

## بررسی اثر زاویه قائم و خصوصیات هیدرولیکی بر نحوه توزیع جریان جت غلیظ منفرد با استفاده از مدل فیزیکی

جواد احدیان<sup>۱</sup>، فریبرز محمدی<sup>۱</sup>، حسین بهرامی<sup>۲\*</sup>

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. گروه مهندسی سواحل، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

### چکیده

در تخلیه پساب‌ها، استفاده از جت مستغرق معمولاً میزان ریسک‌پذیری و خسارت به محیط زیست منبع آب پذیرنده را کاهش می‌دهد. در این تحقیق تخلیه جت مستغرق غلیظ که از کف وارد منبع آب پذیرنده می‌شود، تحت تغییر پارامتر هندسی زاویه نسبت به افق (زاویه قائم)، دبی تخلیه و غلظت سیال تخلیه شونده و نیز پارامتر ارتفاعی نقطه‌ی اوج در منحنی‌های خروجی جت به عنوان پارامتر اصلی اثر زاویه مورد بررسی قرار گرفته است. برای دستیابی به اهداف تحقیق، یک مدل فیزیکی ساخته و در مجموع ۲۷ آزمایش در آن صورت پذیرفت. آزمایش‌ها در سه زاویه‌ی قائم جت ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، سه دبی مختلف و سه غلظت ۱۰۳۰، ۱۰۷۰ و ۱۱۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب برای سیال جت انجام گردید. در طی نتایج بدست آمده پارامتر بدون بعد حداکثر ارتفاع اوج منحنی تخلیه جت نسبت به عدد فرود چگال، بررسی گردید. نقطه اوج بیشتر این منحنی باعث اختلاط بیشتر جریان جت با لایه‌های سطحی منبع آب پذیرنده می‌شود. بر اساس نتایج بدست آمده، ارتباط مستقیمی بین پارامتر حداکثر ارتفاع منحنی‌های پایین افتادگی نسبت به عدد فرود چگال در تمامی زوایا وجود دارد. ضریب شیب این تغییرات به ترتیب در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ برابر ۱/۱۸، ۱/۹۷ و ۲/۳۳ بدست آمد. در خصوص پارامتر طولی منحنی‌های پایین افتادگی نتایج نشان داد که افزایش زاویه از ۳۰ به ۶۰ درجه باعث کاهش ۷۲ درصدی این پارامتر می‌شود. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که تأثیر عدد فرود چگال در افزایش طول طی شده‌ی منحنی‌های خروجی جتها در زوایای کمتر، بیشتر است.

واژگان کلیدی: جت غلیظ، زاویه قائم، دانسیته، پساب، نیروی شناوری

## ۱. مقدمه

رایج‌ترین روش تخلیه پساب‌های شور، بویژه برای کارخانجات و پروژه‌های کوچک، تخلیه سطحی در منابع پذیرنده می‌باشد. این روش باعث اختلاط اولیه کمی می‌شود و منجر به افزایش غلظت در محدوده تخلیه پساب، مخصوصاً به علت نیروی شناوری معکوس، در لایه‌های پائینی منبع پذیرنده می‌شود. برای افزایش راندمان اختلاط می‌توان از جت‌های مستغرق استفاده نمود، بدیهی است که با افزایش سرعت جریان جت، اختلاط افزایش می‌یابد. در بسیاری از مواقع برای رقیق سازی جریان، از جریان جت در آبهای ساکن مانند استخرهای نگهداری آب، مخازن سدها و دفع جت در کف آبهای عمیق مانند اقیانوس‌ها و دریاچه‌های عمیق استفاده می‌شود (Ahadiyan and Musavi, 2009). به طور کلی استفاده از جت‌های مستغرق یک راهکار سریع با ریسک کم از نظر زیست محیطی در تخلیه پساب به منابع آب پذیرنده از قبیل دریاها و اقیانوس‌ها به شمار می‌رود (احدیان، ۱۳۸۸). در مطالعات (Seo et al (2004) مشخصات جت‌های خروجی چندگانه افقی بررسی شده است. همچنین آنها پارامترهای اندازه‌گیری شده در جت منفرد افقی در آبهای ساکن کم عمق را با نتایج حاصل از تحقیق خود مقایسه نمودند. آنها آزمایش‌های خود را در فلوم آزمایشگاهی انجام دادند. در تحقیق آنها برای تعیین خط مرکزی جت در شرایطی که عدد رینولدز کمتر از ۲۰۰۰ است، ضریب اصلاحی اعمال گردیده و با معادله پیشنهادی Fan and Brooks (1969) مقایسه شده است. در زمینه‌ی مدلسازی ریاضی جریان جت غلیظ می‌توان به تحقیق Johnston et al (1994) اشاره نمود. این محققین مطالعات خود را در زمینه مدل ریاضی برای بررسی خصوصیات اختلاط جت غلیظ با آب نمک در شرایط منبع پذیرنده کم

عمق انجام دادند. مدل‌های ریاضی در تحقیقات گذشته از قبیل مدل‌های ریاضی Morton et al (1956) و Fan and Brooks (1969) از فرض عمیق بودن منبع پذیرنده و عدم تاثیر دیواره‌ها استفاده نموده‌اند؛ این در حالی است که، این محققین در مدل ریاضی خود پارامترهای دیواره‌های مرزی، تاثیر پدیده کواندا و سطح آزاد منبع پذیرنده را نیز لحاظ نموده‌اند. در تحقیق Lee and Seo (2000) برای تعیین خصوصیات جت چگال در منبع پذیرنده ساکن و متحرک، از شبیه سازی عددی پخشیدگی و مدل گوسین گردابه‌ای استفاده شده است. در تحقیق آنها نتایج مدل ریاضی با داده‌های آزمایشگاهی و اندازه‌گیری شده صحت‌سنجی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، مدل ارائه شده توسط آنها قابلیت کاربرد در بررسی جت‌های دمایی در شرایط منبع پذیرنده عمیق ساکن و متحرک هم‌سو و غیر هم‌سو را داراست. پروفیل سرعت، توزیع و انتقال شناوری توسط تغییرات آشفستگی بصورت خود متشابه می‌باشد و می‌توان آن را به صورت توزیع گوسین تعریف نمود (به نقل از احدیان، ۱۳۸۸):

$$\frac{u_{eg}}{U_{eg}} = F(\eta) = \exp(-\eta^2) \quad (1)$$

$$\frac{g'}{g'_c} = G(\eta) = \exp\left(-\frac{\eta^2}{\lambda^2}\right) \quad (2)$$

که  $u_{eg}$  و  $U_{eg}$  به ترتیب، سرعت افزایشی موضعی و خط مرکزی، و  $g'$  و  $g'_c$  به ترتیب شتاب گرانشی موثر موضعی و خط مرکزی (و برابر با  $g \frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ ) که  $\Delta\rho$  اختلاف چگالی جت و منبع پذیرنده و  $\rho_0$  چگالی منبع می‌باشد. پارامترهای  $F$ ،  $G$  و  $g$  توابع تشابه،  $\eta$  پارامتری بدون بعد بوده که به صورت  $r/b$  تعریف می‌شود ( $r$ ، فاصله شعاعی از خط مرکزی جت و  $b$ ، بر اساس تعریف

اختلاط جریان جت می‌توان به تحقیق Cipollina et al (2005) اشاره نمود. این محققین تحقیقات آزمایشگاهی خود را در زمینه‌ی بررسی خصوصیات هندسی جت‌های مایل (زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) در منبع پذیرنده دارای جریان متحرک انجام داده‌اند. نتایج تحقیق آنها نشان داده است که تمامی خصوصیات هندسی جت به عدد فرود چگال مرتبط بوده است و تغییرات چگالی جت، تأثیر معنی داری بر رفتار جت نداشته است. در مورد جت‌های سطحی می‌توان به تحقیق Chris and Joseph (2011) اشاره نمود. آنها در مورد جت‌های سطحی با زوایای حمله‌ی مختلف در منابع آب پذیرنده ساکن آزمایش‌هایی را انجام دادند. در تحقیق آنها اثر زاویه بر نحوه‌ی جریان خروجی از جت بررسی شده است. آنها نشان دادند که در زوایای حمله‌ی بیشتر و غلظت‌های بالاتر، منحنی‌های پایین افتادگی اختلاط شدیدتری در منابع آب پذیرنده ایجاد می‌نمایند. از طرفی در خصوص شناوری منفی باید به تحقیق ریاضی-آزمایشگاهی Oliver et al (2013) اشاره نمود. این محققین تأثیر مرزهای جدار بر شناوری منفی را مورد بررسی قرار دادند. آنها از مدل انتگرالی اصلاح شده برای پیش‌بینی شناوری منفی در نزدیکی میدان تخلیه استفاده نمودند و نشان دادند که در این ناحیه کاهش شار شناوری باعث می‌شود که مدل انتگرالی اصلاح شده در عین سادگی از دقت بالایی برخوردار باشد.

با توجه به آنچه که در بخش مروری بر منابع گذشت، اثر زاویه‌ی نسبت به افق در جت‌های کفی بر خصوصیات هیدرولیکی-پخشیدگی کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ از این‌رو، در تحقیق حاضر هدف اساسی بررسی این متغیر در خصوصیات جریان خروجی از جت‌های مستغرق می‌باشد. از آنجایی که یکی از مهمترین پارامترها

Fischer et al, 1979 بعنوان مشخصه نصف عرض معرفی می‌شود)،  $\lambda$  فاکتور انتشار می‌باشد و جهت محاسبه مقدار اسکالر گسترش کمیت‌هایی که عریض تر از پروفیل سرعت است و بر اساس تحقیقات Papanicolaou (1984) مقداری ثابت و معادل  $1/0.67$  می‌باشد. در شرایطی که جریانی چگال از نازلی افقی که به اندازه کافی از بستر دریا فاصله دارد خارج شود، در ابتدا رفتاری همانند جت آزاد از خود نشان داده و متعاقباً قبل از برخورد پساب به بستر در اثر خاصیت شناوری مقدار قابل توجهی از منبع پذیرنده به داخل پساب وارد خواهد شد. با توجه به توضیحات ارائه شده، در صورتی که محل تزریق پساب نزدیک به بستر باشد، امکان ورود آب محیط پذیرنده از طرف مرز محدود شده در جت، بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد؛ ولی، در مرزهای باز جریان، این محدودیت وجود نخواهد داشت؛ در نتیجه، بر اساس اصل برنولی، یک اختلاف فشار در مقاطع عرضی جریان جت توسعه خواهد یافت که جت را به سمت مرز مذکور منحرف می‌کند. چنانچه فاصله محل تزریق جت تا بستر بیشتر کاهش یابد، در نقطه‌ای بحرانی، اتصال دینامیک بین جت چگال و بستر اتفاق خواهد افتاد. مطالعات زیادی درباره جت‌های آزاد افقی در منابع پذیرنده ثابت انجام شده است. که از آنجمله می‌توان به مطالعات Jirka (2006)، Johnston and Volker (1993)، Knudsen and Wood, Johnston et al (1994) و Wood (2002) اشاره نمود. از طرفی Jirka (2007) در خصوص نحوه رقیق سازی جریان جت مستغرق تحت زوایای مختلف آزمایش‌هایی را انجام داده است که بر اساس نتایج وی زوایای ۳۰ تا ۴۵ درجه باعث ایجاد حداکثر مقدار رقیق سازی در نقطه اوج منحنی‌های پایین افتادگی می‌شوند. از جمله مطالعات دیگر در زمینه‌ی اثر زاویه بر خصوصیات

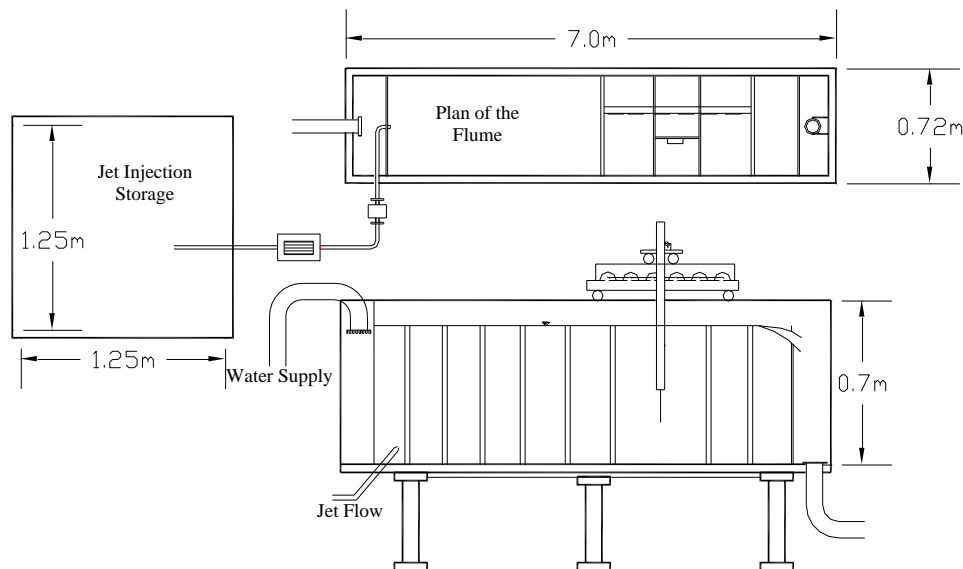
در میزان اختلاط جریان جت خروجی با محیط پذیرنده، نسبت ارتفاعی نقطه‌ی اوج منحنی‌های پایین افتادگی است، لذا در پژوهش حاضر این موضوع به تفصیل بررسی شده است. با این توصیف پژوهش حاضر به دنبال بررسی اثر شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی بر نحوه توزیع و گسترش جریان خروجی جت در منبع آب پذیرنده ساکن می‌باشد.

**۲. مواد و روش‌ها**

**آزمایش‌ها**

همان‌طوری که در بخش قبلی اشاره شد، هدف اصلی این تحقیق بررسی توزیع و گسترش جریان خروجی جت مستغرق تحت تغییر زاویه نسبت به افق می‌باشد. با توجه به هدف مطالعه حاضر اقدام به ساخت مدل آزمایشگاهی جهت انجام آزمایش‌های این تحقیق گردید. مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز برپا شد. آزمایش‌های مربوطه تحت شرایط سیال سنگین برای جت برنامه‌ریزی شد.

سیال سنگین با استفاده از محلول آب نمک در غلظت‌های مختلف تهیه گردید. پس از برنامه‌ریزی آزمایش‌ها ساختار مدل فیزیکی نهایی گردید. برنامه‌ریزی انجام آزمایش‌های این تحقیق بدین صورت پایه‌ریزی شد که برای کلیه آنها سه زاویه قائم جت نسبت به صفحه افقی شامل: ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه در سه دانسیته ۱/۰۴، ۱/۰۷ و ۱/۱ گرم بر سانتیمتر مکعب در نظر گرفته شد. با توجه به برنامه‌ریزی آزمایش‌ها تعداد ۲۷ آزمایش مد نظر قرار گرفت. آزمایش‌ها در فلومی به طول ۷/۰ متر، عرض ۰/۷۲ متر و ارتفاع ۰/۷ متر انجام شد. بخش‌های مختلف مدل فیزیکی شامل، مخزن تامین آب و پمپ انتقال آب به فلوم آزمایش‌ها، مخزن تزریق جت و پمپ اختلاط به منظور همگن کردن سیال جت، فلوم آزمایش‌ها و پمپ تزریق جت و در نهایت جت با زاویه خروجی مختلف نسبت به افق می‌باشد. برای تزریق جت پمپی در نظر گرفته شد که بتواند هدهای مختلفی ایجاد نماید. شکل (۱) این موضوع را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. پلان و مقطع فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده

پمپ جت دارای ارتفاع آبدهی ۵۰ متر و دبی نهایی ۰/۴ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. از طرفی به منظور کنترل دبی خروجی جت علاوه بر تجهیزات اندازه‌گیری که در بخش‌های بعدی بدان اشاره می‌شود، از یک شیر قطع و وصل استفاده شد. برای اندازه‌گیری دانسیته سیال جت قبل از ورود به محیط پذیرنده از هیدرومتر 151H استاندارد شده به روش ASTM، استفاده شد. از طرفی برای غلظت‌های خیلی زیاد از روش وزنی حجمی و قانون شناوری استفاده گردید. مخزن سیال جت به صورت مکعب با ابعاد مشخص در هر راستا ساخته شد که حجم مفید آن با ارتفاع ۰/۸۵ متر محاسبه می‌گردید. لذا با توجه به غلظت مدنظر در آزمایش‌ها، مقدار نمک مورد نیاز محاسبه می‌گردید؛ و سپس نمک در مخزن جداگانه‌ای به طور کامل حل می‌شد و در صورت از اطمینان از حل کامل نمک، محلول به درون مخزن ذخیره سیال جت منتقل می‌گردید. از طرفی پمپ اختلاط این مخزن وظیفه چرخش سیال در آن را بر عهده داشت تا همواره سیال جت بصورت همگن باقی بماند. یکی دیگر از پارامترهایی که در این تحقیق اندازه‌گیری شد، مقدار شوری و دمای سیال پذیرنده و سیال جت بود. اندازه‌گیری شوری به منظورهای مختلف از قبیل بررسی تغییرات غلظت در طول حرکت منحنی پایین‌افتادگی جریان جت، کنترل همگنی سیال جت درون مخزن ذخیره و میزان رقیق‌شدگی در هر آزمایش انجام گردید. برای نیل به اهداف از EC متر آزمایشگاهی WTW inolab مدل ۷۲۰ استفاده گردید. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری شوری و دما را به طور همزمان دارا بود. خطای دستگاه برای شوری تا  $2 \frac{\mu S}{cm}$ ، ۰/۰۰۱ بود و برای شوری‌های بالاتر که برحسب  $\frac{mS}{cm}$  ارائه می‌شدند، این خطا به مقدار ۰/۰۱ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر می‌رسید.

همچنین دقت این دستگاه برای اندازه‌گیری درجه حرارت، ۰/۱ درجه سانتیگراد بود. لازم به توضیح است که حداکثر شوری قابل اندازه‌گیری در این دستگاه ۵۰۰ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر است. در حین انجام آزمایش‌ها تغییرات حداکثر شوری در طول منحنی‌های پایین‌افتادگی با استفاده از این دستگاه اندازه‌گیری می‌شد. شایان ذکر است که در آزمایشگاه رابطه بین شوری، غلظت و دانسیته در طی جداولی استخراج گردیده بود. این رابطه با استفاده از این وسیله و هیدرومتر برای محدوده کاربرد آن و ترازوی دقیق دیجیتالی ۰/۰۱ گرمی، استخراج و تغییرات دانسیته در طول خط مرکزی تراژکتوری (منحنی‌های تراژکتوری) تعیین شد. با توجه به اینکه دانسیته تابعی از دما می‌باشد، در دماهای مشخص و با ثابت نگهداشتن دما این رابطه‌ها مشخص شد. رابطه بین غلظت و دانسیته و به تبع آن شوری و دانسیته با استفاده از هیدرومتر 151H بدست آمد که این وسیله حداکثر تا جرم حجمی ۱/۰۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای آب قادر به اندازه‌گیری دانسیته است. از طرفی اندازه‌گیری دانسیته توسط این وسیله نیز تابعی از دما بوده و از این رو برای اندازه‌گیری پارامتر مربوطه ضریب تصحیح دما و همچنین ضریب تصحیح هلال محاسبه و در محاسبات منظور شد. با توجه به اینکه دمای سیال عاملی مهم در حرکت جریان جت در سیال پذیرنده می‌باشد، آزمایش‌ها در شرایطی انجام شد که گرادیان دما بین سیال پذیرنده و سیال جت صفر باشد. لذا تاثیر درجه حرارت در حرکت جت در سیال پذیرنده حذف شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان جت از دبی‌سنج الکترو مغناطیس استفاده شد. دبی‌سنج الکترومغناطیس MAGAB 3000 ۲ اینچی برای این منظور انتخاب گردید. اصول اندازه‌گیری دبی‌سنج‌های الکترومغناطیسی بر اساس قانون فارادی پیرامون اثر القاء میدان

سیال جت با ماده زنگی مخصوص که حدود ۱۰ گرم آن قابلیت رنگ‌دهی بسیار زیاد برای دو متر مکعب آب را دارا بود، تلفیق می‌شد. این موضوع دانسیته سیال جت را دچار تغییر نمی‌نمود و از طرفی حدود حرکتی جت در سیال پذیرنده را که کاملاً شفاف بود و از آب شرب شهری تهیه می‌شد، با وضوح کامل نمایان می‌ساخت. لازم به توضیح است که برای دستیابی به بهترین حالت برای اندازه‌گیری منحنی‌های پایین افتادگی، آزمایش‌های زیادی اجرا شد تا بهترین حالت برای قرارگیری موقعیت خط‌کش‌ها بدست آید. از این رو با استفاده از خط‌کش‌های نصب شده در موقعیت مناسب، اندازه‌گیری منحنی‌ها امکان‌پذیر بود.

### آنالیز ابعادی

با توجه به پارامترهای حاکم بر پدیده جریان جت و به منظور دستیابی به روابط حاکم بصورت عبارات بدون بعد در این تحقیق، اقدام به آنالیز ابعادی بین پارامترهای موثر در این پدیده شد. پارامترهای موثر در حرکت سیال جت در سیال پذیرنده را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

(۳)

$$f(\rho_a, \mu_j, u_0, u_m, d_p, x, \rho_j, g, Z_u, Z_0, Z_2, \theta_c) = 0$$

در معادله بالا،  $\rho_a$ ، جرم حجمی سیال پذیرنده،  $\mu_j$ ، لزجت مطلق اولیه سیال جت،  $u_0$ ، سرعت اولیه ورودی جت،  $u_m$ ، سرعت مرکزی در مکان‌های مختلف از محل جت،  $d_p$ ، قطر جت،  $x$ ، فاصله طولی فلاکس جریان جت از محل جت،  $\rho_j$ ، جرم حجمی سیال جت،  $g$ ، شتاب ثقل،  $Z_u$ ، ارتفاع مرز بالایی فلاکس جت،  $Z_0$ ، ارتفاع محل جت در بالاترین قسمت قطر،  $Z_2$ ، ارتفاع مرز پایینی فلاکس جت و  $\theta_c$  زاویه‌ی قائم نازل جت می‌باشند. با استفاده از آنالیز ابعادی بین پارامترهای فوق، روابط بدون بعد زیر برای این پدیده استخراج شد:

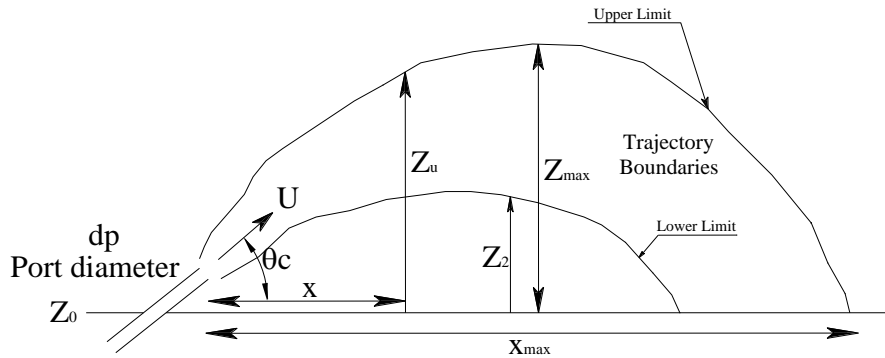
مغناطیسی بر جسم هادی متحرک استوار می‌باشد. دقت اندازه‌گیری در این دستگاه برای سرعت‌های بیشتر، بالاتر بوده به طوریکه در سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه دارای خطای معادل ۰/۸ درصد و برای سرعت‌های بیش از ۱ متر بر ثانیه دارای خطای ۰/۵ درصد می‌باشد. در این تحقیق علاوه بر این موضوع دقت اندازه‌گیری به صورت حجمی مورد بررسی و بازبینی قرار گرفت که مشخص شد این فلومتر دارای دقت بسیار بالایی در اندازه‌گیری دبی سیال می‌باشد. با توجه به اینکه جریان جت، دارای غلظت و دانسیته بیشتری نسبت به جریان پذیرنده است حرکت آن در فلوم با منحنی پایین افتادگی در سیال پیرامون همراه خواهد شد. این موضوع به صورت شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طوری که در این شکل نمایان است، جریان جت در سیال پذیرنده باعث پیدایش دو مرز بالایی و پایینی (محدوده حرکتی جریان جت) شده و از طرفی بر اساس آزمایش‌های انجام شده جریان جت در قسمت اولیه مسیر حرکتی خود به سمت بالا امتداد یافته که باعث اختلاط بیشتر جریان جت با لایه‌های فوقانی جریان پذیرنده می‌گردد. برای اندازه‌گیری حد بالایی و پایینی منحنی‌های پایین افتادگی، بر روی فلوم آزمایش‌ها، خط‌کش‌های با دقت یک میلی‌متر که بر روی کاغذ شفاف ترانس پرانت چاپ شدند، چسبانیده شد. این کاغذها به ارتفاع فلوم (در حدود ۱ متر) و به فاصله هر ۱۵ سانتیمتر روی آن در طرف فلوم نصب شدند. دیواره‌های فلوم که از جنس پلکسی‌گلاس ساخته شده بودند، برای سهولت دیداری و قرائت خط‌کش‌ها مناسب بودند. نصب خط‌کش‌ها به گونه‌ای صورت پذیرفت که هر دو خط‌کش متناظر در دو طرف فلوم دقیقاً روبروی یکدیگر قرار گرفته که این موضوع برای به حداقل رساندن خطای چشمی برای قرائت منحنی تراژکتوری بود. از طرفی

(۴)

$$f\left(\frac{\rho_j U_0 d_p}{\mu_j}, \frac{U_0}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_a} g d_p}}, \frac{Z_u}{d_p}, \frac{Z_2}{d_p}, \frac{x}{d_p}, \theta_c, \frac{u_m}{u_0}\right) = 0$$

جت به سرعت اولیه می‌باشد. با توجه به این روابط در کلیه آزمایش‌های انجام شده پارامترهای مختلف در روابط بدون بعد، اندازه‌گیری و مقادیر آنها محاسبه گردید. لازم به توضیح است که برنامه‌ریزی آزمایش‌ها به گونه‌ای انجام شد که در تمامی آنها عدد رینولدز جریان جت در محدوده جریان متلاطم قرار گیرد؛ به طوری که در کلیه آزمایش‌ها حداقل عدد رینولدز برابر با ۴۷۰۰ بدست آمد. بنابراین، در ارائه نتایج از تأثیر عدد رینولدز صرف نظر شده است. شکل (۲) برخی از پارامترهای موثر این تحقیق را نمایش می‌دهد.

در معادله (۴) پارامتر اول به عدد رینولدز فلاکس ورودی، پارامتر دوم عدد فرود چگال جریان جت که با  $Fr_d$  نمایش داده می‌شود، پارامتر سوم نسبت ارتفاعی مرز بالایی فلاکس جت، پارامتر چهارم نسبت ارتفاعی مرز پایینی فلاکس جت، پارامتر پنجم نسبت طولی جریان پیش رونده فلاکس جت (تراژکتوری)، پارامتر ششم زاویه قائم جت و پارامتر هفتم نسبت سرعت خط مرکزی تراژکتوری در مکان‌های مختلف از محل



شکل ۲. نمایش پارامترهای موثر بر حرکت جریان جت

سیال پذیرنده عامل اصلی اهمیت نیروی شناوری است. برآیند نیروی وزن و نیروی شناوری باعث توسعه جریان جت مستغرق چگال<sup>۱</sup> در جریان پذیرنده می‌شود؛ لذا با تغییر نیروی‌های شناوری و وزن، توسعه فلاکس جریان جت تغییر نموده؛ به طوری که، باعث ایجاد منحنی‌های پایین افتادگی مختلف در سیال پیرامون می‌گردد. در این تحقیق مطابق با کلیه برنامه آزمایش‌ها که در جدول (۱) خلاصه شده است، کلیه منحنی‌های پایین افتادگی که از این پس به اختصار به آن تراژکتوری گفته می‌شود، ترسیم و نتایج مربوطه استخراج گردید.

مطابق با شکل (۲) از آنجایی که فرضیه تحقیق بر مبنای اثر زاویه‌ی قائم جت بر میزان اختلاط است، لذا کلیه متغیرهای هیدرولیکی جت (دبی، سرعت و غلظت) و متغیرهای هندسی آن (قطر و زاویه‌ی قائم)، به عنوان متغیرهای مستقل این تحقیق به کار گرفته شدند؛ به تبع این متغیرها، پارامترهای ارتفاعی که شامل  $Z$ ‌های مختلف و طول منحنی‌های پایین افتادگی است، مورد بررسی قرار گرفت.

### ۳. نتایج

عامل مهم حرکت جریان جت در سیال پذیرنده تاثیر نیروهای شناوری، اصطکاکی و مومنت خواهد بود. تفاوت دانسیته بین سیال جت و

جدول ۱. خلاصه سناریوهای مطرح شده آزمایش‌های این تحقیق

دانسیتة سیال جت kg/m <sup>3</sup>	دبی جت	زاویه پلان جت درجه
۱۰۳۰	Q1	۱۵
۱۰۷۰	Q2	۴۵
۱۱۰۰	Q3	۶۰

در جدول (۱) سون دوم دبی جریان جت بوده که برای هر سری از آزمایش‌ها سه مقدار متفاوت برای آن در نظر گرفته شده است. به طور کلی در این پژوهش ۲۷ آزمایش انجام شد و در هر آزمایش، مقدار دبی با استفاده از فلومتر دقیق الکترومغناطیس اندازه‌گیری گردید؛ این در حالی است که این ستون به صورت پارامتری نشان داده شده است؛ زیرا، کنترل دبی خروجی جت توسط شیر قطع و وصل دستی انجام می‌شد و امکان برقراری یک دبی یکسان در هر سری از آزمایش وجود نداشت. حال به دلیل این‌که با استفاده از رابطه‌ی پیوستگی، سرعت خروجی نازل قابل محاسبه بوده و با جایگذاری در رابطه‌ی بدون بعد عدد فرود چگال، مقدار موثر آن به صورت بدون بعد وارد محاسبات می‌گردد، تنظیم دبی به مقادیر کاملاً یکسان در هر سری از آزمایش ضروری به نظر نمی‌رسد. با این توصیف مقادیر دبی مطابق با جدول (۳) اندازه‌گیری شده است. به هر حال برای هر

دانسیتة‌ی سیال جت و هر زاویه‌ی قائم آن، سه دبی تزریق نزدیک به هم مورد آزمایش قرار گرفت. در کل رنج تغییرات دبی مطابق با جدول (۳) از ۰/۱۴۲ تا ۰/۴۳۷ مترمکعب بر ساعت می‌باشد. با این توضیح، مطابق با جدول (۱) ابتدا کلیه منحنی‌های تراژکتوری به صورت پارامتری مختصات  $(x, z)$  که  $x$  نمایش طولی و  $z$  نمایش ارتفاعی منحنی‌ها را بر عهده داشت، ترسیم گردید. در این راستا برای هر آزمایش حد بالایی و حد پایینی منحنی‌های پایین افتادگی اندازه‌گیری شد. در جدول (۲) نمونه‌ای از داده‌های منحنی‌های یاد شده برای دانسیته ۱/۰۷ گرم در سانتیمتر مکعب، دبی تزریق حدود ۰/۲۲ مترمکعب بر ساعت در زوایای خروجی مختلف ارائه شده است. لازم به توضیح است که ابتدا منحنی‌ها بصورت پارامترهای بعددار ترسیم و سپس با استفاده از روابط بدون بعد استخراج شده بصورت بدون بعد ترسیم شدند.

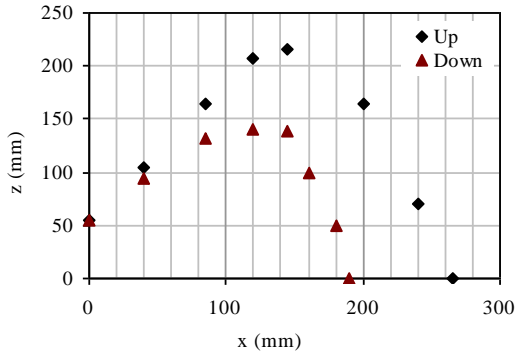
جدول ۲. مختصات اندازه‌گیری شده منحنی‌های پایین افتادگی ( $\rho_0=1.07g/cm^3$ )

$\theta_c=60^0$ Q=0.22 m <sup>3</sup> /hr				$\theta_c=30^0$ Q=0.22 m <sup>3</sup> /hr				$\theta_c=45^0$ Q=0.22 m <sup>3</sup> /hr			
حد بالایی		حد پایینی		حد بالایی		حد پایینی		حد بالایی		حد پایینی	
x	z	x	z	x	z	x	z	x	z	x	z
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	95	0	95	0	60	0	60	0	55	0	55
10	160	10	115	50	95	50	85	40	105	40	95
30	215	30	165	100	110	100	95	85	165	85	132
70	255	70	170	200	155	200	90	120	208	120	140
90	265	90	120	290	165	290	30	145	215	145	138
100	275	100	100	400	130	300	0	200	165	160	100
150	245	140	0	490	0			240	70	170	50

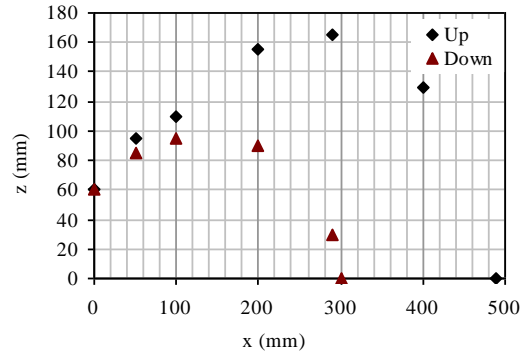


منحنی‌های مربوط به داده‌های مندرج در جدول (۲) را نشان می‌دهد.

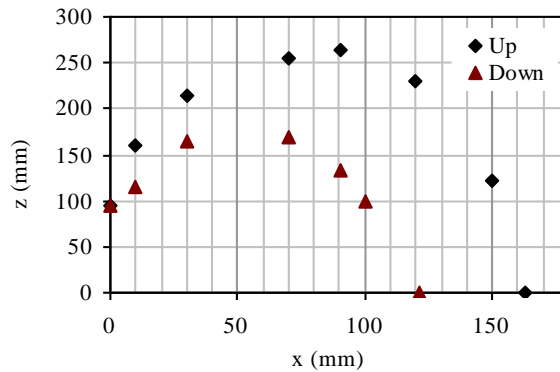
مطابق با اعداد مندرج در جدول (۲) شکل مربوط به حدود بالایی و پایینی منحنی‌های افتادگی برای کلیه آزمایش‌ها ترسیم شد. شکل (۳)



(ب) زاویه ۴۵ درجه



(الف) زاویه ۳۰ درجه



(ج) زاویه ۶۰ درجه

شکل (۳) منحنی‌های پایین افتادگی ( $\rho_0=1.07\text{g/cm}^3$ ,  $Q_0=0.22\text{ m}^3/\text{h}$ ) در زوایای مختلف

جدول (۳) خلاصه نتایج و پارامترهای اصلی مربوط به آزمایش‌های جت در شرایط سیال غلیظ در دانسیته، زاویه و دبی‌های مختلف را نمایش می‌دهد.

در جدول (۳) نتایج مربوط به آزمایش‌های با چگالی ۱/۰۷ گرم در سانتیمتر مکعب و دبی اولیه جت ۰/۲۳ لیتر بر ثانیه و یا سرعت اولیه جت حدود ۰/۶۱ متر بر ثانیه آورده شده است.

جدول ۳. خلاصه نتایج پارامترهای اصلی جت در زوایا و دانسیته‌های مختلف

شماره آزمایش	$Q_0$ ( $m^3/hr$ )	$Z_{max}$ (cm)	$X_{max}$ (cm)	$Fr_d$	$Z_{max}/d_p$	$K_i$ ( $Z_{max}/d_p$ )/ $Fr_d$	$K_x$ ( $X_{max}/d_p$ )/ $F$
$\theta_c = 30^0$							
1	0.421	25	49.5	20.5	22.727	1.109	0.097
2	0.381	22.7	48.5	18.2	20.636	1.134	0.117
3	0.324	12.5	35	8.7	11.364	1.313	0.323
4	0.282	11.7	35.5	7.4	10.636	1.430	0.408
5	0.654	22.5	54.5	17.3	20.455	1.179	0.140
6	0.4	16	39	13.0	14.545	1.123	0.188
7	0.3	13.5	38	9.8	12.273	1.259	0.289
8	0.22	10.5	29	7.2	9.545	1.322	0.382
9	0.199	15	29.5	10.1	13.636	1.350	0.195
$\theta_c = 45^0$							
1	0.265	31.5	33.5	13.0	28.636	2.210	0.082
2	0.296	31.5	35.5	14.5	28.636	1.981	0.078
3	0.147	21.5	30.5	7.7	19.545	2.533	0.184
4	0.395	24	30	11.2	21.818	1.953	0.112
5	0.313	19.7	28.5	8.9	17.909	2.009	0.162
6	0.437	24.5	32	12.2	22.273	1.830	0.107
7	0.317	20.5	27	10.6	18.636	1.759	0.124
8	0.219	16	17.5	7.4	14.545	1.979	0.149
9	0.42	26.5	29	13.6	24.091	1.769	0.080
$\theta_c = 60^0$							
1	0.296	26.5	13	9.6	24.091	2.498	0.051
2	0.41	33.5	16.5	13.6	30.455	2.237	0.036
3	0.22	18	10	7.6	16.364	2.166	0.074
4	0.189	28	12	9.8	25.455	2.590	0.044
5	0.259	36.5	20	14.4	33.182	2.312	0.038
6	0.234	14.5	7.5	6.4	13.182	2.063	0.081
7	0.191	13	7.5	5.3	11.818	2.221	0.108
8	0.385	27	11.3	10.6	24.545	2.308	0.039
9	0.142	21	11	7.4	19.091	2.585	0.071

**۴. بحث و نتیجه گیری**

بر اساس نتایج مندرج در جدول (۳) و همچنین مطابق با نتایج حاصل شده در خصوص توسعه منحنی‌های پایین افتادگی در جریان پذیرنده

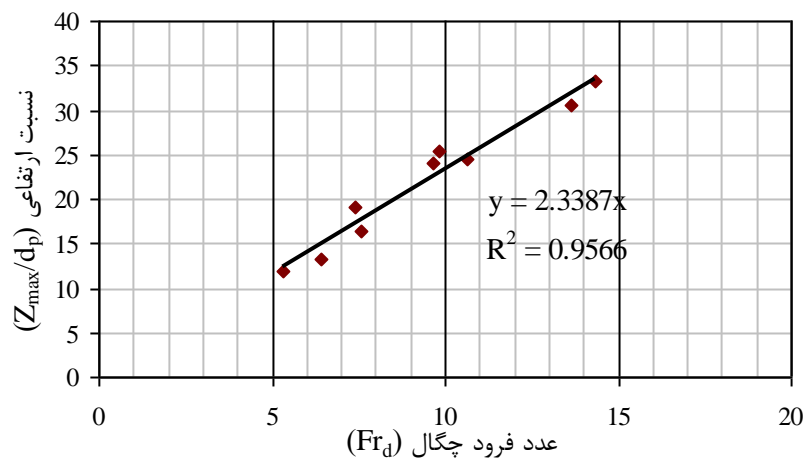
مشاهده شده است که با افزایش زاویه جت نسبت به افق، طول این منحنی‌ها به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. برای هر یک از منحنی‌های یاد شده که در بخش قبل به

را بررسی نمود و بررسی جامع را نمی‌توان انجام داد، لذا، برای تحلیل دقیق‌تر نمایه‌های از هر منحنی استخراج و کلیه پارامترهای حاکم مورد بررسی قرار گرفت. از این رو، برای بررسی حداکثر ارتفاع اوج منحنی‌های تراژکتوری در جریان جت غلیظ از ترسیم مقادیر بدون بعد،  $Z_{max}/d_p$  در برابر عدد فرود چگال برای حالت‌های مختلف استفاده شد. با این توصیف اشکال (۴) و (۵) این موضوع را نشان می‌دهند.

نمونه‌ای از آنها بصورت پارامترهای بعد دار  $(x, z)$  اشاره شد، می‌توان آنها را بصورت بدون بعد مطابق با توابع بدون بعد زیر ترسیم نمود:

$$f\left(\frac{x}{d_p}, \frac{Z_u}{d_p}, \frac{Z_2}{d_p}\right) = 0 \quad (5)$$

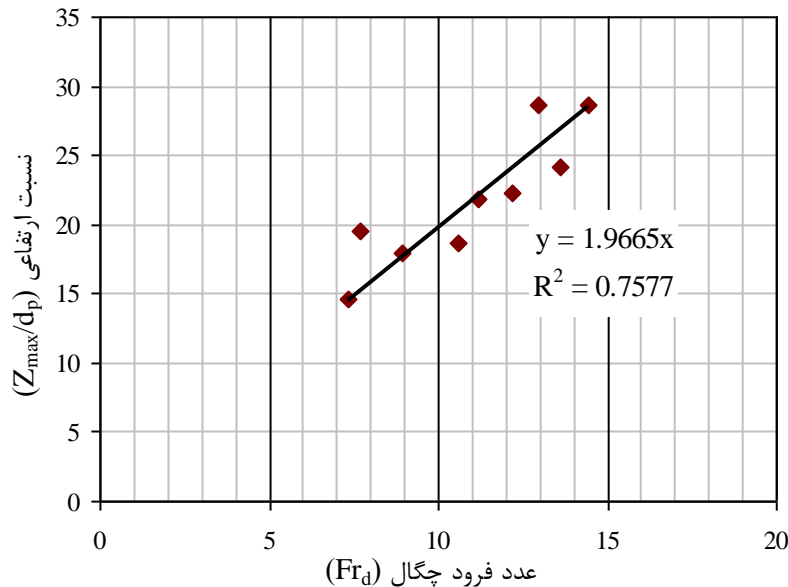
که در این رابطه پارامتر اول نسبت طول طی شده‌ی منحنی، پارامتر دوم نسبت ارتفاعی حد بالایی و پارامتر سوم نسبت ارتفاعی حد پایینی منحنی‌های پائین افتادگی است. از آنجایی که با استفاده از روابط فوق برای هر یک از منحنی‌های پائین افتادگی به تنهایی می‌توان منحنی مربوطه



شکل ۴. تغییرات نسبت ارتفاعی  $Z_{max}/d_p$  تراژکتوری نسبت به عدد فرود چگال (۶۰ درجه)

مانند سیپولینا و همکاران (۲۰۰۵) و رابرتس (۱۹۹۷) که به ترتیب این ضریب را  $۲/۵۳$  و  $۲/۲۲$  محاسبه نمودند، همخوانی دارد. در شکل (۵) نتایج مربوط به زاویه ۴۵ درجه آورده شده است.

همانگونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، می‌توان با تقریب نسبتاً مناسبی رابطه خطی بین حداکثر ارتفاع منحنی‌های تراژکتوری نرمال شده (بدون بعد) و عدد فرود چگال در جت‌های غلیظ با زاویه ۶۰ درجه برقرار نمود. شیب خط مذکور در حدود  $۲/۳۳$  بوده به نتایج تحقیقات پیشین



شکل ۵. تغییرات نسبت ارتفاعی  $Z_{max}/d_p$  تراژکتوری نسبت به عدد فرود چگال (۴۵ درجه)

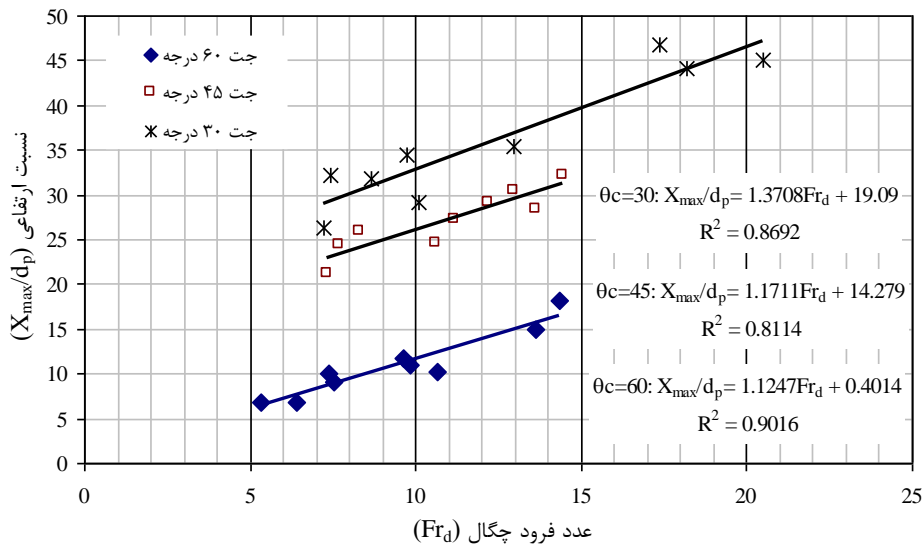
اینکه مؤلفه‌ی عمودی مومنتم جریان خروجی جت کاهش می‌یابد، لذا خصوصیات منحنی‌های پایین افتادگی تحت تأثیر آن قرار می‌گیرد. در زاویه ۴۵ درجه، وجود برخی گردابه‌ها و جریان‌های خفیف برگشتی در اثر تداخل بیشتر جریان، تغییرات بیشتری در این زمینه حادث گردیده است. همچنین این بررسی‌ها برای جت با زاویه ۳۰ درجه نیز مورد بررسی قرار گرفت که روند تغییرات مشابه جت با نتایج جت با زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه بود که نشان دهنده وجود رابطه معنی‌دار بین پارامترهای مورد بررسی است. در زاویه ۳۰ درجه نیز بررسی‌های مشابه انجام شد و شیب خط تغییرات پارامتر اصلی اختلاط ( $Z_{max}/d_p$ ) در مقابل عدد فرود چگال ۱/۱۸ بدست آمد و این در حالی است که در تحقیق سیپولینا و همکاران (۲۰۰۵) مقدار این شیب برابر با ۱/۰۵ استخراج شده بود. این اختلاف تقریباً ۱۲/۴ درصد بیشتر از مقدار پیشین ارائه شده می‌باشد.

یکی دیگر از پارامترهایی که در تحقیق حاضر برای منحنی‌های پایین افتادگی مورد بررسی واقع

شکل (۵) تغییرات پارامتر بدون بعد حداکثر ارتفاع منحنی‌های پایین افتادگی نسبت به عدد فرود چگال در جریان جت غلیظ با زاویه ۴۵ درجه را نشان می‌دهد. ضریب رگرسیون خط برازش داده شده از بین نقاط در حدود ۰/۷۶ است؛ به این جهت نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که شیب این خط دارای اختلافی در حدود ۲۰ درصد با نتایج تحقیقات سیپولینا و همکاران (۲۰۰۵) می‌باشد. لازم به توضیح است که آزمایش‌های آنها در شرایط اختلاف دمایی بین سیال جت و سیال پذیرنده انجام شده است و از این رو می‌توان اذعان داشت یکی از دلایل این اختلاف، تغییرات دمایی بین سیال جت و پذیرنده می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود، کمتر شدن زاویه خروجی جت نسبت به افق باعث افزایش تغییرات در روند رابطه عدد فرود چگال و حداکثر ارتفاع تراژکتوری جت می‌شود. علت این پدیده را می‌توان در افزایش طول منحنی‌های پایین افتادگی در زوایای کوچکتر و در نتیجه افزایش مسیر منحنی‌های پایین افتادگی دانست. در زوایای کمتر به دلیل

شد، حداکثر طول طی شده هر یک از منحنی‌ها در شرایط هیدرولیکی و هندسی متفاوت جریان جت غلیظ می‌باشد. پارامتر بدون بعد مربوطه،  $X_{max}/d_p$  است که تغییرات آن در مقابل عدد فرود چگال بررسی شده است. شکل (۶) این تغییرات را نشان می‌دهد.

شد، حداکثر طول طی شده هر یک از منحنی‌ها در شرایط هیدرولیکی و هندسی متفاوت جریان جت غلیظ می‌باشد. پارامتر بدون بعد مربوطه،  $X_{max}/d_p$  است که تغییرات آن در مقابل عدد فرود چگال بررسی شده است. شکل (۶) این تغییرات را نشان می‌دهد.



شکل (۶) تغییرات نسبت طولی،  $X_{max}/d_p$  منحنی‌های پایین افتادگی نسبت به عدد فرود چگال

در زوایای کمتر در افزایش طول طی شده‌ی منحنی‌های خروجی جتها بیشتر می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

بر اساس آنچه که در این تحقیق گذشت، خلاصه نتایج را می‌توان به صورت زیر بیان نمود: به طور کلی پارامتر بدون بعد حداکثر ارتفاع اوج تراژکتوری نسبت به عدد فرود چگال، تغییرات ارتفاعی حد بالایی منحنی پایین افتادگی را بیان می‌نماید. این بخش از منحنی‌های یاد شده باعث اختلاط بیشتر جریان جت با لایه‌های سطحی منبع آب پذیرنده شده و اختلاط بیشتری را باعث می‌شود. بر اساس نتایج بدست آمده برای کلیه آزمایش‌های انجام شده، ارتباط مستقیمی بین پارامتر بدون بعد حداکثر ارتفاع اوج تراژکتوری نسبت به عدد فرود دنسیمیتریک در تمام زوایای جریان جت آب غلیظ وجود داشت که این ضریب به ترتیب برای زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ برابر ۱/۱۸، ۱/۹۷ و ۲/۳۳ می‌باشد. این

همانطوری که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود با افزایش زاویه در یک عدد فرود چگال ثابت، نسبت طولی منحنی‌های پایین افتادگی به شدت کاهش می‌یابد. این در حالی است که برای تغییر زاویه از ۳۰ به ۴۵ و از ۳۰ به ۶۰ درجه این کاهش به طور متوسط و به ترتیب ۲۱ و ۷۲ درصد می‌باشد. همچنین برای تغییر زاویه از ۴۵ به ۶۰ درجه میزان کاهش نسبت طول منحنی‌های یاد شده ۶۵ درصد می‌باشد. بنابراین مشاهده می‌شود که تغییرات از ۴۵ به ۶۰ درجه اختلاف فاحشی را در طول طی شده‌ی منحنی‌های پایین افتادگی ایجاد می‌نماید. دلیل اصلی این اختلاف کاهش شدید مولفه‌ی عمودی مومنتم که عامل اصلی جلوبرنده‌ی فلاکس جت است می‌باشد. از طرفی شیب تغییرات پارامتر طولی منحنی‌های پایین افتادگی در مقابل عدد فرود چگال برای زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب برابر با ۱/۳۷، ۱/۱۷ و ۱/۱۲ می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر عدد فرود چگال

stratified flows. Part I: The single round jet." *Environ. Fluid Mech.*, 4, 1–56.

Jirka, G. H., (2007), "Buoyant Surface Discharges into Water Bodies. II: Jet Integral Model.", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 9, pp. 21-36.

Johnston, A. J., Volker, R. E., (1993). "Round buoyant jet entering shallow water", *Journal of Hydraulic Research* Vol. 31, No. 1, pp. 121-138.

Johnston. A. J., Philips. C. R. and Volker. R. E. (1994). "Modeling Horizontal Round Buoyant Jets in Shallow Water", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 120, No. 1. Paper no. 3192.

Knudsen, M., Wood, I. R., (1990). "The interaction between a boundary and a horizontal buoyant jet" *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 28, No. 3, pp. 375-385.

Lee. J. and Seo. I. W. (2000). "Numerical Simulation of Advected Thermal Using Gaussian-Vortex Model", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.126, No. 10, Paper No. 21726.

Morton, B. R., Taylor, G., and Turner, J. S. (1956). "Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources." *Proc. R. Soc., Series A*, 235, pp.1-23.

Oliver, C. J., Davidson, M. J. and Nokes, R. I. (2013). "Predicting the near-field mixing of desalination discharges in a stationary environment". *Journal of Desalination* Vol. 30, pp. 148-155.

Papanicolaou, P. N. (1984). "Mass and momentum transport in a turbulent buoyant vertical axisymmetric jet", PhD thesis, W. M. Keck Lab. of Hydr. And Water Resour., California Institute of Technology, Pasadena, Calif.

Seo I. W., Kwon S. J. and Yeo H. K. (2004). "Merging Characteristics of Buoyant Discharges from Rosette-Type Diffusers in Shallow Water", *KSCE j. of civil Eng.* Vol. 8, No. 6, pp. 679-688.

Wood, M. J., (2002). The behaviour of dense plumes near boundaries and an evaluation of modelling approach. Master's thesis, University of Manchester, UK.

موضوع با نتایج تحقیقات گذشته مانند تحقیق سیپولینا و همکاران (۲۰۰۵) و رابرتس (۱۹۹۷) همخوانی دارد. در خصوص پارامتر طولی منحنی‌های پایین افتادگی نتایج نشان داد که افزایش زاویه باعث کاهش این پارامتر می‌شود به طوری که افزایش زاویه از ۳۰ به ۶۰ درجه باعث کاهش ۷۲ درصدی آن می‌گردد. از طرفی محاسبات و بررسی‌ها نشان می‌دهد که تأثیر عدد فرود چگال در زوایای کمتر در افزایش طول طی شده‌ی منحنی‌های خروجی جتها بیشتر می‌باشد.

### منابع

احمدیان، ج.، (۱۳۸۸) "بررسی زاویه همگرایی بر طول اختلاط جت‌های مستغرق با استفاده از مدل فیزیکی و ریاضی"، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۹۷ صفحه.

Ahadiyan, J. Musavi-Jahromi, S. H. (2009). " Effects of jet hydraulic properties on geometry of trajectory in circular buoyant jets in the static ambient flow." *J. Applied Science* Vol. 9, No. 21, pp 3843-3849.

Chris C.K. Lai Joseph H.W. Lee (2012). " Mixing of inclined dense jets in stationary ambient. " *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 6, No. 1, pp. 9-28.

Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F., and Nicosia, S. (2005). "Benchscale investigation of inclined dense jets". *J. Hydraul. Eng.*, 131(11), pp. 1017–1022.

Fan, L-N., and Brooks, N. H. (1969). "Numerical solutions of turbulent buoyantjet problems." Res. rep. KH-R-18, W. M. Keck Laboratory of Hydraulic and Water Resource., California Institue of Technical. Pasadena, California.

Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., and Brooks, N. H. (1979), "Mixing in inland and coastal waters", Academic Press, San Diego.

Jirka, G. H. (2006). "Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded

## Effect of vertical angle and hydraulic properties on flow distribution of single dense jet using physical model

J. Ahadiyan<sup>1</sup>, Mohhamadi, F.<sup>2</sup>, Bahrami. H.<sup>3</sup>

### Abstract

One of the solutions for the rapid draw down influences of sewage into stagnant ambient fluids such as seas and oceans is the utilizing of submerged jets. The exploitation of submerged jets reduces the peril and risk of creating wastewater to ambient environment in the water resources. The injection flow that is evacuated via the submerged jets is affected by the environmental, geometrical and hydraulic variables of the jet. This study shall focus on the impact of the vertical angle; draw down discharge and density of the flow on the distribution pattern of a single density jet. In the experiments programming, a physical model was used and a total of 27 tests were performed. The experiments were carried out on 3 vertical angles of 30°, 45° and 60° respectively, 3 discharge rates and 3 different concentration of the injected fluid. The results obtained is focused on the maximum height parameters ( $Z_{max}/d_p$ ) of the trajectories curve due to the greatest amount of mixing of the upper layers of ambient fluid and the jet flow injection occurs. Moreover; a direct relationship can be observed between the non-dimensional parameters of the maximum height of trajectory point and the Densymetric Frude number in all of the vertical angles. While, the slope coefficient of this variation for the angles of 30°, 45° and 60° degrees are 1.18, 1.97 and 2.33 respectively. Findings show a 72% decrease of longitudinal parameter of trajectory ( $X_{max}/d_p$ ) due to increasing vertical angle from 30 to 60 degrees. In addition, in the lower vertical angles of jets the effect of Densymetric Frude number is increased.

**Keywords:** Dense jet, Vertical angle, Sewage, Density, Buoyancy Force