

## بررسی تجربی اتمیزاسیون جت آب در جریان‌های هوا

حجت قاسمی<sup>۱</sup> و سید داود موسویان<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۵/۲۰)

### چکیده

اتمیزاسیون فرآیندی است که از طریق آن حجم مایع به اسپری تبدیل می‌شود. این فرآیند شامل شکست جت مایع یا صفحه مایع است که از انژکتور خارج می‌شود. در این مقاله به صورت تجربی مدل‌ها و مکانیزم‌های شکست جت و صفحه مایع شکل گرفته به وسیله برخورد جت در سرعت‌های مختلف در محیط ساکن و در جریان‌های موافق، عرضی و مخالف هوا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین، اثر زاویه برخورد، قطر انژکتور و طول قبل برخورد جت‌ها در شکل‌گیری صفحه مایع مطالعه شده است. برای بررسی الگوهای مختلف تشکیل شده در این اندرکنش، از عکس‌برداری استفاده شده است. برای تولید جت، انژکتورهایی با قطرهای ۰/۹ و ۰/۴ میلی‌متر با محدوده سرعت ۱ تا ۳۳ متر بر ثانیه، منطبق بر محدوده عدد رینولدز ۳,۰۰۰ تا ۳۰,۰۰۰ به کار گرفته شده‌اند. در این مطالعه، جت‌های آب با مدل شکست رایلی در سرعت‌های پایین و شکست ناشی از باد اولیه در سرعت‌های بالای جت دچار شکست شدند. طول شکست اندازه گرفته شده هم‌خوانی بسیار خوبی با رابطه سلام دارد. در بررسی شکست جت در جریان عرضی، شش مدل شکست شبه‌رایلی، آشفته، ستونی، متورم، چندحالتی، و برشی مشاهده می‌شود. در این مقاله، همچنین رابطه‌ای برای عمق نفوذ جت آب در جریان هوای مخالف ارائه شده است. با مقایسه کیفی عکس‌های گرفته شده از برخورد جت‌ها، محدوده سرعت و عدد رینولدز مدل‌های حاشیه بسته، قطره متناوب، حاشیه باز و کاملاً توسعه یافته تعیین شد. همچنین، مشاهده شد که با افزایش طول قبل برخورد جت‌ها ناپایداری‌ها روی صفحه افزایش می‌یابند.

**واژه‌های کلیدی:** اتمیزاسیون جت، جریان هم‌جهت جت و هوا، جریان مخالف جت و هوا، جریان متقاطع جت و هوا، شکست تجربی جت،

مدل‌های اتمیزاسیون جت‌های برخوردی

## Experimental Investigation of Atomization of Water Jets in Air Streams

H. Ghassemi and S.D. Moosavian

Mechanical Engineering Department

Iran University of Science and Technology

(Received:13/April/2015; Accepted:11/August/2015)

### ABSTRACT

Atomization is a process by which a volume of liquid is converted spray. This process includes the breakup of the liquid jet or the liquid sheet exiting the injector. This paper has experimentally investigated the models and mechanisms for the breakup of the liquid jet and the liquid sheet formed by the jets impingement in a still environment and in an environment with counter flow, coflow, and cross flow. Also, the effects of the impingement angle, injector diameter, and jet length before impingement on the formation of the liquid sheet have been explored. Imaging has been employed to investigate different patterns formed by these interactions. To produce water jets, injectors with 0.4 and 0.9 mm diameters at a velocity range of 1-33 m/s and in accordance with Reynolds numbers between 3,000 and 30,000 have been used. It was found that in the low flow speed range, the water jet breaks up by the Riley's breakup model. While in high speed range, the breakup model is the firstwind - induced breakup model. The measured breakup length has a very good agreement with the result of Sallam's equation. In investigating the breakup of liquid jets in cross flow, six breakup models were observed, including Rayleigh-like, turbulent, column, bag, multimode and shear breakup models. Also, in paper, an equation has been presented for the penetration of water jet into an air counter flow. Through a qualitative comparison of the images taken from the impingement of two water jets, velocity and Reynolds number ranges of the closed rim, alternating drops, open rim, and fully-developed models were determined. It was observed that, by increasing pre-impingement length of a jet, the instabilities on the liquid sheet increase.

**Keywords:** Jet Atomization, Jet-Air Coflow, Jet-Counter Flow, Jet-Cross Flow, Experimental Jet Breakup, Atomization of Jets Impingement

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): h\_ghassemi@iust.ac.ir

۲- کارشناس ارشد: davood.moosavian@gmail.com

## فهرست علائم و اختصارات

$C_d$	ضریب تخلیه
$L_c$	طول شکست، m
Re	عدد رینولدز
We	عدد وبر
$X_p$	عمق نفوذ، m

## علائم یونانی

$\theta$	زاویه برخورد
$\alpha$	نسبت سرعت جت به جریان هوا

## ۱- مقدمه

فرآیند اتمیزاسیون سوخت در محفظه احتراق یکی از عواملی است که روی عملکرد موتور راکت‌های سوخت مایع تا حد زیادی تأثیر می‌گذارد. زمان تبخیر یک قطر متناسب با مساحت سطح یعنی مربع قطر آن است. بنابراین قطرات کوچک‌تر، خیلی سریع‌تر تبخیر و مخلوط می‌شوند. در نتیجه طول محفظه احتراق که برای احتراق کامل لازم است کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، ناپایداری‌های احتراق در راکت موتورهای سوخت مایع وابسته به قطر قطرات پاشیده شده است. قطرات با توزیع اندازه خیلی ریز، شیب پروفیل احتراق را تندتر و آن را به سمت ناپایداری‌هایی با فرکانس بالا متمایل می‌کنند [۱].

اتمیزاسیون فرآیندای است که از طریق آن حجم مایع به اسپری متشکل از قطرات ریز تبدیل می‌شود. این فرآیند شامل شکست جت مایع یا صفحه مایع است که از انژکتور خارج می‌شود. عوامل مهمی که بر این فرآیند تأثیر می‌گذارند خصوصیات فیزیکی جریان مایع، ابعاد هندسی اتمایزر، پارامترهای عملکردی، و شرایط محیط است.

اتمیزاسیون جت مایع از دو مرحله اتمیزاسیون اولیه و به دنبال آن اتمیزاسیون ثانویه تشکیل شده است. در اتمیزاسیون اولیه، فروپاشی اولیه جت مایع به ساختارهای بزرگ و کوچک با اشکال پیچیده در نزدیکی محل خروج (انژکتور) روی می‌دهد. اتمیزاسیون ثانویه شامل فروپاشی ساختارهای بزرگ به قطرات کوچک است که اسپری را تشکیل می‌دهد.

در سال ۱۹۹۴، مایر<sup>۱</sup> تحقیقات خود را روی اتمیزاسیون جت مایع انجام داد. در ابتدا وی جت‌های مایعی که در محیط ساکن تخلیه می‌شدند را بررسی کرد و بعد از آن اتمیزاسیون جت‌ها را در محیطی با جریان هم‌جهت با جریان جت مورد مطالعه و

آزمایش قرار داد [۲]. با عکس‌برداری از جت‌های آب در محیط ساکن، در سرعت‌های مختلف، تغییر شکل‌ها و امواج مورد مطالعه قرار گرفت. در سال ۱۹۹۵ فیث<sup>۲</sup> و همکارانش ساختار و خصوصیات فروپاشی اسپری‌ها را مورد مطالعه قرار دادند و فرآیند فروپاشی جت را به دو مرحله فروپاشی اولیه و فروپاشی ثانویه تقسیم کردند. فروپاشی اولیه شامل جدا شدن لیگامنت‌ها و قطرات بزرگ از هسته مایع و فروپاشی ثانویه شامل شکسته شدن ذرات بزرگ به قطرات ریز است [۳]. در طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶، سلام<sup>۳</sup> و همکارانش فروپاشی سطح جت مایع آشفته و غیرآشفته را در محیط ساکن و جریان عرضی مطالعه کردند [۴-۷]. ایشان براساس عدد رینولدز و عدد وبر، سه مدل شبه‌رایلی، مدل فروپاشی آشفته و مدل فروپاشی کیسه‌ای/پرشی را پیشنهاد کردند. تلاش‌های بسیاری هم برای مدل کردن شکست جت در محیط ساکن انجام گرفت که از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعات پان<sup>۴</sup> در سال ۲۰۰۶ اشاره کرد [۸]. در سال ۲۰۰۵ رام‌پراکاش<sup>۵</sup> فروپاشی جت مدور را در جریان عرضی بررسی کرد [۹]. در سال ۱۹۹۷ چان ولام<sup>۶</sup> نفوذ و پراکندگی یک جت مایع را در محیطی با جریان مخالف به روش اندازه‌گیری LIF بررسی کردند. تصاویر LIF امکان تعیین میدان کمیت‌های لحظه‌ای جریان را فراهم می‌کند [۱۰].

در مبحث اتمیزاسیون جت، یکی از روش‌های اتمیزاسیون، تلاقی و برخورد جت‌ها است. در این نوع از اتمیزاسیون، دو جت در یک نقطه با هم برخورد می‌کنند و یک ورقه مایع، عمود بر صفحه جت‌ها تشکیل و سپس به قطرات ریز تجزیه می‌گردند. هنگامی که دو جت یکسان در یک نقطه با هم برخورد می‌کنند؛ صفحه مایع عمود بر صفحه جت‌ها تشکیل می‌شود. ورق مایع درحالی که به صورت شعاعی گسترش می‌یابد نازک‌تر می‌شود تا در یک ضخامت خاص به لیگامنت‌ها تجزیه می‌شود و بعد از آن به قطرات تبدیل می‌گردد. اما هنگامی که دو جت دارای ممنتوم یکسانی نباشند، ورق به وجود آمده با صفحه قائم دارای زاویه  $\gamma$  می‌گردد [۱۱].

دامبروسکی<sup>۷</sup> در سال ۱۹۳۶ برخورد دو جت مایع آرام و آشفته را مورد بررسی قرار داد و دریافت صفحه مایع از طریق

2 - Faeth

3- Sallam

4- Pan

5 -Sankarakrishnan

6- Lam

7- Dombrowski

1 - Mayer

قطرات برای انژکتور راکت‌ها بود تا با استفاده از آن، معادلات نرخ تبخیر را حل و نرخ تبخیر سوخت در محفظه احتراق را محاسبه کند [۲۰]. یاتسویاناکی<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۴ برخورد دو جت مشابه را در جریان هوای هم‌جهت مورد بررسی قرار داد. ایشان تغییرات شکل صفحه و اندازه ذرات را با تغییر سرعت گاز و نرخ پاشش جت آب مورد مطالعه قرار دادند [۲۱]. این مقاله به رفتار جت‌های مایع در فرآیند تجزیه و تولید قطره می‌پردازد. ورود جت مایع به درون جریان گاز همراه با شکست آن به قطرات است. علاوه بر این، تولید قطرات از طریق برخورد جت‌های مایع نیز مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. این بررسی با استفاده از جت‌های باریک آب در جریان هوا انجام شده و رژیم‌های مختلف شکست جت‌ها و شکل‌گیری قطرات ناشی از برخورد آن‌ها تبیین شده‌اند.

## ۲- تجهیزات و روش آزمایش‌ها

طرح‌واره‌ای از دستگاه آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. این دستگاه شامل یک کپسول نیتروژن پرفشار (۱) برای فشارگذاری روی مخزن آب (۲) است. برای تنظیم فشار در مخزن آب از یک ریگولاتور (۳) استفاده شده است. فشار مخزن آب از فشارسنج (۴) قابل قرائت می‌باشد. با باز کردن شیرهای دستی (۵)، آب در لوله‌های رابط جریان پیدا کرده و به انژکتورها (۶) می‌رسد. انژکتورها توسط یک سازه نگهدارنده با دو فک و سه درجه آزادی (که در شکل نشان داده نشده) نگهداری می‌شود تا بتوان موقعیت آنها را به دلخواه تغییر داد و جت‌ها را به صورت دلخواه به هم برخورد داد. برای تهیه جریان گاز از یک دمنده سانتریفیوژ (۷) با توان هوادهی ۲۰,۰۰۰ مترمکعب بر ساعت استفاده شده است. جریان خروجی از دمنده یک جریان غیریکنواخت است. به منظور افزایش سرعت هوا و یک‌نواخت‌سازی جریان، یک کانال همگرا با نسبت انقباض یک به دو ساخته و به دمنده متصل شده است. جت خروجی از انژکتورها، درست در مقطع خروجی این کانال تخلیه می‌شود. سرعت گاز توسط یک دریچه تخت که در قسمت ورودی دمنده نصب شده، قابل تغییر می‌باشد. سرعت جریان هوا نیز توسط یک سرعت‌سنج توربینی اندازه‌گیری می‌شود.

امواج آیرودینامیکی و امواج ضربه‌ای شکسته می‌شود [۱۲]. اندرسون<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۴ به این نتیجه رسید که شرایط جریان قبل از برخورد مثل این که جریان آرام یا آشفته باشد، اثرات مهمی روی اتمیزاسیون دارند [۳۱]. لی<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ مدل‌های مختلف صفحه، که در سرعت‌های مختلف به وجود می‌آید را مطالعه و ارتباط آن‌ها را با عدد رینولدز بیان کرد. وی همچنین، ناپایداری‌های لبه صفحه و سرعت صفحه مایع را هم مورد بررسی قرار داد [۱۴ و ۱۵]. برموند<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۶ شکل صفحه، اندازه حاشیه‌های صفحه و میدان سرعت آن را تحلیل کرد [۱۶]. چو<sup>۴</sup> در سال ۲۰۰۷ اثر پروفیل سرعت جت را روی سرعت و ضخامت صفحه مایع مطالعه کرد و به این نتیجه رسید که برخلاف فرض‌های پیشین، سرعت صفحه مایع با تغییر زاویه سمتی  $\theta$  و زاویه برخورد  $\theta$  تغییر می‌کند [۱۷].

هیدمن واپاشی<sup>۵</sup> صفحه مایع را براساس مشاهدات تجربی به چهار مدل طبقه‌بندی کرد. مدل حاشیه بسته، یک ورق هموار مایع عمود بر صفحه گذرنده از دو جت ایجاد می‌کند و قطرات در انتهای مقابل نقطه برخورد شکل می‌گیرند. در مدل قطره متناوب یک ورق مایع با الگوی موجی شکل به وجود می‌آید که قطرات به صورت مماس از حاشیه آن جدا می‌شوند. در مدل حاشیه باز، حاشیه‌ها برخورد نمی‌کنند و ضخامت ورق مایع با فاصله گرفتن از نقطه برخورد کاهش می‌یابد. همه الگوهایی که قطرات، توسط امواج از نقطه برخورد پراکنده می‌گردد به‌عنوان مدل کاملاً توسعه یافته تعریف می‌شوند [۱۸].

پلیککوس<sup>۶</sup> در سال ۱۹۹۶ بیان کرد که در زوایای برخورد کم، اندازه قطرات نسبت به زوایای برخورد بزرگ‌تر، به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیش‌تر است. این موضوع به این خاطر است که اندازه لیگامنت‌های مایع که به قطرات شکسته می‌شود، در این شرایط بزرگ‌تر است [۱۹].

در مقایسه با محیط ساکن، کارهای کم‌تری روی فروپاشی صفحه مایع حاصل از جت‌های برخوردی در جریان هوا انجام گرفته است. از جمله کسانی که شکست جت‌های برخوردی در جریان هم‌جهت را بررسی کرد، اینگبو<sup>۷</sup> در سال ۱۹۵۸ بود. هدف وی از این مطالعات، به‌دست آوردن اطلاعات توزیع اندازه

1 - Anderson

2 - Li

3 - Bremond

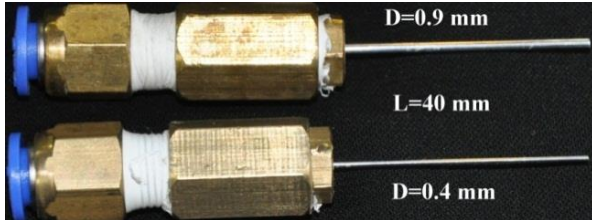
4 - Choo

5 - Heidman

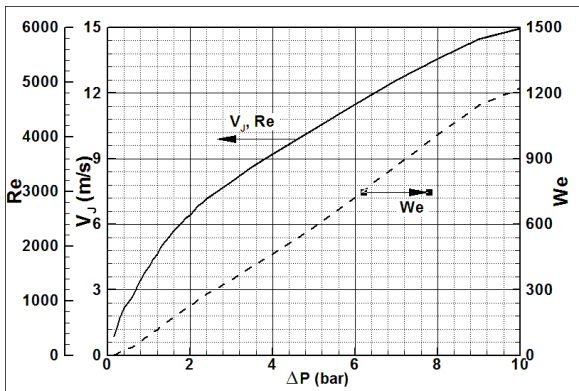
6 - Poulidakos

7 - Ingebo

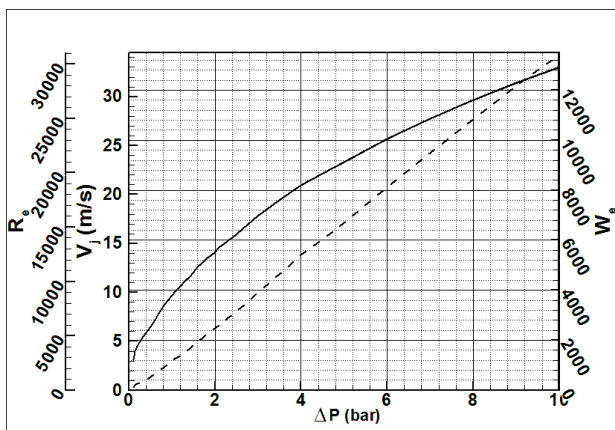
که در این روابط،  $Re$  عدد رینولدز،  $We$  عدد وبر،  $\rho$  چگالی آب،  $\mu$  ویسکوزیته آب،  $\sigma$  کشش سطحی آب،  $D$  قطر انژکتور و  $u$  سرعت خروجی انژکتور است. سرعت خروجی آب، عدد رینولدز و عدد وبر این انژکتورها در فشارهای مختلف در نمودارهای ۳ و ۴ مشاهده می‌شود.



شکل (۲): نمونه‌ای از انژکتورهای ساخته شده.

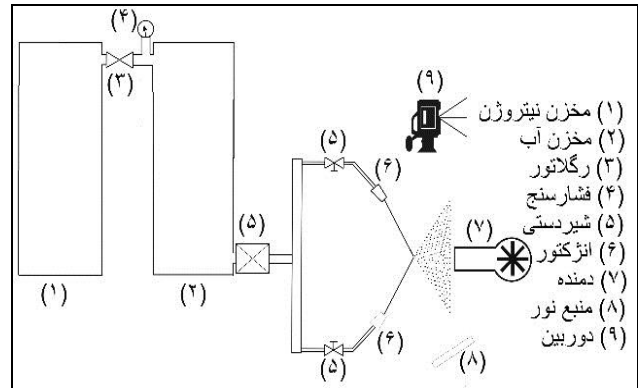


شکل (۳): نمودار سرعت، رینولدز، و وبر جت ۰/۴ mm در فشارهای مختلف.



شکل (۴): نمودار سرعت، عدد رینولدز، و عدد وبر جت برای انژکتورها ۰/۹ mm در فشارهای مختلف.

یک منبع نور (۸)، به همراه یک دوربین عکس برداری با زمان نورگیری  $\frac{1}{4000}$  ثانیه (۹) برای ثبت اتفاق استفاده شده است.



شکل (۱): طرحواره آزمایش.

در این آزمایش‌ها از انژکتورهای سوزنی فلزی، با قطر داخلی ۰/۹ و ۰/۴ میلی‌متر، که نمونه‌ای از آن‌ها در شکل ۲ نشان داده شده؛ استفاده شده است. طول لوله انژکتور ۴۰ میلی‌متر انتخاب شده تا جت حاصله، به دلیل نسبت بالای طول به قطر، یک جت کاملاً توسعه یافته باشد. برای دستیابی به جت‌هایی با سرعت دلخواه، عملکرد انژکتورها بررسی شده است. دبی جریان گذرنده از آن‌ها در فشارهای مختلف مخزن آب اندازه‌گیری شده و به این ترتیب سرعت جت برحسب فشار مخزن آب تعیین شده است. ضریب تخلیه یک انژکتور ساده را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$C_d = \frac{V_a}{\sqrt{2(P_1 - P_2)/\rho}} \quad (1)$$

که در آن،  $P_1 - P_2$  اختلاف فشار قبل و بعد از انژکتور،  $\rho$  چگالی آب و  $C_d$  ضریب تخلیه انژکتور می‌باشد. ضریب تخلیه برای انژکتور با قطر ۰/۴ mm تقریباً ۰/۳۵ و برای انژکتور با قطر ۰/۹ mm تقریباً ۰/۷۵ است. این ضرایب در محدوده مورد استفاده ثابت می‌باشند.

در شکست جت‌ها، اعداد بدون بعد وبر و رینولدز نقش بسزایی دارند. لذا در هر مرحله از آزمایش اعداد رینولدز و وبر طبق روابط زیر محاسبه شده‌اند:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (2)$$

$$We = \frac{\rho u^2 D}{\sigma} \quad (3)$$

#### ۴- نتایج و بحث

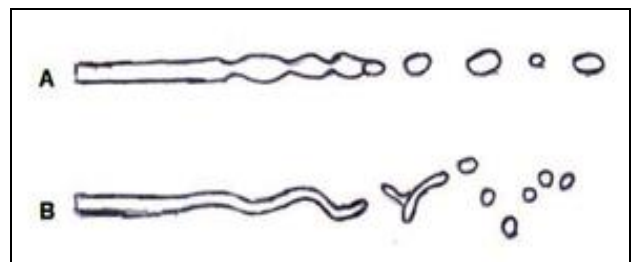
در این بخش اتمیزاسیون جت آب در محیط ساکن، جریان هم جهت، مخالف و عرضی هوا مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۴-۱- اتمیزاسیون جت

در این سری از آزمایش ها جت آب توسط انژکتوری با قطر ۰/۹mm تولید گردید.

#### ۴-۱-۱- اتمیزاسیون جت در محیط ساکن

برای بررسی مدل های شکست جت آب، سرعت جت از ۳ تا ۳۳ متر بر ثانیه و عدد رینولدز از ۳,۰۰۰ تا ۳۰,۰۰۰ تغییر داده شد. در این محدوده سرعت دو مدل شکست رایلی و مدل شکست ناشی از باد اولیه مشاهده گردید. در محدوده سرعت ۱۰-۳ m/s مدل شکست از نوع رایلی است. به خاطر شکل ظاهری جت گاهی به این مدل، شکست واریسی (متورم) هم گفته می شود. همان طور که در شکل ۵ مشخص است جتی که با مدل رایلی دچار شکست می گردد، امواج متقارن محوری ظاهر می شود. امواج متقارن محوری به خاطر برهم کنش آشفتگی های اولیه در مایع و نیروهای کشش سطحی شکل می گیرد. دامنه این امواج شروع به رشد می کند و در نهایت در نقطه شکم نازک شده و جت از آنجا می شکند. قطر قطرات تشکیل شده در این مدل تقریباً دو برابر قطر جت است. در این مدل نیروی آیرودینامیکی محیط قابل صرف نظر کردن نیست و ممکن است باعث تضعیف تشکیل امواج شود. با افزایش سرعت جت، قطر قطرات کاهش می یابد و تقریباً برابر قطر جت می شود.



شکل (۵): مدل های شکست برای یک جت مدور مایع (A) مدل رایلی (B) شکست ناشی از باد اولیه.

با افزایش سرعت جت اثرات نیروهای آیرودینامیکی افزایش می یابد و تاثیر نیروی کشش سطحی کم می شود. در محدوده سرعت ۳۰-۱۰ m/s مدل شکست از نوع باد اولیه است. وقتی سرعت جت به ۱۰ m/s می رسد امواج متقارن محوری به امواج

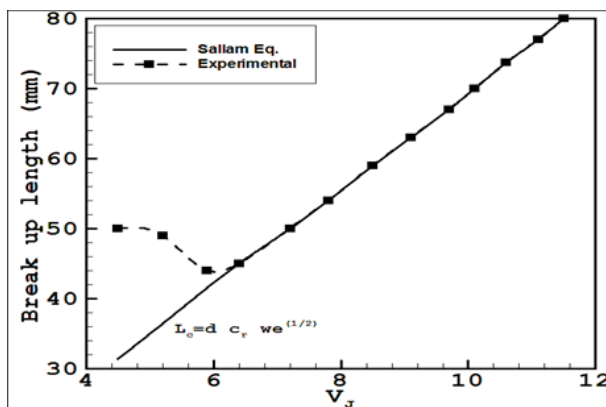
سینوسی تبدیل می شوند. دامنه امواج سینوسی به وسیله مقاومت هوا افزایش می یابد و کشش سطحی جلوی رشد امواج را می گیرد. این امواج در نقطه عطف نازک شده و جت از آنجا می شکند و سپس به قطرات کروی تبدیل می گردد.

با افزایش سرعت، طول موج ها شروع به افزایش می کنند؛ ولی طول شکست تا سرعت ۷ m/s کاهش می یابد و بعد از این سرعت شروع به افزایش می کند. کاهش طول شکست با افزایش سرعت جت تا ۷ m/s، به خاطر تاثیر نیروی جاذبه زمین است. نیروی جاذبه باعث خم شدن جت در سرعت های پایین و شکست زودتر جت می گردد. سلام برای محاسبه طول شکست جت که با مدل رایلی متلاشی می شود رابطه زیر ارائه داد [۴]:

$$\frac{L_c}{d} = C_r We^{\frac{1}{2}} \quad (۴)$$

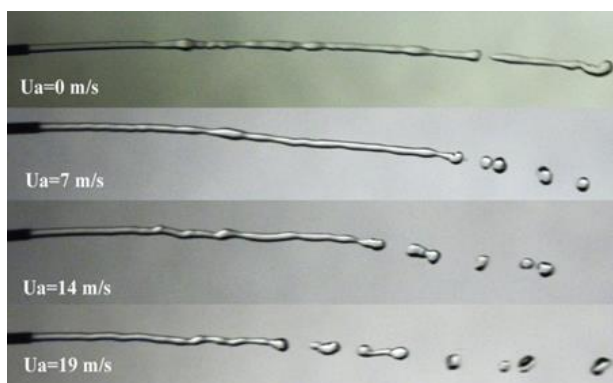
که در این رابطه،  $We$  عدد وبر،  $L_c$  طول شکست و  $d$  قطر جت است.  $C_r$  پارامتر تجربی است و با استفاده از نتایج آزمایش به دست می آید.

در شکل ۶ طول شکست جت آب بر حسب سرعت جت رسم شده است. طول شکست اندازه گرفته شده برای جتی با قطر ۰/۹ mm هم خوانی خوبی با رابطه سلام دارد. برای انژکتور مورد استفاده در آزمایش با قطر ۰/۹ mm ضریب تجربی  $C_r$  برابر ۲/۲ در نظر گرفته شد. عدم هم خوانی نتایج در سرعت های کم به دلیل آرام و بدون موج بودن جت در سرعت کم و تاثیر نیروی جاذبه زمین روی جت است. شکل ۷ تغییر رفتار جت آزاد را نشان می دهد. در شکل ۷ خم شدن جت آب با سرعت کم ( $U_j = 5 \text{ m/s}$ ) در اثر نیروی جاذبه زمین را می توان مشاهده کرد. همچنین، در این شکل مشاهده می شود که با افزایش سرعت جت آب، قطر قطرات شکل گرفته کاهش می یابد.

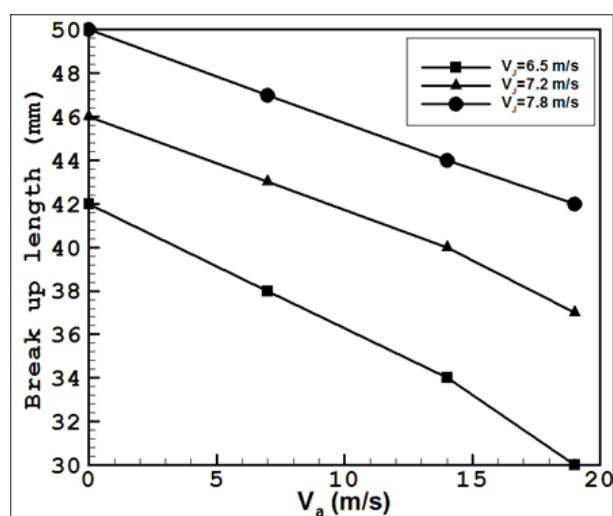


شکل (۶): طول شکست جت آب بر حسب سرعت جت.

سرعت جریان هوا به وضوح قابل مشاهده است. همچنین این شکل نحوه تشکیل قطرات و تقسیم شدن قطرات بزرگ تر به قطرات ریز را به خوبی نشان می دهد. قطرات به محض جدا شدن از جت شکل نامنظمی دارند. این اشکال نامنظم به قطرات ریزتری متلاشی می گردند. فشار یک نواخت هوای اطراف قطره، آن را به شکل کروی در می آورد. در شکل ۱۰ طول شکست جت آب با سرعت های مختلف بر حسب سرعت جریان هم جهت هوا رسم شده است. اعداد به دست آمده برای طول شکست به صورت دستی و از روی عکس های گرفته شده به دست آمده است. همان گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می گردد؛ با افزایش سرعت جریان هم جهت هوا و کاهش سرعت جت، طول شکست جت کاهش می یابد.



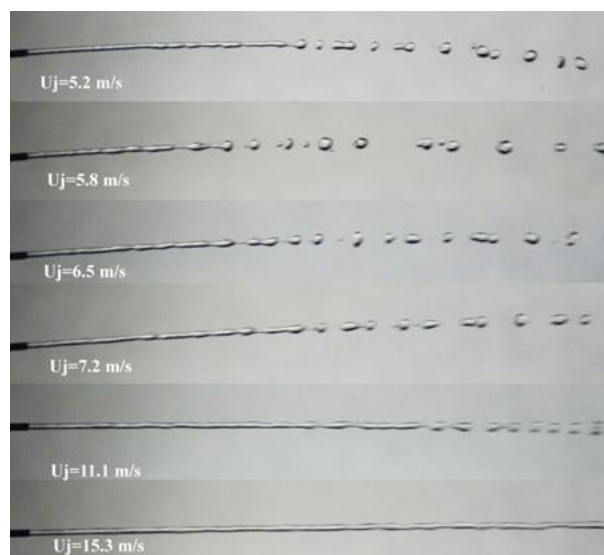
شکل (۹): نقش افزایش سرعت هوا روی جتی با سرعت  $4.5 \text{ m/s}$  و عدد وبر  $250$  در جریان هم جهت هوا.



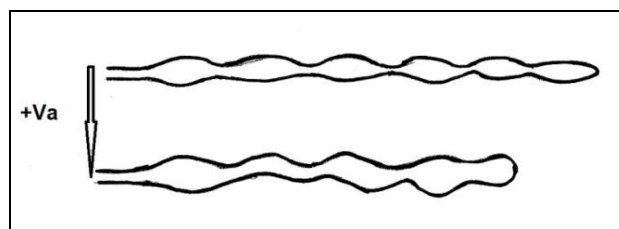
شکل (۱۰): طول شکست جت آب بر حسب سرعت جریان هم جهت هوا.

## ۲-۱-۴- اتمیزاسیون جت در جریان هم جهت هوا

شکل ۸ شماتیکی از جت آب در جریان هم جهت هوا را نشان می دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود افزایش سرعت هوا در جهت جریان جت، باعث کاهش طول شکست جت و افزایش دامنه امواج می شود. روی سطح جت، امواج با طول موج های مختلفی دیده می شود. بسته به پارامترهای سیال و جریان، تنها یک محدوده از طول موج ها از امواج سطحی رشد می کند و باعث جدا شدن قطرات می شود. جریان هوای هم جهت باعث می شود امواج سطحی سریع تر رشد کنند و جت آب سریع تر متلاشی گردد. علت این پدیده را می توان به افزایش تنش برشی در فصل مشترک جت و هوا نسبت داد.



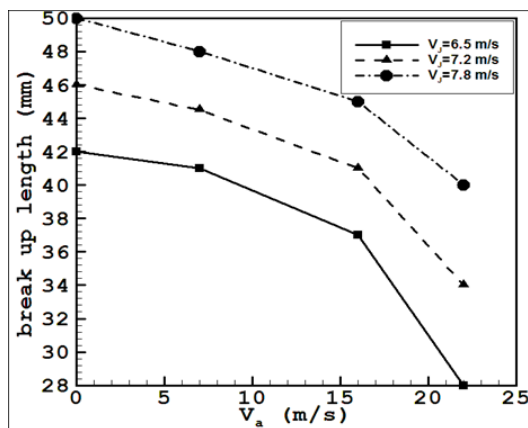
شکل (۷): تغییر مدل واپاشی جت آزاد از مدل رایلی به مدل باد اولیه در اثر افزایش سرعت.



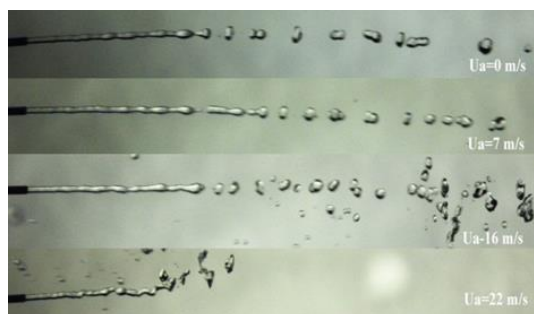
شکل (۸): شماتیکی از جت آب در جریان هم جهت هوا.

نمونه ای از جت آب با سرعت  $4.5 \text{ m/s}$  درون جریان هم جهت هوا با سرعت های مختلف را در شکل ۹ می توان دید. در این شکل کاهش طول شکست جت و افزایش دامنه امواج با افزایش

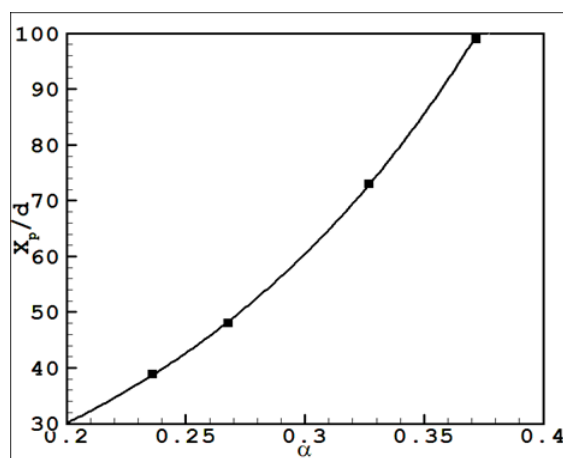
است. در شکل ۱۳ مشاهده می شود که جت به صورت افقی نفوذ می کند و سپس به سمت عقب برمی گردد. نمودار عمق نفوذ جت در جریان مخالف هوا برحسب نسبت سرعت جت به هوا در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل (۱۲): طول شکست جت آب برحسب سرعت جریان مخالف هوا.



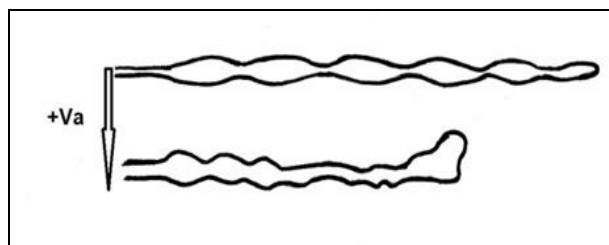
شکل (۱۳): نقش افزایش سرعت هوا روی جت با سرعت  $5/2$  m/s در جریان مخالف.



شکل (۱۴): عمق نفوذ جت در جریان مخالف هوا برحسب نسبت سرعت جت به هوا.

### ۳-۱-۴- اتمیزاسیون جت در جریان مخالف هوا

رفتار جت مایع در جریان مخالف هوا به طور ذاتی ناپایدار است و خط سیر جت به طور قابل ملاحظه ای منحرف می گردد. شماتیکی از امواج تشکیل شده روی سطح جت در جریان مخالف هوا در شکل ۱۱ ارائه شده است. همان طور که در این شکل ملاحظه می گردد، افزایش سرعت جریان مخالف هوا باعث افزایش ناپایداری ها و دامنه موج های روی سطح جت و کاهش طول موج ها و طول شکست می گردد. همچنین با افزایش سرعت جریان مخالف هوا، قطر قطرات تشکیل شده کاهش می یابد؛ زیرا سرعت نسبی جت و هوا افزایش می یابد. اثر متقابل هوا و سطح جت باعث به وجود آمدن ناپایداری ها روی سطح جت می گردد.



شکل (۱۱): شماتیکی از جت آب در جریان مخالف هوا.

در شکل ۱۲ طول شکست جت آب برحسب سرعت جریان مخالف هوا رسم شده است. اعداد به دست آمده برای طول شکست به صورت دستی و از روی عکس های گرفت شده به دست آمده است. همان طور که انتظار می رفت؛ جریان مخالف هوا باعث کاهش طول شکست جت می شود. بررسی و مقایسه شکل های ۱۰ و ۱۲ نشان می دهد که طول شکست جت آب در جریان هم جهت هوا کم تر از طول شکست جت آب در جریان مخالف با سرعت یکسان است. به عنوان مثال جت آب با سرعت  $6/5$  m/s درون جریان هم جهت هوا با سرعت  $7$  m/s در فاصله  $38$  mm از دهانه انژکتور دچار شکست می شود در صورتی که همین جت درون جریان مخالف هوا با سرعت  $7$  m/s در فاصله  $41$  mm از دهانه انژکتور دچار شکست می شود. نمونه ای از جت آب با سرعت  $5/2$  m/s درون جریان مخالف هوا با سرعت های مختلف را در شکل ۱۳ می توان دید. همان طور که در شکل ۱۳ ملاحظه می گردد، با افزایش سرعت جریان مخالف هوا از بالا به پایین، ناپایداری ها و دامنه موج های روی سطح جت افزایش و طول موج ها و طول شکست کاهش می یابد. علت این پدیده ها افزایش تنش برشی بین جت آب و جریان هوا

جت آب باعث خمش جت به سمت ناحیه با فشار کم (سمت راست) می‌شود. شتاب جریان هوا اطراف جت، مایع را در جهت عرضی می‌کشد و تا جایی که با نیروی کشش سطحی به تعادل برسد، سطح جت را پهن می‌کند. این پهن شدن سرانجام باعث می‌شود سطح مقطع جت، شکل لوبیایی بگیرد. هنگامی که جت پهن می‌شود افزایش پهنای جت باعث افزایش درگ و افزایش خمش جت در جریان عرضی می‌شود.

اگر سرعت جت ثابت باشد، با افزایش سرعت جریان عرضی، میزان انحراف جت افزایش و عمق نفوذ کاهش می‌یابد. همچنین افزایش سرعت جریان عرضی باعث فروپاشی بیش‌تر جت می‌شود. افزایش سرعت جت زمانی که سرعت جریان عرضی ثابت است باعث افزایش عمق و کاهش میزان انحراف جت می‌شود.

در بررسی جت در جریان عرضی هوا شش مدل شکست شبه‌رایلی، مدل شکست آشفته، مدل شکست ستونی، مدل شکست متورم، چند حالت و شکست برشی مشاهده گردید. شماتیکی از این مدل‌ها را در شکل ۱۶ می‌توان دید.

شکل (A) ۱۶ مدل شکست شبه رایلی را نشان می‌دهد. در این مدل، روی سطح جت، امواج متقارن محوری و امواج سینوسی تشکیل می‌گردند، که همین امواج باعث شکسته شدن جت مایع به قطرات ریز می‌شود. در این مدل هم مانند اتمیزاسیون جت در جریان هم‌جهت هوا، یک موج با طول موج ثابت روی سطح جت دیده نمی‌شود؛ زیرا عوامل گوناگونی مانند صیقلی نبودن خروجی انژکتور یا اثر متقابل جت با جریان هوا، امواج مختلفی روی سطح جت ایجاد می‌کنند. در مدل آشفته (شکل (B) ۱۶) جت مایع دچار نوسانات شدیدی می‌گردد که دامنه این نوسانات خیلی بیش‌تر از قطر جت است. این مدل در واقع حالت اولیه مدل شکست ستونی است. با افزایش دامنه نوسانات، این مدل به مدل ستونی (شکل (C) ۱۶) تبدیل می‌گردد. در مدل ستونی، روی سطح جت، گره‌هایی به وجود می‌آید که فاصله بین این گره‌ها معمولاً چند برابر قطر است. با افزایش سرعت جت، فاصله بین این گره‌ها کاهش می‌یابد. شتاب گرفتن زیاد ستون مایع متصل بین گره‌ها باعث می‌شود، خیلی بیش‌تر از گره‌ها در جهت جریان عرضی منحرف شوند و یک ساختار شبیه به حلقه را تولید کنند. بالاخره خمش پی‌درپی اتصالات بین دو گره باعث شکست می‌شود. در نتیجه یک بخش جدا شده از این رابط‌های مایع، رشته‌ای از قطرات را

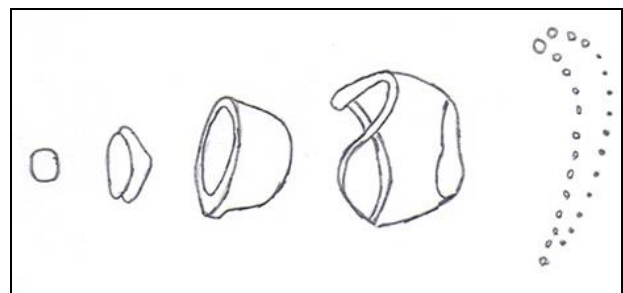
اجاراتنام<sup>۱</sup> رابطه زیر را برای پیش‌بینی عمق نفوذ پیشنهاد داد:

$$\frac{X_p}{d} = C_1 \alpha \quad (5)$$

که در این رابطه،  $X_p$  عمق نفوذ،  $d$  قطر جت،  $\alpha$  نسبت سرعت جت به سرعت هوا،  $C_1$  یک پارامتر تجربی است [۲۲]. بررسی‌های انجام گرفته در این تحقیق نشان می‌دهد رابطه زیر برای پیش‌بینی عمق نفوذ مناسب است.

$$X_p = 810d\alpha^2 \quad (6)$$

در شکل ۱۳ جلوی جت آب با سرعت ۵/۲ m/s که در جریان مخالف با سرعت ۲۲ m/s قرار گرفته است، خرد شدن قطرات کروی در اثر عکس‌العمل متقابل با هوا دیده می‌شود. به این مرحله، اتمیزاسیون ثانویه گفته می‌شود که شماتیکی از آن در شکل ۱۵ رسم شده است. در ابتدا قطرات در اثر فشار هوا، به صورت صفحات تخت در می‌آیند. سپس شکل گلبولی می‌گیرند و در نهایت نیم‌کره می‌شود. این نیم‌کره از قسمت نوک شروع به خرد شدن می‌کند و به قطرات ریز تبدیل می‌گردد.

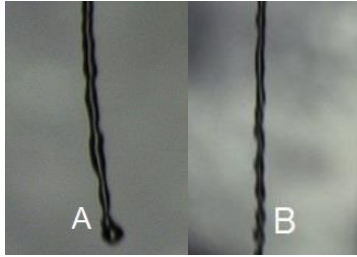


شکل (۱۵): مراحل اتمیزاسیون ثانویه قطرات.

#### ۴-۱-۴ - اتمیزاسیون جت در جریان عرضی هوا

هنگامی که جت آب در جریان عرضی هوا قرار می‌گیرد جلوی سطح جت که در سمت جریان هوا قرار دارد، یک ناحیه با فشار بالا و جلوی سطحی که پشت به جریان هوا قرار دارد ناحیه‌ای با فشار پایین به وجود می‌آید. این توزیع فشار اطراف جت، باعث خمش جت به سمت جریان هوا می‌شود. در شکل شماتیک (D) ۱۶ خم شدن جت آب مشاهده می‌شود. در این شکل هوا از چپ به راست جریان دارد. فشار هوا در سمت چپ جت آب بیشتر از سمت راست آن است. توزیع ناهم‌هنگ فشار اطراف





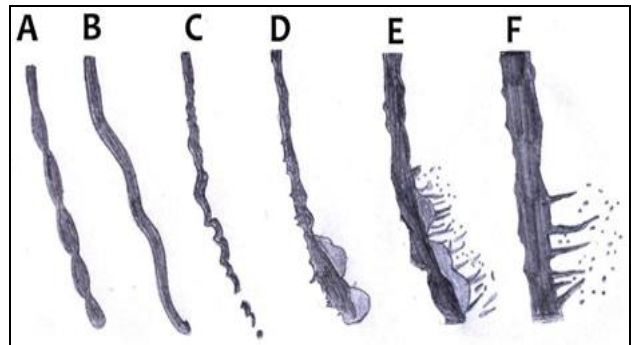
شکل (۱۷): مدل شکست شبه‌رایلی جت آب در جریان عرضی با سرعت (A)  $7 \text{ m/s}$  سرعت جت آب  $5/2 \text{ m/s}$  (B) سرعت جت آب  $1/3 \text{ m/s}$ .

وقتی سرعت جریان هوای عرضی به  $16 \text{ m/s}$  افزایش می‌یابد، جریان هوا انرژی بیشتری برای تغییر شکل دادن جت مایع دارد. در این حالت دو مدل شکست شبه‌رایلی و شکست آشفته که در شکل شماتیک (A) و (B) به نمایش در آمده؛ مشاهده می‌گردد. مدل شکست شبه‌رایلی، وقتی جتی با سرعت  $3$  تا  $11 \text{ m/s}$  در جریان عرضی با سرعت  $16 \text{ m/s}$  قرار می‌گیرد دیده می‌شود. مدل آشفته وقتی جت آب با سرعتی بیش‌تر از  $11 \text{ m/s}$  در جریان عرضی با سرعت  $16 \text{ m/s}$  قرار می‌گیرد پدیدار می‌شود. این مدل در واقع حالت اولیه مدل شکست ستونی است؛ که در شکل (B) نشان داده شده است.

در بررسی جت در جریان عرضی با سرعت  $22 \text{ m/s}$ ، چهار مدل شکست ستونی، شکست متورم، شکست چندحالتی و شکست برشی مشاهده می‌گردد. در محدوده سرعت  $5/2 - 7/2 \text{ m/s}$  جت در جریان عرضی با سرعت  $22 \text{ m/s}$  دارای مدل شکست ستونی است که در شکل (C) به صورت شماتیک نشان داده شده است. شکل (A) مدل شکست ستونی جت آب با سرعت  $5/8 \text{ m/s}$  در جریان عرضی با سرعت  $22 \text{ m/s}$  را نشان می‌دهد.

هنگامی که سرعت جت از  $7/2$  تا  $10 \text{ m/s}$  در جریان عرضی با سرعت  $22 \text{ m/s}$  تغییر کند، مدل شکست متورم که در شکل شماتیک (E) به نمایش درآمده است؛ دیده می‌شود. این مدل در شکل (B) برای جت آب با سرعت  $8/5 \text{ m/s}$  در جریان عرضی با سرعت  $22 \text{ m/s}$  به خوبی مشاهده است. در همین شکل ملاحظه می‌گردد که بعد از خروج از نازل، قطر جت کمی کاهش می‌یابد؛ علت آن می‌تواند مسطح شدن جت استوانه‌ای باشد.

تشکیل می‌دهد. ستون مایع بعد از خروج از انژکتور کمی تغییر شکل می‌دهد و به یک سطح مقطع بیضوی می‌رسد. افزایش نیروی درگ به خاطر شکل مسطح جت مایع، تمایل جت را برای انحراف در جهت جریان عرضی بالا می‌برد. شکل (D) به مدل شکست متورم اشاره دارد. در این مدل، فاصله دو گره تقریباً در حد قطر جت است. جت مایع بین دو گره به صورت مسطح در می‌آید و ساختارهایی شبیه به کیسه بین دو گره ظاهر می‌شود. این ساختارهای متورم به دلیل اختلاف فشار دو طرف جت مایع و گردابه‌هایی که در سمت مخالف جریان هوا، پشت جت وجود دارد، تشکیل می‌گردد. در شکل (E) مدل شکست چندحالتی، که در حقیقت تلفیقی از دو مدل شکست برشی و شکست متورم است مشاهده می‌شود. در مدل شکست برشی که در شکل (F) به صورت شماتیک نشان داده شده است، لیگامنت‌های ریزی در سمت مخالف جریان هوا روی سطح جت ایجاد می‌شوند. این لیگامنت‌ها رشد کرده و قطرات ریزی از نوک آن‌ها جدا می‌شوند.



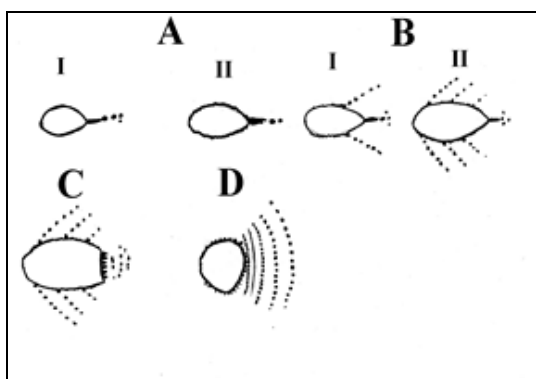
شکل (۱۶): شماتیک‌ای از مدل‌های شکست جت آب در جریان عرضی هوا.

برای بررسی مدل‌های شکست جت آب در جریان هوای عرضی، از انژکتورهایی با قطر  $0/9 \text{ mm}$  بهره گرفته شده است. سرعت جت از  $3$  تا  $33$  متر بر ثانیه و سرعت جریان هوا از  $7$  تا  $22$  متر بر ثانیه تغییر داده می‌شود. زمانی که سرعت جریان عرضی هوا کم است، مدل شکست شبه‌رایلی مشاهده می‌شود. نمونه‌ای از این مدل در شکل ۱۷ قابل دیدن است. در این شکل امواج متقارن محوری و امواج سینوسی روی سطح جت مشاهده می‌شود.

مربوط به طول قبل از برخورد جت‌ها، و زاویه برخورد از آنژکتورهایی با قطر  $0.4 \text{ mm}$  استفاده شده است.

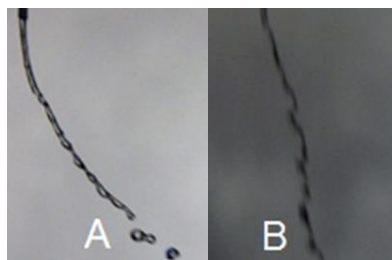
### اثر سرعت جت‌ها روی مدل‌های شکست صفحه مایع

جت‌های برخوردی مایع با توجه به سرعت و عدد رینولدزی که دارند با مدل‌های مختلفی دچار شکست می‌شوند. در برخورد دو جت چهار مدل حاشیه بسته، مدل قطره متناوب، مدل حاشیه باز و مدل کاملاً توسعه یافته مشاهده می‌شود. این همان چهار مدلی است که توسط هیدمن<sup>۱</sup> [۱۸] بیان شد. این مدل‌ها در شکل ۲۰ به صورت شماتیک نشان داده شده است.



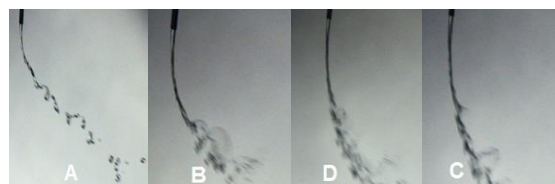
شکل (۲۰): روند تغییر مدل‌های مختلف شکست صفحه مایع با افزایش سرعت جت‌های برخوردی به صورت شماتیک (A) مدل حاشیه بسته (B) مدل قطره متناوب (C) مدل حاشیه باز (D) مدل کاملاً توسعه یافته.

در سرعت‌های کم جت، صفحه بسیار کوچکی در محل برخورد تشکیل می‌شود که با افزایش سرعت جت‌ها بزرگ‌تر می‌شود. این صفحه دارای لبه‌های ضخیم و پایدار است. لیگامنت‌ها و قطرات بزرگ از نوک صفحه جدا می‌شوند و توسط مکانیزم شکست ثانویه شکسته شده و به قطرات ریزتر تبدیل می‌شوند. در این مدل به خاطر تعادلی که بین نیروهای کشش سطحی و نیروهای ممنوم در لبه‌های ورقه وجود دارد یک ورقه نسبتاً آرام دیده می‌شود. این نوع از شکست صفحه مایع، نشان دهنده مدل صفحه حاشیه بسته است که به صورت شماتیک در شکل (A) ۲۰ مشاهده می‌شود. با افزایش سرعت جت لبه‌های صفحه دچار ناپایداری‌هایی می‌گردند که به صورت



شکل (۱۸): شکست جت در جریان عرضی با سرعت  $13 \text{ m/s}$  (A) سرعت جت آب  $5.8 \text{ m/s}$  مدل شکست شبه‌رایل، (B) سرعت جت آب  $13 \text{ m/s}$  مدل شکست آشفته.

در محدوده سرعت  $10$  تا  $11.5 \text{ m/s}$  مدل شکست چندحالتی که در شکل شماتیک (E) ۱۶ به نمایش درآمده است؛ دیده می‌شود. شکل (C) ۱۹ نشان‌دهنده این مدل است. وقتی در جریان عرضی با سرعت  $22 \text{ m/s}$ ، سرعت جت از  $11.5 \text{ m/s}$  بالاتر می‌رود، مدل شکست برشی ظاهر می‌شود. شکل (D) ۱۹ مدل شکست ستونی جت آب با سرعت  $13 \text{ m/s}$  در جریان عرضی با سرعت  $22 \text{ m/s}$  که منطبق بر شکل شماتیک (F) ۱۶ است، را نشان می‌دهد.



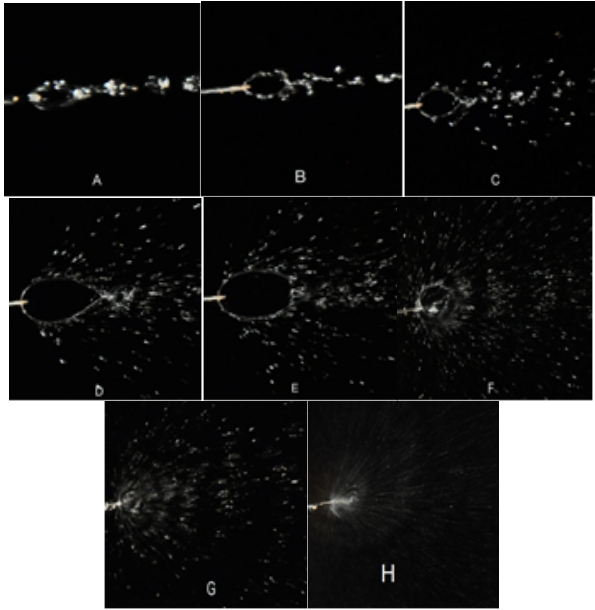
شکل (۱۹): شکست جت در جریان عرضی با سرعت  $22 \text{ m/s}$  (A) سرعت جت آب  $5.8 \text{ m/s}$  مدل شکست ستونی (B) سرعت جت آب  $8.5 \text{ m/s}$  مدل شکست متورم (C) سرعت جت آب  $13 \text{ m/s}$  مدل شکست چندحالتی (D) سرعت جت آب  $13 \text{ m/s}$  مدل شکست برشی.

### ۴-۲-۴- اتمیزاسیون جت‌های برخوردی

در این بخش نقش پارامترهای سرعت جت، قطر آنژکتور، طول قبل از برخورد جت‌ها، و زاویه برخورد در اتمیزاسیون جت‌های برخوردی بررسی گردیده است.

### ۴-۲-۱- جت‌های برخوردی در محیط ساکن

در آزمایش‌های مربوط به بررسی نقش سرعت جت و قطر آنژکتور، از آنژکتورهایی با قطر  $0.4$  و  $0.9 \text{ mm}$  و در آزمایش‌های



شکل (۲۱): جت های برخوردی با قطر  $0.4 \text{ mm}$  و زاویه

برخورد  $100^\circ$  (A,  $V_j = 1/5 \text{ m/s}$  (B,  $V_j = 2/1 \text{ m/s}$  (C,  $V_j = 2/5 \text{ m/s}$  (D,  $V_j = 4/6 \text{ m/s}$  (E,  $V_j = 5/2 \text{ m/s}$  (F,  $V_j = 6/2 \text{ m/s}$  (G,  $V_j = 6/6 \text{ m/s}$  (H,  $V_j = 15 \text{ m/s}$  .

در برخورد جت های با قطر  $0.4 \text{ mm}$  در سرعت بسیار کم، دو جت تبدیل به یک جت می شود و توسط مکانیزم شکست جت متلاشی می شود. زمانی که سرعت جت ها  $1.2 \text{ m/s}$  است، صفحه بسیار کوچکی در محل برخورد تشکیل می شود که با افزایش سرعت جت ها بزرگ تر می شود. این صفحه دارای لبه های ضخیم و پایدار است. لیگامنت ها و قطرات بزرگ از نوک صفحه جدا می شوند و توسط مکانیزم شکست ثانویه شکسته شده و به قطرات ریزتر تبدیل می شوند. در این مدل به خاطر تعادلی که بین نیروهای کشش سطحی و نیروهای ممنوم در لبه های ورقه وجود دارد یک ورقه نسبتاً آرام دیده می شود. این نوع از شکست صفحه مایع، نشان دهنده مدل صفحه حاشیه بسته است. نمونه این مدل در شکل (A) ۲۱ مشاهده می شود. با افزایش سرعت، صفحه بزرگ تر می شود تا در سرعت  $2.1 \text{ m/s}$  لبه های صفحه دچار ناپایداری هایی می گردد که به صورت برآمدگی دیده می شود. این ناپایداری ها حاصل نیروهای آیرودینامیکی است که روی صفحه اعمال می گردد. شکل (B) ۲۲ ناپایداری های لبه صفحه حاصل از برخورد جت هایی با قطر  $0.4 \text{ mm}$  و شکل (A) ۲۳ ناپایداری های لبه صفحه حاصل از برخورد جت هایی با قطر  $0.9 \text{ mm}$  را نشان می دهد. این مدل

برآمدگی دیده می شود. این ناپایداری ها حاصل نیروهای آیرودینامیکی است که روی صفحه اعمال می گردد. در این حالت که به صورت شماتیک در شکل (AII) ۲۰ نشان داده شده است، شکل صفحه تغییری نمی کند و در زمره مدل حاشیه بسته قرار می گیرد.

شکل شماتیک (B) ۲۰ مدل شکست قطره متناوب را نمایش می دهد. این مدل دارای یک صفحه با سطح صاف است. اغتشاشات روی لبه های ورقه باعث می شوند که نیروی ممنوم موضعی از نیروی کشش سطحی موضعی بیش تر شود. این اغتشاشات اشکالی شبیه دانه های تسبیح را به وجود می آورند که با حرکت در امتداد لبه رشد می کند. بعد از این که این دانه ها رشد کردند؛ به قطراتی تبدیل می شوند که از طریق لیگامنت ها به ورقه متصل است. قطرات بعد از جدا شدن از لیگامنت ها، به قطرات ریز متلاشی می شوند.

شکل (C) ۲۰ نشان می دهد که ورقه در پایین دست نقطه برخورد دچار شکاف می شود و به سمت عقب رشد می کند تا به حالت ورقه کاملاً توسعه یافته برسد. به این مدل شکست صفحه مایع، که لبه های صفحه به همدیگر نمی رسد؛ مدل شکست حاشیه باز گفته می شود. در این حالت شکست صفحه مایع به خاطر امواج آیرودینامیکی و امواج برخوردی است و زمانی اتفاق می افتد که دامنه امواج به حد بحرانی می رسد. در این حالت، بالا دست صفحه مایع سالم است اما موج دار باقی می ماند. قطرات روی لبه های سالم صفحه، مثل مدل شکست قطره متناوب به وجود می آید.

مدل کاملاً توسعه یافته که در شکل (D) ۲۰ به صورت شماتیک نمایش داده شده زمانی پیش می آید که سرعت جت ها زیاد است. اتمیزاسیون در این مدل از دیگر مدل هایی که قبلاً توضیح داده شده، شدیدتر است و قطرات جدا شده به صورت نوسانی پراکنده می شوند.

برای بررسی مدل های شکست، با ثابت نگه داشتن زاویه برخورد ( $\theta = 100^\circ$ ) و طول قبل از برخورد  $2 \text{ mm}$ ، سرعت جت هایی با قطر  $0.9 \text{ mm}$  و  $0.4 \text{ mm}$ ، از  $1$  تا  $33$  متر بر ثانیه افزایش می یابد. شکل ۲۱ مدل های مختلف شکست صفحه مایع حاصل از برخورد جت های  $0.4 \text{ mm}$  و شکل ۲۲ مدل های مختلف شکست صفحه مایع حاصل از برخورد جت های  $0.9 \text{ mm}$  را نشان می دهد.

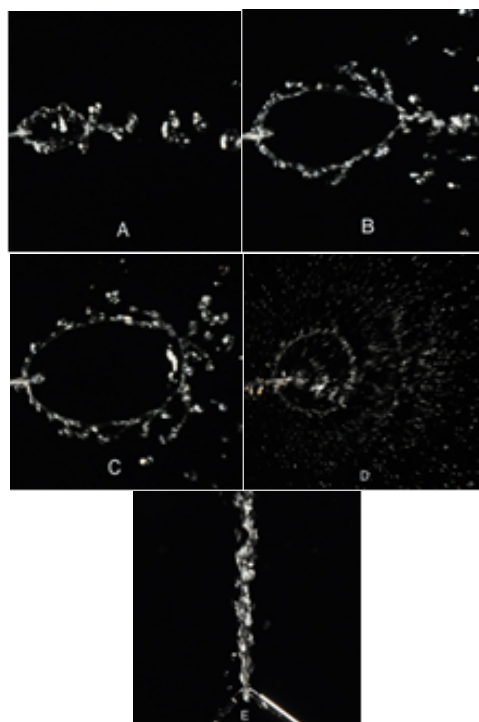
می‌شوند لبه‌های صفحه به هم نرسند و صفحه به صورت حاشیه باز شود. در این سرعت گذار به مدل حاشیه باز شروع و مدل قطره متناوب مرتباً به مدل حاشیه باز تبدیل می‌شود. لی [۱۴] نیز به این نتیجه دست یافت و بیان کرد این پدیده به صورت دوره‌ای اتفاق می‌افتد. در مدل حاشیه باز، جداسدن قطرات از لبه‌ها مثل حالت قبل است. لیگامنت‌ها و قطرات با طول موج‌های ثابتی از نوک صفحه جدا می‌شوند. هر موج قسمتی از صفحه است که به صورت لیگامنت‌ها درآمده است. نمونه‌ای از مدل حاشیه باز را در شکل‌های (E) ۲۱ و (C) ۲۲ می‌توان مشاهده کرد. شکل صفحه مرتباً در حال تغییر است. امواج سینوسی روی صفحه در دید از بالا در شکل (E) ۲۲ مشاهده می‌شود.

با افزایش سرعت جت‌های برخوردی به  $5/5 \text{ m/s}$  ناپایداری‌های صفحه حاشیه باز بیش‌تر می‌شود و گذار به حالت کاملاً توسعه یافته شروع می‌شود. در این حالت صفحه مرتباً از حالت حاشیه باز به حالت توسعه یافته تبدیل می‌شود. حالت گذار را در جت‌های  $0/9 \text{ mm}$  و در سرعت  $5/5 \text{ m/s}$  نیز می‌توان دید. با افزایش سرعت صفحه، مدل حاشیه باز کم‌تر دیده می‌شود و حالت توسعه یافتگی بر کل صفحه غالب می‌شود. شکسته شدن صفحه مایع به صورت کاملاً توسعه یافته، نتیجه غلبه امواج برخوردی در کل صفحه است. صفحه مایع با همان فرکانس امواج برخوردی دچار فروپاشی می‌شود. شکل (F) ۲۱ مدل کاملاً توسعه یافته را نشان می‌دهد. موج‌های جداسده از صفحه به خوبی در این عکس مشخص است.

با افزایش سرعت به  $6/2 \text{ m/s}$  شکل صفحه تقریباً ثابت و فقط حالت کاملاً توسعه یافتگی مشاهده می‌شود. طول موج‌های قطرات نسبت به حالت قبل کاهش می‌یابد. شکل (G) ۲۱ صفحه تشکیل شده توسط جت‌هایی با سرعت  $6/2 \text{ m/s}$  و با قطر  $0/4 \text{ mm}$  را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های (F) ۲۱ و (G) ۲۱ کاهش طول موج‌ها را می‌توان دریافت. اگر سرعت جت‌ها به حدود  $15 \text{ m/s}$  برسد جت‌ها بعد از برخورد پودر می‌شوند و عملاً صفحه‌ای تشکیل نمی‌شود. شکل (H) ۲۱ تمیزاسیون جت‌هایی با سرعت  $15 \text{ m/s}$  و با قطر  $0/4 \text{ mm}$  را نشان می‌دهد.

**اثر قطر جت روی مدل شکست:** در این قسمت نقش قطر انژکتور در برخورد جت‌های دوگانه مورد بررسی قرار گرفته است. در این سری از آزمایش‌ها از انژکتورهایی با قطر  $0/9 \text{ mm}$

را، لی [۱۴] به عنوان ورقه با لبه‌های چین‌دار معرفی کرد. این برآمدگی‌ها با جلو آمدن رشد می‌کنند تا در نهایت قطرات از لبه‌های صفحه جدا می‌گردند. قطرات جداسده از لبه‌ها به مراتب کوچک‌تر از قطرات جداسده از نوک صفحه هستند. جداسدن قطرات از لبه‌های صفحه، مدل قطره متناوب را به نمایش می‌گذارد که نمونه آن‌ها را در شکل‌های (C) ۲۱ و (B) ۲۲ می‌توان مشاهده کرد. همان‌طور که در شکل (D) ۲۱ مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت، صفحه صاف بزرگ‌تر می‌شود و قطرات از نقاط بیش‌تری از لبه جدا می‌شود. جداسدن قطرات از لبه، به سمت بالادست پیش‌روی می‌کند و زاویه اسپری (زاویه امتداد قطرات جداسده از لبه بالا و پایین صفحه) افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت، قطرات جداسده کوچک‌تر می‌شوند. در سرعت  $5 \text{ m/s}$ ، امواج خیلی ضعیفی در روی صفحه تشکیل می‌شوند که از محل برخورد سرچشمه می‌گیرد اما نمی‌تواند صفحه را ناپایدار کند و شکل صفحه ثابت می‌ماند.

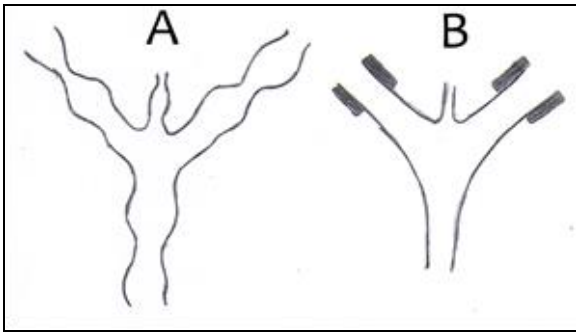


شکل (۲۲): جت‌های برخوردی با قطر  $0/9 \text{ mm}$  و زاویه

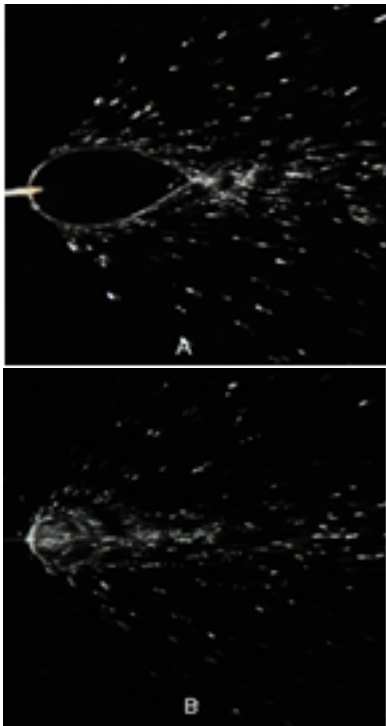
برخورد  $100$  (A)  $V_j=4/5 \text{ m/s}$  (B)  $V_j=4/6 \text{ m/s}$  (C)  $V_j=6/5 \text{ m/s}$  (D)  $5 \text{ m/s}$  (E)  $V_j=4/8 \text{ m/s}$ .

با افزایش سرعت جت‌های برخوردی به  $5/2 \text{ m/s}$  امواج برخوردی که نتیجه تصادم دو جت است رشد کرده و باعث

مدل صفحه کاملاً توسعه یافته، در جت هایی با طول قبل از برخورد ۱۰ mm، نسبت به حالت ۲ mm کوچک تر است.



شکل (۲۳): شکل شماتیک برخورد دو جت (A) طول قبل از برخورد زیاد (B) طول قبل از برخورد کم.



شکل (۲۴): برخورد جت هایی با زاویه ۱۰۰ درجه در سرعت (A) ۴ m/s طول قبل از برخورد ۲ mm (B) طول قبل از برخورد ۱۰ mm.

اثر زاویه برخورد جت ها روی مدل شکست: زاویه برخورد جت ها یکی از عوامل اصلی است که روی اتمیزاسیون جت های برخوردی تأثیر می گذارد. زاویه برخورد از طریق تغییر دادن مؤلفه های سرعت دو جت نسبت به همدیگر و ضخامت صفحه، اتمیزاسیون و اندازه قطرات را کنترل می کند.

و ۰/۴ استفاده شده است. زاویه برخورد جت ها ۱۰۰ درجه تنظیم گردیده است.

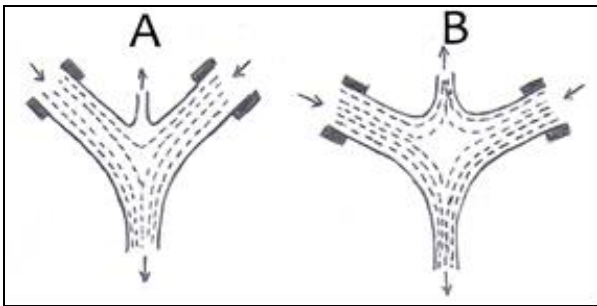
بررسی عکس های (D) ۲۱ حاصل از جت های ۰/۴ mm و (B) ۲۲ حاصل از جت ۰/۹ mm با سرعت ۰/۶ m/s، نشان می دهد که مدل شکست حاصل از دو انژکتور در سرعت های تقریباً یکسان، برابر است. در هر دو مورد مدل قطره متناوب دیده می شود و قطرات از لبه صفحه جدا می گردد. از مقایسه این دو عکس می توان دریافت که با افزایش قطر انژکتور، صفحه به وجود آمده کلفت تر و بزرگ تر می گردد و قطر قطرات به وجود آمده به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد؛ اما شکل کلی صفحه یکسان است. علت بزرگ تر شدن صفحه را می توان به بیش تر بودن دبی انژکتور ۰/۹ mm نسبت داد. این نتایج با یافته های پیلککوس [۱۹] هم خوانی خوبی دارد.

شکل های (F) ۲۱ و (D) ۲۲ به ترتیب مربوط به جت های ۰/۴ mm و ۰/۹ mm در سرعت ۷/۸ m/s است. شکل ها نشان دهنده مدل کاملاً توسعه یافته است. تفاوت هایی که در مدل قطره متناوب اشاره شد در این دو شکل نیز قابل تشخیص است.

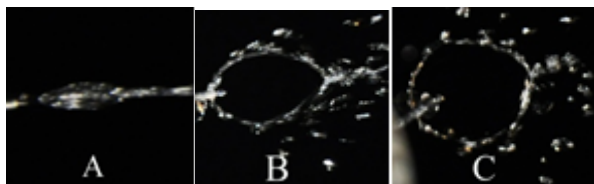
#### اثر طول قبل از برخورد جت ها روی مدل شکست:

هنگامی که سرعت جت ها بالا می رود، روی جت ها، ناپایداری ها و امواج سینوسی ظاهر می شود. زمانی که جت ها با طول قبل از برخورد ۲ mm به هم برخورد می کنند؛ امواج روی جت ها فرصت رشد پیدا نمی کنند؛ اما اگر طول قبل از برخورد به اندازه مناسبی بزرگ شود و به عنوان مثال به ۱۰ mm برسد این امواج رشد می کنند و در محل برخورد جت ها روی صفحه، ناپایداری هایی را به وجود می آورند. ناپایداری روی صفحه وابسته به شرایط امواج سطحی جت در محل برخورد است. دو جت که از محل شکم موج با هم برخورد می کنند صفحه مایع متفاوتی را نسبت به زمانی که از محل گره برخورد می کنند به وجود می آورد. در شکل شماتیک ۲۳ برخورد جت ها با طول کم و زیاد را می توان مشاهده کرد. این ناپایداری ها باعث می شود تا صفحه به سرعت، به سمت توسعه یافتگی پیش رود و در سرعت ۴ m/s به توسعه یافتگی برسد؛ در حالی که صفحه تشکیل شده توسط جت هایی با طول قبل از برخورد ۲ mm، در این سرعت دارای مدل قطره متناوب است (شکل ۲۴). صفحه ای که توسط جت هایی با طول قبل از برخورد ۲ mm به وجود می آید در سرعت ۵/۸ m/s به توسعه یافتگی می رسد. اندازه صفحه و طول موج

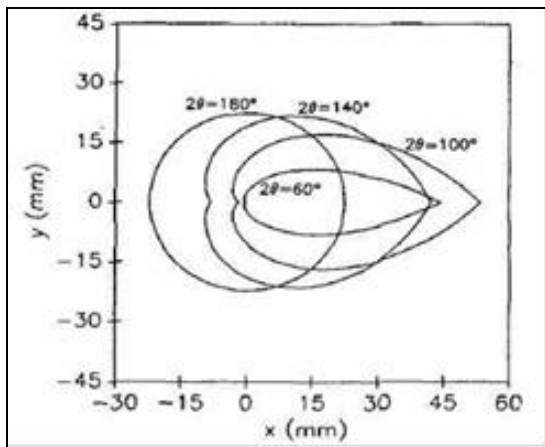
اصلی شکست صفحه در جریان هم‌جهت هوا به صورت مختصر توضیح داده می‌شود.



شکل (۲۵): شماتیکی از برخورد دو جت (A) زاویه برخورد کم (B) زاویه برخورد زیاد.



شکل (۲۶): برخورد جتهایی با سرعت ۴ m/s (A)  $2\theta=60^\circ$  (B)  $2\theta=100^\circ$  (C)  $2\theta=140^\circ$ .



شکل (۲۷): پیش‌بینی شکل صفحه توسط گادگیل [۱۱].

جریان هوای سرعت بالا، تنش برشی چشم‌گیری را در فصل مشترک خود با صفحه مایع سرعت پایین تولید می‌کند. هنگامی که صفحه مایع تحریک شده توسط امواج ضربه‌ای در جریان هم‌جهت هوا قرار می‌گیرد، امواج سینوسی و طولی روی سطح صفحه ظاهر می‌شود. دامنه این امواج به خصوص امواج سینوسی به سرعت رشد می‌کند و در نهایت باعث تجزیه صفحه

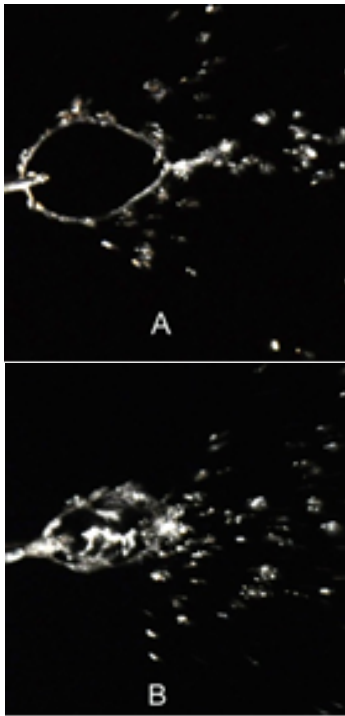
در شکل ۲۵ برخورد دو جت آرام به صورت شماتیک نشان داده شده است. در زوایای برخورد کم (شکل (A) ۲۵) حجم زیادی از مایع به سمت پایین حرکت می‌کند؛ و در نتیجه صفحه مایع به سمت پایین دست گسترش می‌یابد. در زوایای برخورد بزرگ‌تر، (شکل (B) ۲۵)، حجم بیشتری از مایع به سمت بالا دست نقطه برخورد می‌رود. توزیع مایع در اطراف نقطه برخورد یک‌نواخت‌تر می‌شود؛ در نتیجه شکل صفحه به سمت دایره‌ای شدن پیش می‌رود. در زوایای برخورد کم، صفحه شکل بیضی دارد. طول صفحه خیلی بیش‌تر از پهنای صفحه است. اگر با ثابت ماندن سرعت جت‌ها، زاویه برخورد تا  $100^\circ$  درجه افزایش یابد، صفحه مایع شکل بیضی خود را حفظ می‌کند؛ اما قسمت بالا دست صفحه، به پشت محل برخورد گسترش می‌یابد و ابعاد صفحه بزرگ‌تر می‌شود. در زوایای برخورد بیش‌تر از  $100^\circ$  درجه، طول صفحه کم و پهنای صفحه افزایش می‌یابد. شکل صفحه به سمت دایره‌ای شدن پیش می‌رود. گسترش صفحه به سمت پشت محل برخورد، افزایش می‌یابد. تغییر هندسه صفحه مایع در زوایای مختلف در شکل ۲۶ مشاهده می‌شود. اشکال مشاهده شده با پیش‌بینی‌های گادگیل<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۷ که در شکل ۲۷ نمایش داده شده است، هم‌خوانی خوبی دارد [۱۱]. در بررسی‌های عددی گادگیل در زوایای  $100^\circ$  و  $2\theta=140^\circ$ ، تورفتگی در قسمت انتهایی صفحه پیش‌بینی می‌شود که در بررسی‌های تجربی مشاهده نشد. پلیککوس این عدم هم‌خوانی با نتایج عددی را در  $120^\circ$  و  $2\theta=90^\circ$  بیان کرد [۱۹].

در اثر افزایش زاویه برخورد، مؤلفه سرعت در جهت برخورد مستقیم بیش‌تر شده و باعث تشدید پدیده واپاشی و ریزش قطرات می‌شود. همچنین، سرعت لازم برای گذار از یک مدل به مدل دیگر کاهش می‌یابد. به عنوان مثال گذار از مدل قطره متناوب به مدل حاشیه باز در  $2\theta=60^\circ$  در سرعت  $5/5$  m/s،  $2\theta=100^\circ$  در سرعت  $5$  m/s، در  $2\theta=125^\circ$  در سرعت  $4/5$  m/s و در زاویه  $140^\circ$  درجه در سرعت  $4$  m/s اتفاق می‌افتد.

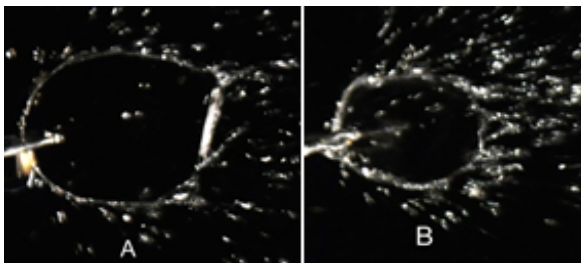
## ۲-۲-۴- برخورد دو جت در جریان هوای هم‌جهت

در این قسمت، خرد شدن جت‌های برخوردی دوگانه در جریان هم‌جهت هوا مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا ویژگی‌های

لیگامنت‌ها در راستای شعاعی را می‌توان به‌علت نوسانات و ناپایداری‌های شعاعی دانست که همراه امواج طولی وجود دارد. جریان هوای هم‌جهت باعث می‌شود گذار از مدل قطره متناوب به مدل حاشیه باز و کاملاً توسعه‌یافته به‌سرعت اتفاق افتد. کوچک‌شدن اندازه صفحه و کاهش زاویه اسپری و طول موج نوسانات در مدل کاملاً توسعه‌یافته توسط جریان هم‌جهت هوا در شکل ۳۰ قابل رویت است.



شکل (۲۸): جت‌های برخوردی با سرعت ۴ m/s و  $\theta = 20^\circ$  (A) در محیط ساکن (B) در جریان هوای هم‌جهت با سرعت ۱۳ m/s.



شکل (۲۹): جت‌های برخوردی با سرعت ۴/۵ m/s و  $\theta = 20^\circ$  (A) در محیط ساکن (B) در جریان هوای هم‌جهت با سرعت ۱۳ m/s.

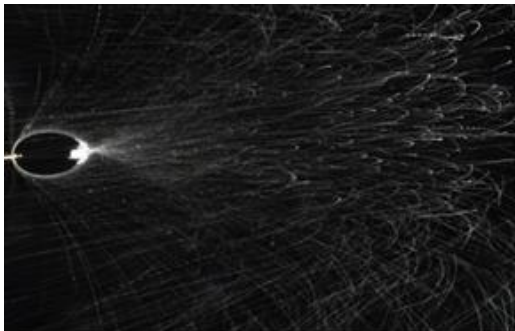
می‌شود. نیروی ممنتوم جریان هوا آنقدر پهنای صفحه مایع را کم می‌کند تا نیروی ممنتوم جریان هوا با نیروی ممنتوم مایع و نیروی کشش سطحی به تعادل برسد. همچنین، نیروی جریان هوای هم‌جهت که روی صفحه مایع اعمال می‌شود، مانع از رشد سریع ناپایداری‌ها و جداسدن قطرات از لبه صفحه می‌شود و در نتیجه زاویه اسپری کاهش می‌یابد.

در این بخش اثر جریان هم‌جهت هوا با سرعت ۱۳ و ۷ m/s روی جت‌های برخوردی با قطر ۰/۴ mm، زاویه  $\theta = 20^\circ$  و طول قبل از برخورد ۲ mm مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این محدوده سرعت جت‌ها مدل صفحه تشکیل‌شده در اثر برخورد دو جت، مدل قطره متناوب، حاشیه باز و کاملاً توسعه‌یافته می‌باشد. در سرعت‌های کم جت، مدل قطره متناوب دیده می‌شود. زمانی که این صفحه در جریان هوای هم‌جهت قرار می‌گیرد، امواج سینوسی روی سطح صفحه ظاهر می‌شود. در این حالت پهنای صفحه مایع، زاویه اسپری و اندازه قطرات تولیدشده کم‌تر می‌شوند. این امواج سینوسی به‌خوبی در شکل (B) ۲۸ که جت‌های برخوردی با سرعت ۴ m/s در جریان هم‌جهت با سرعت ۱۳ m/s را نشان می‌دهد، مشخص است.

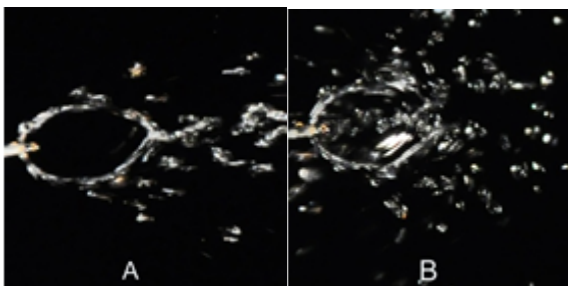
با افزایش بیش‌تر سرعت جت، صفحه‌ای با مدل حاشیه باز ظاهر می‌شود. جریان هوای هم‌جهت باعث می‌شود؛ لیگامنت‌های مایع در قسمت حاشیه باز در جریان تشکیل شود؛ زیرا سرعت جریان هوا از سرعت مایع بیش‌تر است و امواج طولی روی سطح جت را تشدید می‌کند. شکل ۲۹ صفحه حاشیه باز را در محیط ساکن و جریان هوای هم‌جهت نشان می‌دهد. با دقت در قسمت حاشیه باز شکل (B) ۲۹ می‌توان لیگامنت‌های شکل‌گرفته را مشاهده کرد.

با افزایش بیش‌تر سرعت جت، صفحه‌ای با مدل کاملاً توسعه‌یافته ظاهر می‌شود. جریان هوای هم‌جهت در حالت توسعه‌یافته، باعث کاهش طول موج نوسانات می‌شود. صفحه کمی کوچک‌تر و زاویه اسپری در جریان کم‌تر می‌شود و دیگر قطرات از قسمت عقب صفحه جدا نمی‌شوند. علت این پدیده را می‌توان به نیروی اعمال‌شده از جریان هوای هم‌جهت روی صفحه‌ی مایع نسبت داد. در صفحه کاملاً توسعه‌یافته در محیط ساکن، اگر خطی از محل برخورد جت‌ها به نقطه‌ای روی لبه صفحه وصل کنیم، لیگامنت‌های شکل‌گرفته در آن نقطه، در امتداد این خط قرار می‌گیرند. اما در جریان هم‌جهت لیگامنت‌ها به سمت جلوی صفحه خم می‌شوند. جداسدن

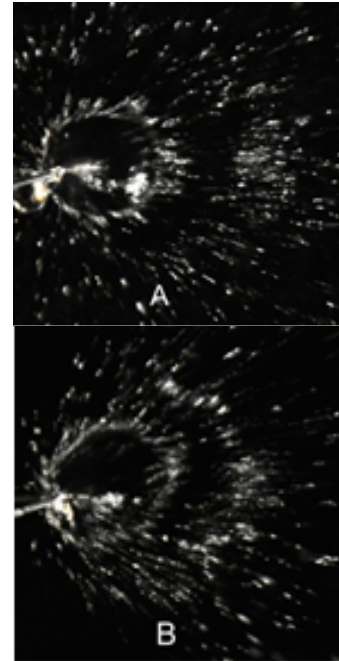
به سرعت رشد می کند و باعث تسریع شکست صفحه و به وجود آمدن مدل حاشیه باز می شود. نوک صفحه مایع به وجود آمده از برخورد جت ها در جریان مخالف به طرفین خم می شود و می شکند و مدل حاشیه باز ظاهر می شود. مقایسه شکل های (A) ۲۲ مربوط به برخورد جت ها با سرعت  $2/4 \text{ m/s}$  با شکل (B) ۲۲ که مربوط به همان جت ها در جریان مخالف  $16 \text{ m/s}$  است، نشان می دهد که در اثر جریان هوا، امواج آیرودینامیکی روی سطح صفحه ظاهر می شوند که باعث تسریع شکست صفحه و به وجود آمدن مدل حاشیه باز می گردند. با افزایش سرعت جریان هوا، تشکیل حاشیه باز به قسمت های عقب تر صفحه می رود و عمق نفوذ کاهش می یابد؛ زیرا ممنتوم جریان هوا افزایش می یابد و بر ممنتوم مایع غلبه کرده و مانع از نفوذ جریان مایع در جریان هوای مخالف می شود. همچنین، طول موج های به وجود آمده ناشی از قطرات و لیگامنت ها در مدل کاملاً توسعه یافته هنگامی که در جریان مخالف هوا قرار بگیرند کاهش می یابند.



شکل (۳۱): جت های برخوردی با سرعت  $4/9 \text{ m/s}$  و  $110^\circ = 2\theta$  در جریان هوا مخالف با سرعت  $7 \text{ m/s}$ .



شکل (۳۲): جت های برخوردی با سرعت  $2/4 \text{ m/s}$  و  $110^\circ = 2\theta$  (A) در محیط ساکن (B) در جریان مخالف با سرعت  $16 \text{ m/s}$ .



شکل (۳۰): جت های برخوردی با سرعت  $5/5 \text{ m/s}$  و  $125^\circ = 2\theta$  (A) در محیط ساکن (B) در جریان هوای هم جهت با سرعت  $13 \text{ m/s}$ .

### ۳-۲-۴- برخورد دو جت در جریان هوای مخالف

در این قسمت از مطالعه قصد داریم اتمیزاسیون جت های برخوردی در جریان مخالف هوا را مورد بررسی قرار دهیم. برای این منظور اثر جریان مخالف هوا با سرعت  $7 \text{ m/s}$  و  $16 \text{ m/s}$  و روی جت های برخوردی با قطر  $0.4 \text{ mm}$  و زاویه  $110^\circ = 2\theta$  و طول قبل از برخورد  $2 \text{ mm}$  مورد مطالعه قرار می گیرد.

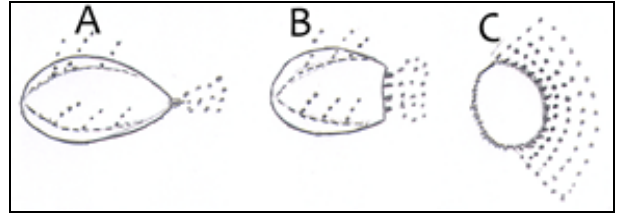
هنگامی که صفحه مایع با مدل حاشیه بسته و حاشیه باز در جریان مخالف قرار می گیرد؛ قطرات جدا شده از صفحه بعد از کمی نفوذ در جریان، سرعتشان در راستای حرکت صفر شده و به سمت عقب منحرف می شوند. قطرات بعد از جدا شدن از لبه های صفحه، یک مسیر قوسی شکل به سمت بالا و پایین را طی می کنند و سپس به عقب منحرف می شوند. قطراتی هم که از نوک صفحه جدا می شوند به چپ و راست منحرف می شوند و به عقب بر می گردند. شکل ۳۱ نحوه انحراف قطرات جدا شده از صفحه مایع در جریان هوای مخالف را نشان می دهد.

هنگامی که صفحه مایع تحریک شده توسط امواج برخوردی در جریان مخالف هوا قرار می گیرد؛ امواج آیرودینامیکی روی سطح صفحه ظاهر می شوند. امواج آیرودینامیکی به خاطر برهم کنش جریان هوا و مایع به وجود می آید. دامنه این امواج



## ۴-۲-۴- برخورد دو جت در جریان هوای عرضی

در این قسمت اتمیزاسیون جت های برخوردی در جریان عرضی مورد مطالعه قرار می گیرد. صفحه مایع با سه مدل قطره متناوب، مدل حاشیه باز و مدل کاملاً توسعه یافته شکسته می شود. شماتیکی از مدل های صفحه مایع در جریان عرضی در شکل ۳۳ نمایش داده شده است.



شکل (۳۳): شماتیکی از مدل های صفحه مایع در جریان

عرضی (A) مدل قطره متناوب (B) مدل حاشیه باز (C) مدل کاملاً توسعه یافته.

قطره متناوب گفته می شود. زمانی که سرعت جت های برخوردی افزایش می یابد؛ امواج برخوردی (که در اثر برخورد دو جت در محل برخورد به وجود می آیند) و امواج آیرودینامیکی تقویت شده و در روی سطح جت رشد می کنند. زمانی که دامنه امواج به حد بحرانی رسیدند باعث شکسته شدن صفحه مایع می شوند. همان طور که در شکل شماتیک (B) ۳۳ نشان داده شده است، در این حالت دیگر لبه های صفحه به هم نمی رسد و مدل شکست حاشیه باز ظاهر می شود. در شکل شماتیک (C) ۳۳ مشاهده می شود که در حالت کاملاً توسعه یافته هم، قطرات جدا شده از نوک صفحه در روی امواج، در یک مسیر منحنی به سمت داخل صفحه کشیده می شود. در این شکل انحراف قطرات به داخل صفحه با کم رنگ شدن نشان داده شده است.

در این بخش اثر جریان عرضی هوا با سرعت  $21$  و  $16$  m/s و  $7$  روی جت های برخوردی با قطر  $0.4$  mm، زاویه  $110^\circ = 2\theta$  و طول قبل از برخورد  $2$  mm مورد مطالعه قرار می گیرد. در این مطالعه سه مدل قطره متناوب، مدل حاشیه باز و مدل کاملاً توسعه یافته مشاهده شد.

در شکل (A) ۳۴ شکل جت های برخوردی با مدل قطره متناوب در جریان عرضی را می توان مشاهده کرد. در این شکل حالت انحنای صفحه مایع به خوبی مشخص است. قطرات جدا شده از نوک در یک مسیر منحنی به سمت عمود بر صفحه منحرف می شوند؛ ولی ناپایداری ها و قطرات، روی لبه ها در مسیر منحنی رشد می کنند و بعد از جدا شدن از صفحه به سمت عمود بر صفحه منحرف می گردند. شکل های (B) ۳۴ مدل صفحه حاشیه باز در جریان عرضی را به نمایش می گذارد. این عکس از روبروی صفحه مایع گرفته شده است و به هم نرسیدن لبه های صفحه مایع و شکسته شدن صفحه به وسیله امواج برخوردی و آیرودینامیکی در آن مشخص است. در حالت کاملاً توسعه یافته هم، قطرات جدا شده از نوک صفحه در روی امواج، در یک مسیر منحنی به سمت داخل صفحه کشیده می شود (شکل (C) ۳۴).

جریان هوای عرضی باعث افزایش ناپایداری های نوک صفحه می شود. در نتیجه حالت گذار از یک مدل به مدل دیگر در سرعت ها و رینولدزهای کمتری اتفاق می افتد. حالت گذار از مدل قطره متناوب به مدل حاشیه باز در محیط ساکن در سرعت  $5$  m/s اتفاق می افتد؛ در حالی که در جریان عرضی با سرعت  $7$  m/s گذار از مدل قطره متناوب به مدل حاشیه باز در

همان طور که در شکل شماتیک (A) ۳۳ مشاهده می شود وقتی جت های برخوردی دوگانه با سرعت نسبتاً پایین در جریان عرضی قرار می گیرد، صفحه مایع تشکیل شده بلافاصله بعد از تماس با جریان هوا دچار شکست نمی شود؛ اما تغییر شکل می دهد تا شکلی خمیده بگیرد. لبه های صفحه مایع تشکیل شده به داخل خم می گردد؛ و یک حالت انحنا به خود می گیرد. هرچه سرعت جریان عرضی بیش تر باشد، خمیدگی بیش تر می شود. در سرعت پایین جت آب و هوا، صفحه مایع از محل برخورد تا موقعیتی که نیروهای کشش سطحی در لبه آزاد با نیروی ممنتوم هوا و مایع به تعادل برسد گسترش می یابد. لبه ها در انتهای صفحه به هم می پیوندند تا حاشیه های ضخیم و پایدار تولید شود. امواج آیرودینامیکی که به دلیل عبور جریان هوا از روی سطح به وجود می آیند باعث می شود لبه های صفحه دچار ناپایداری شود. این ناپایداری ها روی لبه رشد کرده و قطرات ریزی از آن ها جدا می شود. قطرات جدا شده از نوک در یک مسیر منحنی به سمت عمود بر صفحه منحرف می شوند؛ ولی ناپایداری ها و اندازه لیگامنت ها، روی لبه های صفحه به سمت عمود بر صفحه منحرف می گردند. خم شدن نوک صفحه در جریان عرضی نشان می دهد که سرعت مایع در آن قسمت از بقیه نقاط کم تر است. به این مدل از شکست صفحه مایع، مدل

شکست جت و طول موج‌های روی سطح جت و افزایش دامنه امواج می‌شود،

۴- رفتار جت مایع در جریان مخالف هوا به‌طور ذاتی ناپایدار است و خط سیر جت به‌طور قابل ملاحظه‌ای منحرف می‌گردد. افزایش سرعت جریان مخالف هوا، باعث افزایش ناپایداری‌ها و دامنه موج‌های روی سطح جت و کاهش طول موج‌ها، طول شکست و عمق نفوذ جت و کاهش قطر قطرات می‌گردد،

۵- در بررسی شکست جت در جریان عرضی، شش مدل شکست شبه‌رایلی، شکست آشفته، ستونی، مدل شکست متورم، مدل شکست چندحالتی و برشی مشاهده می‌شود،

۶- جت مایع در دو مرحله متوالی شکست اولیه و ثانویه خرد می‌شود. در مرحله شکست اولیه جت مایع به لیگامنت‌ها و قطرات بزرگ تبدیل شده و در شکست ثانویه قطرات بزرگ با مدل گلبولی شدن به قطرات ریز می‌شکنند،

۷- بررسی‌های انجام‌گرفته در این تحقیق نشان می‌دهد رابطه  $X_p = 810d\alpha^2$  برای پیش‌بینی عمق نفوذ جت آب در جریان هوای مخالف مناسب است،

۸- در برخورد دو جت آب چهار مدل حاشیه بسته، قطره متناوب، حاشیه باز و کاملاً توسعه‌یافته روی صفحه مایع مشاهده شد. انتقال از یک مدل به مدل دیگر در یک سرعت مشخص صورت نمی‌گیرد؛ زیرا در حالت گذار هر دو مدل به‌صورت متناوب دیده می‌شود. در حالت گذار با افزایش سرعت، وقوع مدل قبلی کم‌تر شده و مدل بعدی غالب می‌شود،

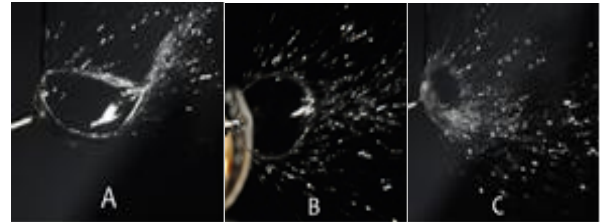
۹- در برخورد دو جت، با افزایش قطر انژکتورها با ثابت نگه‌داشتن سرعت جت‌ها، مدل اسپری تغییر نمی‌کند اما صفحه مایع بزرگ‌تر و ضخیم‌تر می‌گردد و قطرات بزرگ‌تری به‌وجود می‌آید،

۱۰- در برخورد دو جت آب، افزایش طول قبل از برخورد باعث می‌شود روی صفحه در محل برخورد ناپایداری‌ها و امواجی به‌وجود آید و صفحه به‌سرعت به‌سمت توسعه‌یافتگی پیش رود،

۱۱- افزایش زاویه برخورد، باعث تشدید پدیده واپاشی و ریزتر شدن قطرات می‌گردد. افزایش زاویه برخورد تا ۱۰۰ درجه باعث می‌شود، ابعاد صفحه بیضی بزرگ‌تر شده و عمق نفوذ افزایش یابد. زمانی که زاویه از ۱۰۰ درجه بیشتر می‌شود، عمق نفوذ کم‌تر و شکل صفحه به‌سمت دایره‌ای شدن پیش می‌رود،

۱۲- هنگامی که صفحه مایع با مدل قطره متناوب در جریان هم‌جهت هوا قرار می‌گیرد، امواج سینوسی روی سطح صفحه

سرعت  $4/5$  m/s و از مدل حاشیه باز به مدل توسعه‌یافته در سرعت  $5/5$  m/s اتفاق می‌افتد. در جریان عرضی با سرعت  $21$  m/s گذار به مدل حاشیه باز در سرعت  $3/8$  m/s و به مدل توسعه‌یافته در سرعت  $4/5$  m/s اتفاق می‌افتد.



شکل (۳۴): برخورد دو جت با زاویه ۱۱۰ درجه در جریان عرضی هوا (A) مدل قطره متناوب سرعت جت  $3/8$  m/s، سرعت جریان عرضی  $21$  m/s (B) مدل حاشیه باز سرعت جت  $4/5$  m/s، سرعت جریان عرضی  $7$  m/s (C) مدل کاملاً توسعه‌یافته سرعت جت  $5/7$  m/s، سرعت جریان عرضی  $21$  m/s.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به‌صورت تجربی اتمیزاسیون جت‌های آب و جت‌های برخوردی آب در محیط ساکن و جریان هوا مورد مطالعه قرار گرفته است. برای تولید جت از انژکتورهایی با قطر  $0.4$  و  $0.9$  میلی‌متر و با نسبت طول به قطر بالا بهره گرفته شده است. محدوده سرعت جت‌ها بین  $1$  تا  $33$  m/s و محدوده عدد رینولدز بین  $300$  تا  $30,000$  انتخاب گردید. با استفاده از تصویربرداری از جت‌ها و صفحه مایع نتایج زیر به‌دست می‌آید.

۱- در محدوده سرعت  $3-10$  m/s مدل شکست جت آب در محیط ساکن از نوع رایلی و در محدوده سرعت  $10-30$  m/s مدل شکست از نوع باد اولیه است،

۲- در محیط ساکن با افزایش سرعت جت، طول موج‌ها روی سطح جت افزایش می‌یابد ولی طول شکست تا سرعت  $7$  m/s کاهش می‌یابد و بعد از این سرعت شروع به افزایش می‌کند. طول شکست اندازه‌گرفته‌شده هم‌خوانی بسیار خوبی با رابطه سلام دارد. برای انژکتور مورد استفاده در آزمایش، ضریب تجربی  $C_f$  برابر  $2/2$  در نظر گرفته شد،

۳- جریان گاز روی سطح یک جت، باعث رشد امواج سطحی می‌شود. افزایش سرعت جریان هم‌جهت گاز باعث کاهش طول

- Master of Science Dissertation in Mechanical Engineering, Oklahoma State University, 2005.
10. Lam, K.M. and Chan, C. "Round Jet in Ambient Counter Flowing Stream", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 123, No. 10, pp. 895-903, 1997.
  11. Gadgil, H.P. "Studies on Impinging Jet Atomizer", Master of Science Dissertation in Aerospace Engineering, Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India, 2007.
  12. Dombrowski, N. and Hooper, P.C. "A Study of the Sprays Formed by Impinging Jets in Laminar and Turbulent Flow", *Fluid Mech.*, Vol. 18, No. 3, pp. 392-398, 1964.
  13. Anderson, W.E., Ryan, H.M., Pal, S., and Santoro, R.J. "Spray Formation Processes of Impinging Jets Injectors", *NACA Prop. Eng. Res.*, pp. 69-74, 1993.
  14. Li, R. and Ashgriz, N. "Characteristics of Liquid Sheets Formed by Two Impinging Jets", *Physics of Fluids*, Vol. 18, No. 8, pp. 1-13, 2006.
  15. Li, R. and Ashgriz, N. "Edge Instability and Velocity of Liquid Sheets Formed by Two Impinging Jets", *Atomization and Sprays*, Vol. 17, No. 1, pp. 71-97, 2007.
  16. Bremond, N. and Villermaux, E. "Atomization by Jet Impact", *J. Fluid Mech.*, Vol. 549, No. 1, pp. 273-306, 2006.
  17. Choo, Y.J. and Kang, B.S. "The Effect of Jet Velocity Profile on The Characteristics of Thickness and Velocity of the Liquid Sheet Formed by Two Impinging Jets", *Physics of Fluids*, Vol. 19, No. 11, pp. 1-7, 2007.
  18. Heidman, M.F., Priem, R.J. and Humphrey, T.C. "A Study of Sprays Formed by Two Impinging Jets", *NACA Technical Note*, No. 3835, 1957.
  19. Poulikakos, D. "Determination of Structure Temperature and Concentration of the Near Injector Region of Impinging Jets Using Holographic Techniques", *Proc. of the AFOSR Contractors Meeting*, 1993.
  20. Ingebo, R.E. "Drop Size Distributions for Impinging-Jet Breakup in Airstreams Simulating The Velocity Condition in Rocket Combustion", *NACA TN-4222*, 1958.
  21. Yatsuyanagi, N., Sakamoto, H. and Sato, K. "Atomization Characteristics of Liquid Jets Injected into a High-Velocity Flow Field", *Atomization and Sprays*, Vol. 4, No. 4, pp. 451-471, 1994.
  22. Rajaratnam, N. "Turbulent jets", Elsevier Scientific, Amsterdam, The Netherlands, 1976.

شکل می‌گیرد. در این حالت پهنای صفحه مایع، زاویه اسپری، و اندازه قطرات تولید شده کم‌تر می‌شود،

۱۳- در جریان عرضی هوا، لبه‌ها و نوک صفحه مایع به داخل خم می‌گردد و یک حالت انحنا و نیم‌کره به خود می‌گیرد. خم شدن لبه‌ها به داخل، نشان‌دهنده سرعت کم لبه‌ها و نوک صفحه مایع نسبت به بقیه قسمت‌های آن است. جریان عرضی باعث افزایش ناپایداری‌های نوک صفحه می‌شود و در نتیجه حالت گذار از یک مدل به مدل بعد در سرعت‌های کم‌تری اتفاق می‌افتد و

۱۴- جریان مخالف هوا باعث به‌وجود آمدن امواج آیرودینامیکی روی سطح صفحه می‌شود که باعث تسریع شکست صفحه و به‌وجود آمدن حاشیه باز می‌شود. با افزایش سرعت هوا، ناپایداری‌ها و حاشیه‌های باز به سمت عقب پیش‌روی می‌کنند و عمق نفوذ کاهش می‌یابد. همچنین طول موج‌های به‌وجود آمده در صفحه کاملاً توسعه یافته کاهش می‌یابد.

#### ۶- مراجع

1. Trinh, H.P. "Modeling of Turbulent Effect on Liquid Jet Atomization", Alabama, Marshal Space Flight Center, 2007.
2. Mayer, W.O.H. "Coaxial Atomization of a Round Liquid Jet in a High Speed Gas Stream a Phenomenological Study", *Experiments in Fluids*, Vol. 16, No. 6, pp. 401-410, 1994.
3. Faeth, G.M., Hsiang, L.P. and Wu, P.k. "Structure and Break up Properties of Sprays", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 11, P.P. 99-127, 1995.
4. Sallam, K.A., Dai, z. and Feath, G.M. "Liquid Breakup at The Surface of Turbulent Round Liquid Jets in Still Gases", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 28, No. 3, pp. 427-449, 2002.
5. Sallam, K.A., Aalburg, C. and Faeth, G.M. "Breakup of Round Nonturbulent Liquid Jets in Gaseous Crossflow", *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 12, pp. 2529-2540, 2004.
6. Aalburg, C., Sallam, K.A. and Faeth, G.M. "Properties of Non-turbulent Round Liquid Jets in Uniform Crossflows", *The 42<sup>nd</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Nevada, 2004.
7. Sallam, K.A., Aalburg, C. and Faeth, G.M. "Breakup of Turbulent and Non-turbulent Liquid Jets in Gaseous Crossflows", *44<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Nevada, 2006.
8. Pan, Y. and Suga, k. "A Numerical Study on The Breakup Process of Laminar Liquid Jets into a Gas", *Physics of Fluids*, Vol. 18, No. 5, pp. 1-11, 2006.
9. Sankar Krishnan, R. "Breakup of Turbulent Round Liquid Jets in Uniform Gaseous Crossflows",