coils, the magnet position was determined using a rotary encoder. And eventually values obtained from tests were compared with the values obtained from the theoretical equations and the system error at different flows was evaluated. At last magnet was continuously rotated by applying sinusoidal currents, where rotational speed was measured up to one Hertz.

### 1- مقدمه

امروزه استفاده از ربات‌ها روز به روز رو به گسترش است. در سیستم‌های متداول امروزی، در ربات‌ها مکانیزم‌های کنترلی، تشخیصی و حرکتی تعبیه می‌شود که باعث افزایش حجم ربات‌ها می‌شود و نیاز به یک منبع تغذیه دارند که به آن‌ها متصل بوده و انرژی مورد نیاز آن‌ها را تأمین کند. با استفاده از میدان مغناطیسی، به دلیل امکان حذف تجهیزات تغذیه و کنترلی که در روش‌های متداول به ربات متصل هستند، ربات‌ها کوچکتر شده و امکان کنترل آن‌ها از دور فراهم می‌شود. ربات کوچکتر می‌تواند در کاربردهای پزشکی و در داخل بدن انسان نیز جهت اعمال جراحی و درمانی استفاده شده و از خارج بدن انسان کنترل شود.

هنگامی که از یک سیم‌پیچ جریانی عبور می‌کند، میدان مغناطیسی در فضای اطراف آن بوجود می‌آید که طبق قانون بیوساوار مقدار این میدان روی

محور سیم‌پیچ با رابطه (1) محاسبه می‌شود:

$$B = \frac{N \mu_0 I R^2}{2} \frac{1}{(x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} X \quad (1)$$

عبور جریان‌های الکتریکی مختلف از داخل سیم‌پیچ، باعث بوجود آوردن میدان‌های مغناطیسی در اطراف آن می‌شود. در داخل سیم‌پیچ یک میدان مغناطیسی همگن تشکیل می‌شود. این پدیده یکی از اصول اولیه الکترومغناطیس است.

### 1-1- هلمهولتز کوئل

هلمهولتز کوئل از دو سیم‌پیچ روبروی هم تشکیل شده است که فاصله آن‌ها برابر شعاع سیم‌پیچ‌ها می‌باشد و از آن‌ها جریانی برابر و هم جهت عبور می‌کند [1]، این باعث می‌گردد که میدان یکنواختی در فضای بین دو سیم‌پیچ ایجاد شود. شکل 1 به صورت شماتیک هلمهولتز کوئل را نشان می‌دهد.

Please cite this article using:

M. Nazari, Y. Hojjat, V. Sabermend, Investigation of the effect of current in angular positioning by Helmholtz coils, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 46-51, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

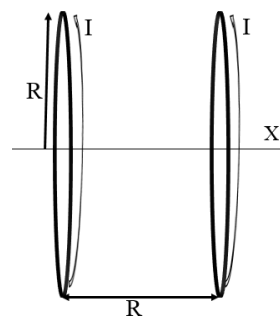


Fig. 1 Schematic of a Helmholtz coils

شکل 1 هلمهولتز کویل به صورت شماتیک

از آنجا که در هلمهولتز کویل از سیم پیچ هایی که روبروی هم قرار دارند، جریان یکسانی عبور می کند، لذا میدان حاصل در فضای بین آن ها جمع تک تک میدان سیم پیچ ها می باشد.

در پژوهشی هرسج و همکارانش [2] برای انجام آزمایش های بیومغناطیس در آزمایشگاه زیست شناسی از 4 عدد سیم پیچ مربع شکل استفاده کردند که از آن ها جریانی هم جهت عبور می کرد و برآیند میدان های مغناطیسی که سیم پیچ ها ایجاد می کرد، یک میدان مغناطیسی یکنواخت بود. چوی و همکارانش [3] از 2 زوج هلمهولتز کویل و 2 زوج مکسول کویل برای موقعیت دهی استفاده کردند. در پژوهشی دیگر چوی و همکارانش [4] مدل قبلی را بهبود داده و به جای اینکه برای ایجاد حرکت از 2 زوج مکسول کویل استفاده کنند، از یک زوج و به صورت عمود بر صفحه ای که هلمهولتز کویل در آن قرار داشت، استفاده کردند. این باعث می شد که نیرویی که میدان گرادین ایجاد می کند باعث حرکت جسم و گشتاوری که هلمهولتز کویل ایجاد می کند باعث تنظیم جهت جسم شود. سمی ژونگ و همکارانش [5] مجموعه ای را متشکل از 3 زوج هلمهولتز کویل و یک جفت مکسول کویل طراحی کردند که بتواند علاوه بر اینکه حرکت ایجاد می کند قابلیت دوران میکروروبات در فضا را هم دارا باشد و بتواند در باز کردن رگ و اعمال جراحی مورد استفاده قرار گیرد. فرانسیسکو و همکارانش [6] برای بازسازی میدان مغناطیسی زمین در داخل فضاپیما از 3 جفت هلمهولتز کویل استفاده کرد که به صورت عمود بر هم و در یک فضای مکعبی قرار گرفته بودند.

اگر در فضای بین سیم پیچ ها میدان محاسبه شود، میدان مغناطیسی مجموع از روابط (2) و (3) به دست می آید.

$$B = B_1 + B_2 \quad (2)$$

$$B^H = \frac{N\mu \circ IR^2}{2} \frac{1}{\left[\left(\frac{R}{2} + x\right)^2 + R^2\right]^{\frac{3}{2}}} X + \frac{N\mu \circ IR^2}{2} \frac{1}{\left[\left(\frac{R}{2} - x\right)^2 + R^2\right]^{\frac{3}{2}}} X \quad (3)$$

در نتیجه اگر دقیقاً در مرکز سیم پیچ ها میدان محاسبه شود مقدار آن از رابطه (4) بدست می آید:

$$B^H = \frac{N\mu \circ IR^2}{\left(\frac{5}{4}R^2\right)^{\frac{3}{2}}} X = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{N\mu \circ I}{R} X \quad (4)$$

### 1-2- گشتاور ناشی از میدان مغناطیسی در آهن ربا

گشتاور در آهن ربا، مربوط به میدان مغناطیسی خارجی، را می توان با قرار دادن دو آهن ربا در نزدیکی یکدیگر، در حالی که یکی از آنها شروع به چرخش می کند، مشاهده کرد. گشتاور مغناطیسی برای به کار انداختن موتورهای ساده الکتریکی استفاده می شود. در یک موتور الکتریکی ساده،

آهن ربا بر روی یک شفت - که آزادانه چرخش می کند - ثابت شده است که تحت میدان مغناطیسی ردیفی از آهن ربا های الکتریکی قرار دارد. با سوئیچینگ مداوم جریان الکتریکی از هر کدام از آهن ربا های الکتریکی، با توجه به تغییر میدان مغناطیسی، گشتاور حاصل به شافت منتقل می شود. گشتاور مغناطیسی  $\tau$  تمایل دارد قطب مغناطیسی را با خطوط میدان  $B$  در یک امتداد قرار دهد. به طور ریاضی، گشتاور  $\tau$  آهن ربا ی کوچک متناسب است با میدان  $B$  اعمال شده و مغناطیسی شدن آهن ربا  $m$  [3].

$$\tau = m \times B \quad (5)$$

$$M_x = M \cos \theta \text{ AND } M_y = M \sin \theta \quad (6)$$

$$\tau = V[M_x i + M_y j] \times [B_x i + B_y j] = V(M_x B_y - M_y B_x) K \quad (7)$$

$$M \cos \theta B_y - M \sin \theta B_x = 0 \quad (8)$$

$$\frac{B_y}{B_x} = \tan(\theta) \quad (9)$$

که در این روابط  $\theta$  زاویه جهت گیری آهن ربا،  $B$  میدان مغناطیسی،  $V$  حجم،  $K$  درجه حرارت می باشد.

از این خاصیت در این پژوهش استفاده شده و با توجه به این که  $m$  مقدار ثابتی است با تغییر میدان  $B$  آهن ربا در موقعیت زاویه ای مورد نظر قرار داده شده، زوایا اندازه گیری شده و با مقدار تئوری مقایسه و مقدار خطای آن بررسی شده است.

### 2- طراحی و شبیه سازی

همان طور که توضیح داده شد، برای ایجاد یک میدان یکنواخت مغناطیسی نیاز است، مجموعه ای متشکل از 2 زوج سیم پیچ هلمهولتز ساخته شود تا بتوان جسم مورد نظر را در فضای بین آن ها در راستای مورد نظر قرار داده و موقعیت دهی کرد.

### 2-1- انتخاب سیم مناسب

هنگامی که از یک سیم جریان الکتریکی عبور می کند، طبق قانون ژول باعث گرم شدن آن می شود، به منظور جلوگیری از ذوب شدن آن باید مشخص گردد که حداکثر جریانی که هر سیم می تواند از خود عبور دهد، چقدر است. این باعث محدود کردن جریان عبوری و در نتیجه میدانی است که در فضای

بین 2 حلقه که از آن ها جریان عبور می کند می گردد.

در روابط (10) بیشترین مقدار جریان عبوری از سیم به صورت تابعی از افزایش درجه حرارت در ساعت آورده شده است [7]. علایم به کار برده شده در زیر آورده شده اند:

$$P = c \cdot m \cdot \frac{\Delta T}{t} \Leftrightarrow \frac{\Delta T}{t} = \frac{P}{c \cdot m} \Leftrightarrow \frac{\Delta T}{t} = \frac{I^2 \cdot R}{c \cdot m} \Leftrightarrow \frac{\Delta T}{t} = \frac{I^2 \cdot \rho r \cdot \frac{l}{A}}{c \cdot m} \quad (10)$$

در این فرمول  $P$  توان،  $c$  ظرفیت حرارتی ویژه سیم،  $m$  جرم نهایی سیم،  $\Delta T/t$  افزایش دما در ساعت،  $R$  مقاومت مجموع سیم پیچ ها،  $I$  جریانی که از هر حلقه عبور می کند،  $A$  سطح مقطع سیم مسی،  $l$  طول سیم،  $\rho r$  مقاومت ویژه سیم،  $d$  قطر سیم می باشند.

با ترکیب روابط بالا به رابطه (11) برای جریان عبوری سیم بدست می آید:

$$I = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{\Delta T}{t} \cdot \frac{c \cdot \rho m}{\rho r}} \quad (11)$$

سیم هایی که برای سیم پیچ کوچکتر انتخاب گردید، سیم با قطر 0.8 می باشد که مشخصات آن در جدول 1 آورده شده است. مشخصات کویل های طراحی شده نیز در جدول 2 ارائه شده است.

2-3- ساخت

مجموعه آزمایشی از جنس پلکسی گلاس و با ابعاد طراحی شده ساخته شد. (شکل 5).

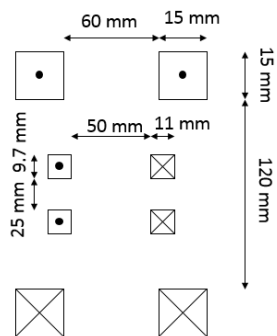


Fig. 2 Dimensions coils

شکل 2 ابعاد سیم پیچ ها

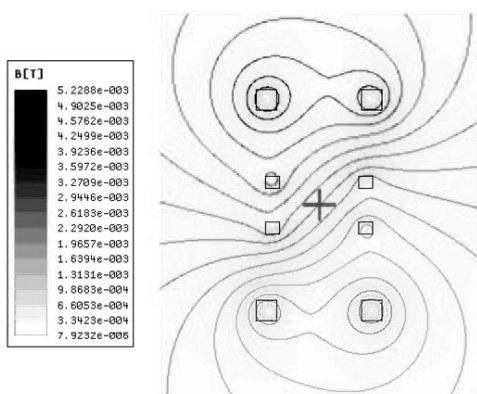


Fig. 3 1A Current flow through both coils

شکل 3 عبور جریان هم زمان 1 آمپر از 2 سیم پیچ

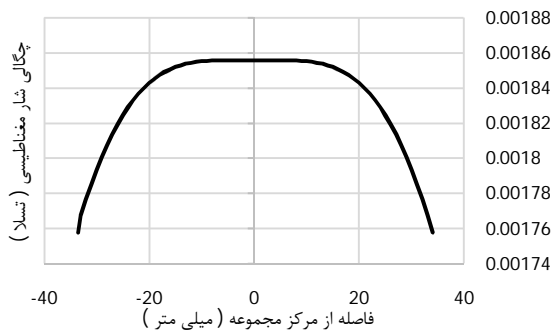


Fig. 4 Flux density through a pair of coils

شکل 4 چگالی شار عبوری در میان یک جفت کویل

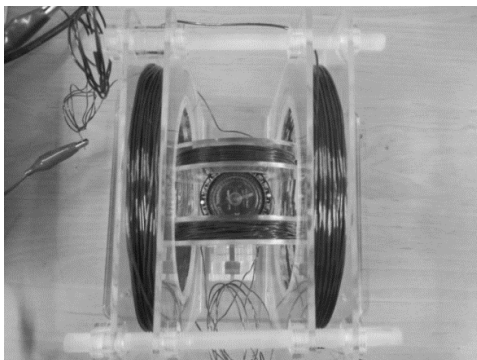


Fig. 5 Two pairs of Helmholtz coils built

شکل 5 مجموعه دو جفت هلمهولتز کویل ساخته شده

جدول 1 خصوصیات حرارتی و مقاومت سیم مسی

Tab. 1 Electrical and thermal properties

قطر سیم مسی	چگالی سیم	مقاومت ویژه	ظرفیت حرارتی ویژه	بیشترین جریان عبوری
0.8	$8960 \frac{Kg}{m^3}$	$1.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$385 \frac{J}{Kg \cdot K}$	2 A

جدول 2 مشخصات سیم پیچ های هلمهولتز

Tab. 2 Coils properties

سیم پیچ	قطر سیم پیچ	قطر سیم	تعداد دور
بزرگتر	132.6	1.2	140
کوچکتر	58.9	0.8	140

برای اطمینان از عدم افزایش غیر مجاز دمای سیم:

$$\frac{\Delta T \max}{t} = 100 \frac{k}{hour} = \frac{1}{36} \frac{k}{s} \quad (12)$$

برای این مقدار طبق روابط:

$$I_{\max} = \frac{\pi \cdot (0.8 \times 10^{-3} m)^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{\frac{1}{36} \frac{k}{s} \cdot 385 \frac{J}{Kg \cdot K} \cdot 8960 \frac{Kg}{m^3}}{1.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m}} \quad (13)$$

$$I_{\max} = 1.23$$

البته به دلیل تبادل حرارتی با محیط، می توان جریان بیشتری را از سیم عبور داد و همان طور که در جدول هم آمده است سازنده عبور جریان 2 آمپر از آن را مجاز دانسته است. با توجه به اینکه قصد بر این است که از این میدان مغناطیسی برای موقعیت دهی زاویه ای و ایجاد حرکت استفاده شود، لذا به میدانی در حدود 0-10 میلی تسلا نیاز است که البته تسلا واحد بزرگی برای میدان می باشد. با توجه به جریان عبوری از سیم پیچ ها و چگالی شار مغناطیسی که در فضای بین آن ها ایجاد می شود، برای سیم پیچ کوچکتر سیم 0.8 میلی متر و برای سیم پیچ بزرگتر از سیم 0.8 میلی متر استفاده شد.

محاسبات لازم برای محاسبه سطح مقطع لازم برای پیچیدن سیم پیچ سیم پیچ بزرگتر به این شکل است.

$$\text{میلیمتر لازم} = \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \times \text{دور تعداد} = \frac{140 \times 1.44 \times \pi}{4} = 58.25$$

که این سطح مقطع را به صورت 12.6 میلی متر در ارتفاع و 12.6 در طول سیم پیچ در نظر گرفته شد، البته در عمل با توجه به فاصله هوایی و سایر عوامل این عدد باید در 0.7 تقسیم شده و سطح مقطع واقعی جهت سیم پیچی به دست بیاید:

$$\text{میلیمتر لازم} = \frac{58.25}{0.7} = 83.21$$

$$\text{میلیمتر لازم} = \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \times \text{دور تعداد} = \frac{140 \times 0.64 \times \pi}{4} = 70.4$$

که این سطح مقطع به صورت 8.9 میلی متر در ارتفاع و 7.9 در طول سیم پیچ در نظر گرفته شد و همان طور که در بالا گفته شد با تقسیم عدد بالا بر 0.7 مقدار آن 100.6 به دست آمد بنابراین در واقع ارتفاع سیم پیچ کوچک برابر است با 11 طول سیم پیچ کوچک برابر است با 9.75 اختیار شد. شکل 2 سطح مقطع سیم پیچ ها را نشان می دهد.

2-2- شبیه سازی

با توجه به هندسه در نظر گرفته شده و قوانین مغناطیس، با انجام شبیه سازی مغناطیسی، میدان هایی که در اثر عبور جریان های مغناطیسی در اطراف سیم پیچ ها ایجاد می شود، شبیه سازی گردید. نرم افزاری که برای این کار در نظر گرفته شده است، نرم افزار شبیه سازی انسیس مکسول می باشد. میدان حاصل عبور 1 آمپر جریان از هر کدام از سیم پیچ ها در شکل 3 نشان داده شده است. مقدار میدان مغناطیسی حاصل از جریان 1 آمپر و بر هم کنش یک جفت کویل هلمهولتز به شکل 4 بدست می آید.

3- نتایج آزمایشات

3-1-3- موقیت دهی دقیق

برای بررسی اثر شدت جریان روی موقعیت زاویه‌ای مجموعه آزمایش‌هایی طراحی گردید. آزمایش‌ها 4 سطح جریان 0.5 و 1 و 1.5 و 2 آمپر، برای سیم‌پیچ کوچکتر در نظر گرفته شد و با تغییر جریان عبوری از سیم‌پیچ بزرگتر (دوم)، تاثیر افزایش جریان آن بررسی گردید.

هنگامی که از سیم‌پیچ کوچکتر جریانی برابر با 0.5 آمپر عبور می‌کند و جریان سیم‌پیچ بزرگ به تدریج افزایش می‌یابد، تا یک نقطه‌ای با افزایش جریان تغییری در جهت‌گیری آهن‌ربا مشاهده نمی‌شود و پس از آن با یک پرش ناگهانی، انکودر در موقعیت قرار می‌گیرد. اعدادی که انکودر ثبت کرده است در شکل 6 آورده شده است.

تا زمانی که جریان در سیم‌پیچ دوم به 0.4 آمپر رسید، با افزایش جریان تغییری در زاویه انکودر مشاهده نشد و پس از آن با یک پرش انکودر در 22.2 درجه قرار گرفت، که با بررسی و مقایسه با تئوری مشاهده شد که با عبور جریان 0.4 از سیم‌پیچ دوم، باید انکودر در موقعیت 19.8 درجه قرار می‌گرفت که حدود 11.9 درصد با حالت تئوری فاصله داشت. درصد خطا در شکل 7 نشان داده شده است.

پس از پرش اولیه مشاهده شد که با تقریب خوبی و با خطای کمتر از 10 درصد اندازه‌گیری‌ها با حالت تئوری مطابقت دارند و اندازه‌گیری‌های انجام شده حداکثر 2.6 درجه با حالت تئوری تفاوت داشتند. در شکل‌های (8) تا (13) اثر عبور جریان 1، 1.5 و 2 آمپر و در صد خطا در هر کدام نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در تمامی آزمایش‌ها خطا بعد از اولین پرش بزرگ به مقدار کمتر از 10 درصد از مقدار تئوری کاهش می‌یابد و در آزمایش‌ها دیده شد که پرش زمانی اتفاق می‌افتد که جریان سیم‌پیچ دوم به حدود 0.4 تا 0.6 آمپر باشد.

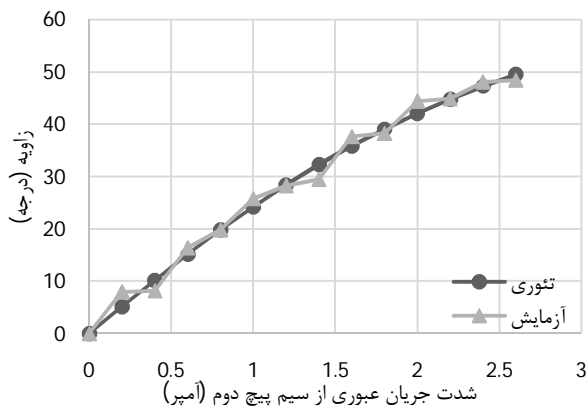


Fig. 8 Effect of change of current of second coil on encoder's angular position while first coil's current= 1A

شکل 8 تاثیر جریان 1 آمپر و افزایش جریان سیم‌پیچ دوم بر زاویه انکودر

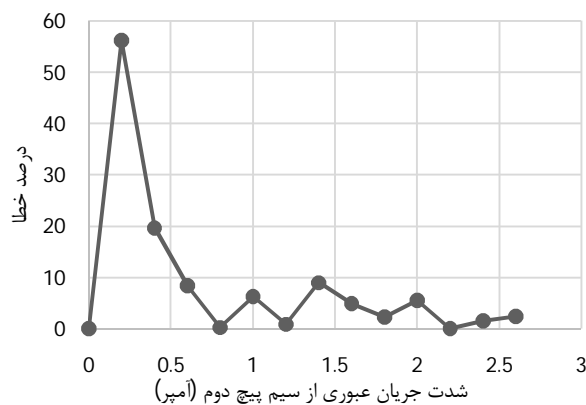


Fig. 9 Effect of change of current of second coil on error while first coil's current= 1A

شکل 9 عبور جریان 1 آمپر و درصد خطا با افزایش جریان سیم‌پیچ دوم

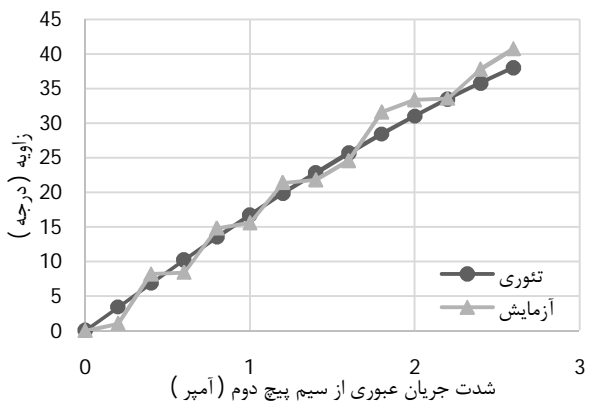


Fig. 10 Effect of change of current of second coil on encoder's angular position while first coil's current= 1.5A

شکل 10 تاثیر جریان 1.5 آمپر و افزایش جریان سیم‌پیچ دوم بر زاویه انکودر

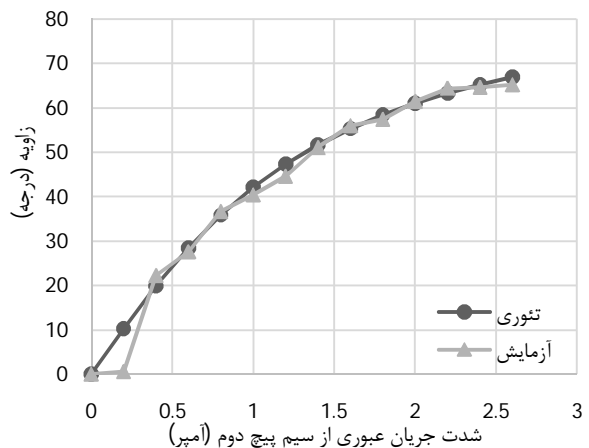


Fig. 6 Effect of change of current of second coil on encoder's angular position while first coil's current= 0.5A

شکل 6 تاثیر جریان 0.5 آمپر و افزایش جریان در سیم‌پیچ دوم بر زاویه انکودر

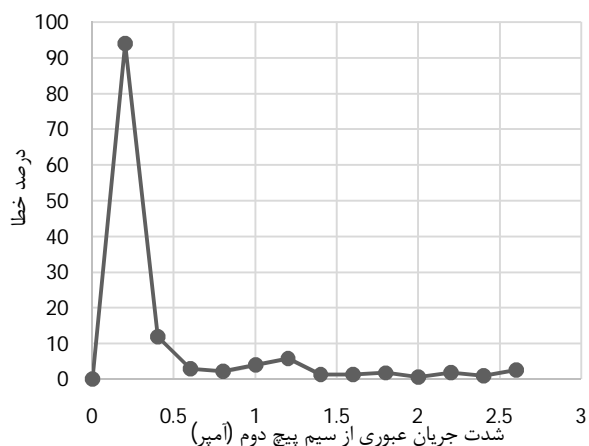


Fig. 7 Effect of change of current of second coil on error while first coil's current= 0.5A

شکل 7 عبور جریان 0.5 آمپر و درصد خطا با افزایش جریان سیم‌پیچ دوم

می‌شود. شماتیک فرآیند اعمال ولتاژ در شکل 14 آمده است. به وسیله نرم‌افزار لیبویو میزان ولتاژ اعمالی تعیین می‌شود و سپس این ولتاژ به کمک میکروکنترلر تبدیل به جریان سینوسی و کسینوسی می‌شود و به جفت کویل‌های ارسال می‌گردد. مدار ساخته شده در شکل 15 نشان داده شده است.

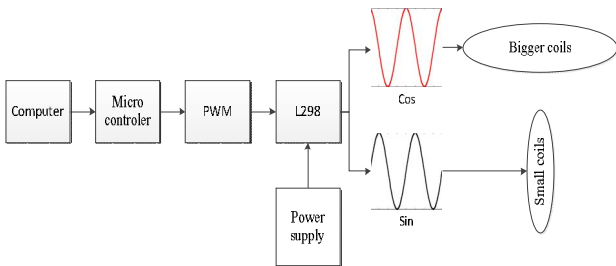


Fig. 14 Block diagram of coil rotation system

شکل 14 نمودار بلوکی سیستم چرخش کویل

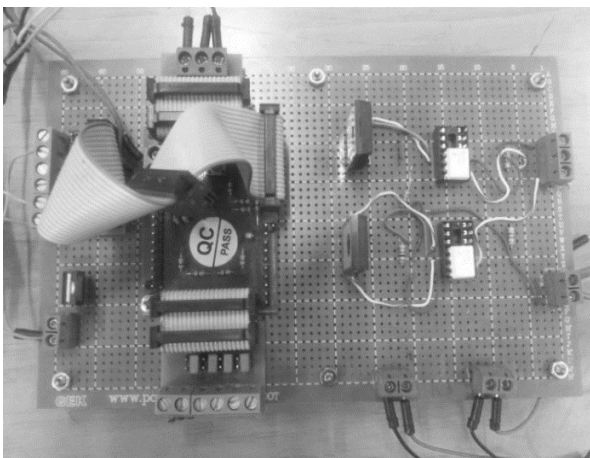


Fig. 15 The built control circuit

شکل 15 مدار کنترلی ساخته شده

در آزمایش‌های انجام شده آهن‌ربا در فضای بین سیم‌پیچ‌ها به صورت 360 درجه موقعیت گرفته و توانست با 1 هرتز شروع به دوران نماید.

#### 4- نتیجه گیری

در این پژوهش روند طراحی، شبیه‌سازی و ساخت یک مجموعه شامل سیم‌پیچ‌ها ارایه گردید که توسط مجموعه‌ای از مدارهای الکترونیکی و نرم‌افزار لیبویو با رایانه ارتباط برقرار کرده و جسم مورد نظر در موقعیت زاویه‌ای مناسب قرار گرفت و به صورت پیوسته چرخانده شد.

با عبور جریان‌های مختلف، آهن‌ربا در جهات مختلف و زوایای گوناگون موقعیت گرفت. همچنین روی اجسام فرو مغناطیس مانند براده آهن، تست انجام شد و مشخص شد که براده‌ها هم جهت با میدان مغناطیسی قرار گرفتند. در موقعیت‌دهی دقیق دیده شد که هنگامی که جریان در سیم‌پیچ اول

0.5 آمپر باشد، پرش اولیه انکودر، مقدار بیشتری است و هنگامی که سیم‌پیچ بزرگ جریان 0.4 آمپر دریافت می‌کند، با یک جهش یک‌باره انکودر در زاویه 22.2 قرار می‌گیرد. با افزایش جریان در سیم‌پیچ اول به میزان 2 آمپر، مقدار جهش اولیه کاهش یافت، به طوری که هنگام اعمال جریان 0.4 آمپر در سیم‌پیچ دوم، پرش اولیه 7.2 گردید و قابلیت موقعیت‌دهی بهتری را ایجاد کرد. هنگامی که سیم‌پیچ کوچکتر جریان کمتری را دریافت می‌کرد، با افزایش جریان سیم‌پیچ بزرگتر، مقادیر زاویه اندازه‌گیری شده به مقدار تئوری نزدیکتر بود.

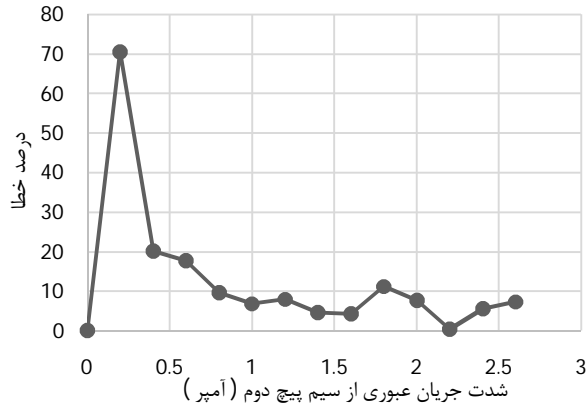


Fig. 11 Effect of change of current of second coil on error while first coil's current= 1.5A

شکل 11 عبور جریان 1.5 آمپر و درصد خطا با افزایش جریان سیم‌پیچ دوم

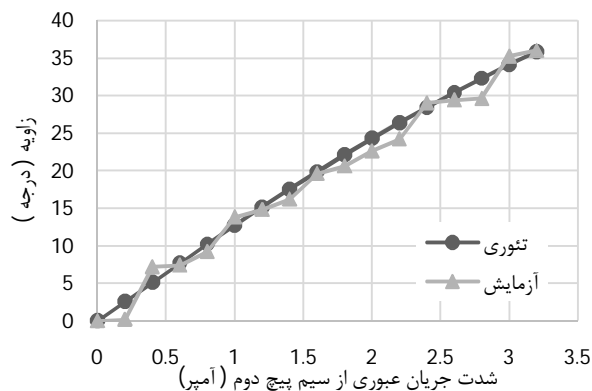


Fig. 12 Effect of change of current of second coil on encoder's angular position while first coil's current= 2A

شکل 12 تاثیر جریان 2 آمپر و افزایش جریان سیم‌پیچ دوم بر زاویه انکودر

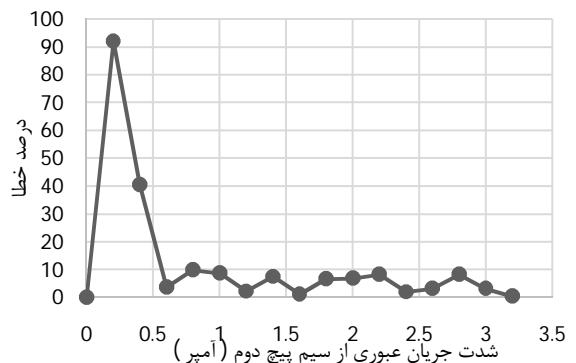


Fig. 13 Effect of change of current of second coil on error while first coil's current= 2A

شکل 13 عبور جریان 2 آمپر و درصد خطا با افزایش جریان سیم‌پیچ دوم

بنابراین در جریان‌های کمتر از این مقدار امکان استفاده از هلمهولتز کویل برای موقعیت‌دهی وجود ندارد اما در جریان‌های بالاتر با دقت بهتر از 10% می‌توان از آن برای موقعیت‌دهی استفاده کرد. دیده شد زمانی که کویل اول 0.5 آمپر جریان دارد بیشترین پرش اتفاق می‌افتد و برش اولیه معادل 22.5 درجه روی می‌دهد و هرچه جریان عبوری کویل اول بیشتر می‌شود پرش اولیه کاهش می‌یابد. زمانی که از کویل اول جریان 2 آمپر می‌گذرد بیشترین پرش 7.2 درجه است که به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است.

#### 3-2- حرکت چرخشی پیوسته

برای اینکار ولتاژهای متناوب سینوسی و کسینوسی به هر جفت کویل اعمال

## 5- مراجع

- [4] H. Choi, J. Choi, S. Jeong, C. Yu, J. Park, *Two-dimensional locomotion of a microrobot with a novel stationary electromagnetic actuation system*, smart mater. Struc, Vol. 18, No. 11, 2009.
- [5] S. Jeong, H. Choi, K. Cha, J. Ii, J. park, S. Park, *Enhanced locomotive and drilling microrobot using precessional and gradient magnetic field*, Sensor and Actuators, Vol. 171, No. 2, 2011.
- [6] L.F. Bozo, P.G. Milani, A proposal for implementing a Helmholtz coils cube control, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 5, No. 4, 2012.
- [7] T. Johansson, P. Jensen, K. Krag, *Helmholtz coil for characterization of magnetic sensors*, Technical university of Denmark, 2003.
- [1] E. Ramsden, *Hall-effect sensors: theory and application*. Newnes, p. 195, 2<sup>nd</sup> edition, 2011.
- [2] D. Herceg, A. Juhas, and M. Milutinov, *A design of a four square coil system for a biomagnetic experiment*. Facta universitatis-series: Electronics and Energetics, Vol. 22, No. 3, 2009.
- [3] H. Choi, J. Choi, S. Jeong, C. Yu, J. Park, *Two-dimensional actuation of a microrobot with a stationary two-pair coil system*, smart mater. Struc, Vol. 18, No. 5, 2009.