

## ارائه روشی نوین در تحلیل میدانی، طراحی و ساخت آهنربای الکتریکی به منظور جابجایی اجسام

سید علی هاشمی\*

استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی شهید مهاجر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان اصفهان، ایران

(دریافت: ۹۷/۰۷/۲۸، پذیرش: ۹۸/۰۳/۱۲)

### چکیده

جرثقیل مغناطیسی یک نمونه از کاربردهای صنعتی جذب مغناطیسی است که در آن از یک آهنربای الکتریکی برای ایجاد نیروی لازم به منظور بلند کردن و جابجایی اجسام استفاده می‌شود. ساختارهای مختلفی برای هسته آهنربای الکتریکی وجود دارد اما بررسی‌ها نشان می‌دهد که ساختار U-I با یک سیم‌پیچ متقارن به لحاظ کاهش تلفات ناشی از شارهای نشتی و اثرات لبه‌ای میدان مغناطیسی، مناسب‌ترین ساختار می‌باشد. در این مقاله روشی جدید برای تحلیل میدانی و طراحی آهنربای الکتریکی معرفی می‌شود. در طی فرایند تحلیل و طراحی، ضمن توجه ویژه به شارهای نشتی و اثرات لبه‌ای، یک مدار معادل مغناطیسی جدید برای آهنربای الکتریکی پیشنهاد شده، همچنین رفتار غیرخطی منحنی B-H هسته فرومغناطیس و نقطه اشباع آن نیز در نظر گرفته شده است. در این مقاله نرم‌افزار MATLAB برای تحلیل عددی و طراحی آهنربای الکتریکی و نرم‌افزار ANSYS MAXWELL به منظور شبیه‌سازی میدان و نیروی مغناطیسی آن استفاده می‌گردد. به منظور بررسی دقت روش پیشنهادی، نمونه آزمایشگاهی یک آهنربای الکتریکی، مطابق با پارامترهای طراحی مستخرج از الگوریتم پیشنهادی، ساخته شد. مقایسه نتایج اندازه‌گیری با نتایج حاصل از شبیه‌سازی، خطایی کمتر از ۲٪ را نشان می‌دهد که این حاکی از دقت بالای روش طراحی است.

**کلید واژه‌ها:** آهنربای الکتریکی، مدار معادل مغناطیسی، میدان مغناطیسی، شار نشتی، اثرات لبه‌ای، نیروی بالاکش

### ۱. مقدمه

هسته و اشباع آن در نظر گرفته نمی‌شوند. لذا نتایج کسب شده دقت پایینی داشته و در کاربردهای عملی قابل اعتماد نمی‌باشند.

در [۲] برای در نظر گرفتن تأثیر شارهای نشتی و اثرات لبه‌ای آهنربای الکتریکی، پرمانس‌هایی<sup>۷</sup> به مدار معادل مغناطیسی اضافه شده است. اما فاقد تحلیل میدانی بوده و مکان استقرار برخی از پرمانس‌ها نیز دقت کافی ندارد.

در [۳-۵] ساختارهای مختلف هسته فرومغناطیسی و نحوه سیم‌پیچی روی آن، از نظر شارهای نشتی و اثرات لبه‌ای میدان مغناطیسی، بررسی شده‌اند. نتیجه این تحقیقات حاکی از آن است که ساختار U-I تک سیم‌پیچ متقارن کمترین تلفات شار مغناطیسی را به همراه دارد. در [۶] از روش اجزاء محدود<sup>۸</sup> برای محاسبه عددی و تحلیل میدانی نیروی الکترومغناطیسی در

آهنربای الکتریکی<sup>۱</sup> یکی از قطعات استفاده شده در تجهیزاتی مانند موتور، ژنراتور، دستگاه تصویربرداری رزونانس مغناطیسی (MRI)، سیستم‌های تعلیق مغناطیسی<sup>۳</sup> نظیر قطارهای مگلو<sup>۴</sup> و همچنین در جرثقیل‌ها برای بلند کردن و جابجایی قطعات سنگین می‌باشد.

در مراجع الکترومغناطیس، یک مدار معادل مغناطیسی برای آهنربای الکتریکی معرفی شده که با تحلیل آن می‌توان شار مغناطیسی را درون هسته محاسبه کرد [۱]. در این روش تحلیل، معمولاً شار نشتی<sup>۵</sup>، اثرات لبه‌ای<sup>۶</sup>، رفتار غیرخطی منحنی B-H

\* نویسنده پاسخگو: ahashemi@tvu.ac.ir

<sup>1</sup> Electromagnet

<sup>2</sup> Magnetic Resonance Imaging

<sup>3</sup> Magnetic Levitation Systems

<sup>4</sup> MagLev Train

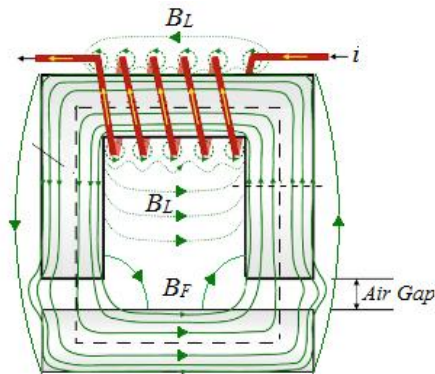
<sup>5</sup> Leakage Flux

<sup>6</sup> Fringing Effect

<sup>7</sup> Permeance

<sup>8</sup> Finite Element Method

نمایش داده شده است. همچنین خطوط میدان‌های ناشی ( $B_L$ ) و لبه‌ای ( $B_F$ ) نشان داده شده‌اند. این میدان‌ها موجب کاهش شار مغناطیسی کل در هسته و در نهایت باعث کاهش نیروی کشش آهن‌ربای الکتریکی می‌شوند.



شکل (۱): آهن‌ربای الکتریکی با ساختار U-I و مسیره‌های عبور شار.

بنابراین، برای داشتن یک روش تحلیل دقیق و کارآمد باید به چند عامل توجه کرد. عامل نخست، شارهای ناشی و در نظر گرفتن آن‌ها در روش تحلیل است. عامل دوم، اثرات لبه‌ای است که باعث می‌شود خطوط شار مغناطیسی در شکاف‌های هوایی پخش و برآمده شوند. عامل سوم پدیده پسماند<sup>۲</sup> در مواد فرومغناطیسی است. این بدان معناست که اولاً نفوذپذیری مواد فرومغناطیس به شدت میدان مغناطیسی ( $H$ ) وابسته بوده و لذا ارتباط  $B$  و  $H$  غیرخطی است. ثانیاً  $B$  در مقدار معینی از  $H$  اشباع می‌شود، یعنی با افزایش  $H$  میدان  $B$  تا رسیدن به اشباع افزایش می‌یابد، اما پس از آن، صرف‌نظر از مقدار  $H$ ، مقدار  $B$  تقریباً ثابت می‌ماند.

## ۲-۲. مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی

شکل (۲-الف) ساختار هندسی بخش‌بندی شده آهن‌ربای الکتریکی با هسته U-I را نشان می‌دهد. ابعاد بخش‌های مختلف هسته و سیم‌پیچ روی شکل مشخص و نام‌گذاری شده‌اند. در شکل (۲-ب) مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی برای آهن‌ربای الکتریکی ترسیم شده است. این مدار با الهام گرفتن از آنچه که در [۲ و ۱۰] ارائه شده و انجام اصلاحاتی روی آن به دست آمده است. پرمانس‌هایی که برای احتساب شارهای ناشی در مدار معادل مغناطیسی قرار گرفته‌اند عبارتند از: پرمانس ناشی افقی سیم‌پیچ  $P_{hl}$ ، پرمانس ناشی عمودی سیم‌پیچ  $P_{vl}$ ، پرمانس ناشی افقی زیر سیم‌پیچ  $P_{hb}$  و پرمانس ناشی عمودی کنارگذر  $P_{vb}$ . نحوه محاسبه این پرمانس‌ها در روابط (۱) الی (۴) ارائه شده است.

سیستم‌های متحرک تعلیق مغناطیسی استفاده شده اما رفتار غیرخطی منحنی B-H و اشباع هسته را در نظر نگرفته است.

این مقاله، ضمن معرفی یک مدار معادل مغناطیسی دقیق برای آهن‌ربای الکتریکی، به تحلیل میدانی، طراحی و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی از آهن‌ربای الکتریکی بر مبنای پارامترهای طراحی حاصل از الگوریتم پیشنهادی اختصاص دارد. بدین منظور در ادامه، ابتدا آهن‌ربای الکتریکی و مسیره‌های مختلف شار مغناطیسی معرفی می‌گردند. سپس مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی معرفی و تحلیل می‌شود. پس از آن یک آهن‌ربای الکتریکی نمونه طراحی می‌شود. چون تعداد پارامترهای مؤثر در طراحی زیاد است مقدار برخی از آن‌ها را که ثابت‌های طراحی نامیده شده‌اند، معلوم فرض کرده، و مابقی که متغیرهای طراحی نامیده می‌شوند، در الگوریتم طراحی و تحلیل عددی در نرم‌افزار MATLAB محاسبه خواهند شد. به منظور اطمینان از دقت روش پیشنهادی، آهن‌ربای طراحی شده را با کمک نرم‌افزار Maxwell شبیه‌سازی کرده و نتایج طراحی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه می‌شوند. در پایان آهن‌ربای الکتریکی ساخته شده و در ماکت یک جرثقیل قرار می‌گیرد تا نیروی بالاکش<sup>۱</sup> آن اندازه‌گیری شود.

## ۲. تحلیل آهن‌ربای الکتریکی

### ۲-۱. بررسی میدانی آهن‌ربای الکتریکی

شکل (۱) نمونه‌ای از یک آهن‌ربای الکتریکی را نشان می‌دهد. این آهن‌ربا متشکل از  $N$  دور سیم حامل جریان ثابت  $i$  بوده که بر روی یک هسته فرومغناطیسی پیچیده شده است. جهت میدان مغناطیسی را می‌توان با قانون دست راست تعیین کرد، به این صورت که اگر انگشتان دست راست به دور سیم‌پیچ و در جهت جریان خم گردد، انگشت شست جهت میدان در مرکز سیم‌پیچ را نشان می‌دهد. همچنین سمتی که خطوط میدان مغناطیسی از آن خارج می‌شود، قطب  $N$  آهن‌ربا می‌باشد [۹-۷]. بخش U-شکل هسته ثابت بوده اما بخش I-شکل، که بار به آن وصل می‌شود، متحرک است. هنگامی که بخش I-شکل به بخش U-شکل هسته نزدیک باشد، بخش عمده‌ای از شار مغناطیسی در مسیر هسته قرار می‌گیرد. اما بخشی از شار مغناطیسی مسیر هسته را به صورت کامل طی نمی‌کند که به آن شار ناشی می‌گویند. نشت شار ناشی از ناصفر بودن نفوذپذیری هوا می‌باشد. همچنین به واسطه اثرات لبه‌ای، میدان مغناطیسی در فواصل هوایی به خارج از مرکز هسته پخش شده و میدان‌های لبه‌ای را ایجاد می‌کند که باعث افزایش مقاومت مغناطیسی مدار می‌شود.

در شکل (۱) تمامی مسیره‌های احتمالی عبور شار مغناطیسی

<sup>2</sup> Hysteresis

<sup>1</sup> Lifting Force

$$P_{4,5} = P_{6,7} = \mu \frac{2w_i d}{x+w_e} \quad (۱۷)$$

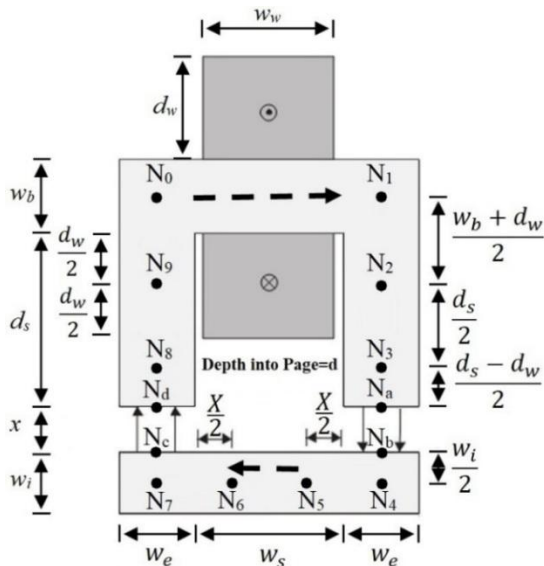
$$P_{5,6} = \mu \frac{w_i d}{w_s - x} \quad (۱۸)$$

تحلیل گره‌ای مدار به یک معادله ماتریسی به صورت رابطه (۱۹) منجر می‌شود.

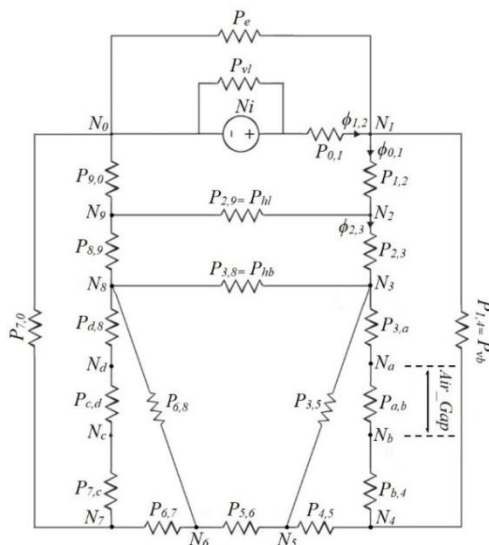
$$[P] (F) = (\Phi) \quad (۱۹)$$

که در آن،  $[P]_{9 \times 9}$  ماتریس پرمانس مدار،  $(F)_{9 \times 1}$  بردار mmf گره‌های مدار، و  $(\Phi)_{9 \times 1}$  بردار منابع شار مغناطیسی مدار می‌باشند. با توجه به شکل (۲-ب)، واضح است که فقط درایه اول بردار  $(\Phi)$  ناصفر است.

$$\Phi_1 = Ni P_{0,1} \quad (۲۰)$$



(الف)



(ب)

شکل (۲): الف- ساختار و ابعاد آهن‌ربای الکتریکی  
ب- مدار معادل مغناطیسی آهن‌ربای الکتریکی

$$P_{hl} = \frac{\mu_0 d_w d}{3w_s} + \frac{2\mu_0 d_w}{3\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi w_e}{w_s}\right) \quad (۱)$$

$$P_{vl} = \frac{1}{6} \frac{\mu_0 w_w d}{d_s + x} \quad (۲)$$

$$P_{hb} = \mu_0 \left( \frac{(d_s - d_w) d}{w_s} + 2 \frac{(d_s - d_w)}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi w_e}{w_s}\right) \right) \quad (۳)$$

$$P_{vb} = \mu_0 \left( \frac{(w_s - w_w) d}{d_s + x} + 2 \frac{(w_s - w_w)}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi Y}{d_s + x}\right) \right) \quad (۴)$$

که در آن،

$$Y = \min(w_b, w_i) \quad (۵)$$

فرمول محاسباتی پرمانس نشستی انتهایی،  $P_e$ ، در [۲] ارائه شده است.

پرمانس اصلی شکاف هوایی برابر است با:

$$P_G = \mu_0 \frac{w_e d}{x} \quad (۶)$$

پرمانس‌هایی که ناشی از اثرات لبه‌ای در چهار وجه شکاف هوایی می‌باشند، عبارتند از:

$$P_{fF} = P_{fB} = \frac{\mu_0 w_e}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi w_i}{x}\right) \quad (۷)$$

$$P_{fO} = \frac{\mu_0 d}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi w_i}{x}\right) \quad (۸)$$

$$P_{fI} = \frac{2\mu_0 d}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi X}{4x}\right) ; X = \min(d_s, w_s) \quad (۹)$$

پرمانس‌های  $P_{fO}$ ،  $P_{fB}$ ،  $P_{fF}$  و  $P_{fI}$  در شکاف هوایی به صورت موازی با  $P_G$  قرار می‌گیرند. اما  $P_{fI}$  با توجه به شکل (۱)، محدوده عملیاتی وسیع‌تری را در مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی در بر گرفته و ریزش شار از داخل بازوهای عمودی بخش U\_شکل به قسمت I\_شکل هسته را نیز شامل می‌شود. این پرمانس به عنوان  $P_{3,5}$  در نظر گرفته می‌شود.

$$P_{3,5} = P_{6,8} = P_{fI} \quad (۱۰)$$

پرمانس‌های مسیر اصلی شار به قرار زیر می‌باشند:

$$P_{0,1} = \mu \frac{w_b d}{w_s + w_e} \quad (۱۱)$$

$$P_{1,2} = P_{0,11} = \mu \frac{2w_e d}{w_b + d_w} \quad (۱۲)$$

$$P_{2,3} = P_{10,11} = \mu \frac{2w_e d}{d_s} \quad (۱۳)$$

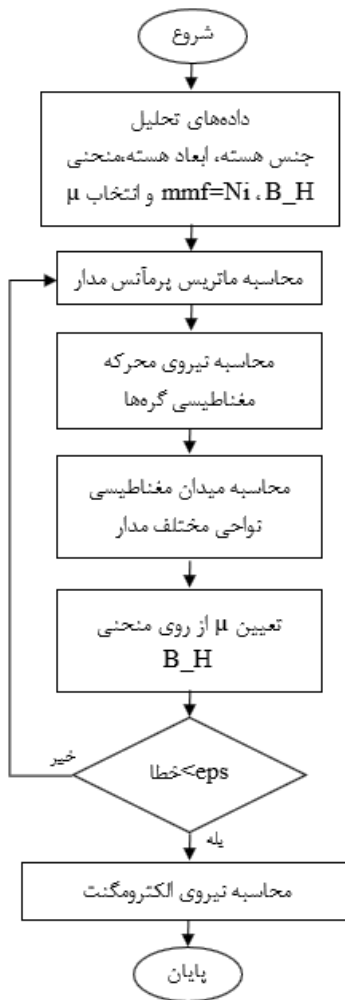
$$P_{3,a} = P_{d,8} = \mu \frac{2w_e d}{d_s - d_w} \quad (۱۴)$$

$$P_{a,b} = P_{c,d} = P_G + P_{fF} + P_{fB} + P_{fO} \quad (۱۵)$$

$$P_{b,4} = P_{7,c} = \mu \frac{2w_e d}{w_i} \quad (۱۶)$$

قابل محاسبه می‌باشد:

$$F_e = -\nabla W_m = -a_x \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} \quad (26)$$



شکل (۳): الگوریتم تحلیل آهن‌ربای الکتریکی

اگر آهن‌ربای الکتریکی به صورت عمودی عمل کند، این نیرو قادر به جذب و بلند کردن جرم  $m$  خواهد بود که از رابطه (۲۷) قابل تعیین است.

$$m = \frac{F_e}{g} \text{ (Kg)} ; \quad g = 9.8 \left(\frac{m}{s^2}\right) \quad (27)$$

در این رابطه  $g$  شتاب ثقل زمین است.

### ۳. طراحی آهن‌ربای الکتریکی

این بخش به طراحی یک آهن‌ربای الکتریکی نمونه اختصاص دارد. چون تعداد پارامترهای طراحی زیاد می‌باشد، مقدار برخی از آن‌ها در ابتدای کار انتخاب شده که ثابت‌های طراحی نامیده می‌شوند. مابقی پارامترها، که متغیرهای طراحی نامیده می‌شوند، در حین طراحی محاسبه و تعیین خواهند شد.

با توجه به رفتار غیرخطی منحنی B-H واضح است که  $\mu$  در بخش‌های مختلف هسته ثابت نیست. برای حل این مشکل، ابتدا با روش درون‌یابی و استفاده از نرم‌افزار MATLAB تابع  $\mu$  نسبت به  $B$  تعیین می‌گردد. سپس تحلیل مدار با یک مقدار اولیه برای  $\mu$  شروع شده و  $B$  در بخش‌های مختلف هسته تعیین می‌گردد. پس از آن مقدار  $\mu$  در بخش‌های مختلف هسته به دست می‌آید. این مقادیر، پرمانس‌ها را تصحیح می‌کنند. سپس تقریب دومی برای  $B$  در بخش‌های مختلف هسته، با پرمانس‌های تصحیح شده به دست می‌آید. از روی مقادیر جدید  $B$ ، نفوذپذیری‌های جدید و پرمانس‌های جدید تعیین می‌گردند. این روال آنقدر تکرار می‌شود تا اینکه تکرارهای بعدی، تغییرات کوچکی در مقادیر محاسبه شده ایجاد نماید. این کار به روش تقریبات متوالی<sup>۱</sup> معروف است.

در شکل (۳)، الگوریتم پیشنهادی برای تحلیل آهن‌ربای الکتریکی ارائه شده است. برنامه نویسی این الگوریتم در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. خطا در این الگوریتم نشان دهنده تفاوت مقدار جدید  $\mu$  و مقدار قبلی آن در نواحی مختلف مدار می‌باشد. یعنی:

$$Error = [(\mu_i) - (\mu_{i-1})] / \mu_i \quad (21)$$

$i = \text{Number of iteration}$

هنگامی که خطا از حد مورد نظر کوچکتر شد، میدان‌ها و پرمانس‌های محاسبه شده قابل قبول می‌باشند. انرژی ذخیره شده در مدار برابر است با:

$$W_m = \frac{1}{2} Li^2 \quad (22)$$

که در آن،  $L$  اندوکتانس مدار بوده و با رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود.

$$L = N^2 P_{eq} = N^2 (P_{vl} + P_T) \quad (23)$$

که در آن،  $P_{eq}$  پرمانس معادل دیده شده از دو سر منبع شار بوده و  $P_T$  از رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود.

$$P_T = P_{0,1} \left(1 - \frac{F_1}{Ni}\right) \quad (24)$$

$F_1$  درایه اول از بردار نیروی محرکه مغناطیسی گره‌های مدار بوده که با توجه به روابط (۱۹) و (۲۰) از رابطه (۲۵) قابل محاسبه است.

$$F_1 = Ni P_{0,1} [P^{-1}]_{1st \text{ row}} [P] P_{0,1} [P^{-1}]_{1st \text{ column}} \quad (25)$$

از آنجایی که تغییرات انرژی فقط ناشی از تغییر طول شکاف هوایی است، نیروی بالاکش آهن‌ربای الکتریکی از رابطه (۲۶)

<sup>1</sup> Successive Approximation Method

بار- آهن‌ربای الکتریکی طراحی شده باید جرم  $15 \text{ Kg}$  را بلند کند که مجموع جرم بار ( $m_L$ ) و جرم بخش I\_ شکل هسته ( $m_I$ ) می‌باشد.

لذا ساختار مورد نظر برای طراحی آهن‌ربای الکتریکی، همانی است که در شکل (۲- الف) ارائه شده است. در جدول (۱) مشخصات هسته و سیم‌پیچ آهن‌ربای الکتریکی ارائه شده‌اند. با توجه به مقادیر ارائه شده در این جدول، سطح مقطع عرضی هسته در همه جا ثابت فرض شده و برابر با  $16 \times 36 \text{ mm}^2$  می‌باشد.

با توجه به ثابت‌های طراحی انتخاب شده، متغیرهای طراحی عبارتند از:

- جریان الکتریکی DC مورد نیاز برای تغذیه سیم‌پیچ (i)
- تعداد دور مورد نیاز برای سیم‌پیچ (N)
- پهنای سیم‌پیچ ( $w_w$ )
- ارتفاع سیم‌پیچ ( $d_w$ )

با مشخص شدن قطر سیم، ارتفاع، پهنای و جرم سیم‌پیچ متغیرهایی هستند که در حین طراحی تعیین خواهند شد. مقدار آن‌ها باید به گونه‌ای باشد که رابطه (۳۰) برقرار باشد:

$$w_w < w_s ; \quad d_w < d_s \quad (30)$$

جدول (۱): معرفی مشخصات هسته و سیم‌پیچ.

مقدار	نماد استفاده شده	نام کمیت
64 (mm)	$w_s$	پهنای شکاف
48 (mm)	$d_s$	ارتفاع شکاف
16 (mm)	$w_e$	پهنای بازوها
16 (mm)	$w_i$	پهنای قسمت I_ شکل هسته
16 (mm)	$w_b$	پهنای پشتی هسته
36 (mm)	$d$	ضخامت هسته
5 (mm)	$x$	فاصله هوایی
0.9948 (Kg)	$m_U$	جرم قسمت U_ شکل هسته
0.4263 (Kg)	$m_I$	جرم قسمت I_ شکل هسته
محاسبه در الگوریتم طراحی	$w_w$	پهنای سیم‌پیچ (mm)
محاسبه در الگوریتم طراحی	$d_w$	ارتفاع سیم‌پیچ (mm)
محاسبه در الگوریتم طراحی	---	جرم سیم‌پیچ (Kg)

### ۲-۳. روش طراحی

در شکل (۴) الگوریتم طراحی آهن‌ربای الکتریکی رسم شده است. برای محاسبه و تعیین متغیرهای طراحی، ابتدا باید نیروی بالاکش مورد نیاز محاسبه گردد  $F_e = m g$ .

با توجه به پدیده اشباع در هسته‌های فرومغناطیس، محدودیتی روی حداکثر نیروی وارد بر واحد سطح هسته وجود دارد که هنگام طراحی باید در نظر گرفته شود [۱۵-۱۳].

### ۱-۳. انتخاب ثابت‌ها و متغیرهای طراحی

ثابت‌های طراحی استفاده شده در این بخش عبارتند از:

جنس هسته- هسته از جنس مگنسیل<sup>۱</sup> که آلیاژی از آهن و سیلیکن است، انتخاب می‌شود. در [۱۱ و ۱۲] مشخصات مغناطیسی این آلیاژ از جمله منحنی B-H و نقطه اشباع آن داده شده است. تابع  $\mu(B)$  با استفاده از روش درون‌یابی و جعبه ابزار cftool نرم‌افزار MATLAB به صورت رابطه (۲۸) تقریب زده می‌شود.

$$\mu(B) = \frac{a_3 * B^3 + a_2 * B^2 + a_1 * B + a_0}{c_2 B^2 + c_1 * B + c_0} \quad (28)$$

که در آن ضرایب  $a_i$  و  $c_i$  در رابطه (۲۹) داده شده‌اند:

$$\begin{aligned} a_3 &= -0.090147694683728 \\ a_2 &= 0.372231707498844 \\ a_1 &= -0.512671484626112 \\ a_0 &= 0.236637207760993 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} c_2 &= 1 \\ c_1 &= -2.115205192304355 \\ c_0 &= 1.166976434278919 \end{aligned}$$

ساختار هندسی هسته- ساختارهای مختلفی برای هسته مطرح می‌باشد. ساختارهای  $U_I$ ،  $U_U$ ،  $E_I$ ،  $E_U$  و از رایج‌ترین ساختارهای هندسی برای تعیین شکل هسته فرومغناطیس می‌باشند. در [۳-۵] با استفاده از نرم‌افزار ANSYS این ساختارها از نظر شارهای نشتی و اثرات لبه‌ای بررسی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند و ساختار  $U_I$  به عنوان مناسب‌ترین ساختار شناخته شده است. لذا در این مقاله از ساختار هندسی  $U_I$  برای هسته استفاده می‌شود. وزن بخش  $U$  شکل برابر با  $0.8438 \text{ Kg}$  و وزن بخش I\_ شکل  $0.4219 \text{ Kg}$  است.

جنس سیم‌پیچ- سیم انتخاب شده از جنس مس با چگالی وزنی  $8960 \text{ Kg/m}^3$  و چگالی جریان مجاز  $10^6 \times 7.62 \text{ A/m}^2$  می‌باشد.

محل سیم‌پیچ- در [۳] محل‌های مختلف سیم‌پیچ بررسی شده‌اند. محل انتخاب شده برای سیم‌پیچ روی ضلع افقی بخش  $U$  شکل هسته انتخاب شده است. این ساختار تک سیم‌پیچ، ظاهر مقارنی به آهن‌ربای الکتریکی می‌دهد.

فاصله هوایی- هدف این است که در فاصله هوایی  $5 \text{ mm}$  بار توسط آهن‌ربای الکتریکی جذب و بلند گردد.

<sup>1</sup> Magnasil = 97% Fe + 3% Si

- اولاً حاصل ضرب  $N$  و  $i$  برابر با مقدار نیروی محرکه مغناطیسی ( $mmf$ ) باشد.
- ثانیاً تعداد دور در هر لایه و نیز تعداد لایه‌های سیم‌پیچ باید به گونه‌ای باشد که روابط (۳۰) برقرار بمانند.
- ثالثاً قطر سیم باید به گونه‌ای انتخاب شود که تحمل جریان عبوری را داشته باشد.



شکل (۴): فلوجارت طراحی آهن‌ربای الکتریکی

تحت شرایط فوق و با هدف کاهش وزن سیم و سهولت در سیم‌پیچی، قطر سیم  $1.2 \text{ mm}$ ، جریان الکتریکی برابر با  $6 \text{ A}$  و تعداد دور سیم‌پیچ برابر با  $600$  دور تعیین گردید که در  $12$  لایه  $50$  دوری پیچیده می‌شود. بنابراین، پهنا و ارتفاع سیم‌پیچ، به ترتیب  $60 \text{ mm}$  و  $14.4 \text{ mm}$  تعیین می‌گردند و جرم سیم‌پیچ  $0.87 \text{ Kg}$  خواهد بود.

$$F_{Max} = 2 \times \frac{B_{sat}^2 \times S}{2\mu_0} \quad (31)$$

بنابراین، با یک ساختار مشخص برای هسته و به‌ازای یک نیروی داده شده اگر  $F_e > F_{Max}$  باشد، باید از هسته بزرگتری استفاده نمود.

پس از اطمینان از اشباع نشدن هسته، میدان مغناطیسی مورد نیاز در شکاف هوایی ( $B_{gap}$ ) با استفاده از رابطه (۳۲) محاسبه می‌شود:

$$B_{gap} = \sqrt{\frac{\mu_0 F_e}{S}} \quad (32)$$

سپس مقدار اولیه‌ای برای  $\mu$  و قطر سیم انتخاب می‌گردد. با صرف نظر کردن از شارهای نشتی و اثرات لبه‌ای، نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۳۳) محاسبه می‌گردد [۱۶ و ۱۷].

$$Ni \approx 2x \sqrt{\frac{F_e}{\mu_0 S}} \quad (At) \quad (33)$$

این مقدار به عنوان مقدار اولیه نیروی محرکه مغناطیسی مورد نیاز برای آهن‌ربای الکتریکی انتخاب شده و با کمک رابطه (۳۰) پهنا و ارتفاع سیم‌پیچ تعیین می‌گردند.

اکنون با تحلیل گره‌ای، میدان  $B$  در نواحی مختلف مدار تعیین می‌شود. از رابطه (۲۹) مقدار جدید  $\mu$  محاسبه خواهد شد. با استفاده از روال تقریبات متوالی هنگامی که اختلاف بین مقادیر جدید و قبلی نفوذپذیری بسیار کوچک باشد، می‌توان به نتایج اعتماد نمود. حال می‌بایست از روی مقدار محاسبه شده میدان مغناطیسی در شکاف هوایی ( $B_g$ )، نیروی محرکه مغناطیسی مدار مطابق رابطه (۳۴) تصحیح گردد.

$$(Ni)_{new} = (Ni)_{old} \left( \frac{B_{gap}}{B_g} \right) \quad (34)$$

خطاهای  $E_1$  و  $E_2$  بیانگر اختلاف مقدار تخمینی و مقدار مورد نیاز برای  $\mu$  و  $B_{gap}$  بوده و از روابط (۳۵) و (۳۶) تعیین می‌شوند:

$$E_1 = \frac{\mu_i - \mu_{i-1}}{\mu_i} \quad (35)$$

$$E_2 = \frac{B_{gap} - B_{g,i}}{B_{gap}} \quad (36)$$

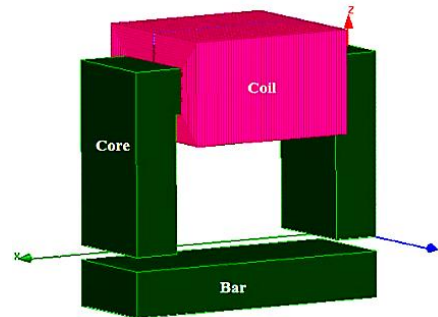
$i = \text{Number of iteration}$

پس از اجرای الگوریتم طراحی، مقدار نهایی نیروی محرکه مغناطیسی برابر با  $At$   $3600$  تعیین گردید. برای تعیین مقادیر  $N$  و  $i$  توجه به چند نکته حائز اهمیت است.

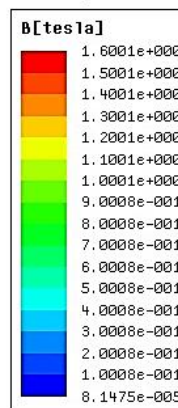
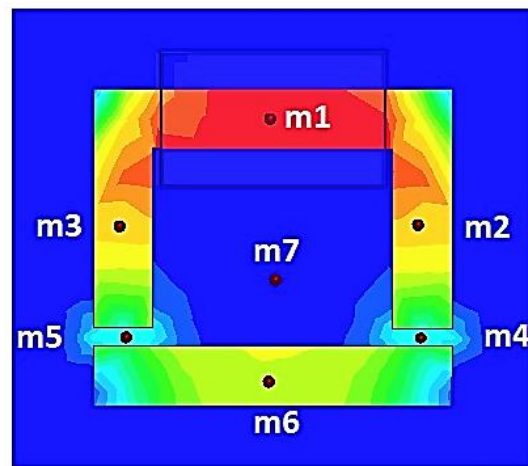


#### ۴. شبیه‌سازی و ساخت

شکل (۵) ساختار سه بعدی آهنربای الکتریکی طراحی شده را در محیط شبیه‌ساز MAXWELL نشان می‌دهد. جنس، ابعاد و سایر مشخصات آهنربای الکتریکی در بخش ۳ ارائه شده‌اند. در شکل (۶) خطوط میدان مغناطیسی شبیه‌سازی شده، ناشی از جریان الکتریکی سیم‌پیچ، درون هسته و محیط پیرامون آن ترسیم شده است.



شکل (۵): ساختار سه‌بعدی آهنربای الکتریکی طراحی شده



Name	B [tesla]
m1	1.549e+000
m2	1.269e+000
m3	1.254e+000
m4	4.599e-001
m5	4.675e-001
m6	1.092e+000
m7	4.717e-002

شکل (۶): شدت میدان مغناطیسی در آهنربای الکتریکی

همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، میدان درون هسته و زیر سیم‌پیچ بیشترین مقدار را دارد. در سایر قسمتهای

هسته، بخشی از شار و میدان مغناطیسی به فضای اطراف نشت کرده و بخشی دیگر به دلیل اثرات لبه‌ای تلف می‌شوند. با توجه به شکل (۶) بیشترین مقدار میدان مغناطیسی درون هسته تقریباً ۱.۵ T است که کمتر از مقدار اشباع می‌باشد. در این شبیه‌سازی، نیروی بالاکش آهنربای الکتریکی ۱۴۴.۳۴ N به دست آمد که برای بلند کردن وزنه ۱۴.۷۲۸۶ Kg کافی است. تفاوت نتایج حاصل از طراحی و شبیه‌سازی کمتر از ۲٪ می‌باشد.

با توجه به رابطه (۳۲) بخش مؤثر میدان مغناطیسی که از شکاف هوایی وارد بخش I\_شکل هسته می‌شود حدوداً ۰.۵۶ T است که با نتایج ارائه شده در شکل (۶) مطابقت دارد. با تحلیل انجام شده در نرم‌افزار MATLAB، نیروی بالاکش آهنربای الکتریکی برابر با ۱۴۵ N تعیین گردید که به مقدار شبیه‌سازی نزدیک بوده و خطایی کمتر از ۰.۵٪ دارد. این نتایج نه تنها به کم بودن تلفات و مناسب بودن ساختار آهنربای الکتریکی پیشنهادی اشاره می‌کند، بلکه دلالت بر دقت بالای روش طراحی دارد.

در [۱۰]، روشی برای طراحی یک آهنربای الکتریکی با هسته‌ای از جنس میکروسیل<sup>۹</sup>، که آلیاژی از آهن و سیلیکن می‌باشد، به منظور بلند کردن باری به جرم ۱۰ Kg ارائه شده است. مشخصات آهنربای الکتریکی مذکور با الگوریتم و روش پیشنهادی در این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نتایج دو روش، خطایی کمتر از ۱٪ در جرم بار قابل حمل را نشان می‌دهد که این حاکی از دقت بالای روش پیشنهاد شده در این مقاله است.

شکل (۷) تغییرات نیروی بالاکش وارد بر بار را نسبت به تغییرات فاصله هوایی در آهنربای طراحی شده، نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که با کاهش شکاف هوایی، نیرو افزایش می‌یابد. بنابراین با تنظیم فاصله هوایی می‌توان بارهای مختلفی را جذب نمود. مثلاً اگر فاصله هوایی ۳ mm باشد، این آهنربای الکتریکی قادر به جذب و بلند کردن وزنه ۳۷.۵ Kg خواهد بود. از طرف دیگر با افزایش شکاف هوایی تا ۷ mm نیروی کشش به ۷۶ N کاهش می‌یابد که توانایی جذب وزنه ۷.۷۵ Kg را دارد. توجه فیزیکی این مطلب آن است که با کاهش فاصله هوایی، اثرات لبه‌ای میدان کاهش یافته و میدان مغناطیسی قویتری به بخش I\_شکل هسته وارد می‌شود. چون نیروی کشش با مجذور میدان مغناطیسی متناسب است، بارهای سنگین‌تری را می‌توان جذب و جابه‌جا نمود.

در شکل (۸) ماکت جرتفیل مغناطیسی ساخته شده نمایش داده شده است. آهنربای الکتریکی استفاده شده در جرتفیل براساس اطلاعات بخش ۳ این مقاله طراحی و ساخته شده است.

<sup>9</sup> Microsil

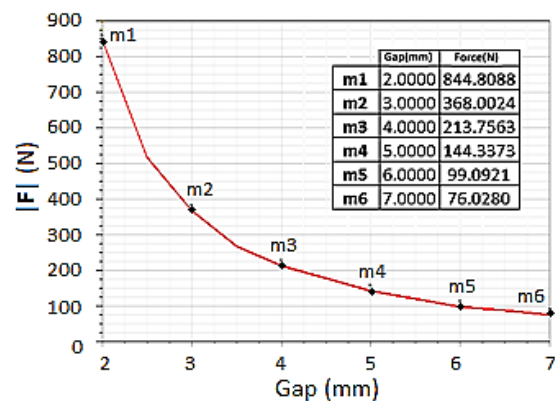
خوبی داشته و نشان دهنده دقت بالای ۹۸٪ است.

### ۵. نتیجه گیری

در این مقاله به ارائه روشی نوین برای تحلیل، طراحی، شبیه سازی و ساخت یک آهن ربای الکتریکی به منظور دستیابی به دانش فنی و بومی سازی آن پرداخته شد. در بخش تحلیل آهن ربای الکتریکی، یک مدار معادل مغناطیسی جدید معرفی گردید که شار نشتی و اثرات لبه ای را با دقت بیشتری مدل می نماید. همچنین از نرم افزار ANSYS MAXWELL در کنار نرم افزار MATLAB به منظور شبیه سازی و افزایش ضریب اطمینان نتایج استفاده شد. چون پارامترهای زیادی در طراحی موثرند، برخی از آن ها معلوم و تعدادی مجهول در نظر گرفته شدند. بررسی مقالات و مراجع نشان داد که آهن ربای الکتریکی با ساختار هندسی U-I تک سیم پیچه کمترین شار نشتی و اثرات لبه ای را دارد. به دلیل قابل اغماض بودن تلفات فوکو و هیستریزس در حالت جریان DC، موق بودن هسته لزومی ندارد، اما به خاطر سهولت ساخت هسته مغناطیسی و با توجه به بازار داخل کشور، از آهن سیلیکنی موق استفاده شد. همچنین با توجه به جنس سیم و حداکثر چگالی جریان الکتریکی قابل تحمل آن، متغیرهایی از قبیل قطر سیم، جریان الکتریکی و تعداد دور سیم پیچ تعیین شدند. در نهایت این آهن ربای الکتریکی ساخته شد و آزمایش های لازم بر روی آن انجام گرفت. نتایج کسب شده از آزمایش ها، با دقت بیش از ۹۸٪ به نتایج شبیه سازی و طراحی نزدیک بوده که این دلالت بر صحت روش طراحی پیشنهادی دارد.

### ۶. مراجع

- [1] D. K. Cheng, "Filed and Wave Electromagnetics," Chap. 6, Addison Wesley, 1983.
- [2] J. Cale, S. D. Sudhoff, and L.-Q. Tan, "Accurately Modeling EI Core Inductors Using a High-Fidelity Magnetic Equivalent Circuit Approach," IEEE T. Magn., vol. 42, no. 1, pp. 40-46, Jan. 2006.
- [3] P. K. Biswas and S. Banerjee, "Ansys Simulation Based Comparative Study between Different Actuators and Guide-ways used in DC Electromagnetic Suspension Systems," INT. J. Elec. Eng. Inf. (JEEI), vol. 4, no. 2, pp. 217-230, July 2012.
- [4] S. Banerjee, P. K. Biswas, R. Bhaduri, and P. Sarkar, "A Comparative Study between Different Structures of Rail and Actuator Used in Electromagnetic Levitation Systems," Proc. in 5th IET Intentional Conference on Power Electronics, Machines and Drives, PEMD 2010, UK, 19-21 April 2010.
- [5] P. K. Biswas and S. Bannerjee, "Analysis of U-I and U-U Type Rail and Actuator Used in Electromagnetic Levitation System Using FEM Software," INT J. Emerg. Tech. Adv. Eng. (IJETA), vol. 2, no. 5, May 2012.
- [6] Z. Hederic, D. Sostaric, and G. Horvat, "Numerical Calculation of Electromagnetic Forces in Magnetic Actuator for Use in Active Suspension System for Vehicles," Technical Gazette, vol. 20, no. 1, pp. 73-77, 2013.



شکل (۷): تغییرات نیروی کشش وارد بر بار نسبت به فاصله هوایی.



شکل (۸): جرثقیل مغناطیسی ساخته شده در محیط آزمایشگاه.

ضخامت هسته ۳۶ mm بوده و سطح مقطع آن در بخش های مختلف مقدار ثابت  $36 \times 16 \text{ mm}^2$  می باشد. سیم پیچ از  $0.86/4 \text{ m}$  سیم مسی با قطر  $1.2 \text{ mm}$  تشکیل شده که در ۱۰ لایه روی هسته پیچیده شده است. هر لایه از ۶۰ دور سیم پیچ تشکیل شده که مجموعاً ۶۰۰ دور سیم پیچ با جریان  $6 \text{ A}$  را ایجاد می کند. این سیم پیچ دارای مقاومت  $1/4 \Omega$  می باشد که تلفات مسی معادل  $50/4 \text{ W}$  را ایجاد می کند. از آن جایی که فرکانس برق DC، صفر است، لذا بحث تلفات فوکو و هیستریزس قابل اغماض می باشد.

جرم قسمت U-شکل همراه با سیم پیچ  $1/138 \text{ Kg}$  می باشد. قسمت I-شکل دارای جرم  $0/4219 \text{ Kg}$  و ابعاد  $36 \times 16 \times 96 \text{ mm}^3$  می باشد. این جرثقیل دو عدد موتور الکتریکی جریان مستقیم گیربکس دار دارد که یکی از آن ها برای بالا و پایین بردن بار و دیگری به منظور جابجایی افقی بار بر روی ریل های تعبیه شده بر روی میز کار جرثقیل استفاده شده اند. منبع تغذیه DC استفاده شده  $12 \text{ V} / 20 \text{ A}$  بوده که وظیفه برق رسانی به موتورها و سیم پیچ آهن ربای الکتریکی را برعهده دارد.

در آزمایش های به عمل آمده، سنگین ترین باری که توسط این جرثقیل از فاصله  $5 \text{ mm}$  جذب و بلند گردید، وزنه  $14.5 \text{ Kg}$  بود که نشان دهنده نیرویی معادل  $142.1 \text{ N}$  می باشد. نتایج این اندازه گیری با نتایج شبیه سازی و تحلیل نرم افزاری سازگاری



- [12] C. W. M. T. McLyman, "Transformer and Inductor Design Handbook," Marcel Dekker, Inc., 3rd ed. 2004.
- [13] Y. Bakhvalov, V. Grechikhin, O. Kravchenko, and A. Yufanova, "Optimal Design of Shell-Type Electromagnets of XY-Coordinate Electric Actuator," IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS), Oct. 2016.
- [14] L. Kolimas and P. Sul, "Computer Design of Electromagnets," The 4th Electronic International Interdisciplinary Conference, 2015.
- [15] A. S. Balte, V. K. Kulloli, and S. Y. Gajjal, "Design and Fabrication of Electromagnetic Dynsmometer for Micro-Power Measurement," Int. J. Eng. Sci. & Res. Tech. (IJESRT), pp. 430-434, Feb. 2015.
- [16] J. Y. Choi, et al., "Design and Dynamic Analysis of Magnetically Levitated Electromagnets with Low-Resolution Position Sensor," IEEE T. Magn., vol. 48, no. 11, pp. 4546-4549, Nov. 2012.
- [17] J. D. Wise, "Magnetic Devices II: Reluctance and Inductance," Internet: [www.ece.rice.edu/~jdw/435/book/ch9.pdf](http://www.ece.rice.edu/~jdw/435/book/ch9.pdf), Aug. 9, 2011.
- [7] S. Hughes, "Lecture 10: Magnetic force, Magnetic fields, Ampere's law," Internet: [web.mit.edu/sahughes/www/8.022/lec13.pdf](http://web.mit.edu/sahughes/www/8.022/lec13.pdf), Mar. 2005.
- [8] Sierzega, "Magnetism 2: Magnetic Force Exerted by a Magnetic Field on a Current-Carrying Wire," Internet: <http://www.west-windsor-plainsboro.k12.nj.us/common/pages/DisplayFile.aspx?itemId=20299639>.
- [9] Sierzega, "Magnetism 4: Magnetic Force Exerted by a Magnetic Field on a Single Moving Charged Particle," Internet: [https://nanopdf.com/download/magnetic-force-exerted-by-a-magnetic-field-on-a-single-moving\\_pdf](https://nanopdf.com/download/magnetic-force-exerted-by-a-magnetic-field-on-a-single-moving_pdf).
- [10] S. D. Sudhoff, "Lecture 8: A Design Example - An Electromagnet," Internet: <https://engineering.purdue.edu/~sudhoff/ee630/Lecture08.pdf>.
- [11] S. Bidwell, "On the Lifting Power of Electromagnets and the Magnetisation of Iron," Proc. Royal Society of London, vol. 40, pp. 486-496, Jun. 1886.

---

**A Novel Method for Field Analysis, Design and Construction  
of a Lifting Electromagnet**

**S. A. Hashemi \***

**Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Mohajer, Isfahan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Isfahan, Iran.**

(Received: 20/10/2018, Accepted: 02/06/2019)

**Abstract**

*The magnetic crane is an example of industrial applications of magnetic absorption in which an electromagnet is used to create the necessary magnetic force for lifting and moving objects. There are various structures for the shape of electromagnet's core, but studies show that the U-I structure with a symmetrical winding is the most appropriate one in terms of reducing the loss due to leakage flux and fringing effect. The purpose of this paper is presenting a novel method for field analysis and designing an electromagnet. Focusing on the leakage flux and fringing effect, and taking into consideration the nonlinear behavior of the B-H curve and saturation point of ferromagnetic core, a new magnetic equivalent circuit for the electromagnet is proposed. For numerical analysis and design of the electromagnet, the Matlab software and for simulation of its magnetic field and force, the ANSYS MAXWELL software has been used. To verify the accuracy of the presented method, the prototype of an electromagnet has been made, in accordance with the design parameters extracted from the proposed algorithm. The comparison between measurements and simulation results show that the error is less than 2%, which confirms the accuracy of the proposed method.*

**Keywords:** Electromagnet, Magnetic Equivalent Circuit, Magnetic Field, Leakage Flux, Fringing Effects, Lifting Force

---

\* Corresponding author E-mail: ahashemi@tvu.ac.ir