

## بررسی عوامل موثر بر توسعه جریان جت‌های مستغرق در منابع آب پذیرنده ساکن

جواد احدیان<sup>۱\*</sup> - حبیب موسوی جهرمی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۸۸/۴/۲۳

تاریخ پذیرش: ۸۸/۸/۱۷

### چکیده

در این مقاله عوامل موثر بر جریان جت مستغرق تخلیه شونده به منابع آب پذیرنده ساکن مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، کلیه پارامترهای جت، پارامترهای محیطی و پارامترهای هندسی موثر بر جریان جت‌های دایره‌ای مستغرق، بررسی و با استفاده از آنالیز ابعادی روابط بدون بعد مربوطه استخراج شد. برای بررسی چگونگی ارتباط بین این پارامترها یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شد و آزمایش‌های مختلف در هندسه و جریان غلیظ متفاوت جت به طور مجموع ۲۱۵ آزمایش انجام گردید. در این تحقیق خصوصیات مهم منحنی‌های تراژکتوری جریان جت که شامل طول شناوری مثبت، حداکثر طول مرز بالایی و حداکثر طول مرز پایینی بررسی شده است. از طرفی با استفاده از سیستم سرعت سنجی آکوستیک پروفایلر، UVDP، پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف از جت اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار گرفته است. پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده با روابط تئوری توزیع نرمال گوسین مقایسه و مشخص شد کلیه پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده از تابع گوسین پیروی می‌کنند. همچنین غلظت و میزان رقیق شدگی جریان در مکان‌های مختلف از جت، اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌های سرعت و غلظت در مکان‌های مختلف از جت نهایتاً مشخص نمود که داده‌های اندازه‌گیری شده با نتایج تئوری تطابق خوبی دارد. نتایج حاصل از این تحقیق با استفاده از تحلیل آماری نشان داد که رابطه غیر خطی با دقت قابل قبولی بین خصوصیات تراژکتوری با عوامل توسعه جریان جت برقرار است. یافته‌ها نشان داد که به طور کلی با افزایش زاویه همگرایی جت، از ۱۵ درجه به ۹۰ درجه مقدار طول نهایی مرز بالایی تراژکتوری در حدود ۲۵ درصد، و برای مرز پایینی در حدود ۲۸ درصد افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** جت مستغرق، زاویه همگرایی، تراژکتوری، الگوی جریان، ضریب انتشار

### مقدمه

کاهش دهد. جریان خروجی جت مستغرق با سیال غلیظ باعث ایجاد منحنی‌های تراژکتوری شده در این گونه جریان‌ها مشخص نمودن طول منحنی مذکور که وابسته به غلظت و زاویه حمله جت تغییر می‌نماید، به لحاظ دیدگاه‌های مختلفی حائز اهمیت است. از طرفی لازم به توضیح است که منحنی تراژکتوری در بخشی از مسیر حرکت خود در جریان پذیرنده رو به بالا حرکت نموده که باعث اختلاط بیشتر در لایه‌های سطحی جریان می‌شود، در این گونه مواقع نیز اطلاع از وضعیت پخشیدگی سطحی نیز می‌تواند مفید واقع شود.

تئوری جت‌های مستغرق توسط آلبرسون و همکاران (۳) که با فرضیاتی نظیر الگوی فشار هیدرواستاتیکی و تشابه پروفیل‌های سرعت در مکان‌های مختلف از جت منطبق بر توزیع گوسین ارائه شده است، ضریب انتشار جت برای سرعت و غلظت بررسی نیز شده است. بر اساس تحقیقات دل بن و همکاران (۵) اختلاف دانسیته بین سیال جت و سیال پیرامون در قسمت ورودی و در لایه‌های سطحی جریان باعث افزایش طول اختلاط اولیه می‌شود. در برخی از

با توسعه صنعت، آلودگی‌های حاصل از ضایعات صنعتی بر محیط زیست تأثیر نامطلوبی را گذاشته است. بدین منظور همواره سعی می‌گردد که پساب ناشی از فعالیت‌های کارخانه‌ها و غیره که به ناچار به رودخانه و دریاها منتهی می‌شود ابتدا کمی تصفیه شده و سپس در فاصله زمانی کوتاهی با آبهای رودخانه‌ها و دریاها مخلوط گردند، تا با کاهش غلظت از اثرات آلودگی آنها کاسته شود. یکی از راههای سریع برای رقیق نمودن آلودگی‌هایی که به رودخانه‌ها یا دریاها می‌ریزند استفاده از جت‌های مستغرق متلاطم است که می‌تواند در فاصله زمانی نسبتاً کوتاهی مقدار زیادی آب و جریان آلودگی را به علت شرایط متلاطمی بالای خود مخلوط نموده و اثرات مخرب آن را سریعاً

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی

علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

(Email: Ja-ahadiyan@yahoo.com)

(\* - نویسنده مسئول)

فلاکس جریان جت و خصوصیات سرعت سقوط ذرات رسوبی موجود در پساب و همچنین سرعت جریان پذیرنده وابستگی شدید دارد.

## مواد و روش‌ها

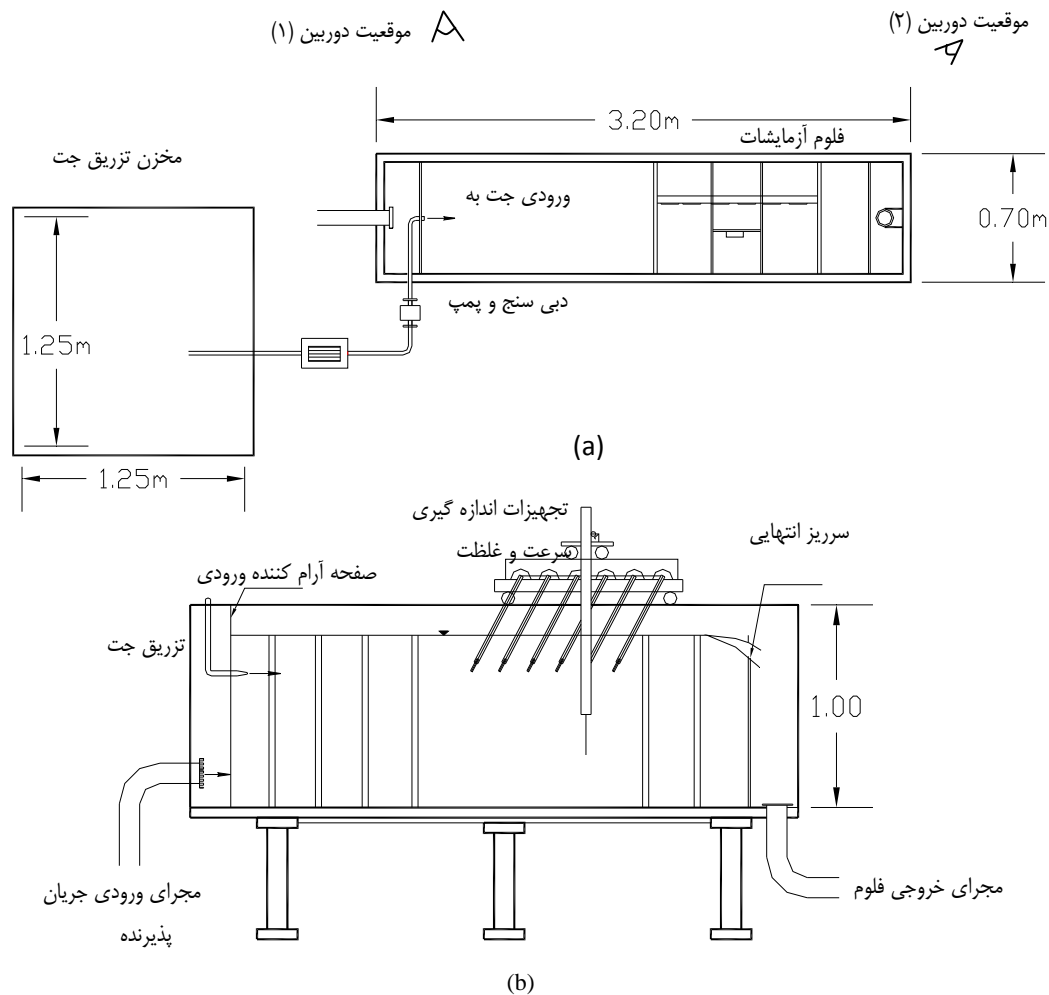
### بسط مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق اثر پارامترهای جت، محیطی و هندسی بر خصوصیات منحنی پایین افتادگی بررسی شده است. در این راستا طولی که در آن منحنی تراژکتوری رو به بالا حرکت می کند که از آن به عنوان طول شناوری مثبت (X) یاد می شود، نیز در مطالعه حاضر بررسی شده است. جهت نیل به هدف این تحقیق یک مدل فیزیکی به طول ۳/۲ متر، به عرض ۰/۶ متر و به ارتفاع ۰/۹۵ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز به همراه تجهیزات مربوطه ساخته شد. شکل (۱) پلان و پروفیل طولی این مدل آزمایشگاهی را نمایش می دهد.

جهت انجام آزمایش‌ها تجهیزاتی که مورد استفاده قرار گرفتند و ساخته شدند، شامل فلوم آزمایشگاهی، مخزن ذخیره سیال تزریق جت، حوضچه و پمپ تامین آب جریان پذیرنده، پمپ تزریق جت، پمپ اختلاط سیال جت و ارابه مستقر بر روی فلوم جهت اندازه‌گیری سرعت و غلظت در مکان‌های مختلف از محل جت بود. وسایل اندازه‌گیری پارامترهای مختلف شامل، دبی سنج دقیق با دقت ۰/۲ درصد برای اندازه‌گیری دبی جریان جت، دانسیته متر برای اندازه‌گیری تغییرات جرم حجمی سیال در طول فلاکس جت، دماسنج برای اندازه‌گیری دمای سیال جت و سیال پذیرنده، point gage برای برداشت حد بالایی تراژکتوری جریان جت و دستگاه سرعت سنج زاویه‌ای DOP2000 بود. از طرفی به فاصله هر ۱۵ سانتیمتر یک خط کش دقیق با دقت ۱ میلی‌متر و به ارتفاع ۱ متر، چاپ شده بر روی کاغذ روغنی شفاف بر روی دیواره فلوم که از جنس پلکسی گلاس ساخته شده بود، چسبانیده شد، همچنین خط کش‌های طولی در سراسر فلوم برای اندازه‌گیری طول طی شده تراژکتوری در نظر گرفته شد.

در طی انجام آزمایش‌ها مطابق با شکل ۱ سیال پذیرنده از طریق مخزن تامین و پمپ، به فلوم منتقل می شد و تا ارتفاع معلومی فلوم را پر می نمود. از طرفی جریان جت نیز از طریق مخزن تزریق و پمپ مربوطه به درون فلوم آزمایشگاهی منتقل می شد. اندازه‌گیری‌ها شامل طول و ارتفاع تراژکتوری در سرعت‌های ورودی مختلف سیال جت، سرعت در مکان‌های مختلف از محل جت، غلظت و دمای سیال تزریق شونده، غلظت و دما در مکان‌های مختلف از محل جت در امتداد خط‌کش‌های نصب شده بر روی دیواره فلوم، دبی جریان جت و همچنین غلظت و دمای منبع آب پذیرنده بود. کلیه دیواره‌های جانبی فلوم از جنس پلکسی گلاس ساخته شد.

فعالیت‌های مهندسی غلظت جریان جت را به گونه‌ای کنترل می‌نمایند که تراژکتوری حاصل (Trajectory) به سمت جلو رانده شود. در تحقیقات تورنر (۱۲) و کونز (۱۰) پخشیدگی ناشی از شوری و دما برای جت‌های مستغرق بررسی شده است. در تحقیقات ایشان مشخص شده است درحالتی که جریان پیرامون تقریباً ساکن باشد، پخشیدگی مولکولی گرما از نمک بیشتر بوده که منجر به تشکیل پدیده salt-fingering گشته که در بالای لایه گرم و شور به وقوع می‌پیوندد بررسی عددی و کمی این پدیده توسط کونز (۱۰) برای جریان‌ات ساحلی انجام شده است. در پدیده Salt-fingering منحنی تراژکتوری که دارای شرایط متفاوتی نسبت به سیال پیرامون است، بررسی می‌شود. تحقیقات ماکسوارتلی (۱۱) و تورنر (۱۱) مشخص نمود که اختلاط جریان جت در عدد رینالدز پائین (R) در فاصله‌ای مشخص خاتمه یافته و منحنی تراژکتوری ایجاد می‌شود. آزمایش‌ها و تحقیقات مشابه در اعداد رینالدز بالاتر و در حالت دو بعدی و سه بعدی تاکنون گزارش نشده است. بر اساس تحقیقات فیشر (۶) بازه‌های توربولنت در پخشیدگی مضاعف ناشی از شوری و دما برای جریان پیرامون ساکن، چندان مورد نیاز نیستند، چرا که در طبیعت این گونه جریان‌ها در شرایط تقریباً آرام در منابع آب پذیرنده تخلیه می‌گردند. بررسی رفتار جت‌های مستغرق در جریان‌های لایه بندی شده از قبیل سواحل دریا و یا مخازن پشت سدها به صورت تئوری و آزمایشگاهی توسط جیرکا (۷ و ۸) انجام شده است. تخلیه فاضلاب‌های خانگی و صنعتی به خلیجها و نواحی ساحلی و همچنین انتشار آلودگی ناشی از دود نیز از جمله جریان‌های لایه بندی شده است که در مسائل زیست محیطی از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار می‌باشد. وی جریان جت مستغرق منفرد و چندگانه را شبیه سازی ریاضی نمود و نتیجه‌گیری کرد برای ناحیه نزدیک جت که هنوز اختلاط کاملی میان جریان جت و سیال پذیرنده رخ نداده است، می‌توان از مدل انتگرالی با دقت قابل قبول بهره جست. احدیان و موسوی (۱) از داده‌های آزمایشگاهی برای بررسی تراژکتوری ایجاد شده در اثر جریان خروجی در پایین دست نیروگاه‌ها استفاده و به صورت آماری روابط با ضریب همبستگی قابل قبولی را برای معادله منحنی تراژکتوری ارائه نمودند. همچنین آنها با استفاده از مدل ریاضی Flow-3D تغییرات مومنتم در فلاکس جت را با استفاده از شبیه سازی ریاضی معادلات حاکم بررسی نمودند که بر اساس نتایج آنها مومنتم جریان جت در طول فلاکس جت، رو به کاهش می‌باشد. تحقیقات کاترسون و همکاران (۴) بر مبنای ترسیب ناشی از پساب جریان خروجی از جت‌های دایره ای مستغرق را که به صورت افقی در منبع آب پذیرنده تخلیه می‌گردید پایه‌گذاری گردید. آنها رفتار متوسط رسوب گذاری ناشی از جریان جت مستغرق را به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. بر اساس نتایج پژوهش این محققین رسوب گذاری ناشی از جریان جت به سه پارامتر اساسی نیروی مومنتم، شناوری



شکل ۱- (a) پلان (b) مقطع طولی مدل آزمایشگاهی تزریق جریان جت در جریان پذیرنده

تزریق انتقال داده می‌شد. دانسیته سیال جت از طریق محاسباتی با روش شناوری و اندازه‌گیری آزمایشگاهی با استفاده از هیدرومتر دقیق ۱۵۱H استاندارد شده در یک دمای مشخص محاسبه و برداشت می‌شد. از طرفی با توجه به تأثیر دما بر دانسیته آب نمک و همچنین پخشیدگی مولکولی، در کلیه آزمایش‌ها اختلاف دمایی بین منبع آب پذیرنده و مخزن جت صفر در نظر گرفته شد تا از تأثیر این پدیده ممانعت به عمل آید. برای این منظور فلوم آزمایشگاهی و مخزن تزریق به صورت همزمان و از یک منبع تأمین آب پر می‌گردید. با استفاده از EC متر دقیق دیجیتالی پرتابل با دقت ۰/۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر که دارای سنسور اندازه‌گیری دما نیز بود، EC و دمای لحظه‌ای آب نمک مخزن تزریق و آب فلوم اندازه‌گیری می‌شد. در هر آزمایش برای اطمینان از همگن بودن محلول آب نمک در مجموع

آزمایش‌ها با دو دوربین دقیق دیجیتالی با وضوح دیدار ۷ مگا پیکسل، که در موقعیت ثابت و معلوم نسبت به فلوم و نسبت به یکدیگر قرار داشتند، تصویربرداری شد؛ به طوری که، تراژکتوری حاصل از جت با استفاده از تصاویر برداشت شده کنترل و اندازه‌گیری مجدد می‌شد. از طرفی بر روی مسیر خط لوله انتقال جریان جت به درون فلوم، یک فلومتر دقیق ۲ اینچ الکترومغناطیس مدل مگاب ۳۰۰۰ با دقت نسبی ۰/۲ درصد، با شرایط استاندارد و کنترل کارخانه‌ای نصب و دبی جریان جت به صورت لحظه‌ای در طول هر آزمایش برداشت می‌شد. همچنین مخزن تزریق جریان جت بصورت مکعب مستطیل ساخته شد و حجم آن در ارتفاع‌های مختلف با نصب اشل استاندارد مشخص گردید. با توجه به حجم مزبور میزان مشخص از نمک در مخزن جداگانه‌ای حل و پس از حل کامل به درون مخزن



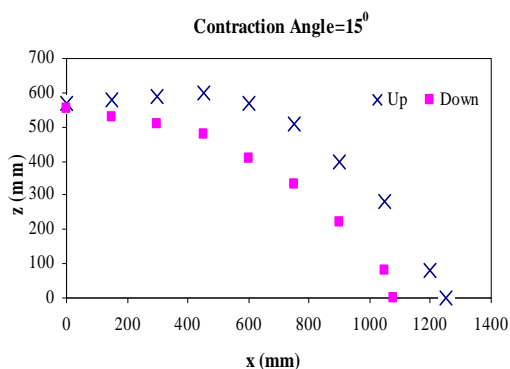
انجام آنها با استفاده از دماسنج و هیدرومتر، دما و دانسیته هر دو جریان جت و منبع آب پذیرنده (Ambient flow) اندازه‌گیری و کنترل می‌شد.

## نتایج و بحث

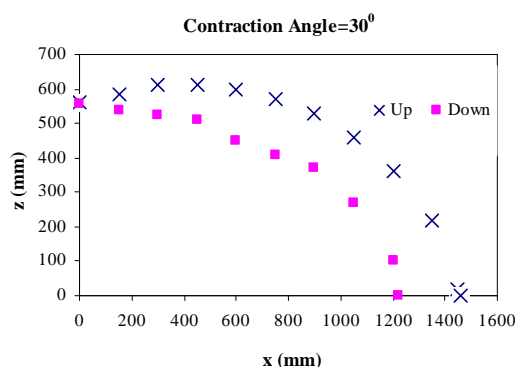
### منحنی‌های تراژکتوری

منحنی‌های تراژکتوری برای کلیه اجراهای آزمایشگاهی ثابت و ترسیم گردیدند. این منحنی‌ها برای سه قطر، چهار سرعت ورودی حدود ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه در چهار غلظت با پنج زاویه همگرایی ترسیم شدند. نتایج حاصله برخی از این منحنی‌ها در شکل (۳) که برای سرعت ورودی ۰/۵ و ۲/۰ متر بر ثانیه برای قطر ۱۵ میلی‌متر، غلظت ۱۵ گرم بر لیتر و در دو زاویه همگرایی ۱۵ و ۹۰ درجه است آمده است.

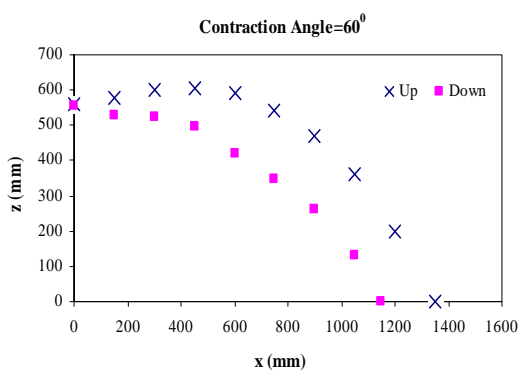
در شکل ۲ محور Z مختصاتی منطبق بر محل جت و مبدا مختصات در راستای محور جت و منطبق بر کف فلوم آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. همانطوری که در این شکل مشخص شده است، طولی که تراژکتوری در آن رو به بالا حرکت می‌کند، با تغییر علامت دادن  $(z_0 - z_{11})$  قابل محاسبه می‌باشد. در حالتی که حد بالایی منحنی تراژکتوری نسبت به محل جت افزایش عمق نشان می‌دهد،  $(z_0 - z_{11})$  دارای علامت منفی بوده که طول طی شده منحنی تراژکتوری در این حالت X نامگذاری شده است. کلیه آزمایش‌ها در سه قطر ۵، ۸ و ۱۵ میلی‌متر برای جت، چهار غلظت اولیه ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ گرم بر لیتر، در پنج زاویه همگرایی ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه و در چهار سرعت اولیه جت حدود ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ در مجموع ۲۱۵ آزمایش صورت پذیرفت. از طرفی تمامی آزمایش‌ها در دمای یکسان برای جریان جت و منبع آب پذیرنده انجام شد. این موضوع به دلیل اعمال شرایط یکسان دمایی می‌باشد، که در طی



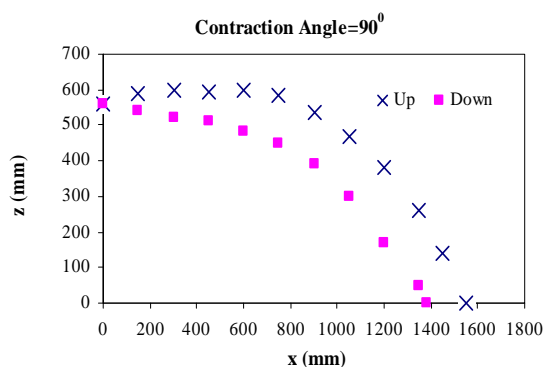
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳- نتایج تراژکتوری‌های جت برای قطر ۱۵ میلی‌متر، غلظت ۱۵ g/L و در سرعت ورودی ۱/۵۵ m/s در زاویه‌های همگرایی مختلف (الف) زاویه همگرایی ۱۵ درجه (ب) زاویه همگرایی ۳۰ درجه (ج) زاویه همگرایی ۶۰ درجه (د) زاویه همگرایی ۹۰ درجه

(جدول ۱) - نتایج تغییرات طول تراژکتوری نسبت به زاویه همگرایی جت

$U_0$ m/s	$\theta$	Xmax mm	Xmin mm	X/dp	$U_0$ m/s	$\theta$	Xmax mm	Xmin mm	X/dp
۰/۴۸	۱۵	۶۴۰	۴۸۰	۲۱/۵۵	۱/۵۸	۱۵	۱۲۵۰	۱۰۸۰	۷۶/۹۱
	۳۰	۵۲۰	۴۶۰	۲۰/۴۳		۳۰	۱۴۶۰	۱۲۲۰	۷۷/۴۹
	۴۵	۶۱۰	۴۶۰	۲۳/۶۴		۴۵	۱۴۳۰	۱۲۳۰	۸۴/۳۵
	۶۰	۶۴۰	۴۸۰	۲۵/۵۷		۶۰	۱۳۸۰	۱۱۸۰	۹۳/۴۲
	۹۰	۷۸۰	۶۲۰	۲۵/۷۸		۹۰	۱۵۵۰	۱۳۸۰	۱۰۲/۰۸
۰/۹۷	۱۵	۹۷۰	۷۸۰	۵۷/۶۱	۲/۰۹	۱۵	۱۷۸۰	۱۶۲۰	۱۲۷/۰۸
	۳۰	۱۰۲۰	۸۰۰	۵۴/۵۵		۳۰	۱۹۰۰	۱۶۱۰	۱۳۹/۶۸
	۴۵	۱۱۳۰	۹۳۰	۵۴/۰۴		۴۵	۱۹۸۰	۱۷۶۰	۱۴۴/۸۹
	۶۰	۱۱۵۰	۹۴۰	۵۷/۳۴		۶۰	۲۰۰۵	۱۷۲۰	۱۵۳/۸۶
	۹۰	۱۲۰۰	۱۰۷۰	۷۲/۵۵		۹۰	۲۲۰۰	۱۸۵۰	۱۵۳/۵۲

نیروی شناوری منفی حاکم بوده به طوری که وزن سیال تزریق شونده نسبت به نیروهای شناوری و هیدرودینامیکی جریان بیشتر بوده و منحنی پایین افتادگی را باعث می‌گردد. در این ناحیه اختلاط کاملی بین سیال جت و سیال تزریق شونده به دلیل گسترش فلاکس جریان جت بوجود می‌آید.

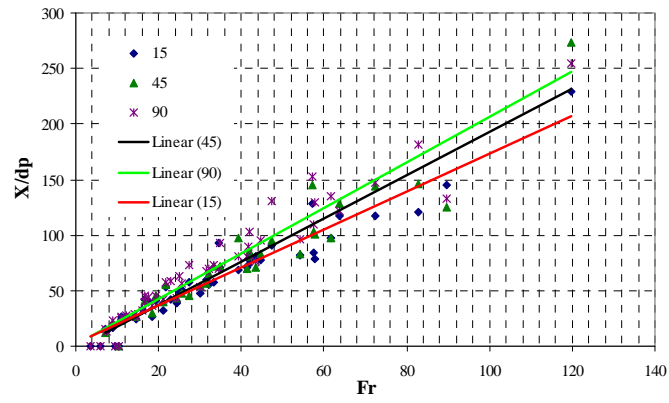
### طول شناوری مثبت و حداکثر طول مرز بالایی و پایینی تراژکتوری

همان‌گونه که در بخش‌های گذشته نیز عنوان گردید، طول شناوری مثبت،  $X$ ، (طولی که در آن منحنی تراژکتوری رو به بالا حرکت می‌کند)، از خصوصیات مهم منحنی‌های پایین افتادگی جریان جت به شمار می‌رود. در این راستا برای کلیه داده‌های آزمایشگاهی تغییرات این طول و طول‌های  $X_{min}$  و  $X_{max}$  محاسبه و در مقابل عدد فرود دنسیمیتریک برای زاویه‌های همگرایی مختلف ترسیم شدند. جدول ۱ نمونه‌ای نتایج تغییرات  $X_{min}$  و  $X_{max}$  و طول شناوری مثبت نسبت به زاویه همگرایی برای جت ۱۵ میلیمتری و غلظت ۱۵ گرم بر لیتر در زاویه‌های همگرایی مختلف را نمایش می‌دهد.

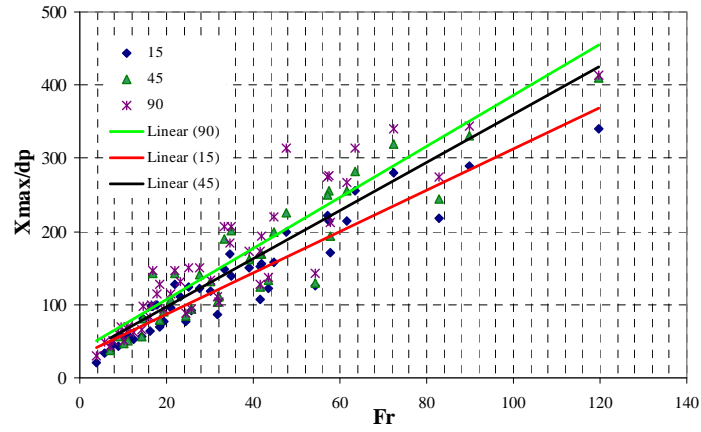
با مقایسه مقادیر جدول ۱ و همچنین برای دیگر حالات اجراهای آزمایشی مشخص شد که طول نهایی تراژکتوری برای مرز بالایی ( $X_{max}$ ) در حدود ۲۵ درصد برای تغییر زاویه همگرایی از ۱۵ به ۹۰ درجه افزایش می‌یابد. این در حالی است که طول نهایی مرز پایینی ( $X_{min}$ ) برای تغییر زاویه از ۱۵ به ۹۰ درجه در حدود ۲۸ درصد افزایش می‌یابد. برای کلیه داده‌های آزمایشگاهی تغییرات این پارامترها نسبت به عدد فرود دنسیمیتریک و زاویه همگرایی بررسی شد. شکل (۴) تغییرات این پارامترها را نسبت به عدد فرود دنسیمیتریک و زاویه همگرایی نمایش می‌دهد.

در شکل ۳ نتایج منحنی تراژکتوری برای سرعت ورودی جت ۱/۵۵ متر بر ثانیه در زاویه‌های همگرایی ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نمایش داده شده است. طول  $X_{min}$  و  $X_{max}$  در زاویه همگرایی ۱۵ درجه به ترتیب برابر با ۱۲۵۰ و ۱۰۸۰ میلیمتر بدست آمده است و این در حالی است که برای زاویه همگرایی ۹۰ درجه این مقادیر به ترتیب ۱۳۸۰ و ۱۵۵۰ میلیمتر می‌باشند. همچنین برای کلیه سرعت‌های ورودی جت، مشخص گردید که با افزایش زاویه همگرایی طول منحنی تراژکتوری برای هر دو مرز پایینی و بالایی افزایش می‌یابد. از طرفی ارتفاع مرز بالایی منحنی تراژکتوری ( $Z_u$ ) نیز تقریباً با افزایش زاویه افزایش می‌یابد. دلیل عمده ارتباط طول منحنی تراژکتوری با زاویه همگرایی را می‌توان، افزایش مومنتم فلاکس جت در اثر افزایش زاویه همگرایی دانست. نیروی مومنتم عامل اصلی قدرت جریان جت در سیال پذیرنده می‌باشد که با افزایش زاویه همگرایی افزایش یافته و باعث می‌شود که فلاکس جریان جت به جلو رانده شود. بنابراین افزایش زاویه همگرایی تأثیر معنی‌داری بر طول منحنی تراژکتوری ( $x$ ) در اشکال فوق خواهد داشت. همچنین افزایش سرعت ورودی و به تبع آن افزایش عدد فرود دنسیمیتریک، نیز طول منحنی تراژکتوری را به طور قابل توجهی افزایش خواهد داد. به دلیل کثرت بسیار زیاد نتایج آزمایشگاهی نمونه‌ای از محاسبات و نمودارها ارائه شده است.

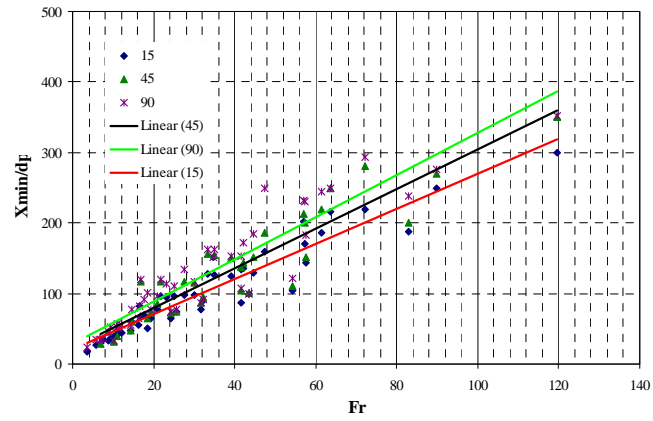
سیال جت و سیال پذیرنده هم‌فاز بوده و به دلیل اختلاف دانسیته نسبی بین آنها، جریان جت در سیال پذیرنده پخش شده که دو  $Z$  با تفاوت معنی دار را باعث می‌شود. اگر سیال جت در هوا (غیر مستغرق) انتشار یابد پخشیدگی ایجاد نخواهد شد. به طور کلی در محاسبات انجام شده برای نیروی شناوری دو ناحیه قابل تفکیک است. ناحیه اول دارای شناوری مثبت بوده که باعث می‌شود مرز بالایی منحنی تراژکتوری نسبت به مرکز جت بالاتر رود. همچنین در سرعت‌های تزریق شونده بیشتر به دلیل افزایش تنش‌های اصطکاکی که ناشی از گرادیان فشاری است، میزان شناوری مثبت بیشتر است. در ناحیه دوم



(الف) طول شناوری مثبت



(ب) حداکثر طول



(ج) حداکثر طول مرز پایینی تراژکتوری

(شکل ۴) - تغییرات خصوصیات تراژکتوری نسبت به عدد فرود دنسیمتریک

$$\frac{X_{\min}}{d_p} = a \cdot \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_a}\right)^b + c \cdot (Fr_j)^e + g(\theta)^h + k\left(\frac{D_i}{d_p}\right)^L \quad (5)$$

ضرایب پارامترهای بدون بعد در روابط بالا به روش‌های آماری محاسبه و در جدول (۲) آورده شدند. لازم به توضیح است که زاویه همگرایی بر حسب درجه در روابط بالادر نظر گرفته شده است. بر اساس روابط استخراج شده اقدام به میزان دقت آنها به روش MSE (Mean of Square Error) که دقت پارامترهای آماری را به خوبی تخمین می‌زند، گردید. بر این اساس خطای برآورد شده برای رابطه (۳) ۱۵ درصد، برای رابطه (۴) ۱۴ درصد و برای رابطه (۵) ۱۲ درصد محاسبه شد. شکل ۵ کلیه مقادیر اندازه‌گیری شده را در مقابل مقادیر محاسباتی برای کلیه داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از فرمول ۱ نمایش می‌دهد.

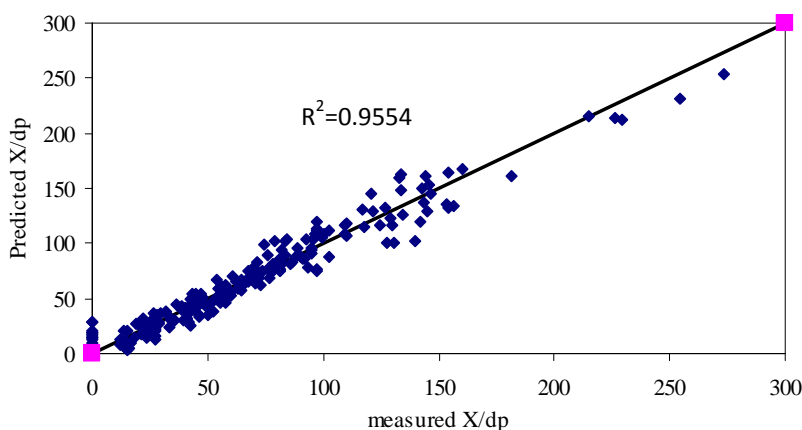
با توجه به شکل‌های فوق خصوصیات تراژکتوری با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. از طرفی در یک عدد فرود دنسیمیتریک مساوی نیز با افزایش زاویه همگرایی این خصوصیات افزایش می‌یابد. برای مشخص نمودن رابطه ریاضی بین پارامترها از نرم افزار آماری SPSS بهره گرفته شد؛ به گونه‌ای که روش‌های مختلف خطی و غیر خطی مورد آزمون آماری با پارامترهای وابسته قرار گرفت و نهایتاً مدل‌های غیر خطی زیر برای پارامترها استخراج شد.

$$\frac{X}{d_p} = a \cdot \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_a}\right)^b + c \cdot (Fr_j)^e + g(\theta)^h + k\left(\frac{D_i}{d_p}\right)^L \quad (3)$$

$$\frac{X_{\max}}{d_p} = a \cdot \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_a}\right)^b + c \cdot (Fr_j)^e + g(\theta)^h + k\left(\frac{D_i}{d_p}\right)^L \quad (4)$$

(جدول ۲) - تخمین ضرایب پارامترهای بدون بعد

Parameter	Estimated X/dp	Estimated Xmax/dp	Estimated Xmin/dp
a	-۸۰/۶۰	-۸۱/۵۸۶	۵۴۳/۱۵
b	۳۴/۱۸	۶۹۱/۶۹	۴۸۵/۹۶
c	۲/۵۴	۳/۵۳	۳/۰۱۵
e	۰/۹۳	۰/۹۴۵	۰/۹۵۰
g	۰/۰۲	۰/۱۱۳	۰/۱۸۰
h	۱/۴۸	۱/۳۴	۱/۰۹۰
K	-۲۱/۲۲	۰/۵۵	۰/۲۰۵
L	-۰/۶۹	۲/۹۰	۳/۳۰



(شکل ۵) - نمایش مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده برای طول نسبی شناوری مثبت

همچنین در این تحقیق حدود ۲۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی جدا شد و مدل‌های آماری یاد شده برای هر سه پارامتر طول شناوری



سرعت در اجراهای مختلف آزمایشگاهی تنظیمات دستگاه که شامل فرکانس صانع کننده و فرکانس تکرار پالس بود تنظیم و عمل برداشت انجام می‌گردد. لازم به توضیح است که برای افزایش دقت تا حد ممکن برای هر مکان قرار گیری ترانس دیوسرها در مجموع ۱۲۸ پروفیل با فاصله زمانی ۱۰ میلی ثانیه برداشت و در نهایت از همگی آنها متوسط گرفته شد. شکل (۷) پروفیل‌های برداشت شده در فواصل مختلف از جت ۵ میلیمتری با زاویه همگرایی ۴۵ درجه در غلظت ۱۵ گرم بر لیتر و برای سرعت اولیه ۰/۹۷ متر بر ثانیه نمایش می‌دهد.

شکل ۷ بخش (الف) مربوط به پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده برای جت ۵ میلیمتری با شرایط ارائه شده می‌باشد. مقادیر x درج شده بر روی این شکل‌ها مربوط به فاصله پروفیل اندازه‌گیری شده از محل جت می‌باشد. بخش (ب) این شکل تابع تئوری گوسین مربوط به هر یک از پروفیل‌ها را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، توزیع گوسین با پروفیل‌های اندازه‌گیری شده تطابق بسیار مناسبی دارد. از این رو معادلات حاکم بر جریان جت که با استفاده از توزیع‌های نرمال گوسین بسط داده می‌شوند، برای شبیه‌سازی خصوصیات مهم هیدرولیکی جریان جت‌های بکار رفته در این تحقیق قابل کاربرد می‌باشند. بر اساس این تئوری که اولین بار توسط آلبرسون و همکاران (۳) ارائه شده است، خصوصیات جت به صورت نسبت سرعت ماکزیمم به سرعت اولیه جت و همچنین نسبت غلظت ماکزیمم به غلظت اولیه جت ارائه می‌شوند. این معادلات به شرح زیر هستند:

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{1}{\sqrt{2\beta}} \left(\frac{x}{d_p}\right)^{-1} \quad (۶)$$

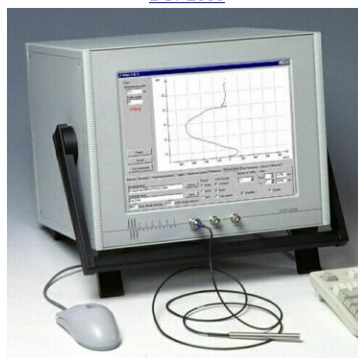
$$\frac{c_m}{c_0} = \frac{1 + \lambda^2}{2\sqrt{2\lambda^2\beta}} \left(\frac{x}{d_p}\right)^{-1} \quad (۷)$$

مثبت، طول نهایی مرز بالایی و طول نهایی مرز پایینی تراژکتوری با استفاده از نرم افزار SPSS مجدداً اجرا گردید. در این حالت ضرایب ارائه شده در جدول (۲) مقدار ناچیزی تغییر یافت. در این حالت نیز برای ۲۰ درصد داده آزمایشگاهی یاد شده پارامترهای فوق محاسبه گردید و خطای رابطه‌ها برآورد شد. بر اساس نتایج بدست آمده برای طول شناوری مثبت روابط ارائه شده (بدون احتساب ۲۰ درصد داده‌ها) ۱۷ درصد خطا، طول نهایی مرز بالایی ۱۳ درصد خطا و طول نهایی مرز پایینی حدود ۱۲ درصد خطا بدست آمد؛ لذا، مدل‌های آماری برآورد طول شناوری مثبت، طول نهایی مرز بالایی و طول نهایی مرز پایینی با دقت قابل قبولی قادر به پیش بینی بوده به طوریکه بر اساس نتایج، کلیه داده‌های محاسباتی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده آنها بر روی خط ۴۵ درجه واقع شدند.

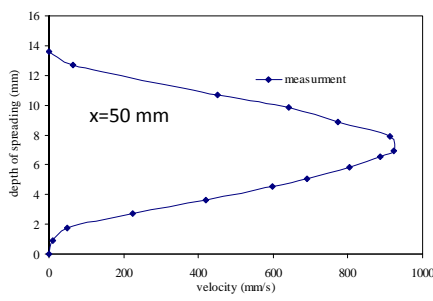
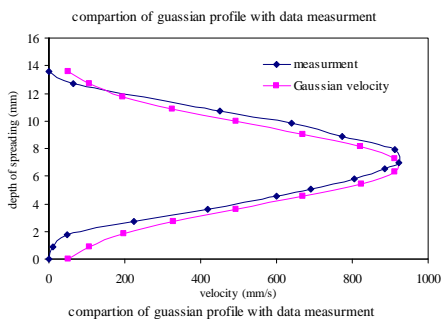
### پروفیل‌های سرعت و غلظت و مقایسه آنها با معادلات تئوری

مطابق با آنچه که در بخش‌های گذشته ارائه شد، برای تشخیص الگوی جریان اقدام به اندازه‌گیری پروفیل سرعت در مکان‌های مختلف برای هر اجرای آزمایش گردید. بر این اساس از سیستم سرعت سنجی UVDP با استفاده از دستگاه DOP2000 پروفیل سرعت اندازه‌گیری گردید. شکل (۶) این دستگاه را به همراه اربابه سه بعدی ساخته شده به این منظور نمایش می‌دهد.

این دستگاه با استفاده از ترانس دیوسر که نسبت به جهت جریان با زاویه‌ای بین ۶۰ تا ۸۰ درجه قرار گیرد به روش آکوستیک پروفیل سرعت را اندازه‌گیری می‌نماید. اربابه سه بعدی ساخته شده به این منظور قادر به حرکت در سه جهت مختصاتی و تنظیم زاویه قرارگیری ترانس دیوسر نسبت به افق بود. روش مورد استفاده در این تحقیق Multiplexer بود که به طور همزمان شش ترانس دیوسر وظیفه اندازه‌گیری سرعت را بر عهده داشت. با توجه به متفاوت بودن مقدار



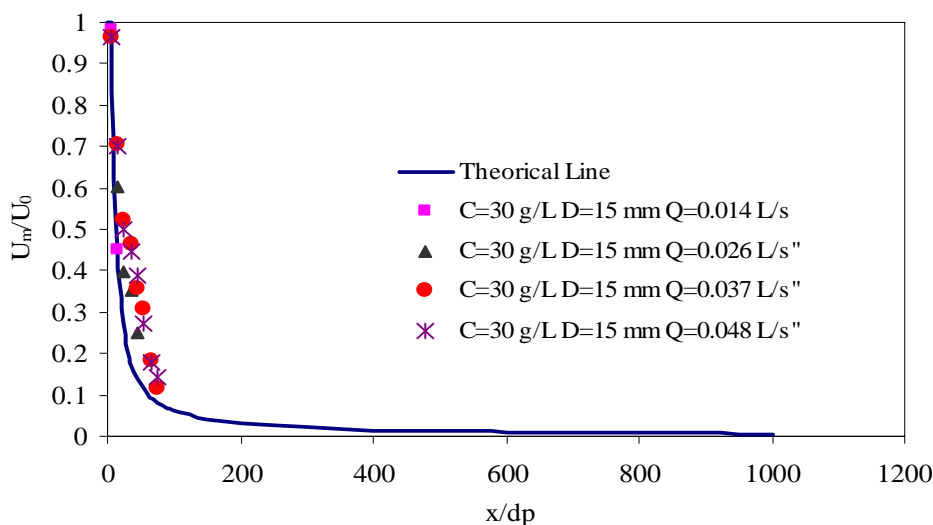
(الف) دستگاه سرعت سنج DOP2000  
 (ب) اربابه سه بعدی  
 (شکل ۶) - تجهیزات اندازه‌گیری پروفیل سرعت



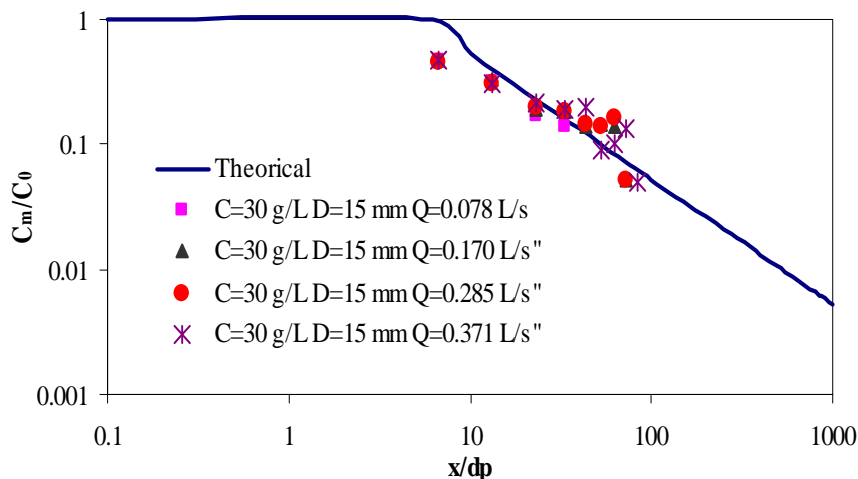
(ب)

(الف)

(شکل ۷) - نمایش پروفیل‌های سرعت در مکان‌های مختلف برای یک آزمایش



(شکل ۸) - مقایسه سرعت‌های اندازه‌گیری شده با تئوری



(شکل ۹) - انطباق داده‌های اندازه‌گیری غلظت خط مرکزی تراژکتوری در مقایسه با معادلات تئوری

در شکل ۸ خط پر رنگ مربوط به ترسیم معادله (۶) بوده و داده‌های اندازه‌گیری شده با نقاط نمایش داده شده‌اند. لازم به توضیح است که حداکثر مقدار مشاهده شده  $x/d_p$  در آزمایشات این تحقیق در حدود ۳۸۵ بوده و این در حالی است که حداقل مقدار اندازه‌گیری شده  $u_m/u_0$  در حدود ۰/۰۲۵ می‌باشد. همچنین حداکثر غلظت خط مرکزی تراژکتوری نیز در تمامی آزمایشات در مکان‌های مختلف از محل جت برداشت گردید و با رابطه تئوری (۷) مقایسه شد. شکل (۹) انطباق داده‌های اندازه‌گیری شده این تحقیق را با معادله (۵) برای چهار اجرای آزمایشی نمایش می‌دهد.

در رابطه‌های فوق ضرایب  $\beta$  و  $\lambda$  ضریب انتشار سرعت و غلظت بوده که مقادیر آنها توسط محققین مختلفی از جمله آلبرسون و همکاران (۳) به میزان ۰/۱۱۴ و ۱/۲ برآورد شده است. البته این ضرایب توسط محققین زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است که اکثراً دارای تفاوت کمی نسبت به این مقادیر هستند. داده‌های حاصل از این تحقیق نیز با معادلات فوق الذکر مورد مقایسه قرار گرفتند که مشخص گردید بین داده‌های اندازه‌گیری شده در این تحقیق و این معادلات همبستگی قابل قبولی برقرار می‌باشد. شکل (۸) برخی از داده‌های اندازه‌گیری شده در این تحقیق را در مقایسه با معادله (۴) نمایش می‌دهد.

## نتیجه گیری

در این تحقیق عوامل موثر بر توسعه جریان جت‌های مستغرق بررسی شد که خلاصه نتایج بدست آمده به صورت زیر می‌باشد.

۱- مطابق با بررسی‌های انجام شده با افزایش عدد فرود دنسیمیتریک و همچنین زاویه همگرایی طول نسبی شناوری مثبت، طول نهایی مرز بالایی و پایینی تراژکتوری به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. افزایش این دو عامل باعث افزایش نیروی مومنتم گردیده که مهمترین پارامتر توسعه فلاکس جریان جت می‌باشد. افزایش عدد فرود با کاهش دانسیته، کاهش قطر جت و یا به عبارتی افزایش سرعت ورودی امکان پذیر است. با کاهش دانسیته نیروی وزن سیال جت کاهش یافته و نیروی شناوری، در طول بیشتری جریان جت را رو به بالا هدایت می‌کند، و این در حالی است که با کاهش قطر فلاکس جریان جت با ضخامت کمتری حادث شده و نیروهای اصطکاکی مقابل جریان کاهش می‌یابد و از طرفی سرعت ورودی افزایش یافته که باعث پیشروی فلاکس جریان می‌شود.

۲- با افزایش زاویه همگرایی طول منحنی تراژکتوری برای هر دو مرز پایینی و بالایی افزایش می‌یابد؛ به طوری که، برای تغییر زاویه همگرایی از ۱۵ به ۹۰ درجه مقدار طول نهایی مرز بالایی تراژکتوری ( $X_{max}$ ) در حدود ۲۵ درصد، افزایش می‌یابد. این در حالی است که طول نهایی مرز پایینی برای تغییر زاویه از ۱۵ به ۹۰ درجه در حدود ۲۸ درصد افزایش می‌یابد. این موضوع برای کلیه سرعت‌های ورودی یکسان است.

۳- خصوصیات مهم منحنی تراژکتوری جریان جت مستغرق اعم از طول شناوری مثبت، حداکثر طول مرز بالایی تراژکتوری و حداکثر طول مرز پایینی تراژکتوری به صورت آماری با استفاده از روش غیر

## منابع

خطی که دارای کمترین خطا بود بررسی شد و مشخص گردید که مدل‌های آماری ارائه شده در این تحقیق با دقت رضایت بخشی قادر به برآورد خصوصیات مهم تراژکتوری می‌باشند.

۴- الگوی جریان جت با استفاده از اندازه‌گیری پروفیل سرعت در مکان‌های مختلف از محل جت مشخص نمود که داده‌های حاصل از این تحقیق با توزیع نرمال گوسین تطابق بسیار بالایی داشته و از این رو معادلات حاکم مربوطه که شامل معادلات نسبت سرعت مرکزی به سرعت اولیه و همچنین معادلات رقیق شدگی است برای بررسی و مقایسه شرایط تئوری و آزمایشگاهی بکار گرفته شد.

۵- طول نسبی شناوری مثبت،  $X/dp$ ، در کلیه آزمایش‌ها برای تغییر زاویه از ۱۵ درجه به ۹۰ درجه بین ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که برای تغییر زاویه از ۱۵ به ۳۰، ۴۵ و ۶۰ برای تمامی سرعت‌های ورودی این تغییرات در حدود ۱۰ درصد می‌باشد. این موضوع به دلیل فشردگی بیشتر جریان برای زاویه ۹۰ درجه می‌باشد.

۶- متجه نیروهای شناوری و اصطکاک به همراه نیروهای مومنتم (جلوبرنده) بر طول کلی منحنی تراژکتوری در منابع آب پذیرنده تأثیر بسزایی دارد، و این در حالی است که نیروی شناوری به ابعاد فلاکس، نیروی اصطکاکی درگ به سطح پیشانی جریان فلاکس و نیروی مومنتم به سرعت ورودی فلاکس و زاویه همگرایی جت وابسته است.

## تشکر و قدردانی

از سازمان آب و برق خوزستان معاونت سد و نیروگاه به واسطه پشتیبانی مالی از این تحقیق قدردانی می‌گردد.

- ۱- احدیان ج.، موسوی جهرمی س.ح. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی خصوصیات جت مستغرق پایین دست نیروگاهها با استفاده از گرادیان حرارتی. مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی تهران. اردیبهشت ۸۷.
- ۲- احدیان ج.، موسوی جهرمی س.ح. ۱۳۸۷. بررسی تغییرات مومنتم جریان جت ورودی در منابع آب پذیرنده کم عمق با استفاده از FLOW-3D ، مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی منابع آب ایران. تبریز مهر ۸۷.
- 3- Albertson M.L., Dai Y.B., Jenson R.A., and Rouse H. 1950. Diffusion of submerged jets. Trans. Am. Soc. Civ. Eng., 115:639-664.
- 4- Cuthberston Alan J.S., Peter A., and Davis P.A. 2008. Deposition from Particle-Laden, round, turbulent, horizontal, buoyant jets in stationary and coflowing receiving fluids. J. Hydraul. Eng., 134 (4):390-402.
- 5- Del Bene J.V., Jirka G., and Largier J. 1994. Ocean brine disposal. Desalination, 97(1-3):365-372.
- 6- Fischer H.B. 1971. The dilution of an undersea sewage cloud by salt fingers. Water Res., 5:909-915.
- 7- Jirka G.H. 2004. Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part 1: Single round jet." Environm'l Fluid Mech., 4, 1-56.
- 8- Jirka G.H. 2006. Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part 2: Plane jet dynamics resulting from multiport diffuser jets. Environm'l Fluid Mech., 6: 43-100.
- 9- Kunze E. 1987. Limits on growing, finite-length fingers: A Richardson number constraint. J. Mar. Res., 45:533-556.

- 10- Kunze E. 1995. Quantifying salt-fingering fluxes in the ocean." Double-diffusive convection. A. Brandt and J. Fernando, eds., AGU Geophysical Monograph, 94:313-320
- 11- Maxworthy T. 1983. The dynamics of double diffusive gravity currents. J. Fluid Mech., 128:259-282.
- 12- Turner J.S. 1967. Salt fingers a density interface. Deep-sea Res. Oceanogr. Abstr., 14: 599-611.
- 13- Turner J.S. 1998. Stratification and circulation produced by heating and evaporation on a shelf. J.Mar. Res., 56:855-904.



## Evaluation of Effective Parameters on Buoyant Jets Development in the Stagnant Ambient Fluid

J. Ahadiyan<sup>1\*</sup> - S. Musavi Jahromi<sup>2</sup>

### Abstract

In the present article, effective parameters of the buoyant jets have been evaluated in the stagnant ambient fluid. The jet parameters, geometry parameters and environmental parameters are investigated. Using dimensional analysis, a set of dimensionless functions was obtained. To achieve the exact functions, a physical model was built in the hydraulic laboratory of Shahid Chamran University, Iran (SCU). 215 experiments were set on base of different jet diameter, different concentration of jet injection and different convergence angle of jets. To precede the goals of the present study, the positive mixing length and trajectory characteristics from a buoyant jet and the maximum length of upper and inferior limits of trajectory have been considered. The velocity profiles of adjacent sections near and far field of location jet injection was measured using profiler acoustic, UVDP. The velocity profiles were compared with the theoretical normal Gaussian distribution. Finding shows that the gathered data in this field have been satisfactory correlated. In addition the concentration and dilution in the different sections along the jet flow were measured. Findings show there are satisfactory correlation between experimental data and theoretical formula. The lengths of falling jet trajectory were analyzed as the ratio of trajectory length to port diameter ( $x/d_p$ ) versus relative trajectory elevation  $((Z_0-Z_u)/x)$ . According to the results, increasing on concentration of jet flow causing a density gradient between jets and receiving fluid and change in the buoyancy forces involved, has major influence on the lengths of falling trajectory. Findings show there is a nonlinear correlation between the trajectory characteristics and jet flow properties. As change of contraction angle, from 15 to 90 degrees, upper limit of trajectory increased to 25 percents. While contraction angle increase from 15 to 90 degrees, the inferior limit increase to 28 percents.

**Key words:** Buoyant jet, Contraction angle, Trajectory, Flow pattern, Spreading Coefficient

1-PhD Student and Associate prof., Shahid Chamran University, Respectively  
(\* - Corresponding author Email: [Ja\\_ahadiyan@yahoo.com](mailto:Ja_ahadiyan@yahoo.com))