ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. Engineering. 2022;22(12):727-736

Experimental and Numerical Analysis of Discontinuous Flow of Molten Sn in an Electromagnetic Pump and Investigation of Effective Parameters on Flow Geometry

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Bagherpour F.[1],
Sadeghi A.[1*],
Osgouie K.[2]

How to cite this article
Bagherpour F, Sadeghi A, Osgouie K. Experimental and Numerical Analysis of Discontinuous Flow of Molten Sn in an Electromagnetic Pump and Investigation of Effective Parameters on Flow Geometry. Modares Mechanical Engineering. Engineering. 2022;22(12):727-736.

[1] Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran.
[2] School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
[3] Caspian Faculty of Engineering, University of Tehran, Gilan, Iran

Correspondence
Address: School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, floor 4, room 402
Alireza.sadeghi@ut.ac.ir

Article History
Received: May 22, 2022
Accepted: July 26, 2022
ePublished: December 13, 2022

ABSTRACT

Melt conductivity of metals makes it possible to apply force directly to the melt by electromagnetic forces. The movement of melt performs without using any mechanical parts, and it also reduces the risk of corrosion of metal parts in contact with molten metals. In this research, a discontinuous molten flow is generated from a designed nozzle, and after a cooling process, the droplets convert to metal powders or granules. In this pump, drop-on-demand formation is based on eddy currents and alternating electromagnetic forces inside the melt. The most important effective parameters in the induction coil are the current, voltage, and frequency. In order to control the operation of the pump, it is necessary to understand its effects and to find the optimal conditions. The results of studies show that the most effective parameter affecting the number of drops released per unit of time is the voltage of the coil and then the frequency and finally the pulse on time. In this project, by studying various effective parameters, a device was designed to generate molten droplets. The results showed at the voltage of 280 v, pulse-On time of 1.5 ms, and also by increasing frequency from 5 to 20 Hz, the number of droplets increased from 144 to 246 drops. The highest number of drop outputs occurred at the frequency of 20 Hz, Voltage of 280 v, and pulse-On time of 1.5 milliseconds.

Keywords Electromagnetic pumps, Drop of demands, Metal powder, Tin

CITATION LINKS

1- Magnetohydrodynamic Drop-on-Demand Liquid Metal Additive Manufacturing: System Overview and Modelling 2- Modeling and characterization of metal droplets generation by using a pneumatic drop-on-demand generator. 3- Research on mechanism of generating aluminum droplets smaller than the nozzle diameter by pneumatic drop-on-demand technology. 4- Rheological Modification of Liquid Metal for Additive Manufacturing of Stretchable Electronics. 5- Liquid phase 3D printing for quickly manufacturing conductive metal objects with low melting point alloy ink. 6- Modification and further development of a drop on demand printhead for wax enabling future 3D-printing and rapid prototyping. 7- MHD printhead for additive manufacturing of metals. 8- A high temperature drop-on-demand droplet generator for metallic melts. 9- Effect of process parameters on copper droplet ejecting by pneumatic drop-on-demand technology. 10- Simulation on deposition and solidification processes of 7075 Al alloy droplets in 3D printing technology. 11- Advances in Magnetohydrodynamic Liquid Metal Jet Printing. 12- Theoretical and experimental study of MHD (magnetohydrodynamic) micropump. 13- Magnetohydrodynamic Pump Work Simulation. 14- Embedded magnetohydrodynamic liquid metal thermal transport: validated analysis and design optimization. 15- Investigation of the movement of the conductive liquid substance to identify the performance of the electromagnetic micropump. 16- Fabrication of solder balls via electromagnetic jetting. 17- Drop-on-demand electromagnetic printing of metallic droplets. 18- A study of ejection modes for pulsed-DC electrohydrodynamic inkjet printing.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

تحلیل تجربی جریان منقطع مذاب قلع در پمپ الکترومغناطیس و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر تعداد قطرات مذاب

فرید باقرپور[۱]، علیرضا صادقی[۲*]، سید کامبیز قایمی اسکویی[۳]
[۱] پردیس بین الملل کیش، دانشگاه تهران
۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران
۳ پردیس کاسپین، دانشگاه تهران

چکیده
سانایی مذاب فلزات این امکان را فراهم می‌سازد تا بتوان با بهره‌گیری از نیروهای الکترومغناطیس بدون استفاده از قطعه‌ای مکانیکی، به مذاب نیرو وارد نموده و موجب جابه‌جایی آن شد. از جمله مزیت‌های مهم این فرایند، حذف قطعات مکانیکی است که معمولا در تماس با مذاب‌های فلزات در خطر خوردگی و تنش حرارتی قرار می‌گیرند. در این پژوهش نوعی پمپ الکترومغناطیسی به منظور ایجاد جریان منقطع مذاب به هدف دستیابی به نازل قابل کنترل در کاربردهای مختلف معرفی شده است. در این پمپ تولید قطرات بر حسب تقاضا بر اساس تخلیه قطره‌های سیال رسانا به کمک ایجاد جریان گردابی و نیروهای الکترومغناطیسی متناوب در داخل مذاب استوار است. ساز و کار این سامانه بر مبنای کویل القایی به واسطه جریان متناوب سبب ایجاد نیروی تناوبی در مذاب و در نهایت ایجاد جریان منقطع داخل مذاب می‌شود. مهم‌ترین عوامل موثر در کویل القایی محرک جریان مذاب، ولتاژ، جریان و بسامد هستند که به منظور کنترل عملکرد پمپ، درک صحیح از عملکرد آن‌ها ضروری است. در این پروژه با بررسی و مطالعه عوامل مختلف تاثیرگذار در ایجاد این جریان منقطع اقدام به طراحی دستگاهی به منظور تولید قطرات مذاب شد. نتایج نشان داد که در ولتاژ ۲۸۰ ولت و زمان روشنی پالس یک و نیم میلی ثانیه با افزایش بسامد از ۵ به ۲۰ هرتز تعداد قطرات خروجی از نازل از ۱٤٤ به ۲٤٦ قطره افزایش یافت. همچنین بیشترین تعداد خروجی قطره در بسامد ۲۰ هرتز، میزان ولتاژ ۲۸۰ ولت و زمان روشنی پالس ۱/۵ میلی ثانیه رخ داد.

کلیدواژه‌ها: پمپ الکترومغناطیس، جریان منقطع مذاب، پودر فلزات، قلع

تاریخ دریافت: ۱٤۰۰/۱۱/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۸
*نویسنده مسئول: Alireza.sadeghi@ut.ac.ir

۱- مقدمه
در علم فیزیک قوانین لاپلاس عکس‌العمل بین میدان مغناطیسی و جریان مغناطیسی را بیان می‌کند که به قانون دست راست فیلیمنگ معروف است و اساس کار پمپ الکترومغناطیس را مشخص می‌نماید. زمانی که انگشت اشاره به سمت میدان مغناطیسی و انگشتان دیگر در جهت جریان باشند، جهت قرارگیری انگشت شست جهت نیروی اعمال شده به سیال را نشان می‌دهد. پمپ‌های الکترومغناطیس بر اساس نوع جریان اعمالی برای تأمین میدان مغناطیسی و همچنین نوع جریان الکتریکی اعمالی به سیال در دو دسته جریان متناوب و مستقیم تقسیم بندی می‌شوند. روش‌های تولید قطره در کاربردهای مختلف را می‌توان بر اساس اصول تولید قطره به سه دسته تقسیم بندی نمود: (۱) چکیدن (dripping)، (۲) جت پیوسته (continuous jetting) و (۳) قطره بر حسب تقاضا ((drop on demand (DOD).

در روش چکیدن، به کمک نیروی گرانش، قطرات مایع با جریان کم از یک لوله مویین خارج می‌شود. نرخ تولید قطره در این روش کم است زیرا زمان زیادی (از چند ثانیه تا چند دقیقه) طول می‌کشد که هر قطره تشکیل شود. بنابراین روش مذکور برای دستگاه‌های آزمایشگاهی که در آنها سرعت تولید و مصرف قطرات از اهمیت کمتری برخوردار است (مانند دستگاه اندازه‌گیری تنش سطحی یا زاویه تماس) مناسب می‌باشد. روش دوم تولید قطرات، جت پیوسته است که زمانی حاصل می‌شود که جریان مایع در لوله مویین افزایش یابد. در این شرایط جت پیوسته در اثر ناپایداری ریلی-پلاتو (Plateau-Rayleigh instability) به قطرات مجزا تبدیل می‌شود. به کمک یک چرخه محرک مناسب، می‌توان یک جریان یکنواخت از قطرات با سرعت و بسامد بالا ایجاد نمود. جت پیوسته در فرآیندهای چاپ جوهر افشان عملکرد موفقیت آمیزی نشان داده است. با این وجود تولید این نوع قطرات نیاز به تجهیزات کنترلی پیچیده‌ای دارد. در روش سوم، قطره بر حسب تقاضا، حجم اندکی از مایع در اثر فشار ضرب های کوچک به کانال حاوی مایع و در ادامه به سمت نازل، رانده می‌شود. در شرایط مناسب، مایع خارج شده از نازل به یک قطره تبدیل می‌شود. این فرآیند روشی کارآمد برای تولید قطره در ابعاد میکرون و رسوب آن روی یک سطح است زیرا به راحتی می‌توان آن را با تغییر سیگنال الکتریکی کنترل کرد.

در پمپ مگنتوهیدرودینامیک قطره بر حسب تقاضا ، ولتاژ وارد شده به دو سر سیم‌پیچ، باعث ایجاد جریان الکتریکی و نهایتاً میدان مغناطیسی اطراف آن می‌شود. میدان مغناطیسی متغیر با زمان، موجب به وجود آمدن جریان‌های گردابی درون سیال رسانا شده و کوپل شدن این جریان گردابی و میدان مغناطیسی خارجی، باعث ایجاد نیروی لورنتس می‌شود. بدیهی است که با تغییر نیروی لورنتس، فشار پشت سیال برای خروج قطره از روزنه‌ی نازل و سپس ، مشخصه‌های قطرات تولیدی تغییر خواهد کرد، چرا که اندازه بار الکتریکی القایی در سیال رسانا و توزیع جرم در قطره خارج شده از نازل، به‌شدت وابسته به خواص سیال و عامل موثر ولتاژ است. همچنین نازل به گونه‌ای طراحی و ساخته شده که با اعمال نیروی لورنتس سیال رسانا درون نازل به سمت پایین و روزنه‌ی خروجی نازل مطابق حرکت می‌کند.

ولتاژ وارد شده به سیم پیچ به دو فاز مثبت و منفی تقسیم‌بندی می‌شود. ولتاژ فاز مثبت موجب افزایش خطی جریان الکتریکی و به دنبال افزایش چگالی شار مغناطیسی می‌شود. که باعث ایجاد نیروهای لورنتس شعاعی و به طرف مرکز نازل شده و فشار موثر بر روی سیال رسانا پشت سوراخ نازل زیاد می‌شود. با تغییر فاز ولتاژ اعمالی و ورود به ناحیه منفی پالس ورودی، جریان‌های گردابی

درون سیال به جهت عکس وارد شده و این بار جهت نیروهای لورنتس به سمت دیواره‌های نازل خواهد بود. نیروی لورنتس در جهت عکس باعث فشار موثر در جهت عکس شده و سیال به سمت حوضچه کشیده می‌شود. افزایش ولتاژ بر روی بسامد قطرات خارج شده از نازل نیز تأثیر بسیار زیادی دارد. به‌طوری‌که با ثابت بودن تمامی پارامترهای فرایند، نرخ تولید قطرات با افزایش میزان ولتاژ، بیشتر می‌گردد.

۲- مروری بر منابع

در روش چکاندن قطرات بر حسب تقاضا ابتدا فاز مذاب در حجم کوچک تولید و در مخزنی نگهداری می‌شود. در گام بعدی مذاب در معرض محرک منقطع قرار می‌گیرد و به صورت قطره به بیرون از نازل پرتاب می‌گردد. در فناوری‌های مختلف انواع محرک‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله فناوری‌های مورد استفاده می‌توان به جت الکترومغناطیس[1] و پیزوالکتریک[2] اشاره نمود.

بررسی تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که انواع مختلفی از محرک‌ها برای جریان منقطع مورد استفاده قرار گرفته است. عموما چهار نوع پمپ بیش از بقیه برای قطره‌سازی به کار گرفته می‌شود که عبارتند از: الف) پمپ پیزوالکتریک، ب) پمپ الکترومغناطیسی، ج) پمپ الکتروهیدرودینامیک و د) پمپ پنوماتیکی. علاوه بر این چهار پمپ، روش‌های دیگری نیز در تحقیقات مختلف مورد استفاده قرار گرفتند از جمله: الف) پمپ ارتعاشی، ب) پمپ حرارتی، ج) پمپ مکانیکی و د) شوک مکانیکی. در جدول ۱ تحقیقات مختلف بر روی جریان‌های منقطع تولید کننده قطرات بر حسب تقاضا گرداوری شده است.

جانگ و همکارانش[12] در سال ۲۰۰۰ به بررسی و شبیه سازی میدان مغناطیسی حاکم بر فلز مذاب پرداختند و روابط حاکم بر آن، از جمله میزان فشار اعمالی، ولتاژ و جریان را در این مکانیزم محاسبه نمودند.

مفهوم پایه الکتروهیدرومغناطیس این است که میدان مغناطیسی می‌تواند در یک سیال رسانای درحال حرکت جریان القا کند، که نتیجه ی آن قطبی کردن سیال و تغییر دادن همان میدان مغناطیسی است[13]. معادلات حاکم بر مگنتوهیدرودینامیک برای سیال نیوتونی شامل معادله ناویر-استوکس، پیوستگی جرم و معادله‌ی ماکسول است. فرم دیفرانسیلی این معادلات به صورت زیر است.

$$u\frac{\delta\rho}{\delta t}+\rho u\cdot\nabla u=-\nabla p+\mu\nabla^2 u+f_{MHD} \quad (۱)$$

$$\frac{\delta\rho}{\delta t}+\nabla\cdot(\rho u)=0 \quad (۲)$$

$$f_{MHD}=J\times B+\rho E \quad (۳)$$

$$\nabla\times E=-\frac{\delta B}{\delta t} \quad (٤)$$

$$\nabla\times B=\mu_0 J \quad (٥)$$

$$J=\sigma E+\sigma u\times B \quad (٦)$$

به علاوه‌ی روابط بالا داریم:

$$\nabla\cdot B=0 \quad (۷)$$

$$\nabla\cdot J=0 \quad (۸)$$

فرآیند مگنتوجت بر اساس اصول مگنتوهیدرودینامیک (هیدرومغناطیسی) شامل مطالعه دینامیک میدان‌های مغناطیسی در سیالات رسانای الکتریکی است. گسترده‌ترین کاربرد مگنتوهیدرودینامیک ریخته‌گری پیوسته فلزات است، اولین نمونه اولیه پمپ مگنتوهیدرودینامیک در سال ۱۹۰۷ ساخته شد و از آن زمان برای کاربردهای مختلفی مانند معلق کردن، کنترل جریان فلزات مذاب، گرمایش، تولید برق و محصور کردن مغناطیسی پلاسما استفاده شده است. با استفاده از پمپ مگنتوهیدردینامیک میتوان سیال مذاب را در دمای بالا به صورت قطره بر حسب تقاضا از نازل خارج کرد.

وادر و همکارانش[11] در سال ۲۰۱۸ از سامانه مگنتوهیدرودینامیک در چاپگرهای سه بعدی استفاده کرده و نتایج قابل توجهی به‌دست آورده‌اند. فرایند ساخت افزودنی در این پژوهش به این صورت است که در ابتدا فیلامنت آلومینیوم با استفاده از سامانه تغذیه وارد نازل شده و با استفاده از سامانه حرارتی ذوب می‌شود. کویل الکترومغناطیس اطراف نازل را احاطه کرده و با اعمال ولتاژ پالسی به کویل میدان مغناطیسی در سیال

جدول ۱) مشخصات و ویژگی‌های تحقیقات منتشر شده بر روی ایجاد جریان منقطع و تولید قطرات بر حسب تقاضا.

عامل محرک	نوع سیال	دمای کاری	فرکانس	قطر نازل	اندازه قطره	منبع
		°C	Hz	mm	mm	
پمپ پیزوالکتریک	آلومینیوم خالص	۹۵۰-۱۳۵۰	۱۰-۱ هرتز	۰/۴۵	۰/۵	[3]
پمپ الکترومغناطیس	قلع خالص	۳۰۰-۶۰۰	۱۲۵	۰/۵	۰/۹	[4]
	فولاد آلیاژی AISI 52100	۱۶۵۰	۱۰	۴۳۷-۴۴۵-۵۳۸ µm	۱/۱۸ ۱/۲۴	[5]
پمپ‌های الکتروهیدرودینامیک	محلول نانوذرات نقره (۵۰٪ وزنی) در بوتیل-کاربیتول	۲۵	۵	۶µm	۶۹/۸µm	[6]
پمپ حرارتی	هیدروژل	۱-۸	-	-	۲	[7]
پمپ ارتعاشی	آلومینیوم	۸۵۰	۱۰	۴	۰/۸۲۵	[8]
پمپ پنوماتیکی	آلیاژ یوتکتیک قلع	۵۰-۶۰	-	۱۱-۲۶	۰-۲/۵	[9]
پمپ مکانیکی (سرنگ)	آلیاژ یوتکتیک گالیم	دمای اتاق	پیوسته	۸۴	-	[10]
شوک مکانیکی	پلی پروپیلن	۱۶۴-۱۷۰	۴	۴	۰-۴/۵	[11]

رسانای درون نازل شکل می‌گیرد. در ادامه جریان گردابی و نیروی لورنتس ایجاد می‌شود. طراحی نازل به گونه‌ای است که با اعمال نیروی لورنتس سیال رسانا به سمت دیواره‌های داخلی و در نهایت به سمت روزنه‌ی نازل حرکت می‌کند.

اساس کار پمپ الکترومغناطیسی نیروهایی است که از طرف دو میدان عمود بر هم الکتریکی و مغناطیسی بر مجموعه‌ای از ذرات باردار وارد می‌شود. برآیند حرکت ذرات تحت تاثیر این نیروها و نیز نیروهای داخلی ، مولفه ثابتی در یک جهت معین دارد ، به گونه‌ای که در رفتار ماکروسکوپی ذرات قابل مشاهده خواهد بود[14].کارمزدی و همکارانش[15] متناوب در داخل سیال رسانا در یک کانال بسته را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق اثر پارامترهای مختلف مشاهده گردید که زمان پیمایش طول کانال توسط سیال پارامتر هدف بود که تعیین کننده حداکثر فرکانس ممکن برای حرکت قطرات و در نهایت حداکثر دبی و فشار پمپ را نیز تعیین می کند.

سوخوتسی و همکارانش[1] نشان دادند که با افزایش بسامد خروج قطرات از نازل همبستگی بین قطرات منجمد شده بر روی صفحه ساخت بیشتر شده است. همچنین افزایش دمای صفحه ساخت باعث کاهش گرادیان حرارتی در فرایند انجماد قطرات خارج شده از نازل شده و هم‌بستگی بین قطرات افزایش پیدا کرده است .

لو و همکارانش[16] تأثیر قطر روزنه نازل بر قطر قطره آلومینیوم را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. زمانی که قطر نازل در محدوده ۳۰۰ میکرومتر است، قطر قطره به آرامی با افزایش قطر روزنه نازل افزایش می‌یابد. اما با افزایش قطره روزنه نازل بیش از ۳۰۰ میکرومتر، قطر قطرات نیز به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند. زمانی که قطر روزنه‌ی نازل از مقداری مشخص بیشتر می‌گردد نیروی گرانش سبب کشش قطرات مذاب به سمت پایین می‌شود و قطره ها به سمت بیرون به حرکت در می‌آیند. همچنین در آزمایشی دیگر توسط لو و همکارانش[17] دو ماده جیوه و قلع به عنوان ماده‌ی مصرفی در دستگاه تولید قطرات مذاب مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مشخص شد کاهش قطر نازل در نهایت کاهش قطر قطرات را به همراه داشته است. برای بررسی اثر بسامد بر قطرات خروجی تحقیقات مختلفی انجام شده است. آن ها در تولید قطرات مذاب جیوه اثر بسامد را بررسی نموده اند. با افزایش پالس‌های اعمال شده از صفر هرتز به ۱۵۰ هرتز، قطرات همیشه مطابق بسامد پالس تولید می‌شوند. از آنجایی که مدت زمان تول ید قطرات ثابت بود، میانگین قطر قطره با تغییر بسامد چاپ تغییر قابل توجهی نداشت. میدان مغناطیسی قوی تر منجر به نیروی محرکه بیشتر برای خروج قطرات می‌شود. در این آزمایش مشخص شد که افزایش میدان مغناطیسی از ۰/۲ به ۰/٤ تسلا، قطر قطرات نیز از ۰/۲۵۱ به ۰/۳۵٤ میلی‌متر افزایش می‌یابد.

به منظور بررسی تاثیر مدت زمان روشنی پالس‌های اعمالی بر سیال رسانای درون نازل آزمایشاتی توسط آن ها صورت پذیرفت. مشخص شد با افزایش مدت پالس از ۲/۵ به ۲۰ میلی‌ثانیه، قطر قطرات از ۰/۳۱۱ به ۰/٤۱۰ میلی‌متر افزایش یافته که نتیجه آن افزایش حجم خروج سیال از نازل پمپ مگنتوهیدرودینامیک قطره بر حسب تقاضا است. طبق آزمایشات لی و همکارانش[18] محدوده ولتاژ بین ۸/٦ تا ۱۰کیلوولت تنظیم گردید. در این آزمایش مشخص شد که در ولتاژ زیر ۸/۷ کیلوولت و مدت پلاس ۰/۲ میلی ثانیه با توجه به کافی نبودن نیروی لورنتس قطره ای ایجاد نشده و با افزایش ولتاژ، قطره قبل از جدا شدن کشیده شده و چندین گلویی ایجاد می‌شود. همچنین در ولتاژهای پایین ایجاد قطرات درشت‌تری را می‌توان مشاهده نمود.

با توجه به مطالعات صورت گرفته برای ایجاد جریان منقطع فلز قلع مذاب، محدوده مناسب بسامد بین ۵ تا ۲۰ در نظر گرفته خواهد شد. میزان ولتاژ نیز به در محدوده‌ی بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ ولت قابل بررسی خواهد بود. دیگر عامل مهم در ایجاد جریان مورد نظر زمان روشنی پالس است که این میزان در ازمایشات مذکور طبق تحقیقات صورت گرفته ۱ و ۱/۵ میلی‌ثانیه انتخاب گردید. در نهایت با طراحی آزمایش مناسب در محدوده‌ی های ذکر شده نتایج حاصل که خروج قطرات خواهد بود مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد و بهینه‌ترین حالت ممکن برای تولید قطرات بیشتر در زمانی کمتر و همچنین قطراتی با قطر دانه کمتر، به دست خواهد آمد. در بررسی آزمایشات شکل دانه‌ها هم از اهمیت زیادی برخوردار است و این ویژگی نیز کیفیت قطرات خروجی رو مشخص می‌کند.

۳- مواد و روش‌ها

در ابتدا پمپ مگنتوهیدرودینامیک قطره بر حسب تقاضا طراحی و ساخته شده است. این پمپ از برد قدرت و برد فرمان تشکیل شده و با استفاده از این پمپ میتوان ولتاژ پالسی به کویل اعمال کرد. طراحی پمپ به گونه‌ای صورت گرفته که می‌توان ولتاژ، بسامد و زمان روشنی پالس را به دلخواه تغییر داد. خروجی پمپ به کویل الکترومغناطیس متصل شده و کویل الکترومغناطیس اطراف نازل را احاطه می‌کند. فلز قلع به صورت گرانول و براکت در نازل ریخته شده و با استفاده از سامانه حرارتی، ذوب می‌شود. در ادامه با اعمال ولتاژ پالسی نیروی لورنتس شکل گرفته و با حرکت سیال درون نازل و هندسه داخلی نازل سبب حرکت سیال به سمت روزنه نازل شده و مذاب قلع به صورت قطره بر حسب تقاضا از نازل به بیرون پرتاب می‌شود.

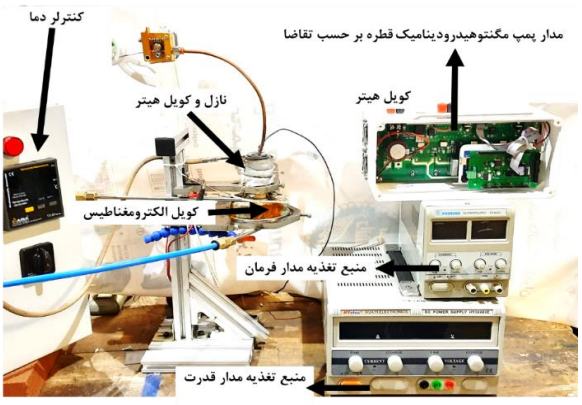
نازل با طراحی جدید از جنس استیل غیر مغناطیس ساخته شده است که علاوه بر دقت ابعادی بالا توانایی تحمل تنش حرارتی بالا نیز دارد. این نازل همانند نازل سرامیکی و نازل پلیمری از دو بخش تشکیل شده است. فلز رسانا به صورت فیلامنت یا گرانول از بالای نازل به داخل ریخته می شود. با استفاده از هیتر گرم شده و با پمپ مگنتوهیدرودینامیک به بیرون از نازل پرتاب می شود. نازل استیل در شکل ۱ نشان داده شده است.

در پمپ مگنتوهیدرودینامیک قطره بر حسب تقاضا ، ولتاژ وارد

شکل ۱) نازل استیل

شده به دو سر سیم‌پیچ، باعث ایجاد جریان الکتریکی و نهایتاً میدان مغناطیسی اطراف آن می‌شود. میدان مغناطیسی متغیر با زمان، موجب به‌وجودآمدن جریان‌های گردابی درون سیال رسانا شده و کوپل شدن این جریان گردابی و میدان مغناطیسی خارجی، باعث ایجاد نیروی لورنتس می‌شود. بدیهی است که با تغییر نیروی لورنتس، فشار پشت سیال برای خروج قطره از روزنه‌ی نازل و سپس ، مشخصه‌های قطرات تولیدی تغییر خواهد کرد؛ چرا که اندازه بار الکتریکی القایی در سیال رسانا و توزیع جرم در قطره خارج شده از نازل، به‌شدت وابسته به خواص سیال و عامل موثر ولتاژ است. همچنین نازل به گونه‌ای طراحی و ساخته شده که با اعمال نیروی لورنتس سیال رسانا درون نازل به سمت پایین و روزنه خروجی نازل حرکت می‌کند.

در این پژوهش برای انجام آزمایش ها مطابق جدول طراحی آزمایش، بسامد در سه سطح و زمان روشنی پالس در دو سطح تغییر یافته است. تغییر بسامد و زمان روشنی پالس مستلزم تغییر کد نصب شده بر روی مدار فرمان است. همچنین برای تغییر ولتاژ اعمالی به دو سر سیم پیچ از منبع تغذیه مدار قدرت استفاده شده است. با توجه به جدول طراحی آزمایش شش کد مختلف بر روی مدار فرمان نصب شده و آزمایش‌های مربوط به هرکدام از این کدها در دو ولتاژ ۲۰۰ و ۲۸۰ ولت انجام شده است. کدها در نرم افزار آردوینو نوشته و بر روی برد آردینو بارگذاری شده است. در شکل ۲ نمای کلی دستگاه به تصویر کشیده است.



شکل ۲) نمای کلی از دستگاه طراحی شده

٤- نتایج و تحلیل

در این پژوهش به بررسی عوامل تاثیرگذار بر شکل، اندازه و تعداد قطرات خروجی از نازل پرداخته شده است. عوامل مورد بررسی شامل ولتاژ، فرکانس، زمان روشنی پالس، دمای نازل و جنس ماده اولیه است. همچنین مطابق پژوهش‌های پیشین هندسه نازل تغییر داده شده و فاصله بهینه مغزی نازل از کف استوانه نازل به‌دست آمده است. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش مطابق جداول ثبت گردیده و میزان و جهت تاثیر عوامل در نمودارها نشان داده شده است. در این پژوهش از بین عوامل مورد بررسی، موثرترین عامل شناسایی و میزان تاثیرگذاری آن مشخص گردیده است. همچنین عوامل ولتاژ در دو سطح ۲۰۰ و ۲۸۰ ولت، بسامد در سه سطح ۵، ۱۲ و ۲۰ هرتز، زمان روشنی پالس در دو سطح ۱ و ۱/۵ میلی‌ثانیه و همچنین دما در دو سطح ۲۵۰ و ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از فلز قلع خالص بررسی شده است. مدت زمان هر آزمایش یک دقیقه و قطرات خارج شده از نازل در همین مدت زمان شمارش شده و همچنین نمودارها تاثیر عوامل موثر بر تعداد قطرات خروجی از نازل پمپ مگنتوهیدرودینامیک قطره بر حسب تقاضا را نشان می‌دهند.

٤-١- بررسی تاثیر ولتاژ، بسامد و زمان روشنی پالس در دمای ۳۲۰℃

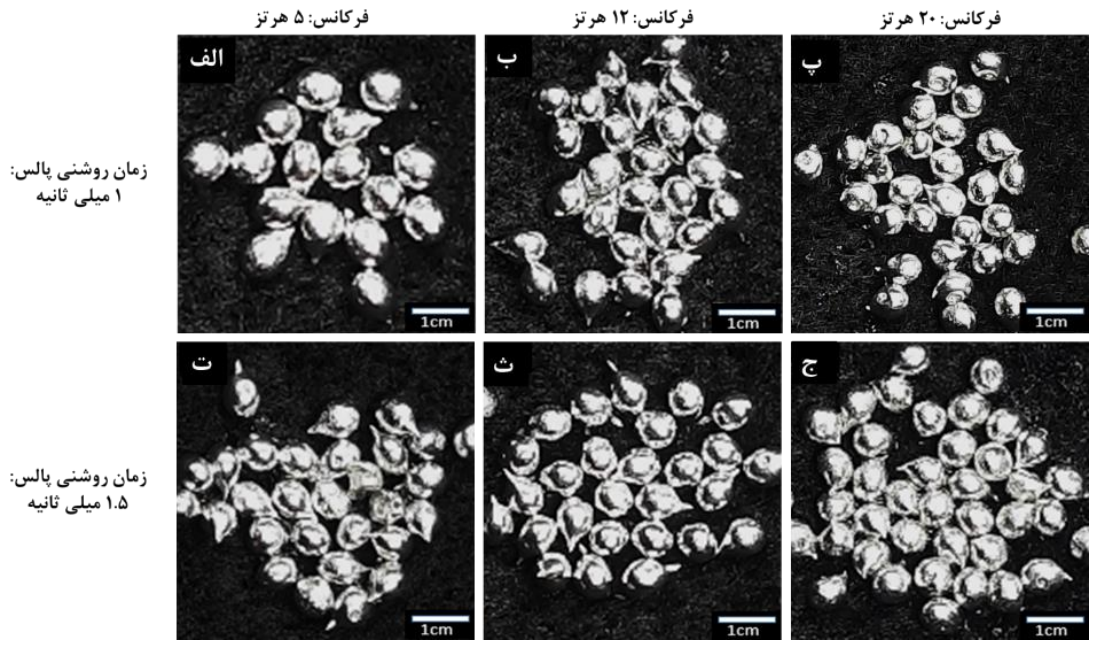
در ابتدا به بررسی تاثیر فرکانس، ولتاژ و زمان روشنی پالس پمپ مگنتوهیدرودینامیک قطره بر حسب تقاضا بر تعداد قطرات خروجی از نازل در آلیاژ قلع خالص در دمای ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد پرداخته می‌شود. در مرحله‌ی اول میزان ولتاژ ثابت و برابر با ۲۰۰ ولت انتخاب گردید. دو عامل بسامد و زمان روشنی پالس در حالات مختلف تغییر داده شدند که تاثیر آن ها بر اندازه‌ی دانه ها و همچنین تعداد دانه ها در شکل ۳ نشان داده شده است. افزایش بسامد از ۵ به ۱۲ هرتز به معنی افزایش تعداد دفعات اعمال نیرو به مذاب فلزی خواهد بود. کم بودن میزان بسامد سبب ایجاد دانه های درشت و نامناسب و افزایش بیش از حد بسامد نیز از ایجاد جریان منقطع جلوگیری می‌کند. در آزمایش پیشرو نیز به خوبی تاثیر افزایش بسامد بر تعداد دانه‌های تولیدی قابل مشاهده است. در قسمت دیگر آزمایش، زمان روشنی از ۱ به ۱/۵ ثانیه افزایش یافته است. این امر سبب اعمال نیروی بیشتر به منظور جدایش قطره از جریان اصلی مذاب می‌شود و از گلویی شدن قطرات جلوگیری می‌کند بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش زمان روشنی پالس دانه‌ها با کیفیت مطلوب‌تری تشکیل شده که این موضوع نیز در شکل ۳ نیز نشان داده شده است.

در گام بعدی آزمایش قبل تنها با یک تغییر و افزایش ولتاژ از ۲۰۰ ولت به ۲۸۰ ولت تکرار گردید. نتایج این آزمایش‌هادر شکل ٤ نشان داده شده است. همان‌طور که قبلا نیز اشاره شده افزایش ولتاژ به معنای ایجاد نیروی القایی قوی تر در داخل مذاب خواهد بود و انتظار می‌رود این افزایش ولتاژ، افزایش تعداد دانه‌ها را به

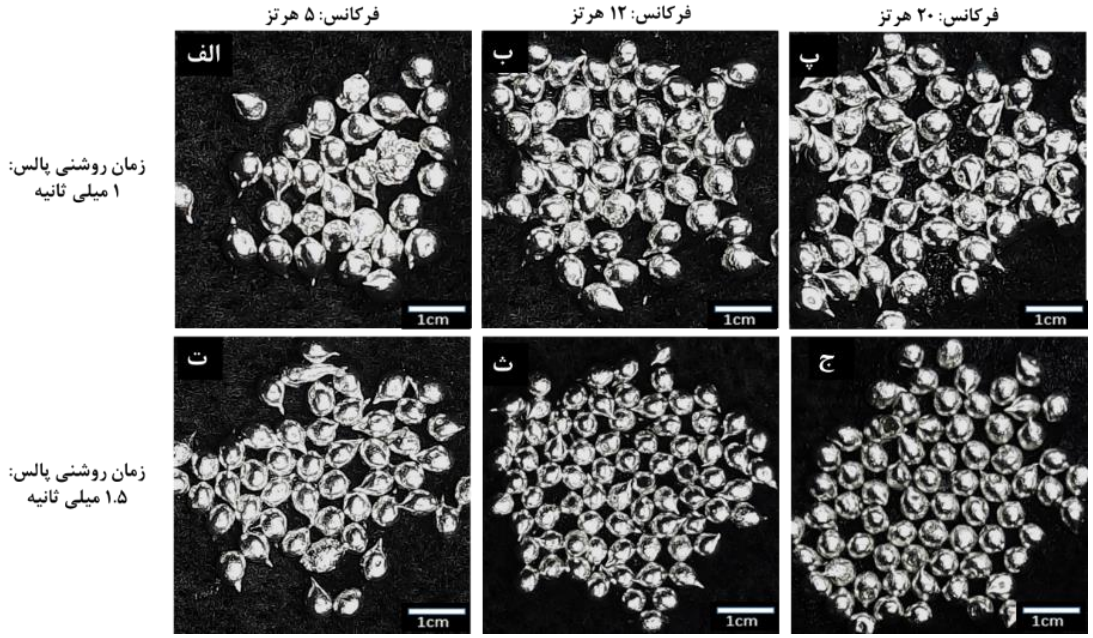
همراه داشته باشد با مقایسه منتاظر شکل ۳ و شکل ٤ مشاهده می‌شود که با شرایط برابر و تنها با افزایش ولتاژ بیشتر، تعداد دانه-های بیشتری تولید می‌گردد.

٤-۲- بررسی تاثیر بسامد و زمان روشنی پالس در دمای ۳۲۰°C

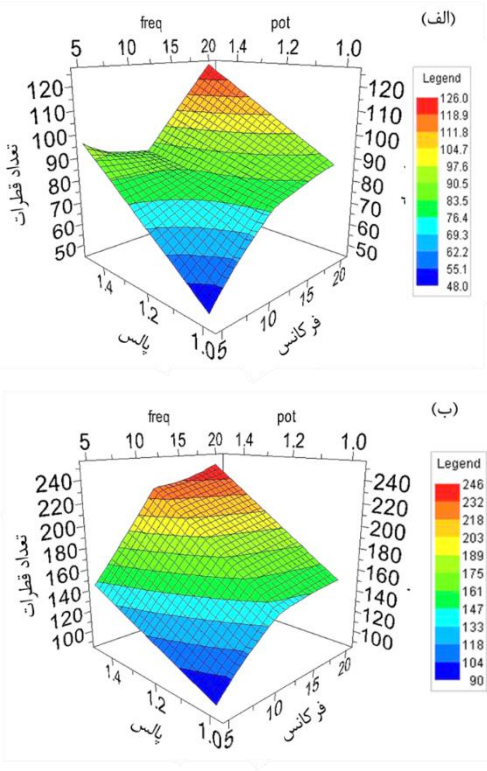
شکل (۵ الف) و (۵ ب) تاثیر افزایش زمان روشنی پالس و بسامد را بر تعداد قطرات خروجی از نازل پمپ مگنتوهیدرودینامیک قطره بر حسب تقاضا را به ترتیب در ولتاژ ثابت ۲۰۰ و ۲۸۰ نشان می‌دهد. افزایش ولتاژ از ۲۰۰ ولت به ۲۸۰ ولت سبب افزایش تعداد قطرات خارج شده از نازل در مدت زمان ثابت یک دقیقه شده است. با افزایش بسامد و زمان روشنی پالس تعداد قطرات خروجی از نازل در ولتاژ ۲۰۰ و ۲۸۰ ولت در مدت زمان ثابت یک دقیقه افزایش پیدا می‌کند. در این قسمت زمان روشنی پالس به عنوان یک عامل موثر در دو سطح یک و یک ونیم میلی‌ثانیه بررسی شده است. به دلیل استفاده از سیم‌پیچ با ۲۰۰ دور، ایندکتنس سیم‌پیچ به‌عنوان یک عامل قابل ملاحظه در زمان‌های روشنی پالس که در حدود میلی‌ثانیه و میکروثانیه قرار دارند در نظر گرفته شده است. تاثیر عامل ایندکتنس به این صورت است که موجب تأخیر زمان اشباع جریان در سیم‌پیچ شده بنابراین سیم‌پیچ در مدت زمان۱/۵ میلی‌ثانیه به اشباع جریان مورد نظر نمی‌رسد. با اعمال ولتاژ میزان



شکل ۳) نتایج حاصل از تغییر بسامد و زمان روشنی پالس قلع خالص در ولتاژ ۲۰۰ ولت و در دمای ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۴) نتایج حاصل از تغییر بسامد و زمان روشنی پالس قلع خالص در ولتاژ ۲۸۰ ولت و در دمای ۳۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد



شکل ۵) تعداد قطرات قلع خالص در دمای ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد خروجی از نازل در ولتاژ ۲۰۰ و۲۸۰ ولت به ترتیب شکل (الف) و (ب)

جریان عبوری از سیم‌پیچ افزایش می‌یابد. افزایش جریان عبوری از سیم پیچ موجب افزایش جریان گردابی تشکیل شده در سیال رسانا بوده و افزایش جریان گردابی باعث افزایش نیروی لورنتس می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که زمان اعمال فشار پشت سیال برای ایجاد قطره بیشتر بوده و لذا تعداد قطرات تولید شده در آزمایش‌های با روشنی پالس ۱/۵میلی‌ثانیه، از تعداد قطرات تولیدی با روشنی پالس ۱ میلی‌ثانیه بیشتر است.

٤-٣- بررسی تاثیر ولتاژ و زمان روشنی پالس در دمای ۳۲۰ ℃ و بسامد ثابت ۵، ۱۲ و ۲۰ هرتز

در بسامد ثابت با افزایش ولتاژ و افزایش زمان روشنی پالس تعداد قطرات خارج شده از نازل در مدت زمان ثابت یک دقیقه افزایش می‌یابد. و همچنین تاثیرگذاری عامل ولتاژ از زمان روشنی پالس بیشتر است. بسامد پمپ در واقع نشان دهنده‌ی تعداد اعمال نیروی لورنتس و یا تعداد اعمال فشار موثر در یک ثانیه است. در این پژوهش سه بسامد ۵، ۱۲ و ۲۰ هرتز مورد مطالعه قرار گرفته شده و با افزایش تعداد اعمال فشار موثر بر سیال رسانای درون نازل تعداد قطرات خروجی از نازل در واحد زمان و با ثابت نگه داشتن سایر عوامل موثر تحت کنترل افزایش یابد.

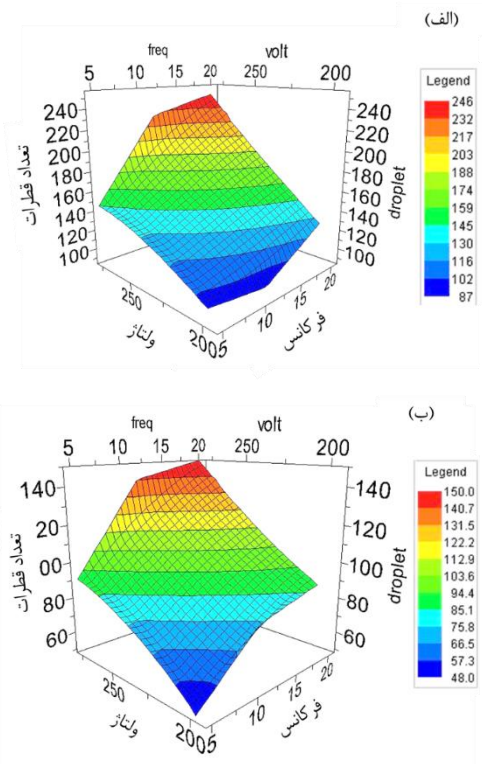
در ادامه تاثیر ولتاژ و زمان روشنی پالس پمپ مگنتوهیدرودینامیک قطره بر حسب تقاضا بر تعداد قطرات خروجی از نازل در قلع خالص در دمای ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد نیز مورد مطالعه قرار گرفت. افزایش ولتاژ سبب افزایش میدان مغناطیسی و طبع آن افزایش جریان گردابی سیال رسانای درون نازل می‌شود. نیروی لورنتس وابسته به میدان مغناطیسی و جریان گردابی است. بنابراین با افزایش جریان گردابی و میدان مغناطیسی نیروی لورنتس افزایش پیدا کرده و در واقع فشار موثر بر خروج قطرات از نازل پمپ مگنتوهیدرودینامیک قطره بر حسب تقاضا افزایش می‌یابد.

٤-٤- بررسی تاثیر ولتاژ و بسامد در دمای ۳۲۰℃ و زمان روشنی پالس ثابت ۱ و ۱/۵ میلی‌ثانیه

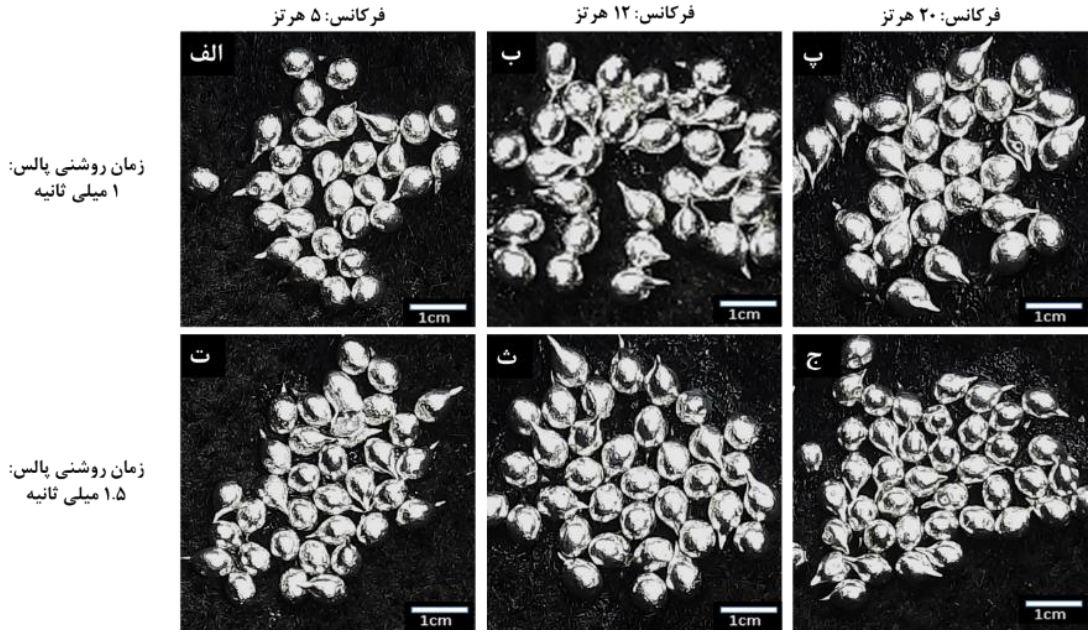
بسامد پمپ مگنتوهیدرودینامیک قطره بر حسب تقاضا نشان دهنده تعداد اعمال ولتاژ پالسی در یک ثانیه به کویل الکترومغناطیس است. با افزایش تعداد اعمال ولتاژ پالسی، تعداد نیروی لورنتس و تعداد فشار موثر بر سیال رسانای درون نازل افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد با افزایش بسامد پمپ، تعداد قطرات خروجی از نازل افزایش می‌یابد. زیرا تعداد اعمال نیرو بر سیال درون نازل افزایش یافته و فرایند شکل گیری قطره در زمان کمتری رخ می‌دهد. مطابق شکل (٦ الف) و (٦ ب) با افزایش ولتاژ و بسامد تعداد قطرات خروجی از نازل افزایش می یابد و ولتاژ در این امر موثر تر از بسامد است.

٤-٥- بررسی تاثیر ولتاژ، بسامد و زمان روشنی پالس و دمای۲۵۰℃

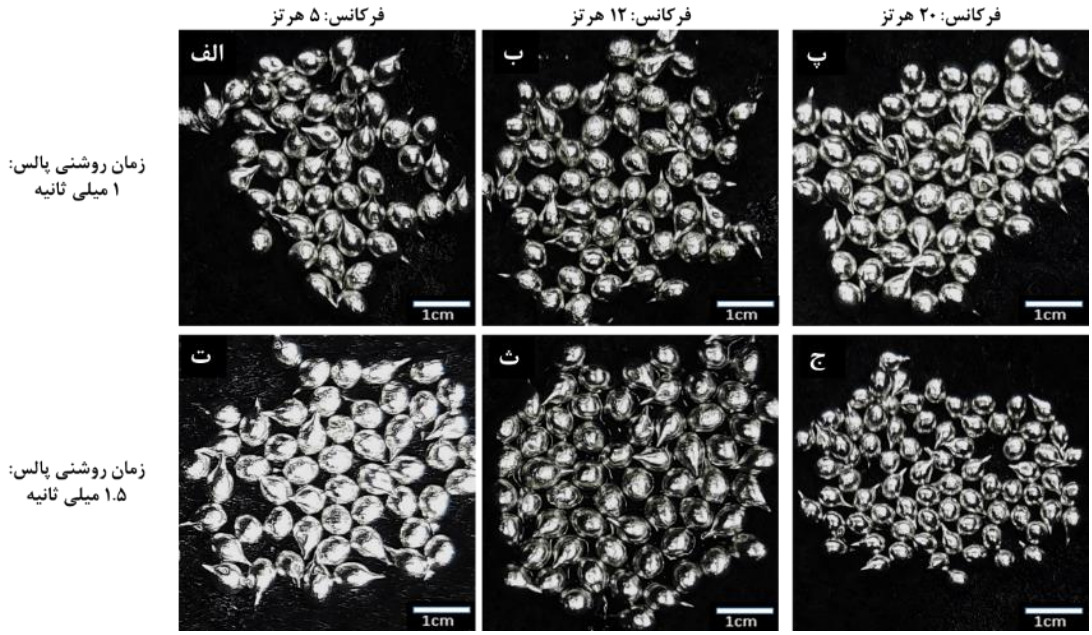
تاثیر بسامد، ولتاژ و زمان روشنی پالس پمپ مگنتوهیدرودینامیک قطره بر حسب تقاضا بر تعداد قطرات خروجی از نازل در آلیاژ قلع خالص در دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد بخش دیگری از آزمایش‌ها صورت گرفته است که تصاویر ماکرو از دانه های تولیدی در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است. در



شکل ۶) تاثیر ولتاژ و بسامد بر تعداد قطرات خروجی آلیاژ قلع خالص در دمای ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۷) نتایج حاصل از تغییر بسامد و زمان روشنی پالس قلع خالص در ولتاژ ۲۰۰ ولت و در دمای ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد



شکل ۸) نتایج حاصل از تغییر بسامد و زمان روشنی پالس قلع خالص در ولتاژ ۲۸۰ ولت و در دمای ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد

این آزمایش‌ها ابتدا ولتاژ فرایند ۲۰۰ ولت (شکل ۷) و سپس ۲۸۰ ولت (شکل ۸) تنظیم گردید.

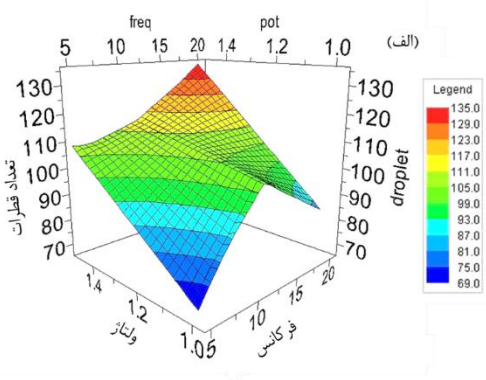
۶-۴- بررسی تاثیر بسامد و زمان روشنی پالس در دمای ۲۵۰°C و ولتاژ ثابت ۲۰۰ و ۲۸۰ ولت

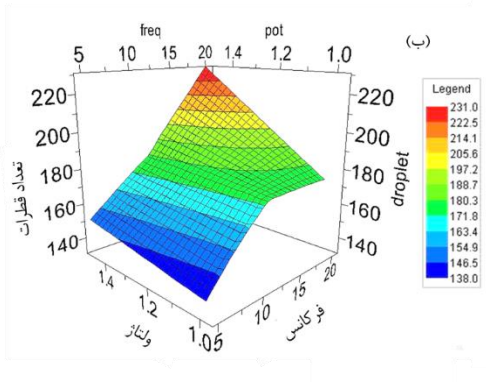
مطابق نتایج آزمایش های پیشین و شکل (۹ الف) و (۹ ب) با افزایش بسامد و زمان روشنی پالس تعداد قطرات خروجی از نازل در ولتاژ ۲۰۰ و ۲۸۰ ولت در مدت زمان ثابت یک دقیقه افزایش پیدا می‌کند.

٤-۷- بررسی تاثیر ولتاژ و بسامد در دمای ۳۲۰ و زمان روشنی پالس ثابت ۱ و ۱/۵ میلی‌ثانیه

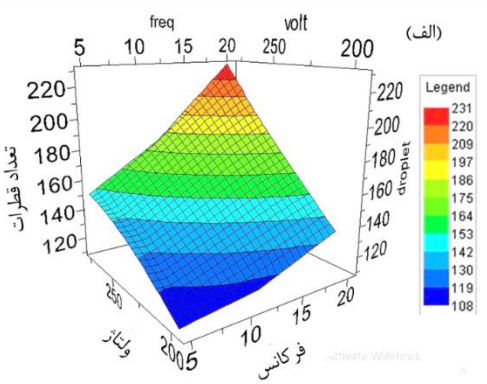
شکل (۱۰ الف) و (۱۰ب) بررسی تاثیر ولتاژ و بسامد را به ترتیب برای زمان روشنی پالس یک و یک و نیم میلی‌ثانیه بر تعداد قطرات خروجی از نازل در قلع خالص در دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد را نشان می‌دهد.

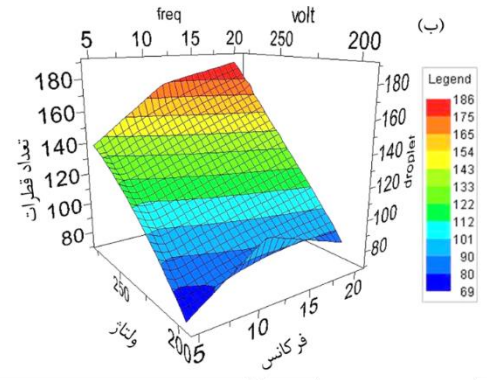
تکرار آزمایشات در شرایط مختلف تاثیرات عوامل ولتاژ، فرکانس، دما و زمان روشنی پالس را بارها تایید نموده است. در آزمایش-های صورت گرفته این عوامل در اندازه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند و نتایج آن ها ارائه گردید. با بررسی این آزمایش‌ها می توان شرایط مختلف برای تولید دانه‌های فلزی با ویژگی‌های گوناگون را مشاهده نمود.





شکل ۹) تعداد قطرات قلع خالص در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد خروجی از نازل در ولتاژ ۲۰۰ و۲۸۰ ولت به ترتیب شکل (الف) و (ب)، میزان تاثیرگذاری بسامد و زمان روشنی پالس شکل (پ) و (ت)





شکل ۱۰) تاثیر ولتاژ و بسامد بر تعداد قطرات خروجی آلیاژ قلع خالص در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد

۵- نتیجه گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از تغییر عوامل موثر در سطح‌های مختلف به طور کلی افزایش ولتاژ، بسامد و زمان روشنی پالس منجر به افزایش تعداد قطرات خارج شده از نازل پمپ مگنتوهیدرودینامیک قطره بر حسب تقاضا می‌شود. افزایش ولتاژ از ۲۰۰ ولت به ۲۸۰ ولت باعث افزایش نیروی لورنتس و در نتیجه افزایش فشار موثر بر سیال رسانا درون نازل شده و با ثابت در نظر گرفتن یک و نیم میلی‌ثانیه برای زمان روشنی پالس و ۲۰ هرتز برای بسامد در مدت زمان ثابت یک دقیقه با افزایش ولتاژ از ۲۰۰ به ۲۸۰ ولت تعداد قطرات خروجی از نازل از ۱۲۶ به ۲۴۶ قطره افزایش پیدا کرده است. همچنین در زمان روشنی پالس یک میلی‌ثانیه و بسامد ۵ هرتز در مدت زمان یک دقیقه با افزایش ولتاژ از ۲۰۰ به ۲۸۰ ولت تعداد قطرات خروجی از نازل از ۴۸ به ۹۰ قطره افزایش پیدا کرده است.

افزایش زمان روشنی پالس از یک میلی‌ثانیه به یک و نیم میلی‌ثانیه باعث افزایش تعداد قطره خروجی از نازل در زمان ثابت شده زیرا با افزایش زمان روشنی پالس، مدت زمان اعمال نیرو و فشار موثر به سیال رسانای درون نازل افزایش می‌یابد. در ولتاژ ۲۸۰ ولت و بسامد ۲۰ هرتز با افزایش زمان روشنی پالس از یک به یک و نیم میلی‌ثانیه تعداد قطرات خروجی از نازل از ۱۵۰ به ۲۴۶ قطره افزایش پیدا کرده است. همچنین در بسامد ۵ هرتز و ولتاژ ۲۰۰ ولت با افزایش زمان روشنی پالس از یک به یک و نیم میلی‌ثانیه تعداد قطرات خروجی از نازل از ۴۸ به ۹۶ قطره افزایش پیدا کرده است. افزایش بسامد پمپ مگنتوهیدرودینامیک قطره بر حسب تقاضا باعث افزایش تعداد قطرات خروجی از نازل در زمان ثابت شده است. در ولتاژ ۲۸۰ ولت و زمان روشنی پالس یک و نیم میلی‌ثانیه با افزایش بسامد از ۵ به ۲۰ هرتز تعداد قطرات خروجی از نازل از ۱۴۴ به ۲۴۶ قطره افزایش پیدا کرده است. همچنین در ولتاژ ۲۰۰ ولت و زمان روشنی پالس یک میلی‌ثانیه با افزایش بسامد از ۵ به ۲۰ هرتز تعداد قطرات خروجی از نازل از ۴۸ به ۸۷ قطره افزایش پیدا کرده است. افزایش دما از ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به ۳۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بیشترین میزان تاثیرگذاری تغییر عوامل پمپ مگنتوهیدرودینامیک قطره بر حسب تقاضا بر روی تعداد قطرات خروجی از نازل در زمان ثابت به ترتیب مربوط به ولتاژ، بسامد و زمان روشنی پالس است.

نشانه‌ها

B چگالی شار مغناطیسی

E میدان مغناطیسی

f نیرو

J چگالی جریان
P فشار سیال
t زمان
u سرعت سیال
μ_f ویسکوزیته دینامیکی سیال
ρ چگالی سیال
σ رسانایی الکتریکی

تأییدیهٔ اخلاقی: ما نویسندگان مقاله " تحلیل تجربی و عددی جریان منقطع مذاب قلع در پمپ الکترومغناطیس و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر هندسه جریان " اعلام می‌نماییم که این مقاله در هیچ نشریه ایرانی یا غیر ایرانی به چاپ نرسیده است.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام مینمایند که اسامی تمام کسانی که در این پژوهش نقش داشته اند و به عنوان نویسنده مقاله مطرح هستند در این مقاله درج شده اند. از این‌رو هیچگونه تعارض منافعی وجود ندارد.

منابع مالی: برای انجام این پژوهش از امکانات آزمایشگاهی دانشگاه تهران و هزینه های شخصی بهره گرفته شده است و اعلام می‌نماییم منبع مالی دیگری در این پژوهش استفاده نشده است.

٦- منابع

1- V. Sukhotskiy, P. Vishnoi, I. H. Karampelas, S. Vader, Z. Vader, and E. P. Furlani, "Magnetohydrodynamic Drop-on-Demand Liquid Metal Additive Manufacturing: System Overview and Modelling," *Proc. 5th Int. Conf. Fluid Flow, Heat Mass Transf.*, no. 155, pp. 1–6, 2018, doi: 10.11159/ffhmt18.155.

2- J. Luo, L. H. Qi, J. M. Zhou, X. H. Hou, and H. J. Li, "Modeling and characterization of metal droplets generation by using a pneumatic drop-on-demand generator," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 3, pp. 718–726, 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.04.014.

3- S. Y. Zhong, L. H. Qi, W. Xiong, J. Luo, and Q. X. Xu, "Research on mechanism of generating aluminum droplets smaller than the nozzle diameter by pneumatic drop-on-demand technology," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 93, no. 5–8, pp. 1771–1780, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0484-x.

4- U. Daalkhaijav, O. D. Yirmibesoglu, S. Walker, and Y. Mengüç, "Rheological Modification of Liquid Metal for Additive Manufacturing of Stretchable Electronics," *Adv. Mater. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1002/admt.201700351.

5- L. Wang and J. Liu, "Liquid phase 3D printing for quickly manufacturing conductive metal objects with low melting point alloy ink," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 57, no. 9, pp. 1721–1728, 2014, doi: 10.1007/s11431-014-5583-4.

6- T. Ottnad, M. Kagerer, F. Irlinger, and T. C. Lueth, "Modification and further development of a drop on demand printhead for wax enabling future 3D-printing and rapid prototyping," *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, AIM*, pp. 117–122, 2012, doi: 10.1109/AIM.2012.6265958.

7- M. Suter, E. Weingärtner, and K. Wegener, "MHD printhead for additive manufacturing of metals," *Procedia CIRP*, vol. 2, no. 1, pp. 102–106, 2012, doi: 10.1016/j.procir.2012.05.049.

8- S. I. Moqadam, L. Mädler, and N. Ellendt, "A high temperature drop-on-demand droplet generator for metallic melts," *Micromachines*, vol. 10, no. 7, pp. 1–12, 2019, doi: 10.3390/mi10070477.

9- S. Y. Zhong, L. H. Qi, J. Luo, H. S. Zuo, X. H. Hou, and H. J. Li, "Effect of process parameters on copper droplet ejecting by pneumatic drop-on-demand technology," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 12, pp. 3089–3097, 2014, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.07.012.

10- H. P. Li, H. J. Li, L. H. Qi, J. Luo, and H. S. Zuo, "Simulation on deposition and solidification processes of 7075 Al alloy droplets in 3D printing technology," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.*, vol. 24, no. 6, pp. 1836–1843, 2014, doi: 10.1016/S1003-6326(14)63261-1.

11- S. Vader, Z. Vader, I. H. Karampelas, and E. P. Furlani, "Advances in Magnetohydrodynamic Liquid Metal Jet Printing," no. 716, pp. 2–5.

12- J. Jang and S. S. Lee, "Theoretical and experimental study of MHD (magnetohydrodynamic) micropump," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 80, no. 1, pp. 84–89, Mar. 2000, doi: 10.1016/S0924-4247(99)00302-7.

13- I. Martynovich, "Magnetohydrodynamic Pump Work Simulation," *2018 Int. Russ. Autom. Conf.*, no. 5, pp. 1–5, 2018.

14- D. J. Hartl, G. J. Frank, and J. W. Baur, "Embedded magnetohydrodynamic liquid metal thermal transport : validated analysis and design optimization," 2016, doi: 10.1177/1045389X16657429.

15-Karmozdi. M, Shafiei. B, Afshin. H," Investigation of the movement of the conductive liquid substance to identify the performance of the electromagnetic micropump", 1397, Annual Conference of Mechanical Engineering،Semnan،https://civilica.com/doc/817102 ".2018 (In Persian).

16- Z. Luo, Z. Li, X. Wang, and W. Li, "Fabrication of solder balls via electromagnetic jetting," *NEMS 2018 - 13th Annu. IEEE Int. Conf. Nano/Micro Eng. Mol. Syst.*, pp. 519–522, 2018, doi: 10.1109/NEMS.2018.8556903.

17- Z. Luo, X. Wang, L. Wang, D. Sun, and Z. Li, "Drop-on-demand electromagnetic printing of metallic droplets," *Mater. Lett.*, vol. 188, no. August 2016, pp. 184–187, 2017, doi: 10.1016/j.matlet.2016.11.021.

18- M. W. Lee, D. K. Kang, N. Y. Kim, H. Y. Kim, S. C. James, and S. S. Yoon, "A study of ejection modes for pulsed-DC electrohydrodynamic inkjet printing," *J. Aerosol Sci.*, vol. 46, pp. 1–6, 2012, doi: 10.1016/j.jaerosci.2011.11.002.