

بررسی آزمایشگاهی اختلاط و غلظت نهایی منحنی سقوط جریان جت سطحی تحت تأثیر زاویه همگرایی

سمیرا سلمانزاده^{۱*} و جواد احدیان^۲

چکیده

در این مقاله نتایج مشاهدات آزمایشگاهی انجام شده جهت بررسی جریان چگال تخلیه شده به محیط پذیرنده توسط جت سطحی دایره‌ای ارائه می‌گردد. میزان اختلاط و غلظت جریان چگال در محیط پذیرنده تحت اثر متغیرهای هندسی و هیدرولیکی بررسی شده است. پارامترهای متغیر شامل دبی تزریق جت، غلظت سیال تخلیه‌شونده، قطر و زاویه همگرایی نازل جت دایره‌ای هستند. در این پژوهش، برای بررسی چگونگی ارتباط بین این پارامترها، مدل فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک ساخته و آزمایش‌های مختلف با هندسه و جریان غلیظ متفاوت جت انجام شد. اندازه‌گیری غلظت خط مرکزی جریان، در طول منحنی پایین‌افتادگی از طریق EC متر دیجیتالی و ارتباط میزان شوری با غلظت صورت پذیرفت. منحنی‌های غلظت نسبت به مختصات طولی برای کلیه آزمایش‌ها رسم شد. تحلیل داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش غلظت سیال چگال از ۱۵ به ۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب، میزان غلظت خط مرکزی جریان جت نسبت به غلظت اولیه، ۵۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین میزان غلظت خط مرکزی جریان جت در زاویه ۳۰ نسبت به ۱۵ درجه، ۲۷/۵ درصد و در زاویه ۹۰ نسبت به ۱۵ درجه، ۷۳ درصد افزایش می‌یابد. مقایسه آماری بین داده‌ها، نشان‌دهنده این است که پروفیل جریان در غلظت ۳۰ نسبت به غلظت ۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب، کاهش ۱۲/۵ درصدی و غلظت ۶۰ نسبت به غلظت ۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب، کاهش ۳۷/۷ درصدی در طول پیشروی پروفیل جریان دارد.

واژه‌های کلیدی: جت سطحی، زاویه همگرایی، غلظت نهایی، منحنی سقوط.

ارجاع: سلمانزاده س. و احدیان ج. ۱۳۹۸. بررسی آزمایشگاهی اختلاط و غلظت نهایی منحنی سقوط جریان جت سطحی تحت تأثیر زاویه همگرایی. مجله پژوهش آب ایران. ۳۳: ۶۹-۶۱.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

* نویسنده مسئول: samira.salmanzade@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۰۸

مقدمه

در مباحث زیست‌محیطی، منابع آب اغلب با خطر وارد شدن پساب‌ها و زهاب‌های غلیظ مواجه هستند؛ بنابراین توانایی پیش‌بینی غلظت زهاب در محل ورود به منابع پذیرنده، به‌خصوص در دبی‌ها و غلظت‌های بالا بسیار مهم است. همچنین به‌دلیل اهمیت گردشگری و درآمد حاصل از بهره‌گیری از سواحل دریاها و رودخانه‌ها، پاکیزه نگه‌داشتن آب‌های ساحلی اهمیت چشمگیری دارد؛ از این‌رو همواره تلاش می‌شود که این پساب‌ها در کوتاه‌ترین زمان و کمترین غلظت از سواحل دور شوند. از جمله راه‌های مؤثر و سریع، استفاده از جت‌های سطحی و مستغرق است (بلنجر و همکاران، ۲۰۰۹). جریان جت‌های متلاطم نوعی از جریان‌های آشفته هستند که براساس نیروهای مومنتم ارزیابی می‌شوند. جریان جت معمولاً توسط یک منبع مداوم و تحت تأثیر نیروهای مومنتم انتشار می‌یابد. همچنین اختلاط جریان جت توسط جریان‌های گردابه‌ای اتفاق می‌افتد (احدیان و همکاران، ۱۳۹۳). جریان خروجی جت توسط سیال آلاینده، باعث ایجاد منحنی‌های پایین‌افتادگی در جریان پذیرنده می‌شود. در این گونه جریان‌ها، مشخص کردن طول منحنی مذکور که وابستگی زیادی به غلظت و زاویه حمله جت دارد، از نظر آلودگی سواحل، گردشگری و مسأله محیط‌زیستی حائز اهمیت است (گانگور و روبرتز، ۲۰۰۹). تنگ و همکاران (۲۰۰۸) بیان کردند که عمق و نوع کف محیط پذیرنده (بستر آبراهه) اهمیت بسیار زیادی در پخشیدگی و طول مسیر طی شده جت دارد؛ زیرا در نزدیکی کف، مسیر جریان جت تحت تأثیر کف محیط پذیرنده است. احدیان و موسوی جهرمی (۱۳۸۸) به بررسی تأثیر خصوصیات هیدرولیکی جت بر ژئومتری منحنی پایین‌افتادگی^۱ در جت‌های دایره‌ای مستغرق در منابع آب پذیرنده پرداختند و نتیجه گرفتند که با افزایش زاویه همگرایی طول منحنی تراژکتوری برای مرزهای پایینی و بالایی منحنی پایین‌افتادگی افزایش می‌یابد. کیکرت و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعات خود به بررسی رفتار جت‌های زاویه‌دار در سیال پذیرنده دارای جریان پرداخته‌اند. آن‌ها منحنی پایین‌افتادگی و رقیق‌شدگی جریان را اندازه‌گیری و زوایای ۰ تا ۹۰ درجه را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که خصوصیات جت در ناحیه

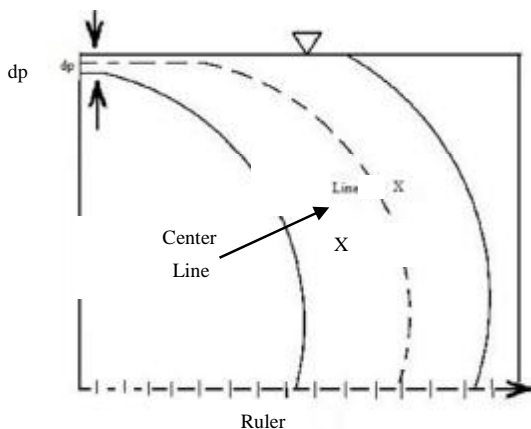
اصلی پخشیدگی، تنها تابعی از زاویه جت است. پالومار و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی و اندازه‌گیری شرایط هیدرولیکی جت، با جریان همسوی با شدت کم پرداختند و مدل انتگرالی را برای پیش‌بینی خصوصیات جریان ارائه دادند. آزمایش‌های آن‌ها برای اندازه‌گیری منحنی پایین‌افتادگی با عدد فرود چگال ۵ و سرعت سیال پذیرنده ۸ میلی‌متر بر ثانیه بوده است. نتایج نشان داد که مدل انتگرالی معرفی شده، برای سرعت‌های صفر تا ۸/۷ میلی‌متر بر ثانیه پیش‌بینی خوبی از روند جریان داشته است. لای و لی (۲۰۱۲) به بررسی اختلاط جت چگال شیب‌دار در محیط‌های ساکن پرداختند. آن‌ها با استفاده از مسیر یاب جریان، منحنی‌های تراژکتوری را در زوایای مختلف خروجی جریان و غلظت‌های مختلف دنبال کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افتادگی تراژکتوری در جت‌های چگال بیشتر از سایرین دیده می‌شود. مینگوان و همکاران (۲۰۱۳) خصوصیات جت مستغرق با درجه حرارت متفاوت نسبت به منبع پذیرنده را با استفاده از روش‌های عددی بررسی کردند. آن‌ها قوانین جریان توسعه یافته در جت‌های مستغرق را تحلیل و با نتایج سایر محققین مقایسه کردند. از جمله پارامترهای مورد مقایسه آن‌ها، می‌توان به توزیع سرعت، کاهش دما در طول خط مرکزی جت، نسبت رقیق‌شدگی و اختلاف فشار هسته جت با محیط پیرامون اشاره کرد. این پژوهشگران نتیجه گرفتند که سرعت انتشار طولی و پخشیدگی عرضی منحنی پایین‌افتادگی جریان چگال تزریق شونده به‌صورت تدریجی تغییر می‌کند. دستغیب و همکاران (۲۰۱۳) به پیش‌بینی مشخصات هیدرولیکی جت شناور دایره‌ای با استفاده از شبکه‌های مصنوعی ANN و ANFIS پرداختند. آن‌ها داده‌های آزمایشگاهی را با نتایج تحلیلی ANN و ANFIS مقایسه و نتیجه‌گیری کردند که شبکه مصنوعی ANFIS نتایج بهتری نسبت به ANN ارائه می‌دهد. ژانگ و ژو (۲۰۱۴) با تزریق مخلوط آب و هوا از طریق یک نازل به بررسی منحنی پایین‌افتادگی جت جوشان (جت حباب‌دار) در جریان‌های متقاطع پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بعد از تزریق، جریان به‌صورت دو فاز جدا از هم درآمده که مسیر جریان در حالت فاز هوا به‌صورت مستقیم است؛ ولی مسیر حرکت فاز آبی به‌صورت منحنی پایین‌افتادگی خواهد بود. بیسالوش و همکاران (۲۰۱۴) ناحیه نزدیک‌شونده در جریان جت

1- Trajectory

در این معادله، r_a جرم حجمی سیال پیرامون (آب زلال)، r_j جرم حجمی سیال جت، m_j لزجت مطلق اولیه سیال جت، u_0 سرعت اولیه ورودی جت، d_p قطر جت، g شتاب ثقل، C_0 غلظت اولیه سیال جت، C_m غلظت خط مرکزی منحنی پایین افتادگی در مکان‌های مختلف از جت، X مختصات طولی خط مرکزی جریان جت، q_c زاویه همگرایی برای نازل جت است. با استفاده از تحلیل ابعادی بین پارامترهای فوق، معادلات بدون بعد زیر استخراج شد:

$$f_1\left(\frac{r_j u_0 d_p}{m_j}, \frac{u_0}{\sqrt{g' d_p}}, \frac{c_m}{c_0}, \frac{X}{d_p}, q_c\right) = 0 \quad (2)$$

در این معادله، پارامتر اول عدد رینولدز جریان ورودی (Re_j)، پارامتر دوم عدد فرود چگال (Fr_d) بوده که در آن g' شتاب ثقل مؤثر و برابر با $\frac{\Delta r}{r_a} g$ است، پارامتر سوم نسبت غلظت خط مرکزی منحنی پایین افتادگی در مکان‌های مختلف از محل جت به غلظت اولیه، پارامتر چهارم نسبت طولی جریان پیشرونده جت و پارامتر پنجم زاویه همگرایی جت است. با توجه به این موارد، در کلیه آزمایش‌های انجام شده پارامترهای مختلف در معادلات بی‌بعد، اندازه‌گیری و مقادیر آن‌ها محاسبه شد.



شکل ۱- نمای کلی جت سطحی

بسط مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه برای بررسی وابستگی غلظت خط مرکزی منحنی پایین افتادگی به زاویه همگرایی نازل تخلیه‌کننده، اقدام به مدلسازی در آزمایشگاه شد. مدل آزمایشگاهی مورد استفاده متشکل از فلوم آزمایشگاهی با دیواره‌های

چگال منفی را بررسی کردند. این پژوهشگران جریان خروجی از جت مایل را بررسی و با سیستم پردازش تصویر، توزیع سرعت را در ناحیه نزدیک جت ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که ناحیه نزدیک و دور جت بر یکدیگر تأثیر بسزایی دارد و تحلیل پخشیدگی جت را تنها براساس ناحیه نزدیک جت نمی‌توان شرح داد. عباسی و روبرتز (۲۰۱۵) به بررسی اثر جهت‌گیری نازل جت چگال در محیط‌های راکد پرداختند. آن‌ها آزمایش‌های خود را برای جهت‌گیری افقی نازل برای زوایای ۱۵-۸۵ درجه نسبت به افق برنامه‌ریزی کردند. پارامترهای اصلی شامل حداکثر ارتفاع جت، نقطه تأثیر و برای اولین بار در پایان ناحیه نزدیک جت^۱، میزان رقیق‌شدگی را اندازه‌گیری نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که اختلاط بین جت تزریق شونده و سیال پذیرنده تحت تأثیر زاویه نازل تخلیه‌کننده جریان است و قبل از برخورد با بستر آبراهه این اختلاط انجام می‌شود. همچنین حداکثر رقیق‌شدگی در نقطه برخورد با کف آبراهه در زوایای ۴۵-۶۵ درجه اتفاق می‌افتد. رقیق‌شدگی در ناحیه نزدیک جت بیشتر به جهت‌گیری نازل وابسته است و برای زوایای بالاتر از ۶۰ درجه کاملاً با پیش‌بینی‌ها مطابقت دارد.

با توجه به کمبود پژوهش‌های جامع در زمینه وابستگی غلظت خط مرکزی منحنی پایین افتادگی به زاویه همگرایی نازل تخلیه‌کننده (زاویه دهانه نازل)، در این پژوهش، سعی شده است که این وابستگی با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی بررسی شود؛ بنابراین با استفاده از یک مدل هیدرولیکی و تحلیل رقومی مشاهدات آزمایشگاهی این هدف انجام شده است.

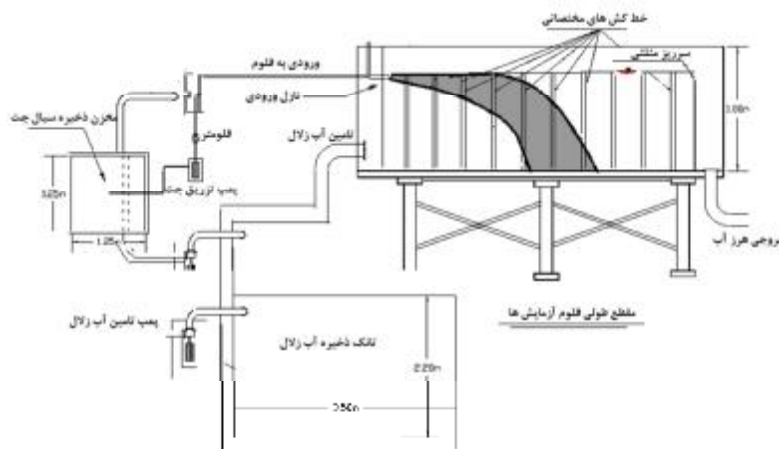
مواد و روش‌ها

همان‌گونه که در بخش‌های قبلی اشاره شد، هدف از این پژوهش بررسی آزمایشگاهی اختلاط و غلظت نهایی منحنی پایین افتادگی جریان جت سطحی تحت تأثیر زاویه همگرایی است. بر این اساس اقدام به برنامه‌ریزی آزمایشگاهی شد. در شکل ۱ نمای کلی از جت سطحی نشان داده شده است.

در این بخش پارامترهای حاکم بر حرکت جریان جت سطحی به صورت بدون بعد ارائه می‌شود.

$$f_1(r_a, r_j, m_j, u_0, d_p, C_0, C_m, g, X, q_c) = 0 \quad (1)$$

در طی انجام آزمایش‌ها سیال پذیرنده از طریق مخزن تأمین و پمپ به فلوم منتقل می‌شد و تا ارتفاع معلومی فلوم را پر می‌کرد. از طرفی، جریان جت چگال نیز از طریق مخزن تزریق و پمپ مربوطه به درون فلوم حاوی سیال پذیرنده تزریق می‌شد. لازم به ذکر است که مخزن تزریق به حجم یک مترمکعب ساخته شد و برای تهیه جریان چگال با غلظت‌های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقادیر مشخص شده از نمک را با ترازو اندازه‌گیری کرده و به مخزن تزریق انتقال داده شد. برای مشخص کردن مسیر حرکت جریان آب‌نمک در سیال پذیرنده، از ماده رنگی حلال در آب استفاده شد. در شکل ۲ نمای تجهیزات ذکر شده در آزمایشگاه هیدرولیک به تصویر کشیده شده است.



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

خط‌کش‌های نصب شده روی فلوم آزمایشگاهی پذیرنده جریان، موقعیت مکانی هر نقطه روی منحنی پایین‌افتادگی جریان چگال مشخص گردید و با استفاده از EC متر دیجیتالی پرتابل، اقدام به تعیین میزان شوری برای هر نقطه با موقعیت مکانی مشخص شد. از طرفی برای افزایش دقت نیز با استفاده از فیلم‌برداری در هر آزمایش، موقعیت هر نقطه کنترل گردید. با توجه به اینکه برای به‌دست 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. دانسیته سیال جت از طریق محاسباتی با روش شناوری و اندازه‌گیری آزمایشگاهی با

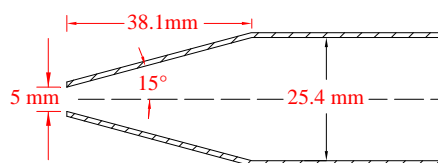
شفاف و از جنس پلکسی گلاس در ابعاد طولی ۳/۲ متر، عرضی ۰/۶ متر و ارتفاعی ۱ متر است. برای انجام آزمایش‌ها، تجهیزاتی که مورد استفاده قرار گرفتند و ساخته شدند، عبارتند از: فلوم آزمایشگاهی، مخزن ذخیره سیال تزریق جت، حوضچه و پمپ تأمین آب جریان پذیرنده، پمپ تزریق جت و پمپ اختلاط سیال جت برای جلوگیری از ته‌نشین شدن آب‌نمک در مخزن. وسایل اندازه‌گیری پارامترهای مختلف شامل EC متر دقیق دیجیتالی پرتابل با دقت ۰/۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر برای تعیین شوری جریان چگال تخلیه‌شونده، فلومتر دقیق با دقت ۰/۲ درصد برای اندازه‌گیری دبی جریان جت، همچنین خط‌کش‌های طولی در سراسر فلوم برای اندازه‌گیری طول طی شده منحنی جت در نظر گرفته شد.

آزمایش‌ها با استفاده از نازل‌های خروجی با قطرهای ۵، ۸ و ۱۵ میلی‌متر و زوایای همگرایی ۱۵، ۳۰ و ۹۰ درجه با دبی‌ها و غلظت‌های مختلف سیال تزریق‌شونده صورت پذیرفت. در شکل ۳ این زوایا برای قطر ۵ میلی‌متر نشان داده شده است.

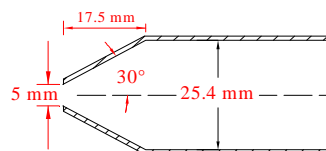
برای تنظیم سطح آب درون سیال پذیرنده، از شیر تنظیم دبی و همچنین سرریز مثلثی در انتهای فلوم استفاده شد. با تزریق جریان جت به‌صورت سطحی، جریان جت چگال به‌صورت کاملاً مماس روی سطح آب قرار گرفت. بعد از شکل‌گیری منحنی پایین‌افتادگی، قرائت میزان شوری و در نهایت میزان غلظت خط مرکزی جریان جت با استفاده از EC متر دیجیتالی پرتابل انجام شد. با توجه به

از نظر تحلیلی می‌توان بیان کرد که در تخلیه سطحی جریان چگال، جریان خروجی تحت تأثیر دو نیروی افقی مومنتم و نیروی عمودی وزن سیال چگال در محیط پذیرنده پیشروی می‌کند. در بخش ابتدایی مسیر، به دلیل سرعت ناشی از نیروی مومنتم، حرکت جریان به صورت افقی و در مجاورت با سطح آب خواهد بود. به تدریج با کم شدن اثر این نیرو سرعت پیشروی جریان جت کاهش می‌یابد. در این شرایط نیروی عمودی وزن سیال چگال بر نیروی مومنتم غلبه می‌کند و جریان ارتباط خود را با سطح آزاد آب از دست می‌دهد و جریان به صورت مستغرق تغییر شکل می‌یابد. با افزایش زاویه نازل جت، نیروی مومنتمی که سبب پیشروی جریان می‌شود، افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت، جریان جت را تنها به جلو می‌راند و فرصت پخشیدگی و جابه‌جایی ذرات نمک با مولکول‌های سیال پذیرنده را نمی‌دهد؛ بنابراین می‌توان گفت در زاویه همگرایی ۹۰ درجه که به صورت تبدیل ناگهانی است، میزان نیروی مومنتم انتقالی نسبت به سایر زوایا بیشتر است. این موضوع باعث افزایش غلظت خط مرکزی در طول جریان جت می‌شود که در همه قطرها و غلظت‌ها چنین روندی مشاهده می‌شود. به تدریج با افزایش نیروی عمودی وزن، منحنی سقوط می‌کند و سبب پخشیدگی جریان می‌شود که این امر باعث می‌شود غلظت خط مرکزی منحنی کاهش یابد و در نهایت برای هر سه زاویه، در نقطه برخورد با بستر، میزان غلظت یکسان و به غلظتی مشابه غلظت سیال پذیرنده تبدیل شود. جدول ۱ نمونه‌ای از پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. در این جدول میزان غلظت در محدوده پیشروی جت موجود است. تحلیل داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش غلظت سیال چگال از ۱۵ به ۶۰ گرم بر لیتر، میزان غلظت در طول خط مرکزی منحنی پایین‌افتادگی نسبت به غلظت اولیه ۵۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین میزان غلظت خط مرکزی جریان جت در زاویه ۳۰ درجه نسبت به ۱۵ درجه ۲۷/۵ درصد و در زاویه ۹۰ درجه نسبت به ۱۵ درجه ۷۳ درصد افزایش می‌یابد. افزایش غلظت سیال جت، سبب چگال‌تر و سنگین‌تر شدن پروفیل جریان جت می‌شود. همین عامل سبب می‌شود که منحنی پایین‌افتادگی سریع‌تر سقوط کند و قادر به طی کردن فاصله طولی نباشد.

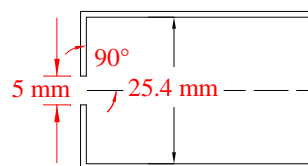
استفاده از هیدرومتر دقیق ۱۵۱H استاندارد شده در یک دمای مشخص محاسبه و برداشت گردید.



(الف)



(ب)



(ج)

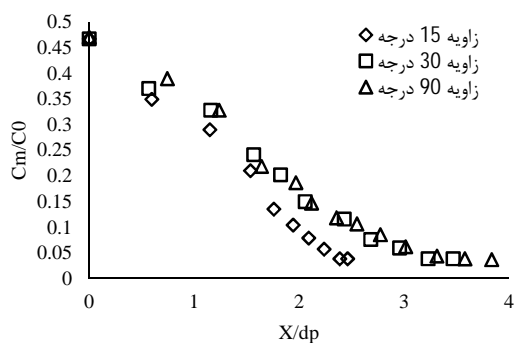
شکل ۳- نمایش جت ۵ میلی‌متر با زاویه‌های همگرایی مختلف، الف) ۱۵ درجه، ب) ۳۰ درجه و ج) ۹۰ درجه

نتایج و بحث

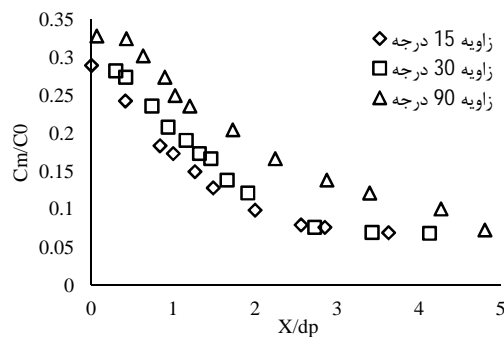
پس از انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری اطلاعات، به بررسی غلظت جریان چگال در طول خط مرکزی منحنی پایین‌افتادگی تحت تأثیر زاویه همگرایی نازل خروجی جریان پرداخته شد. از این رو اعداد بدون بعد حاصل شده از معادله (۲) بررسی شدند. در این معادله C_m/C_0 غلظت خط مرکزی منحنی پایین‌افتادگی در مکان‌های مختلف از محل جت نسبت به غلظت اولیه است که براساس موقعیت مکانی هر نقطه X/d_p یا نسبت طولی جریان پیش‌رونده جت و همچنین زاویه همگرایی ارزیابی شد. در شکل ۴ پروفیل‌های غلظت برای زاویه‌های ۱۵، ۳۰ و ۹۰ درجه برای غلظت‌های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب ترسیم شد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش زاویه همگرایی دهانه نازل، میزان غلظت خط مرکزی جریان افزایش می‌یابد و در زاویه ۹۰ درجه بیشترین غلظت مشاهده می‌شود.

کاهش طول پیشروی ناشی از افزایش غلظت به خوبی نشان داده شده است.

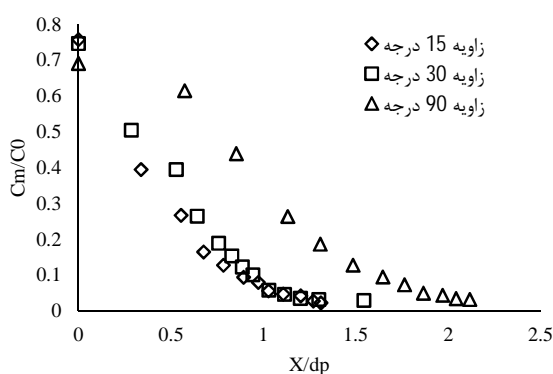
در شکل ۵ میزان پیشروی پروفیل غلظت برای زاویه ۱۵ درجه در ۳ غلظت ۱۵، ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۴- نمودارهای بدون بعد الف) غلظت ۱۵، ب) غلظت ۳۰ و ج) غلظت ۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب

جدول ۱- تغییرات غلظت خط مرکزی جریان در محدوده‌های مختلف X/d_p در ۱۵، ۳۰ و ۹۰ درجه

الف- غلظت اولیه ۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب					
زاویه/محدوده X/d_p	۰-۱	۱-۲	۲-۳	۳-۴	۴-۵
۱۵	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۶	-
۳۰	۰/۲۵	۰/۱۶	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۷
۹۰	۰/۳۱	۰/۲۳	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۸
ب- غلظت اولیه ۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب					
زاویه/محدوده X/d_p	۰-۱	۱-۲	۲-۳	۳-۴	۴-۵
۱۵	۰/۴	۰/۱۹	۰/۰۵	-	-
۳۰	۰/۴۲	۰/۲۵	۰/۱	۰/۰۳۸	-
۹۰	۰/۴۳	۰/۲۶	۰/۱۵	۰/۰۴	-
ج- غلظت اولیه ۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب					
زاویه/محدوده X/d_p	۰-۱	۱-۲	۲-۳	۳-۴	۴-۵
۱۵	۰/۲۷	۰/۰۴	-	-	-
۳۰	۰/۳۲	۰/۰۷	-	-	-
۹۰	۰/۵۱	۰/۲۱	۰/۰۳	-	-

بر مترمکعب، کاهش ۱۲/۵ درصدی و غلظت ۶۰ نسبت به ۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب، کاهش ۳۷/۷ درصدی در طول پیشروی پروفیل غلظت داشته باشد.

برای مشخص کردن معادله بین پارامترها از نرم افزار آماری SPSS استفاده شد؛ به گونه‌ای که روش‌های مختلف خطی و غیرخطی مورد آزمون آماری با پارامترهای وابسته قرار گرفت و در نهایت مدل زیر برای پارامترها استخراج شد:

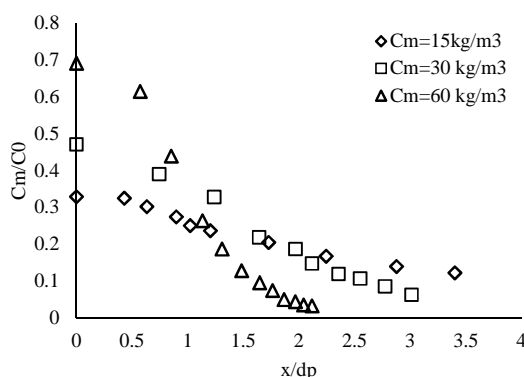
$$\frac{C_m}{C_0} = -0.188Ln\left(\frac{X}{d_p}\right) - 0.0003(Fr_d^{-0.19}) + \quad (3)$$

$$0.172(q^{0.45}) + 0.121 \quad R^2 = 0.78$$

گفتنی است که بهترین ضرایب با استفاده از نرم افزار آماری SPSS به روش رگرسیون خطی برای ۸۰ درصد داده‌ها استخراج شد و با استفاده از روش ریشه میانگین مجذورات مجموع خطا، خطای هر یک از معادلات یاد شده برآورد گردید. با توجه به اینکه ضریب رگرسیون (R^2) به تنهایی معیار مناسبی برای دقت مربوط به معادلات نیست، یکی از روش‌های متداول برای برآورد دقت یک معادله، روش ریشه متوسط مجذورات مجموع خطاها است. جدول ۴ برای هر یک از معادلات نتیجه‌گیری شده دقت مربوطه را که براساس ۲۰ درصد داده‌هایی را که در استخراج مدل آماری نقشی نداشته‌اند، نشان می‌دهد.

در این تحقیق با استفاده از مدل‌های آماری بسط داده شده برای هر آزمایش مقادیر C_m/C_0 محاسبه و در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر آن‌ها ترسیم شد. شایان گفتن است در جدول ۵ محدوده اعداد بدون بعد در آزمایش‌های تحقیق حاضر نشان داده شده است.

برای برقراری ارتباط معنی‌دار بین کاهش طول پیشروی ناشی از افزایش غلظت سیال چگال، از روش آزمون مقایسه میانگین‌ها در نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شده است. با این روش می‌توان مقدار خطای تصادفی بودن داده‌ها را محاسبه کرد. طبق جدول ۲، احتمال ایجاد نتایج در اثر خطای تصادفی کمتر از ۰/۰۵ است، این امر بدین معنی است که نتایج، معنی‌دار هستند. در این سطح معنی‌داری، داده‌ها با ۹۵ درصد سطح اطمینان قابل قبول می‌باشند.



شکل ۵- غلظت‌های ۱۵، ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای زاویه ۱۵ درجه

جدول ۲- نتایج آماری معنی‌دار بودن داده‌ها

سطح معنی‌داری	میانگین مربعات	مجموع مربعات
۰/۰۴	۱۰۶۱۰/۵	۶۲۶۰۲۲/۷

با افزایش غلظت از ۱۵ به ۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای یک زاویه نازل، میزان طول پیشروی منحنی سقوط اندازه‌گیری و در جدول ۳ آورده شده است. مقایسه آماری بین داده‌ها نشان داد که این افزایش غلظت سبب می‌شود پروفیل جریان در غلظت ۳۰ نسبت به غلظت ۱۵ کیلوگرم

جدول ۳- میزان غلظت خط مرکزی جریان در محدوده پیشروی منحنی سقوط جت برای زاویه ۱۵ درجه

میزان C_m/C_0 در محدوده پیشروی					
غلظت kg/m^3	۰-۱	۱-۲	۲-۳	۳-۴	۴-۵
۱۵	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۴	-
۳۰	۰/۲۷	۰/۱۹	۰/۰۶	-	-
۶۰	۰/۴	۰/۲۱	-	-	-

جدول ۴- دقت مدل‌های آماری

خطا (درصد)	دقت (درصد)	MSE	RMSE
۲۹/۹	۷۰/۱	۰/۰۸۲	۰/۰۰۷

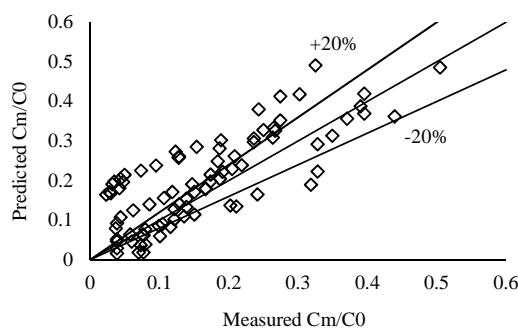
جدول ۵- محدوده اعداد بدون بعد

Fr_d	Re_j	C_m/C_0	x/d_p
۴-۱۲۰	۳۴۲۵-۳۵۰۲/۳	۰-۰/۷۷	۰-۵

منابع

۱. احدیان ج. محمدی ف. و بهرامی ح. ۱۳۹۳. بررسی اثر زاویه قائم و خصوصیات هیدرولیکی بر نحوه توزیع جریان جت غلیظ منفرد با استفاده از مدل فیزیکی. مجله علوم و فنون دریایی. ۱۳(۱): ۶۰-۵۱.
۲. احدیان ج. و موسوی جهرمی س. ح. ۱۳۸۸. بررسی عوامل مؤثر بر توسعه جریان جت مستغرق در منابع آب پذیرنده ساکن. نشریه آب و خاک. ۲۳(۴): ۱۷۹-۱۹۲.
3. Abessi O. and Roberts P. 2015. Effect of Nozzle Orientation on Dense Jets in Stagnant Environments. Journal of Hydraulic Engineering. 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001032 , 06015009.
4. Besalduch L. A. Badas M. G. Ferreri S. and Querzoli G. 2014. On the near field behavior of inclined negatively buoyant jets. University of Cagliari, DICAAR (Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale Architettura), 09123 Cagliari, Italy.
5. Bleninger T. Niepelt A. and Jirka G. 2009. Desalination plant discharge calculator. EDS Congress, Baden-Baden, Germany, 2009.
6. 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. 1880-1895.
7. Gungor E. and Roberts P. J. W. 2009. Experimental studies on vertical dense jets in a flowing current. Journal of Hydraulic Engineering. 135(11): 935-948.
8. Kikkert G. A. Davidson M. J. and Nokes R.I. 2009. A Jet at an Oblique Angle to a Cross-Flow. Journal of Hydro Environment Research. 3(2): 69-76.
9. Lai C. C. K. and Lee J. H. W. 2012. Mixing of inclined dense jet in stationary ambient. Journal of Hydro Environment Research. 6(1): 9-28.
10. Minguan Y. Shengnan X. Can K. and Yuli W. 2013. Effect of Geometrical Parameters on Submerged Cavitation Jet Discharged

ضریب رگرسیون نیز در این حالت نمایه‌ای از میزان دقت هر یک از مدل‌های آماری خواهد بود. شکل ۶ مقادیر اندازه‌گیری شده هریک از پارامترهای فوق را در مقابل مقادیر متناظر محاسباتی برای کلیه آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد و مدل آماری خطی با دقت قابل قبولی قادر به پیش‌بینی است و همان‌طوری که مشاهده می‌شود، اکثر داده‌های محاسباتی در مقابل مقادیر پیش‌بینی روی خط ۴۵ درجه واقع شده‌اند.



شکل ۶- تغییرات مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده برای C_m/C_0

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی اختلاط و غلظت نهایی منحنی سقوط جریان جت سطحی تحت تأثیر زاویه همگرایی پرداخته شد. مطابق با بررسی‌های انجام شده، با افزایش غلظت سیال چگال از ۱۵ به ۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب میزان غلظت در طول خط مرکزی منحنی پایین‌افتادگی نسبت به غلظت اولیه ۵۲ درصد افزایش می‌یابد. افزایش غلظت سبب می‌شود پروفیل جریان در غلظت ۳۰ نسبت به غلظت ۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب کاهش ۱۲/۵ درصدی و غلظت ۶۰ نسبت به ۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب، کاهش ۳۷/۷ درصدی در طول پیشروی پروفیل غلظت داشته باشد. همچنین میزان غلظت خط مرکزی جریان جت در زاویه ۳۰ درجه نسبت به ۱۵ درجه ۲۷/۵ درصد افزایش و در زاویه ۹۰ درجه نسبت به ۱۵ درجه ۷۳ درصد افزایش می‌یابد.

- from Profiled Central-body Nozzle. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 26(3): 476-482.
11. Palomar P. Lara J. I. and Losada I. J. 2012. Near Field Brine Discharge Modeling Part2: Validation of Commercial Tools. Desalination. 290: 28-42.
 12. Tang H. Paik J. Sotiropoulos F. and Khangaonkar T. 2008. Three-Dimensional Numerical Modeling of Initial Mixing of Thermal Discharges at Real-Life Configurations. Journal of Hydraulic Engineering. 134(9): 1210-1224.
 13. Zhang W. and Zhu D. 2014. Trajectories of Air-Water Bubbly Jets in Cross flows. Hydraulic Engineering. 140(7): 06014011.

