http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دوره ۱۲ شماره ۲ تیر ۱۳۹۱ ص‌ص ۱۲۵-۱۳۳

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۰/۶/۲۱
پذیرش ۹۰/۱۰/۲۶
ارائه در سایت ۹۱/۳/۱۵

# بررسی اثر پارامترهای مختلف بر طول شکست اولیه جریان خروجی از نازل

**سوده خسروی[۱]، محمدرضا انصاری[۲*]**

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۴۳- ۱۴۱۱۵، mra_1330@modares.ac.ir

**چکیده**- در این مقاله، مدل دوبعدی متقارن محوری به روش حجم سیال برای شبیه‌سازی عددی جریان جت مورد استفاده قرار گرفته و طول شکست اولیه جت سیال مایع خروجی از نازل محاسبه شده است. جریان به صورت آشفته و ناپایا در محاسبات درنظر گرفته شده است. متغیرهای مورد مطالعه عبارت‌اند از: قطر نازل (۰/۴۷۵mm و ۰/۲۳۷۵mm و ۰/۱۱۸۷۵mm)، سرعت سیال عبوری از مرکز انژکتور (۱۵/۴۱۶m/s و ۷/۷۰۸m/s) و سیال داخل نازل (آب و گازوییل). به منظور محاسبات دوفازی دینامیک سیالات محاسباتی، از نرم‌افزار Fluent 6.3.26 استفاده شده است. نتایج عددی به‌دست آمده ناپایداری‌های هیدرودینامیکی را به وضوح نشان داده و تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج عددی گرفته‌شده با نتایج تجربی مشاهده می‌شود. محاسبات نشان داد که با افزایش سرعت بین دوفاز و یا کاهش دانسیته سیال مایع، طول شکست کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر خروجی نازل تغییر رژیم جریان امکان داشته و طول شکست نیز تغییر می‌کند. به منظور مقایسه نتایج کار جاری با مطالعات دیگران، در این تحقیق از نازلی استفاده شده که ابعاد و داده‌های آزمایشگاهی آن در دسترس است.

**واژگان کلیدی:** طول شکست اولیه، روش حجم سیال، اتمیزاسیون، جت

# The effect of various parameters on breakup length of the outflow from the nozzle

**S. Khosravi[1], M. R. Ansari[2*]**

1. MSc. Student, Mech. Eng., Tarbiat modares Univ., Tehran, Iran
2. Assoc. Prof., Mech. Eng., Tarbiat modares Univ., Tehran, Iran
* P. O. B. 14115-143 Tehran, mra_1330@modares.ac.ir

**Abstract:** in this article, jet flow from the nozzle exit was considered numerically in transient two-dimensional axsymmetric turbulent condition using volume of fluid method (VOF). The hydrodynamical instability for jet flow was analyzed and the breakup length was calculated, the nozzle diameter of 0.11875mm, 0.2375mm and 0.475 mm, the center line velocity of the fluid in the 15.416 m/s and 7.708 m/s and the fluid inside the nozzle are water and gasoil used for the calculation. Fluent6.3.26 was used for two-phase flow analysis. The results obtained from the present numerical simulation compared with the experimental results of the previous researches, good agreement was obtained. It was concluded that the breakup length decreases as the relative velocity between the phases increase or the liquid density decreases. The nozzle diameter is an important parameter which effect of the nozzle outlet regime and the breakup length.

**Keyword:** Breakup Length, Volume of Fluid, Atomization, Jet

## ۱- مقدمه

بررسی ناپایداری‌ها و طول شکست لایه‌های مایع در فرایندهای پاشش مایع، در کاربردهای زیادی مثل تزریق سوخت مایع در موتورهای احتراقی، اسپری‌های خشک‌کننده غذاها و پاک کننده‌ها و ساخت تولیدات دارویی، ضرورت دارد. احتراق سوخت در موتورهای دیزل، موتورهای اشتعال جرقه‌ای DISI[1]، موتورهای پاشش مستقیم بنزین GDI[2]، توربین‌های گازی و کوره‌های حرارتی صنعتی به اتمیزاسیون موثر در افزایش سطح ویژه سوخت و در نتیجه بهبود نرخ اختلاط سوخت و هوا و تبخیر سریع‌تر بستگی دارد.

در بیشتر سیستم‌های احتراقی کاهش در اندازه قطر متوسط قطرات سوخت منجر به بالاتررفتن نرخ حجمی انتقال حرارت، آغازش آسان‌تر و کاهش انتشار آلاینده‌ها می‌شود. در نتیجه فهم بهتر فیزیک تجزیه و اتمیزاسیون اولیه جت و لایه سیال اهمیت ویژه‌ای در بهبود طراحی انژکتور دارد و به استفاده بهتر از شرایط محیط برای بهبود عملکرد کمک می‌کند.

تجزیه جت یا لایه سیال در اثر رشد امواج ناپایدار در سطح مشترک گاز/سیال، به علت نیروهای آیرودینامیکی میان سیال و گاز، اینرسی، فشار، ویسکوزیته و نیروی کشش سطحی که در سطح مشترک عمل می‌کنند، انجام می‌شود. مجموع اثرات این نیروها موجب تقویت نوسانات کوچک ایجادشده در جریان می‌شود. زمانی که ناپایدارترین عدد موج به مقدار بحرانی خود، که معادل ماکزیمم نرخ رشد موج است، می‌رسد امواج ناپایدار موجب جداشدن تکه‌هایی به نام لیگامنت از لبه سیال می‌شوند که خود در اثر افزایش ناپایداری‌ها به علت نیروهای آیرودینامیکی به قطرات ریزتر می‌شکنند.

در این مقاله، طول شکست اولیه جت سیال خروجی از یک نازل تحت شرایط مختلف از جمله قطر مختلف نازل، سیال گذرنده متفاوت و سرعت مختلف هوای عبوری از مرکز نازل اندازه‌گیری و با هم مقایسه شده است. برخلاف آنالیزهای خطی و غیرخطی انجام‌شده، که از تاثیر نیروی کشش سطحی بین دو فاز و نیروی گرانش و تاثیر لزجت صرف‌نظر می‌کنند، در اینجا تمام آن‌ها لحاظ شده است. تحقیقات تجربی، به علت مشکلات موجود، در دامنه محدودی از شرایط اولیه و مرزی قابل انجام می‌باشند و در صورتی که شرایط جدید مطرح شوند امکان به‌دست آمدن نتایج کاملاً متفاوتی وجود خواهد داشت. لذا تحقیقات عددی و تحلیلی، که هزینه کمتری دارند و تغییر شرایط مسئله به سادگی امکان‌پذیر است، کمک شایانی به درک فیزیک نهفته اتمیزاسیون خواهد داشت.

تاکنون تحقیقات زیادی به صورت تجربی، عددی و تحلیلی در زمینه مدلسازی اتمیزاسیون جت سیال انجام شده است. در زمینه ناپایداری جت و لایه سیال، مطالعات کلاسیک رایلی[۱] که اولین آنالیز ناپایداری به صورت خطی برای یک ستون استوانه‌ای از مایع غیرلزج در غیاب گاز محیطی را انجام داد و ارائه نتایج اسکویر[۲] بیشتر مورد توجه قرار گرفته است[۳]. از جمله افرادی که در چند سال اخیر مروری بر کارهای گذشته انجام داده‌اند می‌توان سیریگنانو و مهرینگ[۴]، لاشراس و هوپفینگر[۵]، یون و هیستر[۶]، لین[۷] و ابراهیم و جاگ[۳] را نام برد. از آثار نام برده شده این نتیجه حاصل می‌شود که نیروهای عمل‌کننده در سطح مشترک سیال مایع/گاز شامل تنش سطحی، فشار، نیروی اینرسی، نیروی گریز از مرکز و نیروی لزجت بوده و بالانس آن‌ها تعیین‌کننده گسست یا عدم گسست جت یا لایه سیال خواهد بود. کاروالهو و هیتور[۸] فرایند اتمیزاسیون مایع در یک لایه برشی متقارن محوری، متشکل از اثر متقابل جت‌های هم‌محور (به‌ترتیب جت‌های درونی و بیرونی)، همراه با چرخش و بدون آن در یک انژکتور هوادمشی مدل را، با جریان سیال رینولدز بالا و مغشوش، به صورت تجربی بررسی نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که وجود هوای اتمیزه‌کننده بیرونی به کاهش سریع‌تر طول گسست منجر می‌شود و این تاثیر زمانی قوی‌تر می‌شود که هوای بیرونی چرخش دارد و سطوح چرخش افزایش می‌یابد. لیاو و همکاران[۹] مدل نامتقارن و محوری یک انژکتور را مدل کردند و تاثیرات اختلاف سرعت نسبی بین دوفاز و نسبت دانسیته و انحنای سطح را روی ناپایداری‌ها بررسی کردند. همچنین متوسط سایز قطرات ریز را براساس آنالیز پایداری خطی پیش‌بینی کردند. سپس لیاو و همکاران[۱۰] تاثیر پارامترهای مختلف از جمله تاثیر اختلاف سرعت نسبی محوری، خصوصیات سیال از جمله نسبت دانسیته گاز به مایع و عدد بدون بعد اهنسبرگ[3] و همچنین تأثیر چرخش هوا را

1. Direct Injection, Spark Ignition
2. Gasoline Direct Injection
3. Ohnesberg

روی ناپایداری‌ها بررسی کردند. دا و لی[۱۱] تاثیر چرخشی کردن جریان گاز داخلی و گاز خارجی را روی جت مایع حلقوی لزج بررسی کردند. جیندل و دانچل[۱۲] نیز تاثیر لزجت را روی جت مایع حلقوی، به صورت جریان متقارن و با سرعت محوری یکسان سیال گاز در داخل و خارج جت مایع، بررسی کردند. کاو[۱۳] آنالیز ناپایدار خطی را روی جریان متقارن محوری لزج انجام داد و تاثیر عواملی مانند سرعت هر دو گاز داخلی و خارجی و پارامترهای مختلف جریان را روی فرایند شکست اولیه جت مایع حلقوی بررسی کرد. پانچاگنولا و همکاران[۱۴] یک مدل خطی برای بررسی ناپایداری‌های یک لایه حلقوی از سیال مایع چرخشی غیرلزج در حضور گاز داخلی و خارجی با سرعت غیریکسان ارائه دادند. آلبورن و همکاران[۱۵] آنالیز پایداری خطی را روی جریان مایع حلقوی متقارن غیرلزج (غیرنیوتنی) بررسی کردند. آدزیک و همکاران[۱۶] تجزیه صفحه مایع حلقوی را در یک انژکتور هوادمشی هم‌محور در سرعت‌های هوای اتمیزه‌کننده پایین نشان دادند. آن‌ها اثبات کردند که طول گسست صفحه مایع حلقوی تابعی از مجموع مومنتوم هوای داخلی و خارجی جریان‌های هم‌محور $((u_i^2+u_o^2)^{-0.44})$ می‌باشد. چن و همکاران[۱۷] در یک کار تجربی اثرات جهت چرخش گاز نسبت به مایع را در یک انژکتور هوادمشی فشار بالا مقایسه کردند؛ برای شرایط به‌کار گرفته شده برای کار آن‌ها، نشان داده شده است که در جریان چرخشی هم‌جهت هوای داخل و خلاف جهت هوای خارج نسبت به جهت چرخش مایع، اسپری با قطر متوسط کمتر قطرات حاصل می‌شود، اما طول شکست کمتر زمانی حاصل می‌شود که هر دو جریان داخل و خارج هوا سرعت چرخشی هم‌جهت با مایع داشته باشند.

## ۲-معادلات حاکم

### ۲-۱- معادلات

در روش حجم سیال[1] برای مسیریابی موقعیت سطح آزاد بین فازهای مخلوط‌نشدنی باید معادله پیوستگی برای حجم سیال یک یا چندین فاز حل شود. برای $q$ امین فاز معادله به صورت زیر نوشته می‌شود[۱۸]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q\rho_q)+\nabla.(\alpha_q\rho_q\bar{v}_q)=0 \qquad (۱)$$

1. VOF-Volume Of Fluid

البته معادله کسر حجمی برای فاز اولیه حل نمی‌شود و حجم سیال فاز اولیه براساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\sum_{q=1}^{n}\alpha_q=1 \qquad (۲)$$

رابطه بالا، هم به صورت ضمنی و هم به صورت صریح، قابل حل می‌باشد که در این مقاله به روش ضمنی حل شده است.

مشخصات ظاهرشده در معادلات انتقالی براساس حضور اجزای فازها در حجم کنترل محاسبه می‌شود. برای مثال، در سیستم‌های دوفازی، اگر فازها را با زیرنویس ۱ و ۲ نشان دهیم، آنگاه دانسیته در هر سلول به رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\rho=\alpha_2\rho_2+(1-\alpha_2)\rho_1 \qquad (۳)$$

در کل برای سیستم‌های $n$ فازی دانسیته متوسط کسر حجمی براساس رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$\rho=\sum_{q=1}^{n}\alpha_q\,\rho_q \qquad (۴)$$

بقیه خصوصیات نیز (مانند ویسکوزیتی و ...) به همین روش محاسبه می‌شوند.

برای کل بازه محاسباتی، تنها یک معادله مومنتوم حل می‌شود؛ درنتیجه سرعت بین فازها به اشتراک گذاشته می‌شود. معادله مومنتوم، همان‌طور که در رابطه (۵) نشان داده شده است، به کسر حجمی همه فازها از طریق $\rho,\mu$ وابسته است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{v})+\nabla.(\rho\bar{v}\bar{v})]=-\nabla p +\nabla.[\mu(\nabla\bar{v}+\nabla\bar{v}^T)]+\rho\bar{g}+\bar{F} \qquad (۵)$$

در روش حجم سیال، می‌توان تاثیر کشش سطحی را در طول سطح مشترک بین هر فاز نشان داد. مدل کشش سطحی استفاده‌شده مدل نیروی سطحی پیوسته‌ای است که توسط برک بیل و همکاران ارائه شده است.

$$p_2-p_1=\sigma(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}) \qquad (۶)$$

که $p_1$ و $p_2$ فشار دو سیال در دو طرف سطوح هستند.

در این مدل، برای محاسبه انحنای سطح، ابتدا گرادیان نرمال سطح در سطح مشترک محاسبه می‌شود. اگر $n$ بردار نرمال سطح درنظر گرفته شود، این بردار نرمال به صورت گرادیان $\alpha_q$ (کسر حجمی فاز $q^{th}$) به‌دست می آید، که در رابطه (۷) آورده شده است:

$$n=\nabla\alpha_q \qquad (۷)$$

انحنای سطح نیز به صورت دیورژانس نرمال واحد به‌دست می‌آید که در رابطه (۸) به آن اشاره شده است.

$$k = \nabla . \hat{n} \quad (۸)$$

جایی که نرمال واحد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{n} = \frac{n}{|n|} \quad (۹)$$

همچنین، نیروی کشش سطحی به صورت نیروهای حجمی، در ترم منبعی که در معادله مومنتوم است، ظاهر می‌شود و به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$F_{vol} = \sum_{pairsij,i<j} \sigma_{ij} \frac{\alpha_i \rho_i k_j \nabla \alpha_j + \alpha_j \rho_j k_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (۱۰)$$

زمانی که در یک سلول تنها دو فاز داشته باشیم، $k_i = -k_j$ و $\nabla \alpha_i = \nabla \alpha_j$، نیروی کشش سطحی به صورت رابطه (۱۱) ظاهر می‌شود:

$$F_{vol} = \sigma_{ij} \frac{\rho k_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (۱۱)$$

بدین صورت نیروی کشش سطحی زمانی که دو فاز در کنار یکدیگر باشند به صورت نیروی حجمی در معادله مومنتوم ظاهر می‌شود.

### ۲-۲- پارامترهای بدون بعد

از پارامترهای بدون بعد مهم برای بررسی نیروی کشش سطحی می‌توان به عدد رینولدز[1] و عدد کپیلاری[2] یا عدد رینولدز و عدد وبر[3] اشاره کرد. برای رینودزهای کوچک‌تر از یک، عدد کپیلاری از رابطه (۱۲) و برای رینولدزهای بزرگ‌تر از یک از عدد وبر رابطه (۱۳) استفاده می‌شود. زمانی که عدد کپیلاری یا عدد وبر بزرگ‌تر از یک باشند، می‌توان از تاثیر نیروی کشش سطحی صرف‌نظر کرد.

$$Ca = \frac{\mu u}{\sigma} \quad (۱۲)$$

$$We = \frac{\rho l u^2}{\sigma} \quad (۱۳)$$

### ۲-۳- شرایط مرزی و اولیه

مشخصات سیالات مورد استفاده در جدول ۱ و محدوده قطر هیدرولیکی خروجی نازل در جدول ۲ آورده شده است.

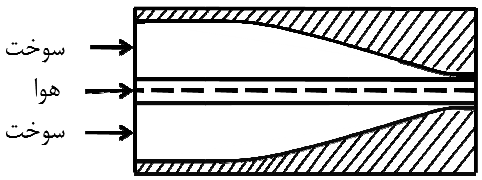
**جدول ۱** مشخصات سیال

| سیال | دانسیته (kg/m3) | لزجت (kg/ms) | سرعت در خروجی نازل (m/s) |
|---|---|---|---|
| آب | ۱۰۰۰ | ۰/۰۰۰۱ | ۳/۴۶۵ |
| هوا | ۱/۲۲۹ | ۰/۰۰۰۰۱۷۸ | ۱۵/۴۱۶و ۷/۷۰۸ |
| گازوییل | ۸۳۰ | ۰/۰۰۳۳۲ | ۳/۴۶۵ |

**جدول ۲** محدوده قطر هیدرولیکی در خروجی نازل

| | |
|---|---|
| محدوده قطر هیدرولیکی در خروجی نازل با زاویه صفر درجه (mm) | ۰/۱۱۸۷۵ و ۰/۲۳۷۵ و ۰/۴۷۵ |

شماتیک نازل جت در شکل ۱ آورده شده است. شرایط مرزی به صورت سرعت ورودی برای دو سیال گاز و مایع درنظر گرفته شده است؛ بدین صورت که از مرکز انژکتور هوا و از داخل نازل، سیال مایع عبور می‌کند. به منظور مدلسازی جریان فرض شده است که مخزن در ابتدا از مایع پر باشد و به طور آنی هوا از مرکز انژکتور و سیال مایع از انتهای نازل خارج شود. با توجه به مطالعات انجام‌شده، پروفیل سرعت در خروجی نازل تاثیر زیادی روی پارامترهای مختلف از جمله طول شکست دارد، که شکل پروفیل سرعت بستگی به سرعت و زاویه خروجی نازل دارد.




**شکل ۱** شماتیکی از نازل جت مایع

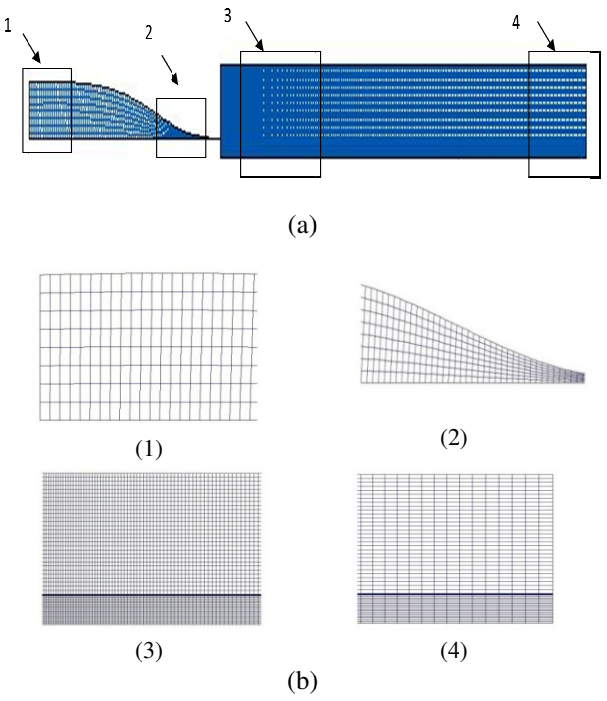
### ۲-۴- روش حل

طرح گسسته‌سازی استفاده‌شده برای فشار PRESTO[4] و روش PISO[5] برای کوپلینگ سرعت و فشار و معادلات مرتبه اول بادسو نیز برای حل معادله مومنتوم، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف آشفتگی، همچنین روش بازسازی هندسی[6] (الگوی یانگ) برای کسر حجمی استفاده شده است. مدل آشفتگی استفاده‌شده نیز $k-\varepsilon$ استاندارد است.

1. Reynolds
2. Capillary
3. Weber
4. Pressure Staggering Option
5. pressure Implicit Splitting of Operators
6. Geo-Reconstruct

توزیع شبکه هندسه مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است. علت استفاده از این نازل در تحقیق حاضر در دسترس بودن داده‌های آزمایشگاهی و ابعاد این نازل است؛ لذا استفاده از آن باعث قابل قیاس شدن کار جاری با مطالعات دیگران است. معیار قضاوت درباره هم‌گرایی کاهش باقی‌مانده‌ها در معادله پیوستگی تا ۰/۰۰۰۰۱ و در سایر معادلات ۰/۰۰۱ است. میدان حل مدل تحت بررسی تقارن محوری درنظر گرفته شده و از روش حجم سیال، که مربوط به جریان‌های دوفازی است، استفاده شده است. همچنین جریان آشفته و ناپایا درنظر گرفته شده است.

از بین شبکه‌بندی‌های مختلف که مورد بررسی قرار گرفت، شبکه استفاده‌شده جهت حل میدان از نوع باسازمان است که در بعضی از قسمت‌ها بر تراکم شبکه اضافه شده است. برای تولید شبکه از پیش‌پردازنده گمبیت[1] استفاده شده است.




**شکل۲** توزیع شبکه جهت شبیه‌سازی پدیده شکست (a) و نمای بسته از توزیع شبکه در مکان‌های مشخص‌شده (b)

اولین شبکه دارای ۳۰۰ × ۹۰ سلول است، که در نرم افزار فلوئنت با مش تطبیقی[2]، شبکه‌بندی، مش آن با توجه به مقدار فاز سیال مایع در هر سلول تعدیل شد. محاسبات توسط یک سیستم با ۸ پردازشگر ۲/۸ گیگاهرتز انجام شده است.

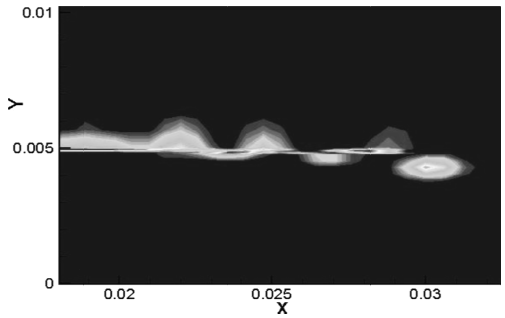
## ۳- نتایج

در این مقاله تأثیر تغییر سرعت، دانسیته و قطر خروجی نازل روی طول شکست جریان جت بررسی شده است.

### ۳-۱- بررسی تاثیر سرعت روی طول شکست

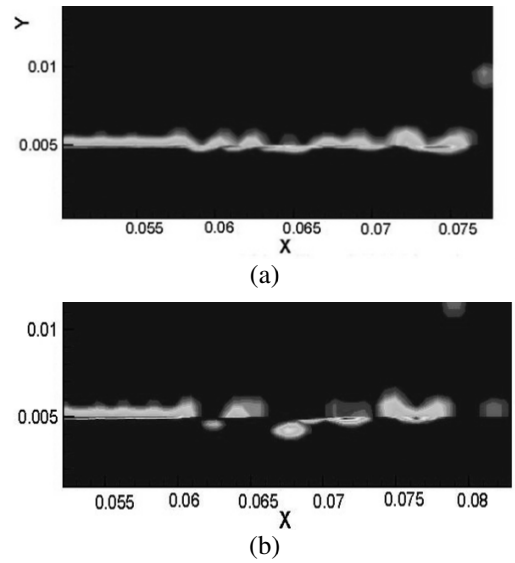
اگر در شرایط یکسان سرعت سیال خروجی از نازل ثابت درنظر گرفته شود و سرعت هوای ورودی از مرکز انژکتور تغییر داده شود، به علت افزایش اختلاف سرعت بین دو فاز، ناپایداری افزایش پیدا می‌کند و این مسئله منجر به کاهش طول شکست اولیه جت سیال می‌شود. با افزایش ناپایداری‌ها، نوسانات کوچک ایجادشده در جریان سریع‌تر تقویت شده و هنگامی که ناپایدارترین عدد موج به مقدار بحرانی خود، که معادل ماکزیمم نرخ رشد موج است، می‌رسد امواج ناپایدار موجب جداشدن تکه‌هایی به نام لیگامنت از لبه سیال می‌شوند که در اثر افزایش ناپایداری‌ها، به علت نیروهای آیرودینامیکی، به قطرات ریزتر می‌شکنند. در شکل‌های ۳ و ۴، سرعت سیال خروجی از نازل ثابت و سرعت هوای ورودی از مرکز انژکتور در دو حالت مختلف (۱۵/۴۱۶ و ۷/۷۰۸) بررسی شده است. مرجع [۱۹] طول شکست را برحسب نسبت سرعت‌ها بیان کرده است که بسیاری از آنالیزهای خطی و غیرخطی انجام‌شده نتایج خود را با نتایج این نمودار مقایسه می‌کنند.

در جدول ۳، نتایج حل عددی و تجربی با هم مقایسه شده است. شکل ۵ نیز ناپایداری‌ها را قبل از زمان شکست نشان می‌دهد.




**شکل ۳** طول شکست در فاصله ۲۹ mm با سرعت آب در خروجی نازل ۳/۴۶۴m/s و سرعت هوا ۱۵/۴۱۶ m/s

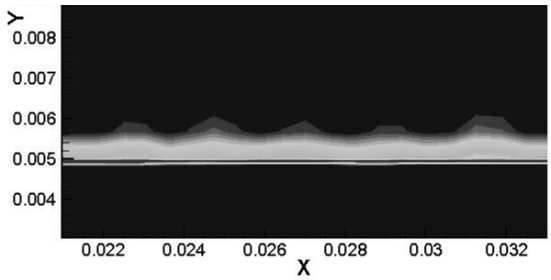
1. Gambit
2. Adapt mesh




**شکل ۴** طول شکست در فاصله ۷۷mm با سرعت آب در خروجی نازل ۳/۴۶۴m/s و سرعت هوا ۷/۷۰۷m/s (a) در لحظه شکست (b) بعد از شکست

**جدول ۳** مقایسه نتایج حل عددی با نتایج تجربی

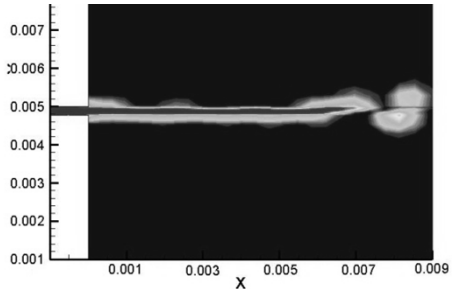
| طول شکست از تحلیل عددی | طول شکست از نتایج تجربی | سرعت هوا |
|---|---|---|
| ۷۷ | ۸۲/۳۱۲ | ۷/۷۰۸ |
| ۲۹ | ۲۷/۳۴۸ | ۱۵/۴۱۶ |



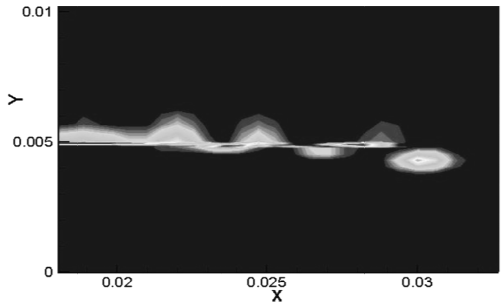

**شکل ۵** ناپایداری‌های ایجادشده با سرعت آب در خروجی نازل ۳/۴۶۴m/s و سرعت هوا ۷/۷۰۷ m/s

### ۳-۲- بررسی تاثیر دانسیته روی طول شکست

در شکل ۶ و ۷ به‌ترتیب طول شکست برای دو سیال گازوییل و آب نشان داده شده است. با مقایسه طول شکست برای دو سیال آب و گازوئیل در شرایط یکسان (مشخصات هندسی نازل و سرعت‌های یکسان)، مشاهده شد که سیال با دانسیته پایین‌تر سریع‌تر و در طول کمتری گسسته می‌شود. با افزایش دانسیته گاز و یا دانسیته مایع، نیروهای آیرودینامیکی بین فاز مایع و گاز افزایش می‌یابد و از آنجایی که قطر ذرات و طول شکست به طول موج‌های ناپایدار و همچنین نرخ رشد ماکزیمم وابسته است، افزایش نسبت دانسیته گاز به مایع منجر به کوچک‌تر شدن قطر ذرات و کوتاه‌شدن طول شکست می‌شود[۲۰].




**شکل ۶** طول شکست در فاصله ۷mm با سرعت گازوییل در خروجی نازل ۳/۴۶۴ m/s و سرعت هوا ۱۵/۴۱۶ m/s




**شکل ۷** طول شکست در فاصله۲۹ mm با سرعت آب در خروجی نازل ۳/۴۶۴ m/s و سرعت هوا ۱۵/۴۱۶ m/s

### ۳-۳- بررسی تاثیر قطر خروجی نازل روی طول شکست

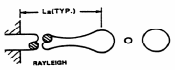
در این مقایسه، تنها پارامتر متغیر قطر نازل است و سایر پارامترها ثابت درنظر گرفته شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، در نازل با قطر خروجی ۰/۴۷۵ میلی‌متر، عدد وبر بزرگ‌تر از ۰/۴ است و طبق جدول ۵ شکست از نوع اول است که این نوع شکست در شکل ۸ نشان داده شده است. ولی همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰، که به ترتیب قطر ۰/۲۳۷۵ میلی‌متر و ۰/۱۱۸۷۵ میلی‌متر را دارند، مشاهده می‌شود عدد وبر کوچک‌تر از ۰/۴است و نوع شکست از نوع رایلی است. مشاهده می‌شود با اینکه هم اختلاف سرعت‌ها و هم نسبت سرعت‌ها یکسان است، ولی هم نوع شکست و هم طول شکست متفاوت است. در قطر ۰/۱۱۸۷۵ میلی‌متر جریان سیال داخل نازل بلافاصله بعد از خروج (با فاصله حدود ۱ میلی‌متر) به‌صورت اسپری درمی‌آید. ولی در قطر ۰/۲۳۷۵ میلی‌متر، که شکست نوع رایلی مشاهده می‌شود، شکست در فاصله حدود ۲۹ میلی‌متر

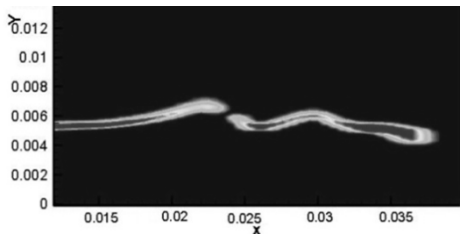
اتفاق می‌افتد و در قطر ۰/۴۷۵ میلی‌متر، بعد از اینکه سیال تا فاصله حدود ۳۳ میلی‌متر پیشروی می‌کند، در فاصله ۲۳ میلی‌متر شکست اتفاق می‌افتد که شکست از نوع اول است.

**جدول ۴** عدد وبر متناسب با قطر خروجی نازل

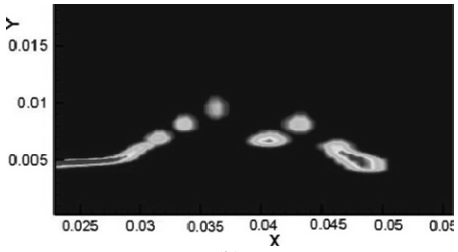
| عدد بدون بعد وبر | قطر (mm) |
|---|---|
| ۰/۵۶۳۴۶۲ | ۰/۴۷۵ |
| ۰/۲۸۱۷۳۱ | ۰/۲۳۷۵ |
| ۰/۱۴۰۸۶۶ | ۰/۱۱۸۷۵ |

**جدول ۵** طبقه‌بندی رژیم‌های گسست بر اساس عدد وبر[۲۱]

| رژیم | شکل | معیار |
|---|---|---|
| رژیم گسست رایلی |  | $We_a < 0.4$ |
| گسست القایی اول | | $0.4 < We_a < 13$ |

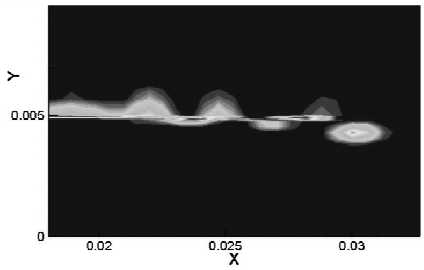


(a)

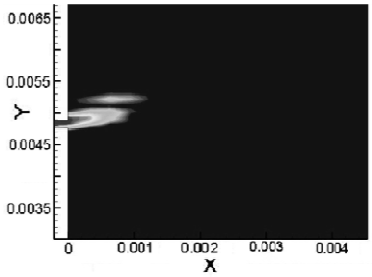


(b)

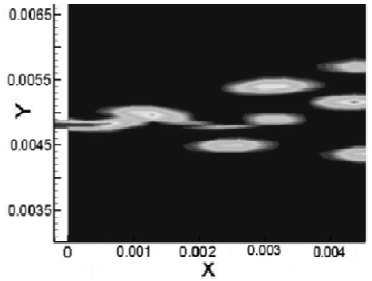
**شکل ۸** طول شکست در فاصله ۲۳mm با سرعت آب در خروجی نازل ۳/۴۶۴m/s و سرعت هوا ۱۵/۴۱۶ m/s در قطر ۰/۴۷۵mm(a) در لحظه شکست (b) بعد از شکست



**شکل ۹** طول شکست در فاصله ۲۹ mm با سرعت آب در خروجی نازل ۳/۴۶۴m/s و سرعت هوا ۱۵/۴۱۶m/s در قطر ۰/۲۳۷۵



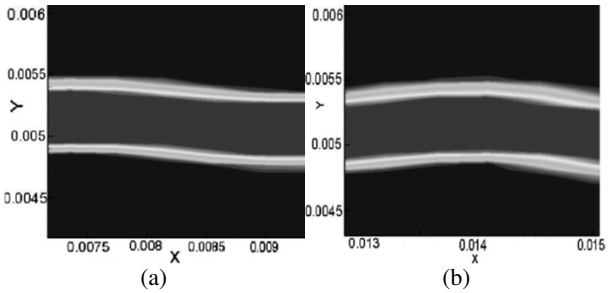
(a)



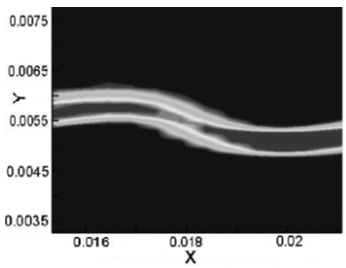
(b)

**شکل ۱۰** طول شکست در فاصله ۱mm با سرعت آب در خروجی نازل ۳/۴۶۴ m/s و سرعت هوا ۱۵/۴۱۶ m/s در قطر ۰/۱۱۸۷۵mm (a) در لحظه شکست (b) بعد از شکست

همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود، ناپایداری‌ها به وضوح قابل مشاهده است و هنگامی که دامنه این موج‌ها به بیشترین مقدار خود می‌رسد سیال از هم گسسته می‌شود و به صورت اسپری درمی‌آید. با گذشت زمان این نقاط شکست به فاصله‌های قبل از خود منتقل شده و در فاصله کمتری شکست اتفاق می‌افتد.

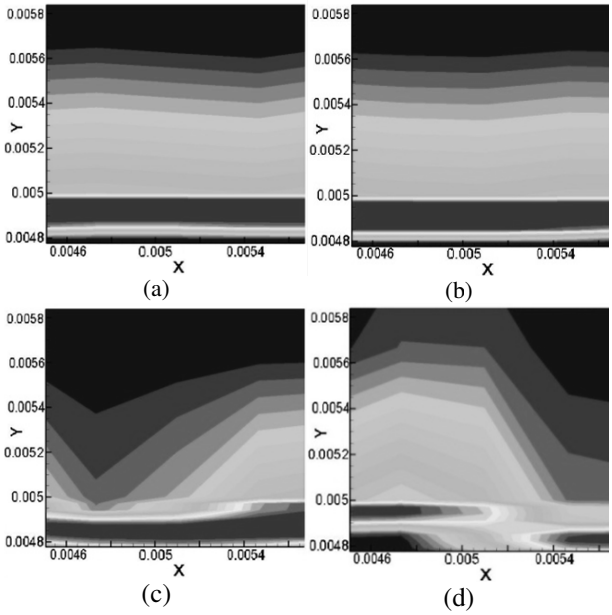


(a) (b)



(c)

**شکل ۱۱** موج‌های ایجادشده ناشی از ناپایداری




**شکل ۱۲** موج های ایجادشده ناشی از ناپایداری بعد از شکست اولیه در فاصله کمتر

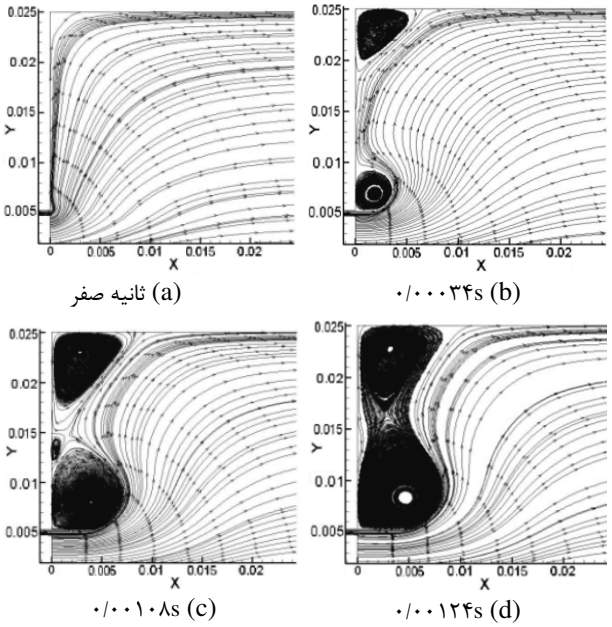
### ۳-۴- خطوط جریان

شکل ۱۳ خطوط جریان را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به اینکه هوای بالای محفظه در ابتدا ساکن درنظر گرفته شده است، در ابتدا خطوط جریان به سمت بیرون است؛ ولی هنگامی که دوسیال با سرعت وارد محفظه می‌شوند، این مسئله باعث تشکیل گردابه‌ها در فضای بالا محفظه می‌شود. با گذشت زمان و ورود جریان بیشتر هر دو سیال در داخل محفظه بر تعداد گردابه‌ها افزوده شده و این گردابه‌ها به هم می‌پیوندند و تشکیل گردابه‌های بزرگ‌تری را می‌دهند.

## ۴- جمع‌بندی

در این مقاله، تاثیر پارامترهای مختلف روی طول شکست اولیه جت سیال بررسی شده و مشاهده می‌شود:

- با افزایش اختلاف سرعت بین دو فاز، به دلیل افزایش ناپایداری‌های هیدرودینامیکی، طول شکست کاهش می‌یابد.
- با افزایش قطر خروجی، طول شکست افزایش و با کاهش آن طول شکست کاهش می‌یابد.
- با افزایش قطر خروجی در یک رژیم جریان طول شکست افزایش می‌یابد، ولی با افزایش قطر ممکن است، به علت تغییر عدد بدون بعد وبر، رژیم جریان تغییر کند.
- با افزایش دانسیته طول شکست افزایش می‌یابد.




**شکل ۱۳** نمایش خطوط جریان با گذشت زمان با سرعت آب در خروجی نازل ۳/۴۶۴ m/s و سرعت هوا ۱۵/۴۱۶ m/s

## ۵- مراجع


[1] Liu H., *Science and Engineering of Droplet, Fundamental and applications*, Noyes Publications, 2000.

[2] Squire H., "Investigation of the Instability of a Moving Liquid Film", *British Journal of Applied Physics*, Vol. 4, 1953, pp. 167-169.

[3] Ibrahim A. A., Jog M. A., "Effect of Liquid and Air Swirl Strength and Relative Rotational Direction on the Instability of an Annular liquid Sheet", *Acta Mechanical*, Vol. 186, 2006, pp. 113-133.

[4] Sirignano W. A., Mehring C., "Review of Theory of Distortion and Disintegration of Liquid Streams", *Energy Combustion Sic*., Vol. 26, 2000, pp. 609-655.

[5] Lasheras J. C., Hopfinger E. J., "Liquid Jet Instability and Atomization in a Coaxial Gas Stream", *Annul Rev. Fluid Mech.*, Vol. 3, 2000, pp. 275-308.

[6] Yoon S. S., Heister S. D., "Categorizing Linear Theories for Atomizing jets", *Atomization Sprays*, Vol. 13, 2003, pp. 499-516.

[7] Lin S. P., *Breakup of Liquid Sheets and Jets*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2003.

[8] Carvalho I. S., Heitor, M. V., "Liquid Film Break-up in a Model of a Prefilming Airblast Nozzle", *EXP. Fluids*, Vol. 24, 1998, pp. 408-415.

[9] Liao Y., Jeng S. M., Jog M. A., Benjamin M. A., "A Comprehensive Model to Predict Simplex Atomizer Performance", *J. Engng. Gas Turbines Power*, Vol. 121, 1999, pp. 285-294.
[10] Liao Y., Jeng S. M., Jog M. A., Benjamin M. A., "Effect of Air Swirl Profile on the Instability of a Viscous Liquid Jet", *J. Fluid Mech*., Vol. 424, 2000, pp. 1-20.
[11] Du Q., Li X., "Effect of Gas Stream Swirls on the Instability of Viscous Annular Liquid Jets", *Acta Mech*, Vol. 176, 2005, pp. 61-81.
[12] Jeandel X., Dumouchel C., "Influence of the Viscosity on the Linear Stability of an Annular Liquid Sheet", *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 20, 1999, pp. 499-506.
[13] Cao J., "Theoretical and Experimental Study of Atomization from an Annular Liquid Sheet", *J. Automobile Engng*, Vol. 217, 2003, pp. 735-734.
[14] Panchagnula M. V., Sojka P. E., Santangelo P. J., "On the Three-Dimensional Instability of a Swirling, Annular, in viscid Liquid Sheet Subject to Unequal Gas Velocities", *Phys. Fluids*, Vol. 8, 1996, pp. 3300-3312,.
[15] Alleborn N., Raszillier H., Durst F., "Linear Stability of Non-Newtonian Annular Liquid Sheets", *Acta Mech*., Vol. 137, 1998, pp. 33-42.
[16] Adzic M., Carvalho I. S., Heitor M. V., "Visualization of the Disintegration on an Annular Liquid Sheet in a Coaxial Airblast Injector at Low Atomizing Air Velocities", *Optical Diagnostics IN Engineering*, Vol. 5, 2001, pp. 27-38.
[17] Chin J. S., Rizk N. K., "Effect of Inner and Outer Air Flow Characteristics on High Liquid Pressure Prefilming Airblast Atomization", *J. Prop. Power*, Vol. 16, 2000, pp. 297-301.
[18] Fluent 6.3 User's Guide, 2006
[19] Shen J., *Formation and Characteristics of Sprays from Annular Viscous Liquid Jet Breakup*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Victoria, 1997,
[20] Liao Y., Jeng S. M., Joj M. A., Benjamin M. A., "The Effect of Air Swirl Profile on the Instability of a Viscous Liquid Jet", *J. Fluid Mech*., Vol. 424, 2000, pp. 1-20.
[21] Ibrahim A., *Comprehensive Study of Internal Flow Field and Linear and Nonlinear Instability of an Annular Liquid Sheet Emanating from an Atomizer*, PhD Thesis, Department of Mechanical, Industrial and Nuclear Engineering of the College of Engineering, University of Cincinnati, 2006.