



## بهینه‌سازی نیروی لورنتز در پمپ الکترومغناطیسی به روش پاسخ سطح با کمک حل عددی معادلات ماکسول در سه بعد و مقایسه آن با نتایج تجربی

وحید رضایی اسفدن<sup>1</sup>، محمد رضا کرفی<sup>2\*</sup>، محمد حسین صادقی<sup>3</sup>، سید پیمان هاشمی<sup>4</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 141-14115، mkarafi@modares.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

جابه‌جایی مذاب فلزات از دیرباز چالشی اساسی در صنعت بوده است. مشکلاتی نظیر خطرهای انسانی، تماس مذاب با هوا، تلاطم زیاد و عمر پایین تجهیزات در این صنعت وجود دارد. استفاده از پمپ الکترومغناطیسی جهت جابه‌جایی مذاب فلزات، بسیاری از مشکلات ظروف جابه‌جایی مذاب و نیز پمپ‌های مکانیکی را حل کرده است. در این مقاله با بررسی اثر پارامترهای اصلی در طراحی پمپ الکترومغناطیسی جریان مستقیم با سطح مقطع مستطیل شامل اندازه میدان مغناطیسی، میزان جریان الکتریکی اعمالی به سیال، ارتفاع کانال و عرض کانال به روش طراحی آزمایش پاسخ سطح، خروجی پمپ شامل سرعت سیال عبوری و نیروی لورنتز در بیشترین حالت قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد اندازه جریان الکتریکی اعمالی به سیال آب و نمک کلرید پتاسیم بیشترین تأثیر را بر پاسخ‌های مسئله دارد. همچنین مشخص شد که تغییر عرض کانال تأثیر چندانی بر پاسخ‌ها ندارد. این در حالی است که کاهش ارتفاع کانال اثر مثبت بر پاسخ سطح دارد. با ایجاد میدان مغناطیسی 0/3 تسلا و جریان 12 آمپر بر روی کانالی با ابعاد 30×10 میلی‌متر سیال با سرعت 0/27m/s تحت اثر نیروی حجمی  $5000\text{N/m}^3$  جابه‌جا می‌شود. استفاده از طراحی آزمایش برای بهینه‌سازی پارامترهای طراحی پمپ الکترومغناطیسی منجر به بهینه‌سازی خروجی پمپ شده است. همچنین نتایج آزمون‌های تجربی صحت شبیه‌سازی‌ها، شامل حداکثر ارتفاع پمپاژ، دبی پمپ و سرعت سیال را نشان می‌دهد.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 10 مهر 1400  
داوری اولیه: 24 مهر 1400  
پذیرش: 16 آبان 1400

### کلیدواژه‌ها:

پمپ الکترومغناطیسی  
نیروی لورنتز  
حل عددی  
روش پاسخ سطح

## Optimization of the Lorentz force in an electromagnetic pump by the surface response method with numerical solution of Maxwell equations in three dimensions and comparison with experimental results

Vahid Rezaee Esfeden, Mohammad Reza Karafi\*, Mohammad Hossein Sadeghi, Seyed Peyman Hashemi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14115-141, Iran, Tehran, karafi@modares.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 2 October 2021  
First Decision: 16 October 2021  
Accepted: 7 November 2021

### Keywords:

Electromagnetic pump  
Lorentz force  
Numerical solution  
Surface response method

### Abstract

Transporting molten metals is one of challenges in industries. Dangers for human, oxidation, turbulence and reduction of equipment life are problems of the transportation. Electromagnetic pumps have solved problems of using molten containers and also mechanical pumps. In this paper, by examining the effect of main parameters in the design of a direct current electromagnetic pump with a rectangular cross section (magnetic field size, electric current applied to the fluid, channel height and width) by the surface response method, the pump output including flow velocity and The Lorentz force is optimized. The results show that the amount of electric current applied to the fluid has the greatest effect on the response surfaces. It is also found that changing the channel width had little effect on responses. However, reducing the channel height has a positive effect on the response levels. By creating a magnetic field of 0.3 Tesla and a current of 12 amps on a channel with dimensions of 30 X 10 mm, the fluid with a velocity of 0.27 m/s is displaced by a volumetric force of  $5000\text{N/m}^3$ . The method used in this paper optimized the output parameter of the pump. Experimental tests verify the results of simulations, including the maximum pumping height, pump flow and fluid velocity in the pump.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

V. Rezaee Esfeden, M. R. Karafi, M. H. Sadeghi, S. P. Hashemi, Optimization of the Lorentz force in an electromagnetic pump by the surface response method with numerical solution of Maxwell equations in three dimensions and comparison with experimental results, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 9, pp. 14- 22, 2021 (in Persian)

## 1- مقدمه

انتقال مذاب از مخزن مذاب به قالب همیشه با مشکل‌های فراوان همراه بوده است. خطرات استفاده از ملاقه فلز ریزی، اکسیداسیون مذاب و وجود حفرات هوایی در قطعات از نتایج جابه‌جایی مذاب بوسیله ملاقه فلز ریزی است [1]. استفاده از پمپ‌های مکانیکی سبب کاهش خطرات انسانی انتقال مذاب می‌شود. ولی معایب آن شامل ایجاد اغتشاش فراوان در مذاب است، همچنین در اثر تماس بیش از حد مذاب با قطعات پمپ عمر پمپ‌های مکانیکی بسیار پایین است [2، 3].

به شاخه‌ای از مطالعات که به اثر متقابل بین میدان مغناطیسی و سیال‌هادی در حال حرکت می‌پردازد، هیدرودینامیک مغناطیسی می‌گویند. هارتمن اولین شخصی بود که هیدرودینامیک مغناطیسی فلزات مایع را معرفی کرد. از جریان هارتمن برای توصیف جریان‌های داخل کانال در حضور میدان مغناطیسی استفاده می‌شود [4].

بررسی این موضوع نیاز به دانستن معادلات حاکم الکترومغناطیسی و سیالات و تاثیرات متقابل آنها بر یکدیگر دارد. میدان مغناطیسی بر جریان سیال داخل کانال، نیروی لورنتز وارد کرده که این نیرو سبب پمپاژ سیال می‌شود و به آن پمپ هیدرودینامیک مغناطیسی می‌گویند. این پمپ‌ها بر اساس اعمال جریان الکتریکی به دو الکتروود قرار گرفته روی دیواره کانال و استفاده از یک میدان مغناطیسی عمود بر جریان الکتریکی کار می‌کنند. میدان مغناطیسی از طریق مغناطیس دائم یا الکترومغناطیس اعمال شده و سیال رسانای درون کانال در جهت عمود به این دو میدان به حرکت در می‌آید [5].

پمپ الکترومغناطیسی با ایجاد نیروی لورنتز سبب جابه‌جایی سیال‌هادی جریان الکتریسیته می‌شود پمپ‌های الکترومغناطیسی برای جابه‌جایی مذاب در بخش‌های مختلفی کاربرد دارند [6]. این پمپ‌ها با توجه به اینکه قطعات آن‌ها هیچ‌گونه تماسی با مذاب ندارند و همچنین هیچ قطعه متحرکی ندارند دارای طول عمر بالا و نشستی کم می‌باشند. از جمله مثال‌های مهم کاربرد این نوع پمپ‌ها استفاده از آن‌ها در راکتورهای هسته‌ای برای به جریان انداختن سدیم مذاب به علت خواص حرارتی مناسب برای خنک‌کاری می‌باشد [7]. انواع پمپ‌های الکترومغناطیسی با جریان مستقیم و یا جریان متناوب کار می‌کنند و هر کدام مزایا و معایب خود را دارد [8]. بر اساس اصول فیزیک الکترومغناطیس زمانی که یک سیال‌هادی و حامل جریان الکتریسیته در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد تحت تاثیر نیروی لورنتز به آن نیرو اعمال می‌شود. این نیرو سبب جابه‌جایی

سیال می‌شود [9]. برای بهینه‌سازی پمپ الکترومغناطیسی فاکتورهای طراحی شامل اندازه میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی و ابعاد پمپ می‌باشد [3]. پمپ‌های جریان متناوب نسبت به پمپ‌های جریان مستقیم بازدهی بالاتری دارند ولی هزینه ساخت و نگهداری بیشتری نیز دارند [10]. یکی از روش‌های تخمین پارامترهای خروجی این نوع پمپ‌ها حل معادلات مکسول در سه بعد با روش‌های عددی است [11]. استفاده از مدار معادل برای مدل‌سازی از روش‌های دیگر بررسی پمپ‌های الکترومغناطیسی جریان متناوب می‌باشد. در نمونه‌ای از این تحقیقات نتیجه‌گیری شده است که علت عدم مشابهت نتایج تئوری و عملی، عدم یکنواختی هسته مغناطیسی و وجود فاصله‌های هوایی می‌باشد [12]. شبیه‌سازی‌ها و تست‌ها در اکثر مواقع برای بدست آوردن دبی پمپ و حداکثر فشار خروجی پمپ انجام می‌شود. همچنین موارد مهم دیگر در شبیه‌سازی و تست تجربی میزان قدرت خنک‌کنندگی سیال استفاده شده و اثرات گرما بر پمپ است [10]. با گسترش نرم‌افزارهای حل المان محدود دامنه مطالعه بر روی پمپ‌های الکترومغناطیسی افزایش یافته است. شبیه‌سازی هم‌زمان اثر میدان مغناطیسی بر روی سیال سدیم در پمپ الکترومغناطیسی جریان متناوب در کانال مدور نشان داد که افزایش جریان الکتریکی اعمالی به سیال سبب افزایش سرعت سیال می‌شود [13]. شبیه‌سازی پمپ الکترومغناطیسی جریان مستقیم در کانال مستطیل شکل نشان دهنده منطقه‌ای با فشار منفی در پمپ می‌باشد. همچنین نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که بکارگیری پمپ الکترومغناطیسی تاثیر مثبتی بر کاهش مک‌های هیدروژنی در قطعات ریخته‌گری شده با استفاده از این نوع پمپ‌ها برای به حرکت درآوردن سیال آلومینیوم داشته است [14]. علاوه بر روش‌های حل عددی و استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، در برخی مطالعات از کدنویسی نیز برای انتخاب بهترین پارامترهای پمپ الکترومغناطیسی جهت رسیدن به فشار و سرعت مناسب سیال استفاده شده است [15]. پارامترهای قابل‌تغییر این نوع پمپ شامل ابعاد هسته الکترومگنت، ابعاد کانال، تعداد قطب‌ها، فاصله مگنت از سیال و جریان ورودی به سیال می‌باشد [16]. اثر شعاع خم کانال انتقال مذاب در زیر پمپ الکترومغناطیسی نشان می‌دهد که کاهش شعاع خم سبب افزایش اختلاف سرعت سیال در دیواره داخلی نسبت به دیواره خارجی می‌شود [17]. در تحقیقی دیگر با روش کد نویسی نشان داده شده است که کاهش فاصله مغناطیس‌ها از یکدیگر و همچنین افزایش جریان الکتریکی سبب افزایش سرعت سیال خروجی، ارتفاع پمپاژ و

حرکت یکنواخت سیال هادی می‌شود [18].

باتوجه به محدودیت‌های طراحی و همچنین از آنجا که روابط تئوری ارائه شده در مقالات نشان دهنده ارتباط خطی بین پارامترهای طراحی بوده است تعداد سطوح پارامترهای طراحی دو سطح برای میدان و جریان انتخاب شده است. همچنین با توجه به عدم امکان افزایش میدان مغناطیسی با افزایش ارتفاع کانال احتمال وجود رابطه غیرخطی برای ارتفاع کانال و عرض کانال وجود دارد که در سه سطح مورد بررسی قرار گرفته است.

- اندازه میدان بین 0/1 تا 0/3 تسلا در دو سطح
  - اندازه جریان الکتریکی بین 30 تا 180 آمپر در دو سطح
  - ارتفاع کانال بین 10 تا 25 میلی‌متر در 3 سطح
  - عرض کانال بین 15 تا 25 میلی‌متر در 3 سطح
- پاسخ‌های مسئله شامل:
- اندازه سرعت سیال خروجی از کانال
  - نیروی لورنتز
  - حداکثر فشار قابل اعمال توسط پمپ

برای بررسی اثر هر یک از فاکتورها بر پاسخ‌ها، با قراردادن 4 فاکتور و 3 پاسخ، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز 36 عدد می‌باشد. به کمک شبیه‌سازی پمپ الکترومغناطیسی که در بخش بعدی توضیحات آن آورده شده است، این 36 شبیه‌سازی انجام شده است و نتایج حاصل از آن در نرم‌افزار طراحی آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است. جدول 2 طراحی آزمایش انجام شده را نشان می‌دهد.

### 3- حل عددی

#### 3-1- طراحی آزمایش

آنالیز نتایج توسط نرم‌افزار طراحی آزمایش در شکل 1 نشان داده شده است. بیشترین اثر بر سرعت خروجی سیال را اندازه جریان الکتریکی اعمالی به آن داشته است و سپس اندازه میدان مغناطیسی از فاکتورهای مؤثر در طراحی پمپ الکترومغناطیسی است.

بر این اساس پارامترهای بهینه انتخاب شده جهت ایجاد بیشترین سرعت سیال به دست آمده است. این پارامترها عبارتند از:

- اندازه میدان مغناطیسی: 0/3 تسلا
  - اندازه جریان الکتریکی اعمالی: 180 آمپر
  - عرض کانال 25 میلی‌متر
  - ارتفاع کانال 10 میلی‌متر
- جدول 2 طرح آزمایش مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

بهبودسازی پمپ‌های الکترومغناطیسی در اکثر مطالعات پیشین، با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای طراحی و تغییر یک پارامتر انجام شده است. از این رو بررسی تأثیر تغییر هم‌زمان دو پارامتر غیرممکن می‌گردد. با توجه به این واقعیت که بررسی هم‌زمان پارامترها مستلزم انجام تعداد زیادی آزمایش و شبیه‌سازی می‌باشد، اکثر محققان تنها با تغییر یک پارامتر اثر آن پارامتر را بررسی کرده‌اند. در این پژوهش با کاهش تعداد آزمایش‌های لازم به کمک روش پاسخ سطح، اثر برهم کنش دو پارامتر به طور هم‌زمان بررسی شده است. بر این اساس در این پژوهش پارامترهای اصلی طراحی پمپ الکترومغناطیسی و میزان اثرگذاری هر کدام مورد مطالعه قرار گرفته است و نتیجه بوسیله حل عددی مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج عددی و آزمون‌های تجربی نشان دهنده تطابق خوب بین نتایج است.

#### 2- پارامترهای آزمایش

یکی از روش‌های طراحی آزمایش روش پاسخ سطح است. این روش برای آنالیز آزمایش‌هایی مفید است که در آن یک یا چند متغیر وابسته (به عنوان پاسخ) تحت تأثیر متغیرهای بسیاری قرار داشته و هدف بهینه کردن پاسخ مزبور است. یکی از مزایای استفاده از این روش و نرم افزار دیزاین اکسپرت<sup>1</sup> علاوه بر کاهش تعداد آزمایش‌ها، امکان ارائه یک رابطه ریاضی بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل فراهم می‌کند. در این تحقیق از روش پاسخ سطح و نرم‌افزار دیزاین اکسپرت برای بهینه‌سازی پاسخ‌ها استفاده شده است.

Table 1 Build information

جدول 1 مشخصات طراحی آزمایش انجام شده				
Design model	Runs	Subtype	Design type	Study type
2FI	36	Randomized	Full factorial	Factorial

پارامترهای اصلی طراحی پمپ‌های الکترومغناطیسی شامل 4 مورد: (1) اندازه میدان مغناطیسی اعمالی به سیال، (2) جریان الکتریکی اعمالی به سیال و ابعاد کانال شامل (3) عرض کانال و (4) ارتفاع کانال می‌باشند. پارامترهای خروجی پمپ شامل (1) سرعت خروجی سیال، (2) حداکثر فشار پمپ و (3) نیروی لورنتز اعمالی به سیال می‌باشد. انتخاب بهینه فاکتورهای طراحی سبب افزایش بازده پمپ و ایجاد بهینه‌ترین حالت در پاسخ‌ها می‌شود.

<sup>1</sup> Design Expert

آمده است.

شکل 2 مش بندی پمپ الکترومغناطیسی را نشان می دهد. با انتخاب مناسب مش حداقل کیفیت مش بندی 0/17 و تعداد المان ها 89688 ایجاد شده است.

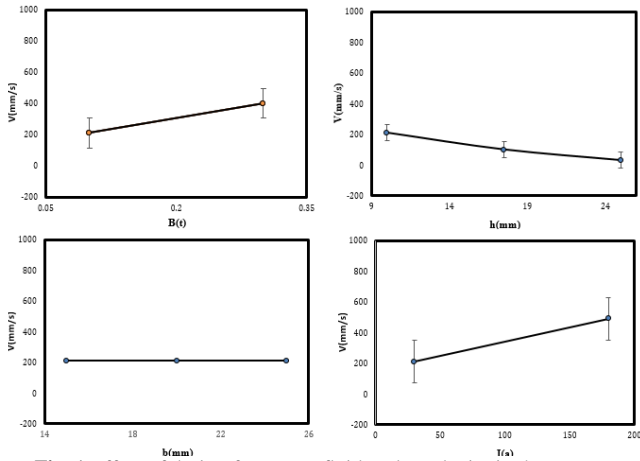


Fig. 1 Effect of design factors on fluid outlet velocity in the pump  
شکل 1 اثر فاکتورهای طراحی بر سرعت خروجی سیال در پمپ

Table 3 Specifications of pumped fluid (KOH salt and water solution)  
جدول 3 مشخصات سیال پمپ شونده (محلول آب و نمک KOH)

مقدار	پارامتر
0/001	گرانروی ( $S/m^2$ )
1024	چگالی ( $\rho$ $kg/m^3$ )
5	رسانایی الکتریکی (S/m)
1	ضریب گذردهی مغناطیسی ( $\mu$ $H/m$ )

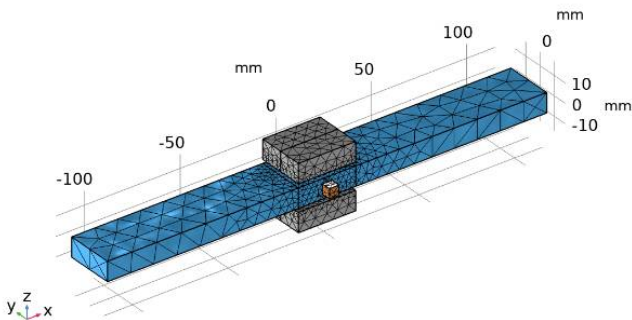


Fig. 2 Finite element model of electromagnetic pump  
شکل 2 مدل المان محدود پمپ الکترومغناطیسی

باتوجه به نوع شبیه سازی، سه فیزیک به طور هم زمان در شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته اند. فیزیک مغناطیس، شبیه سازی میدان مغناطیسی را انجام می دهد. در فیزیک جریان الکتریکی، به سیال جریان الکتریکی اعمال شده است و برآیند این دو سبب ایجاد نیروی لورنتس در سیال شده است. در انتها

Table 2 Experiments required in experimental design

جدول 2 آزمایش های مورد نیاز در طراحی آزمایش

Std order	Run	Factor1 Magnet (T)	Factor 2h (mm)	Factor 3b (mm)	Factor4 Current (A)	Respos1 Velocity (mm/s)	Respos2 Pressure (Pa)
12	1	0/3	25	20	30	165	25
7	2	0/1	10	20	30	205	35
3	3	0/1	17/5	15	30	120	12
19	4	0/1	10	15	180	430	235
24	5	0/3	25	15	180	310	115
30	6	0/3	25	20	180	345	145
16	7	0/3	17/5	25	30	280	32
26	8	0/3	10	20	180	870	570
22	9	0/3	17/5	15	180	440	200
10	10	0/3	17/5	20	30	210	44
35	11	0/1	25	25	180	340	42
9	12	0/1	17/5	20	30	133	14
28	13	0/3	17/5	20	180	500	250
8	14	0/3	10	20	30	350	100
11	15	0/1	25	20	30	105	9
1	16	0/1	10	15	30	180	40
27	17	0/1	17/5	20	180	280	87
14	18	0/3	10	25	30	320	122
15	19	0/1	17/5	25	30	180	10
23	20	0/1	25	15	180	200	37
36	21	0/3	25	25	180	540	122
29	22	0/1	25	20	180	220	50
18	23	0/3	25	25	30	260	22
17	24	0/1	25	25	30	170	8
34	25	0/3	17/5	25	180	650	200
33	26	0/1	17/5	25	180	370	64
4	27	0/3	17/5	15	30	190	37
21	28	0/1	17/5	15	180	260	72
31	29	0/1	10	25	180	510	240
6	30	0/3	25	15	30	155	19
20	31	0/3	10	15	180	740	655
32	32	0/3	10	25	180	900	660
2	33	0/3	10	15	30	300	120
5	34	0/1	25	15	30	100	5
13	35	0/1	10	25	30	215	45
25	36	0/1	10	20	180	500	200

### 2-3- اعمال جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی بر سیال

حل عددی معادلات نویر استوکس و ماکسول در نرم افزار المان محدود کامسول انجام شده است. اثرات مش بندی با روش افزایش المان مورد بررسی قرار گرفته و مش بندی مناسب به دست آمده است. مشخصات سیال مورد آزمایش در جدول 3

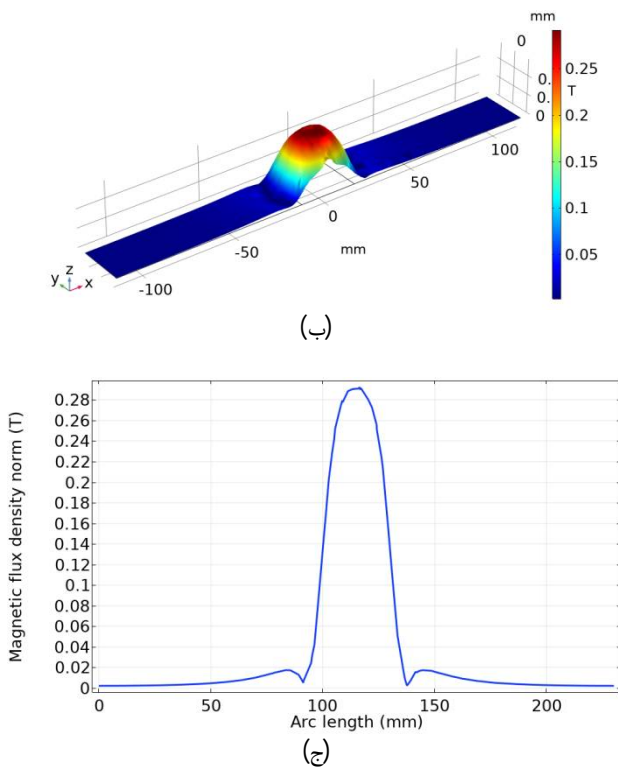


Fig. 4 Direction and magnitude of the magnetic field applied to the fluid under the pump

شکل 4 جهت و اندازه میدان مغناطیسی اعمالی به سیال زیر پمپ

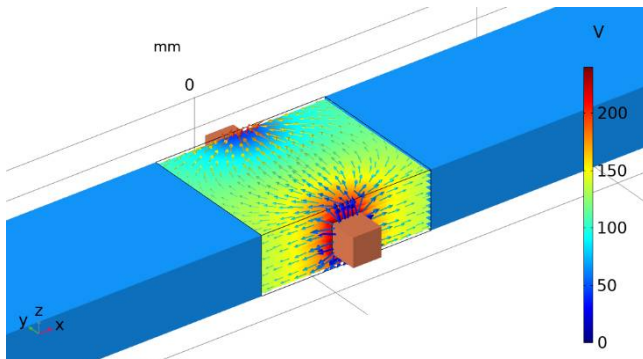


Fig. 5 Electric current between two copper electrodes perpendicular to the magnetic field

شکل 5 جریان الکتریکی بین دو الکترود مسی عمود بر میدان مغناطیسی

### 3-3- بررسی پارامتر خروجی (سرعت سیال)

با حل عددی هم‌زمان قانون القای فارادی و قوانین مکسول توسط نرم‌افزار المان محدود، مطابق با قانون دست راست نیروی لورنتز در سیال سبب جابه‌جایی آن می‌شود. شکل 6 سرعت سیال و جهت حرکت سیال را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است سرعت سیال در میانه کانال بیشتر از دیواره‌ها می‌باشد. همچنین جریان‌های گردابی در نزدیکی الکترودها به دلیل اثر هارتمن مشخص است. به دلیل حرکت سیال در زیر میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در خلاف جهت جریان

در فیزیک جریان آرام این نیرو به سیال اعمال شده و شبه‌سازی حرکت سیال انجام شده است. در شکل 3 ترتیب و عنوان فیزیک‌های حاکم بر مسئله آورده شده است. سرعت ورودی سیال به عنوان شرایط مرزی صفر قرار داده شده است و در خروجی پمپ فشار محیط به عنوان شرایط مرزی اعمال شده است. اصطکاک دیواره‌ها نیز صفر در نظر گرفته شده است و شبه‌سازی در دمای محیط انجام شده است.

با توجه به طراحی آزمایش انجام شده اندازه میدان مغناطیسی 0/3 تسلا در ناحیه بین الکترودها به سیال اعمال شده است. اعمال یکنواخت میدان مغناطیسی از نظر جهت و اندازه سبب پمپاژ یکنواخت‌تر می‌شود.

میدان مغناطیسی از طریق هسته مغناطیسی C شکل که در بالا و پایین کانال قرار گرفته است به سیال اعمال شده است. با تغییر پارامترهای ورودی می‌توان میدان با اندازه‌های مختلف را به سیال اعمال کرد. میدان مغناطیسی 0/3 تسلا مطابق با طراحی آزمایش انجام شده و با توجه به تجهیزات موجود جهت انجام آزمایش‌های تجربی انتخاب شده است.

شکل 4 میزان میدان مغناطیسی اعمالی به سیال در شبه‌سازی عددی را نشان می‌دهد.

برای تکمیل شبه‌سازی هیدرو مغناطیسی، توان الکتریکی به اندازه 2500 وات به سیال اعمال شده است که سبب ایجاد جریان 12 آمپری در سیال می‌شود.

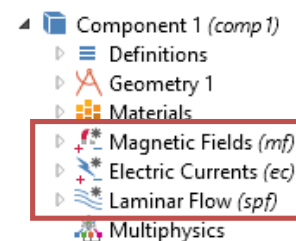
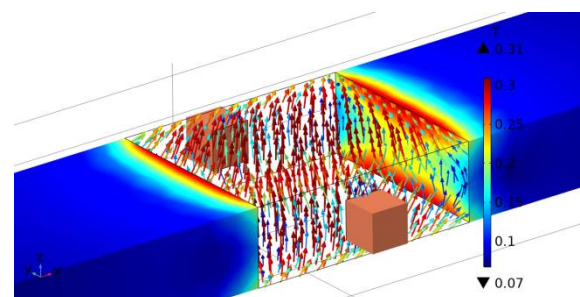


Fig. 3 Applied physics in finite element solution

شکل 3 فیزیک‌های اعمالی در حل المان محدود



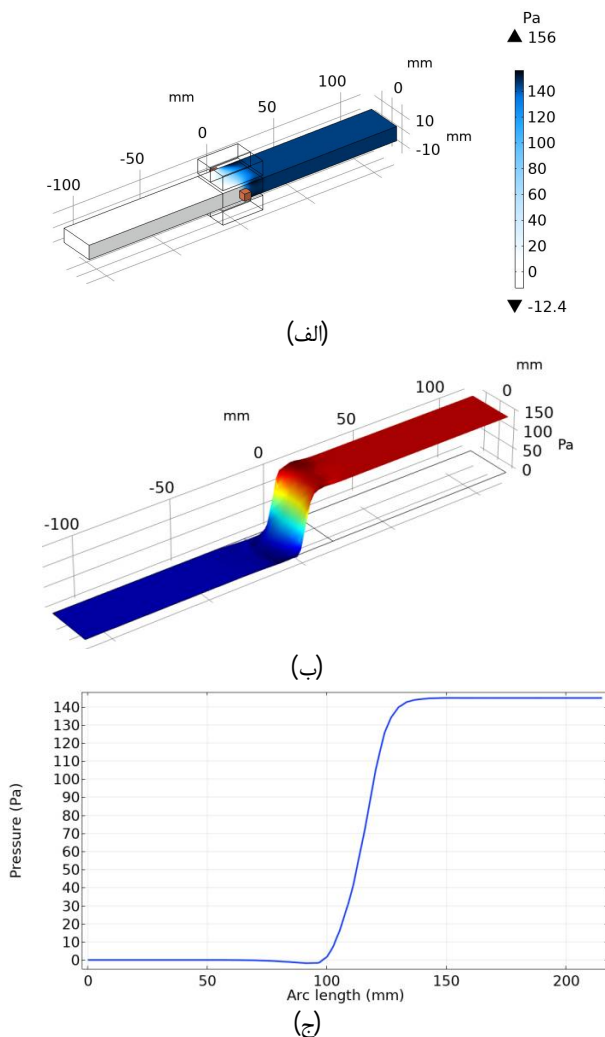
(الف)

**3-4- پارامترهای خروجی، ارتفاع پمپاژ و فشار ایجاد شده توسط پمپ الکترومغناطیسی**

از پارامترهای مهم در طراحی پمپ ارتفاع پمپاژ می‌باشد. فشار در پمپ بر اثر وجود مانع در حرکت سیال ایجاد می‌شود و هرچه حداکثر فشار قابل تأمین توسط پمپ بیشتر باشد امکان غلبه بر موانع پیشروی پمپ بیشتر است که این موضوع با ارتفاع پمپاژ نشان داده شده است. جهت شبیه‌سازی و محاسبه این پارامتر دهانه کانال مسدود شده و شبیه‌سازی پمپ انجام شده است.

حداکثر فشار 156 پاسکال که معادل است با ستون مایع به ارتفاع 1/56 سانتی‌متر که در شکل 7 نشان داده شده است.

$$h = \frac{P}{(\rho \times g)} = \frac{156}{1024 \times 9.81} = 0.01556(m) \approx 1.56(cm) \quad (1)$$



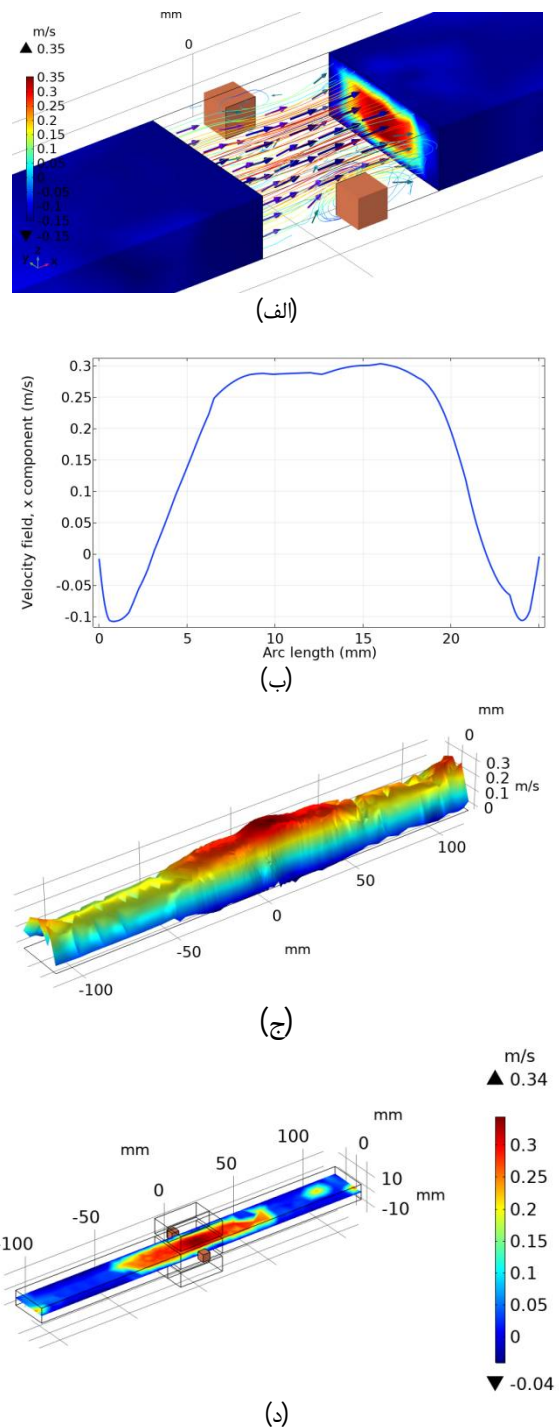
**Fig. 7** Maximum pressure created by the pump

شکل 7 حداکثر فشار قابل ایجاد توسط پمپ

**4- نتایج تست تجربی**

برای بررسی صحت حل عددی انجام شده از روش تجربی

الکتریکی اعمالی به سیال، در آن ایجاد می‌شود که برآیند این دو در نزدیکی الکترودها سبب برگشت سیال و ایجاد جریان گردابی می‌شود.



**Fig. 6** The magnitude of the fluid velocity in the fluid motion path

شکل 6 بزرگی سرعت سیال در مسیر حرکتی سیال

سرعت سیال با اندازه میدان مغناطیسی 0/3 تسلا و جریان الکتریکی 12 آمپر 0/27m/s به دست آمده است که بر نتایج تست‌های تجربی منطبق می‌باشد.



برای اندازه‌گیری دبی پمپ حجم سیال خروجی از دهانه کانال در واحد زمان محاسبه شده که جدول 3 نتایج این تست را نشان می‌دهد. همچنین برای محاسبه حداکثر فشار ایجاد شده توسط پمپ ارتفاع ستون سیال ایجاد شده توسط پمپ محاسبه و فشار پمپ به دست آمده است.

حجم سیال جمع‌آوری شده در زمان با وزن کردن سیال محاسبه شده است. همان‌طور که در جدول 4 آمده است، سرعت عبور سیال از داخل کانال محاسبه شده است. آزمایش سه بار در بازه‌های زمانی مختلف انجام شده است و سرعت پمپاژ محاسبه شده است.

سرعت سیال از طریق فرمول (2) محاسبه شده است و در جدول 4 آورده شده است.

$$v \quad (2)$$

Table 3 Experimental test results of electromagnetic pump

جدول 3 نتایج تست تجربی پمپ الکترومغناطیسی			
3	2	1	شماره آزمایش
محلول آب و محلول آب و نمک KOH	محلول آب و محلول آب و نمک KOH	محلول آب و محلول آب و نمک KOH	سیال تست
0/3	0/3	0/3	پارامتر اندازه میدان مغناطیسی (T)
12	12	12	جریان الکتریکی (A)
30×10	30×10	30×10	ابعاد کانال (mm)
10	5	3	زمان انجام تست (s)
0/76	0/41	0/26	حجم سیال جمع‌آوری شده (Lit)

Table 4 Calculation of pumping speed and flow rate of electromagnetic pump with three repetitions

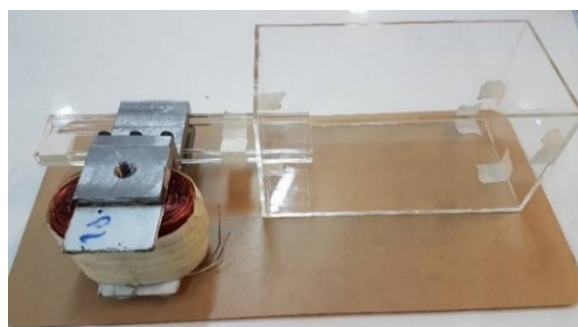
جدول 4 محاسبه سرعت پمپاژ و دبی پمپ الکترومغناطیسی با سه بار تکرار			
3	دبی پمپ (lit/min)	سرعت پمپاژ (m/s)	شماره آزمایش
5/2	0/288	1	
4/92	0/273	2	
4/56	0/253	3	

همان‌طور که در جدول 4 نشان داده شده است دبی پمپ در مدت زمان‌های مختلف تقریباً یکسان می‌باشد. اختلاف جزئی ناشی از اصطکاک بدنه، عدم یکنواختی محلول آب و نمک و تغییر خواص الکتریکی محلول با گذر زمان می‌باشد.

برای محاسبه حداکثر فشار با قراردادن خروجی پمپ به صورت عمودی میزان تغییر ارتفاع سیال محاسبه شده است.

شکل 10 نشان می‌دهد که با روشن شدن پمپ الکترومغناطیسی سیال بر اثر فشار ایجاد شده توسط پمپ به

استفاده شده است. جهت ایجاد میدان مغناطیسی 0/3 تسلا از مگنت الکترومغناطیسی استفاده شده است. قطر سیم الکترومگنت 0/75 میلی‌متر و تعداد دور سیم پیچ 1500 دور می‌باشد. اعمال جریان الکتریکی 4 آمپر توسط منبع جریان الکتریکی مستقیم در سیم پیچ سبب ایجاد میدان 0/3 تسلا در دهانه مگنت شده است که توسط تسلا متر اندازه‌گیری شده است. مخزن از جنس پلکسی جهت انتقال سیال آب و نمک پتاسیم ساخته شده است. از دستگاه جوشکاری با حداکثر توان 2500 وات جهت اعمال جریان الکتریکی 12 آمپری در سیال استفاده شده است. شکل 8 تجهیزات ساخته شده جهت انجام تست پمپ الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. همچنین دستگاه‌های مورد نیاز جهت اعمال جریان الکتریکی به سیال و سیم پیچ الکترومگنت در شکل 9 آورده شده است.



(الف)



(ب)

Fig. 8 Arrangement of an electromagnetic pump to move water and salt  
شکل 8 چیدمان پمپ الکترومغناطیسی جابه‌جایی آب و نمک



Fig. 9 Electric current supply equipment to generate magnetic field and current applied to the fluid

شکل 9 تجهیزات تامین جریان الکتریکی برای ایجاد میدان مغناطیسی و جریان اعمالی به سیال

طراحی آزمایش، شبیه‌سازی پمپ الکترومغناطیسی در نرم‌افزار المان محدود کامسول انجام شد. جهت بررسی صحت شبیه‌سازی تست‌های تجربی انجام شده است. نتایج نشان دادند که در صورت اعمال میدان مغناطیسی 0/3 تسلا و جریان الکتریکی 12 آمپر به سیال آب‌نمک در کانالی به ابعاد  $10 \times 30$  میلی‌متر سرعت سیال خروجی  $0/27 \text{ m/s}$  و دبی پمپ نیز  $4/9 \text{ Lit/min}$  به دست آمده است. همچنین حداکثر فشار کاری پمپ 150 پاسکال و معادل ارتفاع 156 mm ستون سیال می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی انجام شده با وجود فرضیات ساده کننده نظیر اثر دیواره کانال، غیر یکنواختی خواص سیال، ناخالصی در سیال، تغییرات جریان الکتریکی ناشی از نوسانات دستگاه، تطابق خوبی با نتایج تجربی داشته است که نشان‌دهنده صحت شبیه‌سازی می‌باشد.

### 6- مراجع

- [1] Pump, H.D.M.M., *Hazelett DC Magnetic Metal Pump*. 2016.
- [2] Holroyd, R.J., *An experimental study of the effects of wall conductivity, non-uniform magnetic fields and variable-area ducts on liquid metal flows at high Hartmann number. Part 1. Ducts with non-conducting walls*. Journal of Fluid Mechanics, 1979. 93(4): pp. 609-630.
- [3] Lee, G.H. and H.R. Kim, *Mathematical approach for optimization of magnetohydrodynamic circulation system*. Nuclear Engineering and Technology, 2019. 51(3): pp. 654-664.
- [4] Hou, J.B., et al., *Influencing factors of flow rate of electromagnetic pump used to aluminum alloy quantitative pouring*, in *Applied Mechanics and Materials*. 2013. pp. 643-646.
- [5] Rezaee, H.A and Shahidiyan, A.M, *Fluid flow in the microchannel under the influence of electromagnetic force*. Fluid Dynamics Conference. 2008, Khajeh Nasir al-Din Tusi University of Technology (in Persian)
- [6] Al-Hababeh, O.M., et al., *Review of magnetohydrodynamic pump applications*. Alexandria Engineering Journal, 2016. 55(2): pp. 1347-1358.
- [7] Borges, E.M., F.A. Braz Filho, and L.N.F. Guimaraes, *NaK flow control by electromagnetic pump of the SNAP-10A space nuclear reactor*. INAC 2013: international nuclear atlantic conference: Brazil, 2013.
- [8] Kandev, N., V. Kagan, and A. Daoud, *Electromagnetic DC pump of liquid aluminium: computer simulation and experimental study*. 2010.
- [9] Doležel, I., V. Kotlan, and B. Ulrych, *Magnetohydrodynamic pumps for molten salts in cooling loops of high-temperature nuclear reactors*. Academy of Sciences of the Czech Republic in

میزان 1/5 سانتی‌متر به سمت بالا در کانال جابه جا می‌شود. شکل‌های 11 و 12 مقایسه‌ی اثر میدان مغناطیسی بر سرعت سیال و اثر جریان الکتریکی بر سرعت سیال در تست تجربی و نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهند.



(ب)

(الف)

Fig. 10 Fluid height column change with pump on by 1.5 cm and equivalent to 150 Pascals

شکل 10 تغییر ستون ارتفاع سیال با روشن شدن پمپ به میزان 1/5 سانتی‌متر و معادل 150 پاسکال

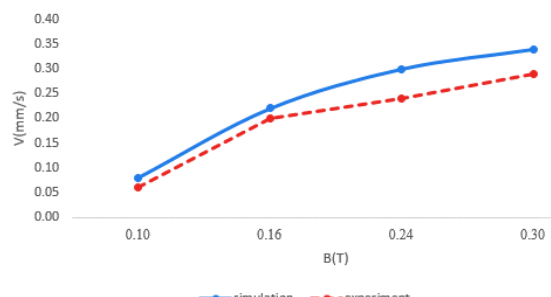


Fig. 11 Comparison of fluid velocity in experimental test and simulation with magnetic field change

شکل 11 مقایسه سرعت حرکت سیال در تست تجربی و شبیه‌سازی با تغییر میدان مغناطیسی

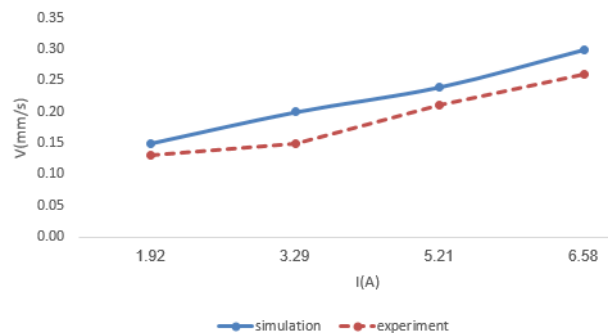


Fig. 12 Comparison of fluid movement velocity in experimental testing and simulation by changing electrical flow to fluid

شکل 12 مقایسه سرعت حرکت سیال در تست تجربی و شبیه‌سازی با تغییر جریان الکتریکی اعمالی به سیال

### 5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق بعد از انتخاب مناسب پارامترهای ورودی به روش



- defect in A380 aluminum alloy*. International Journal of Hydrogen Energy, 2015. 40(30): pp. 9287-9297.
- [15] Li, X.L., et al. *Performance test of electromagnetic pump on heavy liquid metal in PREKY-I facility*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016.
- [16] Kwak, J. and H.R. Kim, *Design optimization analysis of a large electromagnetic pump for sodium coolant transportation in PGSFR*. Annals of Nuclear Energy, 2018. 121: pp. 62-67.
- [17] Yang, J.H., Y. Yan, and C.N. Kim, *Numerical investigation of the LM MHD flows in a curved duct with an FCI with varying slot locations*. Fusion Engineering and Design, 2016. 105: pp. 86-100.
- [18] Zhang, X.D., et al. *Numerical modeling and optimization of electromagnetic pump towards compact driving metal coolant*. in *International Heat Transfer Conference*. 2018.
- Prague, Czech Republic, University of West Bohemia in Pilsen, Czech Republic, 2011.
- [10] Wang, L., et al., *Experimental study and optimized design on electromagnetic pump for liquid sodium*. Annals of Nuclear Energy, 2019. 124: pp. 426-440.
- [11] MOREGA, P.A., *Study of the electromagnetic pumping systems of molten metals and molten salts*. 2016.
- [12] Nashine, B.K. and B.P.C. Rao, *Design, in-sodium testing and performance evaluation of annular linear induction pump for a sodium cooled fast reactor*. Annals of Nuclear Energy, 2014. 73: pp. 527-536.
- [13] Dong, X., et al., *Coupling analysis of the electromagnetic transport of liquid aluminum alloy during casting*. Journal of Materials Processing Technology, 2015. 222(0): pp. 197-205.
- [14] Dong, X., et al., *Effect of electromagnetic transport process on the improvement of hydrogen porosity*