

مدلسازی سیستم تعلیق الکترودینامیکی نوع آهنربای دائم با لحاظ کردن اثر پوستی

محمد رجبی سبدانی^(۱) - عباس نجارخدا بخش^(۲) - احمد دارابی^(۳)

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق، واحد هرنند، دانشگاه آزاد اسلامی، هرنند، اصفهان، ایران

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران

(۳) دانشیار - دانشکده برق و رباتیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۷/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۱۶

خلاصه: در این مقاله ایجاد نیروهای معلق مغناطیسی و مقاوم رانش در سیستم تعلیق الکترودینامیکی با استفاده از آهنربای دائم مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم تعلیق الکترودینامیکی نیروی عکس العمل متقابل دو میدان مغناطیسی است که براساس خاصیت دفعی تولید شده و باعث ایجاد تعلیق می‌شود. بخش معلق این سیستم شامل یک آهنربای دائم مکعبی شکل و مسیر راهنمای آن یک ریل آلومینیومی با ضخامت دو میلی‌متر است که در مدل تحلیلی آهنربا با مدل ورقه‌ای جریان مدل شده است و جریان القایی ناشی از تغییر میدان در ریل آلومینیومی با لحاظ کردن اثر پوستی محاسبه شده است. جهت بررسی اثر پوستی، ریل آلومینیومی چند لایه با هدایت الکتریکی متفاوت فرض شده است. نیروهای تعلیق و مقاوم رانش در سرعت‌های مختلف به کمک مدل تحلیل محاسبه شده‌اند. سپس به کمک روش اجزای محدود دوبعدی سیستم مدل‌سازی شده و تأثیر تغییر سرعت بر نیروهای تعلیق و مقاوم رانش در دو فاصله هوایی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل تحلیلی با روش اجزای محدود مقایسه شده و مورد تأیید قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: تعلیق الکترودینامیکی، مدل تحلیلی، اثر پوستی، روش اجزای محدود.

Modeling, Design and Analysis of a Electrodynamical Levitation System by Considering the Skin Effect

Mohammad Rajabi Sabadani⁽¹⁾ - Abbas Najjar Khadabakhsh⁽²⁾ - Ahmad Darabi⁽³⁾

(1) Indicator - Department of Electrical Engineering, Harand Branch, Islamic Azad University, Harand, Esfahan, Iran

rajabi@harandiau.ac.ir

(2) Indicator - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Esfahan, Iran

a.najjar@pel.iaun.ac.ir

(3) Associate Professor - Department of Electrical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran
darabi.ahmad@hotmail.com

In this paper, lift and drag forces of permanent-magnet electrodynamic suspension (PMEDS) System have been studied by considering the skin effect. Electrodynamic suspension is based on repulsive force between two magnetic fields with the same polarity. In this research the electrodynamic suspension system consists of a moving permanent magnet block levitated over a flat conducting plate with 2 mm thickness. At first, the analytical model of the PMEDS is proposed. For this propose, permanent magnet poles are modeled by the current sheets. Then the eddy current is calculated on aluminum sheet by considering the skin effect. Finally, the lift and drag forces are calculated in difference speed. The 2D finite element method is utilized to investigate the effect of speed variations on the performance of PMEDS at two different airgap. Two-dimensional finite element model, the accuracy of proposed analytical model is validated. The results of the finite element method are compared with results obtained by analytical model. It shows the accuracy of the analytical model in the estimation of the lift and drag forces of an electrodynamic suspension system.

Index Terms: Electrodynamic suspension, analytical model, skin effect, finite element method.

نویسنده مسئول: محمد رجبی سبدانی، دانشکده مهندسی برق، واحد هرنند، دانشگاه آزاد اسلامی، هرنند، اصفهان، ایران، rajabi@harandiau.ac.ir

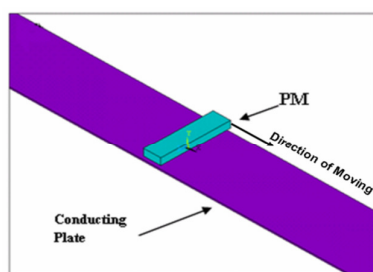
۱- مقدمه

روی ساختار شکلی مسیر راهنما برای بهتر کردن بازده تعلیق و توانایی هدایت انجام شده است [۶]. اغلب از مدل مداری برای بررسی رفتار سیستم تعلیق الکتروایستاتیکی استفاده شده است [۸-۱۳]. در این بررسی‌ها مسیر راهنما توسط سلف و مقاومت مدل می‌شود و تاثیر حرکت نیز با لحاظ کردن اندوکتانس متقابل بین منبع میدان مغناطیسی و مسیر راهنما مدل می‌شود. سپس به کمک تبدیل لاپلاس یا روش‌های معمول، معادلات مداری حل شده و نتایج مورد نیاز از آنها استخراج می‌گردد. در این روش برای بررسی رفتار سیستم در اثر تغییر پارامترها، مقادیر المان‌های مدل مداری تغییر داده می‌شوند. در مواردی که از آرایه‌های هال‌باخ استفاده می‌شود، میدان‌های مغناطیسی را با توابع سینوسی تخمین می‌زنند و در این صورت محاسبه نیروها در این موارد آسان‌تر می‌شود [۱۰] و [۱۴-۱۵]. با استفاده از روش اجزای محدود نیز امکان بررسی رفتار سیستم وجود دارد [۱۴-۱۷]. در اکثر کارهای صورت گرفته تاکنون یک مدل تحلیلی جامع با لحاظ کردن اثر پوستی مورد بررسی قرار نگرفته است.

در این مقاله ایجاد نیروهای معلق مغناطیسی و مقاوم رانش در سیستم تعلیق الکتروایستاتیکی با استفاده از آهنربای دائم مورد بررسی قرار گرفته است. بخش معلق این سیستم شامل یک آهنربای دائم و مسیر راهنمای آن یک ریل آلومینیومی است. ابتدا مدل تحلیلی سیستم ارائه شده که در آن آهنربا با مدل ورقه‌ای جریان جایگزین شده و سپس جریان القایی ناشی از تغییر میدان در مسیر راهنما با لحاظ کردن اثر پوستی محاسبه شده و در نهایت نیروهای تعلیق و مقاوم رانش در سرعت‌های مختلف محاسبه شده است. سپس به کمک روش اجزای محدود دوبعدی سیستم مدل‌سازی شده و صحت مدل تحلیلی ارائه شده تایید گردیده است.

۲- معرفی مدل سیستم تعلیق الکتروایستاتیکی

ساختار سیستم تعلیق الکتروایستاتیکی مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است. در این ساختار یک آهنربای دائم در فاصله هوایی معینی در بالای یک ورقه آلومینیوم تخت با سرعت ثابتی در حال حرکت است. ابعاد آهنربای دائم $4 \times 1 \times 2/5$ سانتیمتر می‌باشد با چگالی شار مغناطیسی پسماند $0/42$ تسلا که در فاصله ۵ میلیمتری از صفحه هادی آلومینیومی قرار دارد. ضخامت صفحه آلومینیومی دو میلیمتر می‌باشد. مطابق شکل جهت حرکت آهنربا از چپ به راست است.



شکل (۱): مدل سیستم تعلیق الکتروایستاتیکی با آهنربای دائم.

Fig. (1): Model of electrodynamic suspension with permanent magnet.

برای ایجاد تعلیق الکتروایستاتیکی^۱ می‌توان از میدان مغناطیسی متغیر با زمان در یک ماده رسانا استفاده کرد. میدان مغناطیسی متغیر با زمان در هادی جریان القا می‌کند و در نتیجه یک میدان مخالف ایجاد کرده و باعث تولید نیروی دافعه بین منبع مغناطیسی و جسم هادی می‌شود [۱]. جریان القایی می‌تواند به وسیله یک میدان متغیر، یا جایجایی یک میدان ثابت و یا ترکیبی از این دو ایجاد شود. امروزه از تعلیق الکتروایستاتیکی در ماشین‌های الکتریکی برای حذف تماس مستقیم سطوح و حذف تلفات ناشی از اصطکاک و رسیدن به سرعت‌های بسیار زیاد استفاده می‌گردد. همچنین از مهمترین کاربردهای تعلیق الکتروایستاتیکی می‌توان به سیستم حمل و نقل معلق مغناطیسی اشاره کرد که در آن قطار در فاصله معینی از ریل معلق می‌شود و می‌تواند با سرعت بیشتری در مسیر حرکت کند [۲-۵]. تعلیق الکتروایستاتیکی به طور مغناطیسی پایدار است و به کنترل فاصله هوایی نیاز ندارد. در این روش فاصله هوایی زیاد بوده و در قطارها مغناطیسی تا حدود ۱۰۰ میلیمتر می‌رسد که این فاصله برای بارهای متغیر با دامنه زیاد قابل اعتماد است. سیستم تعلیق الکتروایستاتیکی برای تولید جریانهای القا شده کافی به سرعت مشخصی نیاز دارد و به همین دلیل در پایین‌تر از یک سرعت معین تعلیق ایجاد نمی‌گردد [۶]. اولین سیستم معلق مغناطیسی پیشنهادی از میدان متغیر ناشی از سولونوئید که بر مسیر راهنما قرار گرفته بود در سال ۱۹۱۲ توسط باچلت ساخته شد [۶]. جریان متغیر سیم‌پیچ در وسیله نقلیه آلومینیومی جریان القا می‌کند که باعث ایجاد نیروی تعلیق می‌شود. تحقیقات تئوری و عملی قابل توجهی در اوایل ۱۹۷۰ بر روی روش‌هایی برای محاسبه نیروی تعلیق و مقاوم حرکت ارائه شد. با توجه به آهنرباهای مورد استفاده، تعلیق الکتروایستاتیکی به دو نوع تقسیم می‌شود: ۱- نوع آهنربای ابر رسانا^۲ [۷-۸] ۲- نوع آهنربای دائم^۳ [۹-۱۰]. ساختار سیستم تعلیق الکتروایستاتیکی با آهنربای ابر رسانا پیچیده است. سرد و تبخیر کردن مایع هلیوم که ناشی از گرمای تولید شده از جریانهای القایی است ممکن است در حین کار مشکلاتی را ایجاد کند. همچنین سرد کردن هلیوم برای داشتن عملکرد خوب در آهنربای ابر رسانا ضروری است. استفاده از آهنربای ابررسانا در سیستم حمل و نقل رکورد جهانی ۵۸۱ کیلومتر بر ساعت را در سال ۲۰۰۳ در ژاپن ثبت کرده است [۵].

در سیستم تعلیق الکتروایستاتیکی با آهنربای دائم از آرایه‌های هال‌باخ^۴ استفاده شده است. در این مدل با کنارهم قرار دادن آهنرباهای دائم که جهت میدان آنها به طور منظمی چرخیده شده، آهنربای هال‌باخ تشکیل شده است. امکان تعلیق در سرعت‌های کم به خاطر وجود آرایه‌های هال‌باخ از ویژگی‌های این سیستم می‌باشد [۱۱].

مسیر راهنمای تعلیق الکتروایستاتیکی معمولاً با تمرکز بر روی کم کردن نیروی مقاوم رانش و ارتباط آن با نیروی تعلیق طراحی می‌شود. نسبت نیروی تعلیق به نیروی مقاوم رانش به عنوان مشخص کننده کارایی سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور مطالعات زیادی بر

با استفاده از [۲۱]:

$$\partial H = \frac{\partial I}{2\pi r} \quad (4)$$

در رابطه بالا r فاصله منبع جریان تا نقطه $P(x_1, y_1)$ بوده و برابر است با:

$$r = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (5)$$

که با جایگذاری روابط (۳) و (۵) در (۴) خواهیم داشت:

$$\partial H = M_0 \frac{\partial y}{2\pi r} = \frac{M_0 \partial y}{2\pi \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}} \quad (6)$$

۳-۱- محاسبه میدان در راستای محور y

میدان در نقطه $P(x_1, y_1)$ در راستای محور y عبارتست از [۲۱]:

$$\partial H_y = \partial H \sin(\theta) \quad (7)$$

$\sin(\theta)$ در رابطه (۷) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sin(\theta) = \frac{(x_1 - x)}{\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}} \quad (8)$$

پس در نهایت رابطه (۷) به صورت زیر در می‌آید:

$$\begin{aligned} \partial H_y &= \partial H \frac{(x_1 - x)}{\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}} \\ &= \frac{M_0 (x_1 - x) \partial y}{2\pi \left((x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 \right)} \end{aligned} \quad (9)$$

با انتگرال گیری از رابطه (۹) شدت میدان مغناطیسی در راستای محور y بدست خواهد آمد. بایستی توجه کرد که میدان در هر نقطه از مجموع میدان‌های ناشی از ورقه جریان در نقاط $x = L/2$ و $x = -L/2$ به دست می‌آید، پس با توجه به این نکته خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} H_y &= \frac{M_0}{2\pi} \left[-\tan^{-1} \left(\frac{(y_1 - D)}{x_1 - \frac{L}{2}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{(y_1)}{x_1 - \frac{L}{2}} \right) \right. \\ &\quad \left. + \tan^{-1} \left(\frac{(y_1 - D)}{x_1 + \frac{L}{2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{(y_1)}{x_1 + \frac{L}{2}} \right) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

۳-۲- محاسبه میدان در راستای محور x

میدان در نقطه $P(x_1, y_1)$ در راستای محور x عبارتست از [۲۱]:

$$\partial H_x = \partial H \cos(\theta) \quad (11)$$

که $\cos(\theta)$ در رابطه (۱۱) عبارتست از:

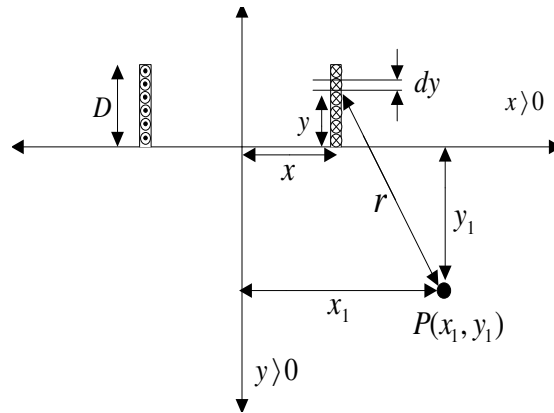
$$\cos(\theta) = \frac{(y_1 - y)}{\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}} \quad (12)$$

پس در نهایت رابطه (۱۱) به صورت زیر خواهد بود:

برای به دست آوردن مدل تحلیلی این سیستم ابتدا بایستی میدان‌های مغناطیسی ناشی از منبع اصلی میدان که آهنرباهای دائم است را محاسبه نمود. سپس جریان القایی ناشی از این میدان را در ورقه آلومینیومی واقع در زیر آهنربا بدست آورد و در نهایت نیروهای ایجاد شده بر اثر برهمکنش میدان‌های ناشی از منبع اصلی و جریان‌های القایی را محاسبه کرد.

۳- میدان مغناطیسی در اطراف آهنربا

اگر یک آهنربای دائم مغناطیس‌شدگی یکنواخت داشته باشد می‌تواند توسط جریان‌های مغناطیس‌کننده و به صورت ورقه‌های جریان در سطوح آهنربا مدل شود [۱۸-۱۹]. در این قسمت مدل سیستم بوسیله ورقه‌های جریان حامل جریان DC مطابق با شکل (۲) مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۲): مدل دو بعدی آهنربای دائم.

Fig. (2): 2-D model of permanent magnet.

تغییرات شار مغناطیسی در حالت دو بعدی بررسی می‌شود. ورقه جریان را در راستای محور $\pm Z$ بینهایت فرض می‌شود و محاسبه برای واحد طول هادی صورت می‌گیرد.

در این مدل فرض شده که ورقه جریان روی محور x در نقطه $-L/2$ به سمت داخل و در نقطه $L/2$ به سمت خارج صفحه و در راستای محور Z می‌باشد. چگالی جریان در ورقه (J_{sz}) به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۲۰]:

$$J_{sz} = M_0 \hat{a}_z \quad (1)$$

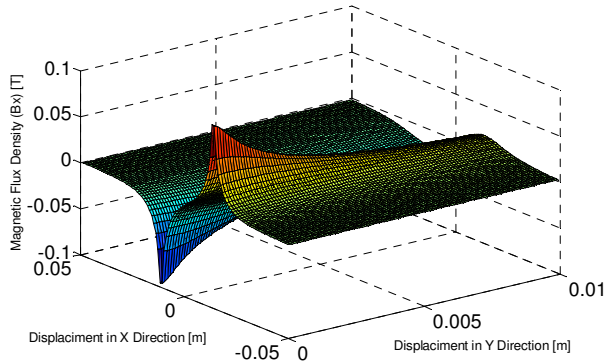
که در آن ضریب مغناطیس‌کنندگی (M_0) عبارتست از:

$$M_0 = \frac{B_{rm}}{\mu_0} \quad (2)$$

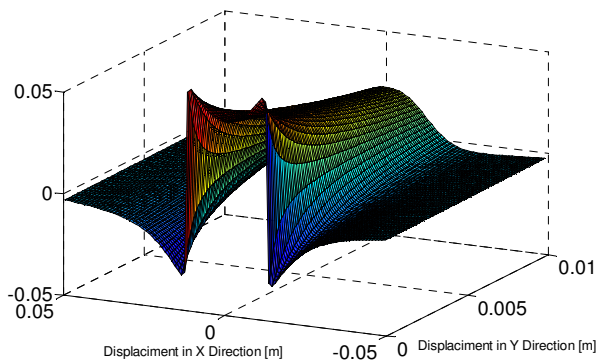
که B_{rm} چگالی شار مغناطیسی پسماند و μ_0 ضریب نفوذپذیری در خلا می‌باشد.

اگر I جریان عبوری از کل هادی‌ها باشد برای محاسبه میدان مغناطیسی در نقطه $P(x_1, y_1)$ خواهیم داشت:

$$\partial I = M_0 \partial y \quad (3)$$



شکل (۳): تغییرات میدان مغناطیسی B_x در زیر آهنربا با تغییر فاصله هوایی
Fig. (3): The distribution of x-axis component of magnetic flux density under the PM



شکل (۴): تغییرات میدان مغناطیسی B_y در زیر آهنربا با تغییر فاصله هوایی
Fig. (4): The distribution of x-axis component of magnetic flux density under the PM

در صورتی که بخواهیم تاثیر اثر پوستی بر رفتار سیستم را نیز مدل کنیم بایستی ریل را به دو یا چند قسمت تقسیم کنیم که این موضوع با توجه به شدت میدان مغناطیسی بالای ریل و فاصله هوایی بین ریل و آهنربای دائم بستگی دارد. در جریان‌های القایی زیاد چون از لایه‌های بالایی ریل بیشتری عبور کرده و جریان لایه‌های پایینی بسیار کمتر است بعد از اینکه ریل را چند لایه فرض کردیم بایستی رسانایی لایه‌های بالایی را بزرگتر و لایه‌های پایینی را کوچکتر فرض کنیم. اگر فرض شود که ریل را به n لایه تقسیم کرده‌ایم در این صورت چگالی جریان در هر لایه برابر خواهد بود با:

$$\begin{aligned} J_{pz1} &= -V_x \sigma_1 \mu_0 H_{y1} \\ J_{pz2} &= -V_x \sigma_2 \mu_0 H_{y2} \\ &\dots \\ &\dots \\ J_{pzn} &= -V_x \sigma_n \mu_0 H_{yn} \quad (20) \end{aligned}$$

در این صورت مجموع چگالی جریانها برابر چگالی جریان کل خواهد بود که عبارتست از:

$$J_{pz} = J_{pz1} + J_{pz2} + \dots + J_{pzn} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \partial H_x &= \partial H \frac{(y_1 - y)}{\sqrt{((x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2)}} \\ &= \frac{M_0 (y_1 - y) \partial y}{2\pi ((x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2)} \end{aligned} \quad (13)$$

با انتگرال گیری از رابطه (۱۳) شدت میدان مغناطیسی در راستای محور x به دست خواهد آمد. بایستی توجه کرد که در این حالت نیز میدان در هر نقطه از مجموع میدان‌های ناشی از ورقه جریان در نقاط $x = -L/2$ و $x = L/2$ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{M_0}{4\pi} \left[\text{Log} \left(\frac{\left(x_1 - \frac{L}{2}\right)^2 + (y_1)^2}{\left(x_1 - \frac{L}{2}\right)^2 + (y_1 - D)^2} \right) \right. \\ &\quad \left. - \text{Log} \left(\frac{\left(x_1 + \frac{L}{2}\right)^2 + (y_1)^2}{\left(x_1 + \frac{L}{2}\right)^2 + (y_1 - D)^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

در روابط فوق برای شدت میدان مغناطیسی در فضای دوبعدی تمام پارامترهای تاثیر گذار از جمله طول و عرض آهنربا لحاظ شده است. نحوه تغییرات چگالی شار میدان مغناطیسی در فاصله هوایی‌های مختلف در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است.

۳-۳- محاسبه جریان القایی با لحاظ کردن اثر پوستی

با عبور آهنربای دائم بر فراز صفحه هادی آلومینیومی، به دلیل متغیر بودن میدان مغناطیسی دیده شده در صفحه هادی در آن جریان القا می‌شود. با افزایش سرعت جسم متحرک، جریان القایی نیز بیشتر می‌شود. مدل کردن جریان القایی ناشی از حرکت بسیار مهم است و روش‌های مختلفی برای آن وجود دارد. همان طور که می‌دانیم:

$$\vec{E} = \vec{V} \times \vec{B} \quad (15)$$

با انجام ضرب خارجی رابطه (۱۵) خواهیم داشت:

$$E = -V_x B_y = -V_x \mu_0 H_y \quad (16)$$

همچنین رابطه نیروی محرکه الکتریکی به صورت زیر است [۲۱]:

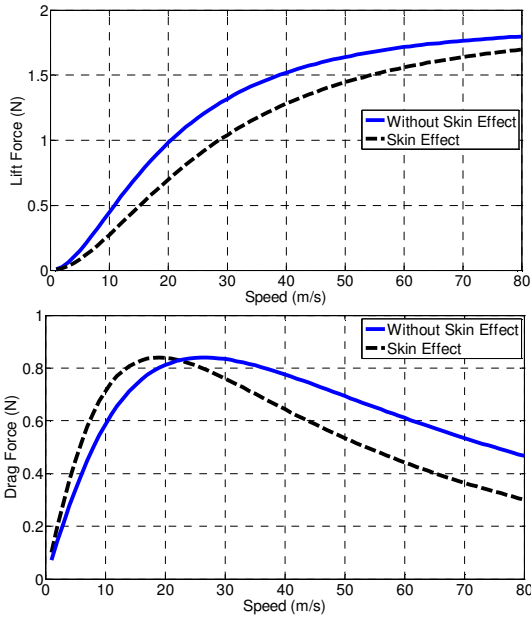
$$E_z = \frac{J_{pz}}{\sigma} \quad (17)$$

با مساوی قرار دادن طرف راست دو معادله (۱۶) و (۱۷) خواهیم داشت:

$$\frac{J_{pz}}{\sigma} = -V_x \mu_0 H_y \quad (18)$$

در نهایت چگالی جریان در جسم هادی متحرک برابر خواهد شد با:

$$J_{pz} = -V_x \sigma \mu_0 H_y \quad (19)$$



شکل (۵): تغییرات نیروی تعلیق و مقاوم رانش محاسبه شده با روابط ریاضی بالفاظ کردن اثر پوستی و بدون اثر پوستی
 Fig. (5): Analytically calculated Lift and Drag forces with and without skin effect.

همانگونه که در شکل (۵) مشخص است ابتدا نیروی تعلیق و مقاوم رانش با زیاد شدن سرعت افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت نیروی مقاوم رانش به مقدار ماکزیمم خود نزدیک می‌شود و پس از سرعت مشخصی مقدار این نیرو با بیشتر شدن سرعت کاهش می‌یابد. این در حالی است که نیروی تعلیق همچنان رو به افزایش است. علت کاهش نیروی مقاوم رانش پس از این سرعت افزایش شدت میدان مخالف میدان اصلی و قرار گرفتن میدان مخالف درست در زیر میدان اصلی است که علت اصلی افزایش نیروی تعلیق در سیستم می‌باشد. عامل اصلی تولید کننده نیروی مقاوم رانش میدان مغناطیسی ایجاد شده برای جلوگیری از کاهش میدان اصلی در سیستم است که در سرعت بالا از محدوده زیر آهنربا خارج شده و باعث کاهش مقدار نیروی مقاوم رانش می‌شود. روند رو به افزایش نیروی تعلیق پس از سرعت خاصی کاهش می‌یابد تا اینکه در سرعت‌های بسیار زیاد به اشباع می‌رود و از حدود دو برابر ماکزیمم نیروی مقاوم رانش تجاوز نمی‌کند. علت این امر افزایش جریان در صفحه هادی است که باعث می‌شود بعد از سرعت خاصی مقدار این جریان افزایش چندانی نداشته و به اشباع رفته و مقدار نیروی تعلیق ثابت بماند.

۴- تحلیل اجزای محدود سیستم

در این مقاله از تحلیل استاتیک و تحلیل گذرا برای تحلیل حرکت مدل و محاسبه نیرو، نوسان نیرو و جریان القایی استفاده شده است. تحلیل مسئله بسته به تعداد گام‌های زمانی، تعداد المان‌ها و سرعت پردازنده می‌تواند زمان زیادی در حدود چند ساعت را به خود اختصاص دهد. محدوده مسئله موردنظر به ۱۷۳۹۲ المان مثلثی و ۳۴۹۰۱ گره تقسیم

$$J_{pz} = -V_x \mu_0 (\sigma_1 H_{y1} + \sigma_2 H_{y2} + \dots + \sigma_n H_{yn}) \quad (22)$$

برای بررسی دقیق چگالی جریان القایی نیز جسم هادی را به قسمت‌های کوچک تقسیم می‌کنیم در این صورت جریان ایجاد شده در هر یک از این اجزای کوچک به صورت زیر خواهد بود:

$$\Delta I_{ind} = J_{pz} \Delta x \Delta y \\ = (J_{pz1} \Delta y_1 + J_{pz2} \Delta y_2 + \dots + J_{pzn} \Delta y_n) \Delta x \quad (23)$$

میدان مغناطیسی ناشی از این جریان در اجزای کناری تاثیر خواهد گذاشت. اندازه این میدان در اجزای کناری به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$B_{y_{ind}} = \frac{\Delta I_{ind}}{2\pi \Delta x_1} \quad (24)$$

که در این رابطه Δx_1 فاصله بین جزیی است که در آن چگالی جریان محاسبه شده و دیگر اجزای کناری آن. در این صورت میدان مجموع در هر جزء برابر است با مجموع میدان مغناطیسی ناشی از منبع اصلی B_y و میدان ناشی از جریان القایی $B_{y_{ind}}$.

$$B_{y_{total}} = B_y + B_{y_{ind}} \quad (25)$$

با تکرار روابط بالا برای هادی، میدان مغناطیسی برآیند برای کل جسم هادی محاسبه می‌شود.

۳-۴- محاسبه نیروهای وارد بر آهنربا

نیروی بین آهنربای دائم و صفحه هادی توسط رابطه زیر به دست می‌آید [۲۱]:

$$F = \int \vec{J} \times \vec{B} dV \quad (26)$$

که در آن \vec{J} بردار چگالی جریان القایی در صفحه و \vec{B} بردار میدان مغناطیسی می‌باشد. dV نیز حجم صفحه هادی می‌باشد. با در نظر گرفتن d به عنوان ضخامت صفحه هادی خواهیم داشت:

$$dV = d \partial x \quad (27)$$

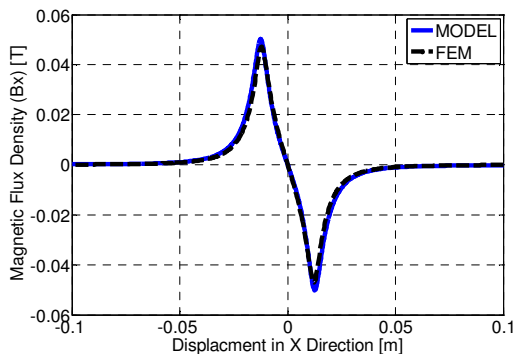
با استفاده از [۲۱] برای محاسبه نیروی مقاوم رانش خواهیم داشت:

$$F_D = F_x = \int J_z \mu_0 H_y d x \quad (28)$$

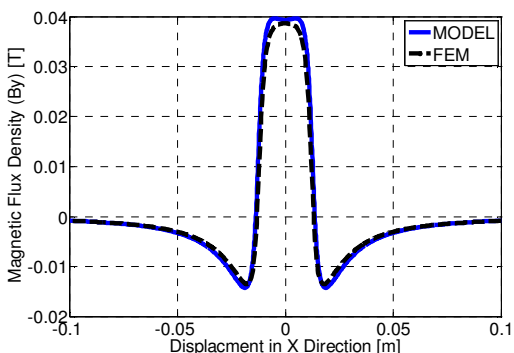
و همچنین نیروی تعلیق نیز به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$F_L = F_y = \int J_z \mu_0 H_x d x \quad (29)$$

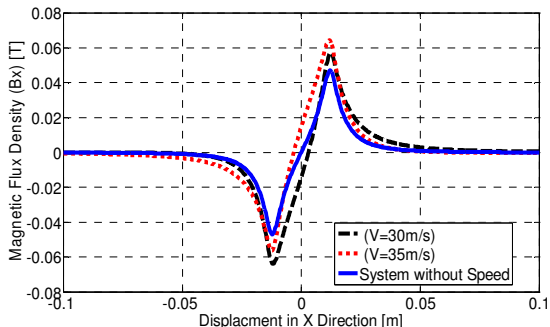
با جایگذاری مقادیر در روابط مربوط به نیروهای تعلیق و مقاوم رانش می‌توان این نیروها را محاسبه کرد. در شکل (۵) نیروهای به دست آمده برای سیستم تعلیق معرفی شده در بخش ۲ با لحاظ کردن و نیز بدون لحاظ کردن اثر پوستی نشان داده شده است.



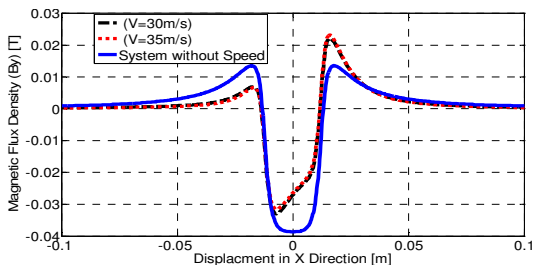
شکل (۸): تغییرات میدان مغناطیسی B_x در طول آهنربا
Fig. (8): Variation of B_x along the PM



شکل (۹): تغییرات میدان مغناطیسی B_y در طول آهنربا
Fig. (9): Variation of B_y along the PM

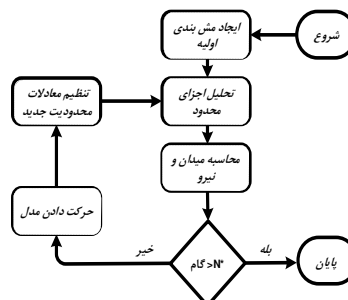


شکل (۱۰): مولفه X چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی
Fig. (10): The distribution of x-axis component of magnetic flux density in the airgap.



شکل (۱۱): مولفه Y چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی
Fig. (11): The distribution of y-axis component of magnetic flux density in the airgap.

شده است. نتایج تحلیل با اجرای بیش از ۳۰۰۰ شبیه‌سازی به دست آمده است. مدت هر شبیه‌سازی حدود ۳۰ ثانیه می‌باشد و زمان مورد نیاز برای چنین تحلیلی به وسیله پروسسور Pentium D 2.8 GHz (Dual-core) و با ۴ گیگابایت حافظه حدود ۲۵ ساعت بوده است.

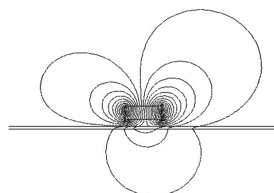


شکل (۶): فلوجارت روش اجزاء محدود مورد استفاده.
Fig. (6): The flowchart of FEM

در حل مسئله از روش تحلیلی گام زمانی استفاده شده است. مطابق شکل (۶) بعد از مش‌بندی اولیه مسئله تحلیل شده و سپس نیروها و میدان‌های تولیدی محاسبه شده است. پس از آن در صورتی که تعداد گام‌های مسئله تمام نشده باشد مدل حرکت داده شده و شرایط و محدودیت‌های جدیدی با توجه به شرایط مسئله اعمال شده و مدل دوباره تا مرحله نهایی تحلیل می‌شود.

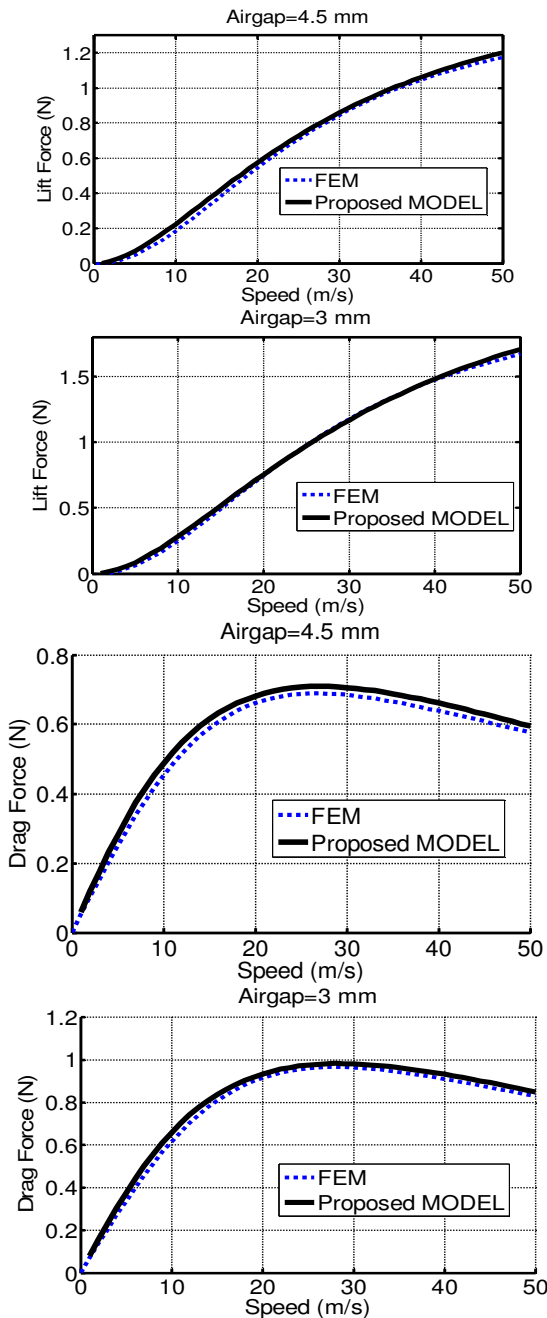
خطوط شار مغناطیسی برای سیستم در سرعت خطی ۵۰ متر بر ثانیه در شکل (۷) نشان داده شده است. در این شکل خطوط شار بین هادی آلومینیومی و آهنربا متمرکز شده‌اند و مولفه‌های میدان در فاصله هوایی از میدان‌های ناشی از آهنربای دائم و جریان چرخشی در هادی آلومینیومی تشکیل شده‌اند.

با توجه به شکل‌های (۸) و (۹) مدل ارائه شده با نتایج شبیه‌سازی انطباق خوبی را نشان می‌دهند. برای میدان B_y اختلاف اندکی بین نتایج شبیه‌سازی و مدل تحلیلی درست در زیر آهنربا وجود دارد که علت آن مدل کردن آهنربا با ورقه جریان در گوشه‌ها است. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مولفه‌های میدان در فاصله ۲/۵ میلیمتری بالای هادی مغناطیسی در حالتی که سرعت صفر می‌باشد متقارن است ولی هنگامی که سرعت افزایش می‌یابد به خاطر عدم تقارن جریان القایی در صفحه آلومینیومی زیرین و میدان‌های ناشی از این جریان‌ها در فضای اطراف، این تقارن به هم می‌خورد.



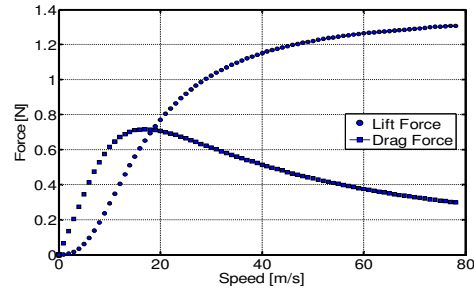
شکل (۷): خطوط شار مغناطیسی سیستم در سرعت ۵۰متر بر ثانیه
Fig. (9): Magnetic flux paths at 50m/s

سیستم معلق، ابتدا نیروی مقاوم رانش افزایش یافته و بعد از رسید به مقدار حداکثر خود شروع به کاهش یافتن می‌کند. همچنین با افزایش سرعت نیروی تعلیق افزایش یافته و در سرعت‌های بسیار بالا به اشباع می‌رود و افزایش چشمگیری ندارد. سپس به کمک روش اجزای محدود دوبعدی سیستم مدل‌سازی شده و تأثیر تغییر سرعت سیستم بر عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. صحت مدل تحلیلی ارائه شده به کمک نتایج به دست آمده از روش اجزای محدود تأیید شده است.



شکل (۱۳): تغییرات نیروی‌های تولیدی برای دو فاصله هوایی مختلف.
Fig. (13): Comparison of forces obtained by the proposed analytical method and FEM for two airgaps.

نیروهای تعلیق و مقاوم رانش بر حسب سرعت به دست آمده از روش اجزای محدود در شکل (۱۲) نشان داده شده‌اند. دیده می‌شود که در سرعت‌های کم نیروی تعلیق و نیز نیروی مقاوم رانش افزایش می‌یابد. سپس با افزایش سرعت از مقدار مشخصی نیروی مقاوم رانش کاهش می‌یابد در حالی که نیروی تعلیق همچنان در حال زیاد شدن است.



شکل (۱۲): تأثیر سرعت بر روی عملکرد سیستم.
Fig. (12): Effect of speed on system performance.

۵- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با مدل تحلیلی

همان‌طور که در شکل (۸) و (۹) نشان داده شده است، تغییرات میدان مغناطیسی به دست آمده از شبیه‌سازی و مدل اجزای محدود در زیر آهنربا بسیار به هم نزدیک بوده و انطباق خوبی دارند که این مسئله نشان می‌دهد که مدل تحلیل ارائه شده برای محاسبه میدان‌های مغناطیسی زیر آهنربا از دقت مناسبی برخوردار است. در شکل (۱۳) نیروهای تعلیق و مقاوم رانش بر حسب سرعت برای دو فاصله هوایی مختلف با روش FEM و تحلیلی با لحاظ کردن اثر پوستی رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش فاصله هوایی نیروی تعلیق و مقاوم رانش افزایش می‌یابد که علت آن افزایش چگالی شار بر روی ریل آلومینیومی با کاهش فاصله هوایی است. بیشترین مقدار نیروی مقاوم رانش در دو فاصله هوایی، در سرعت حدود ۲۷ متر بر ثانیه می‌باشد. مقادیر به دست آمده از مدل تحلیلی به نتایج به دست آمده از روش اجزای محدود بسیار نزدیک می‌باشد. اما باز هم اختلاف جزئی بین نتایج مدل تحلیلی و روش اجزای محدود وجود دارد چون دقت شبیه‌سازی در روش اجزای محدود بیشتر از مدل تحلیلی می‌باشد و در مدل تحلیل برخی پارامترها همچون مدل آهنربا به صورت ایده‌آل در نظر گرفته شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ایجاد نیروهای معلق مغناطیسی و مقاوم رانش در سیستم تعلیق الکتروپنوماتیکی با استفاده از آهنربای دائم مورد بررسی قرار گرفته است. مدل سیستم مورد بررسی شامل یک آهنربای دائم مکعبی به عنوان بخش معلق و یک ریل آلومینیومی به عنوان مسیر راهنما بوده است. در ابتدا مدل تحلیلی سیستم ارائه شده است که در آن آهنربا با مدل ورقه‌ای جریان جایگزین و سپس جریان القایی ناشی از تغییر میدان در مسیر راهنما با لحاظ کردن اثر پوستی محاسبه شده و در نهایت نیروهای تعلیق و مقاوم رانش محاسبه شده است. با افزایش سرعت در

3- Permanent Magnet
4- Halbach Array

پی‌نوشت:

1- Electrodynamic Suspension
2- Superconductivity Magnet

References

- [1] A. Najar-Khodabakhsh, M.R. Moradian, L. Najar-Khodabakhsh, N.R. Abjadi, "Stabilization of electromagnetic suspension system behavior by genetic algorithm", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 3, No. 11, pp. 53-61, Summer 2013 (in Persian)
- [2] F. Impinna, J.G. Detoni, N. Amati, A. Tonoli, "Passive magnetic levitation of rotors on axial electrodynamic bearings", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 49, No. 1, pp. 599-608, Jan. 2013.
- [3] J.F. Gieras, J. Mews, P. Splawski, "Analytical calculation of electrodynamic levitation forces in a special-purpose linear induction motor", *IEEE Trans. on Industry Appl.*, Vol. 48, No. 1, pp. 106-116, Jan./Feb. 2012.
- [4] Z. Long, G. He, S. Xue, "Study of EDS & EMS hybrid suspension system with permanent-magnet halbach array", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 47, No. 12, pp. 4717-4724, Dec. 2011.
- [5] H. Eryong, L. Kun, "Investigation of axial carrying capacity of radial hybrid magnetic bearing", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 48, No. 1, pp. 38-46, Jan. 2012.
- [6] H.W. Lee, K. Kim, J. Lee, "Review of maglev train technologies", *IEEE Trans. on Magnetics* Vol. 42, No. 7, pp. 1917-1925, July 2006.
- [7] R.J. Kaye, E. Masada, "Comparison of linear Synchronous and induction motors", *Urban Maglev Technology Development program, Colorado Maglev Project, Rep. FTA-DC-26-7002*, 2004.
- [8] T. Saijo, "Thrust and levitation force characteristics of linear synchronous motor", *International conference on maglev and Linear Drive, Vancouver, Canada*, pp. 157-164, May 1986.
- [9] H.J. Lever, "Technical assessment of maglev system concept", *Final report By the Government Maglev System Assesment Team, CRREL-SR-98-12*, 1998.
- [10] J. Bird, "An investigation into the use of electrodynamic wheels for high-speed ground transportation", *Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madi-son*, 2007.
- [11] K.R. Davey, "Designing with null flux coils", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp: 4327-4334, Sep. 1997.
- [12] T. Onuki, Y. Toda, "Optimal design of hybrid magnet in maglev system with both permanent and electromagnets", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 29, No. 2, pp. 1783-1786, Mar. 1993.
- [13] T. Iwahana, "Study of superconducting magnetic suspension and guidance characteristics on loop tracks", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 11, No. 6, pp: 1704-1711, Nov. 1975.
- [14] J.F. Hoburg, "Modeling maglev passenger compartment static magnetic fields from linear Halbach permanent-magnet arrays", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 40, No. 1, pp. 59-64, Jan. 2004.
- [15] M.T. Thompson, R.D. Thornton, A. Kondoleon, "Flux-canceling electrodynamic Maglevsuspension: Part 1 test fixture design and modeling", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 35, No. 3, pp. 1956-1963, May 1999.
- [16] H. Cho, D.K. Bae, B.C. Shin, "HTSC levitation experiment with AC current modeling after EDS Maglev", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 17, No. 2, pp. 2095-2098, June 2007.
- [17] T. Sakamoto, A.R. Eastham, G.E. Dawson, "Induced currents and forces for the split-guideway electrodynamic levitation system", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 27, No. 6, pp. 5004-5006, November 1991.
- [18] K.R. Davey, "Electrodynamic maglevcoil design and analysis", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp. 4227-4229, Sep. 1997.
- [19] N. Fujii, M. Chida, K. Ogawa, "Three dimensional force of magnet wheel with revolving permanent magnet", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp. 4221-4223, Sep. 1997.
- [20] K. Davey, "Analysis of an electrodynamic Maglevsystem", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 35, No. 5, pp. 4259-4267, Sep. 1999.
- [21] Y.J. Chen, J. Feng, "Optimization of guideway coil dimensions for a magnetic levitation system", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 33, No. 5, Sep. 1997.
- [23] J.d. Boeij, M. Steinbuch, "Mathematical model of the 5-DOF sled dynamics of an electrodynamic Maglev system with a passive sled", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 41, No. 1, pp. 460-465, Jan. 2005.