

## بررسی آزمایشگاهی سرعت پیشروی جریان در جت سطحی مستطیلی همگرا با و بدون شیب طولی

طوبی حیدری<sup>۱</sup>، نیما شهنی کرم زاده<sup>۱\*</sup>، جواد احدیان<sup>۲</sup>

۱. گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

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

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۲/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۹/۲۵

### چکیده

در این مطالعه، نتایج مشاهدات آزمایشگاهی انجام شده بر روی تراژکتوری و سرعت پیشروی جریان جت‌های سطحی مستطیلی همگرا و شیبدار در محیط پذیرنده ساکن ارائه گردیده است. به منظور شبیه‌سازی فرآیند تخلیه از فلومی به طول ۳/۲، عرض ۰/۶ و ارتفاع ۰/۹ متر به‌عنوان محیط پذیرنده و کانال مستطیلی با عرض کف ۶ سانتیمتر به‌عنوان تخلیه‌کننده سطحی استفاده گردید. کانال تخلیه در چهار زاویه همگرایی ۱۲/۵، ۲۵، ۴۵ و ۹۰ درجه طراحی گردید. کانال مذکور در سه شیب متفاوت صفر، ۴ و ۸ درصد سیال جت را مماس بر سطح محیط پذیرنده تزریق می‌نمود. سیال پذیرنده از آب شرب و سیال جت از انحلال نمک در آب شرب و در سه غلظت ۵، ۱۵ و ۴۵ گرم بر لیتر تهیه می‌گردید. پس از اجرای آزمایش‌ها، با استفاده از فرآیند روندیابی تصاویر، اقدام به تحلیل داده‌های برداشت شده گردید. در این راستا تأثیر متغیرهای هندسی و هیدرولیکی بر تراژکتوری و سرعت پیشروی جریان مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج بدست آمده، افزایش شیب و کاهش زاویه همگرایی کانال موجب افزایش طول تراژکتوری و کاهش سرعت پیشروی جریان می‌گردد. کاهش عدد فرود چگال نیز موجب کاهش طول تراژکتوری می‌گردد. با غلبه نیروی شناوری بر رفتار جریان جت مقدار نسبت سرعت پیشروی جریان جت به سرعت متوسط آن در محل خروج با افزایش شیب از صفر به ۰/۰۸ به میزان ۶۰ درصد کاهش نشان می‌دهد. علاوه بر آن تغییر زاویه همگرایی از ۹۰ به ۱۲/۵ درجه موجب کاهش ۶۰ درصدی در مقدار نسبت سرعت‌ها می‌گردد. همچنین، به‌منظور بررسی تأثیر همگرایی بر مسیر حرکت جریان، با مقایسه نتایج تراژکتوری جریان در کانال‌های همگرا و کانال‌های ساده، پیشروی نسبی بیشتر در کانال‌های همگرا مشاهده گردید.

**واژگان کلیدی:** تراژکتوری، جت سطحی، سرعت پیشروی، عدد فرود چگال، همگرایی

## ۱. مقدمه

کمبود آب شیرین در برخی نقاط دنیا نشانه‌ای از کمبود منابع آب طبیعی است. فرآیند نمکزدایی یکی از طرح‌های اولیه بشر است که برای جداکردن آب شیرین از محلول آب‌نمک و با هدف جبران کمبود آب قابل شرب مورد استفاده قرار گرفته است. نمکزدایی مشابه سایر فعالیت‌های صنعتی پتانسیل ایجاد آثار نامطلوب زیست محیطی روی مناطق مجاور را دارا می‌باشد. این آثار که ناشی از عملکرد کارخانجات نمکزدایی می‌باشند به شکل‌های مختلف نظیر مواد زائد جامد، مایع و یا انتشار گاز دیده می‌شوند (Danoun, 2007). مواد زائد مایع حاصل از کارخانجات نمکزدایی که شامل درصد بالایی از مواد معدنی محلول هستند، به درون دریا تخلیه می‌گردند و بیشترین تأثیر آنها متوجه محیط زیست دریایی می‌شود که می‌تواند بر رشد و اندازه‌ی آبزیان تأثیرگذار باشد (Danoun, 2007). بنابراین افزایش آگاهی از عملکرد جت‌های شناور منفی دارای اهمیت است، چرا که با شناخت فرآیند تخلیه، طراحی کاراتری از سازه‌های تخلیه‌کننده صورت می‌گیرد. بر این اساس، در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای پیرامون بررسی رفتار جریان‌های غلیظ تخلیه‌شده در محیط‌های پذیرنده صورت گرفته است.

(Gustafsson and Larsen 1970) جت افقی تخلیه شونده به آب‌های لایه‌بندی شده و ساکن را مورد بررسی قرار دادند. آنها با بررسی حرکت سیال جت تحت تأثیر نیروی شناوری، روشی را برای تخمین حداکثر ارتفاع صعود سیال جت ارائه نمودند. Zeitoun et al., (1972) تخلیه مستغرق فاضلاب‌هایی با شناوری منفی را مورد تحلیل قرار دادند. آنها مطالعات خود را بر اندازه‌گیری میزان رقیق‌شدگی در حداکثر ارتفاع صعود جت متمرکز نمودند و از میان زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه برای جت، در زاویه ۶۰ درجه به بهترین نرخ رقیق‌شدگی دست یافتند. (Pincine and List 1973) نیز مسیر حرکت جریان و اختلاط مربوط به تخلیه‌کننده‌های با شناوری منفی را در زاویه‌ی ۶۰ درجه بررسی نمودند. در زمینه بررسی جت‌های صفحه‌ای،

(Shahrabani and Ditmars 1976) رفتار جت‌های مستغرق صفحه‌ای با شناوری منفی را با در نظر گرفتن تأثیر مرزها مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از تحقیقات آنها نشان داد که در صورت وجود تأثیر مرزها، میزان رقیق‌شدگی در خط مرکزی سیال جت کاهش می‌یابد. (Roberts et al., 1997) نیز مسیر حرکت جریان و رقیق‌شدگی مربوط به جت‌های چگال مستغرق با شناوری منفی را در حالتی که نازل در زاویه‌ی ۶۰ درجه قرار گرفته است، بررسی نمودند. در زمینه‌ی تخلیه سطحی جریان‌هایی با شناوری منفی Kassem et al., (2003) با مدل‌سازی سه‌بعدی از فرآیند تخلیه با استفاده از تخلیه‌کننده‌های صفحه‌ای واگرا، تأثیر زاویه واگرایی و غلظت سیال جت را بر خصوصیات جبهه جریان بررسی نمودند. آنها مشاهده نمودند که با افزایش زاویه واگرایی و نیز کاهش عدد فرود چگال طول موقعیت شیرجه کاهش می‌یابد. (Cipollina et al., 2005) در مطالعات خود بر روی جت‌های مستغرق چگال با شناوری منفی به بررسی منحنی‌های پایین افتادگی جریان در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه برای نازل پرداختند و به نتایج مشابهی با محققان پیشین دست یافتند. (Jones et al., 2007) تخلیه‌کننده‌های سطحی شناور در پیکره‌های آبی را مورد مطالعه قرار دادند و روشی را که بر ارتباط واحدهای قابل پیش‌بینی در CORMIX 3 پایه‌ریزی شده است، ارائه نمودند. این روش قابلیت پوشش دادن کامل محدوده میدان‌های نزدیک و دور را دارا می‌باشد. (Bleninger and Jirka 2008) با هدف بررسی جت و نرخ‌های رقیق‌شدگی نرم افزار CORMIX را جهت شبیه‌سازی فرآیند تخلیه ارائه نمودند. نتایج حاصل از تحقیقات آنها بر روی زاویه قرارگیری نازل جهت رسیدن به حداکثر نرخ رقیق‌شدگی نشان داد که برای بستر مسطح زاویه نازل بین ۶۰ تا ۷۵ درجه مناسب می‌باشد، برای بسترهای با شیب ملایم مقدار زاویه بین ۴۵ تا ۶۰ درجه و برای بسترهای شیبدار با شیب زیاد زاویه ۳۰ تا ۴۵ درجه بهینه می‌باشد. (Ahadiyan and Musavi-Jahromi 2009) به بررسی جریان جت مستغرق تخلیه‌شونده به

تخلیه سطحی فاضلاب‌هایی با شناوری منفی از طریق تخلیه‌کننده‌های پیشرونده در محیط پذیرنده در مطالعات (Abessi et al., 2010, 2011) بررسی گردید. ایشان مسیر حرکت جریان را در تخلیه‌کننده‌های فاضلاب‌های سنگین در محیط‌های ساکن مورد مطالعه قرار دادند و موقعیت نقاطی با شدت نور یا غلظت بیشینه در برش‌های عرضی متفاوت را به‌عنوان موقعیت خط مرکزی جریان انتخاب نمودند، و با مقایسه نتایج مطالعات خود با مطالعات آزمایشگاهی مربوط به تخلیه مستغرق فاضلاب‌های سبک پیشروی بیشتر جریان را در محیط به دلیل تأثیر سطح آزاد آب و درگیری کمتر جریان خروجی با محیط پذیرنده مشاهده نمودند. همچنین مشاهده نمودند که جریان با عمق محیط پذیرنده و شارهای اولیه جریان خروجی در ارتباط مستقیم قرار دارد. (Bashitlshaer et al., 2012) به بررسی آزمایشگاهی جت‌های شناور منفی مایل پرداختند. ایشان با تغییر پارامترهای اولیه جت شامل قطر نازل، زاویه اولیه نازل نسبت به افق، غلظت جریان و دبی آن و نیز عبور بهترین خط برازش از داده‌های آزمایشگاهی، وابستگی شدید شیب این خط با زاویه اولیه جت را مشاهده نمودند، آنها از بین زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، در زاویه ۶۰ درجه به بهترین نرخ رقیق‌شدگی دست یافتند. مدل‌سازی عددی برای فرآیند تخلیه توسط (Palomar et al., 2012) با هدف بررسی تخلیه آب شور در میدان نزدیک صورت گرفت. ایشان برای جت‌ها در حالات مختلف بهترین مدل را از میان مدل‌های عددی موجود معرفی نمودند. به عنوان نمونه برای جت منفرد مدل‌های CORJET، UM3 و JETLAG را نسبت به CORMIX1 و CORMIX2 به علت سهولت امکان مدل کردن، مناسب دیدند. (Kheirkhah et al., 2014) نیز با استفاده از یک مدل عددی، جت‌های چگال مایل آشفته را در محیط پذیرنده همگن و ساکن مورد مطالعه قرار دادند. ایشان خصوصیات هندسی سیال جت تخلیه شده را تحت تأثیر تغییر در زاویه قرارگیری نازل بررسی نمودند. مطابق نتایج، مشاهده گردید که در محیط‌های پذیرنده

منابع آب پذیرنده ساکن پرداختند. ایشان خصوصیات منحنی‌های پایین افتادگی جریان جت و پروفیل‌های سرعت و غلظت را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که پروفیل‌های سرعت از تابع گوسین پیروی می‌کنند و با استفاده از روش غیرخطی مشخص گردید که مدل‌های آماری با دقت قابل قبولی خصوصیات منحنی‌های پایین افتادگی را برآورد می‌کنند. علاوه بر این Ahadiyan and Musavi-Jahromi (2009) تأثیر خصوصیات هیدرولیکی جریان را بر روی مسیر حرکت جریان در جت‌های شناور دایره‌ای بررسی نمودند. بر اساس نتایج بدست آمده، مشاهده گردید که افزایش قطر جت به دلیل اینکه شار مومنتم را افزایش می‌دهد، تأثیر معناداری بر طول منحنی‌های پایین افتادگی دارد. از طرفی 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 خواهد داشت. به منظور ارزیابی اثرات کارخانجات نم‌کزدایی روی محیط زیست دریایی، (Bleninger 2009) مدلی را ارائه نمودند که قادر بود با مقایسه خصوصیات فاضلاب و محیط پذیرنده، شرایط تخلیه پایه را توصیف کند. (Nashat et al., 2009) مطالعه آزمایشگاهی را در رابطه با آب‌های سطحی آلوده در کانال‌های باز انجام دادند و تأثیر زاویه جت، نسبت سرعت، نوع آلودگی و غلظت آن را روی مسیر حرکت جریان جت، پروفیل‌های سرعت و غلظت و عرض پخشیدگی سیال جت مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحلیل نشان داد که جریان جت کاملاً به نسبت سرعت جریان و زاویه تزریق سیال جت وابسته است. نوع آلودگی تأثیری بر خصوصیات هیدرولیکی ندارد و عرض پخشیدگی سیال جت با افزایش نسبت سرعت، زاویه‌ی قرارگیری نازل و مسافت طی شده توسط سیال جت افزایش می‌یابد. اختلاط مجدد سیال جت در مطالعات (Ferrari and Querzoli 2010) برای جت‌های مستغرق مایل با شناوری منفی مورد تحلیل قرار گرفت. ایشان این پدیده را با تمرکز بر مسیر حرکت جریان جت و موقعیت نهایی صعود سیال جت بررسی نمودند.

همان گونه که اشاره گردید تراژکتوری جریان به علت نقش آن در ترقیق پساب‌های تخلیه شده، و سرعت پیشروی جریان به علت نقش آن در فرآیند اختلاط بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در تحقیق حاضر، پارامترهای مؤثر اعم از پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. برنامه‌ریزی آزمایش‌ها با توجه به پارامترهای مؤثر بر پدیده صورت پذیرفت. بر این اساس، پارامترهای مؤثر بر سرعت پیشروی جریان جت را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

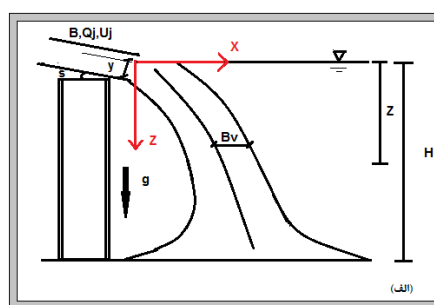
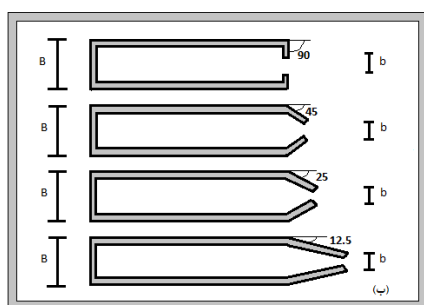
$$f(B, b, y, S, A, H, Z, \rho_j, \rho_a, \mu_j, g, U, U_{0j}) \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، B: عرض بالادست کانال تخلیه، b: عرض کانال تخلیه در محل خروجی کانال، y: عمق جریان در محل خروجی کانال، S: شیب کانال تخلیه نسبت به افق، A: زاویه‌ی همگرایی کانال تخلیه، H: عمق آب در محیط پذیرنده، Z: متغیر زمانی ارتفاع نفوذ سیال جت نسبت به سطح آب،  $\rho_j$ : جرم حجمی سیال جت،  $\rho_a$ : جرم حجمی سیال پذیرنده،  $\mu_j$ : لزجت مطلق اولیه سیال جت، g: شتاب ثقل، U: سرعت نفوذ سیال جت در محیط پذیرنده و  $U_{0j}$ : سرعت سیال جت در محل خروج کانال تخلیه می‌باشد. در شکل (۱) مسیر حرکت سیال جت، کانال‌های تخلیه‌کننده و تعدادی از پارامترهای ذکر شده نمایش داده شده است.

عمیق که سیال جت تا رسیدن به سطح آب محیط پذیرنده مسیر بیشتری را طی می‌کند، زاویه‌های بزرگتر برای قرارگیری نازل مناسب‌تر می‌باشند. در نهایت Voustrou et al., (2015) جت‌های صفحه‌ای مستغرق مایل با شناوری منفی را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان از مقایسه نتایج آزمایشگاهی خود با مطالعات پیشین به این نتیجه دست یافتند که حداکثر ارتفاع صعود سیال در جت‌های صفحه‌ای مایل با زاویه‌ی ۴۵ درجه کمتر از جت‌های دایره‌ای مستغرق می‌باشد.

با توجه به مروری بر منابع انجام شده، نقش اختلاط جریان غلیظ با سیال پذیرنده به‌عنوان یک پارامتر مهم بر رقیق‌شدگی جریان تخلیه‌شونده بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اما در این میان بررسی شرایط تخلیه سطحی از طریق کانال‌های تخلیه‌کننده صفحه‌ای همگرا و شیبدار کمتر مورد توجه بوده است. بنابراین در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی فرآیند تخلیه سطحی جت چگال از کانال‌های مستطیلی همگرا با استفاده از یک مدل هیدرولیکی در محیط آزمایشگاهی انجام گرفت و به بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر مسیر حرکت جریان و سرعت پیشروی آن اقدام گردید.

## ۲. مواد و روش‌ها



شکل ۱- الف) مسیر حرکت سیال جت در تخلیه سطحی و پارامترهای مربوطه (ب) کانال‌های تخلیه‌کننده سیال جت

در رابطه‌ی (۲) پارامتر سوم نسبت سرعت نفوذ سیال جت در محیط پذیرنده به سرعت آن در محل خروج از کانال تخلیه، پارامتر چهارم نسبت ارتفاع نفوذ سیال جت در محیط پذیرنده به عمق آب در محیط پذیرنده، پارامتر پنجم عدد فرود جریان تخلیه شونده، پارامتر

با استفاده از تحلیل ابعادی بین پارامترها، روابط بدون بعد زیر برای این پدیده استخراج گردید:

$$f\left(S, A, \frac{U}{U_{0j}}, \frac{Z}{H}, \frac{U_{0j}}{\sqrt{gy}}, \frac{U_{0j}}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_a} gy}}, \frac{\mu_j}{\rho_j U_{0j} y}, \frac{b}{B}\right) = 0 \quad (2)$$

و ۸ درصد پس از تنظیم شرایط تخلیه، سیال جت را مماس بر سطح محیط پذیرنده تخلیه می‌نمود. این کانال‌ها بر روی یک پایه نگهدارنده قرار می‌گرفتند. این پایه علاوه بر فراهم نمودن امکان تخلیه سیال جت از ارتفاع ۷۰ سانتیمتر، تنظیم شیب تخلیه را بر عهده داشت.

سیال جت مورد استفاده از طریق انحلال نمک در آب شرب مهیا می‌گردید که برای سه غلظت متفاوت ۵، ۱۵ و ۴۵ گرم بر لیتر فراهم می‌شد. به منظور آشکارسازی مسیر حرکت جریان جت تخلیه‌شونده در محیط پذیرنده از ماده‌ای رنگی استفاده شد؛ به گونه‌ای که سیال جت به طور کامل با استفاده از این ماده که اثری در تغییر میزان دانسیته و یا غلظت آن نداشت، رنگی می‌گردید. پس از تهیه سیال جت و تنظیم دبی جریان، کانال تخلیه با زاویه همگرایی مورد نظر و در شیب تنظیم شده از طریق پایه بر روی فلوم مستقر می‌گردید. برای اندازه‌گیری دبی سیال جت از یک دبی‌سنج الکترومغناطیس با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه استفاده شد. برای هر آزمایش دمای سیال محیطی و سیال جت با استفاده از ترمومتر اندازه‌گیری می‌شد و در صورتی که تفاوت دمایی بیش از دو درجه قرائت می‌شد، آن آزمایش حذف می‌گردید. اندازه‌گیری دانسیته سیال جت و سیال محیطی نیز با استفاده از هیدرومتر 151H استاندارد شده به روش ASTM انجام می‌گردید.



شکل ۲- فلوم مورد استفاده برای انجام آزمایشات

پس از تخلیه سیال جت در محیط پذیرنده تمامی مراحل آزمایش از طریق دوربین فیلم‌برداری با سرعت ۵۰ فریم بر ثانیه ثبت گردید. داده‌های مربوط به

ششم عدد فرود چگال، پارامتر هفتم عدد رینولدز جریان تخلیه شونده و پارامتر هشتم نسبت عرض کانال تخلیه در محل خروجی به عرض آن در بالادست کانال می‌باشد. با توجه به ثابت بودن مقدار نسبت عرض کانال تخلیه در محل خروجی به عرض بالادست آن در تمامی آزمایش‌ها، از اثر آن در تحلیل ابعادی صرف‌نظر می‌گردد. همچنین به علت قرارگیری عدد رینولدز جریان جت در محدوده جریان متلاطم، از اثر عدد رینولدز صرف‌نظر می‌شود. حداقل مقدار رینولدز مشاهده شده در آزمایش‌های این تحقیق ۲۲۰۰ بود، بر این اساس می‌توان نوشت:

$$\frac{U}{U_{0j}} = f\left(S, A, Fr, Fr_d, \frac{Z}{H}\right) \quad (3)$$

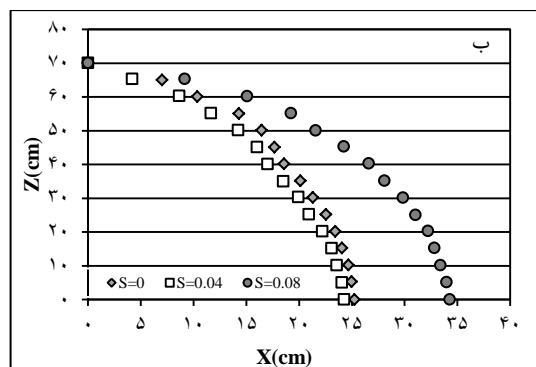
برنامه‌ریزی آزمایش‌ها به گونه‌ای انجام شد که کانال مستطیلی دارای عرض ثابت برابر با ۶ سانتیمتر باشد. از طرفی تمامی آزمایش‌ها در چهار زاویه همگرایی، سه شیب، سه دبی و سه غلظت متفاوت انجام شد. جدول (۱) متغیرهای تحقیق حاضر را نمایش می‌دهد.

جدول ۱- لیست متغیرهای مورد آزمایش در تحقیق حاضر

زاویه همگرایی (درجه)	شیب (متر بر متر)	دبی (لیتر بر ثانیه)	غلظت (گرم بر لیتر)
۱۲/۵	۰	۰/۰۴۲	۵
۲۵	۴	۰/۰۸	۱۵
۴۵	۸	۰/۱۰۵	۴۵
۹۰			

آزمایش‌های تحقیق حاضر، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گردید. مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه فلومی به طول ۳/۲، عرض ۰/۶ و ارتفاع ۰/۹ متر بود که از آب شرب شهری تا ارتفاع ۷۰ سانتیمتر پر می‌گردید. قبل از هر اجرای آزمایشگاهی از ساکن بودن آب پذیرنده اطمینان حاصل می‌شد. در شکل (۲) فلوم مورد استفاده در آزمایشات نشان داده شده است.

تخلیه‌کننده سطحی مورد مطالعه کانال مستطیلی با عرض کف ۶ سانتیمتر بود که در چهار زاویه همگرایی ۱۲/۵، ۲۵، ۴۵ و ۹۰ درجه و سه شیب متفاوت صفر، ۴



شکل ۳- تأثیر شیب کانال تخلیه بر تراژکتوری جریان جت (الف) همگرایی ۱۲/۵ درجه (ب) همگرایی ۹۰ درجه

بر اساس نتایج بدست آمده مشخص می‌شود که برای شیب ۸ درصد طولانی‌ترین مسیر حرکت جریان خروجی جت به وقوع می‌پیوندد، این موضوع به دلیل مومنتم و سرعت اولیه بیشتر می‌باشد. اما در شیب‌های صفر و ۴ درصد که بسیار به یکدیگر نزدیک هستند با وجود بیشتر بودن مومنتم اولیه در شیب ۴ درصد، تراژکتوری کوتاه‌تری حاصل می‌شود. به این دلیل که در شیب ۴ درصد، دو مومنتم در جهات  $X$  و  $Z$  وجود دارد حال آنکه در شیب صفر تمام مومنتم موجود در جهت  $X$  می‌باشد و لذا پیشروی افقی بیشتری ایجاد می‌شود. علاوه بر این در شیب صفر نسبت به شیب ۴ درصد، جریان خروجی جت در بخش آغازین حرکت درگیری کمتری با سیال پذیرنده دارد بنابراین پیشروی افقی بیشتری در حرکت آن مشاهده می‌گردد. در شکل (۴) تأثیر زاویه همگرایی بر تراژکتوری جریان جت برای دبی ۰/۱۰۵ لیتر بر ثانیه، غلظت ۴۵ گرم بر لیتر و شیب‌های ۴ و ۸ درصد نشان داده شده است.

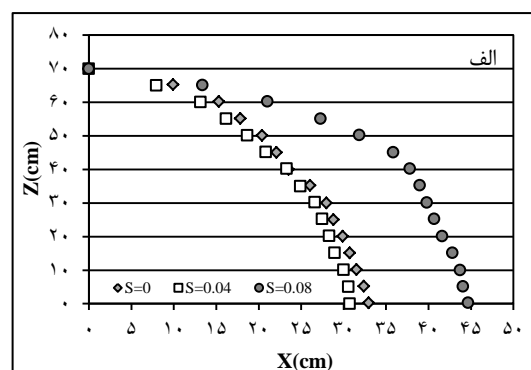
مطابق نتایج بدست آمده، کاهش زاویه همگرایی به دلیل افزایش مومنتم اولیه و سرعت خروج جریان جت موجب افزایش طول تراژکتوری جریان می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در زاویه‌ی همگرایی ۱۲/۵ درجه طول مسیر طی شده توسط جریان جت تا رسیدن به بستر طولانی‌تر می‌باشد که امکان ترفیق بیشتری را برای سیال جت قبل از رسیدن به بستر فراهم می‌آورد.

آزمایش‌ها با استفاده از خط‌کش‌های نصب شده بر روی کاغذهای شفاف ترانس‌پرانت؛ که با فواصل مشخصی بر دیواره‌های فلوم که از جنس پلکسی‌گلاس بودند، برداشت شد. مناسب‌ترین موقعیت این خط‌کش‌ها پس از اجرای چندین آزمایش تعیین گردید. از طرفی برای افزایش دقت برداشت‌ها، از یک سیستم مش‌بندی که به وضوح در فیلم‌های ثبت شده مشخص است، استفاده شد. فاصله نقاط شبکه مش از یکدیگر حداکثر ۲ سانتیمتر در نظر گرفته شده است.

### ۳. نتایج

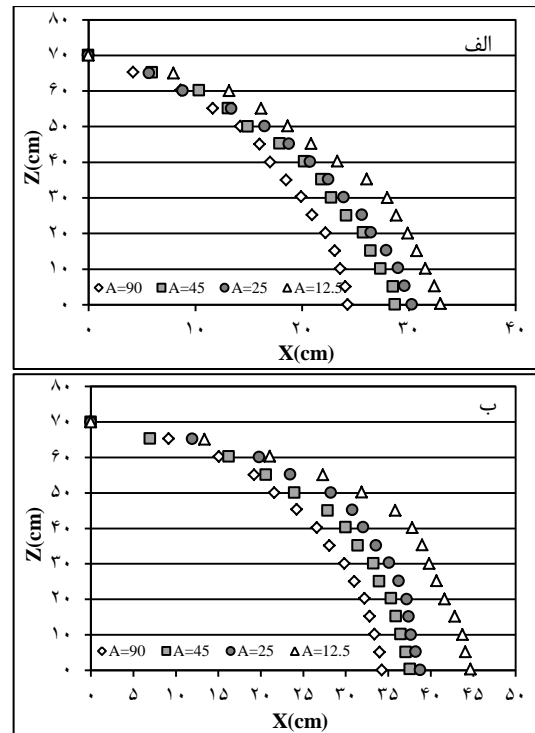
در تخلیه سطحی فاضلاب‌هایی با شناوری منفی، جریان خروجی ابتدا تحت تأثیر مومنتم اولیه بخشی از مسیر را در مجاورت سطح طی می‌کند، سپس تحت اثر برآیند دو نیروی شناوری و مومنتم منحنی پدیدار می‌شود که به آن تراژکتوری می‌گویند. این در حالی است که با غلبه نیروی شناوری، جریان به تدریج به سمت اعماق بیشتر محیط پذیرنده سقوط می‌کند. بیشترین میزان ترفیق زمانی رخ می‌دهد که جریان با طی مسیر طولانی‌تری به بستر می‌رسد. با توجه به اهمیت این موضوع، رفتار تراژکتوری تحت تأثیر پارامترهای مختلف مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

در شکل (۳) تأثیر شیب کانال تخلیه بر تراژکتوری جریان جت در شرایطی که غلظت ۴۵ گرم بر لیتر، دبی ۰/۱۰۵ لیتر بر ثانیه و زوایای همگرایی ۱۲/۵ و ۹۰ درجه می‌باشند نشان داده شده است. در این شکل  $X$  نمایش طولی و  $Z$  نمایش ارتفاعی از منحنی تراژکتوری می‌باشد.



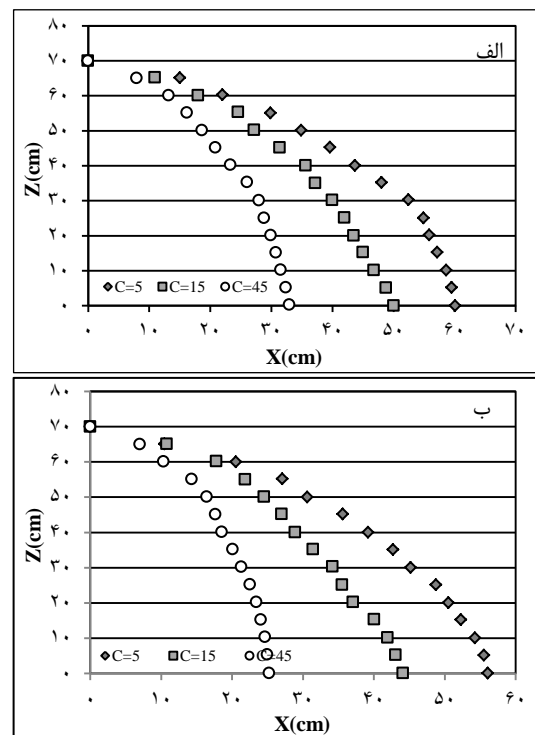
با توجه به نتایج ارائه شده، مشاهده می‌گردد که با افزایش غلظت سیال تخلیه‌شونده طول تراژکتوری جریان کاهش می‌یابد. افزایش اختلاف دانسیته میان سیال جت و سیال محیطی موجب افزایش مقدار نیروی شناوری می‌گردد. نیروی شناوری منفی حاصل و سنگینی بیشتر سیال جت موجب می‌گردد که سیال جت با طی مسیر کوتاه‌تری به بستر برسد.

با ورود سیال جت به محیط پذیرنده، اختلاف سرعت بین سیال جت و سیال پذیرنده موجب ایجاد تنش برشی می‌شود که به دنبال خود آشفتگی را ایجاد می‌کند. آشفتگی حاصل نتیجه انتقال مومنتم جت و اختلاط سیال جت در سیال پذیرنده است که موجب ترقیق سیال جت خواهد شد (Dunn et al, 1975). هر میزان که سرعت پیشروی جریان تخلیه‌شونده بیشتر باشد، اختلاف سرعت بین سیال جت و سیال پذیرنده بیشتر می‌شود. همچنین آشفتگی و اختلاط و در نتیجه رقیق‌شدگی جریان جت بیشتر خواهد شد. اهمیت سرعت پیشروی جریان جت در محیط پذیرنده، بررسی این پارامتر و تأثیر متغیرهای مختلف روی آن را ضروری می‌سازد. در این مطالعه سرعت پیشروی جریان جت در عمق محیط پذیرنده از نسبت طول مسیر طی شده توسط جریان به اختلاف زمان مربوطه محاسبه گردید. در شکل (۶) روند تغییرات سرعت نفوذ سیال جت در عمق محیط پذیرنده و تأثیر شیب بر سرعت پیشروی در شرایطی که دبی  $0/042$  لیتر بر ثانیه و زاویه همگرایی  $12/5$  درجه و دبی  $0/08$  لیتر بر ثانیه و زاویه همگرایی  $25$  درجه می‌باشد نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌گردد با ورود سیال جت به محیط پذیرنده ساکن، اختلاف سرعت بین سیال جت و سیال پذیرنده موجب کاهش قابل توجه در مقدار سرعت پیشروی جت می‌شود، پس از کاهش اثر مومنتم اولیه جت با غلبه نیروی شناوری مجدداً سرعت پیشروی جت افزایش می‌یابد، به مرور زمان به علت اختلاط سیال جت با سیال پذیرنده و رقیق‌تر شدن آن، سرعت پیشروی کاهش می‌یابد. علاوه بر آن در شکل (۶) تأثیر شیب کانال تخلیه نیز بر

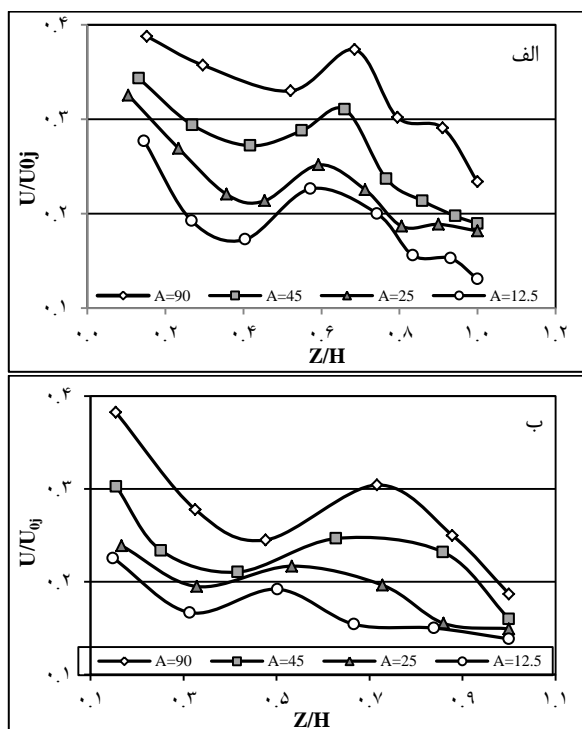


شکل ۴- تأثیر زاویه همگرایی کانال تخلیه بر تراژکتوری جریان جت (الف) شیب ۴ درصد (ب) شیب ۸ درصد

شکل (۵) نیز تراژکتوری جریان را در دبی ثابت  $0/105$  لیتر بر ثانیه، شیب ۴ درصد و زوایای همگرایی  $12/5$  و  $90$  درجه و از منظر تغییرات غلظت سیال جت نشان می‌دهد.



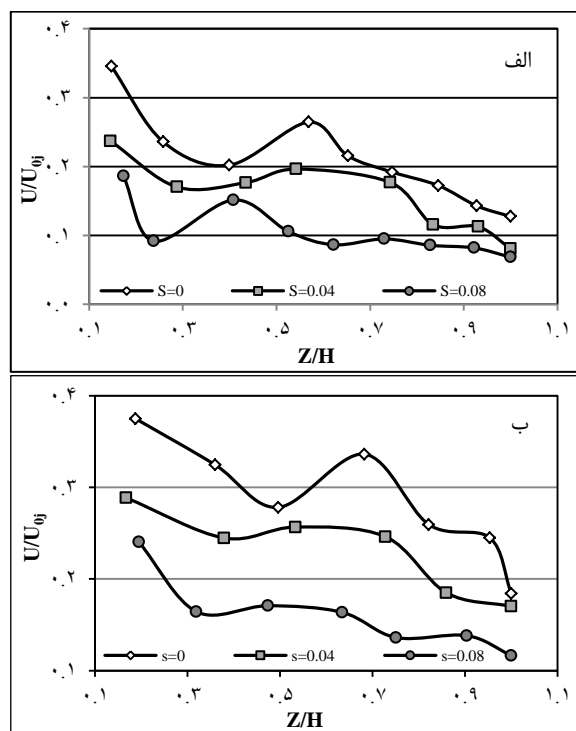
شکل ۵- تأثیر غلظت سیال جت بر تراژکتوری جریان جت (الف) همگرایی  $12/5$  درجه (ب) همگرایی  $90$  درجه



شکل ۷- روند تغییرات سرعت پیشروی جریان در عمق محیط پذیرنده و تأثیر زاویه همگرایی کانال تخلیه بر آن (الف) دبی ۰/۰۴۲ لیتر بر ثانیه و شیب ۴ درصد (ب) دبی ۰/۰۸ لیتر بر ثانیه و شیب ۴ درصد

مطابق نتایج بدست آمده کاهش زاویه همگرایی کانال تخلیه‌کننده نیز موجب افزایش سرعت تخلیه سیال جت، افزایش ترقیق و کاهش سرعت پیشروی آن در محیط پذیرنده می‌گردد. همان طور که مشاهده می‌گردد روند تغییرات سرعت پیشروی سیال جت نیز مستقل از مقدار زاویه همگرایی کانال تخلیه می‌باشد. کاهش زاویه همگرایی کانال تخلیه مانند افزایش شیب طولی کانال موجب می‌شود که اثر مومنتم اولیه در عمق کمتری از بین رود و نیروی شناوری سریع‌تر بر شرایط حاکم شود. در جدول (۲) مجموعه داده‌های مربوط به تراژکتوری چندین آزمایش در شرایطی که غلظت ۴۵ گرم بر لیتر و دبی ۰/۰۱۵ لیتر بر ثانیه می‌باشد ارائه گردیده است. همچنین در جدول (۳) داده‌های مربوط به سرعت پیشروی جریان در شرایطی که غلظت ۴۵ گرم بر لیتر و دبی دارای دو مقدار ۰/۰۴۲ و ۰/۰۸ لیتر بر ثانیه می‌باشد، آورده شده است.

سرعت پیشروی جت نشان داده شده است. افزایش شیب کانال تخلیه موجب افزایش مومنتم اولیه و سرعت خروج سیال جت می‌شود. از طرفی با افزایش مومنتم اولیه و سرعت خروج به علت افزایش اختلاف سرعت، سیال جت در محیط پذیرنده ترقیق یافته و سرعت پیشروی آن کاهش می‌یابد. علاوه بر آن به نظر می‌رسد روند تغییرات سرعت پیشروی جریان جت مستقل از مقدار شیب کانال تخلیه می‌باشد. قابل توجه است که با افزایش شیب کانال تخلیه اثر مومنتم اولیه بر سرعت پیشروی سیال جت در عمق کمتری نسبت به سایر شیب‌ها از بین می‌رود و اثر شناوری سریع‌تر بر شرایط حاکم می‌شود. این موضوع به دلیل بیشتر بودن اختلاف سرعت بین سیال جت و سیال محیطی ساکن می‌باشد.



شکل ۶- روند تغییرات سرعت پیشروی جریان در عمق محیط پذیرنده و تأثیر شیب کانال تخلیه بر آن (الف) دبی ۰/۰۲۴ لیتر بر ثانیه و زاویه همگرایی ۱۲/۵ درجه (ب) دبی ۰/۰۸ لیتر بر ثانیه و زاویه همگرایی ۲۵ درجه

در شکل (۷) تأثیر زاویه همگرایی کانال تخلیه بر سرعت پیشروی سیال جت در شرایطی که دبی‌ها ۰/۰۴۲ لیتر بر ثانیه و ۰/۰۸ لیتر بر ثانیه و شیب برای هر دو ۴ درصد می‌باشد آورده شده است.

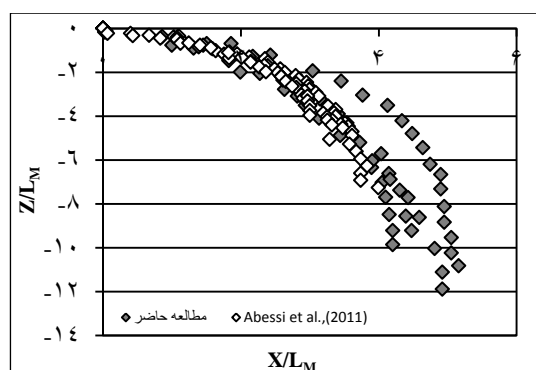


جدول ۲- نتایج مربوط به تراژکتوری جریان در شیب‌ها و زوایای همگرایی مختلف

همگرایی=۱۲/۵		همگرایی=۱۲/۵		همگرایی=۱۲/۵		همگرایی=۹۰		همگرایی=۴۵		همگرایی=۲۵		همگرایی=۱۲/۵	
شیب=۰		شیب=۰/۰۴		شیب=۰/۰۸		شیب=۰/۰۸		شیب=۰/۰۸		شیب=۰/۰۸		شیب=۰/۰۸	
X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z
۰	۷۰	۰	۷۰	۰	۷۰	۰	۷۰	۰	۷۰	۰	۷۰	۰	۷۰
۹/۹۲	۶۵/۲۹	۷/۹۵	۶۵/۰۲	۱۳/۳۹	۶۵/۱۴	۹/۱۶	۶۵/۲۵	۶/۹۸	۶۵/۲۵	۱۱/۹۵	۶۵/۱۵	۱۳/۳۹	۶۵/۱۴
۱۵/۳۱	۶۰/۲۳	۱۳/۱۸	۶۰/۰۷	۲۱/۰۶	۶۰/۲۷	۱۵/۰۸	۶۰/۱۹	۱۶/۲۴	۶۰/۱۹	۱۹/۸۱	۶۰/۰۲	۲۱/۰۶	۶۰/۲۷
۱۷/۸۵	۵۵/۱۶	۱۶/۱۸	۵۵/۱۳	۲۷/۳۲	۵۵/۰۷	۱۹/۲۲	۵۵/۱۳	۲۰/۶۱	۵۵/۱۳	۲۳/۴۹	۵۵/۱۴	۲۷/۳۲	۵۵/۰۷
۲۰/۳۹	۵۰/۱۳	۱۸/۶۷	۵۰/۱۵	۳۱/۸۷	۵۰/۲۱	۲۱/۵۹	۵۰/۰۶	۲۳/۹۶	۵۰/۰۶	۲۸/۲۷	۵۰/۰۱	۳۱/۸۷	۵۰/۲۱
۲۲/۱۰	۴۵/۱۰	۲۰/۸۶	۴۵/۲۰	۳۵/۸۵	۴۵/۰۵	۲۴/۲۴	۴۵/۳۱	۲۷/۸۸	۴۵/۰۰	۳۰/۷۹	۴۵/۱۷	۳۵/۸۵	۴۵/۰۵
۲۳/۵۲	۴۰/۰۳	۲۳/۳۲	۴۰/۲۵	۳۷/۸۵	۴۰/۱۸	۲۶/۶۰	۴۰/۲۲	۳۰/۰۰	۴۰/۲۵	۳۲/۰۶	۴۰/۲۹	۳۷/۸۵	۴۰/۱۸
۲۶/۰۵	۳۵/۲۷	۲۴/۹۲	۳۵/۰۰	۳۹/۰۰	۳۵/۲۸	۲۸/۰۹	۳۵/۱۶	۳۱/۴۳	۳۵/۱۶	۳۳/۵۸	۳۵/۱۶	۳۹/۰۰	۳۵/۲۸
۲۷/۹۸	۳۰/۰۴	۲۶/۶۲	۳۰/۲۶	۳۹/۸۴	۳۰/۱۲	۲۹/۸۴	۳۰/۰۹	۳۳/۲۷	۳۰/۰۹	۳۵/۱۳	۳۰/۳۱	۳۹/۸۴	۳۰/۱۲
۲۸/۸۲	۲۵/۰۹	۲۷/۴۹	۲۵/۲۳	۴۰/۷۱	۲۵/۲۵	۳۱/۰۴	۲۵/۰۳	۳۳/۹۷	۲۵/۰۳	۳۶/۲۵	۲۵/۱۵	۴۰/۷۱	۲۵/۲۵
۲۹/۹۰	۲۰/۱۱	۲۸/۳۳	۲۰/۱۶	۴۱/۶۵	۲۰/۰۹	۳۲/۲۳	۲۰/۲۸	۳۵/۳۳	۲۰/۲۸	۳۷/۱۸	۲۰/۰۲	۴۱/۶۵	۲۰/۰۹
۳۰/۷۴	۱۵/۱۶	۲۸/۹۹	۱۵/۱۳	۴۲/۸۴	۱۵/۱۹	۳۲/۸۲	۱۵/۲۲	۳۵/۹۱	۱۵/۲۲	۳۷/۴۴	۱۵/۱۴	۴۲/۸۴	۱۵/۱۹
۳۱/۵۵	۱۰/۲۱	۳۰/۰۳	۱۰/۱۰	۴۳/۷۶	۱۰/۰۳	۳۳/۴۰	۱۰/۱۲	۳۶/۴۸	۱۰/۱۶	۳۷/۷۰	۱۰/۰۱	۴۳/۷۶	۱۰/۰۳
۳۲/۳۹	۵/۲۳	۳۰/۵۹	۵/۰۳	۴۴/۱۱	۵/۱۶	۳۳/۹۸	۵/۰۶	۳۷/۰۹	۵/۱۰	۳۸/۲۵	۵/۱۶	۴۴/۱۱	۵/۱۶

جدول ۳- نتایج مربوط به سرعت پیشروی جریان در شیب‌ها و زوایای همگرایی مختلف

شیب=۰		شیب=۰/۰۴		شیب=۰/۰۸		همگرایی=۹۰		همگرایی=۴۵		همگرایی=۲۵		همگرایی=۱۲/۵	
Z/H	U/U <sub>0j</sub>	Z/H	U/U <sub>0j</sub>	Z/H	U/U <sub>0j</sub>	Z/H	U/U <sub>0j</sub>	Z/H	U/U <sub>0j</sub>	Z/H	U/U <sub>0j</sub>	Z/H	U/U <sub>0j</sub>
۰/۱۹	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۲۴	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۳۸	۰/۱۶	۰/۳۰	۰/۱۵	۰/۲۶	۰/۱۵	۰/۲۳
۰/۳۶	۰/۲۷	۰/۳۸	۰/۱۹	۰/۳۲	۰/۱۱	۰/۳۳	۰/۲۸	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۳۳	۰/۱۹	۰/۳۱	۰/۱۷
۰/۵	۰/۲۳	۰/۵۳	۰/۲۱	۰/۴۷	۰/۱۲	۰/۴۸	۰/۲۵	۰/۴۲	۰/۲۱	۰/۵۳	۰/۲۲	۰/۵۰	۰/۱۹
۰/۶۸	۰/۲۹	۰/۷۳	۰/۲۰	۰/۶۳	۰/۱۱	۰/۷۲	۰/۳۰	۰/۶۳	۰/۲۵	۰/۷۳	۰/۲۰	۰/۶۷	۰/۱۵
۰/۸۲	۰/۲۱	۰/۸۶	۰/۱۴	۰/۷۵	۰/۰۹	۰/۸۸	۰/۲۵	۰/۸۶	۰/۲۳	۰/۸۶	۰/۱۶	۰/۸۴	۰/۱۵
۰/۹۵	۰/۱۹	۱/۰۰	۰/۱۲	۰/۹۰	۰/۰۹	۱/۰۰	۰/۱۹	۱/۰۰	۰/۱۵	۱/۰۰	۰/۱۴	۱/۰۰	۰/۱۴
۱/۰۰	۰/۱۳			۱/۰۰	۰/۰۷								



شکل ۸- مقایسه نتایج تراژکتوری مطالعه حاضر و Abessi et al., (2011)

مطابق مطالب ارائه شده، روند تغییر سرعت پیشروی سیال جت برای پارامترهای هندسی، مشابه می‌باشد و مقدار آن کاملاً به پارامترهای هندسی و هیدرولیکی وابسته می‌باشد. در این مطالعه؛ با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها، با هدف ایجاد رابطه‌ای میان  $\frac{U}{U_{0j}}$  به عنوان نسبت سرعت پیشروی جریان جت به سرعت تخلیه جریان و پارامترهای وابسته به آن اقدام به تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار spss گردید. بنابراین مدل‌های آماری مختلف به صورت آزمون و خطا مورد بررسی قرار گرفت و از میان آنها مدل غیرخطی ارائه شده به عنوان بهترین مدل مشخص گردید. مدل بدست آمده در رابطه (۵) آورده شده است.

$$\frac{U}{U_{0j}} = a \ln(Fr) + b \ln(Fr_d) + c(S)^2 + d(S) + e\left(\frac{Z}{H}\right) + f(A)^2 + g(A) \quad (5)$$

در جدول (۴) بهترین ضرایب رابطه بدست آمده، ارائه شده است. رابطه حاصل مقدار ریشه میانگین مجموع مربعات خطا را ۰/۰۳۴ برآورد نمود.

جدول ۴- ضرایب مربوط به مدل سرعت پیشروی جریان جت

پارامتر	مقدار تخمینی
a	-۰/۴۸۸
b	۰/۳۷۱
c	-۶/۳۴۷
d	۰/۵۵۵
e	-۰/۱۶۲
f	۰/۰۴۸
g	-۰/۰۶۶
h	-۰/۲۸۷

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

همان طور که پیشتر نیز عنوان شد مسیر طی شده توسط سیال جت دارای تأثیر قابل توجهی بر ترقیق سیال قبل از رسیدن به بستر می‌باشد. بنابراین در تحقیق حاضر تراژکتوری جریان جت سطحی تخلیه شده تحت تأثیر دو پارامتر هندسی شیب طولی و زاویه همگرایی کانال تخلیه بررسی گردید و مطابق نتایج بدست آمده، مشاهده گردید که افزایش شیب طولی و کاهش زاویه همگرایی در بهبود شرایط ترقیق بسیار مؤثر می‌باشند. به منظور بررسی تأثیر همگرایی بر تراژکتوری جریان، نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر با نتایج مطالعه Abessi et al., (2011) مقایسه گردید. هر دو تحقیق مربوط به شرایط تخلیه سطحی با شناوری منفی از کانال‌های تخلیه‌کننده صفحه‌ای در محیط پذیرنده عمیق می‌باشند و کانال تخلیه‌کننده مطالعه حاضر دارای همگرایی می‌باشد. در شکل (۸) پس از محاسبه  $L_M$  که توسط Abessi et al., (2011) مقیاس طولی جت به پلوم معرفی شد و نرمال کردن  $X$  (مسافت طی شده از محل خروجی کانال تخلیه) و  $Z$  (ارتفاع نفوذ سیال جت) نسبت به این پارامتر تأثیر همگرایی در کانال‌های تخلیه‌کننده بر تراژکتوری جریان نشان داده شده است.

$$L_M = \frac{(U_0 Q_0)^{3/4}}{(\rho_a g Q_0)^{1/2}} \quad (4)$$

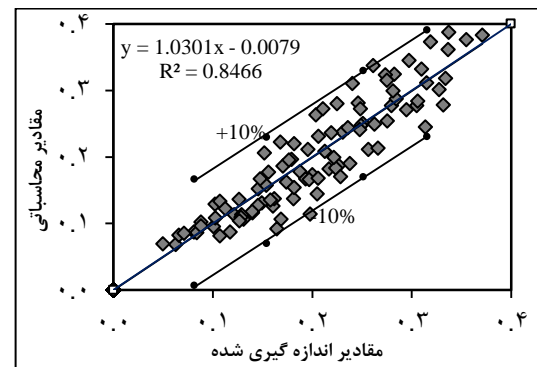
در رابطه‌ی (۴)،  $U_0$ : سرعت جریان خروجی از کانال تخلیه‌کننده،  $Q_0$ : دبی جریان خروجی از کانال تخلیه‌کننده،  $g$ : شتاب ثقل،  $\rho_a$ : جرم حجمی سیال پذیرنده و  $\Delta\rho$ : اختلاف دانسیته سیال جت و سیال پذیرنده می‌باشد. همان طور که در شکل (۸) مشاهده می‌گردد الگوی حرکت جریان در کانال‌های تخلیه‌کننده همگرا و کانال‌های ساده کاملاً همسان هستند و در کانال‌های همگرا به نظر می‌رسد به علت تأثیر زاویه همگرایی بر افزایش مومنتم اولیه و سرعت خروج سیال جت، پیشروی نسبتاً بیشتری صورت می‌گیرد.

تراژکتوری جریان مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده گردید که افزایش شیب و کاهش زاویه همگرایی کانال تخلیه کننده موجب افزایش طول تراژکتوری جریان می-شوند. لازم به ذکر است که مقدار شیب باید از یک مقدار حداقل بیشتر باشد چرا که در شیب نزدیک به صفر تراژکتوری کوتاه تری شکل می گیرد. علاوه بر آن، افزایش اختلاف دانسیته سیال جت و سیال پذیرنده نیز موجب کوتاه تر شدن تراژکتوری می گردد. همچنین در بررسی مقایسه ای با مسیر حرکت جریان در کانال های ساده، الگوی حرکت جریان کاملاً همسان بوده و پیشروی نسبی بیشتری به واسطه همگرایی کانال تخلیه کننده مشاهده گردید. سرعت پیشروی سیال جت در محیط پذیرنده نیز با استفاده از روندیابی تصاویر از روی خط مرکزی جریان در شرایط مختلف محاسبه گردید. روند تغییر سرعت پیشروی سیال جت در عمق و تأثیر پارامترهای هندسی بر سرعت پیشروی سیال جت مورد تحلیل قرار گرفتند. مشاهده گردید که روند سرعت پیشروی سیال جت برای شیب طولی و زاویه همگرایی کانال مشابه می باشد. در نهایت به منظور نشان دادن ارتباط سرعت پیشروی سیال جت و پارامترهای وابسته به آن با استفاده از نرم افزار آماری spss، رابطه ای با ضریب رگرسیون برابر با ۰/۸۱ ارائه گردید.

#### منابع

- Ahadiyan, J. and Musavi-Jahromi, H. 2009. Evaluation of Effective Parameters on Buoyant Jets Development in the Stagnant Ambient Fluid. *J. Water and Soil* 23 (4): 179-192.
- Abessi, O., Saeedi, M., Hajizadeh-Zaker, N. and Kheirkhah, H. 2010. Flow Characterization Dilution in Surface Discharge of Negatively Buoyant Flow in Stagnant and Non-Stratified Water Bodies. *J. Water and Wastewater* 4: 71-82.
- Abessi, O., Saeedi, M., Hajizadeh-Zaker, N. and Kheirkhah-Gildeh, H. 2011. Waste Field Characteristics, Ultimate Mixing and Dilution in

مدل آماری ارائه شده برای ۸۰ درصد داده ها استخراج گردید و سایر داده ها جهت برآورد دقت رابطه، مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از رابطه آماری بدست آمده برای آزمایش های مختلف، مقادیر نسبت سرعت پیشروی جت به سرعت تخلیه سیال جت محاسبه گردید. در شکل (۹) مقادیر محاسباتی برای  $\frac{U}{U_{0j}}$  در مقابل مقادیر اندازه گیری شده نمایش داده شده است. در این حالت ضریب رگرسیون، میزان دقت مدل آماری را نشان می دهد.



شکل ۹- مقادیر محاسباتی در مقابل مقادیر اندازه گیری شده برای سرعت پیشروی جت

#### نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، با شبیه سازی فرآیند تخلیه در آزمایشگاه و روندیابی تصاویر بدست آمده، تراژکتوری و سرعت پیشروی جریان در تخلیه سطحی فاضلاب های سنگین از کانال های مستطیلی همگرا و شیب دار در محیط های ساکن ارزیابی گردید. تأثیر شیب کانال تخلیه و زاویه همگرایی آن و نیز غلظت سیال جت بر

Surface Discharge of Dense Jets into Stagnant Water Bodies. *J. Water and Wastewater* 1: 2-14.

Ahadiyan, J. and Musavi-Jahromi, H. 2009. Effects of Jet Hydraulic Properties on Geometry of Trajectory in Circular Buoyant Jets in the static Ambient Flow. *J. Applied Sci* 9 (21): 3843-3849, 2009.

Bashitialshaaer, R., Larson, M. and Persson, K.M. 2012. An Experimental Investigation on Inclined Negatively Buoyant Jets. *J. Water* 2012, 4, 720-738.

Bleninger, T. and Jirka, G.H. 2008. Modeling and Environmentally Sound Management of

- Brine Discharges from Desalination Plants. *Desalination*, Vol. 221, PP 585-597.
- Bleninger, T., Neipelt, A. and Jirka, G.H. 2009. Desalination Plant Discharge Calculator. Paper BD 180 EDS Congress. May 17-20, Baden-Baden, Germany.
- Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F. and Nicosia, S. 2005. Bench-Scale Investigation of Inclined Dense Jets. *J. Hydraul. Eng, ASCE* 131 (11), 1017-1022.
- Danoun, R. 2007. Desalination Plants: Potential Impacts of Brine Discharge on Marine Life. The Ocean Technology Group, University of Sydney, Australia.
- Dunn, W. E., Policastro, A. J. and Paddock, R. A. 1975. Surface Thermal Plumes: Evaluation of Mathematical Models for the Near and Complete Field. Argonne National Laboratory, Center for Environmental Studies, 1975, 397PP.
- Ferrari, S. and Querzoli, G. 2010. Mixing and Re-Entrainment in a Negatively Buoyant Jet, *J. Hydraul. Res*, Vol. 48, No. 5 (2010), PP. 632-640.
- Gustafsson, B. and Larsen, I. 1970. Jet Diffusion in Stagnant Stratified Waters. *Water Research Pergamon Press* Vol. 4, PP 353-361.
- Jones, G., Nash, D., Doneker, L. and Jirka, H. 2007. Buoyant Surface Discharge into Water Bodies. I: Flow Classification and Prediction Methodology, *J. Hydraul. Eng, ASCE*, 133(9), 1010-1020.
- Kassem, A., Imran, J. and Khan, J.A. 2003. Three-Dimensional Modeling of Negatively Buoyant Flow in Diverging Channels, *J. Hydraul. Eng*, 2003. 129: 936-947.
- Kheirkhah, H., Mohammadian, A., Nistor, I. and Qiblawey, H. 2014. Numerical Modeling of Brine Discharges Using Open FOAM , Proceeding of the International Conference on New Trends in Transport Phenomena, Canada, 2014, Paper No. 51.
- Nashat , A. A., Abozeid, G., Mohamed, A. A. and Darweesh, M.S. 2010. Hydraulics of Surface Polluted Water-Jet in Open Channel Flow. *J. Engineer. Sci, Assiut University*, Vol. 38, No. 1, PP. 71-84, January 2010.
- Palomar, P., Lara, L. J., Rodrigo, M. and Alvarez, A. 2012. Near Field Brine Discharge Modeling Part 1: Analysis of Commercial Tools. *Desalination* Vol. 290, PP 14-27.
- Pincine, A. B. and List, E. J. 1973. Disposal of Brine into an Estuary. *J. Water Pollutant. Control Fed*, 45, 2344-2335.
- Roberts, P. J. W., Ferrier, A. and Daviero, G. 1997. Mixing in Inclined Dense Jets. *J. Hydraul. Eng, ASCE*, 123(8), 693-699.
- Shahrabani, D. M. and Ditmars, J. D. 1976. Negatively Buoyant Slot Jets, *Coastal Engineering* 1976.
- Voustrou, M. K., Yannopoulos, P. C. and Christodoulou, G.C., 2015. Experiments on Plane Negatively Buoyant Jets. E-proceeding of the 36<sup>th</sup> IAHR World Congress 28 June-3 July, Hague, Netherlands.
- Zeitoun, M. A., Raid, R. O., Mctillenny, W. F., and Mitchell, T. M. 1972. Model Studies of Outfall Systems for Desalination Plants. Part 3: Numerical Simulation and Design Considerations. *Res and Devel. Progress Rep.* No. 804, Office of Saline Water, U. S. Dept. of Interior, Washington, D. C.

## Experimental Investigation of the Advance Velocity in the convergent Rectangular Surface Jet Stream with and without Longitudinal Slope

Tooba Heidari<sup>1</sup>, Nima Shahni Karamzadeh<sup>1\*</sup>, Javad Ahadiyan<sup>2</sup>

1- Department of Marine Structures, Faculty of Sea Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology

2- Department of Water Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

### Abstract

In this study, results of experiments about the trajectory and the advance of inclined and convergent rectangular surface jet into stagnant ambient have been presented. In order to discharge process simulation was used a flume with 3.2 m length, 0.6 m width, and 0.9 m height and a rectangular channel with 6 cm width. Discharge channel was designed in the four angle of convergence 12.5, 25, 45 and 90 degree. This channel injected the jet stream to form of tangent to the surface of ambient and in three different slopes 0, 4 and 8 percent. Receiving fluid had been prepared from urban water. As well as the jet fluid had been prepared from the salt liquidation in water and in three concentrations 5, 15 and 45 gr/l. After running the experiments and using of images routing process were analyzed the data. In this regard, hydraulic and geometric parameters on the trajectory and the advance velocity of jet were investigated. According to the results, increase the slope and decrease the angle of convergence causes increase in length of trajectory and decrease in the advance velocity of jet. Reduce the densimetric Froude number causes decrease in length of trajectory. Under the effect of buoyant force, by changing the slope from 0 to 8 percent and convergence angle from 90 to 12.5 degree, the ratio of advance velocity of jet stream to average velocity of that is reduced to 60 percent. Also, in order to investigate of influence of convergence on the movement path of flow, by comparison of trajectory in convergent channel and simple channel, more relative advance was seen in convergent channel.

**Keywords:** trajectory, surface jet, advance velocity, densimetric Froude number, convergence

Fig. 1 (a) Jet flow trajectory in surface discharge and related parameters (b) discharge channels of jet fluid

Fig. 2 The experimental model used for the tests

Fig. 3 The effect of the slope of discharge channel on jet flow trajectory. Convergence angle of (a) 12.5° (b) 90°

Fig. 4 The effect of the convergence angle of discharge channel on jet flow trajectory. Slope of (a) 4 percent (b) 8 percent

Fig. 5 The effect of jet fluid concentration on jet flow trajectory. Convergence angle of (a) 12.5° (b) 90°

Fig. 6 Change of the advance velocity of jet flow in the depth of the ambient and the effect of slope of discharge channel on it (a)

Flow rate of 0.042 lit/sec, convergence angle of 12.5° (b) Flow rate of 0.08 lit/sec, convergence angle of 25°

Fig. 7 Change of the advance velocity of jet flow in the depth of the ambient and the effect of convergence angle on it

(a) Flow rate of 0.042 lit/sec, slope of 4 percent (b) Flow rate of 0.08 lit/sec, slope of 4 percent

Fig. 8 Comparison of the results of trajectory for this study and the study of Abessi et al., (2011)

Fig. 9 Computational values versus measured values for advance velocity of jet flow

Table 1 Variables of this research

Table 2 The results of flow trajectory in different slopes and convergence angles

Table 3 The results of advance velocity of flow in different slopes and convergence angles

Table 4 The coefficients of the jet flow advance velocity model

\* Corresponding Author's E-mail: n.karamzadeh@kmsu.ac.ir