



طراحی و ساخت فلومتر الکترومغناطیسی آرایه‌ای جهت اندازه‌گیری پروفیل سرعت در کانال با مقطع مستطیلی

سید پیمان هاشمی¹، محمدرضا کرفی^{2*}، محمد حسین صادقی³، وحید رضایی اسفدن⁴

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 111-14115، karafi@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 آذر 1400

داوری اولیه: 22 دی 1400

پذیرش: 2 اسفند 1400

کلیدواژه‌ها:

فلومتر الکترومغناطیس

سنجش پروفیل سرعت

شبیه‌سازی عددی جریان سیال

چکیده

در این تحقیق یک ساختار جدید از فلومتر الکترومغناطیسی با قابلیت اندازه‌گیری پروفیل سرعت در عرض یک کانال مستطیلی، ارائه شده است. فلومترهای الکترومغناطیسی موجود میانگین سرعت را اندازه‌گیری کرده و قابلیت تشخیص پروفیل سرعت در مقطع کانال را ندارند. جهت سنجش پروفیل سرعت از یک الکترومغناطیس آرایه‌ای با توانایی کنترل میدان مغناطیسی در عرض کانال استفاده شده است. ابعاد کانال مستطیلی 6×150 میلی‌متر مربع می‌باشد و میدان مغناطیسی توسط پنج عدد کوئل با هسته از جنس آهن کم کربن و با قطر سیم $0/3$ میلی‌متر ایجاد می‌گردد. از محلول 20 درصد وزنی آب و نمک NaOH با رسانایی 4 S/m به‌عنوان سیال عبوری از فلومتر استفاده شده است. فلومتر الکترومغناطیسی آرایه‌ای ساخته شده و به‌صورت تجربی در یک مسیر بسته آزمایش شده است. شبیه‌سازی سه‌بعدی فلومتر شامل میدان مغناطیسی، سرعت سیال و جریان القایی در الکترودها در نرم‌افزار المان محدود کامسول صورت گرفته است. به‌صورت تجربی و عددی فلومتر الکترومغناطیس آرایه‌ای یک‌بار در حالتی که میدان مغناطیسی یکنواخت و یکسان بوده و همچنین در حالتی که آرایه‌ها به‌صورت جداگانه فعال شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین پروفیل دبی ورودی پارابولیک و خطی، با تغییرات سرعت از 0 تا 10 لیتر بر دقیقه، در ورودی اعمال شده و سیگنال خروجی فلومتر ثبت شده است. نتایج تجربی و شبیه‌سازی تطبیق مناسبی داشته (میانگین خطا 16 درصد) و نشان دهنده عملکرد موفق فلومتر آرایه‌ای در سنجش پروفیل سرعت مقطع کانال می‌باشند.

Design and fabrication of electromagnetic arrayed flow meter to measure velocity profiles in a rectangular channel

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

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: 19 December 2021

First Decision: 12 January 2022

Accepted: 21 February 2022

Keywords:

Electromagnetic flow meter,
Velocity profile measurement
Numerical simulation of fluid flow

Abstract

In this paper, a new structure of an electromagnetic flow meter capable of measuring the velocity profile in a rectangular channel is presented. Common electromagnetic flowmeters measure the average velocity and are not capable of detecting velocity profiles in the cross-section of the channel. An array electromagnetic with the ability to control the magnetic field across the channel is used to measure the velocity profile. The dimensions of the rectangular channel are $6 \times 150 \text{ mm}^2$ and the magnetic field is created by five coils with a low carbon iron core with a wire diameter of 0.3 mm. 20% NaOH solution with a conductivity of 4 S/m is used as the fluid passing through the flowmeter. An electromagnetic arrayed flowmeter is fabricated and experimentally tested in a closed path. Three-dimensional simulations of flowmeter including magnetic field, fluid velocity and induced current at the electrodes are performed in the finite element software COMSOL. The arrayed electromagnetic flow meter is experimentally and numerically investigated when the magnetic field was uniform and the array is also activated separately. Also, the parabolic and linear inlet flow profiles, with speed changes from 0 to 10 liters per minute, are applied to the inlet and the flowmeter output signal is recorded. The experimental and simulation results have a good fit (mean error 16%) and show the successful performance of the array flowmeter in measuring the channel cross-sectional velocity profile.

1- مقدمه

می‌باشند، اندازه‌گیری جریان و حجم سیال عبوری از یک مقطع

در بسیاری از فرایندهای تولیدی که با سیال در ارتباط با دقت بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از یک دیدگاه

Please cite this article using:

S. P. Hashemi, M. R. Karafi, M. H. Sadeghi, V. Rezaee Esfeden, Design and fabrication of electromagnetic arrayed flow meter to measure velocity profiles in a rectangular channel, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 12, pp. 21-33, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جریان مستقیم الخط² سیال در فلومتر الکترومغناطیسی فرمول‌بندی کرد. این فرمول‌بندی به صورت گسترده‌ای در پیش‌بینی سیگنال‌های خروجی فلومتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. او نشان داد که برای یک فلومتر دایروی سیگنال خروجی در جریان‌های متقارن محوری به پروفیل سرعت وابسته نیست. همچنین وی برای اولین بار یک تئوری کامل برای درک کامل پارامترهای مختلف یک فلومتر را ارائه کرد. او میزان تأثیر سرعت سیال بر سیگنال خروجی را بررسی کرد و نشان داد که تغییرات سرعت در نزدیکی الکترودها بیشترین تأثیر را بر سیگنال خروجی خواهد داشت [4]. بعد از آن بویر روش تابع وزنی³ را در حالت سه‌بعدی تعمیم داد. بویر وسیله اندازه‌گیری ایده‌آل را تعریف کرد که در آن سیگنال خروجی به نرخ سرعت سیال وابسته است و به پروفیل سرعت وابسته نمی‌باشد [5]. همپ و ورستینگ در راستای اصلاح فرمول‌ها و جامع‌تر شدن آن‌ها (از دیدگاه پیکربندی‌های متنوع الکتریکی و مغناطیسی) با استفاده از توزیع سری فوریه و استفاده از پتانسیل مغناطیسی و پتانسیل مجازی جریان در یک مدل حجم محدود سیال⁴ یک تابع وزنی به صورت سری فوریه را فرمول‌بندی کردند [6]. لونت و همکارانش تأثیر پروفیل سرعت را که شامل یک جریان آرام سهمی‌وار و یک جریان مغشوش بود با استفاده از روابط تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که فلومتر حساسیت بالایی به اختلال و آشفتگی موجود در سیال دارد و بیان داشتند که مدل کردن دقیق سیال و رفتار آن از اهمیت بالایی برخوردار است [7]. در سال 1995 هورنر و همکاران برای اولین بار فلومتر الکترومغناطیسی با ساختار چند الکترودی جهت سنجش پروفیل سرعت را ارائه کردند. آن‌ها تأثیر وجود الکترودهای اضافی را بر خطای فلومترهای الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از چند اوریفیس جهت ایجاد اغتشاش هدفمند در پروفیل سرعت استفاده کردند و به طور کلی نشان دادند که اضافه کردن الکترودها باعث کاهش خطای اندازه‌گیری فلومترهای الکترومغناطیسی در پروفیل‌های سرعت ناهمگن می‌شود [8]. آندره ویگفرس و همکاران در سال 2012 با بهره‌گیری از نیروی لورنتس، سرعت سیال آب نمک را اندازه‌گیری کردند. کانال آن‌ها مستطیلی بوده و سیستم اندازه‌گیری به نحوی بود که یک میدان مغناطیسی در کناره کانال قرار دارد که با عبور سیال رسانا نیروی لورنتس عمل کرده و مجموعه را حرکت می‌دهد. با اندازه‌گیری این حرکت سرعت

می‌توان فلومترهای اندازه‌گیری سیال را به دو دسته فلومترهای تماسی و غیرتماسی تقسیم‌بندی کرد. فلومترهای تماسی مستقیماً با سیال در تماس بوده و با تماس فیزیکی سیال با فلومتر جریان آن اندازه‌گیری می‌شود. اما در فلومترهای غیرتماسی اندازه‌گیری به صورت غیرمستقیم و بدون تماس با سیال اندازه‌گیری می‌گردد. در این بین زمانی که سیال دارای ویژگی‌های خاصی از قبیل دمای بالا، فشار بالا، خوردگی و ساینده‌گی بالا و ... باشد، کار اندازه‌گیری با فلومترهای تماسی امری دشوار و در برخی موارد غیرممکن خواهد بود. در این موارد از فلومترهای غیرتماسی، استفاده می‌شود. مهم‌ترین فلومترهای غیرتماسی، فلومترهای آلتراسونیک و مغناطیسی می‌باشند. فلومترهای آلتراسونیک با استفاده از اختلاف زمانی بین سیگنال‌های دریاقتی امواج صوتی در سیال کار اندازه‌گیری را انجام می‌دهند. به دلیل حساسیت ترانسدوسرهای پیزوالکتریکی مورد استفاده در این فلومترها و کاهش خاصیت سنسوری و عملگری آنها در دمای بالا، کاربرد آن‌ها در شرایط خاص، مانند استفاده در سیستم انتقال مذاب با محدودیت روبرو می‌باشد [1]. اما فلومترهای الکترومغناطیسی به دلیل ویژگی‌هایی از قبیل غیرتهاجمی بودن، دقت مناسب و عدم تأثیر بر جریان سیال عبوری از کانال کاربردهای ویژه‌ای دارند. دقت فلومترهای الکترومغناطیسی رایج در اندازه‌گیری سرعت متوسط در جریان‌های دارای تقارن محوری $\pm 0/05\%$ است [2]. پیش از تحقیقات گسترده در زمینه فلومتر الکترومغناطیسی می‌توان مایکل فارادی را اولین فردی دانست که قواعد الکترومغناطیسی حاکم بر سیال در حال حرکت را در سال 1832 مورد بررسی قرار داد. او سعی داشت که ولتاژ القا شده در رودخانه تاماس¹ بر اثر حرکت آب در میدان مغناطیسی زمین را اندازه‌گیری کند. اما او به دلیل مشکلات متعددی از قبیل اتصال کوتاه و اثرات ترموالکتریک موفق به این کار نشد. فابر برای اولین بار در سال 1932 از فلومتر الکترومغناطیسی به عنوان یک وسیله اندازه‌گیری بهره جست. پس از آن مطالعات زیادی در مباحث تئوری و ارائه روابط بین پروفیل سرعت و حساسیت فلومتر صورت گرفت. تورلمن نشان داد که حساسیت فلومتر در نوع جریان متقارن از توزیع سرعت سیال مستقل است اما در نوع جریان غیرمتقارن این قاعده وجود ندارد [3]. شرکلیف را می‌توان یکی از پژوهشگران اصلی فلومترهای الکترومغناطیسی دانست. وی در سال 1954 یک تابع وزنی کاربردی را برای

² Rectilinear flow³ Weight Function Method (WFM)⁴ Finite Fluid Volume¹ Thames River

و نحوه تحریک آن‌ها بر خطای اندازه‌گیری در فلومتر الکترومغناطیسی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پالس ورودی را به شکل موج دوزنقهای تعریف کردند و نشان دادند که نحوه نوع تحریک سیم‌پیچ تأثیر زیادی بر روی دقت اندازه‌گیری فلومتر الکترومغناطیسی دارد [17].

در اکثر تحقیقات مرور شده مقطع دایروی بوده و بررسی جامعی بر روی اثرات پارامترهای مختلف صورت نگرفته است. همچنین تحقیقات محدودی در مورد تشخیص پروفیل سرعت (نه سرعت میانگین) با استفاده از فلومتر الکترومغناطیسی صورت گرفته است. می‌توان تحقیق لوکاس و همکاران را نزدیک‌ترین تحقیق به پژوهش حاضر دانست. اما در هیچ‌کدام میدان مغناطیسی متغیر در عرض کانال استفاده نشده است. از طرفی پروفیل‌های سرعت موجود در صنعت غیریکنواخت می‌باشند، به‌عنوان نمونه در فاصله نزدیک به خم‌های موجود در خطوط لوله انتقال پروفیل سرعت موجود نامتقارن می‌باشد. به همین دلیل فلومتر باید با فاصله کافی (5 تا 10 برابر قطر لوله) از هر گونه تغییر در پروفیل سرعت (مانند خم‌ها، سه راهی‌ها، شیرها و ...) نصب گردد. این امر باعث اعمال هزینه و زمان و در برخی موارد (قطرهای زیاد) به دلیل برخی محدودیت‌های مکانی، غیرممکن می‌شود [2]. در چنین مواردی دقت فلومترهای معمولی بسیار تحت تأثیر جریان سیال قرار می‌گیرد [18]. لذا وجود فلومتری که قابلیت اندازه‌گیری پروفیل سرعت را داشته باشد اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش امکان‌سنجی استفاده از میدان مغناطیسی متفاوت در یک کانال مستطیلی جهت سنجش پروفیل سرعت در فلومتر الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور یک ساختار آرایه‌ای جدید طراحی و ساخته شده و با موفقیت آزمایش شده است. ساختار آرایه‌ای شامل 5 آرایه مغناطیسی متشکل از مجموعه کوپل‌ها می‌باشد که در راستای عرضی کانال مستطیلی با ابعاد 6×150 میلی‌متر مربع چیده شده‌اند. سیال مورد استفاده در تحقیق حاضر آب ناخالص (رسانا) می‌باشد. با قطع و وصل کردن جریان عبوری از کوپل‌ها در هر آرایه به‌طور جداگانه قابلیت کنترل میدان مغناطیسی فراهم می‌گردد. همچنین شبیه‌سازی فلومتر آرایه‌ای در نرم‌افزار اجزا محدود کامسول صورت گرفته است. سپس هم به‌صورت تجربی و هم شبیه‌سازی سنجش پروفیل سرعت دلخواه در فلومتر الکترومغناطیسی آرایه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است.

2- اصول فلومترهای الکترومغناطیسی

ساختمان فلومترهای الکترومغناطیسی شامل دو آهنربا یا

سیال سنجیده می‌شود. سیستم آن‌ها آزمایشگاهی بوده و قسمت مکانیکی اندازه‌گیری حرکت آن نیاز به تنظیم با دقت بالایی دارد [9]. لوکاس و همکاران از سال 1999 تحقیقات خود را در مورد انواع فلومتر آغاز کردند [10] و پس از بررسی روش‌های مختلف اندازه‌گیری سرعت سیال [11] در سال 2013 با بهره‌گیری از چیدمان دایروی الکترومترها فلومتری را معرفی کردند که قادر است پروفیل سرعت را در جریان‌های چند فاز و تک فاز اندازه‌گیری کند. آن‌ها با تقسیم مقطع فلومتر به‌صورت جفت الکتروود در 7 بخش، جریان سیال را اندازه‌گیری کردند. همچنین از دو کوپل برای ایجاد میدان مغناطیسی استفاده کردند و با اندازه‌گیری سرعت در تمام جفت الکتروودها تغییرات اختلاف پتانسیل اعمالی را مورد بررسی قرار دادند [2]. اخیراً مطالعات عددی فلومترهای الکترومغناطیسی به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های مدل‌های تحلیلی در هندسه‌های پیچیده و شرایط مرزی پیچیده مورد استفاده قرار گرفته است. لونی و همکاران در سال 2019 با تغییرات فاز در میدان مغناطیسی، اثر تغییرات رسانایی فلزات مذاب بر عملکرد فلومتر را به‌صورت تئوری بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از تغییرات فاز در جریان متناوب سیم‌پیچ، حساسیت تغییر فاز در فلومتر را مورد بررسی قرار دادند [12]. در سال 2019 وانگ و همکاران با استفاده از فلومتر الکترومغناطیسی و پردازش تصویر، جریان دوفازی سیال و گاز را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با بهره‌گیری از یک همزن مکانیکی و عبور سیال از یک صفحه اوریفیس‌دار، میزان حباب‌های موجود در سیال را کنترل کردند. سپس با ترکیب نتایج فلومتر و پردازش تصویر اثر حباب‌های موجود در سیال را بر ثوابت فلومتر مورد بررسی قرار دادند [13]. جیانگ و همکاران در سال 2020 با استفاده از روش اجزا محدود روند تغییرات در جریان سیال را در فلومترهای با مقطع دایروی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای حل مدل خود از نرم‌افزار کامسول استفاده کردند و مکان بهینه نصب فلومتر را تعیین کردند [14]. پالاو و همکاران نیز در سال 2020 به‌صورت عددی به بررسی اثرات تلاطم‌های بالادست فلومتر در مسیر حرکت سیال بر عملکرد فلومترهای الکترومغناطیسی و آلتراسونیک پرداختند. آن‌ها به کمک یک مدل سه‌بعدی دینامیکی سیال، خطاها و رفتار فلومتر را مورد بررسی قرار دادند [15]. لی و همکاران در سال 2020 یک مدل چند الکتروودی فلومتر الکترومغناطیسی با دیواره غیر عایق را معرفی کردند. آن‌ها یک مدل تجربی و عددی از فلومتر را ساخته و نتایج آن را با هم مقایسه کردند [16]. تیان و همکاران در سال 2021 تأثیر ورودی‌های مختلف به سیم‌پیچ‌ها

3- ساخت فلومتر الکترومغناطیسی آرایه‌ای

در فلومترهای الکترومغناطیسی متداول، میدان مغناطیسی با استفاده از سیم‌پیچ در سرتاسر کانال سیال به صورت یکنواخت توزیع می‌گردد و تفاوت بسیار جزئی در میزان چگالی میدان مغناطیسی وجود دارد. اما در مقاله حاضر هدف ایجاد میدان مغناطیسی مختلف در راستای عرض کانال و توانایی کنترل چگالی میدان مغناطیسی می‌باشد. به این منظور یک ساختار آرایه‌ای طراحی شده که میدان مغناطیسی متغیر و قابل کنترل را ایجاد می‌کند. در شکل 2 شماتیک و مدل هسته سیم‌پیچ آرایه‌ای نشان داده شده است. با بهره‌گیری از ساختار آرایه‌ای و با فعال شدن هر یک از تیغه‌های سیم‌پیچ، میدان مغناطیسی به صورت متمرکز در آن ناحیه از کانال اعمال می‌شود. با اعمال جریان متفاوت در هر یک از سیم‌پیچ‌ها می‌توان میدانی متفاوت را ایجاد کرد.

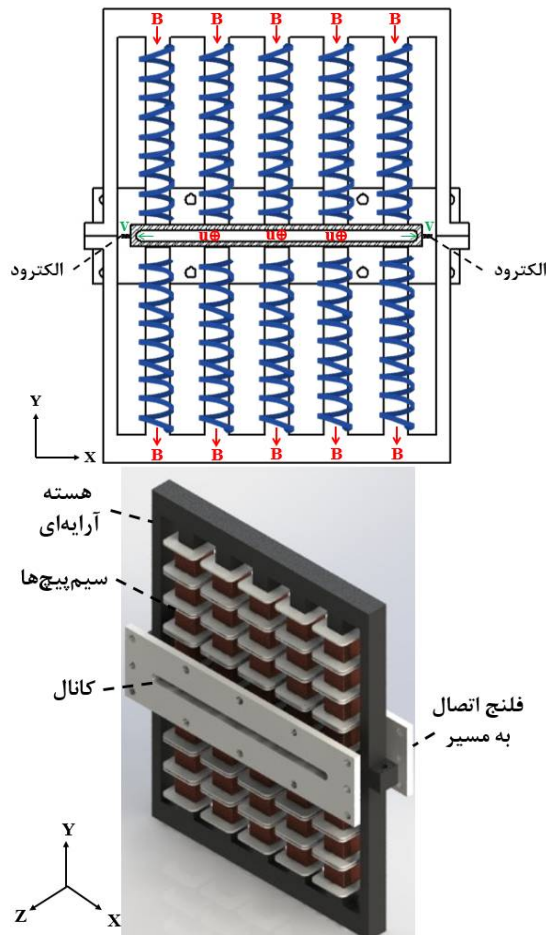


Fig. 2 Schematic of the arrayed Electromagnetic flow meter core and channel

شکل 2 شماتیک هسته و کانال فلومتر آرایه‌ای الکترومغناطیسی

جهت حرکت سیال عمود بر صفحه می‌باشد و جهت القای

الکترومگنت در دو طرف کانال، که وظیفه ایجاد میدان مغناطیسی دائم در کانال را به عهده دارند و دو الکتروود در دیواره‌ها جهت تشخیص ولتاژ القا شده می‌باشد. بر اثر حرکت سیال رسانا در میدان مغناطیسی اختلاف پتانسیل الکتریکی در الکتروودها ایجاد می‌شود. در شکل 1 ساختمان فلومترهای الکترومغناطیسی نشان داده شده است.

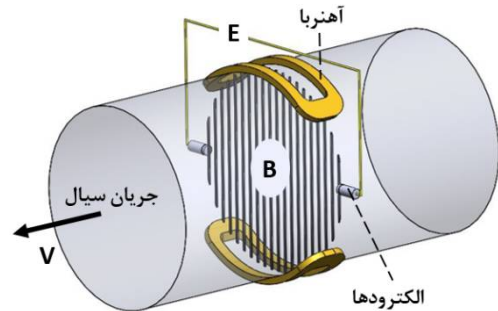


Fig. 1 Electromagnetic flow meter structure

شکل 1 ساختمان فلومترهای الکترومغناطیسی

روابط تئوری حاکم در فلومترهای الکترومغناطیسی موسوم به روابط مگنتوهیدرودینامیک می‌باشد. چگالی جریان حاصل از حرکت سیال در میدان مغناطیسی از قانون اهم و به صورت رابطه (1) محاسبه می‌شود [19].

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (1)$$

که در آن بردار سرعت سیال، B بردار میدان مغناطیسی و σ رسانایی الکتریکی سیال و E بردار میدان الکتریکی موجود در سیستم می‌باشند. ترم $\vec{V} \times \vec{B}$ معرف ولتاژ القایی در اثر حرکت سیال است و E میدان الکتریکی که در سیستم موجود است. در تحقیق حاضر فرض شده است که میدان الکتریکی اضافه‌ای در سیستم وجود ندارد. سرعت سیال هم با زمان ثابت در نظر گرفته می‌شود. به همین دلیل از ترم E در رابطه (1) چشم‌پوشی می‌شود. بردار میدان مغناطیسی و سرعت سیال به صورت روابط (2) و (3) در نظر گرفته می‌شود:

$$\vec{B} = B_x \hat{i} + B_y \hat{j} + B_z \hat{k} \quad (2)$$

$$\vec{V} = u \hat{i} + v \hat{j} + w \hat{k} \quad (3)$$

لذا مؤلفه‌های چگالی جریان الکتریکی برابر است با:

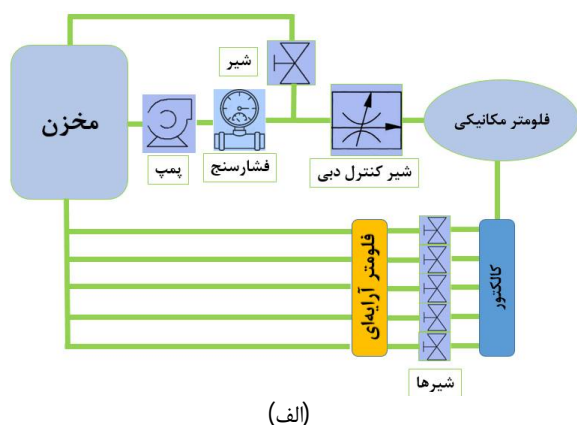
$$j_x = \sigma(vB_z - B_y w + E_x) \quad (4)$$

$$j_y = \sigma(wB_x - B_z u + E_y) \quad (5)$$

$$j_z = \sigma(uB_y - B_x v + E_z) \quad (6)$$

در شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول روابط (4) تا (6) در فیزیک الکتریسیته وارد شده و این چگالی معرف جریان القا شده در الکتروودها می‌باشد.

در شکل 4 مدار و مسیر آزمون فلومتر آرایه‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 4- الف نشان داده شده است سیال از مخزن با استفاده از پمپ سانتریفوژ وارد مسیر شده و پس از عبور از گیج فشار وارد شیر کنترل جریان می‌شود. یک مسیر انحرافی نیز جهت کنترل دبی ورودی و جلوگیری از افزایش فشار در نظر گرفته شده است. جهت اندازه‌گیری میزان سیال عبوری از یک فلومتر ثقلی (ساخت شرکت Kobold آلمان که با دقت 0/1 لیتر بر دقیقه کالیبره شده و امکان اندازه‌گیری سیال از 2 لیتر بر دقیقه تا 25 لیتر بر دقیقه را دارد) استفاده شده است. پس از آن سیال وارد کلکتور شده و با استفاده از شیرهای تعبیه شده در 5 مسیر وارد فلومتر الکترومغناطیسی آرایه‌ای می‌شود و پس از آن مجدداً وارد مخزن می‌گردد. بدین ترتیب امکان ایجاد پروفیل‌های سرعت مختلف در زیر فلومتر و انجام آزمایش‌ها در یک مسیر بسته فراهم گردیده است.



(الف)



(ب)

Fig. 4 Array electromagnetic flowmeter test circuit and path

شکل 4 مدار و مسیر آزمون فلومتر الکترومغناطیسی آرایه‌ای

پتانسیل الکتریکی بر اساس قانون دست راست به طرفین خواهد بود. سیگنال خروجی فلومتر نیز با استفاده از دو الکتروند نقره‌ای به قطر 2 میلی‌متر در طرفین کانال خوانده می‌شود. کانال فلومتر با استفاده از تفلون و به روش ماشین‌کاری ساخته شده است ابعاد داخلی مقطع آن 150×6 میلی‌متر مربع می‌باشد و ضخامت دیواره آن 1/5 میلی‌متر می‌باشد. جنس هسته آرایه‌ای از آهن کم کربن می‌باشد که با استفاده از ماشین‌کاری ساخته شده است و ابعاد آن مطابق به نحوی انتخاب شده است که قابلیت قرارگیری 4 بوبین در هر تیغه فراهم گردد. از 500 دور سیم مسی 0/3 میلی‌متر جهت سیم‌پیچی بوبین‌ها استفاده شده است. با قرارگیری تعداد کامل بوبین‌ها (4 بوبین) در هر تیغه 2000 دور سیم قرار می‌گیرد.

برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی حاصل از هسته و سیم‌پیچ از گاوس‌متر¹ مدل HT201 شرکت سی‌گولدن‌وال² با قابلیت سنجش میدان مغناطیسی از 0 تا 2000 میلی‌تسلا استفاده شده است. این گاوس‌متر دارای رزولوشن 0/01 میلی‌تسلا می‌باشد و با دقت 2 درصد کالیبره شده است. جهت آزمون فلومتر الکترومغناطیسی حالت آرایه‌ای، در ورودی فلومتر باید امکان ایجاد سرعت‌های متفاوت در عرض کانال وجود داشته باشد. به همین دلیل باید مسیر ورودی فلومتر الکترومغناطیسی تقسیم‌بندی شده و به صورت مجزا قابلیت کنترل دبی سیال وجود داشته باشد. به همین منظور از یک کلکتور در مسیر ورودی استفاده شده که سیال پس از جمع شدن در کلکتور با استفاده از شیرهای تعبیه شده در خروجی آن وارد فلومتر می‌شود و بدین ترتیب میزان سیال در هر مسیر کنترل می‌شود. شکل 3 ابعاد هسته و کانال را نشان می‌دهد.

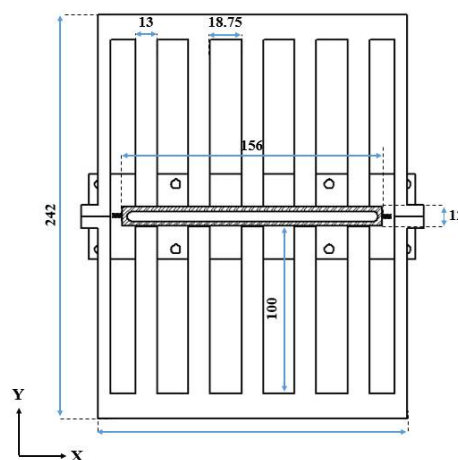


Fig. 3 Core and Channel's dimensions (mm)

شکل 3 ابعاد هسته و کانال (mm)

¹ Gauss meter

² CGoldenwall

ورودی میدان مغناطیسی نیز با استفاده از میکروکنترلر به صورت متناوب اعمال می‌شود. این امر باعث حذف ولتاژهای DC مزاحم می‌گردد. با استفاده از میکروکنترلر Atmega 8a پالس متناوب با فرکانس قابل تنظیم (4 هرتز) تولید شده و میدان مغناطیسی متناوب تولید می‌کند. از یک درایور موتور و منبع تغذیه دو کانال 30 ولت جهت تحریک سیم‌پیچ‌ها استفاده شده است. در شکل 7 برد فرستنده گیرنده، درایور موتور و نحوه تحریک سیم‌پیچ‌ها نشان داده شده است.

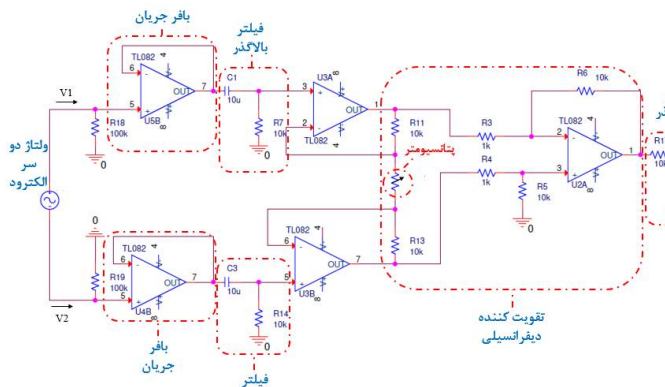


Fig. 6 Output signal amplifier and filter circuit

شکل 6 مدار فیلتر و تقویت سیگنال خروجی

در شکل 5 نمای مونتاژی فلومتر آرایه‌ای ساخته شد و مونتاژ شده در آزمون تجربی در حالی که آرایه شماره 2 سیم‌پیچی شده است، نشان داده شده است. بوبین‌ها به صورت سری به هم متصل شده‌اند و در مجموع هر آرایه در بالا و پایین با استفاده از 8 بوبین تشکیل 4000 دور سیم‌پیچ با قطر 0/3 را می‌دهند. دلیل انتخاب تعداد دور بالا توانایی ایجاد میدان مغناطیسی قوی زیر هر یک از آرایه‌ها می‌باشد. مقاومت سیم‌پیچ هر یک از بوبین‌ها حدود 8 اهم می‌باشد و با اعمال اختلاف پتانسیل 60 ولتی در مجموع از یک آرایه (8 بوبین به صورت سری با مقاومت معادل 64 اهم) جریان نزدیک به 0/94 آمپر عبور می‌کند.

به علت اینکه اختلاف پتانسیل ایجاد شده در فلومتر (علی‌الخصوص فلومتر آرایه‌ای) در مقیاس میلی ولت می‌باشد، لازم است سیگنال خروجی تقویت شده تا قابل تحلیل و بررسی باشد. علاوه بر این جهت حذف ولتاژهای مزاحم مداخله‌گر DC باید جهت میدان مغناطیسی به صورت متناوب معکوس شود و تحریک سیم‌پیچ به صورت متناوب صورت گرفته و در سیگنال خروجی نیز از فیلترهای بلاگذر و پایین‌گذر استفاده شود. همچنین در ورودی مدار برای حذف اثر بارگذاری روی سیگنال ورودی از بافر جریان استفاده شده است. در شکل 6 مدار تقویت سیگنال و فیلتر ولتاژهای مزاحم نشان داده شده است. به علت واکنش‌های الکتروشیمیایی در سیال همواره یک ولتاژ DC مزاحم در سیال وجود دارد که با استفاده از فیلتر بلاگذر (فرکانس قطع 1.5 هرتز) در هر یک از مسیرهای ورودی حذف می‌شوند. همچنین سیگنال‌های فرکانس بالا مانند الکتروموتور پمپ موجود در مدار و فرکانس برق شهر، یک فیلتر پایین‌گذر (فرکانس قطع 16 هرتز) نیز در مدار در نظر گرفته شده است. همچنین جهت تقویت سیگنال نیز از یک تقویت کننده دیفرانسیلی با آپ‌امپ TL082 استفاده شده است.

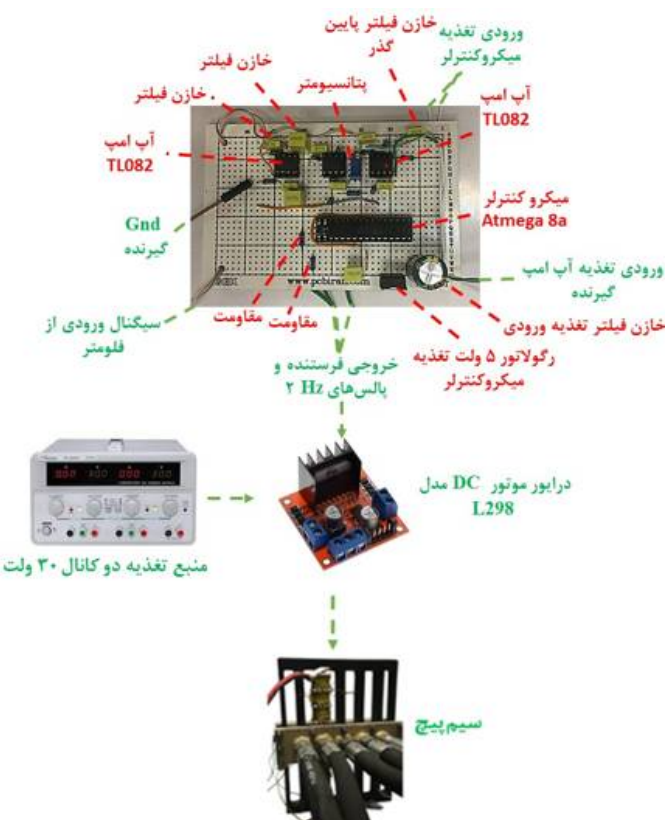


Fig. 7 Transmitter and receiver board of flowmeter

شکل 7 برد فرستنده و گیرنده فلومتر



Fig. 5 Assembly view of constructed arrayed electromagnetic flowmeter when array number 2 is active

شکل 5 نمای مونتاژی فلومتر آرایه‌ای ساخته شده در حالت آرایه شماره 2 فعال

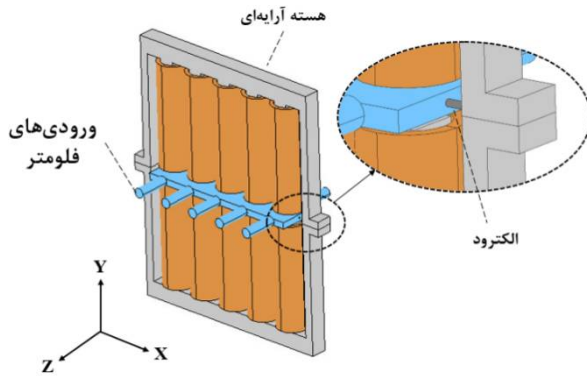


Fig. 9 Schematic of modeled flowmeter in Comsol

شکل 9 شماتیک فلومتر مدل شده در نرم افزار کامسول

Table 1 Specifications of the fluid

پارامتر	جدول 1 مشخصات سیال
مقدار	گرانروی (pa · s)
0/0012	چگالی (ρ (kg/m^3))
1024	رسانایی الکتریکی (S/m)
4	ضریب گذردهی نسبی مغناطیسی μ_r
1	

فیزیک‌هایی که در این شبیه‌سازی باید تعریف گردند عبارتند از: فیزیک میدان مغناطیسی است که جهت ایجاد یک میدان مغناطیسی دائم مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک فیزیک جریان الکتریکی نیز جهت شبیه‌سازی ولتاژ القایی در الکتروودهای فلومتر و آخرین فیزیک مسئله نیز مربوط به بخش سیالاتی می‌باشد که برای تحلیل جریان سیال مورد نیاز می‌باشد. شرایط حل به نحوی است که ابتدا در یک گام فیزیک جریان سیال فعال بوده و جریان در سیال ایجاد می‌گردد. سپس در گام بعدی فیزیک‌های مغناطیس و الکتریسیته فعال شده و ولتاژ القایی به‌عنوان خروجی محاسبه می‌شود. نرم‌افزار خروجی سرعت را از فیزیک جریان سیال و میدان مغناطیسی را از فیزیک مغناطیس استخراج کرده و با قرار دادن در روابط (4) تا (6) جریان الکتریکی ایجاد شده را بدست می‌آورد. مراحل حل تعریف شده در نرم‌افزار کامسول در شکل 10 نشان داده شده است.

برای تعریف حالت فرکانسی در گام‌های حل، یک تحلیل فرکانسی² تعریف می‌شود. شرایط مرزی در فیزیک سیال شامل ورودی سرعت در مسیرهای ورودی، فشار محیط در خروجی و شرایط دیواره‌های بدون اصطکاک می‌باشد. در فیزیک الکتریسیته نیز یکی از الکتروودها به عنوان زمین³ تعریف

با قرارگیری برد تحریک و گیرنده فلومتر، امکان اندازه‌گیری ولتاژ ناشی از حرکت سیال در فلومتر وجود دارد. آرایه‌های میدان مغناطیسی فلومتر و مسیرهای ورودی به آن به ترتیب نشان داده شده در شکل 8 از سمت چپ به راست شماره‌گذاری گردیده است. در آزمون‌های تجربی مسیرهای مختلف باز شده و آرایه‌ها فعال می‌شوند. سپس اختلاف پتانسیل در هر حالت با استفاده از اسیلوسکوپ استخراج و تحلیل شده است.

4- شبیه‌سازی‌های عددی فلومتر الکترومغناطیس

با توجه به اینکه هم‌زمان قوانین الکتریسیته، سیالات و مغناطیس بر فلومتر حاکم است، نیاز است که شبیه‌سازی آن در نرم‌افزاری صورت بگیرد که امکان شبیه‌سازی چند فیزیک را دارا باشد. بدین منظور در تحقیق حاضر از نرم‌افزار کامسول مالتی فیزیک¹ استفاده گردیده است. در شکل 9 مدل ایجاد شده در کامسول شامل هسته آرایه‌ای، الکتروودها و سیال نشان داده شده است. ابعاد و مشخصات مواد تعریف شده مشابه آزمون تجربی می‌باشد.

جنس الکتروودها نقره در نظر گرفته شده است و سیال نیز محلول آب نمک NaOH می‌باشد. با تغییر درصد وزنی نمک حل شده در آب میزان رسانایی محلول تغییر می‌کند. در تحقیق حاضر 20 درصد وزنی نمک NaOH در آب حل شده است که بیشترین میزان رسانایی این نمک در آب می‌باشد [20، 21]. در جدول 1 مشخصات آب نمک تعریف شده در نرم‌افزار نشان داده شده است.

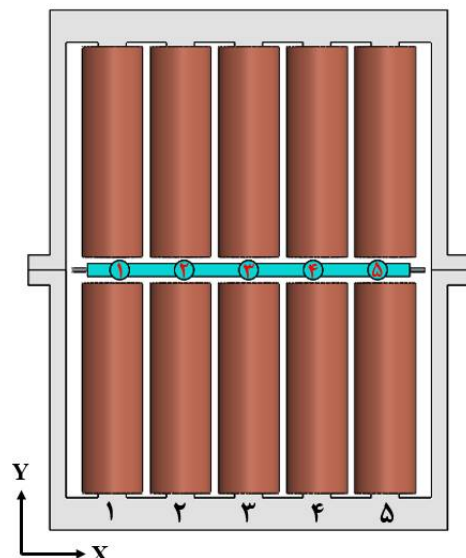


Fig. 8 Numbering of input paths and flowmeter arrays

شکل 8: شماره‌گذاری مسیرهای ورودی و آرایه‌های فلومتر

² Frequency Domain

³ Ground

¹ COMSOL Multiphysics

شکل 13 تغییرات چگالی شار میدان مغناطیسی را در عرض کانال با فعال بودن کوئل شماره 2 نشان می‌دهد.

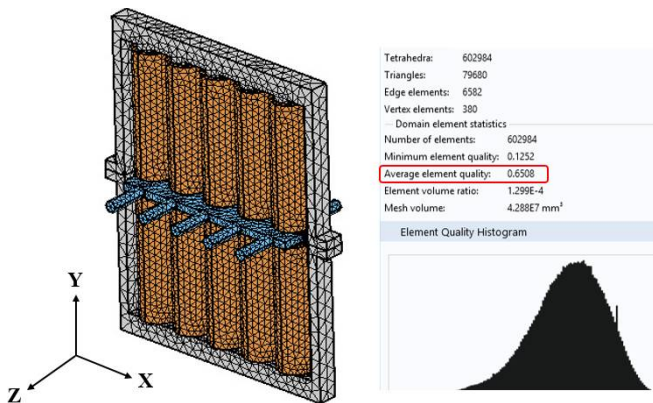


Fig. 11 Mesh view and quality specifications

شکل 11 نمای مش خورده و مشخصات کیفیت مش

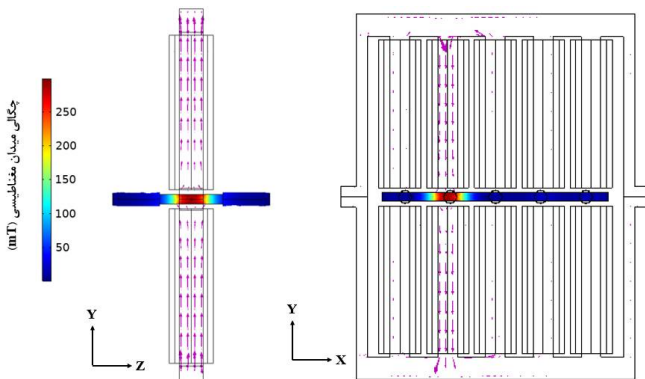


Fig. 12 Side and front view of the magnetic field arrows and density

شکل 12 خطوط میدان و چگالی میدان مغناطیسی از نمای جانب و روبرو کوئل‌های شماره 2 فعال

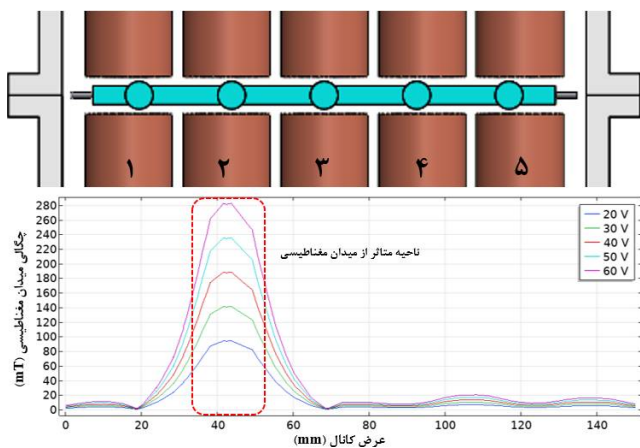


Fig. 13 The magnetic field variation in the channel width when coil number 2 is active at different voltages

شکل 13: تغییرات میدان مغناطیسی در عرض کانال با فعال بودن کوئل شماره 2 در ولتاژهای مختلف

اختلاف پتانسیل اعمالی به سیم‌پیچ‌ها از 20 ولت تا 60 ولت

می‌گردد. در فیزیک مغناطیس تعداد دور، قطر سیم و جریان عملی به سیم‌پیچ‌ها تعریف می‌گردد.

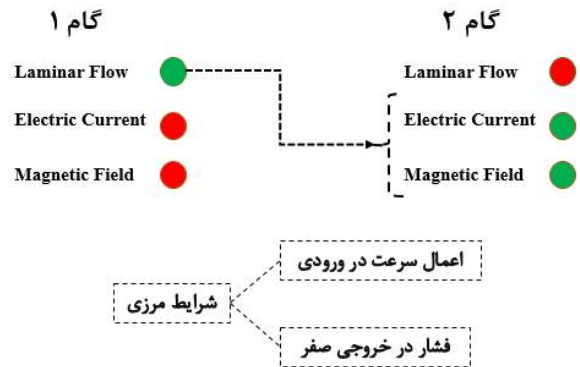


Fig. 10 Solving steps in simulating of an electromagnetic flowmeter in COMSOL

شکل 10 مراحل حل در شبیه‌سازی فلومتر الکترومغناطیسی در نرم‌افزار کامسول

سیگنال خروجی در حالت شبیه‌سازی به صورت اختلاف پتانسیل خوانده شده در دو الکترود استخراج می‌گردد. کیفیت مش و استقلال آن از تعداد مش‌ها در نتایج نهایی تأثیر بسزایی دارد. در نرم‌افزار کامسول جهت بررسی این موضوع بخشی به عنوان کیفیت مش قرار داده شده است. کیفیت مش عددی بین صفر تا یک می‌باشد و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد مش از کیفیت بالاتری برخوردار است و برای جواب صحیح مسئله این عدد باید بالای 0/6 باشد [22]. در این شبیه‌سازی میانگین کیفیت مش 0/64 است که مقدار مناسبی می‌باشد. در شکل 11 نمای مش‌بندی شده فلومتر و میانگین کیفیت مش و تعداد المان‌ها نشان داده شده است.

5- نتایج شبیه‌سازی

در این تحقیق آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی در دو حالت صورت گرفته است. در یک حالت یک آرایه فعال شده و با عبور سیال با سرعت یکسان، در مسیرهای ورودی، ولتاژهای اعمالی در فلومتر اندازه‌گیری و مقایسه شده‌اند. در حالت دیگر مانند فلومترهای معمولی، تمامی آرایه‌ها فعال شده‌اند و میزان ولتاژ القایی در فلومتر در میدان مغناطیسی یکنواخت با باز بودن مسیرهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل 12 خطوط میدان و کانتور چگالی شار میدان مغناطیسی را از نمای جانبی، در حالتی که اختلاف پتانسیل 60 ولتی به دو سر کوئل‌ها اعمال شده است، نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد خطوط میدان از هسته پایین وارد کانال شده و از هسته بالایی خارج می‌شوند. چگالی میدان مغناطیسی اعمالی به سیال در این حالت حدود 280 میلی‌تسلا می‌باشد.

در شکل 16 کانتور تغییرات چگالی شار میدان مغناطیسی در مقطع فلومتر زمانی که تمام کویل‌ها هم‌زمان فعال هستند، نشان داده شده است. در این حالت میدان مغناطیسی یکنواخت‌تری نسبت به حالتی که تک آرایه فعال می‌باشد، در مقطع ایجاد می‌گردد. با اعمال اختلاف پتانسیل 60 ولتی به کویل‌ها میدان مغناطیسی با بزرگی 250 میلی‌تسلا در زیر کویل‌ها اعمال می‌شود.

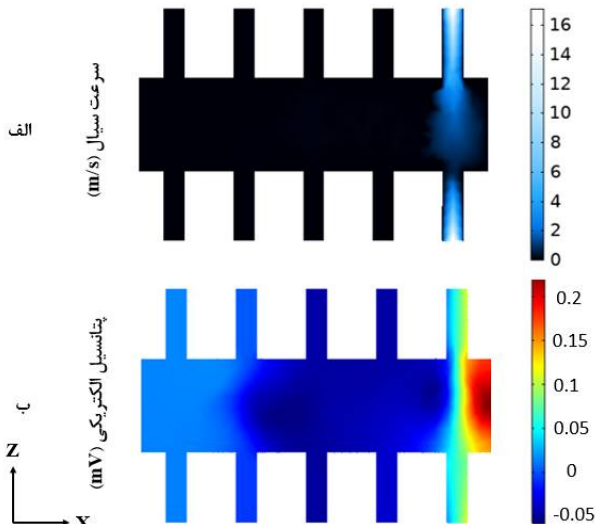


Fig. 15 The variation of a) velocity profile b) electric potential when coil number 2 is active and route number 5 is open

شکل 15 کانتور تغییرات (الف) سرعت سیال (ب) پتانسیل الکتریکی در حالت مسیر 5 باز و آرایه 2 فعال

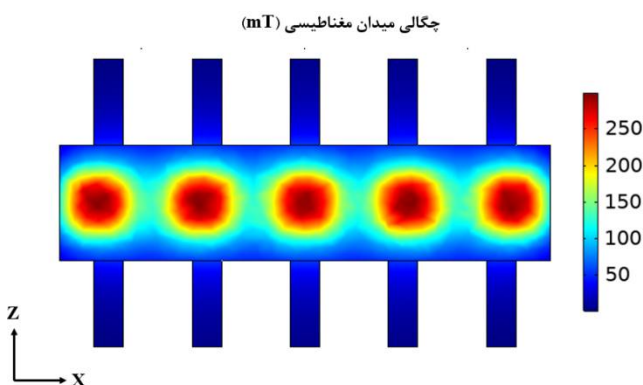


Fig. 16 The magnetic field density vector when all arrayed are active
شکل 16 کانتور چگالی میدان مغناطیسی تمام آرایه‌ها فعال

در حالتی که تمام کویل‌ها فعال هستند و سیال از هر 5 مسیر وارد فلومتر می‌شود توزیع یکنواختی از پتانسیل الکتریکی در مقطع ایجاد می‌شود. در شکل 17 کانتور پروفیل سرعت ورودی و توزیع پتانسیل الکتریکی در این حالت نشان داده شده است. (در این حالت مجموع سیال ورودی به آرایه‌ها معادل 20 لیتر بر دقیقه می‌باشد.)

تغییر می‌کند و با فعال بودن این کویل میدان مغناطیسی به صورت متمرکز در ناحیه زیرین آن افزایش می‌یابد. با افزایش اختلاف پتانسیل اعمالی از 20 ولت به 60 ولت، چگالی میدان مغناطیسی در بیشترین نقطه از 100 میلی‌تسلا تا 280 میلی‌تسلا تغییر می‌کند.

در شکل 14- الف کانتور تغییرات سرعت سیال زمانی که مسیر شماره 2 باز می‌باشد نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد سیال پس از ورود به مقطع فلومتر و اندکی پخش شدن، از مسیر مقابل خارج می‌گردد. این تغییرات سرعت و میدان مغناطیسی اعمالی، باعث ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی می‌شود. توزیع اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد شده در این حالت نیز در شکل 14- ب نشان داده شده است. بیشینه سرعت در زیر کویل‌ها حدود 1/5 متر بر ثانیه می‌باشد و این سرعت اختلاف پتانسیلی معادل 5/5 میلی‌ولت در مقطع فلومتر ایجاد می‌کند.

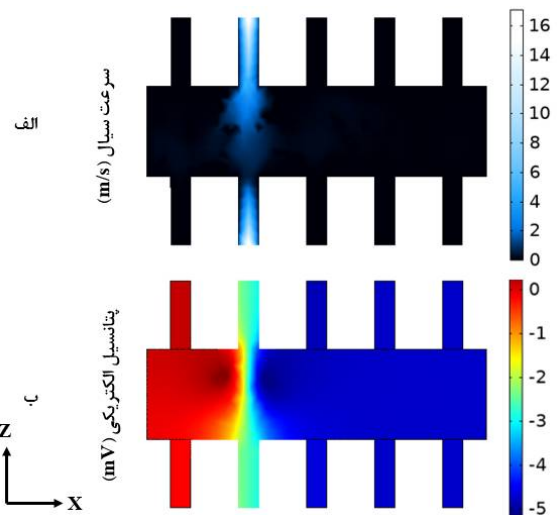


Fig. 14 The variation of a) velocity profile b) electric potential when coil number 2 is active and route number 2 is open

شکل 14: کانتور تغییرات (الف) سرعت سیال (ب) پتانسیل الکتریکی در حالت باز بودن مسیر 2 و فعال بودن کویل 2

زمانی که کویل شماره 2 فعال است و سیال از مسیر دیگری عبور می‌کند، میزان اختلاف پتانسیل ایجاد شده متفاوت می‌گردد. هر چه فاصله سیال در حال حرکت و میدان مغناطیسی بیشتر باشد، ولتاژ القایی کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه در شکل 15- ب تغییرات اختلاف پتانسیل القایی در حالتی که سیال از مسیر شماره 5 عبور کرده و آرایه شماره 2 فعال می‌باشد، نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در این حالت اختلاف پتانسیل اعمالی حدود 0/25 میلی‌ولت می‌باشد.

خروجی از الکترودها با زمان، نشان داده شده است. به دلیل اندوکتانس پایین سیم پیچ (میزان اندوکتانس سیم پیچ هر آرایه 392 میلی‌هانری می‌باشد که با استفاده از ال‌سی‌آر متر² مدل ELC-131D شرکت اسکورت³ اندازه‌گیری شده است) تأثیر تغییرات اعمالی در ورودی به سرعت در خروجی میدان مغناطیسی و سیگنال خروجی فلومتر مشاهده می‌شود. لذا همان‌طور که در شکل 19 نشان داده شده است، در هر سیکل دو بار حالت کاهشی (پیکان‌های قرمز رنگ) و دو بار حالت افزایشی (پیکان‌های سبز رنگ) در خروجی مشاهده می‌شود.

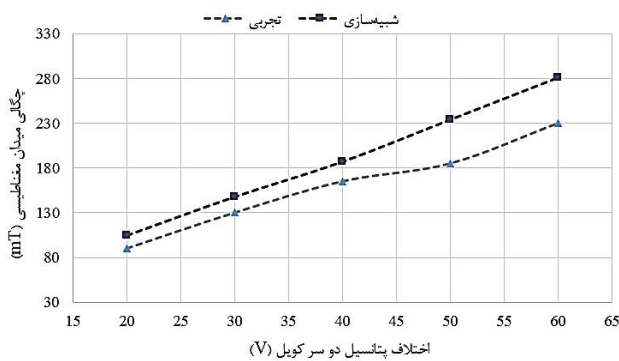


Fig. 18 The variation of magnetic field by increasing the electric potential applied to the coils

شکل 18 تغییرات میدان مغناطیسی با افزایش اختلاف پتانسیل اعمالی به کوئل‌ها

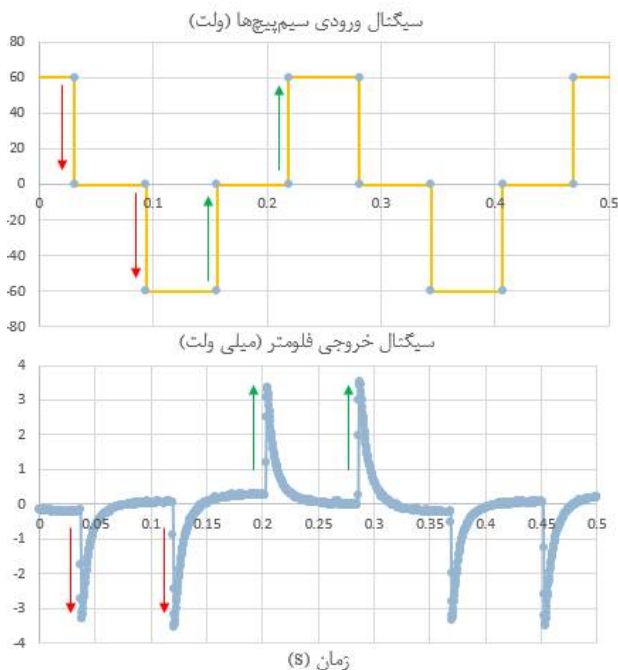


Fig. 19 The variation of electric potential applied to the coils and output of the electrodes

شکل 19 تغییرات اختلاف پتانسیل ورودی سیم‌پیچ‌ها و خروجی الکترودها

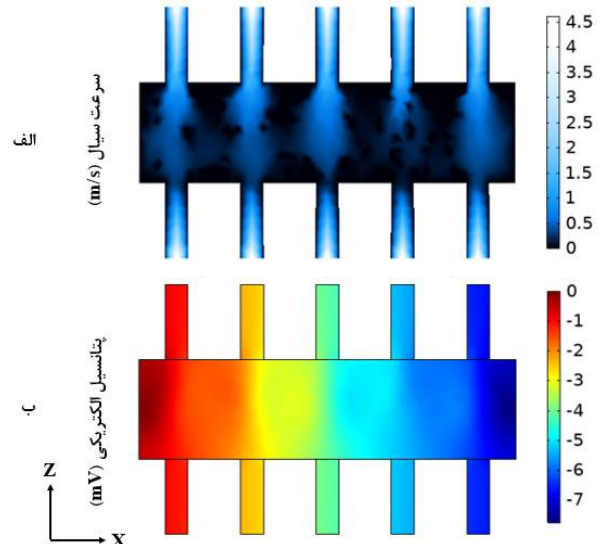


Fig. 17 The variation of a) velocity profile b) electric potential when all coils are active and all routes are open

شکل 17 کانتور تغییرات (الف) سرعت سیال (ب) پتانسیل الکتریکی در حالت تمام مسیرها باز و تمام کوئل‌ها فعال

6- نتایج تجربی

در شکل 18 تغییرات چگالی میدان مغناطیسی، با افزایش اختلاف پتانسیل اعمالی به یک کوئل، در حالت شبیه‌سازی و تجربی نشان داده شده است. حالت تحریک میدان مغناطیسی جهت مقایسه میدان مغناطیسی در حالت تجربی و شبیه‌سازی (در هنگام آزمون اصلی به صورت متناوب اعمال می‌شود) به صورت DC بوده و با تغییر اختلاف پتانسیل اعمالی به دوسر کوئل‌ها، چگالی شار میدان مغناطیسی در زیر کوئل‌ها اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد روند تغییرات چگالی میدان مغناطیسی به صورت خطی می‌باشد و با افزایش اختلاف پتانسیل اعمالی، میدان مغناطیسی قوی‌تری ایجاد می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و تجربی تطابق قابل قبولی داشته و میانگین خطا 16 درصد می‌باشد. دلیل بالاتر بودن میدان مغناطیسی در حالت شبیه‌سازی نسبت به تجربی می‌تواند، اتلاف چگالی شار میدان در هوا و نیز اختلاف خواص مواد در حالت تجربی باشد.

برای محاسبه ولتاژ القایی در فلومتر با توجه به اینکه نمودار خروجی به صورت متناوب می‌باشد، ابتدا اختلاف مقدار بیشینه و کمینه ولتاژ محاسبه شده و سپس با استفاده از ریشه میانگین مربعات¹، این عدد بر بهره مدار تقویت کننده تقسیم شده و مقدار واقعی اختلاف پتانسیل معادل محاسبه می‌شود. به عنوان نمونه در شکل 19 سیگنال مربعی ورودی به سیم‌پیچ‌ها و ولتاژ

² LCR meter

³ ESCORT

¹ RMS

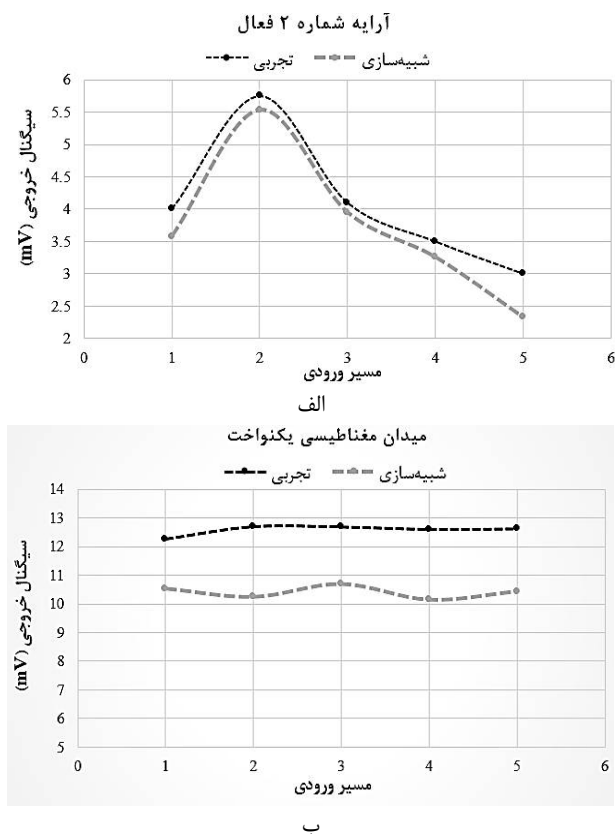


Fig. 21 The output signal in arrayed mood and uniform magnetic field
شکل 21 سیگنال خروجی فلومتر در حالت آرایه‌ای و میدان یکنواخت

در این حالت تمام دبی پمپ (20 لیتر بر دقیقه) پس از عبور از فلومتر ثقلی استاندارد، وارد کلکتور شده و به 5 قسمت مساوی تقسیم می‌شود. شبیه‌سازی صورت گرفته در این حالت در شکل 17 نشان داده شده است. در این حالت سیگنال خروجی فلومتر در شبیه‌سازی 8/2 میلی‌ولت و در آزمون تجربی 9/85 میلی‌ولت می‌باشد که نشان دهنده خطای 16/7 درصدی در این حالت می‌باشد.

در حالت دیگر پروفیل سرعت ورودی با باز و بسته کردن شیرهای ورودی به فلومتر به صورت پارابولیک و خطی تغییر می‌کند. سپس یا فعال شدن تک تک کوپل به صورت جداگانه تغییرات اختلاف پتانسیل اعمالی در فلومتر اندازه‌گیری و ثبت شده است. در شکل 22 تغییرات پروفیل دبی ورودی (نمودار سیاه رنگ) و سیگنال خروجی (نمودار نارنجی رنگ) از فلومتر نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، در حالت پارابولیک، شکل 22-الف، بیشترین دبی در وسط کانال وجود دارد و با حرکت به سمت دیواره‌ها از آن کاسته می‌شود (مسیر 3 کاملاً باز است، مسیر 2 و 4 به صورت نیمه‌باز و مسیر 1 و 5 مسدود هستند). سیگنال خروجی فلومتر نیز روند تغییرات مشابه دبی ورودی دارد و بیشترین مقدار در مرکز کانال (آرایه

در شکل 20 نمودار آبی رنگ، خروجی اسیلوسکوپ را در حالتی که تمامی کوپل‌ها فعال هستند، نشان می‌دهد. در این حالت، به دلیل اعمال میدان یکنواخت تر و وسیع تر، دامنه نمودار به صورت میانگین، بیشتر از دو برابر حالتی است که یکی از آرایه‌ها به تنهایی فعال است (نمودار قرمز رنگ). این امر نشان‌دهنده بزرگ‌تر بودن ولتاژ خوانده شده در این حالت می‌شود. در حالت اول ابتدا یک کوپل فعال شده و 5 مسیر مختلف به صورت مجزا باز شده و سیگنال خروجی فلومتر استخراج شده است. سپس تمام کوپل‌ها فعال شده و میدان یکنواخت در سراسر کانال اعمال شده است و مجدداً با باز شدن تمام مسیرها خروجی فلومتر ثبت شده است. در شکل 21 سیگنال خروجی فلومتر در شبیه‌سازی و تجربی در این حالت، نشان داده شده است. در این آزمون‌ها، سرعت سیال ورودی به کلکتور 10 لیتر بر دقیقه، ولتاژ ورودی به مگنت‌ها 60 ولت با فرکانس 4 هرتز و بهره مدار تقویت کننده سیگنال خروجی (در آزمون تجربی) 200 می‌باشد.

نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان دهنده این است که در زمان فعال بودن کوپل شماره 2 با عبور سیال از بخش‌های مختلف در فلومتر، سیگنال‌های متفاوتی القا می‌شود. زمانی که سیال از قسمت زیرین آرایه فعال عبور می‌کند، بیشترین مقدار ولتاژ ایجاد می‌گردد. این در حالی است که در حالتی که تمام آرایه‌ها فعال می‌باشند با تغییر مسیرهای ورود سیال به فلومتر، با وجود افزایش میزان ولتاژ القایی، اما تغییر محسوسی (کمتر از 4 درصد) در ولتاژ خروجی مشاهده نمی‌شود. برای اعتبارسنجی نتایج علاوه بر مقایسه صورت گرفته در شکل 21، مقایسه در حالتی که تمام مسیرها باز باشند نیز صورت گرفته است.

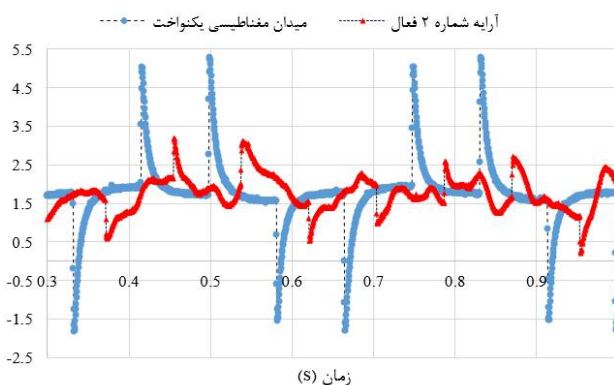


Fig. 20 The output signal when coil number 2 is active and all coils are active

شکل 20 خروجی اختلاف پتانسیل در الکترودها در حالت فعال بودن کوپل شماره 2 و تمامی کوپل‌ها

طراحی و ساخته شده است. فلومتر آرایه‌ای طراحی شده در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شده و حالت‌های مختلف آن مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از آرایه‌ای از سیم‌پیچ‌ها میدان مغناطیسی در هر ناحیه از عرض کانال قابل کنترل می‌باشد. با استفاده از این ویژگی پروفیل سرعت ورودی به فلومتر قابل تشخیص می‌باشد. نتایج تجربی و شبیه‌سازی از تطبیق مناسبی برخوردار بوده (میانگین خطا 16 درصد) و روند تغییرات مشابهی را نشان می‌دهند. در حالت تجربی و شبیه‌سازی با فعال کردن یک آرایه و عبور سیال در فواصل مختلف، تغییرات ولتاژ القایی در فلومتر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تفاوت میدان مغناطیسی یکنواخت و متمرکز و توانایی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت دوم پروفیل سرعت پارابولیک و خطی در ورودی فلومتر ایجاد شده و تغییرات سیگنال خروجی از آن ثبت شده است. نتایج نشان دهنده قابلیت سنجش پروفیل سرعت به کمک فلومتر آرایه‌ای ساخته شده می‌باشد.

8- مراجع

- [1] L.C. Lynnworth, Y.L., Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955-2005. *Ultrasonics Journal*, 2006. Vol. 44: pp. e1371- e1378.
- [2] Leeungculsatien, T. and G. Lucas, Measurement of velocity profiles in multiphase flow using a multi-electrode electromagnetic flow meter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2013. Vol. 31: pp. 86-95.
- [3] Jeong, U., et al., Numerical evaluation of SmCo permanent magnet flowmeter measuring sodium flow in a low flow rate regime using FLUENT/MHD module. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2016. Vol. 53: pp. 173-183.
- [4] Shercliff, J., Relation between the velocity profile and the sensitivity of electromagnetic flowmeters. *Journal of Applied Physics*, 1954. Vol. 25: pp. 817-818.
- [5] Bevir, M., The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters. *Journal of Fluid Mechanics*, 1970. Vol. 43(03): pp. 577-590.
- [6] Zhang, X. and J. Hemp, Calculation of the virtual current around an electromagnetic velocity probe using the alternating method of Schwarz. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 1994. Vol. 5(3): pp. 146-149.
- [7] Luntta, E.H., The effect of velocity profile on electromagnetic flow measurement. *Sensors and Actuators*, 1989. Vol. 16(4): pp. 335-344.
- [8] Horner, B., et al., A multi-sensor induction flowmeter reducing errors due to non-axisymmetric flow profiles. *Measurement Science and Technology*, 1996. Vol. 7(3): pp. 354-360.

شماره 3، 3.5 میلی ولت) و کمترین مقدار در نزدیکی دیواره‌ها (آرایه شماره 1 و 5، 0/36 میلی ولت) می‌باشد. در حالت ورودی خطی، ب، مسیر 1 کاملاً باز و مسیرهای 2 و 3 نیمه‌باز و دو مسیر 4 و 5 مسدود می‌باشند. سیگنال خروجی نیز در زمان فعال بودن کویل شماره 1 بیشترین مقدار (3/85 میلی ولت) و با فعال بودن آرایه شماره 5 کمترین مقدار (0/25 میلی ولت) را نشان می‌دهد. این امر نشان‌دهنده توانایی فلومتر الکترومغناطیسی طراحی شده در سنجش پروفیل سرعت می‌باشد و می‌توان با فعال کردن هر کویل و خواندن اختلاف پتانسیل اعمالی آن، میزان سرعت خطی در ناحیه زیرین آن را سنجید و تغییرات پروفیل سرعت ورودی مرجع را استخراج کرد.

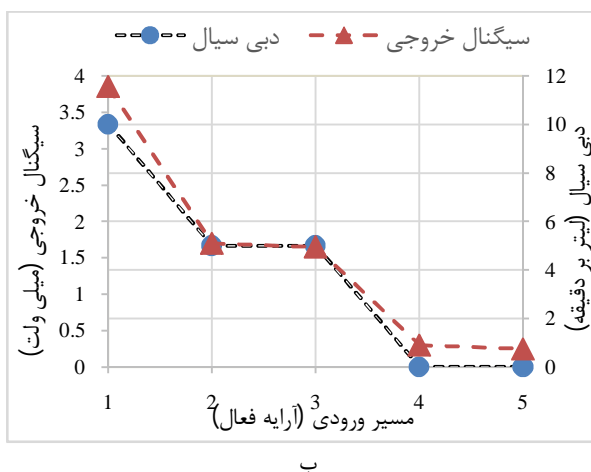
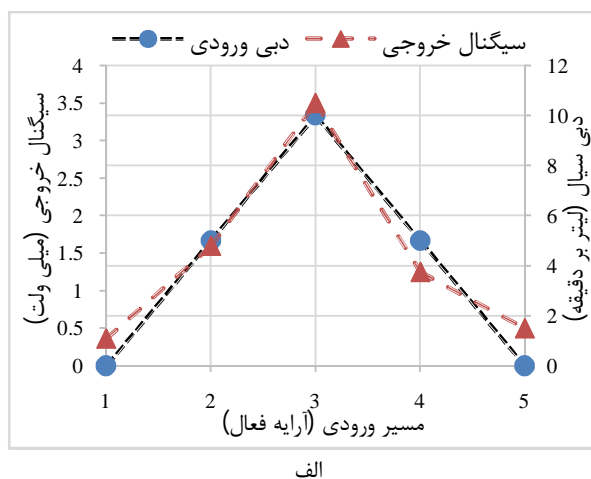


Fig. 22 The variation of input flow rate and output signal in a) parabolic b) linear case

شکل 22 تغییرات دبی ورودی به فلومتر و سیگنال خروجی فلومتر در حالت الف) پارابولیک ب) خطی

7- نتیجه‌گیری

در این تحقیق فلومتر الکترومغناطیسی آرایه‌ای با قابلیت کنترل میدان مغناطیسی در راستای عرضی یک کانال مستطیلی

- and ultrasonic flowmeters. *Journal of Scientia Agricola*, 2020. Vol. 77(4).
- [16] Li, X.J.M., An Numerical Analysis Approach for a Novel Electromagnetic Flow Meter with Multi-Electrode, in *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020. p. 062108.
- [17] Liang Ge, G.T., Junxian Chen, Junaid Ahmed, Qi Huang, Study on a new electromagnetic flowmeter based on three-value trapezoidal wave excitation. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2021. Vol. 78.
- [18] K. Won Lim, M.K.C., Numerical investigation on the installation effects of electromagnetic flowmeter downstream of a 90 elbow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1999. Vol. 10: pp. 167–174.
- [19] Shercliff, J.A., The theory of electromagnetic flow-measurement. 1962: *Cambridge University Press Archive*.
- [20] Foxboro, I., Table of conductivity vs. concentration for common solutions. 1999.
- [21] Artemov, V., A. Volkov, and N.J.E. Sysoev, Conductivity of aqueous HCl, NaOH and NaCl solutions: Is water just a substrate? *A Letters Journal Exploring The Frontiers of Physics*, 2015. Vol. 109(2): p. 26002.
- [22] Fred-Johan Pettersen, J.O.H., From 3D tissue data to impedance using Simpleware ScanFE+ IP and COMSOL Multiphysics. *Journal of Electrical Bioimpedance*, 2011. Vol. 2: pp. 13-32.
- [9] Wegfrass, A., et al., A universal noncontact flowmeter for liquids. *Applied physics letters*, 2012. Vol. 100(19): p. 194103.
- [10] Lucas, G.P., et al., Measurement of the solids volume fraction and velocity distributions in solids-liquid flows using dual-plane electrical resistance tomography. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1999. Vol. 10: pp. 249–258.
- [11] Wang, J., G. Tian, and G. Lucas, Relationship between velocity profile and distribution of induced potential for an electromagnetic flow meter. *Flow Measurement Instrumentation*, 2007. Vol. 18(2): pp. 99-105.
- [12] Looney, R. and J.n. Priede, Concept of a next-generation electromagnetic phase-shift flowmeter for liquid metals. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2019. Vol. 65: pp. 128-135.
- [13] Yang, Y., et al., Measurement of vertical gas-liquid two-phase flow by electromagnetic flowmeter and image processing based on the phase-isolation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019. 101: pp. 87-100.
- [14] Jiang, Y., W. Jiang, and C. Zhang. Simulation Research on Optimal Installation Position of partially-filled pipe Electromagnetic Flowmeter sensor. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2020.
- [15] Palau, C.V., et al., Numerical study of upstream disturbances on the performance of electromagnetic