



دانشگاه تبریز

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

عنوان

مطالعه تجربی تاثیر قدرت و شیوه توزیع میدان الکتریکی در رفتار جت ها و قطرات در محیط

مایع دی الکتریک

استاد راهنما

دکتر اسماعیل اسماعیل زاده

استاد مشاور

دکتر محمد تقی شروانی تبار

پژوهشگر

سید پیمان طباطبائی حسینی

بهمن ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم بہ

پدر و مادر عزیزم

به نام خدا

خدای بزرگ و مهربان را به خاطر توفیق انجام این پایان نامه، سآلرم و از اومی خواهم که بقیة زندگی ام را نیز در راه علم و دانش سپری نمایم.

موراسا سائل زاده تقدیر و سکر می نمایم که به حق، المرارهنانی های ارزتمند ایشان

نود، طی لردن این مسیر نیز میسر بود.

از اسآوار بخدمت جناب آقای پروفور محمد علی ستروالی تبار به خاطر مشاورت های ارزتمندان، کمال سکر و سپاسگزاری را دارم.

از دوست عزیزم آقای مهندس بهنام صدری که در تمام مراحل انجام این پایان نامه همراه و یاور بنده بوده کمال سکر و قدرانی را دارم.

از همه دوستان و عزیزان لروه تحقیقاتی آزمایشگاه مکانیک سیالات که در مدت سیل یاریکرای جانب بوده اند: از آقایان مهندس مهندس

محمدرضا عباسی، مسؤل محترم آزمایشگاه مکانیک سیالات به خاطر زحمات بی دریغشان، داود عبدی، رسول تقی زاده، نادر نور دانش، بابک

و جدی، مهدی رضیاتی و سایر عزیزانی که نشان دلر شده است بسیار سپاسگزارم و از خداوند متعال برای این عزیزان سربلندی و

بهر روزی آرزو مندم.

از خانواده بزرگم که در تمام مراحل این پایان نامه یاریکرای و پشتیبانی نمودند سپاسگزارم.

مورد برای علی ایسان و فین، نرت و سهرام نشان حواکاتم.

سید پرتمان طباطبانی حسینی

بهمن

| | |
|---|--|
| نام خانوادگی: طباطبائی حسینی | نام: سیدپژمان |
| عنوان پایان نامه: مطالعه تجربی تاثیر قدرت و شیوه توزیع میدان الکتریکی در رفتار جت ها و قطرات در محیط مایع دی الکتریک | |
| استاد راهنما: دکتر اسماعیل اسماعیل زاده | استاد مشاور: دکتر محمد تقی شروانی تبار |
| مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی مکانیک گرایش: تبدیل انرژی دانشکده: مهندسی مکانیک دانشگاه: تبریز تاریخ فارغ التحصیلی: ۹۰/۱۱/۳۱ تعداد صفحات: ۸۸ | |
| واژگان کلیدی: جت های برخوردی، ستون جت، قطره، مایع دی الکتریک، الکترو هیدرودینامیک | |
| <p>چکیده:</p> <p>امروزه یکی از چالش های پیشروی محققین در رابطه با جریان جت ها، استفاده از روش های فعال و یا غیرفعال مناسب جهت بالا بردن بازده واحد های صنعتی می باشد. یکی از روش های فعال، استفاده از میدان الکتریکی با ولتاژ بالا (EHD) است که به علت توان مصرفی پایین در مقایسه با راندمان آن در واحدهای صنعتی مدرن، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در بخش نخست این پایان نامه، رفتار تک جت آزاد غیردایروی قائم در غیاب میدان الکتریکی، مورد مطالعه قرار گرفته است تا از این طریق فهم دقیقی از هیدرودینامیک جریان ستون مایع در رژیم لایه ای بدست آید. بررسی های آزمایشگاهی نشان داد که با تعریف یک پارامتر طولی جدید، می توان معیاری کمی برای اندازه گیری شدت اختلاط یا استهلاک صورت گرفته توسط نازل های غیردایروی گزارش کرد، تا از این طریق، شکل بهینه این نوع نازل ها برای کاربردهای متنوع صنعتی اش که شامل بهبود عملکرد اختلاط در مقیاس های بزرگ و کوچک، افزایش بازدهی موتورهای احتراق، پارازیت گیری، و افزایش انتقال حرارت و جرم می شود بدست آید. بعد از تسلط کامل بر روی هیدرودینامیک جت، در بخش دوم پژوهش حاضر رفتار الکترو هیدرودینامیکی ستون مایع حاصل از برخورد جت های غوطه ور متقابل در ناحیه ای لایه ای جریان، مورد مطالعه قرار گرفت. زیرا با توجه به آرایش بی نظیر جت های برخوردی برای جریان سیال، این تکنیک یک روش قدرتمند برای تقویت فرایندهای انتقال (حرارت و جرم) مهیا می سازد، و در بسیاری از صنایع از جمله صنایع نفت و گاز، پتروشیمی، نیروگاه های هسته ای، صنعت طراحی هواپیماهای عمود پرواز، برش قطعات، خشک کردن کاغذ، صنایع فولاد، خنک کاری و پیشرانش جت ها و موشک ها مورد استفاده وسیع قرار گرفته است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که این ستون مایع تحت تاثیر نیروی الکترو فورتیک وارد بر بارهای سطحی در جهت میدان الکتریکی حاکم منحرف می شود. بنابراین، با اعمال ولتاژ الکتریکی مناسب، می توان میزان انحراف ستون جت را جهت هدایت انتقال جرم و حرارت به یک نقطه خاص کنترل کرد. بسته به مقدار سرعت جت های متقابل، دوشکل موج متفاوت بر روی ستون جت پدیدار می شود. با اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو نازل متقابل، پایداری ثانویه ای که به دلیل جاذبه الکتریکی در نقطه برخورد جت ها ایجاد می شود، در مقادیر کم سرعت باعث تقویت امواج متقارن، و در سرعت های بالاتر از یک مقدار معین منجر به تبدیل امواج نامتقارن یا سینوسی به نوع متقارن می شود. از این رومی توان با اعمال مقدار مناسب ولتاژ، اندازه و نحوه توزیع قطرات تولیدی را با تعیین نوع امواج غالب سطحی جت و در نتیجه نحوه شکست آن به راحتی پیش بینی کرد.</p> | |

فهرست مطالب

| | |
|------|---------------------|
| III | چکیده |
| IV | فهرست مطالب |
| VIII | فهرست اشکال و جداول |
| X | مقدمه |

فصل اول: پایه های نظری و پیشینه پژوهش

| | |
|---|---|
| ۱ | ۱-۱ جت های غیردایروی |
| ۱ | ۱-۱-۱ اهمیت بررسی جت های غیردایروی |
| ۱ | ۲-۱-۱ مقدمه ای بر جت های غیردایروی |
| ۲ | ۳-۱-۱ عامل اصلی تمایز جت های غیردایروی با نوع دایروی آنها |
| ۴ | ۲-۱ جت های برخوردی |
| ۴ | ۱-۲-۱ اهمیت بررسی تکنیک جت های برخوردی |
| ۴ | ۲-۲-۱ مقدمه ای بر جت های برخوردی |
| ۵ | ۳-۲-۱ بررسی ساختار جت های متقابل قبل از برخورد |
| ۶ | ۴-۲-۱ طبقه بندی جت های برخوردی |
| ۷ | ۵-۲-۱ ستون جت لایه ای حاصل از برخورد جت ها |
| ۸ | ۱-۵-۲-۱ اغتشاشات سطحی روی ستون جت و انواع آن |
| ۹ | ۲-۵-۲-۱ طبقه بندی شکست ستون جت مایع |

| | |
|----|---|
| ۱۱ |۶-۲-۱ معادلات حاکم |
| ۱۸ |۷-۲-۱ اهمیت بررسی رفتار جت‌ها در حضور میدان الکتریکی با ولتاژ بالا |
| ۲۰ |۳-۱ الکترو هیدرودینامیک |
| ۲۰ |۱-۳-۱ مقدمه |
| ۲۰ |۲-۳-۱ انواع بارهای الکتریکی |
| ۲۱ |۳-۳-۱ پلاریزاسیون |
| ۲۲ |۱-۳-۳-۱ پلاریزاسیون الکترونی |
| ۲۲ |۲-۳-۳-۱ پلاریزاسیون اتمی |
| ۲۳ |۳-۳-۳-۱ پلاریزاسیون جهتی |
| ۲۳ |۴-۳-۳-۱ پلاریزاسیون سطحی |
| ۲۳ |۵-۳-۳-۱ پلاریزاسیون ناگهانی |
| ۲۴ |۴-۳-۱ بررسی معادلات حاکم بر پدیده الکترو هیدرودینامیک |
| ۲۸ |۵-۳-۱ مزایا و کاربردهای الکترو هیدرودینامیک (EHD) |
| ۲۹ |۴-۱ پیسینه پژوهش |
| ۲۹ |۱-۴-۱ جت‌های غیردا بروی |
| ۳۰ |۲-۴-۱ جت‌های برخوردی |
| ۳۲ |۳-۴-۱ ستون جت |
| ۳۴ |۴-۴-۱ جت مایع در حضور میدان الکتریکی با ولتاژ بالا |

فصل دوم: مواد و روش‌ها

| | |
|----|--|
| ۳۶ |۱-۲ مقدمه |
| ۳۶ |۱-۱-۲ بررسی ناپایداری‌های هیدرودینامیکی بر روی جت لایه‌ای |

| | |
|----|---|
| ۳۶ | ۲-۱-۲ بررسی تاثیر میدان الکتریکی بر روی هیدرودینامیک ستون جت |
| ۳۸ | ۲-۲ مطالعه هیدرودینامیکی جریان ستون مایع با تغییر هندسه سطح مقطع آن |
| ۳۸ | ۱-۲-۲ سکوی آزمایش |
| ۴۰ | ۳-۲ مطالعه الکترو هیدرودینامیکی ستون مایع حاصل از برخورد جت‌های متقابل غوطه‌ور باردار |
| ۴۰ | ۱-۳-۲ سکوی آزمایش |
| ۴۲ | ۴-۲ معرفی قسمت‌های مختلف سکوهای آزمایشی |
| ۴۲ | ۱-۴-۲ پمپ |
| ۴۳ | ۲-۴-۲ مخزن کنترل هد بالادست |
| ۴۳ | ۳-۴-۲ مخزن آرامش |
| ۴۳ | ۴-۴-۲ شیرها |
| ۴۴ | ۵-۴-۲ نازل‌ها |
| ۴۴ | ۶-۴-۲ مخزن سیال پایه (مخزن ذخیره درسکوی آزمایش اول) |
| ۴۴ | ۷-۴-۲ آرایش الکترودها درسکوی آزمایش دوم |
| ۴۵ | ۵-۲ سیال‌های به‌کاررفته |
| ۴۶ | ۶-۲ اندازه‌گیری دبی سیال کاری |
| ۴۶ | ۷-۲ اندازه‌گیری ولتاژ و جریان الکتریکی |
| ۴۶ | ۸-۲ اندازه‌گیری پارامترهای هدف مطالعه |
| ۴۶ | ۱-۸-۲ ستون جت غیرداپروی |
| ۴۷ | ۲-۸-۲ جتهای برخوردی و ستون مایع حاصل از آن |
| ۴۸ | ۹-۲ روش پردازش تصویری |
| ۴۹ | ۱۰-۲ اندازه‌گیری سرعت |

فصل سوم: نتایج و بحث

| | |
|----|---|
| ۵۰ | ۱-۳ بررسی هیدرودینامیکی جت‌های غیردایروی |
| ۵۰ | ۱-۳-۱ اندازه‌گیری شدت اختلاط |
| ۵۲ | ۲-۱-۳ ظهور امواج عرضی بر روی جت مربعی |
| ۵۳ | ۳-۱-۳ طول شکست ستون جت غیردایروی |
| ۵۶ | ۲-۳ جت‌های برخوردی |
| ۵۶ | ۱-۲-۳ بررسی رفتار هیدرودینامیکی جت‌های برخوردی در غیاب میدان الکتریکی |
| ۵۸ | ۲-۲-۳ قبل از شکست و بر روی ستون جت |
| ۵۹ | ۱-۲-۲-۳ بررسی انحراف ستون جت حاصل از برخورد جت‌های متقابل |
| ۶۴ | ۲-۲-۲-۳ بررسی طول شکست ستون جت |
| ۶۹ | ۳-۲-۳ بررسی قطرات تولید شده بعد از شکست ستون جت |
| ۷۳ | ۱-۳-۲-۳ بررسی اندازه قطرات تولید شده و تغییرات آن با ولتاژ اعمالی |
| ۷۴ | ۲-۳-۲-۳ بررسی فرکانس قطرات تولیدی و تغییرات آن با شدت میدان الکتریکی اعمالی |
| ۷۵ | ۳-۳-۲-۳ بررسی طول توسعه یافتگی قطرات تولیدی |
| ۷۹ | ۴-۳-۲-۳ بررسی نحوه توزیع قطرات تولید شده |
| ۸۱ | ۳-۳ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری |
| ۸۳ | پیشنهادات برای ادامه کار |
| ۸۴ | مراجع |

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ حرکت جفت گردابه‌ها در گوشه‌ها یا نقاط بانحنای زیاد و رخداد پدیده تعویض محوری ۲
- شکل ۱-۲ جت بیضوی درونمای عمود برهم ۳
- شکل ۱-۳ طرحواره برخورد جت‌های متقابل ۵
- شکل ۱-۴ ناپایداری ستون جت مایع در اثر آشفتگی کوچک و تشکیل قطرات و ریز قطرات ۹
- شکل ۱-۵ شکست یکنواخت ستون جت که در آن ریزقطره‌ای تولید نمی‌شود ۹
- شکل ۱-۶ نمودار طرحواره مدهای شکست ستون جت غوطه‌ور ۱۰
- شکل ۱-۷ طرحواره‌ی از یک ستون جت ناپایدار ۱۱
- شکل ۱-۸ نیروی قطبی به وجود آمده در اثر گرادیان ثابت دی الکتریک ۲۷
- شکل ۲-۱ طرحواره سکوی آزمایش، بررسی اثر تغییر شکل سطح مقطع ستون جت مایع ۳۸
- شکل ۲-۲ طرحواره سکوی آزمایش، بررسی اثر میدان الکتریکی بر روی ستون مایع حاصل از برخورد جت‌ها ۴۰
- شکل ۲-۳ پمپ مورد استفاده برای انتقال سیال کاری به همراه نمودار کارکرد آن ۴۲
- شکل ۲-۴ طول شکست ستون جت ۴۷
- شکل ۲-۵ پارامترهای هدف ۴۸
- شکل ۳-۱ عمق نفوذ تعویض محوری به ترتیب افزایش گوشه‌ها ۵۱
- شکل ۳-۲ تغییرات عمق نفوذ پدیده تعویض محوری به صورت تابعی از عدد وبر ۵۱
- شکل ۳-۳ ظهور امواج عرضی بر روی سطح جت مربعی ۵۳
- شکل ۳-۴ تغییرات طول شکست بی‌بعد ستون جت ۵۴
- شکل ۳-۵ گذار ستون جت از منطقه‌ی لایه‌ای به منطقه‌ی آشفته در حالت ۵۶
- شکل ۳-۶ مناطق مطالعاتی مورد بررسی ۵۸
- شکل ۳-۷ انحراف ستون جت در حضور میدان الکتریکی ۵۹

- شکل ۳-۸ زاویه انحراف جت به صورت تابعی از عدد وبرالکتریکی در اعداد وبر مختلف..... ۶۲
- شکل ۳-۹ تغییرات نقطه برخورد در ولتاژ بحرانی و گام‌های زمانی معین..... ۶۳
- شکل ۳-۱۰ منحنی پایداری. طول شکست ستون مایع، L_0 ، به صورت تابعی از عدد وبر، We ۶۵
- شکل ۳-۱۱ کاهش طول شکست جت، به علت تقویت شدن امواج متقارن روی سطح جت..... ۶۶
- شکل ۳-۱۲ تغییرات طول شکست جت، به علت تغییر نوع امواج سطحی..... ۶۷
- شکل ۳-۱۳ تغییرات طول شکست بی‌بعد، L/L_0 ، بر حسب عدد وبرالکتریکی، We_e ، با حضور امواج متقارن..... ۶۸
- شکل ۳-۱۴ تغییرات طول شکست بی‌بعد، L/L_0 ، بر حسب عدد وبرالکتریکی، We_e ، با حضور امواج نامتقارن..... ۶۹
- شکل ۳-۱۵ جریان یافتن ستون جت به دلیل گرادیان فشار..... ۷۰
- شکل ۳-۱۶ تغییرات قطر قطرات تولیدی به صورت تابعی از عدد وبر..... ۷۱
- شکل ۳-۱۷ نوسان قطر قطرات با اعمال میدان الکتریکی در $We = 46.454$ ۷۲
- شکل ۳-۱۸ تغییرات قطر قطرات با رشد شدت میدان الکتریکی در اعداد وبر مختلف..... ۷۳
- شکل ۳-۱۹ فرکانس تشکیل قطرات به صورت تابعی از عدد وبرالکتریکی..... ۷۵
- شکل ۳-۲۰ نمایش طول توسعه یافتگی و نوسانات قطرات تولید شده در طول مسیر سقوط..... ۷۶
- شکل ۳-۲۱ کاهش طول توسعه یافتگی قطرات تولیدی با رشد شدت میدان الکتریکی..... ۷۸
- شکل ۳-۲۲ نحوه توزیع قطرات تولیدی بر حسب اختلاف پتانسیل الکتریکی اعمالی..... ۸۰

فهرست جداول

- جدول ۲-۱ جزئیات هندسی نازل‌های استفاده شده..... ۳۹
- جدول ۲-۲ خواص هیدرودینامیکی و الکتریکی سیالات به کار رفته..... ۴۵
- جدول ۳-۱ ولتاژ بحرانی مربوط به هریک از اعداد وبر مورد استفاده در آزمایشات..... ۶۴

مقدمه:

جریان های دوفازی نقش بسیار مهمی در صنایع نفت و گاز، پتروشیمی، صنایع هسته‌ای و دارویی، صنایع غذایی و . . . ایفا می‌کنند. در این میان جریان‌های جت دوفازی مایع-گاز و مایع-مایع در بسیاری از کاربردهای صنعتی حضور دارند. بنابراین درک بهترین پدیده‌ها می‌تواند در بالا بردن عملکرد، کاهش هزینه و افزایش ضریب اطمینان در شاخه‌های مختلف مهندسی مؤثر باشد. از جمله چالش‌های پیشروی محققین در رابطه با جریان‌های دوفازی، استفاده از تکنیک‌های فعال و غیرفعال افزایش انتقال جرم و حرارت جهت بالا بردن بازده واحدهای صنعتی می باشد. یکی از روش های فعال، استفاده از میدان الکتریکی با ولتاژ بالا است که اصطلاحاً الکترو هیدرودینامیک (EHD) نامیده می شود. استفاده از این روش در واحد های صنعتی مدرن، به علت توان مصرفی پایین در مقایسه با راندمان آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این پایان‌نامه، تقابل بین میدان‌های هیدرودینامیکی و الکتریکی، از طریق برخورد دوجریان جت لایه‌ای در حضور میدان الکتریکی باولتاژ بالا، بررسی شده است. با توجه به اینکه در منطقه لایه‌ای جریان، بعد از برخورد جت‌های اولیه یک ستون مایع قائم تشکیل می‌شود، لذا قبل از وارد نمودن اثر میدان الکتریکی بر روی ستون جت حاصل و مطالعه تقابل دومیدان مذکور لازم بود تا فهم دقیق‌تری از هیدرودینامیک جریان ستون مایع لایه‌ای داشته باشیم. جهت تحقق این امر، در بخش نخست پژوهش، آزمایشی در غیاب میدان الکتریکی طراحی شد تا هم از این طریق اثراغتشافات سطحی هیدرودینامیکی وارد بر ستون جت بررسی شود و هم به روشن شدن قسمت کوچکی از مشخصه‌های جت که قبلاً کمتر مورد مطالعه قرار گرفته کمک کند. بعد از تبیین کامل اثر میدان هیدرودینامیکی بر روی ستون مایع، نوبت به مطالعه اثر میدان الکتریکی روی هیدرودینامیک ستون جت حاصل از برخورد جت‌های اولیه رسید که این مهم با استفاده از آرایش الکترودی مناسب جهت ایجاد شکل خاصی برای خطوط میدان الکتریکی حاصل می‌شود.

در فصل اول پایان نامه، مبانی نظری و پیشینه پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است. در فصل دوم به بیان روش های به کار رفته در انجام آزمایش ها پرداخته و در فصل پایانی، نتایج و تحلیل آن ها ارائه شده است.

فصل اول:

پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش

۱-۱ جت‌های غیردایروی

۱-۱-۱ اهمیت بررسی جت‌های غیردایروی

به دلیل کاربرد وسیع جت‌های غیردایره‌ای در صنایع مختلف، موضوع بسیاری از تحقیقات کاربردی در پنجاه سال اخیر مربوط به این نوع جت‌ها بوده است.

استفاده از این نوع جت‌ها به عنوان یک روش کارا در جهت کنترل غیرفعال جریان سیال، باعث بهبود عملکرد سامانه‌های فیزیکی، با هزینه‌های نسبتاً پایین‌تری خواهد شد. زیرا تنها هزینه‌ی استفاده از این روش، تغییر شکل دادن سطح مقطع نازل است. کاربرد عمده‌ی جت‌های غیردایروی مطالعه شده در این پایان‌نامه، شامل بهبود عملکرد اختلاط در مقیاس‌های بزرگ و کوچک برای جریان‌های مختلف از جمله مادون صوت و مافوق صوت [۱]، افزایش بازدهی موتورهای احتراق با کاهش ناپایداری‌ها و خروج گازهای نامطلوب [۲ و ۳]، پارازیت‌گیری، و افزایش انتقال حرارت [۴-۹] می‌شود. علیرغم پیشرفت‌های زیادی که در این زمینه صورت گرفته است، هنوز نکات ریز فراوانی وجود دارند که توجه کافی به آن‌ها نشده است، و در بخش اول این پژوهش سعی در روشن‌تر ساختن این نکات شده است.

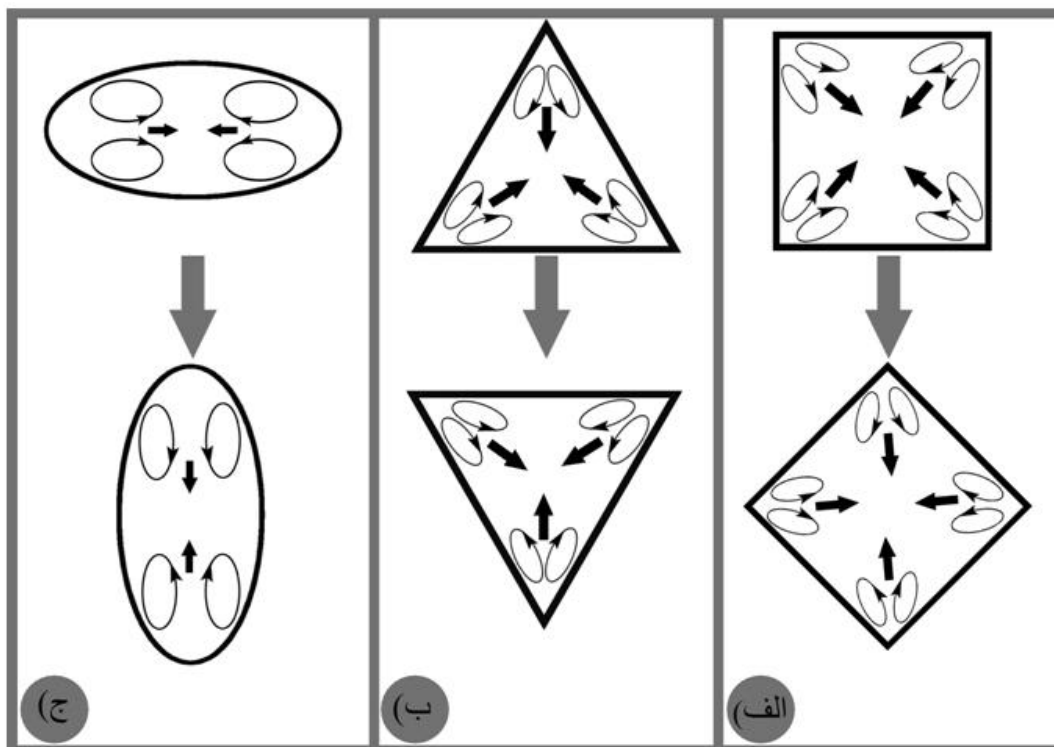
۱-۱-۲ مقدمه‌ای بر جت‌های غیردایروی

بیضی، مثلث و مربع سه هندسه اصلی از نازل‌های غیردایروی هستند که با بررسی آن‌ها می‌توان به نتیجه‌ای عمومی در مورد مشخصات ذاتی و ساختاری جت‌های غیردایره‌ای رسید.

در نازل‌های بیضوی ابعاد مقطعی در راستای دو صفحه عمود بر هم (محور بزرگ و محور کوچک بیضی) یکسان نیست. این مطلب به نوعی در نازل‌های با مقطع مربعی و مثلثی هم صادق است، یعنی در این نوع نازل‌ها ابعاد گوشه‌ها کاملاً متفاوت از قسمت‌های تخت است. لذا به دلیل وجود دو بعد طولی متفاوت در محیط نازل‌های غیردایره‌ای مطالعه شده، و ضریب انتشار نامساوی سیال کاری در این دو بعد انتظارمان این است که مشخصات جت‌های غیردایروی متفاوت از جت‌های دایروی باشند [۱۰].

۱-۳-۱ عامل اصلی تمایز جت های غیردایروی با نوع دایروی آنها

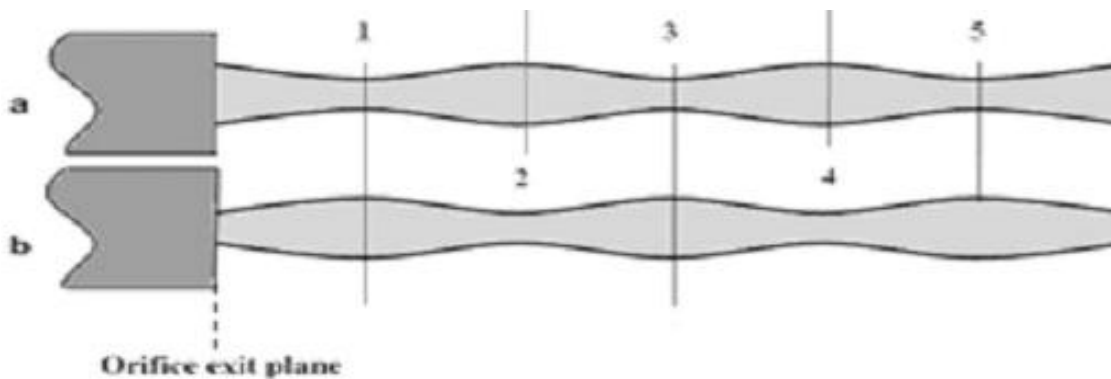
کشش سطحی سیال کاری عاملی است که باعث می شود جت های غیردایروی دائماً در تلاش برای رسیدن به پایدارترین حالت خود که همان جت دایروی است باشند، که این امر باعث جابه جایی افقی سیال درستون جت می شود. سرعت حرکت افقی در تناسب مستقیم با انحنای سطح جت است [۱۱]. لذا قسمتی از سطح جت که دارای انحنای بزرگتری است سریعتر از قسمت دیگر حرکت می کند. به دلیل حرکت سریعتر گوشه ها در جت های مربعی و مثلثی، و نقاط انتهایی قطر بزرگ جت بیضوی، یک جفت گردابه غیرهم جهت بر روی صفحه گذرنده از مقطع جت در این نقاط تشکیل می شود که چندین بار در آزمایش های قبلی اندازه گیری شده اند [۱۲-۱۴]. این گردابه ها در هر کدام از هندسه های مورد مطالعه به صورت طرحواره در شکل ۱-۱ نشان داده شده اند.



شکل ۱-۱ حرکت جفت گردابه ها در گوشه ها یا نقاط بانحنای زیاد و رخداد پدیده تعویض محوری^۱،

(الف) نازل مربعی، (ب) نازل مثلثی، (ج) نازل بیضوی

به دلیل جهت چرخش خاصی که هر کدام از گردابه‌ها نسبت به جفت خود دارند، سیال خروجی از نازل در گوشه‌ها یا نقاط دارای انحنای زیاد به سمت محور مرکزی جت حرکت می‌کند. نیروی کشش سطحی عاملی است که باعث می‌شود حرکت درون‌گرای گوشه‌ها با حرکت برون‌گرای بقیه نقاط در محیط جت همراه شود. یعنی به‌ازای هر مقدار حرکت به سمت محور مرکزی جت، به‌همان اندازه حرکت در جهت دور شدن از محور مرکزی در همسایگی آن نقطه صورت می‌پذیرد. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که، سطح مقطع جت در طول مسیر سقوطش بین اشکال مشابه با مقطع نازل درگیر می‌باشد، اما هر شکل نسبت به شکل بعدی خود به اندازه‌ی زاویه مشخصه هندسه نازل چرخیده است. یعنی درجت بیضوی مقاطع هم‌شکل با نازل با زاویه ۹۰ درجه، در نوع مثلثی با زاویه ۶۰ درجه و در نوع مربعی با زاویه ۴۵ درجه، به صورت تناوبی نسبت به هم در حال چرخش هستند. این عمل که بانام پدیده تعویض محوری شناخته می‌شود، در شکل ۱-۲ برای نوع بیضوی نازل‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ جت بیضوی در دو نمای عمود برهم

برخلاف نازل بیضوی، جت‌های خروجی از نازل‌های مربعی و مثلثی عمل تعویض محوری را در بیش از دو بعد انجام می‌دهند. بنابراین طبیعی است که در این نازل‌ها نتوان قادر به نمایش دوبعدی این پدیده شد.

نکته مهم دیگر این است که فرایند تعویض محوره‌های مقطع نازل، به صورت تناوبی تا طول مشخصی از ستون جت ادامه می‌یابد و بعد از آن قطع شده و به امواج عادی تبدیل می‌شود.

۲-۱ جت های برخوردی

۱-۲-۱ اهمیت بررسی تکنیک جت های برخوردی

تکنیک جت های برخوردی یک آرایش بی نظیر برای جریان سیال است، و به دلیل کاربرد گسترده اش در فرایندهای صنعتی، بخش اعظم تحقیقات دو دهه اخیر را به خود اختصاص داده است. این تکنیک یک روش قدرتمند برای تقویت فرایندهای انتقال (حرارت و جرم) مهیا می سازد، و در بسیاری از صنایع از جمله صنایع نفت و گاز، پتروشیمی، نیروگاه های هسته ای، صنعت طراحی هواپیماهای عمودپرواز، برش قطعات، خشک کردن کاغذ، صنایع فولاد، خنک کاری و پیشرانش جت ها و موشک ها مورد استفاده وسیع قرار گرفته است.

۲-۲-۱ مقدمه ای بر جت های برخوردی

جریان جت عبارت است از تخلیه سیال به داخل محیطی از جنس همان سیال دیگر که در حالت سکون یا حرکت با سرعتی غیر از سرعت جت می باشد. اصل کلی در تکنیک جت های برخوردی، این است که جریان جت ها را بر روی یک صفحه ی مشترک در جهت مخالف هم به یکدیگر برساند که بسته به اینکه جت ها در منطقه ی لایه ای باشند یا آشفته، دو حالت مختلف بعد از برخورد جت ها رخ می دهد. یعنی اگر جت های قبل از برخورد آشفته باشند، در اثر برخورد یک ناحیه ی نسبتا باریک تولید می شود که دیواره ی برخورد نامیده می شود که این دیواره ی برخورد شرایط بسیار خوبی را برای تقویت انتقال حرارت و جرم مهیا می سازد و اگر جت های قبل از برخورد لایه ای باشند، بعد از برخورد، یک ستون جت لایه ای تشکیل می شود. ولی این نوع جریان فقط محدود به صنعت نمی شود، چراکه این جریان یکی از مهمترین جریان های مورد مطالعه به منظور بررسی امواج سطحی حاصل از اغتشاشات روی ستون جت، و شکستی است که به دلیل رشد این امواج شکل می گیرد تا باعث تولید قطرات و ریز قطرات^۲ شود. لذا از جنبه آکادمیک نیز مطالعه ستون جت حاصل از جت های برخوردی حائز اهمیت فراوان است. به عنوان مثالی از کاربرد صنعتی تولید قطرات به روش ذکر شده می توان به تکنولوژی تولید پودر اشاره کرد که در آن شکل یکسان دانه های تولیدی، و اندازه همگن دانه ها مهمترین شدت ریزی آنها است.

۳-۲-۱ بررسی ساختار جت های متقابل قبل از برخورد

کلیه مطالعات جت های برخوردی براساس چهار ناحیه از جریان صورت می گیرد:

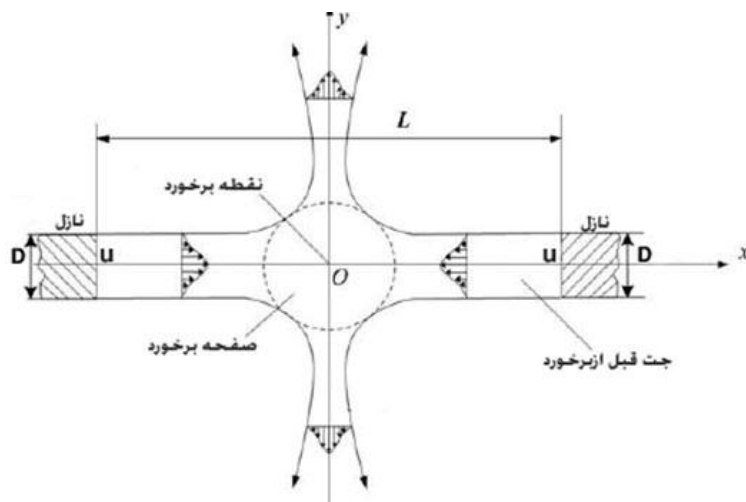
(۱) در ناحیه هسته پتانسیل، سرعت محوری تقریباً ثابت باقی مانده و برابر سرعت خروجی از نازل می باشد

(۲) در ناحیه جت آزاد سرعت به تدریج کاهش پیدا کرده و جریان در فضای اطراف پخش می شود

(۳) در ناحیه بعدی سرعت جریان در نزدیک ناحیه برخورد به سمت صفر میل می کند. فشار استاتیک در این ناحیه به بیشینه مقدار خواهد رسید

(۴) در ناحیه برخورد، جت از حالت محوری خارج شده و به صورت شعاعی پخش می شود. ناحیه برخورد تا جایی ادامه پیدا می کند که فشار روی سطح به فشار محیط میل کند

در جت های برخوردی، سرعت جریان از دهانه خروجی جت تا نقطه برخورد با کاهش تدریجی در خط مرکزی جت توام می باشد که در ناحیه برخورد به مقدار صفر می رسد. در راستای عمود بر خط مرکزی یعنی راستای y هم با فاصله گیری از محور مرکزی جت، سرعت کاهش می یابد تا در نهایت به صفر برسد که این رفتار در تمام مقاطع جت مشاهده می شود. شکل ۳-۱ طرحواره ای از برخورد جت های متقابل در حالت خاص زاویه صفر درجه ای جت ها نسبت به افق و پارامترهای مهم این تکنیک را نشان می دهد.



شکل ۳-۱ طرحواره برخورد جت های متقابل

از سر نازل تا قبل از نقطه برخورد، سرعت فقط دارای مولفه طولی (سرعت در راستای محور جت) است و مولفه عرضی سرعت صفر است و پدید آورنده جریان اصلی و توربولانس، مولفه طولی سرعت یا u است. ولی در روی صفحه برخورد، سرعت غالب سرعت عرضی است و تقریباً مولفه سرعت طولی تقریباً برابر صفر است. بنابراین بجاست که در روی صفحه برخورد، هیچ صحبتی از مولفه سرعت طولی به میان نیاوریم. ضمناً، هرچقدر فاصله نازل ها کمتر می شود، مقدار مولفه سرعت عرضی در روی صفحه برخورد بیشتر می شود که نتیجه ای منطقی است، چون استهلاک مولفه سرعت طولی قبل از برخورد کمتر شده و در هنگام تبدیل سرعت طولی به سرعت عرضی در لحظه برخورد مولفه عرضی سرعت هم بیشتر خواهد بود.

موضوع مورد بحث دیگر، توزیع فشار در ناحیه برخورد می باشد. همان طور که از معادله برنولی می دانیم، فشار در نقطه برخورد که سرعت صفر می باشد، به مقدار بیشینه رسیده و سپس با حرکت در راستای جت شعاعی با افزایش سرعت مقدار آن کاهش یافته و به مقدار فشار محیط میل می کند.

اگر سرعت جت های برخوردی قبل از برخورد متفاوت باشند، به دلیل غلبه جت پرسرعت برجتی که سرعتش کمتر است، صفحه برخورد خمیده شده و به سمت جت با سرعت ضعیف متمایل می شود. با کاهش سرعت جت ها، حساسیت صفحه برخورد برای جابه جایی کاهش می یابد.

۱-۲-۴ طبقه بندی جت های برخوردی

اگر سیال به محیطی با فشاری بیشتر از فشار محیط وارد شود جت غوطه ور^۳ و اگر وارد سیال هم فشار با محیط شود جت آزاد^۴ است. در واقع وقتی سیال جت شونده به درون یک سیال پایه غیر قابل امتزاج^۵ تخلیه می شود، جت از نوع اول، و وقتی که به هوا تخلیه می شود از نوع دوم می باشد. دینامیک هر دو حالت متفاوت است، یعنی در جت های غوطه ور یک لایه برشی در حدفاصل بین جت و سیال اطراف تشکیل می شود. این لایه برشی ناپایدار است و با ایجاد ناپایداری باعث آشفته گی زود هنگام می شود. ولی در جت های آزاد، حرکت آشفته در لایه برشی تاثیر قابل توجهی در جریان ندارد. به علت وجود لایه برشی ناپایدار در جت های غوطه ور، و ایجاد آشفته گی توسط آن، گذار از رژیم لایه ای به آشفته زودتر رخ می دهد. در نتیجه جت های برخوردی غوطه ور بر اساس عدد رینولدز Re ، از طریق سه رژیم پی در پی به صورت زیر توصیف می شوند:

^۳ Floated jet
^۴ Free jet
^۵ Immiscible Liquid

برای محدوده $Re < 690-700$ نوسانی روی سطح ستون حاصل از برخورد جت‌ها وجود نداشته و جریان ستون جت حاصل در این ناحیه می تواند لایه‌ای فرض شود. برای محدوده $700 < Re < 950$ نوسانات کوچکی به وجود آمد که در نتیجه‌ی این نوسانات، رژیم انتقالی به حالت آشفته در این ناحیه رخ می دهد، رژیم جریان کاملاً آشفته هم برای $Re > 950$ گزارش شده است.

در محدوده لایه‌ای، بعداز برخورد جت‌ها یک ستون جت استوانه‌ای لایه‌ای تشکیل می‌شود. درحالی که بعداز گذار به ناحیه آشفته، در منطقه برخورد جت‌های اولیه به جای ستون جت استوانه‌ای، یک صفحه برخوردی یا همان دیواره جت^۶ تشکیل می‌شود. صفحه برخورد، عبارت است از صفحه ساکنی که با افزایش دبی، عریض‌تر شده و بزرگی عرض آن متناسب با سرعت محوری جت‌های اولیه می‌باشد، یعنی هرچه سرعت محوری جت‌های قبل از برخورد بیشتر باشد، عرض صفحه برخورد هم بیشتر خواهد شد. سرعت محوری جت در نقطه برخورد، تماماً به فشار تبدیل می‌شود که با حرکت در راستای شعاعی، طبق معادله برنولی، فشار کاهش و سرعت افزایش می‌یابد، این کار تا جایی ادامه می‌یابد که فشار در روی صفحه برخورد به فشار محیط اطراف برسد. یعنی به محض رسیدن فشار روی صفحه برخورد به فشار محیط، مرز صفحه برخوردی به اتمام می‌رسد.

طبقه‌بندی مهم دیگری که در این قسمت باید مدنظر قرار گیرد، در مورد نوسانات خودبه‌خودی^۷ می‌باشد که به دلیل تشکیل گردابه‌ها در نقطه برخورد به وجود می‌آیند. این نوسانات عبارتند از انحراف‌های متوالی نقطه برخورد از محور تقارن. در محدوده $Re < 90-100$ هیچ نوسانی در نقطه برخورد جت‌ها دیده نخواهد شد، ولی در محدوده $100 \leq Re \leq 4800$ بسته به اینکه نسبت قطرنازل (D) به فاصله نازل‌ها از همدیگر (L)، چه مقداری داشته باشد نوسانات می‌توانند شکل بگیرند [۱۵]. در واقع می‌توان گفت، مقدار عدد رینولدز گذار از حالت پایای نقطه برخورد به حالت نوسانی آن کاملاً به ساختار هندسی وابسته است [۱۶]. این طبقه‌بندی باعث آشکار شدن رژیم جریان سیال در جت‌های برخوردی می‌شود، که برای طراحی و ساخت راکتورهای دارای جت‌های برخوردی قابل استفاده است.

۵-۲-۱ ستون جت^۸ لایه‌ای حاصل از برخورد جت‌ها

تشکیل جت از یک مایع تخلیه شونده به درون سیال غیرقابل امتزاج دیگر و شکست آن به قطرات، در فرایندهای صنعتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با شکست یک جت به قطرات، سطح تماس

^۶ Wall jet
^۷ Auto-Oscillation
^۸ Jet column