

تأثیر هندسه‌ی نازل در رفتار پساب شور تخلیه شده به صورت مستغرق مایل با زاویه‌ی 60°

وحید بابایی‌نژاد (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی هندی عمران - آب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

بابک خورسندی* (دانشیار)

دانشکده‌ی هندی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف (پهار ۲۰۲۰) (۱۴۰۲)
دری ۲ - ۳۹، شماره ۱، ص. ۴۹-۵۷ (پژوهشی)

کارخانه‌های آب شیرین‌کن، پساب به‌جای مانده از شیرین‌سازی آب را مستقیماً به دریا تخلیه می‌کنند، که بسیار شورتر از آب دریاست و باعث تخریب محیط‌زیست می‌شود. استفاده از تخلیه‌کننده‌های مناسب، یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای کاهش آثار زیست‌محیطی پساب‌های مذکور است. بیشتر مطالعات انجام شده در این زمینه مربوط به تخلیه‌ی پساب چگال از نازل دایره‌یی است. در پژوهش حاضر، برای اولین بار با استفاده از مدل آشفستگی $k-\varepsilon$ (RNG) به شبیه‌سازی پساب چگال تخلیه شده از نازل‌های دایره، مثلث و لوزی پرداخته شده است. پساب به‌صورت مستغرق مایل و با زاویه‌ی تخلیه‌ی 60° درجه نسبت به افق در محیط‌آبی ساکن و پویا تخلیه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، هر چه پساب به‌صورت صفحه‌یی از نازل خارج شود، ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت و فاصله‌ی افقی نقطه‌ی برخورد پساب به زمین کاهش و در مقابل میزان رقیق‌سازی پساب افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد میزان پخش در لبه‌ی داخلی جت به دلیل وجود بستر و اثر کواندا، کمتر از میزان پخش در لبه‌ی خارجی جت است.

واژگان کلیدی: آب شیرین‌کن، جت، پساب، پلوم، رقیق‌سازی.

vahidbabaiynejad2@gmail.com

b.khorsandi@aut.ac.ir

۱. مقدمه

با سیال محیط پذیرنده مخلوط شود.^[۱] استفاده از تخلیه‌کننده‌های مستغرق مایل، که پساب را به‌صورت جت تخلیه می‌کنند، مناسب‌ترین روش برای تخلیه‌ی پساب چگال است.^[۲] طبق شکل ۱، پساب تخلیه شده در دو مرحله با سیال محیط پذیرنده مخلوط می‌شود. در مرحله‌ی اول، پساب به شکل جت از نازل خارج می‌شود. میزان اختلاط پساب با سیال محیط پذیرنده در مرحله‌ی اول به عواملی مانند شار مومتوم و عدد فرود (F) جت خروجی و همچنین زاویه‌ی نازل نسبت به افق بستگی دارد. جت خروجی باعث هماوری سیال محیط به درون جت می‌شود، که این مسئله باعث کاهش غلظت و شار مومتوم جت خروجی می‌شود. مرحله‌ی دوم، هنگامی آغاز می‌شود که شار مومتوم جت کاهش قابل توجهی می‌یابد و در مقایسه با شار شناوری می‌توان از مقدار آن صرف‌نظر کرد. در این حالت پساب از حالت جت به پلوم تبدیل می‌شود (چنانچه $F > 1$ باشد، جریان به شکل جت خواهد بود و اگر $F < 1$ باشد، جریان به شکل پلوم خواهد بود). با توجه به این‌که چگالی پساب نسبت به چگالی سیال محیط پذیرنده بیشتر است، پساب در حالت پلوم به واسطه‌ی شار شناوری به سمت کف دریا حرکت می‌کند. در این حالت، تماس

احداث کارخانه‌های آب شیرین‌کن در مناطق ساحلی که با مشکل کمبود آب مواجه هستند، به سرعت در حال افزایش است. کارخانه‌های آب شیرین‌کن به دلیل حجم بالای آب دریاها و اقیانوس‌ها، به‌عنوان یک منبع نامحدود آب شیرین شناخته می‌شوند. کارخانه‌های آب شیرین‌کن، درکنار فوایدی که برای بشر دارند، باعث آسیب زدن به محیط زیست نیز می‌شوند. معمولاً، پساب کارخانه‌های آب شیرین‌کن از طریق خروجی‌های تک‌پورتی (مستغرق یا سطحی) یا چند پورتی به دریا بازگردانده می‌شوند. چنین پساب‌هایی ممکن است به منبع اصلی آلودگی دریایی تبدیل شوند، زیرا حاوی نمک با غلظت بالا و همچنین مواد شیمیایی گوناگون هستند.^[۱] به همین دلیل استفاده از تخلیه‌کننده‌های مناسب برای افزایش میزان رقیق‌سازی پساب‌های ذکر شده ضروری است. برای کاهش آثار مخرب پساب‌های شور تولیدی، تخلیه‌ی آن‌ها باید به‌گونه‌یی انجام شود که پساب بعد از تخلیه در فاصله‌ی زمانی کوتاهی

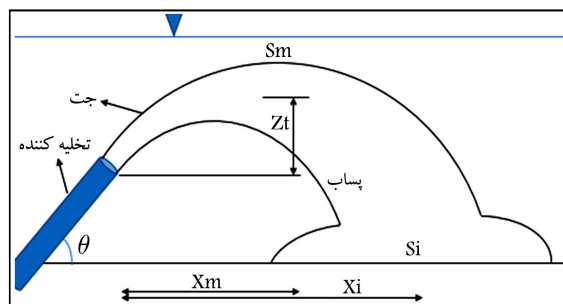
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳/۶/۱۴۰۱، اصلاحیه ۱۴/۸/۱۴۰۱، پذیرش ۱۴/۸/۱۴۰۱.

DOI:10.24200/J30.2022.61005.3137

استناد به این مقاله:

بابایی‌نژاد، وحید و خورسندی، بابک (۱۴۰۲). «تأثیر هندسه‌ی نازل در رفتار پساب شور تخلیه شده به‌صورت مستغرق مایل با زاویه‌ی 60° »، مهندسی عمران شریف، (۱) ۲-۳۹، ص. ۴۹-۵۷



شکل ۱. مشخصات پساب تخلیه شده به صورت مستغرق مایل در حالت جت و پلوم. پلوم با سیال محیط پذیرنده باعث کاهش غلظت پساب می‌شود.^[۴] هر چه زاویه نازل نسبت به افق بیشتر باشد، ارتفاع سقوط پلوم بیشتر می‌شود؛ که این موضوع باعث اختلاط بیشتر پساب با سیال محیط پذیرنده و در نتیجه کاهش غلظت پساب می‌شود.^[۵] میزان رقیق‌شدگی پساب (S) (در اثر اختلاط با محیط آبی) در هر نقطه‌ی پایین دست تخلیه به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

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

که در آن، C_o غلظت پساب قبل از تخلیه، C_a غلظت سیال محیط پذیرنده و C میزان غلظت در نقطه‌ی مورد نظر است.

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در دینامیک و اختلاط جریان تخلیه شده، عدد فرود (F) جت خروجی است. عدد فرود جریان چگال به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود:

$$F = \frac{U_j}{\sqrt{Dg'}} \quad (2)$$

که در آن، U_j سرعت جریان خروجی، D قطر نازل تخلیه و g' شتاب گرانش اصلاح شده است و به صورت رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:

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

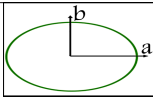
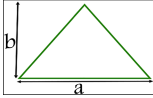
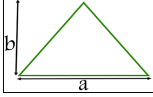
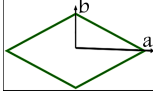
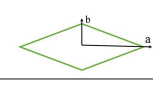
که در آن، ρ_o چگالی اولیه‌ی پساب، ρ_a چگالی محیط و g شتاب گرانش است. و در شکل ۱ X_m فاصله‌ی افقی محل ارتفاع بیشینه‌ی صعود جت از نازل، X_i فاصله‌ی افقی نقطه‌ی برخورد پساب به زمین از نازل، S_m رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت، S_i میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین و θ زاویه‌ی نازل نسبت به افق است.

استفاده از تخلیه‌کننده‌های مناسب برای تخلیه‌ی پساب شور باعث کاهش خسارت‌های وارده به محیط زیست می‌شود. در همین راستا، مطالعه‌های زیادی برای یافتن بهینه‌ترین حالت‌های تخلیه‌ی پساب چگال صورت گرفته است. زیتون^۱ و همکاران (۱۹۷۱)، بهینه‌ترین روش‌های تخلیه‌ی پساب چگال را بررسی کردند و برای یافتن مناسب‌ترین روش تخلیه‌ی پساب چگال، نازل‌هایی با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به افق را بررسی کردند و دریافتند که زاویه‌ی تخلیه‌ی ۶۰ درجه، بیشترین میزان رقیق‌سازی را دارد.^[۶] در همین زمینه، پژوهش‌گران بسیاری در مطالعه‌های خود، زاویه‌ی ۶۰ درجه را مناسب‌ترین زاویه برای تخلیه‌ی پساب با شناوری منفی در محیط ساکن معرفی کرده‌اند.^[۷-۱۰، ۱۲] رابرتز^۲ و همکاران (۱۹۸۷)، به بررسی تأثیر جریان محیط در میزان رقیق‌سازی پساب تخلیه شده با زاویه‌های مختلف پرداختند و دریافتند که پساب تخلیه شده با زاویه‌ی ۹۰ درجه، بیشترین میزان رقیق‌سازی را دارد.^[۱۱] جوی^۳ و همکاران (۲۰۱۶)، به صورت

عددی و تجربی به بررسی رفتار پساب چگال تخلیه شده از نازل دایره‌ی در محیط پویا پرداختند و دریافتند که جریان محیط باعث افزایش مقدار X_i ، کاهش Z_t و افزایش میزان رقیق‌سازی می‌شود. همچنین ایشان نشان دادند نتایج مدل انتگرالی VISJET، مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد.^[۱۳] عباسی^۴ و رابرتز (۲۰۱۴ و ۲۰۱۵)، مطالعات خود را روی رقیق‌سازی پساب شور چگال تخلیه شده از دیفیوژرهای چندپورتی با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۶۰ درجه در محیط ساکن و پویا انجام دادند. آن‌ها مهم‌ترین عامل در طراحی دیفیوژرهای چندپورتی را فاصله‌ی دهانه‌های خروجی از هم دانستند. طبق نتایج ایشان، در صورتی که جت‌ها با هم ادغام شوند، مقدار Z_t ، X_i و S_i در محیط ساکن و پویا کاهش می‌یابد.^[۱۲، ۱۱] فرناندز^۵ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۷] به بررسی استفاده از دیفیوژر در تخلیه‌ی پساب شور و اثر آن در میزان رقیق‌سازی پساب شور پرداختند و با استفاده از مدل CORMIX،^[۱۳] نشان دادند که استفاده از دیفیوژر برای تخلیه‌ی پساب شور حاصل از کارخانه‌های آب شیرین‌کن، آثار زیست‌محیطی پساب شور را به شدت کاهش می‌دهد. یان^۶ و محمدیان (۲۰۱۹)، با استفاده از مدل‌های $(k - \epsilon)$ Standard و $(k - \epsilon)$ RNG به شبیه‌سازی تخلیه‌ی پساب چگال با استفاده از نازل‌های چندپورتی پرداختند و دریافتند که مدل‌های عددی، قابلیت خوبی در شبیه‌سازی تخلیه‌کننده‌های چندپورتی دارند. همچنین مدل $(k - \epsilon)$ RNG عملکرد بهتری در مقایسه با مدل $(k - \epsilon)$ Standard دارد.^[۱۴] رضایی و همکاران (۲۰۲۱)، با استفاده از مدل این فوم، به بررسی تأثیر فاصله‌ی دهانه‌ی نازل (با زاویه‌های تخلیه‌ی ۳۰ و ۴۵ درجه) از بستر دریا پرداختند و دریافتند که نزدیکی دهانه‌ی نازل به بستر دریا، تأثیر محسوسی در رفتار پساب تخلیه شده از نازل با زاویه‌ی ۴۵ درجه ندارد. اما برای پساب تخلیه شده از نازل با زاویه‌ی ۳۰ درجه، هنگامی که مقدار پارامتر y_o/L_M (ارتفاع نازل از سطح زمین، L_M مقیاس طولی جت به پلوم) به کمتر از ۰/۱۴ می‌رسد، مقدار رقیق‌سازی کاهش می‌یابد.^[۱۵] جیانگ^۷ و همکاران، تأثیر هندسه‌ی نازل در رفتار پساب چگال تخلیه شده از نازل با زاویه‌ی ۴۵ درجه را بررسی و نتایج مربوط به نازل با هندسه‌های دایره، مربع، لوزی، منقار اردکی و ستاره را با یکدیگر مقایسه کردند. طبق نتایج ایشان، تخلیه‌ی پساب با نازل‌های منقار اردکی و ستاره‌یی، میزان رقیق‌سازی را نسبت به نازل دایره‌یی به میزان ۱۵٪ افزایش داد. همچنین استفاده از نازل‌های مربع و لوزی، میزان رقیق‌سازی را در مقایسه با نازل دایره‌یی به مقدار قابل ملاحظه‌یی کاهش داده است. همچنین ایشان نشان دادند که تخلیه‌ی پساب با استفاده از نازل منقار اردکی در حالت جریان هم‌راستا با جت، میزان رقیق‌سازی را نسبت به نازل با دهانه‌ی دایره‌یی افزایش می‌دهد.^[۱۶، ۱۷]

امروزه بیشتر کارخانه‌های آب شیرین‌کن، پساب چگال خود را با استفاده از نازل دایره‌یی تخلیه می‌کنند. هندسه‌ی نازل، یکی از عوامل تأثیرگذار در میزان رقیق‌سازی پساب چگال تخلیه شده به صورت مستغرق مایل است.^[۱۷، ۱۶] در زمینه‌ی تخلیه‌ی پساب چگال، مطالعات بسیاری انجام شده و بیشتر آن‌ها مربوط به تخلیه‌ی پساب با استفاده از نازل دایره‌یی بوده است. با توجه به این‌که مطالعات بسیار کمی در مورد تأثیر هندسه‌ی نازل برای تخلیه‌ی پساب چگال انجام شده است، در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار ANSYS FLUENT به بررسی تأثیر هندسه‌ی نازل در مقدار رقیق‌سازی و مشخصات پساب چگال تخلیه شده در محیط آبی (ساکن و پویا) پرداخته شده است. برای این منظور، تخلیه‌ی پساب از نازل با هندسه‌های دایره، مثلث و لوزی در شرایط یکسان مدل‌سازی و مقادیر S_i/F ، S_m/F ، $Z_t/F.De$ ، $X_i/F.De$ برای هر کدام از نازل‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به نازل‌ها.

نازل	هندسه‌ی نازل	ابعاد نازل (mm)	قطر معادل نازل (mm)	مساحت (mm)
دایره		$a = 10$ $b = 10$	۲۰	۳۱۴
مثلث ۱		$a = 23/32$ $b = 26/936$	۲۰	۳۱۴
مثلث ۲		$a = 50$ $b = 12/56$	۲۰	۳۱۴
لوزی ۱		$a = 12/53$ $b = 12/53$	۲۰	۳۱۴
لوزی ۲		$a = 25/06$ $b = 6/265$	۲۰	۳۱۴

۲. مواد و روش‌ها

FLUENT، یک نرم‌افزار مهندسی در زمینه‌ی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است، که توانایی مدل کردن پدیده‌های مربوط به جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه‌های پیچیده را دارد. نرم‌افزار FLUENT از روش حجم محدود در حل مسائل مختلف استفاده می‌کند و امکان ریز یا درشت کردن شبکه‌ی محاسباتی را در نزدیکی مرزها و یا مکان‌هایی که دارای گرادیان‌های شدید هستند فراهم می‌سازد تا مدل مسائل را با دقت بالاتری محاسبه کند.^[۱۸]

در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از نرم‌افزار FLUENT به شبیه‌سازی تخلیه‌ی پساب شور از نازل‌های مستغرق مایل پرداخته شده است. مدل‌سازی مذکور با استفاده از اختلاط دوفازی (آب و روغن با چگالی بالاتر از آب) انجام شده است. همچنین با توجه به نتایج مطالعه‌ی منگ و ونزین^[۱۹]، (۲۰۱۶)، از مدل آشفتگی (RNG) $k - \epsilon$ برای شبیه‌سازی استفاده شده است. مقدار k (انرژی جنبشی آشفتگی) و ϵ (نرخ استهلاك) به ترتیب از روابط ۳ و ۴ به دست می‌آیند:

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

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

که در آن‌ها، $\mu_{t,m}$ لزجت آشفتگی و $G_{k,m}$ انرژی سینماتیک آشفتگی هستند. همچنین مقدار $C_{1\epsilon}^*$ مطابق رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

$$C_{1\epsilon}^* = C_{1\epsilon} - \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^2} \quad (6)$$

مقدار ثابت‌های معادلات با توجه به نتایج مطالعه‌ی منگ و ونزین^[۱۹]، (۲۰۱۶)، عبارت‌اند: $C_{1\epsilon} = 1/44$ ، $C_{2\epsilon} = 1/68$ ، $\eta_0 = 4/377$ ، $\beta = 0/12$ و $\sigma_\epsilon = 1$.

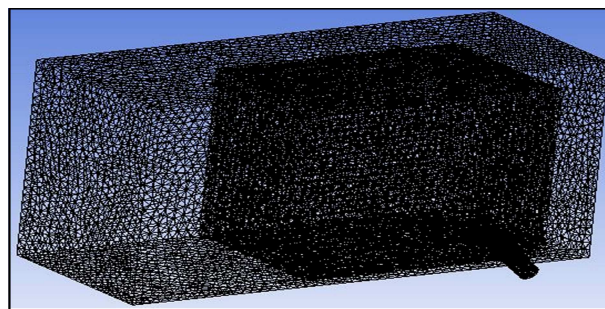
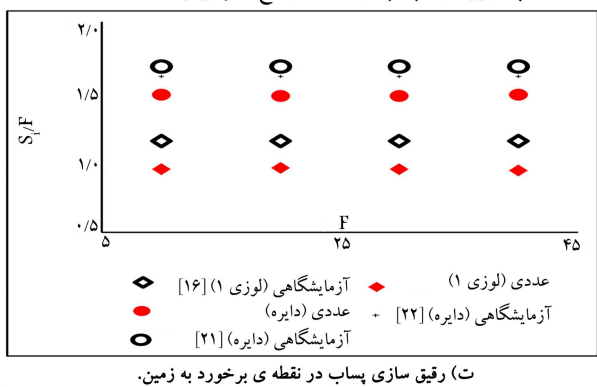
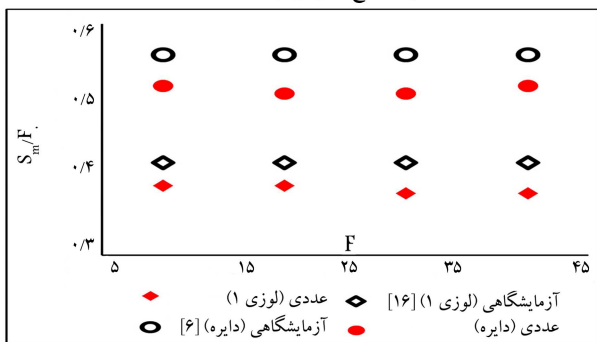
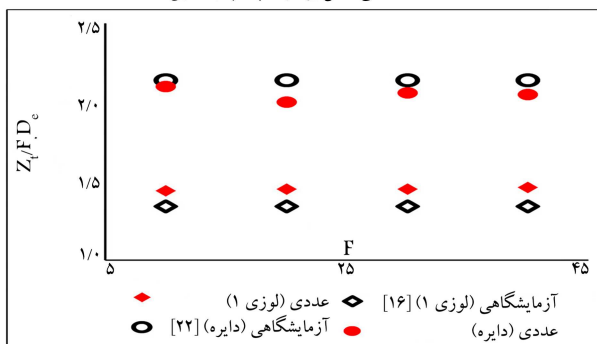
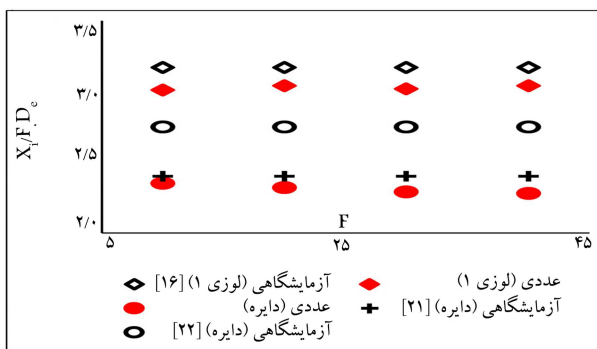
۱.۲. مدل‌سازی

در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار FLUENT به بررسی تأثیر هندسه‌ی نازل در مشخصات پساب چگال تخلیه شده (S_i, S_m, X_i, X_m) پرداخته شده است. پساب با غلظت بالای نمک به صورت مستغرق مایل و با زاویه‌ی تخلیه‌ی 60° در یک محیط آبی ساکن و پویا (هم‌راستا)، از نازل‌هایی با هندسه‌ی دایره، مثلث، و لوزی تخلیه شده است. همه‌ی نازل‌ها دارای سطح مقطع یکسان $(A = 314 \text{ mm}^2)$ و با قطر معادل $2 (D_e)$ سانتی‌متر بوده‌اند. D_e به عنوان قطر دایره‌ی برابر با مساحت یک ناحیه‌ی غیردایره‌ی تعریف می‌شود. اطلاعات مربوط به نازل‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار عدد فرود خروجی پساب در محیط ساکن برابر 10° ، 20° ، 30° و 40° در محیط پویا برابر 20° در نظر گرفته شده است. در محیط پویا، سرعت محیطی متغیر $(0/374 \text{ m/s} < U_a < 0/6 \text{ m/s})$ معادل $(1/87 < U_r F < 0/3 < U_r/U_j)$ بوده است. با توجه به این‌که در پساب حاصل از کارخانه‌های آب شیرین‌کن (به روش اسمز معکوس)، دمای پساب تغییر قابل توجهی نمی‌کند،^[۲۰] اختلاف دمای پساب و سیال محیط پذیرنده برای ساده‌سازی (همانند بیشتر مطالعات موجود در این زمینه) یکسان فرض شده است. اطلاعات اولیه‌ی ورودی به نرم‌افزار در جدول ۲ ارائه شده است.

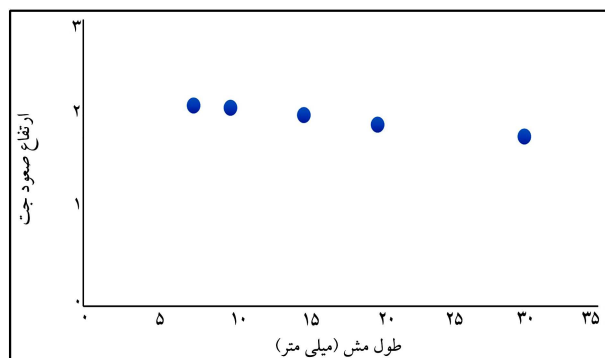
برای شبیه‌سازی، ابتدا هندسه‌ی مدل طراحی و سپس مش‌زنی مطابق شکل ۲ صورت گرفته است. همچنین در شکل ۳، تأثیر اندازه‌ی مش‌ها در مقدار ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت تخلیه شده از نازل دایره‌ی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با کاهش ابعاد مش (R) از 10 میلی‌متر به $7/5$ میلی‌متر، نتایج ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت تغییر چندانی نکرده و به همین دلیل ابعاد مش برابر $8/5$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با افزایش فاصله از محل تخلیه، طول مش‌ها نیز افزایش یافته است. برای دهانه‌ی نازل از شرط مرزی Velocity inlet، برای بستر محل تخلیه به دلیل عدم لغزش میان آب و دیواره از شرط مرزی no slip، و برای دیواره‌های اطراف محل تخلیه از شرط مرزی symmetry استفاده شده است. برای شبیه‌سازی مدل آشفتگی (RNG) $k - \epsilon$ انتخاب و برای ثابت‌های مدل منتخب از پیش فرض‌های نرم‌افزار

جدول ۲. اطلاعات ورودی به نرم افزار.

$D_e (mm)$	$U_a (m/s)$	F	$\theta (^\circ)$	$\rho_o (kg/m^3)$	$\rho_a (kg/m^3)$
۲۰	۰/۰۶	۲۰	۶۰	۱۰۳۲	۹۹۸٫۲
	۰/۱۴		۱۰		
	۰/۲۵		۲۰		
	۰/۳۷		۳۰		
۲۰	۰	۲۰	۶۰	۱۰۳۲	۹۹۸٫۲
			۳۰		
			۲۰		
			۴۰		



شکل ۲. شماتیک مش بندی دامنه ی محاسباتی.



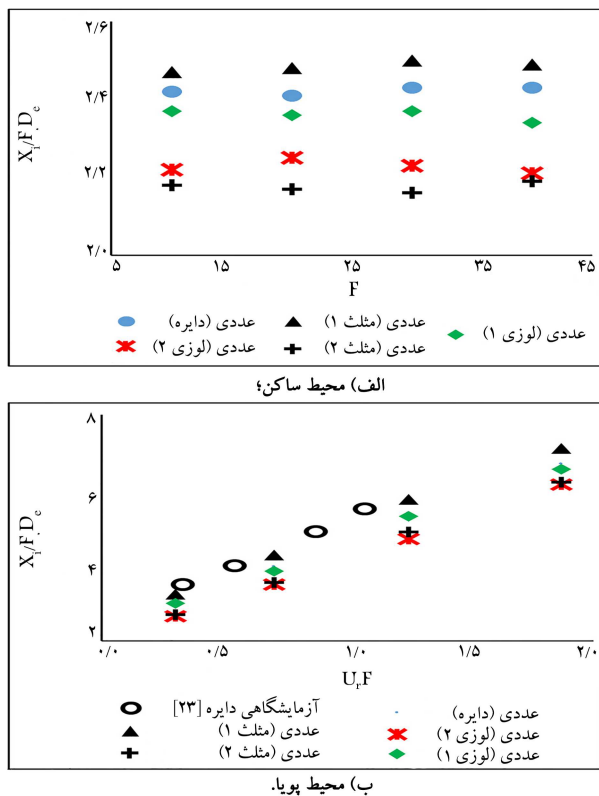
استفاده شده است. برای به دست آوردن گام زمانی مناسب، نتایج به دست آمده از گام زمانی ۰/۰۰۳۵ و ۰/۰۰۲ ثانیه برای تخلیه ی پساب با عدد فرود ثابت تطابق بسیار نزدیکی با یکدیگر دارند و برای دقت بیشتر، گام زمانی ۰/۰۰۲ ثانیه انتخاب شده است. زمان شبیه سازی در ابتدا ۲۰ ثانیه انتخاب و مشاهده شد که نتایج مدل، با نتایج مطالعه ی آزمایشگاهی اختلاف بالایی دارد. با افزایش زمان شبیه سازی، نتایج مدل به نتایج مطالعه های آزمایشگاهی نزدیک تر شده است. برای زمان های بیشتر از ۸۰ ثانیه، نتایج مدل تغییر قابل توجهی نکرد؛ به همین دلیل مدت زمان شبیه سازی ۱۰۰ ثانیه انتخاب شد، تا اطمینان حاصل شود که جریان کاملاً توسعه یافته است.

شکل ۴. مقایسه ی نتایج مشخصات پساب چگال تخلیه شده در محیط ساکن FLUENT با مطالعات تجربی [۲۱، ۱۶، ۶].

با نتایج مطالعات آزمایشگاهی پژوهشگران مختلف مقایسه شده است. در شکل ۴، مقدار پارامتر بدون بعد $X_i/F.D_e$ (شکل ۴ - الف)، $Z_t/F.D_e$ (شکل ۴ - ب)، S_m/F (شکل ۴ - پ) و S_i/F (شکل ۴ - ت) به دست آمده از نرم افزار FLUENT برای تخلیه ی پساب چگال به صورت مستغرق مایل (زاویه ی

۳. اعتبارسنجی مدل

در بخش حاضر، برای راستی آزمایی مدل، نتایج به دست آمده از طریق FLUENT



شکل ۵. فاصله‌ی افقی نقطه‌ی برخورد پساب به زمین از دهانه‌ی نازل.

مثلت ۲ و لوزی ۲، کمترین مقدار را داشته است. استفاده از نازل‌های با مقطع مثلث ۲ و لوزی ۲ (در محیط ساکن و پویا)، باعث کاهش مقدار $X_i/F.D_e$ نسبت به نازل‌های با مقطع مثلث ۱، لوزی ۱ و دایره شده است. در این مورد می‌توان گفت هر چه پساب به صورت صفحه‌یی^{۱۰} از نازل خارج شود، باعث هم‌آوری بیشتر سیال محیط به درون جت می‌شود. افزایش هم‌آوری سیال محیط به درون جت، باعث کاهش مقدار سرعت جت می‌شود و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مسیر افقی طی شده توسط جت کاهش می‌یابد. پساب تخلیه شده با نازل‌های مثلث ۱، لوزی ۱ و دایره، باعث انتقال پساب به نقاط دور از ساحل می‌شود (مسیر افقی بیشتری را طی می‌کند)، که این موضوع از لحاظ زیست‌محیطی توصیه شده است.^[۲۴] بنابراین، از لحاظ زیست‌محیطی، تخلیه‌ی پساب با نازل‌های دایره، لوزی ۱ و مثلث ۱ نسبت به نازل‌های لوزی ۲ و مثلث ۲ (که پساب را به صورت صفحه‌یی تخلیه می‌کنند)، مناسب‌تر است.

۲.۴. ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت ($Z_t/F.D_e$)

در شکل ۶، مقدار پارامتر بدون بُعد $Z_t/F.D_e$ برای پساب چگال تخلیه شده از نازل مستغرق مایل با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۶۰ درجه مشاهده می‌شود. پساب با استفاده از نازل با شکل دایره، مثلث و لوزی در محیط ساکن (شکل ۶ - الف) و پویا (شکل ۶ - ب) تخلیه شده است. در محیط ساکن، مقدار $Z_t/F.D_e$ برای پساب تخلیه شده از نازل‌های مثلث ۱ و لوزی ۲ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار بوده است. در محیط ساکن، مقدار $Z_t/F.D_e$ برای نازل‌ها با هندسه‌ی مثلث ۱، دایره، لوزی ۱، مثلث ۲ و لوزی ۲ به ترتیب برابر ۲/۲، ۲/۱، ۲/۰۳، ۱/۹۱ و ۱/۸۳ بوده است. با توجه به شکل ۵ - ب، مدل RNG مقدار ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت را

جدول ۳. مقدار انحراف معیار نتایج مدل RNG در مقایسه با نتایج تجربی.

مطالعه‌ی تجربی	S_i/F	S_m/F	$Z_t/F.D_e$	$X_i/F.D_e$
جیانگ (لوزی) ^[۱۶]	۰/۰۴۴	۰/۰۲	۰/۰۶۳	۰/۰۸۸
رابرتز (دایره) ^[۲۱]	۰/۰۷۲	-	-	۰/۰۶۵
پاکنتیس (دایره) ^[۲۲]	۰/۱۱	-	۰/۰۶	۰/۲۲
زیتون (دایره) ^[۶]	-	۰/۰۲۸	-	-

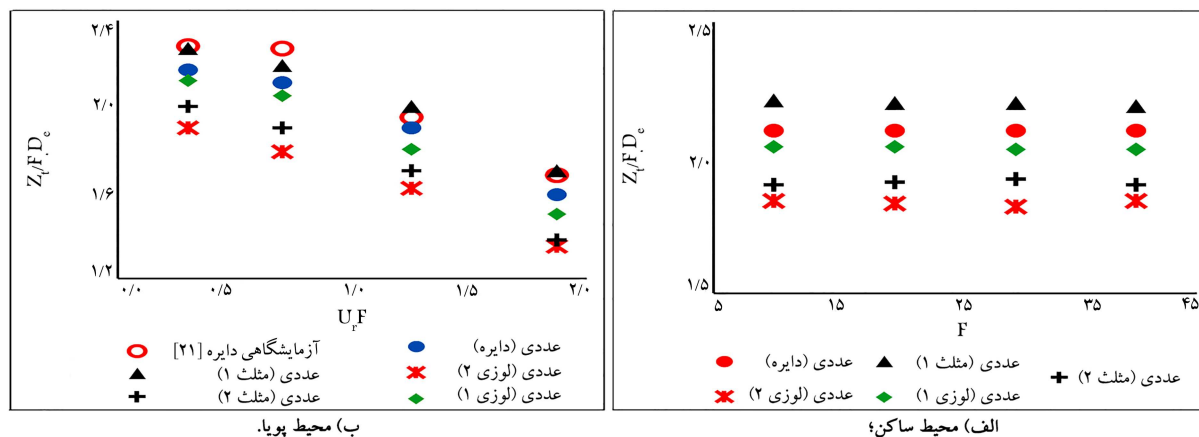
تخلیه‌ی ۶۰ درجه برای تخلیه‌ی پساب با نازل دایره و زاویه‌ی تخلیه‌ی ۴۵ درجه برای تخلیه‌ی پساب با نازل لوزی در محیط ساکن برای اعداد فرود مختلف ارائه شده است. نتایج FLUENT مطابقت خوبی با نتایج مطالعه‌ی تجربی داشته و برای تخلیه‌ی پساب با نازل لوزی، نیز مقدار S_m/F ، $Z_t/F.D_e$ ، $X_i/F.D_e$ و S_i/F را در مقایسه با نتایج تجربی،^[۱۶] به ترتیب با انحرافی در حدود ۷/۳، ۶/۹، ۹/۷ و ۱۰/۴ درصد دست پایین تخمین زده است. همچنین FLUENT مقادیر S_i/F ، S_m/F ، $Z_t/F.D_e$ ، $X_i/F.D_e$ را برای تخلیه‌ی پساب با زاویه‌ی ۶۰ درجه با مقطع دایره به ترتیب با انحرافی در حدود ۶/۳، ۵، ۹/۴ و ۱۱ درصد خطا نسبت به مطالعه‌ی تجربی،^[۱۶] پیش‌بینی کرده است. مقدار انحراف معیار بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.

۴. یافته‌ها و بحث

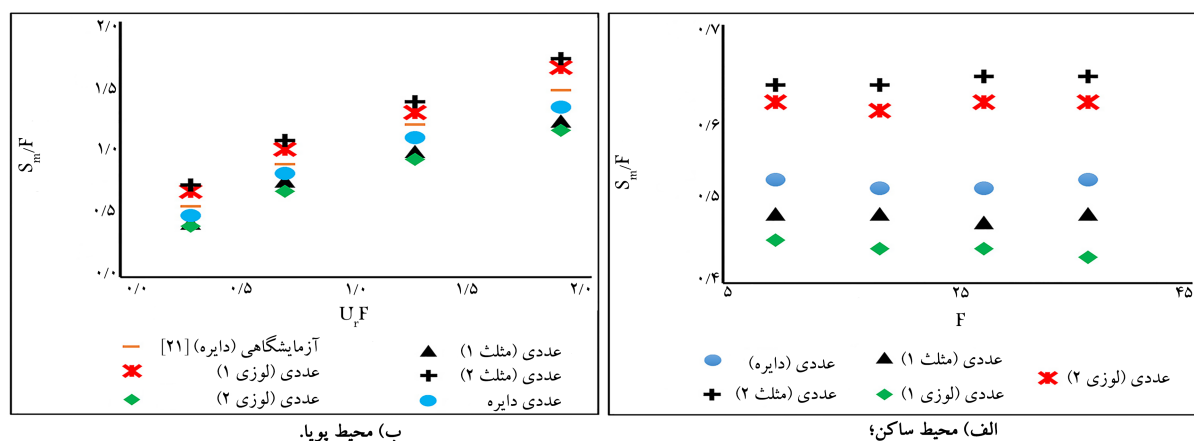
در بخش کنونی، به ارائه‌ی نتایج مدل FLUENT در تخمین تأثیر هندسه‌ی نازل در میزان رقیق‌سازی و تراکتوری پساب چگال تخلیه شده از نازل مستغرق مایل در محیط ساکن و پویا (جریان هم‌راستا) پرداخته شده است.

۱.۴. فاصله‌ی افقی محل برخورد پساب به زمین از نازل (X_i)

در شکل ۵، مقدار پارامتر $X_i/F.D_e$ برای تخلیه‌ی پساب در محیط ساکن (شکل ۵ - الف) و پویا (شکل ۵ - ب) مشاهده می‌شود. پساب به صورت مستغرق مایل با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۶۰ درجه از نازل با هندسه‌های مختلف (دایره، مثلث ۱، مثلث ۲، لوزی ۱ و لوزی ۲) تخلیه شده است. با توجه به شکل ۵ - الف، مقدار $X_i/F.D_e$ برای پساب تخلیه شده از نازل‌های مثلث ۱ و مثلث ۲ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار را در اعداد فرود مختلف داشته است. در محیط پویا (شکل ۵ - ب)، با افزایش $U_r F$ مقدار $X_i/F.D_e$ برای همه‌ی نازل‌ها به صورت خطی افزایش یافته و همچنین نتایج مدل تطابق نسبتاً خوبی با نتایج مطالعه‌ی تجربی جوی و همکاران (۲۰۱۶)،^[۲۴] داشته و مقدار خطای میانگین مجذور مربعات^۹ برای نازل دایره‌یی، ۰/۱۳ بوده است. مطابق شکل ۵، مقدار $X_i/F.D_e$ برای پساب تخلیه شده (با همه‌ی مقاطع در محیط پویا بیشتر از $X_i/F.D_e$ در محیط ساکن بوده است. جریان محیط باعث افزایش طول مسیر حرکت پساب می‌شود. هنگامی که سرعت جت به صفر برسد، پساب از حالت جت به پلوم تبدیل می‌شود. حرکت پساب چگال در حالت پلوم به واسطه‌ی شار شناوری و به سمت بستر محیط پذیرنده صورت می‌گیرد. در صورت وجود جریان محیط، پساب (پلوم)، علاوه بر حرکت به سمت بستر (به دلیل شار شناوری)، مسافتی را هم توسط جریان محیط به صورت افقی منتقل می‌شود. بنابراین، هر چقدر سرعت جریان محیط افزایش پیدا کند، مقدار مسافت طی شده‌ی پساب در حالت جت و پلوم افزایش می‌یابد. در محیط پویا نیز همانند محیط ساکن، مقدار $X_i/F.D_e$ برای نازل با مقطع مثلث ۱، بیشترین و برای نازل‌های با هندسه‌ی



شکل ۶. ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت.



شکل ۷. رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت.

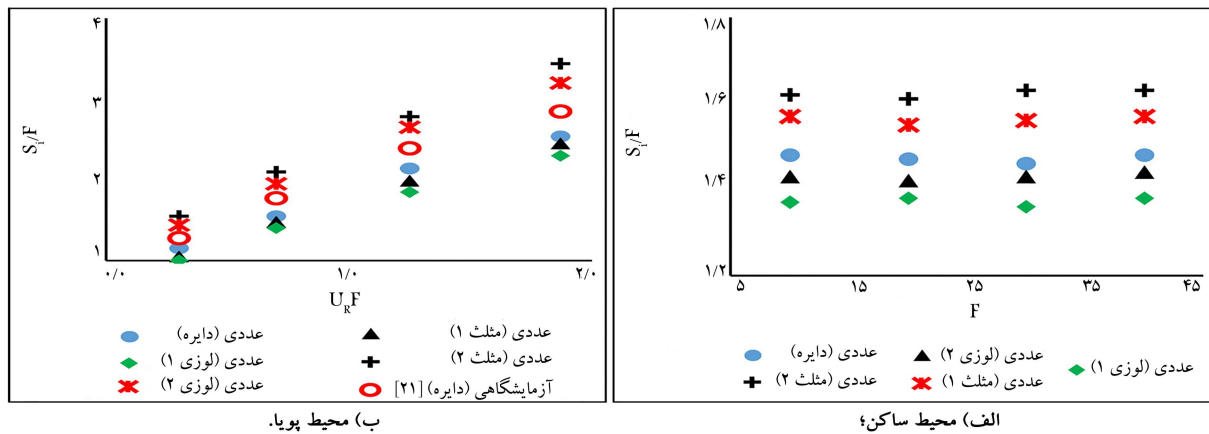
۳.۴. رقیق‌سازی در محل ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت (S_m/F)

در شکل ۷، مقدار بدون بُعد رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت برای نازل با هندسه‌های مختلف مشاهده می‌شود. نتایج مربوط به تخلیه‌ی پساب چگال تخلیه شده به صورت مستغرق مایل با زاویه‌ی تخلیه‌ی 60° درجه در محیط ساکن (شکل ۷ - الف) و پویا (شکل ۷ - ب) است.

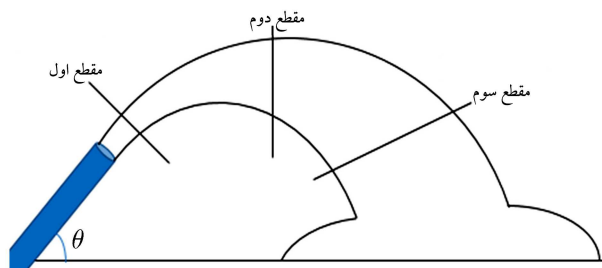
در محیط ساکن، مقدار S_m/F برای تخلیه‌ی پساب با نازل‌های مثلث ۱ ($S_m/F = 0.48$) لوزی ۱ ($S_m/F = 0.45$) و دایره ($S_m/F = 0.52$) کمترین مقدار و برای نازل‌های مثلث ۲ ($S_m/F = 0.63$) و لوزی ۲ ($S_m/F = 0.61$) بیشترین مقدار را داشته است. تخلیه‌ی پساب با جت صفحه‌یی، تماس بدنه‌ی جت با سیال محیط را افزایش می‌دهد و بنابراین سیال محیط بیشتر به درون جت نفوذ می‌کند و غلظت جت را بیشتر کاهش می‌دهد. به همین دلیل، مقدار S_m/F برای نازل‌های مثلث ۲ و لوزی ۲ بیشتر از نازل‌های دیگر بوده است.

در محیط پویا، مقدار S_m/F برای همه‌ی نازل‌ها به صورت تقریباً خطی افزایش یافته و نتایج مدل مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی رابترز و تامز (۱۹۸۷)، [۲۱] داشته و مقدار خطای میانگین مجذور مربعات برای میزان S_m نازل دایره‌یی، 0.12 بوده است. با توجه به شکل ۷، مقدار S_m/F در محیط پویا بیشتر از محیط ساکن بوده و با افزایش سرعت جریان محیط، مقدار S_m/F به صورت خطی افزایش یافته است. دینامیک و اختلاط پساب تخلیه شده در محیط آبی، متأثر از عوامل مختلفی

به خوبی ($RMSE = 0.11$) در مقایسه با نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی رابترز و تامز (۱۹۸۷)، [۲۱] برآورد می‌کند. در محیط پویا، با افزایش سرعت جریان محیط، مقدار $Z_t/F.D_e$ برای همه‌ی نازل‌ها به صورت تقریباً خطی کاهش یافته است. هنگامی که سرعت جت به کمتر از سرعت جریان محیط برسد، جت توسط جریان محیط کاملاً از مسیر خود منحرف می‌شود و در جهت جریان محیط حرکت می‌کند و به همین دلیل، هر چه سرعت محیط افزایش پیدا می‌کند، جت زودتر از مسیر خود منحرف می‌شود. در واقع، می‌توان گفت با افزایش سرعت جریان محیط، نیروی وارد بر بدنه‌ی جت افزایش می‌یابد و هنگامی که سرعت جت برابر سرعت سیال محیط شود، نیروی وارد از طرف جریان محیط مانع از حرکت قائم جت (Z_t) می‌شود و مقدار Z_t کاهش می‌یابد. در محیط پویا، مقدار $Z_t/F.D_e$ برای نازل‌های لوزی ۲ و مثلث ۲ (که به صورت صفحه‌یی از نازل تخلیه می‌شوند)، کمتر از مقدار $Z_t/F.D_e$ برای نازل‌های مثلث ۱، دایره و لوزی است. هر چه جت به صورت صفحه‌یی از نازل خارج شود، نیروی وارد از طرف سیال به جت بیشتر می‌شود و سیال محیط تأثیر زیادی در سرعت جت تخلیه شده می‌گذارد. به همین دلیل، ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت برای نازل‌های مثلث ۱، لوزی ۱ و دایره بیشتر از نازل‌های مثلث ۲ و لوزی ۲ بوده است. با کاهش ارتفاع صعود جت می‌توان پساب را در عمق کمتری تخلیه کرد. تخلیه‌ی پساب در عمق زیاد دریا باعث افزایش هزینه‌ی ساخت و نگهداری نازل می‌شود. بنابراین استفاده از نازل‌های لوزی ۲ و مثلث ۲ در مقایسه با نازل‌های مثلث ۱، لوزی ۱ و دایره، صرفه‌ی اقتصادی دارد.



شکل ۸. رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین.



شکل ۹. شماتیک مقاطع عرضی جت در نقاط مختلف.

مقدار رقیق‌سازی پساب نسبت به محیط ساکن افزایش می‌یابد. [۲۴] با توجه به نتایج، استفاده از تخلیه‌کننده‌های مستغرق مایل، که پساب را به صورت جت صفحه‌یی تخلیه می‌کنند، میزان رقیق‌سازی را به مقدار قابل توجهی (نسبت به نازل دایره‌یی) افزایش می‌دهند و مناسب‌ترین روش برای تخلیه‌ی پساب چگال است.

۵.۴. غلظت در مقاطع عرضی جت

در بخش کنونی، به بررسی تغییرات غلظت در مقاطع عرضی مختلف جت پرداخته شده است. مقاطع عرضی به گونه‌یی انتخاب شده‌اند که مقطع اول در محلی واقع شود که رفتار جریان، جت مانند است؛ یعنی، جایی که مومنتم بر شار شناوری غالب است. مقطع دوم، در محل ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت و مقطع سوم نیز در محلی انتخاب شده‌اند که پساب، رفتار پلوم مانند دارد (مطابق شکل ۹).

در شکل ۱۰، پروفیل‌های عرضی غلظت در سه مقطع بر حسب فاصله‌ی شعاعی از خط مرکزی جت برای عدد فرود ۲۰ ترسیم شده است. C_c مقدار غلظت در مرکز جت، C غلظت در نقطه‌ی مورد نظر، r فاصله‌ی شعاعی از مرکز جت و b_c محلی است که: $C = C_c = \frac{1}{2}$.

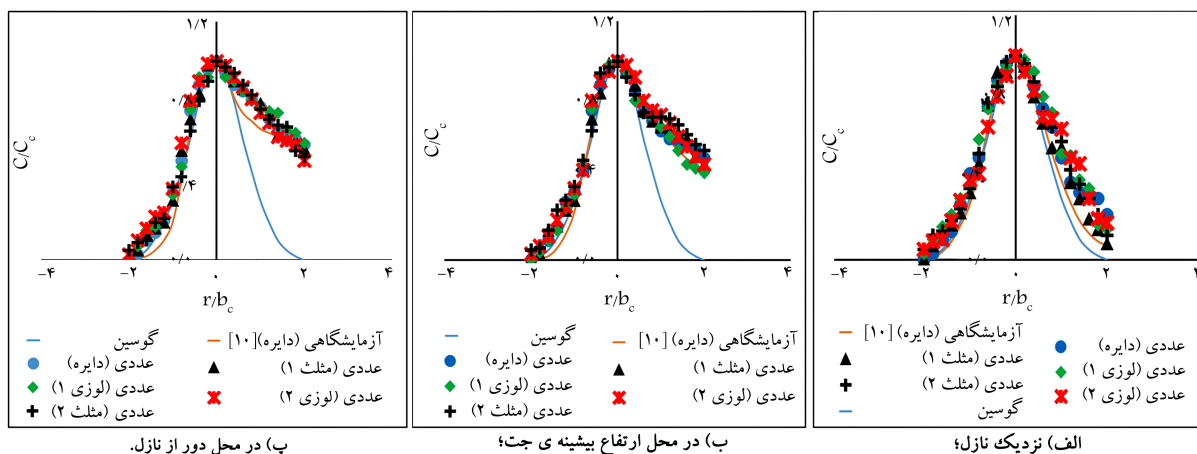
در شکل اخیر، سمت چپ نمودار مربوط به قسمت خارجی جت (نزدیک سطح آب) و سمت راست نمودار مربوط به قسمت داخلی جت (نزدیک بستر) است. رفتار پروفیل‌های عرضی غلظت با توجه به ناحیه‌ی آن متفاوت است. با توجه به شکل ۱۰ الف، در مقطع اول (نزدیک به محل تخلیه)، پروفیل‌های غلظت در لبه‌های داخلی و خارجی جت، اختلاف کمی با هم دارند و هر دو نزدیک پروفیل گاوسی هستند. اما در مقاطع دوم (شکل ۱۰ ب) و سوم (شکل ۱۰ پ)، رفتار جت در لبه‌ی خارجی همانند مقطع اول، نزدیک به پروفیل گاوسی است؛ در حالی که لبه‌ی داخلی به دلیل محدودیت شار شناوری از پروفیل گاوسی فاصله گرفته است. طبق

است که جریان محیط، یکی از مهم‌ترین آن‌هاست و رفتار پساب تخلیه شده در محیط ساکن، متفاوت از محیط پویاست. [۲۱] مقدار S_m/F برای نازل لوزی ۲ به ترتیب ۲۰ و ۳۱ درصد بیشتر از نازل‌های دایره و لوزی ۱ بوده است. همچنین مقدار S_m/F پساب تخلیه شده از نازل مثلث ۲ به ترتیب ۲۵ و ۲۹ درصد بیشتر از نازل‌های دایره و مثلث ۱ بوده است.

۴.۴. رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین (S_i)

در بخش حاضر، به بررسی تأثیر هندسه‌ی نازل در میزان رقیق‌سازی پساب چگال در نقطه‌ی برخورد به زمین پرداخته شده است. نتایج برای پساب چگال تخلیه شده از نازل‌هایی با هندسه‌ی دایره، مثلث ۱، مثلث ۲، لوزی ۱ و لوزی ۲ با زاویه‌ی تخلیه‌ی ۶۰ درجه در محیط ساکن (شکل ۸ - الف) و پویا (شکل ۸ - ب) در شکل ۸ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، میزان رقیق‌سازی در هر دو محیط ساکن و پویا، برای نازل مثلث ۲ بیشترین مقدار و برای نازل لوزی ۱، کمترین مقدار را داشته است. مقدار S_i/F در محیط ساکن برای نازل‌های مثلث ۱، لوزی ۱ و دایره به ترتیب برابر ۱/۴۲، ۱/۳۸ و ۱/۴۷ و برای نازل‌های لوزی ۲ و مثلث ۲ به ترتیب برابر ۱/۶۳ و ۱/۵۷ بوده است.

با توجه به شکل ۸، میزان رقیق‌سازی برای همه‌ی نازل‌ها در محیط پویا بیشتر از میزان رقیق‌سازی در محیط ساکن بوده است. با افزایش سرعت جریان محیط، میزان رقیق‌سازی در محیط پویا در تمام نازل‌ها به صورت تقریباً خطی افزایش یافته است. نتایج مدل برای تخلیه‌ی پساب با زاویه‌ی ۶۰ درجه، همخوانی خوبی ($RMSE = 0.21$) با مطالعه‌ی رابرتز و تامز (۱۹۸۷)، [۲۱] داشته است. در محیط پویا، مقدار رقیق‌سازی پساب تخلیه شده از نازل‌های لوزی ۲ و مثلث ۲ به ترتیب ۲۱ و ۲۶/۵ درصد بیشتر از نازل دایره‌یی بوده است. همچنین در محیط پویا، مقدار S_i/F پساب تخلیه شده از نازل مثلث ۲، ۲۹٪ بیشتر از نازل مثلث ۱ و مقدار S_i/F در نازل لوزی ۲ نیز ۲۸٪ بیشتر از مقدار S_i/F در نازل لوزی ۱ بوده است. در محیط پویا، پساب نسبت به محیط ساکن بیشتر تحت تأثیر رقیق‌سازی توسط جریان محیط قرار می‌گیرد. همان‌گونه که گفته شد، در محیط ساکن، پلوم فقط تحت تأثیر شار شناوری حرکت می‌کند؛ اما در محیط پویا، علاوه بر شار شناوری، پلوم تحت تأثیر جریان محیط نیز قرار می‌گیرد. بنابراین مسافت طی شده‌ی پساب در محیط پویا در مقایسه با محیط ساکن افزایش می‌یابد و به همین دلیل، میزان همآوری سیال محیط به درون جت (تماس پساب با سیال محیط) و در نتیجه



شکل ۱۰. پروفیل‌های بی‌بعد شده‌ی عرضی غلظت در مقایسه با نتایج مطالعه‌ی تجربی [۱۰].

هزینه و آثار زیست‌محیطی (افزایش میزان رقیق‌سازی)، استفاده از نازل با هندسه‌ی مثلث ۲ و لوزی ۲ به جای استفاده از نازل‌های دایره، لوزی ۱ و مثلث ۱ توصیه می‌شود. همچنین مزیت تخلیه‌ی پساب با نازل‌های دایره، لوزی ۱ و مثلث ۱ (در مقایسه با نازل‌های مثلث ۲ و لوزی ۲)، انتقال پساب به نقاط دور از ساحل است.

فهرست علائم

D : قطر نازل دایره‌یی؛
D_e : قطر معادل سطح دایره‌یی؛
U_a : سرعت جریان محیط؛
U_j : سرعت خروجی پساب از نازل؛
$U_r = U_a/U_j$: سرعت نسبی؛
S : میزان رقیق‌سازی؛
S_m : میزان رقیق‌سازی پساب در ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت؛
S_i : میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه‌ی برخورد به زمین؛
X_i : فاصله‌ی افقی نقطه‌ی برخورد پساب به زمین از نازل؛
Z_t : ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت از نازل؛
F : عدد فرود تخلیه؛
K : اثر جنبشی آشفتگی؛
ε : نرخ استهلاك؛
C : غلظت در نقطه‌ی موردنظر؛
C_c : غلظت در مرکز جت؛
C_o : غلظت اولیه‌ی پساب؛
C_a : غلظت محیط پذیرنده؛
r : فاصله‌ی شعاعی نقطه‌ی موردنظر از مرکز نازل؛
b_c : فاصله‌ی شعاعی که $C/C_c = 1/e$ ؛
R : طول مش؛
θ : زاویه‌ی دهانه‌ی نازل نسبت به افق (درجه)؛
ρ_a : چگالی محیط؛
ρ_o : چگالی پساب؛
A : مساحت نازل.

نتایج به دست آمده، میزان پخش در لبه‌ی خارجی جت نسبت به لبه‌ی داخلی آن بیشتر بوده است. این موضوع منجر به انحراف سریع‌تر پروفیل‌های غلظت در لبه‌ی داخلی در مقایسه با لبه‌ی خارجی نسبت به پروفیل گاوسی شده است. در لبه‌ی خارجی جت، هم‌آوری سیال محیطی به درون جت بدون هیچ محدودیتی رخ داده و به همین دلیل، رفتار جت همانند پروفیل گاوسی بوده است. اما در لبه‌ی داخلی جت با دور شدن از منبع تخلیه، به دلیل ناپایداری شار شناوری و همچنین وجود بستر و اثر کواندا، که مانع از هم‌آوری بیشتر سیال محیط به درون جت می‌شوند، نمودار از حالت گاوسی فاصله گرفته است. با توجه به نتایج مشخص شد که هندسه‌ی نازل، تأثیری در پروفیل بی‌بعد شده‌ی غلظت در مقطع عرضی جت ندارد.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار ANSYS FLUENT به بررسی تأثیر هندسه‌ی نازل در مقدار X_i ، Z_t ، S_m و S_i پرداخته شده است. با مقایسه‌ی نتایج مدل آشفتگی (RNG) $k - \varepsilon$ با نتایج مطالعه‌های تجربی مشخص شد که مدل (RNG) $k - \varepsilon$ ، توانایی بالایی در شبیه‌سازی رفتار پساب چگال تخلیه شده در محیط آبی دارد. هندسه‌ی نازل، عامل مهمی در تغییر دینامیک و اختلاط پساب چگال در میدان نزدیک است. در محیط‌های ساکن و پویا، نازل مثلث ۲ در مقایسه با دیگر نازل‌ها، بیشترین میزان S_m و S_i و کمترین میزان Z_t را داشته است. تخلیه‌ی پساب با استفاده از نازل‌های لوزی ۱ و مثلث ۱، میزان رقیق‌سازی را در مقایسه با نازل دایره کاهش داده است. همچنین تخلیه‌ی پساب با نازل مثلث ۲ مقدار S_m و S_i را در مقایسه با نازل دایره‌یی به ترتیب ۲۰ و ۱۰ درصد در محیط ساکن و ۲۵ و ۲۶٫۵ درصد در محیط پویا افزایش داده است. به این ترتیب می‌توان گفت تخلیه‌ی پساب شور با استفاده از نازل‌های صفحه‌یی باعث افزایش تعامل پساب با سیال محیط پذیرنده می‌شود و بنابراین، میزان رقیق‌سازی افزایش می‌یابد. استفاده از نازل‌های مثلث ۲ و لوزی ۲، باعث کاهش ارتفاع صعود بیشینه‌ی جت نسبت به نازل‌های دایره، لوزی ۱ و مثلث ۱ شده است. به همین دلیل، با استفاده از نازل‌های لوزی ۲ و مثلث ۲ به جای نازل‌های دایره، لوزی ۱ و مثلث ۱، می‌توان پساب را در عمق کمتری (نزدیک ساحل) تخلیه کرد، که این موضوع باعث کاهش هزینه‌ی تخلیه‌ی پساب (ساخت و نگهداری از تخلیه‌کننده) می‌شود. بنابراین برای کاهش

1. Zeitoun
2. Roberts
3. Choi
4. Abessi
5. Fernández
6. Yan
7. Jiang
8. Meng & Wenxin
9. RMSE
10. Plane Jet

منابع (References)

1. Papakonstantis, I.G. and Papanicolaou, P.N. "On the computational modeling of inclined brine discharges", *Fluids*, **7**(2:86), p. 14 (2022).
2. Alameddine, I. and El-Fadel, M. "Brine discharge from desalination plants: a modeling approach to an optimized outfall design", *Desalination*, **214**(1-3), pp. 241-260 (2007).
3. Yan, X. and Mohammadian, A. "Evolutionary modeling of inclined dense jets discharged from multiport diffusers", *Journal of Coastal Research*, **36**(2), pp. 362-371 (2020).
4. Bleninger, T. "Coupled 3D hydrodynamic models for submarine outfalls: environmental hydraulic design and control of multiport diffusers", PhD diss., Zugl. Karlsruhe Univ (2007).
5. Jiang, B., Law, A.W.-K. and Lee, J.H.-W. "Mixing of 30 and 45 inclined dense jets in shallow coastal waters", *Journal of Hydraulic Engineering*, **140**(3), pp. 241-253 (2014).
6. Zeitoun, M.A. and McIlhenny, W.F. "Conceptual designs of outfall systems for desalination plants", *In Off-shore Technology Conference, OnePetro* (1971).
7. Loya-Fernández, Á., Ferrero-Vicente, L.M., Marco-Méndez, C. and et al. "Quantifying the efficiency of a mono-port diffuser in the dispersion of brine discharges", *Desalination*, **431**, pp. 27-34 (2018).
8. Lai, Chris C.K. and Lee, J.H.-W. "Mixing of inclined dense jets in stationary ambient", *Journal of Hydro-Environment Research*, **6**(1), pp. 9-28 (2012).
9. Abessi, O. and Roberts, Ph.J.-W. "Dense jet discharges in shallow water", *Journal of Hydraulic Engineering*, **142**(1), p.04015033 (2016).
10. Abessi, O. and Roberts, Ph.J.-W. "Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments", *Journal of Hydraulic Engineering*, **141**(8), p.06015009 (2015).
11. Abessi, O. and Roberts, Ph.J.-W. "Multiport diffusers for dense discharges", *Journal of Hydraulic Engineering*, **140**(8), p.04014032 (2014).
12. Abessi, O. and Roberts, Ph.J.-W. "Multiport diffusers for dense discharge in flowing ambient water", *Journal of Hydraulic Engineering*, **143**(6), p.04017003 (2017).
13. Jirka, G.H., Doneker, R.L. and Hinton, S.W. "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).
14. Yan, X. and Mohammadian, A. "Numerical modeling of multiple inclined dense jets discharged from moderately spaced ports", *Water*, **11**(10), pp.159-171, 2077 (2019).
15. Ramezani, M., Abessi, O. and Rahmani Firoozjaee, A. "Effect of proximity to bed on 30° and 45° inclined dense jets: a numerical study", *Environmental Processes*, **8**(3), pp. 1141-1164 (2021).
16. Jiang, M., Law, A.W.-K. and Song, J. "Mixing characteristics of inclined dense jets with different nozzle geometries", *Journal of Hydro-Environment Research*, **27**, pp. 116-128 (2019).
17. Jiang, M., Chen, W. and Law, A.W.-K. "Mixing characteristics of 45° inclined duckbill dense jets in co-flowing currents", *Journal of Hydro-Environment Research*, **36**, pp. 77-86 (2021).
18. Ansys, Inc. "ANSYS Fluent User's Guide, Version 2019 R3", (2019).
19. Meng, G. and Wenxin, H. "Numerical simulation of a round buoyant jet in a counterflow", *Procedia Engineering*, **154**, pp. 943-950 (2016).
20. Palomar, P., Lara, J.L. and Losada, I.J. "Near field brine discharge modeling part 2: validation of commercial tools", *Desalination*, **290**, pp. 28-42 (2012).
21. Roberts, P.J.-W. and Toms, G. "Inclined dense jets in flowing current", *Journal of Hydraulic Engineering*, **113**(3), pp. 323-340 (1987).
22. Papakonstantis, I.G., Christodoulou, G.C. and Papanicolaou, P.N. "Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements", *Journal of Hydraulic Research*, **49**(1), pp. 13-22 (2011).
23. Choi, K.W., Lai, Ch.C.-K. and Lee, J.H.-W. "Mixing in the intermediate field of dense jets in cross currents", *Journal of Hydraulic Engineering*, **142**(1), 04015041 (2016).
24. Babaiynejad, V. and Khorsandi, B. "Influence of ambient flow on the behavior of dense effluent discharged into the water environment", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **53**(9), pp. 897-900 (In Persian) (1399/2020).