



## طراحی محرکه‌ای جدید جهت تحریک یک نمونه شیر هیدرولیکی خطی صنعتی و بهینه‌سازی آن با الگوریتم ژنتیک

محمد صادق محمدزاده مقدم<sup>1</sup>، مهدی مدبری فر<sup>2\*</sup>، بهمن میرزاکhani<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مکترونیک، دانشگاه اراک، اراک

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

3- استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه اراک، اراک

\* اراک، صندوق پستی 38156-88849، m-modabberifar@araku.ac.ir

### چکیده

### کلیدواژگان

شیر سروو هیدرولیک

موتور بوبین صدا

ترکیب آهن‌ربایی هالباک

بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

تحلیل اجزاء محدود

امروزه در بسیاری از تجهیزات صنعتی استفاده از سیستم‌های هیدرولیکی برای انتقال قدرت گسترش یافته است. از این رو نیاز به بهبود دقت و عملکرد دینامیکی سیستم‌های هیدرولیکی نیز افزایش پیدا کرده است. شیرهای هیدرولیکی از جمله اجزای کلیدی در سیستم‌های هیدرولیکی می‌باشند که بهبود عملکرد آنها سبب افزایش کارایی و دقت سیستم‌های هیدرولیکی می‌گردد. در این مقاله، یک موتور بوبین صدا برای تحریک یک نمونه شیر سروو هیدرولیکی طراحی شده و بهینه‌سازی آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه می‌گردد. ابتدا یک طراحی اولیه با توجه به محدودیت اندازه با استفاده از ترکیب آهن‌ربایی هالباک بررسی شده است. در ادامه معادلات مربوط به طراحی و ابعاد محرکه مورد بررسی قرار می‌گیرد، سپس طراحی بهینه براساس الگوریتم ژنتیک با هدف بهینه‌سازی ابعاد و عدم اشباع شار مغناطیسی و دستیابی به نیروی مورد نیاز ارائه می‌شود. در نهایت نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی طراحی در بکارگیری ترکیب آهن‌ربایی هالباک، با استفاده از تحلیل اجزای محدود ارزیابی می‌شود. نتایج حاصل نشان از بهبود زمان عملکردی 3/41٪ این محرکه جدید در مقایسه با سیستم سلونوئیدی شیر هیدرولیکی انتخاب شده می‌باشد.

## Design of a new actuator for actuating a linear hydraulic valve and its optimization with genetic algorithm

M.S. Mohamadzadeh Moghadam<sup>1</sup>, M. Modabberifar<sup>1\*</sup>, B. Mirzakhani<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

2- Department of Metallurgy Engineering, Arak University, Arak, Iran

\* P.O.B. 38156-88849 Arak, Iran, m-modabberifar@araku.ac.ir

### Keywords

Direct-drive Servo valve (DDV)  
Voice Coil Motor (VCM)  
Optimization with Genetic Algorithm (GA), Halbach Array  
Finite-Element Analysis (FEA)

### Abstract

Today, in many industrial processes, the use of hydraulic systems for power transmission is growing. The need of improving more accurate and faster dynamic performance of hydraulic systems has increased. Hydraulic valves are key components in hydraulic systems that improving their performance causes increasing in hydraulic systems efficiency and accuracy. In this paper, a voice coil motor is designed for a hydraulic servo valve and optimized using genetic algorithm. Firstly, a preliminary design according to the size limit has been investigated using a combination of magnet Halbach. Then optimum design is provided based on genetic algorithms to optimize the size and lack of saturation magnetic flux to achieve power needed. Finally, the achieving results of the optimization design utilizing a Halbach magnet array, is evaluated using finite element analysis. The results show the improvement in time of performance about 3/41% new actuator compared to hydraulic valve's solenoid.

### 1- مقدمه

سروو الکترو هیدرولیک از روش تحریک دو مرحله‌ای استفاده می‌کنند که در آن یک سیگنال الکتریکی کم توان بصورت هیدرولیکی تقویت شده تا اسپول<sup>2</sup> را به حرکت درآورد. این شیرهای دو مرحله‌ای مشکلاتی مانند حساسیت بالا به

امروزه در بسیاری از تجهیزات صنعتی، شیرهای انتقال قدرت ارزان و دقیق مورد نیاز است. شیر سرو الکترو هیدرولیک<sup>1</sup> یکی از مهمترین اجزا سیستم‌های انتقال قدرت است. اکثر شیرهای

<sup>2</sup> Spool

<sup>1</sup> Electro Hydraulic Servo Valve (EHV)

Please cite this article using:

M.S. Mohamadzadeh Moghadam, M. Modabberifar, B. Mirzakhani, Design of a new actuator for actuating a linear hydraulic valve and its optimization with genetic algorithm, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 1-9, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

است. آنها همچنین یک موتور بوبین صدای مقاوم در برابر خطا را طراحی کرده و ساختند که چگالی میدان مغناطیسی آن برای کاربری در شیرهای تحریک مستقیم مناسب بود [9]. نسکوئیو یک موتور بوبین صدا برای تحریک یک شیر هیدرولیک پیشنهاد داد که در آن برای افزایش نیرو و بهبود پاسخ زمانی از یک سیال فرومگنتیت جهت پر کردن فاصله هوایی در مدار مغناطیسی استفاده کرد [10].

در این مقاله یک موتور بوبین صدا با استفاده از ترکیب آهن‌ربای هالیک<sup>4</sup> برای تحریک یک نمونه شیر سروو هیدرولیک و جایگزینی آن به جای سیستم سولونوئید موجود طراحی می‌شود. اگر چه در پژوهش‌های قبلی موتور بوبین صدا برای تحریک شیرهای هیدرولیک معرفی شده و بعضی مشخصات دینامیکی آن ذکر شده است، ولیکن پاسخ زمانی آن با سیستم تحریک سولونوئیدی موجود مقایسه نشده است. هدف از این پژوهش دستیابی به عملکرد دینامیکی بهتر و پاسخ زمانی کوتاه‌تر برای شیر هیدرولیکی در مقایسه با سیستم تحریک سولونوئیدی متداول وهم سایز می‌باشد. در این روش ابعاد محرکه تا حد ممکن بهینه می‌گردد. برای این منظور از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک که روش بهینه‌سازی موثری برای طراحی است، استفاده شده است. به منظور تایید دستیابی به نیروی مورد نظر و ابعاد بهینه شده‌ی موتور بوبین صدا، از تحلیل اجزای محدود استفاده می‌گردد.

## 2- انتخاب شیر هیدرولیکی

با توجه به هدف‌های از پیش تعیین شده برای انتخاب شیر هیدرولیکی مناسب، تا حد امکان فاکتورهایی در نظر گرفته شده است:

- قابلیت استفاده از محرکه پیشنهادی جدید (موتور بوبین صدا) و جایگزینی آن به جای محرکه متداول شیر هیدرولیکی انتخاب شده؛
- مشخصات الکتریکی و تغذیه بوبین و توان مورد نیاز برای راه اندازی شیر هیدرولیکی؛
- میزان استفاده و کاربردی بودن آن در صنایع مختلف؛
- هزینه مناسب برای خرید.

طی بررسی‌های انجام شده برای تهیه یک شیر هیدرولیکی مناسب با توجه به شرایط گفته شده، در نهایت یک عدد شیر برقی هیدرولیکی کنترل جهت ساخته شده توسط شرکت

آلودگی‌های روغنی، ساختار پیچیده و محدوده عملکردی تا 50 هرتز دارند. یک شیر تحریک مستقیم<sup>1</sup> که از یک محرکه الکتریکی برای راندن مستقیم اسپول استفاده میکند این معایب را نداشته و یک جایگزین مناسب به شمار می‌آید. این شیرها در سال‌های اخیر با توجه به ساختار ساده، قابلیت اعتماد و عملکرد دینامیکی بهتر در مقایسه با سرو شیرهای معمولی دو مرحله‌ای تقاضا بیشتری را به دست آورده است.

علاوه بر سولونوئیدهای معمولی، محرکه‌های الکتریکی متعددی برای تحریک شیرهای تحریک مستقیم پیشنهاد شده اند. برتون و همکاران او یک شیر تحریک مستقیم با موتور پله‌ای با ساختاری ساده و دقت بالا توسعه دادند [1]. شرکت موگ<sup>2</sup> یک شیر تحریک مستقیم با استفاده از موتور خطی برای دستیابی به سیستمی با قابلیت اطمینان بالا طراحی کرد [2]. با این حال، پاسخ دینامیکی این شیرهای تحریک مستقیم توسط المان‌های محرکه محدود شده است. لایندلر و همکارانش یک سرو شیر تک مرحله‌ای با استفاده از یک محرکه پیزوالکتریک معرفی کردند [3]. جون و همکارانش یک محرکه جدید برای یک شیر تحریک مستقیم با استفاده از یک پیزوالکتریک و یک مکانیزم تیر انعطاف پذیر پیشنهاد کردند [4]. سیستم الکترونیکی کنترل و قدرت برای یک محرکه پیزوالکتریک یک شیر تحریک مستقیم جهت کاربری‌های هوا و فضا توسط سنتا و همکارانش پیشنهاد شد [5]. یک سرو شیر تحریک مستقیم پیزوالکتریکی برای مکانیزم اسپولی که از یک سری اجزا مستقل تشکیل شده و در تماس با یکدیگر نیز هستند، توسط چانگبین [6] ارائه شد. علاوه بر محرکه‌های پیزوالکتریک، محرکه‌های مگنتواستریکتیو نیز برای شیرهای تحریک مستقیم ارائه شدند. یانگ و همکارانش یک شیر تحریک مستقیم با استفاده از مواد مگنتواستریکتیو طراحی کرده و ساختند [7]. نتایج تست این شیر پاسخ فرکانسی بالای 100 هرتز را نشان دادند. تحریک شدن شیر تحریک مستقیم توسط موتور بوبین صدا<sup>3</sup> یک راه حل مطلوب می‌باشد که مزایایی مانند پاسخ دینامیکی سریع، سهولت کنترل و قابلیت تکرار خوب را دارد. وو و همکارانش یک شیر تحریک مستقیم جدید با یک موتور بوبین صدای فرکانس بالا و کنترلر دیجیتال پیشنهاد کردند [8]. نتایج آزمایش‌ها نشان دهنده پیشرفت در دقت کنترل سیستم شیر هیدرولیک بود. تست‌های پاسخ دینامیکی نشان دادند که بازه فرکانسی این سیستم تا 450 هرتز

<sup>1</sup> Direct Drive Servo Valve (DDV)

<sup>2</sup> Moog

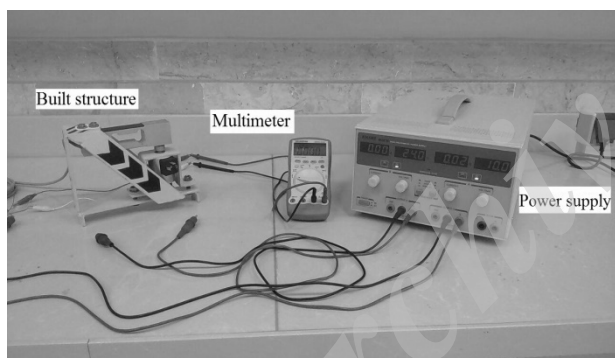
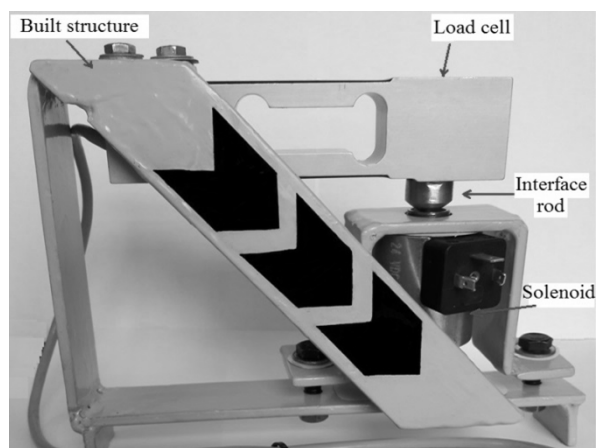
<sup>3</sup> Voice Coil Motor

<sup>4</sup> Halbach array

### 3- ساختار موتور بوبین صدا

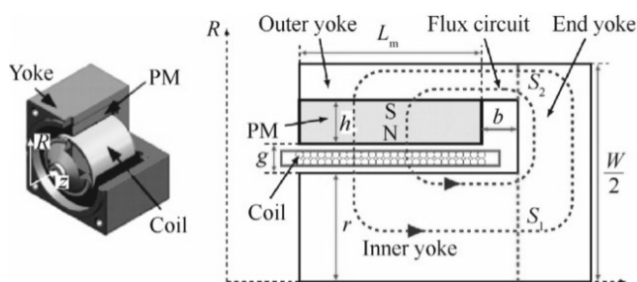
#### 3-1- موتور بوبین صدا با طراحی معمولی

شکل 3 نمایی از طرح یک موتور بوبین صدا معمولی را نشان می‌دهد. قطب‌های آهن‌ربای دائمی در اطراف سیم پیچ متحرک داخلی شیار حلقوی یوغ نصب شده و در جهت شعاعی مغناطیسی شده است. شارهای مغناطیسی آهن‌ربا دائمی از میان یوغ‌های داخلی و خارجی عبور می‌کنند، و یک حلقه بسته را تشکیل می‌دهند.



**Fig. 2** A view of the structure, load cell and solenoid mounted on it (above image) set-up used for testing (Bottom image)

شکل 2 نمایی از سازه، لودسل و سلونوئید نصب شده بر روی آن (تصویر بالا) مجموعه تجهیزات مورد استفاده در آزمایش (تصویر پایین)



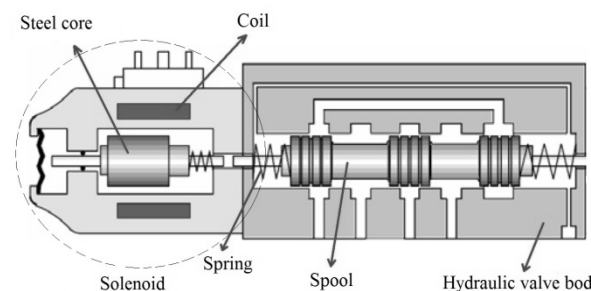
**Fig. 3** Structure and schematic view of a conventional voice coil motor

شکل 3 ساختار و نمایی شماتیک از یک نوع موتور بوبین صدا

ایتالیایی دوپلوماتیک<sup>1</sup> (یکی از برندهای معتبر اروپایی) با کد اختصاری DS3-SA2/10N-D24K1 تهیه گردید. تصویر این شیر برقی هیدرولیکی و نمایی شماتیک از ساختار داخلی آن در شکل 1 نشان داده شده است.

#### 2-1- اندازه گیری نیروی سلونوئید شیر هیدرولیکی

برای اطمینان از مقدار نیروی تولید شده توسط سلونوئید، جهت بدست آوردن نیروی رانش مورد نیاز برای شیر هیدرولیکی انتخاب شده، چند آزمایش مختلف بر روی سلونوئید انجام شد. از یک لودسل برای اندازه‌گیری نیروی خروجی استفاده گردید. برای قرارگیری لودسل و سلونوئید در کنار هم، یک سازه مناسب طراحی و ساخته شد و سپس این دو بر روی آن مونتاژ گردیدند. در شکل 2 نمایی از سازه طراحی شده و لودسل و سلونوئید نصب شده بر روی آن و نیز مجموعه تجهیزات آزمایشگاهی برای انجام تست‌ها نشان داده شده است.



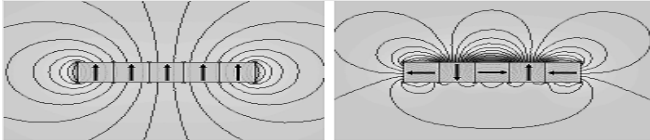
**Fig. 1** Selected Hydraulic solenoid valve (above image) Schematic view of the internal structure of the directional control valve (Bottom image)

شکل 1 شیر برقی هیدرولیکی انتخاب شده (تصویر بالا) نمایی شماتیک از ساختار داخلی شیر انتخاب شده (تصویر پایین)

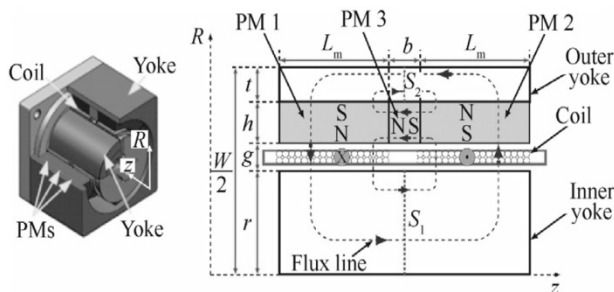
با اعمال ولتاژهای مختلف به سلونوئید و خروجی‌های بدست آمده از لودسل، مقدار نیروی رانش تولید شده توسط سلونوئید طبق مشخصه‌های عملکردی آن در حدود 30 نیوتن اندازه‌گیری شد. بنابراین از این مقدار نیرو به عنوان یکی از پارامترهای مهم برای طراحی محرکه جدید استفاده گردید.

<sup>1</sup> Duplomatic

پیچ و فاصله حرکتی 1 میلی‌متر است. بنابراین مقدار فاصله هوایی  $g$ ، 3 میلی‌متر است. در نهایت با در نظر گرفتن محدودیت‌های ابعادی در طراحی و نیروی مورد نیاز برای راه اندازی شیر هیدرولیکی و با توجه به معادله‌ی 1 پارامترهای طراحی اولیه به صورت جدول 2 می‌باشد.



**Fig. 4** The difference distribution of magnetic flux in Halbach magnets array (pictured right) and the usual array of magnet (pictured left)  
**شکل 4** تفاوت توزیع شار مغناطیسی در ترکیب آهن‌ربای هالباک (تصویر سمت راست) ترکیب معمولی از آهن‌ربا (تصویر سمت چپ)



**Fig. 5** A voice coil motor structure using Halbach magnets array [8]  
**شکل 5** ساختار یک موتور بوبین صدا با استفاده از ترکیب آهن‌ربای هالباک [8]

جدول 1 توصیف پارامترها

**Table 1** Parameters description

نماد	پارامترها
$B$	چگالی شار مغناطیسی
$H$	شدت میدان مغناطیسی
$W$	قطر موتور بوبین صدا
$t$	ضخامت یوغ بیرونی
$b$	ضخامت آهن‌ربای محوری
$L_m$	طول آهن‌ربای شعاعی
$g$	فاصله هوایی
$r$	شعاع یوغ درونی
$h$	ضخامت آهن‌ربای شعاعی
$\mu_m$	نفوذ پذیری نسبی آهن‌ربا
$\mu_a$	نفوذپذیری مغناطیسی هوا
$S_1$	مساحت بخش یوغ درونی
$S_2$	مساحت بخش یوغ بیرونی
$L_c$	طول سیم پیچی
$PM$	آهن‌ربای دائمی
$dw$	قطر سیم

موتور بوبین صدا بر اساس قانون لورنتز عمل می‌کند. یک جریان الکتریکی  $I$ ، با عبور از یک سیم پیچ متحرک یک میدان مغناطیسی تولید می‌کند که در تعامل با میدان ثابت چگالی شار مغناطیسی  $B$ ، یک نیروی محوری حاصل می‌شود. نیروی تولید شده به وسیله این محرکه به صورت معادله‌ی (1) می‌باشد:

$$F = i \cdot L \times B = B \cdot I \cdot L \cdot \sin\theta \quad (1)$$

که در آن  $L$  طول سیم پیچ و  $\theta$  زاویه بین بردارهای  $L$  و  $B$  است [10].

### 3-2- استفاده از ترکیب آهن‌ربای هالباک در موتور بوبین صدا

ترکیب آهن‌ربای هالباک شامل قرار گرفتن تعدادی آهن‌ربا با قطب بندی متفاوت و با آرایش مخصوص در کنار یکدیگر می‌باشند. استفاده از ترکیب آهن‌ربای هالباک می‌تواند باعث تقویت شار مغناطیسی در یک طرف و تضعیف شدن آن در طرف دیگر شود [11]. نمونه‌ای از این ترکیب در شکل 4 نشان داده شده است. نمایی شماتیک از ساختار یک موتور بوبین صدا با استفاده از ترکیب آهن‌ربای هالباک در شکل 5 نشان داده شده است.

### 4- معادلات طراحی

#### 4-1- توصیف پارامترها

پارامترهای اصلی این محرکه در جدول 1 نشان داده شده است. گام مهم در طراحی، محدودیت‌های هندسی محرکه و مدل شار مغناطیسی می‌باشد.

در ابتدا یک طراحی اولیه با توجه به محدودیت اندازه انجام شد. با توجه به جایگزینی محرکه جدید به جای سولونوئید شیر هیدرولیکی، لازم است ابعاد این محرکه تا حد ممکن به ابعاد سولونوئید نزدیک باشد، بنابراین محدودیت‌هایی در نظر گرفته شده است. مهمترین پارامترهای موتور بوبین صدای فرض شده شامل  $L_m$ ,  $r$ ,  $g$ ,  $t$ ,  $h$  و  $b$  می‌باشد. مجموع  $h$ ,  $t$ ,  $g$  و  $r$  نیمی از قطر  $w$  است. در این طراحی حداکثر مقدار قطر VCM، 62 میلی‌متر در نظر گرفته شد. حداقل ضخامت یوغ بیرونی  $t$  نمی‌تواند بیش از حد نازک باشد. در این مطالعه،  $t = 6$  میلی‌متر به منظور استحکام دستگاه مورد نظر تعیین می‌شود. قطر سیم  $dw = 0.5$  mm انتخاب می‌گردد. برای سهولت سیم پیچی، تعداد لایه‌های سیم پیچی  $n$  باید زوج باشد. در این مطالعه، با در نظر گرفتن راحتی سیم پیچی و اتلاف حرارتی و همچنین جلوگیری از افزایش فاصله هوایی و کاهش چگالی شار در آن، تعداد لایه‌های سیم پیچی  $n$  برابر 4 انتخاب شده است. بنابراین ضخامت سیم پیچ 2 میلی‌متر می‌باشد. ضخامت کل قاب سیم

جدول 2 پارامترها طراحی اولیه

پارامترها	ابعاد بر حسب میلی‌متر
قطر موتور بوبین صدا ( $w$ )	62
ضخامت یوغ بیرونی ( $t$ )	6
ضخامت آهن‌ربای محوری ( $b$ )	5
طول آهن‌ربای شعاعی ( $Lm_2$ و $Lm_1$ )	17
فاصله هوایی ( $g$ )	3
شعاع یوغ درونی ( $r$ )	18
ضخامت آهن‌ربای شعاعی ( $h$ )	4

منجر به از دست دادن هیستیریزیس زیادی شود. زمانی که اشباعی وجود نداشته باشد، از استحکام مغناطیسی در یوغ‌ها ( $H_6$  و  $H_3$ ) صرف‌نظر می‌گردد و معادله (2) به صورت معادله (3) ساده می‌شود:

$$hH_1 + gH_2 + gH_4 + hH_5 = 2hH_c \quad (3)$$

معادله‌ی (3) می‌تواند با جایگزینی  $B_x$  به جای  $H_x$  به صورت معادله (4) نوشته شود:

$$h \frac{B_1}{\mu_m} + g \frac{B_2}{\mu_a} + g \frac{B_4}{\mu_a} + h \frac{B_5}{\mu_m} = 2hH_c \quad (4)$$

که در آن  $B_x(x=1,2,\dots,12)$  میانگین چگالی شار هر بخش در مدار شار مغناطیسی است،  $\mu_m$  نفوذ پذیری نسبی آهن‌ربای دائمی و  $\mu_a$  نشان دهنده نفوذپذیری مغناطیسی هوا می‌باشد. به دلیل ساختار متقارن،  $B_2=B_4$  و  $B_1=B_5$  است. فرض می‌شود که نشت شار مغناطیسی وجود ندارد. نسبت  $B_1$  به  $B_2$  برابر است با:

$$\frac{B_1}{B_2} = \frac{r + 0.5g}{r + 0.5(h + g)} \quad (5)$$

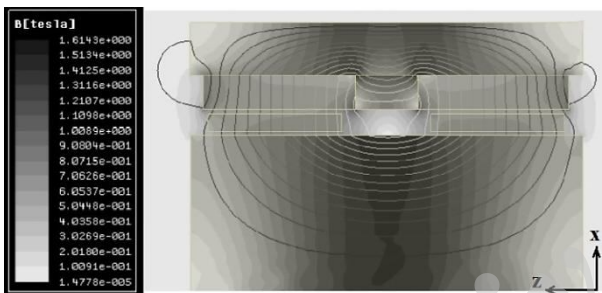


Fig. 6 Two-dimensional simulation of the initial design

شکل 6 شبیه‌سازی دو بعدی طراحی اولیه

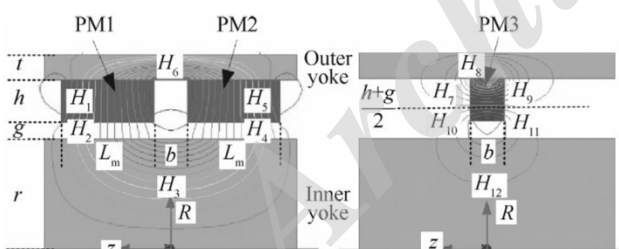


Fig. 7 Radial and axial magnet magnetic circuits [9]

شکل 7 مدارهای مغناطیسی آهن‌ربای شعاعی و محوری [9]

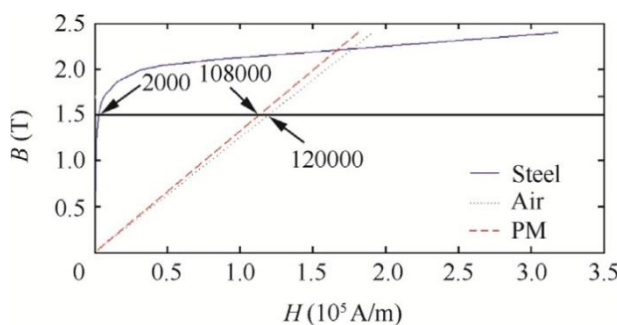


Fig. 8 B-H curve of air, permanent magnet, steel [9]

شکل 8 نمودارهای B-H هوا، آهن‌ربای دائمی، فولاد [9]

طراحی اولیه بگونه‌ای است که اشباع شار مغناطیسی در یوغ‌ها اتفاق نیفتد. این طراحی در نرم‌افزار Ansys Maxwell به صورت دو بعدی شبیه‌سازی شده است. در شکل 6 نتیجه شبیه‌سازی که در آن چگالی شار مغناطیسی و خطوط شار نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود حداکثر شار مغناطیسی در یوغ‌ها کمتر از مقدار اشباع جنس فلز انتخاب شده است، اما این طراحی بهینه نمی‌باشد. برای بهینه‌سازی طراحی موتور بوبین صدا نیاز به تحلیل دقیق الکترومغناطیسی این دستگاه می‌باشد.

#### 4-2- مدل تحلیلی الکترومغناطیسی

شکل 7 مدار مغناطیسی معادل موتور بوبین صدای پیشنهادی را در دو مدار موازی نشان می‌دهد. مدارهای PM شعاعی و محوری در این شکل در نظر گرفته شده است.  $H_x(x=1,2,\dots,12)$  نیرو میدان مغناطیسی هر بخش است؛ برای مثال  $H_1$  نیرو میدان مغناطیسی  $PM_1$  است،  $H_2$  نیرو میدان مغناطیسی در فاصله هوایی است. دو آهن‌رباهای دائمی و دو یوغ مدار شار PM شعاعی را تشکیل می‌دهند. استحکام شار مغناطیسی به صورت معادله (2) محاسبه می‌شود [9]:

$$hH_1 + gH_2 + \int_0^{Y_3} H_3 y_3 dy_3 + gH_4 + hH_5 + \int_0^{Y_3} H_6 y_6 dy_6 = 2hH_c \quad (2)$$

که  $H_c$  نیروی آهن‌ربای دائمی است،  $y_3$  و  $y_6$  به ترتیب مسیر شار از طریق یوغ درونی و یوغ بیرونی هستند، و  $Y_3$  و  $Y_6$  نشان دهنده طول  $y_3$  و  $y_6$  می‌باشد. یوغ درونی و بیرونی از فولاد با هدایت مغناطیسی بالا ساخته شده است. منحنی خاصیت مغناطیسی مواد آهنی در شکل 8 نشان داده شده است. در منحنی‌های  $B-H$  زمانی که  $B$  در یوغ‌ها کوچکتر از مقدار اشباع است، شدت میدان مغناطیسی در یوغ‌ها بسیار کوچکتر نسبت به شکاف هوا یا آهن‌ربای دائمی است. این یک قانون مهم طراحی برای موتور بوبین صدا است. اشباع شار ممکن است

است:

**(1)** چگالی مغناطیسی فاصله هوایی است. از آنجا که جریان‌های شار مغناطیسی در طول مسیری است که در آن هدایت مغناطیسی بالاترین مقدار می‌باشد، می‌تواند فرض شود که شار  $PM3$  در داخل سیلندر با شعاع  $r+(g+h)/2$  از طریق یوغ داخلی، و شارهای دیگر از طریق یوغ بیرونی حرکت می‌کنند (شکل 7). چگالی مغناطیسی فاصله هوایی  $B$  ثابت در نظر گرفته شده است. می‌توان آن را به صورت معادله (11) نشان داد:

$$B = B_2 + \frac{B_7 S_{3mi}}{S_a} \quad (11)$$

که در آن سطح متوسط فاصله هوایی است.

$$S_a = 2\pi \left( r + \frac{g}{2} \right) L_m \quad (12)$$

$S_{3mi}$  مساحت حلقوی  $PM3$  در داخل شعاع  $(g+h)/2$  است که به صورت رابطه (13) مشخص می‌شود:

$$S_{3mi} = \pi \left[ \left( r + \frac{g+h}{2} \right)^2 - (r+g)^2 \right] \quad (13)$$

$L_c$  طول سیم پیچی است.

$$L_c = 2\pi z \left( r + \frac{g}{2} \right) \quad (14)$$

که در آن  $z = 2n L_m / d_w$  تعداد دور سیم پیچ است.

**(3)** جرم کل بخش متحرک، که شامل جرم قاب سیم‌پیچ و

سیم پیچ است. جرم سیم پیچ  $m_c$  با طول سیم پیچ تغییر می‌کند.

$$m_c = L_c m_o \quad (15)$$

که در آن  $m_o$  جرم واحد طول سیم است. جرم قاب سیم پیچ به عنوان  $m_f$  تعریف می‌شود. حجم آن یک معادله هندسی از  $r$ ،  $b$  و  $L_m$  است. جرم کل روتور عبارت است از:

$$m = m_c + m_f \quad (16)$$

یکی دیگر از جنبه‌های مهم طراحی بهینه استفاده کامل از قابلیت هدایت شار در یوغ‌ها، اما با پرهیز از حالت اشباع می‌باشد. بنابراین آن به عنوان یک مورد از مشخصه اشباع در هدف گذاری اضافه می‌گردد. در شکل (7) حداکثر چگالی شار در یوغ‌های داخلی و خارجی در بخش‌های  $S_1$  و  $S_2$  اتفاق می‌افتد. فرض می‌شود هیچ نشتی شاری وجود ندارد. چگالی شار در  $S_1$  و  $S_2$  برابر است با:

$$B_{s1} = BS_a / S_1 \quad (17)$$

$$B_{s2} = BS_a - B_7 S_{3mo} / S_2 \quad (18)$$

به ترتیب،  $S_1$  و  $S_2$  مساحت بخش‌هایی از یوغ‌های داخلی و خارجی می‌باشند.  $S_{3mo}$  ناحیه حلقوی بیرونی  $PM3$  از  $(g+h)/2$  است.

$$S_{3mo} = \pi \left[ (r+g+h)^2 - \left( r + \frac{g+h}{2} \right)^2 \right] \quad (19)$$

بنابراین، به طور میانگین شدت میدان مغناطیسی در فاصله هوایی می‌تواند به صورت معادله (6) محاسبه بشود:

$$h \frac{r + 0.5g}{r + 0.5(h+g)} \times \frac{B_2}{\mu_m} + g \frac{B_2}{\mu_a} = hH_c \quad (6)$$

در شکل (7) شار محوری به دو بخش تقسیم شده است. یک بخش در داخل یوغ خارجی و دیگری در یوغ داخلی حرکت می‌کند. معادله‌ی شار این دو مسیر، در معادلات (7)، (8) آورده شده است:

$$\int_0^{Y_7} H_7 y_7 dy_7 + \int_0^{Y_8} H_8 y_8 dy_8 + \int_0^{Y_9} H_9 y_9 dy_9 = bH_c \quad (7)$$

$$\int_0^{Y_{10}} H_{10} y_{10} dy_{10} + \int_0^{Y_{12}} H_{12} y_{12} dy_{12} + \int_0^{Y_{11}} H_{11} y_{11} dy_{11} = bH_c \quad (8)$$

که در آن مسیر هر بخش در مدار مغناطیسی نشان می‌دهند و  $Y_x(x=7,8,\dots,12)$  طول مسیره‌ها می‌باشد. فرض می‌گردد که یوغ تحت اشباع نباشد. بنابراین از  $H_8$  و  $H_{12}$  صرف نظر می‌شود. مسیره‌های موجود در  $Y_7$ ،  $Y_8$  و  $Y_{10}$  نمی‌تواند در فرمول‌های ساده بیان شود. برای ساده سازی، فرض می‌شود که این مسیر در امتداد یک ربع دایره با شعاع  $(g+h)/5$  و  $H_7=H_9=H_{10}=H_{11}$  با مقادیر ثابت است. سپس معادلات (7) و (8) به صورت زیر ساده می‌شوند:

$$H_7 = H_9 = H_{10} = H_{11} = bH_c \frac{1}{\pi(g+h)} \quad (9)$$

نفوذ پذیری نسبی  $PM$  برای محاسبه چگالی میدان مغناطیسی استفاده می‌گردد. معادله (9) می‌تواند به صورت معادله (10) نوشته شود:

$$B_7 = B_9 = B_{10} = B_{11} = \mu_m bH_c \frac{1}{\pi(g+h)} \quad (10)$$

## 5- بهینه‌سازی موتور با استفاده از الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه‌سازی غیر تحلیلی یا تکاملی است که در مسائل بهینه‌سازی کاربرد زیادی پیدا کرده است. در واقع این الگوریتم یک روش محاسباتی تکاملی است که از فرآیند تکامل الهام می‌گیرد. الگوریتم ژنتیک با یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها شروع و به سمت یک جمعیت بهینه حرکت می‌کند. در این مقاله با ایجاد رابطه‌ای بین نیروی VCM و ابعاد طراحی و همچنین حداکثر چگالی شار در یوغ‌ها، مقادیر بهینه پارامترها بدست می‌آید.

برای کاربرد موتور بوبین صدا در شیرهای تحریک مستقیم، بالاترین توانایی شتاب موتور در جریان نامی به معنای پاسخ دینامیکی بهتر است. این قابلیت می‌تواند به عنوان  $BL_c/m$  نمایش داده شود. این نمادها به صورت زیر توضیح داده شده

مغناطیسی در یوغ‌ها حدود 1/48 تسلا می‌باشد، که نشان می‌دهد این محرکه در نقطه اشباع خوبی کار می‌کند، بنابراین ماکزیمم چگالی شار را در فاصله هوایی ایجاد و بالاترین نیروی مورد نظر را تولید می‌کند. در شکل 9 توزیع چگالی شار در یوغ داخلی و بیرونی موتور بوبین صدا طراحی شده در آنالیز 1/4 نشان داده شده است.

جدول 5 پارامترهای بهینه‌سازی شده

پارامترها	ابعاد بر حسب میلی‌متر
قطر موتور بوبین صدا ( $w$ )	60
ضخامت یوغ بیرونی ( $t$ )	5/5
ضخامت آهن‌ربای محوری ( $b$ )	4/8
طول آهن‌ربای شعاعی ( $Lm_2$ و $Lm_1$ )	17/6
فاصله هوایی ( $g$ )	3
شعاع یوغ درونی ( $r$ )	17/8
ضخامت آهن‌ربای شعاعی ( $h$ )	3/7
طول محوری موتور بوبین صدا	45

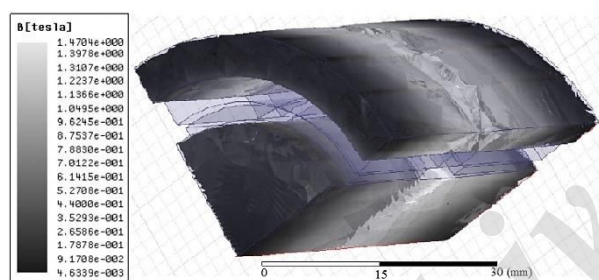


Fig. 9 Analysis of 1/4 designed model and the flux density in the inner and outer yoke

شکل 9 آنالیز 1/4 مدل طراحی شده و نمایش چگالی شار در یوغ درونی و بیرونی

با بررسی انجام شده، تحلیل اجزای محدود با دقتی قابل قبول ابعاد بهینه شده را تأیید می‌نماید. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نتایج حاصل از بهینه‌سازی تحلیلی در جدول 6 با هم مقایسه شده‌اند. در این جدول، چگالی شار در یوغ داخلی و خارجی و همچنین حداکثر نیروی تولید شده، نشان داده شده است.

جدول 6 مقایسه نتایج تحلیلی و عددی

$F$ (N)	$B_{s2}$ (T)	$B_{s1}$ (T)	
30	1/43	1/47	نتایج تحلیلی
29/129	1/4866	1/4515	نتایج عددی
2/91	3/81	1/26	خطا %

به منظور دستیابی به نتایج واقعی لازم است قیودی برای پارامترهای مختلف محرکه در نظر گرفته شود. پارامترهای مهم برای بهینه‌سازی طراحی و محدودیت‌های مربوطه در جدول 3 نشان داده شده است. ثابت‌های مورد استفاده در بهینه‌سازی در جدول 4 ذکر شده است.

جدول 3 پارامترهای مهم بهینه‌سازی و محدودیت‌های آن

Table 3 Important optimization parameters and their limitations

پارامترها	حداقل (mm)	حداکثر (mm)
طول آهن‌رباهای شعاعی ( $Lm$ )	11	18
شعاع یوغ درونی ( $r$ )	12	18
طول آهن‌ربای محوری ( $b$ )	4	6

جدول 4 پارامترها و ضرایب ثابت بهینه‌سازی

Table 4 Optimization parameters and constant coefficients

پارامترهای ثابت	مقادیر
ضریب گذردهی خلاء ( $\mu_0$ (H/m)	$4\pi \times 10^{-7}$
ضریب گذردهی آهن‌ربای دائم ( $\mu_m$ (H/m)	$1/099778 \mu_0$
ضریب گذردهی هوا ( $\mu_{air}$ (H/m)	$1/0000004 \mu_0$
حداکثر چگالی شار مغناطیسی در یوغ‌ها ( $B_{max}$ (T)	1/5

## 6- نتایج بهینه‌سازی

در این بخش، نتایج بهینه‌سازی موتور بوبین صدا با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. بهینه‌سازی انجام شده برای طراحی موتور بوبین صدا با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام گرفته است. نرم‌افزار متلب دارای قابلیت‌ها و امکانات زیادی برای مسائل مهندسی می‌باشد. بکارگیری این الگوریتم با استفاده از محیط تولباکس این نرم‌افزار و در قسمت بهینه‌سازی آن انجام شده است. استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه‌سازی دو هدف اعمال می‌شود: ابعاد بهینه موتور بوبین صدا و رسیدن به بیشترین شتاب در عملکرد روتور می‌باشد. نتایج بهینه‌سازی پارامترهای تحت بررسی و همچنین دیگر پارامترهای وابسته به آنها در جدول 5 نشان داده شده است.

## 7- تحلیل اجزای محدود

در این مقاله، به منظور آنالیز بهینه حاصل از نرم‌افزار Maxwell 3D استفاده شده که عملکرد آن بر اساس تحلیل اجزای محدود است. بدنه این موتور بوبین صدا از جنس (فولاد 1008) انتخاب شده است. مغناطیس‌های دائم از جنس نئودیمیم آهن بور با چگالی شار بالا می‌باشد. تحلیل مغناطیسی به دست آمده توسط Maxwell 3D نمایانگر آن است که حداکثر چگالی شار

شبه‌سازی بیانگر این مطلب است که این زمان در حدود 3/41% بهبود پیدا کرده است که باعث بهبود عملکرد دینامیکی شیر هیدرولیکی خواهد شد. اگرچه قیمت موتور بوبین صدا در مقایسه با سلونوئید اندکی بالاتر است، ولی مزایای دیگری مانند طول کورس بیشتر، نیروی ثابت در طول کورس، امکان حرکت معکوس و کنترل پذیری موقعیت و نیرو این محرکه را به گزینه‌ای جذاب برای تحریک شیرهای هیدرولیک صنعتی کرده است.

## 9- مراجع

- [1] R. Burton, J. Ruan, and P. Ukrainetz, Analysis of electromagnetic nonlinearities in stage control of a stepper motor and spool valve, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 125(2003) 405–412.
- [2] D633 and D634 series direct drive servo-proportional control valves with integrated 24V electronics, Moog Inc., East Aurora, NY, USA.
- [3] J. E. Lindler and E. H. Anderson, Piezoelectric direct drive servo valve, In Proc. SPIE 4698, Smart Structures and Materials: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, 488 (2002) 488-496
- [4] J. Jeon, C. Han, Y. M Han and S. B Choi, A new type of a direct-drive valve system driven by a piezostack actuator and sliding spool, *Smart Materials and Structures*, 23(2014) 075002
- [5] P. A. Sente, F. M. Labrique and P. J. Alexandr, Efficient Control of a Piezoelectric Linear Actuator Embedded into a Servo-Valve for Aeronautic Application, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59 (4) (2012) 1971-1979.
- [6] G. Changbin, J. Zongxia, A piezoelectric direct-drive servo valve with a novel multi-body contacting spool-driving mechanism: Design, modelling and experiment, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 228 (2014) 169-185.
- [7] Z. Yang, Z. He, D. Li, G. Xue, X. Cui, Hydraulic amplifier design and its application to direct drive valve based on magnetostrictive actuator, *Sensors and Actuators A: Physical*, 216(2014) 52-63.
- [8] S. Wu, Z. Jiao, L. Yan, S. Member, R. Zhang, J. Yu and C. Y Chen, Development of a Direct-Drive Servo Valve with High-Frequency Voice Coil Motor and Advanced Digital Controller, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19 (3) (2014) 932-942.
- [9] S. Wu, Z. Jiao, L. Yana, J. Yua, C. Y Chenb, A fault-tolerant triple-redundant voice coil motor for direct drive valves: Design, optimization, and experiment,

با محاسبه مجموع وزن روتور، این محرکه می‌تواند به شتابی معادل با  $517/66 \text{ (m/s}^2\text{)}$  برسد که در مقایسه با عملکرد شتاب سلونوئید  $485/43 \text{ (m/s}^2\text{)}$  بیشینه شتاب بالاتری دارد که می‌تواند خروجی دینامیکی بهتری برای شیر هیدرولیکی فراهم کند.

با توجه به کورس حرکت اسپول (3 میلی‌متر) برای راه اندازی کامل شیر هیدرولیکی، مشخص می‌شود که زمان مورد نیاز برای سلونوئید در حدود 3/52 میلی ثانیه است، در حالی که این مقدار برای موتور بوبین صدا 3/40 میلی ثانیه می‌باشد. شکل 10 نمودار مقایسه زمان عملکرد سلونوئید و موتور بوبین صدا در هنگام اعمال جریان را نشان می‌دهد.

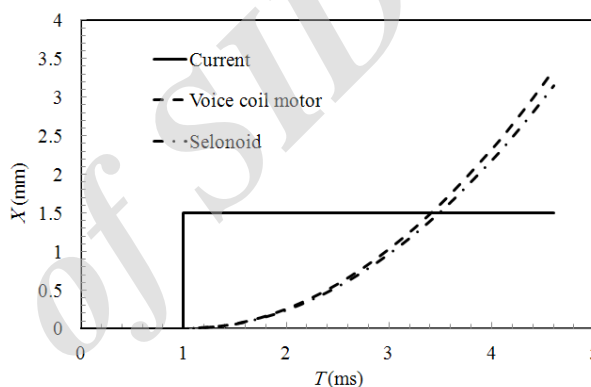


Fig. 10 Chart compare the performance solenoid and voice coil motor sound when current is applied

شکل 10 نمودار مقایسه زمان عملکرد سلونوئید و موتور بوبین صدا در هنگام اعمال جریان

## 8- نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی یک محرکه موتور بوبین صدا برای یک شیر هیدرولیکی با استفاده از ترکیب آهن‌ربای هالک و بهینه‌سازی آن با الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. در ابتدا نیروی مورد نیاز راه‌اندازی شیر هیدرولیکی از طریق انجام آزمایش‌های مختلف بر روی سلونوئید بدست آورده شد. سپس طراحی اولیه‌ای با محدودیت‌های ابعادی برای دستیابی به نیروی مورد نظر و همچنین بررسی عدم اشباع مغناطیسی یوغ‌ها انجام شد. در ادامه برای رسیدن به طراحی بهینه از الگوریتم ژنتیک استفاده گردید. دو هدف، یعنی رسیدن به بیشترین شتاب برای روتور و همچنین ابعاد موتور بوبین صدا بهینه‌سازی شد. در نهایت، با استفاده از نرم‌افزار Maxwell 3D کارایی این الگوریتم تأیید شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که شتاب عملکردی موتور بوبین صدا در مقایسه با سلونوئید بیشتر می‌باشد که باعث بهبود عملکرد دینامیکی شیر هیدرولیکی خواهد شد. نتایج



pp. 185-190.

- [11] Y.-M. Choi and D.-G. Gweon. (2011), "A high-precision dual-servo stage using Halbach linear active magnetic bearings," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 16(5), pp 925–931.

*Chinese Journal of Aeronautics*, 26 (4) (2013) 1071-1079.

- [10] L. Nascutiu. (2006), "Voice Coil Actuator for Hydraulic Servo Valves with High Transient Performances," *IEEE International Conf. on Automation, Quality and Testing, Robotics*, Vol. 1,

Archive of SID