



## بررسی آزمایشگاهی تخلیه زهاب چگال تحت جت سطحی منفرد و متلاطم در جریان‌های پایدار

سمیرا سلمان‌زاده و جواد احدیان\*\*\*

\* نگارنده مسئول: گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. تلفن: ۰۶۱)۳۳۷۵۵۲۴۷،

پایان‌نگار: ja\_ahadiyan@yahoo.com

\*\* به ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد؛ و دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۳۰

### چکیده

در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی تخلیه زهاب چگال تحت جت سطحی منفرد و متلاطم در جریان‌های پایدار پرداخته شده است. تأثیر پارامترهای هیدرولیکی شامل دبی تزریق و غلظت جت چگال و پارامترهای هندسی شامل قطر و زاویه همگرایی نازل تخلیه‌کننده جریان بر پیشروی محدوده جریان جت بررسی شد. جت هیدرولیکی سطحی به قطرهای ۵، ۸ و ۱۵ میلی‌متر تحت زاویه‌های همگرایی مختلف نازل، در آزمایشگاه هیدرولیک آزمایش شد. خصوصیات مهم منحنی‌های پایین‌افتادگی جریان جت که شامل حد انتهایی پیشروی افقی جریان جت نسبت به محل خروج یا موقعیت نقطه شیرجه ( $X_p$ )، حداکثر طول مرز بالایی ( $X_{max}$ ) و حداکثر طول مرز پایینی ( $X_{min}$ ) است، بررسی گردید. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که توسعه محدوده پیشروی جریان جت سطحی چگال در اعداد فرود فوق‌بحرانی صورت می‌پذیرد. همچنین، تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که به‌طور میانگین با افزایش زاویه همگرایی نازل جت، از ۱۵ به ۹۰ درجه،  $X_p$  به اندازه ۴۱ درصد،  $X_{max}$  به اندازه ۴۰ درصد و  $X_{min}$  در حدود ۴۵ درصد افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق با استفاده از تحلیل آماری نشان می‌دهد که بین خصوصیات منحنی پایین‌افتادگی با عوامل توسعه جریان جت رابطه غیرخطی با دقت قابل قبولی برقرار است.

### واژه‌های کلیدی

توسعه محدوده پیشروی جت، زاویه همگرایی، عدد فرود چگال، عدد وبر پیشرونده، منحنی پایین‌افتادگی

### مقدمه

آخرین محل برخورد آلاینده با کف منابع آبی از لحاظ حفظ محیط‌زیست بستر، اهمیت پیدا می‌کند. رایج‌ترین روش تخلیه پساب، تخلیه از طریق انواع تخلیه‌کننده‌ها و کانال‌های ساحلی در منابع آب پذیرنده است. کوارافالو (Kourafalou, 2001) در استفاده از تخلیه‌کننده‌های شناور برای تخلیه زهاب در رودخانه‌ها مشاهده کرده است که سطح آب در دو طرف تخلیه‌کننده همگرا و در نتیجه ذرات معلق و آلودگی‌ها در این نقطه متمرکز می‌شوند. تمرکز این مواد در محل تخلیه‌کننده سبب تجمع و ازدیاد ذرات معلق و آلاینده‌ها می‌شود و از نظر

در مباحث زیست‌محیطی، منابع آبی همواره با خطر وارد شدن پساب‌ها و زهاب‌های غلیظ روبه‌رو هستند. توانایی پیش‌بینی و چگونگی توزیع و پخش این پساب‌ها در منابع آبی پذیرنده، به‌خصوص در حوالی محل وارد شدن زهاب‌ها و تأثیر آن بر محدوده‌های حساس (مانند سواحل تفریحی، تالاب‌ها، ایستگاه‌های پمپاژ پایین‌دست و محل‌های ماهیگیری) بسیار مهم است. حیات بسیاری از موجودات کفزی در اقیانوس‌ها و دریاها با خطر برخورد آلاینده‌ها به کف مواجه است. از این‌رو پیش‌بینی اولین و

آب پذیرنده می‌شود. تحقیقات دی‌ویت و همکاران (De wit *et al.*, 2014) بر مبنای تعامل جت‌های متلاطم در حالت جریان متقاطع پایه‌گذاری شد. نتایج بررسی‌های آنها نشان می‌دهد که سرعت افقی جریان جت شناور در نازل جت بزرگتر از سرعت عرضی جریان است که در حالت جریان‌ات عمیق، قوی‌تر نیز هست. ژانگ و ژو (Zhang & Zhu, 2014) با تزریق مخلوط آب و هوا از طریق یک نازل به بررسی منحنی پایین‌افتادگی جت جوشان در جریان‌های متقاطع پرداخته و با تحلیل خط مرکزی منحنی پایین‌افتادگی برای هر دو فاز آب و هوا در جت جوشان به این نتیجه رسیدند که بعد از جدایی سیال از تخلیه‌کننده، خط مرکزی فاز هوا می‌تواند به صورت مستقیم حرکت کند و جریان جت بعد از طی کردن مسیری افقی و مستقیم، منحنی پایین‌افتادگی را ایجاد و به پایین سقوط می‌کند. اولیور و همکاران (Oliver *et al.*, 2013a, b, c) و شائو و لائو (Shao & Law, 2011) منحنی پایین‌افتادگی و میانگین رقیق‌شدگی خط مرکزی جت شناور منفی را با استفاده از لیزر و سیستم فلورسنس در نقطه شیرجه بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ارتفاع نازل جت و زاویه همگرایی می‌تواند جریان مرزی را تحت تأثیر قرار دهد. عابسی و روبرتز (Abessi & Roberts, 2014) و عابسی و همکاران (Abessi *et al.*, 2012) به بررسی ادغام نازل‌های چندگانه برای تخلیه جت‌های چگال پرداختند و با استفاده از میدان ردیابی غلظت در ۳ بعد اثر فاصله نازل‌ها از یکدیگر را بررسی کردند و نتیجه گرفتند هنگامی که فاصله نازل‌ها و دیگر متغیرهای هندسی کاهش می‌یابد، میزان صعود منحنی پایین‌افتادگی افزایش می‌یابد و رقیق‌شدگی بسیار سریع‌تر از مقادیر پیش‌بینی شده کاهش پیدا می‌کند. لای و لی (Lai & Lee, 2012) در تحقیقات خود با بررسی جت‌های آزاد افقی چگال، دریافتند که محورهای سرعت و غلظت در نقطه برخورد با کف، به‌علت تفاوت در شرایط

زیست‌محیطی این مسأله اهمیت زیادی پیدا می‌کند. لی و همکاران (Lee *et al.*, 2002) از مدلسازی صفحات غشایی مستغرق برای تخلیه پساب سنگین و نیز برای بررسی دفع رسوب و زهاب سنگین از مدلسازی ریاضی استفاده کرده و معادلات دیفرانسیل خطی را برای پیش‌بینی حرکت آنها گسترش داده‌اند. این محققان با استفاده از این مدل توسعه داده شده نه تنها کیفیت پساب، بلکه رفتار رسوب را پیش‌بینی کردند. عابسی و همکاران (Abessi *et al.*, 2011) به بررسی خصوصیات جریان در تخلیه سطحی فاضلاب‌های سنگین در پیکره‌های آبی ساکن و لایه‌بندی نشده پرداختند و از نتایج مشاهدات آزمایشگاهی خود به‌منظور تعیین مشخصات جریان در تخلیه سطحی فاضلاب‌های سنگین از کانال‌های مستطیلی در محیط‌های ساکن استفاده کردند. این محققان همچنین رفتار هندسی جریان را از طریق شبیه‌سازی فرآیند تخلیه در اتاق تاریک ثبت کردند و به پردازش رقومی نتایج به‌دست آمده پرداختند. احدیان و موسوی جهرمی (Ahadiyan & Musavi-Jahromi, 2010) عوامل مؤثر بر توسعه جریان جت‌های مستغرق را در منابع آب پذیرنده ساکن بررسی و نیز با استفاده از سیستم سرعت‌سنجی آکوستیک پروفایلر، UVDP، پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف جت را اندازه‌گیری و بررسی کردند. با مقایسه پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده با روابط تئوری توزیع نرمال گوسین مشخص شد که کلیه پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده از تابع گوسین پیروی می‌کنند. احدیان و همکاران (Ahadiyan *et al.*, 2014) به بررسی اثر زاویه قائم و خصوصیات هیدرولیکی بر نحوه توزیع جریان جت غلیظ منفرد با استفاده از مدل فیزیکی پرداختند. در نتایج به‌دست آمده پارامتر بدون بعد حداکثر ارتفاع اوج منحنی تخلیه جت نسبت به عدد فرود چگال، بررسی گردید. همچنین، نقطه اوج بیشتر این منحنی باعث اختلاط بیشتر جریان جت با لایه‌های سطحی منبع

بررسی آزمایشگاهی تخلیه زهاب چگال تحت جت...

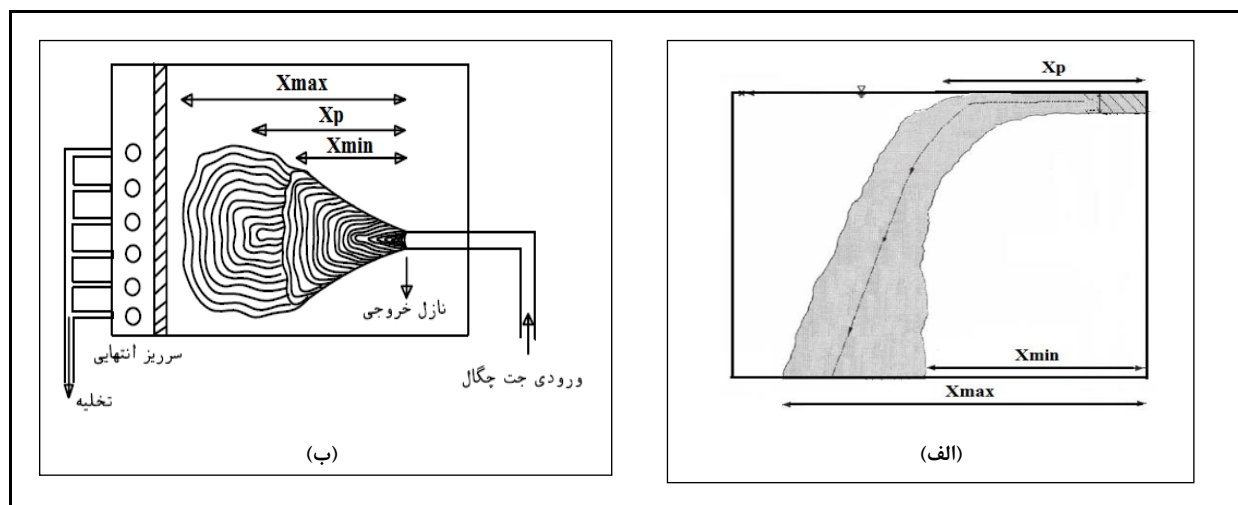
شناور صفحه‌ای متلاطم را در ناحیه نزدیک‌شونده، تحت متغیرهای غلظت و حرارت مدلسازی کرد. جیرکا (Jirka, 2006) با توزیع و پراکنش جت مستغرق در محیط پذیرنده لایه‌بندی شده، از مدل انتگرالی برای توصیف حرکت جت استفاده کرد. اخیرا سلمان‌زاده و احدیان (Salmanzade & Ahadiyan, 2016) به پراکنش حدی جریان جت خروجی در محیط هم‌فاز و غیر هم‌فاز پرداختند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که توسعه محدود پیشروی جریان جت در محیط غیر هم‌فاز، در اعداد فرود چگال زیر بحرانی روی می‌دهد. همچنین، از نظر کمی حداکثر توسعه محدود پیشروی جریان جت در محیط غیر هم‌فاز تا حدود ۲۰۰ برابر قطر نازل است که در محیط هم‌فاز چنین توسعه‌ای از جریان تا ۴۰۰ برابر قطر نازل اتفاق می‌افتد. بررسی‌های این محققان همچنین نشان می‌دهد که در غلظت‌های بیشتر از ۴۰ تا ۵۰ گرم بر لیتر اثر محیط پذیرنده غیر هم‌فاز در توسعه جریان جت بسیار بیشتر از اثر محیط پذیرنده هم‌فاز است.

با توجه به آنچه گفته شد، بررسی جت سطحی چگال تحت تأثیر نازل زاویه‌دار تخلیه‌کننده جریان کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. از این‌رو در تحقیق حاضر تخلیه زهاب چگال تحت جت سطحی منفرد و متلاطم در جریان‌های پایدار در آزمایشگاه بررسی و متغیرها و آزمایش‌های متعددی برنامه‌ریزی شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق اثر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر جریان جت سطحی منفرد، متلاطم و چگال در جریان‌های پایدار بررسی شده است. از این‌رو در این بخش پارامترهای حاکم بر حرکت جریان جت سطحی به‌صورت بدون بعد ارائه می‌شود. شکل ۱ پارامترهای بررسی شده در جریان جت سطحی چگال را نشان می‌دهد.

مرزی در کف مخزن، از یکدیگر دور می‌شوند. تحقیقات کاتبرسن و دیویس (Cuthberston & Davis, 2008) بر مبنای ترسیب ناشی از پساب جریان خروجی از جت‌های دایره‌ای مستغرق پایه‌گذاری شد که به‌صورت افقی در منبع آب پذیرنده تخلیه می‌شدند. نتایج بررسی‌های این محققان نشان می‌دهد که رسوب‌گذاری ناشی از جریان جت اضافه بر سه پارامتر اساسی نیروی مومنتم، شناوری محدود پیشروی جریان جت و خصوصیات سرعت سقوط ذرات رسوبی موجود در پساب، به سرعت جریان پذیرنده نیز وابسته است. احدیان و موسوی جهرمی (Ahadiyan & Musavi-Jahromi, 2009) تأثیر خصوصیات هیدرولیکی جت بر ژئومتری منحنی پایین‌افتادگی در جت‌های دایره‌ای مستغرق را با استفاده از تحلیل‌های آزمایشگاهی بررسی کردند. یافته‌های این محققان نشان می‌دهد که میزان تغییر طول منحنی پایین‌افتادگی به قطر نازل وابسته است که دلیل عمده آن کاهش نیروهای اصطکاکی، اثر کاهش عرض پیشانی جت و در نتیجه سطح کمتر مقابل جریان و کاهش نیروی هیدرواستاتیکی درگ است. دستغیب و همکاران (Dastgheib *et al.*, 2013) به پیش‌بینی مشخصات هیدرولیکی جت شناور دایره‌ای با استفاده از شبکه‌های مصنوعی ANN و ANFIS پرداختند؛ نتایج مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی ANN و ANFIS نشان داد که شبکه مصنوعی ANFIS نتایج بهتری نسبت به شبکه ANN ارائه می‌دهد. خیرخواه‌گیلده و همکاران (Kheirkhah-Gildeh *et al.*, 2014) به مدلسازی عددی جت‌های صفحه‌ای شناور در منابع پذیرنده ساکن پرداختند و ناحیه نزدیک‌شونده جت و خصوصیات اختلاط در جت صفحه‌ای غلیظ را بررسی کردند. در این پژوهش، عملکرد مدل‌های متلاطم در معادلات ناویر استوکس، تحت تنش‌های متوسط رینولدزی بررسی شده است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که می‌توان جت‌های



شکل ۱- نمای شماتیک جریان جت سطحی چگال: (الف) دید روبه‌رو و (ب) دید از بالا

### تحلیل ابعادی

با توجه به پارامترهای حاکم بر پدیده جریان جت سطحی چگال و به منظور دستیابی به روابط حاکم به صورت عبارات بدون بعد در این تحقیق، اقدام به تحلیل ابعادی بین پارامترهای مؤثر گردید. پارامترهای مؤثر در حرکت سیال جت چگال در سیال پذیرنده در رابطه ۱ آورده شده‌اند:

$$f_1(\rho_a, \rho_j, \mu_j, u_0, d_p, g, X_p, X_{max}, X_{min}, \theta, \sigma) = 0 \quad (1)$$

که در آن،

$\rho_a$  = جرم حجمی سیال پیرامون (آب زلال)؛  $\rho_j$  = جرم حجمی سیال جت؛  $\mu_j$  = لزوجت مطلق اولیه سیال جت؛  $u_0$  = سرعت اولیه ورودی جت؛  $d_p$  = قطر جت؛  $g$  = شتاب ثقل؛  $X_p$  = حد انتهایی پیشروی افقی جریان جت نسبت به محل خروج یا موقعیت نقطه شیرجه؛  $X_{max}$  = طول نهایی مرز بالایی منحنی پایین افتادگی؛  $X_{min}$  = طول نهایی مرز پایینی منحنی پایین افتادگی جت؛  $\theta_c$  = زاویه همگرایی برای نازل جت و  $\sigma$  = کشش سطحی سیال پیرامون (آب زلال). با استفاده از تحلیل ابعادی بین پارامترهای

فوق، روابط بدون بعد ۲ برای این پدیده استخراج شد:

$$f_2\left(\frac{\rho_j u_0 d_p}{\mu_j}, \frac{u_0}{\sqrt{g d_p}}, \frac{\rho_j u_0^2 X_p}{\sigma}, \frac{X_p}{d_p}, \frac{X_{max}}{d_p}, \frac{X_{min}}{d_p}, \frac{\rho_j}{\rho_a}, \theta_c\right) = 0 \quad (2)$$

که در آن،

پارامتر اول  $Re_j$  = عدد رینولدز ورودی محدوده پیشروی جت؛ پارامتر دوم  $Fr_d$  = عدد فرود چگال است که در آن  $g' =$  شتاب ثقل مؤثر و برابر با  $g \frac{\Delta\rho}{\rho_a}$  است؛ پارامتر سوم  $Wb_p$  = عدد وبر پیشرونده، پارامتر چهارم نسبت طولی پیشرونده افقی، پارامتر پنجم و ششم نسبت طول کلی مرز بالایی و پایینی منحنی پایین افتادگی، پارامتر هفتم نسبت جرم حجمی سیال جت به سیال پیرامون و پارامتر هشتم زاویه همگرایی جت است. یادآوری می‌شود که حداقل عدد رینولدز ۴۲۵۱ و حداکثر آن ۳۰۵۹۵ به دست آمد. بنابراین کلیه آزمایش‌ها در محدوده جریان متلاطم قرار گرفته‌اند و اثر لزوجت در میزان پخشیدگی جریان در مقایسه با عدد فرود چگال و همچنین عدد وبر ناچیز است. از این‌رو اثر این پارامتر

بررسی آزمایشگاهی تخلیه زهاب چگال تحت جت...

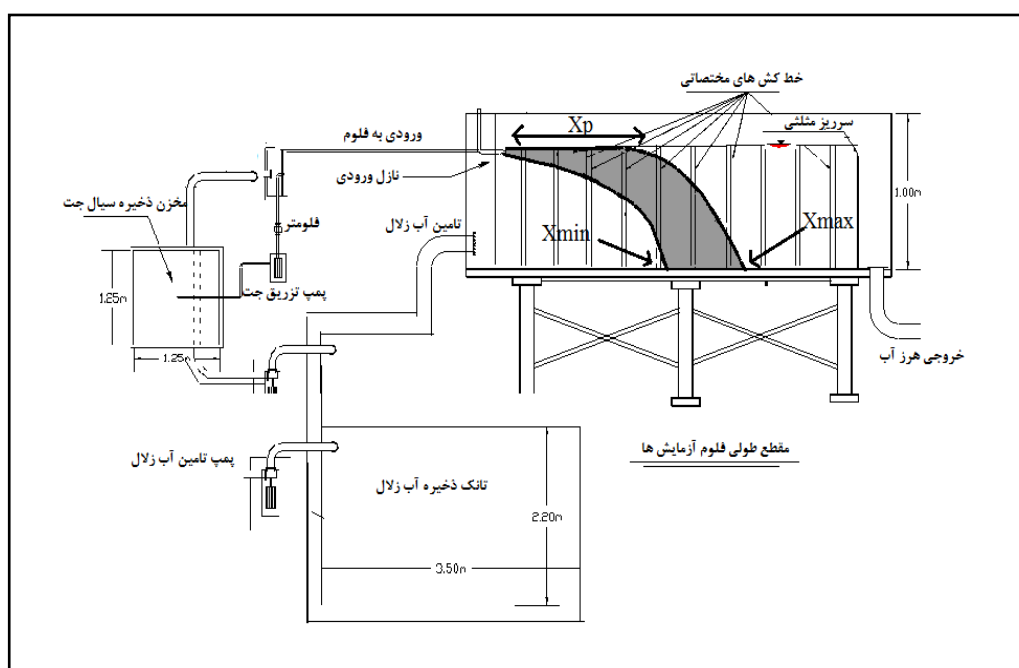
سانتی‌متر، برای تعیین شوری جریان چگال تخلیه‌شونده و فلومتر دقیق با دقت  $0/2$  درصد برای اندازه‌گیری دبی متغیر جت چگال بودند. با استفاده از سطح مقطع خروجی نازل، سرعت خروجی جت چگال به دست آمد. همچنین، خط‌کش‌های طولی در سراسر فلوم برای اندازه‌گیری طول طی شده منحنی جت در نظر گرفته شد. در خلال آزمایش‌ها، سیال پذیرنده از طریق مخزن تأمین و پمپ به فلوم منتقل می‌شد و تا ارتفاع معلومی فلوم را پر می‌کرد. جریان جت چگال نیز از طریق مخزن تزریق و پمپ مربوط به درون فلوم حاوی سیال پذیرنده تزریق می‌شد. مخزن تزریق به حجم یک متر مکعب ساخته شد و برای تهیه جریان چگال با غلظت‌های  $15$ ،  $30$  و  $60$  کیلوگرم بر مترمکعب، مقادیر مشخص شده نمک با ترازو اندازه‌گیری و به مخزن تزریق انتقال داده می‌شد. برای مشخص کردن مسیر حرکت جریان آب نمک در سیال پذیرنده، از ماده رنگی انحلال‌پذیر در آب استفاده شد. در شکل ۲ مدل آزمایشگاهی جریان جت و فلوم در محیط پذیرنده نشان داده شده است.

حذف و سایر پارامترها با توجه به تأثیر معنی‌دارشان در نتایج آزمایش‌ها در نظر گرفته شدند.

### بسط مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه برای بررسی آزمایشگاهی تخلیه زهاب چگال تحت جت سطحی منفرد و متلاطم در جریان‌های پایدار، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز به مدلسازی پرداخته شد. مدل آزمایشگاهی مورد استفاده متشکل است از فلوم آزمایشگاهی با دیواره‌های شفاف و از جنس پلکسی گلاس به درازا، پهنا، و بلندی به ترتیب  $3/2$ ،  $0/6$  و  $1$  متر. تجهیزاتی که برای اجرای این آزمایش‌ها ساخته و به کار گرفته شدند شامل فلوم آزمایشگاهی، مخزن ذخیره سیال تزریق جت، حوضچه و پمپ تأمین آب جریان پذیرنده، پمپ تزریق جت و پمپ اختلاط سیال جت برای جلوگیری از ته‌نشین شدن آب نمک در مخزن هستند.

وسایل اندازه‌گیری پارامترهای مختلف شامل EC متر دقیق دیجیتالی پرتابل با دقت  $0/1$  میکروزیمنس بر

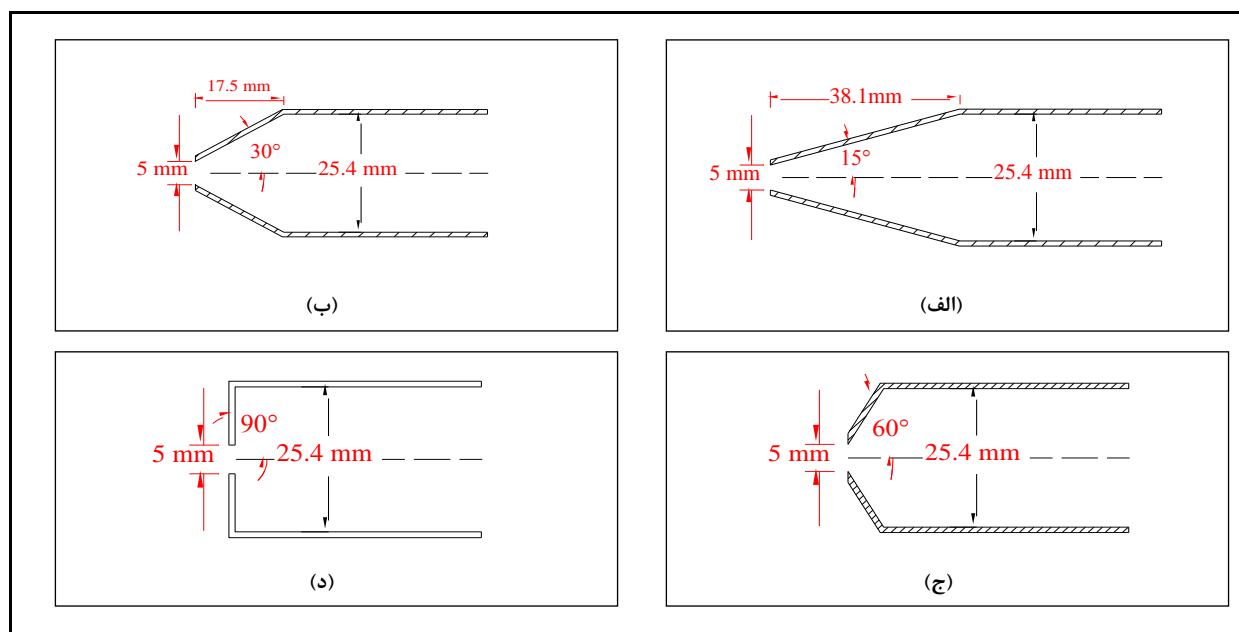


شکل ۲- مدل آزمایشگاهی جریان جت و فلوم در محیط پذیرنده

برای تنظیم سطح آب درون سیال پذیرنده، از سرریز در انتهای فلوم استفاده شد. آزمایش‌ها با استفاده از نازل‌های خروجی با قطرهای ۵، ۸ و ۱۵ میلی‌متر و زاویه‌های همگرایی ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه با دبی‌ها و غلظت‌های مختلف سیال تزریق‌شونده اجرا شد. جدول ۱ برنامه آزمایش‌ها را در این تحقیق نمایش می‌دهد. در شکل ۳ نیز نمونه‌ای از نازل‌های خروجی برای قطر ۵ میلی‌متر نشان داده شده است.

جدول ۱- لیست سناریوهای مورد آزمایش برای بررسی منحنی پایین افتادگی

زاویه همگرایی (درجه)	دبی جت (لیتر بر ثانیه)	قطر جت (میلی‌متر)	غلظت (گرم بر لیتر)
۱۵	۰/۰۱۳		۱۵
۳۰	۰/۰۲۶	۵	۳۰
۶۰	۰/۰۴۸		۶۰
۱۵	۰/۰۲۶		۱۵
۳۰	۰/۰۵۳	۸	۳۰
۶۰	۰/۱۱۰		۶۰
۱۵	۰/۰۸۱		۱۵
۳۰	۰/۱۷۵	۱۵	۳۰
۶۰	۰/۳۸۶		۶۰



شکل ۳- نمایش نازل جت ۵ میلی‌متر  
الف) ۱۵ درجه، ب) ۳۰ درجه، ج) ۶۰ درجه و د) ۹۰ درجه

بررسی آزمایشگاهی تخلیه زهاب چگال تحت جت...

دیجیتالی و هیدرومتر برای محدوده کاربرد آن و ترازوی دقیق دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم، استخراج شد. با توجه به اینکه دانسیته تابعی از دماست، در دماهای مشخص و با ثابت نگه داشتن دما این رابطه‌ها مشخص شد. رابطه بین غلظت و دانسیته و به تبع آن شوری و دانسیته با استفاده از هیدرومتر 151H از طریق محاسباتی با روش شناوری به دست آمد. با این وسیله، دانسیته سیال آب نمک در همه آزمایش‌ها قابل اندازه‌گیری بود. از این‌رو غلظت نمک با استفاده از اندازه‌گیری دانسیته نیز در این سری آزمایش‌ها کنترل گردید. جدول ۲ چگونگی ارتباط بین این پارامترها در دمای معین را نشان می‌دهد که در آزمایشگاه مشخص شده است. همه عملیات مرتبط با دانسیته و غلظت برای به دست آوردن مقادیر  $\rho_j$ ،  $\rho_a$  است.

با تزریق جریان جت به صورت سطحی، جریان جت چگال به حالت کاملاً مماس بر سطح آب قرار می‌گرفت. پس از تزریق جریان جت به سیال پذیرنده و شکل‌گیری منحنی پایین افتادگی، داده‌ها با قرائت از روی خط‌کش‌های نصب شده روی فلوم ثبت و به صورت همزمان با دوربین Canon مدل hs50SX عکس‌برداری می‌شد. برای حصول اطمینان از قرائت صحیح خط‌کش‌های نصب شده روی فلوم، داده‌ها بار دیگر با تصویرهای ضبط شده با دوربین مقایسه گردید. با توجه به اینکه برای به دست آوردن عدد فرود چگال جریان جت در بدو ورود به سیال پذیرنده نیاز به داشتن دانسیته جریان است، رابطه بین شوری و دانسیته با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی تعیین شد. این رابطه با بهره‌گیری از EC متر دقیق

جدول ۲- رابطه بین غلظت، شوری و دانسیته در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

دمای محیط (درجه سلسیوس)	دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	شوری (میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر)	غلظت (گرم بر لیتر)
۲۵	۱/۰۱۰	۲۸/۸	۱۵
۲۵	۱/۰۱۹۷	۵۱/۸	۳۰
۲۵	۱/۰۳۹	۹۱/۱۰	۶۰

برای توجیه حرکت محدوده پیشروی جریان جت سطحی استفاده شده است. برای کلیه داده‌های آزمایشگاهی تغییرات  $X_p$ ،  $X_{max}$  و  $X_{min}$  محاسبه گردید و در مقابل عدد فرود چگال و عدد وبر پیشرونده برای زاویه‌های همگرایی مختلف رسم شده است. با مقایسه و بررسی نتایج مشخص شد که به طور میانگین،  $X_p$  در حدود ۴۱ درصد برای تغییر زاویه همگرایی از ۱۵ به ۹۰ درجه افزایش می‌یابد اما  $X_{max}$  با این افزایش زاویه همگرایی ۴۰ درصد و  $X_{min}$ ، ۴۵ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به نقش مؤثر عدد وبر پیشرونده در حرکت محدوده پیشروی جریان جت سطحی، افزایش پارامترهای ذکر شده در اثر افزایش زاویه همگرایی، در نمودارهای رسم شده در

## نتایج و بحث

### موقعیت نقطه شیرجه، حداکثر طول مرز بالایی و پایینی در تخلیه سطحی چگال

در تفسیر نتایج آزمایش‌ها، نحوه تغییرات پارامتر  $X_p$  به عنوان حد انتهای پیشروی افقی جریان جت نسبت به محل خروج یا موقعیت نقطه شیرجه، پارامترهای  $X_{max}$  و  $X_{min}$  به عنوان حداکثر طول‌های مرز بالایی و پایینی بررسی می‌شوند. از آنجا که این تخلیه، چگال و به صورت کاملاً سطحی و مماس بر سطح سیال پذیرنده صورت پذیرفته، کشش سطحی محیط پذیرنده (آب زلال) بر محدوده پیشروی جریان جت مؤثر خواهد بود. در نتیجه، از اعداد بدون بعد شده فرود چگال و عدد وبر پیشرونده

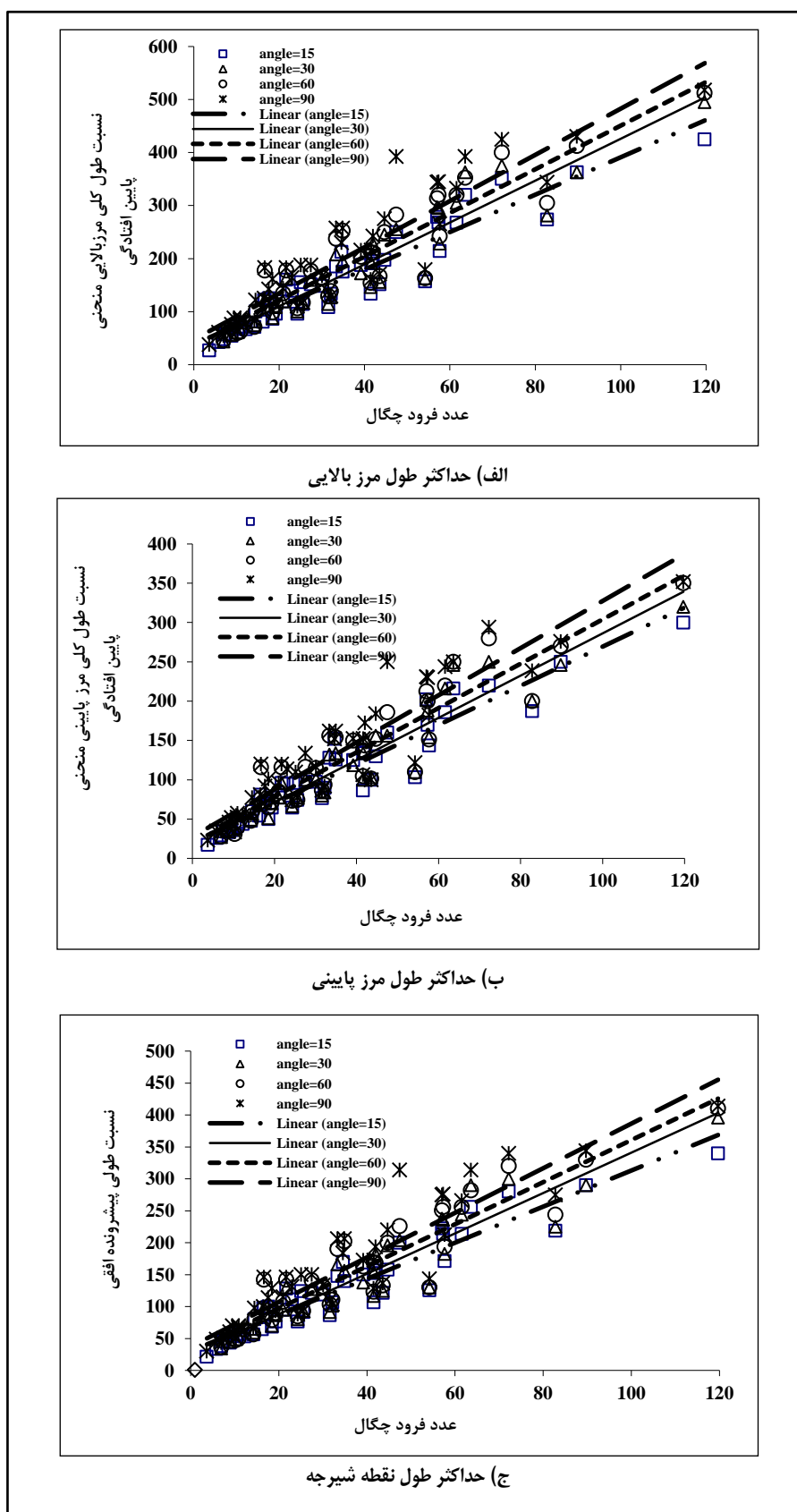
شدت بیشتری را برای توسعه جریان جت برقرار می‌کند. در نتیجه، با افزایش زاویه همگرایی به ۹۰ درجه، توسعه منحنی پایین افتادگی جت افزایش بیشتری می‌یابد. برای بررسی دقیق‌تر، در همه آزمایش‌ها این تغییرات تحلیل شدند. شکل ۴ تغییرات  $X_p/d_p$ ،  $X_{min}/d_p$  و  $X_{max}/d_p$  را نسبت به عدد فرود چگال و زاویه همگرایی نمایش می‌دهد.

علت رسم خطوط برازش در شکل ۴، بررسی روند تغییرات طول‌های پیشرونده تحت اثر زاویه همگرایی است. با کاهش زاویه همگرایی، روند پیشروی طول‌های مورد بررسی با شیب کمتری ادامه می‌یابد. به عبارتی دیگر در یک عدد فرود چگال مساوی، با افزایش زاویه همگرایی، طول‌های پیشروی فزونی می‌یابند. زاویه همگرایی باعث توسعه پیشروی بیشتر جریان یکنواخت در محیط پذیرنده می‌شود و محدوده پیشروی جریان جت فاصله‌ای دورتر و بیشتر می‌پیماید. با توجه به نمودارهای شکل ۴، خصوصیات منحنی پایین افتادگی با افزایش عدد فرود چگال افزایش می‌یابد؛ همچنین محدوده عدد فرود چگال در این پژوهش تا مرز عدد ۱۱۹/۷ است که در این محدوده جریان حالت فوق بحرانی دارد. با افزایش عدد فرود چگال، تغییرات سرعت در واحد طول افزایش می‌یابد و به توسعه بیشتر محدوده پیشروی جت می‌انجامد. به دلیل اینکه این تخلیه کاملاً به صورت سطحی است و جریان نیز به حالت مماس بر سطح تخلیه شده، علاوه بر عدد فرود چگال، عدد وبر پیشرونده نیز بررسی شده است. حضور کشش سطحی سیال پذیرنده سبب می‌شود که محدوده پیشروی جریان جت زمان بیشتری روی سطح آب باقی بماند و منحنی پایین افتادگی با طی فاصله‌ای بیشتر نسبت به تخلیه‌کننده سقوط کند.

شکل ۵ به وضوح نشان داده شده است. دلیل عمده ارتباط طول‌های ذکر شده مربوط به منحنی‌های پایین افتادگی با زاویه همگرایی را می‌توان افزایش مومنتم محدوده پیشروی جریان جت در اثر افزایش زاویه همگرایی دانست. عامل حرکت جریان جت در سیال پذیرنده، تأثیر نیروهای شناوری و مومنتم است. تفاوت دانسیته بین سیال جت و سیال پذیرنده عامل اصلی اهمیت نیروی شناوری است. برآیند نیروی وزن و نیروی شناوری باعث توسعه جریان جت سطحی چگال در جریان پذیرنده می‌شود؛ از این رو با تغییر نیروی‌های شناوری و وزن، توسعه جریان جت تغییر می‌کند به طوری که باعث ایجاد منحنی‌های پایین افتادگی مختلف در سیال پیرامون می‌شود. نیروی مومنتم، نیروی پیشروی جریان و عامل اصلی قدرت جریان در محیط پذیرنده است که با اعمال سرعت بیشتر برای سیال تخلیه شونده لحاظ می‌گردد. با افزایش عدد فرود چگال که در واقع فزونی یافتن نیروهای حرکتی و مومنتمی جریان به نیروهای شناوری است، خصوصیات منحنی پایین افتادگی افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه همگرایی، مؤلفه افقی نیروی مومنتم که باعث توسعه بیشتر محدوده پیشروی جت می‌شود، افزایش می‌یابد و پارامترهای مهم منحنی پایین افتادگی را فزونی می‌بخشد. حضور نیروی مومنتم در عدد فرود چگال و عدد وبر پیشرونده گواهی بر این گفته است. به طور کلی، افزایش زاویه همگرایی باعث ایجاد شوک بیشتر به جریان ورودی به سیال پذیرنده می‌شود زیرا سیال جت پیش از ورود به نازل جت، در لوله‌ای با قطر بزرگتر جریان دارد که شرایط ماندگاری در آن حاکم است و با نزدیک شدن به نازل، مومنتم مربوط تغییر می‌کند و این در حالی است که برای زاویه همگرایی ۹۰ درجه این موضوع به طور کاملاً ناگهانی اتفاق می‌افتد و



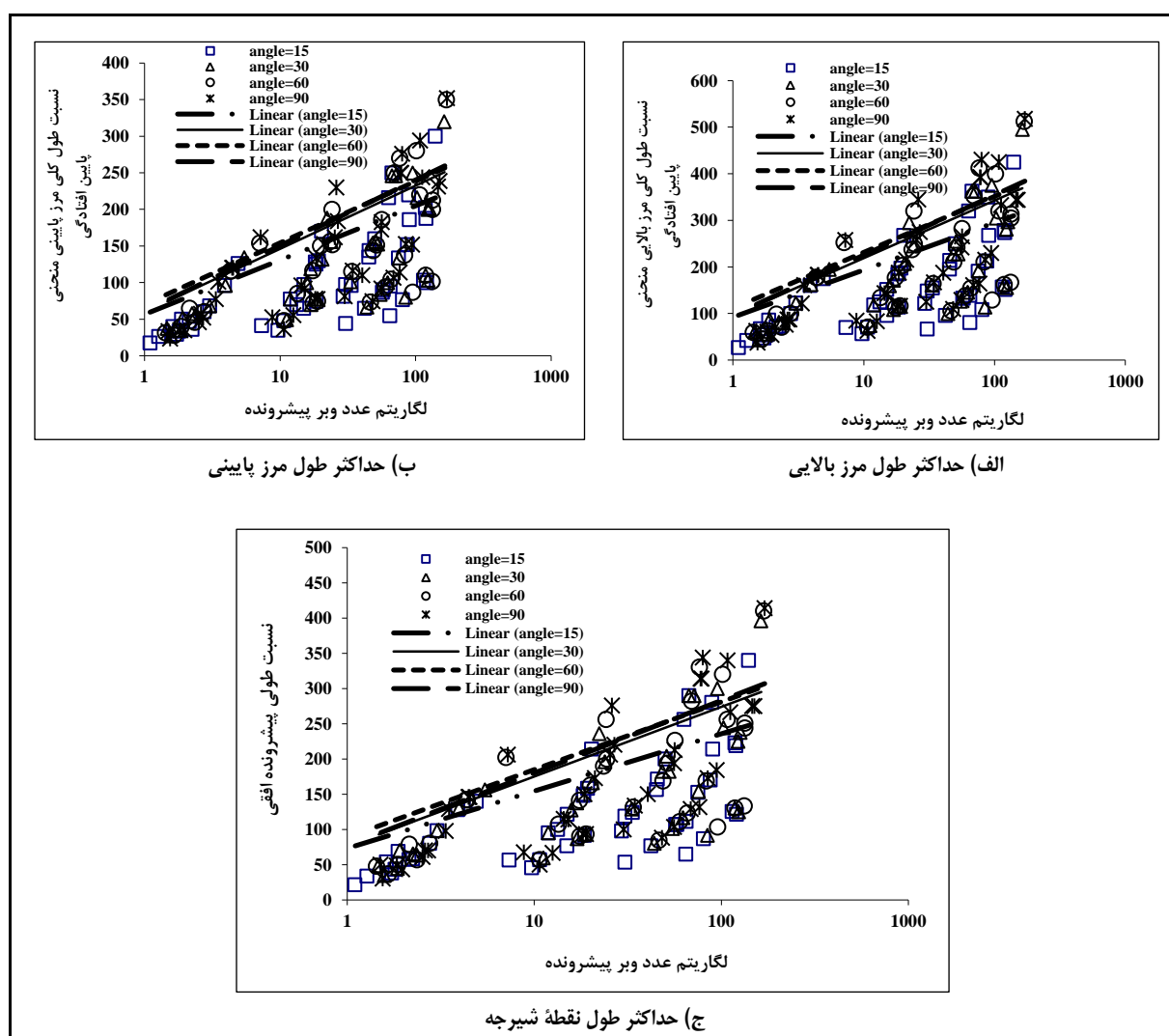
بررسی آزمایشگاهی تخلیه زهاب چگال تحت جت...



شکل ۴- تغییرات خصوصیات منحنی پایین افتادگی نسبت به عدد فرود چگال

بر این موضوع دانست. تخلیه جت چگال به صورت سطحی روی آب زلال و مماس شدن سیال تخلیه‌شونده جت با سیال پذیرنده (آب زلال) سبب پیشروی بیشتر محدوده جریان جت چگال بر سطح آب می‌گردد. محدوده اعداد بدون بعد در این پژوهش در جدول ۳ آورده شده است.

در شکل ۵ تغییرات خصوصیات منحنی پایین‌افتادگی با توجه به عدد وبر پیشرونده در زاویه‌های همگرایی مختلف نشان داده شده است. در نمودارهای شکل ۵ می‌بینیم که با افزایش عدد وبر پیشرونده، خصوصیات منحنی‌های پایین‌افتادگی افزایش می‌یابد که وجود نیروی مومنتوم و کشش سطحی سیال پذیرنده را می‌توان دلیلی



شکل ۵- تغییرات خصوصیات منحنی پایین‌افتادگی نسبت به عدد وبر پیشرونده

جدول ۳- محدوده تغییرات اعداد بدون بعد

$\frac{X_{min}}{d_p}$	$\frac{X_p}{d_p}$	$\frac{X_{max}}{d_p}$	$Re_j$	$Wb_p$	$Fr_d$
۳۵۲-۱۷	۴۱۴-۲۱	۵۱۷-۲۶	۳۰۵۹۵-۴۲۵۱	۱۷۰/۷-۱/۱	۱۱۹/۷-۳/۶۷

بررسی آزمایشگاهی تخلیه زهاب چگال تحت جت...

$$\frac{X_{\max}}{d_p} = a.(Fr_d^e) + b.(\theta^f) + c.(Wb_p^g) + d \quad (3)$$

$$R^2 = 0.93$$

$$\frac{X_{\min}}{d_p} = a.(Fr_d^e) + b.(\theta^f) + c.(Wb_p^g) + d \quad (4)$$

$$R^2 = 0.9$$

$$\frac{X_p}{d_p} = a.(Fr_d^e) + b.(\theta^f) + c.(Wb_p^g) + d \quad (5)$$

$$R^2 = 0.95$$

برای مشخص کردن رابطه ریاضی بین پارامترها، از نرم افزار آماری SPSS بهره گرفته شد؛ به گونه ای که روش های مختلف خطی و غیرخطی با پارامترهای وابسته آزمون آماری شدند و سرانجام مدل های غیرخطی زیر برای پارامترها استخراج گردیدند. که در این روابط ضرایب پارامترهای بدون بعد به روش های آماری محاسبه و در جدول ۴ آورده شده اند.

جدول ۴- تخمین ضرایب پارامترهای بدون بعد

پارامتر	$X_{\max}/d_p$	$X_{\min}/d_p$	$X_p/d_p$
a	۱۶/۱	۱۱/۹	۱۲/۸
b	۲۵/۹	۱۵/۷	۲۰/۷
c	۱/۶	۱/۶	۱/۵
d	-۳۴	-۲۹	-۲۷/۳
e	۰/۷۵	۰/۷۲	۰/۷۴
f	۱/۳	۱/۳	۱/۲
g	۰/۷۳	۰/۶۷	۰/۷۳

مربوط به معادلات نیست، یکی از روش های متداول جهت برآورد دقت معادله روش ریشه متوسط مجذورات مجموع خطاها<sup>۱</sup> و روش ریشه متوسط مجموع خطاها<sup>۲</sup> است. جدول ۵ برای هر یک از معادلات نتیجه گیری شده دقت مربوط را بر اساس ۲۰ درصد داده هایی نشان می دهد که در استخراج مدل آماری نقشی نداشته اند.

گفتنی است که بهترین ضریبها با استفاده از نرم افزار آماری SPSS به روش تعیین خطی برای ۸۰ درصد داده ها استخراج شدند. بر اساس ضریب های محاسبه شده برای مدل های آماری خصوصیات مهم توسعه جریان جت در سیال پذیرنده، دقت آنها برآورد شد. با توجه به اینکه ضریب تعیین ( $R^2$ ) به تنهایی معیار مناسبی برای دقت

جدول ۵- دقت مدل های آماری

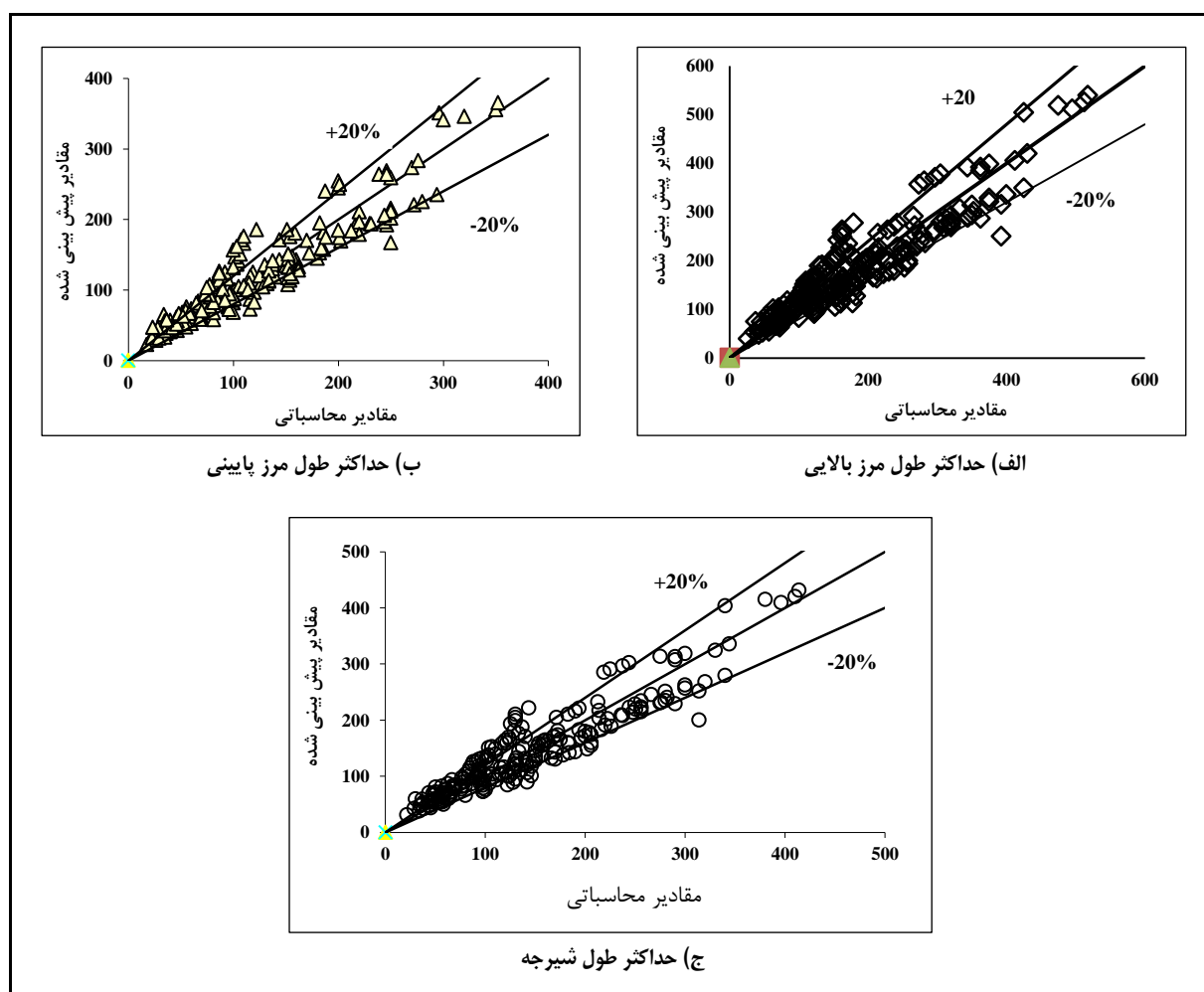
ردیف	$X_{\max}/d_p$	$X_{\min}/d_p$	$X_p/d_p$
RMSE	۴۳	۴۱/۸	۴۴/۶
MSE	۱۹۹۰/۹۰	۱۹۱۷/۶۹	۵۳۰/۴۰۰۲
دقت (درصد)	۸۴	۸۳	۸۶
خطا (درصد)	۱۶	۱۷	۱۴

1- Root Mean Summation of Square Error (RMSE)

2- Mean Summation of Square Error (MSE)

خواهد بود. شکل ۶، مقادیر اندازه‌گیری شده هر یک از پارامترهای فوق را در مقابل مقادیر متناظر محاسباتی برای کلیه آزمایش‌ها نشان می‌دهد. مدل آماری با دقت قابل قبولی قادر به پیش‌بینی پارامترهای مهم در حرکت جت سطحی چگال است و همان‌طوری که مشاهده می‌شود، اکثر داده‌های محاسباتی در مقابل مقادیر پیش‌بینی در همسایگی خط یک به یک واقع شده‌اند.

مدل‌های آماری بر اساس ۸۰ درصد داده‌ها استخراج و از ۲۰ درصد داده‌ها برای برآورد دقت و صحت‌سنجی روابط استفاده شد. در این تحقیق با استفاده از مدل‌های آماری بسط داده شده برای هر آزمایش مقادیر  $X_{max}/d_p$ ،  $X_{min}/d_p$  و  $X_p/d_p$  محاسبه و در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر آنها رسم گردید. ضریب تعیین نیز در این حالت نمایه‌ای از میزان دقت هر یک از مدل‌های آماری



شکل ۶- مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده

بررسی شده است. مطابق با این شکل، مدل‌های آماری تخمین طول‌های نامبرده در منحنی پایین‌افتادگی جت سطحی چگال را با دقتی قابل قبول می‌تواند پیش‌بینی کند و نیز اینکه ۲۰ درصد

یکی از راهکارهای بررسی دقت معادلات آماری، استفاده از خط یک به یک و بررسی تغییرات مقادیر اندازه‌گیری در مقابل مقادیر محاسباتی است؛ این تغییرات در شکل ۶

بررسی آزمایشگاهی تخلیه زهاب چگال تحت جت...

پیشین شده است که همخوانی این دو را نشان می‌دهد. ضمن اینکه با مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج مطالعات احدیان و موسوی جهرمی ( Ahadiyan & Musavi-Jahromi, 2010)، افزایش طول‌های پیشرونده  $X_{min}$ ،  $X_{max}$  و  $X_p$  در جت سطحی نسبت به مستغرق کاملاً مشخص است.

داده‌های محاسباتی در مقابل پیش‌بینی در همسایگی خط ۴۵ درجه واقع شده‌اند.

بررسی مقایسه‌ای پژوهش حاضر با تحقیقات پیشین برای ارزیابی نتایج به‌دست آمده، در جدول ۶ مقایسه‌ای بین نتایج پژوهش حاضر با نتایج مطالعات

جدول ۶- مقایسه نتایج این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین

منابع مورد استفاده	بررسی موقعیت نقطه شیرجه، حداکثر طول‌های مرز بالا و پایین
احدیان و موسوی جهرمی (Ahadiyan & Musavi-Jahromi, 2010)	با افزایش زاویه همگرایی نازل جت مستغرق از ۱۵ به ۹۰ درجه: $X_p$ ، به میزان ۲۰ درصد، $X_{max}$ ، به میزان ۲۵ درصد و $X_{min}$ ، به میزان ۲۸ درصد افزایش می‌یابد.
عابسی و همکاران (Abessi et al., 2011)	مقایسه نتایج به‌دست آمده از جت سطحی با حالت مستغرق نشان می‌دهد که به دلیل سطح آزاد محیط، در حالت تخلیه سطحی، مسیر حرکت جریان دارای پیشروی افقی بیشتری نسبت به حالت مستغرق است.
پژوهش حاضر	با افزایش زاویه همگرایی نازل جت سطحی از ۱۵ به ۹۰ درجه: $X_p$ ، به میزان ۴۱ درصد، $X_{max}$ ، به میزان ۴۰ درصد و $X_{min}$ ، به میزان ۴۵ درصد افزایش می‌یابد.

## نتیجه‌گیری

جت، جریان جت با ضخامت کمتری حادث می‌شود و نیروهای اصطکاکی مقابل جریان کاهش می‌یابد؛ از طرفی، افزایش سرعت ورودی سبب افزایش طول نقطه شیرجه و باعث پیشروی محدوده جریان جت می‌شود. از نظر کمی، با افزایش زاویه همگرایی طول منحنی پایین افتادگی برای هر دو مرز پایینی و بالایی و موقعیت نقطه شیرجه افزایش می‌یابد؛ به‌طور میانگین برای تغییر زاویه همگرایی از ۱۵ به ۹۰ درجه طول نهایی مرز بالایی منحنی پایین افتادگی  $(X_{max})$ ، ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که طول نهایی مرز پایینی  $(X_{min})$  برای تغییر زاویه از ۱۵ به ۹۰ درجه در حدود ۴۵ درصد و برای حد انتهایی پیشروی افقی جریان نسبت به محل خروج یا موقعیت نقطه شیرجه  $(X_p)$  در حدود ۴۱ درصد برای تغییر زاویه همگرایی از ۱۵

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی تخلیه زهاب چگال تحت جت سطحی منفرد، متلاطم و چگال در جریان‌های پایدار پرداخته شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود چگال، عدد وبر پیشرونده و زاویه همگرایی، پارامترهای مؤثر در توسعه محدوده پیشروی جریان جت سطحی که حداکثر طول نهایی مرز بالایی و پایینی منحنی پایین افتادگی همچنین حد انتهایی پیشروی افقی جریان جت نسبت به محل خروج یا موقعیت نقطه شیرجه را شامل می‌گردد، به شکلی چشمگیر افزایش می‌یابد. با کاهش دانسیته نیروی وزن سیال جت کاهش می‌یابد و نیروی شناوری، در طول بیشتری جریان جت را رو به جلو هدایت می‌کند؛ با کاهش قطر محدوده پیشروی

پایین‌افتادگی و حد انتهایی پیشروی افقی جریان نسبت به محل خروج یا موقعیت نقطه شیرجه به‌صورت آماری با استفاده از روش غیرخطی که دارای کمترین خطاست، بررسی و مشخص شد که مدل‌های آماری ارائه شده در این تحقیق با دقت رضایت‌بخشی می‌توانند خصوصیات مهم منحنی پایین‌افتادگی را برآورده کنند.

به ۹۰ درجه افزایش می‌یابد. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد که توسعه محدود پیشروی جریان جت سطحی چگال در این پژوهش، در اعداد فرود چگال فوق‌بحرانی روی می‌دهد؛ و نیز اینکه خصوصیات مهم منحنی پایین‌افتادگی جریان جت سطحی چگال اعم از حداکثر طول مرز بالایی و مرز پایینی منحنی

### مراجع

- Abessi, O. and Roberts, P. 2014. Multiport diffusers for dense discharges. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 140(8): 04014032.
- Abessi, O., Saeedi, M., Bleninger, T. and Davidson, M. 2012. Surface discharge of negatively buoyant effluent in unstratified stagnant water. *J. Hydro-Environ. Res.* 6(3): 181-193.
- Abessi, O., Saeedi, M., Hajizadeh-Zaker, N. and Khirkehah-Gildeh, H. 2011. Flow characterization dilution in surface discharge of negatively buoyant flow in stagnant and non-stratified water bodies. *J. Water Waste Water*. 22(4): 71-82. (in Persian)
- Ahadiyan, J., Mohamadi, F. and Bahrami, H. 2014. Effect of vertical angle and hydraulic properties on flow distribution of single dense jet using physical model. *J. Khoramshahr Marine Sci. Technol.* 13(1): 51-60. (in Persian)
- Ahadiyan, J. and Musavi-Jahromi, S. H. 2010. Evaluation of effective parameters on buoyant jets development in the stagnant ambient fluid. *J. Water Soil*. 23(4): 179-192. (in Persian)
- Ahadiyan, J. and Musavi-Jahromi, S. H. 2009. Effects of jet hydraulic properties on geometry of trajectory in circular buoyant jets in the static ambient flow. *J. Appl. Sci.* 9(21): 3843-3849.
- Cuthberston, A. and Davis, P. 2008. Deposition from particle-laden, round, turbulent, horizontal, buoyant jets in stationary and coflowing receiving fluids. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 134(4): 390-402.
- Dastgheib, S., Musavi-Jahromi, S. H. and Nowroozpour, A. 2013. Predicting hydraulic properties of circular buoyant jets in the static ambient flow using ANN and ANFIS. *World Environmental and Water Resources Congress*. May 19-23. Ohio.
- De wit, L., Van Rhee, C. and Keetels, G. 2014. Turbulent interaction of a buoyant jet with cross-flow. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 140(12): 04014060.
- 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(1): 43-100.
- Kheirkehah-Gildeh, H., Mohammadian, A., Nistor, I. and Qiblawey, H. 2014. Numerical modeling of turbulent buoyant wall jets in stationary ambient water. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 140(6): 04014012.
- Kourafalou, V. H. 2001. River plume development in semi-enclosed mediterranean regions: north adriatic sea and northwestern Aegean sea. *J. Marine Syst.* 30(3-4): 181-205.
- Lai, C. C. K. and Lee, j. H. W. 2012. Mixing of inclined dense jet in stationary ambient. *J. Hydro- Environ. Res.* 6(1): 9-28.
- Lee, Y., Cho, J., Seo, Y., Lee, J. and Ahn, K. 2002. Modeling of submerged membrane bioreactor process for wastewater treatment processes. *Desalination*. 146, 451-457.

بررسی آزمایشگاهی تخلیه زهاب چگال تحت جت...

- Oliver, C. J., Davidson, M. J. and Nokes, R. I. 2013a. Predicting the near-field mixing of desalination discharges in a station environment. *Desalination*. 309, 148-155.
- Oliver, C. J., Davidson, M. J. and Nokes, R. I. 2013b. Removing the boundary influence on negatively buoyant jets. *J. Environmen. Fluid Mech.* 13, 625-648.
- Oliver, C. J., Davidson, M. J. and Nokes, R. I. 2013c. Behavior of dense discharges beyond the return point. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 139(12): 1304-1308.
- Salmanzade, S. and Ahadiyan, J. 2016. Distribution limit of jet flow in the same and dissimilar phases of ambient fluid. *J. Irrig. Sci. Eng.* 39(1): 93-107.
- Shao, D. and Law, A. W. K. 2011. Boundary impingement and attachment of horizontal offset dense. *J. Hydro-Environ. Res.* 5(1): 15-24.
- Zhang, W. and Zhu, D. 2014. Trajectories of air-water bubbly jets in crossflows. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 140(7): 06014011.



## Laboratory Study of the Single and Turbulent Surface Jet for Discharge of Dense Current in the Steady Flow

S. Salmanzade and J. Ahadiyan\*

\* Corresponding Author: Ph. D. in Hydraulic Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University (SCU), Ahwaz, Iran. Email: ja\_ahadiyan@yahoo.com

Received: 26 September 2016, Accepted: 19 January 2017

In this research, the single and turbulent surface jet is evaluated for discharge of dense current by evaluating the effect of various parameters on circular surface buoyant jet flow. To achieve the purposes of this research, a physical model with 3.2 m length, 0.6 m width and 0.9 m height was applied. Then, the experiments were conducted by using the nozzles with diameters of 5, 8 and 15 mm at different contraction angles. The final limit of horizontal length of jet flux to inlet of effluent position (plunge point position),  $X_p$ , the maximum of upper limit length,  $X_{max}$ , and the maximum of inferior limit length were considered as important properties of path trajectory. Findings showed development of surface jet flux occurred in supercritical Froude Number. Hence, the trajectory properties including  $X_p$ ,  $X_{max}$  and  $X_{min}$  was increased by 41, 40 and 45 percent with increase of contraction angle 15 into 90 degrees, respectively. Result of statistical analysis showed a nonlinear relationship exists as a satisfactory correlation between trajectory properties and jet flux parameters.

**Keywords:** Contraction Angle, Densimetric Froude Number, Jet Flux, Progressive Weber Number, Trajectory