



Design, Fabrication, and Experimental Modeling of a Piezoelectric-Based Droplet Injection System Using Statistical Methods

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Firuzi Rad P.¹,
Ghafarirad H.^{1*},
Rezaei S.M.¹,

How to cite this article

Firuzi Rad P, Ghafarirad H, Rezaei S.M. Design, Fabrication, and Experimental Modeling of a Piezoelectric-Based Droplet Injection System Using Statistical Methods. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(10):657-666.

¹ Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ghafarirad@aut.ac.ir

Article History

Received: November 19, 2024

Accepted: January 5, 2025

ePublished: January 22, 2025

ABSTRACT

In this study, a droplet injection system based on a piezoelectric actuator was designed and built to evaluate the system's performance in producing droplets of varying volumes. Droplet injection systems are crucial in many biological and biomedical applications. These systems contain numerous adjustable parameters, making it challenging to predict the resulting droplet volume. To analyze the influence of different input parameters and predict droplet volume, a statistical design of experiments approach was employed using response Surface methodology. Five main factors were investigated in this research, including three parameters related to the input signal (rise time, fall time, open time, and signal amplitude), back pressure, and nozzle diameter. Different levels were considered for each parameter, and their independent and interactive effects on droplet volume were analyzed. The results indicated that all factors had a p-value of less than 0.05, confirming their significant impact on the output volume. The regression model obtained, with R² of 0.98, showed strong predictive capability for droplet volume. Furthermore, the inverse performance of the regression model was analyzed using parameter optimization, and a comparison with the experimental setup demonstrated an error of less than 5%. This model enables the optimization of design parameters and enhances the system's performance, significantly improving the accuracy and efficiency of such devices in targeted applications.

Keywords Fluid Droplet Injection System, Piezoelectric, Design of Experiments, Response Surface

CITATION LINKS

1- Numerical analysis and simulation of ... 2- Piezoelectric micro-jet devices: A review 3- Design and Research of a Novel Piezostack-Driven Jetting Dispenser ... 4- Rigid flexible coupling dynamic analysis of piezoelectric jetting dispenser ... 5- A piezoelectric jetting dispenser with a pin joint 6- A Simplified Analysis Method for the Piezo Jet Dispenser ... 7- Design and Analysis of a Hybrid Displacement Amplifier Supporting a High-Performance Piezo Jet Dispenser 8- Design and performance evaluation of a new jetting dispenser system using two piezostack actuators 9- A novel piezostack-driven jetting dispenser with corner-filled flexure hinge and high-frequency performance 10- Influence of needle impact velocity on the jetting effect of a piezoelectric needle-collision jetting dispenser 11- Design and performance analysis of a flexible-hinged piezoelectric driving dispenser 12- Design and experiment of a jetting dispenser with compact amplifying mechanism and low stress in piezostack 13- A Novel High-Speed Jet Dispenser Driven by Double Piezoelectric Stacks 14- Design and experiment of a new double needle type piezoelectric jetting dispenser 15- Simulation and Experiment on Droplet Volume for the Needle-Type Piezoelectric Jetting Dispenser 16- Development of a Piezo-Driven Liquid Jet Dispenser with Hinge-Lever Amplification Mechanism 17- Flow Channel Influence of a Collision-Based Piezoelectric Jetting Dispenser on Jet Performance 18- Droplet formation study of a liquid micro-dispenser driven by a piezoelectric actuator 19- Optimizing dispensing performance of needle-type piezoelectric jet dispensers: a novel drive waveform approach 20- Design and performance analysis of a piezoelectric jetting dispensing valve 21- Numerical and experimental study of oil-in-water (O/W) droplet formation in a co-flowing capillary device 22- Design of Experiment on Concrete Mechanical Properties Prediction: A Critical Review 23- Design and Analysis of Piezoelectric Aided Dispensing System for Fluid Droplet Generation 24- Prediction of optimal ranges of mix ratio of self-compacting mortars (SCMs) based on response surface method (RSM)

طراحی، ساخت و مدل‌سازی تجربی سامانه تزریق قطره مبتنی بر پیزوالکتریک با استفاده از روش آماری

پویا فیروزی‌راد^۱، حامد غفاری‌راد^{۲*}، سید مهدی رضاعی^۱

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش، دستگاه تزریق قطره سیال مبتنی بر عملگر پیزوالکتریک طراحی و ساخته شده است، تا عملکرد این سامانه در تولید قطرات با حجم‌های مختلف ارزیابی شود. سامانه تزریق قطره، در بسیاری از کاربردهای زیستی و بیولوژیکی اهمیت دارد. این سیستم‌ها دارای عامل‌های قابل‌تنظیم متعددی هستند که پیش‌بینی حجم قطره تولید شده را دشوار می‌کند. برای تحلیل تأثیر مولفه‌های مختلف ورودی و پیش‌بینی حجم قطره، از روش طراحی آماری آزمایش‌ها با رویکرد پاسخ سطح استفاده شده است. در این تحقیق، پنج عامل اصلی شامل سه مولفه مرتبط با سیگنال ورودی (زمان بالارفتن و پایین آمدن، زمان گشودگی و دامنه سیگنال)، فشار پشت سیال، و قطر نازل مورد مطالعه قرار گرفتند. برای هر کدام از این مولفه‌ها، سطوح مختلفی در نظر گرفته شده و تأثیرات مستقل و تعاملی آن‌ها بر حجم قطره مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی نتایج نشان داد که تمامی عامل‌ها دارای پی‌ولیک کمتر از ۰/۰۵ هستند که مبنی بر این است که این عوامل به طور معناداری بر حجم خروجی تأثیر دارند. همچنین مدل رگرسیون به‌دست‌آمده با ضریب تعیین ۰/۹۸، توانایی مناسبی در پیش‌بینی حجم قطره دارد. همچنین عملکرد معکوس مدل رگرسیون با استفاده از بهینه‌سازی پارامترها بررسی شد، که در مقایسه با نتایج تجربی، نشان از خطای کمتر از ۵ درصد داشت. مدل به‌دست‌آمده بهینه‌سازی مولفه‌های طراحی و بهبود عملکرد سامانه را امکان‌پذیر می‌کند و به افزایش دقت و کارایی این نوع دستگاه‌ها در کاربردهای هدف، کمک شایانی می‌نماید.

کلیدواژه‌ها: سامانه تزریق قطره سیال، پیزوالکتریک، طراحی آزمایش، پاسخ سطح

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

*نویسنده مسئول: ghafarirad@aut.ac.ir

۱- مقدمه

دستگاه تزریق قطره سیال از سامانه‌های بسیار کاربردی در زمینه‌های مطالعات بیولوژیکی و پرینترهای زیستی هستند [1,2]. این دستگاه‌ها معمولاً ساختاری نسبتاً پیچیده دارند که شامل مولفه‌های ورودی متعدد است که همگی آن‌ها در خروجی سیستم دخیل هستند. تعدد مولفه‌های ورودی سیستم پیش‌بینی حجم قطره را بسیار دشوار می‌سازد. روش‌های بسیاری برای مدل‌سازی حرکت سوزن و همچنین دبی خروجی آن با استفاده از روابط بسیار ساده‌سازی شده ارائه شده است.

بسیاری از مقالات در این زمینه تنها به مدل‌سازی حرکت سوزن پرداخته‌اند و روشی برای محاسبه حجم قطره خروجی پیشنهاد

نموده‌اند برای مثال پنگ و همکاران [3] برای مکانیزم تزریق سیال یک فنر خاص طراحی کردند سپس مدل حرکتی سوزن را هم به‌صورت محاسباتی و هم در نرم‌افزار آدامز شبیه‌سازی نمودند. لی و همکاران [4] نیز با استفاده از نرم‌افزار آدامز حرکت سوزن را در سیستم خود شبیه‌سازی نمودند. در پژوهشی دیگر دنگ و همکاران [5] فعالیت مشابه را با نرم‌افزار سیمولینک انجام دادند. ایشان همچنین در مطالعه‌ای دیگر جابه‌جایی در مکانیزم تزریق متفاوتی را با روابط ساده ریاضی مدل‌سازی نمودند [6]. چاوو و همکاران [7] در مطالعه‌ای مکانیزم افزایش دامنه، استفاده‌شده در سامانه تزریق را مدل‌سازی کردند و حالت بهینه‌ای را برای این قطعه به دست آوردند و حرکت آن را با حرکت سیستم صحه‌گذاری نمودند. جنون و همکاران [8] نیز دستگاه تزریق قطره‌ای با دو پیزو طراحی کردند و میزان جابه‌جایی سوزن را در نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی کردند. با وجود این که این مطالعات به وسیله‌ی شبیه‌سازی حرکت سوزن می‌توانند اطلاعات ارزشمندی از دینامیک سیستم ارائه نمایند اما توانایی پیش‌بینی حجم قطره سیال که در واقع کاربردی ترین مدل برای سیستم است را ندارند. برخی از مقالات صرفاً به گزارش حجم قطرات در فرکانس‌ها و بعضاً در دماهای مختلف اکتفا نموده‌اند از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به کاربو و همکاران [9] اشاره نمود که در آن یک مکانیزم برای تأمین حرکت سامانه تزریق قطره سیال طراحی شده است و حجم قطرات از سیگنال ۱ تا ۴۰۰ هرتز با حد فاصل ۱۰ هرتز و در دمای ۵۰ تا ۶۵ درجه سلسیوس بررسی شده‌اند. در پژوهشی دیگر یانگ و همکاران [10] تأثیر سرعت برخورد سوزن بر قطره تولید شده را بررسی نمودند ایشان سرعت برخورد را در مقادیر مختلف هم در آزمایش تجربی و هم با نرم‌افزار شبیه‌سازی بررسی کردند و الگوی تغییر حجم قطره باتوجه به تغییر سرعت سوزن را به دست آوردند اما در این پژوهش مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی صورت نگرفت. وئو و همکاران [11] در مطالعه‌ای یک سامانه تزریق قطره را با مکانیزم بزرگنمایی جدید طراحی نمودند و همچنین تأثیر فشار پشت سیال و فرکانس تحریک را بر روی حجم قطره بررسی کردند. وانگ و همکاران [12] در مطالعه‌ای دستگاه تزریق قطره سیالی طراحی نمودند که در آن میزان تنش در عملگر پیزوالکتریک کمتر از نمونه‌های مشابه باشد. ایشان همچنین حجم قطره را در فرکانس‌های مختلف و فشارهای مختلف گزارش کردند.

برخی دیگر از پژوهشگران برای پیش‌بینی حجم قطرات مدل‌های ریاضیاتی پیشنهاد کردند که حجم قطره خروجی را تا حدودی پیش‌بینی می‌کند از جمله این مطالعات می‌توان به کار چاوو و همکاران [13] اشاره نمود که با مدلی بسیار ساده‌سازی شده حجم قطره خروجی را پیش‌بینی می‌نمایند با این حال صحت‌سنجی این مقاله بسیار محدود بوده و دقت مدل در پیش‌بینی حجم قطره بررسی نشد. در مقاله‌ای دیگر چاوو و همکاران [14] مدلی برای محاسبه حجم قطره استخراج نمودند و به کمک آن پروفیل حرکت

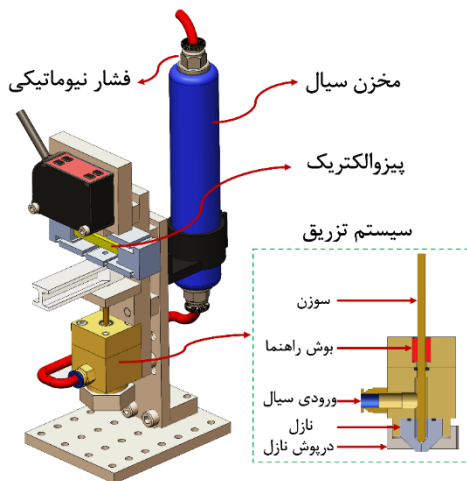
کارایی این روش می‌افزاید. با وجود کارآمد بودن این روش، پژوهش کافی برای پیاده‌سازی این روش بر روی سیستم تزریق قطره سیال انجام نگرفته است.

در این مطالعه یک دستگاه تزریق قطره سیال طراحی و ساخته شده است که توانایی تولید قطره در بازه وسیعی را دارد. برای مطالعه تأثیر مولفه‌های دستگاه بر روی خروجی و همچنین برای به‌دست‌آوردن مدلی برای پیش‌بینی خروجی سیستم از روش طراحی آماری آزمایش پاسخ سطح کمک گرفته شده است.

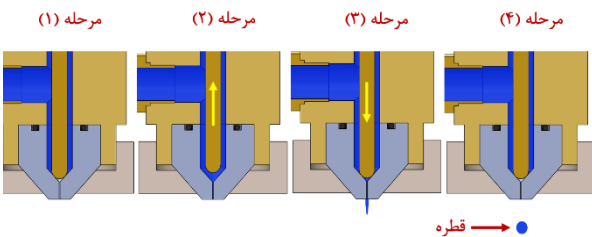
متغیرهای قابل‌تنظیم به‌عنوان ورودی سیستم به پنج عامل تقسیم شده است که سه عدد از آن‌ها مربوط به سیگنال ولتاژ ورودی هستند که شامل زمان بالارفتن و پایین آمدن، زمان گشودگی و دامنه سیگنال است. دو مولفه دیگر فشار پشت سیال و قطر نازل است. تأثیرگذاری این مولفه‌ها و اثر تعاملی آن‌ها بررسی شده و دلیل وقوع آن‌ها تحلیل شده است. لازم به ذکر است برای محاسبات آماری از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت کمک گرفته شده است.

۲- ساختار دستگاه

دستگاه‌های تزریق قطره سیال مبتنی بر پیزوالکتریک انواع مختلفی دارند. سامانه‌ای که در این مطالعه ساخته شده است از نوع سوزنی است. این نوع از سامانه‌های تزریق که نمای کلی آن در شکل ۱ قابل مشاهده است، دارای یک سوزن است که این سوزن، جابه‌جایی خود را از یک عملگر پیزوالکتریک دریافت می‌نماید.



شکل ۱) سامانه تزریق قطره سیال و اجزای آن



شکل ۲) مرحله‌های عملکردی سیستم تزریق سیال

سوزن برای تولید قطره را بهبود بخشیدند اما مقایسه‌ای بین حجم محاسبه شده قطره خروجی و نتایج تجربی صورت نگرفت.

گروهی دیگر از مقالات به شبیه‌سازی دینامیک سیالاتی این دستگاه در نرم‌افزارهای این حوزه پرداخته‌اند. لو و همکاران^[15] دستگاه تزریق قطره سیال را در نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی نمودند و تأثیر مولفه‌های تزریق را بر روی خروجی بررسی کردند. همچنین نتایج نرم‌افزار به‌صورت محدود با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد. در مطالعه‌ای دیگر تریمری و همکاران^[16] سامانه تزریق قطره سیال را در نرم‌افزار سیمولیشن اکس شبیه‌سازی کردند. در این مطالعه ضمن بررسی پروفیل فشار و دبی در نازل، خروجی دستگاه در فرکانس‌های مختلف نشان داده شد و همچنین نتایج نرم‌افزار به صورت محدود (در ۲ حالت) با نتایج تجربی صحت‌گذاری شد. در پژوهش چاو و همکاران^[17] سیستم تزریق در نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی شد و الگوی برخی از مولفه‌ها همچون فشار و سرعت سیال در نازل‌های مختلف باهم مقایسه گردید و همچنین حجم قطره تولید شده در سه مورد با نتایج نرم‌افزار صحت‌سنجی شد. در مقاله‌ی دیگر لو و همکاران^[18] نحوه تشکیل قطره در سیستم تزریق قطره سیال به کمک نرم‌افزار بررسی شد. رویکرد این مقاله بررسی تأثیر عدد رینولدز و وبر بر روی قطره تشکیل شده بود. در این مقاله نتایج تجربی با شبیه‌سازی مقایسه نشدند. کائو و همکاران^[19] با شبیه‌سازی فرآیند تزریق در نرم‌افزار فلوئنت شکل موج بهبود یافته‌ای را برای تزریق پیشنهاد نمودند که میزان حباب‌های هوا را در قطره خروجی کاهش می‌داد. در این مطالعه، مقایسه‌ای بین حجم قطره در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی صورت نگرفت. شی و همکاران^[20] سامانه تزریق قطره سیال مبتنی بر پیزوالکتریک را طراحی نمودند و فرآیند تولید قطره را در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی کردند. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی خطایی در حدود ۵ درصد را نشان می‌داد.

روش‌های شبیه‌سازی دینامیک سیالاتی مبتنی بر نرم‌افزاری، با وجود کارآمد بودن معمولاً نیازمند رعایت بسیاری از نکات و در نظر گرفتن جزئیات فراوان است که باعث می‌شود زمان تحلیل به شدت افزایش یابد و حتی تا روزها به طول انجامد^[21]. در این میان روش‌های آماری بسیار راهگشا هستند؛ زیرا این روش‌ها مدل‌هایی‌اند که علاوه بر تحلیل اثر هر مولفه به‌صورت جداگانه و اثر تعاملی آن‌ها، توانایی ارائه مدل رگرسیونی را دارند که خروجی سیستم را با توجه به مولفه‌های ورودی پیش‌بینی می‌نماید. همچنین این مدل‌ها پیچیدگی محاسباتی بسیار کمتری دارند^[22]. به‌دست‌آوردن مدل رگرسیون برای بازه‌ای از ورودی‌ها نیازمند انجام تعداد فراوانی از آزمون‌های تجربی است که شامل تمام جای‌گشت‌ها شود. روش‌های آماری طراحی آزمایش، قادر به کاهش شمار آزمایش‌های موردنیاز به مقدار قابل‌توجه هستند که برای استفاده در این مطالعه الزامی است. همچنین مدل به‌دست‌آمده از این روش قابلیت معکوس‌پذیری نیز دارد که بر

ولتاژ ورودی سیستم توسط یک کارت داده‌برداری تولید می‌شود. اما حداکثر ولتاژ تولید شده توسط این کارت ۱۰ ولت می‌باشد که برای تحریک پیزوالکتریک کافی نیست. به همین علت برای افزایش ولتاژ از یک درایور پیزوالکتریک استفاده شده است، که ولتاژ ورودی خود را به صورت فعال ۲۰ برابر می‌کند. ولتاژ تولید شده توسط کارت پس از تقویت شدن به وسیله درایور به عملگر پیزوالکتریک اعمال می‌شود.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، تزریق قطره در چهار مرحله انجام می‌شود. برای انجام این مراحل سوزن باید الگوی دوزنقه‌ای را طی نماید و متناظر با این الگوی حرکتی، ولتاژ ورودی نیز باید به‌صورت دوزنقه‌ای، به عملگر اعمال گردد.

دوره ۲۴، شماره ۱۰، مهر ۱۴۰۳

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده‌است، سامانه تزریق قطره سیال از قطعات مختلف تشکیل شده است که شامل پیژوالکتریک، مکانیزم منعطف، سوزن، بوش راهنما، محفظه تزریق، درگاه ورود سیال و نازل است. محفظه تزریق به‌گونه‌ای طراحی شده است که در مقابل فشار سیال کاملاً آب‌بند باشد و همچنین سوزن و نازل کاملاً با یکدیگر هم‌محور باشند.

اساس کار این نوع سامانه به این صورت است که سوزن با استفاده از جابه‌جایی که از عملگر پیزو الکتریک دریافت می‌نماید، حرکت بالا و پایین بسیار سریع انجام می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، سوزن در هر دوره، یکبار به نازل برخورد می‌کند که حاصل آن تولید یک قطره است.

۳- معرفی تجهیزات آزمایشگاهی

ماہنامہ علمی مہندسی مکانیک مدرس

مستقل هر مولفه، اثرات تعاملی آن‌ها نیز تحلیل شوند. مقادیر هر یک از سطوح برای مولفه‌های بررسی شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱) حدود مولفه‌ها در طراحی آماری آزمایش

متغیر	سطوح					
	واحد	نماد	$-\alpha$	-۱	۰	۱
دامنه	V	A	۵۵	۷۶/۲۵	۹۷/۵۰	۱۱۸/۷۵
زمان خیز/سقوط	mSec	B	۰/۵	۱	۱/۵	۲
زمان گشودگی	mSec	C	۲/۵	۴/۳۷۵	۶/۲۵	۸/۱۲۵
فشار نیوماتیک	Bar	D	۱/۶۰	۱/۹۵	۲/۳۰	۲/۶۵
قطر نازل	mm	E	۰/۲	-	۰/۵	-

تعداد آزمایش‌هایی که نرم‌افزار برای این طراحی محاسبه کرده است، برابر با ۹۰ آزمایش است. این آزمایش‌ها در محدوده بین منفی آلفا تا آلفا اجرا شده‌اند. انتخاب این محدوده‌ها بر اساس آزمایش‌های اولیه صورت گرفته است، به‌طوری‌که دستگاه دارای یک بازه کاری مشخص است که خروج از آن منجر به عدم تولید قطره یا تولید قطرات غیریکنواخت می‌شود و در نتیجه نمی‌تواند نتایج مطلوبی به همراه داشته باشد.

نرم‌افزار دیزاین اکسپرت مدل‌های مختلف آماری را برای انطباق با داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها را بررسی می‌کند و نتایج را در قالب جدول ۲ ارائه می‌دهد. این جدول نشان‌دهنده میزان تطابق هر مدل با داده‌ها است و انتخاب مناسب‌ترین مدل را برای تحلیل نهایی تسهیل می‌کند.

جدول ۲) مدل‌های بررسی شده توسط نرم‌افزار و مدل پیشنهادی

مدل	ضریب تعیین		ضریب تعیین	
	پیش‌بینی (Predicted)	پیش‌بینی (R ²)	پیش‌بینی (Adjusted)	پیش‌بینی (R ²)
مدل استفاده شده	۰/۷۳۸۶	۰/۹۹۰۳	۰/۹۸۰۱	۰/۹۸۰۱
خطی	۰/۷۳۸۶	۰/۹۹۰۳	۰/۹۸۰۱	۰/۹۸۰۱
مدل تعاملی	۰/۷۳۸۶	۰/۹۹۰۳	۰/۹۸۰۱	۰/۹۸۰۱
دو عاملی (2Fi)	۰/۷۳۸۶	۰/۹۹۰۳	۰/۹۸۰۱	۰/۹۸۰۱
کوادراتیک	۰/۷۳۸۶	۰/۹۹۰۳	۰/۹۸۰۱	۰/۹۸۰۱

همان‌طور که از جدول ۲ مشخص است نرم‌افزار بجای پیشنهاد یکی از مدل‌های خطی، کوادراتیک یا مدل تعاملی دو عاملی یک مدل با جملات ترکیبی را پیشنهاد نموده است، که دارای ضریب

عامل دیگری که در آزمایش بررسی شده است، فشار نیوماتیکی پشت سیال می‌باشد، که می‌توان آن را با استفاده از رگولاتور فشار تنظیم کرد و با سنسور فشار موجود، تا دقت ۰/۰۱ بار کنترل نمود. قطر نازل نیز یکی از مولفه‌های تنظیم شونده است، که با تعویض نازل قابل تنظیم می‌باشد. برخلاف چهار مولفه دیگر، قطر نازل یک متغیر گسسته بوده و نمی‌توان آن را در یک بازه به صورت پیوسته تغییر داد.

فرایند اندازه‌گیری حجم قطره به این صورت انجام می‌شود، که دستگاه تعدادی قطره را تولید می‌کند و این قطرات روی سطحی صاف از جنس استیل ضدزنگ قرار می‌گیرند. سپس از قطرات، به صورت عمود عکس‌برداری می‌شود تا حجم آن‌ها مشخص گردد. برای اینکه بتوان ارتباط دقیقی بین حجم قطره و قطر آن بر روی سطح به دست آورد، زاویه تماس نیز اندازه‌گیری شده است. زاویه تماس، در واقع زاویه‌ای است که خط مماس بر سطح قطره در نقطه تماس قطره با افق تشکیل می‌دهد. با فرض اینکه قطره سیال یک بخش از کره است، می‌توان حجم این بخش از کره را با استفاده از روابط هندسی ساده محاسبه کرد که به صورت رابطه (۱) بیان شده است.

$$V = \frac{\pi D^3}{24 \sin^3 \theta} (1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta) \quad (1)$$

که در آن V حجم قطره و D قطر قطره قرار گرفته روی سطح است. زاویه θ زاویه تماس سیال با سطح است، که با آزمایش به دست می‌آید. سیال مورد استفاده، گلیسرین رقیق است که زاویه تماس آن با سطح ۴۳ درجه اندازه‌گیری شده است.

۴- طراحی آزمایش

برای بررسی جامع تأثیر مولفه‌های معرفی شده و پیش‌بینی حجم قطره بر اساس شرایط ورودی، از روش پاسخ سطح و طراحی آزمایش با استفاده از طراحی مرکزی مرکب بهره گرفته شده است. این طراحی با ۵ مولفه متغیر انجام شده که هرکدام از این مولفه‌ها، به جز مولفه قطر نازل، دارای ۵ سطح متفاوت هستند، که در جدول ۱ نمایش داده شده است. قطر نازل چون حالت گسسته دارد، سه سطح برای آن در نظر گرفته شده است. فرایند طراحی و تحلیل آزمایش‌ها، با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت صورت گرفته است.

اصول طراحی مرکزی مرکب به‌گونه‌ای است که سه دسته از نقاط طراحی را شامل می‌شود: نقاط فاکتوریل دوسطحی که شرایط حدی را بررسی می‌کنند، نقاط محوری یا ستاره‌ای که بر تعیین اثرات غیرخطی تمرکز دارند، و نقاط مرکزی که برای ارزیابی میزان دقت و بازدهی مدل استفاده می‌شوند. در این تحقیق، هر یک از مولفه‌های انتخاب شده در ۵ سطح متفاوت شامل منفی آلفا، ۰، ۱ و مثبت آلفا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، که مقدار آلفا برابر با ۲ در نظر گرفته شده است. این تنظیمات اجازه می‌دهند تا علاوه بر تأثیرات

تعیین بالاتر است، که نشان‌دهنده آن است که این مدل با دقت بسیار بیشتری توانایی انطباق بر داده‌ها را دارد.

۵- بررسی و تحلیل نتایج

با انتخاب مدل پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار، تأثیر هر کدام از مولفه‌ها بر خروجی به‌صورت جدول ۳ نمایش داده شده‌است. پی‌ولیو در روش‌های آماری معمولاً دارای اهمیت بسیار فراوان است. معمولاً اگر مقدار پی‌ولیو برای یک عامل، کمتر از ۰/۰۵ باشد، گفته می‌شود که آن مولفه دارای تأثیر معنادار در خروجی آزمایش است و اگر بیشتر از این مقدار باشد، ممکن است تأثیر معنادار نباشد یا اتفاقی باشد [24].

جدول ۳) واریانس چندطرفه مقادیر پی‌ولیو و اف‌ولیو برای عامل‌های آزمایش

پی‌ولیو	اف‌ولیو	حداقل مربعات	مجموعه مربعات	منبع
۰/۰۰۰۱	۳۷۳/۸۶	۷. ۳/۰۶۱	۸. ۷/۳۴۷	مدل
۰/۰۰۰۱	۲۶۲/۲۵	۷. ۲/۱۴۷	۷. ۲/۱۴۷	دامنه (A)
۰/۰۰۰۱	۲۶/۲۲	۶. ۲/۱۴۷	۶. ۲/۱۴۷	زمان خیز/ سقوط (B)
۰/۰۰۰۱	۵۴۷/۲۵	۷. ۴/۴۸۱	۷. ۴/۴۸۱	زمان گشودگی (C)
۰/۰۰۰۱	۱۳۱/۶۲	۷. ۱/۰۷۸	۷. ۱/۰۷۸	فشار نیوماتیک (D)
۰/۰۰۰۱	۳۰۵۰/۸۰	۸. ۲/۸۷۲	۸. ۵/۷۴۴	قطر نازل (E)
۰/۰۰۰۱	۱۲۲/۵۳	۷. ۱/۰۰۳	۸. ۲/۰۰۷	AE
۰/۰۰۳۰۰	۴/۹۲	۵. ۴/۰۳۰	۸. ۴/۰۳۰	BD
۰/۰۰۰۱	۱۱/۰۰	۵. ۹/۰۰۶	۶. ۱/۸۰۱	BE
۰/۰۰۰۰۵	۱۳/۳۹	۶. ۱/۰۹۶	۶. ۱/۰۹۶	CD
۰/۰۰۰۰۱	۲۵۰/۱۵	۲/۱۴۷۰۴۸ ۷.	۷. ۴/۰۹۶	CE
۰/۰۰۰۰۱	۲۵/۰۱	۶. ۲/۰۴۸	۶. ۲/۰۴۸	A ²
۰/۰۰۰۶۶	۷/۸۶	۵. ۶/۴۴۰	۵. ۶/۴۴۰	D ²
۰/۰۱۲۵	۴/۴۹	۵. ۳/۸۴۱	۵. ۷/۶۸۲	BDE
۰/۰۰۰۰۳	۹/۱۱	۵. ۷/۴۶۰	۶. ۱/۴۹۲	CDE
۰/۰۰۰۰۲	۹/۷۷	۵. ۸/۰۰۱	۶. ۱/۶۰۰	A ² E
۰/۷۱۳۸	۰/۸۱۷۱	۷۷۸۵۷/۹۰	۶. ۳/۸۹۳	عدم برازش

همان‌طور که در جدول ۳ نشان‌دهنده شده است دامنه، زمان خیز/سقوط، زمان گشودگی، فشار نیوماتیکی و قطر نازل همگی دارای تأثیر معنادار در خروجی هستند. همچنین بعضی از مولفه‌های تعاملی نیز اثر معنادار در خروجی دارند، که نشان از پیچیدگی نقش هر یک از مولفه‌ها در خروجی دارد. مقدار پی‌ولیو عدم برازش نیز بزرگ‌تر از ۰/۰۵ است که نشان‌دهنده آن است که این مدل دارای الگویی مشخص است، که با مدل ارائه شده قابلیت انطباق دارد.

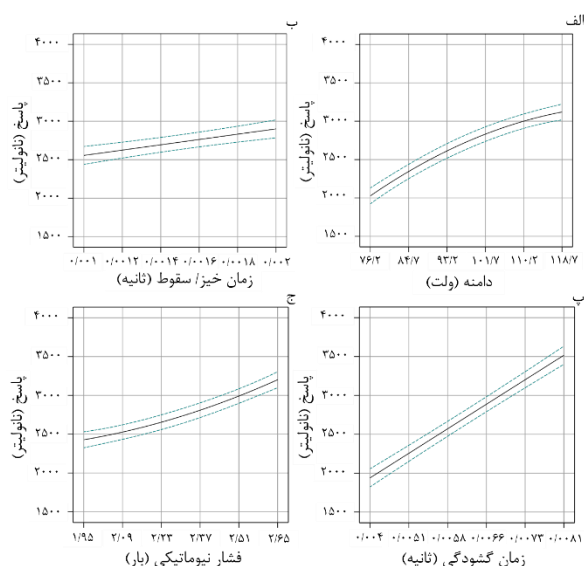
چون عامل پنجم (قطر نازل) حالت گسسته دارد، مدلی که برای این داده‌ها برازش می‌شود، حالت ناپیوسته دارد. به عبارتی دیگر مدل رگرسیونی برازش شده بر داده‌ها، در اصل یک تابع سه ضابطه‌ای است، که هر یک از ضابطه‌ها به یکی از نازل‌های ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۸ نسبت داده شده‌اند. تابع به‌دست‌آمده در روابط (۲)، (۳) و (۴) نشان‌دهنده شده است.

$$Y_{\{0.2\}} = 22.95 A - 1.06e5 B - 48345.5 C - 3465 D + 80759.1 BD + 75326.9 CD - 0.084 A^2 + 709.14D^2 + 2445.2 \quad (2)$$

$$Y_{\{0.5\}} = 44.47 A + 2.88e5 B + 130899 C - 2901 D - 52921 BD + 7352.4 CD - 0.179 A^2 + 709D^2 + 272.11 \quad (3)$$

$$Y_{\{0.8\}} = 210 A - 2.759 B - 4.09e5 C - 6778 D + 1.5e5 BD + 6.08e5 CD - 0.756 A^2 + 709.2D^2 - 2299 \quad (4)$$

شکل ۵ نشان‌دهنده تأثیر مستقل هر یک از عامل‌ها است. همان‌طور که از نمودار مشخص است، تمام عامل‌ها تأثیر مثبت بر روی خروجی دارند. به عبارتی افزایش هر یک از مولفه‌ها در بازه مجاز، باعث افزایش مقدار خروجی می‌شود.



شکل ۵) (الف): تأثیر مستقل مولفه دامنه بر حجم قطره. (ب): تأثیر مستقل مولفه زمان خیز/سقوط بر حجم قطره. (پ): تأثیر مستقل مولفه زمان گشودگی بر حجم قطره. (ج): تأثیر مستقل مولفه فشار نیوماتیکی بر حجم قطره.

با توجه به این که قطر نازل مؤلفه گسسته است، تأثیر آن به صورت مستقل نمایش داده شود. نمودار تأثیر این عامل در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل مشخص است که تأثیر قطر نازل بر روی خروجی به صورت تصاعدی است و تغییر قطر نازل از ۰/۵ به ۰/۸ تغییرات بزرگی در خروجی ایجاد نموده است.

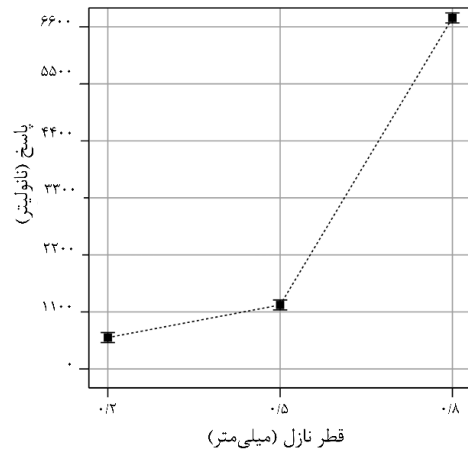
یکی از اهداف طراحی آزمایش، بررسی تأثیرات تعاملی عامل‌ها است، که در واقع اثری مضاعف بر تأثیر یک عامل به تنهایی است. این‌گونه خصوصیت در سیستم، زمانی رخ می‌دهد که فیزیک سیستم پیچیده و مولفه‌های موجود، به نوعی درهم آمیخته در خروجی دیده شوند.

شکل ۷-الف) نشان‌دهنده تأثیر تعاملی بین دامنه و قطر نازل است. همان‌طور که در شکل ۶ نیز مشاهده شد، اثر افزایش قطر نازل بر روی حجم قطره خروجی به صورت تصاعدی است؛ اما در این شکل مشاهده می‌شود که شیب خط آبی که مربوط به نازل ۰/۸ است، بسیار بیشتر از نازل‌های قطر پایین‌تر است. این افزایش شیب نشان از آن دارد که تأثیر افزایش دامنه در قطر نازل بالاتر، بیشتر خود را نشان می‌دهد. این پدیده به این دلیل می‌تواند رخ بدهد که زمانی که قطر نازل کم است، با وجود ویسکوزیته بالا سیال، افزایش جریان سیال محدود به ویسکوزیته سیال می‌شود و حتی با بالا رفتن بیشتر سوزن نیز، افزایش بسیار چشمگیر نخواهد بود. اما با افزایش عرض کانال عبوری سیال (قطر نازل)، عامل محدود کننده جریان، بیش از این که ویسکوزیته و مویینگی سیال باشد، میزان سیال است. که این عامل می‌تواند با حرکت سوزن به خوبی کنترل شود.

در صورت درست بودن تحلیل برای شکل ۷-الف)، این اثر باید برای دیگر عامل‌ها همچون زمان گشودگی و زمان خیز/سقوط برقرار باشد، که همین پدیده در شکل ۷-ب) و شکل ۷-پ) نیز مشاهده می‌شود. به عبارتی در این نمودارها نیز اثر تعاملی زمان گشودگی با قطر نازل و زمان خیز/سقوط با قطر نازل بیان شده است، که مشاهده می‌شود در هر دو نمودار شیب خط مربوط به نازل ۰/۸ بالاتر می‌باشد.

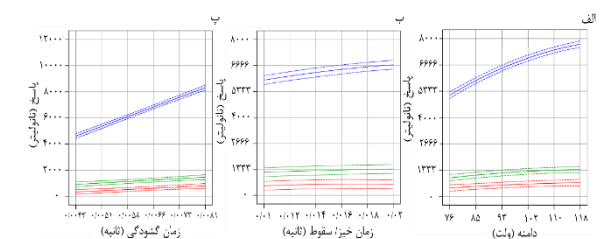
همچنین در شکل ۷ بیشترین اختلاف شیب با نازل‌های دیگر، مربوط به زمان گشودگی است. علت این که اختلاف شیب در نمودار زمان خیز/سقوط کمتر بارز است، به این دلیل است که مقدار تأثیر این عامل بر تنظیم دبی خروجی، در مقایسه با زمان گشودگی به دلیل کوتاه‌تر بودن آن و شیب‌دار بودن حرکت در این زمان، کمتر است.

نمودار شکل ۸-الف) به اثر تعاملی فشار نیوماتیکی پشت سیال و زمان خیز/سقوط یا زمان گشودگی اشاره می‌کند. به نظر می‌رسد، اثر فشار نیوماتیکی زمانی بارزتر است که، زمان بیشتری به سیال برای جاری شدن داده شود. این اثر در زمان گشودگی نیز، بسیار بیشتر است. جالب است که بر خلاف اثر تعاملی قبلی، در این مورد دامنه اثر قابل توجهی ندارد. از طرفی در آثار تعاملی، اثر همزمان

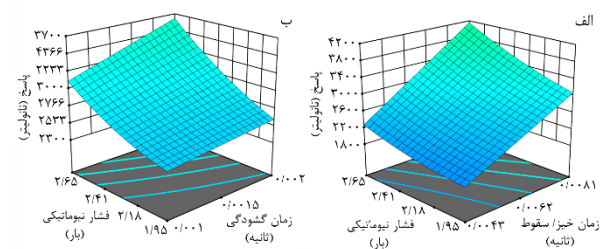


شکل ۶) تأثیر قطر نازل بر روی خروجی.

در نمودارهای شکل ۵، بارزترین عامل زمان گشودگی می‌باشد. یا به عبارت دیگر، زمانی است که سوزن در بالاترین حالت قرار گرفته است. زمانی که سوزن در بالاترین حالت قرار دارد، بدیهی است که سیال بیشتری فرصت می‌یابد تا به سمت خروجی نازل حرکت نماید و باعث می‌گردد حجم قطره خروجی افزایش یابد. پدیده جالب در این عامل، این است که تأثیر میزان دامنه کم‌رنگ‌تر از زمان گشودگی است. این عامل می‌تواند مربوط به ویسکوزیته بالای سیال باشد، که حتی با وجود نبود مانع در مقابل سیال، بازهم زمان نقش پررنگ‌تری نسبت به گشودگی دارد. لازم به ذکر است خط چین سبز رنگ در اطراف خطوط در نمودار شکل ۵ نشان‌دهنده بازه اطمینان است. این خطوط که توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شوند نشان می‌دهند که داده‌ها با اطمینان ۹۵ درصد در بین دو خط چین قرار می‌گیرند.



شکل ۷) الف): اثر تعاملی دامنه و قطر نازل. ب): اثر تعاملی زمان خیز/سقوط و قطر نازل. پ): اثر تعاملی زمان گشودگی و قطر نازل. (خطوط قرمز سبز و آبی به ترتیب مربوط به نازل‌های ۰/۵، ۰/۷۵ و ۰/۸ هستند.)



شکل ۸) الف): نمودار سه بعدی اثر تعاملی فشار نیوماتیکی و زمان خیز/سقوط. ب): نمودار سه بعدی اثر تعاملی فشار نیوماتیکی و زمان گشودگی.

زمان گشودگی (ثانیه)	۰/۰۰۷۵		
فشار نیوماتیکی (بار)	۲/۶۱		
قطر نازل (میلی‌متر)	۰/۲		
دامنه (ولت)	۹۹/۹۷		
زمان خیز/ سقوط (ثانیه)	۰/۰۰۱۵		
زمان گشودگی (ثانیه)	۰/۰۰۷۲	۱۵۸۳	۵٪/۵
فشار نیوماتیکی (بار)	۲/۶۲		
قطر نازل (میلی‌متر)	۰/۵		
دامنه (ولت)	۷۸/۸۷		
زمان خیز/ سقوط (ثانیه)	۰/۰۰۱۹		
زمان گشودگی (ثانیه)	۰/۰۰۴۴	۳۱۱۲	۳٪/۷
فشار نیوماتیکی (بار)	۱/۹۵		
قطر نازل (میلی‌متر)	۰/۸		

با این که به دست آمدن ضریب تعیین ۰/۹۸ برای مدل برازش شده بر داده‌ها نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل است، داده‌های ارائه شده در جدول ۴ نشان‌دهنده خطای حدود ۵ درصد است، که بر دقت مدل تأکید دارد.

مقایسه نتایج این پژوهش با پژوهش‌های دیگر که با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالاتی به دست آمده‌اند، در جدول ۵ نشان داده شده است.

پژوهش	درصد متوسط خطا	ضریب تعیین
لو و همکاران [15]	حدود ۷ درصد	گزارش نشده
شی و همکاران [20]	حدود ۵ درصد	گزارش نشده
پژوهش حاضر	حدود ۵ درصد	۰/۹۸

لازم به ذکر است مزیت پژوهش حاضر، در سرعت پاسخ‌گویی بیشتر و همچنین قابلیت معکوس‌پذیری آن با حفظ دقت است، که پژوهش‌های دیگر فاقد این ویژگی‌ها هستند.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک دستگاه تزریق قطره سیال مبتنی بر پیزوالکتریک طراحی و ساخته شده است. در عملکرد این سیستم مولفه‌های بسیاری وجود دارد که هر یک از آن‌ها در خروجی که حجم قطره

فشار و قطر نازل به چشم نمی‌خورد. این آثار دلالت بر وابستگی اثر فشار بر زمان، در این سیستم دارد. به عبارتی دیگر بیش از این که دامنه یا قطر نازل بالاتر، باعث آشکار شدن اثر فشار باشد، عامل‌های وابسته به زمان تأثیر حداکثری بر این پدیده دارند.

۶- حل معکوس با الگوریتم بهینه‌سازی

روابط (۲) تا (۴) نشان دهنده رابطه حجم قطره با مولفه‌های ورودی سیستم است. با این وجود، نیاز کاربر در غالب موارد عکس این حالت است. یعنی یک حجم هدف برای قطره تعیین می‌گردد و پارامترهای ورودی مناسب باید برای آن پیدا شوند. برای این کار می‌توان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده نمود، تا هر پنج پارامتر برای خروجی مورد نظر محاسبه شود.

در این پژوهش، برای حل معکوس این روابط از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. به این صورت که قیودی برای مولفه‌های ورودی تعیین می‌شود که در جدول ۱ نشان داده شده است. یک تابع هزینه ساده نیز به صورت رابطه (۵) در نظر گرفته می‌شود.

$$C = (Y_{\{Goal\}} - Y)^2 \quad (5)$$

که در آن C مقدار هزینه، $Y_{\{Goal\}}$ مقدار حجم قطره هدف و Y مقدار به دست آمده از روابط (۲) تا (۴) است. با توجه به اینکه بهینه‌سازی با تعداد محدودی از تکرارها به نتیجه می‌رسد و حل آن بیش از چند ثانیه زمان نمی‌برد، در اجرای الگوریتم هر سه معادله جداگانه به کار گرفته می‌شوند. سپس سه مجموعه پاسخ ایجاد می‌شود و پاسخی که کمترین مقدار هزینه را دارد گزارش می‌شود. مقادیر مورد نظر برای چندین نقطه در جدول ۴ محاسبه شده است.

جدول ۱) مقایسه نتایج به دست آمده از حل معکوس روابط رگرسیون و آزمایش تجربی

خطا	مقدار تجربی	مقادیر پیشنهادی	مولفه‌ها	مقدار حجم هدف (نانولیت)
		۹۴/۱۳	دامنه (ولت)	
		۰/۰۰۱۷	زمان خیز/ سقوط (ثانیه)	
۵٪/۷	۴۷۳	۰/۰۰۶۲	زمان گشودگی (ثانیه)	۵۰۰
		۱/۹۷	فشار نیوماتیکی (بار)	
		۰/۲	قطر نازل (میلی‌متر)	
		۱۰۳/۲۶	دامنه (ولت)	
۴٪	۹۶۱	۰/۰۰۱۷	زمان خیز/ سقوط (ثانیه)	۱۰۰۰

- Science 2021 Mar 1 (Vol. 714, No. 3, p. 032081). IOP Publishing.
- 5- Deng G, Cui W, Zhou C, Li J. A piezoelectric jetting dispenser with a pin joint. *Optik*. 2018 Dec 1;175:163-71.
- 6- Deng G, Wang N, Zhou C, Li J. A simplified analysis method for the piezo jet dispenser with a diamond amplifier. *Sensors*. 2018 Jul 2;18(7):2115.
- 7- Zhou S, Yan P. Design and Analysis of a Hybrid Displacement Amplifier Supporting a High-Performance Piezo Jet Dispenser. *Micromachines*. 2023 Jan 27;14(2):322.
- 8- Jeon J, Hong SM, Choi M, Choi SB. Design and performance evaluation of a new jetting dispenser system using two piezostack actuators. *Smart Materials and Structures*. 2014 Dec 8;24(1):015020.
- 9- Bu Z, Lin S, Huang X, Li A, Wu D, Zhao Y, Luo Z, Wang L. A novel piezostack-driven jetting dispenser with corner-filletted flexure hinge and high-frequency performance. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2018 Apr 11;28(7):075001.
- 10- Yang Y, Gu S, Lv Q, Liu J, Yang Z, Li C, Tian H. Influence of needle impact velocity on the jetting effect of a piezoelectric needle-collision jetting dispenser. *Aip Advances*. 2019 Apr 1;9(4).
- 11- Wu M, Zhao RM, Chen JN, Zheng JJ, Shao BK. Design and performance analysis of a flexible-hinged piezoelectric driving dispenser. *Smart Materials and Structures*. 2024 Mar 12;33(4):045014.
- 12- Wang L, Huang X, Lin S, Bu Z, Jin H, Lin X, Lin Z, Xie P. Design and experiment of a jetting dispenser with compact amplifying mechanism and low stress in piezostack. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2020 Mar;31(5):788-98.
- 13- Zhou C, Duan JA, Deng G, Li J. A novel high-speed jet dispenser driven by double piezoelectric stacks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016 Aug 10;64(1):412-9.
- 14- Zhao R, Lv S, Chen G, Chen J, Wang Q, Wu M, Zheng J. Design and experiment of a new double needle type piezoelectric jetting dispenser. *Smart Materials and Structures*. 2023 Feb 9;32(3):035022.
- 15- Lu S, Chen X, Zheng H, Zhao Y, Long Y. Simulation and experiment on droplet volume for the needle-type piezoelectric jetting dispenser. *Micromachines*. 2019 Sep 18;10(9):623.
- 16- Trimzi MA, Ham YB, An BC, Choi YM, Park JH, Yun SN. Development of a piezo-driven liquid jet dispenser with hinge-lever amplification mechanism. *Micromachines*. 2020 Jan 21;11(2):117.
- 17- Zhou C, Deng G, Li J, Duan JA. Flow channel influence of a collision-based piezoelectric jetting dispenser on jet performance. *Sensors*. 2018 Apr 20;18(4):1270.
- 18- Lu S, Zhang J, Liu Y, Zheng H, Ren C. Droplet formation study of a liquid micro-dispenser driven by a piezoelectric actuator. *Smart Materials and Structures*. 2019 Mar 29;28(5):055003.
- 19- Cao L, Gong SG, Tao YR, Duan SY. Optimizing dispensing performance of needle-type piezoelectric jet dispensers: a novel drive waveform approach. *Smart Materials and Structures*. 2024 Mar 4;33(4):045001.

سیال است تأثیرگذار هستند. برای بررسی تجربی این عامل‌ها و تأثیر آن بر حجم قطره تولید شده طراحی آماری آزمایش با روش پاسخ سطح انجام گرفت. مولفه‌های مؤثر در خروجی که مورد بررسی قرار گرفتند شامل زمان خیز / سقوط، زمان بالابودن، و دامنه سیگنال ورودی بودند که مربوط به سیگنال ورودی به سیستم هستند. دو عامل دیگر نیز فشار نیوماتیکی پشت سیال و قطر نازل بودند. هر کدام از مولفه‌های در نظر گرفته شده به جز قطر نازل دارای ۵ سطح هستند و قطر نازل دارای ۳ سطح طراحی است. تأثیرات مستقل مولفه‌ها و تأثیرات تعاملی آن‌ها نشان داد که همه مولفه‌ها دارای اثر مثبت در خروجی هستند. در تأثیرات مستقل می‌توان مشاهده نمود که در این بازه از تغییرات، قطر نازل و زمان گشودگی دارای بیشترین تأثیر در حجم قطره هستند. از بارزترین اثرات تعاملی نیز می‌توان به افزایش تأثیرگذاری مولفه‌های مربوط به سیگنال در قطر بالاتر نازل اشاره کرد. همچنین این اثر مشاهده شد که افزایش عرض سیگنال (زمان یک دوره) در فشارهای بالا، تأثیرات بسیار بیشتری بر افزایش خروجی دارد. مدل رگرسیون به‌دست‌آمده دارای ضریب تعیین بالای ۰/۹۸ است که نشان‌دهنده تطابق مناسب بین مدل برازش شده و داده‌های آزمایشگاهی است. همچنین معکوس مدل به‌دست‌آمده نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شد و نتایج نشان داد که تفاوت این نتایج با نتایج تجربی حدود ۵ درصد است. نتایج این پژوهش باعث می‌شود کاربر بتواند خروجی سیستم را با مولفه‌های ورودی تخمین بزند که به افزایش کارایی سیستم کمک شایانی می‌نماید همچنین شناخت مولفه‌ها و اثرات آن می‌تواند در بهینه‌سازی طراحی این سیستم برای خروجی‌های هدف کاربردی باشد.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.

تعارض منافع: مطالب این پژوهش هیچ تضاد یا تعارض منافی با فرد یا نهادی ندارد.

منابع مالی: این پژوهش تحت هیچ‌گونه حمایت مالی نمی‌باشد.

منابع

- 1- Trimzi MA, Ham YB, An BC, Park JH, Yun SN. Numerical analysis and simulation of an impulse driven piezoelectric needle-free jet injector. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019 Aug;33:3851-8..
- 2- Li H, Liu J, Li K, Liu Y. Piezoelectric micro-jet devices: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019 Oct 1;297:111552..
- 3- Peng H, Deng J, Deng G, Zhou C, Li J. Design and Research of a Novel Piezostack-Driven Jetting Dispenser With a Diamond Spring. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2022 Oct 31;12(11):1849-56.
- 4- Li G, Zhou C. Rigid flexible coupling dynamic analysis of piezoelectric jetting dispenser based on ADAMS. *InIOP Conference Series: Earth and Environmental*

- 20- Shi Y, Huang A, Fu B. Design and performance analysis of a piezoelectric jetting dispensing valve. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2024 Jun;35(10):920-41.
- 21- Deng C, Wang H, Huang W, Cheng S. Numerical and experimental study of oil-in-water (O/W) droplet formation in a co-flowing capillary device. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*. 2017 Nov 20;533:1-8.
- 22- Chong BW, Othman R, Putra Jaya R, Mohd Hasan MR, Sandu AV, Nabiałek M, Jeż B, Pietrusiewicz P, Kwiatkowski D, Postawa P, Abdullah MM. Design of experiment on concrete mechanical properties prediction: a critical review. *Materials*. 2021 Apr 9;14(8):1866.
- 23- Salehian S, Rad PF, Ghafarirad H. Design and Analysis of Piezoelectric Aided Dispensing System for Fluid Droplet Generation. In 2023 11th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM) 2023 Dec 19 (pp. 756-761). IEEE.
- 24- Li L, Wan Y, Chen S, Tian W, Long W, Song J. Prediction of optimal ranges of mix ratio of self-compacting mortars (SCMs) based on response surface method (RSM). *Construction and Building Materials*. 2022 Feb 14;319:126043.