بررسی ترقیق، تناوب و شدت آشفتگی جریان آشفته در تخلیه مستغرق جریان‌های شور

شیوا غیور[۱] ، مهدی حمیدی[۲*]، عزیر عابسی[۳]

[۱] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، shiva692014@gmail.com
[۲*] دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، hamidi@nit.ac.ir
[۳] استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، oabessi@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۳

کلمات کلیدی:
تخلیه فاضلاب آب شیرین‌کن
جت مستغرق
پلوم
شناوری منفی
جریان آشفته

چکیده

در دهه‌های اخیر، تخلیه پساب‌های شور در پیکره‌های آبی و تأسیس آب‌شرین‌کن‌ها در سراسر دنیا افزایش یافته‌است. در پژوهش پیش‌رو، رفتار جریان آشفته در تخلیه مستغرق پساب‌های شور تولیدی در آب-شیرین‌کن‌های ساحلی با زاویه تخلیه ۴۵ درجه نسبت به افق، به کمک سیستم آزمایشگاهی سه‌بعدی آشکارسازی لیزری جریان آغشته به فلورسنت مورد بررسی قرار گرفته‌است. پس از برداشت تصاویر و تبدیل آنها به فایل‌های ASCI، تغییر رفتار جریان آشفته در انتقال رژیم از جت به پلوم، با ترسیم نیمرخ‌های عرضی غلظت، شدت آشفتگی و تناوب جریان در فواصل مختلف از نازل تخلیه به کمک توسعه کدهایی در نرم‌افزار MATLAB تحلیل شده‌است. نتایج نشان می‌دهند که در این انتقال رژیم، تطابق نیمرخ‌های غلظت میانگین با توزیع گوسی در وجه درونی کاهش می‌یابد، مقادیر شدت جریان افزایش می‌یابند و ناحیه صفر تناوبی کوچک می‌شود. همچنین، شیب تغییرات غلظت میانگین، شدت نوسانات غلظت و تناوب در راستای خط جریان، به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابند.

Investigation of Dilution, Frequency, and Intensity of Turbulent Flow in Submerged Disposal of Brine

Shiva Ghayour[1], Mehdi Hamidi[2*], Ozeair Abessi[3]

[1] MSc., Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology; shiva692014@gmail.com
[2] Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology; hamidi@nit.ac.ir*
[3] Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology; oabessi@nit.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 26 Apr. 2021
Accepted: 04 Jun. 2021

Keywords:
Desalination Wastewater Discharge
Submerged Jet
Plume
Negative Buoyancy
Turbulent Flow

ABSTRACT

In recent decades, brine discharge into the water bodies and desalination plants have increased dramatically all over the world. In this research, behavior of turbulent flow in submerged disposal of saline wastewater produced by coastal desalination with a nozzle oriented upwards at 45° to the horizontal was investigated by employing a three-dimensional laser-induced fluorescent (3DLIF) system. After obtaining experimental pictures and converting them to ASCI files, change of turbulent flow in jet-to-plume transition was analyzed through cross-sectional profiles of concentration, turbulent intensity and flow intermittency in different distances from the discharge nozzle with code development in MATLAB software. The results show that in this regime transition, agreement with Gaussian distribution in mean concentration profiles decreases for the inner side of discharged flow in the plume region, Concentration intensity increases and zero-intermittency zone decreases. Also, changes in slope of mean concentration, concentration fluctuation intensity and intermittency along the centerline increase dramatically.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.12.2]

۱ - مقدمه

در سال‌های اخیر نمک‌زدایی آب دریا جهت تأمین آب شرب در مناطق ساحلی به‌عنوان راه‌حلی پایدار برای برون‌رفت از بحران کمبود جدی آب شیرین مورد توجه قرار گرفته‌است. ظرفیت آب‌شیرین‌کن‌های نصب‌شده در کشورهای حوزه خلیج فارس در سال ۲۰۰۹ در حدود ۲۸۵۰ میلیون مترمکعب بوده‌است و طبق تخمین‌ها، این میزان تا سال ۲۰۲۵ به ۴۳۲۷ میلیون مترمکعب خواهد رسید [۱]. از روش‌های موجود برای شیرین‌سازی آب دریا، می‌توان به روش‌های تقطیر چندگانه[۱]، تقطیر چند مرحله‌ای[۲] و همچنین اسمز معکوس[۳] در مقیاس‌های بزرگ و صنعتی اشاره کرد [۲].

در کنار تولید آب شیرین، تأسیسات نمک‌زدایی مقادیر زیادی پساب شور را به‌عنوان محصول ثانویه تولید می‌کنند. علاوه بر این، افزایش دمای آب از ۵ تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد، افزایش غلظت نمک تا ۲/۵ برابر و ورود انواع فلزات سنگین اعم از روی، کروم، نیکل، مولیبدن، آهن و مس به آب از جمله پیامدهای ناشی از نمک‌زدایی آب دریا در صنایع نمک‌زدایی به شمار می‌آیند [۳]. براساس قوانین سازمان حفاظت از محیط زیست آمریکا[۴] (۱۹۸۲)، گروه مهندسی ارتش آمریکا[۵] (۱۹۸۴) و کمیته سلطنتی آلودگی محیط‌زیست بریتانیا[۶] (۱۹۸۴)، تنها با اختلاط و ترقیق مناسب فاضلاب تولیدی در محیط دریا می‌توان از شدت پیامدهای زیست‌محیطی احتمالی آن کاست. برای این منظور استفاده از تخلیه‌کننده‌های دریایی مورد تأکید قرار گرفته‌است [۴]. تخلیه‌کننده‌ها در واقع لوله‌هایی قطور به طول چند صد متر تا چند کیلومتر هستند که از ساحل به داخل دریا کشیده شده و در انتها مجهز به دیفیوزرهای تک یا چندتایی هستند که فاضلاب را با فاصله از دریا و در طول نسبتاً زیادی در محیط پخش می‌نماید [۵]. به‌طور عمومی رفتار جریان بسته به غلبه مومنتم و شناوری اولیه خروجی، تحت تأثیر دو رژیم جت شکل و پلوم شکل قرار خواهد گرفت. این دو رژیم اگرچه از لحاظ ظاهری مشابه هستند اما تفاوت‌هایی ذاتی با هم دارند. با وجود آنکه در منابع علمی واژه‌های "جت" و "پلوم" حامل طیف وسیعی از مفاهیم و معانی تخصصی هستند، در فرایند تخلیه فاضلاب، "جت" به نوعی از جریان اطلاق می‌شود که رفتار آن تحت حاکمیت ممنتوم باشد. در مقابل، پلوم جریانی است که در آن نیروی شناوری حاکم بر رفتار جریان باشد. یک "جت شناور[۷]" به جریانی اطلاق می‌شود که در ابتدا ممنتوم محور بوده و پس از طی مسافتی به دلیل اختلاف چگالی با سیال پیرامون و غلبه نیروی شناوری و استهلاک مومنتم، تغییر رفتار داده و پلوم شکل می‌شود [۶].

تاکنون پژوهش‌های بسیاری در زمینه بررسی رفتار عمومی جریان‌های با شناوری‌های منفی در محیط‌های ساکن و متحرک انجام شده‌است. از اولین پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه می‌توان به پژوهش زیتن [۷] اشاره کرد. در این مقاله، نویسنده با استفاده از روش‌های بصری ساده، رفتار جت مایل با شناوری منفی تحت زوایای تخلیه مختلف را مورد مطالعه قرار داد. او مشاهده نمود که تخلیه جت با زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق باعث شکل‌گیری طولانی‌ترین خط مسیر و در نتیجه بیشترین ترقیق در جریان می‌شود و به این ترتیب زاویه ۶۰ درجه را به‌عنوان زاویه بهینه برای تخلیه فاضلاب‌های شور و سنگین توصیه نمودند. نتایج کار او در ادامه توسط عابسی و همکاران، پینسین و همکاران و رابرتز و همکاران [۵، ۸، ۹] مورد بررسی و تأیید قرار گرفته‌است.

با پیشرفت تکنولوژی‌های تصویربرداری و رایانه‌ای، روش‌های آشکارسازی رفتار جریان در آزمایشگاه نیز پیشرفت‌های بسیاری داشته است. در این زمینه می‌توان به روش آشکارسازی لیزری جریان آغشته به فلورسنت[۸] [۱۰] روش میرایی نور[۹] [۱۱]، روش شدت نور[۱۰] [۱۲] و روش‌های تعقیب ذرات برای سرعت‌سنجی[۱۱] [۱۳]، اشاره نمود.

علی‌رغم تعداد زیاد پژوهش‌ها، فیزیک پخشیدگی و اختلاط و رفتار آماری جریان‌های آشفته به دلیل دشواری ثبت و استخراج داده‌های نوسانی با فرکانس بالا در این نوع جریانات، در تعداد محدودی از پژوهش‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مثال، پاپانیکولائو و همکاران [۱۴] با ترکیب دو روش آزمایشگاهی سنجش داپلر لیزر[۱۲] و آشکارسازی لیزری جریان آغشته به فلورسنت، سرعت و غلظت در جت‌های عمودی شناور را به‌طور همزمان ثبت و مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها رفتار آشفته جریان را در سه ناحیه جت شکل، پلوم شکل و انتقالی بررسی کرده‌اند. در پژوهش آنها، جذر میانگین مربعات[۱۳] نوسانات غلظت و سرعت در هر دو جهت افقی و عمودی در ناحیه‌های جت شکل و پلوم شکل ترسیم و با نمودارهای غلظت و سرعت در جریان میانگین مقایسه شده‌اند.

ونگ و همکاران [۱۳] با استفاده از دو روش آشکارسازی لیزری جریان آغشته به فلورسنت و تعقیب ذرات برای سرعت‌سنجی، تخلیه جریان سطحی با شناوری منفی را مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش آنها نیمرخ‌های غلظت، سرعت، تنش برشی و انتقال جرم در جریان آشفته ترسیم و مشخصات و رفتار جریان آشفته در رژیم جت شکل و پلوم شکل مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. تغییر رفتار جریان در امتداد خط مرکزی در انتقال از رژیم جت به پلوم شکل با استفاده از نمودارهای ترقیق و شدت جریان انجام گرفته‌است. در بررسی تغییرات میزان ترقیق در امتداد مسیر، نقطه تغییر محسوس شیب به‌عنوان نقطه تغییر رژیم جت به پلوم بررسی شده‌است.

الیور و همکاران [۱۵] جت‌های تخلیه‌شده را با زاویه مورب نسبت به افق، با استفاده از روش آشکارسازی لیزری جریان آغشته به فلورسنت مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند. مقایسه نمودار شدت آشفتگی برای مقاطع عمود بر خط مسیر در رژیم جت شکل و پلوم شکل نشان داده‌است که این نمودار در ناحیه جت شکل دارای دو قله و در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.12.2]

بخش پلوم شکل تنها دارای یک قله است. همچنین، طبق نتایج این پژوهش، در لبه بالایی جریان، گردابه‌های بزرگ سبب تسریع فرآیند اختلاط و کشیده شدن سیال اطراف به مرکز جریان تخلیه‌شده می‌شوند. به همین دلیل در این وجه تناوب[۱۴] نسبت به لبه پایینی و داخلی از مقدار بیشتری برخوردار است. تفاوت ویژگی‌های وجه داخلی و خارجی جت تخلیه‌شده در نیمرخ‌های غلظت نیز کاملاً مشهود است. مقادیر غلظت برای وجه بیرونی کاملاً بر توزیع نرمال منطبق بوده درحالی‌که در وجه داخلی به‌دلیل وجود ممنتوم ناشی از شناوری توزیع از حالت گوسی فاصله می‌گیرد. آنها تأکید نمودند که بررسی آشفتگی جریان با رویکرد آماری، به شناخت بهتر رفتار اختلاطی و آشفته جریان منتج شده و امکان مناسبی فراهم می‌سازد تا بتوان با درک بهتر فرایندهای تأثیرگذار، پخشیدگی و ترقیق جریان در تأسیسات تخلیه پساب صنایع نمک‌زدایی را ارتقا بخشید. علاوه بر آن، این پژوهش‌ها می‌توانند جهت صحت‌سنجی مدل‌های عددی فرایند تخلیه در بالاترین سطح مورد استفاده قرار گیرند.

در پژوهش حاضر، با توجه به کمبود پژوهش‌های مرتبط با تأثیر مشخصات آشفتگی بر رفتار اختلاطی جریان سعی شده‌است تا با بررسی نوسانات غلظت جریان در امتداد مسیر، تغییرات کمیت‌های جریان آشفته از جمله ترقیق، شدت آشفتگی و تناوب حین انتقال جریان از رژیم جت به پلوم مورد مطالعه قرار گیرد که پیش از این در مقاله‌های مشابه مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش، هدف تحلیل رفتار اختلاطی جریان سنگین خروجی از تخلیه‌کننده مستغرق مورب ۴۵ درجه نسبت به افق در محیط ساکن است که از طریق شبیه‌سازی فرآیند تخلیه در آزمایشگاه صورت گرفته‌است. پروفیل‌های غلظت، شدت آشفتگی و تناوب برای مقاطع مختلف عمود بر خط مسیر و مشخصات اختلاطی جت، در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین تغییر و تفاوت مشخصات ذکرشده در تبدیل جریان از رژیم جت شکل به پلوم شکل با جزئیات بیشتری تحلیل شده‌اند. مقایسه رفتار جریان در رژیم‌های جت و پلوم شکل می‌تواند به محققان به یافتن درک بهتری از فیزیک جریان‌های آشفته و ارتقای عملکرد تخلیه‌کننده‌های دریایی کمک کند و در جلوگیری از ایجاد زیان‌های زیست‌محیطی به اکوسیستم‌های پیکره‌های آبی مؤثر باشد. همچنین، با توجه به بی‌بعد بودن پارامترها در نمودارهای ترسیم‌شده این پژوهش، در نهایت امکان پیش‌بینی مشخصات جریان در طراحی نمونه‌های واقعی به نحو مطلوب فراهم می‌گردد. همچنین مطالعه آماری مشخصات این جت‌ها و جریان آشفته و رژیم‌های مختلف آن می‌توانند جهت ارزیابی، تصحیح و افزایش دقت مدل‌های کامپیوتری و عددی موجود راهگشا باشند.

در این پژوهش تکنیک آزمایشگاهی آشکارسازی لیزری جریان آغشته به فلورسنت، (به‌عنوان نمونه ارتقا یافته دستگاه مشابه در مؤسسه فناوری جورجیا[۱۵] امریکا) مورداستفاده قرار گرفته‌است. با استفاده از این تجهیزات علاوه بر تعیین مشخصات هندسی و میزان غلظت جریان در هر نقطه، ثبت نوسانات غلظت جریان در محدوده وسیعی از فرکانس‌های داده‌برداری امکان‌پذیر است. به این ترتیب علاوه بر ترسیم نیمرخ‌های غلظت جریان میانگین، شدت آشفتگی و تناوب برای جریان آشفته بدست آمده و روند تغییرات آنها در طول خط مرکزی جریان تعیین و با هم مقایسه شده‌است.

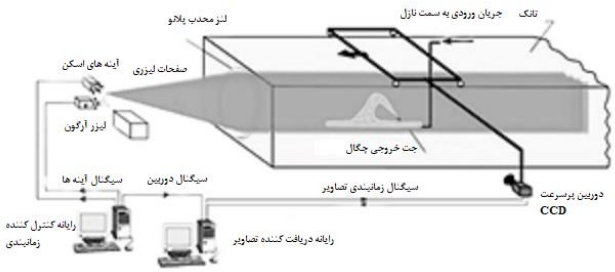
۲ – مواد و روش‌ها

در این پژوهش از سامانه اسکن لیزری سه‌بعدی آشکارساز جریان آغشته به فلورسنت در آزمایشگاه هیدرولیک محیط زیست دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل جهت مدل‌سازی جریان و ثبت نوسانات غلظت استفاده شده‌است. در شکل ۱ نمایی کلی از تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده آورده شده‌است. این سامانه متشکل از یک تانک آب به طول ۱/۸ متر، عرض ۱/۵ متر و عمق ۱ متر و تأسیسات هیدرولیکی مرتبط است. به دلیل آنکه با ورود پساب حاوی فلورسنت مشخصات سیال محیط تغییر می‌کند، برای هر آزمایش، تانک مجدداً از آب شهر پر شده و کلرزدایی می‌شود. پمپ ۳۶۰ واتی و لوله‌های انتقال آب امکان پر و خالی نمودن تانک آزمایش را در زمان کوتاهی فراهم می‌سازند. منبع نور، لیزر سبز رنگ با طول موج ۵۱۴ نانومتر است که در سمت چپ تانک قرار گرفته و برای کنترل فرایندهای آزمایش همراه با سیستم کنترلی و دوربین دیجیتال به یک پردازشگر مرکزی متصل شده‌است. این سامانه با استفاده از یک سیستم اسکن سریع به همراه دو آینه نوسانی صفحات لیزر باریک در امتداد خط مرکزی جریان تولید می‌کند. دوربین تصویربرداری مورد استفاده از نوع مارس[۱۶] با حداکثر توان برداشت ۳۰۰ فریم بر ثانیه و وضوح تصویر ۶۴۰ در ۴۸۰ پیکسل است که تصاویری از نوع مقیاس خاکستری[۱۷] ضبط می‌نماید. تصاویر برداشت‌شده با توسعه مجموعه‌ای از کدهای توسعه‌داده‌شده به زبان C# از منظر هندسی و شدت نور کالیبره شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. با تفسیر رقومی تصاویر خاکستری به‌دست‌آمده، رفتار اختلاطی و هندسی جریان در یک فایل Tecplot استخراج می‌گردد [۱۶]. برای شبیه‌سازی جت تخلیه فاضلاب سنگین در آب ساکن داخل تانک، از یک نازل مایل به قطر ۳/۳ میلی‌متر استفاده شده‌است. نازل بر روی یک سیستم ریلی سوارشده روی قاب بالایی تانک قرار گرفته و از طریق شیلنگ و سیستم لوله‌کشی به منبع آب شور آغشته به فلورسنت متصل شده‌است. جریان فاضلاب شور از طریق پمپی با توان ۰/۵ وات و با عبور از فلومتر به نازل داخل تانک هدایت می‌شود. فلومتر استفاده‌شده در این آزمایش از نوع تابلویی با مدل ACA ۰۵ با بدنه اکریلیک (برای کنترل دبی در محدوده ۲۵ تا ۲۵۰ لیتر بر ساعت) انتخاب شده‌است. جریان خروجی در آغاز در اثر مومنتوم اولیه خود به سمت بالا رفته و به بیشترین ارتفاع خود می‌رسد. با اضمحلال

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.12.2]

مومنتم اولیه به‌تدریج سنگینی فاضلاب شور غالب شده و جریان رفتاری پلوم شکل به خود می‌گیرد. در نهایت فاضلاب خروجی بعد از رسیدن به نقطه اوج به سمت کف برمی‌گردد و در روی بستر محیط به صورت جریانی چگال جریان می‌یابد.



شکل ۱- نمای کلی از سامانه اسکن لیزری سه‌بعدی جهت آشکارسازی جریان آغشته به فلورسنت [۱۶]

علاوه بر ثبت دو بعدی آزمایش، این سامانه از طریق اسکن حجم مشخصی از سیال جلوی نازل، قادر به ثبت سه‌بعدی جریان نیز می‌باشد. پرتوی نور لیزر با کمک ساختارهای طراحی شده با حرکت به سمت بالا و دوطرف، صفحه‌های لیزری متعدد ایجاد کرده و محدوده مورد نظر را به طور متناوب دوبار در ثانیه روشن می‌سازد. این صفحه‌ها با اسکن حجم مشخصی از سیال از جلوی تخیله‌کننده در فعالیت همزمان با دوربین، حجم کنترلی از سیال را به صورت سه بعدی اسکن خواهند کرد. در این سامانه با قراردادن صفحه لیزری در مرکز جت امکان ثبت آزمایش‌ها به صورت دوبعدی میسر شده است.. در پژوهش حاضر از قابلیت‌های تجهیزات ذکرشده برای ثبت آزمایش به‌صورت دوبعدی با فرکانس ۱۰۰ فریم بر ثانیه استفاده شده‌است. با تخلیه جریان آغشته به فلورسنت از نازل و برخورد پرتوی لیزر با آن، ماده فلورسنت طول موج خاصی از نور نارنجی از خود منتشر می‌سازد که در فضای کاملاً تاریک اتاق توسط دوربین دیجیتال مجهز به فیلتر نارنجی ثبت می‌شود. این سامانه نسخه توسعه‌یافته سیستم اسکن لیزری سه‌بعدی است که اولین بار در سال ۲۰۰۳ توسط تیان و همکاران [۱۰] در مؤسسه فناوری جورجیا آمریکا ساخته شده و توسط عابسی و رابرتز در سال ۲۰۱۵ [۵] ارتقا داده شده‌است. پس از آن، این سیستم در ایران برای اولین بار توسط عابسی و همکاران در سال ۱۳۹۷ در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفته‌است. جزئیات این روش به‌طور مبسوط در مقاله [۱۶] تشریح شده‌است.

در آزمایش‌های انجام‌شده پساب تخلیه‌شده، حاصل انحلال نمک کلرید سدیم[۱۸] و رودامین 6G در آب شیرین بوده که از نازلی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق در محیط ساکن داخل تانک تخلیه شده‌است. برای ساختن فاضلاب مصنوعی در این آزمایش، ۳۰ گرم نمک در یک لیتر آب شیرین حل شده‌است ($\rho_a = ۱۰۲۱ kg/m^3$). جریان مورد بررسی در این پژوهش دارای سرعت تخلیه ۷۴/۷ سانتیمتر بر ثانیه، دبی تخلیه ۶/۹۴ سانتی متر مکعب بر ثانیه و عدد فرود چگالی برابر با ۲۸/۶۴ بوده است. رابطه (۱) عدد فرود چگالی را به‌دست می‌آورد.

$$Fr_0 = \frac{U_0}{\sqrt{g_0^{'} d}} \qquad (۱)$$

که در آن $g^{'}$ شتاب جاذبه کاهش یافته است و از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$g^{'} = g\frac{\rho_0 - \rho_a}{\rho_a} \qquad (۲)$$

در رابطه فوق g شتاب جاذبه، ρ_a چگالی سیال اطراف و ρ_0 چگالی فاضلاب خروجی می‌باشند. عدد رینولدز جریان در این آزمایش که از رابطه (۳) محاسبه می‌شود برابر با ۲۳۹۶/۸۴ است و تضمین‌کننده شکل‌گیری جریان آشفته می‌باشد.

$$\mathrm{Re} = \frac{Vd}{\upsilon} \qquad (۳)$$

این آزمایش ۴ بار تکرار و بهترین برداشت جهت تفسیر و تحلیل فرکانسی مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش تعداد ۸۰۰۰ تصویر از آزمایش پس از پردازش و کالیبراسیون نهایی، به فرمت ASCII تبدیل شده و با استفاده از نرم افزار متلب مورد تحلیل و تفسیر قرار گرفته‌اند.

۳ – نتایج و بحث

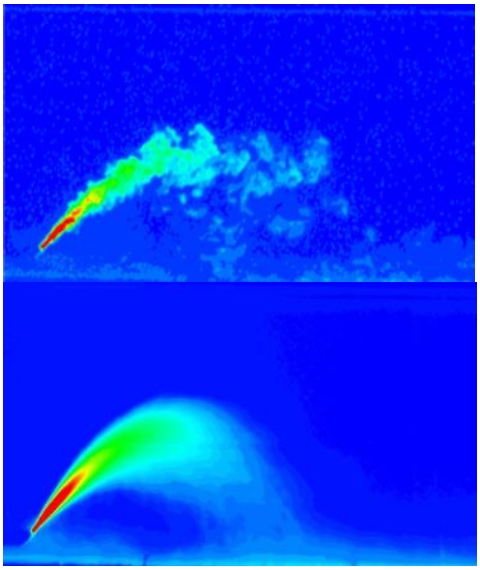
رفتار عمومی جریان فاضلاب چگال خروجی از نازل مورب ۴۵ درجه‌ای در محیط ساکن به‌عنوان نمونه در شکل ۲ آورده شده‌است. در شکل ۲-الف، جریان پس از طی زمان ۳۰ ثانیه از آغاز تخلیه نشان داده شده‌است. پیش از ۳۰ ثانیه جریان همچنان درحال طی مسیر از منبع تخلیه به سمت بستر تانک است و پس از ۳۰ ثانیه جریان آشفته تخلیه‌شده، مسیر منحنی شکل خود را تا کف تانک به تمامی پیموده است. نمایش جریان در یک لحظه و ایجاد امکان مقایسه آن با تصویر میانگین‌گیری‌شده می‌تواند در درک فیزیک جریان‌های آشفته تخلیه‌شده از تخلیه‌کننده‌های مستغرق دریایی، تشخیص گردابه‌های تشکیل‌دهنده جریان آشفته و نوسانات غلظت در مقاطع مختلف مؤثر باشد. در شکل ۲-ب، تصویر میانگین زمانی غلظت جریان آورده شده‌است. رنگ‌های نشان‌داده‌شده در این تصویر، خطوط هم غلظت در طیف رنگین کمانی است که از طریق نرم افزار Tecplot ترسیم شده‌است. رنگ قرمز در نزدیکی منبع تخلیه نشان‌دهنده غلظت زیاد پساب در فاصله اندکی از پخش‌کننده است. با دور

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.12.2]

شدن جریان از نازل، رنگ پساب به زرد و پس از آن آبی روشن تغییر پیدا می‌کند که بیانگر کاهش غلظت نمک و افزایش ترقیق با افزایش فاصله از منبع تخلیه می‌باشد.

با بررسی شکل ۲ (الف) تفاوت در رفتار جریان پیش و پس از ماکزیمم ارتفاع قابل مشاهده است. جریان پساب قبل از رسیدن به نقطه اوج، تحت حاکمیت ممنتوم اولیه است. در این ناحیه سرعت بالا، تناوب اندک و انحراف کم جریان از مسیر اصلی از ویژگی‌های شناخته‌شده جریان است. پس از ماکزیمم ارتفاع، شناوری بر ممنتوم اولیه غلبه کرده و رژیم جریان را از جت به پلوم تغییر می‌دهد. در این بخش، ممنتوم ناشی از شناوری از ممنتوم اولیه سبقت گرفته و باعث افزایش چشمگیر پخشیدگی جریان و نوسانات غلظت در طول زمان برای هر یک از نقاط می‌شود. به این ترتیب رفتار جت‌های با شناوری منفی در واقع حاصل جدال دو نیروی ممنتوم و شناوری اولیه در امتداد مسیر جریان است.



شکل ۲- رفتار جریان آشفته فاضلاب تخلیه‌شده در طول زمان، (الف): رفتار لحظه‌ای آزمایش در زمان ۳۰ ثانیه (ب): تصویر میانگین زمانی آزمایش

با توجه به شکل ۲ (ب) مشاهده می‌شود که لبه بالایی جریان، نسبت به لبه درونی آن رفتار متفاوتی دارد. در لبه بالایی بسته‌های جداشده از جریان به دلیل شناوری منفی از یک سو و شار اختلاطی[۱۹] از سوی دیگر نهایتاً به مسیر اولیه باز می‌گردند و دوباره به جریان اصلی ملحق می‌شوند اما در لبه پایینی با وجود شار اختلاطی، ممنتوم ناشی از شناوری، بسته‌های جداشده را از مرکز جریان دورتر می‌کند. به این ترتیب در وجه درونی جریان، پلوم عریض‌تر شده و دارای لبه مشخصی نیست. به این ترتیب در لبه پایین، میزان ترقیق جریان افزایش یافته که دلیل آن را می‌توان کاهش مقیاس زمانی گردابه‌ها، بزرگی نوسانات، شکل‌گیری بسته‌های بزرگ سیال و افزایش تناوب جریان عنوان کرد که در نهایت فرصت بیشتری برای اختلاط در این محدوده در اختیار جریان قرار می‌دهد. در مقابل در لبه بیرونی جریان، به‌تدریج خلأهای[۲۰] بیشتری مشاهده می‌شود. ورود بسته‌های بزرگ جریان در این ناحیه نشانه نفوذ بالای سیال محیط به داخل جریان و افزایش اختلاط و تناوب جریان است که باعث کشیده شدن سیال تا خط مرکزی جریان می‌شود. در مرز بالایی، گرادیان منفی چگالی نوسانات غلظت را تعدیل می‌کند. درصورتی‌که در وجه درونی جریان، تاثیر گرادیان چگالی مثبت بوده و نوسانات تشدید می‌شوند. به همین دلیل است که مرز بالایی تیزتر و قابل تشخیص‌تر بوده و به خط مسیر جریان نزدیک‌تر است.

۳ – ۱– تغییرات عرضی مشخصات جریان

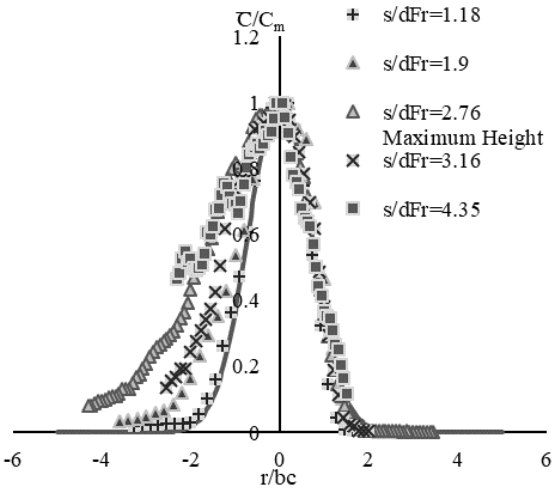
به‌منظور ارزیابی کمی رفتار آشفته جریان در امتداد مسیر، نیمرخ‌های غلظت، شدت آشفتگی و تناوب برای مقاطع عمود بر خط مرکزی جریان در فواصل مختلف از منبع تخلیه ترسیم شده‌اند. این فواصل که باتوجه به طول خط مسیر از منبع تخلیه تا مقطع مورد نظر (s) تعریف شده‌اند، با تقسیم شدن به حاصلضرب قطر نازل d، در عدد فرود چگالی آزمایش Fr_0، نرمال شده‌اند (dFr_0) و عبارت‌اند از: $s/dFr_0 = 1.18,1.9,2.76,3.16,4.35$. برای مهیا شدن امکان مقایسه مشخصات جریان آشفته در رژیم جت شکل و پلوم شکل، دو مقطع اول پیش از ماکزیمم ارتفاع (در بخش جت شکل)، مقطع سوم در ماکزیمم ارتفاع و دو مقطع آخر پس از ماکزیمم ارتفاع (در رژیم پلوم شکل) پیش‌بینی شده‌اند. با استفاده از نمودارهای فوق و با تعقیب تغییرات رفتار آشفتگی جریان در انتقال آن از رژیم جت به پلوم، می‌توان به شناخت بهتری از تأثیرات آشفتگی بر فرایند اختلاط و ترقیق این نوع جریان‌ها دست یافت. تغییرات مشاهده‌شده در محیط‌های ساکن، ناشی از مصالحه میان نرخ القاء و اضمحلال انرژی جنبشی در امتداد جریان است که حاصل تأثیرات مومنتم و شناوری اولیه خروجی و مشخصات سیال محیط می‌باشد.

۳ – ۱– ۱– نیمرخ غلظت

در شکل ۳، نیمرخ متوسط زمانی غلظت برای ۵ مقطع عمود بر خط مرکزی جریان در فواصل متفاوت نسبت به منبع تخلیه ترسیم شده‌است. این مقاطع در فاصله کافی از دهانه تخلیه و در ناحیه جریان توسعه یافته ترسیم شده‌اند. در محور عمودی، غلظت میانگین هر نقطه از جریان نسبت به غلظت ماکزیمم ($\overline{C}/C_m$)، بی‌بعد شده‌است که در آن C_m حداکثر غلظت در آن مقطع می‌باشد. در محور افقی نیز فاصله شعاعی هر نقطه از مرکز جریان (r)، نسبت به فاصله شعاعی متناظر با غلظتی برابر با $1/e = 37\%$ غلظت ماکزیمم (b_c) نرمال شده‌است [۵]. مقادیر مثبت r در محور افقی وجه بالایی و مقادیر منفی آن وجه درونی جت تخلیه‌شده را نشان می‌دهند. به دلیل آنکه این نیمرخ‌ها نامتقارن هستند، b_c با استفاده از برازش بر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.12.2]

وجه بالایی جریان برداشت شده‌است. خط سیاه ترسیم‌شده در این شکل تابع توزیع نرمال را نشان می‌دهد و امکان مقایسه نیمرخ‌ها را با این توزیع غلظت فراهم می‌سازد. با توجه به منحنی برازش‌شده می‌توان مشاهده کرد که مقادیر غلظت در این مقاطع از الگوی توزیع نرمال تبعیت می‌کنند. همچنین متغیر s فاصله مقطع مورد نظر تا دهانه نازل در امتداد خط مرکزی جریان بوده که نسبت به حاصلضرب قطر نازل d، در عدد فرود چگالی آزمایش Fr_0، نرمال شده‌است (dFr_0).



شکل ۳- نیمرخ‌های خودهمسان غلظت در مقاطع عمود بر خط مسیر در فواصل مختلف از منبع تخلیه

نیمرخ غلظت در نقطه اوج در فاصله نرمال شده‌ای برابر با $s/dFr_0 = 2.76$ از منبع قرار دارد. در مراجع [۲, ۱۱, ۱۵] اشاره شده‌است که پس از این نقطه، جریان وارد رژیم پلوم شکل می‌شود. همانطور که در علائم شکل ۳ دیده می‌شود، با دور شدن از منبع تخلیه میزان عدم تطابق نیمرخ غلظت با توزیع نرمال در وجه داخلی جریان افزایش یافته و نمودار تقارن خود را از دست می‌دهد. این عدم تقارن حاصل ناپایداری ناشی از شناوری منفی[۲۱] فاضلاب خروجی است که پیشتر به آن اشاره شد. به این ترتیب در لبه داخلی جریان گرادیان ناپایدار چگالی سبب افزایش پخشیدگی می‌شود. به‌طور کلی برآیند نیروهای اختلاطی در هر دو وجه جریان باعث بازشدگی و ترقیق جریان می‌شود. درحالی‌که در وجه پایینی به دلیل آنکه این نیرو توسط شناوری منفی پساب تشدید می‌شود، بسته‌های جریان دوباره به مسیر اصلی باز نمی‌گردند و باعث عدم تقارن جریان می‌شوند [۱۷].

۳ – ۱– ۲– نیمرخ شدت آشفتگی

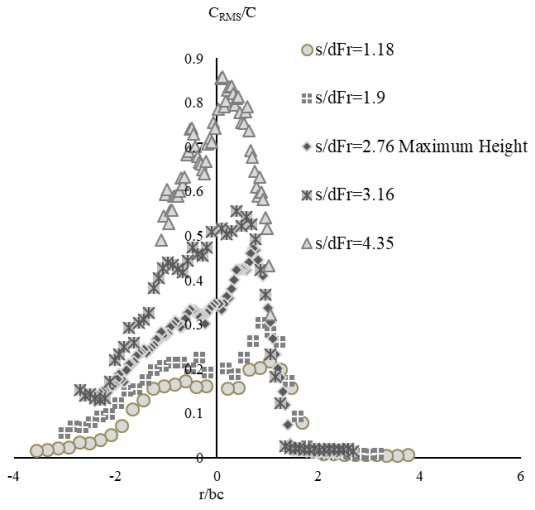
در پژوهش‌های آماری، برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های نوسانی یک کمیت فیزیکی به‌طور معمول از تعریف جذر متوسط مربعات آن استفاده می‌شود. در مطالعه جریان‌های آشفته، با اندازه‌گیری سرعت یا غلظت جریان در فرکانس بالا و تعین کمیت این نوسانات، شدت آشفتگی نوسانات (غلظت) به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌گردد:

$$\Im = \frac{C_{RMS}}{\overline{C}} = \frac{\sqrt{\overline{C'^2}}}{\overline{C}} \qquad (۴)$$

در این رابطه، C' مولفه نوسانی غلظت یا همان میزان انحراف لحظه‌ای غلظت از مقدار متوسط جریان در آن نقطه است. $\overline{C}$ نیز اندازه غلظت متوسط یک نقطه در طول زمان است که برای طول زمان آزمایش (۸۸ ثانیه در این پژوهش) میانگین‌گیری شده‌است. با توجه به رابطه (۵) غلظت در هر نقطه را می‌توان از جمع غلظت میانگین با نوسان لحظه‌ای به‌دست آورد.

$$C = C' + \overline{C} \qquad (۵)$$

در شکل ۴ نمودار شدت آشفتگی برای ۵ نیمرخ عمود بر خط مرکزی جریان در فواصل مختلف از منبع تخلیه، ترسیم شده‌است. برای محاسبه میزان شدت آشفتگی، داده‌ها فیلتر و با نرخ ۱۰ فریم بر ثانیه استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مقاطع انتخاب شده، همان مقاطع مورد استفاده در شکل ۳ هستند. مقایسه شدت آشفتگی در این نیمرخ‌ها، تصویر جامعی از تغییر شدت آشفتگی در انتقال جریان از حالت جت به پلوم فراهم می سازد.



شکل ۴- نیمرخ شدت آشفتگی در مقاطع عمود بر خط مسیر در محدوده جت مانند و پلوم شکل جریان

در مراجع [۱۴] و [۱۳] با مطالعه روی تخلیه عمودی جت‌های با شناوری منفی، نمودار شدت آشفتگی در بخش جت شکل دارای دو قله متقارن گزارش شده است که مقادیر آنها برابر با ۰/۲۲ بوده و متناظر با نقاط $r/b_c = \pm 0.8$ هستند. همچنین میزان شدت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.12.2]

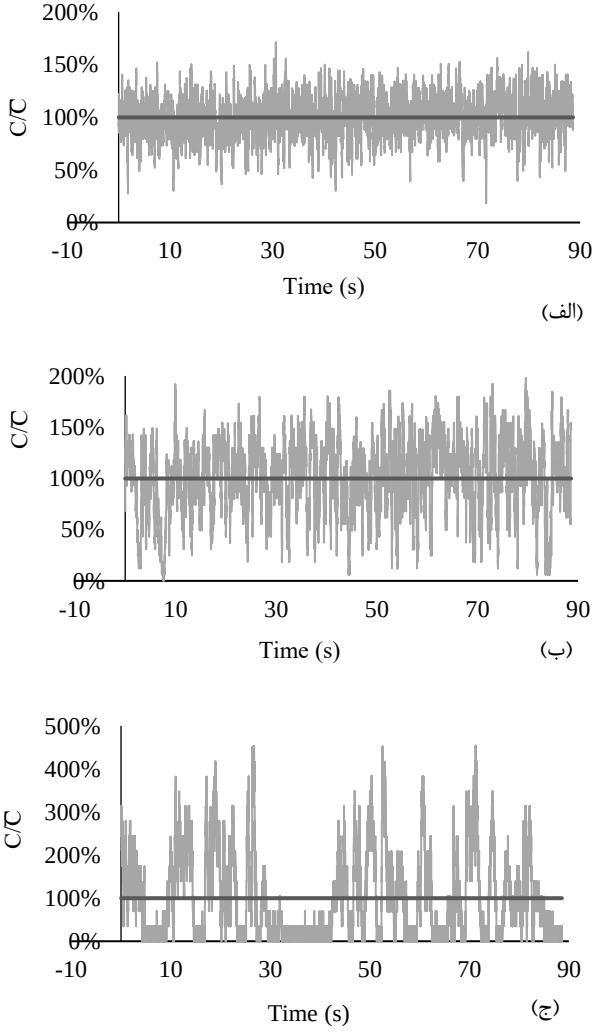
آشفتگی در $r/b_c = 0$ برابر با ۰/۲ محاسبه شده‌است. در پژوهش فوق نمودار شدت جریان در بخش پلوم شکل بر خلاف قسمت جت شکل، تنها دارای یک رأس روی خط مرکزی جریان بوده و مقدار آن تقریباً برابر با ۰/۴۴ گزارش شده‌است. در این جریان‌ها میزان نوسانات و در نتیجه شدت آشفتگی با حرکت از محدوده جت به سمت پلوم، ضمن افزایش میزان تناوب، افزایش می‌یابد. در مقابل، در نمودارهای شدت آشفتگی ارائه‌شده در مرجع [۱۵] مقادیر شدت آشفتگی دارای دو قله نامتقارن است که رأس وجه بیرونی آن از دارای مقدار بزرگتری است. در این پژوهش مشاهده شده‌است که با تغییر رژیم از جت به پلوم، قله درونی به‌تدریج مضمحل می‌شود. بدیهی است که این عدم تقارن ناشی از تخلیه مورب و تأثیر ممنتوم ناشی از شناوری منفی است. نیمرخ‌های شدت آشفتگی ترسیم‌شده در پژوهش حاضر (شکل ۴) از تطابق خوبی با مرجع [۱۵] برخوردار است. با توجه به شکل ۴ می‌توان اظهار داشت که با دور شدن از منبع تخلیه، نقطه متناظر با قله، به‌تدریج به سمت خط مرکزی جریان متمایل شده و میزان آن افزایش قابل‌توجهی می‌یابد. همچنین مقایسه شدت آشفتگی برای مقاطع مختلف نشان می‌دهد که با دور شدن از منبع تخلیه، تغییر شیب این نیمرخ‌ها در وجه درونی جریان و برای مقادیر منفی r، بسیار بیشتر از وجه خارجی جریان است. از این‌رو می‌توان بیان داشت که تغییر رژیم جریان بر وجه درونی تأثیر بیشتری داشته‌است. اختلاف قابل توجه شدت آشفتگی را در وجه درونی و بیرونی (به‌ویژه برای نیمرخ‌های رسم‌شده در مقاطع پس از ماکزیمم ارتفاع) شاید بتوان ناشی از تأثیر پایداری گرادیان چگالی در لبه بالایی دانست که تمایل جریان به حفظ شرایط موجود و مهار اختلاط را بیشتر می‌کند. به این ترتیب، شدت نوسانات برای لبه بالایی مقدار بیشتری به خود اختصاص می‌دهد.

در نمودارهای شکل ۴ حداکثر میزان شدت آشفتگی در نیمرخ ماکزیمم ارتفاع برابر با ۴۷ ٪ محاسبه شده است. در مرجع [۱۸] حداکثر شدت آشفتگی برای نیمرخ غلظت در مقطع ماکزیمم ارتفاع در حدود ۵۰٪ گزارش شده‌است.

۳ – ۱– ۳– نیمرخ تناوب

تناوب به میزان دفعاتی که غلظت در نقطه مورد بررسی از حد آستانه مشخص شده‌ای کمتر باشد، اطلاق می‌گردد. بنابراین میزان تناوب صفر برای یک ناحیه نشان‌دهنده آن است که در طول زمان آزمایش غلظت آن نقطه هیچ‌گاه از حد آستانه مشخصی کمتر نمی‌شود. در مقابل، تناوب ۱ برای یک نقطه به این معنی است که در آن نقطه میزان غلظت همواره از حد آستانه کمتر است. در واقع چرخش گردابه‌ها در یک نقطه ثابت و ورود سیال محیط به جریان، گاهی باعث عدم وجود بسته‌هایی از جریان خروجی می‌شود. این امر طبیعتاً بیشتر در لبه‌های جریان اتفاق می‌افتد که گردابه‌های بزرگ در حال کشیده شدن به مرکز جریان هستند. درحالی‌که برای نقاط نزدیک به خط مرکزی جریان، در بیشتر مواقع غلظت میزان قابل‌توجهی داشته، خلأهای کمتری مشاهده شده و تناوب از مقادیر کمتری برخوردار است [۱۵].

در شکل ۵ نوسانات غلظت در امتداد مسیر جریان، برای سه نقطه متفاوت آورده شده‌است. این شکل با استفاده از برداشت داده‌ها با نرخ ۱۰ فریم بر ثانیه رسم شده‌است.



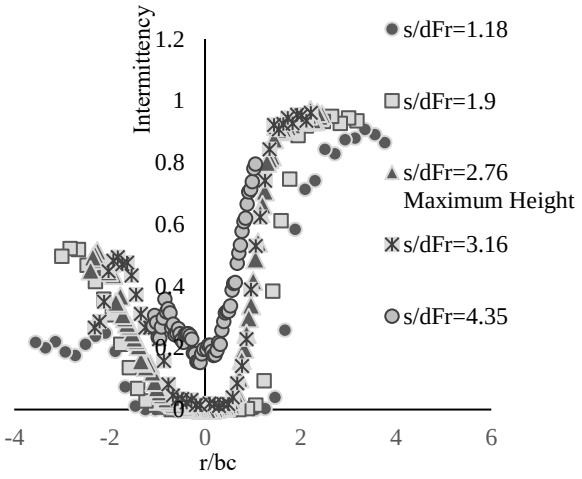
شکل ۵- نوسانات غلظت در نقطه، (الف): جت $s = 0.5s_m$ (ب): ماکزیمم ارتفاع $s = s_m$ (ج): پلوم $s = 1.5s_m$

در نمودار شکل ۵، C' میزان انحراف غلظت لحظه‌ای از مقدار میانگین است که با تقسیم بر غلظت میانگین ($\overline{C}$)، بی‌بعد شده- است. با توجه به شکل ۵ می‌توان مشاهده نمود که برای نقطه الف که در بخش جت شکل واقع شده‌است، تناوب بسیار کم می‌باشد. در نمودارهای (ب) و (ج) شکل ۵ که به‌ترتیب مربوط به نقاطی در نقطه ماکزیمم ارتفاع و ناحیه پلوم شکل هستند، می‌توان مشاهده نمود که تناوب به‌تدریج افزایش می‌یابد به‌طوری‌که برای نمودار (ج)،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.12.2]

زمان‌های بسیاری وجود دارند که غلظت در آنها به صفر رسیده است. این زمان‌ها در واقع نشان‌دهنده چرخش گردابه‌ها و گذر خلأهای ذکرشده از نقطه موردنظر هستند. همچنین می‌توانند نشانه نفوذ سیال اطراف تا مرکز جریان تخلیه‌شده باشند. توضیحات ذکرشده این فرض را که تناوب قابل توجه، از مشخصات قسمت پلوم شکل است، تأیید می‌کنند.



شکل ۶- تناوب در مقاطع عمود بر خط مسیر جریان در فواصل مختلف از منبع تخلیه

شکل ۶ نشان‌دهنده میزان تناوب در پروفیل‌های پنج‌گانه مورد اشاره است. نرخ برداشت داده‌ها برای رسم پروفیل تناوب برابر با ۱۰ فریم بر ثانیه بوده‌است. از این شکل می‌توان دریافت که برای رژیم جت شکل در مرکز جریان میزان تناوب برابر با صفر است و با حرکت به سمت هر کدام از دو وجه، مقدار تناوب شروع به افزایش می‌کند. مقادیر کمتر تناوب در لبه پایینی نسبت به وجه بالایی، به دلیل بازشدگی جریان و ناپایداری ناشی از شناوری منفی پساب خروجی است. پروفیل تناوب در نهایت به دلیل قطع شدن برش عمودی توسط مرز پایینی تانک توسعه نیافته و کامل نمی‌شود. در این نمودار می‌توان مشاهده نمود که در لبه بالایی بزرگ‌ترین گردابه‌ها در حال کشانده شدن به مرکز جت می‌باشند که با داشتن مرزهای قابل تعریف‌تر این وجه، سبب افزایش تناوب می‌شوند. درحالی‌که در لبه پایینی، اختلاط بیشتر از آنکه در نتیجه چرخش گردابه‌ها و فرو رفتن سیال اطراف به مرکز جریان باشد، به دلیل ناپایداری ناشی از شناوری است. در این وجه، فرار بسته‌های سیال از جریان اصلی زیاد بوده و شدت تناوب کمتر است. نکته حائز اهمیت آنکه، برای مقاطع پیش از ماکزیمم ارتفاع (ناحیه جت شکل)، ناحیه غیرمتناوب (ناحیه با تناوب صفر) نامتقارن است. تناوب وجه بالایی تقریباً پس از $r/b_c = 0.5$ با شیب قابل توجهی افزایش می‌یابد. درحالی‌که تناوب لبه درونی تا $r/b_c = -0.9$ همچنان برابر با صفر بوده و با افزایش فاصله شعاعی با شیب کمتری افزایش می‌یابد. پس از مقطع $s/dFr = 2.76$ که معرف ماکزیمم ارتفاع است، تناوب در نقاط اطراف خط مسیر نیز به تدریج از میزان صفر افزایش می‌یابد. این امر در نتیجه نفوذ سیال اطراف به مرکز جریان تخلیه‌شده روی می‌دهد. تناوب صفر در مرکز جریان تخلیه‌شده، از ویژگی‌های بخش جت شکل جریان است. لذا رفتار جریان در موقعیت ماکزیمم ارتفاع را می‌توان بیشتر متمایل به رژیم جت دانست. این موضوع در مراجع [۱۴, ۱۹] نیز مورد تأکید قرار گرفته‌است. همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود با عبور از نقطه ماکزیمم ارتفاع، ناحیه غیرمتناوب در مسیر جریان کاملاً از بین رفته و دیگر وجود نخواهد داشت. این امر نشان‌دهنده وجود رژیم پلوم شکل در این ناحیه است.

۳- ۲- رفتار جریان آشفته در امتداد خط مرکزی

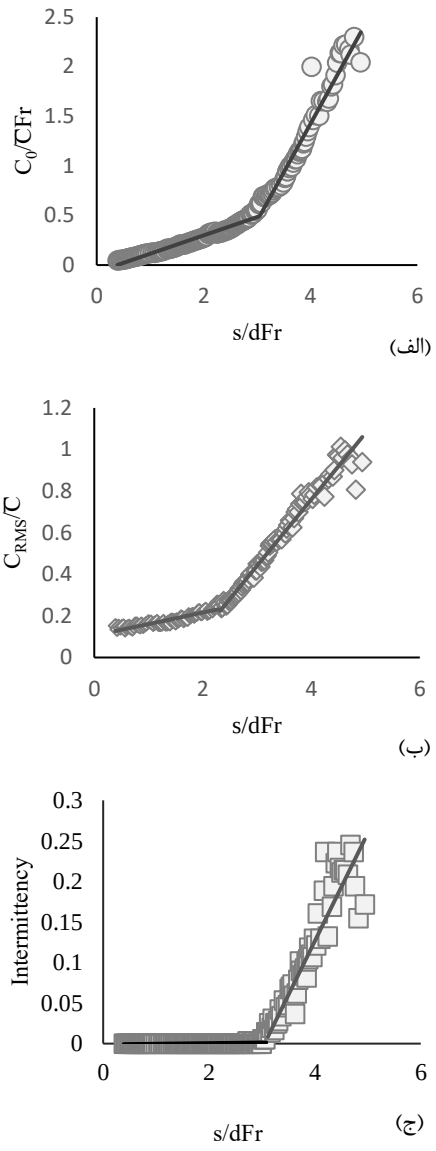
در این قسمت، پارامترهای جریان آشفته در امتداد مسیر و موقعیت انتقال از رژیم جت شکل به پلوم شکل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل۷ (الف)، (ب) و (ج) به‌ترتیب نیمرخ تغییرات ترقیق، شدت آشفتگی و تناوب در طول خط مرکزی جریان آورده شده‌اند. در محور افقی این نمودارها، طول خط مرکزی جریان (s) با تقسیم بر حاصلضرب قطر نازل در عدد فرود چگالی (s/dFr) بی‌بعد شده‌است. در شکل ۷ (الف) در محور عمودی، ترقیق با تقسیم بر عدد فرود چگالی نرمال شده‌است. میزان ترقیق در هر نقطه مطابق با رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$Dilution = \frac{C_0 - C_a}{C - C_a} \qquad (۶)$$

که در آن C_0 غلظت اولیه سیال تخلیه‌شده، C_a غلظت محیط و C غلظت میانگین در نقطه موردنظر است. در محور عمودی شکل ۷ (الف)، ترقیق با استفاده از عدد فرود چگالی اولیه بی‌بعد شده‌است. در این شکل مشاهده می‌شود که تغییر در شیب نمودار ترقیق در محدوده $s/dFr = 3$ اتفاق می‌افتد. مشابه آنچه که در مراجع [۶, ۱۳] پیشتر گزارش شده بود. این نقطه را می‌توان نقطه انتقال جریان از رژیم جت به پلوم دانست. اختلاط قابل توجه از مشخصات جریان در ناحیه پلوم شکل بوده آن‌چنان‌که پس از نقطه شکست، افزایش شیب در میزان ترقیق جریان به نحو آشکار مشاهده می‌گردد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.12.2]



شکل ۷ - تغییرات در طول خط مسیر، (الف): ترقیق (ب): شدت آشفتگی (ج): تناوب

در شکل ۷ (الف)-(ج)، مشاهده می‌شود که خطوط برازش داده‌شده در نقطه‌ای نزدیک به نقطه متناظر با نمودار ترقیق، تغییر شیب می‌دهند. تغییر شیب ذکرشده در نمودار شدت آشفتگی در نقطه $s/dFr = 2.5$ و در نمودار تناوب در نقطه‌ای متناظر با $s/dFr = 3$ رخ داده‌است. تغییر شیب در نمودار ترقیق و تناوب با دقت قابل قبولی بر هم منطبق هستند ولی برای نمودار شدت آشفتگی این تغییر در فاصله‌ای کمتر نسبت به منبع تخلیه آغاز می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که برای وارد شدن جریان به رژیم پلوم شکل، کمی پیش از آنکه شیب تغییر تناوب و ترقیق افزایش یابد، نرخ تغییر شدت آشفتگی به‌طور چشم‌گیری زیاد می‌شود. به‌طوری‌که برای تغییر رژیم ابتدا القای آشفتگی اتفاق افتاده و نوسانات غلظت یا فاصله غلظت‌های لحظه‌ای از غلظت میانگین افزایش می‌یابد. بعد از آن، تأثیر تشدید نوسانات آشفتگی در افزایش تناوب و میزان ترقیق جریان در امتداد خط مرکزی مشاهده خواهد شد.

۴ – نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف درک بهتر تغییر رفتار جریان پساب‌های شور تخلیه‌شده از آب‌شیرین‌کن‌ها در محیط‌های ساکن، در انتقال آنها از رژیم جت شکل به پلوم شکل انجام شده‌است. در این مقاله نیمرخ‌های غلظت میانگین برای بررسی مشخصات جریان میانگین، و نیمرخ‌های شدت آشفتگی و تناوب برای مطالعه پارامترهای وابسته به آشفتگی، در مقاطع عمود بر مسیر جریان برای فواصل مختلف از منبع تخلیه ترسیم شده‌اند. شکل عمومی نمودارهای غلظت نمایانگر آن است که مقادیر غلظت در لبه خارجی جریان برای هر دو رژیم جت و پلوم از توزیع گوسی تبعیت می‌کنند، درحالی‌که این مقادیر پس از ماکزیمم ارتفاع ($s/dFr_0 = 2.76$) و ورود جریان به رژیم پلوم شکل در وجه درونی به دلیل ناپایداری ناشی از شناوری، از توزیع نرمال فاصله می‌گیرند.

نیمرخ‌های شدت آشفتگی نیز نشان می‌دهند که با فاصله گرفتن از منبع تخلیه، میزان نوسانات غلظت و در نتیجه شدت آشفتگی به‌تدریج افزایش می‌یابد. این مقادیر از 0.15 برای $s/dFr = 1.18$ تا 0.7 برای $s/dFr = 4.35$ زیاد می‌شوند.

به دلیل اختلاط زیاد که از ویژگی‌های رژیم پلوم شکل است، و همچنین ورود سیال ساکن اطراف به جریان تخلیه‌شده، تناوب به‌تدریج زیاد می‌شود. همین امر باعث می‌شود که برخلاف ناحیه جت شکل، پس از $s/dFr_0 = 2.76$ با ورود جریان به رژیم پلوم شکل، در اطراف خط مسیر جریان نیز مقادیر تناوب از صفر بیشتر باشند.

با توجه به نمودارهای ترسیم‌شده در امتداد خط مسیر که نشان‌دهنده مقادیر ترقیق، شدت آشفتگی و تناوب هستند، مشاهده شده است که شیب تغییر شدت آشفتگی نسبت به ترقیق و تناوب، در فاصله کوتاه‌تری از منبع تخلیه ($s/dFr = 2.5$) با افزایش ناگهانی مواجه می‌شود. در واقع برای تغییر رژیم جریان قبل از آنکه اختلاط افزایش یابد، نوسانات غلظت هستند که افزایش می‌یابند. با توجه به نتایج می‌توان گفت که تغییر شیب پارامتر شدت آشفتگی در فاصله‌ای معادل با $s/dFr = 2.5$ اتفاق می‌افتد. درحالی‌که تناوب و ترقیق پس از $s/dFr = 3$ آغاز به افزایش می‌کند. به این معنی که در جریان‌های آشفته، القای آشفتگی و در نتیجه ناپایداری در مرزها و نوسانات قدرتمند در جریان است که پیش‌نیاز و عامل ایجاد اختلاط، تشدید تناوب و افزایش ترقیق در جریان هستند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.12.2]

۵- کلید واژگان

1- Multi Effect Desalination (MED)
2- Multi Stage Flash (MSF)
3- Reverse Osmosis (RO)
4- United States Environmental Protection (USEP)
5- United States Army of Engineering (USAE)
6- Royal Commission on Environmental Pollution (ACEP)
7- Buoyant Jet
8- Laser-Induced Fluorescence (LIF)
9- Light Attenuation (LA)
10- Light Intensity (LI)
11- Particle Tracking Velocity (PTV)
12- Laser Doppler Anemometer
13- Root Mean Square (RMS)
14- Intermittency
15- Georgia Institute of Technology
16- Mars
17- Gray Scale
18- NaCl
19- Entrainment Flux
20- Gaps
21- Buoyancy-driven Instability

۶- مراجع

1- Dawoud, M.A., (2011), *Water import and transfer versus desalination in arid regions: GCC countries case study*, Journal of Desalination and Water Treatment, Vol.28, Issue 1-3, p.153-163.

2- Shao, D. and Law, A.W.K., (2010), *Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets*, Journal of Environmental Fluid Mechanics, Vol.10, Issue 5, p.521-553.

3- Lattemann, S. and Höpner, T., (2008), *Environmental impact and impact assessment of seawater desalination*, Journal of Desalination, Vol.220, Issue 1-3, p.1-15.

4- Roberts, P.J., A. Ferrier, and Daviero, G., (1997), *Mixing in inclined dense jets*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.123, Issue 8, p. 693-699.

5- Abessi, O. and Roberts, P.J., (2015), *Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.141, Issue 8, 06015009.

6- Oliver, C., (2012), *Near field mixing of negatively buoyant jets*, University of Canterbury, Department of Civil and Natural Resources Engineering, p. 233.

7- Zeitoun, M., (1970), *Conceptual designs of outfall systems for desalting plants*.

8- Pincince, A.B. and List, E.J., (1973), *Disposal of brine into an estuary*, Journal of Water Pollution Control Federation, Vol.45, Issue 11, p. 2335-2344.

9- Roberts, P.J. and Toms, G., (1987), *Inclined dense jets in flowing current*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.113, Issue 3, p. 323-340.

10- Tian, X. and Roberts, P.J., (2003), *A 3D LIF system for turbulent buoyant jet flows*, Journal of Experiments in Fluids, Vol.35, Issue 6, p. 636-647.

11- Kikkert, G.A., Davidson, M.J. and Nokes, R.I., (2007), *Inclined negatively buoyant discharges*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.133, Issue 5, p.545-554.

12- Abessi, O., Saeedi, M., Hajizadeh, N.Z. Kheirkhah, H.G., (2012), *Waste field characteristics, ultimate mixing and dilution in surface discharge of dense jets into stagnant water bodies*, Journal of Water and Wastewater, Vol.23, Issue 1, p.2-14.

13- Wang, H. and Law, A.W., (2002), *Second-order integral model for a round turbulent buoyant jet*, Journal of Fluid Mechanics, Vol.459, p.397-428.

14- Papanicolaou, P.N. and List, E.J., (1988), *Investigations of round vertical turbulent buoyant jets*, Journal of Fluid Mechanics, Vol.195, p.341-391.

15- Oliver, C., Davidson, M.J. and Nokes, R.I., (2013), *Removing the boundary influence on negatively buoyant jets*, Journal of Environmental Fluid Mechanics, Vol.13, Issue 6, p.625-648.

16- Abessi, O., Firoozjaee, A.R., Hamidi, M., Bassam, M.A. and Khodabakshi, Z., (2020), *Three dimensional laser scanning system for illumination of feluorescent flow for the environmental hydraulic investigations*, Journal of Hydraulics, Vol.14, Issue 4, p.69-81. (In Persian)

17- Ghayour, S., Hamidi, M. and Abessi, O., (2019), *Experimental investigation of turbulent flows in submerged sewage discharge of coastal desalination plants*, Journal of Oceanography, Vol.10, Issue 39, p.101-111. (In Persian)

18- Papakonstantis, I.G. Christodoulou, G.C. and Papanicolaou, P.N., (2011), *Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements*, Journal of Hydraulic Research, Vol.49, Issue 1, p.13-22.

19- Lai, C.C. and Lee, J.H., (2012), *Mixing of inclined dense jets in stationary ambient*, Journal of Hydro-environment Research, Vol.6, Issue 1, p.9-28.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.33.12.2]