

بررسی اثرات سرعت و زاویه بر رفتار تخلیه پساب شور به وسیله جت مایل در محیط ساکن و لایه‌بندی نشده

حسین اردلان^۱، فریدون وفایی^{۲*}، محمد عزیزی^۳، داود گوهری کامل^۴، آزاده کلاته عربی^۵

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، پست الکترونیکی: hardalans@gmail.com

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران-محیط زیست، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، پست الکترونیکی: fvfafai@kntu.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد مهندسی عمران-محیط زیست، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، پست الکترونیکی: mohammadm1370@gmail.com

۴- کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، پست الکترونیکی: navid_ng2000@yahoo.com

۵- کارشناسی ارشد مهندسی عمران-محیط زیست، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، پست الکترونیکی: azadeh_karabi@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۲۸

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۶/۷/۱۷

چکیده

در این مطالعه مجموعه‌ای از مطالعات آزمایشگاهی به منظور یافتن زاویه و سرعت بهینه در تخلیه پساب شور به محیط دریا انجام گرفت. بدین منظور سری آزمایش‌های مرسوم روی جت‌های سنگین و مایل با زوایای 30° ، 45° و 60° و سرعت‌های مختلف تخلیه انجام گرفت. مشخصات اصلی جریان، شامل فاصله افقی نقطه بازگشت از نازل، عرض جریان جت در نقطه حداکثر ارتفاع خط مرکزی، پروفیل خودهمسان توزیع غلظت و میزان ترقیق پساب، به وسیله پردازش تصویر حاصل از ردیاب رنگی موجود در پساب شور تعیین شد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داد که تغییرات سرعت خروج پساب، بر الگوی پروفیل خودهمسان توزیع غلظت در بیشترین ارتفاع خط مرکزی تاثیر ندارد و این پروفیل مستقل از سرعت جریان است. اما با افزایش سرعت تخلیه، طول مسیر افزایش یافته و پخشیدگی و ترقیق نهایی افزایش می‌یابد. تغییرات زاویه تخلیه پساب بر الگوی پروفیل خودهمسان توزیع غلظت در بیشترین ارتفاع خط مرکزی و همچنین افزایش عرض پلوم جریان و ترقیق نهایی تاثیر می‌گذارد و در نتیجه در میان سه زاویه مورد بررسی، بیشترین ترقیق در زاویه 60° اتفاق می‌افتد. کلمات کلیدی: آب‌شیرین‌کن، پساب شور، جت منفی، ترقیق، تخلیه کننده.

۱. مقدمه

شیرین‌سازی آب دریا شده است. پساب شوری که از فعالیت واحدهای آب‌شیرین‌کن حاصل می‌شود معمولاً به وسیله پخش‌کننده‌های سطحی و مایل تک مجرای و چند مجرای مستقر در نزدیکی بستر دریا به پیکره آبی دریا بازمی‌گردد (Abessi and Roberts, 2015). با توجه به شوری بیشتر این

امروزه افزایش روزافزون جمعیت، نیاز به استفاده از آب برای مصارف شهری، کشاورزی و صنعتی را افزایش داده است. این نیاز در کشورهای ساحلی موجب توسعه استفاده از سیستم‌های

همکاران (۲۰۱۳) و همچنین Abessi و Roberts (۲۰۱۵) مقدار ترقیق نهایی را در زوایای وسیعی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده از تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که افزایش زاویه تخلیه موجب افزایش طول جت می‌گردد و لذا می‌تواند ترقیق بیشتری را به وجود آورد. از طرفی افزایش زاویه تخلیه پساب موجب افزایش ارتفاع جت شده و با قرار داشتن بیشتر تخلیه‌کننده‌ها در مناطق کم عمق ساحلی، این امر می‌تواند مکانیزم ترقیق پساب را دچار مشکل کند (Abessi and Roberts, 2016). هرکدام از زوایای 30° ، 45° و 60° عمدتاً در تحقیقات گذشته مورد توجه قرار گرفته و بیشترین آزمایش‌ها برای بررسی عملکرد تخلیه‌کننده‌ها در این زوایا انجام شده است. ارائه مشخصات هندسی و اختلاطی جت‌های شناور منفی برای ترکیبی از زوایا که می‌توانند در مناطق ساحلی بکار گرفته شوند کمتر در تحقیقات گذشته انجام شده است. الگوی پروفیل خود همسان غلظت جریان از مهمترین شناسه‌های مورد استفاده برای بررسی عملکرد مدل‌های انتگرالی و عددی می‌باشد. از این رو در این مطالعه سعی شده است در راستای تکمیل مطالعات گذشته تأثیر توأمان تغییرات زاویه و سرعت روی جریان و رفتار هندسی و اختلاطی پساب شور و به خصوص پروفیل خود همسان غلظت مشخص گردد.

۲. مواد و روش‌ها

جریان سیال با خروج از تخلیه‌کننده، تحت دو ناحیه مجزا در داخل محیط پذیرنده پیشروی می‌نماید. به محض خروج جریان، آشفتگی ایجاد شده بر اثر اختلاف سرعت در مرزهای جریان با طی بخشی از مسیر به تدریج خود را به مرکز پلوم رسانده و کل پیکره آنرا در برمی‌گیرد. این ناحیه که مرحله اول حرکت جریان در محیط تلقی می‌گردد تحت عنوان ناحیه شکل‌گیری جریان^۱ شناخته می‌شود. طی این محدوده جت خروجی دارای پروفیل سرعت و غلظت مشخصی نمی‌باشد. اما در انتهای این ناحیه به واسطه پیشروی آشفتگی به سمت مرکز پلوم به تدریج یک پروفیل غلظت مشخص در عرض جریان شکل می‌گیرد. این پروفیل در واقع میانگین نوسانات شکل گرفته در عرض جریان است. با رسیدن کامل آشفتگی از لبه سیال به مرکز جریان، ناحیه

پساب نسبت به آب دریا، رفتار شناوری آن منفی بوده و با حرکت به سمت بستر دریا در لایه زیرین ساحل تجمع پیدا می‌کند (Abessi et al., 2012; Papakonstantis et al., 2011). لذا مقدار ترقیق نهایی پساب شور تخلیه شده از لحاظ زیست‌محیطی برای حیات جانداران و گیاهان بستر دریا بسیار مهم است (Jirka, 2008).

تحقیق انجام شده توسط Zeitoun و همکاران (۱۹۷۰)، از قدیمی‌ترین مطالعات روی جت‌های تک مجرای مایل در محیط آرام به شمار می‌رود که در آن زاویه تخلیه 60° نسبت به افق به عنوان زاویه‌ای با بیشترین میزان ترقیق در نقطه بازگشت پیشنهاد شده است. Holly و Grace (۱۹۷۲) و همچنین Inoue و Su (۱۹۸۳) از محققینی بودند که رفتار کلی جریان‌های با شناوری منفی خروجی از تخلیه‌کننده‌های مستغرق را مورد بررسی قرار دادند. Lane و همکاران (۱۹۹۳) الگوی توزیع غلظت را در مقاطع جریان به دست آوردند. Roberts و همکاران (۱۹۹۷) سری آزمایش‌های وسیعی را روی تأثیر سرعت جانبی محیط بر پیشینه صعود و ترقیق و همچنین مطالعاتی در جهت تعیین مقدار ترقیق در انتهای ناحیه اختلاط انجام دادند. Cipollina و همکاران (۲۰۰۵) مشخصات هندسی تخلیه پساب شور در یک مدل آزمایشگاهی را به وسیله ردیاب رنگی و میانگین‌گیری تصاویر بررسی کردند و به رابطه عدد فرود چگال جریان با پارامترهای هندسی پی بردند. Kikkert و همکاران (۲۰۰۷) رفتار هندسی و توزیع غلظت را برای زوایای 25° تا 90° در اعداد فرود چگال ۱۴ تا ۹۹ بررسی نمودند تا به روشی برای پیش‌بینی موقعیت خط مرکزی و بیشترین صعود دست یابند. (Jirka 2008) تأثیر شیب بستر را بر رفتار اختلاطی جت‌های مایل مورد بررسی قرار داد. Shao و Law (۲۰۱۰) رفتار تخلیه جت‌های 30° و 45° را در آب‌های نسبتاً کم‌عمق مورد مطالعه قرار دادند. Papakonstantis و همکاران (۲۰۱۱) مطالعات گسترده‌ای را روی رفتار هندسی و اختلاطی جت‌های 45° تا 90° در اعداد رینولدز بالاتر از ۶۰۰۰ و اعداد فرود چگال بین ۷ و ۶۰ انجام دادند و نتایج حاصل را با نتایج دیگر محققین مقایسه نمودند. Bashitialshaer و همکاران (۲۰۱۲) ارتباط میان پارامترهای هندسی مسیر جریان را با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار دادند. Lai و Lee (۲۰۱۲) با انجام آزمایش‌هایی در زوایای 15° تا 60° الگوی توزیع غلظت را در مقاطع مختلف جریان مورد مطالعه قرار دادند. Oliver

¹ Zone of Flow Establishment (ZFE)

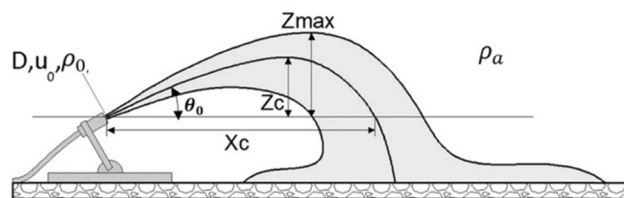
مقیاس‌های طولی برای تفکیک چگونگی رفتار جریان در محیط پذیرنده استفاده می‌گردد. مقیاس‌های طولی به وسیله انجام تحلیل ابعادی بر روی پارامترهای موثر بر رفتار جریان به دست آمده‌اند و طولی از جریان را نشان می‌دهند که در آن یکی از پارامترهای موجود تعیین‌کننده رفتار جریان می‌باشد (Wright, 1977). در این مقاله با توجه به ساکن بودن آب محیط پذیرنده از دو مقیاس طولی تخلیه (معادله ۳) و مقیاس طولی تبدیل جت به پلوم (معادله ۴) استفاده می‌گردد.

$$L_Q = \frac{Q}{\sqrt{M_0}} \quad \text{معادله ۳}$$

$$L_M = \frac{M_0^{0.75}}{\sqrt{B_0}} \quad \text{معادله ۴}$$

مقیاس طولی تخلیه بیانگر تاثیر مشخصات هندسی مجرای خروجی است که مربوط به لحظه‌ای پس از خروج جت از مجرای می‌باشد و در آن Q دبی جریان و $M_0 = u_0 Q$ شار مومنتوم (u_0 سرعت خروج جت از نازل) است. مقیاس طولی جت به پلوم نیز بیانگر فاصله‌ای است که در آن رفتار جت از کنترل شدن توسط شار مومنتوم یا رفتار جت مانند به کنترل توسط شار شناوری یا رفتار پلوم مانند تغییر می‌کند و در آن $B_0 = g' Q$ شار شناوری می‌باشد که نشان‌دهنده رفتار پلوم مانند جریان است (Roberts and Toms, 1987).

مشخصات اصلی جریان خروجی از تخلیه کننده‌های شور و مایل به محیط ساکن در شکل ۱ نشان داده شده است. چگالی سیال تخلیه شونده ρ_0 و چگالی سیال محیط ρ_a است ($\rho_a < \rho_0$). جریان جت با زاویه θ_0 نسبت به افق و با سرعت u_0 از نازل دایره‌ای به قطر D خارج می‌شود.



شکل ۱: شماتیک مسیر جریان و موقعیت خط مرکزی جریان جت سنگین

در این تحقیق از مدل آزمایشگاهی ساخته شده در مؤسسه تحقیقات آب استفاده شد. این مدل دارای مخزن شیشه‌ای به

شکل‌گیری جریان پایان یافته و محدوده دیگر جریان تحت عنوان ناحیه جریان توسعه یافته^۱ آغاز می‌گردد. با پیشروی اثر مرزها به داخل جریان و در برگرفتن کل پیکره پلوم، میانگین تغییرات عرضی سرعت و غلظت جریان به صورت زنگوله‌ای در می‌آید. تغییرات زنگوله‌ای این پارامترها در جهت عرض، تحت عنوان پروفیل‌های گوسی خود همسان جریان معرفی می‌شود. خود همسانی جریان به این معنی است که از ابتدای این ناحیه، پروفیل‌های سرعت و غلظت در نقاط مختلف جریان، دارای شکل و الگویی مشابه هستند (عابسی، ۱۳۹۰).

در مطالعه فرآیندهای هیدرولیکی در محیط‌های آزمایشگاهی، برای مطالعه رفتار پدیده به صورتی که انعکاس مناسبی از رفتار آن پدیده در محیط واقعی حاصل گردد، لازم است محدوده تغییر پارامترهای جریان به نحوی انتخاب گردد که بر اساس اصول مدلسازی در محیط واقعی نیز معنی‌دار باشد. لذا برای برقراری تشابهات فیزیکی، دینامیکی و سینماتیکی بین مدل و نمونه اصلی به دلیل عدم امکان ایجاد تشابه بین همی نیروهای موجود، باید از نیروهای کم اهمیت‌تر چشم پوشی نموده و برقراری تشابه، تنها بر اساس نیروی اصلی حاکم، با در نظر گرفتن عدد بی‌بعد مربوطه صورت گیرد. در تخلیه پساب در محیط‌های آبی با توجه به ابعاد و با آشفته در نظر گرفتن جریان از تاثیر نیروی لزجت، الاستیسیته، کشش سطحی و فشار صرف نظر می‌گردد. لذا از میان اعداد بدون بعد گوناگون تنها از عدد فرود چگال (معادله ۱) که بیانگر نسبت نیروی اینرسی به نیروی ثقل است، استفاده می‌گردد و از آن به عنوان معیار مدلسازی و تشابه دینامیکی بین مدل و نمونه اصلی استفاده می‌شود. در این رابطه g' شتاب گرانش اصلاح شده (معادله ۲) است.

$$Fr = u_0 / \sqrt{g'_0 D} \quad \text{معادله ۱}$$

$$g' = g(\rho_0 - \rho_a) / \rho_a \quad \text{معادله ۲}$$

و

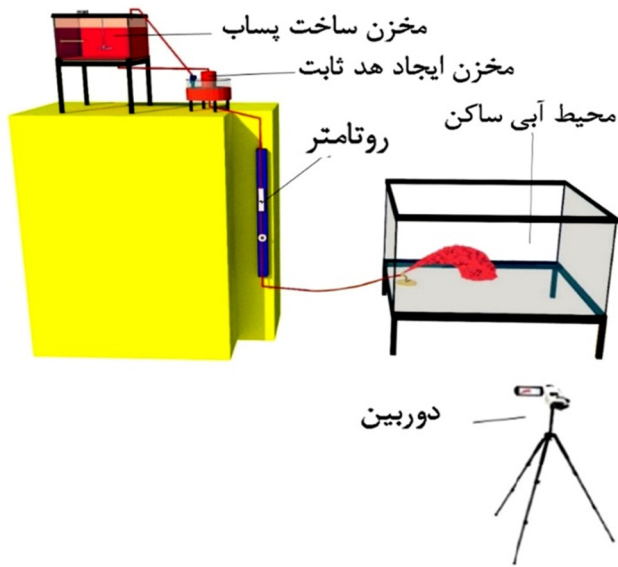
ρ_a : چگالی آب محیط (kg/m^3)

ρ_0 : چگالی اولیه پساب (kg/m^3)

g : شتاب گرانش (m/s^2)

^۱ Zone of Established Flow (ZEF)

به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۲: تصویر شماتیک اجزای مدل آزمایش

در جدول ۱ مشخصات و شرایط آزمایش‌ها ارائه شده است. این شرایط برای آزمایش‌های هر سه زاویه یکسان است. در حقیقت خروج پساب با شوری ۸ psu و با سه سرعت ۲۷ cm/s، ۴۷ cm/s و ۶۵ cm/s برای هر سه زاویه تکرار شده است. تمامی مراحل آزمایش نیز به وسیله دوربین فیلم‌برداری ثبت شده و در نهایت از تصویر میانگین حاصل از فیلم آزمایش‌ها برای بررسی تغییرات غلظت و یافتن خط مرکزی که دارای بیشترین غلظت شوری در مقطع جریان می‌باشند، استفاده شد.

طول ۲ m، عرض ۲ m و ارتفاع ۱/۲ m به عنوان محیط پذیرنده است. برای ردیابی جریان و تعیین رفتار هندسی و اختلاطی جت تخلیه شده در محیط، مقداری ماده رنگی رودامین به پساب شور ساخته شده افزوده شد. مخزن تهیه پساب برای ایجاد تراز ثابت، در ارتفاع ۳ m نسبت به مخزن آزمایش قرار گرفت و در صورت المنبت و ترموستات برای کنترل دما قرار گرفت که در صورت لزوم دما را به دمای محیط آب برساند. برای اطمینان از دمای ورودی جت به محیط، یک میکرو سنسور نیز در ورودی جت به محیط نصب شد تا دمای پساب ورودی را در هر ثانیه نشان دهد. سنجش میزان شوری پساب نیز به وسیله دستگاه مولتی‌متر HACH در مخزن ساخت پساب صورت گرفت. سرعت خروج پساب به وسیله روتامتر نصب شده در میانه مسیر تعیین شد. بدین صورت که روتامتر، شاخصی به عنوان سرعت جریان را نشان داده و سپس با داشتن این شاخص سرعت متناظر با آن به دست آمد. در نهایت جریان پساب شور به وسیله جت مستقر در محیط آبی که دارای نازلی به قطر ۴ میلی‌متر می‌باشد، به محیط تخلیه گردید. در این مطالعه زاویه جت تخلیه کننده نیز قابل تغییر بوده و خروج پساب با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت. زوایای فوق براساس مرور ادبیات فنی تحقیق، بیشترین کاربرد را در تخلیه کننده‌ها دارند. زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه عمدتاً در مناطق کم عمق ساحلی که محدودیت عمق برای تخلیه کننده وجود دارد و زاویه ۶۰ درجه در مناطق عمیق‌تر می‌تواند بکار گرفته شوند. شکل ۲ اجزای مدل برپاشده برای آزمایش‌ها را

جدول ۱: مشخصات و شرایط آزمایش‌ها (اطلاعات برای هر سه زاویه)

مقیاس‌های طولی	مشخصات محیط پذیرنده			مشخصات جریان جت تخلیه شونده										
	LM (cm)	LQ (cm)	چگالی (g/cm ³)	دما (°C)	شوری (PSU)	شار شناوری (m ⁴ /hr ³)	مومتوم (m ⁴ /hr ²)	عدد فرود چگال	چگالی (g/cm ³)	دما (°C)	دبی (cm ³ /s)	سرعت (cm/s)	شوری (psu)	زاویه تخلیه
۶/۱۶	۰/۳۵۴	۱۶/۸	۰/۹۹۹۴	۱۶/۸	-۰/۷	۸۷۰۱/۵۹	۱۱/۸۷	۱۸/۲۱	۱/۰۰۵۰	۱۶/۸	۳/۳۹۳	۲۷	۸	۳۰
۱۱/۹۴	۰/۳۵۴	۱۶/۸	۰/۹۹۹۴	۱۶/۸	-۰/۷	۱۵۱۴۷/۲۱	۳۵/۹۸	۳۱/۷۰	۱/۰۰۵۰	۱۶/۸	۵/۹۰۶	۴۷	۸	۳۰
۱۶/۵۱	۰/۳۵۴	۱۶/۸	۰/۹۹۹۴	۱۶/۸	-۰/۷	۲۰۹۴۸/۳۶	۶۸/۸۱	۴۳/۸۴	۱/۰۰۵۰	۱۶/۸	۸/۱۶۸	۶۵	۸	۳۰
۶/۱۶	۰/۳۵۴	۱۶/۸	۰/۹۹۹۴	۱۶/۸	-۰/۷	۸۷۰۱/۵۹	۱۱/۸۷	۱۸/۲۱	۱/۰۰۵۰	۱۶/۸	۳/۳۹۳	۲۷	۸	۴۵
۱۱/۹۴	۰/۳۵۴	۱۶/۸	۰/۹۹۹۴	۱۶/۸	-۰/۷	۱۵۱۴۷/۲۱	۳۵/۹۸	۳۱/۷۰	۱/۰۰۵۰	۱۶/۸	۵/۹۰۶	۴۷	۸	۴۵
۱۶/۵۱	۰/۳۵۴	۱۶/۸	۰/۹۹۹۴	۱۶/۸	-۰/۷	۲۰۹۴۸/۳۶	۶۸/۸۱	۴۳/۸۴	۱/۰۰۵۰	۱۶/۸	۸/۱۶۸	۶۵	۸	۴۵
۶/۱۶	۰/۳۵۴	۱۶/۸	۰/۹۹۹۴	۱۶/۸	-۰/۷	۸۷۰۱/۵۹	۱۱/۸۷	۱۸/۲۱	۱/۰۰۵۰	۱۶/۸	۳/۳۹۳	۲۷	۸	۶۰
۱۱/۹۴	۰/۳۵۴	۱۶/۸	۰/۹۹۹۴	۱۶/۸	-۰/۷	۱۵۱۴۷/۲۱	۳۵/۹۸	۳۱/۷۰	۱/۰۰۵۰	۱۶/۸	۵/۹۰۶	۴۷	۸	۶۰
۱۶/۵۱	۰/۳۵۴	۱۶/۸	۰/۹۹۹۴	۱۶/۸	-۰/۷	۲۰۹۴۸/۳۶	۶۸/۸۱	۴۳/۸۴	۱/۰۰۵۰	۱۶/۸	۸/۱۶۸	۶۵	۸	۶۰

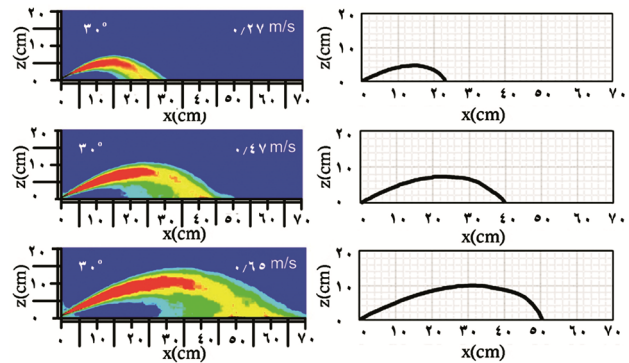
۳. نتایج و بحث

تحقیق Lai و Lee منطبق هستند. البته همان‌گونه که مشخص است در زاویه 60° پراکنش نقاط خط مرکزی در هنگام رسیدن به نقطه اوج بیشترین مقدار هستند، که نشان می‌دهد در این زاویه الگوی ناپایدارتر و نامنظم‌تری نسبت به زوایای کمتر وجود دارد.

در شکل ۳ الگوی توزیع غلظت و نمودار خط مرکزی به دست آمده برای تخلیه جریان با زاویه 30° نشان داده شده است.

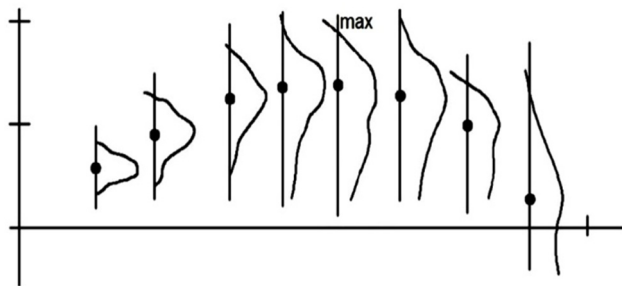
۱-۳ پروفیل‌های توزیع غلظت

الگوی پروفیل توزیع غلظت در تخلیه جریان شور به محیط ساکن توسط Lane و همکاران (۱۹۹۳) مطابق شکل ۵ تعریف شده است. مطابق با این الگو، پروفیل جریان در ابتدای خروج از نازل به صورت گوسی شکل بوده و با پیشروی جریان، پساب به علت نیروی گرانش در ناحیه زیرین خط مرکزی ریزش کرده از حالت گوسی شکل خارج می‌شود.



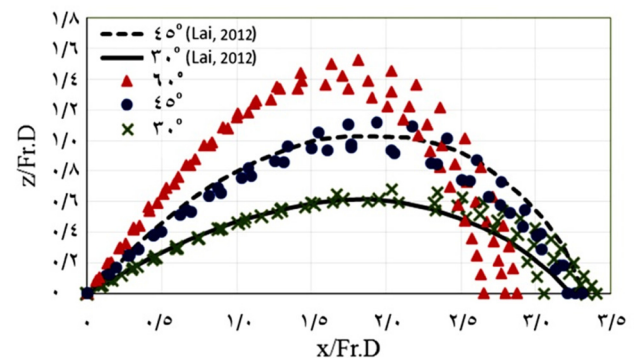
شکل ۳: الگوی توزیع غلظت و موقعیت خط مرکزی

از نتایج حاصل از موقعیت خط مرکزی، نمودارهای بدون بعد خط مرکزی جریان برای سه زاویه 30° ، 45° و 60° به صورت شکل ۴ به دست آمده است.



شکل ۵: پروفیل‌های توزیع غلظت در مقاطع مختلف جریان (Lane et al., 1993)

در این پژوهش الگوی پروفیل توزیع غلظت در بالاترین ارتفاع خط مرکزی برای سرعت‌ها و زوایای مختلف به دست آمد (شکل ۶). در این نمودارها C_m غلظت بیشینه (یا جذب نور بیشینه) در امتداد مرکز جریان، C غلظت (یا جذب نور) نقاط مختلف مقطع، r فاصله هر نقطه از خط مرکزی و b_v عرض جریان (فاصله خط مرکزی از نقطه‌ای که غلظت آن، $1/e$ یا 0.37) مقدار غلظت حداکثر آن مقطع است) هستند.

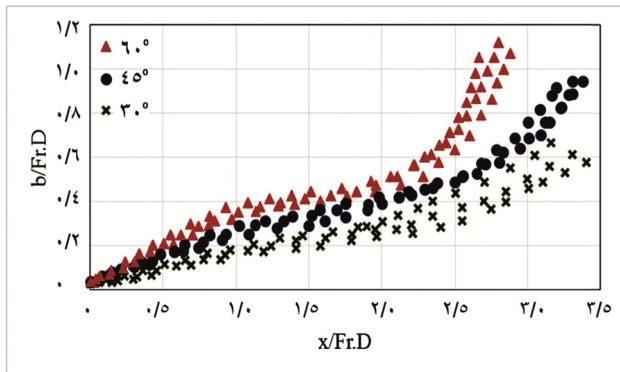


شکل ۴: نمودار بدون بعد خطوط مرکزی جریان

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات زاویه بر الگوی توزیع غلظت در بالاترین ارتفاع خط مرکزی مؤثر است. نمودارها نشان می‌دهند که در تمامی زوایا، توزیع غلظت در ناحیه بالای خط مرکزی تقریباً منطبق با پروفیل گوسی است، اما در ناحیه پایین خط مرکزی الگوی توزیع غلظت از پروفیل گوسی فاصله می‌گیرد. این فاصله در زاویه 30° کمترین مقدار و در زاویه 60° به بیشترین مقدار می‌رسد که علت آن را می‌توان با افزایش ریزش‌های جریان به دلیل افزایش برهم‌کنش بردارهای سرعت در

این نمودارهای نرمال شده از تقسیم مختصات خط مرکزی جریان بر $Fr.D$ به دست آمد که به وسیله آن می‌توان خط مرکزی جریان را در تخلیه‌هایی با سایر اعداد فرود به دست آورد. نتایج به دست آمده در آزمایش‌های این پژوهش با نمودارهای مربوط به زوایای تخلیه 30° و 45° به دست آمده از تحقیق Lai و Lee (۲۰۱۲) که به جای افزودن ماده رنگی از روشی متفاوت با این آزمایش (مشخص سازی جریان با لیزر و ماده فلئورسنت) استفاده نموده‌اند، مقایسه شدند. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است، نتایج زوایای تخلیه 30° و 45° تحقیق حاضر بر نمودارهای

60° و کمترین افزایش عرض و در نتیجه ترقیق، در زاویه 30° اتفاق افتاده است.

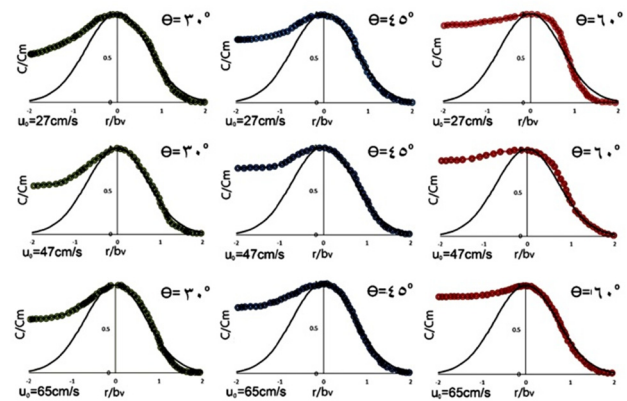


شکل ۷: تغییرات عرض جریان در راستای محور x برای سه زاویه 30° ، 45° و 60°

۳-۳ میزان ترقیق جریان در طول مسیر

جریان تخلیه شده بر اثر تنش برشی و آشفستگی جریان، سیال محیط را به داخل کشیده و در نتیجه غلظت آن کاهش می‌یابد (Nemlioglu and Roberts, 2006). ورود سیال محیطی به داخل جریان، با توجه به گسترش آلودگی موجب ترقیق آلاینده در محیط می‌گردد (Cipollina et al., 2005). در تخلیه جریان‌های سنگین در محیط ساکن، جریان خروجی در ابتدا تحت تاثیر شار مومنتوم در محیط پیشروی می‌کند. با استهلاک مومنتوم، جریان بر اثر شار شناوری به سمت پایین منحرف می‌گردد که این شار عامل اصلی ترقیق جریان در ادامه مسیر خواهد بود (Cipollina et al., 2004). مقدار ترقیق از رابطه $S = (C_0 - C_a) / (C - C_a)$ به دست می‌آید که در آن، Ca شوری محیط، C0 شوری اولیه پساب و C شوری نقطه مورد بررسی است. در این پژوهش به جای محاسبه میزان دقیق ترقیق، مقدار تغییرات شدت جذب نور در نقطه بازگشت خط مرکزی مورد مطالعه قرار گرفت. درصد تغییرات شدت جذب نور که از تصویر خاکستری حاصل از هر آزمایش به دست آمد در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در میان سه زاویه مورد بررسی بیشترین تغییرات شدت نور در نقطه بازگشت خط مرکزی در زاویه 60° و کمترین مقدار آن در زاویه 30° اتفاق می‌افتد. همچنین این تغییرات در هر زاویه با افزایش سرعت و در نتیجه افزایش عدد فرود چگال افزایش می‌یابد.

این زاویه مرتبط دانست. تاثیر سرعت اولیه خروج جت در پروفیل توزیع غلظت که برای زوایای مختلف به صورت ستونی می‌باشد و در شکل ۶ ارائه شده است، نشان می‌دهد که تغییرات سرعت بر الگوی توزیع غلظت تاثیر معنی‌داری نداشته و تنها بر طول تراژکتوری تاثیرگذار است.



شکل ۶: پروفیل توزیع غلظت در بالاترین ارتفاع خط مرکزی و برای شرایط متفاوت سرعت و زاویه تخلیه

۳-۲ الگوی تغییرات عرض جریان

جریان پساب تخلیه شده بلافاصله پس از ورود به محیط پذیرنده، با کشیدن آب محیط به داخل جریان، افزایش حجم یافته و در جهات مختلف گسترش می‌یابد (Abessi et al., 2012; Christodoulou et al., 2015). با توجه به نیروهای تاثیرگذار، گسترش عرضی پلوم در همه جهات یکسان نیست و بیشترین افزایش عرض در راستای گرانش صورت می‌گیرد. به همین دلیل در جریان‌های سنگین تمایل خط مرکزی به سمت بالا است (Cipollina et al., 2005; Kikkert et al., 2007).

در این تحقیق با در نظر گرفتن نیمه بالایی خط مرکزی جریان به عنوان نیمه پایدار، میزان تغییرات عرضی این نیمه (b) به ازای مقادیر مختلف محور x در حالات مختلف تخلیه مورد بررسی قرار گرفت. با تقسیم این مقادیر بر عدد فرود چگال و قطر نازل (Fr.D) نموداری بدون بعد از تغییرات عرض در هر زاویه به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است با افزایش زاویه خروجی به دلیل افزایش شیب جریان و همچنین افزایش پخشیدگی، عرض جریان بیشتر و سریعتر افزایش یافته است. بنابراین بیشترین افزایش عرض و در نتیجه ترقیق جریان در زاویه

واسنجی و تدقیق مدل‌های عددی در گام بعد نیاز به تعیین پارامترهای توربولانس به وجود آمده در بخش جت شکل و بخش پلوم شکل این نوع از جریان‌ها دارند و لذا بررسی آزمایشگاهی پارامترهای توربولانس جریان‌های شناور سنگین برای ادامه تحقیقات پیشنهاد می‌گردد.

۵. سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از کارکنان محترم پژوهشکده هیدرولیک و محیط‌های آبی مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو و ریاست محترم آن مجموعه به دلیل مساعدت‌های بی‌دریغشان تشکر بعمل می‌آورند.

منابع

عابسی، ع.، ۱۳۹۰. تحلیل پدیده تخلیه سطحی فاضلاب‌هایی با شناوری منفی در پیکره‌های آبی لایه‌بندی نشده. پایان‌نامه دکتری. دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۱۸ صفحه.

Abessi, O.; Roberts, P.J.W., 2016. Dense jet discharges in shallow water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1): 1-13.

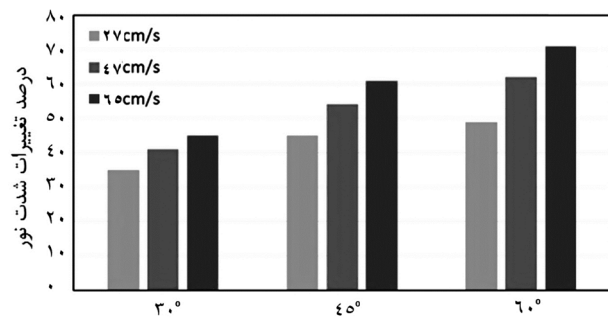
Abessi, O.; Roberts, P.J., 2015. Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(8): 06015009.

Abessi, O.; Saeedi, M.; Bleninger, T.; Davidson, M., 2012. Surface discharge of negatively buoyant effluent in unstratified stagnant water. *Journal of Hydro-Environment Research*, 6(3): 181-193.

Bashitialshaaer, R.; Larson, M.; Persson, K.M., 2012. An experimental investigation on inclined negatively buoyant jets. *Water*, 4(3): 720-738.

Christodoulou, G.C.; Papakonstantis, I.G.; Nikiforakis, I.K., 2015. Desalination brine disposal by means of negatively buoyant jets. *Desalination and Water Treatment*, 53(12): 3208-3213.

Cipollina, A.; Brucato, A.; Grisafi, F.; Nicosia, S., 2005. Bench-scale investigation of inclined dense jets.



شکل ۸: درصد تغییرات شدت نور خط مرکزی (غلط نمک) در نقطه بازگشت پساب

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش مجموعه‌ای از مطالعات آزمایشگاهی به منظور یافتن زاویه و سرعت بهینه در تخلیه پساب شور به محیط دریا انجام گرفت تا از مخاطرات زیست محیطی ناشی از تخلیه پساب شور در محیط‌های دریایی کاسته شود. در این راستا در کل، تعداد ۹ آزمایش انجام شد که در آن زاویه و سرعت خروج از نازل پارامترهای متغیر مورد بررسی بر رفتار تخلیه جت‌های سنگین هستند. نتایج حاصل نشان داد که سرعت جریان در یک زاویه مشخص فقط بر طول مسیر حرکت جریان تأثیر داشته، اما بر روی الگوی توزیع غلظت تأثیری ندارد (شکل‌های ۳ و ۶). همچنین تغییرات زاویه خروجی تخلیه کننده بر الگوی توزیع غلظت تأثیر دارد و نیمه پایین مقطع جریان از حالت گوسی خارج شده و با افزایش زاویه، ریزش بیشتری را در زیر خط مرکزی نشان می‌دهد (شکل ۶). مقدار تغییرات عرض پلوم جریان نیز با افزایش زاویه خروج، افزایش یافته و بیشترین تغییرات عرض و ترقیق در زاویه ۶۰° اتفاق افتاده است (شکل ۷). در نهایت نتایج حاصل از بررسی مقدار ترقیق نهایی خط مرکزی در نقطه بازگشت نشان داد که در آزمایش‌های انجام شده در این سه زاویه، هرچه ارتفاع و طول مسیر خط مرکزی بیشتر باشد (زاویه ۶۰° و سرعت خروج بیشتر) ترقیق نهایی نیز بیشتر می‌گردد. در نتیجه در سه زاویه بررسی شده استفاده از زاویه ۶۰° در تخلیه‌کننده‌های دریایی در صورت عدم وجود محدودیت‌های عمق، مناسب‌تر بوده و مخاطرات زیست محیطی کمتری خواهد داشت.

نتایج تحقیق حاضر در واسنجی و تدقیق مدل‌های ریاضی جت‌های شناور سنگین می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

- Turkey, November 6-10.
- Oliver, C.J.; Davidson, M.J.; Nokes, R.I., 2013. Predicting the near-field mixing of desalination discharges in a stationary environment. *Desalination*, 309: 148-155.
- Papakonstantis, I.G.; Christodoulou, G.C.; Papanicolaou, P.N., 2011. Inclined negatively buoyant jets 1: geometrical characteristics. *Journal of Hydraulic Research*, 49(1): 3-12.
- Roberts, P.J.; Toms, G., 1987. Inclined dense jets in flowing current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(3): 323-340.
- Roberts, P.J.; Ferrier, A.; Daviero, G., 1997. Mixing in inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(8): 693-699.
- Shao, D.; Law, A.W.K., 2010. Mixing and boundary interactions of 30 and 45 inclined dense jets. *Environmental Fluid Mechanics*, 10(5): 521-553.
- Wright, S.J., 1977. Effects of ambient crossflows and density stratification on the characteristic behavior of round turbulent buoyant jets, Doctoral Dissertation. Pasadena: California Institute of Technology Pasadena, 35p.
- Zeitoun, M.A.; McIlhenny, W.F.; Reid, R.O., 1970. Conceptual designs of outfall system for desalting plants, office of saline water research and development progress report 550. US Dept. of the Interior, NTIS PB: 201-033.
- Journal of Hydraulic Engineering*, 131(11): 1017-1022.
- Cipollina, A.; Bonfiglio, A.; Micale, G.; Brucato, A., 2004. Dense jet modelling applied to the design of dense effluent diffusers. *Desalination*, 167: 459-468.
- Holly, F.M.; Grace, J.L., 1972. Model study of dense jet in flowing fluid. *Journal of the Hydraulics Division*, 98(11): 1921-1933.
- Inoue, M.; Su, T.C., 1983. Mixing characteristics of negatively buoyant swirling plume. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(7): 1049-1056.
- Jirka, G.H., 2008. Improved discharge configurations for brine effluents from desalination plants. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1): 116-120.
- Kikkert, G.A.; Davidson, M.J.; Nokes, R.I., 2007. Inclined negatively buoyant discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(5): 545-554.
- Lai, C.C.; Lee, J.H., 2012. Mixing of inclined dense jets in stationary ambient. *Journal of Hydro-Environment Research*, 6(1): 9-28.
- Lane-Serff, G.F.; Linden, P.F.; Hillel, M., 1993. Forced, angled plumes. *Journal of Hazardous Materials*, 33(1): 75-99.
- Nemlioglu, S.; Roberts, P.J.W., 2006. Experiments on dense jets using three-dimensional laser-induced fluorescence (3DLIF), Proceedings of the 4th International conference on marine waste water disposal and marine environment, DVD, Antalya,