


Validation of CORMIX and CorJet models in dense effluents released with a 60° angle from multi-port dischargers

Vahid Babaiynejad ¹, Babak Khorsandi ^{2*}

1- Research Assistant, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Tehran (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

* b.khorsandi@aut.ac.ir

Received: 22 November 2020, Accepted: 31 January 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: In today's world, fresh water is known as a limited resource that all economic and social activities of human beings and more importantly human life and other organisms depend on it. Therefore, in many coastal countries, desalination of the seas and oceans is the most important source of water supply. One of the products of desalination plants is the brine (saline effluent) that is discharged into the seas or oceans. Improper discharge of brine causes damage to the environment and can cause irreparable damage to aquatic life. Due to the fact that the use of multi-port dischargers for brine release has increased in recent decades, it is necessary to conduct numerical and laboratory studies on these types of dischargers. Many studies have been performed to validate CORMIX and CorJet models for effluents discharged from single-port dischargers, but so far the accuracy of these models for dense effluent discharged using multi-port dischargers has not been studied. For this reason, in this research, the validation of CORMIX and CorJet models in saline effluents discharged from multi-port discharger in quiescent and dynamic environments was conducted.

Methodology: CORMIX is a hydrodynamic model that uses flow classification to study the behavior of effluents with positive, negative and neutral buoyancy in the aquatic environment. Predicting the behavior of the effluent in the distant field, considering the wind flow, roughness and slope of the bed are among the features of this model. CORMIX consists of three sub-models: CORMIX1 (discharge using single-port discharge), CORMIX2 (discharge using multi-port dischargers) and CORMIX3 (surface discharge).

CorJet is an accurate, three-dimensional integral model for analyzing the concentration and flow path of discharged effluents in the aqueous medium. This model is a subset of the CORMIX model and can be run directly or independently from the CORMIX system. This model solves the equations and predicts the dilution of effluents with positive, neutral and negative densities based on the Eulerian integral method. CorJet is used for single-port and multi-port dischargers. A feature of this model is the integration of jets in multi-port discharger. The CorJet model does not consider any boundaries, only applies to the near-field, and does not predict dilution in far-field.

Results and Discussion: The results showed that as the distance between outlets of a discharger increases, the dilution rate of the effluents at the point of impact with the ground increases in both quiescent and dynamic environments. The dilution rates predicted by the

CorJet for the effluents released from multi-port dischargers in a quiescent environment are in good agreement with those of the laboratory study of Abessi and Roberts (2014). In contrast, the dilution rates estimated by the CORMIX model are 62% higher than the results of the experimental study, and are therefore, less reliable. The CorJet model computes the horizontal distance between the outlet and the point of impact of the effluent to the ground well, with an average error of 11% with respect to the experimental results of Abessi and Roberts (2014). As the horizontal distance between the dischargers increases, the error between the model results and those of the experimental study decreases. However, the CORMIX model predicts the horizontal distance between the outlet and the point of impact of the effluent to the ground with a higher error. CorJet and CORMIX overestimate the maximum jet climb height when the discharger's spacing is small. The results of CorJet and CORMIX models for the effluent dilution rate at the point of impact in dynamic environments are on average overestimated by 18 and 48%, respectively, relative to the results of Abessi and Roberts (2017). Comparing the results of CorJet and the laboratory study of Abessi and Roberts (2017), it can be seen that CorJet predicts the height of the jet ascent in a coflow and a counterflow with an error of about 33% and 20%, respectively. CORMIX estimates the maximum ascent height of the jet in a coflow and a counterflow with a difference of about 13 and 7%, respectively, relative to the results of Abessi and Roberts (2017). The CORMIX model predicts the maximum ascent height of the jet in dynamic environments with more accuracy compared to the CorJet model.

Conclusion: Multi-port dischargers were simulated in quiescent and dynamic environments using CORMIX and CorJet models and the results were compared with those of laboratory studies. The CorJet model estimates all the parameters of the condensed effluent (S_i , X_i and Z) released from the multi-port dischargers in quiescent and dynamic environments with a reasonable accuracy. On the other hand, the CORMIX model only predicts the maximum ascent height of the effluent jet in the dynamic environment well, but its estimates of the other parameters of the discharged effluent are less accurate.

Keywords: CorJet, CORMIX, desalination plant, effluent, plume, jet.



© 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 مدل‌های CORMIX و CorJet برای تخلیه پساب چگال از تخلیه‌کننده چند مجرای با زاویه تخلیه 60°

وحید بابایی نژاد^{۱*}، بابک خورسندی^۲

۱- دستیار محقق، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).
۲- استادیار گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).

* b.khorsandi@aut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۲، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۲، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: باتوجه به کاهش منابع طبیعی آب شیرین، استفاده از کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن افزایش چشمگیری داشته است. پساب تولیدی توسط کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن در صورت تخلیه نامناسب در محیط آبی، به دلیل دارا بودن غلظت بالای پساب آسیب‌ها و زیان‌های جبران‌ناپذیری به محیط‌زیست وارد می‌کنند. استفاده از تخلیه‌کننده‌های چند مجرای باعث کاهش شار مومنتوم جت خروجی می‌شود و بهمین دلیل ارتفاع صعود بیشینه جت کاهش پیدا می‌کند و استفاده از این نوع تخلیه‌کننده‌ها در عمق کم ساحل را امکان‌پذیر می‌سازد. در این پژوهش با استفاده از رابطه‌های تجربی به اعتبارسنجی مدل‌های CORMIX و CorJet برای برآورد پارامترهای پساب شور تخلیه شده به صورت چند مجرای در محیط ساکن و پویا پرداخته می‌شود. در صورت ادغام پساب‌ها (فاصله افقی تخلیه‌کننده‌ها کم باشد)، به دلیل اثر پدیده کواندا و هماوری جت‌ها، پارامترهای پساب چگال در محیط ساکن و پویا (میزان رقیق‌سازی، فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین و ارتفاع صعود بیشینه جت)، با خطای زیادی توسط مدل‌ها دست‌بالا برآورد می‌شود. اما در صورتی که فاصله افقی تخلیه‌کننده‌ها افزایش یابد احتمال ادغام پساب‌ها در پایین دست کاهش می‌یابد و در این صورت مدل‌ها با اختلاف کمتری نسبت به رابطه‌های تجربی، فراسنجه‌های پساب چگال تخلیه شده را برآورد می‌کنند. مدل CorJet محل ادغام پساب‌ها در محیط ساکن را در مقایسه با رابطه‌های تجربی با اختلافی کمتر از ۱۰ درصد به خوبی پیش‌بینی می‌کند. بنابر نتایج این پژوهش، مدل CorJet رفتار پساب چگال تخلیه‌شده از تخلیه‌کننده‌های چند مجرای در محیط ساکن و پویا را در مقایسه با مدل CORMIX با خطای کمتری باورد می‌کند.

کلید واژگان: CorJet، CORMIX، کارخانه آب‌شیرین‌کن، پساب، پلوم، جت.

۱- مقدمه

می‌شود. تخلیه نادرست این پساب باعث آسیب رساندن به محیط‌زیست شده و می‌تواند آسیب‌ها و زیان‌های جبران‌ناپذیری در زندگی انسان‌ها و دیگر موجودها ایجاد کند. پساب کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن به دلیل شوری بالا نسبت به محیط پذیرنده، پس از تخلیه بی‌درنگ به سمت بستر محیط آبی حرکت می‌کند که این امر باعث افزایش غلظت محیط در نزدیکی محل تخلیه می‌شود (Kikkert et al., 2006). برای کاهش اثرگذاری‌های زیست‌محیطی، پساب تخلیه شده باید در کمترین زمان و مکان با محیط پذیرنده مخلوط شود. در افزایش میزان اختلاط پساب با محیط پذیرنده عامل‌های مختلفی تاثیرگذار است که یکی از مهم‌ترین آنها، روش تخلیه پساب است (Panagopoulos et al., 2019). پساب‌های تولیدی به دو

برآورد یکی از مسئله‌هایی که بشر امروزه با آن دست و پنجه نرم می‌کند مسئله کم آبی است. در جهان امروز آب شیرین به عنوان یک منبع محدود شناخته می‌شود که همه‌ی فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی بشر و مهم‌تر از آن حیات بشر و دیگر موجودها وابسته به همین منبع محدود است و این منبع محدود روز به روز در حال کم شدن است. امروزه در بیشتر کشورها شیرین کردن آب دریاها و اقیانوس‌ها مهم‌ترین منبع تامین آب منطقه‌های نزدیک به ساحل است. مهم‌ترین محصول کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن، آب شیرین است که باعث بهبود کیفیت زندگی انسان‌ها می‌شود. دیگر محصول کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن پساب شور است که به محیط دریا تخلیه

محققان به منظور بهینه‌سازی سازوکار تخلیه و کاهش میزان آسیب‌ها و زیان‌های تخلیه پساب آغاز به انجام بررسی‌ها در این زمینه کردند و نتایج مختلفی را ارائه دادند. Bene et al. (1994) با استفاده از مدل مقیاس طولی CORMIX (Jirka et al., 1996) به بررسی تخلیه پساب شور مستغرق تک مجرای و سطحی پرداختند. بنابر مشاهده‌های آنان پساب تخلیه شده از دیفیوزرهای تک مجرای ملیل، ابتدا به دلیل اینرسی بالا به سمت سطح آب بالا می‌رود و سپس از کاهش اینرسی جت، پساب به دلیل شار شناوری به سمت پایین سقوط می‌کند و با بستر محیط پذیرنده برخورد می‌کند. بنابر نتایج Bene et al. (1994) میزان رقیق‌سازی در میدان نزدیک بسیار بیشتر از میدان دور بود. (Alameddine and El-Fadel, 2007) با استفاده از مدل CORMIX به بررسی تخلیه پساب گرم ناشی از نیروگاه برق پرداختند. آنان در تحقیق خود انواع روش‌های تخلیه پساب را بررسی کردند و میزان رقیق‌سازی تخلیه‌کننده‌های مختلف را با هم مقایسه کردند. بنابر نتایج آنان، تخلیه‌کننده‌های چند مجرای بالاترین میزان رقیق‌سازی را نسبت به دیگر تخلیه‌کننده‌ها (تخلیه سطحی و تخلیه مستغرق تک مجرای) نشان داد و به عنوان بهینه‌ترین نوع تخلیه، از نظر کاهش اثرگذاری‌های زیست‌محیطی انتخاب شد. Fernández et al. (2012) به مقایسه نتایج ارائه شده توسط چهار مدل UM3, CORMIX, CorJet و MEDVSA (Frick., 2004) برای تخلیه پساب چگال در محیط آبی با استفاده از تخلیه‌کننده مستغرق تک مجرای پرداختند. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان داد همه مدل‌ها به جز مدل UM3، نتایج را به صورت تقریبی و محافظه کارانه ارائه کردند. Palomar et al. (2012) به منظور اعتبارسنجی مدل‌های CorJet, VisJet و UM3، نتایج به دست آمده برای تخلیه پساب چگال (به صورت تخلیه‌کننده تک مجرای) در محیط ساکن و پویا توسط مدل‌ها را با بررسی‌های آزمایشگاهی مختلف مقایسه کردند. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و بررسی‌های آزمایشگاهی مشخص شد در محیط ساکن هر سه مدل ابعاد مختلف جت را دست پایین برآورد می‌کنند. در این بین CorJet با اختلافی در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد دقت بهتری را نسبت به دیگر مدل‌ها دارا بود. همچنین رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین در محیط ساکن با اختلافی در حدود ۵۰ تا ۶۵ درصد توسط هر سه مدل

صورت سطحی یا مستغرق تخلیه می‌شوند. تخلیه‌کننده‌های سطحی و مستغرق سودها و زیان‌های متفاوتی دارند و هر کدام با توجه به نوع پساب (شناوری منفی، مثبت و خنثی) و شرایط محیطی به کار برده می‌شوند (Fischer et al., 2013). تخلیه‌کننده‌های مستغرق به دو دسته کلی تخلیه‌کننده تک مجرای (شکل ۱ الف که در آن S_i میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین، Z ارتفاع صعود بیشینه جت و θ زاویه تخلیه نسبت به افق) و چند مجرای (شکل ۱ ب) تقسیم می‌شوند. تخلیه‌کننده‌های چند مجرای با توجه به جهت‌گیری تخلیه‌کننده‌ها نسبت به هم به حالت‌های مختلفی تقسیم می‌شوند. در صورتی که حجم پساب تخلیه شده بالا باشد بهترین و به صرفه‌ترین روش برای تخلیه پساب و دسترسی به بیشترین رقیق‌سازی استفاده از تخلیه‌کننده‌های چند مجرای است. در این روش با استفاده از شمار تخلیه‌کننده‌های زیاد، مومنوم پساب تخلیه شده کاهش می‌یابد و به این ترتیب می‌توان پساب را در عمق‌های کمتری نسبت به تخلیه‌کننده‌های تک مجرای تخلیه کرد.

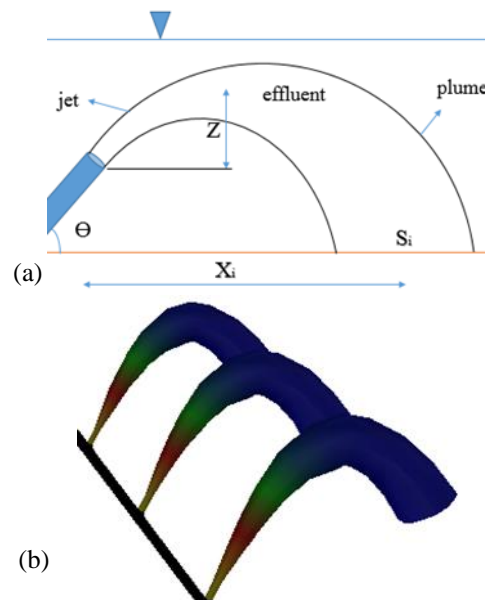


Fig. 1 Submersible drainage effluent in jet and plume mode. (a) Single port, (b) Multi-port.

شکل ۱ پساب تخلیه شده به صورت مستغرق مایل در حالت جت و پلوم. (a) تک مجرای. (b) چند مجرای.

باتوجه به اینکه تخلیه پساب‌های ناشی از کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن و دیگر صنایع به آب دریاها و اقیانوس‌ها باعث آسیب رساندن به محیط‌زیست و آبیان می‌شود، گروهی از

$$L_m = \frac{m}{U_a^2} \quad (۳)$$

$$L_b = \frac{J}{U_a^3} \quad (۴)$$

در رابطه‌های بالا $Q=U \times A$ دبی تخلیه (A سطح مقطع تخلیه‌کننده و U سرعت جت خروجی است)، $M=Q \times U$ شار مومنتوم، $J=g' \times Q$ شار شناوری و U_a سرعت جریان محیط است. g' شتاب گرانش اصلاح شده می‌باشد که به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود.

$$g'_0 = g \frac{(\rho_0 - \rho_a)}{\rho_a} \quad (۵)$$

در رابطه بالا ρ_0 چگالی پساب پیش از تخلیه، ρ_a چگالی محیط پذیرنده و g شتاب گرانش است.

L_Q تعیین کننده اهمیت شار حجمی به شار مومنتوم جت خروجی و L_M محدودهای که پساب به صورت جت است را مشخص می‌کند. همچنین L_m محدودهای که در آن پساب بیشتر تحت تاثیر شار مومنتوم قرار دارد و L_b نیز محدودهای که پساب تحت تاثیر شار شناوری قرار دارد را نشان می‌دهد.

پس از محاسبه مقیاس‌های طولی، در آغاز مدل بنابر رابطه‌های تعیین شده کلاس جریان را مشخص می‌کند. آن‌گاه ویژگی‌های پساب تخلیه‌شده در محیط آبی بر مبنای کلاس جریان و با استفاده از رابطه‌های تعریف شده برای هر فراسنجه، محاسبه می‌شوند (Jirka et al., 1996).

۲-۲- مدل CorJet

CorJet (Jirka et al., 1996) یک مدل انتگرالی دقیق و سه بعدی برای تجزیه و تحلیل غلظت و مسیر حرکت پساب‌های تخلیه‌شده در محیط آبی است. این مدل از زیر مجموعه‌های مدل CORMIX است و به صورت مستقیم یا مستقل از سامانه CORMIX قابل اجراست. معادله‌های حاکم بر جریان سیال خروجی، معادله‌های پیوستگی، اندازه حرکت و انتقال-انتشار است. این مدل بر مبنای روش انتگرال اوبلری به حل معادله‌های پیش‌بینی رقیق‌سازی پساب‌های با چگالی مثبت، خنثی و منفی می‌پردازد (Bleninger et al., 2007).

۲-۳- ویژگی‌های مدل آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی

در این پژوهش نتایج مدل‌های CORMIX و CorJet با

محافظة کارانه و دست پایین برآورد شد. Angelidis et al. (2017) به صورت آزمایشگاهی و عددی به بررسی رفتار پساب چگال تخلیه شده از تخلیه‌کننده مستغرق عمودی در محیط کم عمق و ساکن پرداخت. بنابر نتایج ایشان، مدل CorJet برای پیش‌بینی رقیق‌سازی انواع پساب چگال تخلیه شده در محیط ساکن، که پساب به دلیل اینرسی بالا به سطح آب برخورد می‌کند قابل اعتماد می‌باشد.

بسیاری از پژوهش‌های مربوط به بررسی رفتار پساب شور تخلیه شده در محیط دریا به وسیله مدل‌های CORMIX و CorJet انجام می‌شوند. با توجه به اینکه استفاده از تخلیه‌کننده‌های چند مجرای در دهه‌های اخیر افزایش یافته است نیاز است تا بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی بر روی این نوع تخلیه‌کننده‌ها نیز انجام شود. در رابطه با تخلیه‌کننده‌های چند مجرای بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی محدودی صورت گرفته است. مطالعات زیادی برای اعتبارسنجی مدل‌های CORMIX و CorJet، برای تخلیه پساب با استفاده از تخلیه‌کننده‌های تک مجرای انجام شده است ولی تا به حال دقت این مدل‌ها برای تخلیه پساب چگال با استفاده از تخلیه‌کننده‌های چند مجرای بررسی نشده است. به همین دلیل در این پژوهش به اعتبارسنجی مدل‌های CORMIX و CorJet، برای بررسی جریان پساب شور تخلیه شده از تخلیه‌کننده‌های چند مجرای در محیط ساکن و پویا پرداخته می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل CORMIX

CORMIX یک مدل هیدرودینامیکی است که با استفاده از تجزیه و تحلیل ابعادی و طبقه‌بندی جریان خروجی، ویژگی‌های پساب در محیط آبی را تعیین می‌کند. CORMIX برای تخلیه پساب به صورت چندمجرای، از مقیاس طولی تخلیه (L_Q)، مقیاس طولی جت به پلوم (L_M)، مقیاس طولی جت به جریان جانب (L_m) و مقیاس پلوم به جریان جانبی (L_b) استفاده می‌کند (رابطه‌های ۱ تا ۴).

$$L_Q = \frac{Q}{M^{0.5}} \quad (۱)$$

$$L_M = \frac{m}{J^{0.7}} \quad (۲)$$

رابطه‌های تجربی (Abessi and Roberts (2014) مقایسه می‌شود. (Abessi and Roberts (2014) در پژوهش خود به بررسی تاثیر فاصله افقی تخلیه کننده ها بر ادغام پساب چگال تخلیه شده از تخلیه کننده های چند مجرایبی پرداختند. پساب چگال با استفاده از تخلیه کننده‌های چند مجرایبی با شمار ۱، ۴، ۷ و ۲۲ خروجی و با زاویه تخلیه ۶۰° صورت گرفت. آنان برای اندازه‌گیری میزان رقیق‌سازی پساب از یک سامانه فلورسانس سه بعدی ناشی از لیزر (DLIF 3) و یک مخزن شیشه ای به طول ۶/۱ m، عرض ۰/۹ m و عمق ۰/۶ m استفاده کردند. عدد فرود جت خروجی بین ۱۲ تا ۱۰۰ و همچنین عدد رینولدز جت بین ۸۴۰ تا ۹۳۰۰ در نظر گرفته شد.

$$\frac{S_i}{F} = A \log\left(\frac{L}{D.F}\right) + B \quad (9)$$

$$\frac{Z}{D.F} = A \log\left(\frac{L}{D.F}\right) + B \quad (10)$$

میزان‌های A و B به ترتیب به صورت زیر (رابطه ۱۱ و رابطه ۱۲) تعریف می‌شوند:

$$A = a_1(U_r, F) + a_2 \quad (11)$$

$$B = b_1(U_r, F) + b_2 \quad (12)$$

در رابطه بالا $U_r = Ua/U$ است. میزان‌های a_1 ، a_2 ، b_1 و b_2 برای رابطه ۱۱ به ترتیب برابر ۲/۱، ۰/۸۶، ۰/۴ و ۰/۴۹ و برای رابطه ۱۲ به ترتیب برابر ۰/۰۷، ۰/۳۱، ۰/۳۳- و ۲/۱ می‌باشد (Abessi, Roberts., 2017). (Abessi, Roberts., 2017). برای فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین از تخلیه کننده در محیط پویا، به دلیل پراکندگی نتایج به دست آمده رابطه‌ای را ارائه نکردند.

۲-۴- مدل‌سازی

در این پژوهش حاضر شبیه‌سازی تخلیه پساب از ۳ تخلیه کننده موازی با استفاده از مدل CorJet و CORMIX در محیط ساکن و پویا (جریان همراستا و جریان خلاف جهت) صورت می‌گیرد. در این شبیه‌سازی عدد فرود جت خروجی برای تخلیه پساب در محیط ساکن و پویا، به ترتیب برابر ۲۴/۸۶ و ۳۳/۴۸ و قطر تخلیه کننده‌ها برابر ۰/۲ m در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای هر دو حالت تخلیه در محیط پویا، سرعت جریان محیط برابر m/s ۰/۳ در نظر گرفته می‌شود. عمق محل تخلیه به گونه‌ای انتخاب شد که جت خروجی به سطح آب برخورد نکند. در این پژوهش، فاصله افقی بین تخلیه کننده‌ها با استفاده از پارامتر $L/D.F$ تعریف می‌شود و $0.1 < L/D.F < 2$ انتخاب شده است. غلظت پساب تخلیه شده دو برابر غلظت سیال محیط پذیرنده است.

یکی از مهم‌ترین نکته‌ها در طراحی تخلیه کننده‌های چند مجرایبی، فاصله افقی تخلیه کننده‌ها از هم (که تعیین کننده ادغام یا عدم ادغام جت‌ها می‌باشد) است. بنابر نتایج (Abessi and Roberts, 2014) در صورتیکه $L/D.F > 2$ (فاصله افقی تخلیه کننده‌ها از هم، F عدد فرود خروجی و D قطر تخلیه کننده) باشد جت‌ها با هم ادغام نمی‌شوند که در این صورت رفتار و ویژگی‌های پساب همانند تخلیه کننده‌های تک مجرایبی محاسبه می‌شود. اما در صورتی که $L/D.F < 2$ باشد جت‌ها با هم ادغام می‌شوند که در این صورت برای تعیین پویایی و غلظت پساب از رابطه‌های ارائه شده توسط (Abessi and Roberts (2014) استفاده می‌شود. رابطه‌های ارائه شده توسط (Abessi and Roberts (2014) برای رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین (Si) (رابطه ۶) و فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین از تخلیه کننده (Xi) (رابطه ۷) و ارتفاع صعود بیشینه جت (Z) (رابطه ۸)، برای تخلیه کننده چند مجرایبی مایل با زاویه ۶۰ درجه در محیط ساکن به صورت زیر است.

بنابر نتایج (Abessi, Roberts. (2017) ویژگی‌های پساب در محیط آبی در حالت جریان همراستا^۱ و جریان خلاف جهت^۲ تفاوت چندانی باهم ندارند. رابطه‌های ارائه شده توسط (Abessi

$$\frac{S_i}{F} = 0.9 \left(\frac{L}{D.F} \right) \quad (6)$$

$$\frac{X_i}{D.F} = 2 \left(\frac{L}{D.F} \right)^{0.5} \quad (7)$$

$$\frac{Z}{D.F} = 1.9 \left(\frac{L}{D.F} \right)^{0.5} \quad (8)$$

بنابر نتایج (Abessi, Roberts. (2017) ویژگی‌های پساب در محیط آبی در حالت جریان همراستا^۱ و جریان خلاف جهت^۲ تفاوت چندانی باهم ندارند. رابطه‌های ارائه شده توسط (Abessi

² Counter-flow

¹ Co-flow

۳- نتایج و بحث

در این قسمت نتایج به دست آمده توسط مدل‌های CORMIX و CorJet، برای میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین، فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین از تخلیه‌کننده و ارتفاع صعود بیشینه جت، با نتایج به دست آمده از رابطه‌های ارائه شده توسط Abessi and Roberts (2014, 2017) مقایسه می‌شود.

۳-۱- محیط ساکن

۳-۱-۱- رقیق‌سازی در محیط ساکن

شکل ۲ مقایسه نتایج به دست آمده توسط مدل‌های CORMIX و CorJet و رابطه‌های ارائه شده توسط Abessi and Roberts (2014) را برای رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین و برای $L/D.F$ مختلف، در تخلیه‌کننده چند مجرای با زاویه تخلیه ۶۰ درجه را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل ۲، با افزایش فاصله تخلیه‌کننده‌ها از هم، رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین تا حدودی به صورت خطی افزایش می‌یابد. نتایج مدل CorJet

مطابقت خوبی (با میانگین خطا ۱۸ درصد) با رابطه‌های تجربی دارد و هرچه فاصله تخلیه‌کننده‌ها از هم بیشتر می‌شود نتایج CorJet به نتایج رابطه‌های تجربی نزدیک می‌شود به طوری که برای $L/D.F = 1/8$ ، نتایج CorJet و مطالعه تجربی ۵ درصد اختلاف دارند. اما در مقابل نتایج مدل CORMIX برای رقیق‌سازی پساب تخلیه شده از تخلیه‌کننده‌های چند مجرای در محیط ساکن نسبت به بررسی مطالعه تجربی ۶۲ درصد خطا دارد و قابل اعتماد نیست. بنابر نتایج Abessi and Roberts (2014) جت‌ها در $L/D.F = 2$ با هم ادغام می‌شوند که این میزان توسط CorJet با خطای ۱۰ درصدی حدود $1/83$ برآورد شد اما نتایج مدل CORMIX برای محل ادغام جت‌ها ($L/D.F$) پراکندگی زیادی داشت (برای اعداد فرود مختلف نتایج به کل متفاوت و غیرعادی ارائه می‌کند). بنابر نتایج به دست آمده مدل CorJet میزان رقیق‌سازی پساب تخلیه شده از تخلیه‌کننده‌های چند مجرای در محیط ساکن را با دقت بالایی برآورد می‌کند و برای استفاده در این زمینه مناسب است.

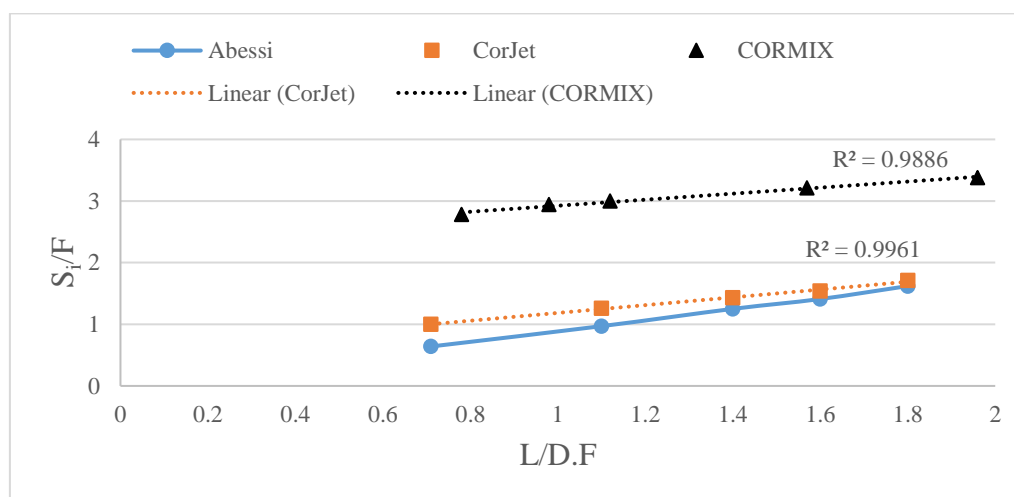


Fig. 2 Results of CORMIX and CorJet models for dilution of effluent at the point of impact of the discharged effluent at an angle of 60 degrees, in a static environment in comparison with the laboratory study of Abessi and Roberts (2014).

شکل ۲ نتایج مدل‌های CORMIX و CorJet برای رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین پساب تخلیه شده با زاویه ۶۰ درجه، در محیط ساکن در مقایسه با رابطه‌های تجربی (Abessi and Roberts (2014).

و هم‌اوری سیال محیط به درون جت به میزان قابل توجهی صورت می‌پذیرد. اما در صورت ادغام جت‌ها، سطح تماس جت با محیط آبی کاهش پیدا می‌کند و همین امر موجب کاهش هم‌اوری سیال محیط پذیرنده به درون جت می‌شود. به عبارت

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله تخلیه‌کننده‌ها از هم، پیش‌بینی CorJet به نتایج رابطه‌های تجربی نزدیک می‌شود. هنگامی که جت به صورت منفرد در محیط آبی حرکت می‌کند همه‌ی دیواره جت در تماس با محیط پذیرنده می‌باشد

همان‌طور که گفته شد مدل CORMIX از طریق طبقه‌بندی جریان به تحلیل مسئله‌ها می‌پردازد. ادغام جت‌ها، باعث در نظر نگرفتن تاثیر پدیده کواندا و شرایط حقیقی تخلیه پساب توسط مدل CORMIX می‌شود و همین موضوع باعث عدم تشخیص درست کلاس جریان توسط مدل می‌شود. اما مدل CorJet با استفاده از حل معادله‌های به تحلیل مسئله‌ها می‌پردازد و به همین دلیل نتایج مربوط به میزان رقیق‌سازی مدل CorJet در مقایسه با نتایج مدل CORMIX دقیق‌تر است.

۱-۲-۳- فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین
 شکل ۳ فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین را برای $L/D.F$ مختلف و زاویه تخلیه ۶۰ درجه را نشان می‌دهد. بنابر نتایج (Abessi and Roberts (2014)، با افزایش فاصله تخلیه‌کننده‌ها از هم فاصله افقی نقطه برخورد پساب از تخلیه‌کننده با نرخ کمی افزایش می‌یابد.

دیگر با ادغام جت‌ها میزان هم‌آوری سیال محیط به درون جت کاهش می‌یابد. از سوی دیگر به دلیل حضور جت‌های مجاور و ادغام آنها، یک تعامل پویایی به نام اثر کواندا بین جت‌ها رخ می‌دهد و باعث تغییر الگوی تداخل جت‌ها با محیط پذیرنده شده و میزان رقیق‌سازی را کاهش می‌دهد. این در حالی است که مدل‌های عددی برای ساده‌سازی تحلیل پساب تخلیه‌شده از تخلیه‌کننده‌های چند مجرای، هر یک از جت‌ها را به صورت جت منفرد در نظر می‌گیرند. همچنین پدیده کواندا که تاثیر به سزایی در کاهش میزان رقیق‌سازی پساب تخلیه‌شده به صورت چند مجرای دارد را در نظر نمی‌گیرند. به همین دلیل در صورت ادغام جت‌ها میزان رقیق‌سازی توسط مدل‌ها دست بالا و با اختلاف بالایی برآورد شد. اختلاف نتایج مدل CorJet و مدل CORMIX به دلیل تفاوت در روش و طریقه تحلیل فراسنجه‌های پساب در محیط آبی توسط دو مدل می‌باشد.

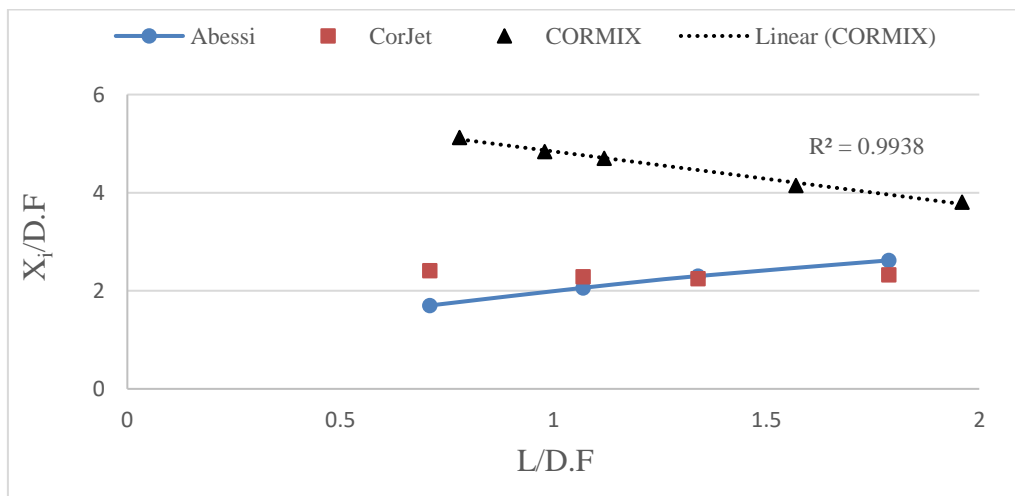


Fig. 3 Results of CORMIX and CorJet models for the horizontal distance of the point of impact of the effluent to the ground effluent at an angle of 60 degrees, in comparison with the laboratory study of Abessi and Roberts (2014).

شکل ۳ نتایج مدل‌های CORMIX و CorJet برای فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین پساب تخلیه شده با زاویه ۶۰ درجه، در محیط ساکن در مقایسه با رابطه‌های تجربی (Abessi and Roberts (2014).

میزان X_i را به خوبی و با خطای میانگین ۱۱ درصد برآورد می‌کند و هرچه فاصله افقی تخلیه‌کننده‌ها از هم افزایش می‌یابد میزان خطای بین نتایج مدل و مطالعه تجربی کاهش می‌یابد. اما مدل CORMIX فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین را برای حالتی که تخلیه‌کننده‌ها در فاصله کمی از هم قرار داشته باشند ($L/D.F=0.7$) را با خطای بالایی پیش‌بینی می‌کند و با افزایش فاصله بین تخلیه‌کننده‌ها نتایج مدل به میزان رابطه‌های

اما بنابر نتایج به دست آمده توسط CORMIX فاصله نقطه برخورد پساب به زمین با افزایش فاصله تخلیه‌کننده‌ها از هم کاهش می‌یابد. از سوی دیگر نتایج مدل CorJet نشان می‌دهد که میزان X_i در آغاز با افزایش فاصله تخلیه‌کننده‌ها از هم ($L/D.F < 1/2$) با شیب کمی کاهش می‌یابد و در ادامه با افزایش فاصله تخلیه‌کننده‌ها از هم ($L/D.F > 1/2$) این فراسنجه (X_i) با شیب کمی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۳ مدل CorJet

۳-۱-۳- ارتفاع صعود بیشینه جت

شکل ۴ مقایسه نتایج به دست آمده توسط مدل‌های CORMIX و CorJet، و رابطه‌های ارائه شده توسط Abessi and Roberts (2014) را برای ارتفاع صعود بیشینه جت ($Z/D.F$)، در فاصله‌های مختلف تخلیه‌کننده‌ها از هم ($L/D.F$)، نشان می‌دهد. بنابر نتایج Abessi and Roberts (2014) با افزایش فاصله تخلیه‌کننده‌ها از هم، ارتفاع صعود بیشینه جت افزایش می‌یابد زیرا ادغام جت‌ها باعث برخورد و تداخل آنها باهم شده و ارتفاع صعود جت کاهش پیدا می‌کند. اما بنابر نتایج CORMIX و CorJet، با افزایش فاصله تخلیه‌کننده‌ها از هم ($L/D.F < 0.5$) ارتفاع صعود بیشینه جت کاهش می‌یابد.

تجربی نزدیک می‌شود. میانگین خطای مدل CORMIX، ۴۸ درصد است. هرچه تخلیه‌کننده‌ها در فاصله کمی از هم قرار داشته باشند باعث می‌شود پساب‌های خروجی زودتر باهم ادغام شوند (Abessi and Roberts, 2014). در نظر نگرفتن پدیده کواندا توسط مدل‌ها باعث می‌شود نتایج مدل‌ها برای حالتی که تخلیه‌کننده‌ها در فاصله کمی از هم قرار داشته باشند غیرقابل اعتماد باشد. با توجه به نتایج می‌توان گفت نتایج مدل CorJet همخوانی خوبی با نتایج بررسی‌های تجربی دارد و قابل اعتماد است اما در مقابل نتایج مدل CORMIX خطای بالایی دارد و غیرقابل اعتماد است.

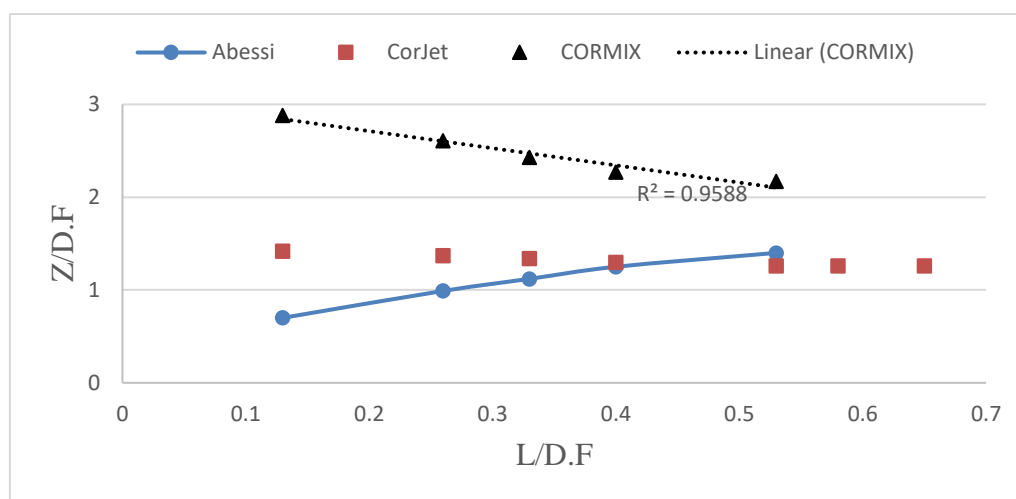


Fig. 4 Results of CORMIX and CorJet models for the maximum ascent height of the discharged effluent with an angle of 60 degrees, in the living environment in comparison with the laboratory study of Abessi and Roberts (2014)

شکل ۴ نتایج مدل‌های CORMIX و CorJet برای ارتفاع صعود بیشینه پساب تخلیه شده با زاویه ۶۰ درجه، در محیط ساکن در مقایسه با رابطه‌های تجربی (Abessi and Roberts (2014)).

می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت برای $L/D.F > 0.5$ پساب در حالت جت باهم ادغام نمی‌شود.

۳-۲- محیط پویا

۳-۲-۱- رقیق‌سازی پساب در حالت تخلیه به محیط همراستا و ناهمراستا

شکل ۵ مقایسه نتایج به دست آمده توسط مدل‌های CORMIX و CorJet و رابطه‌های ارائه شده توسط Abessi and Roberts (2017) را برای میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین (Si/F)، را برای $L/D.F$ مختلف نشان می‌دهد. در این قسمت جهت جریان محیط به صورت همراستا (شکل ۵- الف)

در صورتی که فاصله افقی تخلیه‌کننده‌ها به هم نزدیک باشد ($L/D.F = 0.13$)، CORMIX و CorJet میزان ارتفاع صعود بیشینه جت را دست بالا برآورد می‌کند اما در صورتی که فاصله تخلیه‌کننده‌ها افزایش یابد نتایج هر دو مدل به نتایج رابطه‌های تجربی نزدیک می‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت هرچقدر فاصله تخلیه‌کننده‌ها افزایش پیدا کند نتایج مدل‌ها قابل اعتمادتر خواهد بود. CORMIX و CorJet میزان ارتفاع بیشینه جت را به ترتیب با میانگین خطای ۵۵ و ۱۹ درصدی نسبت به رابطه‌های تجربی برآورد می‌کنند. بنابر نتایج مدل CorJet، میزان $Z/D.F$ برای $L/D.F > 0.5$ مستقل از فاصله تخلیه‌کننده‌هاست و میزانی ثابت دارد که این موضوع نشانگر ادغام پساب در حالت پلوم

برخورد به زمین، برای فاصله‌های مختلف تخلیه‌کننده‌ها از هم، به ترتیب ۴۸ و ۱۸ درصد اختلاف دارند. همچنین با افزایش فاصله تخلیه‌کننده‌ها از هم، نتایج مدل‌ها و رابطه‌های تجربی به هم نزدیک می‌شوند. در این حالت (محیط پویا)، مدل CorJet میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین را در مقایسه با مدل CORMIX با خطای کمتری برآورد می‌کند.

و خلاف جهت (شکل ۵-ب) با جهت پساب خروجی است. بنابراین نتایج به‌دست آمده میزان رقیق‌سازی با افزایش فاصله تخلیه‌کننده‌ها از هم افزایش می‌یابد که این موضوع نشانگر افزایش فاصله افقی محل ادغام جت‌ها از تخلیه‌کننده در پایین دست محل تخلیه می‌باشد. نتایج ارائه شده توسط مدل‌های CORMIX و CorJet برای پیش‌بینی رقیق‌سازی پساب در نقطه

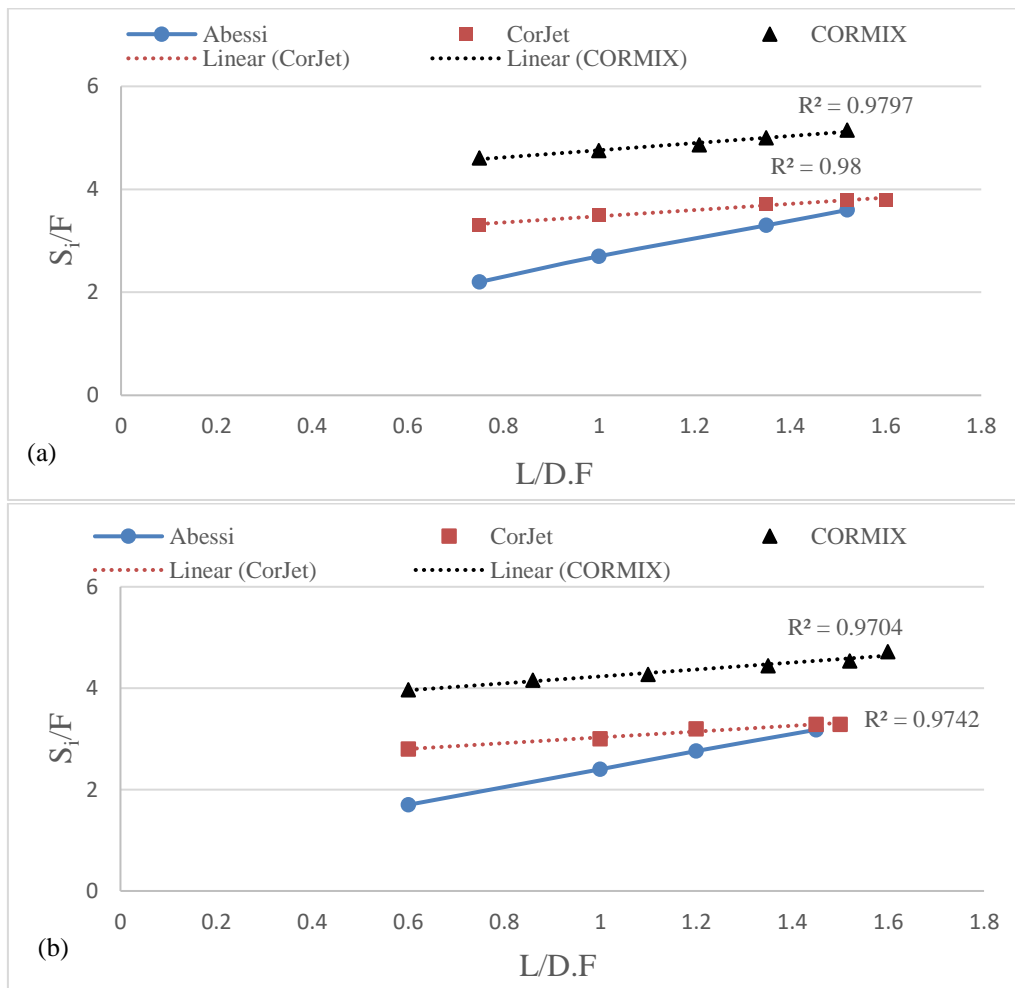


Fig. 5 Results of CORMIX and CorJet models for dilution of discharged effluent at an angle of 60° to the point of impact compared to the results of Abessi and Roberts (2017). (a) Evacuation to the coflow, (b) Discharge to counterflow environment.

شکل ۵ نتایج مدل‌های CORMIX و CorJet برای رقیق‌سازی پساب تخلیه‌شده با زاویه 60° در نقطه برخورد به زمین در مقایسه با نتایج (Abessi and Roberts (2017)). (a) تخلیه به محیط همراهی، (b) تخلیه به محیط خلاف جهت.

دارد. CORMIX محدوده ادغام جت‌ها ($L/D.F$) در محیط پویا (جریان همراهی و خلاف جهت) را برای اعداد فرود مختلف با پراکندگی بسیاری برآورد می‌کند که این میزان غیرقابل اعتماد است.

۳-۲-۲- ارتفاع صعود بیشینه جت در حالت تخلیه به محیط

باتوجه به نتایج مدل CorJet، در حالت تخلیه پساب به محیط همراهی و خلاف جهت، ادغام جت‌ها به ترتیب در $L/D.F = 1/55$ و $L/D.F = 1/42$ صورت می‌گیرد. درحالی‌که این میزان در محیط ساکن توسط مدل برابر $1/83$ برآورد شد. این کاهش به این دلیل است که افزایش قطر پساب در حالت پلوم در محیط پویا، بدلیل جریان محیط نسبت به محیط ساکن محدودیت

می‌یابد، جت‌ها در فاصله دورتری از تخلیه‌کننده با هم ادغام می‌شوند. ادغام جت‌ها باعث برخورد و تداخل آنها باهم شده و ارتفاع صعود جت کاهش پیدا می‌کند. بنابر نتایج مدل CorJet، میزان $Z/D.F$ برای $L/D.F > 0.7$ برای هر دو حالت همراستا و ناهمراستا ثابت می‌ماند که این موضوع نشانگر ادغام جت‌ها در حالت پلوم می‌باشد. به عبارت دیگر هنگامی که فاصله تخلیه‌کننده‌ها تاثیری در ارتفاع صعود بیشینه جت نداشته باشند، می‌توان نتیجه گرفت ادغام جت‌ها بعد از نقطه ارتفاع صعود بیشینه جت (در حالت پلوم) رخ می‌دهد.

همراستا و ناهمراستا شکل ۶ مقایسه نتایج به‌دست آمده توسط مدل‌های CORMIX و CorJet و رابطه‌های ارائه شده توسط Abessi and Roberts (2017) را برای ارتفاع صعود بیشینه جت ($Z/D.F$)، در فاصله‌های مختلف تخلیه‌کننده‌ها از هم ($L/D.F$)، نشان می‌دهد. در این قسمت جریان محیط به صورت همراستا (شکل ۶-الف) و خلاف جهت (شکل ۶-ب) با جهت پساب تخلیه شده می‌باشد. بنابر نتایج، ارتفاع صعود جت با افزایش فاصله تخلیه‌کننده‌ها از هم افزایش می‌یابد. هرچه فاصله تخلیه‌کننده‌ها از هم افزایش

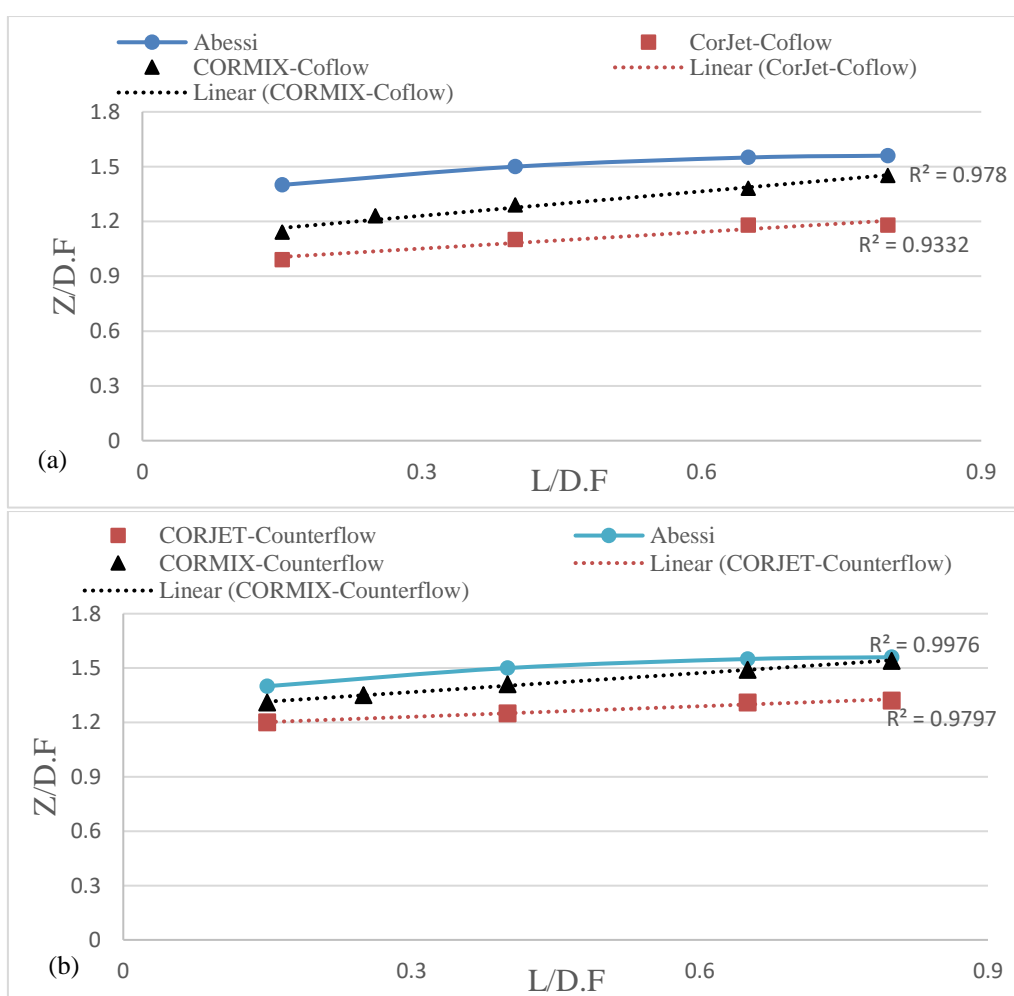


Fig. 6 Results of CORMIX and CorJet models for the maximum ascent height of the discharged effluent with an angle of 60 degrees, compared to the results of Abessi and Roberts (2017). (a) Coflow, (b) Counterflow.

شکل ۶ نتایج مدل‌های CORMIX و CorJet برای ارتفاع صعود بیشینه پساب تخلیه شده با زاویه ۶۰ درجه، در مقایسه با نتایج Abessi and Roberts (2017). (a) جریان همراستا. (b) جریان غیرهمراستا.

پیش‌بینی می‌کند. همچنین CORMIX نیز میزان ارتفاع صعود بیشینه جت در حالت جریان همراستا و ناهمراستا را به ترتیب با اختلافی در حدود ۱۳ و ۷ درصد به خوبی برآورد می‌کند. بنابر

با مقایسه نتایج CorJet و رابطه‌های تجربی مشاهده می‌شود CorJet میزان ارتفاع صعود جت در حالت جریان همراستا و ناهمراستا را به ترتیب با خطایی در حدود ۳۳ و ۲۰ درصد

نتایج بین مدل‌های CORMIX و CorJet و رابطه‌های تجربی در جدول ۱ آورده شده است.

نتایج مشخص شد مدل CORMIX ارتفاع صعود بیشینه جت در محیط پویا (جریان همراستا و ناهمراستا) را در مقایسه با مدل CorJet با اختلاف کمتری پیش‌بینی می‌کند. خلاصه مقایسه

جدول ۱ میانگین خطای مدل‌های CORMIX و CorJet در مقایسه با بررسی‌های تجربی
Table 1 Mean error of CORMIX and CorJet models compared to experimental study

	Stagnant environment			Co-flow		Counter-flow	
	S_i	X_i	Z	S_i	Z	S_i	Z
CORMIX error (%)	62	48	55	54	17	48	13
CorJet error (%)	18	11	19	21	20	18	33

فراسنجه‌های طراحی مانند فاصله بین تخلیه‌کننده‌ها با استفاده از مدل‌سازی، باعث افزایش نرخ رقیق‌سازی پساب و کاهش اثرگذاری‌های منفی بر روی محیط‌زیست دریایی در ناحیه تخلیه می‌شود.

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش به شبیه‌سازی تخلیه‌کننده‌های چند مجرای در محیط ساکن و پویا با استفاده از مدل‌های CORMIX و CorJet پرداخته شد و نتایج به‌دست آمده با رابطه‌های تجربی مقایسه شد. مدل CorJet محل ادغام جت‌ها در تخلیه پساب با زاویه ۶۰ درجه در محیط ساکن را به خوبی و با اختلاف ۱۰ درصدی پیش‌بینی می‌کند اما مدل CORMIX محل ادغام جت‌ها را با اختلاف و پراکندگی بسیاری ارائه می‌کند. مدل CorJet همه فراسنجه‌های پساب چگال تخلیه‌شده (S_i , X_i و Z) از تخلیه‌کننده‌های چند مجرای در محیط ساکن و پویا را با خطای قابل قبولی برآورد می‌کند. اما مدل CORMIX تنها ارتفاع صعود بیشینه جت پساب تخلیه شده در محیط پویا را به خوبی برآورد می‌کند و دیگر فراسنجه‌های پساب تخلیه شده را با اختلاف بالایی برآورد می‌کند. هرچه فاصله افقی تخلیه‌کننده‌ها افزایش یابد نتایج مدل‌ها به نتایج بررسی‌های تجربی نزدیک می‌شود که این موضوع به دلیل در نظر نگرفتن اثر کواندا و شرایط حقیقی هم‌آوری سیال محیط به درون جت، توسط مدل‌ها می‌باشد. مدل CORMIX با استفاده از طبقه‌بندی جریان به تحلیل مسئله‌ها می‌پردازد. ادغام جت‌ها باعث طبقه‌بندی نادرست جریان و در نتیجه تحلیل نادقیق بیشتر فراسنجه‌های مربوط به تخلیه پساب چگال در محیط آبی توسط CORMIX می‌شود. با توجه به نتایج دقیق‌تر مدل CorJet برای میزان رقیق‌سازی پساب، توصیه می‌شود در طراحی سازوکار و مدل‌سازی تخلیه شورابه آب‌شیرین‌کن‌ها و دیگر پساب‌ها به محیط‌های آبی ساکن و پویا مانند دریا، از این مدل استفاده شود. بهینه‌سازی

۵- فهرست نشانه‌ها

D	قطر تخلیه‌کننده، m
U_a	سرعت جریان محیط، m/s
U	سرعت جت خروجی، m/s
S_i	میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین
X_i	فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین از تخلیه‌کننده، m
Z	ارتفاع صعود بیشینه جت، m
F	عدد فرود تخلیه
L	فاصله افقی تخلیه‌کننده‌ها، m
θ	زاویه دهانه تخلیه‌کننده نسبت به افق
A	فراسنجه (رابطه ۶)
B	فراسنجه (رابطه ۷)
ρ_0	چگالی پساب، Kg/m^3
ρ_i	چگالی سیال محیط پذیرنده، Kg/m^3
Q	دبی خروجی، m^3/s
M	شار مومنتوم، m^4/s^2
J	شار شناوری، m^4/s^3
g'	شتاب گرانش اصلاح شده، m/s^2

Palomar P, Lara JL, Losada IJ. Near field brine discharge modeling part 2: Validation of commercial tools. *Desalination*. 290, 28-42.

Panagopoulos A., Haralambous, K.J., Loizidou, M. (2019). Desalination brine disposal methods and treatment technologies-A review. *Science of The Total Environment*. 693, 133545, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.351.

g

شتاب گرانش، m/s^2

۶- منابع ها

Abessi, O., and Roberts, P.J. (2014). Multiport diffusers for dense discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*. 140(8), 04014032.

Abessi, O., and Roberts, P.J. (2017). Multiport diffusers for dense discharge in flowing ambient water. *Journal of Hydraulic Engineering*. 143(6), 04017003.

Alameddine, I., and El-Fadel, M. (2007). Brine discharge from desalination plants: a modeling approach to an optimized outfall design. *Desalination*. 214(1-3), 241-260.

Angelidis, P., Kalpakis, D., Gyrikis, V., Kotsovinos, N. (2017). 2D brine sewage after impinging on a shallow sea free surface. *Environmental Fluid Mechanics*. 17(3), 615-628.

Bleninger, T., Jirka, G.H. (2008). Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants. *Desalination*. 221(1-3), 585-597.

Del Bene J.V., Jirka, G., Largier, J. (1994). Ocean brine disposal. *Desalination*. 97(1-3), 365-372.

Fischer, H.B., List, J.E., Koh, C.R., Imberger, J., Brooks, N.H. (2013). *Mixing in inland and coastal waters*. Elsevier.

Frick, W.E. (2004). Visual Plumes mixing zone modeling software. *Environmental modelling and software*. 19(7-8), 645-654.

Jirka, G.H., Doneker, R.L., Hinton, S.W. (1996). User's manual for CORMIX: A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters. US Environmental Protection Agency, Office of Science and Technology, 1996 Sep.

Kikkert, G.A. (2006). Buoyant jets with two and three-dimensional trajectories. PhD Thesis, University of Canterbury. New Zealand, 2006.

Loya-Fernández, Á., Ferrero-Vicente, L.M., Marco-Méndez, C., Martínez-García, E., Zubcoff, J., Sánchez-Lizaso, J.L. (2012). Comparing four mixing zone models with brine discharge measurements from a reverse osmosis desalination plant in Spain. *Desalination*. 286, 217-224.