طراحی و ساخت موتور خطی جریان مستقیم

یوسف حجت[1*]، محمد کریمی[2]، محسن بهرامی[3]، امیرعبدالله[4]

1- استادیار گروه ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

2- کارشناس ارشد ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

3- استاد گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

4- استادیار گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

***تهران صندوق پستی 14115-143**

yhojjat@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: فروردین 1383، پذیرش مقاله: فروردین 1385)

چکیده- در این مقاله، طراحی و ساخت نوعی موتور خطی جریان مستقیم با آهنربای دائمی بررسی می‌شود، که از نوع تخت با آهنربای متحرک است. این موتور ساختار بسیار ساده‌ای دارد و بنابراین کنترل آن بسیار ساده است. در این طرح، نیروی رانش بر اثر قرار گرفتن سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی آهنربای دائم ایجاد می‌شود. در ساخت این موتور از آهنربای دائمی از نوع ساخته شده با عناصر کمیاب خاکی استفاده می‌شود که قویترین آهنربا در حال حاضر است، به‌همین علت این موتور بازده بالایی دارد. برای تخمین اولیه پارامترهای هندسی مانند ابعاد آهنربا و سیم‌پیچ از معادلات ساده شده ریاضی و برای تحلیل دقیق از روش اجزای محدود استفاده شده است. نتایج تجربی و مقایسه آن با نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود، بیانگر تطابق خوب این روش تحلیل با نتایج تجربی است.

کلید واژگان: موتور خطی، جریان مستقیم، آهنربای دائم.

1- مقدمه

در موارد بسیاری از موتورهای خطی در ماشینهای مخصوص- که استفاده از نوع دورانی آن با مشکلات خاصی روبه‌روست- استفاده می‌شود. همچنین زمانی که سرعتهای جابه‌جایی بزرگی مدنظر باشد یا تغییر شکل الاستیک اجزا باعث کاهش دقت شود، کاربرد موتورهای خطی ضرورت می‌یابد. استفاده در سیستمهای تسمه نقاله، حمل و نقل مواد، ذخیره‌سازی، جابه‌جایی انسانها، پمپ کردن فلز در حالت مایع، شتاب‌دهنده‌ها و پرتاب‌کننده‌ها، ماشینهای ابزار و قطارهای سریع‌السیر، برخی از کاربردهای موتورهای خطی است. با استفاده از موتورهای دورانی و مکانیزمهای مختلفی مانند پیچ و مهره، چرخ زنجیر یا چرخدنده شانه‌ای, می‌توان حرکت خطی را ایجاد کرد. اما با نگاهی به مسیر انتقال حرکت، می‌توان دریافت که برای تبدیل حرکت دورانی موتور به حرکت خطی, از عناصر مکانیکی مختلفی استفاده می‌شود. با مقایسه دو سیستم استفاده کننده از موتور خطی و موتور دورانی برای ایجاد حرکت خطی می‌توان به نکات زیر رسید:

- در مکانیزمهای تبدیل حرکت دورانی به حرکت خطی معمولاً از جعبه دنده استفاده می‌شود که خطای لقی و خطای الاستیک دارند. اما در موتورهای خطی چنین خطاهایی وجود ندارد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1386.7.2.11.3]

- خصوصیات بهترین پیچ انتقال قدرت عبارت است از سرعتی در محدوده 40-60m/min، حداکثر شتاب 1g، قابلیت تکرارپذیری در حدود 0/01mm و عمری در حدود 8000 ساعت. در حالی که در موتور خطی می‌توان به سرعتی در حدود 360-3000m/min، شتابی تا حدود 10g، قابلیت تکرارپذیری در حدود 0/001mm و عمری در حدود 50000 ساعت دست یافت.

- موتورهای خطی حرکتی کاملاً هموار دارند، درحالی‌که پیچهای انتقال قدرت به‌خاطر ارتعاشات ناشی از ورود و خروج ساچمه‌ها به داخل مهره, حرکتی نرم و هموار ندارند. در سیستمهایی که از موتور خطی برای تولید حرکت خطی استفاده می‌کنند، محدودیتی در طول دامنه حرکت وجود ندارد, در حالی‌که در پیچهای انتقال قدرت، محدودیت طول وجود دارد [1].

در سال 1989 در دانشگاه ولز کالج کاردیف انگلستان تحقیقی در زمینه موتور خطی جریان مستقیم با آهنربای دائم انجام شد. مشخصات موتورهای بررسی شده در این تحقیق در جدول 1 آورده شده است [2].

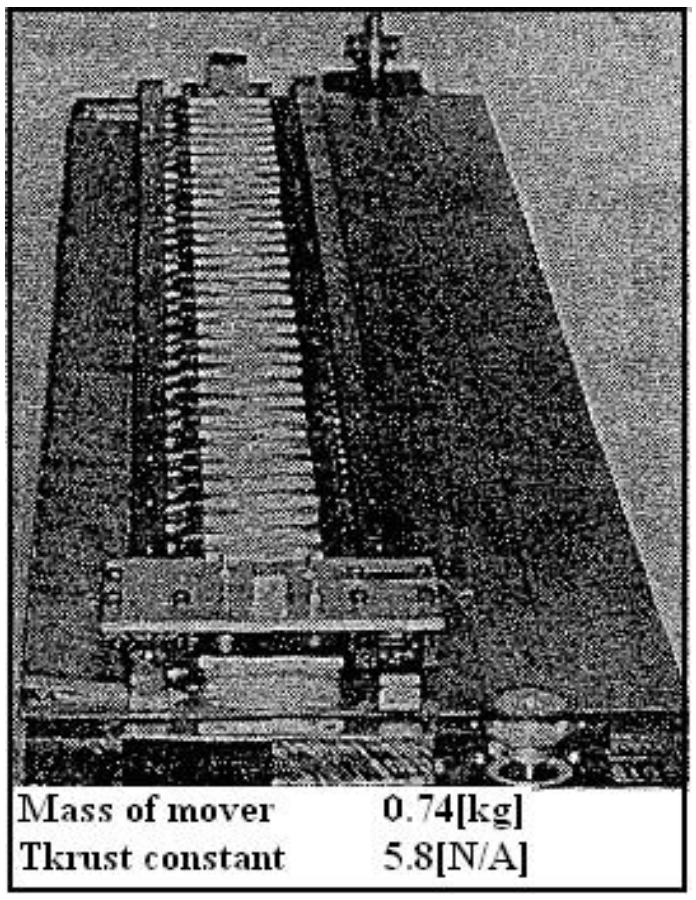
جدول 1 مشخصات موتورهای مطالعه شده در تحقیق دانشگاه کاردیف انگلیس

موتورها / پارامترها	موتور 1	موتور 2	موتور 3
طول متحرک (cm)	8	12	23/7
قطر خارجی (cm)	13/2	13/2	13/2
وزن متحرک (kg)	1/73	2/75	4/77

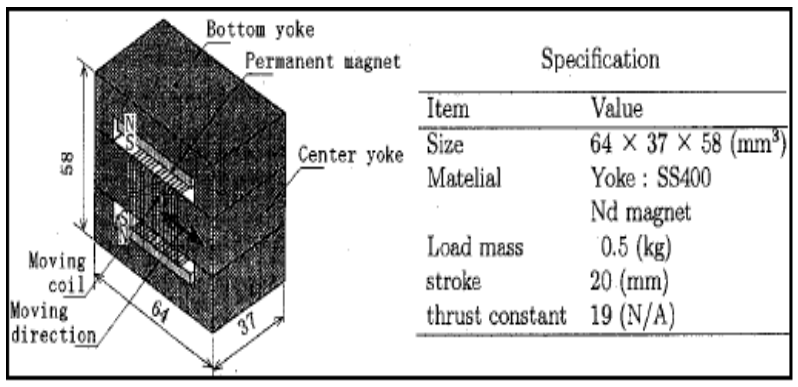
در سال 1997 جین‌هور[1] و همکاران در دانشگاه هانینگ سئول در کره جنوبی, نوعی موتور خطی جریان مستقیم را ساخته و ارائه کردند که نسبت ثابت نیروی رانش به جرم برابر 7/84 نیوتن بر آمپر به‌ازای واحد جرم متحرک داشت (شکل1) [3].

1. Jin Hur

در همین سال در ژاپن, یاجیما[2] و همکاران در دانشگاه شینسو[3] نوعی موتور خطی جریان مستقیم را تکمیل و ارائه کردند که نسبت ثابت نیروی رانش به جرم بسیار بالایی داشت (38 نیوتن بر آمپر به‌ازای واحد جرم متحرک). طرح ساده‌ای از این موتور همراه با برخی مشخصات آن در شکل 2 مشاهده می‌شود [4].



شکل 1 موتور خطی جریان مستقیم ساخته شده در دانشگاه هانینگ سئول (کره جنوبی)



شکل 2 موتور خطی جریان مستقیم ساخته شده در دانشگاه شینسو ژاپن

در ایران, موتور خطی پله‌ای در سال 1380 در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر مورد

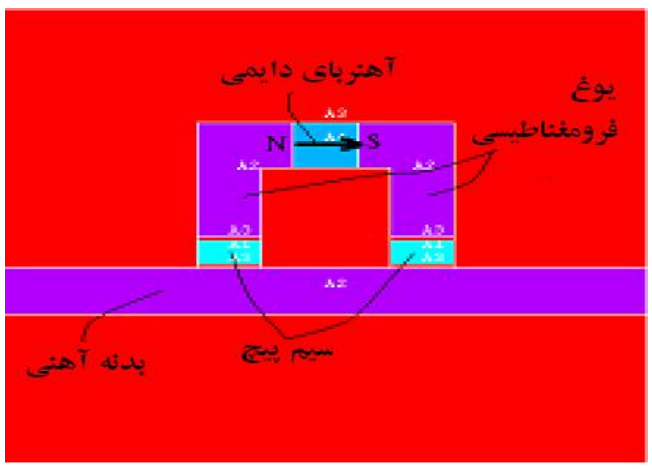
2. Yajima
3. Shinsu

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1386.7.2.11.3]

مطالعه قرار گرفته و ساخته شد [5]. موتور خطی القایی نیز در سال 1381 در دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر طراحی و ساخته شد [6].

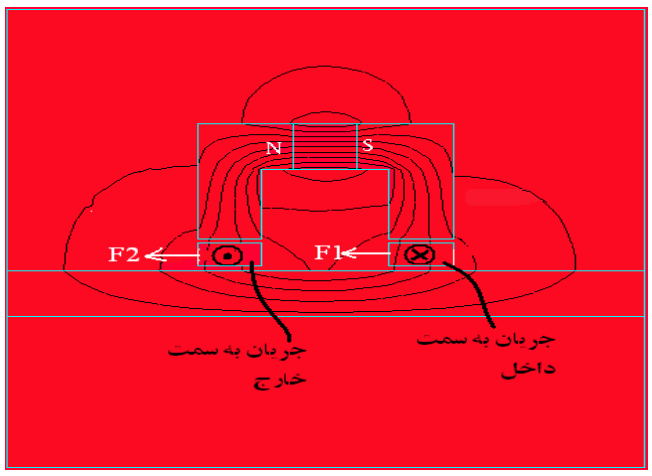
2- ارائه مدلهای مختلف برای طراحی و ساخت موتور خطی جریان مستقیم

اگر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی قرار گیرد, بر سیم نیرویی وارد می‌شود که جهت آن مطابق قانون دست راست, عمود بر جهت میدان و جریان است. براساس این اصل می‌توان طرحهای بسیاری را برای موتور خطی ارائه داد. طرحی که در اینجا بررسی می‌شود, نوعی مدار مغناطیسی شامل آهنربای دائمی، رسانای حامل جریان و یوغهایی از جنس مواد فرومغناطیس برای تکمیل مدار مغناطیسی است (شکل3).



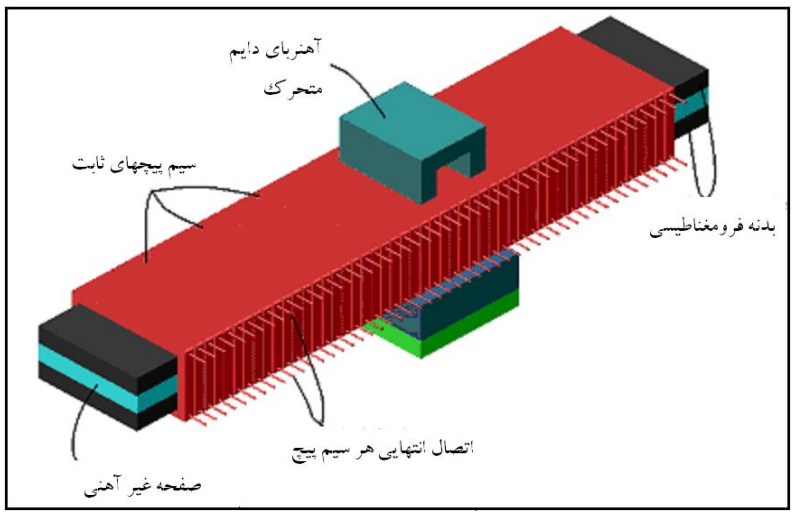
شکل 3 طرحواره دوبُعدی طرح ارائه شده

در این طرح با استفاده از مواد فرومغناطیسی, شار مغناطیسی آهنربا به مکان مناسب یعنی محل رسانا هدایت شده و در نتیجه اثر این میدان بر رسانای حامل جریان, نیرو تولید می‌شود (شکل4).



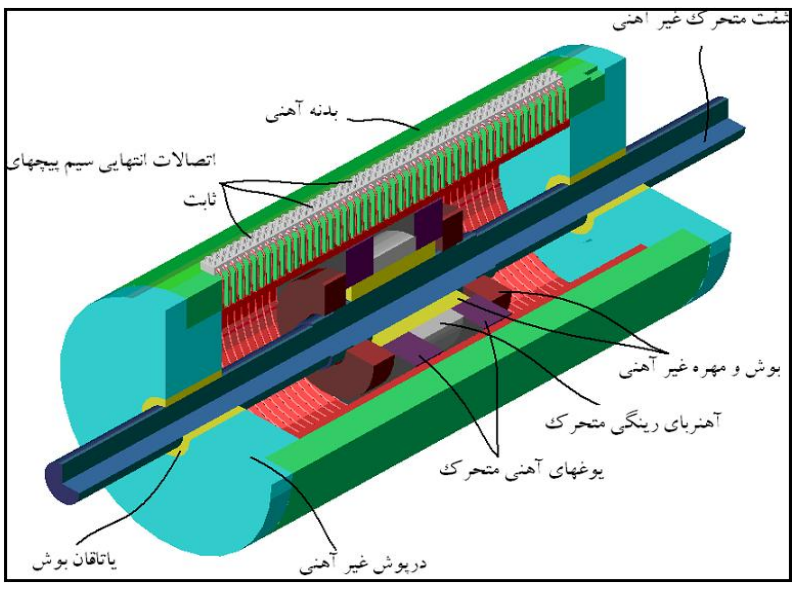
شکل 4 چگالی شار مغناطیسی و جهت نیروها

در این حالت نیروی وارد شده از طرف میدان در دو رسانا همجهت بوده و یکدیگر را تقویت می‌کنند. براساس این طرح دوبُعدی, طرحهای مختلفی را می‌توان ارائه کرد که در ادامه بررسی می‌شود. اگر این طرح دوبُعدی در امتداد خط راست گسترده شود, طرح موتور خطی تخت به‌دست می‌آید (شکل5).



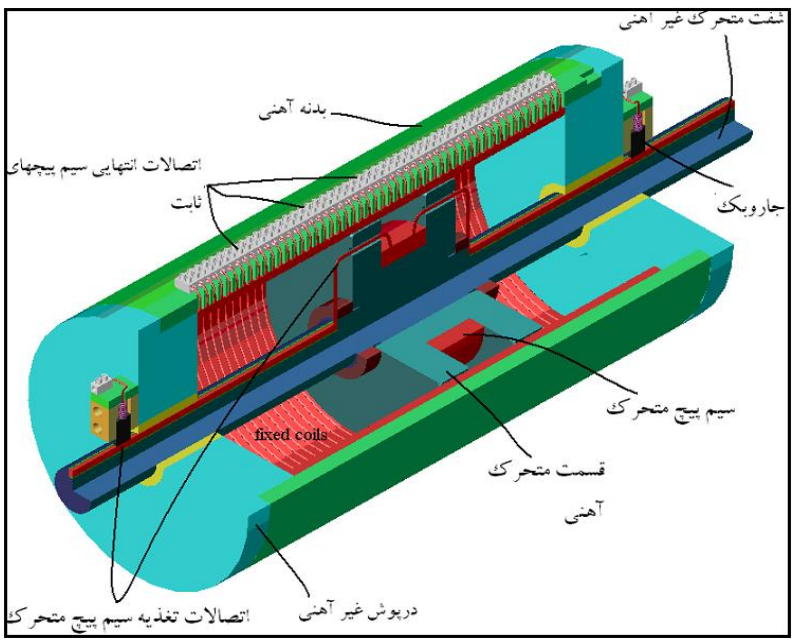
شکل 5 موتور تخت خطی جریان مستقیم با استفاده از سیم‌پیچ و دو صفحه آهنی

طرح فوق نوع دیگری از موتورهای خطی را در ذهن تداعی می‌کند که موتورهای لوله‌ای نامیده می‌شوند. اگر طرح دوبُعدی مزبور به‌جای اینکه در طول خط راست گسترده شود، حول محوری مرکزی گسترده شود، موتور خطی لوله‌ای به‌وجود می‌آید. میدان مغناطیسی در این موتور ممکن است به‌وسیله آهنربای دائمی شکل 6 یا سیم‌پیچ تحریک تولید شود، (شکل7).



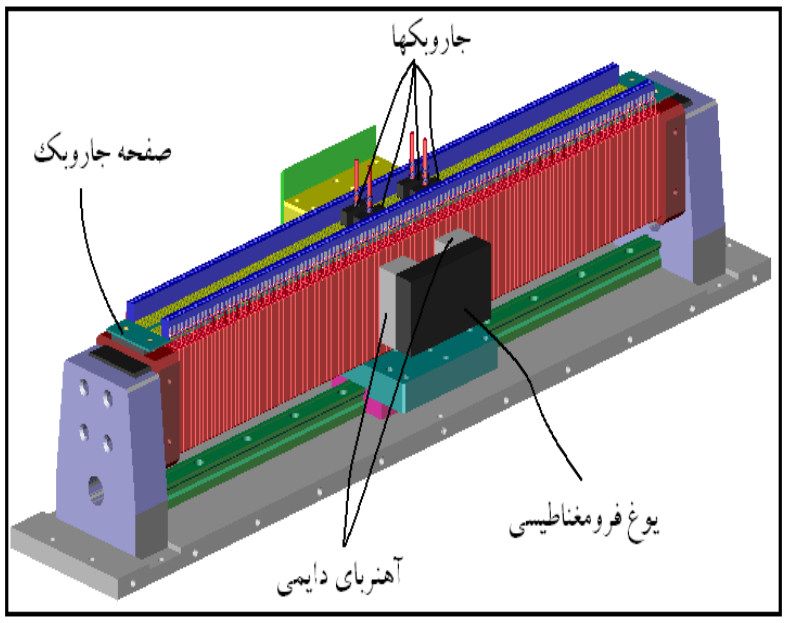
شکل 6 موتور لوله‌ای خطی جریان مستقیم با آهنربای دائمی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1386.7.2.11.3]



شکل 7 موتور لوله‌ای خطی با استفاده از سیم‌پیچ تحریک

علاوه بر معیارهای الکترومغناطیسی، عوامل دیگری نیز در طراحی موتور مؤثر است. یکی از این موارد وسائل جانبی مورد نیاز مانند سنسورها و اتصالات الکتریکی برای راه‌اندازی موتور می‌باشد. یکی دیگر از عواملی که در ارائه طرح نهایی تأثیر به‌سزایی دارد, محدودیت مواد اولیه موجود و قابل دسترس است. به‌عنوان مثال فقط یک نوع آهنربای دائمی از نوع عناصر کمیاب خاکی موجود است که طراحی نهایی ما نیز برمبنای آن انجام شده است. با توجه به ابعاد این آهنربا و تأکید بر پرهیز از هر نوع عملیات ماشینکاری به‌علت اثر منفی آن بر خواص مغناطیسی, درنهایت از طرح موتور تخت استفاده شد (شکل8).



شکل 8 موتور خطی جریان مستقیم با آهنربای دائمی

3- نتایج محاسبه و تحلیل الکترومغناطیسی موتور خطی جریان مستقیم

3-1- تخمینهای اولیه

3-1-1- چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی

برای محاسبه نیرو براساس قانون آمپر, ابتدا باید چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی محاسبه شود. مدار مغناطیسی مورد بحث, شامل آهنربای دائم مکعب مستطیل شکل به ابعاد ارتفاع h_M, عرض w_M و طول l_M دو یوغ فولاد کم‌کربن با طول $2l_{Fe}$ و فاصله هوایی g است. با توجه به قانون مدار بسته آمپر می‌توان نوشت [7]:

$$\begin{aligned} H_M h_M &= H_g g + 2H_{Fe} l_{Fe} \\ &= H_g g\left(1+\frac{2H_{Fe} l_{Fe}}{H_g g}\right) \end{aligned} \qquad (1)$$

که H_g, H_{Fe} و H_M شدت میدان مغناطیسی در فاصله هوایی, یوغهای آهنی و آهنربایی دائم است. با فرض بینهایت بودن نفوذپذیری هسته و با صرفنظر کردن از نشتی شار آهنربای دائم به بیرون, چگالی شار مغناطیسی B یکنواخت بوده و با درنظر گرفتن مقادیر جبری در معادله (1) می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} & H_M h_M + H_g g = 0 \\ & \Rightarrow \quad Hg = -\frac{h_M}{g} H_M \end{aligned} \qquad (2)$$

با صرفنظر کردن از پدیده لبه و اثر گوشه‌ها، چگالی شار مغناطیسی B یکنواخت بوده و داریم:

$$B = -\mu_0 \frac{h_M}{g} H_M \qquad (3)$$

معادله (3) مشخصه فاصله هوایی مدار مغناطیسی را نشان می‌دهد. نقطه کار سیستم، محل برخورد مشخصه فاصله هوایی و مشخصه آهنربای دائم است. آهنربای به‌کار رفته در موتور از نوع عناصر کمیاب خاکی بوده و مشخصه‌ای خطی به‌صورت زیر دارد [7]:

$$B = B_r + \frac{B_r}{H_c} H_M \qquad (4)$$

با توجه به معادله (3):

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1386.7.2.11.3]

$$H_M = -\frac{g}{\mu_0 h_M} B \qquad (5)$$

و از معادلات (4) و (5):

$$B = B_r + \frac{B_r}{H_c} \cdot (-\frac{g}{\mu_0 h_M}) B \qquad (6)$$

در نهایت چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی به صورت معادله (7) به‌دست می‌آید:

$$B = \frac{B_r}{1 + \frac{g}{\mu_0 h_M} \cdot \frac{B_r}{H_c}} \quad (T) \qquad (7)$$

که در آن B_r چگالی شار مغناطیسی پسماند، H_c مقاومت میدان اجباری آهنربای دائم، g فاصله هوایی، μ_0 ضریب نفوذپذیری هوا و h_M ضخامت آهنربا است. چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی با افزایش چگالی شار مغناطیسی پسماند (B_r)، مقاومت میدان اجباری (H_c) و h_M ضخامت آهنربا افزایش یافته و با افزایش فاصله هوایی g کاهش می‌یابد.

3-1-2- محاسبه نیروی رانش استاتیکی

نیروی وارد شده از طرف میدان مغناطیسی بر رسانای غیرمغناطیسی حامل جریان الکتریکی، از رابطه لورنتز[1] به‌دست می‌آید [7]:

$$\vec{F} = (\oint_S \vec{J} \times \vec{B}\, ds)\, l \quad (N) \qquad (8)$$

که در آن $\vec{F}$ نیروی رانش استاتیکی، $\vec{J}$ چگالی جریان، $\vec{B}$ چگالی شار مغناطیسی و l طول مؤثر سیم‌پیچ در میدان مغناطیسی است. انتگرال فوق روی سطح سیم‌پیچها محاسبه می‌شود.

با حل انتگرال فوق, نیروی حاصل از اثر متقابل جریان الکتریکی معادل I_{eq} عبوری از رسانا به طول l که در یک میدان مغناطیسی با چگالی شار B قرار گرفته به‌صورت زیر ساده می‌شود (قانون آمپر):

$$F = I_{eq} l B \quad (N) \qquad (9)$$

1. Lorentz Equation

I_{eq} متناسب با جریان عبوری از سیم‌پیچ، تعداد دور سیم‌پیچ و تعداد سیم‌پیچهایی است که درون میدان مغناطیسی قرار گرفته‌اند:

$$I_{eq} = (NI)n \quad (A) \qquad (10)$$

N تعداد دور سیم‌پیچ، I جریان عبوری از سیم‌پیچ و n تعداد سیم‌پیچهای درون میدان مغناطیسی است:

$$n = \frac{w_M}{w_c} \qquad (11)$$

w_c عرض سیم‌پیچ و w_M عرض آهنربا است. N متناسب با فضای موجود برای سیم‌پیچ در فاصله هوایی بوده و با قطر مفتول رسانا نسبت معکوس دارد.

با توجه به ضخامت عایق روی مفتول، مقطع دایروی آن و فضای خالیی که بین سیمها ایجاد می‌گردد، سطح مقطع مؤثر سیم‌پیچ معمولاً نصف مساحت فضای اشغال شده به‌وسیله آن درنظر گرفته می‌شود [4] بنابر این:

$$A_{efc} = NA_c = \frac{1}{2} w_c g \qquad (12)$$

که در آن A_c مساحت مقطع مفتول مسی است. با توجه به $A_c = \frac{\pi d_c^2}{4}$ داریم:

$$N = [\frac{2 w_c g}{\pi d_c^2}] \qquad (13)$$

جریان هر سیم‌پیچ از رابطه $I = JA_c$ به‌دست می‌آید که در آن J چگالی جریان بوده و بیشترین مقدار آن $5A/mm^2$ درنظر گرفته می‌شود [8].

مقدار l به‌ازای هر آهنربا برابر طول آهنربا یعنی l_M است. بنابراین برای به‌دست آوردن نیروی رانش استاتیکی موتور با توجه به وجود چهار آهنربا, $l = 4l_M$ درنظر گرفته می‌شود.

با توجه به معادلات فوق نیروی رانش استاتیکی در موتور را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$F = ([\frac{w_c g}{2A_c}] JA_c) \frac{w_M}{w_c} 4 l_M \times \frac{B_r}{1 + \frac{g}{\mu_0 h_M} \cdot \frac{B_r}{H_c}} \quad (N) \qquad (14)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1386.7.2.11.3]

با صرفنظر کردن از خطای ناشی از حذف جزء صحیح داریم:

$$F=(\frac{w_c g}{2A_c}JA_c)\frac{w_M}{w_c}4l_M\frac{B_r}{1+\frac{g}{\mu_0 h_M}\cdot\frac{B_r}{H_c}}=\frac{2Jl_M w_M B_r}{1+\frac{g}{\mu_0 h_M}\cdot\frac{B_r}{H_c}}g=\frac{2Jl_M w_M h_M B_r}{\frac{h_M}{g}+\frac{B_r}{\mu_0 H_c}}=\frac{2JV_M B_r}{\frac{h_M}{g}+\frac{B_r}{\mu_0 H_c}} \quad (15)$$

با توجه به معادله (15) ملاحظه می‌شود که مقدار نیروی رانش استاتیکی در موتور در حالت ایدئال و در چگالی شار یکسان, مستقل از نوع سیم‌پیچ است. برای آهنربای مشخص و چگالی جریان معین, با تغییر فاصله هوایی می‌توان نیروی رانش را تغییر داد. با توجه به معادله فوق نیروی رانش موتور با افزایش فاصله هوایی افزایش یافته و دارای مقدار مجانبی به‌صورت زیر است:

$$F_{MAX}=\lim_{g\to\infty}\left(\frac{2JV_M B_r}{\frac{h_M}{g}+\frac{B_r}{\mu_0 H_c}}\right)=2\mu_0 H_c J V_M \quad (16)$$

یعنی در ایدئال‌ترین حالت برای آهنربای معین, همواره نیروی رانش موتور کمتر از مقدار به‌دست آمده از معادله (16) است.

مقدار حدی نیروی رانش موتور را با افزایش ضخامت آهنربا و با فرض ثابت بودن فاصله هوایی به‌صورت زیر می‌توان نوشت:

$$F_{MAX}=\lim_{h_M\to\infty}\left(\frac{2JV_M B_r}{\frac{h_M}{g}+\frac{B_r}{\mu_0 H_c}}\right)=2gJB_r w_M l_M \quad (17)$$

در طراحی موتور اگر نیروی رانش مشخصی مدنظر باشد، با توجه به معادله (18) فاصله هوایی را برحسب نیروی رانش استاتیکی می‌توان محاسبه کرد:

$$g=\frac{h_M}{B_r\left[\frac{2JV_M}{F}-\frac{1}{\mu_0 H_c}\right]} \quad (18)$$

با توجه به مشخصات هندسی و الکترومغناطیسی آهنربای موجود، برای رسیدن به نیروی رانش استاتیکی 50N با استفاده از چگالی جریان $5A/mm^2$ مقدار g از معادله (18) 4mm به‌دست می‌آید.

در محاسبات فوق فرضهای ساده‌کننده‌ای استفاده شده است. ضریب نفوذپذیری هسته برابر بینهایت فرض شده و از پدیده لبه و اثر گوشه‌ها صرفنظر و چگالی شار مغناطیسی B در فاصله هوایی یکنواخت درنظر گرفته شده است. همچنین اثر میدان مغناطیسی حاصل از جریان سیم‌پیچ بر چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی, نادیده انگاشته شده است. بنابراین محاسبات فوق در واقع تخمینهای اولیه‌ای برای شروع طراحی است و پس از ارائه طرح, محاسبات دقیقی به‌وسیله روشهای حل عددی مانند روش عناصر محدود باید انجام شود. بدیهی است که با حذف فرضهای ساده کننده و ایدئال و با درنظر گرفتن شرایط واقعی نیروی رانش استاتیکی کمتر از مقادیر فوق به‌دست خواهد آمد.

در اینجا برای حل معادلات فوق و به‌دست آوردن نیروی رانش الکتریکی در موتور خطی جریان مستقیم، از روش المان محدود و نرم‌افزار انسیس[1] استفاده شده است. با توجه به امکانات این نرم‌افزار، نیروی رانش استاتیکی در هر مدل با سه روش نیروی لورنتز[2] روش تنسور تنش ماکسول[3] و روش کار مجازی[4] محاسبه شده است. این محاسبات با توجه به چگالی جریان $5A/mm^2$ بر سطح مقطع مؤثر تخمین زده شده رساناهای حامل جریان و مشخصات الکترومغناطیسی مواد استاندارد انجام شده است.

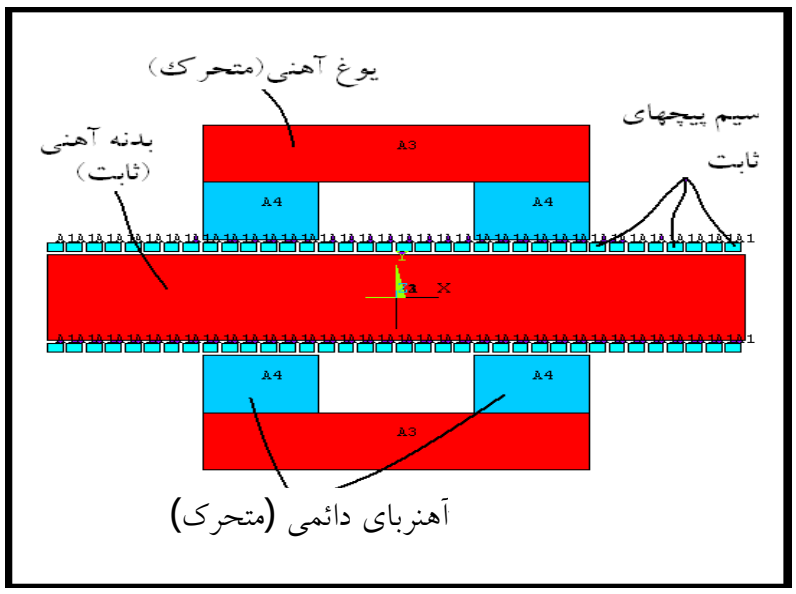
3-2- تحلیل المان محدود نیروی رانش در موتور جریان مستقیم خطی تخت با آهنربای دائمی

مدلی که مطالعه می‌کنیم، موتور خطی تخت با آهنربای دائم است (شکل9). در این موتور سیم‌پیچها حول هسته فرومغناطیسی پیچیده شده و هر یک به‌صورت مجزا دارای اتصال انتهایی بوده و به یک جزء رسانا بر روی فیبر مدار

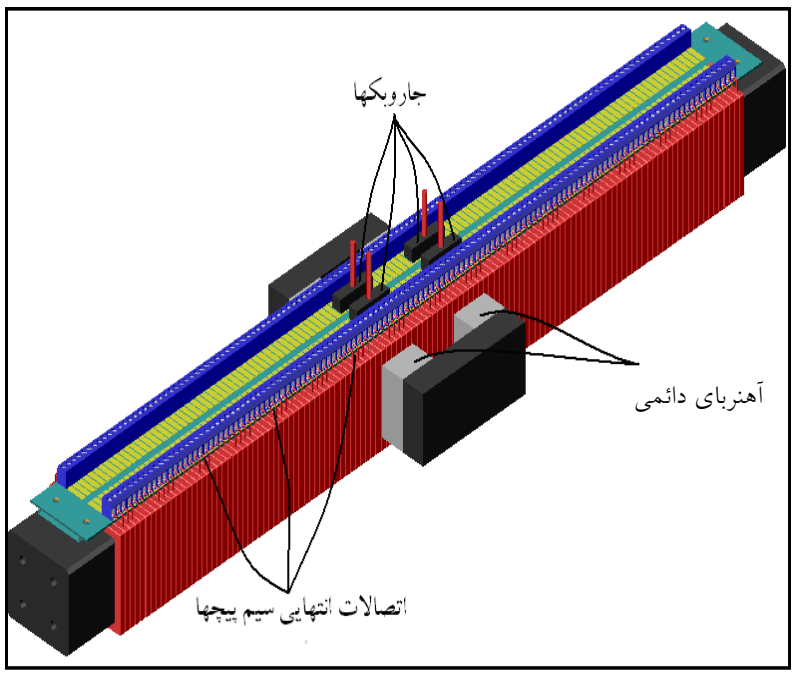
1. Ansys
2. Lorentz Force
3. Maxwell Stress Tensor
4. Virtual Work

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1386.7.2.11.3]

چاپی متصل می‌شود. فیبر مدار چاپی - که دارای یک لایه مس به‌صورت بخشهایی مجزا از یکدیگر است- واسطه سیم‌پیچهای ثابت و جاروبکهای متحرک حامل جریان است. در این موتور از چهار آهنربای دائم بلوکی شکل از نوع عناصر کمیاب خاکی استفاده شده که روی بلوک آهنی نصب شده است. بلوکهای آهنی، آهنرباهای دائم و جاروبکها اجزای متحرک موتور را تشکیل می‌دهند (شکل10).

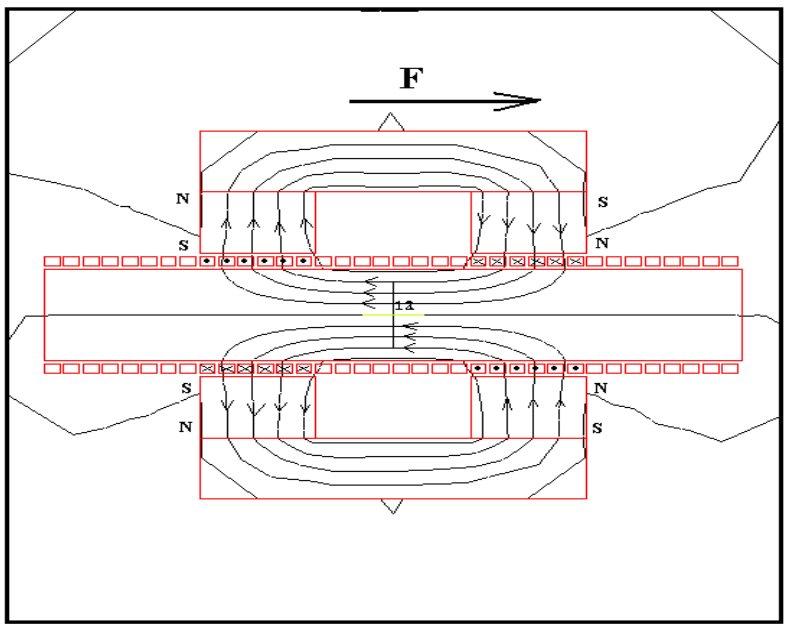


شکل 9 طرحوارهٔ دوبُعدی از طرح ارائه شده



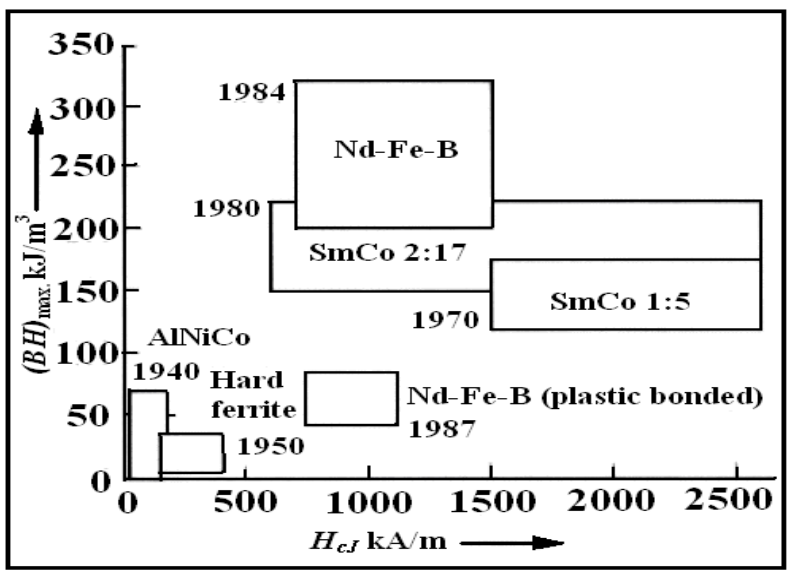
شکل 10 موتور جریان مستقیم خطی تخت با آهنربای دائمی

در این طرح با استفاده از مواد فرومغناطیسی، شار مغناطیسی آهنربا به مکان مناسب، محل رسانا هدایت شده و در نتیجه اثر این میدان بر رسانای حامل جریان نیرو تولید می‌شود. در این حالت با توجه به جهت شار مغناطیسی و جریان سیم‌پیچها، نیروی وارد شده از طرف میدان در رساناها همجهت بوده و یکدیگر را تقویت می‌کنند. ازآنجاکه سیم‌پیچها ثابت هستند، جهت حرکت درخلاف جهت نیروی وارد شده بر رساناها خواهد بود (شکل11).



شکل 11 جهت شار مغناطیسی، جریان و نیروی حاصل

برای حل مسأله باید مشخصات مواد به‌کار رفته در موتور و همچنین شرایط مرزی برای نرم‌افزار تعریف شود. آهنربای دائمی از نوع عناصر کمیاب خاکی[1] انتخاب شده که قوی‌ترین آهنربا در حال حاضر است (شکل12) [9].

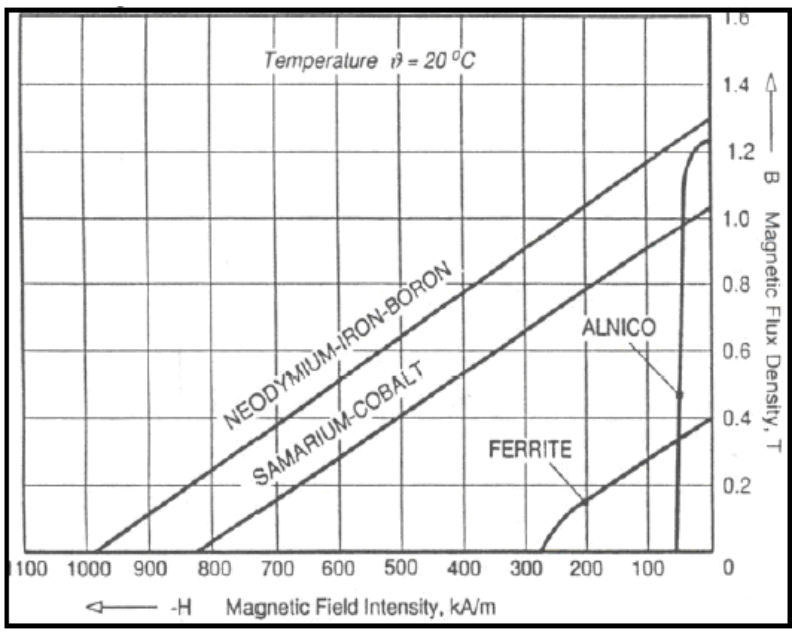


شکل 12 مقایسه آهنرباهای مختلف از نظر انرژی بیشینه

1. NdFeB

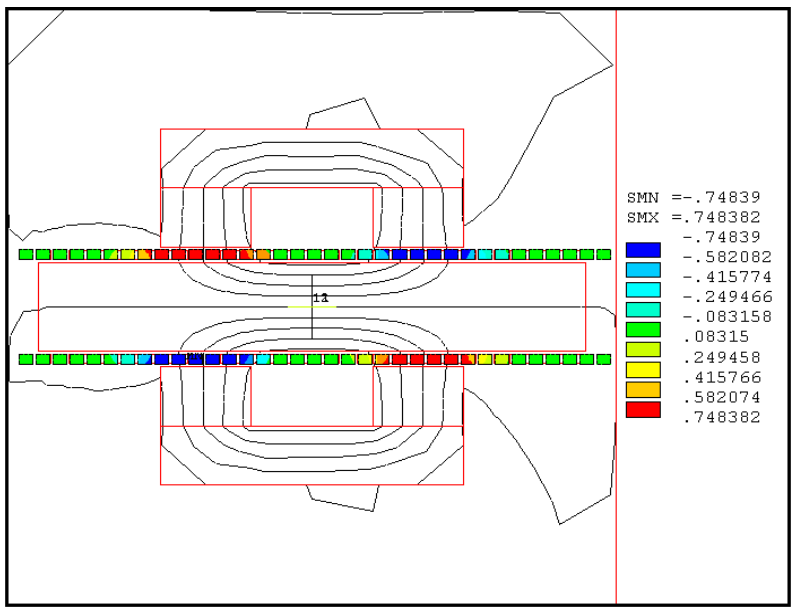
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1386.7.2.11.3]

اطلاعات مورد نیاز برای حل مسأله از روی منحنی مشخصه[1] مربوط در 20 نقطه استخراج شده و در نرم‌افزار استفاده شده است (شکل13) [9].



شکل 13 منحنی مشخصه آهنرباهای مختلف

براساس این طرح دوبُعدی، چگالی جریان $5A/mm^2$ و اطلاعات مربوط به خواص الکترومغناطیسی مواد و آهنربای دائم, مقدار چگالی شار مغناطیسی (B) در محل سیم حامل جریان به‌دست می‌آید (شکل14).



شکل 14 شدت چگالی شار مغناطیسی (B) در محل سیم حامل جریان

نتایج محاسبه نیروی رانش استاتیکی با سه روش نیروی لورنتز مبتنی بر قانون آمپر، روش تنسور تنش ماکسول و روش کار مجازی به‌وسیله نرم‌افزار انسیس به‌ترتیب برابر 47/8، 51/69 و 47/8 نیوتن است. در این طرح ابعاد قسمت متحرک $100*100*120mm^3$ و ابعاد کلی موتور $700*120*120mm^3$ است.

4- بحث و نتیجه‌گیری

4-1- نتایج به‌دست آمده از آزمایش

پس از ساخت موتور خطی, آزمایشهایی برای اندازه‌گیری نیروی رانش استاتیکی در موتور خطی انجام شد. از آنجاکه ابعاد و اندازه‌های هندسی ثابت بوده و تنها یک نمونه از آن ساخته شده، تنها عاملی که می‌توان تغییرات نیروی رانش استاتیکی را برای تغییرات آن بررسی کرد، چگالی جریان یا جریان ورودی موتور است. جریان سیم‌پیچ از عقربه منبع تغذیه خوانده شده و نیروی رانش استاتیکی به‌وسیله لودسل[2] اندازه‌گیری می‌شود. لودسل وسیله‌ای دقیق برای اندازه‌گیری نیرو بوده و کارکرد آن بر تغییر مقاومت الکتریکی مدار آن - شامل مقاومتهای حساس به تغییر طول- استوار است. خروجی لودسل ولتاژی است که با تغییر نیروی اعمال شده بر آن به‌صورت خطی تغییر می‌کند. آزمایشها برای دو حالت سیم‌پیچ سری و موازی انجام شده است.

4-1-1- حالت سیم‌پیچ سری

در این حالت سیم‌پیچهایی که در طول موتور و در حوزه تأثیر میدان مغناطیسی آهنربای دائم قرار دارند، با یکدیگر سری شده و دو سر سیم‌پیچ حاصل به منبع تغذیه جریان مستقیم متصل می‌شود. در این حالت جاروبکها و صفحه حامل آن از روی موتور باز می‌شود. در حالت سری, ولتاژ مورد نیاز موتور بالا اما جریان نسبتاً کمی مورد نیاز است نتایج حاصل از تغییر نیروی رانش استاتیکی با افزایش جریان منبع تغذیه در این مرحله در شکل 15 مشاهده می‌شود. با رجوع به قانون

1. B-H Curve

2. Load Cell

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1386.7.2.11.3]

نیروی آمپر, برای هندسه ثابت موتور، نیروی رانش متناسب با جریان سیم‌پیچ است [10]:

$$F=K_f I \quad (N) \tag{21}$$

F نیروی رانش، I جریان سیم‌پیچ و K_f ثابت نیروی رانش به‌معنای نیروی رانش به‌ازای واحد جریان است.

K_f در روش ریاضی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F=\frac{2JV_M B_r}{\frac{h_M}{g}+\frac{B_r}{\mu_0 H_c}} \quad (N) \tag{17}$$

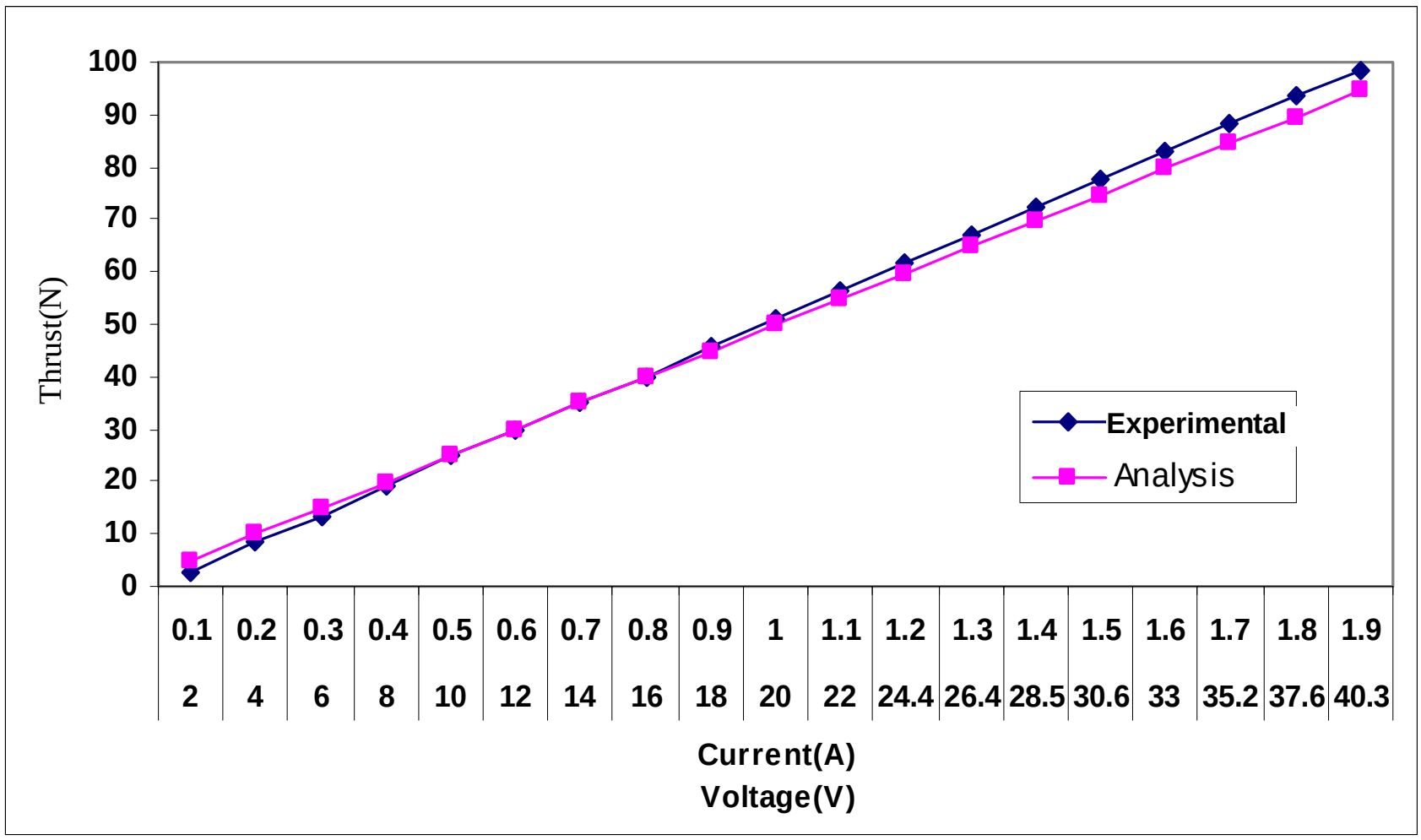
در حالت سری داریم:

$$I=JA_c \Rightarrow J=\frac{I}{A_c} \tag{22}$$

بنابر این:

$$F=\frac{2V_M B_r}{\frac{h_M}{g}+\frac{B_r}{\mu_0 H_c}}\cdot\frac{I}{A_c} \Rightarrow$$
$$K_f=\frac{F}{I}=\frac{2V_M B_r}{\frac{h_M}{g}+\frac{B_r}{\mu_0 H_c}}\cdot\frac{1}{A_c} \tag{23}$$

در موتور ساخته شده که از سیم مسی با قطر 0/5 میلیمتر، فاصله هوایی 5 میلیمتر و مواد توصیف شده استفاده شده، K_f، 61/1 نیوتن به‌ازای یک آمپر جریان به‌دست می‌آید. میانگین K_f در روش حل عددی 49/7 و میانگین مقدار به‌دست آمده از آزمایش 53/2 نیوتن به‌ازای یک آمپر جریان ورودی سیم‌پیچ است. بخشی از خطاها مربوط به خطاهای اندازه‌گیری است (شکل 15).

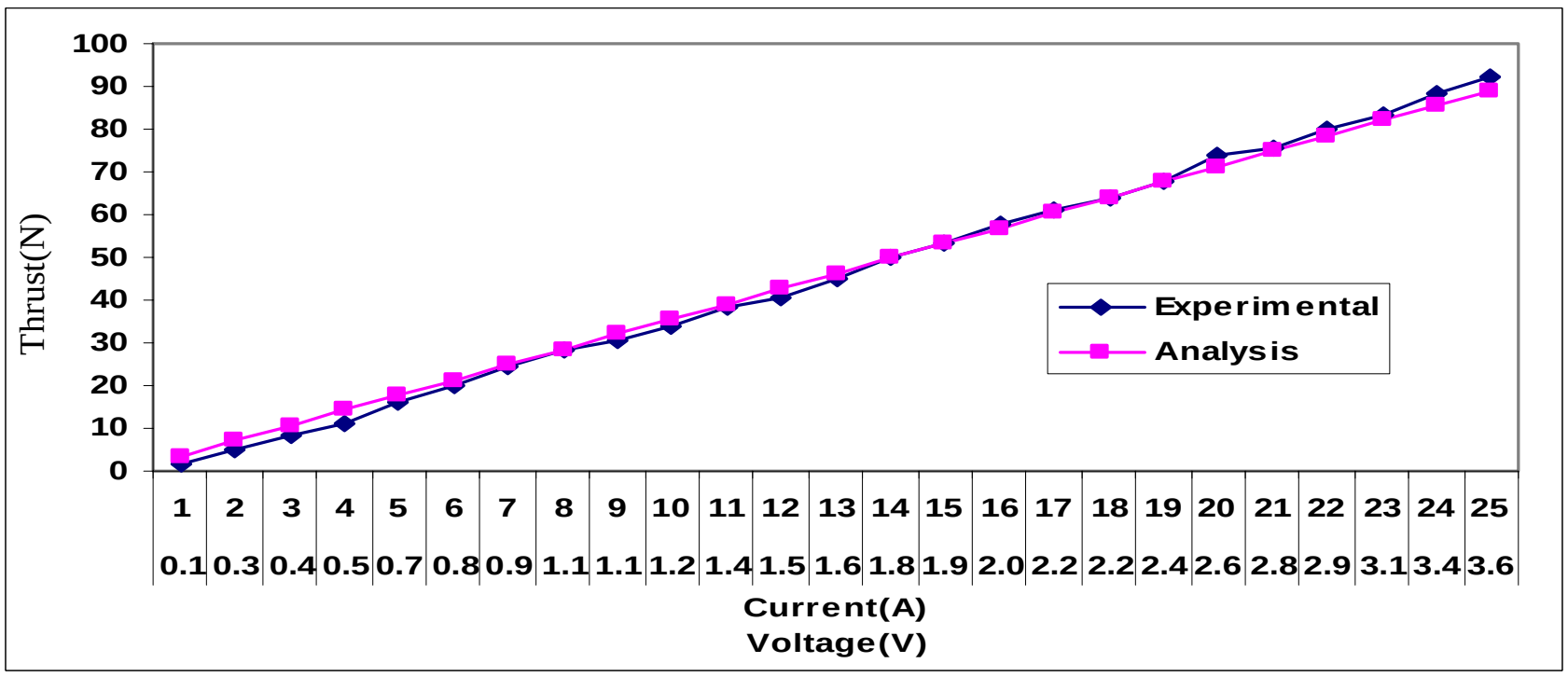


شکل 15 نتایج تئوری و تجربی تغییر نیروی رانش استاتیکی با تغییر جریان (ولتاژ) در حالت سری

4-1-2- حالت سیم‌پیچ موازی

در این حالت سیم‌پیچهایی که در طول موتور و در حوزه تأثیر میدان مغناطیسی آهنربای دائم قرار دارند، با یکدیگر به‌صورت موازی قرار گرفته و مجموعه سیم‌پیچها به‌وسیله جاروبکها تغذیه می‌شود. در حالت موازی, ولتاژ مورد نیاز موتور پایین بوده اما جریان بسیار بالایی مورد نیاز است. نتایج حاصل از تغییر نیروی‌رانش استاتیکی با افزایش جریان منبع تغذیه در این مرحله در شکل 16 مشاهده می‌شود.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1386.7.2.11.3]



شکل 16 نتایج تئوری و تجربی تغییر نیروی رانش استاتیکی با تغییر جریان در حالت موازی

در حالت موازی رابطه جریان و چگالی جریان با توجه به معادلات به‌صورت به زیر به‌دست می‌آید:

$$n = \frac{w_M}{w_c} \tag{13}$$

$$I_{tot}\big|_P = 2nI_c \tag{24}$$

$$J = \frac{I}{2nA_c} = \frac{Iw_c}{2w_M A_c} \tag{25}$$

و بدین‌ترتیب:

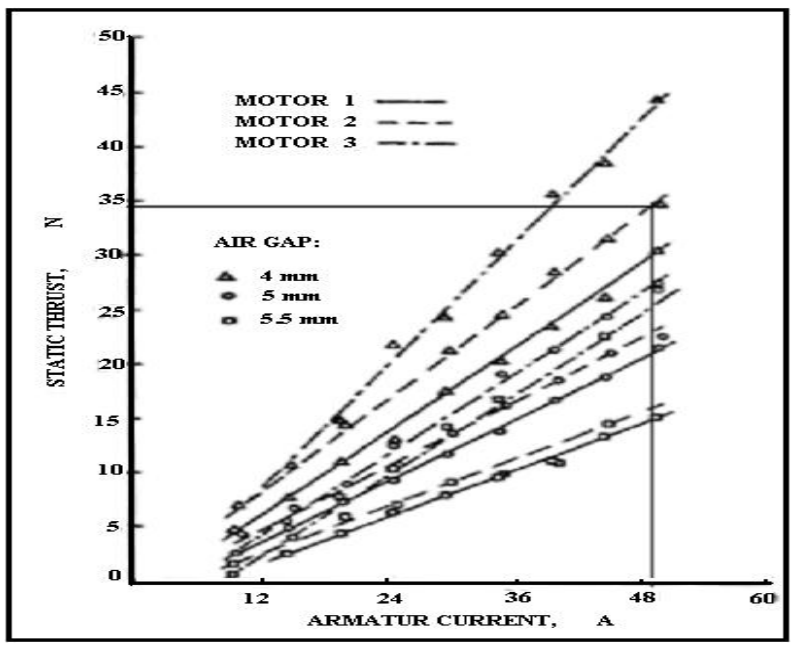
$$F = \frac{2V_M B_r}{\frac{h_M}{g} + \frac{B_r}{\mu_0 H_c}} \cdot \frac{w_c}{2w_M A_c} I \Rightarrow$$

$$K_f = \frac{F}{I} = \frac{2V_M B_r}{\frac{h_M}{g} + \frac{B_r}{\mu_0 H_c}} \cdot \frac{w_c}{2w_M A_c} \tag{26}$$

در موتور ساخته شده که از سیم مسی با مقطع 0/5 میلیمتر، سیم‌پیچ با ضخامت 5 میلیمتر و فاصله هوایی 5 میلیمتر و مواد توصیف شده استفاده شده، K_f با استفاده از روابط ریاضی برابر 5/1 نیوتن به‌ازای یک آمپر جریان به‌دست می‌آید. میانگین K_f در روش حل عددی 3/6 و میانگین مقدار به‌دست آمده از آزمایش 3/8 نیوتن به‌ازای یک آمپر جریان ورودی سیم‌پیچ است.

4-2- مقایسه موتور خطی ساخته شده با منابع دیگر

قسمت متحرک موتور ساخته شده دارای طول متحرک 12 سانتیمتر، عرض 15 و ارتفاع 10 سانتیمتر است. با توجه به مشخصات موتورهای مطالعه شده در دانشگاه والز کالج کاردیف انگلستان که در جدول 1 آمده می‌توان ملاحظه کرد که نتایج موتور خطی ساخته شده در حالت سیم‌پیچ موازی را می‌توان با نتایج موتور شماره 2 (قطر 13/2 و طول متحرک 12 سانتیمتر) در تحقیق فوق مقایسه کرد. برای جریان 50 آمپر موتور شماره دو در بهترین حالت (فاصله هوایی 4 میلیمتر) دارای نیروی رانش استاتیکی 34/5 نیوتن است. نتایج به‌دست آمده از این کار نیز در شکل 17 نشان داده شده است [2].



شکل 17 نتایج تغییر نیروی رانش استاتیکی با تغییر جریان در موتور جریان مستقیم با آهنربای عناصر کمیاب خاکی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1386.7.2.11.3]

این مقدار برای موتور ساخته شده از برونیابی نتایج تجربی، برابر190 نیوتن و با روش حل عددی برابر180 نیوتن به‌دست می‌آید. وزن بخش متحرک موتور ساخته شده برابر 5/640 کیلوگرم است. برای مقایسه بهتر می‌توان نسبت نیروی رانش به جرم متحرک را مورد توجه قرار داد. این نسبت در جریان 50 آمپر برای موتورهای شماره 1 ،2 و 3 در بهترین حالت به‌ترتیب برابر 11/6، 12/5 و 9/2 نیوتن به‌ازای واحد جرم است. این نسبت برای موتور خطی جریان مستقیم ساخته شده در جریان 50 نیوتن، از برونیابی نتایج تجربی، برابر 33/7 و با روش حل عددی برابر 32 نیوتن به‌ازای واحد جرم به‌دست می‌آید.

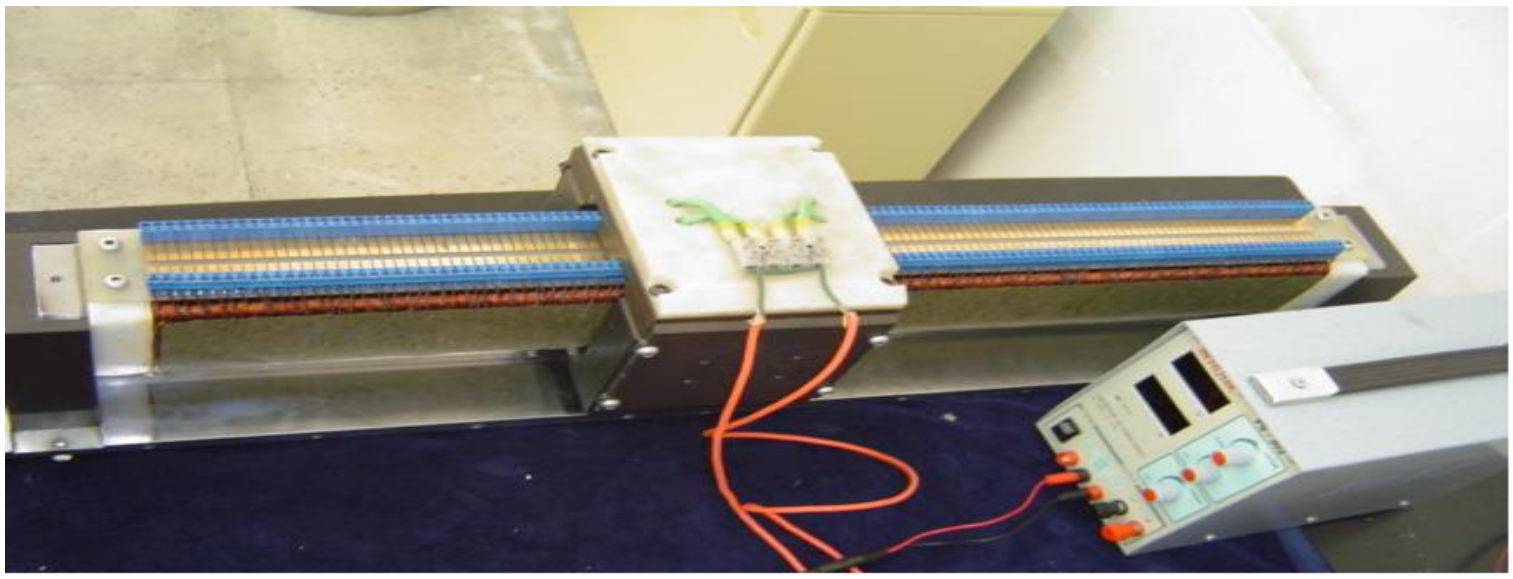
البته این نکته را نباید از نظر دور داشت که برای هندسه ثابت, با کوچک انتخاب کردن قطر سیم و افزایش دور سیم‌پیچ می‌توان ثابت نیروی رانش را افزایش داد که این موجب افزایش مقاومت سیم‌پیچ و در نتیجه افزایش توان اتلافی در موتور خواهد شد.

امروز با گسترش روزافزون استفاده از موتورهای خطی، در نقاط مختلف جهان شرکتهایی به تولید تجاری و عرضه این موتورها پرداخته‌اند.

شرکت بالدور[1] که یکی از تولیدکنندگان معتبر ماشینهای الکتریکی است در سطح وسیعی به تولید و عرضه موتورهای خطی می‌پردازد. موتور خطی جریان مستقیم ساخت این شرکت که از نظر اندازه تقریباً قابل مقایسه با موتور ساخته شده است مدل LMBR06-48 است که طول، عرض و ارتفاع قسمت متحرک آن به‌ترتیب برابر 11/1، 12 و 4/5 سانتیمتر است. ثابت نیروی رانش استاتیکی این موتور با توجه به کاتالوگ سازنده برابر 26/4 نیوتن بر آمپر است [11].

یکی از محصولات شرکت امریکایی H2W تکنولوژی نیز موتور خطی جریان مستقیم است که آن را در اندازه‌های مختلفی عرضه می‌کند. مدل BRA-XXX-127 از این گروه محصولات، نوعی موتور خطی جریان مستقیم با جاروبک است که ابعاد طول، عرض و ارتفاع 11/1، 12/7 و 4/2 بوده و ثابت نیروی رانش استاتیکی آن برابر 28/5 نیوتن بر آمپر است [12].

موتور ساخته شده نیز با ابعاد 12، 15 و 10 سانتیمتر دارای ثابت نیروی رانش استاتیکی 53/2 نیوتن بر آمپر با توجه به میانگین مقادیر به‌دست آمده از آزمایش است. با درنظر گرفتن ابعاد و مقادیر ثابت نیروی رانش استاتیکی بالا می‌توان گفت که موتور ساخته شده، از نظر ایجاد نیروی رانش استاتیکی مورد نیاز با موارد یاد شده قابل رقابت است. البته با تکیه بر تجارب ساخت نمونه اول می‌توان همین نیرو را در ابعاد کمتری نیز به‌دست آورد. در شکل 18 موتور خطی ساخته شده در این تحقیق نشان داده شده است.



شکل 18 موتور خطی ساخته شده

1. Baldor

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1386.7.2.11.3]

5- منابع

[1] S. A. Nasar; “Linear Electric Motors”; Prentice-Hall INC.; 1987; pp. 5-22.

[2] F. J. Anayi; A. Basak; “Brushless NdFeB permanent magnet DC linear motors”; Electrical Machines and Drives; Fourth International Conference; 1989; pp. 71 –75.

[3] Jin Hur; Sang-Baeck Yoon; Dong-Seok Hyun; “Fast and precise position control of linear DC motor for carrier using seek control and neural network”; Electric Machines and Drives Conference Record; 1997; IEEE International; pp. MC3/2.1-MC3/2.3.

[4] H. Yajima; H. Wakiwaka; S. Senho; “Consideration On High-response Of A Linear DC Motor, Magnetics Conference”; 1997; Digests of INTERMAG'97, IEEE International; pp. BP-14 -BP-14.

[5] مجتبی قدسی؛ محسن بهرامی؛ امیر عبدالله؛ یوسف حجت؛ «طراحی و ساخت موتور خطی پله‌ای»؛ پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ دانشکده مهندسی مکانیک؛ 1380.

[6] مهران میرزایی؛ مجتبی میرسلیم؛ «طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی موتور القایی خطی با کمک روش المان محدود»؛ پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ دانشکده مهندسی برق؛ 1381.

[7] سلون، ج. ر.؛ استراون، ا.؛ «تحلیل ماشینهای الکتریکی با روش عناصر محدود»؛ مجتبی میرسلیم؛ عارف درودی؛ تهران؛ انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ 1380؛ صص. 5-35.

[8] V. N. Mittle; Arvind Mittal; “Design of Electrical Machines”; Standard Publisher Distributors”; 1996; pp. 78-80.

[9] J. F. Gieras; “Linear Synchronous Motors”; Prentice-Hall INC.; 2001; pp. 150-155.

[10] H. Wakiwaka; H. Yajima, S. Senoh; H Yamada; “Simplified Thrust Limit Equation of Linear DC Motor”; IEEE Transactions on Magnetics; Vol. 32, No. 5; 1996; pp. 5073-5075.

[11] Baldor Electric Company Catalog, www.baldor.com.

[12] H2W Technologies Brochure, www.h2wtech.com.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1386.7.2.11.3]