



کنترل تشکیل قطره در چاپ جوهرافشان با استفاده از تنظیم خواص فیزیکی مرکب چاپ و بررسی تاثیر اعداد بدون بعد در قابلیت چاپ

دریا عوض نژاد فرد^۱، مرضیه خطیب زاده^{۲*}، سعیده گرجی کندی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵.

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۲۴ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۷/۰۶/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۶/۲۱ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۷/۰۹/۰۷

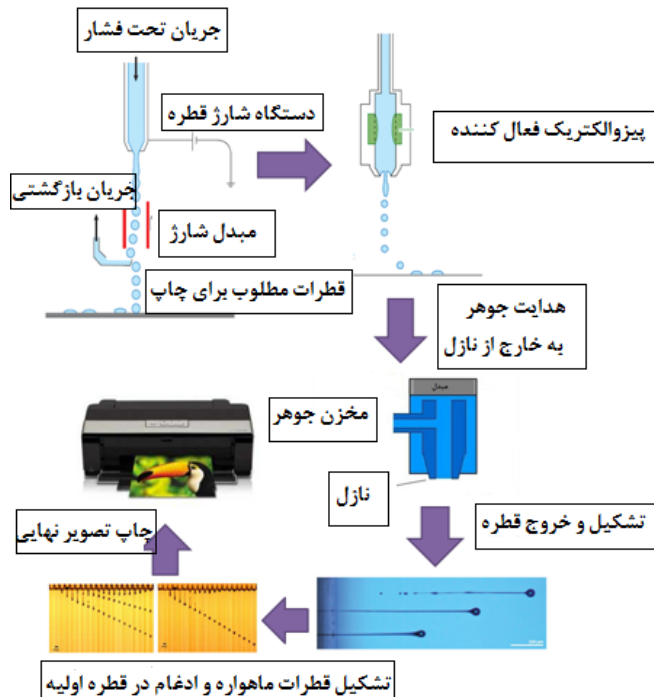
چکیده

چاپ جوهرافشان یک فرآیند چاپ جالب توجه است که در آن جریان سیال خارج شده از نازل، موجب تشکیل قطره شده و در نهایت تصویر دلخواه بر روی زمینه مورد نظر ایجاد می‌شود. مزایای بی‌شمار روش چاپ جوهرافشان، این روش را به یکی از کارآمدترین و اصلی‌ترین روش‌های چاپ تبدیل کرده است. با توجه به اهمیت و کاربرد روز افزون این روش، قابل چاپ بودن جوهر مورد استفاده بسیار حائز اهمیت می‌باشد. خواص فیزیکی جوهر مورد استفاده در این روش چاپ، مستقیماً بر روی قابلیت چاپ و سازوکار تشکیل قطره اثر می‌گذارد. با تنظیم خواص رئولوژیکی جوهر چاپ می‌توان نحوه تشکیل قطره را کنترل نمود. قابلیت چاپ سیالات با استفاده از عکس عدد Z تحت عنوان عدد اونسورگ، که مربوط به خواص فیزیکی جوهر از جمله گرانش، کشش سطحی و چگالی است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، محدوده Z قابل چاپ برای سیالات مختلف، از طریق بررسی دینامیک تشکیل قطره، مشخص می‌شود.

واژه‌های کلیدی

چاپ جوهر افشان، تشکیل قطره، اعداد بدون بعد، رئولوژی.

چکیده تصویری





Controlling Droplet Formation in Inkjet Printing Using Adjustment of Physical Properties in Ink and Investigating the Effect of Dimensionless Numbers on Printing Capability

Darya Ewaznezhad Fard, Marziyeh Khatibzadeh*, Saeideh Gorji Kandi

Faculty of Polymer Engineering & Color Technology, Amirkabir University of Technology, P. O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran.

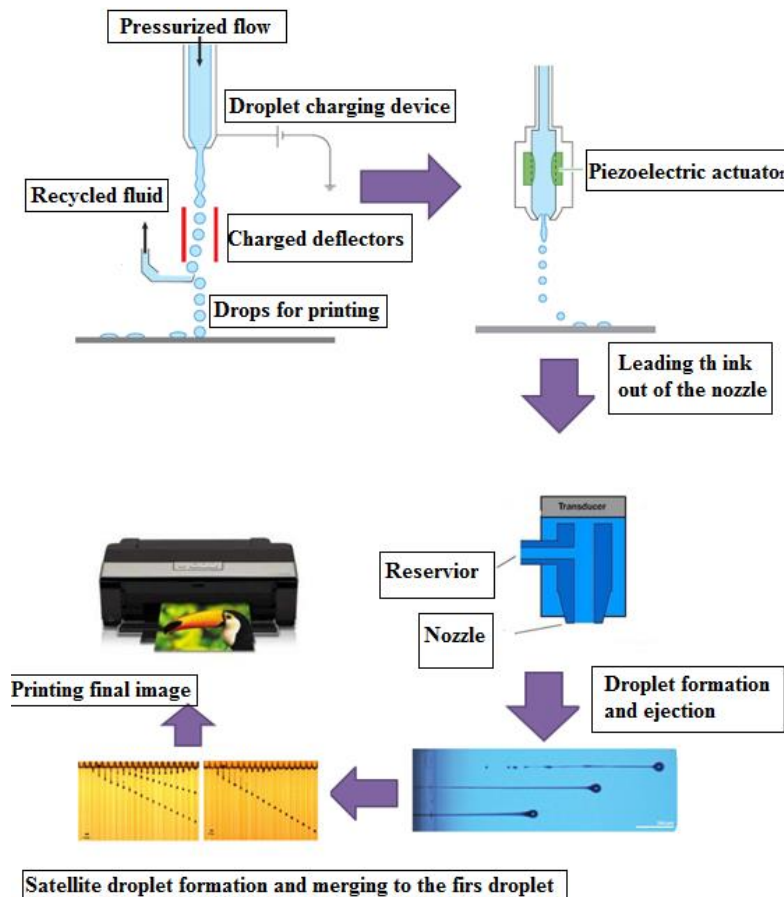
Abstract

The numerous benefits of inkjet printing have transformed this method into one of the most efficient printing methods. Considering the importance and the increasing use of this technique, it is very important to use an appropriate printing ink. The physical properties of the ink used in this printing method, directly affects the printability and the droplet forming mechanism. By controlling the rheological properties of the ink, droplet formation will be controlled. The ability to print fluids using the inverse of Z number, called the ohnesorge number, refers to the physical properties of the ink, including viscosity, surface tension and density. Also, the printable Z range for different fluids is determined by analyzing the dynamics of droplet formation.

Keywords

Inkjet Printing, Droplet formation, Dimensionless Numbers, Rheology.

Graphical abstract



۱- مقدمه

بعد وبر^{۱۲} (N_{We}) نسبت نیروی اینرسی به نیروی موئینگی است [۱]. مطالعات و تحقیقات بسیاری در زمینه‌ی چاپ جوهر افشان و سازوکار تشکیل قطره انجام شده است که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد.

۲- چاپ جوهر افشان

این روش، یک روش چاپ مستقیم و بدون استفاده از صفحه حامل تصویر است که فرآیند چاپ را با سرعت بالا روی زیرآیند مورد نظر انجام می‌دهد. ویژگی اصلی این فرآیند شامل انتقال سیال مشخص با / بدون ذرات از طریق مسیر مشخص بر روی زمینه است [۱۰]. تقسیم‌بندی این روش چاپ به دو دسته چاپ پیوسته^{۱۳} و قطره به درخواست^{۱۴} مرسوم و کاربردی است [۵]. چاپ پیوسته عموماً برای کدگذاری و علامت گذاری با قطر قطره‌ی تقریباً $100 \mu m$ به کار می‌رود و روش قطره، در صورت کاربرد در گرافیک و چاپ حروف با قطر قطره‌ی کمتر، غالباً در محدوده‌ی $50-20 \mu m$ مورد استفاده می‌باشد [۱۱]. اخیراً از این روش چاپ برای چاپ در کاربردهای متفاوتی از جمله چاپ هولوگرام نیز استفاده می‌شود که در این فرآیند دیسپرسیونی از ذرات کلوییدی، پس از فرآیند تشکیل قطره، بر روی سطح زمینه مورد نظر قرار می‌گیرند [۱۲].

یکی از انواع هددهای مورد استفاده در چاپگرهای جوهر افشان، هد پیژوالکتریک^{۱۵} می‌باشد. با توجه به استفاده وسیع از آن، پیش از پرداختن به انواع چاپگر جوهر افشان توضیح مختصری در این مورد جالب توجه است. در روش پیژوالکتریک با استفاده از پالس فشاری به بلور پیژوالکتریک و در نتیجه خم کردن بلور و اعمال فشار به مخزن جوهر و تشکیل جت منجر به تشکیل قطره در زمان نیاز و روی سطح مورد نظر خواهد شد در حالی که در چاپ پیوسته، جمعی از قطرات شکل گرفته در اثر اعمال پالس فشاری به پیژوالکتریک و غلبه بر نیروی کشش سطحی، از نازل خارج می‌شوند و سیال با نیروی موئینگی و اینرسی، از سر نازل جدا می‌شود [۱۱].

بلور پیژوالکتریک، از جنس تیتانیم زیرکونیم سرب می‌باشد و با فرکانسی در محدوده‌ی ۶۴ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز تحریک می‌شود. با اعمال ولتاژ به این بلور، حجم آن افزایش یافته و در نتیجه فشار داخل محفظه برای خروج قطره جوهر از نازل افزایش می‌یابد و این افزایش حجم، باعث یک جابه‌جایی ۳۰ نانومتری می‌شود که برای خروج قطره از سوراخ ۸۰ میکرونی نازل با سرعتی حدود ۱۳ متر بر ثانیه کافی است. همچنین، این بلورها اشکال مختلفی دارند که با توجه به کاربرد مورد نظر از آن‌ها استفاده می‌شود [۱۳]. در اوایل دهه ۱۸۹۰، اثر پیژوالکتریک توسط برادران کوری^{۱۶} کشف شد که تا حد زیادی استفاده از مواد جدید را رواج دادند. پس از آن، مواد کاربردی بسیاری با اثر پیژوالکتریک کشف شدند. در اوایل دهه ۱۹۴۰ مواد پیژوالکتریک مورد استفاده در فناوری مبدل‌ها گزارش شد. در اوایل پیشرفت مواد پیژوالکتریک، بلور کوارتز به عنوان اولین منبع برای این مواد مورد استفاده قرار می‌گرفت و

چاپ جوهر افشان در سال‌های اخیر با موارد مصرف فزاینده از مصارف خانگی و اداری روبه‌رو بوده است و به دلیل گسترش استفاده از این روش چاپ و همچنین افزایش استفاده از آن در چاپ منسوجات، همواره تلاش بر بهبود عملکرد این روش مورد توجه بوده است [۲، ۱]. چاپ جوهر افشان در میان سایر روش‌های چاپ، روش پرکاربردی است و دارای مزیت‌هایی از جمله سرعت چاپ نسبتاً مناسب، انعطاف پذیری، تک مرحله‌ای و کم هزینه بودن فرآیند، قابل استفاده روی زیرآیندهای متفاوت و سازگار با محیط‌زیست می‌باشد [۳]. همچنین در تولید با حجم کم، این روش چاپ پرهزینه نمی‌باشد و وابستگی چندانی به نیروی کاری ندارد. بنابراین چاپ جوهر افشان بهترین و ساده‌ترین روش چاپ شناخته شده است که از نظر آلودگی محیط‌زیست مشکل چندانی ایجاد نمی‌کند [۴]. چاپ غیرضربه‌ای^۱ شامل چاپ جوهر افشان و چاپ الکتروفوتوگرافی است [۵].

یکی از چالش‌های اصلی، تعیین فرمول‌بندی جوهر مورد استفاده است که باید متناسب با روش چاپ و زیرآیند مورد استفاده در فرآیند چاپ باشد. جوهرهای چاپ جوهر افشان به طور کلی شامل یک ماده رنگ‌بخش^۲ و محمل^۳ هستند. ماده رنگ‌بخش تصویر مرئی را روی زیرآیند ایجاد می‌کند و می‌تواند ماده رنگ‌زا^۴ یا رنگدانه^۵ باشد. مزیت اصلی مواد رنگ‌زا نسبت به رنگدانه‌ها، گستره وسیع محدوده رنگی آن‌هاست. پیونده جزئی از فرمول‌بندی است که جوهر را روی سطوحی همچون کاغذ، شیشه و سرامیک نگه می‌دارد [۶-۸]. همواره چالش‌های فراوانی به منظور بهبود فرمول‌بندی جوهرهای مصرفی در چاپ جوهر افشان مورد توجه بوده است.

تولید قطره فرآیند دینامیکی است [۹] نحوه تشکیل قطره در فرآیند چاپ، علاوه بر روش چاپ به خواص رئولوژیکی جوهر نیز وابسته است. از جمله خواص فیزیکی حائز اهمیت در فرآیند تشکیل قطره می‌توان به گرانیروی، چگالی و کشش سطحی سیال اشاره نمود. در نتیجه تنظیم این خواص در مرکب چاپ و تلاش در جهت بهبود آن‌ها، کنترل‌کننده‌ی نحوه‌ی تشکیل و خروج قطره خواهد بود. شکل قطره‌های خروجی از نازل و سرعت آن‌ها در کیفیت چاپ اثر می‌گذارد. خواص سیال با به کارگیری اعداد بدون بعد رینولدز^۶، وبر^۷ و اونسورگ^۸ بیان می‌شوند [۹-۷]. خواص رئولوژیکی و فیزیکی مهم سیال عموماً از طریق ارتباط با اعداد بدون بعد روی سازوکار تشکیل قطره اثر می‌گذارند و مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته است که در این میان می‌توان به تحقیق انجام‌شده توسط فروم^۹ اشاره کرد. او از اعداد بدون بعد برای ارائه‌ی خواص فیزیکی سیال استفاده نمود. عدد بدون بعد رینولدز^{۱۰} (N_{Re}) نسبت نیروی اینرسی^{۱۱} به نیروی ویسکوز است. عدد بدون

1 Non-Impact Printing

2 Colorant

3 Vehicle

4 Dye

5 Pigment

6 Reynolds

7 Weber

8 Ohnesorge

9 Fromm

10 Reynolds number

¹¹ Inertia

¹² Weber number

¹³ Continuous jet (CIJ)

¹⁴ Drop On Demand (DOD)

¹⁵ Piezoelectric Head

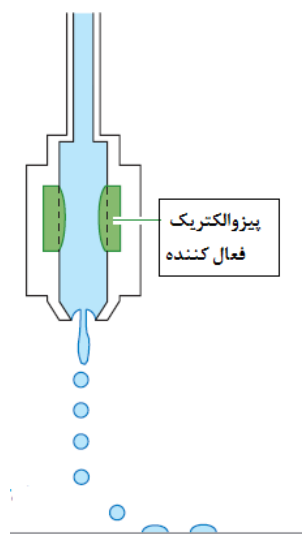
¹⁶ Curie brothers

مقاله

درخواست می‌باشد. با این حال همچنان در برخی کاربردها روش چاپ پیوسته به کار گرفته می‌شود [۳]. با اعمال فشار منظم و پیوسته به جوهر داخل مخزن، در یک فرکانس معین، اندازه و فواصل قطرات تشکیل شده نیز منظم خواهد بود. این اتفاق از طریق اعمال ولتاژ به بلور پیزوالکتریک که در تماس با جوهر است رخ می‌دهد. جریانی یکنواخت از قطرات با اندازه و فواصل مناسب شکل گرفته که اگر امکان سقوط روی زمینه را داشته باشد تشکیل یک خط پیوسته از نقاط را خواهد داد [۳].

۲-۲- روش قطره به درخواست

روش قطره به درخواست به طور کلی به دو دسته‌ی حرارتی و پیزوالکتریک تقسیم می‌شود. در این روش پالس فشاری روی جوهر داخل مخزن به طور پیوسته نبوده و تنها زمانی که تشکیل قطره‌ی منفرد مورد نیاز است، پالس فشاری توسط بلور پیزوالکتریک اعمال می‌شود [۳]. روش قطره به درخواست بخش اعظمی از چاپ جوهرافشان را با توجه به سادگی‌اش به خود اختصاص داده است [۸]. در روش پیزوالکتریک، رسوب قطره از طریق قرار گیری نازل چاپ بالای مکان مورد نظر روی زمینه قبل از خروج رخ می‌دهد. قطرات از طریق یک پالس فشاری، در پشت مخزنی که سیال در آن قرار گرفته، تشکیل می‌شوند. اگر پالس فشاری بیش از مقدار مورد نیاز باشد، بیش از یک قطره خارج شده و در غیاب پالس فشاری، مایع از طریق کشش سطحی در نازل نگه داشته می‌شود. اندازه قطره تشکیل و خارج شده تقریباً برابر با اندازه‌ی سر نازل می‌باشد [۱۱]. در روش قطره به درخواست، پالس فشاری از طریق یک مبدل پیزوالکتریک به سیال داخل مخزن وارد می‌شود. شکل ۲ نمونه‌ای از مبدل پیزوالکتریک در چاپگر جوهرافشان به روش قطره به درخواست می‌باشد که در اثر اعمال پالس فشاری، تشکیل قطره می‌دهد [۱۱].



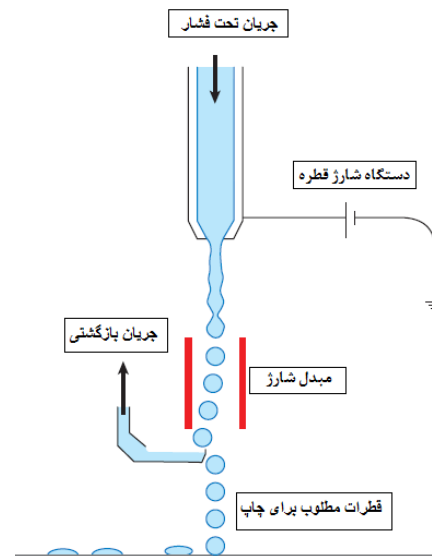
شکل ۲- نمایش شمایی مبدل پیزوالکتریک در روش قطره به درخواست و اعمال پالس فشاری و تشکیل قطره [۱۱].

در طول سال‌های دهه ۱۹۵۰ کشف شد که سرامیک‌های باریم تیتانات نیز دارای خاصیت پیزوالکتریک هستند و بدین ترتیب سرامیک‌های پیزوالکتریک بسیار توسعه یافتند. در دهه ۱۹۶۰، جافه^۱ و همکارانش خاصیت پیزوالکتریک پیزوالکتریک تیتانات زیرکونات سرب^۲ را کشف کرده و بیان کردند که این نوع سرامیک پیزوالکتریک خاصیت پایداری و پیزوالکتریسیته بهتری از سایر مواد از خود نشان داده‌است و از آن پس استفاده از این نوع سرامیک پیزوالکتریک در اکثر صنایع و فناوری‌ها گسترش یافت [۱۴].

۲-۱- روش پیوسته

در روش چاپ پیوسته، جمعی از قطرات شکل گرفته در اثر پالس فشاری به طور پیوسته از نازل خارج می‌شوند. برای هدایت و رسوب این قطرات، نازل در یک پتانسیل مشخص قرار گرفته که از این طریق به هر یک از قطرات شکل گرفته مقدار مشخصی شارژ رسانده می‌شود. نمودار شمایی از عملکرد چاپگر پیوسته در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۱]. چاپگر پیوسته همان طور که از نام آن مشخص است، به طور پیوسته، حتی زمانی که مورد نیاز نیست، تولید قطره می‌کند. قطرات ناخواسته توسط میدان منحرف می‌شوند و در بسیاری از کاربردها این جوهرهای تلف شده بازیابی می‌شوند. در بسیاری از کاربردها و همچنین در علم مواد، این بازیابی پس از قرارگیری در معرض محیط‌زیست باعث ایجاد خطرات محیطی ناشی از جوهر می‌شود. از این رو فرآیند چاپ پیوسته یک روش نسبتاً نامطلوب می‌باشد. از دیگر مشکلات این روش چاپ، این است که سیالات محدودی در این روش قابل استفاده می‌باشد. ضمناً وضوح تصویر حاصل از چاپ به روش پیوسته، کمتر از وضوح تصویر در روش قطره به

¹ Jaffe
² Lead Zirconate Titanate



شکل ۱- نمونه‌ای از چاپ پیوسته [۱۱].

۳- سازوکار تشکیل قطره

فرآیند تولید قطره با توجه به عوامل زیادی تعریف می‌شود. این عوامل در سه دسته اصلی قرار می‌گیرند:

- شکل امواج اعمالی
- خواص سیال
- هندسه نازل

قبل از اینکه محرک به سیال داخل مخزن، شارژی وارد کند، سیال در داخل نازل به صورت متعادل قرار دارد. در این مرحله، سرعت سیال و فشار صفر است. وقتی محرک قصد اعمال عامل تحریک را دارد، فشار بالا در داخل نازل تولید شده و سیال شروع به حرکت و جاری شدن به خارج از اریفیس^۱ می‌کند. در عین حال، انرژی جنبشی از دیواره‌های محرک به جریان خروجی منتقل می‌شود. انرژی جنبشی به دلیل غلبه بر کشش سطحی سیال، یک نیروی میراست. در مرحله بعد، قطره با مایع داخل نازل به یک فیلامنت نازک متصل می‌شود. پس از مدتی اگر ممنتوم مایع به اندازه کافی زیاد باشد، قطره از نازل جدا می‌شود. در این مرحله، کشش سطحی سیال به میان می‌آید تا فیلامنت را به قطره بچسباند و پس از پایان این مرحله، دوباره چرخه ادامه می‌یابد و از ابتدا مخزن نازل را از سیال پر می‌کنند و سایر مراحل تشکیل قطره تکرار می‌شود [۸، ۱۵].

۳-۱- شکل امواج اعمالی

بوگی^۲ و تالکه^۳ برای پالس فشاری مقدار بهینه تعریف کردند که در آن مقدار،

قطره خارج شده دارای بیشینه سرعت بوده است. آن‌ها اظهار داشتند که بهینه‌ی پالس فشاری با رابطه‌ی $c/1$ ارائه می‌شود که در آن l طول حفره و c سرعت امواج در سیال می‌باشد. ریس^۴ و دربی^۵ نیز تاکید کردند که سرعت قطره خروجی دارای یک مقدار بیشینه می‌باشد که این مقدار تابع پالس فشاری است [۱]. شکل ۳ ترتیب تشکیل قطره را در چاپگر جوهرافشان به روش قطره به درخواست نشان می‌دهد. دم کش آمده مایع یکی از ویژگی‌های فرآیند چاپ در این روش می‌باشد [۱۱].

شکل ۴ یک موج تک‌قطبی را نشان می‌دهد که در آزمایشات به کار می‌رود تا پیزوالکتریک چاپگر را تحریک کند. متغیرهای t_R ، t_D و t_F به ترتیب زمان خیز، زمان سکون و زمان افت بوده و V_D ولتاژ اعمالی در زمان سکون می‌باشد. زمانی که ولتاژ افزایش می‌یابد، المان پیزوالکتریک منقبض می‌شود و این امر باعث تولید پالس منفی در حفره‌ی نازل می‌شود. این انقباض، برای زمان t_D است و پس از آن پیزوالکتریک منبسط شده و در ادامه ولتاژ اعمالی باعث تشکیل قطره و ایجاد یک پالس فشاری مثبت درون حفره نازل می‌شود، نتیجه‌ی این امر خروج سیال و تشکیل قطره می‌باشد. پالس فشاری در فرکانس ثابت اعمال می‌شود. متغیرهای t_R و t_F طی $5 \mu s$ ثابت شده در حالی که t_D متغیر است. طی آزمایشات انجام‌شده در این مطالعه، سیال مورد استفاده به عنوان جوهر چاپ، مخلوط‌های آبی از گلیسرول با درصد وزنی از ۰ تا ۸۰ است که به طور طبیعی نیوتنی هستند [۱].

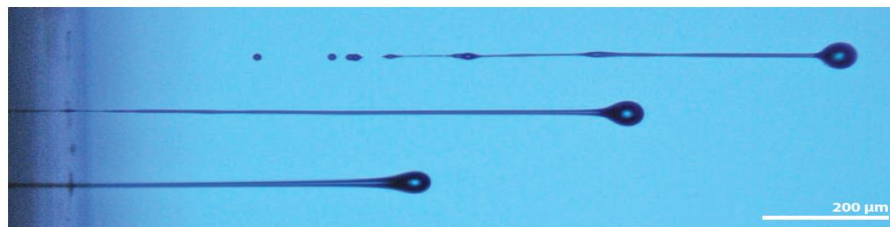
³ Talke

⁴ Reis

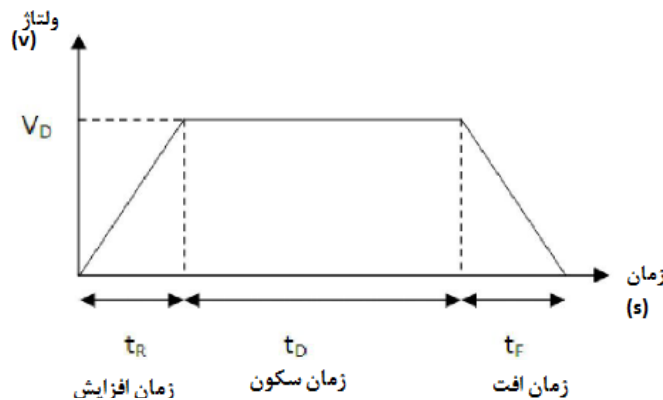
⁵ Derby

¹ Orifice

² Bogy



شکل ۳- مراحل تشکیل قطره در چاپگر جوهرافشان به روش قطره به درخواست [۱۱].

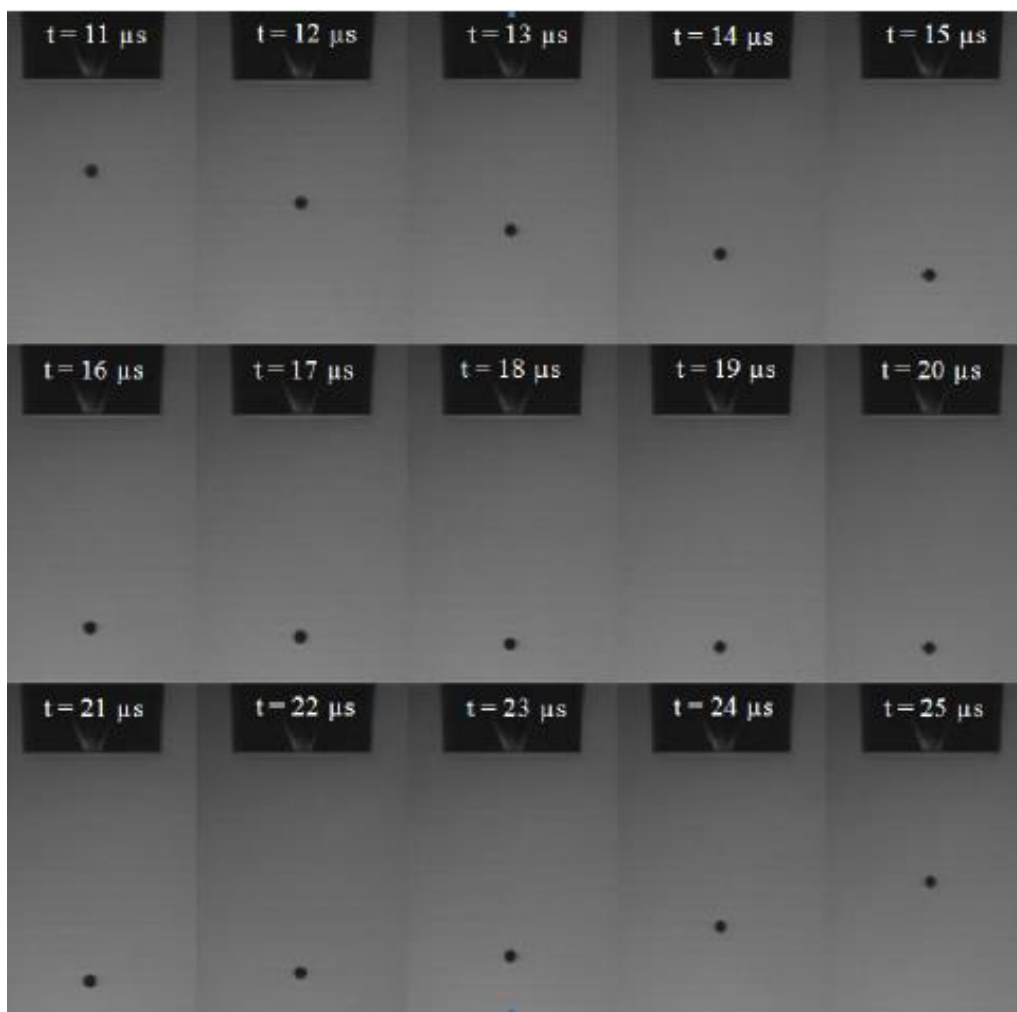


شکل ۴- موج تحریک تک‌قطبی و نشان‌دهنده زمان خیز، زمان سکون و زمان افت [۱].

مقاله

همچنین با افزایش درصد گلیسرول در ترکیب سیال، ولتاژ اعمالی جهت تشکیل و خروج قطره کافی نبوده است. این امر در جدول ۱ نشان داده شده است [۱]. به عبارتی با افزایش درصد گلیسرول در ترکیب فرمول بندی جوهر، چگالی و گرانیوز افزایش می یابد در حالی که، کشش سطحی ترکیبات کاهش می یابد و طبق رابطه ۳، که در ادامه خواهیم داشت، عدد اونسورگ در حال افزایش است. این امر در شکل ۶ نیز نشان داده شده است [۱].

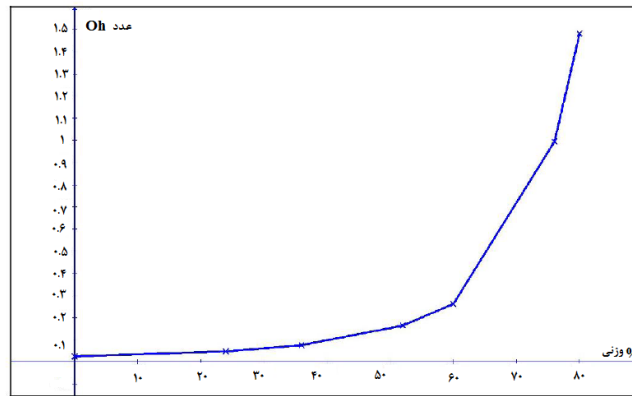
تعیین زمان واقعی تشکیل قطره با استفاده از یک دوربین و تصویربرداری از آن ها ممکن خواهد بود. t_D برای هر ترکیب گلیسرول از یک حد پایین تا یک حد بالا تغییر می کند و به موجب آن در این محدوده، یک قطره می تواند از نازل خارج شود. این محدوده ها برای ترکیبات مختلف گلیسرول با توجه به ولتاژ اعمالی جهت خروج قطره کمی متفاوت خواهد بود. با تغییر t_D ، توسط دوربین ها تصویری از خروج قطره ثبت می شود. با استفاده از نرم افزار JETLABII [۱۶]، سرعت و حجم قطره نیز کمی شده و اندازه گیری می شود. مقادیر ثبت شده در شکل ۵ نشان داده شده است [۱].



شکل ۵- تصاویر ثبت شده برای ترکیب گلیسرول ۷۶٪ با تغییر t_D در هر ثانیه توسط دوربین [۱].

جدول ۱- پتانسیل اعمال شده برای ترکیب درصدهای مختلف گلیسرول [۱].

درصد وزنی گلیسرول	ولتاژ اعمالی (V)
۰ (water)	۱۵
۲۴	۱۵
۳۶	۱۵
۵۲	۱۵
۶۰	۲۰
۷۶	۳۰
۸۰	۳۵



شکل ۶- منحنی افزایشی عدد اونسورگ در مقابل غلظت گلیسرول [۱]

۲-۳- خواص سیال

برای اینکه مرکب هنگام استفاده در چاپگر مشکل‌زا نباشد و چاپی با خطوط مرزی منظم در طرح مورد نظر و همچنین با ثبات‌های قابل قبول ارائه دهد باید دارای خواص مناسب باشد [۴]. فناوری جوهرافشان محدودیت‌های زیادی را بر مرکب‌ها تحمیل می‌کند که شامل ملزوماتی چون پایداری سوسپانسیون، گرانروی، کشش سطحی، اندازه ذرات رنگدانه و استحکام رنگ می‌باشد [۱۷].

همان‌طور که اشاره شد، برای خروج قطره‌ی جوهر به شکل مناسب، باید گرانروی جوهر در محدوده بهینه تنظیم شود. بالاتر بودن گرانروی جوهر از محدوده مناسب (که از بالا بودن غلظت یا وزن مولکولی اجزای به کاررفته در جوهر ناشی می‌شود) منجر به عدم تشکیل قطره جوهر و عدم خروج آن از نازل دستگاه چاپگر می‌شود و می‌تواند به هد دستگاه چاپگر نیز آسیب برساند، درحالی‌که پایین‌تر بودن گرانروی جوهر از محدوده مناسب (که از غلظت یا وزن مولکولی پایین اجزا ناشی می‌گردد) منجر به ایجاد دنباله در قطره جوهر و عدم تشکیل یک قطره منسجم و یگانه شده که درنهایت باعث به وجود آمدن شکل نامنظم روی سطح و تصویر با کیفیت پایین خواهد شد. به عبارتی اگر گرانروی مرکب در محدوده پایین باشد امکان حرکت سریع در نازل‌های هد چاپگر، حرکت آسان‌تر در کانال‌های موجود در مخزن مرکب و نفوذ آسان‌تر در زیر لایه‌های متخلخل را فراهم می‌کند اما اگر گرانروی بیش از حد پایین باشد احتمال ریزش جوهر از نازل نیز وجود دارد [۱۷]. کشش سطحی جوهر نیز باید به اندازه کافی پایین باشد تا جوهر بتواند کانال‌های مویینه را تر کرده و به خارج از نازل جریان یابد [۳].

همان‌طور که اشاره شد، خواص فیزیکی مهم جوهرهای چاپ، گرانروی، کشش سطحی و چگالی می‌باشند. این ویژگی‌ها روی سازوکار تشکیل قطره و اندازه‌ی مناسب قطره تشکیل شده اثر می‌گذارند. فرم^۱ یک راه حل تقریبی برای خروج قطره ارائه کرد. او از اعداد بدون بعد برای ارائه‌ی خواص فیزیکی جوهرهای چاپ استفاده کرد. عدد بدون بعد رینولدز (N_{Re}) نسبت

نیروی اینرسی^۲ به نیروی ویسکوز است. عدد بدون بعد وبر (N_{We}) نیز بیان‌گر نسبت بین نیروی اینرسی به نیروی موئینگی است [۳].

$$N(Re) = \frac{v_{ap}}{\eta} \quad (1)$$

$$N(We) = \frac{v^2 a \rho}{\gamma} \quad (2)$$

$$Z = \frac{1}{Oh} = \frac{N(Re)}{N(We)^{1/2}} \quad (3)$$

که در این روابط v ، ρ و η به ترتیب سرعت متوسط، چگالی، کشش سطحی و گرانروی سیال هستند و a شعاع اریفیس چاپ است. فرایند چاپ شامل سه مرحله متمایز می‌باشد که این سه مرحله شامل تشکیل قطره، پرتاب قطره و برخورد قطره جوهر با زمینه مورد نظر است. هر کدام از این مراحل محدودیت‌هایی در هر دو مورد فرمول‌بندی جوهر و فرایند چاپ ایجاد می‌کند. عدد بدون بعد وبر در مرحله اول تشکیل قطره جوهر که برهم‌کنش متقابل انرژی جنبشی و کشش سطحی مطرح است اهمیت دارد (عدد وبر متناسب است با نسبت انرژی جنبشی بر کشش سطحی) و عدد بدون بعد رینولدز نیز در مراحل دوم و سوم که در آن گشتاور حاصل از پالس فشار بر رئولوژی سیال (گرانروی) غلبه می‌کند اهمیت دارد (عدد رینولدز متناسب است با نسبت انرژی جنبشی بر گرانروی سیال) [۹-۶]. عدد بدون بعد اونسورگ اهمیت نسبت نیروی ویسکوز به انرژی سطحی را توضیح می‌دهد که معمولاً برای توصیف مکانیزم تشکیل قطره به کار گرفته می‌شود. مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته است که در این میان می‌توان به تحقیق انجام‌شده توسط فروم اشاره کرد. او به گونه‌ای ابهام‌آمیز از عکس عدد اونسورگ تحت عنوان Z استفاده کرد و اظهار کرد سیالات با $Z > 2$ سیالات قابل چاپ هستند. سپس این آنالیزها توسط دربی و ریس نیز مورد بررسی قرار گرفت و آن‌ها برای سیالات قابل چاپ، به طور دقیق‌تر، محدوده‌ی $1 < Z < 11$ [۱۱] ($0.2 < Oh < 1/5$) [۳] را گزارش کردند. در مقادیر Z کم، زیاد بودن گرانروی نمونه‌های جوهر، مانع از تشکیل و خروج قطره شده و برعکس در مقادیر Z زیاد، قطره منفرد شکل گرفته که ممکن

¹ Fromm

² Inertia

مقاله

هستند، اثر می‌گذارد. طبق مطالعه‌ای که ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۸ انجام دادند، برای جوهرهایی با چگالی $1000,500 \text{ kg/m}^3$ و ۱۵۰۰ سازوکار تشکیل قطره را بررسی کردند. نتیجه این بررسی در شکل ۸ نشان داده شده است [۱۰].

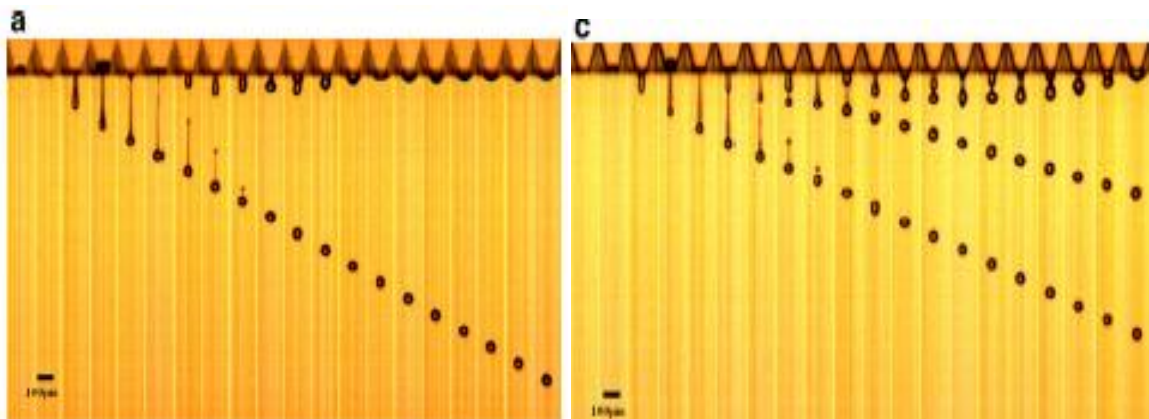
شکل ۹ اثر گرانی را بر فرآیند خروج نشان می‌دهد. با افزایش نیروی ویسکوز، حرکت و جدایش سیال و قطره آهسته‌تر می‌شود که برای یک قطره پایدار چنین پدیده‌ای مطلوب است. این نکته نیز قابل ذکر است که تاثیر گرانی منجر به اتلاف نیروی ویسکوز در نازل شده و نیازمند انرژی بیشتری از پالس فشاری می‌باشد تا قطرات با سرعت مشخص را تولید کنند [۱۰].

شکل ۱۰ اثر کشش سطحی را در فرآیند خروج قطره نشان می‌دهد. کشش سطحی یک عامل کلیدی و اثرگذار بر شکل قطره ابتدایی و جدایش قطره اولیه و قطرات ماهواره می‌باشد. با افزایش مقدار عددی کشش سطحی، دم قطره خروجی تقریباً نامرئی می‌شود و قطره اولیه دور می‌شود. همچنین قابل ذکر است که کشش سطحی به خواص تر شوندگی سیال و نازل نیز وابسته بوده و نقش مهمی را در دوباره تولید و تکرارپذیری قطره دارد [۱۰].

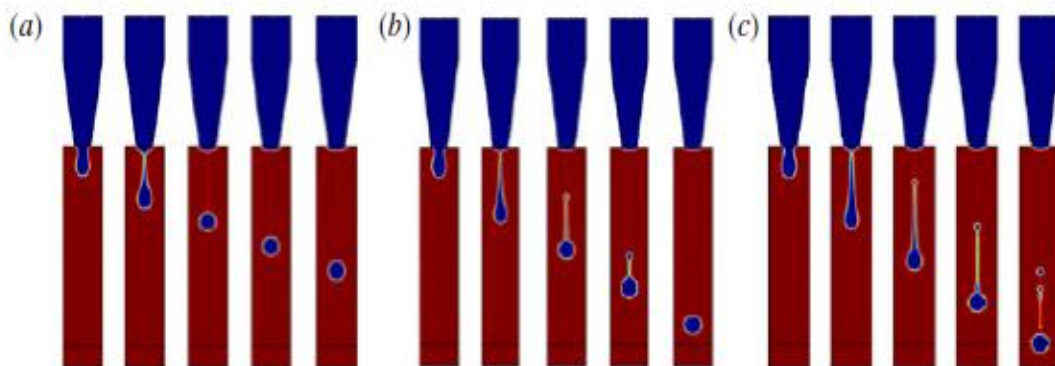
است با تعدادی قطره‌ی ناپایدار تحت عنوان ماهواره^۱ همراه باشد [۱۱]. اگر قطرات ماهواره در قطرات اولیه ادغام شوند مشکلی برای کیفیت و رزولوشن چاپ ایجاد نمی‌شود، در غیراین صورت، روی کیفیت چاپ اثر منفی خواهد داشت که این امر در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل a-۷ نشان دهنده‌ی ادغام فیلامنت یا قطره ماهواره تشکیل شده طی فرآیند چاپ است که روی کیفیت چاپ اثر منفی نمی‌گذارد در حالی که در شکل c-۷، قطرات ماهواره قادر به پیوستن به قطرات تشکیل شده اولیه نبوده و دو قطره اصلی و ناخواسته هر دو وجود دارند. قطرات ثانویه باعث پایین آمدن کیفیت تصویر چاپ شده می‌شود [۱۵].

اثر خواص سیال یا جوهر چاپ مانند چگالی، گرانی و کشش سطحی به تفکیک در شکل ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است. طبق شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش چگالی، دم قطره خروجی از نازل بلندتر شده و تعداد قطرات ماهواره نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش چگالی، پایداری فرآیند خروج قطره کاهش می‌یابد. با این وجود، در آزمایشات حقیقی، چگالی به طور مستقیم بر فرآیند تشکیل قطره اثرگذار نمی‌باشد بلکه بر مدول الاستیک و سرعت، که هر دو به دامنه پالس فشاری مربوط

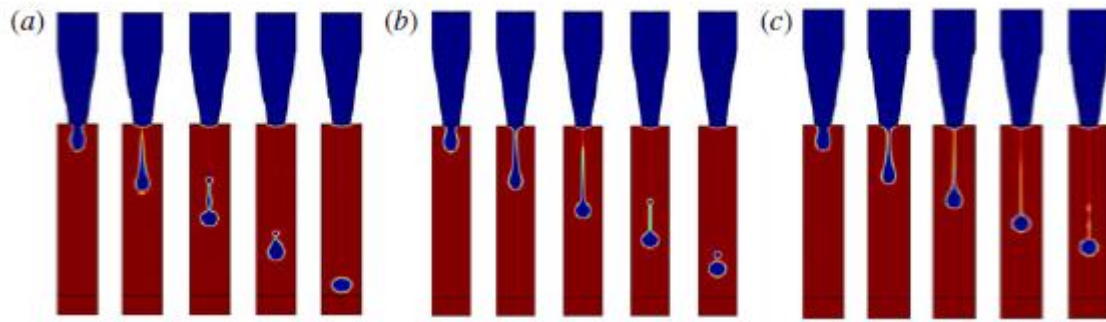
¹ Satellite



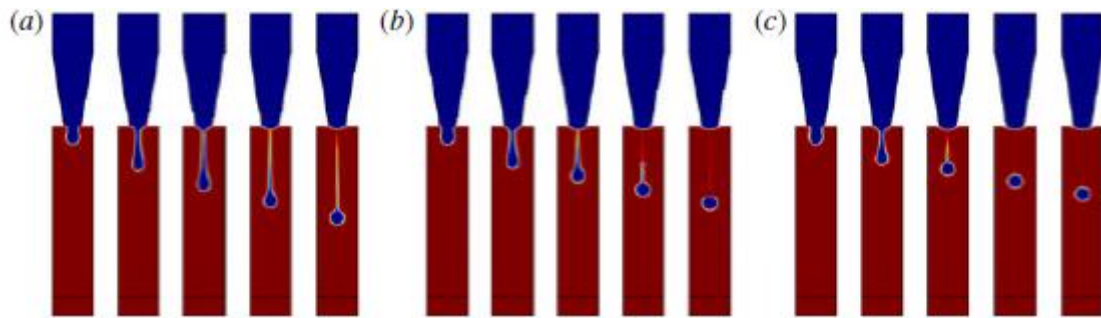
شکل ۷ - تشکیل قطرات ماهواره و اثر آن‌ها بر کیفیت چاپ [۱۵].



شکل ۸ - اثر افزایش چگالی بر فرآیند تشکیل قطره چگالی مایع، (a): 500 kg/m^3 ، (b): 1000 kg/m^3 و (c): 1500 kg/m^3 [۱۰].



شکل ۹ - اثر افزایش گرانشی بر فرآیند تشکیل قطره، گرانشی سیال: (a): 5 cP ، (b): 10 cP و (c): 15 cP [۱۰].

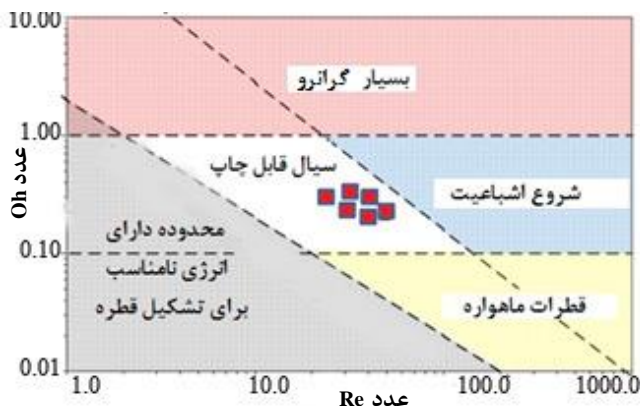


شکل ۱۰ - اثر افزایش کشش سطحی بر فرآیند تشکیل قطره، کشش سطحی سیال: (a): 0.02 N/m ، (b): 0.04 N/m و (c): 0.06 N/m [۱۰].

روی قابل چاپ بودن جوهرها، کشش سطحی آنهاست چرا که با افزایش آن از 25 تا 70 mN/m تنها افزایش کمی بر روی عدد اونسورگ مشاهده شده و تغییر در عدد رینولدز به وجود نیامده است. با تنظیم سرعت قطره، بر روی نمودار، یک جابه جایی از محدوده‌ی با انرژی کم به محدوده‌ی بهینه و قابل چاپ قابل مشاهده است. تنظیم این عامل بر ترکیبات جوهر تاثیر منفی ندارد. بحرانی‌ترین و مهم‌ترین ویژگی، گرانشی است که بر هر دو عدد اونسورگ و رینولدز اثرگذار بوده و با تغییر آن می‌توان از محدوده‌ی بسیار گرانشی به مناطق با گرانشی کمتر، جایی که قطرات ماهواره تشکیل می‌شوند، حرکت کنیم [۱۲].

به طور خلاصه، جوهرهایی با چگالی کم و گرانشی و کشش سطحی نسبتاً بالا جهت ایجاد قطره‌هایی با پایداری نسبی همواره ترجیح داده می‌شوند [۱۰].

همان‌طور که پیش‌تر نیز به آن اشاره شد، چاپ جوهرافشان اخیراً به دلیل مزایایی از جمله صرفه اقتصادی در چاپ هولوگرام‌ها نیز مورد استفاده قرار گرفتند. طی مطالعه‌ای که کلر^۱ و همکارانش انجام دادند از ذرات کروی پلی استایرن جهت تهیه جوهرهایی برای چاپ با روش جوهرافشان و در نهایت تهیه هولوگرام استفاده کردند. در اکثر مطالعات مربوط به چاپ ذرات کروی کلوییدی با استفاده از روش جوهرافشان، آماده‌سازی سطح به منظور افزایش زاویه تماس صورت می‌گیرد. در این کاربرد چاپ جوهرافشان نیز تنظیم خواص رئولوژیکی و دینامیکی جوهرهای مورد استفاده مورد توجه می‌باشد. کلر و همکارانش جهت درک اهمیت ویژگی‌های رئولوژیکی و تشکیل قطره مناسب از نموداری که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، استفاده کردند. آنها با در نظر گرفتن این نکته که تنها در صورتی که ویژگی‌هایی از جمله گرانشی، کشش سطحی و سرعت قطره را بتوان تنظیم کرد، قادر به تاثیرگذاری بر عملکرد چاپ جوهرافشان خواهیم بود، شکل ۱۱ را که محورهای آنها اعداد رینولدز و اونسورگ بودند، طراحی کردند. با استفاده از این نمودار به صورت تئوری قادر به محاسبه مشخصه‌های دینامیکی جوهرهای حاوی پلی استایرن بوده‌اند. مطابق همین نمودار، کم‌ترین ویژگی بر



شکل ۱۱ - نمودار شمایی بیانگر رژیم عملی برای تولید قطرات پایدار در سیستم‌های قطره به درخواست جوهرافشان [۱۲].

¹ K Keller

مقاله

سطح تر شده و قطر اولیه پیش از جمع شدن با شکل کروی تعریف می شود. اگر چه در بسیاری از عملیات مربوط به جوهرافشان، به عنوان نتیجه ای از قطر کوچک حتی در سرعت های بالای خروج قطره، عدد رینولدز بین ۱ تا ۱۰۰ باقی می ماند. زمانی که اعداد وبر و رینولدز به ۱ نزدیک می باشند، انرژی جنبشی قطره با کشش سطحی قابل مقایسه می باشد. گر انرژی جنبشی و کشش صرف نظر کردن نخواهد بود. بنابراین طی پخش، انرژی جنبشی و کشش سطحی با یکدیگر تحت اثر نیروی گر انرژی رقابت می کنند.

موضوع دیگر در جمع شدگی قطره، گیر افتادن حباب در انتهای قطره است. به طوری که حضور حباب در انتهای قطره می تواند منجر به ضعیف شدن کیفیت پوشش جوهرافشان شود. به همین دلیل باید از تشکیل این حباب ها جلوگیری شود. از سویی دیگر، سرعت جت نباید به قدری آهسته یا سریع باشد که منجر به گرفتگی نازل یا جاری شدن سیال بر روی سطح زیر آید شود.

بنابراین هدف این تحقیق، درک رسوب و تشکیل قطرات برای مقادیر رینولدز و وبر کوچک روی سطوحی با زاویه تماس کنترل شده جهت بررسی جمع شدگی قطرات جوهرافشان است که پیش از این توسط سایر محققان مورد بررسی قرار نگرفته بود. عدد وبر بین ۰/۰۵ تا ۲ محدود شده و در این رژیم، هیچ گونه حبابی در انتهای قطره تشکیل نشده است. زمانی که اندازه قطره $46 \mu\text{m}$ باشد سرعت جمع شدگی را تغییر داده شد تا عدد وبر تغییر کند. همچنین طی این بررسی درک شد که مقدار بیشینه پخش به اعداد وبر و رینولدز وابسته نیست. به منظور بررسی دینامیک جمع شدگی قطرات جوهرافشان، یک سیستم جوهر افشان مطابق شکل ۱۲ آورده شده است [۱۸].

در این آزمایش قطر نازل $50 \mu\text{m}$ بوده و فاصله بین نازل و شیشه $0/4$ تا $0/8 \text{ mm}$ بوده است. در جوهرافشان پیژو یک پالس ولتاژ تولید و به نازل انتقال داده می شود. زمانی که فیلامنت وارد هوا می شود به دلیل کشش سطحی به قطره ای کروی تبدیل می شود. نکته حائز اهمیت در سیستم جوهرافشان این است که شرایط اعمال مناسب به کار گرفته شود زیرا بسته به این شرایط اعمال، قطرات ماهواره می تواند به دنبال قطرات اصلی یا جدا از آنها شکل بگیرد. برای جلوگیری از بروز این مشکل، یک سیستم موج مناسب باید در نازل تولید و اعمال شود که این اتفاق از طریق انتخاب پالس فشاری مناسب رخ می دهد، که پیش تر در بخش شکل امواج توضیح داده شد.

شکل ۱۳ نشان دهنده تصاویر ثبت شده از قطره آب بر روی زمینه های با درجات آب دوستی متفاوت است. مجموعه ای سه تایی از تصاویر قطرات بیانگر اینست که بسته به ذات آب دوستی سطح، تغییر شکل قطره به جز برای فاز اولیه جمع شدگی کاملاً شبیه به یکدیگر نخواهد بود. با گرم کردن سطح، شکل قطره تغییر می کند و به شکل یک صفحه درمی آید (در $16/5$ میکرو ثانیه و زاویه 50° و 70° و در $24/75$ میکروثانیه در زاویه 90° درجه). با این حال، تغییرات بعدی شکل قطره برای زمینه های مختلف متفاوت می باشد.

بررسی سازوکار جمع شونده گی قطره بر روی سطح جامد به مدت یک قرن است که مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است. اخیراً یارین^۱ و همکارانش دینامیک جمع شونده گی قطره را به طور وسیع مورد مطالعه قرار دادند و پدیده های بسیاری مانند پخش^۲ قطره، عقب نشینی^۳ قطره و پدیده هایی از این دست نیز مشخص شدند. همان طور که پیش تر گفته شد، تا کنون اکثر مطالعات بر روی جمع شدگی قطره برای سیالات نیوتنی صورت پذیرفته است اما تمایلات جهت بررسی این امر برای سیالات غیر نیوتنی با توجه به رئولوژی قطره نیز مورد توجه می باشد [۱۸].

سانین^۴ و همکارانش، فرآیند جمع شونده گی قطره را با توجه به مقادیر اعداد بدون بعد وبر و اونسورگ^۵ به چهار دسته مختلف تقسیم بندی کردند. در دسته اول، $We \geq 1$ و $Oh \leq 1$ که در این دسته، انرژی جنبشی غالب بوده و سیال مانند یک سیال لزج عمل می کند. در دسته دوم، که $We \leq 1$ و $Oh \leq 1$ می باشد، اثر موینگی پدیده غالب می باشد. در دسته سوم، که $We \leq 1$ و $Oh \geq 1$ است، اثر موینگی پدیده غالب بوده و همچنین گر انرژی سیال نیز مهم است. در نهایت در دسته چهارم، $We \geq 1$ و $Oh \geq 1$ بوده و انرژی جنبشی بر اثر موینگی غلبه کرده و انرژی ویسکوز سیال نیز همچنان مورد توجه می باشد [۱۸].

مطالعات زیادی روی اثرات طول و زمان قطع شدن فیلامنت، حجم قطره و تشکیل ماهواره صورت گرفته است. باساران^۵ و همکارانش طی مطالعه ای در سال ۲۰۰۷ اظهار داشتند که موارد نامبرده تاثیر چندانی بر عدد بدون بعد اونسورگ ندارند و اثر آن ها زمانی قابل توجه است که عدد وبر بزرگ باشد. در صورت وجود شکل موج مناسب، قطرات کوچک تر از قطر اریفیس نازل می توانند با اونسورگ در محدوده متوسط $(0/2 - 0/1)$ شکل بگیرند اما زمانی که اونسورگ خیلی کوچک $(0/2)$ و یا خیلی بزرگ (1) باشد، تشکیل قطره منفرد ممکن نخواهد بود [۱]. طی مطالعه ای که سون^۶ و همکارانش در سال ۲۰۰۸ انجام دادند، چارچوبی را برای درک پدیده جمع شدگی برای اعداد وبر کوچک بر پایه مطالعه اعداد بدون بعد ارائه دادند. اگر چه آزمایشات آنها به ترشونده گی سطح جامد ارتباطی نداشت. ریوبو^۷ و همکارانش اظهار کردند، گروه های بدون بعد وبر و اونسورگ کم حساسیت تر بوده و ترشونده گی مهم ترین عامل در دینامیک پخش شونده گی قطره می باشد. مطالعات بسیار دیگری نیز وابستگی زاویه تماس را در دینامیک پخش شونده گی قطره نشان می دهد [۱۸].

تاکنون تمامی مطالعات و آزمایشات در مورد جمع شدگی قطرات برای اعداد رینولدز بزرگ (100 تا 2000) و اعداد وبر در محدوده 1 تا 400 با قطر قطره $2-3 \text{ mm}$ انجام شده است. در این شرایط، انرژی جنبشی قطرات بر کشش سطحی آنها غلبه کرده و بنابراین ضریب پخش بیشینه^۸ به عنوان نسبت قطر

¹ Yarin

² Spreading

³ Receding

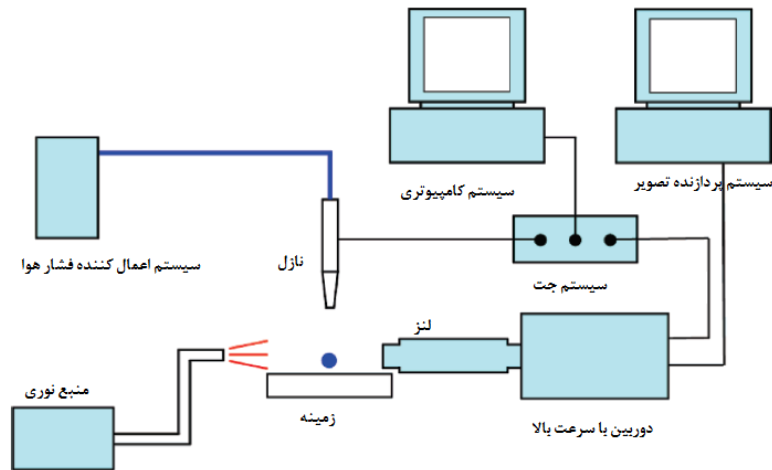
⁴ Sonin

⁵ Basaran

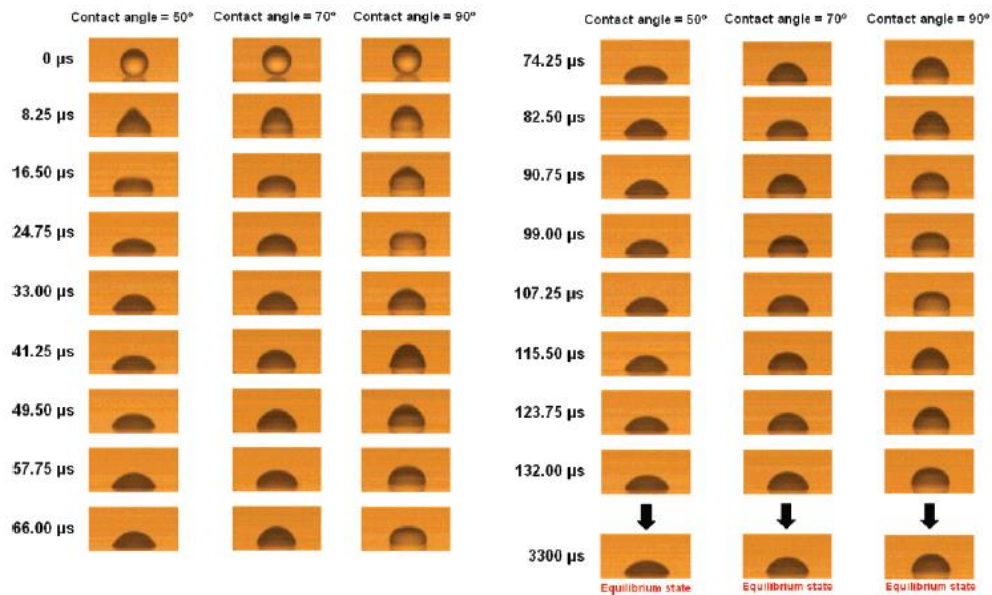
⁶ Son

⁷ Rioboo

⁸ Maximum Spreading Factor



شکل ۱۲- شمایی از تنظیمات مورد استفاده در بررسی دینامیک تشکیل قطره [۱۸].



شکل ۱۳- دینامیک تشکیل قطره روی سطوح با زوایای تماس متفاوت، $We = 1/23$ ، $Oh = 0.17$ [۱۸].

۳-۳- هندسه نازل

روش قطره به درخواست، این فاصله ۲-۳ mm می‌باشد. این فاصله مناسب همچنین روی دقت قطره‌ای ایجاد شده و در نتیجه تصویر نهایی اثر می‌گذارد چرا که کشیدن جریان هوا در محیط چاپ می‌تواند قطرات را از مسیر اصلی خود منحرف کند. برای به حداقل رساندن این اثر، برای فاصله‌ی نازل از سطح زمینه به طور معمول، کمترین مقدار لحاظ می‌شود تا از تشکیل قطرات منفرد اطمینان حاصل شود [۱۱].

در یک سیستم جوهر افشان، علاوه بر اهمیت اعمال فشار مناسب برای تشکیل قطره‌ی پایدار، دوربین CCD^۳، عکس‌های فوری از دینامیک تشکیل قطره با فواصل زمانی ۱ μs می‌گیرد. این دوربین مجهز به نور LED بوده تا قطرات منفرد به خوبی مشاهده شوند [۱]. شکل ۱۴ شمایی از چاپگر جوهرافشان و نحوه عملکرد آن را نشان می‌دهد [۱].

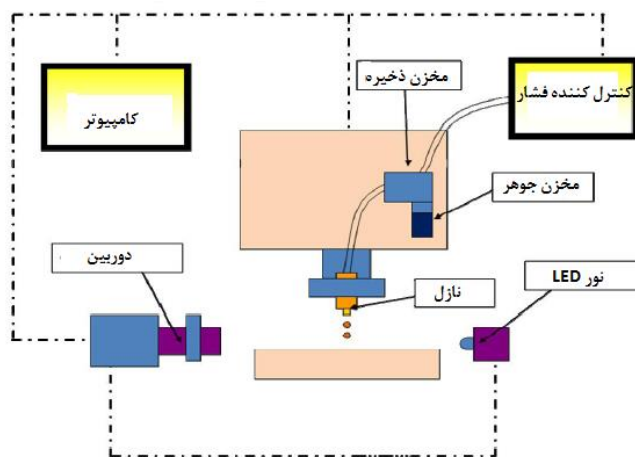
اندازه‌ی نازل، یک خاصیت هندسی مهم در فرآیند تشکیل قطره می‌باشد. کیفیت چاپ با اندازه‌ی قطره‌ی تشکیل شده محدود می‌شود که به طور مستقیم وابسته به اندازه و قطر نازل است. اندازه‌ی نازل باید از نظر تئوری، کوچکتر از اندازه‌ی قطرات باشد. چن^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۲ از نازلی به قطر ۵۰ μm استفاده کردند و موفق به تولید قطره شدند اما برای سیالات با مقادیر Z بالا اظهار داشتند که نازلی با قطر ۲۰۴ μm موفق به تولید قطره بوده است [۳].

به منظور آسان سازی ادغام قطرات ماهواره در قطرات اصلی، مرسوم است که چاپ در فاصله‌ی مناسب نازل از سطح زمینه^۲ قرار گیرد. برای چاپ به روش

^۱ A.U Chen

^۲ Stand-off Space

^۳ Charge-Coupled Device



شکل ۱۴ - شمایی از چاپگر جوهرافشان و عملکرد آن [۱]

می‌تواند فرآیند دینامیکی تشکیل قطره را کنترل کرده و از چاپ با کیفیت، رزولوشن و وضوح بالا بهره‌مند شویم و زمان و هزینه کمتری را متحمل شویم. با توجه به مطالعات مختلف، دسته‌بندی‌هایی بر روی اعداد بدون بعد صورت گرفته‌است که فرآیند پخش شونده‌گی قطره نیز در این دسته‌بندی لحاظ شده‌است. همچنین طبق مطالعات مختلف، زاویه تماس و میزان ترشوندگی سطوح مختلف نیز بر سازوکار تشکیل قطره، شکل قطره نهایی، تشکیل یا عدم تشکیل فیلامنت در امتداد قطره اولیه و همچنین تشکیل قطرات ماهواره نیز اثر می‌گذارد.

۴- نتیجه گیری

در سال‌های اخیر، چاپ جوهرافشان کاربردهایی فراتر از کاربرد یک چاپگر خانگی داشته است و به دلیل ساده بودن و مزایای آن نسبت به سایر روش‌ها، بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. در این چاپگرها، فرآیند تشکیل قطره از اهمیت زیادی برخوردار است و عوامل مختلفی از جمله خواص رئولوژیکی سیال چاپ، روی آن اثر می‌گذارد. تهیه فرمول‌بندی مناسب جوهر همچنان از چالش‌های موجود در صنعت چاپ می‌باشند به گونه‌ای که کنترل و تنظیم عوامل متفاوت فیزیکی، رئولوژیکی و شیمیایی

۷- مراجع

- J. Tai, H. Yap, Y. Liang, B. Lok, "Control of Droplet Formation in Inkjet Printing Using Ohnesorge Number Category", Electronics Packaging Technology Conference, 761-766, 2008.
- S. Daplyn, L. Lin, "Evaluation of Pigmented Ink Formulations for Jet Printing onto Textile fabrics", Pigment Resin Technol. 32, 307-318, 2003.
- D. Jang, D. Kim, J. Moon, "Influence of Fluid Physical Properties on Ink-Jet Printability", Langmuir. 25, 1-7, 2009.
- ن. شکیب، ا. سلیمانی گرگانی، "مروری بر چاپ پارچه‌های پنبه‌ای به وسیله چاپگر جوهرافشان"، نشریه علمی-ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۱، ۳-۸، ۱۳۹۰.
- R. Leach, R. Pierce, "The Printing Ink Manual", Fourth edition, Society of British Printing Ink Manufacturers Ltd, Springer Science & Business Media, 1984.
- B. Gans, L. Xue, U. Agarwal, S. Ulrich, "Ink-Jet Printing of Linear and Star Polymers", Macromol. Rapid Comm. 26, 310-314, 2005.
- S. Hoaty, M. Hutchings, G. Martin, "Links Between Ink Rheology, Drop-on-Demand Jet Formation, and Printability", Imaging. Sci. Techn. 53, 1-8, 2009.
- D. Van Dam, "Experimental study of the Impact of an Ink-Jet Printed Droplet on a Solid Substrate", Phys. Fluids. 16, 1-13, 2004.
- P. Wang, "Numerical Analysis of Droplet Formation and Transport of A Highly Viscous Liquid", Master Thesis, Lexington, Kentucky, 1-73, 2014.
- Y. Zhong, H. Fang, Q. Ma, X. Dong, "Analysis of Droplet Stability after Ejection from an Inkjet Nozzle", Fluid. Mech, 845, 378-391, 2018.
- B. Derby, "Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution", Inkjet Printing of Functional and Structural Mater. 40, 395-414, 2010.
- K. Keller, A. V. Yakovlev, E. V. Grachova, A. V. Vinogradov, "Inkjet printing of Multicolor Daylight Visible Opal Holography", Adv. Funct. Mater. 28, 1-9, 2018.
- W. Mason, "Piezoelectricity, Its History and Applications", Acoust. Soc. Am. 70, 1561-1566, 1981.
- K. Li, J. Liu, W. S. Chen, L. Zhang, "Controllable Printing Droplets on Demand by Piezoelectric Inkjet", Microsyst. Technol. 24, 1-11, 2017.
- H. Yoo, C. Kim, "Generation of Inkjet Droplet of Non-Newtonian Fluid", Rheol. Acta, 52, 313-325, 2013.
- Microfab technologies. INC, jetlab II-precision, www.microfab.com/complete systems/jetlab-ii-tabletop, Online access 2018.
- م. پیمان نیا، ا. سلیمانی گرگانی، م. قهاری، "نانومرکب‌های سرمایی جوهرافشان"، نشریه علمی-ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۲، ۲۹-۳۶، ۱۳۹۱.
- Y. Son, Kim, H. Y. Chongyoun, J. Doo, "Spreading of an Inkjet Droplet on a Solid Surface with a Controlled Contact Angle at Low Weber and Reynoldz Numbers", Langmuir, 24, 2900-2907, 2008.