


# Numerical Simulation of Dense Discharges from 30° Submerged Inclined Jet in Free and Bed-Affected Conditions

Mohammadmehdi Ramezani <sup>1</sup>, Ozeair Abessi <sup>2\*</sup>, Ali Rahmani Firoozjaee <sup>2</sup>

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.

\* [Oabessi@nit.ac.ir](mailto:Oabessi@nit.ac.ir)

Received: 17 May 2020, Accepted: 7 September 2020  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Human population growth and industrialization have led to an increase in freshwater demand all around the world, specifically in coastal areas. The conventional resources of freshwater (e.g., rain, rivers, lakes, etc.) do not meet this demand; hence finding new resources of freshwater besides preserving and the optimal use of the available freshwater resources is strictly considered recently. During the last decades, the desalination of seawater by removing salt from the roughly unlimited supply of seawater has emerged as a new source of freshwater in coastal zones. One of the major by-products of desalination plants is the effluent with a higher salt concentration than the feeding water, called brines. Disposal of the produced brine into coastal bodies has raised serious concerns due to its potential to cause negative impacts on the marine environment, especially on the benthic communities. The disposal of brines is typically done through a single inclined nozzle or multiport diffuser that laid on the seafloor far enough from the coastline. So far, many different studies have been performed on dense jets to find the optimal angle of the inclination. The generally accepted design practice recommends a 60° angle as the optimal angle. However, the terminal rise height associated with this angle is relatively high. Consequently, smaller angles are more appropriate for shallow coastal waters. This paper studies geometrical and mixing characteristics of 30° inclined dense jets in free and proximate to bed conditions through simulating two numerical series. In the first series, nozzles are placed well above the bed in terms of  $y_0/d$  to act like free jets. In the second series, the distance of nozzles to the lower boundary has reduced to observe the possible effect of proximity to bed on dense jets behavior.

**Methodology:** The governing equations of the present problem are continuity, conservation of momentum, and tracer advection-diffusion equations. These governing equations are solved using an open-source finite volume model named OpenFOAM. The buoyant Boussinesq Pimple Foam solver, which is a transient solver for buoyant, turbulent flow of incompressible fluids, is modified within the OpenFOAM to solve the governing equations of the present problem. Moreover, the realizable  $k - \epsilon$  model and the Boussinesq approximation are employed for turbulent closure and buoyancy effects, respectively.

**Results and Discussion:** The major geometrical characteristics of dense jets, including the centerline trajectory, the location of centerline peak, the terminal rise height, etc., are presented. The centerline trajectories are in acceptable agreement with previous analytical and experimental studies. They are generally symmetrical; however, a slight asymmetry was

observed in the boundary-affected cases. The other geometrical characteristics in all cases are in good agreement with previous data. The mixing and dilution characteristics were also studied through cross-sectional concentration profiles. It is observed that the present simulations predict the dilution at the return point significantly conservative. The buoyant instabilities on the inner edge of flow are also evident in the mean concentration profiles.

**Conclusions:** Ocean outfalls are the most widely used method for brines disposal. Therefore, predicting the flow behavior along the near field region (a short distance from the nozzle tip) is vital. The review of the previous studies showed that the literature is rich in this field. Several experimental and theoretical studies have been reported to predict the brine flow through surface and submerged discharges into both stagnant and flowing waters. There are also commercial models developed for this purpose, which work based on simplifying assumptions for the governing equations. Recently, thanks to the advancements in computer performance, the use of numerical methods to solve physical problems has become possible for engineering purposes. The discharge of brines, as with many other engineering flows, are physically complicated and fully turbulent, so requiring robust and accurate modeling.

In the present paper, a numerical study was reported for inclined dense jets at the angle of  $30^\circ$ . Two series of simulations were performed. In the first series, the nozzles were placed far from the bed. While in the second series, the nozzles were placed in a close distance to the bed. The aim was to analyze the possible effects of proximity to bed on dense jets behavior. The locations of the terminal rise height and impact point as well as the dilution at the return point were determined. The simulations predict trajectory data in free jets with reasonable accuracy, but dilution predictions are conservative in comparison to previous analytical and experimental studies. Comparisons between two numerical series showed discharging  $30^\circ$  inclined dense jets in a close distance to the bed in the cases that in this study were examined had no appreciable effects on neither the geometrical characteristics nor mixing and dilution characteristics.

**Keywords:** Desalination, Dense jet, Numerical simulation, Coanda effect, OpenFOAM.



© 2020 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/>)

# شبیه‌سازی عددی تخلیه‌ی فاضلاب‌های سنگین از تخلیه‌کننده‌ی مستغرق $30^\circ$ در حالت‌های آزاد و مجاور به بستر

محمد مهدی رضانی<sup>۱</sup>، عزیز عابسی<sup>۲\*</sup>، علی رحمانی فیروزجایی<sup>۲</sup>

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

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

\* Oabessi@nit.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۸، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۷، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

**چکیده:** تخلیه‌ی شورابه‌ی ناشی از فرآیند شیرین‌سازی آب دریا در محیط پذیرنده، به طور عمده از طریق تخلیه‌کننده‌های دریایی صورت می‌گیرد. به عنوان یک استاندارد جهانی، تخلیه‌ی مستغرق با زاویه‌ی  $60^\circ$  نسبت به افق به عنوان حالت بهینه مورد پذیرش همگانی قرار گرفته است؛ اما ارتفاع بیشینه صعود جریان در این زاویه به نسبت زیاد بوده و این موضوع در ساحل‌های کم‌عمق دشواری‌هایی به همراه خواهد داشت. از این‌رو در این آب‌ها، تخلیه با زاویه‌های کمتر پیشنهاد شده است. این مطالعه، به شبیه‌سازی تخلیه‌کننده‌ی مستغرق  $30^\circ$  در دو حالت آزاد و مجاور به بستر می‌پردازد. این شبیه‌سازی‌ها با اصلاح حلگری در نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM انجام شده است. ویژگی‌های هندسی و اختلاطی جت‌های سنگین  $30^\circ$  در حالت آزاد و نزدیک به بستر تعیین و با پژوهش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی گذشته مقایسه شده است. مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد شبیه‌سازی‌های انجام شده با دقت بالایی ویژگی‌های هندسی جریان را پیش‌بینی می‌کنند؛ اما میزان ترقیق در نقطه‌ی بازگشت به صورت قابل ملاحظه‌ای محافظه‌کارانه‌تر از میزان آزمایشگاهی و تحلیلی برآورد شده است.

**کلیدواژگان:** نمک‌زدایی آب دریا، تخلیه‌کننده‌های دریایی، شبیه‌سازی عددی، اثر کواندا، OpenFOAM.

## ۱- مقدمه

جت سنگین چنانچه با سرعت اولیه و مایل نسبت به افق در محیط پذیرنده تخلیه شود در آغاز به سمت بالا پیشروی کرده تا به ارتفاع بیشینه‌ی خود برسد؛ پس از آن به دلیل شناوری منفی به سمت بستر منحرف شده و در نهایت بر روی آن سقوط می‌کند. سپس در محل برخورد با بستر، جریان به صورت یک جریان چگال روی کف دریا پیشروی کرده و پخش می‌شود (Abessi and Roberts, 2015a, 2018).

تاکنون پژوهش‌های پرشماری برای یافتن حالت بهینه‌ی تخلیه‌ی جت‌های سنگین، به ویژه تعیین بهترین زاویه‌ی تمایل نسبت به افق صورت گرفته است. Cederwall (1968) تخلیه با زاویه‌ی  $45^\circ$  درجه را به عنوان حالت بهینه‌ی تخلیه پیشنهاد کرد؛ هرچند که مبنای این نظر چندان روشن نیست. Zeitoun et al. (1970) تخلیه با زاویه‌ی  $60^\circ$  درجه

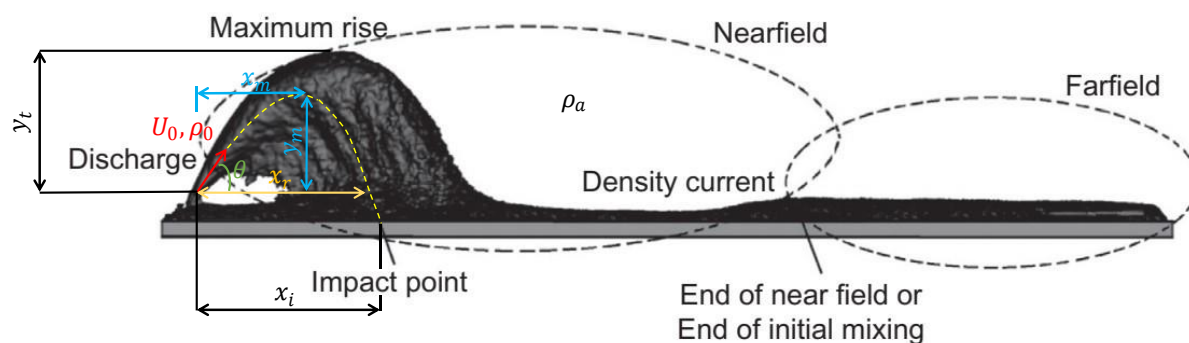
یکی از فرآورده‌های جانبی فرآیند شیرین‌سازی آب دریا پساب‌هایی بسیار شور (شورابه<sup>۱</sup>) هستند که به طور عمده از طریق تخلیه‌کننده‌های دریایی<sup>۲</sup> در محیط پذیرنده دفع می‌شوند. تخلیه‌کننده‌های دریایی، سازه‌ای به شکل لوله‌های تک‌مجرای یا چندمجرای هستند که با پخش و اختلاط مناسب شورابه با آب دریا اثر منفی ناشی از تخلیه‌ی شورابه را تا حد قابل قبول برای محیط پذیرنده کاهش می‌دهند (Abessi et al., 2012; Saedi et al., 2012). در ادبیات فنی به تخلیه‌کننده‌های دریایی که در آن‌ها چگالی سیال خروجی بیشتر از چگالی سیال محیط باشد (مانند تخلیه‌ی شورابه در دریا)، جت‌های سنگین یا جت‌های باشناوری منفی اطلاق می‌شود (Roberts and Abessi, 2014). در شکل ۱ نمایی از یک جت سنگین نشان داده شده است.

<sup>2</sup> Outfalls

<sup>1</sup> Brine

پیشنهاد شده است، هرچند که دقت آن در بررسی‌های بعدی مورد تردید قرار گرفته است. از این‌رو در سال‌های اخیر محققان دیگری نیز آزمایش‌های گسترده‌ای بر روی اثر زاویه‌ی تخلیه‌کننده در میزان ترقیق جریان در محیط ساکن انجام داده‌اند.

را به دلیل دارا بودن طولانی‌ترین خط سیر<sup>۱</sup> و بیشترین میزان ترقیق در نقطه‌ی برخورد در مقایسه با زاویه‌های ۳۰، ۴۵ و ۹۰ درجه به عنوان حالت بهینه‌ی تخلیه معرفی کردند. به استناد این مطالعه، تخلیه با زاویه‌ی ۶۰ درجه به عنوان یک استاندارد عملی برای تخلیه‌ی جت‌های سنگین



**Fig. 1** A view of an inclined dense jet (Abessi, 2018)  
شکل ۱ نمایی از یک جت سنگین مورب (Abessi, 2018)

(Roberts, 2015b).

Shao and Law (2010) با بررسی آزمایشگاهی روی جت‌های سنگین با زاویه ۳۰ و ۴۵ درجه در محیط ساکن و در دو حالت آزاد و نزدیک به بستر به بررسی تاثیرگذاری احتمالی نزدیکی تخلیه‌کننده به بستر روی رفتار جریان اقدام کردند. مشاهده شد در زاویه‌ی ۳۰ درجه، مجاورت به بستر می‌تواند افزون بر برخی تغییرات در ویژگی‌های هندسی جریان، میزان ترقیق در نقطه‌ی بازگشت را حدود ۲۳ درصد نسبت به حالت آزاد کاهش دهد.

Abessi and Roberts (2015b) آزمایش‌های گسترده‌ای روی جت‌های سنگین مورب ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه که در آب کم‌عمق تخلیه می‌شوند، انجام دادند. سه رژیم جریان شامل آب عمیق، تماس سطحی و آب کم‌عمق شناسایی شد. بر مبنای نتایج این پژوهش، در آب‌های ساحلی کم‌عمق، نازل با زاویه‌ی ۳۰ درجه از این جهت که دارای فعل و انفعال‌های کمتری با سطح بوده و تاثیر بصری کمتری در سطح آب ایجاد می‌کند، دارای برتری بیشتری می‌باشد.

در زمینه‌ی تخلیه‌ی جت‌های با شناوری منفی تاکنون بررسی‌های آزمایشگاهی گسترده‌ای انجام شده است (Abessi 2018; Robert et al., 1997)؛ در حالی که در

Roberts et al. (1997) با بررسی عمیق‌تر تخلیه‌ی شورابه از جت‌های ۶۰ درجه، مجموعه‌ای از رابطه‌های تجربی برای پیش‌بینی ویژگی‌های جریان پیشنهاد و همچنین تعریفی برای تعیین فاصله‌ی میدان نزدیک ارائه کردند.

Lai and Lee (2012) مطالعه‌ی آزمایشگاهی جامعی بر روی جت‌های سنگین مورب با زاویه‌های ۱۵ الی ۶۰ درجه انجام دادند. بر مبنای مشاهده‌های آنها رفتار اختلاطی جریان تا بیشینه‌ی ارتفاع اوج‌گیری رفتاری جت مانند و تفاوت در میزان ترقیق برای زاویه‌های بین ۳۸ تا ۶۰ درجه ناچیز و قابل صرف نظر کردن است.

بر اساس مشاهده‌های آزمایشگاهی Abessi and Roberts (2015a) میزان ترقیق در نقطه‌ی برخورد در زاویه‌های ۴۵ تا ۶۵ درجه نسبت به زاویه‌ی نازل کمتر حساس است. با این وجود میزان ترقیق در انتهای میدان نزدیک به زاویه‌ی نازل بیشتر وابسته بوده و بیشینه‌ی آن در زاویه‌ی ۶۰ درجه رخ می‌دهد. به رغم آنکه تخلیه با زاویه‌ی ۶۰ درجه به جهت دارا بودن بیشترین میزان ترقیق در مجاورت بستر، مناسب تشخیص داده شده است؛ با این حال، ارتفاع بیشینه‌ی صعود جریان در آن به نسبت زیاد بوده و این زاویه برای تخلیه در ساحل‌های کم‌عمق ایجاد مشکل می‌کند (Abessi and

<sup>1</sup> Trajectory

$k - \varepsilon$  Realizable جریان را با دقت بیشتری نسبت به دیگر مدل‌های بررسی شده پیش‌بینی می‌کنند.

Zhang et al. (2017) تخلیه‌ی جت‌های سنگین مورب با زاویه‌های ۴۵ و ۶۰ درجه در محیط ساکن به همراه اثر بستر و اختلاط پس از آن روی دیواره را به صورت عددی و با رویکرد شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۲</sup> بررسی کردند. نتایج نشان داد که روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به صورت معقولی می‌تواند خم مرکزی جریان را پیش‌بینی کند. با این حال، ترقیق در نقطه‌ی برخورد در حدود ۲۰ درصد کمتر از میزان آزمایشگاهی برآورد شده است. افزایش موضعی غلظت گزارش شده توسط Abessi and Roberts (2015a) در نقطه‌ی برخورد نیز در این شبیه‌سازی بازتولید شد.

هنگامی که یک جت در نزدیکی یک سطح نفوذناپذیر قرار می‌گیرد، نفوذ آب محیطی از سمت نزدیک به مرز محدود می‌شود؛ در حالی که، در سمت مخالف چنین بازدارنده‌ای وجود ندارد. در نتیجه، بر مبنای اصل برنولی، یک تفاوت فشار در مقطع جت القا می‌شود، که نقش یک نیروی خارجی را بازی کرده و می‌تواند باعث انحراف جت به سمت مرز شده، تا اینکه تماس رخ دهد. این پدیده در ادبیات فنی به اثر کواندا مشهور است. Shao and Law (2010) در نتیجه بررسی‌های آزمایشگاهی خود گزارش کردند که این پدیده در جت‌های سنگین مورب ۳۰ درجه می‌تواند منجر به کاهش اختلاط و شوری بیش از حد در طول بستر شده، که ممکن است باعث اثرات سوء شدیدی روی جوامع کفزی شود.

میزان مجاورت خروجی یک تخلیه‌کننده به بستر،  $\gamma_0$ ، که فاصله‌ی میان مرکز دهانه‌ی نازل تا بستر است، را می‌توان با دو مقیاس طولی قطر نازل  $d$  و مقیاس طولی جت به پلوم  $L_M$  که به صورت زیر تعریف می‌شود، بی بعد کرد.

$$L_M = \frac{M_0^{3/4}}{B_0^{1/2}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} d Fr_d \quad (1)$$

در این رابطه  $M_0$  شار مومنتم،  $B_0$  شار شناوری و  $Fr_d$  عدد فرود چگالی است که در رابطه‌های زیر معرفی شده‌اند:

$$M_0 = \frac{1}{4} \pi d^2 U_0^2 \quad (2)$$

$$B_0 = g_0' Q_0 \quad (3)$$

مقایسه، مدل‌سازی عددی به میزان کمتری مورد توجه قرار گرفته است. در سال‌های اخیر مدل‌سازی رایانه‌ای تخلیه‌ی فاضلاب‌های شور آب شیرین‌کن‌های ساحلی در قالب پژوهش‌های عددی متنوعی گزارش شده است.

Vafeiadou et al. (2005) جت‌های مورب با شناوری منفی را با استفاده از مدل سه‌بعدی CFX-5 بررسی کردند. برای بستن معادله‌های آشفتگی جریان، مدل انتقال تنش برشی<sup>۱</sup> به کار گرفته شد. آن‌ها گزارش کردند که مدل استفاده شده، بیشینه ارتفاع اوج‌گیری را اندکی و نقطه‌ی بازگشت را به مقدار قابل توجهی کمتر از داده‌های آزمایشگاهی Roberts et al. (1997) پیش‌بینی می‌کند.

Oliver et al. (2008) شبیه‌سازی‌های خود را که با استفاده از مدل آشفتگی استاندارد  $k - \varepsilon$  بود، با داده‌های آزمایشگاهی تخلیه‌کننده‌های مورب با شناوری منفی مقایسه کردند. مدل  $k - \varepsilon$  استفاده شده بخشی از بسته‌ی استاندارد دینامیک سیالهای محاسباتی CFX بود. در این پژوهش تلاش شد از طریق اصلاح عدد اشمیت آشفتگی در معادله انتقال-انتشار غلظت، مدل راجهت‌ارائه پیش‌بینی‌هایی معقول‌تر و انسجی‌تر کرد. اگرچه این رویکرد باعث بهبود برخی از ویژگی‌ها به ویژه چگونگی پخشیدگی غلظت و میزان ترقیق شد؛ اما اثر کلی آن بر کیفیت پیش‌بینی‌ها بسیار ناچیز بود و این مدل قادر نبود به‌طور موثری توزیع عرضی غلظت متوسط را پیش‌بینی کند. همچنین در این مدل، میزان ترقیق در بیشینه ارتفاع خط مرکزی جریان کمتر از میزان داده‌های آزمایشگاهی برآورد می‌شود.

اختلاط جت‌های آشفتگی در ساحل‌های کم عمق کاربردهای متعدد مهندسی دارد. پیش‌بینی دقیق اثرهای متقابل این جت‌ها با سیال محیطی چالش‌های بسیاری دارد و کماکان به طور کامل روشن نشده است. Kheirkhah Gildeh et al. (2015) جت‌های سنگین با زاویه‌های ۳۰ و ۴۵ درجه را به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار حجم محدود OpenFOAM مدل کردند. از چندین مدل آشفتگی RANS به منظور ارزیابی دقت پیش‌بینی‌ها استفاده شد. نتایج این مطالعات با بررسی‌های پرشمار آزمایشگاهی مقایسه و مشاهده شد که مدل‌های آشفتگی LRR و

<sup>2</sup> LES: Large Eddy Simulation

<sup>1</sup> SST: Shear Stress Transport

اشاره کرد. در LES گردابه‌های بزرگ جریان که حامل بیشترین انرژی هستند به صورت مستقیم حل شده و گردابه‌های کوچکتر مدل می‌شوند. اما در RANS همه نوسان‌های آشفتگی مدل شده و تاثیر نوسان‌های آشفتگی روی میدان جریان متوسط با استفاده از مدل‌های آشفتگی دیده می‌شود. اگرچه به طور کلی LES دقیق‌تر از RANS است؛ اما هزینه‌ی محاسباتی آن نیز بسیار بیشتر از RANS بوده (و به مراتب کمتر از DNS) و در نتیجه در مسئله‌های رایج مهندسی، RANS بیشترین کاربرد را دارد.

با وجود اینکه استفاده از RANS برای شبیه‌سازی تخلیه‌کننده‌های دریایی مسوق به سابقه است، اما بیشتر این مطالعات معطوف به جت‌های آزاد می‌شود. در این تحقیق، به منظور بررسی تاثیر فاصله از بستر بر رفتار جت‌های سنگین ۳۰ درجه دو سری شبیه‌سازی به روش RANS و با اصلاح یک حلگر در نرم‌افزار متن باز OpenFOAM انجام می‌شود. در سری اول جت‌های ۳۰ درجه در فاصله‌ای از بستر بر حسب  $\gamma_0/d$  قرار گرفته اند که رفتار جت تداعی‌کننده‌ی جت آزاد باشد. در سری دوم، میزان فاصله تا بستر کاهش و در نتیجه مقدار  $\gamma_0/d$  کاهش یافته است. به طور همزمان، مقدار  $\gamma_0/L_M$  برای هر دو سری به صورتی در نظر گرفته شده است که همپوشانی داشته باشند. نتایج شبیه‌سازی‌ها در قالب نمودارها و جدول‌هایی ارائه و با مشاهده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های تحلیلی مقایسه می‌شوند.

## ۲- مواد و روش‌ها

معادله‌های حاکم بر این مسئله شامل شکل تراکم‌ناپذیر معادله‌های بقای جرم یا پیوستگی، بقای مومنتم یا ناویر-استوکس به همراه تخمین بوسینسک و معادله‌ی انتقال-انتشار غلظت می‌شود. بر مبنای تخمین بوسینسک هنگامی که تغییرات چگالی کم باشد، می‌توان با چگالی در ترم‌های زمانی و انتقالی به عنوان یک ثابت و تنها در ترم گرانشی به عنوان یک متغیر رفتار کرد (Ferziger and Perić, 2002). این معادله‌ها را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

معادله‌ی پیوستگی:

$$Fr_d = \frac{U_0}{\sqrt{g'_0 d}} \quad (4)$$

و

$$Q_0 = \frac{1}{4} \pi d^2 U_0 \quad (5)$$

$$g'_0 = g \left( \frac{\Delta \rho_0}{\rho_a} \right) = g \left( \frac{\rho_0 - \rho_a}{\rho_a} \right) \quad (6)$$

که در آن‌ها  $U_0$ ،  $Q_0$ ،  $g$ ،  $g'_0$ ،  $\Delta \rho_0$  و  $\rho_0$  و  $\rho_a$  به ترتیب شار حجمی تخلیه، سرعت جت، شتاب گرانشی، شتاب گرانشی اصلاح‌شده، تفاوت چگالی اولیه، چگالی جت و چگالی آب محیط هستند. کمیت‌های بی‌بعد حاصله‌ی  $\gamma_0/d$  و  $\gamma_0/L_M$  هر دو می‌توانند برای ارزیابی میزان مجاورت بستر استفاده شوند. در زمینه‌ی جت‌های سنگین مورب، میزان انحراف نازل نیز افزون بر میزان مجاورت به بستر، نقش مهمی در توسعه‌ی اثر کواندا بازی می‌کند. به صورتی که، با  $\gamma_0/d$  و  $\gamma_0/L_M$  یکسان، هرچه زاویه‌ی نازل نسبت به افق کمتر باشد، اثر کواندا بیشتر است (Shao and Law, 2010).

اگرچه با حل عددی معادله‌های حاکم بر فرآیندهای محیط‌زیستی، پیش‌بینی رفتار پدیده و طراحی مناسب آن‌ها با اجرای پیش فرض‌هایی مختلف ممکن می‌شود؛ اما همواره محدودیت در منابع محاسباتی، مانعی بزرگ بر سر راه این امر بوده است. به صورتی که حل مستقیم عددی (DNS) معادله‌های حاکم در آینده‌ای قابل پیش‌بینی، دور از دسترس به نظر می‌رسد. امروزه بسیاری از محققان تلاش کرده‌اند تا با استفاده از فرض‌هایی ساده‌کننده، هزینه‌ی محاسباتی حل این معادله‌ها را در حد توان محاسباتی موجود پایین بیاورند. از جمله‌ی این تلاش‌ها در زمینه‌ی تخلیه‌کننده‌های دریایی می‌توان به مدل‌های عددی CorJet و VisJet اشاره کرد. اما امکان استفاده از این مدل‌ها تنها تا هنگامی که فرض‌های ساده‌کننده‌ی آن‌ها برقرار باشند وجود دارد؛ لذا نمی‌توان برای بررسی همه‌ی پیش‌فرض‌های ممکن در طراحی فرآیند از این مدل‌ها بهره برد. در سال‌های اخیر با پیشرفت در زمینه‌ی علوم رایانه، امکان استفاده از روش‌هایی که با پالایش نوسان‌های جریان آشفته به حل عددی معادله‌های حاکم بر پدیده‌ها می‌پردازند به وجود آمده است. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) و همچنین معادله‌های ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده به روش رینولدز (RANS)

۲-۲- میدان محاسباتی و شرایط مرزی

تانکی با طول ۱/۱۵ متر، عمق ۰/۴ متر و عرض ۰/۴ متر در نظر گرفته شد؛ اما از آن جایی که مسئله متقارن است، برای کاهش هزینه‌ی محاسباتی، تنها نیمی از تانک مدل شد. در همه موارد به منظور پرهیز از برخورد جت با سطح آب، معیار رژیم آب عمیق ( $dFr_a/H < \lambda/0$ ) پیشنهاد شده توسط Abessi and Roberts (2015b) ارضا می‌شود. به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه‌ی محاسباتی موقعیت نقطه‌ی بازگشت و بیشینه ارتفاع صعود جریان که به ترتیب دورترین نقطه‌ها در راستای افقی و عمودی هستند در این پژوهش بررسی و برای ۴ شبیه‌سازی که در شمار سلول‌های شبکه با هم متفاوت بودند (۱۱۰۰۰۰، ۲۲۰۰۰۰، ۳۴۰۰۰۰، ۴۵۰۰۰۰ و ۶۸۰۰۰۰)، مقایسه شدند. مشاهده شد بیشترین تفاوت شبکه با ۴۵۰۰۰۰ سلول با شبکه‌ی متراکم‌تر در ویژگی‌های در نظر گرفته شده ۴ درصد است. از این‌رو از این شبکه که برابر شکل ۲ دارای تراکم بیشتر در نزدیکی نازل و بستر است برای انجام دیگر شبیه‌سازی‌ها استفاده شد.

شرایط مرزی برای دهانه‌ی نازل به صورت زیر اعمال شد:

$$u = U_0 \times \cos(\theta), v = U_0 \times \sin(\theta), w = 0, C = C_0$$

که  $C_0$  میزان غلظت در دهانه‌ی نازل،  $\theta$  میزان انحراف نازل نسبت به افق و همچنین  $u$ ،  $v$  و  $w$  به ترتیب مولفه‌های سرعت در راستاهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  می‌باشند. اندازه مرزی انرژی جنبشی آشفتگی  $k$  و اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی  $\varepsilon$  از رابطه‌ی ۱۵ که توسط Huai et al. (2010) برای جت‌های شناور پیشنهاد شده است، استفاده شد:

$$k = 0.06u^2, \varepsilon = 0.06u^3/d \quad (15)$$

در مقطع در تماس با اتمسفر، شرط مرزی نیومان با مقدار ثابت صفر برای متغیرهای  $u$ ،  $v$ ،  $w$  و  $C$  و همچنین به منظور تعیین فشار مرجع، شرط مرزی دریکله با میزان ثابت صفر برای متغیر  $P_{rgh}$  در نظر گرفته شد. در مقطع خروجی شرایط مرزی مشابه مقطع در تماس با اتمسفر در نظر گرفته شد با این تفاوت که برای متغیر  $P_{rgh}$  نیز شرط مرزی نیومان با میزان ثابت صفر اعمال شد. در دیواره‌ها، شرط عدم لغزش برای متغیر سرعت و برای متغیرهای  $k$  و  $\varepsilon$  نیز از تابع‌های دیواره‌ی بهبود یافته توسط Launder and

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (7)$$

معادله‌های ناویر-استوکس به همراه تخمین بوسینسک:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\mathbf{U}) = -\nabla \left( \frac{P_{rgh}}{\rho_a} \right) - (\mathbf{g} \cdot \mathbf{r}) \nabla \left( \frac{\rho}{\rho_a} \right) + \nabla \cdot (2\nu_{eff} D(\mathbf{U})) \quad (8)$$

$$P_{rgh} = P - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{r} \quad (9)$$

$$D(\mathbf{U}) = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T) \quad (10)$$

$$\nu_{eff} = \nu_t + \nu \quad (11)$$

معادله‌ی انتقال-انتشار غلظت:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}C) = \nabla \cdot (\nabla (k_{eff} C)) \quad (12)$$

$$k_{eff} = \frac{\nu_t}{Sc_t} + \frac{\nu}{Sc} \quad (13)$$

در معادله‌های بالا،  $\mathbf{U}$  بردار سرعت،  $\rho_a$  چگالی سیال محیطی،  $P_{rgh}$  فشار منهای فشار هیدرواستاتیک،  $\mathbf{g}$  بردار شتاب ثقل،  $\mathbf{r}$  بردار مکان،  $\rho$  چگالی،  $\nu_{eff}$  لزوجت سینماتیکی موثر،  $D(\mathbf{U})$  بیان‌کننده نرخ تانسور کرنش،  $P$  فشار،  $T$  نماد ترانهاد،  $\nu_t$  لزوجت سینماتیکی آشفته،  $\nu$  لزوجت سینماتیکی مولکولی،  $C$  غلظت،  $k_{eff}$  ضریب پخشیدگی (دیفیوژن) موثر غلظت،  $Sc_t$  عدد اشمیت آشفته و  $Sc$  عدد اشمیت مولکولی می‌باشند.

همچنین برای محاسبه چگالی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\rho/\rho_a = 1 + \beta(C - C_a) \quad (14)$$

که  $\beta$  و  $C_a$  به ترتیب ضریب انقباض شوری و غلظت نمک در سیال محیطی می‌باشند. در این پژوهش، میزان ضریب انقباض شوری و لزوجت سینماتیکی در دمای ۲۵ درجه‌ی سلسیوس از رابطه پیشنهادی El-Dessouky and Ettouney (2002) برای چگالی و لزجت آب دریا استخراج و به ترتیب برابر  $8/94 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  و  $7/52 \times 10^{-4} \text{ ppt}^{-1}$  در نظر گرفته شد. اگرچه در جریان‌های آشفته میزان پخشیدگی مولکولی  $D = \nu/Sc$  در مقایسه با پخشیدگی آشفته بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است؛ اما در این پژوهش اثر آن در نظر گرفته شده و میزان آن در دمای ۲۵ درجه‌ی سلسیوس بر مبنای Rard and Miller (1982) بازه‌ی  $1/48 - 1/57 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  تعیین شد. همچنین میزان عدد اشمیت آشفته بر مبنای تجربه‌های پیشین در شبیه‌سازی‌های عددی مسئله‌های مشابه برابر ۰/۷ اعمال شده است (Lai and Socolofsky, 2018).

گردایان به وسیله‌ی روش استاندارد حجم محدود با استفاده از انتگرال گوسی گسسته‌سازی شدند. همچنین برای محاسبه‌ی مقادیر روی مراکز سطوح از روی مراکز حجم، در ترم‌های پخشیدگی و گردایان از روش درونیابی linear و در ترم‌های انتقالی به جز ترم انتقالی سرعت که از روش linearUpwind استفاده شد، در دیگر موارد از روش درونیابی limitedLinear با ضریب یک استفاده شد. در همه شبیه‌سازی‌های این تحقیق، معیار همگرایی در هر گام زمانی برای متغیرهای  $u, v, w, C, k$  و  $\varepsilon$  برابر  $10^{-7}$  و برای متغیر  $P_{rgh}$  برابر  $10^{-9}$  در نظر گرفته شد.

### ۳- بحث‌ها و نتایج

در این تحقیق ۶ شبیه‌سازی از رفتار جت‌های سنگین تخلیه شونده از نازل مورب ۳۰ درجه در دو حالت نزدیک به بستر (N) و دور از آن (F) انجام گرفته است که ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در ادامه نتایج شبیه‌سازی‌ها ارائه، بحث و با داده‌های آزمایشگاهی و تحلیلی مقایسه می‌شوند.

#### ۳-۱- رخ نما (پروفیل) غلظت خودهمسان

رخ نما (پروفیل)‌های غلظت متوسط دو مورد از شبیه‌سازی‌ها در سه مقطع در طول خط سیر جریان در شکل ۳ نشان داده شده است. این رخ نماها عمود بر خط مرزی و به صورت  $C/C_c$  بر حسب  $r/b_c$  که  $C_c$  بیشینه غلظت محلی در مقطع عرضی،  $r$  فاصله‌ی شعاعی از خط مرکزی و  $b_c$  محلی است که  $C/C_c = 1/e$ ، نرمال شده‌اند. از آن جایی که رخ نماها متقارن نیستند، مقدار  $b_c$  از روی منحنی برازش شده‌ی گوسی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{C}{C_c} = e^{\left(\frac{-r^2}{b_c^2}\right)} \quad (16)$$

همچنین در اینجا  $s$  بیانگر فاصله‌ی مقطع مورد نظر تا دهانه‌ی نازل در امتداد خط مرکزی جریان است که با حاصلضرب عدد فرود چگالی در قطر نازل بی‌بعد شده است (Abessi and Roberts, 2016). این فاصله‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که مقطع اول در محلی واقع شده که رفتار جریان جت مانند است یعنی جایی که مومنتم بر شناوری غالب است. مقطع دوم در نزدیکی نقطه‌ی بیشینه صعود جریان و دیگری در محدوده‌ی رفتار پلوم مانند جریان است.

(Spalding (1983) استفاده شد. در صفحه‌ی تقارن از شرط مرزی symmetry استفاده شد. این شرط مرزی با قرار دادن گردایان عمود بر صفحه برابر صفر اعمال می‌شود.

#### ۳-۲- پیکربندی جریان و تنظیم‌های محاسباتی

شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM انجام شد. این نرم‌افزار معادله‌های حاکم بر سیال را با روش حجم محدود حل می‌کند. در این نرم‌افزار، حلگر *buoyantBoussinesqPimpleFoam* که یک حلگر انتقال دمای ناپایا برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر، شناور و آشفته است، برای حل معادله‌های حاکم بر مسئله‌ی حاضر اصلاح شد. این حلگر از تخمین بوسینسک برای در نظر گرفتن اثر شناوری و از الگوریتم PIMPLE برای حل معادله‌های جفت (کوپل) شده‌ی فشار-مومنتم استفاده می‌کند. این الگوریتم ترکیبی از الگوریتم‌های مشهور SIMPLE و PISO است که اجازه می‌دهد از کورانت‌های بزرگتر و در نتیجه از گام‌های زمانی بزرگتر استفاده کرد. با این حال، در این تحقیق، از این حلگر در حالت PISO و با عدد کورانت کمتر از یک استفاده شد، تا این اطمینان حاصل شود که اطلاعات مهم وابسته به زمانی از دست نمی‌رود. برای مطالعه‌ی بیشتر در زمینه‌ی الگوریتم PIMPLE می‌توان به (Holzmann (2016) مراجعه کرد.

مدل آشفتگی که در شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شود، نقش مهمی در دقت نتایج دارد. در این تحقیق، از مدل  $k - \varepsilon$  Realizable (Shih et al. (1995) استفاده شد. برای بسته‌سازی معادله‌های آشفتگی جریان استفاده شد. این مدل آشفتگی در جریان‌های با نرخ برش متوسط بالا (مانند جت‌ها) در مقایسه با مدل استاندارد  $k - \varepsilon$  که میزان لزوجت آشفته را دست‌بالا برآورد می‌کند، عملکرد بسیار بهتری دارد. همچنین از این مدل آشفتگی در برخی پژوهش‌های عددی انجام شده در این زمینه همچون (Huai et al. (2010)، (Kheirkhah Gildeh et al. (2015) و (Ardalan and Vafaei (2019) نیز استفاده شده و این عملکرد بهبود یافته مشاهده شده است.

برای گسسته‌سازی ترم‌های زمانی، از روش مرتبه اول و ضمنی Euler استفاده شد. ترم‌های انتقالی، پخشیدگی و



جدول ۱ ویژگی شبیه‌سازی‌ها

Table 1 Simulations characteristics

Case No.	Inclined angle $\theta$	Nozzle diameter $d$ (mm)	Distance $y_0$ (mm)	$\Delta\rho/\rho_a$ (%)	Discharge velocity $U_0$ (m/s)	Reynolds number $Re$	Densimetric Froude number $Fr$	Jet to plume characteristic length scale $L_M$ (mm)	Bed proximity parameter $y_0/L_M$
F1	30	5.80	24.00	0.995	0.356	2271	15.0	81.69	0.29
F2	30	5.80	24.00	0.995	0.503	3209	21.1	115.43	0.21
F3	30	5.80	24.00	0.995	0.602	3841	25.3	138.15	0.17
F4	30	5.80	24.00	0.995	0.727	4639	30.6	166.83	0.14
N1	30	5.80	11.17	0.995	0.487	3107	20.5	111.70	0.10
N2	30	5.80	11.17	0.995	0.325	2073	13.7	74.71	0.15

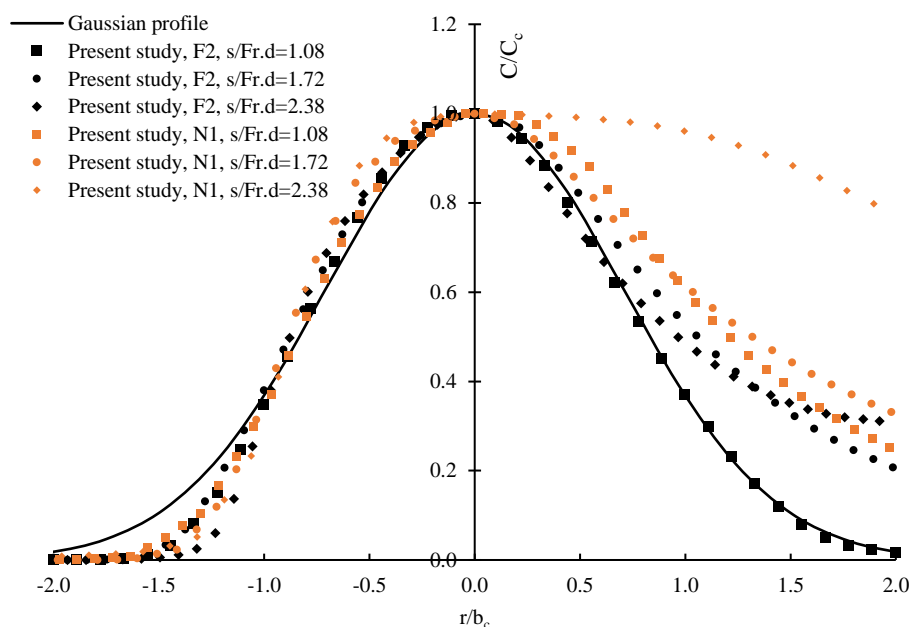


Fig. 3 Mean concentration profile perpendicular to the centerline

شکل ۳ رخ نماهای غلظت متوسط عمود بر خط مرکزی

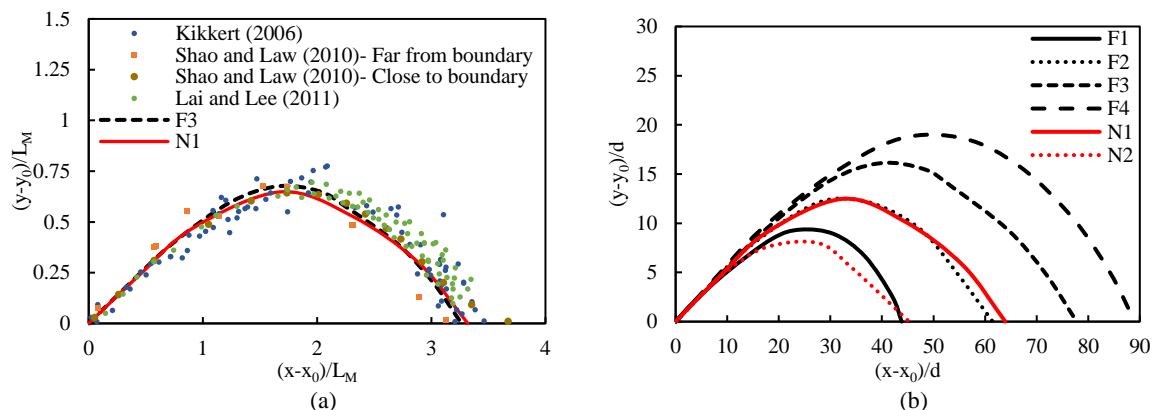


Fig. 4 (a) Comparison of centerline trajectories with different  $Fr_d$ ; (b) Normalized centerline trajectories

شکل ۴ (a) مقایسه‌ی خطوط سیر جت‌ها با عددهای فرود چگالی متفاوت؛ (b) خطوط سیر جت نرمال شده

هستند، هرچند خط سیری که از کمیت غلظت به دست می‌آید کمی زودتر نزولی می‌شود (Shao and Law, 2010). برای مقایسه‌ی خط سیر جت‌های مختلف، به طور معمول از دو کمیت قطر نازل و مقیاس طولی جت به پلوم جهت بی‌بعدسازی نتایج استفاده می‌شود. در شکل ۴ (a) بی‌بعدسازی با قطر نازل صورت گرفته است. برابر انتظار مشاهده می‌شود در هر دو سری F و N با افزایش عدد فرود چگالی، طول خط سیر جت بیشتر شده و نقطه‌های اوج و بازگشت در فاصله‌ی دورتری نسبت به محل تخلیه قرار می‌گیرند. در شکل ۴ (b) برای مقایسه‌ی خط سیرهای به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی با مدل‌های آزمایشگاهی، داده‌ها با مقیاس طولی جت به پلوم نرمال شده‌اند. شکل ۴ (b) سازگاری بسیار خوب خط سیر جت‌های شبیه‌سازی شده در هر دو سری F و N را با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. این سازگاری هم در قسمت صعودی خط سیر یعنی جایی که جریان تحت تاثیر مومنتم اولیه است و هم در قسمت نزولی آن، که جریان پلوم شکل است، مشاهده می‌شود. همچنین لازم به یادآوری است خط سیر جت‌های شبیه‌سازی شده در حالت آزاد حین صعود و سقوط به تقریب متقارن هستند که در تطابق با پژوهش (Shao and Law (2010) و در تضاد با پژوهش

جایی که شناوری بر مومنتم غلبه دارد.

لازم به یادآوری است در شکل ۳، سمت چپ نمودار در قسمت بیرونی جت و سمت راست نمودار در سمت درونی یا سمتی که به بستر نزدیک است، قرار دارند. مطابق انتظار در لبه‌ی بیرونی جریان، یعنی مکان‌هایی که نفوذ سیال محیطی به درون جت بدون هیچ محدودیتی رخ می‌دهد، رفتار خودهمسان گوسی مشاهده شده و در لبه‌ی درونی جریان با دور شدن از منبع تخلیه به دلیل ناپایداری شناور نمودار از حالت گوسی فاصله می‌گیرد. این فاصله‌گیری از نمودار گوسی در سری N که نازل‌های در فاصله‌ی کمتری نسبت قرار گرفته و تحت تاثیر بستر می‌باشند، نسبت به سری F بیشتر است که این امر احتمال دارد به دلیل نفوذ کمتر سیال محیطی به درون جریان و تاثیر کواندا رخ می‌دهد.

### ۳-۲- خط سیر جت

خط سیر یا خط مرکزی جت ساده‌ترین مفهوم توصیف‌کننده‌ی رفتار جت است که از طریق اتصال مقادیر بیشینه‌ی سرعت یا غلظت در مقاطع عمود بر جریان به دست می‌آید. خط سیرهایی که از دو کمیت سرعت و یا غلظت به دست می‌آیند تا حدودی منطبق بر یکدیگر

جدول ۲ ارزیابی کارایی مدل عددی

Table 2 Evaluation of performance of the numerical model

Quantity	Proportionality coefficients	Average of series-F	Average of free jets experimental studies	Absolute difference (%)	Average of series-N	Shao and Law (2010)-boundary-affected	Absolute difference (%)
Terminal rise height	$y_t/d.Fr_d$	0.98	1.07	8.41	0.99	1.05	5.71
Horizontal location of return point	$x_r/d.Fr_d$	2.96	3.07	3.58	3.12	2.88	7.69
Return Point dilution	$S_r/Fr_d$	0.71	1.13	37.17	0.69	1.18	41.52
Vertical location of centerline peak	$y_m/d.Fr_d$	0.62	0.66	6.06	0.60	0.66	9.09
Horizontal location of centerline peak	$x_m/d.Fr_d$	1.61	1.77	5.85	1.70	1.70	0.00

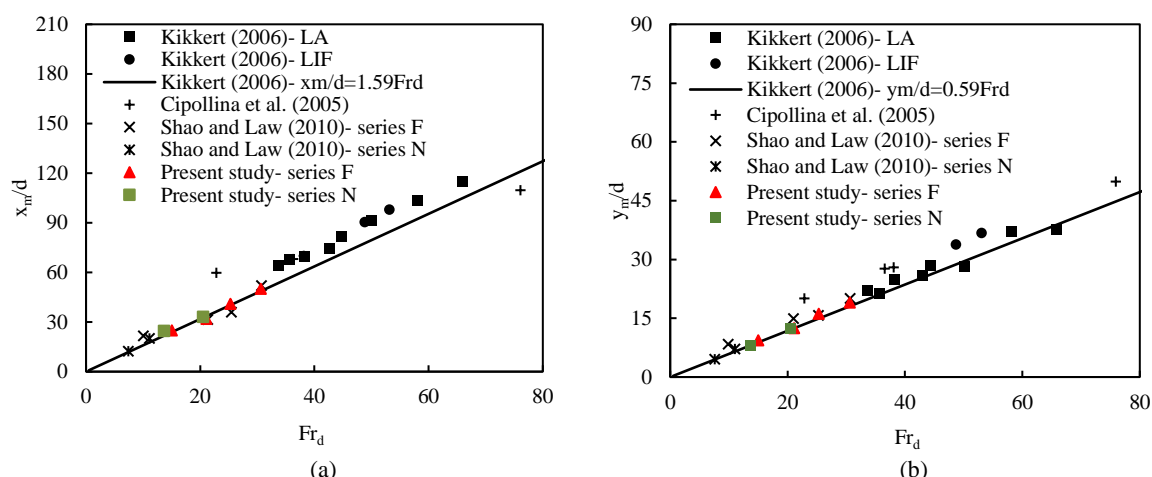


Fig. 5 Normalized (a) horizontal and (b) vertical location of centerline peak versus  $Fr_d$

شکل ۵ موقعیت (a) افقی و (b) عمودی نرمال شده‌ی بیشینه ارتفاع خط مرکزی جریان بر حسب  $Fr_d$

جدول ۳ مقایسه‌ی ضریب‌های عددی و آزمایشگاهی

Table 3 Comparison of numerical and experimental coefficients

Quantity	Proportionality coefficients	Present study	Shao and Law (2010)		Lai and Lee (2011)	Kikkert et al. (2006)			Abessi and Roberts (2015)
			$0.10 \leq y_0/L_M \leq 0.15$	$y_0/L_M \geq 0.15$		LA data	LIF data	Model prediction	
Terminal rise height	$y_t/d.Fr_d$	0.98	1.05	-	0.95	1.00	1.19	1.02	1.17
Horizontal location of return point	$x_r/d.Fr_d$	3.02	2.88	3.00	3.18	3.14	3.44	2.95	-
Return Point dilution	$S_r/Fr_d$	0.70	1.18	1.45	0.82	-	-	-	-
Vertical location of centerline peak	$y_m/d.Fr_d$	0.61	0.66	-	0.65	0.56	0.66	0.62	0.79
Horizontal location of centerline peak	$x_m/d.Fr_d$	1.64	1.70	1.54	1.95	1.75	1.85	1.70	-

بالقوه تحت تاثیر بستر قرار می‌گیرد، خط سیر اندکی از حالت متقارن فاصله می‌گیرد که این مورد به صورت محسوس‌تر در شبیه‌سازی N2 نیز مشاهده شده است. البته به صورت کلی مشاهده می‌شود در هر دو سری F و N خطوط سیر به تقریب متقارن هستند و مجاورت به بستر تاثیر قابل چشم پوشی در خط سیر جریان داشته است.

(Ferrari and Querzoli 2004) این تفاوت در مشاهدات آزمایشگاهی به دلیل تفاوت در سطح دقت و روش آزمایشگاهی به کار گرفته شده در این دو پژوهش است. در مطالعات آزمایشگاهی یک پدیده ثابت، ناهمخوانی نتایج پژوهشگران مختلف برهم، پدیده ای معمول بوده اما روند تغییرات در یک محدوده مشخص است. Shao and Law (2010) گزارش کردند هنگامی که جت

## ۳-۳- بیشینه ارتفاع خط مرکزی جت

بیشینه ارتفاع خط مرکزی جت از روی خط سیر جت به دست می‌آید که با داده‌های ارائه شده در بخش پیش استخراج و ترسیم شده است. مولفه‌های افقی و عمودی این نقطه پس از نرمال کردن با قطر نازل نسبت به عدد فرود چگالی در شکل ۵ ترسیم شده اند. شکل ۵ (a) نشان می‌دهد موقعیت افقی رسیدن جت به نقطه اوج یا بیشینه ارتفاع به تقریب منطبق بر خط حاصل از رابطه‌ی نیمه‌تجربی ارائه شده توسط (Kikkert 2006) است که این امر سازگار با آزمایش‌های (Shao and Law 2010) و به طور کلی اندکی کمتر از دیگر پژوهش‌های آزمایشگاهی پیشتر انجام شده است. همچنین در شکل ۵ (b) مشاهده می‌شود موقعیت عمودی این نقطه نیز بر خط حاصل از رابطه‌ی نیمه‌تجربی ارائه شده توسط (Kikkert 2006) منطبق است که در سازگاری با پژوهش‌های آزمایشگاهی پیشین است. در جدول ۲ ارزیابی کمی شبیه‌سازی‌ها با مقایسه‌ی میانگین هر سری با میانگین آزمایشگاهی انجام شده است. از آن جایی‌که بر مبنای اطلاع نویسندگان پژوهش (Shao and Law 2010) تنها پژوهشی است که اثر مرز را تاکنون به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده است، ارزیابی کمی شبیه‌سازی‌های سری N از طریق مقایسه با داده‌های این پژوهش انجام شده است؛ که البته این امر نشانگر خلایق است که باید با انجام پژوهش‌های بیشتر پر شود. در این جدول مشاهده می‌شود که شبیه‌سازی‌های انجام شده با دقت خوبی بیشینه ارتفاع خط مرکزی جت و همچنین دیگر ویژگی‌های هندسی جریان را پیش‌بینی می‌کنند که انحراف کمتر از ۱۰ درصد از میانگین داده‌های آزمایشگاهی مؤید این امر است. همچنین در جدول ۲ مشاهده می‌شود که اختلاف موقعیت افقی و عمودی بیشینه ارتفاع خط مرکزی جت و همچنین دیگر ویژگی‌های مورد بررسی در دو سری تفاوت محسوسی ندارند؛ از این رو میانگین میزان بی‌بعد شده‌ی شبیه‌سازی‌ها برای ویژگی‌های مختلف در جدول ۳ به صورت کمی با پژوهش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی پیشین مقایسه شده اند. در جدول ۳، با مقایسه‌ی مولفه‌های افقی و عمودی بیشینه ارتفاع خط مرکزی جت که نسبت به  $d.Fr_d$  نرمال شده‌اند، با نتایج به دست آمده از

پژوهش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی گذشته می‌توان استنباط کرد که موقعیت این نقطه‌ها در شبیه‌سازی‌های انجام شده سازگاری مطلوبی با نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی و تحلیلی پیشین دارد.

## ۳-۴- بیشینه ارتفاع صعود جریان

همان‌طور که پیشتر بیان شد، جت سنگین مورب به واسطه‌ی مومنتم اولیه صعود می‌کند. این صعود تا جایی ادامه پیدا کرده که مولفه‌ی عمودی مومنتم به صفر برسد و پس از آن در این مکان، به دلیل شتاب گرانشی به سمت بستر سقوط می‌کند. بیشینه ارتفاع صعود جریان که با در نظر گرفتن بازشدگی جریان در نقطه اوج محاسبه می‌شود، از مهم‌ترین ویژگی‌ها در تخلیه‌ی جت‌های سنگین است. چراکه در طراحی‌ها سعی می‌شود این ارتفاع تا حدی باشد که از برخورد پساب با سطح آب جلوگیری شود. اجماعی برای تعیین این نقطه در میان محققان به ویژه در پژوهش‌های آزمایشگاهی وجود ندارد که این امر موجب عدم قطعیت در مقایسه‌ی نتایج ارائه شده در پژوهش‌های گذشته با یکدیگر شده است. (Lai and Lee 2012) مرز چشمی را در فاصله‌ای شعاعی از هسته جریان تعریف می‌کند که  $C/C_c = 25/0$ . در این نقطه تناوب آشفتگی، یعنی بخشی از زمان که این محل توسط جریان آشفته اشغال شده است، برابر  $0/5$  است. مدل انتگرالی مشهور CORJET برای محاسبه مرز چشمی دو نقطه انقطاع ۳ و ۲۵ درصد غلظت بیشینه مقطع را در نظر می‌گیرد. در این پژوهش مشابه مطالعه (Shao and Law 2010) از سطح انقطاع ۳ درصد برای تعیین ارتفاع صعود بیشینه استفاده می‌شود.

در شکل ۶ نمودار ارتفاع صعود بیشینه جت که با قطر نازل نرمال شده است بر حسب عدد فرود چگالی رسم شده است. مشاهده می‌شود همانند دیگر ویژگی‌های هندسی پیشتر بررسی شده، ارتفاع صعود ترمینال نرمال شده منطبق بر خط حاصل از رابطه‌ی تحلیلی (Kikkert 2006) بوده و در عین حال سازگاری بسیار خوبی با مطالعات آزمایشگاهی پیشین دارد. همچنین میزان میانگین ارتفاع صعود نرمال شده با  $d.Fr_d$  در شبیه‌سازی‌های انجام شده در جدول ۲ به صورت

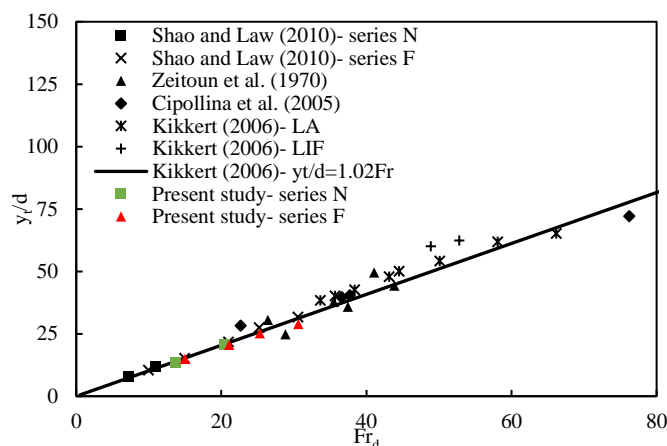


Fig. 6 Normalized terminal rise height versus  $Fr_d$

شکل ۶ بیشینه ارتفاع صعود جریان نرمال شده بر حسب  $Fr_d$

تحقیق حاضر است. لازم به یادآوری است بنابر تعریف Roberts et al. (1997) میدان اختلاط فعال از نازل آغاز شده و تا جایی ادامه می‌یابد که میزان نوسان‌های غلظت به کمتر از ۵ درصد میزان میانگین برسد. پس از این ناحیه جریان به صورت جریان چگال درآمده و روی بستر پخش می‌شود. میزان اختلاط در میدان دور بسیار کمتر از میدان نزدیک بوده و خارج از کنترل مهندس طراح می‌باشد. در شکل ۷ نمودار فاصله‌ی افقی نقطه‌ی بازگشت که با قطر نازل بی‌بعد شده است بر حسب عدد فرود چگالی نشان داده شده است. فاصله‌ی افقی نرمال‌شده‌ی نقطه‌ی بازگشت به دست آمده از شبیه‌سازی‌های این تحقیق، چه در سری F و چه در سری N و همچنین آزمایش‌های Shao and Law (2010) روی خط حاصل از رابطه‌ی تحلیلی Kikkert (2006) به تقریب منطبق هستند که این امر اندکی کمتر از نتایج دیگر پژوهش‌های آزمایشگاهی انجام شده است.

### ۳-۶- ترقیق

میزان ترقیق مهم‌ترین ویژگی در ارزیابی اثرات محیط زیستی تخلیه‌کننده‌های دریایی است. همواره تلاش می‌شود تخلیه‌کننده‌ها به صورتی طراحی شوند تا بیشترین میزان ترقیق انجام پذیرد. میزان ترقیق  $s$  از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$s = \frac{C_0 - C_a}{C - C_a} \quad (17)$$

کمی ارزیابی شده و در جدول ۳ نیز به با مطالعات پیشین مقایسه شده است.

### ۳-۵- فاصله‌ی افقی نقطه‌ی بازگشت

جت سنگین مورب به دلیل شناوری منفی خود پس از اوج‌گیری به سمت بستر سقوط کرده و در نقطه‌ای که در ادبیات فنی به نقطه‌ی برخورد معروف است، با بستر تماس پیدا می‌کند. میزان ترقیق در نقطه‌ی برخورد به طور معمول به عنوان یک شاخص در تعیین اثرات زیانباری که تخلیه‌ی پساب می‌تواند روی جوامع کفزی باعث شود، در نظر گرفته می‌شود. اما از آن جایی که موقعیت نقطه‌ی برخورد به فاصله‌ی نازل از بستر و همچنین شیب آن بستگی دارد و در نتیجه وابسته به مکان تخلیه است؛ به جهت اینکه نتایج به صورت کلی قابل استفاده باشند، نقطه‌ی بازگشت که بنابر تعریف محلی است که جریان به سطح ارتفاعی منبع تخلیه باز می‌گردد و مستقل از ارتفاع منبع تخلیه و شیب بستر است، بررسی شده است. از این جهت که در شرایط واقعی میزان ارتفاع منبع تخلیه و شیب بستر در مقایسه با کل ناحیه‌ی اختلاط در نظر گرفته شده، ناچیز است، میزان ترقیق در نقطه‌ی برخورد و بازگشت به تقریب یکسان و در نقطه‌ی برخورد اندکی بیشتر است. در شرایطی که میزان ارتفاع منبع تخلیه و یا شیب بستر زیاد باشد، آنگاه اثرات این دو پارامتر نیز می‌بایست در نظر گرفته شده و به صورت جداگانه ارزیابی شود که خارج از محدوده‌ی مورد بررسی

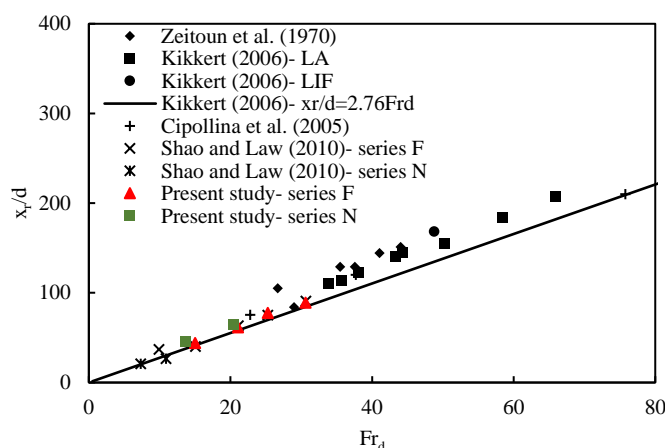


Fig. 7 Normalized horizontal location of return point versus  $Fr_d$

شکل ۷ فاصله‌ی افقی نقطه‌ی بازگشت نرمال شده بر حسب  $Fr_d$

#### ۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف شبیه‌سازی عددی تخلیه‌ی جت‌های سنگین ۳۰ درجه در محیط ساکن و در دو حالت آزاد و مجاور به بستر انجام شده است. بدین منظور دو سری شبیه‌سازی که در یک سری جت‌ها در فاصله‌ای زیاد نسبت به بستر قرار داشته که تداعی کننده‌ی جت آزاد باشند و در سری دیگر جت‌ها در ارتفاعی به مراتب کمتر نسبت به حالت پیشین قرار گرفتند، صورت گرفته است. ویژگی‌های هندسی و اختلاطی جت‌ها شامل خط سیر، بیشینه ارتفاع خط مرکزی، بیشینه ارتفاع صعود جریان، موقعیت نقطه‌ی بازگشت و میزان ترقیق در بیشینه ارتفاع خط مرکزی و نقطه‌ی بازگشت به صورت کمی و کیفی ارائه، بحث و با نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی مقایسه شدند. مقایسه‌ها نشان داد، مدل استفاده شده در این پژوهش با دقت بالایی ویژگی‌های هندسی جت‌های سنگین را پیش‌بینی می‌کند؛ در حالیکه میزان ترقیق در نقطه‌ی بازگشت به صورت قابل ملاحظه‌ای محافظه‌کارانه‌تر از داده‌های آزمایشگاهی برآورد شده است. این اختلاف در سری شبیه‌سازی مجاور به بستر بیشتر از حالت آزاد بوده است؛ که نارسایی شبیه‌سازی در قسمت‌هایی که لایه‌ی مرزی شکل می‌گیرد را بیان می‌کند. همچنین از طریق مقایسه‌ی نتایج دو سری آزمایش بالا، امکان ایجاد پدیده کواندا و تاثیر احتمالی آن روی رفتار جریان بررسی شد. مشاهده شد در حالت‌هایی که در این پژوهش بررسی شده است اثرات این پدیده قابل چشم‌پوشی

که در اینجا  $C$  میزان غلظت در محل مورد نظر است. میزان میانگین ترقیق ناشی از شبیه‌سازی‌های انجام شده در نقطه‌ی بازگشت و بیشینه ارتفاع خط مرکزی در جدول ۳ ارائه و با نتایج دیگر پژوهش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی مقایسه شده است. از این جهت که تفاوت چشم‌گیری در رفتار جت در شرایطی که در این پژوهش بررسی شده است، مشاهده نشد، نتایج هر دو سری نزدیک و دور از بستر در یک ستون ارائه شده است. این درحالی است که Shao and Law (2010) کاهش در حدود ۲۳ درصدی در میزان ترقیق در شرایطی که پارامتر مجاورت به بستر بین ۰/۱ تا ۰/۱۵ باشد را گزارش کرده اند. همچنین مشاهده می‌شود در شبیه‌سازی‌های انجام شده در مقایسه با دیگر پژوهش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی به صورت قابل ملاحظه‌ای میزان ترقیق محافظه‌کارانه‌تر پیش‌بینی می‌شود که این مسئله در نتایج پژوهش‌های Zhang et al. (2017) و Robinson et al. (2016) نیز پیشتر گزارش شده است که می‌تواند به دلیل ثابت در نظر گرفتن عدد اشمیت آشفته در معادله‌ی انتقال-انتشار غلظت باشد؛ زیرا عدد اشمیت آشفته کمیتی وابسته به جریان بوده و در جریان‌های آشفته به واسطه‌ی ذات نوسانی جریان آشفته و تغییرات زیاد در کمیت‌های وابسته به جریان، متصور شدن یک مقدار ثابت برای یک کمیت وابسته به جریان دور از واقعیت می‌نماید. از این رو انجام پژوهش‌هایی به منظور بیان عدد اشمیت آشفته بر حسب کمیت‌های توده‌ای جریان می‌تواند کمک شایانی به افزایش سطح دقت شبیه‌سازی‌ها در میزان ترقیق کند.

نویسنده‌های مقاله مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره BNUT/390035/99 اعلام می‌دارند.

### ۶- فهرست نشانه‌ها

$d$	قطر نازل (m)
$L_M$	مقیاس طولی جت به پلوم (m)
$y_0$	فاصله‌ی مرکز نازل تا بستر (m)
$H$	عمق آب (m)
$Fr_d$	عدد فرود چگالی
$M_0$	شار مومنتم ( $m^4s^{-2}$ )
$B_0$	شار شناوری ( $m^4s^{-3}$ )
$Q_0$	شار حجمی ( $m^3s^{-1}$ )
$g$	شتاب گرانشی ( $ms^{-2}$ )
$g'_0$	شتاب گرانشی اصلاح شده ( $ms^{-2}$ )
$U$	سرعت ( $ms^{-1}$ )
$U_0$	سرعت اولیه‌ی جت ( $ms^{-1}$ )
$P$	فشار ( $kgm^{-1}s^{-2}$ )
$P_{rgh}$	فشار منهای فشار هیدرواستاتیک ( $kgm^{-1}s^{-2}$ )
$C$	غلظت (ppt)
$C_a$	غلظت سیال محیطی (ppt)
$C_c$	غلظت بیشینه در مقطع (ppt)
$k_{eff}$	ضریب پخشیدگی موثر غلظت (ppt)
$Sc$	عدد اشمیت
$Sc_t$	عدد اشمیت آشفته
$D$	ضریب پخشیدگی مولکولی ( $m^2s^{-1}$ )
$k$	انرژی جنبشی آشفته‌گی ( $m^2s^{-2}$ )
$s$	میزان ترقیق
$x_m$	مولفه افقی بیشینه ارتفاع خط مرکزی (m)
$y_m$	مولفه عمودی بیشینه ارتفاع خط مرکزی (m)
$y_t$	بیشینه ارتفاع صعود جریان (m)
$r$	فاصله‌ی شعاعی (m)
$b_c$	فاصله‌ی شعاعی که $C/C_c = 1/e$ (m)
$v_{eff}$	لزوجت سینماتیکی موثر ( $m^2s^{-1}$ )
$v_t$	لزوجت سینماتیکی آشفته ( $m^2s^{-1}$ )
$v$	لزوجت سینماتیکی مولکولی ( $m^2s^{-1}$ )
$\varepsilon$	از بین رفتن انرژی جنبشی آشفته‌گی ( $m^2s^{-3}$ )
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )

است. البته بنابر اطلاع نویسندگان پژوهش‌های آزمایشگاهی در زمینه‌ی ایجاد و تاثیرات این پدیده در رفتار جت‌های سنگین مورب محدود به یک مطالعه می‌شود که لزوم انجام پژوهش‌های بیشتر عددی و آزمایشگاهی در این زمینه را ایجاب می‌کند.

با در نظر گرفتن نتایج پژوهش‌های پیشین و نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که در آب‌های عمیق استفاده از نازل ۶۰ درجه به دلیل داشتن بیشترین میزان ترقیق در نقطه‌ی برخورد و انتهای میدان نزدیک در اولویت است. همچنین با توجه به اینکه بیشترین میزان ترقیق در قسمت پلوم مانند جریان (نه جت مانند) و پیش از برخورد پساب با بستر صورت می‌گیرد، توصیه می‌شود تا حد امکان نازل در ارتفاع بالاتری از بستر نصب شود. اما در آب‌های کم‌عمق چنانچه استفاده از نازل ۶۰ درجه منجر به برخورد هسته‌ی جریان به سطح آب شود، در این شرایط نازل با زاویه‌ی کمتر به دلیل جلوگیری از به هم ریختگی سطح آب و کاهشی که در میزان ترقیق رخ می‌دهد، دارای برتری است. در شرایطی که عمق آب به اندازه‌ای کم باشد که طراح افزون بر کاهش زاویه، ملزم به قرار دادن نازل در فاصله‌ای نزدیک به بستر باشد، آنگاه با توجه به یافته‌های این پژوهش نیازی به در نظر گرفتن مقادیر متفاوت برای برآورد پارامترهای طراحی نیست و از همان مقادیر جت‌های آزاد می‌توان برای طراحی فرآیند استفاده کرد.

در نهایت به غم اثرات محیط زیستی تخلیه شورابه برابر استانداردهای موجود، چنانچه طراح بتواند با تخلیه مناسب، غلظت آلاینده را تا حد تحمل موجودهای ساکن در بستر پایین آورد تخلیه مجاز بوده و می‌تواند بدون زیان‌های محیط زیستی انجام پذیرد. در این زمینه، چنانچه با استفاده از تخلیه کننده‌های تک مجرای دستیابی به استاندارد (در دبی‌های زیاد) ممکن نباشد از انواع تخلیه کننده‌های چند مجرای و پخش کننده (دیفیوزر)های خطی و بوت‌ه شکل می‌توان استفاده کرد. مشاهده‌های آزمایشگاهی و میدانی تضمین کننده دستیابی به سطح قابل تحمل از غلظت آلاینده‌ها به این روش می‌باشند.

### ۵- سپاسگزاری

Holzmann, T. (2016). Mathematics, numerics, derivations and OpenFOAM®. Loeben, Germany: Holzmann CFD, URL: <https://holzmann-cfd.de> (visited on Nov. 29, 2017).

Huai, W., Li, Z., Qian, Z., Zeng, Y., Han, J. and Peng, W. (2010). Numerical simulation of horizontal buoyant wall jet. *Journal of Hydrodynamics*, Springer, 22(1), 58–65.

Kikkert, G.A. (2006). Buoyant jets with two and three-dimensional trajectories. University of Canterbury. Civil Engineering.

Kikkert, G.A., Davidson, M.J. and Nokes, R.I. (2007). Inclined negatively buoyant discharges. *Journal of Hydraulic engineering*, American Society of Civil Engineers, 133(5), 545–554.

Lai, C.C.K. and Lee, J.H.W. (2012). Mixing of inclined dense jets in stationary ambient. *Journal of hydro-environment research*, Elsevier, 6(1), 9–28.

Lai, C.C.K. and Socolofsky, S. A. (2018). Budgets of turbulent kinetic energy, Reynolds stresses, and dissipation in a turbulent round jet discharged into a stagnant ambient. *Environmental Fluid Mechanics*, Springer, 1–29.

Launder, B.E. and Spalding, D.B. (1983). The numerical computation of turbulent flows. Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion, Elsevier, 96–116.

Oliver, C.J., Davidson, M.J. and Nokes, R.I. (2008). k-ε predictions of the initial mixing of desalination discharges. *Environmental Fluid Mechanics*, Springer, 8(5–6), 617.

Pope, S. B. (2001). Turbulent flows. IOP Publishing.

Rard, J.A. and Miller, D.G. (1982). Mutual diffusion coefficients of SrCl 2–H 2 O and CsCl–H 2 O at 25° C from Rayleigh interferometry. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, Royal Society of Chemistry, 78(3), 887–896.

Roberts, P.J.W., Ferrier, A., and Daviero, G. (1997). Mixing in inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, 123(8), 693–699.

Robinson, D., Wood, M., Piggott, M. and Gorman, G. (2016). CFD modelling of marine discharge mixing and dispersion. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, Taylor & Francis, 4(2), 152–162.

Roberts, P.J. and Abessi, O. (2014). Optimization of desalination diffusers using three-dimensional laser-induced fluorescence. Agreement Number R11 AC81, 535.

$\rho_0$  چگالی سیال ( $\text{kgm}^{-3}$ )  
 $\rho_a$  چگالی سیال محیطی ( $\text{kgm}^{-3}$ )  
 $\beta$  ضریب انقباض شوری ( $\text{ppt}^{-1}$ )  
 $\theta$  انحراف نازل نسبت به افق

## ۷- منابع

Abessi, O. (2018). Chapter 7 - Brine Disposal and Management—Planning, Design, and Implementation. V. G. B. T.-S. D. H. Gude, ed., Butterworth-Heinemann, 259–303.

Abessi, O., and Roberts, P. J. W. (2015a). Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments. *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, 141(8), 6015009.

Abessi, O. and Roberts, P.J.W. (2015b). Dense jet discharges in shallow water. *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, 142(1), 4015033.

Abessi, O., Roberts, P.J. and Gandhi, V. (2017). Rosette diffusers for dense effluents. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(4), p.06016029.

Abessi, O. and Roberts, P.J.W. (2018). Rosette diffusers for dense effluents in flowing currents. *Journal of Hydraulic Engineering*.

Abessi, O., Saeedi, M., Davidson, M. and Zaker, N.H. (2012). Flow Classification of Negatively Buoyant Surface Discharge in an Ambient Current. *Journal of Coastal Research*.

Ardalan, H. and Vafaei, F. (2019). CFD and Experimental Study of 45° Inclined Thermal-Saline Reversible Buoyant Jets in Stationary Ambient. *Environmental Processes*, Springer, 1–21.

Cederwall, K. (1968). Hydraulics of marine waste water disposal. Chalmers tekniska högskola.

El-Dessouky, H.T. and Ettouney, H.M. (2002). Fundamentals of salt water desalination. Elsevier.

Ferziger, J.H. and Perić, M. (2002). Computational methods for fluid dynamics. Springer.

Fox, R.O. and Stiles, H.L. (2003). Computational models for turbulent reacting flows. Cambridge university press Cambridge.

Gildeg, H.K., Mohammadian, A., Nistor, I., and Qiblawey, H. (2015). Numerical modeling of 30 and 45 inclined dense turbulent jets in stationary ambient. *Environmental Fluid Mechanics*, Springer, 15(3), 537–562.



Saeedi, M., Farahani, A.A., Abessi, O. and Bleninger, T. (2012). Laboratory studies defining flow regimes for negatively buoyant surface discharges into crossflow. *Environmental fluid mechanics*, 12(5), 439-449.

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

Shih, T.-H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J. (1995). A new k- $\epsilon$  eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, Elsevier, 24(3), 227–238.

Vafeiadou, P., Papakonstantis, I. and Christodoulou, G. (2005). Numerical simulation of inclined negatively buoyant jets. The 9th international conference on environmental science and technology, September, 1–3.

Zeitoun, M.A., Reid, R., McHilheny, W.F. and Mitchell, T.M. (1970). Model studies of outfall system for desalination plants. Washington, DC.

Zhang, S., Law, A.W.-K. and Jiang, M. (2017). Large eddy simulations of 45° and 60° inclined dense jets with bottom impact. *Journal of Hydro-Environment Research*, Elsevier, 15, 54–66.