



Design, Manufacture and Validation of Linear Electromagnetic Actuator with Force Range of Milli Newton

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Akhbari S.^{1*},
Farhid M.¹,
Dehnad M.¹,
Golzarian R.¹

How to cite this article

Akhbari S, Farhid M, Dehnad M, Golzarian R. Design, Manufacture and Validation of Linear Electromagnetic Actuator with Force Range of Milli Newton. Modares Mechanical Engineering. 2022; 22(09):615-623.

¹Space thruster research institute, Iranian space research center, Tabriz, Iran.

*Correspondence

Address: Space thruster research institute, Iranian space research center, Tabriz, Iran.
S_akhbari@tabrizu.ac.ir

Article History

Received: January 31, 2022
Accepted: May 08, 2022
ePublished: September 28, 2022

ABSTRACT

In recent years, linear electromagnetic actuators have gained special attention in small robot actuation and calibration of milli newton thruster stands. In this paper, a linear electromagnetic actuator with a force range of milli newtons is designed and manufactured. In this regard, first the analytical relationships of the magnetic field and Lorentz force were derived and then, based on the desired design criteria meaning high force sensitivity, low heat loss and minimum geometric dimensions and weight, the appropriate design parameters of the electromagnetic actuator are obtained. According to the results, the obtained force constant is approximately 1 mN/A while the maximum power loss is 1 mW at available stroke of 10 mm. Finally, a prototype of the linear electromagnetic actuator is manufactured and experiments are performed to validate the electromagnetic actuator. For this purpose, a precision scale with an accuracy of 0.01 gr and a power supply with a resolution of 1 mA is utilized. The results showed that the maximum difference between the calculated and measured force was 2.5%. Therefore, there is a good correlation between the experimental data and the corresponding analytical values.

Keywords Electromagnetic actuator, Analytical modeling, Magnetic field, Milli newton sensitivity, Manufacturing, validation

CITATION LINKS

[1] Magnetic actuators and sensors. [2] Contributed Review: Application of voice coil motors in high-precision positioning stages with large travel ranges. [3] Design of decoupled dual servo stage with voice coil motor and linear motor for XY long stroke ultra-precision scanning system. [4] Design and optimization of voice coil motor for application in active vibration isolation. [5] High-performance moving-coil actuators with double-sided PM arrays: A design comparison. [6] Modeling and analysis of a novel rectangular voice coil motor for the 6-DOF fine stage of lithographic equipment. [7] Design of a 5 degree of freedom-voice coil motor actuator for smartphone camera modules. [8] Analysis of High Force Voice Coil Motors for Magnetic Levitation. [9] A novel voice-coil actuated mini crawler for In-pipe application employing active force control with iterative learning algorithm. [10] Design, verification and validation of a micropropulsion thrust stand. [11] Development of a milli-newton level thrust stand for thrust measurements of electric propulsion systems and UK90 Hall effect thruster. [12] High precision thrust balance development at the George Washington. [13] Magnetic actuators and sensors. [14] Direct 3-D method for performance prediction of a linear moving coil actuator with various topologies. [15] (Semi-) analytical models for the design of high-precision permanent magnet actuators. [16] Permanent magnet motor technology: design and applications. [17] 3D analytical calculation of the forces exerted between two cuboidal magnets. [18] Modeling of magnetically levitated planar actuators with moving magnets. [19] Pulsed thrust measurements using electromagnetic calibration techniques. [20] Comparison of force balance calibration techniques for the nano-Newton range.

طراحی، ساخت و صحنه‌گذاری یک محرک الکترومغناطیسی خطی در بازه نیرویی میلی-نیوتنی

سینا اخباری^{۱*}، مرتضی فرهید^۱، مسعود دهنادا^۱، رضا گلزاریان^۱
^۱پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر محرک‌های الکترومغناطیسی خطی کاربرد ویژه‌ای در ایجاد حرکت ربات‌های کوچک و اعمال نیروهای میلی‌نیوتنی جهت کالیبراسیون استندهای سنجش تراست رانشگرها یافته است. در این مقاله به طراحی و ساخت یک محرک الکترومغناطیسی خطی با بازه نیرویی میلی‌نیوتنی پرداخته شده است. در این راستا، ابتدا روابط تحلیلی برای به‌دست‌آوردن پارامترهای میدان مغناطیسی و نیروی لورنتس استخراج شده و سپس، بر اساس معیارهای طراحی نسبت نیرویی بالا، اتلاف حرارتی پایین و کمترین ابعاد هندسی و وزن، مناسب‌ترین طراحی محرک الکترومغناطیسی مدنظر تعیین شد. بر اساس مدل طراحی شده، نسبت نیرویی تقریباً ۱ میلی‌نیوتن بر آمپر حاصل شده، درحالی‌که اتلاف توان حداکثر ۱ میلی‌وات بود. همچنین کورس حرکتی قابل‌دسترس ۱۰ میلی‌متر بود. در نهایت، یک نمونه واقعی از محرک الکترومغناطیسی خطی ساخته شده و آزمایش‌های تجربی به‌منظور صحنه‌گذاری محرک الکترومغناطیسی طراحی شده انجام یافتند. بدین منظور از یک ترازوی دقیق با دقت ۰/۰۱ گرم و منبع تغذیه با رزولوشن ۱ میلی‌آمپر بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که حداکثر اختلاف بین نیروی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده ۲/۵ درصد بود. در نتیجه، مطابقت خوبی بین داده‌های تجربی و مقادیر تحلیلی متناظر وجود دارد.

کلیدواژه‌ها: محرک الکترومغناطیسی، مدل‌سازی تحلیلی، میدان مغناطیسی، حساسیت میلی‌نیوتنی، ساخت، صحنه‌گذاری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۸

* نویسنده مسئول: S_akhbari@tabrizu.ac.ir

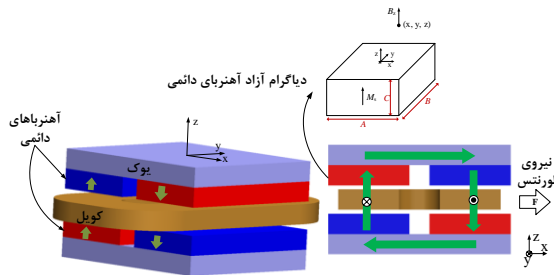
۱- مقدمه

محرک الکترومغناطیسی وسیله‌ای هست که با عبور جریان از داخل سیم‌پیچ‌های تعبیه شده در حضور میدان مغناطیسی ناشی از آهنرباهای دائمی و در اثر پدیده خودالقائی نیروی لورنتس تولید می‌کند. محرک‌های الکترومغناطیسی به‌ویژه در کاربردهای حرکتی دقیق مفید هستند، زیرا به دلیل عملکرد غیرتماسی و پیوسته خود، عاری از هیستریزیس مکانیکی، نوسانات نیرو یا گشتاور و پس‌زنی هستند^[۱]. طراحی ساده و حرکت بدون چرخ دنده، استفاده آن‌ها را قابل دسترس‌تر می‌کند، اگرچه معمولاً کورس حرکتی کوتاه‌تر و نسبت نیرو به حجم کمتری از محرک‌های نوع تماسی مانند محرک‌های پیژوالکتریک و موتورهای الکتریکی مستقیم و متناوب هستند. با توجه به تطبیق‌پذیری بالا در طراحی محرک‌های الکترومغناطیسی از نظر اندازه، شکل، بازه حرکتی، پیکربندی و ظرفیت، کاربردهای مختلفی از آنها در سیستم‌های حرکتی دقیق

پدید آمده است. علاوه بر این، نیروی مغناطیسی تولید شده متناسب با جریانی است که در طول سیم پیچ جریان می‌یابد، که برای کنترل دقیق مناسب است^[۲].

در سال‌های اخیر، در ادبیات موضوع در مورد طراحی و کاربرد محرک‌های الکترومغناطیسی در سیستم‌های موقعیت دهنده دقیق^[۳] و جداسازی فعال ارتعاشات^[۴] مطالعات فراوانی انجام یافته است. کیم و همکاران^[۳] از سه عدد محرک الکترومغناطیسی به عنوان یک سیستم محرک صفحه‌ای در حرکات ریز یک دستگاه اسکن فوق دقیق استفاده کردند تا اختلالات ناشی از اتصالات کاهش یابد. یانسن و همکاران^[۵] نحوه مدل‌سازی و طراحی محرک الکترومغناطیسی را برای کاربرد در یک سیستم جداسازی ارتعاشات مغناطیسی غیرفعال توصیف کردند. کیم و همکاران^[۶] با مدل‌سازی، بهینه‌سازی و اعتبارسنجی یک سیستم جداسازی ارتعاشات فعال را با استفاده از یک موتور سیم‌پیچ صوتی، یک سیستم شش درجه آزادی را پیشنهاد کردند که می‌تواند برای ماشین‌های اندازه‌گیری دقیق مانند میکروسکوپ نیروی اتمی، میکروسکوپ پروب روبشی و غیره کار کند. هسیه و همکاران^[۷] یک محرک الکترومغناطیسی پیشنهاد کردند که می‌توانست پنج درجه آزادی را پوشش دهد که شامل سه حرکت خطی و دو حرکت چرخشی برای ماژول‌های دوربین گوشی‌های هوشمند بود. کیم و آهن^[۸] دو مدل محرک الکترومغناطیسی با قابلیت ایجاد نیروهای بالا بر اساس شناوری مغناطیسی ارائه کردند. همچنین سبزمیدانی و همکاران^[۹] یک ربات خزنه کوچک به منظور انجام عملیات مختلف در داخل لوله معرفی کردند که از محرک الکترومغناطیسی به جای موتور استفاده کرده تا اختلالات ناخواسته ناشی از اصطکاک و سرعت حذف شوند. اخیراً، محرک‌های الکترومغناطیسی خطی برای کالیبراسیون استندهای سنجش تراست رانشگرها در حوزه هوافضا نیز استفاده شده است^[۱۰-۱۲]. با توجه به اینکه در محدوده نیروهای میلی‌نیوتنی، نیروهای اصطکاکی عامل بسیار تاثیر گذار بوده و می‌توانند هم مرتبه نیروهای مورد نظر باشند، بنابراین مهمترین مزیت کالیبراسیون استندهای سنجش تراست با استفاده از محرک‌های الکترومغناطیسی عدم وجود اصطکاک و پایداری و تکرارپذیری نیروهای ایجاد می‌باشد.

با توجه به اینکه اکثر محرک‌های الکترومغناطیسی ارائه شده در ادبیات موضوع با هدف ایجاد نیروهای بزرگ بوده و یا از محرک‌های تماسی بهره برده‌اند، در این مقاله یک محرک الکترومغناطیسی خطی برای ایجاد نیروی میلی‌نیوتن برای کاربردهای مختلف از جمله کالیبراسیون دستگاه سنجش تراست رانشگرها طراحی شده است. علاوه بر این، هدف و نوآوری در این پژوهش طراحی محرکی است که در کنار قابلیت تولید نیروهای میلی‌نیوتنی به ازای جریان و ولتاژ پایین، دارای کمترین ابعاد هندسی و وزن ممکن، اتلاف حرارتی پایین و ثابت نیرویی



شکل ۱) مفهوم طراحی محرک الکترومغناطیسی خطی به همراه با شکل سه بعدی، نمای برش خورده و دیاگرام آزاد آهنربای دائمی در فضای کارترین به منظور بدست آوردن تحلیلی میدان مغناطیسی

۳- مدل سازی میدان مغناطیسی آهنربای دائمی

نیروی ایجاد شده با محاسبه نیروی لورنتس اعمال شده بر روی سیم پیچ در اثر میدان مغناطیسی آهنرباهای دائمی بدست می‌آید. بنابراین نیروی اعمال شده بر روی آهنربا برابر این نیرو و در خلاف جهت آن می‌باشد. چگالی شار مغناطیسی در فضای بین آهنرباهای دائمی (جایی که سیم پیچ قرار گرفته) از طریق قانون ماکسول به صورت تحلیلی استخراج می‌شود. فرض اصلی در این روش برابر یک بودن مقدار نفوذپذیری نسبی در سرتاسر حجم مورد مطالعه می‌باشد ($\mu_r = 1$). نفوذ پذیری نسبی نشان‌گر نسبت بین نفوذپذیری محیط مورد مطالعه و نفوذ پذیری خلاء ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$) هست. خطای ناشی از این فرض برای آهنرباهای نئودیمیوم-آهن-بور تقریباً برابر ۲ الی ۳ درصد می‌باشد [15].

مدل بار سطحی [13,16] که در ادبیات موضوع به عنوان روشی بسیار دقیق شناخته شده، آهنربا را به عنوان توزیع بارهای مغناطیسی در نظر می‌گیرد. میدان مغناطیسی-استاتیکی ایجاد شده توسط یک آهنربای دائمی در فضای آزاد توسط معادلات (۱) تا (۳) با استفاده از مرجع [13] بدست می‌آید:

$$\rho_m = -\nabla \cdot \mathbf{M}_s \quad (1)$$

$$\sigma_m = -\mathbf{M}_s \cdot \hat{\mathbf{n}} \quad (2)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\rho_m(\mathbf{x}')(\mathbf{x} - \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^3} dv' + \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_S \frac{\sigma_m(\mathbf{x}')(\mathbf{x} - \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^3} ds' \quad (3)$$

در رابطه (۳)، μ_0 نفوذپذیری محیط، بردار \mathbf{x} موقعیت نقطه مدنظر و بردار \mathbf{x}' موقعیت منبع بار را نشان می‌دهند. اولین عبارت انتگرالی رابطه (۳) میدان مغناطیسی-استاتیکی ایجاد شده توسط چگالی بار حجمی (ρ_m)، از رابطه (۱) بوده و انتگرال دوم در رابطه (۳)، میدان مغناطیسی-استاتیکی ایجاد شده توسط چگالی بار سطحی (σ_m)، از رابطه (۲) می‌باشد. موقعیت نقطه‌ای در فضا که بردار میدان مغناطیسی آن از رابطه (۳) بدست می‌آید، نسبت به دستگاه مختصات در شکل ۱ مشخص می‌باشد.

در این پژوهش شکل هندسی آهنرباها مکعبی می‌باشد. به منظور ساده سازی با فرض اینکه مغناطش (\mathbf{M}_s)، آهنرباهای مکعبی

ایجاد در کورس حرکتی محرک باشد. بدین منظور، ابتدا اصول هندسی محرک الکترومغناطیسی تشریح می‌شود. سپس نیروی ایجاد شده بر روی سیم پیچ‌ها از طریق قانون لورنتس به صورت ریاضی استخراج شده است. در این راستا از روش بار مغناطیسی سطحی [13] برای مدل سازی میدان مغناطیسی آهنرباهای دائمی استفاده شده است. این روش تحلیلی نیازی به گسسته سازی هندسی نداشته و با ارائه روابط میدانی کاملاً تحلیلی در سرتاسر دامنه تحت پوشش، منجر به سریع تر شدن محاسبات نسبت به روش‌های المان محدود می‌شود. معیارهای طراحی، نسبت نیرویی بالا، اتلاف حرارتی پایین و کمترین ابعاد هندسی و وزن تعیین شده‌اند.

۲- ساختار هندسی محرک الکترومغناطیسی

بسیاری از کاربردهای صنعتی و تحقیقاتی به محرک‌های خطی نیاز دارند که بین عملکرد بالا و کاهش هزینه و حجم ابعادی توازن ایجاد کنند. طرحی که برای تأمین این الزامات در نظر گرفته می‌شود، محرک الکترومغناطیسی خطی با سیم پیچی است که در میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط آهنرباهای دائمی حرکت می‌کند. اگرچه محرک‌های الکترومغناطیسی غالباً شکل استوانه‌ای دارند، اما می‌توانند از طریق شکل گسترده با آهنرباهای مکعبی یک طرفه یا دو طرفه [14] (همانطور که در این پژوهش پیشنهاد شده است) کار کنند. طرح هندسی محرک الکترومغناطیسی پیشنهادی به صورت شماتیک در شکل ۱ نمایش داده شده است. مطابق شکل ۱ دو گروه آهنربایی در بالا و پایین سیم پیچی که در مرکز محرک قرار گرفته تعبیه شده‌اند. هر گروه شامل دو آهنربای دائمی به شکل مکعب مستطیل هستند که در جهت عمود بر فاصله هوایی مغناطیسی سازی شده‌اند. در شکل ۱، حلقه میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط آهنرباها با پیکان‌های سبز رنگ مشخص شده‌اند. این آهنرباها از پشت به یوک‌هایی (از جنس فولاد ضدزنگ نگیر) متصل هستند که سفتی مکانیکی سیستم را فراهم می‌کنند. قسمت میانی سیم پیچ کشیده شده و قسمت انتهایی سیم پیچ در دو طرف خمیده است. این انتهای خمیده تجزیه و تحلیل نیرو را پیچیده تر می‌کند، زیرا جریان از قسمت گرد هم عبور می‌کند؛ به عبارت دیگر شار جریانی سیم پیچ در صفحه و به صورت دو بعدی جریان دارد. علاوه بر این، جریان در قسمت گرد سیم پیچ، نیروی مزاحمی ایجاد می‌کند که موثر نیست. بنابراین به منظور حذف این نیروی نامطلوب و همچنین ساده تر شدن معادلات، فقط قسمت مستقیم و کشیده سیم پیچ تحت میدان مغناطیسی آهنرباها قرار می‌گیرد. چراکه در صورت عدم اعمال میدان مغناطیسی به قسمتی از سیم پیچ، نیرویی نیز در آن القا نمی‌شود. همچنین جنس آهن-رباهای دائمی به کار رفته نئودیمیوم-آهن-بور با گرید ۴۲ (NdFeB-42) می‌باشد.

چراکه آهنرباهای دائمی هم در این جهت کشیده شده‌اند؛ بنابراین، انتگرال حجمی به صورت انتگرال دوگانه می‌تواند نوشته شود: انتگرال سطحی و انتگرال خطی در طول مستقیم سیم پیچ، l_c ، (شکل ۲).

$$F = \int_l \int_A \mathbf{J} \times \mathbf{B} dAdl \quad (7)$$

حال، حاصل تقسیم بردار جریانی I بر سطح مقطع سیم پیچ (A) در صفحه $x-z$ ، می‌تواند جایگزین بردار I در رابطه (۷) شود. جایی که I بردار جریان در سطح مقطع جاری می‌باشد. از آنجایی که آهنرباها در امتداد محور y کشیده شده‌اند، میدان مغناطیسی تولید شده در جهت y توسط آهنرباها نادیده گرفته می‌شوند. بنابراین، بردار شدت میدان مغناطیسی در مختصات دکارتی به دو مؤلفه تجزیه می‌شود:

$$\mathbf{F} = \int_l \int_A \mathbf{I} \times (B_x \hat{i} + B_z \hat{k}) dAdl \quad (8)$$

با توجه به اینکه بردار I یا در جهت مثبت محور y و یا در جهت منفی محور y می‌باشد، بنابراین به صورت $y\hat{j}$ یا $-y\hat{j}$ نوشته می‌شود. مطابق شکل ۲ بردار جریان در قسمت راست و چپ جهت مثبت محور y به ترتیب برابر $|I|\hat{j}$ و $-|I|\hat{j}$ می‌باشد. بنابراین، رابطه (۸) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\mathbf{F} = \frac{l_c |I|}{A} \left(\int_A (-B_{x,right} \hat{k} + B_{z,right} \hat{i}) dA + \int_A (B_{x,left} \hat{k} - B_{z,left} \hat{i}) dA \right) \quad (9)$$

در صفحه $x-z$ ، گروه‌های آهنربا نسبت به مبدأ مختصات مقابل یکدیگر قرار گرفته و دارای تقارن هستند. بنابراین، اگر سیم پیچ نیز بر اساس مرکز تقارن گروه‌های آهنربا قرار بگیرد، شدت میدان مغناطیسی در بلوک سیم پیچ سمت چپ و بلوک سیم پیچ سمت راست نیز متقارن می‌شوند که معادله (۹) را به شکل زیر ساده می‌کند:

$$\mathbf{F} = 2 \frac{l_c |I|}{A} \int_A (-B_{x,right} \hat{k} + B_{z,right} \hat{i}) dA \quad (10)$$

از آنجایی که I کل جریان گذرنده از سیم پیچ می‌باشد، رابطه (۱۰) می‌تواند به صورت تعداد دوره‌های سیم پیچ در جریان گذرنده از هر سیم پیچ (i)، نوشته شود. تعداد دوره‌های سیم پیچ (n)، بر اساس ویژگی‌های هندسی سیم پیچ که در شکل ۲ نشان داده شده از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$n = \left(\frac{w_c}{d_c} - \frac{1}{2} \right) \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{h_c}{d_c} - 1 \right) + 1 \right) \quad (11)$$

جایی که، w_c عرض سیم پیچ، d_c قطر هر یک از سیم‌های سیم پیچ و h_c ضخامت سیم پیچ می‌باشد؛ بنابراین رابطه نهایی نیروی لورنتس محرک الکترومغناطیسی مطابق رابطه (۱۲) می‌باشد:

$$\mathbf{F} = 2 \left(\frac{w_c}{d_c} - \frac{1}{2} \right) \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{h_c}{d_c} - 1 \right) + 1 \right) \frac{l_c I}{A} \int_A (-B_{x,right} \hat{k} + B_{z,right} \hat{i}) dA \quad (12)$$

همگن هستند، معادله (۱) به همراه عبارت نخست رابطه (۳) برابر صفر می‌شود. ضمناً، محرک الکترومغناطیسی به صورتی طراحی می‌شود که از قویترین مؤلفه شار مغناطیسی بهره بگیرد، که موازی با جهت مغناطش آهنرباهای مکعبی است. بنابراین، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده مؤلفه z میدان مغناطیسی (B_z)، در موقعیت برداری مشخص x ، با مراجعه به کارهای مراجع [17, 18] به ترتیب زیر استخراج می‌شود:

$$B_z = \frac{\mu_0 M_s}{4\pi} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 (-1)^{i+j+k} \tan^{-1} \left(\frac{ST}{RU} \right) \quad (4)$$

جایی که:

$$\begin{aligned} S &= x - (-1)^i (A/2), \\ T &= y - (-1)^j (B/2), \\ U &= (z + C/2) - (-1)^k (-C/2), \\ R &= \sqrt{S^2 + T^2 + U^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

محرک الکترومغناطیسی از چهار عدد آهنربای مکعبی تشکیل شده است؛ در نتیجه شار مغناطیسی برآیند اعمالی بر سیم پیچ از طریق برهم نهی شار مغناطیسی هر کدام از آهنرباها به دست می‌آید. به منظور ساده شدن فرآیند جمع‌زنی، از انتقال و دوران مختصات با توجه به موقعیت و جهت‌گیری فضایی هر یک از آهنرباها نسبت به یک مختصات مرجع استفاده شده است. با توجه به اینکه ماندگاری مغناطیسی آهنرباهای استفاده شده برابر $B_r = 1.28$ T بوده با استفاده از رابطه $M_s = B_r / \mu_0$ مقدار M_s بر حسب آمپر بر متر در رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

۴- محاسبه نیروی سیم پیچ

روابط استخراج شده برای میدان مغناطیسی با روش مدل بار سطحی، برای محاسبه نیروی الکترومغناطیسی اعمال شده به سیم پیچ استفاده شده‌اند. با توجه به مرجع [14]، به منظور مدل سازی تحلیلی محرک الکترومغناطیسی، از روابط قانون لورنتس استفاده شده است. یکی از مزیت‌های روابط نیروی لورنتس عدم نیاز به محاسبه میدان مغناطیسی خود سیم پیچ است. هنگامی که یک بردار چگالی حجمی جریان I از میان یک میدان مغناطیسی خارجی B عبور می‌کند، نیروی لورنتس F ایجاد شده در کل حجم V یک جسم رسانا از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{J} \times \mathbf{B} dV \quad (6)$$

با توجه به اینکه محرک الکترومغناطیسی مورد مطالعه به منظور ایجاد نیرو در راستای محور x طراحی شده است، در نتیجه، تنها قسمت هم راستا با محور y سیم پیچ، در محاسبات نقش دارد. همچنین، از آنجایی که میدان فقط در بخش مستقیم سیم پیچ وجود دارد، انتگرال‌گیری فقط این قسمت را شامل شده و بردار I می‌تواند در امتداد محور y ثابت در نظر گرفته شود. همچنین بردار میدان مغناطیسی B در امتداد انتگرال محور y تغییر نمی‌کند،

با توجه به تعداد زیاد متغیرهای هندسی، این متغیرها به دو دسته از پیش تعیین شده و مستقل تقسیم می‌شوند. قطر سیم، ضخامت سیم‌پیچ و عرض آهن‌ریا به همراه جریان عبوری از سیم-پیچ متغیرهای مستقل بوده و سایر متغیرها با مقدار مشخص و ثابت، از قبل تعیین شده هستند. در جدول ۱ مقادیر هندسی ثابت و در جدول ۲ پارامترهای متغیر، با توجه به شکل ۲ لیست شده‌اند. به منظور به حداقل رساندن ابعاد هندسی محرک الکترومغناطیسی، ضخامت سیم‌پیچ بایستی کمترین مقدار ممکن را داشته باشد؛ بنابراین در محاسبات میدان و نیرو، ضخامت سیم-پیچ برابر با قطر سیم در نظر گرفته می‌شود. به طبع آن، سیم‌پیچی در صفحه x-y صورت گرفته و در جهت z همواره یک لایه سیم وجود دارد.

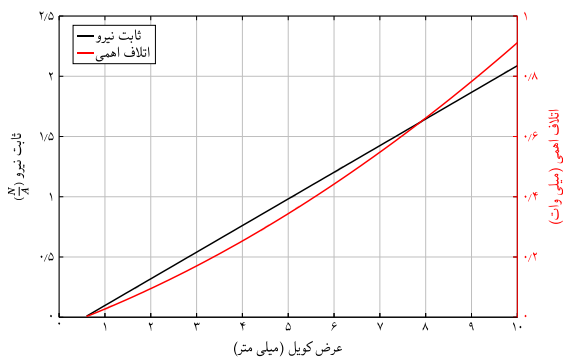
جدول ۱) مقادیر هندسی ثابت در طراحی محرک الکترومغناطیسی (ابعاد به میلی‌متر هستند)

فاصله دو آهن‌ریا فاصله دو آهن‌ریا در راستای عمودی	ضخامت آهن‌ریا در راستای عمودی	طول سیم‌پیچ	طول آهن‌ریا	ضخامت سیم‌پیچ
wg	hz	hm	lm	hc
۵	۱۰	۵	۴۰	۵۶

جدول ۲) مقادیر هندسی متغیر در طراحی محرک الکترومغناطیسی (ابعاد به میلی‌متر هستند)

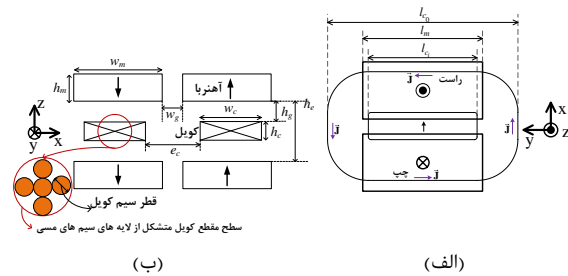
متغیرهای مستقل	مقدار انتخابی	بازه تغییر
عرض سیم‌پیچ wc	۵	۰/۶ الی ۱۰
عرض آهن‌ریا wm	۲۰	۱۰ الی ۳۰
قطر سیم dc	۱	۰/۲ الی ۱/۶
ضخامت سیم‌پیچ hc	برابر با قطر سیم	۰/۲ الی ۱/۶

شکل‌های ۳ الی ۵ تغییرات ثابت نیروی محرک الکترومغناطیسی و اتلاف اهمی را به ترتیب در مقابل تغییرات عرض سیم‌پیچ، عرض آهن‌ریا و قطر سیم سیم‌پیچ را نشان می‌دهد. در شکل ۳ ملاحظه می‌شود که با افزایش عرض سیم‌پیچ، هم ثابت نیرو و هم اتلاف اهمی افزایش می‌یابد. دلیل افزایش ثابت نیرو، افزایش شار مغناطیسی و افزایش اتلاف اهمی به دلیل افزایش مقاومت سیم‌پیچ می‌باشد. همچنین مطابق شکل ۴ با افزایش عرض آهن‌ریا، ثابت نیرو در اثر بزرگ‌تر شدن میدان مغناطیسی افزایش یافته



شکل ۳) منحنی ثابت نیرو و اتلاف اهمی بدست آمده از محاسبات تحلیلی در مقابل تغییرات عرض سیم‌پیچ

لازم به ذکر است که نیروی لورنتس در معادله (۱۲) متناسب با جریان جاری در هر یک از سیم‌های سیم‌پیچ هست؛ به این معنی که نیرو می‌تواند با افزایش جریان پیوسته افزایش یابد. بنابراین، یک متغیر که به صورت نسبت نیروی تولید شده توسط محرک الکترومغناطیسی به جریان جاری در سیم‌پیچ تعریف شده و با نام ثابت نیرو معرفی می‌شود، به جای شدت نیرو، متغیر معقول‌تری برای بیان اثربخشی طراحی می‌باشد.



شکل ۲) بیکربندی و پارامترهای طراحی محرک الکترومغناطیسی: (الف) نمای بالا، (ب) نمای جانبی

در نهایت، به دلیل اینکه در طراحی محرک الکترومغناطیسی مدنظر نیرو در جهت x لازم می‌باشد، بنابراین نیرویی که با انتگرال‌گیری از مقادیر میدان مغناطیسی در جهت x ایجاد می‌شود از رابطه (۱۲) حذف شده و این رابطه به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{F}{i} = 2l_c \left(\frac{w_c}{d_c} - \frac{1}{2} \right) \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{h_c}{d_c} - 1 \right) + 1 \right) \frac{\int_A B_{z, right} dA}{A} \quad (13)$$

در معادله نهایی (۱۳)، ثابت نیرو با مشخصات هندسی سیم‌پیچ و مقدار متوسط شدت میدان مغناطیسی در ناحیه عبور سیم‌پیچ بیان می‌شود. با توجه به عبور جریان از داخل سیم‌پیچ، مقداری اتلاف گرمایی وجود خواهد داشت که به دلیل مقاومت الکتریکی سیم‌پیچ‌ها ایجاد شده و اتلاف اهمی نامیده می‌شود. این اتلاف به صورت شار گرمایی پراکنده می‌شود. مقدار انرژی تلف شده در واحد زمان با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$P_c = i^2 R_c \quad (14)$$

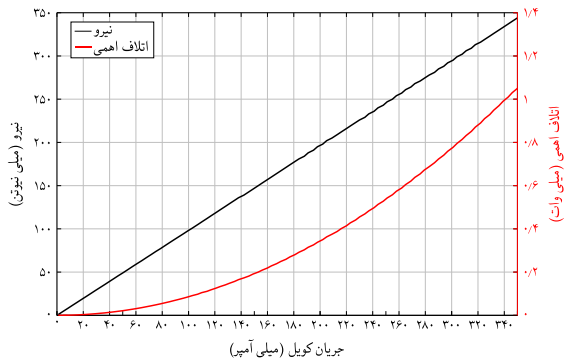
جایی که R_c مقاومت الکتریکی سیم‌پیچ بوده و با مراجعه به شکل ۲، از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_c = \rho_e \frac{4n(2l_c + \pi(2w_c + e_c))}{\pi d_c^2} \quad (15)$$

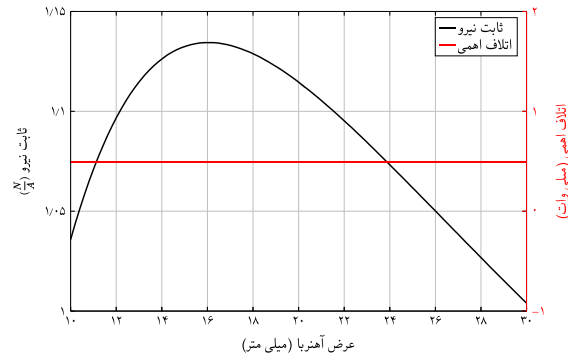
در رابطه فوق ρ_e مقاومت الکتریکی ویژه بوده و برای سیم مسی برابر ۱۶/۸ نانو اهم‌متر می‌باشد.

۵- طراحی محرک الکترومغناطیسی

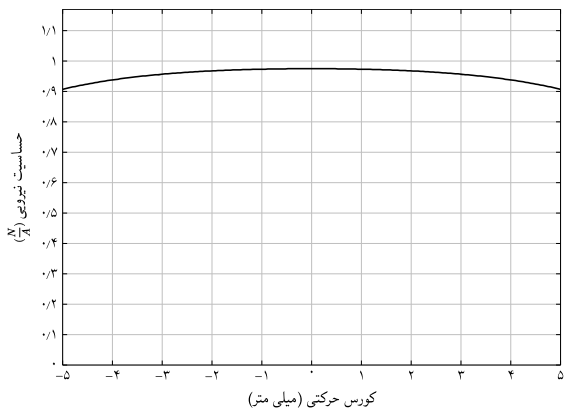
معیار اساسی در این پژوهش برای طراحی و ساخت محرک الکترومغناطیسی، دستیابی به نسبت نیرویی میلی‌نیوتن و یکنواخت می‌باشد. بدین معنی که در ازای تغییر یک میلی‌آمپر در جریان سیم‌پیچ، تغییر نیرویی برابر یک میلی‌نیوتن به دست آید. دیگر معیارها شامل اتلاف حرارتی پایین، حداقل وزن و ابعاد ممکن و توانایی ایجاد نیرو در محدوده ۱ تا ۳۵۰ میلی‌نیوتن می‌باشد.



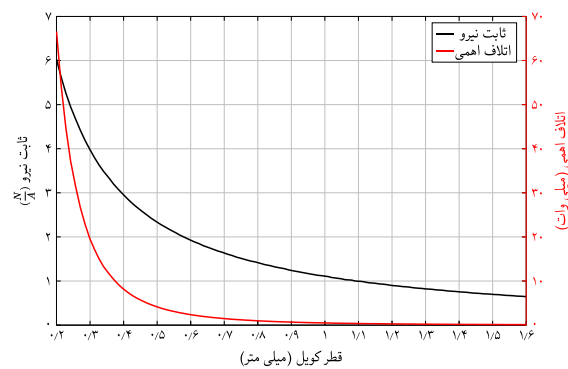
شکل ۶) منحنی نیرو و اتلاف اهمی بدست آمده از محاسبات تحلیلی در مقابل تغییرات شدت جریان



شکل ۴) منحنی ثابت نیرو و اتلاف اهمی بدست آمده از محاسبات تحلیلی در مقابل تغییرات عرض آهن‌ریا



شکل ۷) نمودار ثابت نیرو در امتداد کورس حرکتی



شکل ۵) منحنی ثابت نیرو و اتلاف اهمی بدست آمده از محاسبات تحلیلی در مقابل تغییرات قطر سیم سیم‌پیچ

جریان‌هایی در بازه ۱ الی ۳۵۰ میلی‌آمپر، بازه نیرویی مورد نیاز ۱ الی ۳۵۰ میلی‌نیوتن) برای محرک الکترومغناطیسی با اتلاف حرارتی حداکثر ۱ میلی‌وات به دست می‌آید. در نهایت، شکل ۷ تغییرات ثابت نیرو را به ازای موقعیت سیم‌پیچ در امتداد کورس حرکتی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که محرک الکترومغناطیسی طراحی شده در طول کورس حرکتی نسبت نیرویی تقریباً یکنواختی دارد.

۶- نتایج تجربی حاصل از صحنه‌گذاری

با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی تحلیلی، شکل نهایی محرک الکترومغناطیسی طراحی شده در شکل ۸ ملاحظه می‌شود. ضخامت سیم‌پیچ برابر قطر سیم یعنی ۱ میلی‌متر بوده و تعداد دور سیم‌پیچ ۵ دور در صفحه x-y می‌باشد. همچنین با توجه به ابعاد انتخابی، مجموع وزن قطعات و اتصالات تشکیل دهنده محرک الکترومغناطیسی برابر ۵۱۷ گرم بدست آمد.

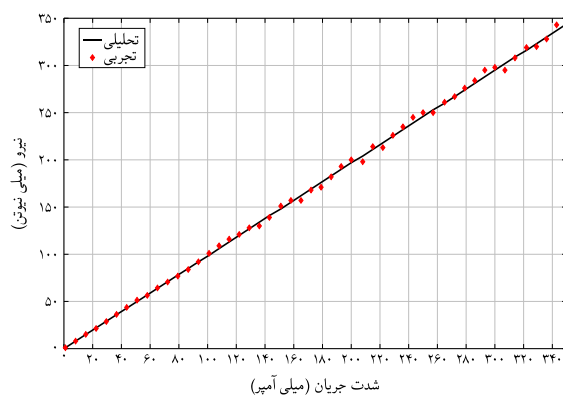
در نهایت به منظور صحنه‌گذاری محرک الکترومغناطیسی ساخته شده، یک سری آزمایش تجربی ترتیب داده می‌شود. چیدمان آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است. در این نوع آزمایش که در ادبیات موضوع [19, 20] نیز استفاده شده، محرک الکترو مغناطیسی در راستای محور x بر روی یک ترازوی دقیق قرار گرفته

اما اتلاف حرارتی ثابت می‌ماند. همچنین از این شکل مشخص هست که به ازای جریان ۲۰۰ میلی‌آمپر، اتلاف حرارتی بسیار کمی به مقدار ۰/۴ میلی‌وات وجود خواهد داشت. در شکل ۵ با افزایش قطر سیم، هر دو متغیر ثابت نیرو و اتلاف حرارتی کاهش می‌یابد. با وجود اینکه کاهش اتلاف اهمی یک مزیت محسوب می‌شود، اما از طرفی با افزایش بیش از حد قطر سیم نسبت بین نیرو و آمپر کوچک‌تر شده که باعث می‌گردد برای دستیابی به نیروهای بزرگ، نیاز به جریان‌های بالا باشد. در نتیجه با توجه به اینکه هدف پژوهش دستیابی به حالتی هست که به ازای اعمال جریان ۱ میلی‌آمپر نیرویی معادل ۱ میلی‌نیوتن ایجاد شود، انتخاب قطر سیم به مقدار ۱ میلی‌متر با توجه به منحنی شکل ۵ مناسب می‌باشد. در این حالت ثابت نیرویی برابر ۰/۹۷ نیوتن بر آمپر به دست می‌آید. این بدین مفهوم هست که به طور مثال، برای رسیدن به نیرویی برابر با ۱۰۰ میلی‌نیوتن، منبع تغذیه باید با جریانی در حدود ۱۰۰ میلی‌آمپر تنظیم شود که اختلاف پتانسیلی به مقدار ۱/۶ ولت ایجاد می‌شود.

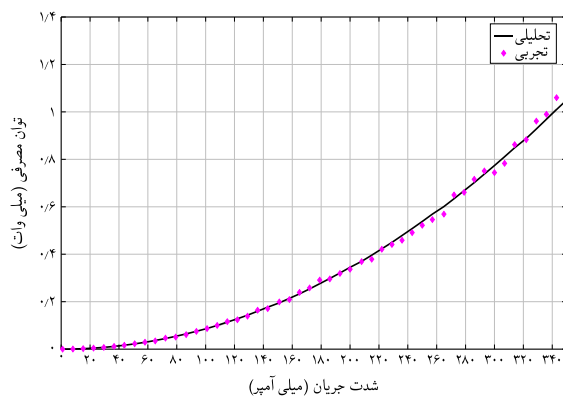
شکل ۶ تغییرات نیروی ایجادی در محرک الکترومغناطیسی و اتلاف اهمی در سیم‌پیچ را در مقابل تغییرات جریان اعمالی نشان می‌دهد. در این شکل ثابت نیرو ۰/۹۷ نیوتن بر آمپر بوده و مشخصاً رابطه‌ای خطی بین جریان و نیرو برقرار می‌باشد. در نتیجه با اعمال



شکل ۸) نمای سه بعدی از محرک الکترومغناطیسی طراحی شده و چیدمان آزمایش‌های تجربی



شکل ۹) نمودار مقایسه داده‌های حاصل از نتایج تجربی با مقادیر تحلیلی متناظر برای نیرو ایجاد شده در محرک الکترومغناطیسی در مقابل تغییرات شدت جریان



شکل ۱۰) مقایسه منحنی‌های توان مصرفی واقعی و تئوری در محرک الکترومغناطیسی در مقابل تغییرات شدت جریان

میلی‌متر، عرض سیم‌پیچ ۵ میلی‌متر و عرض آهن‌ریا نیز ۲۰ میلی‌متر انتخاب شدند. بر این اساس ثابت نیرویی حاصله، تقریباً ۱ میلی‌نیوتن بر میلی‌آمپر بوده و در ازای اعمال شدت جریان‌های ۱

است. ترازوی مورد استفاده در این پژوهش دارای دقت یک صدم گرم برابر با یک دهم میلی‌نیوتن می‌باشد. در نتیجه از دقت لازم برای صحنه‌گذاری عملکرد محرک الکترومغناطیسی با دقت یک میلی‌نیوتن برخوردار می‌باشد. یک منبع تغذیه وظیفه ایجاد اختلاف پتانسل و برقراری جریان در دو سر سیم‌پیچ را دارد. ابتدا وزن خود محرک الکترومغناطیسی اندازه‌گیری شده و به عنوان صفر ترازوی دیجیتالی فرض می‌شود. با برقراری جریان و در اثر میدان مغناطیسی آهن‌رباهای دائمی تعبیه شده، نیروی لورنتس در جهت x ایجاد شده و باعث اعمال وزن بر ترازوی دیجیتالی می‌شود. مطابق شکل ۹ به ازای جریان‌های مختلف سیم‌پیچ، مقادیر نشان داده شده در ترازو ثبت می‌گردند که در حقیقت نشان‌گر نیروی ایجاد شده توسط محرک الکترومغناطیسی می‌باشند. در شکل ۱۰ نیز منحنی توان مصرفی محاسبه شده از روابط تحلیلی در کنار مقادیر بدست آمده از آزمایش‌های انجام یافته برای نمونه واقعی به ازای مقادیر مختلف شدت جریان ترسیم شده است. لازم به ذکر هست که هر یک از داده‌های تجربی در شکل‌های ۹ و ۱۰ حاصل میانگین پنج مرتبه تکرار هر آزمایش می‌باشد.

با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ ملاحظه می‌شود که اختلاف بین مقادیر محاسبه شده از روابط تحلیلی و نتایج تجربی، با افزایش شدت جریان افزایش یافته است. به نحوی که حداکثر اختلاف نیروی تحلیلی و اندازه‌گیری شده ۲/۵ درصد و حداکثر خطا در توان مصرفی ۳/۵ درصد می‌باشد. دلیل افزایش خطا به ازای افزایش شدت جریان اینگونه توجیه می‌شود که در شدت جریان بالا اتلاف اهمی هم در منبع تغذیه و هم در محرک الکترومغناطیسی افزایش یافته و باعث افزایش خطای اختلاف پتانسیل شده است. همچنین مجذور میانگین مربعات خطاهای داده‌های اندازه‌گیری شده نیرو ۰/۱ و توان مصرفی ۰/۰۳ بدست آمدند. از جمله عوامل ایجاد خطا می‌توان به خطاهای ساخت و مونتاژ و اختلاف بین ماندگاری مغناطیسی نامی و واقعی آهن‌رباهای دائمی اشاره نمود. در نهایت، می‌توان بیان نمود که نتایج تجربی مطابقت خوبی با مقادیر تحلیلی متناظر داشته و نشان از صحت بالای محرک الکترومغناطیسی طراحی و ساخته شده دارد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش مدل‌سازی تحلیلی میدان مغناطیسی و نیروی لورنتس به منظور طراحی و ساخت یک محرک الکترومغناطیسی خطی ارائه گردید. معیار اصلی طراحی به شکل نسبت نیرو بر شدت جریان (ثابت نیرویی) انتخاب شده و تأثیر متغیرهای هندسی و شدت جریان اعمالی به سیم‌پیچ در ثابت نیرویی و اتلاف حرارتی بررسی شد. مدل‌سازی براساس معیار طراحی درحالی‌که اتلاف حرارتی پایین و محرک دارای حداقل وزن و ابعاد هندسی باشد، انجام گرفته و طراحی متناسب برای محرک الکترومغناطیسی پیشنهاد گردید. با توجه به نتایج تحلیلی مناسب‌ترین قطر سیم ۱

میلی آمپر و ۳۵۰ میلی آمپر به ترتیب نیروی‌های حدود ۱ میلی-نیوتن و ۳۵۰ میلی نیوتن ایجاد می‌شود. در این میان، اتلاف حرارتی تولیدی نیز کم و حداکثر ۱ میلی وات می‌باشد. بر اساس نتایج مدل‌سازی تحلیلی، نمونه واقعی محرک الکترومغناطیسی طراحی و ساخته شد. برای صحت‌گذاری محرک الکترومغناطیسی از آزمایش‌های تجربی و مقایسه داده‌های نتایج تجربی و مقادیر تحلیلی متناظر نیرو و توان مصرفی استفاده شد. نتایج نشان داد که مطابقت خوبی بین نتایج تحلیلی و تجربی وجود داشت.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته‌اند.

منابع مالی: تمامی آزمایش‌های عملی مذکور در مقاله در پژوهشکده رانشگرهای فضایی انجام یافته است.

منابع

1- Brauer JR. Magnetic actuators and sensors. John Wiley & Sons; 2006.
 2- Shan G, Li Y, Zhang L, Wang Z, Zhang Y, Qian J. Contributed Review: Application of voice coil motors in high-precision positioning stages with large travel ranges. Review of Scientific Instruments. 2015;86(10):101501.
 3- Kim KH, Choi YM, Gweon DG, Hong DP, Kim KS, Lee SW, Lee MG. Design of decoupled dual servo stage with voice coil motor and linear motor for XY long stroke ultra-precision scanning system. InICMIT 2005: Mechatronics, MEMS, and Smart Materials 2006(Vol. 6040, pp. 273-278). SPIE.
 4- Banik R, Gweon DG. Design and optimization of voice coil motor for application in active vibration isolation. Sensors and Actuators A: Physical. 2007;137(2):236-43.
 5- Janssen JL, Paulides JJ, Encica L, Lomonova E. High-performance moving-coil actuators with double-sided PM arrays: A design comparison. In2010 International Conference on Electrical Machines and Systems 2010 (pp. 1657-1660). IEEE.
 6- Wang X, Yang BT, Zhu Y. Modeling and analysis of a novel rectangular voice coil motor for the 6-DOF fine stage of lithographic equipment. Optik. 2016;127(4):2246-50.
 7- Hsieh CL, Liu CS, Cheng CC. Design of a 5 degree of freedom-voice coil motor actuator for smartphone camera modules. Sensors and Actuators A: Physical. 2020;309:112014.
 8- Kim JY, Ahn D. Analysis of High Force Voice Coil Motors for Magnetic Levitation. InActuators 2020(Vol. 9, No. 4, p. 133). MDPI.
 9- Sabzehmeidani Y, Mailah M, Hing TH, Abdelmaksoud SI. A novel voice-coil actuated mini crawler for In-pipe application employing active force control with iterative learning algorithm. IEEE Access. 2021;9:28156-66.
 10- Bijster RJ. Design, verification and validation of a micropropulsion thrust stand, 2014.
 11- Kokal U. Development of a mili-newton level thrust stand for thrust measurements of electric propulsion systems and UK90 Hall effect thruster (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
 12- Kolbeck J, Porter TE, Keidar M. High precision thrust balance development at the george washington. InProceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference, Georgia, USA 2017.
 13- Brauer JR. Magnetic actuators and sensors. John Wiley & Sons; 2006.
 14- Compter JC, Lomonova EA, Makarovic J. Direct 3-D method for performance prediction of a linear moving coil actuator with various topologies. IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology. 2003;150(4):183-91.
 15- Jansen JW, Janssen JL, Rovers JM, Paulides JJ, Lomonova EA. (Semi-) analytical models for the design

فهرست علائم

نشانه	واحد	توضیح
μ_r	ولت.ثانیه بر آمپر.متر	نفوذ پذیری نسبی
μ_0	ولت.ثانیه بر آمپر.متر	نفوذ پذیری محیط
x	متر	برداری موقعیت نقطه مدنظر
x'	متر	برداری موقعیت منبع بار
M_s	آمپر بر متر	مغناطش آهن‌ربا
ρ_m	آمپر بر متر مربع	چگالی بار حجمی
σ_m	آمپر بر متر	چگالی بار سطحی
$B(x)$	تسلا	میدان مغناطیسی - استاتیکی کلی
B_z	تسلا	مؤلفه z میدان مغناطیسی
A, B, C	متر	ابعاد آهنربا مشخص شده در شکل ۱
R, S, T, U	متر	پارامترهای جایگزین شده عبارات طولانی مطابق روابط ۵
B_r	تسلا	ماندگاری مغناطیسی آهن‌ربا
F	نیوتن	نیروی لورنتس
J	آمپر بر مترمکعب	برداری چگالی حجمی جریان سیم‌پیچ
I	آمپر	برداری جریان سیم‌پیچ
i	آمپر	جریان گذرنده از هر سیم‌پیچ
n	-	تعداد دورهای سیم‌پیچ
w_c	متر	عرض سیم‌پیچ
d_c	متر	قطر هر یک از سیم‌های سیم‌پیچ
h_c	متر	ضخامت سیم‌پیچ
P_c	وات	انرژی تلف شده در واحد زمان
R_c	اهم	مقاومت الکتریکی سیم‌پیچ
ρ_e	اهم متر	مقاومت الکتریکی ویژه
l_c	متر	طول سیم‌پیچ
l_m	متر	طول آهن‌ربا
h_m	متر	ضخامت آهن‌ربا
h_z	متر	فاصله دو آهنربا در راستای عمودی

of high-precision permanent magnet actuators. International Compumag Society Newsletter. 2009;16(2):4-17.

16- Gieras JF. Permanent magnet motor technology: design and applications. CRC press; 2009 Aug 26.

17- Akoun G, Yonnet JP. 3D analytical calculation of the forces exerted between two cuboidal magnets. IEEE Transactions on magnetics. 1984;20(5):1962-4.

18- Jansen JW, Van Lierop CM, Lomonova EA, Vandenput AJ. Modeling of magnetically levitated planar actuators with moving magnets. IEEE Transactions on Magnetics. 2006;43(1):15-25.

19- Tang H, Shi C, Zhang XA, Zhang Z, Cheng J. Pulsed thrust measurements using electromagnetic calibration techniques. Review of Scientific Instruments. 2011;82(3):035118.

20- Selden NP, Ketsdever AD. Comparison of force balance calibration techniques for the nano-Newton range. Review of Scientific Instruments. 2003;74(12):5249-54.