

Validation of CORMIX Model in Simulation of Single Port Brine Discharge into Seawater

Maryam Mahdieh Najafabadi¹, Bayramali Mohammadnezhad^{2*}, Abdolreza Karimi³

¹Master of Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical Engineering, Qom University of Technology (QUT), Iran.

²Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical Engineering, Qom University of Technology (QUT), Iran.

³Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical Engineering, Qom University of Technology (QUT), Iran.

* mohammadnezhad@qut.ac.ir

Received: 14 June 2021, Accepted: 10 August 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Over recent decades, utilizing desalination plants with reverse osmosis technology has been expanded all around the world whereas discharging their brine has become a serious environmental concern. This is due to this fact that this phenomenon can have catastrophic environmental consequences. Consequently, numerical models have grown which enable engineers to simulate and predict brine discharge before erecting marine outfalls. CORMIX is a functional and useful model which is able not only predicts discharge effluent behavior, but also it applies environmental limitation in its simulation. Therefore, a plethora of researchers have used the CORMIX to design marine outfall and recognize jet behavior in waterbodies. However, evaluating the reliability and accuracy of the CORMIX is crucial.

Methodology: In this study, the CORMIX model was evaluated for the simulation of discharging dense jets via a single port diffuser in a stagnant and dynamic seawater body. Discharge velocity (u_0) and diffuser diameter (d) have been chosen as two main variables which play an effective role in jet behavior. Then, the primarily jet characteristics including dilution at the impact point (S_i), the horizontal location of the impact point (X_i), the horizontal location of the centerline peak (X_m), and the vertical location of the centerline peak (Z_m) were calculated and their governed equations were extracted. Then, quantitative and qualitative analysis of CORMIX model results was performed with the experimental data using standard deviation and RMSE statistical methods.

The CORMIX model: The CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System) is a computer model for analyzing, forecasting, and designing for the discharge of effluents, toxic water, or conventional contaminants into a variety of aquatic environments. There is a flow classification system within CORMIX. Flow classes are presented based on technical principles and using hydrodynamic models with dimensional analysis relationships from the experimental data. Dimensional analysis is the simplest technique to formulate reasonable assumptions in the complex physical conditions. Variables are considered to have the greatest effect on dilution, and variables are kept constant with the least effect, to reduce the number of independent variables in the problem. The selected independent variables are related to each other by the size of the flux, which represents the main forces controlling the effluent behavior.

Experimental data for dense jet in stagnant and dynamic ambient: Based on Roberts and Toms (1987), in a stagnant ambient for a specific discharge angle, jet dilution and geometric properties are a function of port diameter (d) and densimetric Froude number (Fr). So, the dimensionless parameters consist of $\frac{S_i}{Fr}$, $\frac{X_i}{d.Fr}$, $\frac{X_m}{d.Fr}$, and $\frac{Z_m}{d.Fr}$ are commonly evaluated to describe jet behavior. For discharge in the dynamic ambient besides port diameter and densimetric Froude number, discharge velocity (u_0), ambient velocity (u_a), and the horizontal angle of the port for the ambient current are effective. Therefore, the dimensionless parameter $S_i/Fr=C_i(u_r.Fr)^{1/2}$ where C_i is constant and u_r is relative velocity and is defined as $u_r = u_a/u'_0$ was used to evaluate jet behavior.

Result and discussion: After conducting approximately 180 simulations, the CORMIX outcome for dilution at the impact point (S_i), the horizontal location of the impact point (X_i), the horizontal location of the centerline peak (X_m), and the vertical location of the centerline peak (Z_m) were normalized in the dimensionless form.

Validation of dense jet discharge into stagnant ambient: As for S_i and X_i parameters, the more port diameter and discharge velocity decline, the more dilution rate at the impact point increase until the relation $Fr>15$ applied on the CORMIX results. After that, the outcome followed the experimental data trend with 0.2 and 0.025 differences for S_i and X_i , respectively. Meanwhile, they were underestimated which is so vital to be considered when the brine is discharged in a water body with a sensitive ecosystem. In addition, the S_i parameter was more sensitive to discharge velocity fluctuation whereas X_i was not so reliant on port diameter and discharge velocity. As regards of X_m , the outcome of CORMIX for $Fr>25$ with high turbulence followed experimental data while they were underestimated with 0.14 error.

Validation of dense jet discharge into dynamic ambient: In dynamic ambient, due to the lack of studies in terms of jet geometric features for $\theta =60^\circ$ and $\sigma =0$, the study limited to dilution at the impact point. For S_i , overall, decreasing port diameter and discharge velocity had a positive effect on the dilution rate increase. Although their changes were negligible as $u_r.Fr<0.2$, the CORMIX results were overestimated with 0.77 compared to the experimental data.

Conclusion: The results of CORMIX will be reliable only if the values of Fr have located in the specified domain (for S_i and X_i , $Fr>15$ and for X_m and Z_m , $Fr>30$). In the dynamic ambient, besides port diameter and discharge velocity, the ambient velocity has an effective impact on the dilution rate and jet geometric properties. Consequently, for S_i , the design should be done based on the relation $u_r.Fr>0.2$. Nevertheless, since CORMIX results were underestimated compared to experimental studies, calculated errors must be considered.

In the dynamic environment, besides port diameter and discharge velocity, the ambient velocity has an effective impact on the dilution rate and jet geometric properties. Consequently, the design should be done based on the relation $u_r.Fr>0.2$ for S_i parameter. Nevertheless, since CORMIX results were underestimated compared to experimental studies, it is essential that calculated errors be considered.

Key words: Desalination, Dense jet, Nearfield region, Brine discharge, Single port diffuser, Negative buoyancy

© 2021 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/>)

اعتبارسنجی مدل CORMIX در شبیه‌سازی تخلیه پساب شور تک مجرای به آب دریا

مریم مهدیه نجف آبادی^۱، بایرامعلی محمدنژاد^{۲*}، عبدالرضا کریمی^۲

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران- محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، ایران

* mohammadnezhad@qut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۹، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: تخلیه پساب شور سایت‌های نمک‌زدایی در محیط‌های دریایی، یکی از چالش‌های مهم زیست محیطی است. طراحی بهینه و مناسب سامانه تخلیه پساب یک روش کارآمد برای کاهش اثرات زیست محیطی آب شیرین‌کن‌ها می‌باشد. مدل عددی CORMIX ابزاری سودمند و کارآمد است که توانایی شبیه‌سازی رفتار پساب شور برای بررسی و کنترل محدودیت‌های زیست‌محیطی را دارد. این مدل برای شبیه‌سازی تخلیه جت پساب شور تک مجرای در محیط‌های دریایی با جریان راکد و پویا ارزیابی شد. در مجموع با در نظر گرفتن دو متغیر مهم سرعت تخلیه (u_0) و قطر نازل (d)، حدود ۹۰ شبیه‌سازی برای محیط راکد و ۹۰ شبیه‌سازی برای محیط پویا انجام شد. نتایج نشان داد که در محیط راکد همواره باید $F_r > 15$ برقرار باشد تا نتایج مدل قابل استناد باشد اما چنانچه عمق محل تخلیه محدود باشد، باید $F_r > 30$ لحاظ شود. بنابراین، فراسنجه‌های انتشار جت و نرخ رقیق سازی آن نسبت به تغییرپذیری‌های سرعت تخلیه حساس‌تر از قطر نازل می‌باشند، بنابراین برای کنترل رفتار جت و رسیدن به بازه فرود چگال مطلوب در طراحی‌ها، بهتر است u_0 تغییر داده شود. به‌طور کلی نتایج مدل CORMIX برای تخلیه پساب شور در محیط راکد همواره نسبت به نتایج آزمایشگاهی دست پایین برآورد می‌شود و اعمال خطای شبیه‌سازی در طراحی‌ها ضروری می‌باشد. در محیط پویا، برای اطمینان از نتایج مدل، باید همواره رابطه بی بعد $u_0.F_r > 0.2$ برقرار باشد. بنابراین برای برقراری این رابطه، در محیط‌هایی که نسبت سرعت محیط به سرعت تخلیه (u_0) پایین است، می‌توان با کاهش قطر نازل میزان $u_0.F_r$ را افزایش داد.

کلیدواژه‌گان: آب شیرین کن، جت چگال، میدان نزدیک، تخلیه پساب شور، تخلیه تک مجرای، شناوری منفی.

۱- مقدمه

برآورده شود (Höpner and Windelberg, 1997). از سوی دیگر، آب شیرین‌کن‌ها منابع امنی برای تأمین آب شیرین در بلند مدت می‌باشند که مستقل از بارش عمل نموده و در منطقه‌هایی که منابع آب معمول، ناکافی باشد و یا به طور مضاعف استفاده شود، بسیار کارآمد هستند (Palomar et al., 2012). اسمز معکوس در تصفیه آب دریا یک فناوری در حال توسعه است که امروزه به سبب مصرف کم انرژی و کارآمدی بیشتر در مقایسه با دیگر فناوری‌ها، بیش از ۶۰٪ کارخانه‌های آب شیرین‌کن را تشکیل می‌دهد (Frank et al., 2019; Sola et al., 2019). پساب شور یک

رشد و گسترش جمعیت جهان، افزایش شهرنشینی، بهبود شیوه زندگی، افزایش فعالیت‌های اقتصادی از یک سو و کمبود آب شرب و افزایش آلودگی منابع آب موجود از سوی دیگر باعث افزایش تقاضا برای آب شیرین قابل شرب شده است و تأمین آب پایدار و قابل دسترس را به یکی از مسئله‌های مهم و چالش‌های اصلی جامعه‌های امروز تبدیل کرده است (Panagopoulos et al., 2019). اگرچه راهبرد مصرف مجدد آب راهکاری موثر در رفع این نیاز به شمار می‌آید، اما روند سریع افزایش تقاضا نمی‌تواند توسط شیوه‌های سنتی تأمین آب و روش‌های احیا کننده آب،

به همین منظور پیرامون محل تخلیه، ناحیه‌ای اختصاصی با عنوان ناحیه اختلاط در نظر گرفته می‌شود که رقیق‌سازی اولیه جت در آن رخ می‌دهد و دامنه آن تا جایی ادامه می‌یابد که کیفیت پساب تخلیه شده با استانداردهای کیفیت آب در آن پیکره آبی همخوانی داشته باشد. ناحیه اختلاط بر مبنای رفتار پساب به دو منطقه مختلف فیزیکی با عنوان "میدان نزدیک" و "میدان دور" تقسیم می‌شود (شکل ۲). اختلاط ناحیه میدان نزدیک، که در مجاورت نقطه تخلیه واقع شده‌است، تحت تاثیر تلاطم (Turbulence) ناشی از شناوری اولیه و مومنوم جت ناشی از تخلیه پساب در مقیاس‌های کوچک (متر و دقیقه) صورت می‌گیرد و به ویژگی‌های فیزیکی تخلیه مانند تفاوت چگالی بین پساب شور و آب دریا، شار شناوری، شار جنبشی، نرخ جریان، هندسه دهانه و عمق بستر وابسته‌است (Cipollina et al., 2004; Kheirkhah Gildeh, 2013; Loya-Fernández et al., 2012). هرچه جت حاصله از محل تخلیه فاصله می‌گیرد، تاثیر ویژگی‌های فیزیکی تخلیه بر اختلاط پساب شور کاهش می‌یابد تا جایی که اختلاط ناشی از تلاطم جت از بین می‌رود. سپس پساب شور به شکل یک جریان چگال در طول بستر دریا حرکت می‌کند و میزان رقیق‌سازی آن تنها تحت تاثیر فرآیندهای محیط آبی، انتشار و پخش ملکولی تولید شده توسط جریان‌های دریایی و امواج، در مقیاس‌های بزرگ (کیلومتر و ساعت) صورت می‌گیرد. این ناحیه "میدان دور" نامیده می‌شود (Cipollina et al., 2004; Malcangio and Petrillo, 2010; Kress et al., 2020).

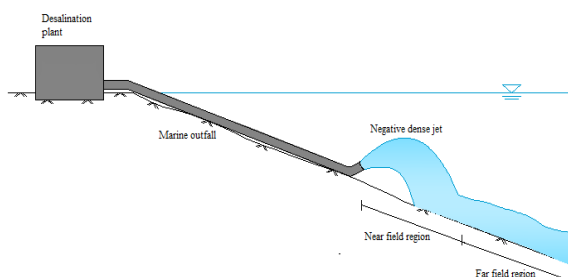


Fig. 2 Schematic of mixing zone due to brine discharge and the near field region and far field region

شکل ۲ نمای کلی از ناحیه اختلاط ناشی از تخلیه پساب شور و ناحیه میدان نزدیک و ناحیه میدان دور

محصول جانبی فرآیند نمک‌زدایی در کارخانه‌های SWRO است (شکل ۱) که در محیط‌های دریایی تخلیه شده و می‌تواند تا ۲.۵ برابر شوری بالاتر از آب دریا داشته‌باشد (Purnalna et al., 2003). تا چندی پیش اغلب آب‌شیرین‌کن‌ها پساب شور خود را به طور مستقیم و از طریق کانال‌های سطحی به آب‌های ساحلی تخلیه می‌کردند اما امروزه سازمان حفاظت محیط زیست هر گونه تخلیه سطحی را ممنوع کرده (Alameddine and El-Fadel, 2007) و ساخت خروجی‌های مستغرق دریایی، مجهز به یک خط لوله و نازل را برای دفع پساب شور ضروری دانسته است. نازل با هدف سرعت بخشیدن به فرآیند اختلاط و رقیق‌سازی پساب شور با محیط آبی و کاهش شوری پساب تا سطح قابل قبول استفاده می‌شود تا کمترین اثرگذاری‌های آلاینده‌گی را بر موجودهای دریایی داشته‌باشد (Abessi and Roberts, 2014; Loya-Fernández et al., 2012). هنگامی که پساب شور توسط یک نازل تک مجرای در بستر پهنه آبی تخلیه می‌شود، یک جت چگال با فلاکس شناوری منفی شکل می‌گیرد. جت ایجاد شده، ناحیه‌ای پیرامون محل تخلیه ایجاد می‌کند که در مقایسه با پهنه آبی، شوری بسیار بالایی دارد (شکل ۲) (Malcangio and Petrillo, 2010). در این ناحیه، رشد و تکثیر گونه‌های آبی، بقاء در مرحله لاروی، تراکم جمعیت و ویژگی‌های باروری آن‌ها تحت تاثیر قرار می‌گیرد (Bleninger and Jirka, 2008; Danoun, 2007).

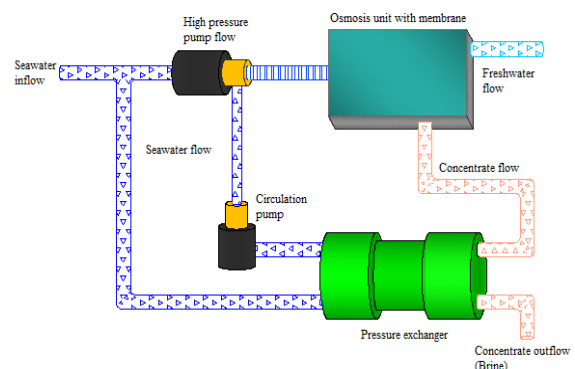


Fig. 1 Schematic of operation of desalination plant with reverse osmosis technology

شکل ۱ نمای کلی از کارکرد کارخانه آب شیرین کن با فرآیند اسمز معکوس

اسمز معکوس (RO)، برای تخلیه پساب با شناوری منفی نیز گسترش یافت (Doneker and Jirka, 2007). در ادامه، افزون بر اینکه محققان زیادی از مدل CORMIX برای بررسی تأثیر فراسنجه‌های هندسی جت بر میزان رقیق‌سازی پساب شور با شناوری منفی، حساسیت سنجی و ارائه دستورکارهای طراحی بهینه استفاده کردند (Del Bene et al., 1994; Bleninger and Jirka, 2008). به کارگیری این نرم‌افزار در تحلیل و کنترل نتایج بدست‌آمده از مدلسازی‌های آزمایشگاهی برای تخلیه پساب شور با شناوری منفی نیز گسترش یافت (Valero and Bung, 2016; Angelidis et al., 2017; Ardalan and Vafaei, 2018).

با توجه به افزایش مقبولیت و استفاده روزافزون نرم‌افزار CORMIX در تخلیه پساب شور با چگالی منفی و کمبود بررسی‌های اعتبارسنجی برای این نرم‌افزار، ضروری است که دقت و صحت نتایج بدست‌آمده از این نرم‌افزار ارزیابی و صحت سنجی شود. در این بررسی نتایج مدل CORMIX برای شبیه‌سازی تخلیه پساب شور ناشی از کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن با فرآیند اسمز معکوس به صورت مستغرق و در فاصله قابل توجهی از ساحل از طریق خروجی دریایی مجهز به نازل تک مجرای در دو محیط راکد و پویا به صورت کمی و کیفی بررسی شده است. علت انتخاب محیط راکد این بود که اغلب به عنوان بدترین حالت برای طراحی و برآورده سازی قوانین زیست محیطی فرض می‌شود. رابطه‌های حاکم بر انتشار آب شور در محیط دریا، بر مبنای نتایج مدل CORMIX استخراج و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی صحت سنجی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- داده‌های اولیه

ویژگی‌های اصلی یک جت چگال منفرد با سرعت تخلیه u_0 و چگالی ρ_0 در عمق H و در یک محیط راکد لایه‌بندی نشده با چگالی ثابت ρ_a ($\rho_a < \rho_0$) در شکل ۳ نشان داده شده است. جت متراکم با فلاکس شناوری منفی تولید شده، باعث ایجاد یک جریان برشی شدید با محیط آبی و در نتیجه یک تلاطم شدید شده و عرض آن از طریق فرآیند تداخل

در دهه‌های اخیر به منظور شناخت بهتر ناحیه اختلاط، افزایش اختلاط جت حاصل از تخلیه پساب شور و کاهش اثرگذاری‌های زیانبار زیست‌محیطی آن بررسی‌های مختلفی با هدف طراحی نازل‌ها صورت گرفته است. بررسی‌های میدانی به طور عمده به منظور شناسایی مسیر حرکت جت حاصل از تخلیه پساب شور، محل برخورد آن با بستر محیط آبی (Loya-Fernández et al., 2012)، بررسی کیفیت آب و ارزیابی اثرات زیست محیطی در ناحیه اختلاط (Frank et al., 2019) انجام شده‌اند. اما این روش به خاطر دشواری اندازه‌گیری و نبود امکان اصلاح ساختار نازل‌ها پس از ساخت کمتر استفاده می‌شوند. در مطالعه‌های آزمایشگاهی به بررسی اثرگذاری‌های فراسنجه‌های جت شامل سرعت تخلیه (u_0) (Roberts and Toms, 1987)، زاویه تخلیه (θ) (Ardalan and Vafaei, 2018)، قطر نازل (d) و چگالی جت (ρ_0) (Cipollina et al., 2005)، نرخ رقیق‌سازی (S) (Abessi and Roberts, 2014) و شناسایی رفتار جت حاصل از تخلیه پساب (Abessi and Roberts, 2016) پرداخته شده که منجر به ارائه رابطه‌ها و محدودیت‌هایی در مبحث تخلیه پساب شور شده است. اما به دلیل هزینه‌های بالا، وقت‌گیر بودن و خطای اندازه‌گیری در این روش‌ها، مدل‌های عددی و رایانه‌ای رواج یافتند. این مدل‌ها بسیار مقرون به صرفه بوده و این قابلیت را به طراحان داده که پیش از ساخت خروجی‌های دریایی، از طریق شبیه‌سازی محیط تخلیه و مدلسازی خروجی‌ها، رفتار و مسیر جت را برآورد کرده و مناسب‌ترین مکان و فراسنجه‌های هندسی را برای طراحی نازل‌ها انتخاب کنند تا اثرات زیست محیطی وارد بر اکوسیستم منطقه تخلیه تا حد ممکن کاهش یابد (Cipollina et al., 2004; Malcangio and Petrillo, 2010; Kheirkhah Gildeh, 2013; Oliver et al., 2013; Crowe et al., 2016; Mansour et al., 2020; Pistocchi et al., 2020). در این میان مدل CORMIX به سبب کاربری آسان و سریع بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این مدل در آغاز برای دفع پساب با شناوری مثبت طراحی شد و در طراحی خروجی‌های دریایی برای دفع پساب حاصل از کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن حرارتی استفاده شد (Alameddine and El-Fadel, 2007). اما با توسعه فناوری‌های غشایی و گسترش آب‌شیرین‌کن‌ها با فرآیند

پساب شور معادل ۷ متر بر ثانیه نیاز می‌باشد. لذا به منظور بررسی رفتار جت چگال در سرعت‌های مختلف، بازه انتخاب شده برای عدد فرود چگال $50 < F_r < 5$ در نظر گرفته شد. در انتخاب قطر نازل نیز کمترین قطر با هدف جلوگیری از گرفتگی نازل‌ها به خاطر عامل‌های زیستی ۲۰ cm گرفتگی (Palomar et al., 2012) و بیشینه آن برای زاویه تخلیه عمودی ۶۰ درجه برای $d < H$ (عمق تخلیه) انتخاب شد (Doneker and Jirka, 2007).

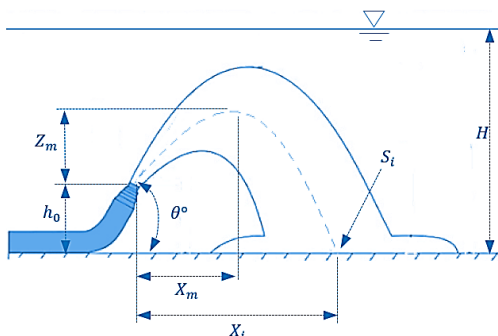


Fig. 3 The most important characteristics of inclined dense jet for single port discharge

شکل ۳ مهم‌ترین ویژگی‌های جت چگال مایل در تخلیه تک مجرای

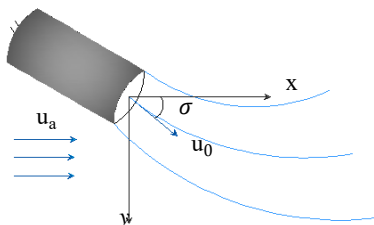


Fig. 4 Plan view of an inclined dense jet

شکل ۴ نگاره طرح جت چگال مایل

مقادیر جدول ۱ به عنوان داده‌های ورودی در مدل‌سازی استفاده شد. این مقادیر مربوط به یک آب‌شیرین‌کن با فناوری RO در اسپانیا می‌باشد که پساب شور خود را از طریق یک لوله دریایی مجهز به نازل تک مجرای با زاویه تمایل ۶۰ درجه نسبت به افق تخلیه می‌کند (Loya-Fernández et al., 2012). افزون بر این به منظور ساده سازی در بررسی رفتار جت حاصل از تخلیه پساب شور تک مجرای، پساب یک سیال نیوتنی تراکم ناپذیر با چگالی بالاتر از چگالی محیط ($\rho_a < \rho_0$) و تخلیه به صورت آشفته

در جهت جریان گسترش می‌یابد. افزون بر این، با توجه زاویه تخلیه (θ) و غلبه مومنتوم تخلیه پساب، جت ایجاد شده در یک مسیر صعودی حرکت می‌کند و در طول مسیر صعود مومنتوم جت کاهش یافته و با نیروی شناوری منفی برابر می‌شود، در این حالت جت به بالاترین ارتفاع صعود خود (h) می‌رسد و پس از آن بدلیل غلبه نیروی شناوری منفی، جت به سمت پایین سرازیر می‌شود تا با بستر برخورد کند.

دو ویژگی عمده که بر ویژگی‌های تخلیه پساب و رفتار جت تاثیرگذارند عبارت‌اند از: (۱) فراسنجه‌های مربوط به هندسه سازه تخلیه و ویژگی‌های پساب و (۲) ویژگی‌های آب محیط و شرایط کلی منطقه تخلیه (از جمله نزدیکی به سازه‌های آبی مانند سد یا اکوسیستم‌های آبی حساس)، بر ویژگی‌های تخلیه پساب و در نهایت بر رفتار جت تاثیرگذار است. بنابراین برای طراحی مناسب سامانه تخلیه پساب شور توسط CORMIX مشخص بودن برخی فراسنجه‌های تخلیه پساب و همچنین شرایط محیط آبی پذیرنده پساب ضروری می‌باشد و مشخص بودن برخی دیگر، به طراحی بهتر و ایمن‌تر کمک می‌کند.

در این بررسی متغیرهای مسئله از بین فراسنجه‌های مهم و موثر در افزایش اختلاط پساب شور انتخاب شد که عبارت‌اند از سرعت تخلیه پساب شور (u_0) و قطر نازل (d). فراسنجه‌های هندسی اصلی جت شامل رقیق سازی در نقطه برخورد جت (S_i)، محل افقی نقطه برخورد جت (X_i)، محل افقی اوج خط مرکزی جت (X_m) و ارتفاع اوج خط مرکزی جت (Z_m) که در طراحی نازل تک مجرای نقش اساسی ایفا می‌کنند، در محدوده دامنه میدان نزدیک بررسی و اعتبارسنجی شدند (شکل‌های ۳ و ۴). برای انتخاب محدوده سرعت تخلیه از عدد فرود چگال استفاده شد. برای جلوگیری از نفوذ ناگهانی آب محیط درون پخش نازل، کمترین میزان عدد فرود چگال باید ۱۰ در نظر گرفته شود (Kheirkhah Gildeh, 2013).

همچنین بررسی پیستوچی (Pistocchi et al., 2020) نشان داد که برای رسیدن به ۱۰ تا ۳۳ درصد رقیق‌سازی پساب شور حاصل از یک سایت نمک‌زدایی با قابلیت تأمین آب شرب جمعیت ۱۸۰ میلیون نفری، بیشینه سرعت تخلیه

در ناحیه اختلاط اولیه، برای سازگاری با محدودیت‌های قانونی و همچنین پیش‌بینی رفتار پساب تخلیه شده می‌باشد. به همین منظور این نرم‌افزار مجهز به محدوده گسترده‌ای از پیش و پس پردازشگرهای داده‌های اولیه برای آماده سازی آن‌ها در مرحله ورود اطلاعات، رسم نتایج خروجی و ارائه توصیه‌های کاربردی می‌باشد. قابلیت‌های اجرایی دیگر این نرم افزار شامل، تحلیل رفتار هیدرودینامیکی جریان در شرایط مختلف و تحت بار آلاینده‌های خانگی، صنعتی و حرارتی و نیز در نظر گرفتن اثرگذاریه‌های زبری بستر و باد در تحلیل رفتار پساب در میدان دور می‌باشد. نرم افزار CORMIX از چهار زیر مدل یکپارچه هیدرودینامیکی شامل CORMIX1 (تخلیه تک مجرای CORMIX2 (تخلیه چندپورت)، CORMIX3 (تخلیه سطحی) و DHYDRO (زیر مدل هیدرودینامیکی برای تجزیه و تحلیل تخلیه‌های چگال و رسوب در محیط ساحلی) تشکیل شده‌است که می‌تواند دفع پساب با شناوری مثبت، منفی و خنثی را در شرایط مختلف تخلیه و محیط، شبیه سازی کند.

($Re > 2000$) فرض شد و از پخش مولکولی جت نیز صرف‌نظر شد. با فرض تقریب بوسینسک (Boussinesq approximation) از تغییر چگالی سیال در ترم مومنتوم صرف‌نظر و تنها تغییر چگالی در ترم شناوری لحاظ شد (Maalouf et al., 2014). همچنین بر مبنای فرض‌های مدل CORMIX از اثر کواندا و تداخل مجدد نیز صرف نظر شد.

۲-۲- مدل عددی CORMIX

مدل CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System) برای طراحی دهانه‌های خروجی در تخلیه پساب‌ها و آب‌های سمی یا آلاینده‌های مرسوم درون محیط‌های آبی گوناگون کاربرد دارد. این نرم افزار در سال ۱۹۸۰ تحت چندین توافق نامه همکاری، بین سازمان حفاظت محیط زیست EPA و دانشگاه کرنل (USA)، توسعه یافته است و توسط EPA پشتیبانی می‌شود، به همین دلیل به یکی از مقبول‌ترین برنامه‌های رایانه‌ای برای مدل‌سازی تخلیه پساب تبدیل شده است. تأکید ماژول‌های این سامانه بر طراحی فراسنجه‌های هندسی و رقیق‌سازی

جدول ۱ داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی CORMIX در محیط راکد و پویا

Table 1 Input data for CORMIX simulation in stagnant and dynamic ambient

Discharge configuration				Environmental conditions						
ρ_0 (Kgm^{-3})	u_0 (ms^{-1})	d (cm)	h_0 (m)	θ ($^\circ$)	σ ($^\circ$)	H (m)	DS (psu)	WS (ms^{-1})	ρ_a (Kgm^{-3})	u_a (ms^{-1})
1054.04	$2.5 < u_0 < 11$	$0.2 < d < 1$	4.5	60	0	34.9	30.96	2	1026.66	0

از مدل‌های هیدرودینامیکی و رابطه‌های تحلیل ابعادی، طی آزمایش‌های مکرر و مقایسه داده‌ها، ارائه شده است. تحلیل ابعادی ساده‌ترین روش برای فرموله کردن فرضیه‌های معقول در شرایط فیزیکی پیچیده است که برای کاهش شمار متغیرهای مستقل مسئله، متغیرهای با موثرتر بر رقیق سازی در نظر گرفته می‌شوند و متغیرهای با تأثیر کمتر ثابت نگه داشته می‌شوند. متغیرهای مستقل انتخاب شده، از طریق اندازه فلاکس، که نشان دهنده نیروهای اصلی کنترل رفتار پساب است، به یکدیگر مربوط می‌شوند. فلاکس‌های اصلی که بر مبنای آن‌ها رفتار پساب شور

بنابراین به منظور شناسایی رابطه‌های حاکم بر جت، درون برنامه CORMIX یک سیستم طبقه بندی جریان وجود دارد که قانون‌های پایه برای کلاس‌بندی جریان‌ها در آن تعریف شده است (Doneker and Jirka, 2007) و با دقت در میان الگوهای جریان هیدرودینامیکی مختلفی که یک جت می‌تواند داشته باشد الگوی حاکم بر جریان جت را تشخیص می‌دهد. برای هر چهار زیر مدل یکپارچه هیدرودینامیکی موجود، در مجموع ۱۶۰ کلاس جریان مشخص شده است. روش طبقه بندی کلاس‌ها بر مبنای اصول فنی است که توسط توسعه دهندگان آن، با استفاده

که در آن d قطر نازل و F_r عدد فرود چگال جت و معادل $F_r = u_0 / \sqrt{g'd}$ است. بنابراین در یک زاویه مشخص (θ) ، فراسنجه‌های هندسی جت و نرخ رقیق سازی تابعی از قطر نازل (d) و عدد فرود چگال جت (F_r) در نظر گرفته شد.

Jet geometric properties and dilution rate: $J_1(\theta, F_r, d)$ (6)

برای یک جت چگال تک مجرای با شناوری منفی در محیط راکد اغلب فراسنجه‌های بدون بعد زیر برای بررسی رفتار جت در اوج محور جت، نقطه برخورد جت با بستر و میزان رقیق سازی جت در نقطه برخورد، اعتبارسنجی می‌شوند:

$$\frac{S_i}{F_r} = C_1, \frac{X_i}{d.F_r} = C_2, \frac{X_m}{d.F_r} = C_3, \frac{Z_m}{d.F_r} = C_4 \quad (7)$$

که S_i رقیق سازی در نقطه برخورد جت، X_i محل افقی نقطه برخورد جت، X_m محل افقی اوج خط مرکزی جت، Z_m ارتفاع اوج خط مرکزی جت، F_r عدد فرود چگال جت و d قطر نازل می‌باشند و C_1, C_2, C_3, C_4 ضرایب تجربی هستند که از بررسی‌های آزمایشگاهی به دست می‌آیند، هر یک از این ضرایبها بر مبنای متغیرهای آزمایشها و نظر محقق، در بازه خاصی از عدد فرود چگال جت معتبر می‌باشد (جدول ۲).

۲-۴- جت چگال در محیط پویا

(Roberts and Toms, 1987) نشان دادند که برای یک جت چگال با شناوری منفی در محیط پویا با جریان آشفته و با در نظر گرفتن تقریب بوسینسک برای یک زاویه تخلیه مشخص، ویژگی‌های هندسی جت و نرخ رقیق سازی آن تابعی از قطر نازل (d)، عدد فرود چگال جت (F_r)، سرعت تخلیه پساب شور (u_0)، سرعت جریان محیط (u_a) و زاویه نازل با جریان محیط (σ) است (شکل ۴). آنها رابطه (۸) را برای بررسی میزان رقیق سازی (S_i) یک جت شناور منفی تک مجرای در محیط پویا ارائه کردند:

Jet geometric properties and dilution rate:

$$J_1(\theta, \sigma, F_r, d, u_r) \quad (8)$$

$$u_r = \frac{u_a}{u_0}$$

$$\frac{S_i}{F_r} = C_5 (u_r.F_r)^{1/2} \quad (9)$$

توصیف می‌شود عبارت‌اند از: فلاکس جرمی (Q) (نشان دهنده جریان پساب تخلیه شده به محیط دریافتی)، فلاکس مومنتوم (M) (نشان دهنده انتقال انرژی در طول تخلیه پساب است) و فلاکس شناوری (B) (نشان دهنده تاثیر جاذبه بر پساب تخلیه شده) (Doneker and Jirka, 2007).

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \cdot u_0, \quad M = u_0 \cdot Q, \quad B = g'_0 \cdot Q \quad (1)$$

$$g'_0 = \frac{(\rho_0 - \rho_a)}{\rho_a} \cdot g \quad (2)$$

که در رابطه‌های بالا d قطر نازل، u_0 سرعت تخلیه پساب شور، g' شتاب ثقل اصلاح شده، ρ_0 و ρ_a به ترتیب چگالی جریان محیط و چگالی پساب و g شتاب ثقل می‌باشند. فلاکس‌ها با یکدیگر و با سایر فراسنجه‌هایی که رفتار تخلیه پساب را تحت تاثیر قرار می‌دهند، مانند جریان محیط، طبقه بندی چگالی، زاویه تخلیه و غیره، ترکیب شده و بر مبنای آن دامنه مقیاس‌های طولی تعیین می‌شوند که عبارت‌اند از: طول تخلیه (L_M) و طول مومنتوم (L_Q) (Doneker and Jirka, 2007).

$$L_M = M^{3/4} / B^{1/2}, \quad L_Q = Q / M^{1/2} \quad (3)$$

سپس جریان شناسایی شده در یکی از کلاس‌های موجود در پایگاه داده‌ها طبقه بندی می‌شود. برای هر کلاس جریان فرمول ساده شده‌ای از فرآیند تخلیه بر مبنای تحلیل ابعادی اعمال می‌شود تا ویژگی‌های اصلی رفتار جت محاسبه شود.

۲-۳- جت چگال در محیط راکد

در سال‌های اخیر بررسی‌های آزمایشگاهی چندی برای ارزیابی رابطه‌های تحلیل ابعادی که رفتار هندسی جت چگال منفی حاصل از تخلیه پساب شور را توصیف می‌کنند، انجام شده است. رابرتز و تامز (Roberts and Toms, 1987) با فرض یک جریان به کلی آشفته در یک محیط راکد نشان دادند که در تحلیل ابعادی، هر متغیر وابسته تابعی از فلاکس‌های Q, M و B است که با استفاده از یک ضریب تناسب به صورت مقیاس طولی بیان می‌شود:

$$S, X, Z: J_1(Q, M, B) = J_2(L_Q, L_M) \quad (4)$$

و با در نظر گرفتن $L_Q \ll L_M$ و تقریب بوسینسک فرض شد:

$$L_M = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} d.F_r \quad (5)$$

اعتبارسنجی نتایج CORMIX در تخلیه تک مجرای پساب شور با زاویه تمایل ۶۰ درجه و $\sigma=0$ در محیط پویا، داده‌های آزمایشگاهی تنها برای فراسنجه رقیق سازی پساب شور در نقطه برخورد جت با بستر (S_i) در دسترس بود. بنابراین در این بررسی از رابطه $C_5=2.06$ که توسط پالمار و همکاران (Palomar et al., 2012) ارائه شده‌است استفاده شد.

آنان نشان دادند هنگامی که رفتار جت در محیط پویا بررسی می‌شود، زاویه افقی جت با محور جریان (σ) نیز یک عامل مهم در تعیین فراسنجه‌های هندسی جت و رقیق سازی به حساب می‌آید (شکل ۴). بر همین مینا، ضریب تجربی C_5 که از بررسی‌های آزمایشگاهی حاصل شده است، برای σ های مختلف متفاوت می‌باشد. در حد دانش ما، برای

جدول ۲ ضریب‌های تجربی حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی CORMIX در محیط راکد

Table 2 Experimental coefficients for CORMIX validation in stagnant ambient

Researchers	F_r	θ	$\frac{S_i}{F_r}$	$\frac{X_i}{d.F_r}$	$\frac{X_m}{d.F_r}$	$\frac{Z_m}{d.F_r}$
Zeitoun and McIlhenny (1971)	25-60	60	1.12	3.19	-	-
Roberts and Toms (1987)	19-36	60	1.60±0.12	2.40	-	-
Cipolina et al. (2005)	16-216	60	-	2.25	1.42	1.77
Kikkert et al. (2007)	14-99	60	1.81	2.72	1.60	1.60
Papakonstantis et al. (2011a, 2011b)	7.5-58.3	60	1.68±0.1	2.75	1.84±0.08	1.68

فراسنجه عدد فرود چگال و میزان رقیق‌سازی پساب افزایش می‌یابند، اما میزان تغییرات رقیق‌سازی نسبت به تغییرات عدد فرود چگال کمتر است، بنابراین فراسنجه $\frac{S_i}{F_r}$ با سیر نزولی روبرو می‌شود. این درحالی است که برای اعداد فرود چگال بیشتر از ۱۵ ($F_r > 15$)، با وجود تغییرات قطر نازل و سرعت تخلیه پساب شور، مقادیر S_i با تقریب قابل قبولی روند یکنواختی را دنبال می‌کند و نسبت تغییر میزان رقیق‌سازی به عدد فرود چگال معادل ۱:۱ می‌شود. طی مقایسه نتایج عددی حاصل از CORMIX با نتایج آزمایشگاهی برای فراسنجه S_i (شکل ۷)، مشخص شد که از فرود چگال بالاتر از ۱۵ نتایج عددی CORMIX قابل استناد خواهد بود و به خوبی روند داده‌های تجربی را دنبال می‌کند و رابطه (۱۰) بر این نتایج حاکم می‌باشد که با میزان انحراف معیار ۰.۲ بهترین همبستگی را با نتایج زیتون و همکاران (Zeitoun and McIlhenny, 1971) دارد. اما به طور کلی CORMIX مقادیر پارامتر S_i را نسبت به نتایج آزمایشگاهی دست پایین برآورد شده است.

$$\frac{S_i}{F_r} = 0.72 \quad \text{for } F_r \geq 15 \quad (10)$$

تغییرات فراسنجه هندسی محل افقی نقطه برخورد جت (X_i) برای تخلیه جت پساب شور در یک محیط راکد، برای تغییرات قطر در سرعت ثابت و تغییرات سرعت در قطر ثابت، به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.

۳- نتایج و بحث

نرخ رقیق‌سازی و فراسنجه‌های هندسی جت شامل رقیق سازی در نقطه برخورد جت (S_i)، محل افقی نقطه برخورد جت (X_i)، محل افقی اوج خط مرکزی جت (X_m) و ارتفاع اوج خط مرکزی جت (Z_m) برای متغیرهای جدول ۱ توسط مدل CORMIX محاسبه شد. سپس نتایج در شکل‌های ۵ تا ۲۱ در شکل بی بعد شده نمایش داده شد و با استفاده از مجموعه بررسی‌های آزمایشگاهی (جدول ۲)، یک تحلیل کمی و کیفی بر روی نتایج صورت گرفت. به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از CORMIX با داده‌های آزمایشگاهی از روش‌های آماری انحراف معیار برای نتایج با منبع نقطه‌ای در محیط راکد و RMES برای نتایج غیرخطی در محیط پویا استفاده شد.

۳-۱- اعتبارسنجی جت چگال در محیط راکد

با توجه به میزان رقیق‌سازی پساب شور در نقطه برخورد (S_i) در محیط راکد (شکل‌های ۵ و ۶) مشاهده می‌شود که در یک سرعت ثابت، کاهش قطر سبب افزایش میزان رقیق سازی پساب شور در نقطه برخورد (S_i) می‌شود. در حالی که در یک قطر ثابت هرچه میزان سرعت تخلیه پساب افزایش یابد، فراسنجه $\frac{S_i}{F_r}$ با کاهش روبرو می‌شود. به عبارت دیگر، با وجود این که با افزایش سرعت تخلیه پساب هر دو

همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای اعداد فرود چگال کمتر از ۱۵ ($F_r > 15$) در یک سرعت تخلیه مشخص، با کاهش قطر میزان X_i افزایش می‌یابد اما افزایش سرعت تخلیه پساب در یک قطر ثابت باعث کاهش فراسنجه $\frac{X_i}{d.F_r}$ می‌شود. بدین معنا که افزایش عدد فرود چگال در این حالت، همواره بیشتر از تغییر محل افقی نقطه برخورد جت می‌باشد. البته این تغییرات بسیار کوچک و در حدود ۰.۰۰۰۲٪ و قابل چشمپوشی است. اعتبار سنجی نتایج مدلسازی با نتایج تجربی برای فراسنجه X_i (شکل ۱۰) نشان داد که در حالت کلی برای اعداد فرود چگال بالاتر از ۱۵ رابطه (۱۱) بر نتایج مدل CORMIX حاکم است که نه تنها روند مطالعات تجربی را دنبال می‌کند بلکه با انحراف معیار ۰.۰۲۵ بهترین همبستگی را با نتایج آزمایشگاهی (Cipollina et al., 2005) نشان می‌دهد. همچنین در CORMIX همواره مقادیر X_i نسبت به نتایج آزمایشگاهی دست پایین برآورد شده است.

در رابطه با فراسنجه هندسی محل افقی اوج خط مرکزی جت (X_m)، با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲، در یک قطر ثابت با افزایش سرعت تخلیه، فراسنجه X_m کاهش پیدا می‌کند. در حالی که در سرعت‌های بالا با قطرهای کوچک‌تر هنگامی که عدد فرود در بازه‌های بزرگتر از حدود ۱۷ قرار می‌گیرد بار دیگر مقادیر X_m افزایش یافته و روند مقادیر عددی منبع نقطه‌ای را دنبال نموده و روند صعودی یا نزولی ندارد. به عبارت دیگر در اعداد فرود چگال بالاتر هرچه تلاطم ایجاد شده بزرگتر باشد نتایج عددی روند داده‌های تجربی را بهتر دنبال می‌کند. در حالت کلی با توجه به شکل ۱۳، در عدد فرود بزرگتر از ۲۵ ($F_r > 25$) نتایج مدل CORMIX به خوبی روند نتایج آزمایشگاهی را دنبال کرده و رابطه ۱۲ بر نتایج CORMIX حاکم می‌شود که همگرایی قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی (Cipollina et al., 2005) با انحراف معیار ۰/۱۴ دارد، اما همواره مقادیر X_m را دست پایین برآورد شده است.

$$\frac{Z_m}{d.F_r} = 1.77 \quad \text{for } F_r \geq 30 \quad (13)$$

در جدول ۳ میزان خطای بین نتایج CORMIX و نتایج آزمایشگاهی برای فراسنجه‌های هندسی مورد بررسی، ارائه شده‌است.

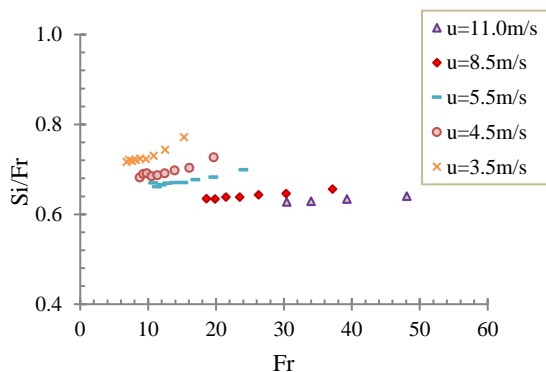


Fig. 5 Si behavior towards changes in discharge rate
شکل ۵ رفتار S_i/F_r نسبت به تغییرات سرعت تخلیه

$$\frac{X_i}{d.F_r} = 2.2 \quad \text{for } F_r \geq 15 \quad (11)$$

در بررسی فراسنجه هندسی ارتفاع اوج خط مرکزی جت

$$\frac{X_m}{d.F_r} = 1.13 \quad \text{for } F_r \geq 25 \quad (12)$$

در بررسی فراسنجه هندسی ارتفاع اوج خط مرکزی جت

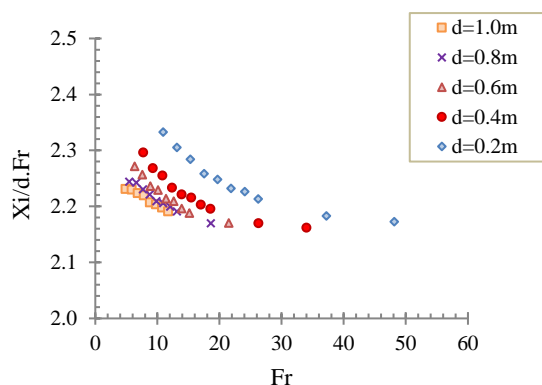


Fig. 9 Behavior of X_i in diffuser diameter changes
 شکل ۹ رفتار X_i در تغییرات قطر نازل

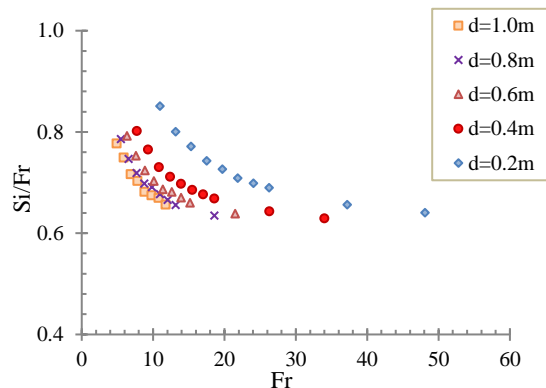


Fig. 6 S_i behavior towards diffuser diameter changes
 شکل ۶ رفتار S_i نسبت به تغییرات قطر نازل

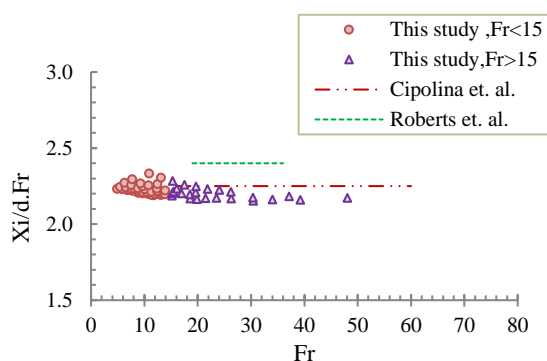


Fig. 10 Horizontal location of the impact point for dense jet
 شکل ۱۰ فاصله افقی نقطه برخورد جت چگال

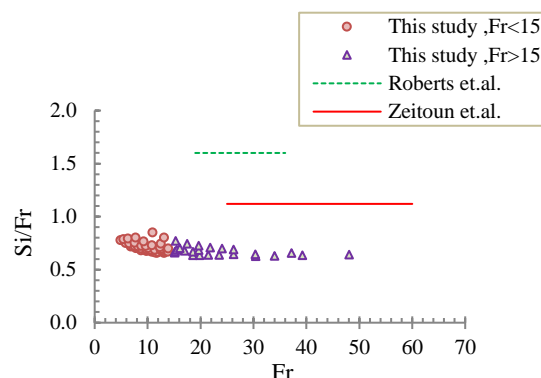


Fig. 7 Dilution at the impact point for dense jet
 شکل ۷ رقیق سازی در نقطه برخورد جت چگال

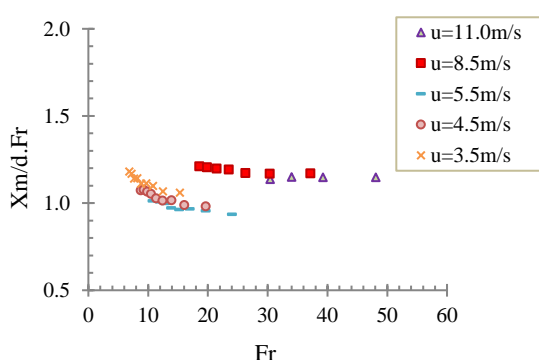


Fig. 11 Behavior of X_m in discharge velocity changes
 شکل ۱۱ رفتار X_m در تغییرات سرعت تخلیه

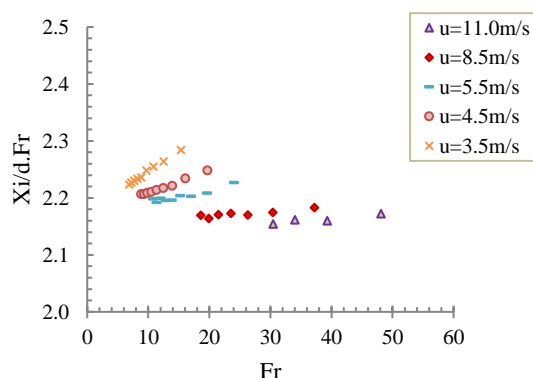


Fig. 8 Behavior of X_i in discharge velocity changes
 شکل ۸ رفتار X_i در تغییرات سرعت تخلیه

یابد میزان رقیق سازی در نقطه برخورد جت با بستر (S_i) افزایش می یابد. از سوی دیگر با افزایش سرعت تخلیه پساب در یک قطر ثابت، میزان پارامتر $\frac{S_i}{Fr}$ با کاهش همراه است. همچنین مشاهده می شود که در قطرهای کوچکتر (افزایش مقدار $u_r.Fr$) تأثیر سرعت تخلیه پساب بر میزان رقیق سازی افزایشی است. با توجه به نمودار کلی (شکل ۱۹)،

۲-۳- اعتبارسنجی جت چگال در محیط پویا

به طور کلی در محیط پویا، فراسنجه $u_r.Fr$ مستقل از سرعت تخلیه پساب می باشد و تنها نسبت به تغییرات قطر نازل و سرعت جریان محیط واکنش نشان می دهد. بنابراین با توجه به دو شکل ۱۷ و ۱۸ مشاهده می شود که در یک سرعت تخلیه ثابت با جریان محیط یکنواخت، هر چه قطر کاهش

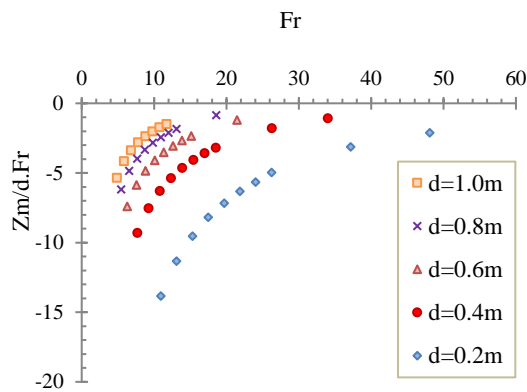


Fig. 15 Behavior of Z_m for diameter changes

شکل ۱۵ رفتار Z_m برای تغییرات قطر نازل

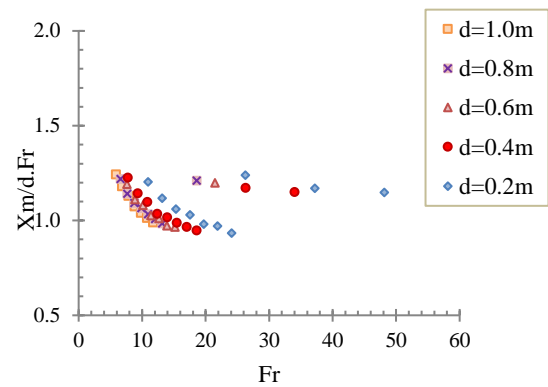


Fig. 12 Behavior of X_m for diffuser diameter changes

شکل ۱۲ رفتار X_m برای تغییرات قطر نازل

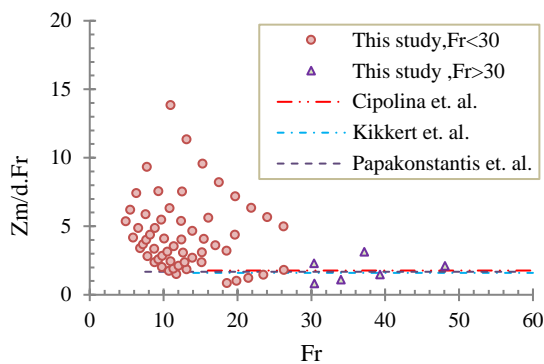


Fig. 16 Validation of vertical location of the centerline peak for dense jet

شکل ۱۶ اعتبارسنجی ارتفاع اوج خط مرکزی جت چگال

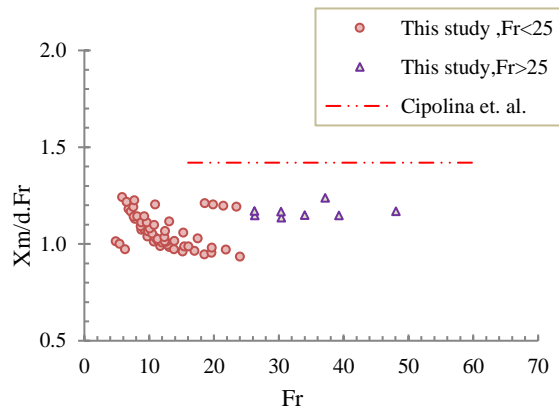


Fig. 13 Validation of horizontal location of the centerline peak for dense jet

شکل ۱۳ اعتبارسنجی محل افقی اوج خط مرکزی جت چگال

رابطه ۱۳ با همبستگی متوسط بر نتایج عددی CORMIX حاکم می‌باشد (شکل ۱۹) که روند داده‌های تجربی را با RMSE حدود ۰/۷۷ دنبال می‌کند، اما همواره مقدار پارامتر S_i را دست بالا برآورد می‌کند.

$$\frac{S_i}{F_r} = 2.3(u_r.F_r)^{5/3} \quad (14)$$

در بررسی محل افقی نقطه برخورد جت (X_i) (شکل‌های ۲۰ و ۲۱) مشاهده شد که در یک سرعت ثابت، علاوه بر اینکه با کاهش قطر نازل، پارامتر X_i کاهش یافته و این سیر نزولی در تمام سرعت‌ها رخ داده است، فراسنجه $u_r.F_r$ روند افزایشی داشته که نشان دهنده کاهش محل افقی نقطه برخورد جت می‌باشد. در حالی که در یک قطر ثابت، با افزایش سرعت تخلیه فراسنجه X_i با افزایش همراه است. اما به دلیل نبود داده‌های آزمایشگاهی X_i برای مقایسه با نتایج حاصل از CORMIX از ارائه رابطه برای این فراسنجه پرهیز شد. در بررسی رفتار پارامتر ارتفاع اوج خط مرکزی

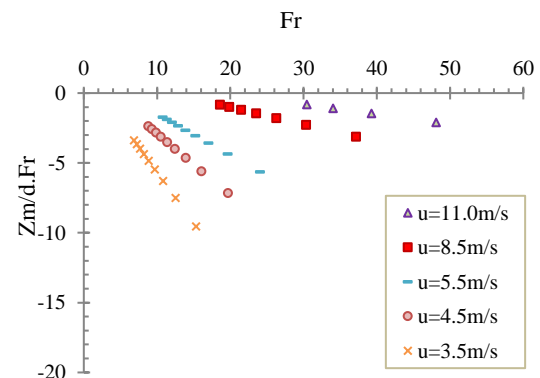


Fig. 14 Behavior of Z_m parameter for discharge velocity changes

شکل ۱۴ رفتار Z_m برای تغییرات سرعت تخلیه

هنگامی که $u_r.F_r < 0.2$ می‌باشد، تغییرات قطر نازل و سرعت تخلیه پساب شور تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان رقیق سازی پساب شور در نقطه برخورد ندارند، در حالی که از $u_r.F_r > 0.2$ مقادیر عددی فراسنجه S_i روندی افزایشی دارد.

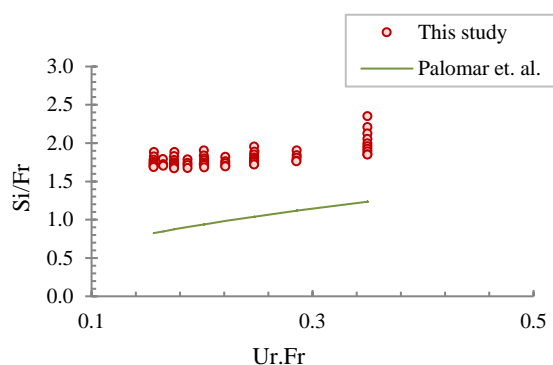


Fig. 19 Validation of dilution at the impact point for dense jet (Dynamic ambient)

شکل ۱۹ اعتبارسنجی رقیق سازی در نقطه برخورد جت چگال (محیط پویا)

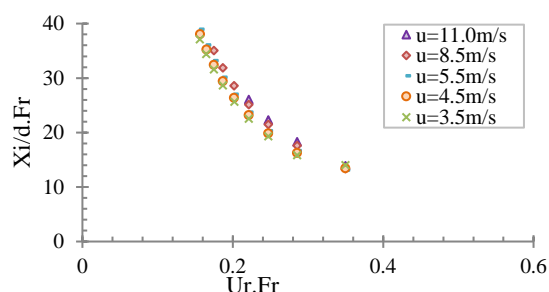


Fig. 20 Behavior of X_i for discharge velocity changes (Dynamic ambient)

شکل ۲۰ رفتار X_i برای تغییرات سرعت تخلیه (محیط پویا)

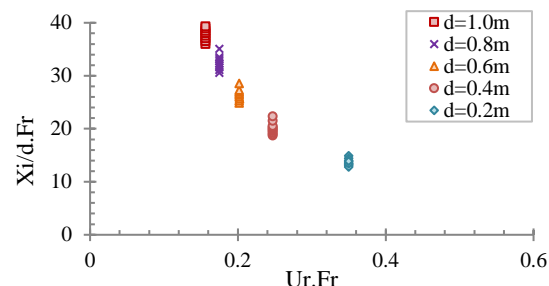


Fig. 21 Behavior of X_i for diffuser diameter changes (Dynamic ambient)

شکل ۲۱ رفتار X_i برای تغییرات قطر نازل (محیط پویا)

بین نتایج مدل و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد و میزان خطای مدل را می توان در طراحی ها با در نظر گرفتن ضریب اطمینان در طراحی سامانه تخلیه پساب به محیط راکد لحاظ کرد. این در حالی است که برای ارزیابی مدل CORMIX در محیط پویا، آزمایش های تجربی بیشتری مورد نیاز است.

جت (Z_m) و محل افقی اوج خط مرکزی جت (X_m) در محیط پویا، نه تنها مقادیر آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی نتایج CORMIX وجود نداشت، بلکه همبستگی قابل قبولی نیز بین نتایج استخراج شده مشاهده نشد. بنابراین از ارائه مقادیر X_m و Z_m صرف نظر شد.

اعتبارسنجی مدل CORMIX برای پارامترهای بی بعد شده و مهم در طراحی نازل های تک مجرای با نتایج مربوط به بررسی های آزمایشگاهی محققان مختلف انجام شد و میزان اختلاف نتایج شبیه سازی ها با نتایج آزمایشگاهی با استفاده از روش های آماری انحراف معیار و خطای میانگین مجذور مربعات محاسبه شد که در جدول ۳ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود در شرایط محیط راکد نتایج آزمایشگاهی خوبی توسط محققان مختلف در دسترس بود که بر همین مبنا برای همه فراسنجه های بی بعد مقایسه انجام شده است. در این شرایط همخوانی به نسبت خوبی

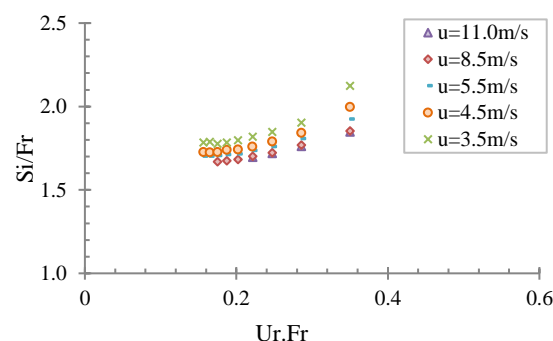


Fig. 17 Behavior of S_i parameter for discharge velocity changes (Dynamic ambient)

شکل ۱۷ رفتار S_i برای تغییرات سرعت تخلیه (محیط پویا)

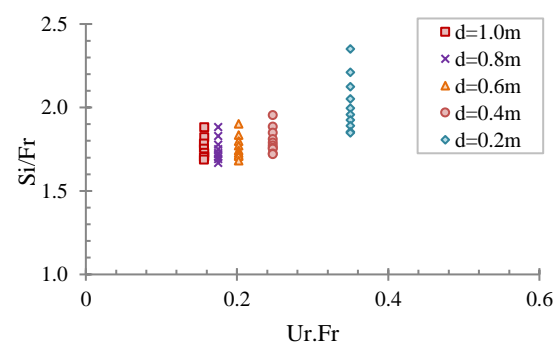


Fig. 18 Studying behavior of S_i for diameter changes (Dynamic ambient)

شکل ۱۸ رفتار S_i برای تغییرات قطر نازل (محیط پویا)

جدول ۳ اعتبارسنجی مدل CORMIX با نتایج آزمایشگاهی محققان مختلف

Table 3 Validation of the CORMIX model with experimental data

Researchers	$\frac{S_i}{F_r}$	$\frac{X_i}{d.F_r}$	$\frac{X_m}{d.F_r}$	$\frac{Z_m}{d.F_r}$
Standard deviation method for stagnant ambient				
Zeitoun and McIlhenny (1971)	0.200	0.490	-	-
Roberts and Toms (1987)	0.440	0.100	-	-
Cipolina et al. (2005)	-	0.025	0.140	0
Kikkert et al. (2007)	0.540	0.260	0.230	0.085
Papakonstantis et al. (2011a, 2011b)	0.480	0.270	0.350	0.045
RMSE method for dynamic ambient				
Palomar et al. (2012)	0.770	-	-	-

۴- نتیجه‌گیری

در این بررسی و ارزیابی‌ها، مدل عددی CORMIX برای شبیه‌سازی تخلیه پساب شور حاصل از سایت‌های نمک زدایی آب شور توسط یک نازل تک مجرای و در دو محیط آبی راکد و پویا اعتبارسنجی شد. مجموعه گسترده‌ای از شبیه‌سازی‌ها برای دو متغیر سرعت تخلیه و قطر نازل انجام شد. سپس میزان رقیق‌سازی و فراسنجه‌های هندسی جت توسط مدل CORMIX محاسبه و نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی محققان مختلف بررسی و تحلیل شد که در بسیاری از موارد سازگاری خوبی بین آن‌ها مشاهده شد.

در محیط راکد (بدترین شرایط محیطی در حالت طراحی) دو متغیر مهم در طراحی تخلیه پساب به دریا شامل سرعت تخلیه پساب شور (u_0) و قطر نازل (d) به خوبی در فراسنجه بدون بعد عدد فرود چگال جت (F_r) نهفته شده‌اند. به همین منظور نتایج حاصل از این بررسی بر مبنای عدد فرود چگال جت تجزیه و تحلیل شد.

به دنبال مقایسه نتایج مدل عددی CORMIX با بررسی‌های آزمایشگاهی، مشخص شد که دو فراسنجه S_i و X_i به ترتیب از روابط (۱۰) و (۱۱) قابل محاسبه می‌باشد، مشروط بر اینکه رابطه $F_r > 15$ برقرار باشد تا با نتایج آزمایشگاهی همخوانی داشته باشد. از سویی برای قابل اعتماد بودن طراحی‌ها با استفاده از این رابطه‌ها (مدل CORMIX) و برآورده‌سازی استانداردهای زیست‌محیطی، همواره باید درصد خطای این فراسنجه‌ها لحاظ شود (جدول ۳). به ویژه در اکوسیستم‌های حساس، که برآورده

نشدن استانداردها می‌تواند آسیب و زیان‌های جبران‌ناپذیری بر اکوسیستم آن منطقه داشته باشد. در صورت تخلیه پساب شور به محیط آبی کم عمق، نقش ارتفاع اوج خط مرکزی جت در طراحی اهمیت می‌یابد. زیرا در صورت برخورد جت حاصل از تخلیه با سطح آب رقیق‌سازی به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد و به دنبال آن آلودگی زیست محیطی افزایش می‌یابد. لذا فراسنجه Z_m از رابطه (۱۳) قابل محاسبه است، مشروط بر اینکه رابطه $F_r > 30$ برقرار باشد. به‌طور کلی حین طراحی خروجی‌های دریایی با استفاده از مدل CORMIX مهم است که سرعت تخلیه و قطر نازل به گونه‌ای انتخاب شوند که عدد فرود چگال در بازه‌های تعیین شده در این بررسی قرار گیرد. در این صورت نتایج بدست آمده از CORMIX قابل اعتماد خواهد بود. زیرا در اعداد فرود بالا، آشفتگی جریان بسیار زیاد می‌باشد به همین دلیل در جریان‌های چگال که در در عمق حرکت می‌کنند، هنگامی که جریان در حال انتقال از فوق بحرانی به زیر بحرانی است، یک پرش شدید هیدرولیکی ایجاد می‌کند. پرش هیدرولیکی باعث ایجاد اختلاط شدید در جت چگال می‌شود و عملاً تأثیر فراسنجه‌های سرعت تخلیه پساب و قطر نازل را از بین می‌برد. این در حالی است که در اعداد فرودهای پایین، میزان رقیق‌سازی و فراسنجه‌های هندسی جت به تغییرات u_0 و d حساس می‌باشند.

در محیط پویا دو متغیر سرعت تخلیه پساب شور (u_0) و قطر نازل (d) در پارامتر بی بعد $u_r.F_r$ لحاظ شدند، لذا برای تحلیل نتایج و انتخاب مناسب‌ترین شرایط طراحی از عدد

WS	سرعت باد (ms^{-1})
X_i	محل افقی نقطه برخورد جت (m)
X_m	محل افقی اوج خط مرکزی جت (m)
Z_m	ارتفاع اوج خط مرکزی جت (m)
ρ_0	چگالی جت پساب شور (Kgm^{-3})
ρ_a	چگالی محیط آبی (Kgm^{-3})
θ	زاویه نازل در راستای قائم ($^\circ$)
σ	زاویه نازل در راستای افقی تخلیه ($^\circ$)

۶- منابعها

Abessi, O., Roberts, P.J.W. (2014). Multiport diffusers for dense discharges, Journal of Hydraulic Engineering, 140, 04014032.

Abessi, O., Roberts, P.J.W. (2016). Dense jet discharges in shallow water, Journal of Hydraulic Engineering. 142, 04015033.

Alameddine, I. and El-Fadel, M. (2007). Brine discharge from desalination plants: a modeling approach to an optimized outfall design, Desalination. 214, 241-60.

Angelidis, P., Kalpakis, D., Gyrikis, V. and Kotsovinos, N. (2017). 2D brine sewage after impinging on a shallow sea free surface, Environmental Fluid Mechanics. 17, 615-28.

Ardalan, H. and Vafaei, F. (2018). Hydrodynamic classification of submerged Thermal-Saline Inclined Single-Port discharges, Marine Pollution Bulletin. 130, 299-306.

Bleninger, T. and Jirka, G.H. (2008). Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants, Desalination. 221, 585-597.

Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F. and Nicosia, S. (2005). Bench-scale investigation of inclined dense jets, Journal of Hydraulic Engineering, 131, 1017-1022.

Cipollina, A., Bonfiglio, A., Micale, G. and Brucato, A. (2004). Dense jet modelling applied to the design of dense effluent diffusers, Desalination. 167, 459-468.

Crowe, A.T., Davidson, M.J. and Nokes, R.I. (2016). Modified reduced buoyancy flux model for desalination discharges, Desalination. 378, 53-59.

بدون بعد $u_r.F_r$ استفاده شد. بر مبنای شبیه‌سازی‌ها برای محاسبه میزان رقیق‌سازی در محیط پویا رابطه (۱۴) قابل استفاده است اما با توجه به میزان خطای بسیار بالا، در مقایسه با مقدار تجربی (جدول ۳) دقت رابطه پایین و نتایج CORMIX اعتمادناپذیر می‌باشد. اگرچه برای دیگر فراسنجه‌های هندسی جت، پیشینه بررسی‌ها برای اعتبارسنجی نتایج یافت نشد، اما همبستگی شایان ملاحظه‌ای بین نتایج CORMIX برای X_i وجود داشت. اما انجام بررسی‌های آزمایشگاهی برای تخلیه پساب شور با شناوری منفی در محیط پویا به شدت ضروری است. زیرا با تخلیه پساب‌های شور در رودخانه‌ها و پیکره‌های آبی با سرعت جریان بالا، قابل اطمینان بودن نتایج مدل‌های رایانه‌ای در طراحی خروجی‌های آبی بسیار ضروری می‌باشد

۵- فهرست علائم

B	فلاکس شناوری ($m^3 Kg^{-1}$)
C_1 تا C_5	ضرایب ثابت تجربی
d	قطر نازل (m)
DS	شوری مازاد تخلیه (psu)
F_r	عدد فرود چگال
g	شتاب گرانش (ms^{-1})
g'	شتاب گرانش اصلاح شده ($m.s^{-2}$)
H	عمق تخلیه (m)
h	ارتفاع صعود جت (m)
h_0	ارتفاع نازل (m)
L_M	مقیاس طولی تخلیه
L_Q	مقیاس طولی مومنتوم
M	فلاکس مومنتوم ($Nsm^{-2}s^{-1}$)
Q	فلاکس جرمی ($Kgm^{-2}s^{-1}$)
Re	عدد رینولدز
S	نرخ رقیق‌سازی
S_i	رقیق‌سازی در نقطه برخورد جت
u_0	سرعت تخلیه پساب شور (ms^{-1})
u_a	سرعت جریان محیط (ms^{-1})
$u_r = \frac{u_a}{u_0}$	سرعت نسبی

- Oliver, C.J., Davidson, M.J. and Nokes, R.I. (2013). 'Predicting the near-field mixing of desalination discharges in a stationary environment, *Desalination*. 309, 148-55.
- Palomar, P., Lara, J.K. and Losada, I.J. (2012). Near field brine discharge modeling part 2: Validation of commercial tools, *Desalination*. 290, 28-42.
- Palomar, P., Lara, J.L., Losada, I.J., Rodrigo, M. and Álvarez, A. (2012). Near field brine discharge modelling part 1: Analysis of commercial tools, *Desalination*. 290, 14-27.
- Panagopoulos, A., Haralambous, K.-J. and Loizidou, M. (2019). Desalination brine disposal methods and treatment technologies-A review, *Science of the Total Environment*. 693, 133545.
- Papakonstantis, I.G., Christodoulou, G.C. and Papanicolaou, P.N. (2011a). Inclined negatively buoyant jets 1: geometrical characteristics, *Journal of Hydraulic Research*. 49, 3-12.
- Papakonstantis, I.G., Christodoulou, G.C. and Papanicolaou, P.N. (2011b). Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements, *Journal of Hydraulic Research*. 49, 13-22.
- Pistocchi, A., Bleninger, T. and Dorati, C. (2020). Screening the hurdles to sea disposal of desalination brine around the Mediterranean, *Desalination*. 491, 114570.
- Purnalna, A., Al-Barwani, H.H., and Al-Lawatia, M. (2003). Modeling dispersion of brine waste discharges from a coastal desalination plant, *Desalination*. 155, 41-47.
- Roberts, P.J.W. and Toms, G. (1987). Inclined dense jets in flowing current, *Journal of Hydraulic Engineering*. 113, 323-40.
- Sola, I., Zarzo, D. and Sánchez-Lizaso, J.L. (2019). 'Evaluating environmental requirements for the management of brine discharges in Spain', *Desalination*. 471, 114132.
- Valero, D. and Bung, D.B. (2016). Sensitivity of turbulent Schmidt number and turbulence model to simulations of jets in crossflow, *Environmental Modelling & Software*. 82, 218-28.
- Zeitoun, M.A. and McIlhenny, W.F. (1971). Conceptual designs of outfall systems for desalination plants. In *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference.
- Danoun, R. (2007). *Desalination Plants: Potential impacts of brine discharge on marine life*. Thesis, The Ocean Technology Group.
- Del Bene, J.V., Jirka, G.H. and Largier, J. (1994). Ocean brine disposal, *Desalination*. 97, 365-372.
- Doneker, R.L. and Jirka, G.H. (2007). CORMIX USER MANUAL A Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System for Pollutant Discharges into Surface Waters.
- Frank, H., Fussmann, K.E., Rahav, E. and Zeev, E.B. (2019). Chronic effects of brine discharge from large-scale seawater reverse osmosis desalination facilities on benthic bacteria, *Water research*. 151, 478-487.
- Höpner, T. and Windelberg, J. (1997). Elements of environmental impact studies on coastal desalination plants, *Desalination*. 108, 11-18.
- Kheirkhah Gildeh, H. (2013). *Numerical Modeling of Thermal/Saline Discharges in Coastal Waters*, Master Thesis, University of Ottawa.
- Kikkert, G.A., Davidson, M.J. and Nokes, R.I. (2007). Inclined negatively buoyant discharges, *Journal of Hydraulic Engineering*. 133, 545-554.
- Kress, N., Gertner, Y. and Shoham-Frider, E. (2020). Seawater quality at the brine discharge site from two mega size seawater reverse osmosis desalination plants in Israel (Eastern Mediterranean), *Water research*. 171, 115402.
- Loya-Fernández, A., Ferrero-Vicente, L.M., Marco-Méndez, C., Martínez-García, E., Zubcoff, J. and Sánchez-Lizaso, J.L. (2012). Comparing four mixing zone models with brine discharge measurements from a reverse osmosis desalination plant in Spain, *Desalination*. 286, 217-24.
- Maalouf, S., Rosso, D. and Yeh, W.W.-G. (2014). Optimal planning and design of seawater RO brine outfalls under environmental uncertainty, *Desalination*. 333, 134-145.
- Malcangio, D. and Petrillo, A.F. (2010). Modeling of brine outfall at the planning stage of desalination plants, *Desalination*. 254, 114-125.
- Mansour, T.M., Ismail, T.M., Ramzy, K. and Abd El-Salam, M. (2020). Energy recovery system in small reverse osmosis desalination plant: Experimental and theoretical investigations, *Alexandria Engineering Journal*. 59, 3741-3753.