

An Experimental Study on the Process of Mixing and Dilution for the Discharge of Dense Effluent

Ali Galeshi¹, Ozeair Abessi^{2*}, Mahdi Yousefifard³, Ali Rahmani Firoozjaee²

1- M.Sc. Student, School of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

2- Assistant Professor, School of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

3- Assistant Professor, School of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

* oabessi@nit.ac.ir

Received: 3 April 2022, Accepted: 8 June 2022  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: In recent years, the scarcity of freshwater resources and the increasing water demands due to population growth and industrialization, have turned the issue of supplying drinking water into a global subject. Therefore, exploiting unconventional water resources, such as saline and brackish water using emerging technologies for desalination, has emerged as a promising solution in coastal areas. Desalination through Reverse Osmosis (RO) technology besides freshwater produces brine effluent as a byproduct, which has more salinity and density than the feeding water. Improper disposal of this effluent into coastal bodies will have serious environmental impacts on the receiving environment and can severely affect the aquatic ecosystem. To prevent negative impacts, the effluent is discharged through submerged nozzles diagonally, with a high initial velocity and momentum, at a distance far enough from the shore. Using this method, the outflow is mixed with the seawater due to disturbances and the concentration is reduced down to the tolerance of the marine environment. In this study, the results of an experimental study were reported in the stationary environment to investigate the time evaluation of the discharge, and the process of mixing and dispersion for 60° inclined dense discharge.

Methodology: The planar laser-induced fluorescence technique (PLIF) has been used to capture the flow central plane in this study. The system consisted of two swift scanning mirrors to provide a flat laser sheet across the centerline of the flow. The laser sheet was formed by the oscillation of a 100 milliwatts green Diode-pump solid-state laser (DPSSL) beam with 0.5mm width. With an infinitesimal quantity of a fluorescent dye (Rhodamine 6G), the discharged effluent would be fluoresced under the laser. The reflected light is captured by a CCD camera (Mars 640-300G 1/4"@4.8um) in the grayscale form at the rate of 100 frames per second. The procedures were controlled by a computer server equipped with an I/O board and controlling software and the images were continuously downloaded to the hard disk of the server for later processes. The captured images were then modified and calibrated for laser attenuation and sensor response for each pixel using clear and dyed water of known concentration.

Using this technique, the system can illuminate the instantaneous behavior of the flow and the production, development, and dissipation of turbulent eddies along the flow. By capturing the flow instance behavior, the formation of turbulent eddies and their impacts on turbulent diffusion and flow mixing and entrainment have been investigated. Also, concentration

fluctuations at the centerline, the effects of Kelvin-Helmholtz instability, and shear entrainment on the flow mixing process were discussed.

Results and Discussion: By illuminating the flow behavior, the development of flow regimes in jet and plume-like regions and the formation of instabilities, and the dissipation of eddies were studied. For this purpose, the instantaneous images of the flow evolution for different times were extracted and depicted using a non-dimensional parameter developed specifically for this purpose. The different processes of flow mixing and dilution along the jet and plume regions were analyzed by describing the physics of eddies formation and dissipation long the inertial subrange. The formation of flow packets out of the main path is affected by the intensity of velocity fluctuations. The vortices take their energy from the averaged velocity and transfer it from the biggest formed scale i.e. integral scale to the smallest vortices i.e. Kolmogorov's viscous subrange in a cascade of energy. The Energy Cascade is basically an energy spectrum that characterizes the turbulent kinetic energy distribution as a function of length scale. The scales of turbulent structures are directly a function of velocity fluctuation in each region and direct the process of the entrainment that led to the increases of dilution from the nozzle tip to the seafloor. These days, numerical simulations are becoming a common way of modeling the brine discharge in the marine environment. It is time-consuming and needs high expertise. The models are usually unsteady and after full development, the flow time-averaged image of the last 45 to 60 seconds is used for identifying the flow geometrical and mixing behavior. Using these experiments, it observed that the non-dimensional time required to flow fully developed and reach the impact point is about $T^*=5.7$. Knowing that will help engineers find the optimal duration of time needed for the simulation and modeling.

Conclusion: It is known through the basics of physics that the maximum range for projectile motion happens when it is launched at an angle of 45 degrees. However, the previous experiments exhibited that the maximum dilution at the impact point occurs at the nozzle with 60° inclinations where the flow path is the longest. It was carefully examined by explaining the complex action of turbulence on flow mixing and dilution. The formation of eddies initially begins due to Kelvin-Helmholtz instability and it leads to velocity fluctuations with different time and length scales in the body of flow. The result is concentration dispersion with different magnitudes along the flow path in inclined dense discharges.

Keywords: Dense Jet, Desalination Plant, Brine Discharge, Mixing, Environment.



© 2022 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی آزمایشگاهی فرایند اختلاط و ترقیق در تخلیه جریان‌های چگال

علی گالشی موزیرجی^۱، عزیز عابسی^{۲*}، مهدی یوسفی فرد^۳، علی رحمانی فیروزجائی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط‌زیست دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳- عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

* oabessi@nit.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: در سال‌های اخیر، با توجه به کمبود آب شیرین در سطح جهان و افزایش روزافزون مصرف آب به دلیل افزایش جمعیت و صنعتی شدن جامعه، تامین آب آشامیدنی به یک معضل جهانی تبدیل شده است. از این رو بشر به استفاده از منابع‌های آب نامتعارف، مانند آب شور دریاها و اقیانوس‌ها، روی آورده است تا با کمک فناوری نمک‌زدایی به روش‌های متفاوت، نیاز آبی خود را مرتفع‌سازد. در فرآیند اسمز معکوس برای تولید آب شیرین از دریا، آب شور برداشت شده و بخشی از آن شیرین و مابقی با شوری و چگالی بیشتر به محیط دریا بازگردانده می‌شود. بازگرداندن پساب بسیار شور تولیدی، اگر به نحو مناسب صورت نپذیرد، به یک معضل جدی برای محیط پذیرنده تبدیل شده و محیط زندگی آبریان دریایی را تحت‌تاثیر قرار خواهد داد. برای پرهیز از این مشکل، پساب تولیدی از طریق نازل‌هایی مستغرق به صورت مورب و با سرعت و مومنتم اولیه بالا در فاصله کافی از ساحل تخلیه می‌شود. بر اثر آشفتگی‌های ایجاد شده، جریان خروجی با آب دریا اختلاط یافته و غلظت آن تا حد تحمل محیط کاهش می‌یابد. در این پژوهش، تخلیه پساب شور از یک تخلیه‌کننده تک‌مجریایی در محیط ساکن از طریق مدل‌سازی آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته و توسعه زمانی جریان نشان می‌دهد جت خروجی در زمان بی بعد $T^*=0.57$ از آغاز تخلیه در نهایت به بستر محیط پذیرنده می‌رسد. همچنین اندازه نوسانات غلظت که بیانگر شدت و قدرت آشفتگی جریان می‌باشد، در امتداد مسیر جریان از دهانه نازل تا نقطه برخورد به تدریج افزایش می‌یابد.

کلیدواژگان: جت چگال، آب شیرین کن، تخلیه فاضلاب، اختلاط، محیط زیست.

۱- مقدمه

آن هم در سطح زمین به طور یکسان پراکنده نشده است. مطابق با آمار بیش از ۱/۴ میلیارد نفر از مردم زمین (معادل با یک پنجم جمعیت کل) با چالش‌های جدی کم آبی روبه‌رو هستند (Oliver, 2012). شهرهای ساحلی با وجود آنکه تنها ۱۸ درصد از سطح زمین را پوشانده‌اند، حدود ۶۰ درصد جمعیت جهان را در خود جای داده‌اند. توسعه شهرنشینی و رشد روزافزون جمعیت و فعالیت‌های صنعتی در این مناطق، افزایش بی‌سابقه حجم پساب را در پی داشته است. بخش مهمی از پساب‌های تخلیه شونده در

بر مبنای برآوردها، حجم کل پیکره آبی موجود روی کره زمین به ۱.۳۸۶ میلیارد کیلومتر مکعب می‌رسد و اقیانوس‌ها در حدود ۷۱ درصد سطح زمین را پوشانده‌اند. این پیکره عظیم آبی بزرگ‌ترین بوم سامانه طبیعی سطح زمین به شمار رفته و مملو از گونه‌های متنوع جانوری و گیاهی می‌باشد. با وجود این حجم خیره‌کننده، عمده آب زمین به صورت شور در اقیانوس‌ها ذخیره شده و میزان بسیار کمی به صورت آب شیرین در دسترس می‌باشد که

ویژگی‌های پیکره آبی پذیرنده بر آن غلبه می‌یابد. فاز دوم، ناحیه اختلاط میدان دور می‌باشد که در آن اختلاط توسط فرآیندهای انتقال و آشفتگی محیط کنترل می‌شود و مشخصات نازل و شارهای خروجی، تاثیری در اختلاط پساب در محیط ندارند. فاز سوم و نهایی اختلاط جریان در محیط که تحت تاثیر جریان‌های بزرگ مقیاس بوده، محدوده بلند مدت پخش جریان در محیط^۱ را تشکیل داده که در نهایت باعث ایجاد غلظت‌های پیش زمینه‌ای آلاینده در محیط می‌شود. در این محدوده جریان تخلیه شده تحت تاثیر جذر و مد، جریان‌های بزرگ مقیاس، اختلاف فشار و تاثیر نیروی کوریولیس قرار می‌گیرد.

رفتار جریان در امتداد میدان نزدیک از نازل‌های مورب ۶۰ درجه در ادامه توسط Roberts and Tom (1987) و Roberts et al. (1997) به صورت آزمایشگاهی بررسی و ارزیابی شده است. در این بررسی‌ها با استفاده از تحلیل‌های ابعادی و به روش مقیاس طولی، معادله‌های پیش‌بینی ویژگی‌های جریان برای جت سنگین در محیط‌های متحرک و ساکن ارائه و رفتار جریان در امتداد ناحیه اختلاط اولیه بررسی شده است. Wang and Law (2002) برای بررسی آزمایشگاهی فرایند تخلیه جت‌های سنگین عمودی در محیط ساکن از روش‌های PLIF و DPTV استفاده کردند. در این مطالعه آنان نوسان‌های آشفتگی و تغییرات غلظت در مقطع‌های عمود بر محور مرکزی جت و پلوم را بررسی کردند. در پژوهشی دیگر Oliver et al. (2013) آشفتگی جریان در پدیده تخلیه جت سنگین مورب در زاویه‌ها و اعداد فرود مختلف را به روش LIF بررسی کردند. مشاهدات آنان بیانگر آن است که در جت‌های سنگین مایل، نوسان‌های غلظت در لبه پایینی جریان با سرعت بیشتری نسبت به لبه بالایی مضمحل می‌شود. این موضوع باعث اختلاط مضاعف جریان در ناحیه پایینی از طریق تسریع فرآیند کشیده شدن سیال محیط به درون جریان می‌شود. در نتیجه نیمرخ غلظت در لبه بالایی بر الگوی توزیع گوسی منطبق بوده، در حالی که در لبه پایینی شرایط به کلی متفاوت است.

دریا را، پساب شور و سنگین آب‌شیرین‌کن‌های ساحلی تشکیل می‌دهند که در سال‌های اخیر برای تامین نیاز فزاینده آب آشامیدنی شهرهای ساحلی توسعه یافته‌اند. این پساب‌ها به طور معمول از طریق تخلیه مستقیم در محیط دریا و اقیانوس به طبیعت باز گردانیده می‌شوند. با تخلیه و ترقیق پساب در محیط از طریق انواع تخلیه‌کننده‌های تک‌مجریایی، چندمجریایی یا سطحی، می‌توان غلظت آلاینده‌ها را تا میزان قابل پذیرش در دریا کاهش داد و به این ترتیب از پیامدهای زیانبار محیط زیستی احتمالی آن جلوگیری کرد. تخلیه شورابه افزون بر آنکه تاثیرهای نامناسب ظاهری همچون ایجاد بوهای ناخوشایند و تخریب چشم‌اندازها را به دنبال دارد، به دلیل چگالی بیشتر از آب دریا، با ته‌نشینی بر روی بستر، می‌تواند خطرهای جدی برای بوم سامانه دریا و جانداران متنوع آن اعم از انواع پلانکتون‌ها و بنتوزها به همراه داشته باشد (Abessi et al., 2011). از این‌رو تخلیه پساب‌های شور با زاویه نسبت به افق در خور یا عمق دریا و در فاصله کافی از ساحل، به عنوان راهکاری برای کمینه‌سازی پیامدهای محیط زیستی به صورت گسترده استفاده می‌شود (Abessi, 2018).

Zeitoun et al. (1970) از نخستین محققانی بودند که به بررسی رفتار تخلیه جریان‌های شور و چگال با زاویه‌های مختلف اقدام کرده‌اند. ایشان با بررسی تاثیر زاویه تخلیه بر فرایند اختلاط و ترقیق، در نهایت زاویه ۶۰ درجه را به عنوان زاویه بهینه طراحی که درازترین مسیر و بیشترین میزان ترقیق را فراهم می‌سازد، پیشنهاد کردند. Pincine and list (1973) برای برآورد میزان ترقیق و رفتار جریان پساب سنگین در پیکره‌های آبی اقدام به انجام مطالعاتی بر روی فرآیند اختلاط در شرایط گوناگون تخلیه و محیط‌پذیرنده کردند. آنان گزارش کردند، پساب‌های خروجی تحت تاثیر سه مرحله، در پیکره‌های آبی پذیرنده انتقال یافته و پخش می‌شوند. مرحله اول، فاز اختلاط اولیه است که طی آن، شارهای جریان خروجی از نازل تعیین کننده رفتار جریان می‌باشد. در انتهای ناحیه اختلاط اولیه، آشفتگی ایجاد شده توسط مومنوم اولیه جریان به تدریج از بین رفته و آشفتگی ناشی از

1 Long term flushing

تحلیل آزمایش‌ها کرده و در نهایت تصویرهای لحظه‌ای پردازش شده در زمان، میانگین‌گیری شده و مورد تحلیل قرار می‌گیرند. این روند اگرچه در مطالعات آزمایشگاهی متداول است، در شبیه‌سازی‌های عددی می‌تواند بسیار زمان‌بر بوده و هزینه محاسبه بسیار بالایی را به فرایند مدل‌سازی تحمیل کند. از این‌رو در این مطالعه از طریق ثبت توسعه زمانی جریان در آزمایشگاه، نسبت به بی‌بعدسازی زمانی و تحلیل رقومی نتایج به دست آمده در تخلیه پساب‌های شور از نازل‌های مورب در محیط ساکن اقدام شده است. در این مطالعه با ارزیابی بزرگی و شدت نوسان‌های غلظت، فرایند اختلاط و پخشیدگی جریان در امتداد ناحیه جت و پلوم شکل نیز بررسی شده است. با ثبت و تحلیل نوسان‌های غلظت جریان با تواتر بالا، رفتار اختلاطی جریان و تاثیر شارهای اولیه خروجی بر توسعه زمانی آن در تخلیه فاضلاب شور که تاکنون کمتر مورد توجه بوده، نیز بررسی شده است. به این ترتیب این مطالعه سعی دارد تا با کمک تحلیل ابعادی شارهای اولیه جریان خروجی، درجه‌ای نو به آشنایی بیشتر با تاثیرهای آشفتگی جریان بر پخشیدگی و اختلاط آلاینده‌ها در محدوده میدان نزدیک باز کند.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از روش LIF و سامانه توسعه داده شده در آزمایشگاه هیدرولیک محیط زیست دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل استفاده شده است. LIF سامانه تصویربرداری با تابش لیزر به جریان آغشته به فلورسنت است که بدون اثرگذاری بیرونی بر جریان امکان بررسی رفتار سیال را فراهم می‌سازد. این سامانه به طور کلی از ۶ جزء اصلی تشکیل شده است؛

۱. منبع لیزر با طول موج ۵۳۲ نانومتر با توان ۰/۱ وات و دستگاه پراش پرتوی لیزر با قابلیت کنترل زمان‌بندی
۲. رایانه هماهنگ کننده دوربین و لیزر برای ثبت تصویرها و پردازش داده‌های خام
۳. دوربین تصویر برداری Mars 640-300G با رزولوشن ۶۴۰*۴۸۰ با قابلیت کنترل زمان‌بندی
۴. تانک آب با جداره‌های شیشه‌ای لمینت به ابعاد ۱.۸

اگرچه انتخاب زاویه ۶۰ درجه به عنوان زاویه بهینه در طراحی تخلیه کننده‌های مستغرق جریان‌های شور و چگال در مطالعه (Jirka (2008) به چالش کشیده شده است، در بررسی‌های آتی دیگر محققان اعم از (Kikkert et al. (2007) و (Lai and Lee (2012) و (Abessi and Roberts (2015) و (Papakonstantis et al. (2011) به دلیل دستیابی به بیشینه تریق در نقطه برخورد به عنوان زاویه استاندارد در تخلیه پساب‌های شور مورد پذیرش قرار گرفته است. در همین ارتباط رفتار جریان چگال از تخلیه کننده‌های چند مجرای ۶۰ درجه در محیط‌های ساکن و متحرک توسط (Abessi and Roberts (2014, 2017) و (Rosset (2017) و (Rosset (2017) و (Rosset (2017) type (تکی و چندگانه در محیط‌های ساکن و متحرک توسط (Abessi and Roberts (2016, 2018) بررسی و ارزیابی شده است. در این بررسی‌ها، رفتار عمومی جریان در نقطه‌های بحرانی با توسعه مجموعه‌ای از روابط بی‌بعد ارائه شد، که به طور مستقیم در طراحی‌های واقعی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

در سال‌های اخیر با توجه به گسترش توانایی محاسبه‌ای در مدل‌های رایانه‌ای و دسترسی به رایانه‌های پر قدرت بررسی تخلیه انواع پساب‌ها در پیکره‌های آبی بیشتر متوجه مدل‌سازی‌های عددی با نرم افزارهای تجاری چون Flow3D و Fluent و یا مدل‌های متن باز مثل OpenFOAM بوده است. روند بسیار پیچیده و زمان‌بر مدل‌سازی عددی این جریان‌ها، در عمل استفاده از آن‌ها را محدود به بررسی‌های علمی و تحقیقاتی کرده و کاربرد آن در طراحی‌های مهندسی و استفاده‌های میدانی را بسیار سخت و در مواردی ناممکن ساخته است.

با توجه به رفتار آشفته جریان و نوع استانداردهای حاکم بر تخلیه فاضلاب در پیکره‌های آبی، این میانگین زمانی رفتار جریان است که به طور معمول مورد توجه قرار می‌گیرد. در مدل‌سازی حالت غیرماندگار، پس از توسعه و دستیابی جریان به حالت شبه ماندگار، لازم است نتایج به دست آمده از رفتار لحظه‌ای در بازه زمانی به نسبت طولانی از شبیه‌سازی جریان، میانگین‌گیری شود. در آزمایشگاه، پژوهشگر با مشاهده چشمی آزمایش و پس از اطمینان از توسعه کافی جریان اقدام به ثبت، پردازش و

تصویرهای زمینه خاکستری به دست آمده به این روش با انجام مجموعه‌ای از اصلاحات تصویری و رقومی، توسط کدهای توسعه داده شده برای پردازش تصویر، تحت واسنجی و پردازش قرار گرفته و در نهایت امکان ثبت رفتار هندسی و پخشیدگی جریان و نیز ثبت نوسان‌های غلظت و شکل‌گیری گردابه در زمان‌های مختلف را ممکن می‌سازد. برای بررسی جزئیات و آشنایی بیشتر با روش کار این سامانه، نظر خوانندگان گرامی به مطالعه مقاله Abessi et al. (2020) جلب می‌شود.

متر طول و ۱.۵ متر عرض و ۱ متر ارتفاع
۵. مخزن ذخیره‌سازی به همراه پمپ آب برای پر نمودن تانک
۶. مخزن کوچک به همراه پمپ برای ذخیره و پمپاژ سیال آغشته به فلئورسنت از نازل و تخلیه جریان روش کار این سامانه توسط (Abessi et al. (2020) با بیان جزئیات، تشریح شده است. روش کار مبتنی بر تابش صفحه لیزری به جریان آغشته به فلئورسنت برای آشکار سازی آن و ثبت طول موج خاصی از نور نارنجی گسیل شده با دوربین‌های پرسرعت عکس‌برداری است.

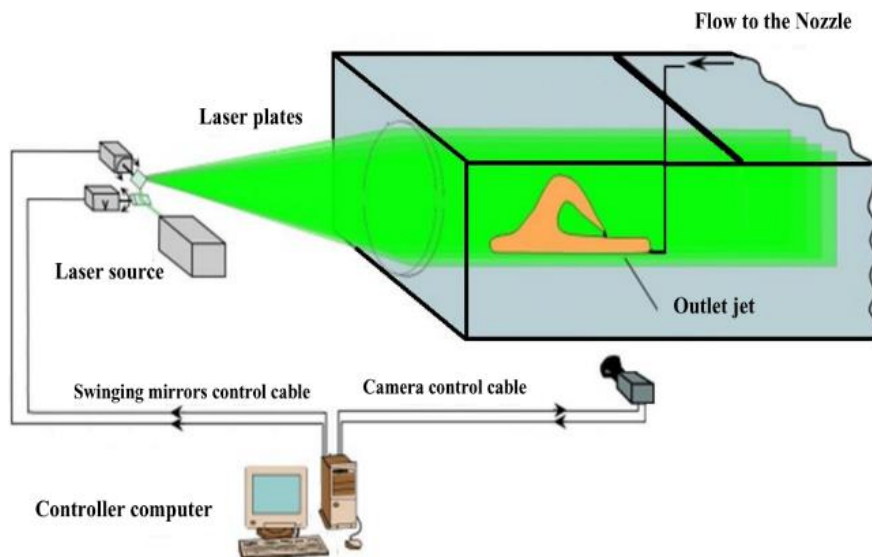


Fig. 1 A schematic of NITLIF apparatus (Abessi, 2018)

شکل ۱ تصویری از سامانه NITLIF (Abessi, 2018)

است. جریان پس از خروج از دهانه نازل مسیر پرتابه ماندنی تا برخورد با کف تانک طی می‌کند. در این حالت جریان تحت تاثیر شار مومنتم اولیه به بیشینه ارتفاع خود می‌رسد، در ادامه با استهلاک مومنتم و چیرگی شار شناوری منفی، از حالت جت شکل به حالت پلوم مانند درآمده و به سمت پایین متمایل می‌شود. در طول مسیر در نتیجه آشفتگی‌های ایجاد شده، جریان در محیط پذیرنده پخش و از غلظت آن کاسته می‌شود. در ادامه، رفتار آشفتنه جریان و نحوه پخشیدگی غلظت همراه با تصویرهای به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است.

۲-۱- توسعه آزمایش‌ها

در این پژوهش پدیده پخشیدگی و اختلاط جریان در تخلیه جت سنگین در محیط ساکن از نازل‌های ۶۰ درجه‌ای بررسی و ارزیابی شده است. در این آزمایش‌ها قطر نازل ۳/۷۵ میلی‌متر و ارتفاع دهانه نازل از کف تانک ۸/۵ سانتی‌متر می‌باشد. سرعت تخلیه جریان ۰/۶۲۹ متر بر ثانیه، شوری پساب ۳۱ کیلوگرم بر متر مکعب، چگالی آب محیط ۹۹۸/۵ و چگالی پساب شور ۱۰۲۱/۸۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. شکل عمومی تخلیه جریان چگال از نازل مورب در ناحیه اختلاط اولیه (میدان نزدیک) در شکل ۲ نشان داده شده

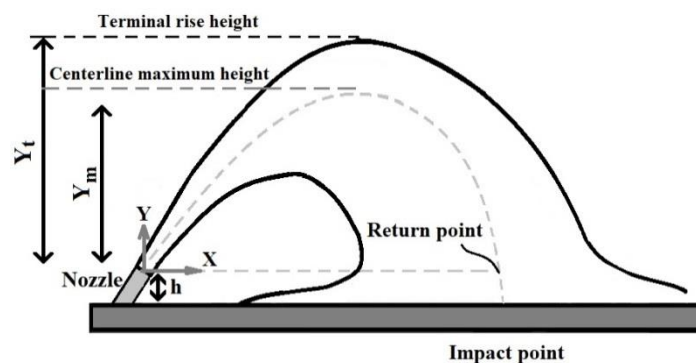


Fig 2. Schematic of dense discharge in stationary environment

شکل ۲ نمایی کلی از پدیده تخلیه جت چگال در محیط ساکن

۲-۲- تحلیل ابعادی

ویژگی‌های جریان (φ) در تخلیه پساب‌های چگال تابعی از زاویه تخلیه (θ) ، سرعت (u) یا شار مومنتم (M) ، دبی (Q) و شار شناوری جریان خروجی (B) است (Fischer et al. 1979, Roberts et al. 1997, Abessi et al. 2015a, 1979). به این ترتیب برابر با رابطه ۱ خواهیم داشت:

$$\varphi = f(Q, M, B, \theta) \quad (1)$$

در این رابطه:

$$Q = \frac{\pi}{4} d^2 u \quad (2)$$

$$M = u Q \quad (3)$$

$$B = g_0 Q \quad (4)$$

$$g_0 = g \cdot \frac{\rho_j \rho_a}{\rho_a} \quad (5)$$

که در آن چگالی پساب خروجی، ρ_j چگالی آب محیط و g شتاب جاذبه زمین و g_0 شتاب اصلاح شده برای پساب شناور در آب است. با استفاده از این شارها می‌توان مقیاس طولی مومنتم به شناوری را به صورت زیر توسعه داد:

$$L_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad (6)$$

که L_M خود با توجه به رابطه زیر با عدد فرود دنیسمتریک جریان (Fr_d) متناسب است:

$$L_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} d \cdot Fr_d \quad (7)$$

که در آن:

$$Fr_d = \frac{U_j}{\sqrt{g_0 d_j}} \quad (8)$$

به این ترتیب پارامتر بی‌بعد ویژگی هندسی (X) و میزان ترقیق جریان $(S = \frac{c_j - c_a}{c - c_a})$ را می‌توان به صورت زیر تابع عدد فرود دنیسمتریک (Fr_d) و حاصل ضرب عدد فرود در قطر نازل $(d Fr_d)$ دانست:

$$\frac{X}{d Fr_d} = f(x) \quad \text{and} \quad \frac{S}{Fr_d} = f(\theta) \quad (9,10)$$

همچنین برای بی‌بعدسازی پارامتر زمان در مدل‌سازی آزمایشگاهی با تقسیم زمان بر نسبت مومنتم به شناوری $(\frac{M_0}{B_0})$ متغیر بی‌بعد زمان (T^*) به صورت زیر تعریف می‌شود (Tofigian et al. 2021):

$$T_D = \frac{M_0}{B_0} \quad (11)$$

$$T^* = \frac{T}{T_D} \quad (12)$$

به این ترتیب همه پارامترهای زمانی، هندسی و اختلاطی جریان را می‌توان به صورت بی‌بعد تابع شارهای اولیه جریان دانست. در این حالت رابطه‌ها و ثابت‌های به دست آمده قابل ارجاع در ابعاد واقعی برای استفاده میدانی خواهد بود.

۳- نتایج و بحث

به منظور توسعه و ثبت آزمایش‌ها، صفحه لیزری در امتداد محور مرکزی جریان قرار گرفته و ثبت آزمایش در امتداد صفحه دو بعدی عبوری از آن انجام گرفته است. پس از پردازش و تفسیر تصاویر، در نهایت توسعه جریان

برازش داده شده (bv)، نرمال و به ترتیب در محورهای Y و X ترسیم شده است. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود نیمرخ جریان در ناحیه پلوم شکل در نیمه بالایی فشرده تر و در نیمه پایینی پهن تر هستند. شکل گیری ادی های بزرگ در بدنه جریان مشخصه ناحیه پلوم شکل بوده که با انتقال سیال محیط به درون جریان باعث تشدید فرایند اختلاط و ترقیق بیشتر جریان در این ناحیه نسبت به ناحیه جت شکل می شود. مشخصه دیگر این محدوده، شکل گیری بسته های بیرون رونده از مسیر اصلی جریان است که به آن detrainment اطلاق شده و تحت تاثیر نیروی ثقل، توسعه بیشتر جریان از لبه پایینی جریان را سبب می شود. به این ترتیب ناشی از چگالی بیشتر بسته های سیال و ناپایداری القا شده بر اثر شناوری، جریان از پایین توسعه بیشتری یافته و این موضوع نبود تقارن در رفتار جریان نسبت به نیمه ابتدایی جریان پیش از نقطه اوج را به دنبال دارد. شکل گیری گرادیان چگالی ناپایدار در این ناحیه بر اثر قرارگیری بسته های جریان بر روی محیط کمتر چگال، عامل اصلی این ناپایداری به شمار می آید. به این ترتیب بسته های سیال نزدیک به مرز پایینی ناشی از تفاوت چگالی با محیط پیرامون به سمت قسمت های بیرونی رانده شده و بازشدگی بیشتر جریان را سبب می شوند در حالیکه در قسمت بالایی به همان صورت به سمت پایین و داخل جریان رانده شده و این موضوع جمع شدگی جریان در نیمه بالایی را سبب خواهد شد. این موضوع باعث شکل گیری یک مرز تیز و مشخص در بخش بالایی جت شده در حالی که قسمت های پایینی جت از نقطه اوج تا کف محیط مرز تار و نامشخصی خواهند داشت. تاثیر این ناپایداری ها و ورود بسته های سیال محیط به داخل جریان، باعث ایجاد نوسان های وابسته به زمان و مکان در میدان سرعت، فشار، چگالی و غلظت می شود. جریان آشفته دارای ماهیتی ناپایدار و تصادفی بوده و نوسان این کمیت ها در آن کاملاً تصادفی و غیرقابل پیش بینی است. در این حالت شرایط رفتار جریان میانگین در مقیاس بزرگ ثابت بوده و روش های آماری، ابزار مناسبی برای تحلیل و تفسیر رفتار جریان به شمار می آید. در شکل ۶،

در زمان های مختلف برای تخلیه از نازل مورب ۶۰ درجه در زمان های (بی بعد) به صورت شکل ۳ استخراج و ترسیم شد. تصویرهای به دست آمده برای هر آزمایش، به دو صورت تصویرهای خام یا پردازش نشده (تصویر سیاه و سفید) و تصویرهای واسنجی شده (پردازش شده) برای غلظت در طیف رنگین کمانی ترسیم شده است. مرحله آغاز تخلیه یا شکل گیری جریان تا مرحله رسیدن پلوم به کف به صورت تکاملی در این تصویرها نشان داده شده است. میزان مقیاس زمانی (T_D) که نسبت شار مومنت (M_0) به شار شناوری (B_0) جریان است، برای این آزمایش ۳/۰۱ ثانیه برآورد شده است. به این ترتیب با تقسیم زمان در تصویر لحظه های ثبت شده بر میزان T_D ، مقیاس زمانی بی بعد (T^*) استخراج و برای زمان های بی بعد ۰/۳۳، ۰/۲۲۵، ۰/۵، ۲/۶، ۵/۷ به صورت زیر ترسیم شده است.

مشاهده می شود، جریان طی ناحیه ابتدایی که ناحیه غلبه سرعت بر رفتار جریان یا ناحیه جت شکل است، دارای ساختاری ریز (ادی های کوچک) و رفتاری مشخص و قابل تعریف است اما پس از رسیدن به حداکثر ارتفاع (نقطه بازگشت) و آغاز نزول به سمت بستر، ناحیه پلوم شکل جریان شکل گرفته که با توسعه ادی های بزرگ تر در بدنه جریان همراه است. در ناحیه غلبه شناوری (ناحیه پلوم شکل)، نوسان های سرعت بزرگتر و در نتیجه آشفته گی جریان بیشتر است و تحت تاثیر توامان نیروی ثقل و مومنت جریان، بسته های بزرگ شکل گرفته به طور پیوسته به سمت مرزهای پایینی چرخیده و باعث توسعه نامتقارن جریان می شوند. در شکل ۴ تصویر میانگین زمانی برداشت شده از آزمایش و حالت پردازش شده آنها آورده شده است. در این تصویرها الگوی عمومی حرکت جریان از دهانه نازل تا کف دریا به خوبی نشان داده شده است. در شکل ۵ نیز نیمرخ های نرمال غلظت جریان در ناحیه جت شکل ($X/dF=0.45$)، موقعیت بیشینه ارتفاع جریان ($X/dF=2$) و در محدوده ناحیه پلوم شکل ($X/dF=2.8$) ترسیم شده است. در این نیمرخ ها غلظت هر نقطه (C) نسبت به بیشینه غلظت در برش عرضی (C_0) و موقعیت هر نقطه (r) نسبت به عرض توزیع گوسی

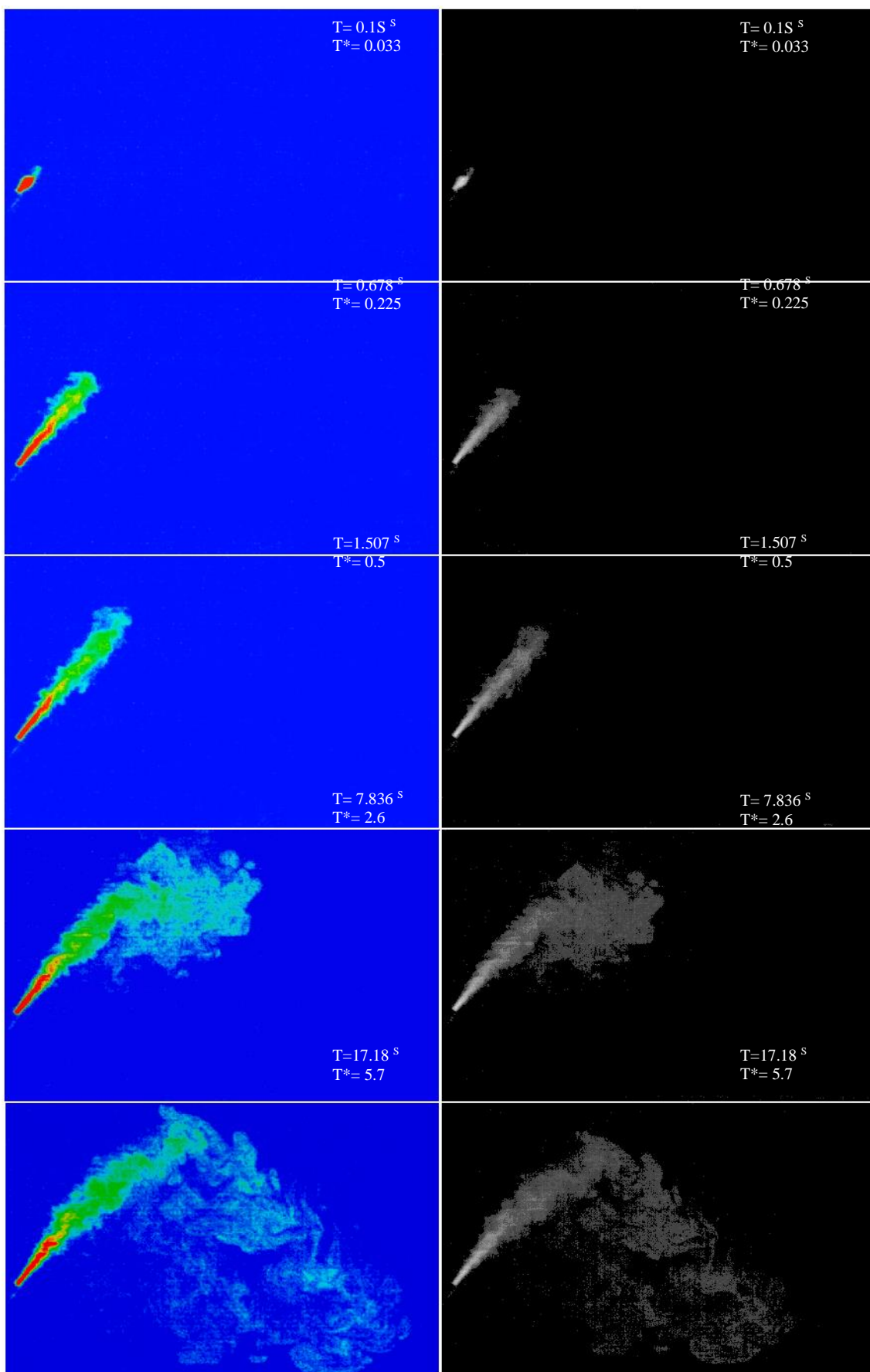


Fig 3. Instantaneous picture of flow time evaluation for 60° dense discharge
 شکل ۳ تصویرهای لحظه‌ای از توسعه زمانی جریان در تخلیه پساب چگال با زاویه ۶۰ درجه

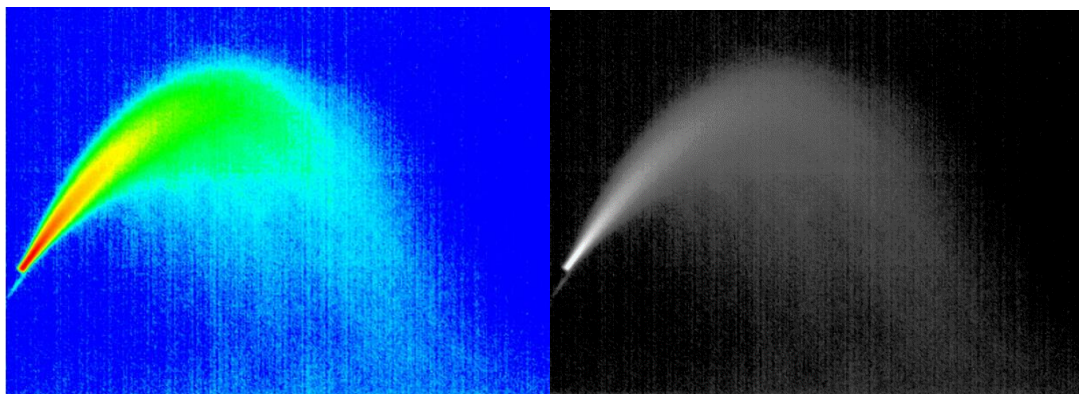


Fig. 4 The time-averaged picture of flow for 60° dense discharge
 شکل ۴ تصویرهای میانگین زمانی جریان در تخلیه پساب چگال با زاویه ۶۰ درجه

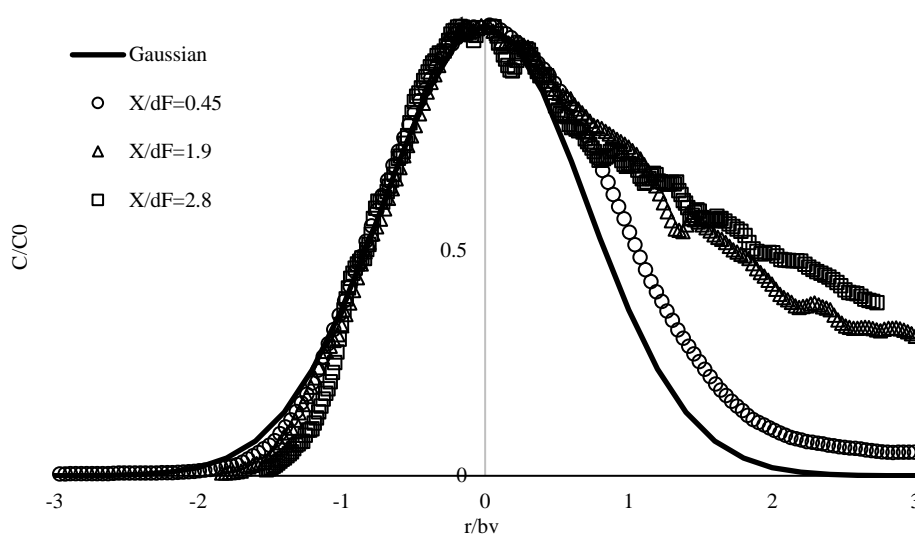


Fig. 5 Normal profiles of flow concentration along the jet-like, maximum rise height, and plume-like region
 شکل ۵ نیمرخ های نرمال از غلظت جریان در محدوده جت شکل، نقطه اوج و محدوده پلوم شکل جریان

است.

$$c_x = \bar{c}_x + c'_x \quad (23)$$

که در آن c'_x مولفه نوسانی غلظت یا همان میزان انحراف اندازه غلظت لحظه‌ای از میزان غلظت متوسط جریان در همان نقطه می‌باشد. به طور مشابه در جریان آشفته، هر کمیت فیزیکی دلخواه (مانند سرعت، چگالی، دما و ...) را می‌توان به صورت جمع دو مولفه متوسط و مولفه نوسانی بیان کرد. قسمت نوسانی جریان کاملاً اتفاقی و تصادفی بوده و به طور معمول با استفاده از فرضیه های آماری تجزیه و تحلیل می‌شود. برای تفسیر مولفه‌های نوسانی کمیت‌های فیزیکی از تعریف جذر میانگین مربعات (RMS^1) استفاده می‌شود. این کمیت برای غلظت‌های

میانگین زمانی و نوسان‌های غلظت در یک نقطه در خط مرکزی جریان در سه موقعیت مورد اشاره ترسیم شده است. در این شکل از داده‌های غلظت آشکارساز (فلورسنت) با نرخ برداشت ۱۰ هرتز استفاده شده است. در این نقطه‌ها غلظت یک نقطه حول یک میزان مشخص نوسان می‌کند. اندازه غلظت متوسط، با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\bar{C}_x = \frac{1}{T} \int_0^T C dt \quad (22)$$

که در آن میانگین‌گیری در زمانی به مراتب بزرگتر از طولانی‌ترین زمان نوسان‌های جریان انجام می‌گیرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، غلظت در هر نقطه برابر با مجموع غلظت میانگین و میزان نوسان غلظت در آن نقطه

1 Root Mean Square

اندازه‌گیری شده، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{RMS} = \sqrt{C^2} \quad (24)$$

در تخلیه مایل جریان‌های چگال، نوسان‌ها در ابتدای جریان و در طول ناحیه جت شکل، ریز و با انحراف معیار پایین هستند در حالی که در امتداد مسیر، شدت و انحراف معیار نوسان‌ها به تدریج افزایش یافته و در محدوده پلوم شکل به بیشینه مقدار خود می‌رسد. به این ترتیب هرچه جریان از ناحیه جت شکل به ناحیه پلوم شکل نزدیک‌تر شود، نوسان غلظت افزایش و در پی آن، مقیاس‌های زمانی و مکانی آشفتگی جریان افزایش می‌یابد. در محدوده جت شکل ابعاد گردابه تابعی از قطر نازل بوده در حالیکه با بزرگ شدن نوسانات و افزایش تناوب آنها، ابعاد گردابه تابعی از مقیاس‌های طولی محیط پذیرنده (عمق یا عرض محیط) خواهد بود.

هر گردابه در جریان آشفته، بسته به اندازه و ظرفیت خود از انرژی جنبشی موجود در جریان میانگین، سهم‌خواهی یا انرژی‌گیری می‌کند. بنابراین بزرگترین گردابه‌های موجود در جریان، وظیفه حمل و جابه‌جایی بخش عمده‌ای از انرژی جنبشی جریان میانگین را بر عهده دارند. با توسعه جریان و ایجاد ناپایداری در مرزها، گردابه‌های شکل گرفته عمده انرژی خود را از جریان میانگین گرفته و به گردابه‌های کوچکتر در درون خود منتقل می‌کنند. روند انتقال انرژی از گردابه‌های بزرگ به گردابه‌های کوچکتر به آبشار انرژی^۱ معروف است. در این حالت گردابه‌های موجود انرژی را از بدنه جریان گرفته و نقش چشمه انرژی را برای گردابه‌های کوچکتر از خود را ایفا می‌کنند. در این روند هر گردابه همزمان چاه انرژی برای گردابه‌های بزرگتر از خود خواهد بود. گردابه‌ها به این دلیل که بخشی از انرژی آشفتگی موجود در درون خود را به گردابه‌های کوچکتر منتقل می‌سازند، نقش منبع انرژی جنبشی آشفتگی را بازی کرده و به طور هم زمان به این دلیل که از انرژی جنبشی جریان متوسط موجود در گردابه‌های بزرگتر از خود تغذیه می‌کند، نقش چاه را برای انرژی جنبشی متوسط ایفا می‌کند. به این ترتیب در

هر مقیاسی، رقابتی برای تبدیل انرژی جنبشی به دیگر شکل‌ها برپاست. در این حالت گردابه‌های بزرگ، انرژی جنبشی آشفتگی را به گردابه‌های کوچکتر منتقل کرده و در پایین‌ترین سطح، لزجت سیال انرژی جنبشی دریافتی را به طور کامل مستهلک می‌کند. در این حالت کوچکترین گردابه‌های شکل گرفته که دیگر توانی برای انتقال انرژی به گردابه‌های کوچکتر از خود را ندارند، کل انرژی دریافتی را به انرژی گرمایی تبدیل می‌کنند. در یک جریان آشفته اضمحلال انرژی^۲ فرآیندی به کلی لزج و انتقال انرژی^۳ در بین گردابه‌ها (از گردابه‌های بزرگ یا مادر به گردابه‌های فرزند) یک فرآیند غیرلزج است. در این حالت، ابعاد بزرگترین گردابه‌های شکل گرفته در جریان تابعی از مشخصه‌های طولی محیط پذیرنده بوده و در جهت‌های مختلف، اندازه و ویژگی‌های کاملاً متفاوتی از یکدیگر دارند (غیرایزوتروپ هستند). این گردابه‌ها دربردارنده عمده انرژی جریان بوده و با عنوان گردابه‌های با مقیاس انتگرالی شناخته می‌شوند. کوچکترین گردابه‌های تولیدی در ناحیه اضمحلال انرژی تنها تابع لزجت سیال بوده و در همه جهت‌ها تا حدودی یکسان بوده و همروند^۴ فرض می‌شوند که با عنوان ادی‌های مقیاس کولموگروف شناخته می‌شوند. در این مقیاس بخش عمده انرژی به شکل گرما از سامانه خارج می‌گردد و فرآیند اضمحلالی تنها فرآیند حاکم در آن می‌باشد. در این محدوده انتقال انرژی از انرژی جنبشی به انرژی گرمایی (افزایش دما) به وسیله (نرخ اضمحلال) در کوچکترین گردابه‌ها کنترل می‌شود. به این ساختار انتقال انرژی آشفتگی از میانگین جریان به ابعاد ریزتر و نهایت لزجت سیال، آبشار انرژی گفته می‌شود. اندازه گردابه‌ها در ناحیه میانی چگونگی توزیع انرژی جنبشی در امتداد آبشار انرژی را نشان می‌دهد. در ناحیه جت شکل یا ناحیه ابتدایی جریان، فرایند القای آشفتگی ناشی از ناپایداری‌های کلوین-هلمهولتز و تحت تاثیر لایه برشی در مرز مشترک دو سیال (جت و آب پیرامون) آغاز شده و پس از آن، انتقال انرژی از بسته‌های بزرگتر به کوچکتر

2 Energy Dissipation

3 Energy Transfer

4 isotropic

1 Energy Cascade

تفاوت‌های بسیاری که در پیش‌بینی رفتار این جریان‌ها در مطالعات آزمایشگاهی و عددی محققان مختلف گزارش شده است ناشی از پیچیدگی‌های ذاتی این جریان بوده و این موضوع ضرورت بررسی‌های بیشتر برای ارزیابی فرایند اختلاط و ترقیق جریان‌های چگال را آشکار می‌سازد. در شکل ۶- سعی شده است با بی‌بعدسازی پارامتر توسعه زمانی جریان و نمودار برازش گوسی تغییرات عرضی جریان، تحت تاثیر شارهای اولیه جریان خروجی، یک الگوی عمومی برای تفسیر جریان ارائه و رفتار اختلاطی آن متاثر از این نیروها تشریح شود.

و در انتها مصرف مومنتم توسط ویسکوزیته سیال رخ می‌دهد. به این ترتیب شدت متفاوت نوسان‌های سرعت و در نتیجه میزان متفاوت قدرت و شدت آشفتگی جریان در امتداد ناحیه جت و پلوم، رفتار اختلاطی متفاوتی در جریان در امتداد مسیر آن از دهانه نازل تا انتهای ناحیه اختلاط اولیه ایجاد می‌کند و این موضوع الگوی حرکت جریان را متفاوت از حرکت ساده یک پرتابه با زاویه مشخص می‌کند. این موضوع همچنین رفتار جریان‌های چگالی خروجی از نازل‌های مایل را بسیار پیچیده‌تر از جت‌های شناور عمودی رو به بالا یا پایین می‌کند. به نظر می‌رسد

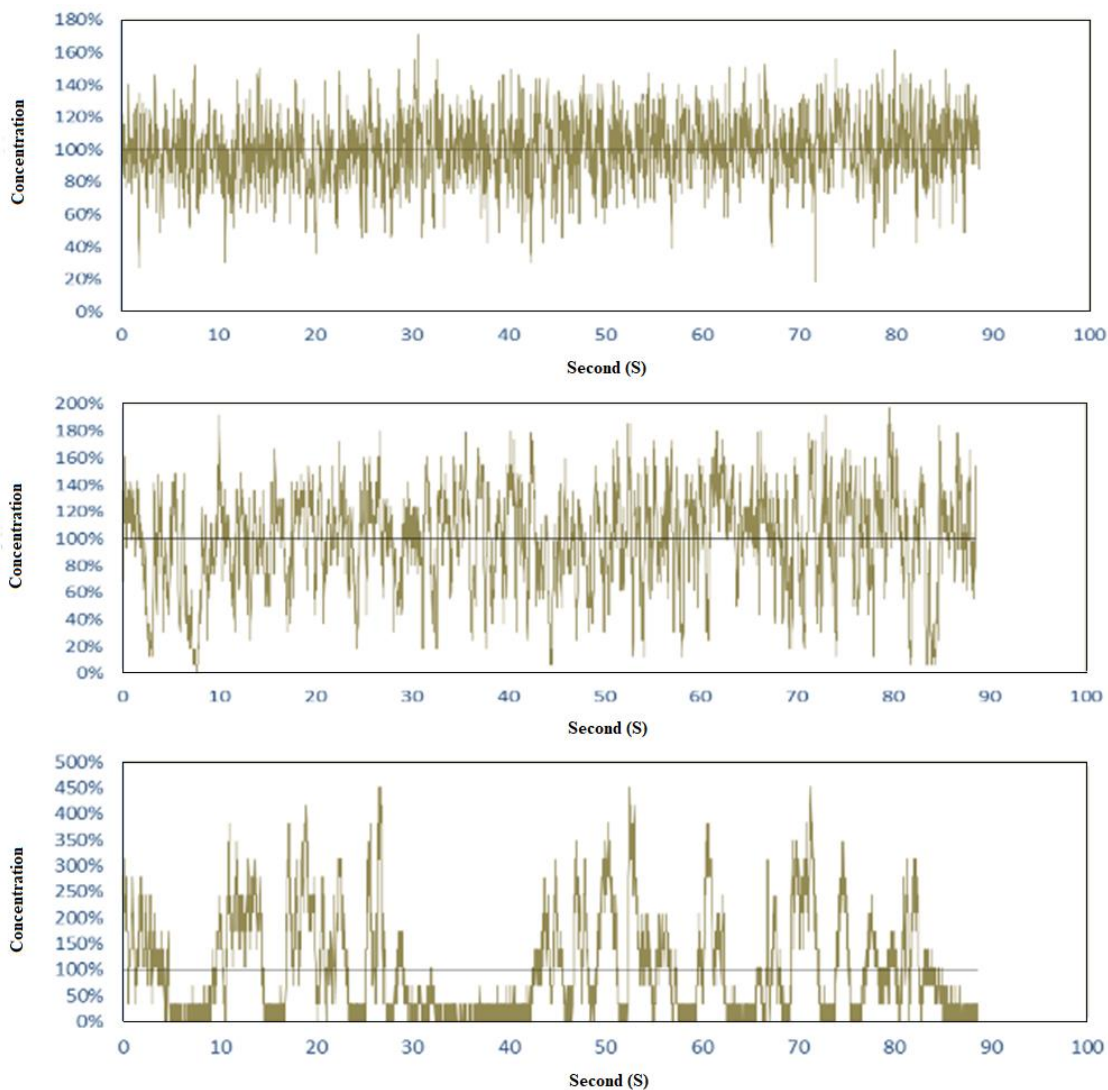


Fig. 6 The fluctuation of flow concentration (a) in jet like region ($\frac{x}{d_F} = 0.45$), (b) in maximum rise height ($\frac{x}{d_F} = 1.9$), c) in plume-like region ($\frac{x}{d_F} = 2.8$)

شکل ۶ نوسان‌های غلظت در (a) محدوده جت شکل جریان ($\frac{x}{d_F} = 0.45$)،
(b) در نقطه بیشینه ارتفاع ($\frac{x}{d_F} = 1.9$) و (ج) در ناحیه پلوم شکل جریان ($\frac{x}{d_F} = 2.8$)

S	ترقیق بی بعد
s	ترقیق
T _j	مقیاس زمانی (s)
U _j	سرعت خروجی جت از دهانه نازل (ms ⁻¹)
d _j	قطر داخلی دهانه نازل (mm)
C _j	شوری جت (kgm ⁻³)
C _a	شوری اولیه محیط (kgm ⁻³)
C	شوری (kgm ⁻³)
T	زمان (s)
T*	زمان بی بعد
	نشانه های یونانی:
ρ _j	چگالی جت خروجی (kgm ⁻³)
ρ _a	چگالی محیط (kgm ⁻³)

۷- منابع ها

- Abessi, O. (2018). Chapter 7 - Brine Disposal and Management- Planning, Design, and Implementation. Sustainable Desalination Handbook, pp. 259-303.
- Abessi, O. and Roberts, P.J. (2014). Multiport diffusers for dense discharges. Journal of Hydraulic Engineering, 140(8), 401-432.
- Abessi, O. and Roberts, P.J.W. (2015a). Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments. Journal of Hydraulic Engineering, 141(8), 60-75.
- Abessi, O. and Roberts, P.J.W. (2015b). Dense jet discharges in shallow water. Journal of Hydraulic Engineering, 142(1), 401-413.
- Abessi, O. and Roberts, P.J. (2017). Multiport diffusers for dense discharge in flowing ambient water. Journal of Hydraulic Engineering. 143(6), 401-407.
- Abessi, O., Roberts, P.J. and Gandhi, V. (2016). Rosette diffusers for dense effluents. Journal of Hydraulic Engineering. 143(4), 601-629.
- Abessi, O., Ramani, Firoozjaye A., Hamidi, M., Bassam, M. and Khodabakhshi, Z. (2020). Three Dimensional Laser Scanning System for Illumination of Fluorescent flow for the Environmental Hydraulic researches. J. Hydraul, 14(4), 69-81.
- Abessi, O., Saeedi, M., Hajizadeh, N. and Kheirkhoh, H. (2011). Flow Characterization Dilution in Surface Discharge of Negatively

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش، توسعه زمانی جریان و فرایند اختلاط و ترقیق در تخلیه جریان های پساب های شور آب شیرین کن های ساحلی تحت زاویه ۶۰ درجه به صورت آزمایشگاهی بررسی و ارزیابی شده است. آنچه که در این مطالعه به طور خاص مورد توجه قرار گرفته است، ارایه مقیاس های بی بعد در توسعه زمانی جریان و بررسی علت شکل گیری، تکامل و اضمحلال ادی ها و تاثیر آن بر پخشیدگی غلظت و اختلاط جریان در محیط است. از این رو تصویرهای لحظه ای از توسعه جریان برای زمان های مختلف استخراج و به صورت بی بعد به تصویر کشیده شده است. رفتار اختلاطی جریان در امتداد ناحیه جت شکل و پلوم شکل تحلیل و با تشریح فیزیک حاکم بر رفتار جریان های آشفته، چگونگی شکل گیری بسته های جریان متاثر از شدت نوسان های سرعت (غلظت) تشریح و انتقال انرژی از منبع تا استهلاك کامل آن توسط لزجت جریان بحث و بررسی شد. در نهایت با تبیین فیزیک پیچیده آشفته گی و اختلاط جریان، علت تفاوت رفتار جریان نسبت به حرکت یک پرتابه در تخلیه جریان های چگال از نازل های مورب ۶۰ درجه مورد بحث قرار گرفت. در این مقاله به این ترتیب سعی شده است تا نوری اندک به رفتار پیچیده هیدرودینامیک جریان در فرایندهای پخش و اختلاط پساب های شور در پیکره های آبی پذیرنده تابانیده شود.

۵- سپاسگزاری

پژوهشگران و نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره BNUT/390035/1400 اعلام می دارند.

۶- فهرست نشانه ها

همه نمادها و نشانه های به کار رفته در رابطه ها و در متن مقاله در این بخش درج شدند.

L _D	مقیاس طولی (m)
frd	عدد فروید دنسیمتریک
g`	شتاب گرانش اصلاح شده (ms ⁻²)

- Tofighian, H., Aghajanpour, A., Abessi, O. and Ramezani, M.M. (2021). Simulation of Inclined Dense Jets in Stagnant Environments: an LES and Experimental Study. *Environmental Fluid Mechanics*, 138(1), 358-361.
- Wang, H. and Law, A.W. (2002). Second-order Integral Model For a Round Turbulent Buoyant Jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 459(1), 397-428.
- Zeitoun, M., McIlhenny, W. and Reid, R.O. (1970). Conceptual design of outfall systems for desalination plants, Office of Saline Water Research and development progress.
- Buoyant Flow in Stagnant and Non-Stratified Water Bodies. *Journal of Water and Wastewater*. 22(4), 71-82. (In Persian)
- Fischer, H.B., List, J.E., Koh, R.C.Y., Imberger, J. and Brooks, N.H. (1979). Mixing in inland and coastal waters. Academic Press, Waltham.
- Jirka, G.H. (2008). Improved Discharge Configurations for Brine Effluents from Desalination Plants., *Journal of Hydraulic Engineering*, 134, 116–120.
- Kikkert, G.A., Davidson, M.J. and Nokes, R.I. (2007). Inclined Negatively Buoyant Discharges. *J Hydraul Eng.*, 133(5), 545–554.
- Lai, C.C.K. and Lee, J.H.W. (2012). Mixing of inclined dense jets in stationary ambient. *J Hydro-environment Res*, 6(1), 9–28.
- Oliver, C.J. (2012). Near field mixing of negatively buoyant jets, PhD Thesis, University of Canterbury, Christchurch, 102 p.
- Papakonstantis, I.G., Christodoulou, G.C. and Papanicolaou, P.N. (2011). Inclined Negatively Buoyant Jets 2: Concentration Measurements. *Journal of Hydraulic Research*, 49(1), 13-22.
- Pincince, A.B. and List, E.J. (1973). Disposal of brine into an estuary. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 45(11), 2335-2344.
- Ramezani, M., Abessi, O. and Rahmani Firoozjaee, A. (2020). Numerical Simulation of Dense Discharges from 30° Submerged Inclined Jet in Free and Bed-Affected Conditions. *Journal of Hydraulics*, 15(3), 75-91. doi: 10.30482/jhyd.2020.228141.14541 (In Persian)
- Roberts, P.J. and Toms, G. (1987). Inclined Dense Jets in Flowing Current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(3), 323-340.
- Roberts, P.J., Ferrier, A. and Daviero, G. (1997). Mixing in inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(8), 693-699.