



## طراحی، ساخت و کالیبراسیون میکرو پمپ سرنگی برای کاربردهای میکروفلوئیدیک

محمد آذران<sup>۱</sup>، سجاد مظلوم باغسیاهی<sup>۲</sup>، مریم مقدم متین<sup>۳</sup>، بهنام معتکف ایمانی<sup>۴\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زیست شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- عضو هیئت علمی، گروه زیست شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: imani@um.ac.ir

## اطلاعات مقاله

## چکیده

## مقاله پژوهشی

دریافت: ۹ دی ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

## کلیدواژگان:

پمپ سرنگی

میکرو فلوئیدیک

کالیبراسیون

میکرو پمپ

امروزه دستگاه‌های میکروفلوئیدیک پتانسیل خودکارسازی طیف گسترده‌ای از عملیات شیمیایی و بیولوژیکی را ارائه می‌دهند که برای کاربردهای تشخیصی و درمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در کاربرد میکرو فلوئیدیک، میکرو پمپ ابزاری ضروری برای کنترل حجم کم سیال در ابعاد میکرو لیتر بوده، لذا توسعه میکرو پمپ اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش‌های زیادی در حوزه میکروفلوئیدیک در حال توسعه است که در زمینه‌های مختلف مانند زیست‌شناسی، شیمی و پزشکی-بالینی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در کاربردهای میکروفلوئیدیک، یکی از عناصر مهم میکرو پمپ‌ها می‌باشند. میکرو پمپ‌ها نقش کلیدی را در این کاربردها ایفا می‌کنند. اخیراً طراحی و ساخت میکرو پمپ‌ها توسعه پیدا کرده و انواعی از این پمپ‌ها ارائه شده که از چالش‌های مهم این پمپ‌ها هزینه، دقت در تزریق/مکش و یکنواختی حرکت است. در این پژوهش یک میکرو پمپ سرنگی طراحی و ساخته و با الگوریتم سینماتیکی حرکت با شتاب ثابت ارائه شده است. که از دستاوردهای این پمپ دقت بالا در تزریق و یکنواختی در حرکت که باعث ایجاد جریان یکنواخت در تزریق سیال می‌شود.

## Design, manufacturing and calibration of a micro syringe pump for micro-fluidics applications

Mohammad Azaran<sup>1</sup>, Sajjad Mazloom Baghsiahi<sup>2</sup>, Maryam Moghaddam Matin<sup>3</sup>, Behnam Moetakef Imani<sup>4\*</sup>

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- MSc Student, Department of Biology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Faculty Member, Department of Biology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

4- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

\* Corresponding Author's Email: imani@um.ac.ir

## Article Information

## Original Research Paper

Received: 30 December 2023

Accepted: 31 January 2024

## Keywords:

Syringe Pump

Microfluidic

Calibration

Micropump

## Abstract

Today, microfluidic devices offer the potential to automate a wide range of chemical and biological operations used for diagnostic and therapeutic applications. In micro-fluidics, the micro-pump is an essential equipment to control the micro-volume of fluid on the scale of micro-liter, so the development of the micro-pump has recently received much attention. Many research works are being developed in the field of a microfluidic devices, which are used in various fields such as biology, chemistry, and clinical medicine. In microfluidic applications, the most important elements are declared to the micropump. Micropumps play a key role in these applications. Recently, the design and construction of micro pumps have been developed and various types of these pumps have been designed, and the most important challenges of these pumps are cost, injection/suction accuracy, and uniformity of movement. In this research, a syringe micro-pump is designed and manufactured. In addition, the kinematic algorithm of movement with constant acceleration is thoroughly explained. One of the achievements of this pump is high accuracy in injection and uniformity in movement, which creates a uniform flow in fluid injection.

## Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Azaran M, Mazloom Baghsiahi S, Moghaddam Matin M, Moetakef Imani B. Design, manufacturing and calibration of a micro syringe pump for micro-fluidics applications. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 September 23;10(7):45-56. doi: 10.22034/IJME.2024.432467.1891 [In Persian]

## ۱- مقدمه

دستگاه‌های میکرو فلوئیدیک پتانسیل خودکارسازی طیف گسترده‌ای از عملیات شیمیایی و بیولوژیکی را ارائه می‌دهند که برای کاربردهای تشخیصی و درمانی با کارایی بالاتر و همچنین تکرارپذیری بالاتر قابل استفاده هستند. در کاربرد میکرو فلوئیدیک، میکرو پمپ ابزاری ضروری برای کنترل حجم کم سیال در ابعاد میکرو لیتر بوده، لذا توسعه میکرو پمپ اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱]. این پمپ‌ها با عملگرهای پیژوالکتریک، الکترواستاتیک، ترموپنوماتیک و الکترومغناطیسی و پمپ‌های سرنگی اخیراً بسط و توسعه پیدا کرده‌اند. دقت و هزینه بالا چالش‌های اصلی در توسعه این فناوری هستند [۲].

خودکارسازی و کوچک‌سازی از چالش‌های اصلی دیگر این فناوری است. در نتیجه طیف گسترده‌ای از دبی و حجم قابل برنامه‌ریزی برای تحقیقات میکرو فلوئیدیک به ارمغان می‌آورد. ذخیره‌سازی پیشرفته داده‌ها با قدرت تفکیک بسیار بالا و برنامه‌نویسی محاوره‌ای جهت تنظیم مقدار دقیق دوز از مزایای این فناوری است [۳، ۴].

مزایای پمپ‌های سرنگی:

۱- این پمپ‌ها بر اساس کاربرد، انعطاف در طراحی را ارائه می‌دهند:

به‌طور کلی، این نوع از پمپ‌ها از یک موتور پله‌ای تشکیل شده است، که می‌تواند سرو موتور یا موتور خطی هم باشد، که پیستون سرنگی را فشار می‌دهد و سیال را از مسیر سوزن خارج می‌کند، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است. طراحی ممکن است بسته به کاربرد متفاوت باشد. بسته به کاربرد ممکن است دارای قابلیت تزریق یا مکش یا هر دو قابلیت تزریق و مکش باشد. برخی از پمپ‌های سرنگی می‌توانند چندین سرنگی را در خود جای دهند. آن‌ها را می‌توان با دبی حجمی بسیار کوچک بین میلی‌لیتر تا میکرو لیتر، به کاربرد در حالی که دقت بسیار بالایی را حفظ می‌کنند. و همچنین استفاده از پمپ‌های سرنگی سریع و آسان است.

۲- قابلیت برنامه‌نویسی پارامترهای مختلف مطابق با نیاز پژوهشگر:

- به کاربر این امکان را می‌دهد که حجم کل سیال را تعریف کرده و آن را با دبی دقیق تزریق کند.
- می‌توانند فشار را کنترل کنند تا جابجایی سیال با ویسکوزیته بالا را تسهیل کنند.
- پمپ‌های مجهز به المان گرم‌کننده، کنترل دما را ارائه می‌دهند.
- امکان جابجایی بین سرنگ‌های مختلف را برای به حداکثر رساندن قابلیت استفاده فراهم می‌کنند.
- می‌توان برای دقت بالاتر و کنترل بهتر برنامه‌ریزی کرد و برخی از مدل‌ها را می‌توان به رایانه متصل کرد تا توسط رایانه کنترل شود و تاریخچه تزریق یا مکش را ثبت کند.

۳- میزان خطا در هنگام تحلیل آزمون‌ها و آزمایش‌های مختلف به حداقل می‌رسد که می‌توان به مواردی از جمله کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا<sup>۱</sup>، طیف‌سنجی جرمی<sup>۲</sup> و کروماتوگرافی مایع-طیف‌سنجی جرمی<sup>۳</sup> اشاره کرد [۵].

۴- به دلیل قابلیت اندازه‌گیری دقیق خود، تحقیقات کاربردهای میکروفلوئیدیک و همچنین حوزه‌های آزمایشگاه روی تراشه را تسهیل می‌کنند.

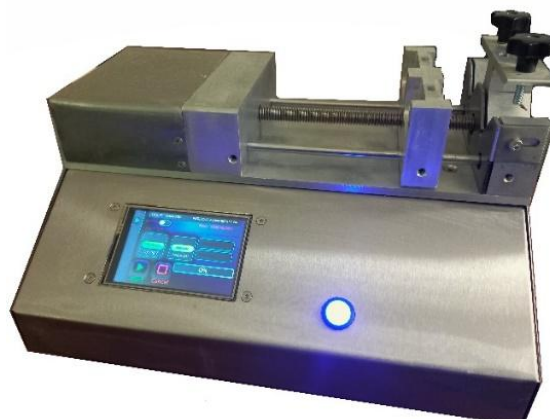
عوامل مهمی را که برای انتخاب این پمپ‌ها باید در نظر گرفت با مواردی مانند؛ زمان پاسخ و قدرت تفکیک یا حداقل زاویه قابل تنظیم روی موتور و پایداری جریان مشخص می‌شوند. حداقل حرکت موتور (زاویه گام موتور) پایداری جریان یک پمپ را تعیین می‌کند، در حالی که زمان پاسخ به مکانیک سیال، مقاومت سیستم میکرو فلوئیدیک بستگی دارد.

پمپ‌های سرنگی برای کاربردهای آزمایشگاهی توصیه می‌شوند، اما به محدودیت‌های عملیاتی آن‌ها که در بالا اشاره شد باید توجه نمود. به عنوان مثال جریان سیال غیریکنواخت می‌تواند از بزرگ بودن پله‌های حرکت موتور ناشی شده باشد. این جریان می‌تواند به صورت ضربه‌های پشت سر هم در سیال اعمال شود. الاستیسیته کم (لوله و سیستم صلب) منجر به ضربه در جریان سیال می‌شود. الاستیسیته بالا (لوله و سیستم الاستیک و وجود حباب‌های گاز) باعث تعدیل ضربات سیال می‌شود [۱].

<sup>1</sup> High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)

<sup>2</sup> Mass Spectrometry

<sup>3</sup> Liquid Chromatography-Mass Spectrometry (LC-MS)

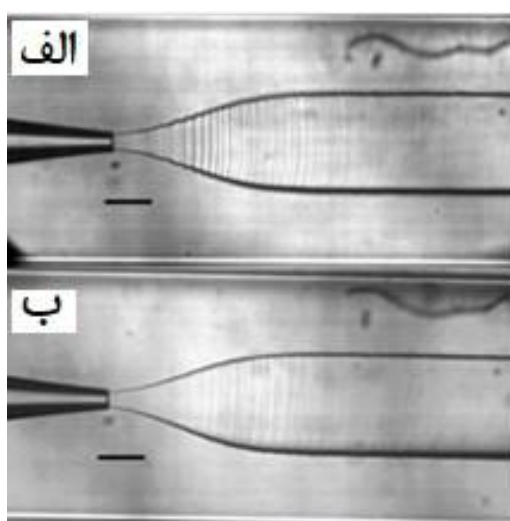


شکل ۱ پمپ سرنگی طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

جریان لایه‌ای یکنواخت در کاربردهای میکرو فلوئیدیک بسیار حائز اهمیت است. تغییرات کوچک در نرخ جریان باعث ایجاد اختلال در جریان در کانال‌های میکرو فلوئیدیک می‌شود.

- جریان لایه‌ای یکنواخت کنترل دقیقی بر واکنش‌های شیمیایی و فرآیندهای بیولوژیکی می‌دهد.
- جریان لایه‌ای و یکنواخت امکان تکرارپذیری بالا و عدم قطعیت کم را در مقیاس کوچک تزریق فراهم می‌کند.
- ایجاد قطره<sup>۱</sup> با اندازه بسیار دقیق نیازمند جریان لایه‌ای کاملاً یکنواخت است.
- یکی از مهم‌ترین دلایل استفاده از میکرو پمپ‌ها قابلیت کنترل میزان تزریق و تکرارپذیری و عدم قطعیت پایین در پارامترهای تزریق است. همچنین در کاربردهای پزشکی-بالینی از قبیل تزریق دارو به انسان جریان لایه‌ای یکنواخت اهمیت دوچندان پیدا می‌کند [۴].

سیستم‌های پمپ سرنگی وجود دارد که منابع آن‌ها به صورت رایگان در دسترس است و می‌توان آن‌ها را ساخت و استفاده کرد [۷، ۸]. اما یکی از چالش‌های مهم در این زمینه که کمتر در طراحی پمپ‌ها به آن توجه شده، مشکل عدم یکنواختی و لایه‌ای بودن جریان است که در یکی از تحقیقات مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. شکل ۲ این مشکل در جریان سیال را به وضوح نمایش می‌دهد. موج‌های ایجاد شده ناشی از پله‌ای بودن حرکت موتورهای پله‌ای استفاده شده می‌تواند موفقیت در انجام آزمایش‌ها را خدشه‌دار کند [۱].



شکل ۲ الف) سیال تزریق شده با پمپ سرنگی ب) سیال تزریق شده با استفاده از پمپ‌های تحت فشار<sup>۲</sup> [۱]

<sup>1</sup> Droplet

<sup>2</sup> Pressure-Driven Pumps

## ۲- روش تحقیق

در این پژوهش با توجه به نقصان‌های ذکر شده در مکانیسم پمپ سرنگی یک الگوریتم سینماتیک کنترل معرفی شده است که با استفاده از آن می‌توان نوسانات حرکت را به حداقل و دقت حجم تزریق با به حداکثر رساند. این رویکرد با استفاده از درایورهای میکرواستپ و کتابخانه‌های آماده کنترل موتور پله‌ای برای سینماتیک حرکت (سرعت، شتاب و جرک) تحت کنترل قرار می‌گیرد. این رویکرد با استفاده از درایو میکرواستپ با درایور DRV8825 و کتابخانه Speedy Stepper با پروفیل سرعت با شتاب ثابت برای برد کنترلی آردوینو یونو<sup>۱</sup> و ESP32 برای کنترل حرکت استپ موتور است. در ادامه این پژوهش به صورت زیر ارائه می‌شود:

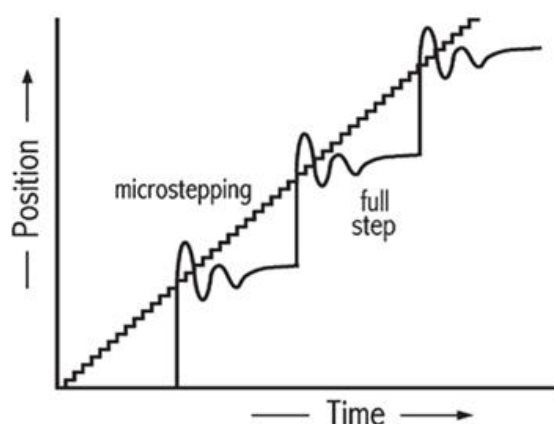
- روش تحقیق
- انجام آزمون‌های کالیبراسیون
- بررسی نتایج و جمع‌بندی

پمپ سرنگی ساخته شده در این پژوهش که حرکت خطی آن با استفاده از یک پیچ دنده دوزنقه‌ای<sup>۲</sup> با کوپل مستقیم به یک استپ موتور طراحی شده است، را با استفاده از درایور DRV8825 و برد آردوینو یونو و کتابخانه Speedy Stepper که از پروفیل سرعت شتاب ثابت استفاده می‌کند، راه اندازه شده. این پمپ برای دبی‌های تزریق ۰/۲۵ تا ۵ میلی‌لیتر طراحی شده است.

## ۲-۱- میکرواستپ

اکثر موتورهای پله‌ای دارای زاویه گام ۱/۸ درجه هستند، که منجر به ۲۰۰ گام در دور می‌شود. یک برد معمولی درایور موتور پله‌ای این امکان را می‌دهد که آن را برای میکرو استپینگ پیکربندی کنید. میکرو استپینگ به این معنا است که درایور هر یک از گام‌های موتور پله‌ای را برای حرکت به گام‌های ریز تبدیل کرده و وضوح زاویه‌ای بیشتر و چرخش نرم و یکنواخت‌تر ارائه می‌دهد. به‌طور مثال؛ اگر برد برای ۲ برابر میکرو استپ تنظیم شده باشد، ۴۰۰ گام برای یک چرخش با زاویه ۰/۹ درجه حرکت را انجام می‌دهد، همچنین استفاده از میکرو استپینگ ۳۲ برابر به ۶۴۰۰ گام در دور با زاویه ۰/۰۵۶۲۵ درجه می‌رسد.

استفاده از میکرو استپینگ باعث می‌شود تا حرکت‌هایی که موتور بین دو استپ متوالی انجام می‌دهد کوچک‌تر شده. در نتیجه پرش‌ها و ریپل‌های موقعیتی در حرکت استپ‌های کامل از بین برود. کاربرد این فناوری در پمپ‌های سرنگی باعث می‌شود تا نوسان‌هایی که در حرکت سیال وجود دارد برطرف شده و یک حرکت یکنواختی را ارائه دهد. در شکل ۳ ریپل‌های ایجاد شده در موقعیت موتور در اثر گشتاور نامتعادل استپ کامل و میکرو استپ نشان داده شده است.



شکل ۳ ریپل موقعیت ایجاد شده توسط گشتاور نامتعادل برای حالت‌های عملیاتی استپ کامل و میکرو استپ [۹]

<sup>1</sup> Arduino Uno

<sup>2</sup> Lead Screw

**۲-۲- کتابخانه Speedy Stepper**

این کتابخانه آردوینو برای کنترل یک یا چند موتور پله‌ای استفاده می‌شود. حرکت موتورها در این کتابخانه با الگوریتم سینماتیک سرعت با شتاب ثابت انجام می‌شود. کتابخانه برای کنترل سرعت بهینه شده است.

Speedy Stepper می‌تواند ۱۲۵۰۰ استپ در ثانیه با استفاده از برد آردوینو یونو ایجاد کند. با فرض اینکه سیستمی در یک زمان فقط یک موتور را هدایت می‌کند. با حرکت یک موتور در حالت نیم گام، به سرعت ۳۱ دور در ثانیه یا ۱۸۷۵ دور در دقیقه قابل دستیابی است و در حالت یک چهارم گام حدود ۱۵ دور در ثانیه یا ۹۳۷ دور در دقیقه ارائه می‌دهد.

برد آردوینو یونو یک میکرو کنترلر بر پایه ATmega328 است. این برد ۱۴ پین ورودی و خروجی دیجیتال (که ۶ پین آن می‌تواند به عنوان خروجی PWM استفاده گردد)، ۶ ورودی آنالوگ، یک تشدیدگر سرامیکی<sup>۱</sup> ۱۶ مگاهرتز، یک پورت USB، یک پاورجک (ورودی منبع تغذیه)، یک پین ICSP و یک دکمه ریست دارد. برد آردوینو یونو شامل کلیه امکانات موردنیاز جهت به‌کارگیری میکروکنترلر موجود بر روی برد است [۱۰].

ماژول درایور استپ موتور DRV8825 یک درایور میکرواستپ برای استپ موتورهای دوقطبی است. این درایور ویژگی‌هایی همچون محدودیت جریان قابل تنظیم، حفاظت حرارتی و اضافه جریان و ۶ میکرو استپ (۱/۳۲ استپ) رزولوشن دارد. این ماژول در محدوده ۸/۲ تا ۴۵ ولت کار کرده و بدون هیت سینک تا جریان ۱/۵ آمپر را به خوبی تأمین می‌کند.

نحوه اتصالات و پیکربندی سیستم الکترونیکی پمپ برای راه اندازی آن در شکل ۳ نشان داده شده است. در این سیستم گام پیچ استفاده شده در این پمپ سرنگی ۲ میلی‌متر است بنابراین برای کنترل سرعت آن در آردیونو باید تعداد استپ‌ها در واحد زمان محاسبه شوند که این کار با استفاده از روابط ۱ و ۲ انجام می‌شود. (جابه‌جایی لید اسکرو برحسب میلیمتر بر دقیقه مطلوب است برای رسیدن به این سرعت باید با روابط ۱ و ۲ سرعت استپ را برحسب استپ بر ثانیه به دست آوریم).

$$Total\ steps = 200 * microstepping\ mode \quad (1)$$

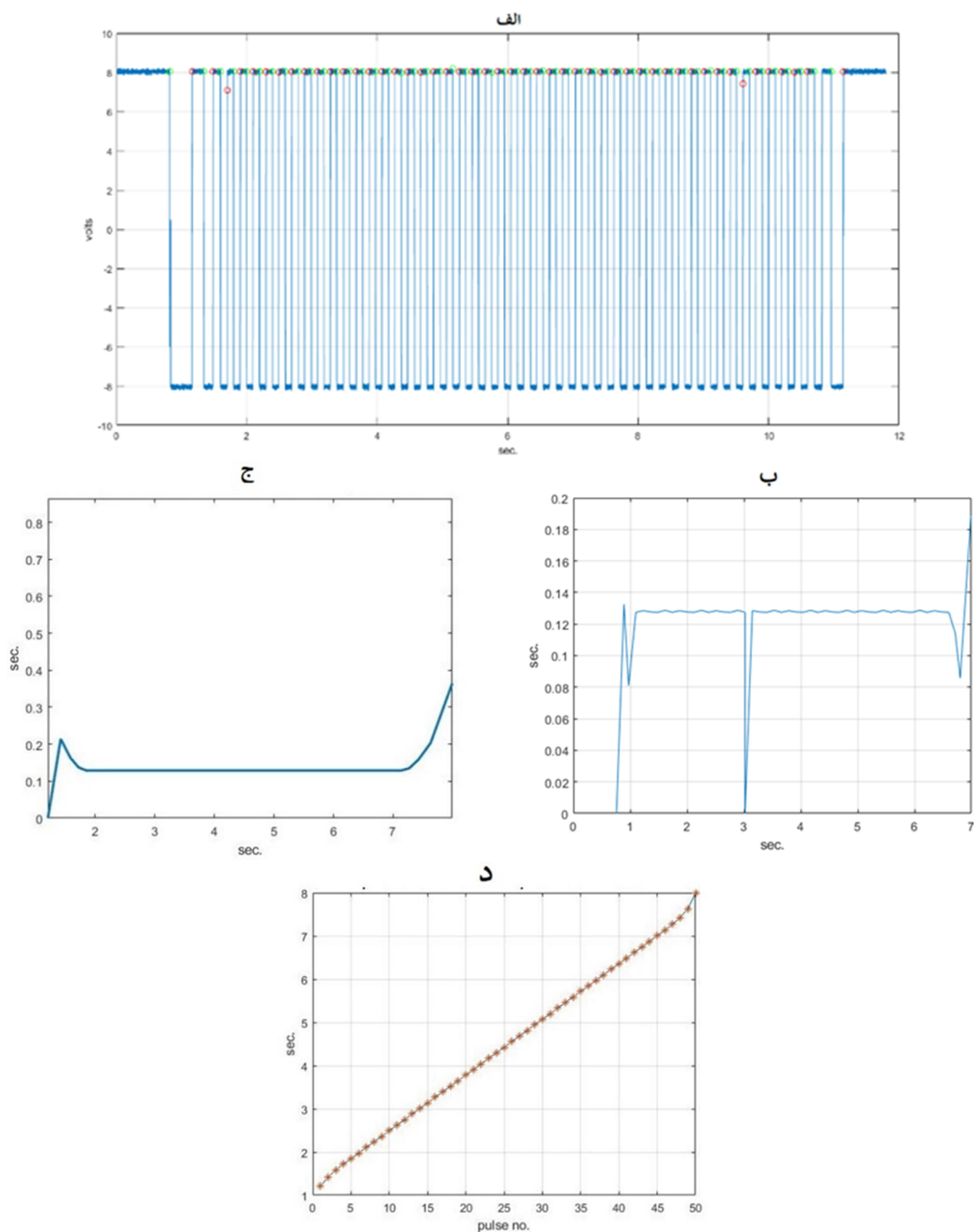
$$Speed \left( \frac{steps}{sec} \right) = speed \left( \frac{mm}{min} \right) * \frac{1}{60} (min/sec) * \frac{1}{2} (round/mm) * steps (steps/round) \quad (2)$$

**۲-۳- کنترل پالس‌های خروجی درایور**

برای بررسی و کنترل عملکرد درست درایور مورد استفاده و همچنین الگوریتم استفاده شده برای حرکت پمپ پالس‌های خروجی درایور با استفاده از یک کارت داده برداری ذخیره و مورد بررسی قرار گرفته است. در بررسی‌های انجام شده تنظیمات سرعت حرکت موتور در مقادیر مشخص به‌ویژه در سرعت‌های پایین که ضربات ناشی از حرکت موتور حساست بیشتری دارد، انجام شده است. سپس پالس‌های خروجی در نرم‌افزار متلب پردازش (شکل ۴-الف، شکل پالس‌های سرعت ۰/۲ میلی‌متر بر ثانیه را نمایش می‌دهد) و پارامتر زمان پالس‌ها برای بررسی یکنواختی پالس‌های تولید شده، محاسبه و سپس نمودار تغییرات زمان پالس برحسب زمان حرکت (شکل ۴-ب و ۴-ج) و نمودار زمان پالس برحسب موقعیت موتور یا شماره استپ (شکل ۴-د) رسم و بررسی شده است.

همان‌طور که در شکل ۴-ج و ۴-د دیده می‌شود زمان پالس‌ها در ابتدای حرکت و انتهای حرکت به دلیل حرکت شتاب ثابت، بیشتر بوده و این نشان دهنده عملکرد درست درایور و کتابخانه برای تولید حرکت با سینماتیک شتاب ثابت است. همچنین شکل ۴-ب و ۴-ج تفاوت استفاده از میکرو استپ و استپ کامل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت میکرو استپ زمان پالس‌ها در ابتدا و انتهای حرکت شتاب ثابت به صورت یکنواخت افزایش و کاهش داشته و در میانه حرکت زمان پالس‌ها ثابت بوده و نوسانی مشاهده نمی‌شود.

<sup>1</sup> Ceramic Resonator



شکل ۴ الف) پالس‌های اندازه‌گیری شده از خروجی درایور (ب) نمودار تغییرات زمان پالس برحسب زمان حرکت در حالت استپ کامل (ج) نمودار تغییرات زمان پالس برحسب زمان حرکت در حالت استفاده از میکرو استپ و (د) نمودار زمان پالس برحسب موقعیت موتور (شماره استپ)

### ۳- انجام آزمون‌های کالیبراسیون

فرایند کالیبراسیون و بررسی دقت تزریق با استفاده از تزریق مقادیر مشخص از حجم‌ها و دبی‌های مشخص از مایع آب و اندازه‌گیری وزن مایع تزریق شده انجام شده است. به این صورت که حجم محاسبه شده به صورت تعداد استپ برای حرکت خطی برای سرنگ شیشه‌ای حجم ۵ میلی‌لیتر با قطر داخلی ۱۲/۷۲ میلی‌متر و میکرواستپینگ ۱/۳۲ با استفاده از روابط ۳ در برنامه انجام شده و این حجم با دبی مشخص شده تزریق می‌شود و وزن مایع تزریق شده با استفاده از ترازو اندازه‌گیری شده است.

روند آزمون به این صورت بوده که پمپ در دبی‌های بین ۰/۲۵ تا ۵ میلی‌لیتر تنظیم شده (جدول ۱) که ۱۰ حالت دبی و هریک از دبی‌ها در ۵ حجم و در این حجم‌ها با ۳ تکرار، فرایند تزریق انجام شده است. جدول شماره ۲ مشخصات دبی، حجم‌های تزریق شده را ارائه می‌دهد.

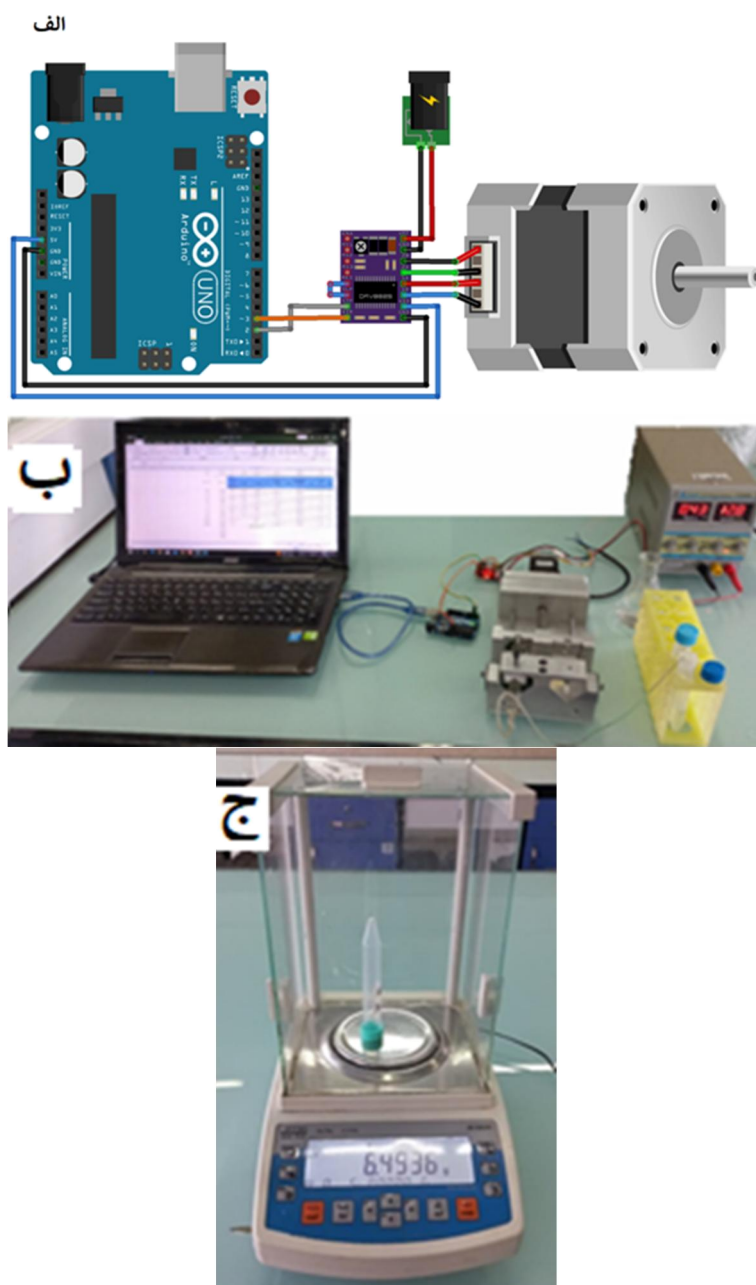
در این آزمون برای اندازه‌گیری وزن مایع تزریق شده از ترازو AS 220.R1 ساخت شرکت RADWAG (شکل ۵-ج) که مشخصات آن در جدول شماره ۳ ارائه شده، انجام شده است.

جدول ۱ دبی‌های تزریق و سرعت استپ‌های موتور در واحد زمان متناظر با دبی

ردیف	دبی (میلی لیتر بر دقیقه)	استپ بر ثانیه
۱	۰,۲۵	۱۰۵
۲	۰,۵	۲۱۰
۳	۰,۷۵	۳۱۵
۴	۱,۰	۴۲۰
۵	۱,۲۵	۵۲۵
۶	۱,۵	۶۲۹
۷	۲	۸۳۹
۸	۳	۱۲۵۹
۹	۴	۱۶۷۹
۱۰	۵	۲۰۹۸

جدول ۲ حجم‌های تزریق و تعداد استپ متناظر با هریک

ردیف	دبی (میلی لیتر)	استپ
۱	۱,۰	۲۵۱۸۲
۲	۲,۰	۵۰۳۴۶
۳	۳,۰	۷۵۵۴۵
۴	۴,۰	۱۰۰۷۲۷
۵	۵,۰	۱۲۵۹۰۹



شکل ۵ الف) اتصالات الکتریکی برد و درایور و استپ موتور برای راه اندازی پمپ ب) بستر آزمون پمپ ج) ترازو AS 220.R1 ساخت شرکت RADWAG

جدول ۳ مشخصات فنی ترازو AS 220.R1 ساخت شرکت RADWAG

پارامترهای مترولوژیکی

۲۲۰ گرم	حداکثر ظرفیت
۱۰ میلی گرم	حداقل بار
۲ ثانیه	زمان تثبیت
۰/۰۹ میلی گرم	تکرارپذیری مجاز
۰/۰۷ میلی گرم	تکرارپذیری استاندارد
±۰,۲ میلی گرم	خطی بودن

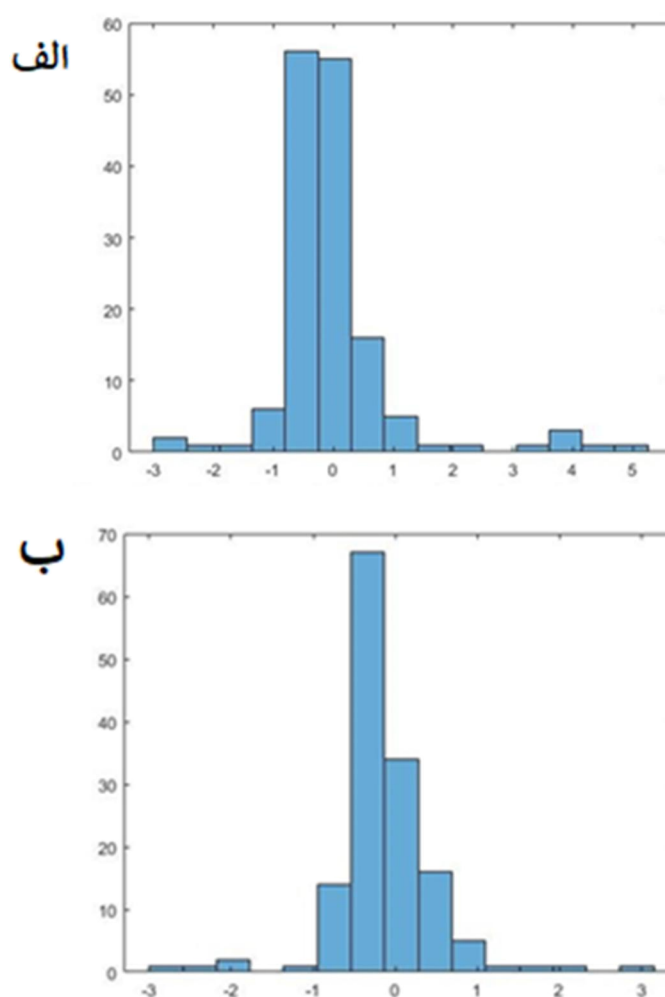


#### ۴- نتایج و بحث

همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، این پمپ ساخته شده برای بررسی کالیبراسیون مورد ارزیابی قرار گرفته است و وزن سیال تزریق شده اندازه‌گیری شده که نتایج آن را در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

در آزمون‌های انجام شده ۵۰ حالت مختلف از ترکیب دبی و حجم تزریق، مورد ارزیابی قرار گرفته است. که هر یک از این حالت‌ها به تعداد ۳ مرتبه تکرار شده که در مجموع ۱۵۰ آزمون انجام شده است. در ادامه میزان خطای نسبی وزن سیال تزریق محاسبه شده که برای تکرار اول آزمون‌ها در جدول شماره ۴، این محاسبات، ارائه شده است.

نمودار توزیع درصد خطای نسبی با استفاده داده‌های خام خطای نسبی در شکل ۶-الف نشان داده شده است. که میانگین آن ۱/۱۵- درصد و انحراف معیار آن ۱/۰۲ است. در ادامه با استفاده از حذف خطاهای پرت که شامل خطاهای با فاصله سه انحراف معیار<sup>۱</sup> از میانگین خطا است، توزیع خطای نسبی در شکل ۶-ب نشان داده شده. که یک توزیع نرمال شامل خطاهای با احتمال ۹۹/۷ درصد و انحراف معیار ۰/۶۶ و میانگین ۰/۱۵ را نشان می‌دهد.



شکل ۶ الف) نمودار توزیع پراکندگی درصد خطای نسبی برای داده‌های خام (ب) نمودار توزیع درصد خطای نسبی برای فاصله ۶ سیگما (انحراف معیار) با احتمال ۹۹/۷ درصد

<sup>1</sup> Standard Deviation

جدول ۴ نتایج آزمون اندازه‌گیری وزن سیال تزریق شده (آزمون‌های تکرار اول)

شماره آزمون	دبی ( میلی لیتر بر دقیقه)	وزن نامی(گرم)	تکرار	وزن خالص(گرم)	درصد خطای نسبی
	۰,۲۵	۱	۱	۱,۰۱۴۱	-۱,۴۱
۴	۰,۲۵	۲	۱	۲,۰۱۵۹	-۰,۸۰
۷	۰,۲۵	۳	۱	۲,۹۹۲۳	۰,۲۶
۱۰	۰,۲۵	۴	۱	۴,۰۴۶۰	-۱,۱۵
۱۳	۰,۲۵	۵	۱	۵,۰۸۱۷	-۱,۶۳
۱۹	۰,۵	۲	۱	۲,۰۱۹۳	-۰,۹۶
۲۲	۰,۵	۳	۱	۳,۰۴۱۴	-۱,۳۸
۲۵	۰,۵	۴	۱	۴,۰۵۴۴	-۱,۳۶
۲۸	۰,۵	۵	۱	۵,۰۳۰۳	-۰,۶۱
۳۱	۰,۷۵	۱	۱	۰,۹۹۱۴	۰,۸۶
۳۴	۰,۷۵	۲	۱	۲,۰۲۲۰	-۱,۱۰
۳۷	۰,۷۵	۳	۱	۳,۰۴۶۶	-۱,۵۵
۴۰	۰,۷۵	۴	۱	۴,۰۱۴۲	-۰,۳۵
۴۳	۰,۷۵	۵	۱	۵,۰۲۳۱	-۰,۴۶
۴۶	۱	۱	۱	۱,۰۳۰۶	-۳,۰۶
۴۹	۱	۲	۱	۲,۰۱۳۵	-۰,۶۷
۵۲	۱	۳	۱	۳,۰۴۴۶	-۱,۴۹
۵۵	۱	۴	۱	۴,۰۳۵۴	-۰,۸۹
۵۸	۱	۵	۱	۵,۰۸۲۰	-۱,۶۴
۶۱	۱,۲۵	۱	۱	۱,۰۰۱۲	-۰,۱۲
۶۴	۱,۲۵	۲	۱	۲,۰۳۰۴	-۱,۵۲
۶۷	۱,۲۵	۳	۱	۳,۰۳۹۰	-۱,۳۰
۷۰	۱,۲۵	۴	۱	۴,۰۵۱۹	-۱,۳۰
۷۳	۱,۲۵	۵	۱	۵,۰۶۵۵	-۱,۳۱
۷۶	۱,۵	۱	۱	۱,۰۰۵۲	-۰,۵۲
۷۹	۱,۵	۲	۱	۲,۰۲۳۱	-۱,۱۶
۸۲	۱,۵	۳	۱	۳,۰۳۴۸	-۱,۱۶
۸۵	۱,۵	۴	۱	۴,۰۵۱۲	-۱,۲۸
۸۸	۱,۵	۵	۱	۵,۰۷۳۷	-۱,۴۷
۹۱	۲	۱	۱	۱,۰۱۵۵	-۱,۵۵
۹۴	۲	۲	۱	۲,۰۱۰۲	-۰,۵۱
۹۷	۲	۳	۱	۳,۰۳۳۱	-۱,۱۰
۱۰۰	۲	۴	۱	۴,۰۶۷۱	-۱,۶۸
۱۰۳	۲	۵	۱	۵,۰۴۹۵	-۰,۹۹
۱۰۶	۳	۱	۱	۱,۰۱۶۰	-۱,۶۰
۱۰۹	۳	۲	۱	۲,۰۲۲۶	-۱,۱۳
۱۱۲	۳	۳	۱	۳,۰۳۹۳	-۱,۳۱
۱۱۵	۳	۴	۱	۴,۰۵۴۱	-۱,۳۵

۱۱۸	۳	۵	۱	۵,۰۷۶۲	-۱,۵۲
۱۲۱	۴	۱	۱	۰,۹۷۳۰	۲,۷۰
۱۲۴	۴	۲	۱	۲,۰۲۹۶	-۱,۴۸
۱۲۷	۴	۳	۱	۳,۰۴۲۳	-۱,۴۱
۱۳۰	۴	۴	۱	۴,۰۷۱۰	-۱,۷۷
۱۳۳	۴	۵	۱	۵,۰۶۸۵	-۱,۳۷
۱۳۶	۵	۱	۱	۱,۰۰۰۹	-۰,۰۹
۱۳۹	۵	۲	۱	۲,۰۳۰۰	-۱,۵۰
۱۴۲	۵	۳	۱	۳,۰۴۸۵	-۱,۶۲
۱۴۵	۵	۴	۱	۴,۰۵۷۲	-۱,۴۳
۱۴۸	۵	۵	۱	۵,۰۷۴۳	-۱,۴۹
میانگین خطای نسبی					
-۰,۸۹					

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش یک پمپ سرنگی با استفاده از فناوری میکرواستپینگ موتورهای پله طراحی و ساخته شده است. پله های حرکت در موتورهای پله با کنترل معمولی موجهایی ایجاد کرده که باعث بوجود آمدن جریان غیر لایه ای در میکروکانالها می شود. در طراحی سیستم کنترل حرکت این پمپ به کمک الگوریتمهای میکرواستپینگ حرکت یکنواخت سیال در داخل کانال برای سیکلهای مختلف کاری تامین شده است. از این پمپ ارتقاء یافته می توان برای جداسازی ذرات و سلولهای هدف در موقعیتهای مشخص در داخل میکروکانال استفاده بهینه ای نمود. همچنین در صورت نیاز به جریان لایه ای با سرعت ثابت در طی مسیر مستقیم یا دارای انحناء می توان از این پمپ بهره برد و تجهیز می مطمئن برای چالشهای کنترل فرآیند در کاربردهای زیست پزشکی و بالینی مانند کشت سلول و جداسازی سلولی و داروسازی می باشد.

از دیگر چالشهای استفاده از پمپها در کاربردهای ذکر شده، دقت تزریق و تکرار پذیری آن است. در کاربردهای زیست پزشکی و بالینی معمولاً حجمهای تزریق پایین و در محدوده میلی لیتر می باشد. همچنین دبی هایی که سیال تزریق می شود در حدود میکرولیتر تا میلی لیتر است. در این پژوهش با طراحی و انجام فرآیند کالیبراسیون فوق دقیق موفق شده ایم به دقت بالا در تزریق سیال و همچنین تکرار پذیری بالا دست یابیم. نتایج حاصل از کالیبراسیون نشان می دهد که در محدوده دبی ۰/۲۵ تا ۵ میلی لیتر بر دقیقه و حجمهای ۱ تا ۵ میلی لیتر کالیبراسیون با دقت مناسب صورت پذیرفته است و می توان برای کاربردهای حوزه زیست شناسی با اطمینان خاطر از پمپ توسعه یافته استفاده نمود. در آینده نیز پس از عملکرد موفق این پمپ در حوزههای فوق و همچنین با انجام کالیبراسیون دقیق و مطابق با استانداردهای حوزه پزشکی و کاربردهای انسانی، همراه با تحلیل عدم قطعیت در حوزههای پزشکی- بالینی استفاده خواهد شد.

## References

- [1] Zida Li, Sze Yi Mak, Alban Sauret, Ho Cheung Shum. Syringe-pump-induced fluctuation in all-aqueous microfluidic system implications for flow rate accuracy. *Lab Chip*. 2014 January 14; 14(4):744-749. doi: 10.1039/c3lc51176f
- [2] Aziz A A, Mohd Azmi M A, Mohd Nazri M N A, Zainal M H F, Khalfan M A, Bahrain A K. Fabrication of micropump for microfluidics application. *AIP Conference Proceedings*. 2019 July 30; 2129(1):020140. doi: 10.1063/1.5118148
- [3] Lake JR, Heyde KC, Ruder WC. Low-cost feedback-controlled syringe pressure pumps for microfluidics applications. *PLoS One*. 2017 Apr 3; 12(4): e0175089. doi: 10.1371/journal.pone.0175089
- [4] Iverson, Brian D, Garimella, Suresh V. Recent advances in microscale pumping technologies: a review and evaluation. *Microfluid Nanofluid*. 2008 August 01; 5(2):145-174. doi: 10.1007/s10404-008-0266-8
- [5] Huber, Josef F. Instrumentation for high-performance liquid chromatography. *Conference Proceedings*. 1978.
- [6] Glawdel T, Elbuken C, Ren C L. Droplet Generation in Microfluidics. *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*. 2014 May 06. doi: 10.1007/978-3-642-27758-0\_1713-1

- [7] Akkoyun F, ÖZÇELİK A. A Simple Approach for Controlling an Open-Source Syringe Pump. *European Mechanical Science*. 2020 December 20; 4(4):166-70. doi: [10.26701/ems.769837](https://doi.org/10.26701/ems.769837)
- [8] Supriyanto A, Anggriani R, Suciayati S, Surtono A, Junaidi J. A control system on the syringe pump based on Arduino for electrospinning application. *Journal of Physical Science*. 2021 April 25; 32(1):1-12. doi: [10.21315/jps2021.32.1.1](https://doi.org/10.21315/jps2021.32.1.1)
- [9] Bellini A, Concari C, Franceschini G, Toscani A. Mixed-Mode PWM for High-Performance Stepping Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007 December 10; 54(6):3167-3177. doi: [10.1109/TIE.2007.905929](https://doi.org/10.1109/TIE.2007.905929)
- [10] Samokhin, A S. Syringe Pump Created using 3D Printing Technology and Arduino Platform. *Journal of Analytical Chemistry*. 2020 March 01; 75(3): 416-421. doi: [10.1134/S1061934820030156](https://doi.org/10.1134/S1061934820030156)