

## بررسی تأثیر همزمان هندسه جت‌های مستغرق و غلظت پساب

### خروجی بر طول شناوری مثبت

جواد احدیان\*، حبیب موسوی جهرمی\*\*

\* نگارنده مسئول، نشانی: اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز، ص. پ. ۴۳۳۱۱-۶۱۳۵۷، تلفن:

۰۶۱۱)۳۳۶۵۶۷۰، پیام‌نگار: ja\_ahadiyan@yahoo.com

\*\* به ترتیب استادیار؛ و دانشیار گروه سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۸۸/۲/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۲/۱۵

### چکیده

جریان تخلیه شده جت‌های مستغرق باعث اختلاط جریان جت با جریان پذیرنده می‌شود. پیش‌بینی نوع اختلاط، در مسائل زیست محیطی را از اهمیت زیادی دارد. در این مقاله، طول اختلاط شناوری مثبت و خصوصیات منحنی پایین افتادگی ایجاد شده در اثر جت مستغرق بررسی شده است. جریان جت به پارامترهایی از قبیل سرعت اولیه، قطر پخش‌کننده، غلظت جریان تخلیه شده در منبع پذیرنده، و شرایط جریان پذیرنده وابسته است. برای بررسی چگونگی ارتباط بین پارامترها، یک مدل آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران ساخته و آزمایش‌های مختلف با سرعت، غلظت، و قطرهای اولیه متفاوت جت اجرا شد. طول منحنی‌های پایین افتادگی جریان جت به صورت نسبت بدون بعد طول به قطر اولیه در مقابل نسبت طولی پایین افتادگی بررسی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش قطر جت و به تبع آن افزایش مومنتم فلاکس، تأثیر معنی‌داری بر طول منحنی پایین افتادگی دارد. همچنین، افزایش غلظت سیال جت نیز به دلیل افزایش گرادیان دانسیته بین سیال جت و سیال پذیرنده و تغییر در نیروهای شناوری تأثیر زیادی بر طول منحنی پایین افتادگی دارد، به طوری که در یک غلظت مساوی، با افزایش قطر از ۵ به ۸ و از ۸ به ۱۵ میلی‌متر، عدد فرود جرمی برای سرعت‌های ورودی مختلف بین ۳۰ تا ۴۰ درصد کاهش و نسبت طولی شناوری مثبت به قطر اولیه بین ۲۰ تا ۳۵ درصد کاهش نشان داده است. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که با افزایش غلظت به میزان دو برابر، نسبت طولی شناوری مثبت به قطر اولیه بین ۵ تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

### واژه‌های کلیدی

جت دایره‌ای، طول شناوری مثبت، عدد فرود جرمی، غلظت، منحنی پایین‌افتادگی

### مقدمه

نسبت به سیال پیرامون دانسیته بیشتری داشته باشد، فلاکس جت به صورت منحنی پایین‌افتادگی (تراژکتوری) در سیال پیرامون پخش می‌شود؛ درحالی‌که وقتی اختلاف جرمی کم باشد ابتدا این منحنی به سمت بالا متمایل می‌شود و پس از آن رو به پایین می‌گراید. در این مقاله، طولی که منحنی مزبور رو به بالا متمایل می‌شود طول شناوری مثبت یا طول اختلاط نامیده شده است. در شرایطی که تخلیه پساب در منبع آب پذیرنده اتفاق می‌افتد، منحنی پایین‌افتادگی ایجاد می‌شود که بسته به

در تخلیه پساب‌ها به صورت جت مستغرق در منابع پذیرنده، اختلاف سرعت بین ناحیه جت و جریان پیرامون، با اختلاط انرژی جنبشی همراه است که به سمت کاهش انرژی پیش می‌رود. توزیع سرعت جریان در طول و دانستن آن برای حل بسیاری از مسائل پخشیدگی ضروری است. در جریان جت مستغرق پخشیدگی جانبی و شتاب حرکت برای شرایط یکسان در ناحیه اطراف مرزهای حرکت جت بررسی می‌شود. در شرایطی که سیال جت

(2001a,b) مطالعه آزمایشگاهی و نظری مکانیسم ته‌نشینی رسوب در جریان جت‌های مستغرق حاوی ذرات رسوبی را بررسی کردند. این محققان، مکانیسم جریان سنگین رسوب‌دار<sup>۲</sup> برای جت متقارن مستغرق و پخشیدگی سطحی ناشی از شناوری مثبت در اثر پدیده مذکور را بررسی کردند. لاو و همکاران (Law et al., 2004) از نتایج آزمایشگاهی برای بررسی منحنی‌های پایین افتادگی در شرایط مختلفی از عدد رینولدز تقریباً در ناحیه آرام بهره گرفتند. ژیرکا (Jirka, 2004; 2006) در خصوص رفتار جت‌های مستغرق در جریان‌های لایه‌بندی شده از قبیل سواحل دریا یا مخازن پشت سدها، به صورت تئوری و آزمایشگاهی تحقیقاتی کرده است. وی جریان جت مستغرق منفرد و همچنین جت مستغرق چندگانه را با استفاده از مدل انتگرالی برای ناحیه نزدیک جت به صورت ریاضی شبیه سازی کرد. احدیان و موسوی (Ahadiyan & Musavi-Jahromi, 2009a) منحنی‌های پایین افتادگی حاصل از جریان جت مستغرق خروجی نیروگاه‌ها را که نسبت به سیال پیرامون دمایی متفاوت داشت با استفاده از روابط آماری تحلیل کردند. احدیان و موسوی (Ahadiyan & Musavi-Jahromi, 2009b) همچنین تغییرات مومنتم در فلاکس جت را با استفاده از شبیه سازی ریاضی بررسی کردند؛ که بر اساس نتایج به دست آمده، مومنتم جریان جت در طول فلاکس جت رو به کاهش می‌گراید. کتبرسون و همکاران (Cuthberston Alan et al., 2008) ترسیب ناشی از پساب جریان خروجی از جت‌های دایره‌ای مستغرق را که به صورت افقی در منبع آب پذیرنده تخلیه می‌شود و نیز رفتار متوسط رسوب‌گذاری ناشی از جریان جت مستغرق را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. در مطالعه آزمایشگاهی این محققان، سه پارامتر اساسی نیروی مومنتم، شناوری فلاکس جریان جت و خصوصیات سرعت سقوط ذرات رسوبی موجود در پساب، و همچنین سرعت جریان پذیرنده کنترل شد.

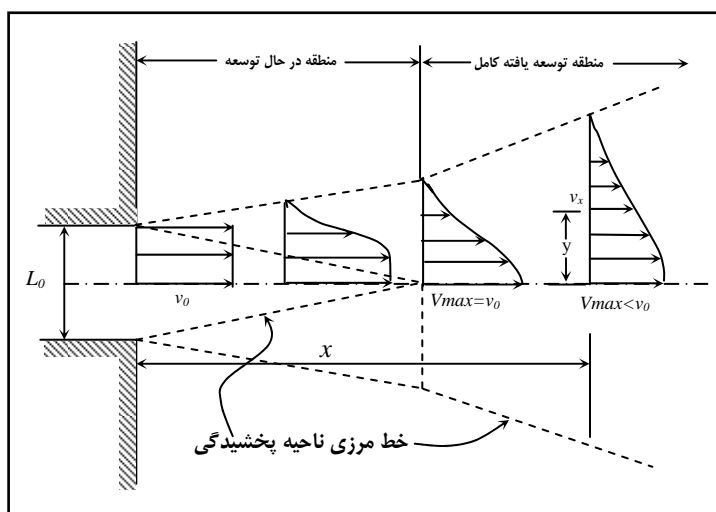
غلظت پساب می‌تواند به سمت بالا یا پایین امتداد یابد. این منحنی وقتی به سمت بالا امتداد می‌یابد، دارای طول شناوری مثبت است و باعث پخشیدگی بیشتر در منبع آب پذیرنده می‌شود و بر کیفیت آن تاثیر بیشتری می‌گذارد. تخلیه‌کننده‌های فاضلاب به نواحی ساحلی یا رودخانه‌ها از جمله این جریان‌ها هستند که لایه‌های سطحی آن تحت تاثیر طول شناوری مثبت است و به لحاظ مسائل زیست محیطی اهمیت ویژه‌ای دارد.

بر اساس تحقیقات دل بن و همکاران (Del Ben et al., 1994) گرادیان جرمی در نزدیکی منطقه ورودی در لایه‌های سطحی جریان پیرامون جت، باعث افزایش طول اختلاط اولیه می‌شود. در بعضی مواقع، نیاز خواهد بود که در اختلاط آب گرم با آب سرد دقت بیشتری بشود، تا، شار فوران میل به فرو نشست پیدا نکند و از این رو به سمت جلو رانده شود. در تحقیقات ترنر (Turner, 1967) و کونز (Kunze, 1987) پخشیدگی ناشی از شوری و دما برای جت‌های مستغرق بررسی و مشخص شده است درحالی که جریان پذیرنده تقریباً ساکن باشد، پخشیدگی مولکولی گرما از نمک بیشتر است و بالای لایه گرم و شور به تشکیل پدیده پنجه‌شدن نمک<sup>۱</sup> می‌انجامد. کونز (Kunze, 1995) بررسی عددی و کمی این پدیده را برای جریان‌های ساحلی و دریا بررسی کرد. پدیده پنجه‌شدن نمک، حرکت رو به پایین فلاکس ورودی را بیان می‌کند که نسبتاً سردتر و شورتر از سیال اطراف است. مکس وارتنی (Maxworthy, 1983) و ترنر (Turner, 1998) نشان دادند که اختلاط جریان جت با عدد رینولدز پائین در فاصله‌ای مشخص خاتمه و به سمت پایین امتداد می‌یابد. بر اساس تحقیقات فیشر (Fischer, 1971)، بازه‌های متلاطم در پخشیدگی مضاعف ناشی از شوری و دما برای جریان پیرامون ساکن، چندان مورد نیاز نیستند، زیرا این‌گونه جریان‌ها در طبیعت در شرایط تقریباً آرام در منابع آب پذیرنده تخلیه می‌شوند. کاردوسو و زاربینی (Cardoso, & Zarrebini,

### نئوری جت‌های مستغرق

با تابع احتمال نرمال در هر مقطع عرضی است. شکل ۱ نمای ظاهری جریان ورودی از یک جت به سیال دیگر را نمایش می‌دهد. ناحیه اولیه جریان که تحت عنوان جریان در حال توسعه<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، باید براساس ناحیه پیرامون برای جت بررسی شود. زمانی که جریان جت تخلیه می‌شود، گرادیان سرعت بین شار جت و منبع آب پذیرنده اتفاق خواهد افتاد.

خصوصیات تقریبی جریان جت به صورت تحلیلی بر اساس معادلات حاکم، که با در نظر گرفتن مفروضات متعدد استخراج می‌شوند، بررسی می‌شود. این مفروضات شامل برقراری توزیع فشار هیدرواستاتیکی، مشابه بودن مراحل پخشیدگی به صورت دینامیکی برای تمام مقاطع، و تغییرات مؤلفه طولی سرعت در ناحیه پخشیدگی مطابق



شکل ۱- شماتیک جریان جت در منبع آب پذیرنده

جت کاهش می‌یابد. از نظر تحلیلی، برای ناحیه توسعه یافته کامل مرزی وجود ندارد و در مطالعات معمولاً یک حد متوسط برای تفکیک این ناحیه و ناحیه در حال توسعه در نظر گرفته می‌شود. مباحث جریان در حال توسعه و جریان توسعه یافته کامل بصورت نظری اولین بار آلبرستون (Albertson et al., 1950) ارائه داد.

چنانچه عدد رینولدز جریان جت مستغرق خیلی کوچک نباشد، سرعت متوسط نقطه‌ای ( $v$ ) باید براساس مختصات ( $x, y, z$ ) و سرعت ورودی  $v_0$  و یک مشخصه طولی  $L_0$  وابسته به هندسه جت، ارائه شود. این متغیرها را می‌توان به شکل بدون بعد به صورت زیر نوشت:

$$\frac{v}{v_0} = f_1\left(\frac{x}{L_0}, \frac{y}{x}, \frac{z}{x}\right) \quad (1)$$

در این ناحیه به دلیل وجود تنش برشی نسبتاً زیاد، پخشیدگی نسبی ایجاد و منجر به نفوذ جریان پیرامون به شار ورودی می‌شود. از طرفی، شتاب جریان جت به صورت تدریجی کاهش و شتاب سیال پیرامون به صورت تدریجی افزایش می‌یابد؛ در نتیجه سرعت طولی هسته جت به صورت پیوسته کاهش و همزمان ضخامت ناحیه جت افزایش می‌یابد. حد ناحیه اول یا ناحیه در حال توسعه موقعی است که جریان پیرامون در مرکز جریان جت نفوذ می‌کند و سرعت هسته جت رو به کاهش می‌رود. موقعی که قسمت مرکزی جت متلاطم می‌شود، جریان " توسعه یافته کامل"<sup>۲</sup> نامگذاری می‌شود. جریان توسعه یافته کامل با منبع آب پذیرنده اختلاط می‌یابد و به تعادل می‌رسد. در اثر این پدیده، سرعت در ناحیه مرکزی

1- Flow Establishment

2- Fully Established

ثابت و نسبت  $\frac{M}{M_0}$  را برابر ۱ در نظر می‌گیرند. روابط فوق برای هر دو ناحیه در حال توسعه و توسعه یافته کامل بر اساس نوع هندسه جت‌ها (دایره‌ای یا دیواره‌ای) قابل استخراج و بررسی است. در روابط بالا  $v_x$ ، سرعت خط مرکزی جریان جت در فاصله طولی  $x$ ؛  $v_0$ ، سرعت اولیه جریان جت؛  $L_0$ ، مشخصه طولی جت؛  $M$ ، شار مومنتم در فاصله طولی  $x$ ؛ و  $M_0$ ، شار مومنتم ورودی است.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق هدف عبارت‌است از بررسی پارامترهای مؤثر از جمله هندسه جت و غلظت اولیه جریان جت بر طول اختلاط یا طول شناوری مثبت. جهت نیل به این هدف، یک مدل فیزیکی به طول  $3/2$ ، به عرض  $0/6$ ، و به ارتفاع  $0/95$  متر به همراه تجهیزات مربوط ساخته شد. شکل ۲ پلان جزییات این مدل را نشان می‌دهد.

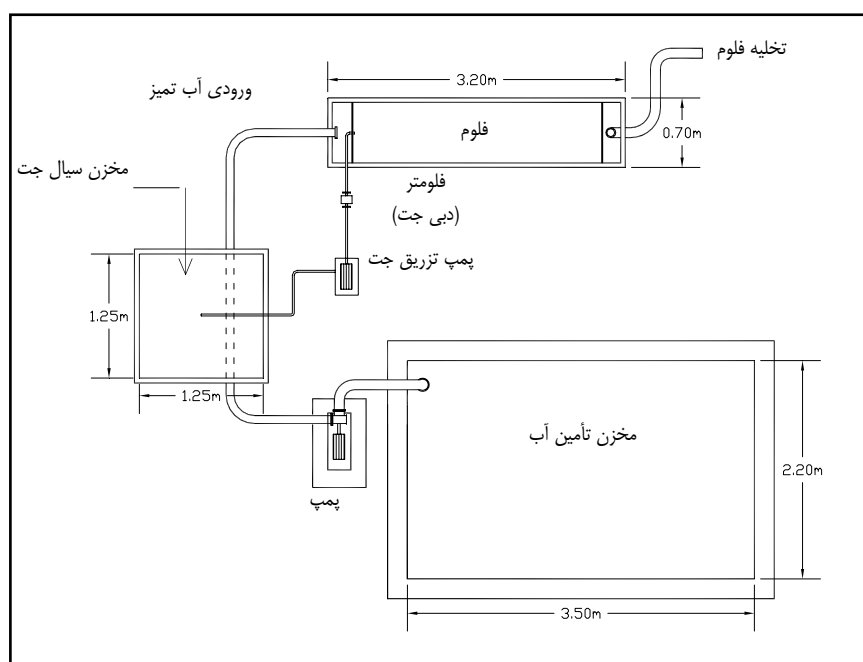
میزان تغییرات دبی جریان جت،  $Q$ ، عبوری در هر مقطع از طریق انتگرال‌گیری از معادله دیفرانسیل  $v_x \cdot dA$  به دست می‌آید. به دلیل اینکه  $Q$  نسبت به طول متغیر است، می‌توان نوشت:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\int_0^\infty v_x dA}{v_0 A_0} = f_2\left(\frac{x}{L_0}\right) \quad (2)$$

که در آن،  $A_0$  = سطح مقطع خروجی است. به همین ترتیب برای شار مومنتم،  $M =$  نسبت به  $M_0$  برای هر مقطع نیز می‌توان نوشت:

$$\frac{M}{M_0} = \frac{\int_0^\infty (v_x)^2 dA}{(v_0)^2 A} = f_3\left(\frac{x}{L_0}\right) \quad (3)$$

معمولاً به دلیل اینکه این مراحل به طور کامل در داخل مرز جت اتفاق می‌افتد، شار مومنتم در داخل مرز جت را



شکل ۲- پلان مدل آزمایشگاهی تزریق جریان جت در آب زلال

استفاده از هیدرومتر دقیق ۱۵۱H استاندارد شده در دمایی مشخص محاسبه و برداشت می‌شد. با توجه به تأثیر گرادیان دما در جرم مخصوص 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 تاثیر این پدیده جلوگیری شود. برای این منظور، فلوم آزمایشگاهی و مخزن تزریق به صورت همزمان از یک منبع تأمین آب پر می‌شد. با استفاده از EC متر دقیق دیجیتالی پرتابل با دقت ۰/۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر که دارای حس‌گر اندازه‌گیری دما نیز بود، EC و دمایی لحظه‌ای آب نمک مخزن تزریق و آب فلوم اندازه‌گیری می‌شد. در هر آزمایش، برای حصول اطمینان از همگن بودن محلول آب نمک، در مجموع برای ۲۷ نقطه مخزن تزریق (۳ نقطه در طول، ۳ نقطه در عرض و ۳ نقطه در ارتفاع)، به صورت مداوم شوری و دما اندازه‌گیری می‌شد. یک پمپ جداگانه متصل به مخزن تزریق، وظیفه اختلاط و چرخش سیال مخزن تزریق را بر عهده داشت. برای کنترل غلظت جریان جت، علاوه بر کنترل و اندازه‌گیری حجمی رابطه بین EC و غلظت برای دماهای مختلف اندازه‌گیری و محاسبه می‌شد. به منظور دستیابی به روابط حاکم به صورت عبارات بدون بعد در این تحقیق اقدام به آنالیز ابعادی بین پارامترهای مؤثر در این پدیده شد. با توجه به مکانیسم پدیده جریان جت می‌توان پارامترهای مرتبط با آن را به صورت زیر نوشت:

$$f(\rho_a, \mu_j, U_0, D_i, d_p, x, X, \rho_j, \Delta\rho, g, Z_u, Z_0, v_x) = 0 \quad (4)$$

که در آن  $\rho_a$  = جرم حجمی سیال پیرامون؛  $v_x =$  لزوجت سینماتیک اولیه سیال جت؛  $U_0 =$  سرعت اولیه ورودی

برای اجرای آزمایش مطابق شکل ۲، آب زلال از طریق مخزن تأمین و با پمپ به فلوم منتقل و فلوم تا ارتفاع معلومی از آب پر شد. جریان جت نیز از طریق مخزن تزریق و پمپ مربوط به درون فلوم آزمایشگاهی منتقل شد. طول و ارتفاع منحنی پایین‌افتادگی در سرعت‌های ورودی مختلف سیال جت، غلظت و دمایی سیال تزریق شونده، دبی جریان جت، و غلظت و دمایی منبع آب پذیرنده اندازه‌گیری شده روی دیواره‌های جانبی فلوم که از جنس پلکسی‌گلاس ساخته شده است. طول سنج شفاف چاپ شده بر صفحه‌ای شفاف با دقت ۱ میلی‌متر به صورت بسیار دقیق چسبانده شد که منحنی‌های پایین‌افتادگی با استفاده از آن اندازه‌گیری شود. با دو دوربین دقیق دیجیتالی با وضوح دیداری ۵ مگا پیکسل، که در موقعیت ثابت و معلوم نسبت به فلوم و نسبت به یکدیگر قرار داشتند، از کلیه آزمایش‌ها تصویربرداری شد. همه برداشت‌های منحنی‌ها با استفاده از تصاویر گرفته شده کنترل و برای بار دوم اندازه‌گیری می‌شد. روی مسیر خط لوله انتقال جریان جت به درون فلوم، یک دبی‌سنج مغناطیسی بسیار دقیق ۲ اینچ 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 به صورت مکعب مستطیل ساخته و حجم آن در ارتفاع‌های مختلف با نصب اشل استاندارد مشخص شد. با توجه به حجم به‌دست آمده، میزان مشخصی از نمک، مطابق با شرح‌نامه آزمایش‌های، در مخزن جداگانه‌ای حل و به درون مخزن تزریق انتقال داده می‌شد. میزان غلظت نمک با توجه به حجم مخزن، که دارای حجم کلی ۱۹۲۵ لیتر بود، محاسبه و در مخزن تزریق حل می‌شد. جرم مخصوص سیال جت با روش شناوری و اندازه‌گیری آزمایشگاهی با

پارامتر شناوری جریان جت، بخش پنجم نسبت طولی جریان پیش رونده جریان جت، بخش ششم نسبت طولی بخش شناوری مثبت، و بخش هفتم نسبت تغییرات طولی سرعت جریان است. با توجه به این روابط، در کلیه آزمایش‌های پارامترهای مختلف در روابط بدون بعد اندازه‌گیری و میزان اعداد فوق محاسبه شد. حداقل عدد رینولدز با توجه به برنامه آزمایش‌ها و پارامترهای اندازه‌گیری شده ۲۵۰۰ بود که همه آزمایش‌ها را در محدوده جریان متلاطم قرار می‌دهد. بنابراین، در ارائه نتایج از بررسی عدد رینولدز صرف نظر شده است. شکل

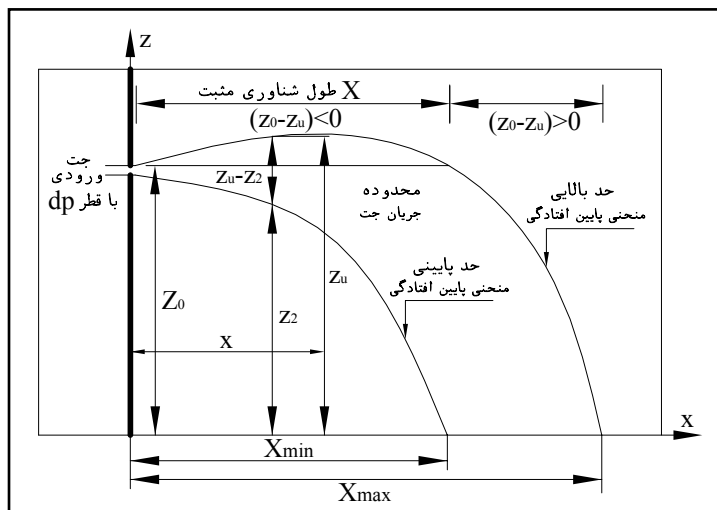
۳ برخی از پارامترهای فوق را نمایش می‌دهد. در شکل ۳، محور Z مختصات منطبق بر محل جت و مبدا مختصات در راستای محور جت و منطبق بر کف فلوم آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. در این شکل مشخص شده است که طول شناوری مثبت به لحاظ ریاضی با تغییر علامت دادن  $(Z_0-Z_u)$  قابل محاسبه است. در حالتی که حد بالایی منحنی نسبت به محل جت افزایش عمق نشان می‌دهد،  $(Z_0-Z_u)$  دارای علامت منفی است که طول طی شده منحنی در این حالت طول شناوری مثبت نامیده شده است. جدول ۱، برنامه آزمایشی را در این تحقیق نمایش می‌دهد.

جت؛  $Di =$  قطر ورودی قبل از جت؛  $dp =$  قطر جت؛  $x =$  فاصله طولی شار جریان جت از محل جت؛  $X =$  فاصله‌ای که تا آن نقطه جریان جت رو به بالا حرکت می‌کند؛  $\rho_j =$  جرم حجمی سیال جت؛  $\Delta\rho =$  گرادیان جرمی بین سیال جت و سیال پیرامون؛  $g =$  شتاب ثقل؛  $Z_u =$  ارتفاع مرز بالایی جریان جت؛  $Z_0 =$  ارتفاع محل جت در بالاترین قسمت قطر؛ و  $v_x =$  سرعت طولی در جهت x است. با استفاده از آنالیز ابعادی بین پارامترهای فوق، روابط بدون بعد مهم زیر برای این پدیده استخراج شد:

$$f\left(\underbrace{\frac{\rho_j U_0 d_p}{\mu_j}}_{(1)}, \underbrace{\frac{U_0}{\sqrt{(\frac{\Delta\rho}{\rho_a} \cdot g \cdot d_p)}}}_{(2)}, \underbrace{\frac{D_i}{d_p}}_{(3)}\right) \quad (5)$$

$$\underbrace{\left(\frac{Z_0 - Z_u}{x}\right)}_{(4)}, \underbrace{\frac{x}{d_p}}_{(5)}, \underbrace{\frac{X}{d_p}}_{(6)}, \underbrace{\frac{v_x}{U_0}}_{(7)} = 0$$

در رابطه ۵، بخش اول به عدد رینولدز فلاکس ورودی، بخش دوم عدد فرود جرمی جریان جت، بخش سوم نسبت فشردگی جریان جت (پارامتر هندسه جت)، بخش چهارم



شکل ۳- نمایش منحنی پایین افتادگی جریان جت به همراه پارامترهای مربوط

جدول ۱- برنامه آزمایش‌های اجرا شده تحت اثر همزمان هندسه و غلظت سیال جت

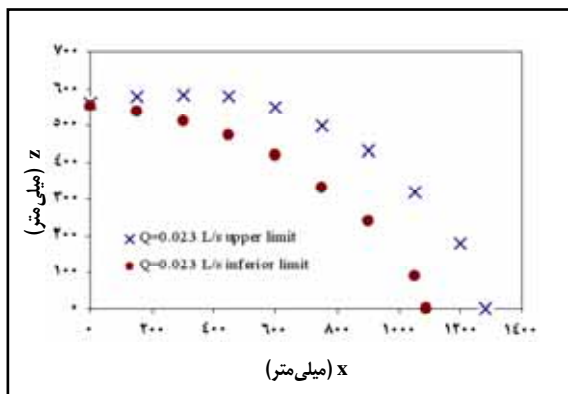
دبی جت (لیتر در ثانیه)	قطر (میلی‌متر)	غلظت (گرم بر لیتر)	دبی جت (لیتر در ثانیه)	قطر (میلی‌متر)	غلظت (گرم بر لیتر)
۰/۰۱۴			۰/۰۱۴		
۰/۰۲۶			۰/۰۲۶		
۰/۰۳۷	۵		۰/۰۳۷	۵	
۰/۰۴۸			۰/۰۴۸		
۰/۰۲۶			۰/۰۲۶		
۰/۰۵۳		۳۰	۰/۰۵۳		
۰/۰۷۸	۸		۰/۰۷۸	۸	۱۵
۰/۱۱۰			۰/۱۱۰		
۰/۰۸۱			۰/۰۸۱		
۰/۱۷۵			۰/۱۷۵		
۰/۲۷۸	۱۵		۰/۲۷۸	۱۵	
۰/۳۷۵			۰/۳۷۵		

### نتایج و بحث

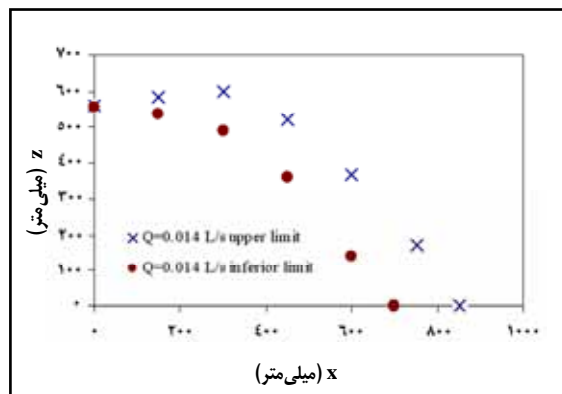
#### نتایج تحلیلی آزمایش‌ها و بررسی منحنی‌های پایین افتادگی

در بالا گفته شد که آزمایش‌ها در سه قطر، چهار دبی، و دو جرم مخصوص اجرا شد. منحنی پایین افتادگی به صورت مختصاتی (X,Z) اندازه‌گیری شد. مختصات Y به دلیل ثابت بودن و تقارن نسبت به خط مرکزی و یا هسته جت برداشت نمی‌گردید. شکل ۴ منحنی پایین افتادگی برای قطر ۵ میلی‌متر و غلظت ۱۵ گرم در لیتر را برای چهار دبی (چهار سرعت ورودی سیال جت) نمایش می‌دهد.

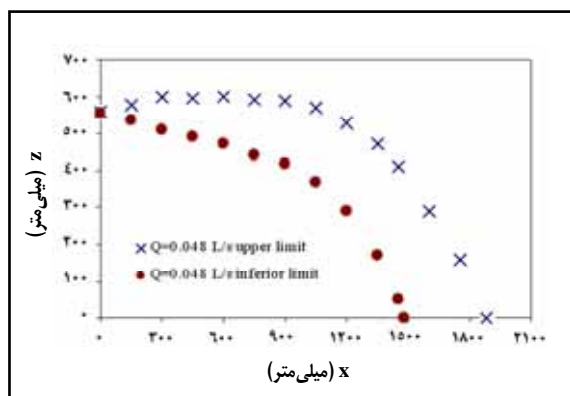
در جدول ۱، بخش اول مربوط به آزمایش با غلظت ۱۵ گرم بر لیتر و بخش دوم مربوط به آزمایش با غلظت ۳۰ گرم بر لیتر است. کلیه آزمایش‌ها در ۳ قطر ۵ و ۸ و ۱۵ میلی‌متر تحت چهار حالت دبی اجرا شد. دبی‌های جریان جت طوری انتخاب شد که سرعت‌های ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵، و ۲ متر بر ثانیه برای جریان ورودی ایجاد کند. در تمام آزمایش‌ها، دمای جریان جت و منبع آب پذیرنده یکسان بود که به دلیل آن اعمال شرایط یکسان دمایی است. در آزمایش‌ها، از آب نمک با غلظت‌های متفاوت استفاده شد و نیز با استفاده از دماسنج و هیدرومتر، دما و دانسیته هر دو جریان جت و منبع آب پذیرنده اندازه‌گیری و کنترل می‌شد.



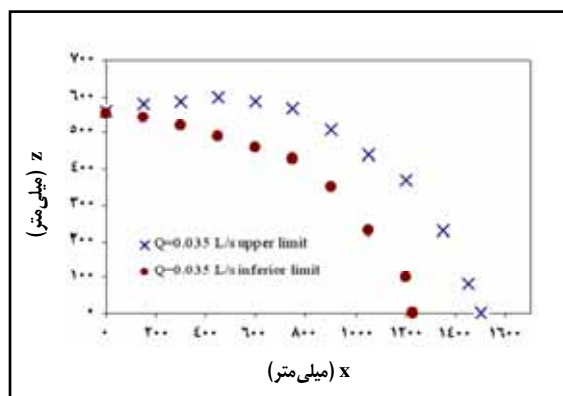
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴- نتایج منحنی‌های پایین افتادگی سیال جت برای قطر ۵ میلی‌متر با غلظت ۱۵ گرم بر لیتر

طول تراژکتوری را نسبت به غلظت و هندسه جت نمایش می‌دهد. به دلیل اینکه بین سیال تزریق شونده و سیال پیرامون اختلاف جرم نسبی وجود دارد، جریان جت در سیال پذیرنده پخش و در یک طول ثابت باعث ایجاد دو ارتفاع می‌شود. اگر سیال تزریق جت در هوا (غیر مستغرق) انتشار یابد پخشیدگی ایجاد نخواهد شد؛ از این رو دو مقدار برای  $Z$  برداشت و محاسبات و نمودارهای مربوط به حد بالایی و حد پایینی ترسیم شد.

این آزمایش‌ها و بررسی‌ها برای غلظت ۳۰ گرم بر لیتر و قطرهای ۸ میلی‌متر و ۱۵ میلی‌متر نیز دنبال و بدین ترتیب کلیه نمودارهای مربوط به هر آزمایش ترسیم شد. در همه شکل‌ها و داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده  $Z_2$  و  $Z_{II}$  برای هر آزمایش برداشت شد که  $Z_{II}$  مربوط به حد بالایی منحنی و  $Z_2$  مربوط به حد پایینی آن است. بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش جرم مخصوص یا افزایش غلظت تأثیر معنی‌داری بر طول منحنی ( $X$  در شکل‌های فوق) دارد. جدول ۲ نتایج کلی تغییرات

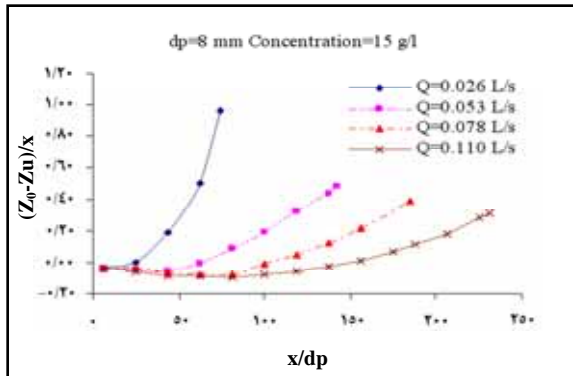


جدول ۲- نتایج تغییرات طول منحنی پایین افتادگی نسبت به غلظت و هندسه جت

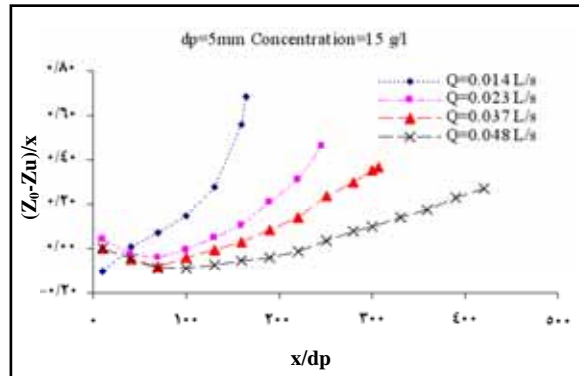
قطر جت ۱۵ میلی‌متر		قطر جت ۸ میلی‌متر		قطر جت ۵ میلی‌متر		دبی جت (لیتر بر ثانیه)	غلظت (گرم بر لیتر)
$X_{min}$	$X_{max}$	$X_{min}$	$X_{max}$	$X_{min}$	$X_{max}$		
۰/۸۲	۰/۹۴	۰/۴۴	۰/۵۹	۰/۷	۰/۸۲	$Q_1$	۱۵
۱/۲۳	۱/۴۲	۰/۹۸	۱/۱۴	۰/۹۹	۱/۲۳	$Q_2$	
۱/۵۰	۱/۷۵	۱/۳۳	۱/۴۸	۱/۱۴	۱/۵۳	$Q_3$	
۱/۶۸	۱/۸۸	۱/۶	۱/۸۵	۱/۵۲	۲/۱	$Q_4$	
۰/۵۲	۰/۵۸	۰/۴۷	۰/۵۷	۰/۵۳	۰/۶۱	$Q_1$	۳۰
۰/۹۵	۱/۱۰	۰/۸۲	۰/۹۹	۰/۹۲	۱/۰۵	$Q_2$	
۱/۲۶	۱/۶۸	۱/۲۸	۱/۴۲	۱/۱۲	۱/۲۸	$Q_3$	
۱/۶۹	۲/۰	۱/۶۸	۱/۹۵	۱/۴۲	۱/۷	$Q_4$	

نیروی شناوری منفی حاکم است به طوری که وزن سیال تزریق شونده نسبت به نیروهای شناوری و هیدرودینامیکی جریان فزونی می‌یابد و منحنی پایین افتادگی را باعث می‌شود. در این ناحیه، اختلاط کاملی بین سیال جت و سیال تزریق شونده به وجود می‌آید و دلیل آن گسترش فلاکس جریان جت است. بر اساس آنالیز ابعادی اجرا شده در این تحقیق و روابط بدون بعد استخراج شده نمودارهای مربوط ترسیم شد. در شکل‌های ۵ و ۶ ارتباط بین پارامتر شناوری با نسبت طولی فاصله پایین افتادگی از محل جت برای قطرهای ۵، ۸، و ۱۵ میلی‌متر برای دو غلظت ۱۵ و ۳۰ گرم بر لیتر ترسیم شده است.

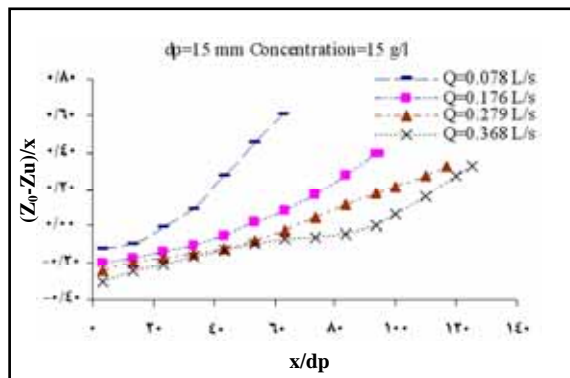
در جدول ۲،  $X_{min}$  و  $X_{max}$  مربوط به طول کلی منحنی پایین افتادگی است که به ترتیب برابر با حداکثر طول منحنی برای حد بالایی و پایینی هستند که در شکل ۳ نمایش داده شده است. به طور کلی در محاسبات، برای نیروی شناوری دو ناحیه قابل تفکیک است؛ ناحیه اول دارای شناوری مثبت است که باعث می‌شود حد بالایی منحنی نسبت به مرکز تزریق جت افزایش عمق نشان دهد که این موضوع در غلظت پایین تر فزونی بیشتری دارد. همچنین در سرعت‌های تزریق بیشتر به دلیل افزایش تنش‌های اصطکاکی که ناشی از گرادیان فشاری است، میزان شناوری مثبت بیشتر است. در ناحیه دوم جریان



(ب) قطر جت ۸ میلی‌متر



(الف) قطر جت ۵ میلی‌متر



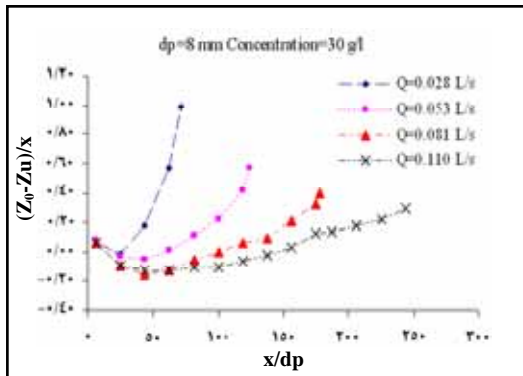
(ج) قطر جت ۱۵ میلی‌متر

شکل ۵- تغییرات پارامتر شناوری در مقابل نسبت طولی منحنی پایین افتادگی (غلظت ۱۵ گرم بر لیتر)

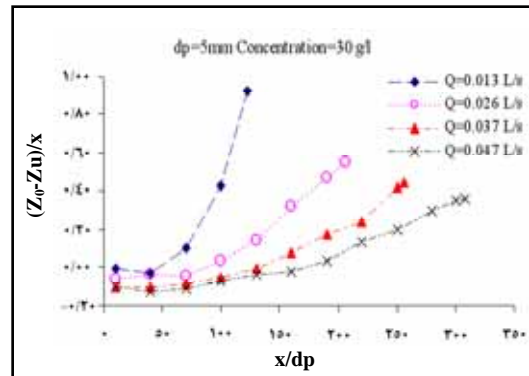
میزان طول نسبی و یا طول منحنی پایین افتادگی ایجاد شده کاهش خواهد یافت که در بخش بحث و نتایج تغییرات به صورت کمی ارائه می‌شود. عدد فرود جرمی جت  $(Fr_j)$  و  $X/dp$  محاسبه و ترسیم شد  $(X)$  طولی است که در آن منحنی رو به بالا حرکت می‌کند. در جدول ۳، محاسبات مربوط برای غلظت‌های ۱۵ و ۳۰ گرم بر لیتر آورده شده است.

همان‌طور که در شکل‌های فوق مشخص است، با افزایش دبی جت (سرعت ورودی جریان جت) شیب تغییرات پارامتر شناوری در مقابل  $x/dp$  کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش  $x/dp$  در تغییراتی مساوی برای پارامتر شناور است و به عبارت دیگر، با افزایش سرعت ورودی طول شناوری مثبت افزایش خواهد داشت. با مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان دریافت که با افزایش غلظت،

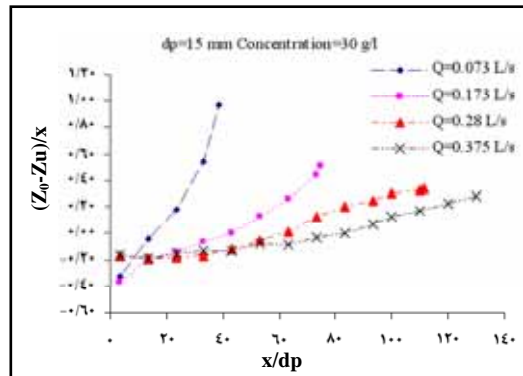
بررسی تأثیر همزمان هندسه جت‌های مستغرق...



(ب) قطر جت ۸ میلی‌متر



(الف) قطر جت ۵ میلی‌متر



(ج) قطر جت ۱۵ میلی‌متر

شکل ۶- تغییرات پارامتر شناوری در مقابل نسبت طولی منحنی پایین افتادگی (غلظت ۳۰ گرم بر لیتر)

یافته است. مقدار کاهش طول نسبی شناوری بین ۵ تا ۲۰ درصد برای قطرهای مختلف مشاهده شد که اعداد کمتر مربوط به قطر ۸ میلی‌متر و دلیل عمده آن تعادل نسبی بین نیروهای اصطکاکی و جلوبرنده (مومنتم) است. با توجه به اعداد مندرج در جدول ۳، رابطه بین عدد فرود جرمی با طول نسبی شناوری به صورت رگرسیون آماری برآورد شد. با توجه به برآورد آماری، ضریب همبستگی بسیار بالایی بین عدد فرود دنسیمیتریک با طول نسبی شناوری به صورت خطی وجود دارد. در جدول ۴ این ضرایب و معادلات به دست آمده آورده شده است.

طول نسبی شناوری به لحاظ ریاضی با تغییر علامت دادن پارامتر شناوری و درون‌یابی قابل محاسبه است. در جدول ۳، ستون اول و دوم مربوط به پارامتر هندسه، ستون‌های چهارم و پنجم محاسبات عدد فرود دنسیمیتریک و پارامتر شناوری برای غلظت ۱۵ گرم بر لیتر، و ستون‌های ششم و هفتم مربوط به غلظت ۳۰ گرم بر لیتر است. بر اساس محاسبات و نتایج آزمایشگاهی، مقادیر  $(\Delta\rho/\rho_a)$  برای دو این دو غلظت به ترتیب ۰/۰۰۹۸۱ و ۰/۰۱۸۵۲ محاسبه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، عدد فرود جرمی با افزایش غلظت و مقادیر طول نسبی شناوری نیز به تبع آن کاهش

جدول ۳- محاسبات عدد فرود و طول نسبی شناوری مثبت در کلیه داده‌های آزمایشگاهی

X/dp	عد فرود (غلظت ۳۰ گرم بر لیتر)	X/dp	عد فرود (غلظت ۱۵ گرم بر لیتر)	دبی جت (لیتر بر ثانیه)	قطر جت (میلی‌متر)	Di/dp
۴۶/۰۰	۲۱/۹۷	۳۷/۲۷	۳۲/۵۰	۰/۰۱۴		
۸۵/۵۲	۴۳/۹۴	۱۰۵/۲۶	۵۲/۴۰	۰/۰۲۳	۵	۵/۰۸
۱۳۲/۵۹	۶۵/۵۲	۱۳۷/۹۴	۸۵/۹۱	۰/۰۳۷		
۱۷۰/۱۲	۷۹/۴۲	۲۲۸/۲۴	۱۱۱/۴۵	۰/۰۴۸		
۲۶/۴۹	۱۴/۶۱	۲۵/۰۰	۱۸/۶۴	۰/۰۲۶		
۵۹/۷۱	۲۷/۶۶	۶۴/۴۸	۳۸/۰۰	۰/۰۵۳	۸	۳/۱۸
۱۰۱/۸۳	۴۲/۲۷	۱۰۴/۴۰	۵۵/۹۳	۰/۰۷۸		
۱۴۵/۹۰	۵۷/۴۰	۱۵۲/۲۰	۷۸/۸۷	۰/۱۱۰		
۱۵/۱۷	۷/۹۱	۲۳/۹۴	۱۱/۶۲	۰/۰۷۸		
۴۲/۸۹	۱۸/۷۵	۵۰/۶۴	۲۶/۲۱	۰/۱۷۶	۱۵	۲/۵۴
۶۱/۲۳	۳۰/۳۵	۶۶/۳۸	۴۱/۵۵	۰/۲۷۹		
۸۲/۹۰	۴۰/۶۵	۹۱/۸۱	۵۴/۸۱	۰/۳۶۸		

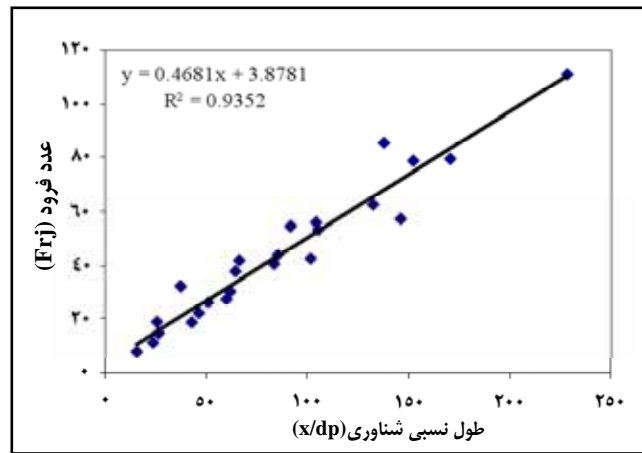
جدول ۴- روابط بین عدد فرود جرمی با طول نسبی شناوری در آزمایش‌های مختلف

ضریب رگرسیون (درصد) $R^2$	معادله	غلظت (گرم بر لیتر)	قطر (میلی‌متر)
۹۵/۰۳	$\frac{X}{d_p} = 2.33 Fr_j - 38.09$	۱۵	۵
۹۹/۵۲	$\frac{X}{d_p} = 2.20 Fr_j - 5.74$	۳۰	
۹۹/۹۸	$\frac{X}{d_p} = 2.12 Fr_j - 14.90$	۱۵	۸
۹۹/۹۱	$\frac{X}{d_p} = 2.80 Fr_j - 16.06$	۳۰	
۹۸/۷۱	$\frac{X}{d_p} = 1.53 Fr_j + 6.87$	۱۵	۱۵
۹۹/۱۸	$\frac{X}{d_p} = 2.03 Fr_j + 0.93$	۳۰	

بررسی تأثیر همزمان هندسه جت‌های مستغرق...

مقابل طول نسبی کاهش می‌یابد که به صورت کمی در بخش مربوط ارائه شده است. شکل ۷، ارتباط کلی بین تمام داده‌های آزمایشگاهی برای عدد فرود دنسیمتریک و طول نسبی را نمایش می‌دهد. شکل ۷ رابطه بین عدد فرود جرمی با نسبت طولی شناوری را که به صورت خطی با ضریب همبستگی قابل قبولی برقرار است نمایش می‌دهد؛ در شکل، معادله مربوط نیز نوشته شده است.

بر اساس نتایج جدول ۴، رابطه بین عدد فرود جرمی با طول نسبی شناوری به صورت خطی ضریب همبستگی بالایی دارد به طوری که حداقل مقدار ضریب رگرسیون ۰/۹۵ برآورد شده است. در شکل‌های فوق شیب خط مربوط، که در واقع به لحاظ فیزیکی نشان دهنده آهنگ تغییرات عدد فرود در مقابل طول نسبی شناوری است، در مقابل پارامتر هندسه جت ترسیم و مشخص شد که با افزایش پارامتر هندسه آهنگ تغییرات عدد فرود در



شکل ۷- رابطه بین عدد فرود جرمی با طول نسبی شناوری

### تحلیل‌های کمی و کیفی نتایج

در این تحقیق، برای بررسی تأثیر همزمان هندسه جت و غلظت سیال بر منحنی‌های پایین افتادگی و محاسبات مربوط از قبیل عدد فرود جرمی

پارامتر شناوری  $(Fr_j = (U_0 / \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho_a} g \cdot d_p}))$

پارامتر هندسه  $(G_n = \frac{D_i}{d_p})$ ، طول  $(B_n = \frac{Z_0 - Z_u}{x})$

نسبی شناوری  $(\frac{X}{d_p})$  برنامه آزمایش‌ها اجرا و ارتباط بین

روابط بدون بعد تعیین و مشخص شد که بین عدد فرود جرمی و طول نسبی شناوری رابطه خطی با ضریب

عدد فرود جرمی به قطر، دبی، و غلظت سیال جت وابسته است و همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش عدد فرود دنسیمتریک مقدار طول نسبی شناوری یا طول اختلاط به صورت خطی افزایش می‌یابد؛ افزایش عدد فرود با کاهش دانسیته جریان جت یا کاهش قطر جت امکان‌پذیر است. با کاهش دانسیته نیروی وزن سیال جت کاهش می‌یابد 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 می‌شود و نیروهای اصطکاکی مقابل جریان کاهش می‌یابد و باعث پیشروی فلاکس جریان می‌شود.

رگرسیون رضایت بخشی برقرار است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان تغییر طول منحنی‌های پایین‌افتادگی برای قطر ۸ میلی‌متر نسبت به قطر ۵ میلی‌متر، با کاهش طول ۱۰ الی ۳۰ درصدی در سرعت‌های مختلف همراه است؛ دلیل عمده این موضوع کاهش نیروهای اصطکاکی در اثر کاهش عرض پیشانی جت (ZU-Z2) برای قطر ۵ میلی‌متری و در نتیجه آن سطح کمتر مقابل جریان و کاهش نیروی هیدرودینامیکی درگ است. گفتنی است که در بررسی جریان جت مستغرق سه نیروی عمده دخالت دارند: نیروی شناوری، نیروی درگ یا اصطکاکی ناشی از فشار، و نیروی جلوبرنده مومنتم.

نتایج از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که برای جت ۱۵ میلی‌متر نسبت به جت ۸ میلی‌متر، افزایش طول منحنی‌های پایین‌افتادگی تا ۴۰ درصد قابل انتظار است که دلیل عمده آن غلبه نیروهای مومنتم جریان به علت افزایش معنی دار دبی جریان در مقایسه با نیروهای اصطکاکی مقابل جریان است. در واقع، منتهی‌نیروهای جلوبرنده و نیروهای اصطکاکی در اثر افزایش قطر طول منحنی‌های پایین‌افتادگی را به شکل معنی‌داری افزایش خواهد داد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که طول تراژکتوری در ازای افزایش غلظت تا دو برابر، از صفر تا ۴۰ درصد کاهش می‌یابد که اعداد کمتر به سرعت‌های ورودی کمتر و اعداد بیشتر به سرعت‌های بیشتر اختصاص دارد. دلیل این موضوع غلبه منتهی‌نیروی شناوری و هیدرودینامیکی (اصطکاکی) درگ بر نیروی جلوبرنده جریان (مومنتم) است. طول نسبی شناوری برای پارامتر هندسه (Di/dp) برابر ۵/۰۸، که حداکثر مقدار مورد استفاده در آزمایش‌ها بود، برای غلظت ۱۵ گرم بر لیتر از ۳۷ تا ۲۲۸ تغییر می‌کرد درحالی‌که برای غلظت ۳۰ گرم بر لیتر تفاوت از ۴۶ تا ۱۷۰ برآورد شد. طول نسبی شناوری برای Di/dp برابر ۲/۵۴، که حداقل مقدار مورد استفاده در آزمایش‌ها

بود، برای غلظت ۱۵ گرم بر لیتر از ۲۳ تا ۹۱ تغییر می‌کرد و این درحالی است که برای غلظت ۳۰ گرم بر لیتر تفاوت از ۱۵ تا ۸۳ برآورد شد. این موضوع به دلیل کاهش نیروهای هیدرودینامیکی درگ در جریان جت برای Di/dp بزرگتر است.

برای هر دو غلظت سیال جت و کلیه پارامترهای هندسه جت، تغییر طول نسبی شناوری، از دبی ۰/۱۴ به ۰/۲۳ لیتر بر ثانیه برای قطر ۵ میلی‌متر، از دبی ۰/۵۳ به ۰/۷۸ لیتر بر ثانیه برای قطر ۸ میلی‌متر، و از دبی ۰/۱۱۰ به ۰/۲۰۰ درصد است درحالی‌که در گام‌های بعدی برای افزایش دبی، طول نسبی حداکثر ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. گفتنی است که اولین دبی برای هر قطر حدوداً در ناحیه جریان بینابین است درحالی‌که در گام‌های بعدی دبی، جریان در ناحیه آشفته کامل و تنش‌های رینولدزی قرار دارد.

با کاهش پارامتر هندسه از ۵/۰۸ به ۳/۱۸ (۳۷ درصد کاهش)، عدد فرود جرمی به‌طور کلی بین ۲۵ تا ۳۸ درصد برای دبی‌های مختلف کاهش می‌یابد درحالی‌که طول نسبی شناوری بین ۲۰ تا ۴۰ درصد کاهش خواهد یافت ولی، آهنگ کاهش طول نسبی شناوری نسبت به عدد فرود کمتر است. با کاهش پارامتر هندسه از ۳/۱۸ به ۲/۵۴ (۲۰ درصد کاهش)، تغییرات برای عدد فرود و طول نسبی شناوری بین ۳۰ تا ۴۰ درصد است.

با افزایش پارامتر هندسه از ۲/۵۴ به ۳/۱۸، شیب خط تغییرات عدد فرود در مقابل طول نسبی به میزان ۲۷ درصد برای هر دو غلظت ۱۵ و ۳۰ گرم بر لیتر کاهش می‌یابد درحالی‌که با افزایش پارامتر هندسه از ۳/۱۸ به ۵/۰۸، این شیب به مقدار بسیار کمتری (تا حدود ۱۰ درصد) کاهش می‌یابد. با این توصیف برای مقادیر بالاتر از پارامتر هندسه (یعنی افزایش ضریب فشردگی که ناشی از کاهش قطر یا افزایش قطر اولیه است) آهنگ تغییرات عدد فرود جرمی در مقابل طول نسبی شناوری به پارامتر

بررسی تأثیر همزمان هندسه جت‌های مستغرق...

پایین‌افتادگی در منابع آب پذیرنده تأثیر بسزایی دارد، درحالی‌که نیروی شناوری به ابعاد ناحیه جت، نیروی اصطکاکی درگ به سطح پیشانی جریان جت، و نیروی مومنتم به سرعت ورودی جریان جت و پارامتر هندسه جت وابسته است. بر این اساس، منته‌نیروهای فوق برای قطر ۸ میلی‌متر به گونه‌ای است که نسبت به قطر ۵ میلی‌متر و ۱۵ میلی‌متر کاهش طول منحنی پایین‌افتادگی را نشان می‌دهد و از طرفی افزایش طول منحنی برای قطر ۱۵ میلی‌متر به دلیل افزایش نسبتاً زیاد نیروهای جلوبرنده نسبت به نیروهای شناوری و اصطکاکی درگ نسبت به قطر ۵ میلی‌متر کاملاً مشهود و نمایان است.

• بررسی‌ها و آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بین عدد فرود دنسیمیتریک و طول نسبی شناوری رابطه‌ی زیر با ضریب رگرسیون  $R^2 = 0.9352$  برقرار است:

$$Fr_j = 0.4681 \frac{X}{d_p} + 3.878$$

هندسه وابستگی کمتری نشان خواهد داد.

### نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌های اجرا شده در این تحقیق در خصوص تأثیر همزمان غلظت پساب خروجی ناشی از جریان جت به منبع آب پذیرنده و هندسه جت مستغرق بر روی طول شناوری مثبت، به صورت کمی در بخش گذشته ارائه شد. خلاصه این نتایج را می‌توان در بندهای زیر خلاصه کرد.

- عدد فرود جرمی و پارامتر هندسه جت یا ضریب فشردگی جریان جت تأثیر معنی‌داری بر طول شناوری مثبت دارد به طوری که آهنگ تغییرات عدد فرود جرمی با طول نسبی شناوری مثبت با تغییر پارامتر هندسه تغییر می‌کند درحالی‌که با افزایش مقادیر پارامتر هندسه تأثیر آن بر آهنگ تغییرات عدد فرود دنسیمیتریک در مقابل طول شناوری مثبت کاهش می‌یابد.

- منته‌نیروهای شناوری و اصطکاک به همراه نیروهای مومنتم (جلوبرنده) بر طول کلی منحنی‌های

## قدردانی

حمایت‌های آموزشی و پژوهشی گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز از مؤلفان مقاله قابل تقدیر است و از سازمان آب و برق خوزستان معاونت سد و نیروگاه نیز به واسطه پشتیبانی مالی از این تحقیق قدردانی می‌شود.

## مراجع

- Ahadiyan, J., Musavi Jahromi, S. H. 2009a. Simulation of buoyant jet properties at the downstream of power plant using thermal gradient. National Conferences of Dam and Ppower Plant. Tehran. Iran.
- Ahadiyan, J., Musavi Jahromi, S. H. 2009b. Evaluation of jet flow momentum in the shallow water using Flow-3D. International Conference of Resource Management. Tabriz. Iran.
- Albertson, M. L., Dai, Y. B., Jenson, R. A. and Rouse, H. 1950. Diffusion of submerged jets. Trans. Am. Soc. Civil Eng. 115, 639-664.
- 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.
- Cardoso, S. S. S. and Zarrebini, M. 2001a. Convection driven by particle settling surrounding a turbulent plume. Chem. Eng. Sci. 56, 3365-3375.
- Cardoso, S. S. S. and Zarrebini, M. 2001b. Sedimentation of polydispersed particles from a turbulent plume. Chem. Eng. Sci. 56, 4725-4736.
- Del Bene, J. V., Jirka, G. and Largier, J. 1994. Ocean brine disposal. Desalination. 97(1-3), 365-372.
- Fischer, H. B. 1971. The dilution of an undersea sewage cloud by salt fingers. Water Res. 5, 909-915.
- Jirka, G. H. 2004. Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part 1: Single round jet. Environ. Fluid Mech. 4, 1-56.
- Jirka, G. H. 2006. Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part 2: Plane jet dynamics resulting from multiport diffuser jets. Environ. Fluid Mech. 6, 43-100.
- Kunze, E. 1987. Limits on growing, finite-length fingers: A Richardson number constraint. J. Mar. Res. 45, 533-556.
- Kunze, E. 1995. Quantifying salt-fingering fluxes in the ocean. Double-diffusive convection. Brandt, A. and Fernando, J. (Eds.) AGU Geophysical Monograph. 94, 313-320



بررسی تأثیر همزمان هندسه جت‌های مستغرق...

**Law, W.A., Fun Ho, W. and Monismith, G. S. 2004. Double diffusive effect on desalination discharges. J. Hydraul. Eng. 122(11): 450-457.**

**Maxworthy, T. 1983. The dynamics of double diffusive gravity currents. J. Fluid Mech. 128, 259-282.**

**Turner, J. S. 1967. Salt fingers a density interface. Deep-Sea Res. Oceanogr. Abst. 14, 599-611**

**Turner, J. S. 1998. Stratification and circulation produced by heating and evaporation on a shelf. J. Mar. Res. 56, 855-904**



**Simultaneous Effect of Jet Geometry and Concentration  
of Sewage Outflow on the Positive Mixing Length  
of Flux Buoyancy in a Buoyant Jet  
J. Ahadiyan\* and S. H, Musavi Jahromi**

\* Corresponding Author: Assisstant Profossor, Shahid Chamran University, P. O. Box: 61357-43311, Email: ja\_ahadiyan@yahoo.com

In this research, the positive mixing length and trajectory characteristics of a buoyant jet was investigated. Jet flux is dependent on parameters such as initial velocity, port diameter, concentration of jet and flow conditions in the receiving fluid. A buoyant jet fluid governing equation with relevant logical assumptions was used to drive the required dimensionless functions using dimensional analysis. A physical model was built to evaluate the function of these parameters. Testing was done at varying velocities, concentrations and initial port diameters. The length of the falling jet trajectory was analyzed as the ratio of trajectory length to port diameter versus relative trajectory elevation. The results showed that increasing jet diameter and jet momentum had a significant effect on jet trajectory. Increasing jet fluid density caused a density gradient between the jet and receiving fluid and a change in the buoyancy forces involved which had a major influence on the length of the falling jet trajectory. Hence at a given density, increasing the diameter from 5-8 mm or 8-15 mm decreased the densimetric Froude number 30-40% for different velocities and the ratio of the length of positive flux buoyancy to port diameter decreased 20-35%. Findings showed that doubling the increase in density decreased the length of positive flux buoyancy 5-20%.

**Key Words:** Concentration, Densimetric Froude Number, Length of Positive Buoyancy, Round Buoyant Jet Trajectory