

## Validation of Integral and Turbulence Models for Saline Wastewater Discharged into the Sea Environment

V. Babaeinezhad<sup>1</sup>, B. Khorsandi<sup>2\*</sup>

1,2- MSc of Civil Engineering and Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

\*(Corresponding Author Email: b.khorsandi@aut.ac.ir)

Received: 19-10-2022

Revised: 19-01-2023

Accepted: 21-01-2023

Available Online: 20-06-2023

## اعتبارسنجی مدل‌های انتگرالی و آشفتگی برای پساب شور تخلیه شده در محیط آبی

وحید بابایی‌نژاد<sup>۱</sup>، بابک خورسندی<sup>۲\*</sup>

۱ و ۲- به ترتیب کارشناسی‌ارشد عمران- آب و دانشیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

\*(نویسنده مسئول، E-Mail: b.khorsandi@aut.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱

### Abstract

With the reduction of natural sources of fresh water, the activity of desalination factories is increasing. The effluent of these factories is returned to the sea environment. The effluent contains a lot of chemicals and salt, which in case of improper discharge will disturb the balance of the sea environment. Using numerical models to check different discharge methods is one of the cheapest methods. In this research, the results of CORJET, VISJET and RNG (k- $\epsilon$ ) models are validated for the discharge of concentrated wastewater. For this purpose, the simulation results of these models in static and dynamic environments are compared with the results of various laboratory studies. According to the results, the RNG model estimates the axial velocity of the jet well and with a small error compared to the integral and laboratory models. All three models estimate most of the parameters related to the discharge of concentrated wastewater in comparison with the laboratory studies. CORJET and VISJET models estimate the amount of effluent dilution with a high error, but the RNG model estimates the amount of effluent dilution with an acceptable error due to the consideration of flow turbulence. The most important advantage of CORJET and VISJET integral models is easy modeling and very low calculation time compared to RNG turbulence model. According to the presented results, it can be concluded that the RNG model is suitable for carrying out studies related to the discharge of concentrated wastewater from desalination plants due to considering the flow turbulence and providing accurate results.

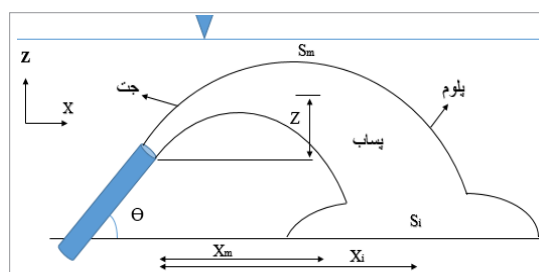
**Keywords:** Desalination, Jet, Effluent, Plume, Dilution.

### چکیده

با کاهش منابع طبیعی آب شیرین، فعالیت کارخانه‌های آب شیرین‌کن در حال افزایش است. پساب این کارخانه‌ها بلافاصله به محیط دریا بازگردانده می‌شود. پساب تولیدی مواد شیمیایی و نمک بسیار زیادی دارد که در صورت تخلیه نامناسب باعث برهم زدن تعادل محیط‌زیست دریا می‌شود. استفاده از مدل‌های عددی برای بررسی روش‌های مختلف تخلیه، یکی از ارزان‌ترین روش‌ها است. در این تحقیق برای اولین بار به اعتبارسنجی نتایج مدل‌های CORJET، VISJET و RNG (k- $\epsilon$ ) برای تخلیه پساب چگال پرداخته می‌شود. برای این منظور نتایج شبیه‌سازی این مدل‌ها در محیط ساکن و پویا، با نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی مختلف مقایسه می‌شود. باتوجه‌به نتایج، مدل RNG سرعت محوری جت را به خوبی و با خطای ناچیزی در مقایسه با مدل‌های انتگرالی و آزمایشگاهی برآورد می‌کند. هر سه مدل اکثر پارامترهای مربوط به تخلیه پساب چگال را در مقایسه با مطالعه‌های آزمایشگاهی کمتر تخمین می‌زنند. مدل‌های CORJET و VISJET میزان رقیق‌سازی پساب را با خطای بالایی برآورد می‌کنند اما مدل RNG به دلیل درنظر گرفتن آشفتگی جریان، میزان رقیق‌سازی پساب را با خطای قابل قبولی تخمین می‌زند. مهم‌ترین مزیت مدل‌های انتگرالی CORJET و VISJET مدل‌سازی آسان و زمان محاسبه بسیار کم در مقایسه با مدل آشفتگی RNG است. باتوجه‌به نتایج ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت مدل RNG به دلیل درنظر گرفتن آشفتگی جریان و ارائه نتایج دقیق، برای انجام مطالعه‌های مربوط به تخلیه پساب چگال حاصل از کارخانه‌های آب شیرین‌کن مناسب است.

**واژه‌های کلیدی:** آب شیرین‌کن، جت، پساب، پلوم، رقیق‌سازی.

میزان رقیق‌سازی پساب در میدان دور به عوامل طبیعی مانند جهت و سرعت جریان محیط پذیرنده، شیب محل تخلیه و ... بستگی دارد (Adams و Shrivastava، ۲۰۱۹). به همین دلیل اکثر مطالعات انجام شده در زمینه تخلیه پساب چگال به میدان نزدیک محدود می‌شود. در میدان نزدیک، پساب در دو مرحله با سیال محیط پذیرنده ترکیب می‌شود. در مرحله اول پساب با سرعت بالا و به صورت جت از نازل خارج می‌شود. هم‌آوری سیال محیط به درون جت (به دلیل تنش برشی به وجود آمده بین جت و سیال محیط) باعث کاهش غلظت و شار ممنتوم جت خروجی می‌شود (Fernández و همکاران، ۲۰۱۸). مرحله دوم هنگامی آغاز می‌شود که شار مومنوم جت (سرعت جت) تقریباً صفر می‌شود. در این حالت پساب از جت به پلوم تبدیل می‌شود (اگر  $F < 1$  باشد رفتار سیال به صورت جت و اگر  $F > 1$  باشد رفتار سیال به صورت پلوم است). باتوجه به اینکه چگالی پساب نسبت به چگالی سیال محیط پذیرنده بیشتر است، پلوم به خاطر شار شناوری به سمت بستر محیط آبی سقوط می‌کند (Saeidi و همکاران، ۲۰۲۲)، که در این حالت تماس پلوم با سیال محیط پذیرنده باعث کاهش غلظت پساب می‌شود.



شکل ۱- مشخصات پساب تخلیه شده به صورت مستغرق مایل

میزان رقیق‌شدگی پساب (S) (در اثر اختلاط با محیط آبی) در هر نقطه از پایین دست محل تخلیه به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$S = \frac{C_0 - C_a}{C - C_a} \quad (1)$$

که در آن C میزان غلظت در نقطه مورد نظر است.

عدد فرود جت نیز به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$F = \frac{U_j}{\sqrt{D \cdot g_0}} \quad (2)$$

U سرعت جت خروجی، D قطر نازل دایره‌ای و  $g_0'$  شتاب گرانش اصلاح شده می‌باشد. شتاب گرانش اصلاح شده به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$g_0' = g \frac{(\rho_0 - \rho_a)}{\rho_a} \quad (3)$$

که در آن  $\rho_a$  چگالی سیال محیط،  $\rho_0$  چگالی پساب و g شتاب گرانش می‌باشد.

باتوجه به اینکه تخلیه پساب ناشی از کارخانه‌های آب شیرین‌کن و دیگر صنایع به آب دریاها و اقیانوس‌ها باعث آسیب رساندن به محیط‌زیست و آبریان می‌شود، گروهی از محققان به منظور یافتن روش‌های مناسب تخلیه و کاهش آسیب‌های تخلیه پساب،

شیرین‌سازی آب دریاها و اقیانوس‌ها یک منبع آب مستقل از بارندگی برای تأمین طولانی مدت آب شیرین است. امروزه احداث کارخانه‌های آب شیرین‌کن به منظور شیرین کردن آب دریاها و اقیانوس‌ها، در کشورهای ساحلی که منابع طبیعی آب شیرین کافی نیست یا بیش از حد مورد بهره برداری قرار می‌گیرند اهمیت پیدا کرده است. شیرین کردن آب دریا علاوه بر تولید آب شیرین پسابی با غلظت بالای نمک ( $C_0$ : غلظت اولیه پساب) (نسبت به غلظت سیال محیط پذیرنده ( $C_a$ )) نیز تولید می‌کند. برای کارخانه‌های آب شیرین‌کن واقع در نزدیک سواحل، بهترین روش دفع پساب، تخلیه آن به محیط دریا و اقیانوس است (Kikkert و همکاران، ۲۰۰۷؛ Ramakanth و همکاران، ۲۰۲۲). پساب تخلیه شده به دریا به دلیل وجود مقدار زیاد نمک اثرات منفی بسیاری بر آبریان دریا دارد (Wang و Mohammadian، ۲۰۲۲). روش‌های مختلفی برای تخلیه پساب وجود دارد که بهترین روش از نظر کاهش اثرات محیط‌زیستی، استفاده از تخلیه کننده‌های مستغرق مایل (شکل ۱) است (Shao و Law، ۲۰۱۰). در شکل (۱) بیشترین ارتفاع صعود جت از نازل،  $X_m$  فاصله افقی محل بیشترین ارتفاع صعود جت از تخلیه کننده،  $S_m$  رقیق‌سازی پساب در محل بیشترین ارتفاع صعود جت،  $X_i$  فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین از نازل،  $S_i$  میزان رقیق‌سازی پساب در محل برخورد پساب به زمین و  $\theta$  زاویه دهانه نازل نسبت به افق می‌باشد. برای تخلیه پساب به صورت مستغرق از دیفیوزر استفاده می‌کنند تا سرعت تخلیه پساب افزایش یابد. رقیق‌سازی پساب به دلیل اختلاف سرعت بین جت خروجی و سیال محیط پذیرنده، و در نتیجه هم‌آوری سیال محیط به درون جت اتفاق می‌افتد. هرچه طول مسیر حرکت پساب در محیط پذیرنده افزایش یابد اختلاط پساب با سیال محیط پذیرنده نیز افزایش می‌یابد. به همین دلیل برای افزایش طول مسیر حرکت پساب در محیط آبی، تخلیه کننده به صورت مایل نصب می‌شود. باتوجه به نتایج محققین مختلف، زاویه تخلیه ۴۵ تا ۶۰ درجه ( $60 > \theta > 45$ ) بهینه‌ترین زاویه برای تخلیه پساب چگال است (Papakonstantis و همکاران، ۲۰۱۱). رقیق‌سازی پساب در دو میدان نزدیک و دور صورت می‌گیرد. میدان نزدیک ناحیه اطراف نازل از لحظه خروج پساب از تخلیه‌کننده تا لحظه برخورد پساب به زمین ( $X_i$ ) را شامل می‌شود. اما میدان دور بسیار بزرگتر از میدان نزدیک است و از لحظه برخورد پساب به زمین تا اختلاط کامل پساب با سیال محیط پذیرنده را در بر می‌گیرد (Shao و Law، ۲۰۱۰). رقیق‌سازی پساب در میدان نزدیک بسیار بیشتر از میدار دور است (Fernández و همکاران، ۲۰۱۸). رقیق‌سازی پساب در میدان نزدیک به عواملی همچون زاویه تخلیه‌کننده نسبت به افق، عدد فرود جت خروجی (F)، سرعت جریان محیط ( $Ua$ ) و اختلاف غلظت بین سیال محیط پذیرنده و پساب خروجی بستگی دارد. اما

آغاز به انجام تحقیقاتی در این زمینه کردند و نتایج مختلفی را ارائه دادند. Fernández و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی استفاده از دیفیوزر در میزان رقیق سازی پساب شور تخلیه شده در محیط آبی ساکن که در آن سرعت جریان محیط صفر است ( $U_a=0$ ) پرداختند. ایشان با استفاده از مدل CORMIX (Doneker و Jirka، ۲۰۰۱) نشان دادند استفاده از دیفیوزر برای تخلیه پساب شور، اثرات محیط زیستی این نوع پساب را به شدت کاهش می دهد. Malcangio و Petrillo (۲۰۱۰) با استفاده از مدل CORMIX به بررسی تخلیه پساب چگال حاصل از کارخانه های آب شیرین کن پرداختند. طبق نتایج ایشان استفاده از تخلیه کننده های چند پورتهی میزان رقیق سازی را در مقایسه با تخلیه کننده های دیگر افزایش می دهد. Jiang و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مدل آزمایشگاهی و عددی رفتار پساب چگال تخلیه شده از نازل با هندسه های مختلف را بررسی کردند. طبق نتایج ایشان هندسه نازل تأثیر زیادی در رفتار پساب چگال تخلیه شده در محیط آبی دارد. بابایی نژاد و خورسندی (۱۴۰۰) به اعتبارسنجی مدل های CORMIX و CORJET (Doneker و Jirka، ۲۰۰۱) برای تخلیه پساب چگال با استفاده از نازل های چند پورتهی پرداختند. طبق نتایج ایشان مدل CORJET در مقایسه با مدل CORMIX عملکرد مناسبی در شبیه سازی رفتار پساب چگال تخلیه شده از نازل های چند پورتهی مایل داشت. Ramezani و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از نرم افزار اپن فوم، تأثیر فاصله دهانه نازل (با زاویه تخلیه ۳۰ و ۴۵ درجه) از بستر دریا را بررسی کردند. طبق نتایج ایشان نزدیکی دهانه نازل

به بستر دریا تأثیر محسوسی بر رفتار پساب تخلیه شده از نازل با زاویه ۴۵ درجه ندارد. اما برای پساب تخلیه شده از نازل با زاویه ۳۰ درجه، هنگامی که مقدار پارامتر  $y_0/L_M$  (ارتفاع نازل از سطح زمین،  $L_M$  مقیاس طولی جت به پلوم) به کمتر از ۰/۱۴ می رسد، مقدار رقیق سازی کاهش می یابد. باتوجه به محدودیت و هزینه بالای مطالعه های آزمایشگاهی، استفاده از مدل های عددی به منظور کاهش هزینه ها امری ضروری است. اولین قدم برای استفاده از مدل های عددی اطمینان از نتایج مربوط به آن مدل است. مدل های انتگرالی CORJET و VISJET (Cheung و همکاران، ۲۰۰۰) باتوجه به کاربرد دوست بودن و همچنین زمان بسیار پایین شبیه سازی، یکی از پرکاربردترین مدل ها برای شبیه سازی رفتار پساب چگال تخلیه شده در محیط آبی است. مدل آشفتگی (k-ε) RNG نیز توانایی بالایی در شبیه سازی تخلیه پساب به صورت جت مستغرق مایل دارد (Yan و Mohammadian، ۲۰۱۹). به همین دلیل در این پژوهش برای اولین بار به اعتبارسنجی مدل آشفتگی (k-ε) RNG (با استفاده از نرم افزار ANSYS-FLUENT) و مدل های انتگرالی CORJET و VISJET برای بررسی رفتار پساب شور تخلیه شده از نازل تک پورتهی دایره (با زاویه تخلیه ۶۰ درجه) در محیط ساکن و پویا (که در آن جریان سیال به صورت هم راستا با جهت جریان تخلیه جت (co-flow) است) پرداخته می شود. برای این منظور نتایج مدل های CORJET، VISJET و (k-ε) RNG با نتایج مطالعه های آزمایشگاهی مختلف (جدول ۱) مقایسه می شود.

جدول ۱- مطالعه های تجربی انجام شده

F/S	S <sub>m</sub> /F	Z/FD	FD/X	X <sub>m</sub> /FD	F	مطالعه تجربی
۱/۸۱	-	۱/۶	۲/۷۲	۱/۶	۱۴-۹۹	(Kikkert و همکاران، ۲۰۰۷)
۱/۶۵	۰/۶۲	۱/۶۷	۲/۷۵	۱/۷		(Abessi و Roberts، ۲۰۱۶)
-	-	۱/۷۷	۲/۴۵	۱/۴۲	۱۶-۲۱۶	(Cipollina و همکاران، ۲۰۰۵)
۱/۶	-	-	۲/۴	-	۱۹-۳۶	(Roberts و Toms، ۱۹۸۷)
۱/۶۸	-	۱/۶۸	۲/۷۵	۱/۸۴	۷-۵۸	(Papakonstantis و همکاران، ۲۰۱۱)

## مواد و روش ها

CORJET یک مدل انتگرالی برای پیش بینی رفتار انواع پساب (با شناوری مثبت، خنثی و منفی) تخلیه شده در محیط آبی است. معادله های حاکم بر این مدل، معادله اندازه حرکت، پیوستگی و انتقال-انتشار است. این مدل براساس انتگرال اویلری به تجزیه و تحلیل معادله های مربوط به تخلیه پساب می پردازد. مدل VISJET نیز یک مدل انتگرالی دقیق برای پیش بینی رفتار پساب تخلیه شده به صورت جت در محیط آبی است. VISJET با استفاده از مدل انتگرال لاگرانژی معادلات حاکم را بررسی و تحلیل می کند. FLUENT یک نرم افزار شبیه ساز سه بعدی با توانایی بال در زمینه

دینامیک سیالات محاسباتی است. FLUENT با استفاده از روش حجم محدود مسائل مختلف را حل می کند. شبیه سازی رفتار پساب در میدان دور، در نظر گرفتن آشفتگی جریان و استفاده از مدل های آشفتگی مختلف برای شبیه سازی رفتار پساب، از مزیت های این نرم افزار در مقایسه با مدل های انتگرالی است. در مدل RNG مقدار K (انرژی جنبشی آشفتگی) و ε (نرخ استهلاک) به ترتیب از روابط (۴) و (۵) به دست می آید (Wenxin و Meng، ۲۰۱۶).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m k) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \epsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m \epsilon) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon}^* G_{k,m} - C_{2\epsilon} \rho_m \epsilon) \quad (5)$$

$N_3, N_2, N_1$  بیان می‌شوند.  $S_i/F = N_4, S_m/F = N_3, X_i/FD = N_2$  و  $N_4$  ضرایب ثابتی هستند که از مطالعه‌های تجربی و عددی محاسبه می‌شوند، هر کدام از این ضرایبها براساس نتایج مطالعه انجام شده در بازه خاصی از عدد فرود جت خروجی، معتبر است.

#### • مدل سازی

در این تحقیق با استفاده از مدل‌های CORJET، VISJET و RNG (k-ε) به شبیه‌سازی رفتار پساب چگال تخلیه شده در محیط ساکن و پویا پرداخته می‌شود. پساب به صورت جت مستغرق مایل ( $\theta = 60^\circ$ ) با عدد فرود  $12/6$  ( $U_j = 0/41$ )،  $16/8$  ( $U_j = 0/55$ ) و  $20/9$  ( $U_j = 0/68$ )، با استفاده از نازل دایره‌ای به قطر 5 mm تخلیه می‌شود ( $U_j$ : سرعت خروجی پساب از نازل). چگالی پساب تولیدی برابر  $1026 \text{ kg/m}^3$  است که در یک محیط آبی با چگالی  $998 \text{ kg/m}^3$  تخلیه می‌شود. اختلاف دمای بین پساب و سیال محیط پذیرنده صفر است. در محیط پویا پساب با عدد فرود  $20/9$  با سرعت‌های محیطی مختلف ( $0/06 \text{ m/s} < U_a < 0/12 \text{ m/s}$ ) معادل  $1/85 < U_r F < 0/61$ ، که در آن  $U_r = U_a/U_j$  (سرعت نسبی) تخلیه می‌شود (جدول ۲). زاویه بین جهت جریان محیط و جهت تخلیه پساب ( $\varphi$ ) عامل مهمی در تغییر رفتار پساب چگال تخلیه شده در محیط آبی است. به همین دلیل در محیط پویا تخلیه پساب در دو حالت هم‌راستا ( $\varphi = 0$ ) و مخالف با جهت جریان محیط ( $\varphi = 180$ ) صورت می‌گیرد.

در روابط بالا  $\mu_{i,m}$  لزجت آشفتگی و  $G_{k,m}$  انرژی سینماتیک آشفتگی است. همچنین مقدار  $C_{1\epsilon}^*$  برابر است با (رابطه ۶):

$$C_{1\epsilon}^* = C_{1\epsilon} - \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (6)$$

#### • آنالیز ابعادی جریان جت با شناوری منفی

آنالیز ابعادی یک روش مناسب برای کاهش تعداد متغیرهای موثر بر پدیده‌های فیزیکی است. مطالعه‌های آزمایشگاهی مختلفی برای بررسی رابطه‌های آنالیز ابعادی مربوط به پساب چگال تخلیه شده در محیط آبی انجام شده است. Toms و Roberts (1987) با در نظر گرفتن یک جریان آشفتته در یک محیط آبی ساکن نشان دادند در آنالیز ابعادی، همه پارامترهای تابعی از دبی جرمی ( $Q$ )، شار مومنتوم ( $M$ ) و شار شناوری ( $B$ ) است که توسط یک ضریب تناسب به صورت مقیاس طولی (رابطه ۷) تعریف می‌شود:

$$Z, X, S : \int_1(Q, M, B) = \int_2(L_Q, L_M) \quad (7)$$

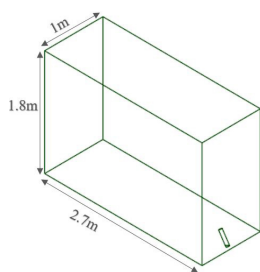
مقدار مقیاس طولی تخلیه ( $L_Q$ ) و مقیاس طولی مومنتوم ( $L_M$ ) به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود.

$$L_Q = Q / M^{0.5}, L_M = (M^{0.75}) / (B^{0.5}) \quad (8)$$

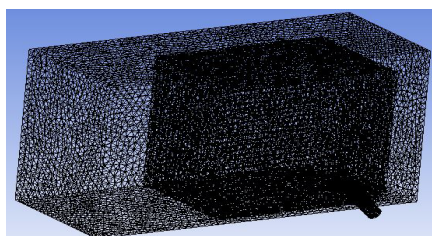
با استفاده از تقریب بوسینسک و با توجه به اینکه  $L_Q \ll L_M$  می‌توان گفت  $L_M = 0.95 D.F$ . بنابراین برای یک زاویه ثابت، پارامترهای مختلف تخلیه پساب چگال تابعی از عدد فرود و قطر تخلیه‌کننده است که در حالت بی‌بعد، این پارامترها به صورت  $Z/FD = N_1$

جدول ۲- اطلاعات ورودی به مدل

D (mm)	$U_a$ (m/s)	F	$\theta$ (°)	$U_j$ (m/s)	$\varphi$ (°)	$\Delta T$ (°C)	$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )
	0	12/6		0/41	0			
5	$0/02 < U_a < 0/06$	16/8	60	0/55	180	0	1026	998
		20/9		0/68				



(الف)



(ب)

شکل ۲- مدل شبیه‌سازی شده در نرم افزار انسیس فلونت. الف) مدل هندسی (ب) مش بندی.

در FLUENT برای شبیه‌سازی ابتدا هندسه مدل در نرم‌افزار SPACE-CLAIM طراحی (شکل ۲-الف) و سپس با استفاده از ANSYS-MESHING مش‌زنی صورت گرفت (شکل ۲-ب). در نزدیکی محل تخلیه به دلیل سرعت بالای جت و تنش برشی ایجاد شده، از مش‌های با اندازه بسیار کم استفاده شد. برای اطراف محل تخلیه، به دلیل عدم تأثیرگذاری این مناطق بر روی جریان جت از مش‌های با اندازه بزرگتر استفاده شد. بعد از مش‌زنی مدل جهت مقداردهی وارد نرم‌افزار FLUENT شد. برای دهانه نازل از شرط مرزی Velocity Inlet، برای بستر محل تخلیه از شرط مرزی No Slip و برای دیواره‌های اطراف محل تخلیه از شرط مرزی Symmetry استفاده شده است. برای شبیه‌سازی از مدل آشفتگی RNG استفاده شد.

در این قسمت نتایج مدل‌های CORJET، VISJET و مدل آشفتگی RNG برای تخلیه پساب چگال، با نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی مختلف مقایسه می‌شود. پساب در محیط ساکن و پویا (جریان هم‌راستا و غیرهم‌راستا) به صورت مستغرق مایل ( $60^\circ$ )  $(\theta =)$  با اعداد فرود  $12/6$ ،  $16/8$  و  $20/9$  تخلیه می‌شود. میزان خطا بین دو عدد با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

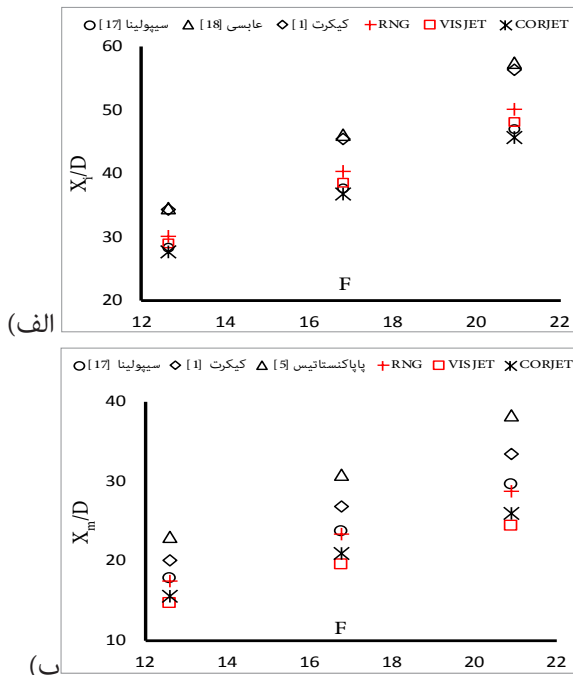
$$E = \left[ \frac{J_E - J_N}{J_E} \right] * 100 \quad (9)$$

در رابطه بالا  $J_E$  داده آزمایشگاهی (عدد بزرگتر) و  $J_N$  داده عددی (عدد کوچکتر) است.

### محیط ساکن

#### ۱- فاصله افقی محل پساب از نازل

شکل (۳) نتایج مربوط به پارامتر بی بعد فاصله افقی محل ارتفاع صعود حداکثر جت از نازل ( $X_m/D$ ) (شکل ۳-الف) و فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین از نازل ( $X_i/D$ ) (شکل ۳-ب) را برای اعداد فرود مختلف نشان می‌دهد. مقدار  $X_m/D$  و  $X_i/D$  با افزایش عدد فرود، برای هر سه مدل به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابند. با افزایش عدد فرود (به دلیل افزایش سرعت جت خروجی)، ممنوم جت افزایش می‌یابد و به همین دلیل مقدار  $X_m$  و  $X_i$  نسبت به نازل افزایش می‌یابد (Choi و همکاران، ۲۰۱۶) باتوجه به شکل (۳-الف) هر سه مدل مقدار  $X_m$  را کمتر تخمین می‌زنند. نتایج مدل‌ها مطابقت خوبی با نتایج مطالعه تجربی Cipollina و همکاران (۲۰۰۵) دارد که در این بین نتایج مدل RNG کاملاً منطبق بر نتایج Cipollina و همکاران (۲۰۰۵) است. اما نتایج هر سه مدل در مقایسه با نتایج Papakonstantis و همکاران (۲۰۱۱) و Kikkert و همکاران (۲۰۰۷) اختلاف بالایی دارند. میانگین مقدار فاصله افقی محل ارتفاع صعود حداکثر جت مطالعه‌های تجربی در حالت بی بعد شده ( $X_m/F$ )، برابر  $1/51$  است. مقدار  $X_m/F$  برای مدل‌های RNG، VISJET و CORJET به ترتیب برابر  $1/4$ ،  $1/17$  و  $1/25$  است. مدل‌های VISJET و CORJET مقدار فاصله افقی محل ارتفاع صعود حداکثر جت از نازل را در مقایسه با نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی به ترتیب با  $22/5$  و  $17/5$  درصد خطا برآورد می‌کنند. مدل آشفتگی RNG در مقایسه با مدل‌های انتگرالی عملکرد بهتری داشت و مقدار  $X_m$  را با  $7/2$  درصد خطا در مقایسه با میانگین نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی تخمین زد. باتوجه به شکل (۳-ب)، نتایج مدل‌های VISJET، RNG و CORJET نزدیک به نتایج مطالعه تجربی Cipollina و همکاران (۲۰۰۵) است. نتایج مدل‌های VISJET و CORJET همخوانی بسیار خوبی با نتایج Cipollina و همکاران (۲۰۰۵) دارند. میانگین مقدار  $X_i/F$  مطالعه‌های آزمایشگاهی برابر  $2/58$  است. مقدار

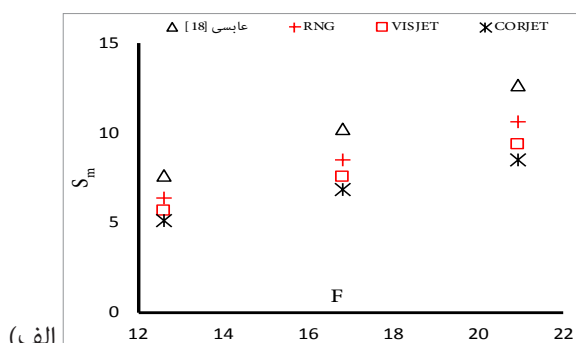


شکل ۳- نتایج مدل‌های CORJET، VISJET، RNG و CORJET برای فاصله افقی محل پساب از نازل در مقایسه با مطالعه‌های تجربی. الف) محل ارتفاع صعود حداکثر جت از نازل. ب) محل نقطه برخورد پساب به زمین از نازل.

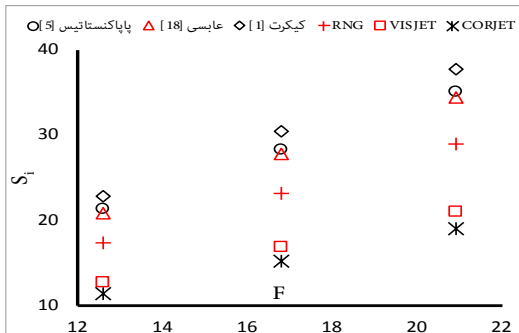
#### ۲- ارتفاع صعود بیشینه جت (Z)

شکل (۴) مقایسه نتایج به دست آمده با مدل‌های VISJET، RNG و CORJET و نتایج مدل‌های آزمایشگاهی را برای ارتفاع صعود بیشینه مرکز جت در اعداد فرود مختلف نشان می‌دهد. پساب به صورت مستغرق مایل از نازل دایره‌ای با زاویه  $60^\circ$  درجه نسبت به افق تخلیه می‌شود. با افزایش عدد فرود (سرعت جت خروجی)، مقدار  $Z/D$  به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. باتوجه به شکل (۴)، همه مدل‌ها مقدار ارتفاع صعود حداکثر جت را کمتر برآورد می‌کنند که نتایج مدل RNG در مقایسه با مدل‌های انتگرالی دقیق‌تر بود. میانگین مقدار بی بعد ارتفاع صعود حداکثر جت ( $Z/F$ ) برای مطالعه‌های آزمایشگاهی (Kikkert و همکاران، ۲۰۰۷؛ Papakonstantis و همکاران، ۲۰۱۱؛ Roberts و Abessi، ۲۰۱۶)  $1/65$  است. مدل RNG مقدار ارتفاع صعود حداکثر جت ( $Z/F$ ) را با  $14$  درصد خطا نسبت به میانگین نتایج مطالعه‌های تجربی، به خوبی

رقیق‌سازی را با اختلاف بالایی پیش‌بینی می‌کنند. مدل آشفتگی RNG در مقایسه با مدل‌های انتگرالی VISJET و CORJET رفتار پساب چگال تخلیه شده در محیط آبی را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. همچنین مدل RNG مقدار رقیق‌سازی پساب را در مقایسه با مدل‌های انتگرالی با خطای کمتری تخمین می‌زند. آشفتگی جریان یکی از عوامل تأثیرگذار در میزان رقیق‌سازی و رفتار پساب چگال تخلیه شده در محیط آبی است. مدل‌های انتگرالی برخلاف مدل RNG آشفتگی جریان را در نظر نمی‌گیرند. به همین دلیل می‌توان گفت نتایج مدل RNG در مقایسه با نتایج مدل‌های انتگرالی VISJET و CORJET قابل اعتمادتر است.



(الف)



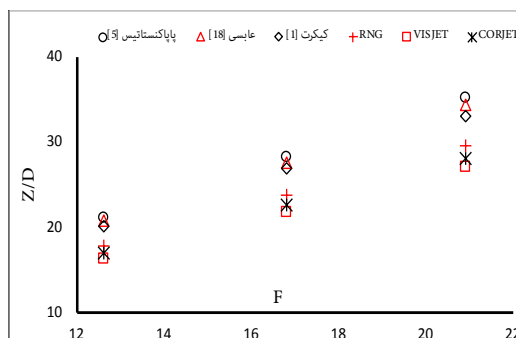
(ب)

شکل ۵- نتایج مدل‌های RNG، VISJET و CORJET برای رقیق‌سازی پساب. در نقطه برخورد به زمین در مقایسه با نتایج مطالعه‌های تجربی. (الف) رقیق‌سازی پساب در محل ارتفاع صعود حداکثر جت. (ب) رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین.

جدول ۳- مقایسه نتایج مدل‌های RNG، VISJET و CORJET و نتایج مدل‌های تجربی در حالت بی‌بعد

$S_i/F$	$S_m/F$	$Z/F.D$	$X_i/F.D$	$X_m/F.D$	پارامتر بی‌بعد شده
۱/۷۲	۰/۶۱	۱/۶۵	۲/۵۸	۱/۵۱	میانگین مطالعه‌های تجربی
۱/۳۸	۰/۵۱	۱/۴۲	۲/۴	۱/۴	مدل RNG
۱/۰۲	۰/۴۵	۱/۳	۲/۳	۱/۱۷	مدل VISJET
۰/۹	۰/۴۱	۱/۳۵	۲/۱۹	۱/۲۵	مدل CORJET
۱۹/۷۶	۱۶/۴	۱۴	۷	۷/۲	خطای RNG
۴۱	۲۶/۳	۲۲	۱۱	۲۲/۵	خطای VISJET
۴۷/۶	۳۲/۸	۱۹	۱۵	۱۷	خطای CORJET

تخمین می‌زند. مقدار ارتفاع صعود حداکثر جت توسط مدل‌های VISJET ( $Z/F.D = 1/3$ ) و CORJET ( $Z/F.D = 1/35$ ) به ترتیب با ۲۲ و ۱۹ درصد خطا برآورد شد.



شکل ۴- نتایج مدل‌های RNG، VISJET و CORJET برای ارتفاع صعود بیشینه جت در مقایسه با مطالعه‌های تجربی

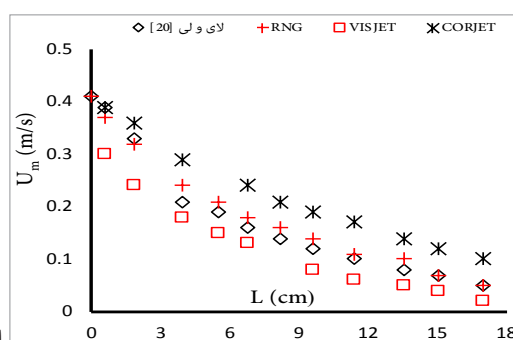
### ۳- رقیق‌سازی پساب ( $S_i$ و $S_m$ )

در این قسمت نتایج مربوط به رقیق‌سازی پساب در محل ارتفاع صعود حداکثر جت (شکل ۵-الف) و رقیق‌سازی در نقطه برخورد پساب به زمین (شکل ۵-ب) مدل‌های RNG، VISJET و CORJET برای اعداد فرود مختلف آورده شده است. باتوجه به شکل (۵)، با افزایش عدد فرود مقدار رقیق‌سازی برای همه مدل‌ها به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. با افزایش عدد فرود، مقدار ارتفاع صعود حداکثر جت و فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین افزایش می‌یابد که این موضوع باعث افزایش طول مسیر حرکت پساب در محیط آبی می‌شود. رقیق‌سازی پساب به دلیل تنش برشی ایجاد شده میان جت و سیال محیط پذیرنده و در نتیجه هم‌آوری سیال محیط به درون جت ایجاد می‌شود. بنابراین می‌توان گفت هرچه طول مسیر حرکت پساب (جت و پلوم) افزایش یابد، هم‌آوری سیال محیط به درون جت و در نتیجه میزان رقیق‌سازی پساب (اختلاط پساب با سیال محیط پذیرنده) افزایش می‌یابد (Roberts و Toms، ۱۹۸۷). باتوجه به نتایج شبیه‌سازی، هر سه مدل مقدار رقیق‌سازی ( $S_i$  و  $S_m$ ) را کمتر برآورد می‌کنند. مدل‌های RNG، VISJET و CORJET مقدار  $S_m$  را به ترتیب با ۱۶/۴، ۲۷ و ۳۲/۴ درصد خطا نسبت به مطالعه Roberts و Abessi (۲۰۱۶) تخمین می‌زنند. باتوجه به شکل (۵-ب) نتایج مدل RNG همخوانی خوبی با نتایج مطالعه‌های تجربی دارد. طبق جدول (۳) مدل‌های RNG، VISJET و CORJET مقدار  $S_i/F$  را به ترتیب با ۱۹/۷۶، ۴۱ و ۴۷/۶ درصد خطا کمتر پیش‌بینی می‌کنند.

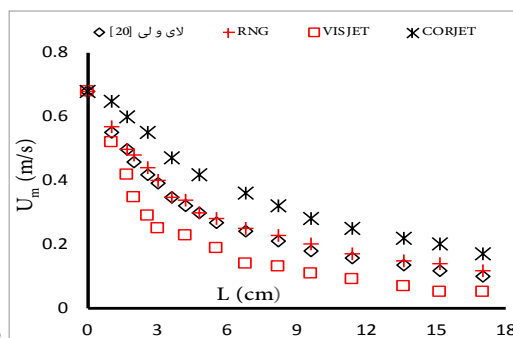
باتوجه به جدول (۳)، مدل‌های CORJET و VISJET طول مسیر حرکت پساب (ارتفاع صعود حداکثر جت، فاصله افقی محل برخورد پساب به زمین از نازل و فاصله افقی محل ارتفاع صعود حداکثر جت از نازل) را با خطای قابل قبولی تخمین می‌زنند اما میزان

#### ۴- سرعت محوری جت

شکل (۶) سرعت محوری جت در نقاط مختلف امتداد طول خط مرکزی جت ( $L$ ) در محیط ساکن را نشان می‌دهد. نتایج برای اعداد فرود  $۱۲/۶$  (شکل ۶-الف) و  $۲۰/۹$  (شکل ۶-ب) آورده شده است. باتوجه به شکل (۶)، با افزایش  $L$  سرعت محوری جت کاهش می‌یابد. حرکت جت درون محیط آبی باعث ایجاد تنش برشی بین سیال محیط و جت تخلیه شده می‌شود. هم‌اوری سیال محیط به درون جت که به دلیل تنش برشی میان جت و سیال محیط صورت می‌گیرد باعث کاهش سرعت جت می‌شود. باتوجه به نتایج به دست آمده، مدل  $RNG$  سرعت محوری جت را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. اما مدل‌های  $CORJET$  و  $VISJET$  سرعت محوری جت را در مقایسه با نتایج مدل تجربی ( $Lai$ ) و Lee (۲۰۱۲)، به ترتیب بیشتر و کمتر تخمین می‌زنند.



(الف)



(ب)

شکل ۶- نتایج مدل‌های  $RNG$ ،  $VISJET$  و  $CORJET$  برای سرعت محوری جت در مقایسه با نتایج مطالعه تجربی. الف)  $F=۱۲/۶$  ب)  $F=۲۰/۹$

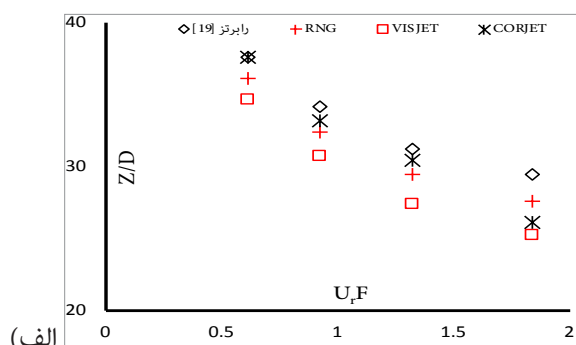
#### • محیط پویا

در این قسمت به مقایسه نتایج مدل‌های  $RNG$ ،  $VISJET$  و  $CORJET$  با نتایج مدل آزمایشگاهی Roberts و Toms (۱۹۸۷) پرداخته می‌شود. پساب به صورت مستغرق مایل در محیط پویا (جریان هم‌راستا  $(\Phi=0)$  و غیرهم‌راستا  $(\Phi=۱۸۰)$ ) تخلیه می‌شود.

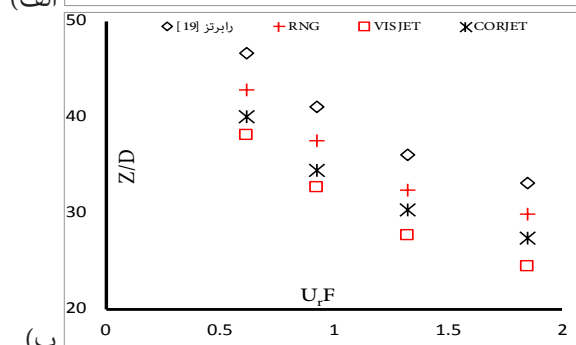
#### ۱- ارتفاع صعود حداکثر جت ( $Z$ )

شکل (۷) مقدار ارتفاع صعود حداکثر جت را برای سرعت‌های محیطی مختلف هم‌راستا با جهت تخلیه پساب  $(\Phi=0)$  (شکل ۶-

الف) و خلاف جهت تخلیه پساب  $(\Phi=۱۸۰)$  (شکل ۷-ب) را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل (۷)، با افزایش سرعت جریان محیط مقدار  $Z$  کاهش می‌یابد. که این موضوع به دلیل نیروی وارده از طرف جریان محیط به جت است. هنگامیکه سرعت جت بیشتر از سرعت جریان محیط باشد  $(U_j > U_0)$  جت درون محیط سیال به حرکت خود ادامه می‌دهد. اما هنگامی که سرعت سیال محیط بیشتر از سرعت جت شود جریان محیط مانع از حرکت جت می‌شود جت توسط جریان محیط منحرف می‌شود. به همین دلیل با افزایش سرعت جریان محیط، مقدار ارتفاع صعود حداکثر جت کاهش می‌یابد. باتوجه به شکل (۷)، مقدار  $Z$  در جریان غیرهم‌راستا کمتر از مقدار  $Z$  در جریان هم‌راستا است که این موضوع به دلیل بیشتر بودن نیروی وارده به جت در جریان غیرهم‌راستا نسبت به جریان هم‌راستا است. مدل‌های  $RNG$ ،  $VISJET$  و  $CORJET$  مقدار ارتفاع صعود حداکثر در جریان هم‌راستا را به ترتیب با  $۱۰/۱۲$ ،  $۲۶/۴۵$  و  $۱۸/۳$  درصد خطا نسبت به مطالعه Roberts و Toms (۱۹۸۷) کمتر تخمین زدند. مدل‌ها ارتفاع صعود حداکثر جت در جریان غیرهم‌راستا را به خوبی و با اختلاف بسیار کمی پیش‌بینی کردند. مدل‌های  $RNG$  و  $CORJET$  با خطای تقریباً ۵ درصد، و مدل  $VISJET$  نیز با خطای ۱۲ درصد مقدار  $Z$  را برآورد کردند.



(الف)



(ب)

شکل ۷- مقدار ارتفاع صعود حداکثر جت در محیط پویا. الف) جریان هم‌راستا  $(\Phi=0)$ . ب) جریان غیرهم‌راستا  $(\Phi=۱۸۰)$ .

#### ۲- رقیق‌سازی در محل ارتفاع صعود حداکثر جت

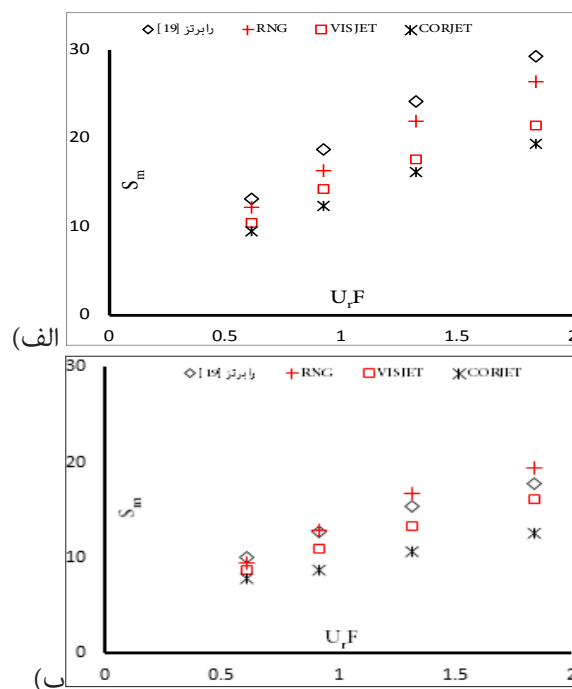
شکل (۸) میزان رقیق‌سازی پساب در محل ارتفاع صعود حداکثر جت را در سرعت‌های محیطی مختلف نشان می‌دهد. پساب

### ۳- رقیق‌سازی پساب در محل برخورد به زمین

در این قسمت به بررسی تأثیر جریان محیطی هم‌راستا (شکل ۸-الف) و غیرهم‌راستا (شکل ۹-ب) با جهت تخلیه پساب، بر میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین پرداخته می‌شود. باتوجه به شکل (۹) نتایج هر سه مدل همخوانی خوبی با مطالعه‌های تجربی دارند. با افزایش سرعت جریان محیط، میزان رقیق‌سازی به صورت خطی افزایش می‌یابد. در محیط ساکن بعد از کاهش سرعت جت ( $F > 1$ ) و تبدیل پساب از حالت جت به پلوم، پساب تنها به واسطه شار شناوری به سمت بستر محیط (دریا) سقوط می‌کند (Jiang و همکاران، ۲۰۲۱). اما در محیط پویا (هم‌راستا و غیرهم‌راستا) پلوم علاوه بر حرکت به سمت بستر محیط پذیرنده که به دلیل شار شناوری اتفاق می‌افتد، مسیری را هم به واسطه حرکت سیال محیط پذیرنده در جهت افقی طی می‌کند (به دلیل نیروی وارده از طرف سیال محیط بر پلوم) (Roberts و Toms، ۱۹۸۷). در این حالت با افزایش سرعت سیال محیط، میزان مسافت افقی طی شده پلوم نیز افزایش می‌یابد. همچنین در محیط پویا (هم‌راستا و غیرهم‌راستا) جریان سیال محیط باعث ایجاد آشفتگی در محیط می‌شود. آشفتگی جریان و افزایش طول مسیر حرکت پساب در محیط پذیرنده باعث اختلاط بیشتر پساب با سیال محیط و در نتیجه افزایش میزان رقیق‌سازی می‌شود (Choi و همکاران، ۲۰۱۶). به همین دلیل با افزایش سرعت سیال محیط در حالت هم‌راستا و غیر هم‌راستا، رقیق‌سازی در محل برخورد پساب به زمین افزایش می‌یابد. باتوجه به شکل (۹-ب) میزان رقیق‌سازی پساب در محیط غیرهم‌راستا نسبت به حالت هم‌راستا کمتر است. باتوجه به شکل (۷)، مقدار  $Z$  برای تخلیه پساب در حالت غیرهم‌راستا ( $\Phi = 180$ ) نسبت به جریان هم‌راستا کمتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت طول مسیر حرکت پساب در حالت غیرهم‌راستا در مقایسه با محیط هم‌راستا کاهش پیدا می‌کند. این موضوع باعث کاهش هم‌آوری سیال محیط پذیرنده به درون جت (رقیق‌سازی) می‌شود (Tofghian و همکاران، ۲۰۲۲).

مدل‌های RNG، VISJET و CORJET میزان رقیق‌سازی پساب تخلیه شده در محیط هم‌راستا را در مقایسه با مطالعه تجربی Roberts و Toms (۱۹۸۷) به ترتیب با ۶، ۸ و ۵ در مقایسه با نتایج مطالعه Choi و همکاران (۲۰۱۶) به ترتیب با ۲۰/۱۵، ۲۶/۷ و ۲۲/۳ درصد خطا پیش‌بینی می‌کنند. در محیط غیرهم‌راستا نیز مدل‌های RNG، VISJET و CORJET میزان رقیق‌سازی را در مقایسه با نتایج مطالعه‌های تجربی (Roberts و Toms، ۱۹۸۷؛ Choi و همکاران، ۲۰۱۶) به ترتیب با ۸ تا ۱۱، ۲۹ تا ۳۱ و ۱۹ تا ۲۱ درصد خطا تخمین می‌زنند.

به صورت مستغرق مایل در محیط پویا و در حالت جریان هم‌راستا (شکل ۸-الف) و غیرهم‌راستا (شکل ۸-ب) تخلیه می‌شود. باتوجه به شکل (۸)، مقدار  $S_m$  با افزایش سرعت جریان محیط به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. آشفتگی جریان یکی از عوامل اصلی در افزایش میزان رقیق‌سازی پساب است. با افزایش سرعت سیال محیط، آشفتگی جریان و در نتیجه میزان اختلاط و هم‌آوری سیال به درون جت افزایش می‌یابد. باتوجه به شکل (۸)، مقدار  $S_m$  در جریان هم‌راستا بیشتر از جریان غیرهم‌راستا است. نیروی وارده به جت (از طرف سیال محیط) در محیط غیرهم‌راستا بیشتر از محیط هم‌راستا است. هرچه نیروی وارده به جت افزایش یابد طول مسیر حرکت جت در محیط آبی کاهش می‌یابد که این موضوع باعث کاهش میزان هم‌آوری سیال به درون جت و در نتیجه کاهش میزان رقیق‌سازی می‌شود. باتوجه به شکل (۸)، مدل‌های عددی مقدار  $S_m$  را کمتر تخمین می‌زنند. مدل CORJET مقدار  $S_m$  در جریان هم‌راستا و غیر هم‌راستا را به ترتیب با ۳۲/۲ و ۲۹/۴۹ درصد خطا پیش‌بینی کرد. مدل VISJET نیز مقدار  $S_m$  را در محیط هم‌راستا و غیرهم‌راستا به ترتیب با ۲۴/۷ و ۱۵/۱ درصد خطا نسبت به مطالعه تجربی Roberts و Toms (۱۹۸۷) کمتر تخمین زد. اما مدل آشفتگی RNG نسبت به دو مدل دیگر نتایج دقیق‌تری را ارائه کرد. مدل RNG مقدار رقیق‌سازی در محل ارتفاع صعود حداکثر جت را در محیط پویا (هم‌راستا و غیرهم‌راستا) با ۸ تا ۱۰ درصد خطا برآورد کرد.



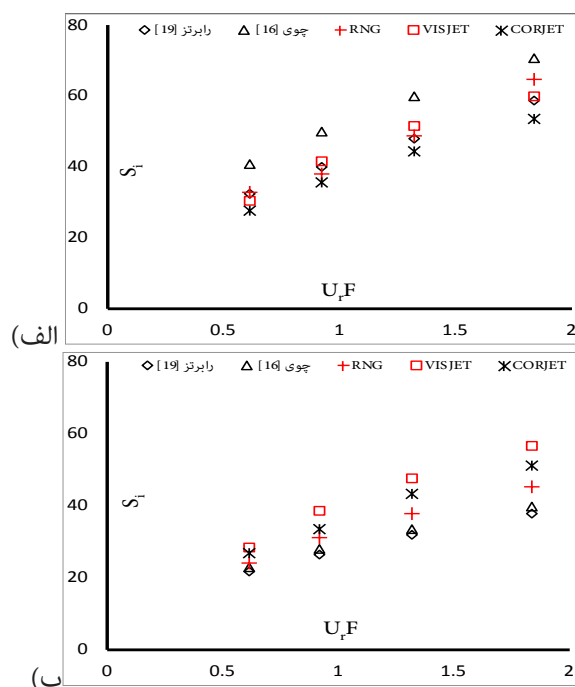
شکل ۸- رقیق‌سازی پساب در محل ارتفاع صعود حداکثر جت در محیط پویا. الف) جریان هم‌راستا ( $\Phi = 0$ ). ب) جریان غیرهم‌راستا ( $\Phi = 180$ ).



RNG و CORJET، در جریان هم‌راستا را به ترتیب با  $10/12$ ،  $26/45$  و  $18/3$  درصد خطا، و در جریان غیرهم‌راستا نیز هر سه مدل با اختلاف نزدیک به هم  $5$  تا  $12$  درصد نسبت به مطالعه تجربی، مقدار ارتفاع صعود حداکثر جت را پیش‌بینی کردند. مدل‌های RNG، VISJET و CORJET مقدار  $S_m$  در محیط پویا (هم‌راستا و غیرهم‌راستا) را به ترتیب با حداکثر  $32/2$ ،  $24/7$  و  $10$  درصد خطا نسبت به مطالعه تجربی تخمین زدند. میزان رقیق‌سازی در محل برخورد پساب به زمین در حالت جریان هم‌راستا به خوبی و با خطای  $5$  تا  $26$  درصد توسط هر سه مدل پیش‌بینی شد. اما در محیط غیرهم‌راستا، مدل‌های انتگرالی مقدار  $S_i$  را در مقایسه با مدل آشفتگی RNG با خطای بالایی تخمین زدند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت مدل آشفتگی RNG در مقایسه با مدل‌های انتگرالی VISJET و CORJET نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد اما زمان و هزینه محاسباتی بالایی نسبت به مدل‌های انتگرالی دارد. اما در مقابل، مدل‌های انتگرالی کاربرپسند بوده و مدل‌سازی در آنها به راحتی و در زمان کوتاهی انجام می‌شود و نتایج قابل قبولی را نیز ارائه می‌دهند.

#### منابع

- بابایی‌نژاد، و. و خورسندی، ب. ۱۴۰۰. اعتبارسنجی مدل‌های CORMIX و CorJet برای تخلیه پساب چگال از تخلیه کننده چند مجرای با زاویه تخلیه  $60$  درجه. نشریه علمی- پژوهشی هیدرولیک، ۱۶(۲): ۱۳-۱. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2021.258266.1491>
- Abessi O. and Roberts P.J. 2016. Dense jet discharges in shallow water. Journal of Hydraulic Engineering, 142(1): 04015033. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001057](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001057)
- Cheung S.K.B., Leung D.Y.L., Wang W., Lee J.H.W. and Cheung V. 2000, June. VISJET-a computer ocean outfall modelling system. In Proceedings Computer Graphics International, 21: 75-80. <https://doi.org/10.1109/CGI.2000.852322>
- Choi K.W., Lai C.C. and Lee J.H. 2016. Mixing in the intermediate field of dense jets in cross currents. Journal of Hydraulic Engineering, 142(1): 04015041. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001060](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001060)
- Cipollina A., Brucato A., Grisafi F. and Nicosia S. 2005. Bench-scale investigation of inclined dense jets. Journal of Hydraulic Engineering, 131(11): 1017-1022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:11\(1017\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:11(1017))



شکل ۹- میزان رقیق‌سازی پساب در محل برخورد به زمین در محیط پویا. الف) جریان هم‌راستا ( $\varphi = 0$ ). ب) جریان غیرهم‌راستا ( $\varphi = 180$ ).

#### نتیجه‌گیری

در این تحقیق به اعتبارسنجی مدل‌های CORJET، VISJET و RNG ( $k-\epsilon$ ) برای تخلیه پساب چگال (به صورت جت مستغرق مایل با زاویه تخلیه  $60$  درجه نسبت به افق) در محیط آبی ساکن و پویا پرداخته شد. برای این منظور، نتایج مربوط به میزان رقیق‌سازی و دیگر پارامترهای مربوط به رفتار پساب شور تخلیه شده در محیط آبی ساکن و پویا، با نتایج مطالعه‌های آزمایشگاهی مختلف مقایسه شد. طبق نتایج هر سه مدل در محیط ساکن مقادیر مربوط به میزان رقیق‌سازی، فاصله افقی محل پساب از نازل و ارتفاع صعود حداکثر جت را در مقایسه با نتایج مدل‌های آزمایشگاهی اکثراً کمتر برآورد می‌کنند. مدل‌های CORJET و VISJET پارامترهای مربوط به طول مسیر حرکت پساب چگال تخلیه شده در محیط آبی را با خطای قابل قبولی پیش‌بینی می‌کنند اما میزان رقیق‌سازی را با خطای بالایی برآورد می‌کنند. اما مدل RNG میزان رقیق‌سازی و دیگر پارامترهای مربوط به تخلیه پساب چگال را به خوبی تخمین می‌زند که این موضوع می‌تواند به دلیل در نظر گرفتن آشفتگی جریان توسط مدل RNG باشد. هر سه مدل روند سرعت محوری جت را به خوبی تخمین می‌زنند که در این بین عملکرد مدل RNG مناسب‌تر بود.

میزان رقیق‌سازی برای تخلیه پساب در حالت هم‌راستا ( $\varphi = 0$ ) بیشتر از حالت غیرهم‌راستا ( $\varphi = 180$ ) بود که این موضوع به خوبی توسط هر سه مدل پیش‌بینی شد. مدل‌های VISJET

- Ramezani M., Abessi O. and Firoozjaee A.R. 2021. Effect of proximity to bed on 30° and 45° inclined dense jets: a numerical study. *Environmental Processes*, 8(3): 1141-1164. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001032](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001032)
- Roberts P.J. and Toms G. 1987. Inclined dense jets in flowing current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(3): 323-340. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1987\)113:3\(323\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1987)113:3(323))
- Saeidi Hossieni S.A.R., Mohammadian A., Roberts P.J. and Abessi O. 2022. Numerical Study on the Effect of Port Orientation on Multiple Inclined Dense Jets. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5): 590. <https://doi.org/10.3390/jmse10050590>. <https://doi.org/10.3390/jmse10050590>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10652-010-9171-2>
- Shrivastava I. and Adams E.E. 2019. Pre-dilution of desalination reject brine: Impact on outfall dilution in different water depths. *Journal of Hydro-Environment Research*, 24: 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2018.09.001>
- Tofighian H., Aghajanzpour A., Abessi O. and Ramezani M. 2022. Simulation of inclined dense jets in stagnant environments: an LES and experimental study. *Environmental Fluid Mechanics*, 22(5): 1161-1185. <https://doi.org/10.1007/s10652-022-09884-z>
- Wang X. and Mohammadian A. 2022. May. Numerical Simulations of 15-Degree Inclined Dense Jets in Stagnate Water Over a Sloped Bottom. In *Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2021: CSCE21 General Track Volume 2*. Singapore: Springer Nature Singapore. doi: [10.1007/978-981-19-0507-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0507-0_7)
- Yan X. and Mohammadian A. 2019. Numerical modeling of multiple inclined dense jets discharged from moderately spaced ports. *Water*, 11(10): 2077. <https://doi.org/10.3390/w11102077>
- Jiang M., Law A.W.K. and Song J., 2019. Mixing characteristics of inclined dense jets with different nozzle geometries. *Journal of Hydro-environment Research*, 27: 116-128. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2019.10.003>
- Jiang M., Chen W. and Law A.W.K. 2021. Mixing characteristics of 45° inclined duckbill dense jets in co-flowing currents. *Journal of Hydro-environment Research*, 36: 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.03.006>
- Doneker R.L., and Jirka G.H. 2001. CORMIX-GI systems for mixing zone analysis of brine wastewater disposal. *Desalination*, 139(1-3): 263-274.
- Kikkert G.A., Davidson M.J. and Nokes R.I. 2007. Inclined negatively buoyant discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(5): 545-554. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00318-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00318-6)
- Lai C.C. and Lee J.H. 2012. Mixing of inclined dense jets in stationary ambient. *Journal of hydro-environment research*, 6(1): 9-28. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2011.08.003>
- Loya-Fernández Á., Ferrero-Vicente L.M., Marco-Méndez C., Martínez-García E., Vallejo J.J.Z. and Sánchez-Lizaso J.L. 2018. Quantifying the efficiency of a mono-port diffuser in the dispersion of brine discharges. *Desalination*, 431: 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.014>
- Malcangio D. and Petrillo A.F. 2010. Modeling of brine outfall at the planning stage of desalination plants. *Desalination*, 254(1-3): 114-125. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.12.005>
- Meng G. and Wenxin H. 2016. Numerical simulation of a round buoyant jet in a counterflow. *Procedia Engineering*, 154: 943-950. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.520>
- Papakonstantis I.G., Christodoulou G.C. and Papanicolaou P.N. 2011. Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements. *Journal of Hydraulic Research*, 49(1): 13-22. <https://doi.org/10.1080/00221686.2010.542617>
- Ramakanth A., Davidson M.J. and Nokes R.I. 2022. Laboratory study to quantify lower boundary influences on desalination discharges. *Desalination*, 529: 115641. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115641>