



بررسی تجربی رفتار هیدرودینامیکی و شکست جت مایع با و بدون حضور میدان الکتریکی

رضا غرائی خسروشاهی^{۱*}، مهدی توانا^۲، سیما باهری اسلامی^۲

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

^۲دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۰۳

بازنگری: ۱۳۹۶/۱۰/۱۷

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۶/۱۱/۱۷

کلمات کلیدی:

جت سیال

طول شکست

الکترو هیدرودینامیک

دی الکتریک

خلاصه: در کار حاضر، رفتار هیدرودینامیکی جت سیال با و بدون اعمال میدان الکتریکی مطالعه شده و اثر شدت و جهت اعمال میدان الکتریکی بر ناپایداری و شکست جت به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که در جت‌های آزادی که فقط تحت تأثیر گرانش می‌باشند، مشخصات جت سیال وابسته به عدد رینولدز است؛ در این نوع جت‌ها، قطر متوسط جت و طول شکست آن با عدد رینولدز رابطه مستقیم دارد. اعمال میدان الکتریکی قطر متوسط جت در ناحیه پائین دست الکترودها را افزایش و طول شکست آن را کاهش می‌دهد و اثر میدان مستقیم در کاهش طول شکست بیشتر از میدان معکوس می‌باشد. با اعمال اختلاف پتانسیل ۶ کیلوولت، می‌توان طول شکست بالایی جت را به میزان ۲۷ درصد نسبت به حالت بدون میدان کوتاه‌تر کرد. انحراف معیار قطره‌های تولید شده در حالت بدون میدان و میدان الکتریکی مخالف حاصل از ۲ کیلوولت به ترتیب برابر با ۱/۳ و ۱/۱ میلی‌متر می‌باشد که حاکی از یکنواختی بیش‌تر قطرات در حضور میدان مخالف است. با توجه به ضرایب گردی ذرات مختلف تولید شده، می‌توان گفت که میدان الکتریکی باعث تولید قطرات با گردی بیش‌تر شده و فراوانی قطرات نامنظم را کاهش می‌دهد.

۱- مقدمه

شکست جت‌ها به قطره‌های کوچک‌تر، در فرآیندهای فنی اتمی‌سازی، پاشش سوخت و مرتب‌سازی ذرات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به این کاربردهای فنی، مسأله پایداری جت به صورت گسترده مورد مطالعه قرار گرفت. بلیژت و ادلین [۴] ناپایداری‌هایی را در نظر گرفتند که به صورت تجربی منجر به شکست جت‌های مایع با سرعت کم می‌شدند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌داد که این جت‌ها از تئوری خطی و بر تا نقطه بحرانی پیروی می‌کنند. تئوری‌های ناپایداری زمانی و فضایی برای تعیین محل آغاز موج سطحی و توصیف پدیده شکست ستون مایع، توسط کرامر و همکاران [۵] مورد بررسی قرار گرفتند. در تئوری‌های ناپایداری خطی، دامنه موج سطحی اولیه در مقایسه با قطر ستون جت مایع، بسیار کوچک در نظر گرفته شده است. این تئوری‌ها بر روی جت مایع آرامی اعمال شدند که دارای سطح صاف و سرعت پاشش کم بودند. تئوری‌های ناپایداری غیرخطی که برای توصیف رفتار دامنه موج‌های بزرگ بر سطح مایع اعمال شدند، توسط چونگ و همکاران [۶] مورد مطالعه قرار گرفتند. در حالت جت آرام که به صورت عمودی پاشیده می‌شود، زمانی که سرعت پاشش نسبتاً کوچک است، قطر

جت مایعی که از یک نازل به درون یک گاز دلخواه جریان می‌یابد، زمانی که در معرض اختلال‌های لحظه‌ای قرار می‌گیرد ممکن است به شکل قطره‌های کوچک‌تر شکسته شود. این اختلال‌ها می‌توانند به صورت جابه‌جایی سطح، نوسان‌های فشار یا سرعت در سامانه تغذیه بوده و یا بر روی سطح جت اعمال شوند؛ همچنین می‌توانند شامل نوسان‌هایی در خواص مایع مثل دما، لزجت یا ضریب کشش سطحی باشند. ناپایداری و شکست جت‌های مایع به قطرات کوچک‌تر از اوایل قرن نوزدهم به یکی از موضوعات مورد علاقه تبدیل شد [۱]. آماگای و آرای [۲] ساختار موج سطحی را در یک جت مایع آرام که به صورت افقی خارج می‌شد، مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که موج سطحی از چندین موج با حالت‌های مختلف تشکیل شده است و پدیده شکست دارای حرکت‌های بی‌قاعده‌ای حتی در جت مایع آرام می‌باشد. ایگر و ویلرامو [۳] جت سیال و مشخصات اساسی آن را به صورت جامع بررسی کردند. پژوهش آن‌ها نشان داد که مطالعه

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: gharraei@azaruniv.ac.ir



ستون مایع به صورت عمودی با اثر جاذبه تغییر می‌کند. این امر نشان می‌دهد که ساختار موج سطحی و پدیده شکست تحت تأثیر تغییر قطر ستون جت سیال قرار می‌گیرد.

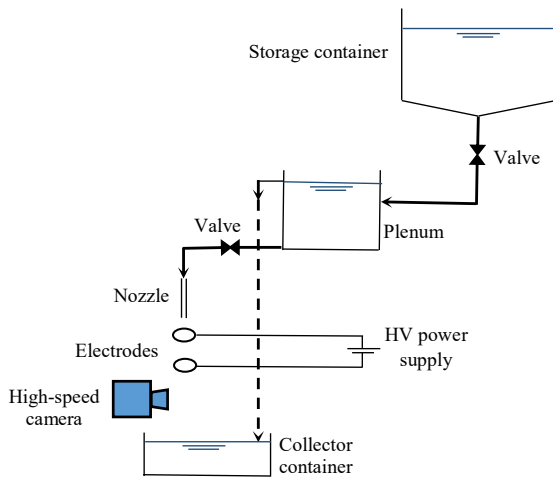
میدان الکتریکی به عنوان یک روش فعال در بسیاری از زمینه‌ها مانند انتقال حرارت [۷]، الکترواسپری [۸] و اختلاط [۹] اعمال می‌شود. قابلیت الکتریکی جت‌ها موجب کنترل بیش‌تر بر تشکیل قطره‌های ناشی از شکست جت می‌شود؛ زیرا نیروهای الکتریکی ممکن است پایداری جت یا مسیر قطره‌های تشکیل شده از شکست جت را تغییر دهند. این روش اسپری کردن که به عنوان اتمیزاسیون الکتروهیدرودینامیکی نیز شناخته می‌شود، فرآیندی است که در آن مایع، با استفاده از میدان الکتریکی قوی دچار شکست و تجزیه می‌شود. تنش برشی نتیجه نیروی الکتریکی اعمالی به سطح مایع در الکترواسپری است. این نیرو با افزایش قطر جت مایع باعث می‌شود جت تحت تأثیر نیروهای مکانیکی و الکتریکی تغییر شکل داده و با تشدید ناپایداری‌ها به قطره‌های کوچک‌تر تبدیل شود. اسپری کردن به روش الکتروهیدرودینامیک دارای کاربردهای وسیعی همانند چاپگرهای الکتروهیدرودینامیک با وضوح مطلوب [۱۰]، تولید نانوذرات [۱۱]، کاربردهای پزشکی به‌خصوص سامانه تزریق دارو [۱۲] و تولید امولسیون پایدار [۱۳] می‌باشد. زمانی که جت سیال دی‌الکتریک درون یک میدان الکتریکی جریان می‌یابد، سه نیروی مختلف می‌تواند به آن اعمال شود. نیروی الکتروفورتیک که در حضور بارهای آزاد تولید می‌شود. نیروی دی‌الکتروفورتیک که به دلیل اختلاف الکتربسته بین جت مایع و گاز احاطه شده تشکیل می‌شود و نیروی الکترواستریکشن که در حضور اثر تراکم‌پذیری سیال به‌وجود می‌آید. این سه نیرو می‌توانند به صورت مستقل عمل کنند و در هیدرودینامیک و پایداری جت‌ها موثر باشند [۱۴]. نیروهای اشاره شده در فوق را می‌توان به‌ترتیب به‌صورت زیر نوشت:

$$F_e = qE - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon + \frac{1}{2} \nabla \left(E^2 \frac{d\epsilon}{d\rho} \rho \right) \quad (1)$$

که در آن چگالی نیروی الکتریکی، چگالی بار الکتریکی، شدت میدان الکتریکی، ضریب گذردهی و چگالی سیال است.

برهم‌کنش بین جت شارژ شده و نیروهای الکتریکی باعث به‌وجود آمدن یک نیروی مماسی بر سطح مایع در نقاط باریک جت می‌شود. زمانی که تنش ظاهری ایجاد شده از کشش سطحی مایع بیش‌تر شود، سطح جت ناپایدار شده و جت سیال به قطره‌های ریز شکسته می‌شود. نرخ تشکیل قطره‌های مایع،

به مؤلفه مماسی نیروی الکترواستاتیکی که با اضافه شدن به نیروی گرانش، قطره‌های کوچک‌تری را تشکیل می‌دهد، وابسته است [۱۵]. روش جدیدی به منظور مطالعه کشش سطحی و شکل قطرات در یک میدان الکتریکی توسط باطنی و همکاران گسترش یافت [۱۶]. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که کشش سطحی الکل‌ها زمانی که میدان الکتریکی به آن‌ها اعمال می‌شود به میزان یک یا دو درصد افزایش می‌یابد. وابستگی پایداری جت به حالت الکتریکی سطح آن که از اعمال میدان الکتریکی به جت ایجاد می‌شود، توسط اتن و الیوری مورد بررسی قرار گرفت [۱۷]. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش برای سطوح هم‌پتانسیل و غیرهم‌پتانسیل مشابه نبود. در حالت هم‌پتانسیل، افزایش میدان الکتریکی یا سرعت جت و یا کاهش کشش سطح مشترک سیال، موجب ناپایا شدن جت سیال می‌شود. این فرآیند منجر به شکست جت در نواحی نزدیک به خروجی نازل و در نتیجه کوتاه شدن طول شکست جت و همچنین کوچک‌تر شدن اندازه قطرات می‌شود. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که اختلاف در رفتار هر دو حالت را می‌توان با استفاده از توزیع چگالی بار سطح توصیف کرد. لی و همکاران [۱۸] نتیجه گرفتند که در شدت میدان الکتریکی کمتر، حالت متقارن دارای نرخ رشد بیش‌تری در تمامی طول موج‌ها نسبت به حالت نامتقارن می‌باشد. با افزایش شدت میدان الکتریکی، حالت نامتقارن دارای نرخ رشد سریع‌تری بوده و در نهایت به مقدار حالت متقارن می‌رسد؛ همچنین طول موج بحرانی کاهش می‌یابد و نرخ رشد بحرانی نیز با افزایش روبه‌رو خواهد شد. این بدان معناست که اندازه قطره‌ها کاهش یافته و طول جت مایع کوتاه‌تر می‌شود. یانگ و همکاران [۱۹] بیان کردند زمانی که میدان الکتریکی اعمال می‌شود، زاویه اسپری و چگالی شار حجمی افزایش می‌یابد. این امر بیان می‌کند که در آزمایش آن‌ها، الکترودها به صورت افقی در نظر گرفته شده‌اند که موجب تغییر بسیار اندک در هندسه و قطر متوسط قطره‌ها می‌شود. خوشنویس و همکاران [۲۰] شکست جت مذاب به یک ماده لزج را در حضور یک میدان الکتریکی قوی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که با اعمال نیروی الکتروهیدرودینامیک، افزایش چشمگیری در کاهش اندازه و افزایش گردی ذرات رخ می‌دهد. در کار آن‌ها، فرآیند شکست جت مذاب به منظور غلبه بر ناپایداری‌های هیدرودینامیکی و الکتروهیدرودینامیکی ارائه شده است. مطالعه تجربی رفتار ستون مایع تشکیل شده از برخورد دو جت آرام شیب‌دار، با شیب مخالف، در حضور میدان الکتریکی مستقیم با ولتاژ بالا توسط طباطبایی و همکاران انجام گرفت [۲۱]. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش شدت میدان الکتریکی، قطر متوسط و انحراف ستون قطره‌های تولید شده افزایش ولی بسامد تشکیل آن‌ها کاهش می‌یابد. رحمان‌پور و ابراهیمی [۲۲] شکل مخروط



شکل ۱: طرحواره سکوی آزمایش

Fig. 1: The schematic of the experimental setup

محل قرار گرفتن مخزن ذخیره می‌باشد. قسمت دیگر این پایه که مخزن بالادست روی آن قرار گرفته است، قابلیت تغییر ارتفاع را داشته و می‌تواند بین ۱۳۰-۳۰ cm جابه‌جا شود. مخزن بالادست به منظور تأمین دبی پایدار و ثابت دارای یک سرریز می‌باشد. مجرای تأمین کننده جت دارای قطر داخلی ۳mm، قطر خارجی ۵mm و طول ۱۰cm می‌باشد و در راستای شتاب گرانش تنظیم و تثبیت شده است. قسمت الکتریکی شامل یک منبع تغذیه ولتاژ بالا، الکترودها و چندین عدد لامپ جهت آشکارسازی جریان جت در تاریک‌خانه می‌باشد. منبع تغذیه قابلیت ایجاد اختلاف ولتاژ بین الکترودها HV و الکترودها GR حداکثر تا ۵۳ kV را دارا می‌باشد. دو نوع الگوی مختلف برای اتصال الکترودهای HV و GR به کار گرفته شده است.

میدان الکتریکی در آرایش مستقیم در جهت جریان جت سیال است در حالی که در آرایش مخالف، خلاف جهت جریان سیال می‌باشد. شعاع الکترودها ۶ mm است که روی پایه‌ای از پلی‌اتیلن نصب شده‌اند که فاصله آن‌ها از لبه جت به ترتیب ۲ و ۳ سانتی‌متر است.

جت سیال با استفاده از دوربین فیلمبرداری با سرعت بالا با سرعت ۳۰۴/۸ متر بر ثانیه تصویربرداری شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، دوربین در قسمت خروجی نازل تثبیت شده است و با استفاده از پردازش تصاویر فیلمبرداری شده می‌توان خصوصیات جت را به دست آورد. شکل ۲ دو نمونه از تصاویر ثبت شده توسط دوربین سرعت بالا به همراه تصاویر پردازش شده در متلب را نشان می‌دهد.

سیال کاری مورد استفاده آب مقطر و روغن ترانسفورمر است که خواص فیزیکی و الکتریکی آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

مایع و جت حاصل را در حضور میدان الکتریکی خارجی به صورت عددی مورد بررسی قرار داده و مدل را با استفاده از نتایج تجربی صحنه‌گذاری کردند. یو و همکاران [۲۳] تأثیر برهم‌کنش بین خواص الکتریکی و رئولوژیکی جوهر را در فرآیند چاپ الکترویدرودینامیکی با طراحی سامانه‌هایی که کنترل هدایت الکتریکی و ویسکوالاستیسیته جوهر را به عهده داشتند، بررسی کردند. مطالعه آن‌ها نحوه اثرگذاری موارد فوق، بر تشکیل جت مخروطی تیلور را توضیح می‌دهد. همچنین آن‌ها بیان کردند که ولتاژ اولیه که جت مخروطی تیلور ابتدا در آن پدیدار می‌شود و ولتاژ نهایی که در آن جت ناپایدار می‌شود، در رسانایی الکتریکی بالاتر افزایش می‌یابد؛ زیرا شکل مخروطی با سطح بیش‌تر تشکیل شده و پایداری را در رسانایی بیش‌تر تضمین می‌کند. تأثیرات رسانایی الکتریکی بر حالت‌های الکترواسپری و قطرات تولید شده آن توسط فرجی و همکاران [۲۴] مطالعه گردید. نتایج اثبات کردند که حالت‌های مختلف اسپری کردن، به رسانایی الکتریکی بیش‌تر از سینتیک جریان وابسته هستند. افزایش رسانایی مایع منجر به کوچک‌تر شدن اندازه‌ی قطره‌های تولید شده می‌شود، درحالی‌که سرعت رشته‌های خارج شده از جت مایع در همان زمان کاهش می‌یابد.

با وجود تمامی این پیشرفت‌ها درباره جت مایع منفرد و مشخصه‌های آن، قسمت‌های نامشخصی در ناحیه‌ی آرام جت‌ها و خواص مربوط به ستون مایع آن‌ها وجود دارند که در گذشته به آن‌ها توجه کافی نشده است. به عنوان مثال، تأثیر ناپایداری‌های هیدرودینامیکی که به ستون جت اعمال می‌شوند و کنش و برهم‌کنش آن‌ها با ناپایداری‌های الکتریکی که به دلیل ساختار جدید الکترودها به وجود می‌آیند هرگز مورد بررسی قرار نگرفته است. در پژوهش حاضر به بررسی رفتار جت سیال مایع در غیاب و حضور میدان الکتریکی پرداخته شده است. اثر میدان بر ناپایداری‌های ایجاد شده، طول شکست جت و قطره‌های تولید شده ناشی از شکست در دو حالت میدان مستقیم و معکوس مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- سکوی آزمایش و روش تحقیق

شکل ۱ شماتیکی از سکوی آزمایش ساخته شده برای مطالعه حاضر را نشان می‌دهد که از دو قسمت هیدرودینامیکی و الکتریکی تشکیل شده است. قسمت هیدرودینامیکی شامل مخزن ذخیره جهت تأمین دبی جریان در طول آزمایش، مخزن بالادست جهت ایجاد دبی ثابت و پایدار، مخزن جمع کننده سیال در قسمت پایینی سکو، مجرای تأمین کننده جریان جت، چند عدد شیر کنترلی و پایه تنظیم ارتفاع می‌باشد. پایه تنظیم ارتفاع به گونه‌ای طراحی شده است که دارای یک قسمت ثابت با ارتفاع ۱۳۰ cm است که

جدول ۱: خواص سیال‌های استفاده شده [۲۵]

Table 1: The properties of the fluids used in the experiment

ضریب گذردهی نسبی (-)	کشش سطحی، Nm ⁻¹	چگالی، kgm ⁻³	ویسکوزیته، kgm ⁻¹ s ⁻¹	سیال
۸۰/۱	۰/۰۷۱۵	۹۹۸	۰/۰۰۱	آب مقطر
۳/۴	۰/۰۲۹۵	۸۶۴	۰/۰۱۶	روغن ترانسفورمر

انحراف معیار قطر محلی در فواصل مختلف از خروجی نازل، بر اساس اطلاعات ثبت شده برای مقادیر لحظه‌ای قطر محلی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_1 = \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T (\delta(t) - \delta_{i,local})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

که در آن بازه زمانی است.

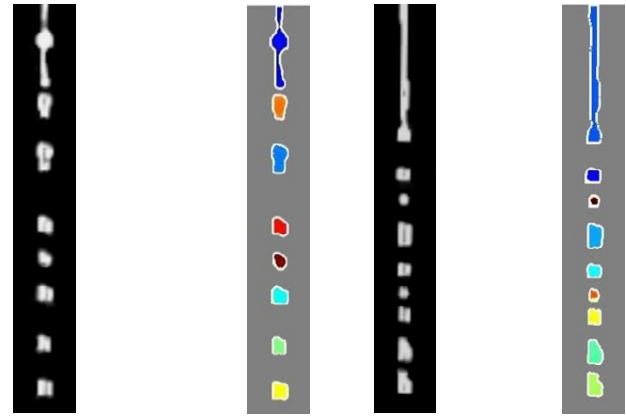
بسامد امواج ایجاد شده یکی از مهمترین پارامترهای بررسی جت سیال می‌باشد که با استفاده از روش‌های آماری ارائه شده برای بررسی رفتار پدیده‌های تصادفی، از روی اطلاعات قطر لحظه‌ای ثبت شده در نقاط مختلف می‌تواند استخراج شود. به همین منظور از توابع خودهمبستگی و چگالی طیف توان استفاده می‌شود. در تحلیل فرآیندهای تصادفی، خود همبستگی یک متغیر تصادفی به عنوان معیاری از ارتباط مقادیر این متغیر در زمان‌های مختلف با هم به صورت تابعی از اختلاف زمانی می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_{ii}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \delta_i(t) \delta_i(t + \tau) d\tau \quad (6)$$

تابع چگالی طیف توان از اعمال تبدیل فوریه بر روی تابع خود همبستگی به دست می‌آید [۲۶]:

$$G_{ii}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{ii}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (7)$$

بنابراین، مشخصه بسامد موج، به عنوان بسامد متناظر با مقدار بیشینه چگالی طیف توان برای قطر آنی در نظر گرفته می‌شود. برای مقایسه بسامد امواج، یک طول بی‌بعد شده توسط آرای و آماگای [۲] به صورت زیر تعریف می‌شود:



شکل ۲: دو نمونه از تصاویر ثبت شده و پردازش شده

Fig. 2: Two examples of the recorded and processed photos

برای مطالعه رفتار دینامیکی جت سیال، فیلم‌های ضبط شده از ناحیه مورد مطالعه با استفاده از یک کد که در نرم‌افزار متلب نوشته شده است، مورد آنالیز قرار گرفته‌اند [۲۵]. کد نوشته شده به گونه‌ای است که فریم‌های فیلم ضبط شده را جدا کرده و به صورت تصاویر جداگانه درمی‌آورد. این تصاویر که به شکل آر.جی. بی هستند مورد پردازش قرار گرفته و مرزهای جت سیال که با استفاده از نورپردازی انجام شده درخشان هستند تشخیص داده می‌شوند. قطر جت سیال بدین طریق قابل ارزیابی است.

قطر متوسط جت نیز با استفاده از متوسط‌گیری از قطر جت به دست می‌آید

$$\bar{\delta}_i = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i(t)}{n} \quad (2)$$

که قطر محلی آنی و تعداد نقاط اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

قطر متوسط محلی، به صورت متوسط زمانی قطر جت در محلی مشخص تعریف می‌شود:

$$\bar{\delta}_{i,local} = \frac{\sum_{j=1}^m \delta_i(j)}{m} \quad (3)$$

نمایه‌ای است که بازه زمانی مورد مطالعه را جاروب می‌کند.

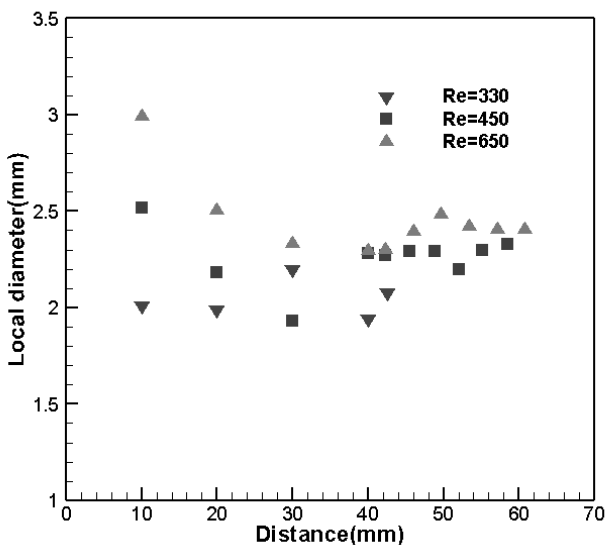
قطر متوسط جت به عنوان متوسط زمانی قطرهای متوسط لحظه‌ای در زمان‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود:

$$\bar{\delta}_{mean} = \frac{\sum_{j=1}^m \bar{\delta}_j(t)}{m} \quad (4)$$

تأثیرات میدان الکتریکی بر مشخصه‌های اصلی جت سیال روغن ترانسفورمر می‌پردازیم. خاطرنشان می‌گردد به دلیل رفتار قطبی سیال آب در حضور میدان الکتریکی، امکان بررسی آن در حضور میدان الکتریکی فراهم نشد. کمترین مقدار دبی سیال که می‌تواند تشکیل جت دهد ملاک کار بوده و به منظور مقایسه نتایج، چند دبی بیش‌تر نیز انتخاب شده است.

۳-۱- جت آب مقطر

شکل ۳ قطر محلی جت را در فواصل مختلف از خروجی نازل نشان می‌دهد. با بررسی شکل ۳ مشاهده می‌شود که قطر جت به صورت کلی با افزایش فاصله از خروجی نازل تحت تأثیر نیروی گرانش، کاهش می‌یابد؛ اما در نواحی انتهایی هر یک از جت‌ها این مقدار با افزایش روبه‌رو می‌شود. دلیل این پدیده را می‌توان به نزدیک بودن ناحیه انتهایی به منطقه شکست جت نسبت داد که در آن سیال تحت تأثیر شکست به صورت الاستیک کمی بالا آمده و ستون جت ضخیم‌تر می‌شود. شکل ۴ نمودار تغییرات قطر متوسط جت را در اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش دبی جت سیال شده و لذا قطر جت بیش‌تر می‌شود؛ لذا می‌توان بیان داشت که قطر متوسط جت با عدد رینولدز رابطه مستقیم دارد [۳]. شکل ۵ مقدار طول شکست جت آب را به ازای اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. برای هر یک از حالت‌های بررسی شده یک مقدار بیشینه و یک مقدار کمینه برای طول شکست استخراج شده است. در حالت کلی می‌توان بیان داشت که طول شکست در طول زمان در محدوده این بازه نوسان می‌کند. اهمیت این بازه طولی در آن است که پژوهش‌های انجام شده بر روی جت سیال



شکل ۳: قطر محلی جت سیال آب مقطر در فواصل مختلف از نازل

Fig. 3: Local diameters of water jets at different Reynolds numbers

$$Z^* = \frac{Z}{L_b} \quad (8)$$

که در آن فاصله از خروجی نازل در امتداد جت سیال و طول شکست جت می‌باشد.

در مرحله بعد، محاسبات مورد نیاز برای هر قطره صورت می‌پذیرد و محیط و مساحت هر یک از شکل‌ها محاسبه می‌شود. با توجه به مساحت یک قطره دایروی شکل، قطر معادل از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D_e = \sqrt{\frac{4A_{drop}}{\pi}} \quad (9)$$

که در آن قطر معادل و مساحت تصویر قطره تولید شده است. یک پارامتر که نشان‌دهنده میزان گرد بودن قطره تولید شده است، به صورت ذیل تعریف می‌گردد [۲]:

$$CR = \frac{4\pi A}{p^2} \quad (10)$$

که محیط می‌باشد. این نسبت برای قطره‌های کاملاً کروی شکل برابر با یک بوده و برای سایر شکل‌ها مقداری کوچک‌تر از یک را دارد. برای دسترسی به معیارهای تئوری، اعداد رینولدز و وبر به صورت زیر تعریف می‌شوند:

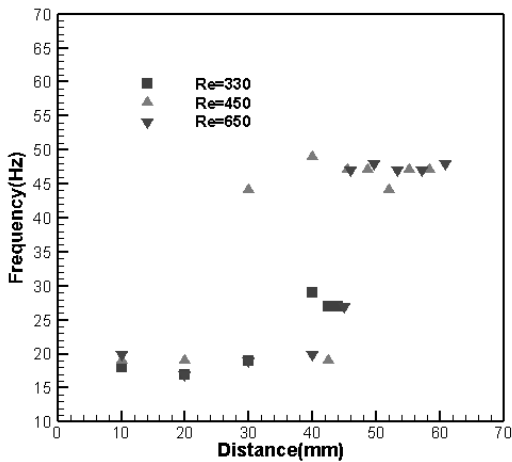
$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (11)$$

$$We = \frac{\rho U^2 D}{\sigma} \quad (12)$$

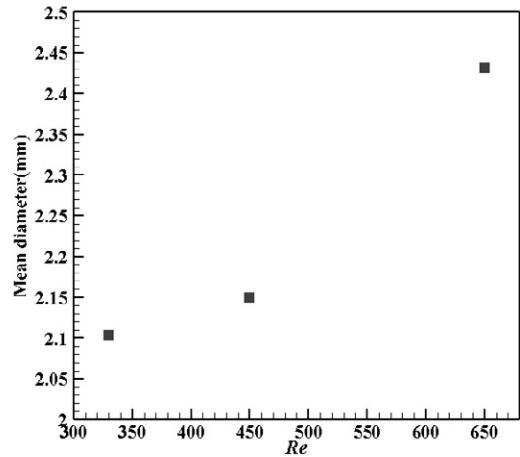
در آن سرعت متوسط سیال در خروجی نازل و قطر نازل است. خاطرنشان می‌گردد تمامی آزمایش‌های انجام شده در فشار اتمسفری و دمای محیط () انجام یافته و از روش نورپردازی خاصی جهت آشکارسازی سطح ستون جت و قطرات استفاده شده است. با توجه به کالیبراسیون فریم‌ها، دقت اندازه‌گیری ضخامت ۰/۱ میلی‌متر تخمین زده می‌شود.

۳- نتایج و بحث

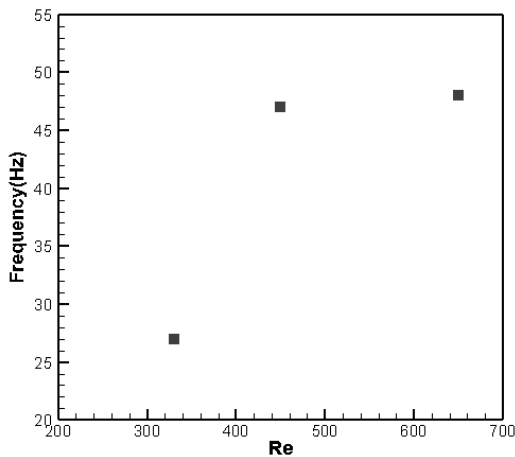
در بخش اول پژوهش حاضر، رفتار جت سیال آب مقطر در غیاب میدان الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفته است تا از این طریق فهم دقیقی از هیدرودینامیک جریان ستون مایع در رژیم لایه‌ای به‌دست آید. سپس به بررسی



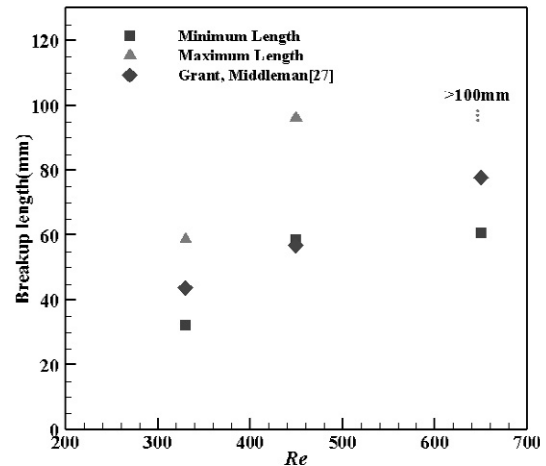
شکل ۶: توزیع فرکانس امواج سطح جت سیال آب مقطر در فواصل مختلف
Fig. 6: Frequency distribution of waterjet surface waves at various distances



شکل ۴: تغییرات قطر متوسط جت سیال آب مقطر
Fig. 4: Changes in the diameters of water jets



شکل ۷: تغییرات بسامد امواج سطح در $Z^* = 1$ در رینولدزهای مختلف
Fig. 7: Frequency variation of the surface $Z^*=1$ at different Reynolds



شکل ۵: طول شکست جت آب مقطر در اعداد رینولدز مختلف
Fig. 5: The variation of jet breakup lengths at different Reynolds numbers

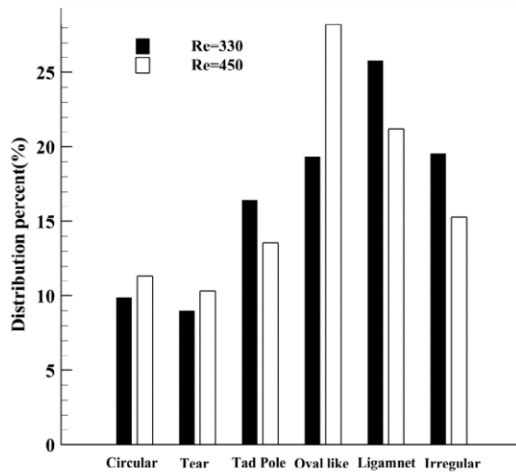
افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش قطر جت شده و لذا طول مؤثر برای غلبه ناپایداری‌های به وجود آمده روی ستون جت نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین رشد طول شکست ستون جت با افزایش عدد رینولدز و افزایش قطر ستون جت روندی عادی و طبیعی است [۶].

برای عدد رینولدز برابر با ۶۵۰ محدوده بالایی شکست، خارج از ناحیه انتخاب شده برای مطالعه قرار دارد که به همین علت در نمودار نیز با علامت بزرگتر، از بقیه متمایز شده است. بسامد امواج روی سطح جت به ازای اعداد رینولدز مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج بررسی و مقایسه، نشان دهنده تشابه در روند کیفی نتایج با همدیگر می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که افزایش بسامد ناپایداری‌های روی سطح جت در ناحیه نزدیک شکست، به ازای تمامی اعداد رینولدز قابل مشاهده است. این موضوع ناشی از این حقیقت است که در

و قطره‌های تولید شده ناشی از شکست، باید در این محدوده تمرکز داشته باشند. علاوه بر این، شکل ۵ مقادیر طول شکست پیش بینی شده توسط رابطه تجربی گرنٹ و میدلمن [۲۷] را نیز نشان می‌دهد.

$$L_b = 19.5D \left[We^{0.5} + 3 \frac{We}{Re} \right]^{0.85} \quad (13)$$

که این رابطه در رژیم شکست رایلی صادق می‌باشد. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که طول شکست پیش بینی شده در رابطه (۱۳) در محدوده طول شکست بالایی و پایینی بدست آمده از پژوهش حاضر قرار می‌گیرد. با توجه به این نکته می‌توان بیان داشت، تطابق نتایج بدست آمده با طول شکست پیش بینی شده قابل قبول می‌باشد.



شکل ۸: اثر عدد رینولدز بر توزیع قطره‌های تولید شده

Fig. 8: Effects of Reynolds numbers on distribution of droplets

می‌باشد چون همان‌طور که پیشتر اشاره شد قطر متوسط جت با عدد رینولدز رابطه مستقیم دارد. بنابراین با کاهش عدد رینولدز قطره‌های تولید شده کوچک‌تر می‌شوند، در حالی که تعداد قطره‌های گرد تولید شده کاهش یافته و در عوض ذره‌های نامنظم بیش‌تری شکل می‌گیرند. لذا برای ایجاد قطره‌های کوچک‌تر همراه با ضریب گردی بالاتر، باید علاوه بر کاهش عدد رینولدز جت به دنبال روش دیگری از جمله استفاده از میدان الکتریکی بود.

۳-۲- جت روغن ترانسفورمر

همان‌طور که قبلا ذکر گردید، اعمال میدان الکتریکی بر روی جت آب به دلیل بالا بودن هدایت الکتریکی آن امکان پذیر نبوده و در این مورد جت روغن ترانسفورمر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به دلیل لزجت بالای روغن ترانسفورمر، طول شکست آن در اعداد رینولدز بالا زیاد بوده و کلیه نتایج در این بخش به ازای عدد رینولدز ۴۲/۵ گزارش شده اند.

روغن ترانسفورمر دارای قابلیت گذردهی بالایی نسبت به هوا می‌باشد؛ بنابراین فاکتور کلازیوس-موزتی برای فصل مشترک هوا-روغن مثبت بوده و باعث کشیده شدن سطح مشترک به سمت ناحیه با شدت میدان بالاتر (نزدیکی حلقه) خواهد شد. به عبارت دیگر، نیروی دی الکتروفوریتیک تلاش به افزایش دامنه امواج منتشر شده روی سطح جت و تسریع شکست آن دارد. از طرف دیگر به دلیل وجود ناخالصی‌ها، در حضور میدان الکتریکی بارهای خالص نیز در روغن ایجاد شده و نیروی الکتروفوریتیک نیز بر روغن اعمال می‌شود. شکل ۹ قطر محلی جت را در فاصله‌های مختلف از نازل و در حضور میدان الکتریکی نشان می‌دهد. با افزایش ولتاژ اعمالی و در نتیجه شدت میدان الکتریکی در بالادست ناحیه مورد مطالعه، اعمال نیروی الکتروفوریتیک منجر به شتاب یافتن جت سیال

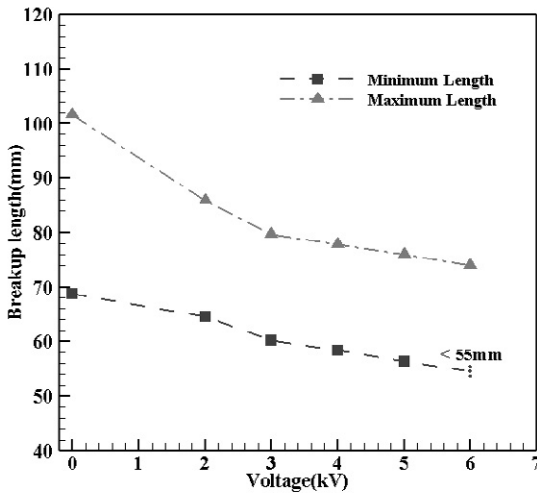
جدول ۲: شکل ذرات متداول به‌همراه محدوده ضریب گردی [۲۰]
Table 2: Droplet shapes with different roundness coefficients

شکل قطره	نام قطره	ضریب گردی
	نامنظم	۰/۱۵~۰/۷۵
	رباطی	۰/۲۵~۰/۶۵
	بیضی	۰/۱۸~۰/۹۵
	بادامی	۰/۴~۰/۶۵
	اشکی	۰/۷~۰/۱۸
	دایروی	۰/۹۵~۱

این ناحیه، افزایش بسامد ناپایداری‌ها منجر به ناپایداری ستون جت و در نهایت شکست آن به ذرات کوچک‌تر می‌شود. بنابراین در توصیف ناحیه نزدیک به شکست جت، افزایش مقطعی قطر محلی جت و بسامد ناپایداری‌های روی سطح جت را می‌توان عنوان کرد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد مقادیر بسامد امواج دارای نوساناتی بوده و لذا با توجه به این مطلب می‌توان گفت که جت سیال دارای یک بسامد واحد نیست. به این ترتیب می‌توان برای یک جت سیال، گستره‌ای از بسامدها را در نظر گرفت. این موضوع در کار آرای و آماگای [۲] نیز به خوبی نشان داده شده است.

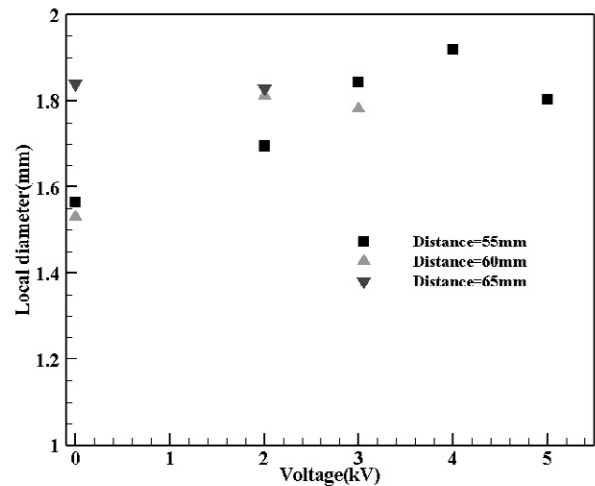
نمودار تغییرات بسامد برای $Z^* = 1$ در شکل ۷ آورده شده است. شکل ۷ نشان دهنده ارتباط مستقیم بسامد با عدد رینولدز جت می‌باشد. در اعداد رینولدز بالاتر به دلیل تقویت نیروهای اینرسی در مقایسه با نیروهای لزجی، انتشار بسامدهای اغتشاشی بالاتر در ستون جت امکان پذیر شده و امواج ناپایداری با بسامد بالاتر در روی سطح جت قابل مشاهده می‌باشند.

جدول ۲، دسته‌بندی شکل ذره‌های تولید شده پس از شکست جت بر اساس شکل ظاهری و ضریب گردی آن‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۸ اثر عدد رینولدز بر توزیع پراکنندگی قطره‌های تولید شده در دو حالت مختلف نشان داده شده است. برای رینولدز ۶۵۰ به دلیل خارج بودن ناحیه شکست بالایی از محدوده مورد مطالعه، امکان چنین تحلیلی فراهم نبوده است. ناپایداری‌های منتشر شده در ستون جت منجر به شکست جت و ایجاد قطره‌هایی با شکل‌های مختلف می‌شوند. مشابه نتایج گرنت و میدلمن [۲۷]، کاهش عدد رینولدز منجر به کاهش طول شکست جت سیال شده و ناپایداری‌ها در فاصله کمتری از نازل، منجر به فروپاشی جت و ایجاد قطره‌ها می‌شوند. جریان جت با عدد رینولدز پایین‌تر با داشتن طول شکست کوتاه‌تر و بسامدهای اغتشاشی پایین‌تر، تمایل بیش‌تری به ایجاد قطره‌ها با شکل نامنظم دارد که آن را می‌توان به استهلاک کمتر امواج بعد از شکست جت مرتبط دانست. به همین علت در رینولدزهای پایین‌تر تولید قطره‌های نامنظم افزایش و میزان تولید ذرات دایروی کاهش می‌یابد. میانگین قطر قطره‌های تولید شده برای رینولدز ۴۵۰ برابر ۳/۱۱ میلی‌متر و برای رینولدز ۳۳۰ برابر با ۲/۸۲ میلی‌متر می‌باشد. این پدیده ناشی از افزایش قطر متوسط جت



شکل ۱۰: طول شکست جت در حضور میدان الکتریکی

Fig. 10: Jet break lengths in the presence of an electric field



شکل ۹: تغییرات قطر محلی جت در حضور میدان الکتریکی

Fig. 9: Local diameter variations in the presence of an electric field

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، می‌توان گفت که طول شکست ستون جت با شدت میدان الکتریکی اعمال شده به آن رابطه معکوس دارد. در میدان ایجاد شده با ولتاژ ۶kV می‌توان طول شکست بالایی جت را به میزان ۲۷ درصد نسبت به حالت بدون میدان کوتاه‌تر کرد. مقدار کمینه طول شکست در این شدت میدان در خارج از محدوده مورد بررسی قرار داشت؛ به همین علت از علامت کوچک‌تر برای این مورد استفاده شده است. همچنین با افزایش شدت میدان، شیب تغییرات طول شکست کاهش می‌یابد که این مسأله را می‌توان به پلاریزاسیون کامل جت سیال نسبت داد. مطالعه شکل ۱۱ که اثر جهت میدان اعمال شده بر روی جت سیال را نشان می‌دهد، بیان‌گر این مطلب است که روند تغییرات قطر متوسط جت در میدان‌های معکوس نیز به‌صورت کیفی مشابه میدان مستقیم بوده و ابتدا با افزایش میدان، قطر متوسط نیز افزایش می‌یابد و سپس با اشباع جت با کاهش قطر جت مواجه می‌شویم. همان‌طور که قبلاً ذکر شد اعمال میدان الکتریکی قطر جت را افزایش می‌دهد؛ در حالت اعمال میدان مستقیم، به دلیل اعمال نیروی الکتروفورتیک و شتاب دادن سیال در ناحیه الکترودها که باعث انباشت سیال در بالادست ناحیه بررسی می‌شود، قطر جت افزایش می‌یابد. اعمال میدان معکوس باعث کندتر شدن جریان سیال در ناحیه الکترودها شده و منجر به افزایش قطر جت در ناحیه بالادست الکترودها می‌شود. افزایش قطر با اعمال میدان الکتریکی معکوس به دلیل بیش‌تر بودن فاصله ناحیه بررسی با ناحیه کند شدن جت، کمتر از حالت میدان مستقیم است.

شکل ۱۲ تأثیر جهت میدان را بر طول شکست جت نشان می‌دهد. این شکل

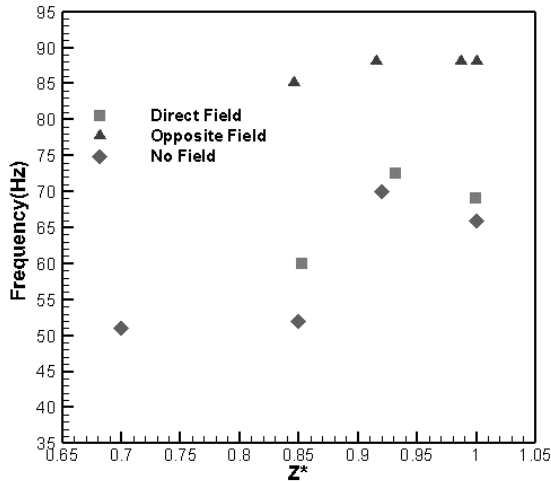
نشان می‌دهد که در ولتاژهای پایین، تغییر آرایش اثر قابل توجهی بر

طول شکست ندارد ولی در ولتاژهای بالا اثر آن قابل ملاحظه است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، نیروی الکتروفورتیک ایجاد شده در اثر وجود ناخالصی‌ها با

در ناحیه بین الکترودها شده و با انباشته شدن سیال در پایین دست این ناحیه، قطر محلی افزایش می‌یابد. این روند افزایشی تا یک مقدار معینی ادامه می‌یابد و سپس با پلاریزاسیون کامل مایع جت، به دلیل عدم امکان افزایش نیروی الکتروفورتیک و با رشد ناپایداری‌ها، قطر جت کمی کاهش می‌یابد. پس از حالت اشباع (پلاریزاسیون کامل)، قطر محلی یک روند کاهشی به خود گرفته و سپس تخلیه الکتریکی مانع از مطالعه بیش‌تر رفتار جت می‌شود. لازم به ذکر است در حالت بدون میدان، مشابه جت آب، قطر محلی جت روغن نیز با افزایش فاصله و تحت تأثیر نیروی گرانش کاهش یافته و در نزدیکی ناحیه شکست، تحت تأثیر این ناحیه، افزایش می‌یابد. قطر محلی جت روغن در فواصل ۵/۵، ۶ و ۶/۵ سانتی‌متری نازل به ترتیب برابر با ۱/۵۷، ۱/۵۳ و ۱/۸۴ میلی‌متر می‌باشد که از الگوی توضیح داده شده تبعیت می‌کند.

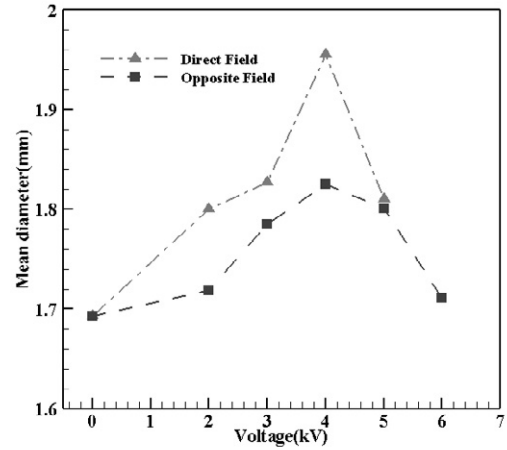
در فواصل دورتر از الکترودها با برگشت سیال به حالت عادی و سقوط آن تحت اثر گرانش، اثر میدان از بین رفته و لذا ضخامت محلی روند نزولی پیدا می‌کند. لازم به ذکر است که مطالعه رفتار جت در ولتاژهای بالا و برای فواصل بیش‌تر از نازل به علت شکست جت میسر نبوده و لذا در فواصل بیش‌تر به ارائه داده‌ها در ولتاژهای پایین بسنده شده است. بررسی قطر محلی در یک ولتاژ معین حاکی از رابطه مستقیم آن با فاصله از نازل در نقاط دور از ناحیه شکست است.

شکل ۱۰، نمودار طول شکست ستون جت را در حضور میدان الکتریکی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که طول شکست پیش‌بینی شده توسط رابطه تجربی گرنر و میدلمن [۲۷] برای جت بدون اعمال میدان الکتریکی برابر با ۸۹/۹۷ میلی‌متر می‌باشد که تطابق خوبی با میانگین طول بیشینه و کمینه شکست جت روغن دارد. با افزایش شدت میدان الکتریکی، نیروی دی‌الکتروفورتیک قوی‌تری به جت سیال اعمال شده و ناپایداری‌های روی ستون جت تشدید می‌شوند. لذا



شکل ۱۳: توزیع بسامد امواج سطح جت در حضور میدان الکتریکی

Fig. 13: Frequency distribution of jet surface waves in the presence of an electric field

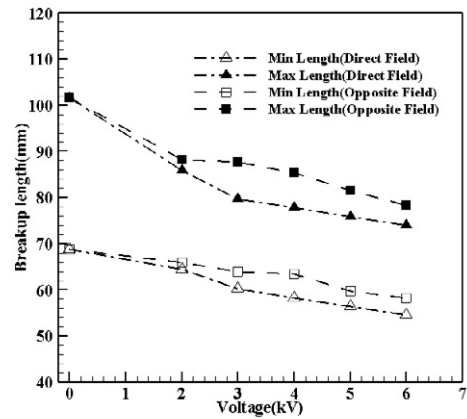


شکل ۱۱: اثر جهت میدان الکتریکی بر قطر متوسط جت

Fig. 11: Effects of the direction of the electric field on the average jet diameter



شکل ۱۴: انحراف قطره‌ها تحت اثر میدان الکتریکی اعمال شده
Fig. 14: Deviation of droplets in the presence of an applied electric field



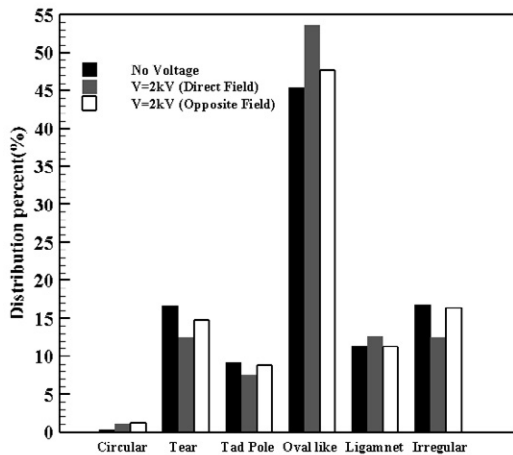
شکل ۱۲: اثر جهت میدان در طول شکست جت

Fig. 12: Effects of the direction of the electric field on jet breakup length

شده می‌باشد و این موضوع در کار آرای و آماگای [۲] برای جت‌های بدون حضور میدان الکتریکی نیز گزارش شده است. شکل ۱۴ انحراف ریزقطرات تولید شده ناشی از شکست جت از مسیر اصلی خود را تحت تأثیر میدان الکتریکی با ولتاژ ۲kV نشان می‌دهد. ریزقطرات تولید شده با توجه به جرم ناچیزشان تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار گرفته و قابلیت اثرپذیری بیش تری در اثر میدان را دارا می‌باشند. به همین علت دچار انحراف شده و مسیرهای مختلفی را طی می‌کنند. محل انحراف این ریزقطرات نیز با توجه به جرم آن‌ها متفاوت می‌باشد. شکل ۱۵، اثر میدان الکتریکی بر پراکندگی شکل قطرات تولید شده را نشان می‌دهد.

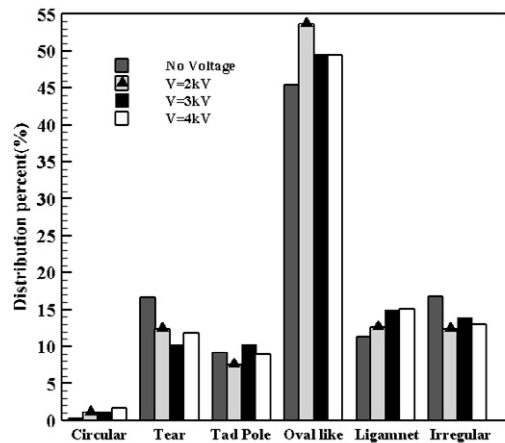
مقایسه بین حالت‌های مختلف در این نمودار حاکی از این مطلب است که اعمال میدان الکتریکی در ایجاد قطرات با گردی بیش تر، نقش بسزایی ایفا می‌کند؛ طوری که با افزایش شدت میدان، درصد فراوانی قطرات گرد نیز افزایش می‌یابد. همچنین این نمودار مشخص می‌کند که افزایش شدت میدان الکتریکی در کاهش قطرات نامنظم مؤثر می‌باشد. شکل ۱۶ اثر راستای میدان بر قطرات تشکیل شده را نشان می‌دهد. وجود میدان الکتریکی موجب تشکیل قطرات با گردی بیش تر شده و این اثر برای هر دو حالت میدان مستقیم و میدان معکوس تقریباً به یک میزان است. علاوه بر این، اثر میدان مستقیم در کاهش تولید

افزایش ولتاژ قوی تر شده و اثر تغییر آرایش را نمایان می‌سازد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که تغییر رفتار جت با تغییر آرایش الکترودها حاکی از وجود نیروی الکتروفورتیک می‌باشد؛ چون نیروی دی‌الکتروفورتیک مستقل از جت میدان عمل می‌کند. شکل ۱۳ توزیع بسامد امواج سطح جت، تحت تأثیر میدان الکتریکی با ولتاژ ۲kV را نشان می‌دهد. همان طور که اشاره شد، میدان الکتریکی با اعمال نیروی دی‌الکتروفورتیک منجر به افزایش ناپایداری‌های سطح جت می‌شود؛ لذا می‌توان ناپایداری‌های با بسامد بیش تری را قبل از شکست جت نسبت به حالت بدون میدان مشاهده کرد. همچنین اعمال نیروی الکتروفورتیک در جهت مخالف حرکت سیال در میدان مخالف، منجر به افزایش محسوس بسامد این ناپایداری‌ها می‌گردد و بسامد امواج ایجاد شده به مراتب بیش تر از میدان مستقیم است. افزایش بسامد امواج در نقطه شکست، ویژگی مشترک در تمامی حالت‌های یاد



شکل ۱۶: اثر جهت میدان بر قطره‌های تولید شده

Fig. 16: Effects of the electric field direction on the distribution of droplets



شکل ۱۵: اثر میدان الکتریکی بر توزیع قطره‌های تولید شده

Fig. 15: Electric field effects on the distribution of droplets

برای حالت‌های مختلف، می‌توان به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر روی این مقدار پرداخت. بررسی‌ها نشان داد که در فاصله ثابت از خروجی نازل، بسامد امواج با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابند.

مطالعه جت سیال در حضور میدان الکتریکی، نشان دهنده تأثیرات میدان بر روی جت سیال بود؛ طوری که پارامترهای اساسی جت دچار تغییرات قابل توجهی شدند. با بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که با افزایش شدت میدان الکتریکی ضخامت متوسط جت افزایش و طول شکست آن کاهش می‌یابد. با اعمال اختلاف پتانسیل ۶kV به الکترودها، می‌توان طول شکست بالایی جت را به میزان ۳۷ درصد نسبت به حالت بدون میدان کوتاه‌تر کرد. با افزایش شدت میدان اندازه قطرات تولید شده دچار تغییراتی شده و در حالت‌های خاصی دارای شکل یکنواخت‌تری می‌شوند. انحراف معیار قطره‌های تولید شده در حالت بدون میدان و میدان الکتریکی مخالف حاصل از ۲ kV به ترتیب برابر با $1/3$ و $1/1$ میلی‌متر می‌باشد که حاکی از یکنواختی بیشتر قطرات در حضور میدان مخالف است. این موضوع در فرآیند اسپری جت سیال کاربرد گسترده‌ای دارد. بررسی قطرات تولید شده از لحاظ میزان گرد بودن، نشان داد که میدان الکتریکی باعث تولید قطرات با گردی بیشتر شده و فراوانی قطرات نامنظم را کاهش می‌دهد.

قطرات نامنظم به خوبی قابل مشاهده است. در نهایت می‌توان بیان داشت که برای کاربردهای خاص باید اثر میدان از لحاظ شدت و جهت اعمال آن نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

انحراف معیار قطره‌های تولید شده در حالت بدون میدان برابر با $1/3$ mm است. در حالی که این عدد در حضور میدان الکتریکی حاصل از ولتاژ ۲ kV برای حالت مستقیم و معکوس به ترتیب برابر با $1/46$ mm و $1/1$ mm می‌باشد. لذا می‌توان گفت میدان الکتریکی معکوس در تولید قطره‌های یکنواخت‌تر نقش مهمی را ایفا می‌کند.

۴- نتیجه گیری

در جت‌های آزادی که فقط تحت تأثیر گرانش می‌باشند، مشخصات جت سیال وابسته به عدد رینولدز آن می‌باشد. طوری که ضخامت ستون جت و طول شکست آن دارای رابطه مستقیم با عدد رینولدز هستند. بسامد موج‌های منتشر شده بر روی جت نیز که در این جا یکی از شاخصه‌های اساسی جت سیال به شمار می‌آید، دارای محدوده خاصی می‌باشد. بسامد امواج جت آزاد دارای تغییرات قابل توجهی در فواصل مختلف از خروجی نازل هستند. لذا با مقایسه بسامد یک نقطه با فاصله ثابت از خروجی نازل

منابع

- [1] G. Bidone, Expériences sur la forme et sur la direction des veines et des courans [sic] d'eau lancés par diverses ouvertures, Imprimerie royale,)1829(.
- [2] K. Amagai, M. Arai, Frequency analysis of disintegrating liquid column, International Journal of Fluid Mechanics Research, 24 (1997) 1-3.
- [3] J. Eggers, E. Villermaux, Physics of liquid jets, Reports on progress in physics, 71(3) (2008) 036601.
- [4] J. Blaisot, S. Adeline, Instabilities on a free falling jet under an internal flow breakup mode regime, International journal of multiphase flow, 29(4) (2003) 629-653.
- [5] C. Cramer, P. Fischer, E.J. Windhab, Drop formation in a co-flowing ambient fluid, Chemical Engineering Science, 59(15) (2004) 3045-3058.
- [6] B. Cheong, T. Howes, Capillary jet instability under the influence of gravity, Chemical engineering science, 59(11) (2004) 2145-2157.
- [7] M. Hojjati, E. Esmailzadeh, B. Sadri, R. Gharraci, Electrohydrodynamic conduction pumps with cylindrical electrodes for pumping of dielectric liquid film in an open channel, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 392(1) (2011) 294-299.
- [8] Y. Gan, Z. Luo, Y. Cheng, J. Xu, The electro-spraying characteristics of ethanol for application in a small-scale combustor under combined electric field, Applied Thermal Engineering, 87 (2015) 595-604.
- [9] B. Khorshidi, M. Jalaal, E. Esmailzadeh, Electrohydrodynamic instability at the interface between two leaky dielectric fluid layers, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 380(1) (2011) 207-212.
- [10] B.V. Hokmabad, S. Faraji, T.G. Dizajyekan, B. Sadri, E. Esmailzadeh, Electric field-assisted manipulation of liquid jet and emanated droplets, International Journal of

فهرست علائم

علائم انگلیسی	
مساحت، m^2	A
ضریب گردی	CR
قطر، m	D
شدت میدان الکتریکی، NC^{-1}	E
چگالی نیرو، Nm^{-3}	F
بسامه، Hz	f
تابع خود هم‌بستگی	G_{ii}
طول، m	L
محیط، m	p
چگالی بار الکتریکی، Cm^{-3}	q
تابع چگالی طیف توان	R_{ii}
عدد رینولدز	Re
انحراف معیار استاندارد	S
دما، K	T
زمان، s	t
سرعت، ms^{-1}	u
عدد وبر	We
فاصله از نازل، m	Z
علائم یونانی	
قطر جت، m	δ
کشش سطحی، Nm^{-1}	σ
ضریب گذردهی نسبی	ε
لزجت دینامیکی، $kgm^{-1}s^{-1}$	μ
چگالی، kgm^{-3}	ρ
زمان بی‌بعد	τ
بالانویس‌ها	
بی‌بعد	*
زیرنویس‌ها	
شکست	b
قطره	$drop$
الکتریکی	e
شمارنده	i
محلی	$local$
متوسط	$mean$

- of an electrified viscoelastic liquid jet, *Journal of Fluids Engineering*, 134(7) (2012) 071303.
- [20] A. Khoshnevis, M.F. Tabriz, M. Hemayatkhah, A.E. Kandjani, J.M. Milani, E. Esmailzadeh, M. Eslamian, M.R. Vaezi, Characteristics of the breakup and fragmentation of an electrohydrodynamic melt jet, *Particuology*, 10(3) (2012) 255-265.
- [21] P. Tabatabaee-Hosseini, B. Sadri, E. Esmailzadeh, Experimental study on the impinging of two opposed inclined electrified laminar jets in the stagnant dielectric medium, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 42 (2012) 230-239.
- [22] M. Rahmanpour, R. Ebrahimi, Numerical simulation of electrohydrodynamic spray with stable Taylor cone-jet, *Heat and Mass Transfer*, 52(8) (2016) 1595-1603.
- [23] M. Yu, K.H. Ahn, S.J. Lee, Interplay between electrical and rheological properties of viscoelastic inks, *Applied Physics A*, 122(4) (2016) 1-8.
- [24] S. Faraji, B. Sadri, B.V. Hokmabad, N. Jadidoleslam, E. Esmailzadeh, Experimental study on the role of electrical conductivity in pulsating modes of electrospraying, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 81 (2017) 327-335.
- [25] R. Gharraei, M. Hemayatkhah, S.B. Islami, E. Esmailzadeh, An experimental investigation on the developing wavy falling film in the presence of electrohydrodynamic conduction phenomenon, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 60 (2015) 35-44.
- [26] T. Karapantsios, S.t. Paras, A. Karabelas, Statistical characteristics of free falling films at high Reynolds numbers, *International Journal of Multiphase Flow*, 15(1) (1989) 1-21.
- [27] R. Grant, S. Middleman, Newtonian jet stability, *AIChE Journal*, 2 (1966) 669-678.
- Multiphase Flow*, 65 (2014) 127-137.
- [11] S. Faraji, M.F. Yardim, D.S. Can, A.S. Sarac, Characterization of polyacrylonitrile, poly (acrylonitrile-co-vinyl acetate), and poly (acrylonitrile-co-itaconic acid) based activated carbon nanofibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 134(2) (2017) 44381.
- [12] Y. Wu, J.A. MacKay, J. R. McDaniel, A. Chilkoti, R.L. Clark, Fabrication of elastin-like polypeptide nanoparticles for drug delivery by electrospraying, *Biomacromolecules*, 10(1) (2008) 19-24.
- [13] B. Sadri, B.V. Hokmabad, E. Esmailzadeh, R. Gharraei, Experimental investigation of electrosprayed droplets behaviour of water and KCl aqueous solutions in silicone oil, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 36 (2012) 249-255.
- [14] P. Foroughi, Design and characterization of an electrohydrodynamic (EHD) micropump for cryogenic spot cooling applications, University of Maryland, College Park, 2008.
- [15] S. Arumuganathar, S. Jayasinghe, N. Suter, Unique aerodynamically driven methodology for forming droplets, threads to scaffolds, *Journal of applied polymer science*, 104(6) (2007) 3844-3848.
- [16] A. Bateni, S. Laughton, H. Tavana, S. Susnar, A. Amirfazli, A. Neumann, Effect of electric fields on contact angle and surface tension of drops, *Journal of colloid and interface science*, 283(1) (2005) 215-222.
- [17] A. Atten, S. Oliveri, Charging of drops formed by circular jet breakup, *Journal of electrostatics*, 29(1) (1992) 73-91.
- [18] F. Li, X.-Y. Yin, X.-Z. Yin, Axisymmetric and non-axisymmetric instability of an electrified viscous coaxial jet, *Journal of Fluid Mechanics*, 632 (2009) 199-225.
- [19] L.-j. Yang, Y.-x. Liu, Q.-f. Fu, Linear stability analysis