



Introduction, Simulation and Experimental Investigation of a Planar Positioner Based on Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Technology

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hojjat Y.*¹ PhD,

Ghavami Namin B.² MSc

How to cite this article

Hojjat Y, Ghavami Namin B. Introduction, Simulation and Experimental Investigation of a Planar Positioner Based on Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Technology. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(11):2803-2810.

ABSTRACT

The aim of this research is to design and fabricate an actuator, which operates based on reaction forces between current carrying stator coils and magnetic arrays (Halbach arrays) connected to the mover, in order to move a motion stage for positioning objects. Thus, according to the initial and intended position of the mover, current commutation in stator coils is changed in a way that required force for transporting the mover to the desired position is provided. In this research, the integration of two perpendicular synchronous linear motors is utilized in order to create the planar motion. The stator consists of two sets of rectangular coils, which are placed perpendicular to each other. Mover consists of four Halbach arrays, which two Halbach arrays are used for x-axis motion and the other two arrays are used for y-axis motion. First, the analytic relationship between the applied magnetic force and current commutation was introduced. Then, the design parameters such as mover dimensions and stator workspace were determined. Concerning these parameters, dimensions of cubic magnets for Halbach array fabrication were obtained and with respect to array dimensions, the dimensions and number of turns for stator coils were determined. Using these design parameters and commutation equations, the planar motion of the actuator was simulated. The simulation results showed good agreement with the analytical results. Experimental tests were conducted in order to investigate the positioning capabilities and 2 dimensional motion. The precision of the fabricated actuator is 5mm and the minimum response time of actuator is 0.5sec. The minimum position error occurs at 25mm position that is due to the closeness to motor magnetic period.

Keywords Positioning; Magnetic Finite Element Analysis; Synchronous Linear Motor; Halbach array

¹Manufacturing Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

²Applied Design Department, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Tarbiat Modares University Jalale-Ale-Ahmad Street, Nasr Bridge, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 828883364
Fax: +98 (21) 82883364
yhojjat@modares.ac.ir

Article History

Received: May 26, 2019

Accepted: May 26, 2019

ePublished: November 2, 2019

CITATION LINKS

[1] 6D Direct-drive technology for planar motion stages [2] Magnetic positioning device [3] Electro-dynamic planar motor [4] High-precision magnetic levitation stage for photolithography [5] Linear synchronous motors: transportation and automation [6] Modeling ironless permanent-magnet planar actuator structures [7] Transient free convection flow on a vertical surface with an array of large-scale roughness elements [8] Modeling and vector control of a planar magnetic levitator [9] Study on a novel contact-free planar system using direct drive DC coils and permanent magnet [10] An analytical approach to determine coil thickness for magnetically levitated planar motors

معرفی، شبیه‌سازی و بررسی تجربی موقعیت دهنده صفحه‌ای اجسام مبتنی بر تکنولوژی موتور سنکرون خطی با آهن‌ربای دائم

یوسف حجت * PhD

گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

بهزاد قوامی نمین MSc

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، طراحی و ساخت عملکردی است که با استفاده از نیروهای عکس‌العمل میان سیم‌پیچ‌های حامل جریان در استاتور و چیدمانی از آهن‌ربای دائمی (چیدمان هالباخ) متصل به متحرک، جابه‌جایی یک پایه متحرک و موقعیت‌دهی اجسام انجام گیرد. به این ترتیب با توجه به موقعیت اولیه و موقعیت مطلوب توزیع جریان در سیم‌پیچ‌های استاتور به گونه‌ای تغییر می‌کند تا نیروی لازم برای انتقال متحرک به موقعیت مطلوب فراهم شود. در این پژوهش از ترکیب موتورهای سنکرون خطی با آهن‌رباهای دائمی برای ایجاد حرکت در دو بعد استفاده می‌شود. استاتور شامل دو دسته سیم‌پیچ مستطیلی است که به صورت عمود برهم نصب شده‌اند. متحرک شامل چهار چیدمان آهن‌ربا هالباخ تخت است. دو چیدمان برای ایجاد حرکت در راستای x و دو چیدمان دیگر به منظور ایجاد حرکت در راستای y مورد استفاده قرار می‌گیرد. ابتدا رابطه بین نیرو و کاموتاسیون جریان به شکل تحلیلی ارائه شد، سپس پارامترهای طراحی از قبیل ابعاد متحرک و فضای کاری انتخاب شده و متناسب با آنها، ابعاد آهن‌رباهای مورد نیاز برای ساخت چیدمان تعیین شد و با توجه به ابعاد چیدمان، ابعاد و تعداد دور سیم‌پیچ‌ها نیز مشخص شد. با استفاده از پارامترهای طراحی به روابط کاموتاسیون، شبیه‌سازی حرکت صفحه‌ای عملکرد انجام گرفت. نتایج به دست آمده مطابقت زیادی با روابط تحلیلی داشت. آزمایش‌های تجربی برای بررسی قابلیت موقعیت‌دهی و حرکت دویجی متحرک انجام گرفت. دقت عملکرد ساخته شده ۵ میلی‌متر و حداقل زمان پاسخ برای عملکرد ۰/۵ ثانیه است. کمترین مقدار خطا در موقعیت ۲۵ میلی‌متری اتفاق می‌افتد. علت آن می‌تواند در نزدیک بودن این موقعیت به دوره تناوب مغناطیسی موتور باشد.

کلیدواژه‌ها: موقعیت دهی، تحلیل اجزای محدود مغناطیسی، موتور سنکرون خطی، چیدمان هالباخ

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۳

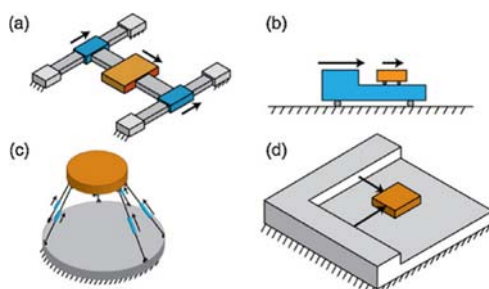
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۵

* نویسنده مسئول: yhojjat@modares.ac.ir

مقدمه

ماشین‌های امروزی معمولاً نیازمند حرکت با چندین درجه آزادی می‌باشند. ۳ روش اصلی در طراحی سیستم‌های موقعیت‌دهی وجود دارد که به ۳ گروه معماری سریال، معماری موازی و معماری تحریک مستقیم تقسیم‌بندی می‌شود. در معماری سریال چندین سیستم یک درجه آزادی (خطی یا دورانی) به شکل سری گردآوری شده‌اند تا باعث ایجاد حرکت چند درجه آزادی با بهبود عملکرد (از نظر دقت و طول کورس) آن می‌شود. در شکل ۱-۱ یک روش بسیار پرکاربرد که در ماشین‌های چند محوره مورد استفاده قرار می‌گیرد، نشان داده شده است. یک حرکت‌دهنده خطی برای حرکت راستای y سبب ایجاد حرکت در راستای y در یک پایه متحرک می‌شود که به یک متحرک متصل شده است که آن را در راستای x حرکت می‌دهد و به این ترتیب یک حرکت خطی در راستای x - y ایجاد می‌شود. ایده استفاده از ۲ پایه متحرک در شکل ۱-۲ برای رسیدن به دقت بالا در راستای کورس بلند از طریق به‌کاربردن محرک با کورس بالا و دقت پایین برای جابه‌جا کردن یک

محرک با دقت بالا و کورس پایین استفاده می‌شود به گونه‌ای که اولی حرکت‌های بزرگ و دیگری حرکت‌های کوچک را انجام می‌دهد. به این ترتیب می‌توان به یک حرکت دقیق در یک کورس بلند رسید. روش طراحی سریال بسیار فراگیر می‌باشد. زیرا پایه‌های متحرک (Stage) با یک درجه آزادی تکنولوژی بسیار ساده و شناخته‌شده‌ترین تکنولوژی موجود می‌باشند. با این حال از آنجایی که هر پایه متحرک با یک درجه آزادی، یک محور با کنترل فعال دارد، ۵ درجه آزادی دیگر به شکل غیرفعال مقید شده‌اند. به این ترتیب پایه متحرک انتهایی به اتصال سری چند جسم متحرک از کمبود صلبیت و خطای تجمعی در حرکت و اینرسی حرکتی بسیار زیاد رنج می‌برد. یک گزینه جایگزین می‌تواند معماری موازی باشد (شکل ۱-۳) که در آن هر المان حرکتی موازی با پایه متحرک انتهایی متصل شده‌اند. این روش به علت پتانسیل حرکتی چندمحوره، به یکی از زمینه‌های پژوهشی پرفرودار تبدیل شده است. ولی این روش مقبولیت زیادی در صنعت پیدا نکرده است که علت آن رنج حرکتی کم و نسبت انتقال متغیر و صلبیت وابسته به مکان در فضای کاری می‌باشد. روش‌های سریال و موازی قابلیت ترکیب شدن با یکدیگر را دارا می‌باشند (مانند پایه متحرکی با حرکت یا (Yaw) با دامنه بزرگ). معماری ایده‌آل، روش تحریک مستقیم می‌باشد (شکل ۱-۴) که در آن پایه متحرک، بدون المان‌های حرکتی واسطه بوده و در آن تمام نیروهای عملکرد به صورت مستقیم به متحرک اعمال می‌گردد. در پایه متحرک خطی مزیت روش تحریک مستقیم نسبت به پیچ و مهره به خوبی درک گردیده است که از جمله آن‌ها عبارت‌اند از: بهبود شتاب، سرعت و صحت این دستگاه‌ها. این مزیت در مورد پایه‌های حرکتی چند درجه آزادی نیز صادق می‌باشد. ولی این محرک‌ها به طور گسترده مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. از نظر مفهومی سیستم‌های ۶ درجه آزادی با تحریک مستقیم نیازی به یاتاقان‌های راهنما و غیره ندارند. بنابراین مزایای اضافی از قبیل اصطکاک صفر جدایی ذاتی از ارتعاشات محیط اطراف را دارا می‌باشند[۱].



شکل ۱ معماری طراحی پایه متحرک‌های حرکتی: (a) سری برای چند درجه آزادی، (b) سری برای کورس با طول زیاد، (c) معماری موازی، (d) تحریک مستقیم^[۱]

در سال ۱۹۶۸ سویر^[۲] اولین موتور صفحه‌ای را بر اساس معماری موتور پله‌ای طراحی و تولید نمود و این موتورها به عنوان موتورهای سویر شناخته می‌شوند. این موتور دارای ۳ درجه آزادی بود که ۲ درجه مربوط به حرکت در راستای محور x و y و یک درجه آزادی مربوط به دوران حول محور z می‌باشد. به منظور تعلیق متحرک، از یاتاقان هوایی استفاده شد. از جمله معایب موتورهای سویر دقت پایین در موقعیت‌دهی می‌باشد ولی مزیت آن‌ها در عدم نیاز به فیدبک برای کنترل است. به منظور بهبود عملکردی این موتورها روابط الکترومکانیکی حاکم باید استخراج شوند. کوپتر و همکاران^[۳] رابطه بین نیروی عمودی و افقی وارد بر متحرک و

شار، سادگی و سراسر بودن مکانیزم کاموتاسیون می‌باشد. به علاوه یک وابستگی نمایی برای شار مغناطیسی نسبت به موقعیت عمودی x می‌توان فرض کرد. به این ترتیب معادله شار مغناطیسی در حالت بسیار نزدیک به واقعیت به صورت رابطه (۱) خواهد بود.

$$\varphi_m(x, z) = \widehat{\varphi}_m e^{-\frac{\alpha z}{\tau}} \sin\left(\frac{\pi x}{\tau}\right) \quad (1)$$

در این رابطه $\widehat{\varphi}_m$ بیشینه میدان مغناطیسی و α ضریب هندسی نامیده می‌شود. برای یک سیم‌پیچ رابطه نیروهای F_x و F_z و شدت جریان $i(t)$ با استفاده از معادله ولتاژ و توان الکتریکی به دست می‌آید[3]:

$$F_x = \frac{\partial \varphi_m(x, z)}{\partial x} i(t) \quad (2)$$

$$F_z = \frac{\partial \varphi_m(x, z)}{\partial z} i(t) \quad (3)$$

با استفاده از این روابط ضرایب K_x و K_z به این صورت تعریف می‌شوند:

$$K_z = \frac{F_z}{i(t)} = \frac{\partial \varphi_m(x, z)}{\partial z} \quad (4)$$

$$K_x = \frac{F_x}{i(t)} = \frac{\partial \varphi_m(x, z)}{\partial x} \quad (5)$$

با در نظر گرفتن توزیع شار مغناطیسی در چیدمان هالباخ در رابطه (۱) ضرایب به صورت روابط (۶) و (۷) به دست می‌آید.

$$K_x = \frac{\pi}{\tau} \widehat{\varphi}_m e^{-\frac{\alpha z}{\tau}} \cos\left(\frac{\pi x}{\tau}\right) = \widehat{K}_x(z) \cos\left(\frac{\pi x}{\tau}\right) \quad (6)$$

$$K_z = \frac{-\alpha}{\tau} \widehat{\varphi}_m e^{-\frac{\alpha z}{\tau}} \sin\left(\frac{\pi x}{\tau}\right) = \widehat{K}_z(z) \sin\left(\frac{\pi x}{\tau}\right) \quad (7)$$

$\widehat{K}_x$ و $\widehat{K}_z$ علاوه بر ثوابت α و τ و $\widehat{\varphi}_m$ فقط تابعی از z می‌باشد. عملگرهای خطی شامل ۳ سیم‌پیچ می‌باشد. هر سیم‌پیچ، ثابت نیروی منحصربه‌خود را دارد که به موقعیت واقعی سیم‌پیچ نسبت به چیدمان آهن‌ربایی بستگی دارد که این ثوابت برای هر کدام از سیم‌پیچ‌ها ($j=1, 2, 3$) عبارت است از:

$$K_{xj} = \widehat{K}_x(z) \cos\left(\frac{\pi x}{\tau} + \theta_j\right) \quad (9)$$

$$K_{zj} = \widehat{K}_z(z) \sin\left(\frac{\pi x}{\tau} + \theta_j\right) \quad (10)$$

که در آن θ_j زاویه فاز سیم‌پیچ نسبت به چیدمان مغناطیسی می‌باشد. با فرض اینکه موقعیت عملگرهای خطی با موقعیت افقی سیم‌پیچ یکی است. به علت استفاده از عملگر خطی ۳ فاز- ۴ قطب، زاویه فاز برای هر سیم‌پیچ به صورت (۱۱) می‌باشد:

$$\theta_j = \frac{4\pi}{3} (j - 1) \quad (11)$$

چون هر سیم‌پیچ نسبت به سیم‌پیچ مقابل به اندازه $\frac{4\pi}{3}$ در راستای جهت افقی فاصله دارد.

ثابت نیروی سیم‌پیچ‌ها در هنگام حرکت چیدمان مغناطیسی تغییر می‌کند. به منظور ایجاد یک نیروی ثابت، جریان در داخل سیم‌پیچ‌ها به تناسب تغییر می‌کند. به این صورت که آمپلی‌فایر عملگر خطی باید جریان i_j را طبق رابطه (۱۲) ایجاد نماید.

$$i_j = \widehat{I} \sin\left(\frac{\pi x}{\tau} + \theta_j + \Phi\right) \quad (12)$$

که در آن $\widehat{I}$ دامنه جریان گذرنده از سیم‌پیچ و Φ نشان‌دهنده نسبت مؤلفه‌های نیروها می‌باشد. این جریان از طریق محاسبه نیروهای کلی که توسط عملگر خطی تولید می‌شود، محاسبه می‌شود که با جمع کردن نیروهای ایجاد شده توسط سیم‌پیچ‌ها به دست می‌آید.

سیگنال جریان اعمال شده به سیم‌پیچ‌ها را در یک موتور سنکرون خطی با آهن‌ربای دائم با استفاده از معادل‌سازی توان‌های الکتریکی و مکانیکی به دست آوردند. آن‌ها در این روابط از در نظر گرفتن گشتاور وارد بر متحرک صرف نظر کردند. در موتورهای سنکرون خطی با آهن‌ربای دائمی، توزیع یکنواخت و هارمونیک شار مغناطیسی در جلوگیری از پرش نیرو و یکنواختی و دقت حرکتی از اهمیت بالایی برخوردار است. کیم و ترمپر[4] در سال ۱۹۹۸ نشان دادند، چیدمان هالباخ که از کنار هم قرار گرفتن مکعب‌های آهن‌ربایی با قطبیت دوران یافته به اندازه ۹۰ درجه نسبت به هم ساخته می‌شود، دارای توزیع شار به صورت سینوسی می‌باشند.

به منظور صحت‌سنجی روابط و پارامترهای به دست آمده در طراحی می‌توان از روش شبیه‌سازی با استفاده از المان محدود مبتنی بر تئیسور تنش ماکسول استفاده کرد[5]. در اکثر پژوهش‌ها[6-8] این روش فقط برای اندازه‌گیری نیروی تولید شده توسط استاتور و توزیع شار، مورد استفاده قرار گرفته و تا کنون اثرات سینماتیکی این نیروها بر متحرک، مورد بررسی قرار نگرفته است. در این زمینه بیشتر از آزمایش‌های تجربی بهره گرفته شده که هزینه‌بر هستند[9]. این امر در پژوهش‌هایی که به منظور بهینه‌سازی دقت و توان مصرفی سیستم‌های طراحی شده صورت می‌گیرد[10]، ضروری‌تر به نظر می‌رسد.

در پژوهش حاضر ضمن ارائه روابط حاکم بر نیرو و کاموتاسیون (Commutation) جریان در موتورهای سنکرون خطی با آهن‌ربای دائم تحلیل حرکتی و موقعیت‌دهی با استفاده از روش المان محدود در این نوع موتور انجام گرفته است و مطابقت خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و روابط تحلیلی مشاهده شده است. در ادامه آزمایشات تجربی برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی ارائه می‌شود.

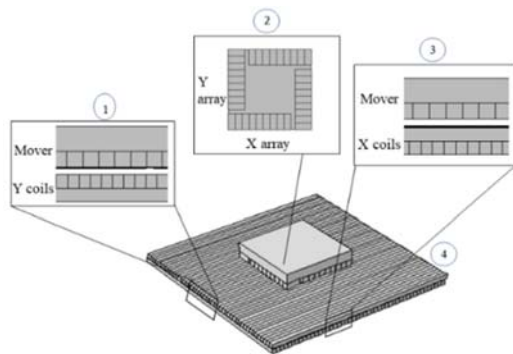
روابط حاکم

در شکل ۲ نمایی از یک موتور سنکرون خطی با آهن‌ربای دائم و نیروهای وارد بر آن مشاهده می‌شود. در اینجا آهن‌ربا، متصل به متحرک در نظر گرفته شده است. موتور مورد بررسی در این مقاله موتور ۳ فاز با ۴ قطب می‌باشد. چیدمان آهن‌ربایی مورد استفاده چیدمان هالباخ بوده طول هر قطب برابر τ می‌باشد. طول هر تناوب مکانی (فاصله هر نقطه تا نقطه مشابه) نیز برابر λ می‌باشد. سیم‌پیچ‌ها با شماره‌های ۱، ۲ و ۳ روی شکل مشخص شده‌اند. کل نیروی ایجاد شده توسط سیم‌پیچ‌ها نیز که به مرکز جرم وارد می‌شود، در این شکل کشیده شده است که شامل نیروهای F_x و F_z می‌باشد. برای خنثی کردن نیروی جاذبه بوده و برای بالابردن عملگر می‌باشد و F_x نیز مؤلفه مماسی بوده که حرکت در راستای x را ایجاد می‌کند. گشتاور کلی ایجاد شده حول مرکز جرم آن توسط M_y نشان داده شده است. اگرچه چیدمان مغناطیسی و سیم‌پیچ‌های عملگر در راستای محور y در نظر گرفته نشده‌اند، از اثرات آنها صرف نظر شده است. نتیجه این بخش برای موتورهای صفحه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۳ نیز نحوه چیدمان آهن‌ربا در چیدمان هالباخ ایده‌آل و چیدمان هالباخ تکه‌ای نشان داده شده است. به علت فرآیند پیچیده ساخت یک چیدمان هالباخ ایده‌آل، در عمل از چیدمان‌های مغناطیسی برای تخمین حالت ایده‌آل استفاده می‌شود.

شار مغناطیسی ایجاد شده توسط چیدمان آهن‌ربایی نیز با دوره تناوب λ هارمونیک می‌باشد. یکی از مزایای هارمونیک خالص بودن

حامل جریان می‌باشد. در نوع دوم سیم‌پیچ حامل جریان متصل به متحرک بوده و قسمت ساکن عملگر (استاتور) متشکل از آهن‌رباهای دائم می‌باشد. یکی از معایب عملگرهای صفحه‌ای سیم‌پیچ متحرک، در مقایسه با عملگرهای آهن‌ربا متحرک، سیم‌های حامل جریان هستند که باید به متحرک متصل شوند که در این صورت دینامیک متحرک را تحت تاثیر قرار می‌دهد^[6]. به این ترتیب عملگر مورد بررسی در این مقاله عملگر آهن‌ربا متحرک می‌باشد.

در شکل ۴ نمایی از عملگر طراحی شده به همراه اجزای مختلف آن آورده شده است. مشخصات پارامترهای مختلف طراحی در جدول ۱ ذکر گردیده است.



شکل ۴) عملگر موقعیت‌دهی طراحی شده: (۱) موتور خطی برای حرکت Y، (۲) متحرک با چیدمان‌های هالباخ، (۳) موتور خطی برای حرکت X، (۴) استاتور و سیم‌پیچ‌ها

جدول ۱) مشخصات طراحی

پارامتر	راستای X	راستای Y
λ	۲۵/۴ mm	۲۵/۴ mm
α	π	π
τ	۱۲/۷ mm	۱۲/۷ mm
فاصله هوایی	۸ mm	۳ mm
کورس حرکتی	۵۵ mm	۵۵ mm

شبیه‌سازی

در این قسمت به شبیه‌سازی دستگاه موقعیت‌دهی ۲ بعدی با استفاده از میدان‌های مغناطیسی پرداخته می‌شود. نرم‌افزار مورد استفاده، نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک (Comsol Multiphysics) می‌باشد. این نرم‌افزار قابلیت شبیه‌سازی کوپله را دارا می‌باشد. در این بخش ابتدا توزیع میدان مغناطیسی در یک چیدمان آهن‌ربایی هالباخ مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این مرحله از شبیه‌سازی استقلال از مش مورد بررسی قرار گرفته است برای این منظور تغییرات چگالی شار مغناطیسی در مختصات $(-5, -5)$ از مرکز چیدمان را نسبت به اندازه مش مورد استفاده مورد بررسی قرار داده و نتایج آن در نمودار ۱ نشان داده شده است و با توجه به نمودار اندازه مش ۲/۸ میلی‌متر انتخاب گردید. هندسه مورد نظر با مش انتخاب شده در شکل ۵ نشان داده شده است. در گام بعدی شبیه‌سازی، با استفاده از ترکیب ۳ فیزیک میدان‌های مغناطیسی، مش متحرک و دینامیک چند جسمی، حرکت متحرک عملگر در راستای افقی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت رابطه بین شدت جریان و پارامترهای سینماتیکی عملگر مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{x1} & K_{x2} & K_{x3} \\ K_{z1} & K_{z2} & K_{z3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \quad (13)$$

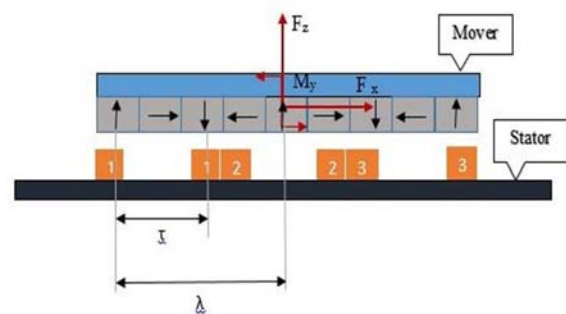
$$\frac{3}{2} \hat{I} \begin{bmatrix} \hat{K}_x \sin(\Phi) \\ \hat{K}_z \cos(\Phi) \end{bmatrix}$$

زاویه Φ و جریان $\hat{I}$ مورد نیاز برای تولید نیروی مورد نظر در راستای افقی و عمودی از روابط (۱۴) و (۱۵) به دست می‌آید.

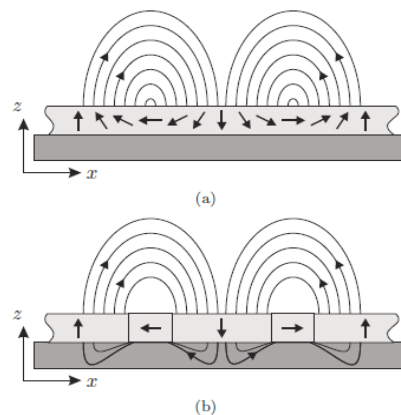
$$\hat{I}(t) = \frac{2}{3} \sqrt{\left(\frac{F_x(t)}{\hat{K}_x}\right)^2 + \left(\frac{F_z(t)}{\hat{K}_z}\right)^2} \quad (14)$$

$$\Phi(t) = \arctan\left(\frac{F_x(t)}{\hat{K}_x} \frac{\hat{K}_z}{F_z(t)}\right) \quad (15)$$

نتیجه حاصل از استخراج این معادلات به این شرح است: با این فرض که میدان مغناطیسی توزیع هارمونیک دارد، نیروی ایجاد شده توسط عملگر را می‌توان به ۲ مؤلفه افقی و عمودی تجزیه (Decoupled) کرد. هر ۲ مؤلفه را می‌توان به صورت مستقل تنظیم کرد که یک وضعیت مطلوب در زمینه کنترل عملگر می‌باشد. به این ترتیب با مشخص بودن پروفیل حرکتی موقعیت‌دهنده به ترتیب، شتاب و نیروهای لازم برای دستیابی به حرکت مطلوب تعیین شده و با کمک آن‌ها می‌توان $\hat{I}(t)$ و $\Phi(t)$ را تعیین کرد.



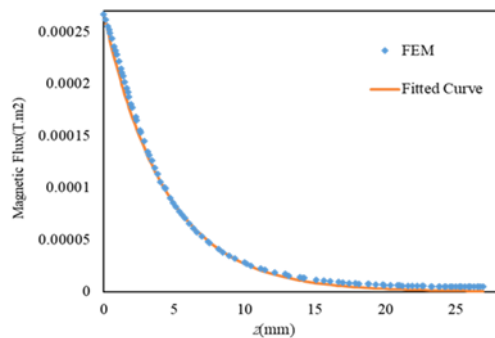
شکل ۲) موتور خطی سنکرون با آهن‌ربای دائم ۳ فاز- ۴ قطب



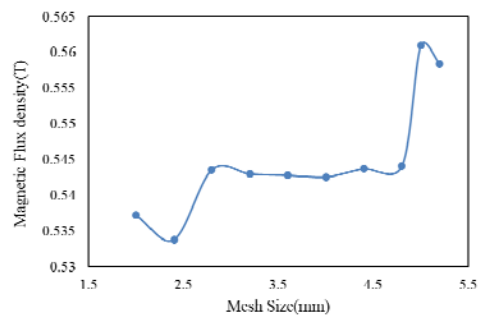
شکل ۳) چیدمان هالباخ (a) ایده‌آل، (b) تکه‌ای

طراحی

یکی از مراحل طراحی موقعیت‌دهنده، تعیین نوع متحرک و استاتور می‌باشد. عملگرهای صفحه‌ای مغناطیس دائم به ۲ دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: عملگرهای سیم‌پیچ متحرک و عملگرهای آهن‌ربا متحرک. در نوع اول عملگرهای صفحه‌ای متحرک دربردارنده آهن‌رباهای دائم می‌باشد و قسمت ساکن دربرگیرنده سیم‌پیچ‌های



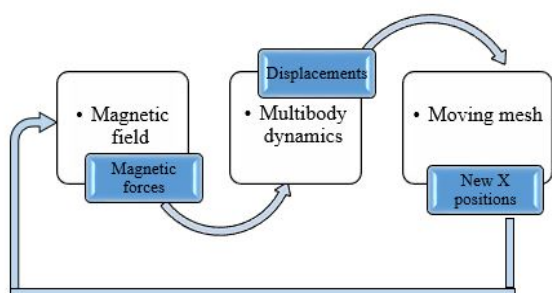
نمودار ۳) شار مغناطیسی نسبت به ارتفاع از سطح چیدمان در $x = 18/2 \text{ mm}$



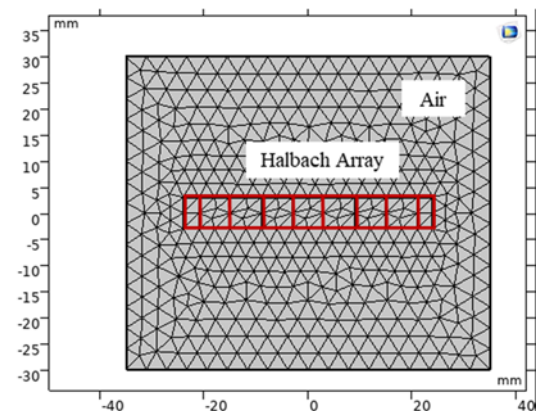
نمودار ۱) وابستگی چگالی شار مغناطیسی به اندازه مش در نقطه (۵،-۵) میلی‌متر

شبیه‌سازی حرکت

در این مرحله از شبیه‌سازی، از محیط‌های «میدان مغناطیسی» (Magnetic field) و «دینامیک اجسام» (Multibody dynamics) نرم‌افزار کامسول به صورت هم‌زمان استفاده می‌شود. نحوه ارتباط این محیط‌ها در نرم‌افزار و متغیرهای مسئله به صورت شماتیک در شکل ۶ نشان داده شده است. به منظور ساده‌سازی، فرض‌هایی در نظر گرفته شده است که عبارت‌اند از: لحاظ کردن فاصله هوایی و نبود اصطکاک بین متحرک و استاتور و صرف نظر کردن از نیروهای جابه‌جایی در راستای عمود بر استاتور. به علاوه تمام اجزا، صلب فرض شده‌اند و از تغییر شکل آن‌ها صرف نظر شده است. در نمودار ۴ یک مسیر مستطیل‌شکل برای شبیه‌سازی حرکت در نظر گرفته شده است. ابعاد مستطیل مورد نظر 20×10 میلی‌متر می‌باشد. مسیر مورد نظر به شکل فرامین پالس نیرو و به تبع آن پالس جریان به سیم‌پیچ‌ها اعمال می‌شود تا حرکت مورد نظر توسط متحرک صورت پذیرد. پروفیل حرکتی در نظر گرفته شده برای موقعیت‌دهی از ۲ مرحله حرکتی با شتاب ثابت تشکیل شده است: در مرحله اول حرکت، جسم از حالت سکون یک حرکت تندشونده را آغاز می‌کند. این مرحله تا زمانی که متحرک نیمی از مسیر حرکت را طی کند ادامه می‌یابد. در مرحله دوم متحرک با شتاب قرینه مرحله اول به صورت کندشونده به مسیر خود ادامه داده و در موقعیت مورد نظر متوقف می‌شود. با مشخص شدن نحوه شتاب‌گیری برای مسیر برگشت همین روند در پیش گرفته می‌شود. با توجه به نمودارهای ۵ و ۶، مشاهده می‌شود خطای شبیه‌سازی موقعیت‌دهی در راستای X برای مسیر رفت ۵۲٪ و مسیر برگشت ۱۶/۶٪ می‌باشد. این مقادیر برای راستای Y به ترتیب ۵۰٪ و ۲۸/۶٪ می‌باشد. این امر نشان‌دهنده نیاز به استفاده از کنترل‌کننده برای کاهش خطای ماندگار سیستم می‌باشد.



شکل ۶) شماتیک روند شبیه‌سازی حرکت متحرک



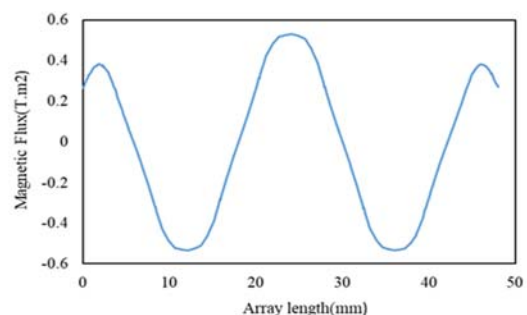
شکل ۵) مش انتخاب‌شده برای شبیه‌سازی شار مغناطیسی چیدمان

توزیع میدان مغناطیسی در چیدمان هالباخ

از جمله ویژگی‌های چیدمان هالباخ هارمونیک یا سینوسی بودن توزیع چگالی شار مغناطیسی در قسمت قوی‌تر چیدمان می‌باشد. طبق رابطه ارائه شده در قسمت ۲ برای توزیع شار مغناطیسی در یک طرف چیدمان آهن‌ریا این شار به صورت سینوسی و هارمونیک است و دوره تناوب آن برابر دوره تناوب چیدمان می‌باشد این مطلب در نمودار ۲ نشان داده شده است. از طرفی با فاصله گرفتن از سطح آهن‌ریاهای چیدمان هالباخ، این شار مغناطیسی به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند این موضوع در نمودار ۳ برای 2 mm $x =$ نشان داده شده است. به این ترتیب با برازش منحنی بر نتایج به دست آمده می‌توان مقدار ضریب هندسی را به دست آورد. معادله منحنی برازش شده با الگوریتم لونبرگ-مارکوات (Levenberg-Marquardt) به دست می‌آید:

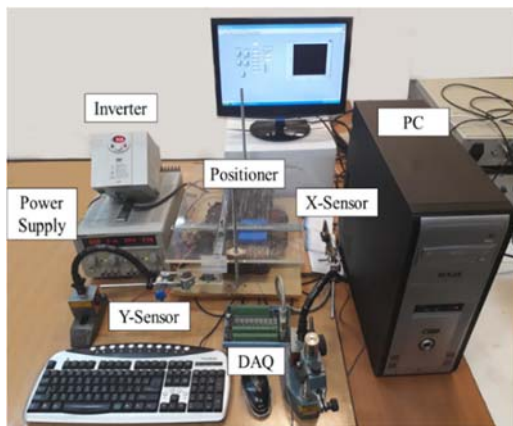
$$\varphi_m(z) = \widehat{\varphi}_m e^{-0.2298z} \quad (16)$$

که در آن $\widehat{\varphi}_m = 0.000381 \text{ T.m}^2$ به این ترتیب مقدار به دست آمده برای ضریب هندسی با این روش $\alpha = 2/92$ می‌باشد که خطای مقدار آن نسبت به مقدار طراحی شده برابر ۷٪ می‌باشد.

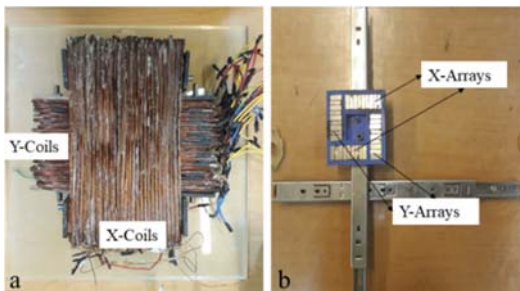


نمودار ۲) شار مغناطیسی در طول چیدمان در $z = 2 \text{ mm}$ نسبت به سطح چیدمان

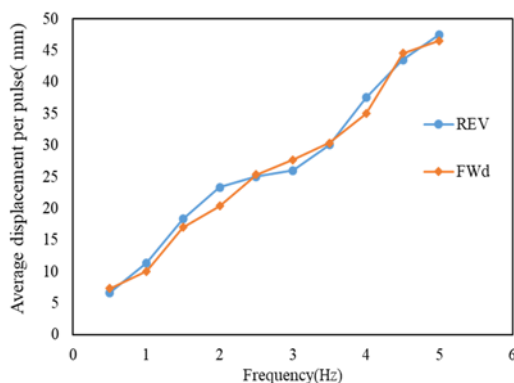
توقف فرمان استفاده شد. ولتاژ مورد نیاز برای تحریک عملگر به صورت ۳ فاز می‌باشد. به منظور کنترل سرعت متحرک و نیروی وارد بر آن از یک عدد اینورتر استفاده گردید. اینورتر مورد استفاده در این عملگر، اینورتر LS IC50015 می‌باشد. حداکثر توان خروجی این اینورتر ۲/۵ کیلووات و جریان خروجی اینورتر ۸ آمپر می‌باشد. در پژوهش حاضر از مود کنترلی ولتاژ به فرکانس ثابت استفاده شد. به منظور خواندن خروجی سنسور، از کارت داده‌برداری ADVANTECH 1716 استفاده شد. سرعت داده‌برداری این کارت ۲۵۰۰۰۰ نمونه بر ثانیه می‌باشد. به منظور کاهش نویز در داده‌های به‌دست‌آمده از یک فیلتر میانگین‌گیری با نرخ میانگین‌گیری ۳۰ داده استفاده شده است. در دسته بعدی از آزمایش‌ها فرمان‌های متوالی موقعیت‌دهی پله‌ای اعمال گردید. در این آزمایش فرمان پله‌ای حرکت از صفر به ۱۰ میلی‌متر، از ۱۰ به ۲۵ میلی‌متر و از ۲۵ به ۴۵ میلی‌متر به ازای فرکانس‌های مختلف اعمال گردید. هدف از این آزمایش بررسی قابلیت موقعیت‌دهی نسبی سیستم می‌باشد.



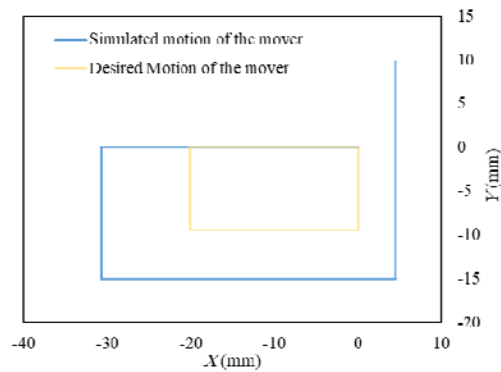
شکل (۷) مجموعه آزمایش



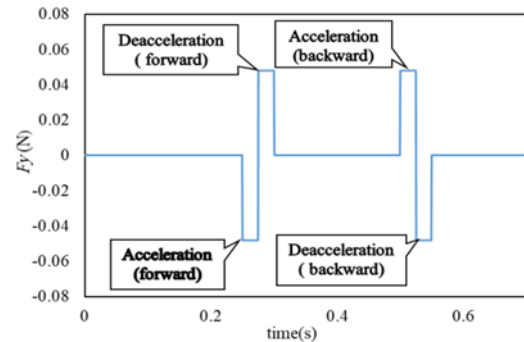
شکل (۸) (a) سیم‌پیچ‌های استاتور، (b) متحرک



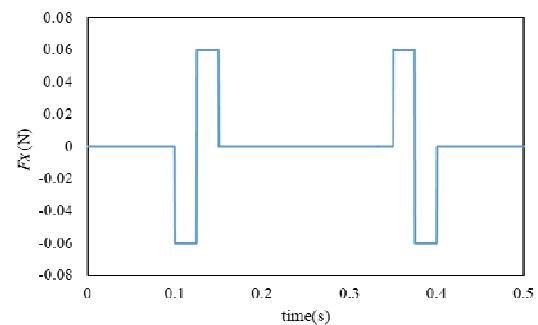
نمودار (۹) جابجایی به ازای پالس حرکتی برای فرکانس‌های مختلف برای حالت رفت و برگشت



نمودار (۱۰) فرمان حرکت مستطیلی اعمال شده به موقعیت‌دهنده و پاسخ آن



نمودار (۱۱) پالس نیرو برای حرکت در راستای X در پروفیل حرکت مستطیلی



نمودار (۱۲) پالس نیرو برای حرکت در راستای Y در پروفیل حرکت مستطیلی

بررسی تجربی

مجموعه آزمایش مورد نظر در شکل ۷ آورده شده است. در شکل ۸ نیز چیدمان آهن‌رباهای متصل به متحرک و سیم‌پیچ‌های استاتور نشان داده شده است. در این مجموعه به منظور جلوگیری از زاویه‌گرفتن استاتور و از بین بردن اثر پخش نیرو در اندازه‌گیری‌ها، از ۲ عدد ریل متصل به هم، برای متحرک استفاده شد. سری اول آزمایش‌ها به منظور اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی خطی در راستای استاتور X به ازای فرکانس‌های مختلف برای کوتاه‌ترین پالس روشنی و خاموشی قابل دسترس برای اینورتر (۵/۰ ثانیه)، صورت گرفت. در این آزمایش‌ها برای هر فرکانس ۳ پالس روشنی و خاموشی اعمال گردید و میانگین جابه‌جایی برای این ۳ پالس برای هر فرکانس اندازه‌گیری شد. این آزمایش یک بار برای مسیر رفت و یک بار برای مسیر برگشت انجام گرفت. نتایج به‌دست‌آمده در نمودار ۹ آورده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت با افزایش فرکانس میزان جابه‌جایی به ازای هر پالس افزایش می‌یابد. به منظور موقعیت‌دهی کنترل‌شده از سنسور مادون قرمز Sharp GP2D120 برای خواندن میزان جابه‌جایی و فیدبک برای

شبیه‌سازی ابتدا سینوسی‌بودن توزیع چگالی شار مغناطیسی در سمت قوی چیدمان هالباخ صحت‌سنجی گردید. در ادامه صحت روابط کاموتاسیون جریان برای ایجاد نیروهای معین مورد بررسی قرار گرفت و قابلیت موقعیت‌دهی با اعمال سیگنال‌های مناسب مورد امکان‌سنجی قرار گرفت که مطابقت خوبی با روابط تئوری داشت. در بررسی تجربی به منظور راه‌اندازی عملگر ساخته‌شده از یک اینورتر ۳ فاز با مود کنترلی ولتاژ به فرکانس ثابت استفاده گردید. به منظور موقعیت‌دهی و اعمال فرامین کنترلی به اینورتر از یک برنامه گرافیکی و کارت رابط اینورتر استفاده شد. به منظور پسخوراند موقعیت برای اعمال فرمان توقف اینورتر و ثبت اطلاعات مربوط به موقعیت، از سنسور جابه‌جایی مادون قرمز استفاده شد. نتایج آزمایشات نشان می‌دهند، به منظور رسیدن به موقعیت دقیق‌تر، فرکانس پایین مناسب‌تر است. زیرا احتمال فراجش از مقدار مرجع را کاهش می‌دهد ولی این امر باعث کندترشدن پاسخ سیستم و حرکت بریده بریده متحرک می‌شود. عوامل ایجاد خطا در سیستم مواردی از قبیل پرش نیرو ناشی از خطاها در ابعاد سیم‌پیچ‌ها، ترازنبودن، سیم‌پیچ‌های استاتور و هارمونیک‌های موجود در چیدمان هالباخ می‌باشد. از مشخصات عملگر ساخته شده، دقت ۵ میلی‌متر و حداقل زمان پاسخ ۰/۵ ثانیه می‌باشد. کمترین مقدار خطا در ۲۵ میلی‌متری اتفاق می‌افتد که می‌تواند به نزدیک‌بودن موقعیت به دوره تناوب مغناطیسی موتور نسبت داده شود. این عملگر به علت استفاده از چپش عمود بر هم استاتورهای ۲ موتور سنکرون عمود بر هم می‌تواند با حذف راهنماهای صلیبی‌شکل، امکان ایجاد حرکت ۲ بعدی را فراهم آورد. از جمله معایب این سیستم پاسخ نامطلوب اینورتر و دقت نسبتاً پایین و نویز بالای سنسورهای مادون قرمز علی‌رغم محدوده اندازه‌گیری بزرگ آن‌هاست. در صورت استفاده از سنسورهای دقیق‌تر با پاسخ فرکانسی بالا همچنین اینورترهایی با زمان پاسخ پایین و قابلیت کنترل مستقل سیگنال کنترلی آن‌ها می‌توان قابلیت تعلیق مغناطیسی متحرک و حرکت کاملاً بدون تماس را فراهم نمود.

تشکر و قدردانی: نویسندگان لازم می‌دانند از زحمات و راهنمایی‌های دکتر حسام صادقیان فیروزآباد در انجام پژوهش تشکر و قدردانی نمایند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان مقاله مذکور با اعلام موافقت خود برای ارسال مقاله به نشریه مهندسی مکانیک مدرس تعهد نمودند که این مقاله در زمان ارسال برای این نشریه، در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی در حال بررسی نبوده و تا تعیین تکلیف قطعی در این نشریه برای هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی دیگر ارسال نشده و آقای دکتر یوسف حجت را به عنوان نویسنده رابط معرفی نموده و وکالت تام ایشان در کلیه امور مربوط با این مقاله نزد نشریه مهندسی مکانیک مدرس پذیرفته‌اند.

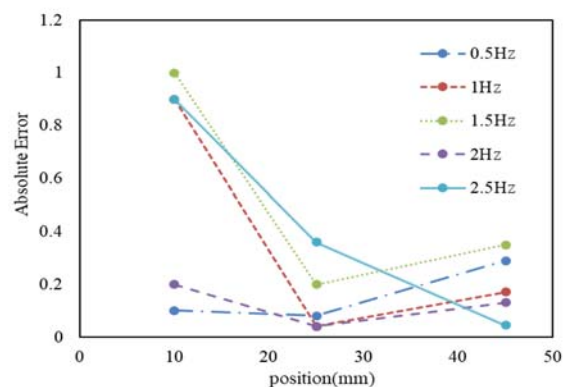
تعارض منافع: این مقاله از پایان‌نامه انجام‌شده توسط بهزاد قوامی نمین به راهنمایی دکتر یوسف حجت استخراج گردیده است.

سهم نویسندگان: یوسف حجت (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ بهزاد قوامی نمین (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)

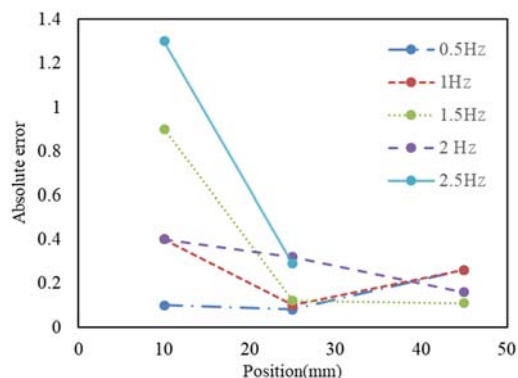
منابع مالی: از بودجه پژوهشی در نظر گرفته‌شده توسط دانشگاه تربیت مدرس برای پایان نامه تحت عنوان "طراحی و ساخت موقعیت‌دهنده دوبعدی با استفاده از میدان‌های مغناطیسی" انجام‌شده توسط بهزاد قوامی نمین به راهنمایی دکتر یوسف حجت تأمین شده است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این مرحله و طول کورس قابل دسترس توسط عملگر، فرکانس‌های ۰/۵ تا ۲/۵ هرتز برای بررسی موقعیت‌دهی با رزولوشن بالا انتخاب گردید. از سایر فرکانس‌ها به علت اینکه متحرک را از فضای کاری با یک پالس حرکتی خارج می‌کنند، صرف نظر شد. به منظور انجام موقعیت‌دهی، ۳ موقعیت ۱۰، ۲۵ و ۴۵ میلی‌متری در نظر گرفته شد. نحوه موقعیت‌دهی به این صورت است که در برنامه نوشته‌شده برای کنترل حرکت، شرطی اعمال شد که اعمال پالس حرکت با رسیدن متحرک به موقعیت مورد نظر قطع شود. نتایج مربوط به آن‌ها در نمودار ۸ و نمودار ۹ آورده شده است.

برای موقعیت‌های نزدیک مبدأ، قدر مطلق خطای حالت ماندگار در فرکانس‌های ۱، ۱/۵ و ۲/۵ هرتز، بزرگ می‌باشد. در مجموع فرکانس‌های پایین‌تر برای موقعیت‌دهی دقیق‌تر، مناسب‌تر می‌باشند؛ زیرا به ازای چند سیکل زمانی، متحرک به آرامی به موقعیت مورد نظر می‌رسند. با این وجود سرعت پاسخ سیستم کاهش می‌یابد.



نمودار ۸) قدر مطلق خطا نسبت به موقعیت مرجع به ازای فرکانس‌های مختلف



نمودار ۹) قدر مطلق خطا برحسب مکان به ازای فرکانس‌های مختلف برای حرکت پله‌ای

نتیجه‌گیری

طراحی و شبیه‌سازی و بررسی عملگر موقعیت‌دهی صفحه‌ای بر اساس ترکیب ۲ موتور سنکرون خطی ارائه گردید. در این عملگر متحرک شامل ۴ چیدمان آهن‌ربایی هالباخ تشکیل شده و استاتور شامل سیم‌پیچ‌های ۳ فاز می‌باشند. از بین انواع موتورهای سنکرون با استاتور بدون شیار در نظر گرفته شد. علت استفاده از چیدمان هالباخ، داشتن توزیع میدان سینوسی با هارمونیک‌های کم می‌باشد. در ادامه با استفاده از معادله ولتاژ، روابط مربوط به کاموتاسیون جریان و نیروهای وارد بر عملگر استخراج شد. در فصل

levitation stage for photolithography. Precision Engineering. 1998;22(2):66-77.

5- Gieras JF. Linear synchronous motors: transportation and automation. 2nd Edition. Boca Raton: CRC press; 2012. p. 155.

6- de Boeij J, Lomonova E, Vandenput A. Modeling ironless permanent-magnet planar actuator structures. IEEE Transactions on Magnetics. 2006;42(8):2009-2016.

7- Jansen JW, van Lierop CMM, Lomonova EA, Vandenput AJA. Magnetically levitated planar actuator with moving magnets. IEEE Transactions on Industry Applications. 2008;44(4):1108-1115.

8- Kim WJ, Trumper DL, Lang JH. Modeling and vector control of a planar magnetic levitator. IEEE Transactions on Industry Applications. 1998;34(6):1254-1262.

9- Jung KS, Baek YS. Study on a novel contact-free planar system using direct drive DC coils and permanent magnet. IEEE/ASME Transaction in Mechatronics. 2002;7(1):35-43.

10- Zhang S, Dang X, Wang K, Huang J, Yang J, Zhang G. An analytical approach to determine coil thickness for magnetically levitated planar motors. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2017;22(1):572-580.

فهرست علائم

نیروی الکترومغناطیسی (N)	F
گشتاور حول محور y (N.m)	M_y
شدت جریان (A)	I
علائم یونانی	
شار مغناطیسی (Tm^2)	φ_m
دوره تناوب مغناطیسی (mm)	λ
گام مغناطیسی (s)	τ
اختلاف فاز در ولتاژ ۳ فاز	θ
اختلاف فاز سیگنال نیرو	ϕ
ضریب هندسی	α

منابع

- 1- Lu X, Usman I. 6D Direct-drive technology for planar motion stages. CIRP Annals. 2012;61(1):359-362.
- 2- Sawyer BA. Magnetic positioning device. US Patent. 1968;(3376578):1-2.
- 3- Compter IrJC. Electro-dynamic planar motor. Precision Engineering. 2004;28(2):171-180.
- 4- Kim WJ, Trumper DL. High-precision magnetic