

# طراحی و ساخت موتور خطی جریان مستقیم

یوسف حجت<sup>1\*</sup>، محمد کریمی<sup>2</sup>، محسن بهرامی<sup>3</sup>، امیر عبدالله<sup>4</sup>

- 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 143-14115

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 حاکی 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.

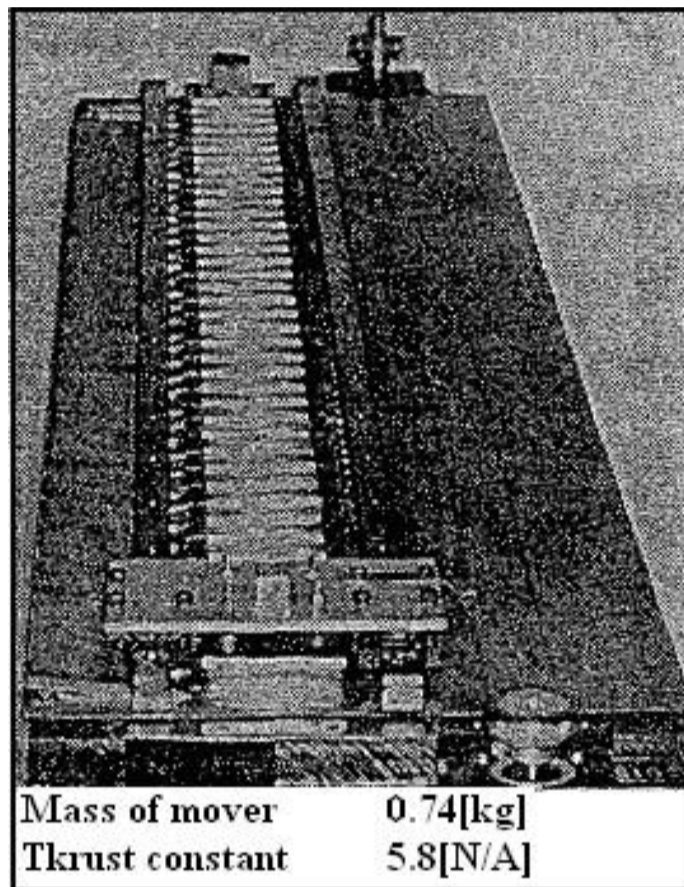
## 1- مقدمه

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:

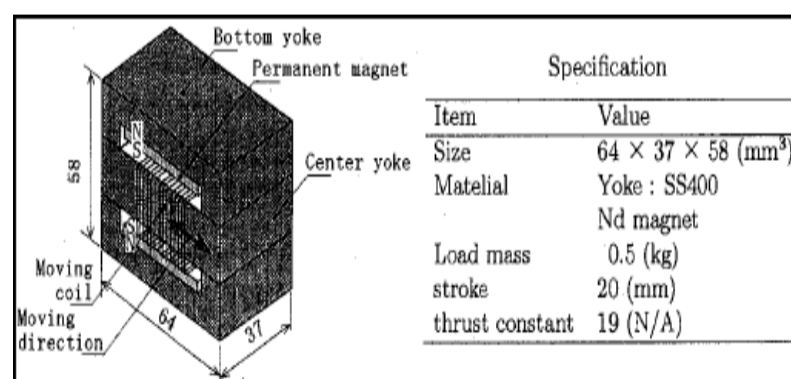
- در مکانیزمهای تبدیل حرکت دورانی به حرکت خطی معمولاً از جعبه دنده استفاده می‌شود که خطای لقی و خطای الاستیک دارند. اما در موتورهای خطی چنین خطاهایی وجود ندارد.

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

در همین سال در ژاپن، یاجیما<sup>2</sup> و همکاران در دانشگاه شینسو<sup>3</sup> نوعی موتور خطی جریان مستقیم را تکمیل و ارائه کردند که نسبت ثابت نیروی رانش به جرم بسیار بالایی داشت (38 نیوتن بر آمپر به ازای 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

- 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، درحالی که پیچهای انتقال قدرت به خاطر 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 حالی که 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

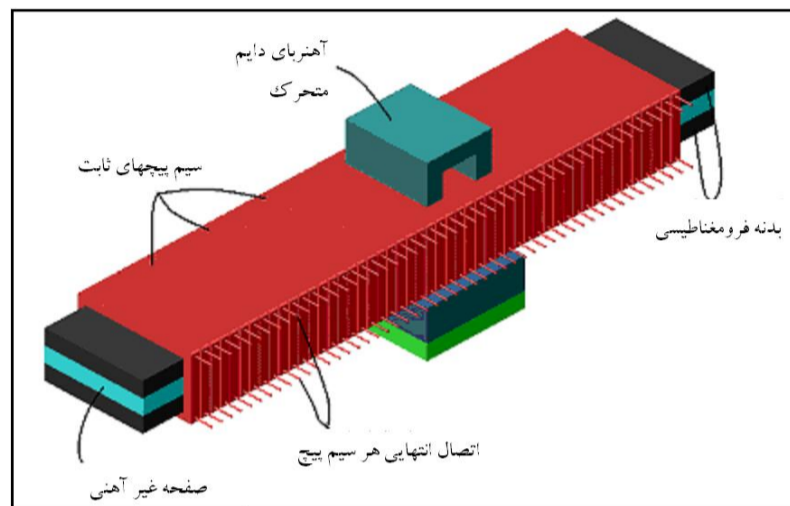
		موتورها		
		موتور 1	موتور 2	موتور 3
پارامترها				
طول متحرک (cm)		8	12	23/7
قطر خارجی (cm)		13/2	13/2	13/2
وزن متحرک (kg)		1/73	2/75	4/77

در سال 1997 جین‌هور<sup>1</sup> 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 به ازای واحد جرم متحرک داشت (شکل 1) [3].

2. Yajima  
3. Shinsu

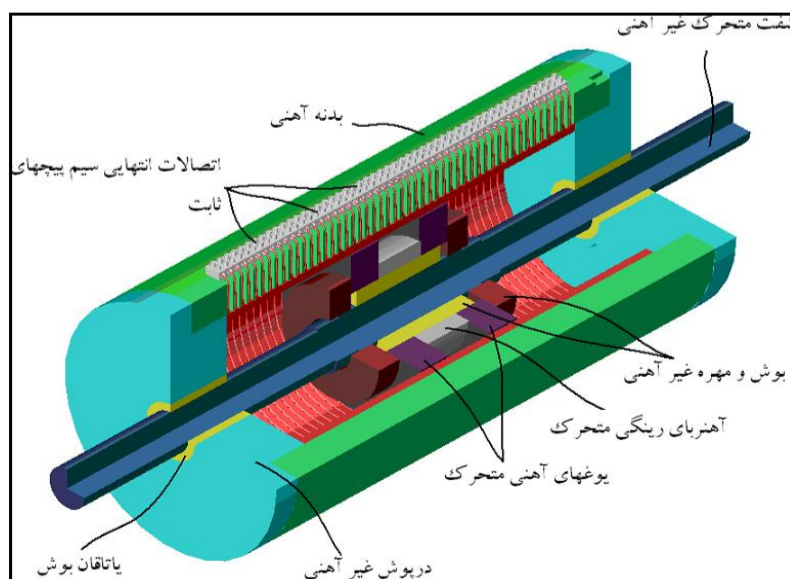
1. Jin Hur

در این حالت نیروی وارد شده از طرف میدان در دو رسانا همجهت بوده و یکدیگر را تقویت می‌کنند. براساس این طرح دو بُعدی، طرحهای مختلفی را می‌توان ارائه کرد که در ادامه بررسی می‌شود. اگر این طرح دو بُعدی در امتداد خط راست گسترده شود، طرح موتور خطی تخت به دست می‌آید (شکل 5).



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

طرح فوق نوع دیگری از موتورهای خطی را در ذهن تداعی می‌کند که موتورهای لوله‌ای نامیده می‌شوند. اگر طرح دو بُعدی مزبور به جای اینکه در طول خط راست گسترده شود، حول محوری مرکزی گسترده شود، موتور خطی لوله‌ای به وجود می‌آید. میدان مغناطیسی در این موتور ممکن است به وسیله آهنربای دائمی شکل 6 یا سیم پیچ تحریک تولید شود، (شکل 7).

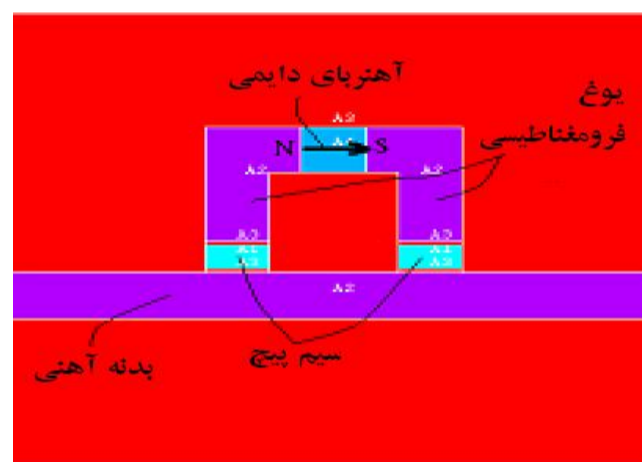


شکل 6 موتور لوله‌ای خطی جریان مستقیم با آهنربای دائمی

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].

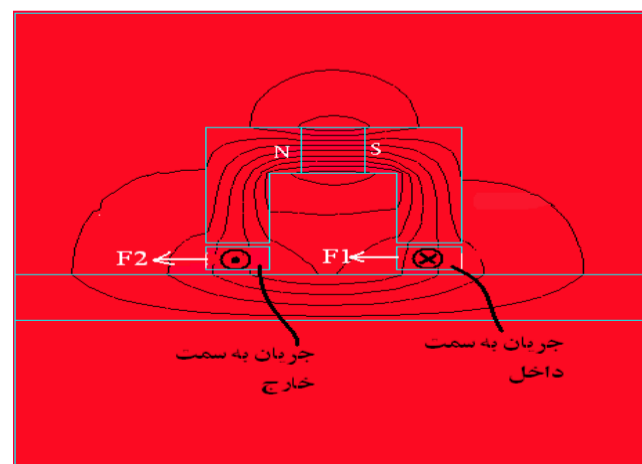
## 2- ارائه مدل‌های مختلف برای طراحی و ساخت موتور خطی جریان مستقیم

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 یوگهایی از جنس مواد فرومغناطیس برای تکمیل مدار مغناطیسی است (شکل 3).



شکل 3 طرحواره دو بُعدی 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 (شکل 4).



شکل 4 چگالی شار مغناطیسی و جهت نیروها

### 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 کم کربن با طول  $2l_{Fe}$  و فاصله هوایی  $g$  است. با توجه به قانون مدار بسته آمپر می توان نوشت [7]:

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

که  $H_M$ ،  $H_{Fe}$  و  $H_g$  شدت میدان مغناطیسی در فاصله هوایی، یوگهای آهنی و آهنربایی دائم است. با فرض بینهایت بودن نفوذپذیری هسته و با صرف نظر کردن از نشتی شار آهنربای دائم به بیرون، چگالی شار مغناطیسی  $B$  یکنواخت بوده و با در نظر گرفتن مقادیر جبری در معادله (1) می توان نوشت:

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

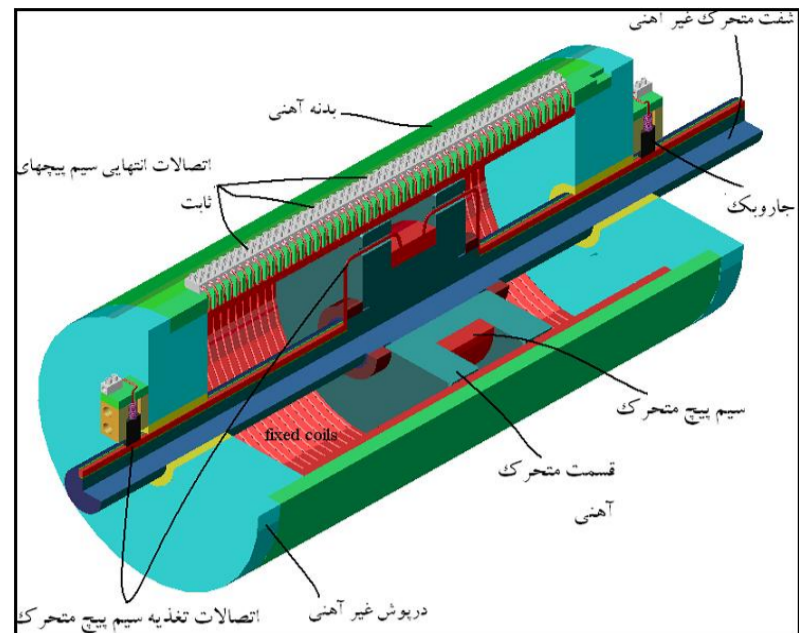
با صرف نظر کردن از پدیده لبه و اثر گوشه ها، چگالی شار مغناطیسی  $B$  یکنواخت بوده و داریم:

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

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

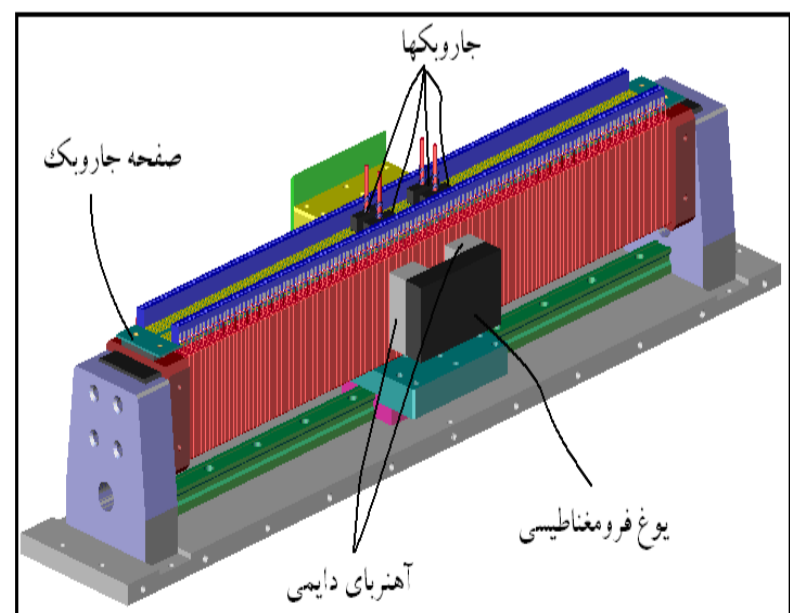
$$B = B_r + \frac{B_r}{H_c} H_M \quad (4)$$

با توجه به معادله (3):



شکل 7 موتور لوله ای خطی با استفاده از سیم پیچ تحریک

علاوه بر معیارهای الکترومغناطیسی، عوامل دیگری نیز در طراحی موتور مؤثر است. یکی از این موارد وسایل جانبی مورد نیاز مانند سنسورها و اتصالات الکتریکی برای راه اندازی موتور می باشد. یکی دیگر از عواملی که در ارائه طرح نهایی تأثیر به سزایی دارد، محدودیت مواد اولیه موجود و قابل دسترس است. به عنوان مثال فقط یک نوع آهنربای دائمی از نوع عناصر کمیاب خاکی موجود است که طراحی نهایی ما نیز بر مبنای آن انجام شده است. با توجه به ابعاد این آهنربا و تأکید بر پرهیز از هر نوع عملیات ماشینکاری به علت اثر منفی آن بر خواص مغناطیسی، در نهایت از طرح موتور تخت استفاده شد (شکل 8).



شکل 8 موتور خطی جریان مستقیم با آهنربای دائمی

$I_{eq}$  متناسب با جریان عبوری از سیم پیچ، تعداد دور سیم پیچ و تعداد سیم پیجهایی است که درون میدان مغناطیسی قرار گرفته اند:

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

$N$  تعداد دور سیم پیچ،  $I$  جریان عبوری از سیم پیچ و  $n$  تعداد سیم پیجهای درون میدان مغناطیسی است:

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

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

با توجه به ضخامت عایق روی مفتول، مقطع دایروی آن و فضای خالی که بین سیمها ایجاد می گردد، سطح مقطع مؤثر سیم پیچ معمولاً نصف مساحت فضای اشغال شده به وسیله آن در نظر گرفته می شود [4] بنابر این:

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

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

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

جریان هر سیم پیچ از رابطه  $I = JA_c$  به دست می آید که در آن  $J$  چگالی جریان بوده و بیشترین مقدار آن  $5A/mm^2$  در نظر گرفته می شود [8].

مقدار  $l$  به ازای هر آهنربا برابر طول آهنربا یعنی  $l_M$  است. بنابراین برای به دست آوردن نیروی رانش استاتیکی موتور با توجه به وجود چهار آهنربا،  $l = 4l_M$  در نظر گرفته می شود.

با توجه به معادلات فوق نیروی رانش استاتیکی در موتور را می توان به صورت زیر نوشت:

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

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

و از معادلات (4) و (5):

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

در نهایت چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی به صورت معادله (7) به دست می آید:

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

که در آن  $B_r$  چگالی شار مغناطیسی پسماند،  $H_c$  مقاومت میدان اجباری آهنربای دائم،  $g$  فاصله هوایی،  $\mu_0$  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 می یابد.

### 3-1-2- محاسبه نیروی رانش استاتیکی

نیروی وارد شده از طرف میدان مغناطیسی بر رسانای غیرمغناطیسی حامل جریان الکتریکی، از رابطه لورنتز<sup>1</sup> به دست می آید [7]:

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

که در آن  $\vec{F}$  نیروی رانش استاتیکی،  $\vec{J}$  چگالی جریان،  $\vec{B}$  چگالی شار مغناطیسی و  $l$  طول مؤثر سیم پیچ در میدان مغناطیسی است. انتگرال فوق روی سطح سیم پیچها محاسبه می شود.

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 به صورت زیر ساده می شود (قانون آمپر):

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

1. Lorentz Equation

50N با استفاده از چگالی جریان  $5A/mm^2$  مقدار  $g$  از معادله (18)  $4mm$  به دست می آید.

در محاسبات فوق فرضهای ساده کننده ای استفاده شده است. ضریب نفوذپذیری هسته برابر بینهایت فرض شده و از پدیده لبه و اثر گوشه ها صرف نظر و چگالی شار مغناطیسی  $B$  در فاصله هوایی یکنواخت در نظر گرفته شده است. همچنین اثر میدان مغناطیسی حاصل از جریان سیم پیچ بر چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی، نادیده انگاشته شده است. بنابراین محاسبات فوق در واقع تخمینهای اولیه ای برای شروع طراحی است و پس از ارائه طرح، محاسبات دقیقی به وسیله روشهای حل عددی مانند روش عناصر محدود باید انجام شود. بدیهی است که با حذف فرضهای ساده کننده و ایدئال و با در نظر گرفتن شرایط واقعی نیروی رانش استاتیکی کمتر از مقادیر فوق به دست خواهد آمد.

در اینجا برای حل معادلات فوق و به دست آوردن نیروی رانش الکتریکی در موتور خطی جریان مستقیم، از روش المان محدود و نرم افزار انسیس<sup>1</sup> استفاده شده است. با توجه به امکانات این نرم افزار، نیروی رانش استاتیکی در هر مدل با سه روش نیروی لورنتز<sup>2</sup> روش تنسور تنش ماکسول<sup>3</sup> و روش کار مجازی<sup>4</sup> 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 می کنیم، موتور خطی تخت با آهنربای دائم است (شکل 9). در این موتور سیم پیچها حول هسته فرومغناطیسی پیچیده شده و هر یک به صورت مجزا دارای اتصال انتهایی بوده و به یک جزء رسانا بر روی فیبر مدار

با صرف نظر کردن از خطای ناشی از حذف جزء صحیح داریم:

$$F = \left( \frac{w_c g}{2A_c} J A_c \right) \frac{w_M}{w_c} 4l_M \frac{B_r}{1 + \frac{g}{\mu_0 h_M} \cdot \frac{B_r}{H_c}} \\ = \frac{2J l_M w_M B_r}{1 + \frac{g}{\mu_0 h_M} \cdot \frac{B_r}{H_c}} g = \frac{2J l_M w_M h_M B_r}{\frac{h_M}{g} + \frac{B_r}{\mu_0 H_c}} \\ = \frac{2J V_M B_r}{\frac{h_M}{g} + \frac{B_r}{\mu_0 H_c}} \quad (15)$$

با توجه به معادله (15) ملاحظه می شود که مقدار نیروی رانش استاتیکی در موتور در حالت ایدئال و در چگالی شار یکسان، مستقل از نوع سیم پیچ است. برای آهنربای مشخص و چگالی جریان معین، با تغییر فاصله هوایی می توان نیروی رانش را تغییر داد. با توجه به معادله فوق نیروی رانش موتور با افزایش فاصله هوایی افزایش یافته و دارای مقدار جانبی به صورت زیر است:

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

یعنی در ایدئال ترین حالت برای آهنربای معین، همواره نیروی رانش موتور کمتر از مقدار به دست آمده از معادله (16) است. مقدار حدی نیروی رانش موتور را با افزایش ضخامت آهنربا و با فرض ثابت بودن فاصله هوایی به صورت زیر می توان نوشت:

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

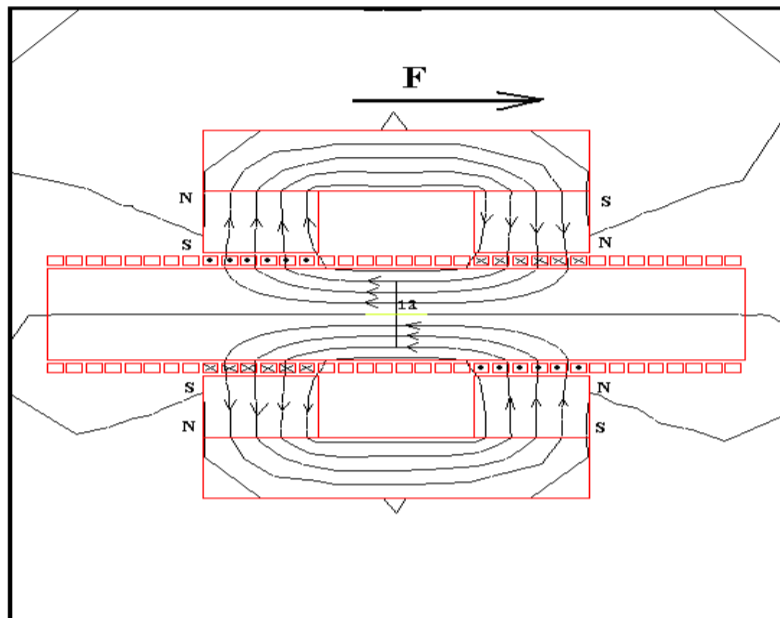
در طراحی موتور اگر نیروی رانش مشخصی مدنظر باشد، با توجه به معادله (18) فاصله هوایی را برحسب نیروی رانش استاتیکی می توان محاسبه کرد:

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

با توجه به مشخصات هندسی و الکترومغناطیسی آهنربای موجود، برای رسیدن به نیروی رانش استاتیکی

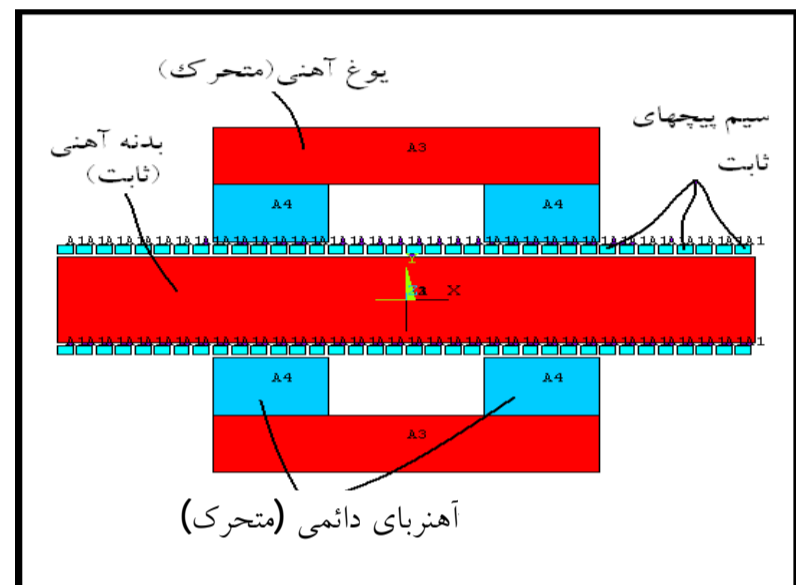
1. Ansys  
2. Lorentz Force  
3. Maxwell Stress Tensor  
4. Virtual Work

نیرو تولید می‌شود. در این حالت با توجه به جهت شار مغناطیسی و جریان سیم پیچها، نیروی وارد شده از طرف میدان در رساناها همجهت بوده و یکدیگر را تقویت می‌کنند. از آنجاکه سیم پیچها ثابت هستند، جهت حرکت درخلاف جهت نیروی وارد شده بر رساناها خواهد بود (شکل 11).



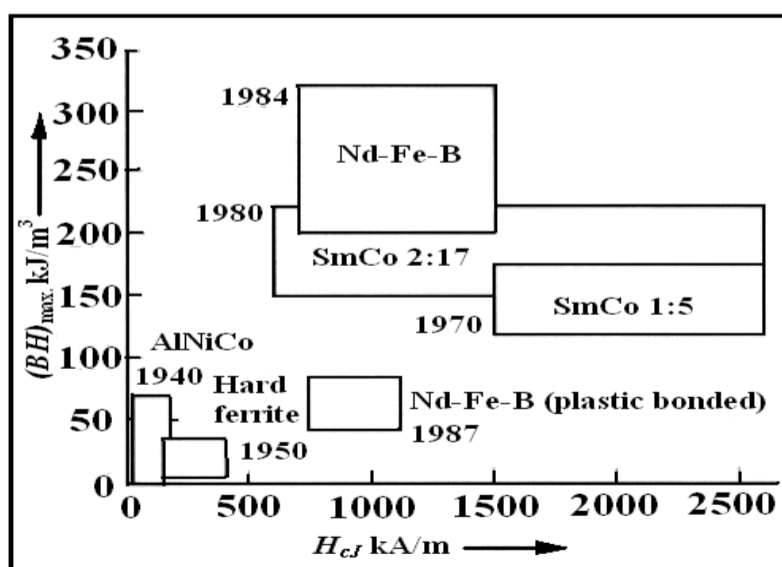
شکل 11 جهت شار مغناطیسی، جریان و نیروی حاصل

چاپی متصل می‌شود. فیبر مدار چاپی - که دارای یک لایه مس به صورت بخشهایی مجزا از یکدیگر است - واسطه سیم پیچهای 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 (شکل 10).

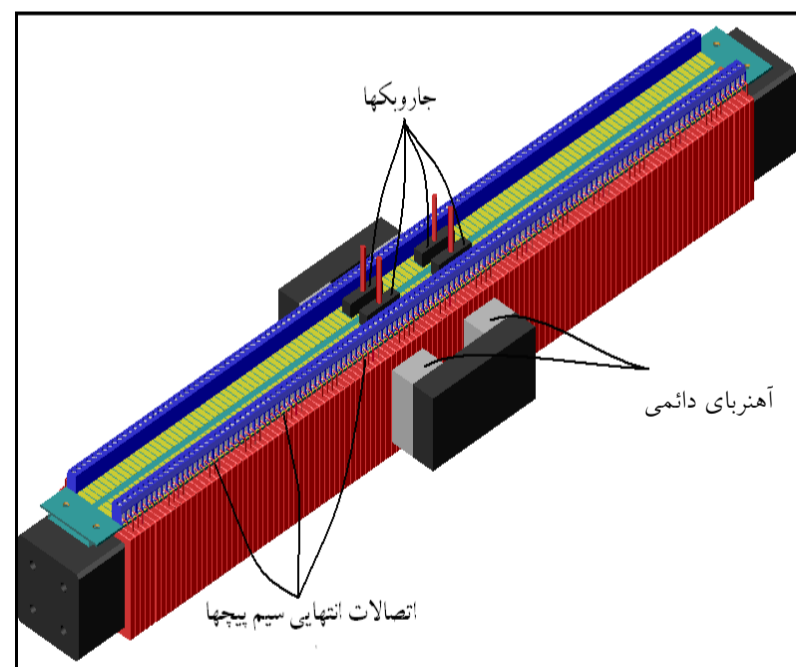


شکل 9 طرحواره دو بُعدی از طرح ارائه شده

برای حل مسأله باید مشخصات مواد به کار رفته در موتور و همچنین شرایط مرزی برای نرم افزار تعریف شود. آهنربای دائمی از نوع عناصر کمیاب خاکی<sup>1</sup> انتخاب شده که قوی ترین آهنربا در حال حاضر است (شکل 12) [9].



شکل 12 مقایسه آهنرباهای مختلف از نظر انرژی بیشینه



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

1. NdFeB

ماکسول و روش کار مجازی به وسیله نرم افزار انسیس به ترتیب برابر 47/8، 51/69 و 47/8 نیوتن است. در این طرح ابعاد قسمت متحرک  $100 \times 100 \times 120 \text{mm}^3$  و ابعاد کلی موتور  $700 \times 120 \times 120 \text{mm}^3$  است.

#### 4- بحث و نتیجه گیری

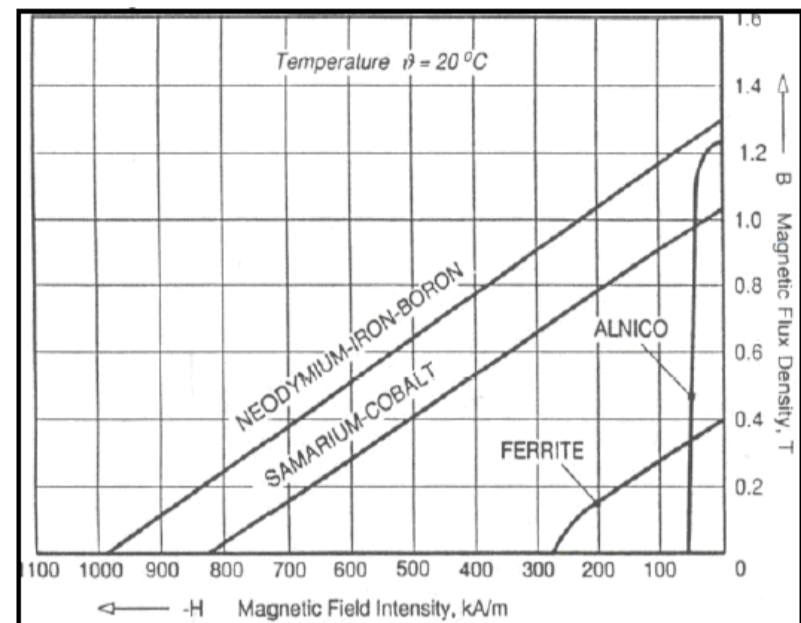
##### 4-1- نتایج به دست آمده از آزمایش

پس از ساخت موتور خطی، آزمایشهایی برای اندازه گیری نیروی رانش استاتیکی در موتور خطی انجام شد. از آنجا که ابعاد و اندازه های هندسی ثابت بوده و تنها یک نمونه از آن ساخته شده، تنها عاملی که می توان تغییرات نیروی رانش استاتیکی را برای تغییرات آن بررسی کرد، چگالی جریان یا جریان ورودی موتور است. جریان سیم پیچ از عقربه منبع تغذیه خوانده شده و نیروی رانش استاتیکی به وسیله لودسل<sup>2</sup> اندازه گیری می شود. لودسل وسیله ای دقیق برای اندازه گیری نیرو بوده و کارکرد آن بر تغییر مقاومت الکتریکی مدار آن - شامل مقاومت های حساس به تغییر طول - استوار است. خروجی لودسل ولتاژی است که با تغییر نیروی اعمال شده بر آن به صورت خطی تغییر می کند. آزمایشها برای دو حالت سیم پیچ سری و موازی انجام شده است.

##### 4-1-1-1-4- حالت سیم پیچ سری

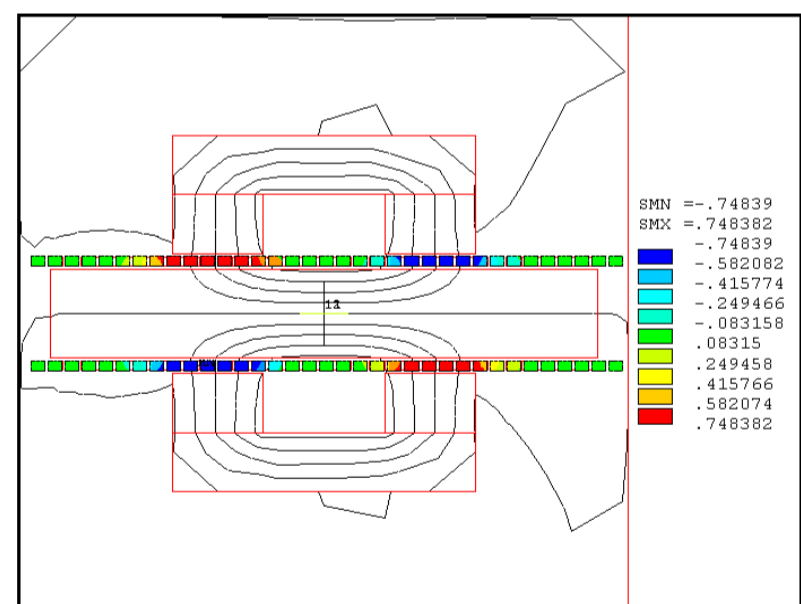
در این حالت سیم پیچهایی که در طول موتور و در حوزه تأثیر میدان مغناطیسی آهنربای دائم قرار دارند، با یکدیگر سری شده و دو سر سیم پیچ حاصل به منبع تغذیه جریان مستقیم متصل می شود. در این حالت جاروبکها و صفحه حامل آن از روی موتور باز می شود. در حالت سری، ولتاژ مورد نیاز موتور بالا اما جریان نسبتاً کمی مورد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

اطلاعات مورد نیاز برای حل مسأله از روی منحنی مشخصه<sup>1</sup> مربوط در 20 نقطه استخراج شده و در نرم افزار استفاده شده است (شکل 13) [9].



شکل 13 منحنی مشخصه آهنرباهای مختلف

بر اساس این طرح دو بُعدی، چگالی جریان  $5 \text{A/mm}^2$  و اطلاعات مربوط به خواص الکترومغناطیسی مواد و آهنربای دائم، مقدار چگالی شار مغناطیسی (B) در محل سیم حامل جریان به دست می آید (شکل 14).



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

2. Load Cell

1. B-H Curve



$$F = \frac{2V_M B_r}{\frac{h_M}{g} + \frac{B_r}{\mu_0 H_c}} \cdot \frac{I}{A_c} \Rightarrow \quad (23)$$

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

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 به ازای یک آمپر جریان به دست می آید. میانگین  $K_f$  در روش حل عددی 49/7 و میانگین مقدار به دست آمده از آزمایش 53/2 نیوتن به ازای یک آمپر جریان ورودی سیم پیچ است. بخشی از خطاها مربوط به خطاهای اندازه گیری است (شکل 15).

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

$$F = K_f I \quad (N) \quad (21)$$

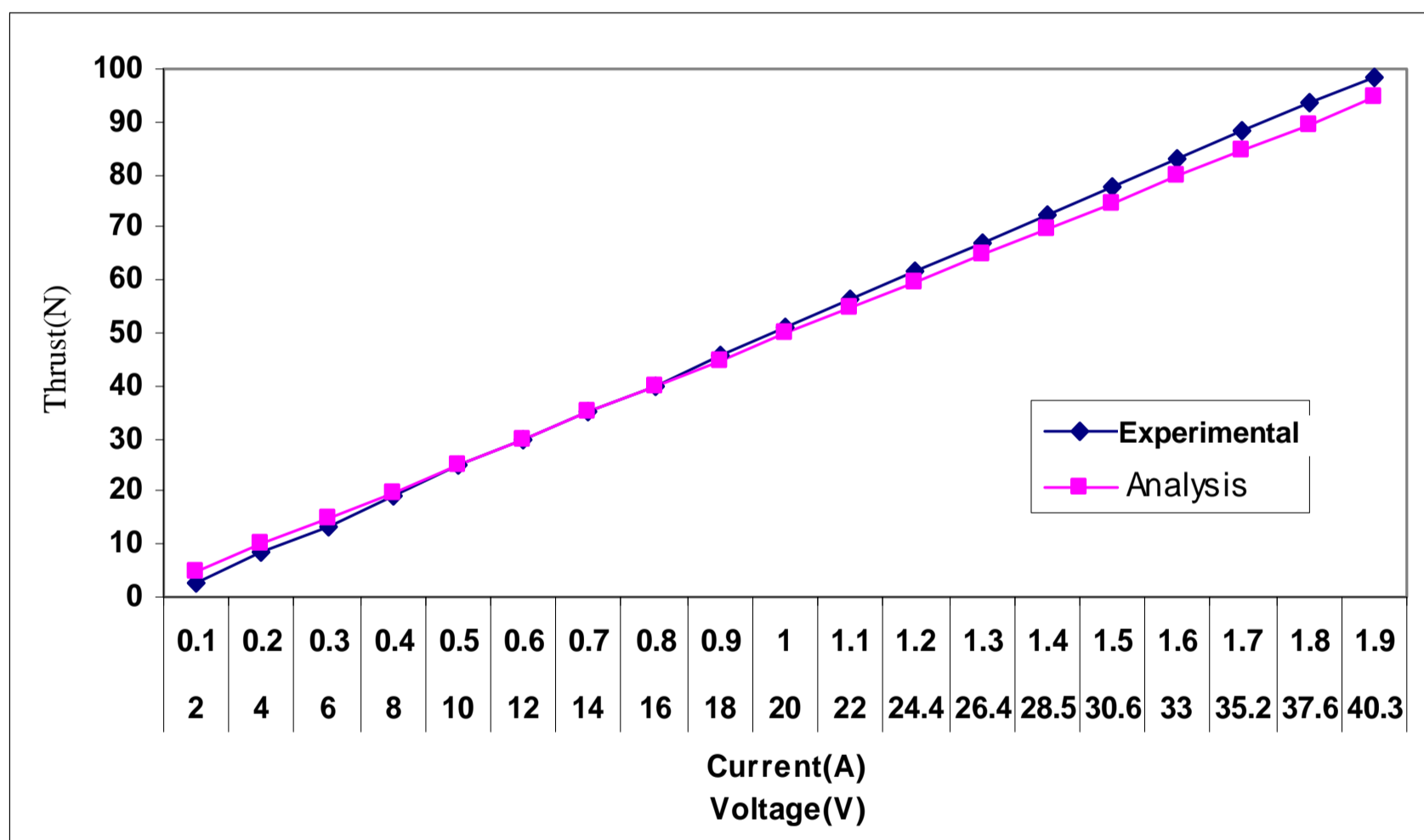
$F$  نیروی رانش،  $I$  جریان سیم پیچ و  $K_f$  ثابت نیروی رانش به معنای نیروی رانش به ازای واحد جریان است.  $K_f$  در روش ریاضی به صورت زیر محاسبه می شود:

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

در حالت سری داریم:

$$I = J A_c \Rightarrow J = \frac{I}{A_c} \quad (22)$$

بنابر این:

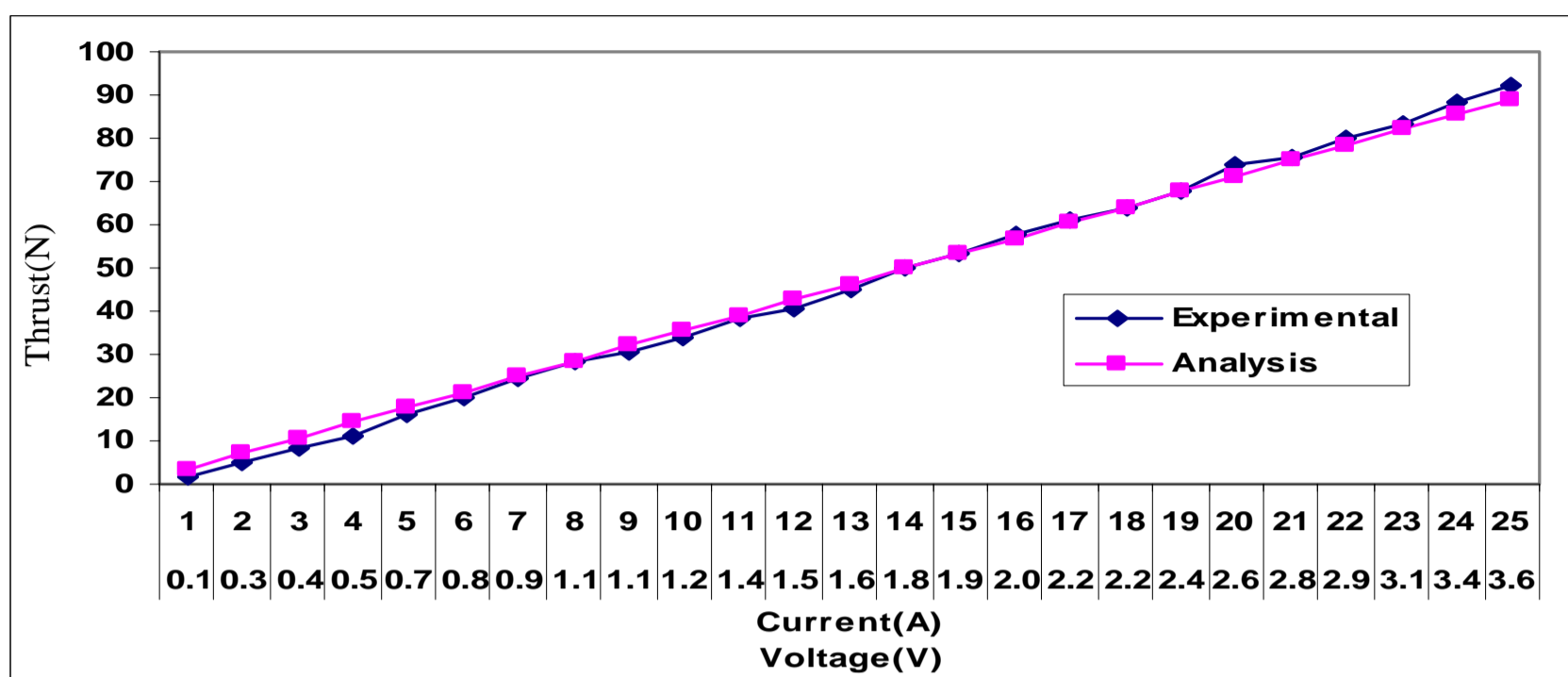


شکل 15 نتایج تئوری و تجربی تغییر نیروی رانش استاتیکی با تغییر جریان (ولتاژ) در حالت سری

#### 4-1-2- حالت سیم پیچ موازی

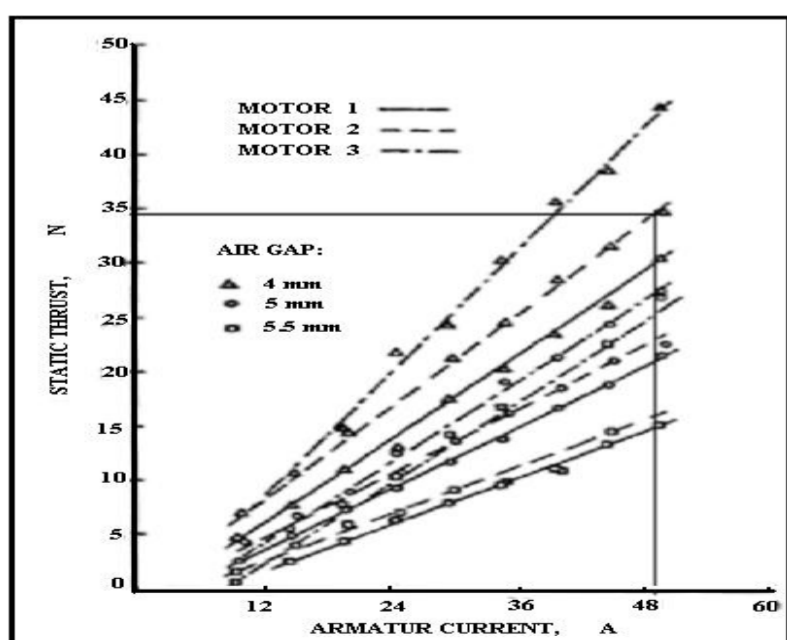
موازی، ولتاژ مورد نیاز موتور پایین بوده اما جریان بسیار بالایی مورد نیاز است. نتایج حاصل از تغییر نیروی رانش استاتیکی با افزایش جریان منبع تغذیه در این مرحله در شکل 16 مشاهده می شود.

در این حالت سیم پیجهایی که در طول موتور و در حوزه تأثیر میدان مغناطیسی آهنربای دائم قرار دارند، با یکدیگر به صورت موازی قرار گرفته و مجموعه سیم پیچها به وسیله جاروبکها تغذیه می شود. در حالت



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

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

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

$$\eta = \frac{W_M}{W_c} \quad (13)$$

$$I_{tot} |_p = 2nI_c \quad (24)$$

$$J = \frac{I}{2nA_c} = \frac{Iw_c}{2W_M A_c} \quad (25)$$

و بدین ترتیب:

$$F = \frac{2V_M B_r}{\frac{h_M}{g} + \frac{B_r}{\mu_0 H_c}} \cdot \frac{w_c}{2W_M A_c} I \Rightarrow \quad (26)$$

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

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

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 به ترتیب 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].

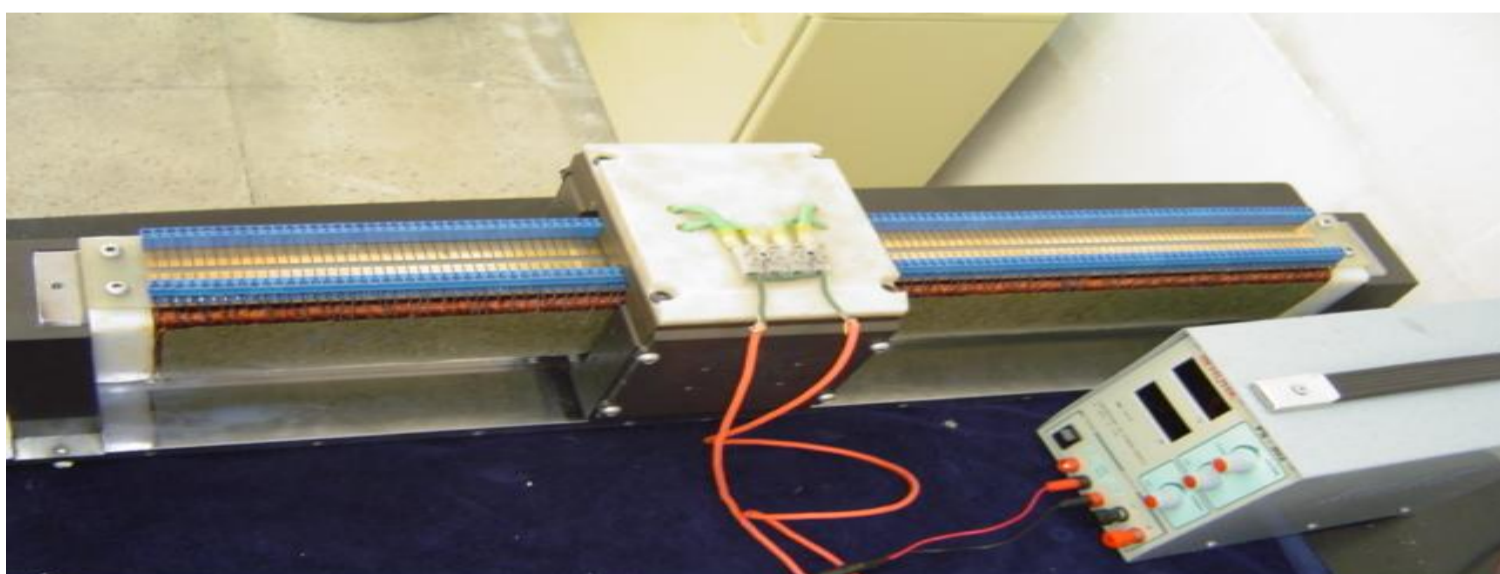
موتور ساخته شده نیز با ابعاد 12، 15 و 10 سانتیمتر دارای ثابت نیروی رانش استاتیکی 53/2 نیوتن بر آمپر با توجه به میانگین مقادیر به دست آمده از آزمایش است. با در نظر گرفتن ابعاد و مقادیر ثابت نیروی رانش استاتیکی بالا می‌توان گفت که موتور ساخته شده، از نظر ایجاد نیروی رانش استاتیکی مورد نیاز با موارد یاد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

این مقدار برای موتور ساخته شده از برونیابی نتایج تجربی، برابر 190 نیوتن و با روش حل عددی برابر 180 نیوتن به دست 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 به ترتیب برابر 11/6، 12/5 و 9/2 نیوتن به ازای 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 به ازای واحد جرم به دست می‌آید.

البته این نکته را نباید از نظر دور داشت که برای هندسه ثابت، با کوچک انتخاب کردن قطر سیم و افزایش دور سیم پیچ می‌توان ثابت نیروی رانش را افزایش داد که این موجب افزایش مقاومت سیم پیچ 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<sup>1</sup> که یکی از تولیدکنندگان معتبر ماشینهای الکتریکی است در سطح وسیعی به تولید و عرضه موتورهای خطی می‌پردازد. موتور خطی جریان مستقیم ساخت



شکل 18 موتور خطی ساخته شده

1. Baldor

## 5- منابع

پایان نامه کارشناسی ارشد؛ 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»؛ پایان نامه کارشناسی ارشد؛ 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.

[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»؛