



تأثیر جریان محیط بر رفتار پساب چگال تخلیه شده در محیط آبی

وحید بابایی نژاد، بابک خورسندی*

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۲
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۱۶
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۰۶

کلمات کلیدی:

CorJet

رقیق سازی

جت

پلوم

محیط آبی

خلاصه: با توجه به محدودیت منابع طبیعی آب شیرین و افزایش جمعیت در دهه‌های گذشته، بشر برای پر کردن فاصله بین عرضه و تقاضا به احداث کارخانه‌های آب شیرین کن روی آورده است. مهم‌ترین مشکل زیست محیطی کارخانه‌های آب شیرین کن تولید پساب با غلظت بالای نمک است که این پساب‌ها به صورت مستقیم به محیط دریا تخلیه می‌شوند. عوامل مختلفی در میزان رقیق سازی پساب تخلیه شده تأثیرگذار است که یکی از مهم‌ترین این عوامل جریان محیط است. در این تحقیق با استفاده از مدل انتگرالی CorJet، به بررسی میزان تأثیرگذاری سرعت و جهت جریان محیط بر جهت و طول مسیر حرکت پساب در حالت جت و پلوم و میزان رقیق سازی پساب پرداخته می‌شود. جهت و مقدار سرعت جریان محیط پویا بر دینامیک، غلظت و اختلاط پساب تخلیه شده تأثیرگذار می‌باشد. بیشترین تأثیر جریان محیط بر رفتار پساب برای حالتی است که سرعت جریان محیط بیشتر از سرعت پساب باشد. در این صورت پساب به صورت کامل توسط جریان محیط از مسیر اصلی خود منحرف می‌شود. طبق نتایج، در تخلیه پساب چگال در محیط پویا هر چه زاویه تخلیه کننده نسبت به افق بیشتر باشد پساب مسافت بیشتری را در محیط پذیرنده طی می‌کند و به دنبال آن میزان رقیق سازی افزایش می‌یابد. در محیط پویا زاویه تخلیه ۹۰ درجه بهینه‌ترین حالت تخلیه پساب چگال است و بیشترین میزان رقیق سازی را دارد. از طرف دیگر، با افزایش زاویه بین جهت تخلیه پساب و جریان محیط ($0 < \phi < 180$)، طول مسیر حرکت پساب در حالت جت، فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین از تخلیه کننده و میزان رقیق سازی پساب در نقطه برخورد به زمین کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

کارخانه‌های آب شیرین کن، آسیب رساندن به اکوسیستم و آبریزان در هنگام آب‌گیری از دریا و یا هنگام تخلیه پساب با غلظت و دمای بالا به دریا است [۳]. پساب کارخانه‌های آب شیرین کن به دلیل شوری بالا نسبت به محیط پذیرنده، پس از تخلیه بلافاصله به سمت بستر محیط آبی حرکت می‌کند که این امر باعث افزایش غلظت محیط در نزدیکی محل تخلیه می‌شود. جهت کاهش اثرات زیست محیطی، پساب تخلیه شده باید در کمترین زمان و مکان با محیط پذیرنده مخلوط شود. در افزایش میزان اختلاط پساب با محیط پذیرنده عوامل مختلفی تأثیرگذار است که یکی از مهم‌ترین عوامل نحوه تخلیه پساب (تخلیه به صورت سطحی یا مستغرق) است [۴]. اغلب تخلیه کننده‌های مستغرق پساب را به صورت جت تخلیه می‌کنند. روش کار تخلیه کننده‌های مستغرق بر اساس اختلاط و هم‌آوری سیال محیط توسط جت آشفته می‌باشد. هم‌آوری سیال محیط به درون جت باعث افزایش شار جرمی و کاهش غلظت و سرعت جت می‌شود.

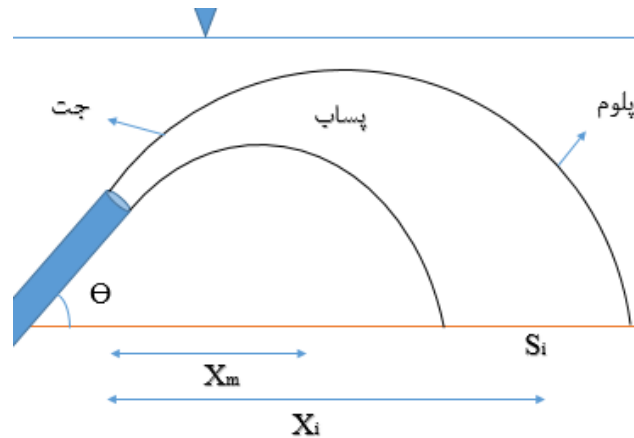
بسیاری از ساکنان مناطق خشک و نیمه‌خشک از کمبود آب رنج می‌برند و این مسئله محدودیت‌هایی را برای توسعه اقتصادی، صنعتی و کشاورزی به وجود آورده است. در صورتی که مقدار آب برداشتی از منابع طبیعی، بیشتر از مقدار آب تزریق شده به این منابع باشد، خسارات جبران ناپذیری به محیط زیست وارد شده و باعث افزایش بیابان‌زایی می‌شود [۱]. با توجه به اینکه منابع آب شیرین طبیعی رو به اتمام است و این حجم محدود آب پاسخگویی نیازهای بشر نیست انسان‌ها به شیرین کردن و استفاده از آب‌های اقیانوس‌ها و دریاها روی آورده‌اند. امروزه شیرین کردن آب دریاها و اقیانوس‌ها یکی از منابع اصلی تأمین آب انسان، مخصوصاً مردم ساحل نشین است، چرا که این آب از نظر حجم و کیفیت یک منبع مطمئن و قابل اعتماد است [۲]. شیرین کردن آب دریاها و اقیانوس‌ها در کنار فوایدی که دارد خساراتی هم به محیط زیست وارد می‌کند. مهم‌ترین خسارت ناشی از

1 entrainment

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: b.khorsandi@aut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.





شکل ۱. مشخصات پساب تخلیه شده به صورت مستغرق مایل در حالت جت و پلوم. X_m فاصله افقی محل ارتفاع ماکزیمم صعود جت از تخلیه کننده، X_i فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین از تخلیه کننده، S_i میزان رقیق سازی پساب در نقطه برخورد به زمین و θ زاویه تخلیه کننده نسبت به افق می باشد.

Fig. 1. Schematic of submerged discharges of dense effluent in jet and plume mode. X_m is the horizontal location of the centerline peak, X_i is the horizontal location of the impact point, S_i is the minimum centerline dilution at the impact point, and θ is the discharge angle relative to the horizon

پایین دست تخلیه، به شکل نسبت غلظت پساب قبل از خروج (ρ_0)، به غلظت پساب در مکان مورد نظر (ρ_i) است (رابطه ۱)

$$S = \frac{\rho_0}{\rho_i} \quad (1)$$

یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر دینامیک و اختلاط جریان تخلیه شده، عدد فرود (F) جریان خروجی است. چنانچه $F > 1$ باشد جریان به شکل جت خواهد بود و اگر $F < 1$ باشد جریان به شکل پلوم خواهد بود. عدد فرود جریان چگال به صورت رابطه ۲ تعریف می شود.

$$F = \frac{U}{\sqrt{Dg'_0}} \quad (2)$$

در رابطه بالا F عدد فرود جریان خروجی، U سرعت جریان خروجی، D قطر نازل تخلیه و g'_0 شتاب گرانش اصلاح شده می باشد. شتاب گرانش اصلاح شده به صورت رابطه ۳ تعریف می شود.

پساب تخلیه شده در محیط های آبی قبل از برخورد به زمین در دو مرحله اقدام به اختلاط با محیط پذیرنده می کند (شکل ۱). در مرحله اول رقیق سازی پساب تحت تاثیر مشخصات جت خروجی مانند شار مومنتم جت خروجی، عدد فرود و زاویه تخلیه کننده نسبت به افق قرار دارد. در این مرحله رفتار پساب به صورت جت است و همآوری سیال محیط به درون جت و اختلاط آن با سیال جت به علت آشفتگی جت صورت می پذیرد. در این مرحله رفتار پساب تخلیه شده به واسطه شار مومنتوم جت صورت می گیرد [۵]. مرحله دوم اختلاط، رقیق سازی پساب در حالت پلوم است. در این مرحله به دلیل کاسته شدن از سرعت جت، شار مومنتوم ناچیز بوده و پساب تخلیه شده از حالت جت به پلوم تبدیل می شود. در این مرحله نیروی شناوری پدیده غالب است و حرکت پساب به واسطه اختلاف چگالی بین پساب و محیط پذیرنده صورت می گیرد. در این حالت در صورتی که چگالی پساب بیشتر یا کمتر از چگالی محیط پذیرنده باشد حرکت پساب تخلیه شده به ترتیب به سمت پایین و بالای محیط آبی خواهد بود. هر چه ارتفاع سقوط یا صعود پساب در حالت پلوم بیشتر باشد تماس آن با محیط پذیرنده به مقدار بیشتری می رسد، در نتیجه رقیق سازی پساب افزایش می یابد. میزان اختلاط پساب با محیط آبی و رقیق شدگی (S) آن در هر نقطه

شده با زاویه ۳۵، ۵۰ و ۷۰ درجه بود [۱۳].

دینامیک و اختلاط پساب تخلیه شده در محیط‌های آبی متأثر از عوامل مختلفی است که جریان محیط یکی از مهم‌ترین این عوامل است. دینامیک و اختلاط پساب تخلیه شده در محیط ساکن، متفاوت از محیط پویا می‌باشد و نتایج به دست آمده برای تخلیه پساب در محیط ساکن قابل تعمیم به محیط پویا نمی‌باشد. زاویه بین جهت جریان محیط و جهت پساب تخلیه شده (ϕ)، می‌تواند بین صفر درجه (جریان همراستا^۱) تا ۱۸۰ درجه (جریان مخالف^۲) متغیر باشد. سرعت جریان محیط بر دینامیک و غلظت پساب تخلیه شده تاثیرگذار است و پساب در محیط پویا در سرعت‌های مختلف، رفتار متفاوتی خواهد داشت. اکثر مطالعات انجام شده در زمینه تخلیه پساب شور، برای محیط‌های آبی ساکن انجام شده است و مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام شده برای تخلیه پساب در محیط پویا بسیار محدود می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از مدل انتگرالی CorJet به بررسی تاثیر مقدار سرعت و جهت جریان محیط بر پارامترهای مختلف پساب چگال (شور) تخلیه شده (از تخلیه‌کننده با زاویه‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه) در محیط آبی مانند فاصله افقی ارتفاع ماکزیم صعود جت از تخلیه‌کننده (X_m)، فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین از تخلیه‌کننده (X_i) و میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین (S_i)، پرداخته می‌شود. همچنین زاویه بهینه تخلیه پساب چگال از نظر میزان رقیق‌سازی با توجه به جهت و میزان سرعت جریان محیط مشخص می‌گردد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل CorJet

CorJet [۱۴] یک مدل انتگرالی دقیق و سه بعدی برای تجزیه و تحلیل غلظت و مسیر حرکت پساب‌های تخلیه شده در محیط آبی است. این مدل از زیر مجموعه‌های مدل CORMIX [۱۴] است و به صورت مستقیم یا مستقل از سیستم CORMIX قابل اجرا است. این مدل بر اساس روش انتگرال اولبری به حل معادلات و پیش‌بینی رقیق‌سازی پساب‌های با چگالی مثبت، خنثی و منفی می‌پردازد. CorJet برای تخلیه‌کننده‌های تک مجرای و چند مجرای کاربرد دارد. از ویژگی این مدل می‌توان به در نظر گرفتن ادغام جت‌ها در تخلیه‌کننده‌های چند پورتی و کاربر دوست بودن این مدل اشاره کرد. در نظر گرفتن جریان محیط در جهات مختلف از دیگر ویژگی‌های CorJet است. این مدل هیچ‌گونه مرزی را در

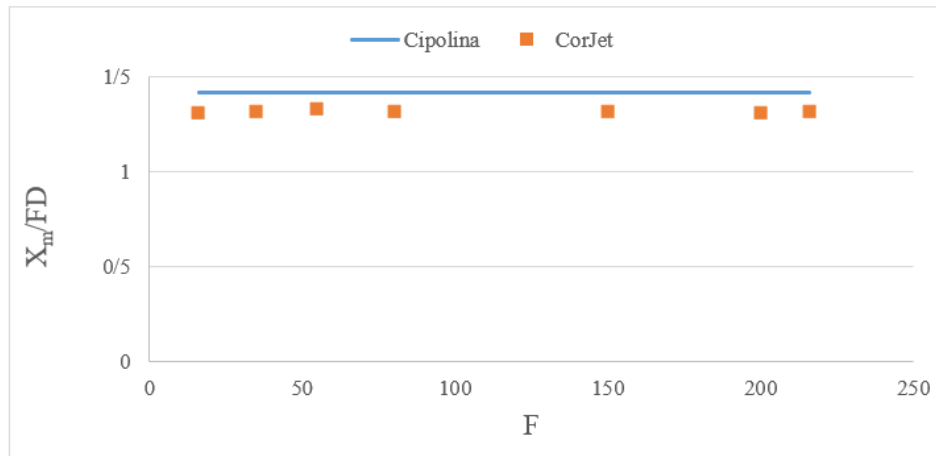
$$g'_0 = g \frac{(\rho_0 - \rho_a)}{\rho_a} \quad (۳)$$

در رابطه بالا ρ_0 چگالی پساب، ρ_a چگالی محیط و g شتاب گرانش می‌باشد.

محققان مختلف برای کاهش خسارات ناشی از تخلیه پساب کارخانه‌های آب شیرین‌کن تحقیقات مختلفی را در این زمینه انجام داده‌اند. زیتون و همکاران جزو اولین افرادی بودند که به بررسی بهینه‌ترین حالت تخلیه پساب شور در محیط ساکن پرداختند. آن‌ها برای یافتن بهینه‌ترین حالت تخلیه پساب شور، به بررسی رقیق‌سازی پساب تخلیه شده با زاویه‌های مختلف پرداختند. نتایج نشان داد، برای تخلیه پساب چگال در محیط ساکن، بهینه‌ترین حالت تخلیه پساب استفاده از تخلیه‌کننده‌های مستغرق مایل و با زاویه ۶۰ درجه است. در این حالت پساب تخلیه شده مسیر بیشتری را در مقایسه با زاویه‌های دیگر در محیط آبی طی می‌کند و اختلاط پساب با محیط پذیرنده به بیشترین مقدار ممکن می‌رسد [۶]. سال‌های بعد نیز جهت یافتن زاویه بهینه برای دستیابی به بیشترین میزان رقیق‌سازی پساب چگال، آزمایشات متعددی توسط محققان مختلف همچون پینسیس و لیست [۷]، رابرتز و تامز [۸]، عابسی و رابرتز [۹] در محیط ساکن انجام شد و همگی نتایج ارائه شده توسط زیتون و همکاران [۶] را تایید کردند. جیانگ و همکاران به بررسی رفتار پساب چگال تخلیه شده با زاویه ۳۰ و ۴۵ درجه در آب‌های کم عمق ساحلی پرداختند و تاثیر برخورد جت به سطح آب را در میزان رقیق‌سازی پساب در محیط ساکن مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. عابسی و رابرتز مطالعات خود را بر روی رقیق‌سازی پساب شور تخلیه شده از دیفیوزرهای چند پورتی در محیط ساکن انجام دادند. عابسی و رابرتز مهم‌ترین عامل در طراحی دیفیوزرهای چند پورتی را فاصله دهانه‌های خروجی از هم دانستند و پارامتر بی بعد L/FD (فاصله تخلیه‌کننده‌ها از هم، D قطر تخلیه‌کننده و F عدد فرود خروجی پساب)، را به عنوان معیاری برای ادغام جت‌ها با هم معرفی کردند [۱۱]. فرناندز و همکاران به بررسی تاثیر استفاده از دیفیوزر در تخلیه‌کننده‌های مستغرق مایل، بر میزان رقیق‌سازی پساب تخلیه شده پرداختند [۱۲]. پاپاکونستانتیز و تساتسارا ویژگی‌های اختلاط جت‌های چگال تخلیه شده در محیط ساکن را بررسی نمودند. آزمایشات آن‌ها شامل اندازه‌گیری غلظت پساب در نقطه برخورد به زمین، غلظت پساب در نقطه ماکزیم ارتفاع صعود جت، فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین و فاصله افقی ارتفاع ماکزیم صعود جت از تخلیه‌کننده، برای پساب تخلیه

1 coflow

2 counterflow



شکل ۲. مقایسه نتایج محل افقی ارتفاع ماکزیمم صعود پساب چگال تخلیه شده در محیط ساکن با زاویه ۶۰ درجه مدل CorJet، با مطالعه تجربی [۱۷].

Fig. 2. Comparison of the results of the horizontal location of the centerline peak effluent discharged in the static environment with an angle of 60 degrees of the CorJet model, with an experimental study [17].

اعتبار مدل‌های عددی وجود دارد که یکی از این روش‌ها مقایسه نتایج به دست آمده توسط مدل با نتایج مطالعات تجربی معتبر است. در این قسمت برای صحت‌سنجی مدل، نتایج به دست آمده توسط مدل CorJet با نتایج مطالعات آزمایشگاهی محققان مختلف مقایسه می‌شود.

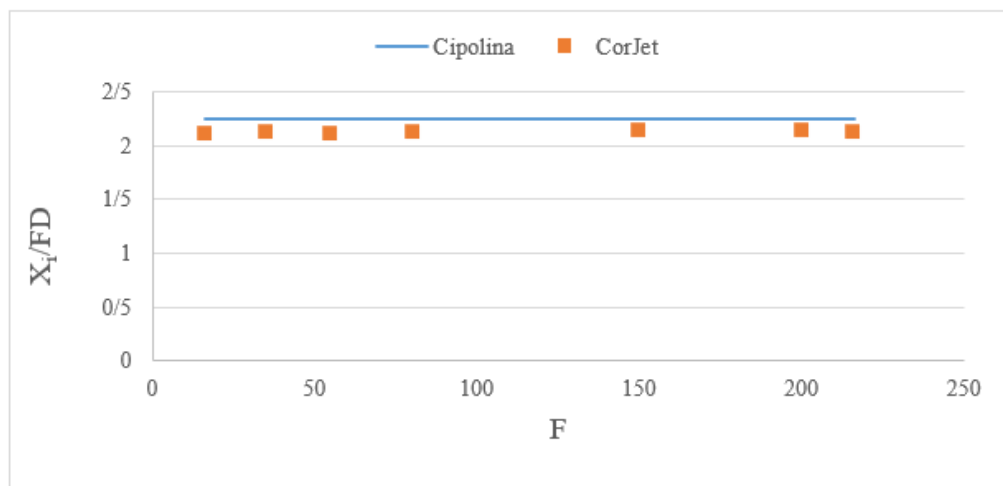
در شکل ۲، مقدار پارامتر بدون بعد X_m/FD عدد فرود خروجی، D قطر تخلیه کننده) به دست آمده از مدل CorJet برای تخلیه پساب چگال به صورت مستغرق و با زاویه تخلیه ۶۰ درجه در محیط ساکن برای اعداد فرود مختلف ارائه شده است. نتایج مدل‌سازی با نتایج مطالعه تجربی سیپولینا و همکاران [۱۷] مقایسه شده است. طبق نتایج مدل، مقدار پارامتر بدون بعد X_m/FD به ازای همه اعداد فرود مقداری تقریباً ثابت (۱/۳۲) است. با توجه به شکل ۲ نتایج مدل CorJet مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشته و مقدار X_m را با انحرافی در حدود ۷ درصد دست پایین تخمین می‌زند.

پارامتر بی بعد X_m/FD به دست آمده از مدل CorJet برای تخلیه پساب چگال به صورت مستغرق و با زاویه ۶۰ درجه در محیط‌های ساکن و پویا در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج با مطالعات تجربی سیپولینا و همکاران [۱۷] برای جریان ساکن (شکل ۳-الف) و چوی و همکاران [۱۸] برای جریان محیطی هم‌راستا (شکل ۳-ب) مقایسه شده‌اند. در شکل ۳-ب $U_r = U_a/U_j$ است که U_a سرعت جریان محیط و U_j سرعت جت خروجی

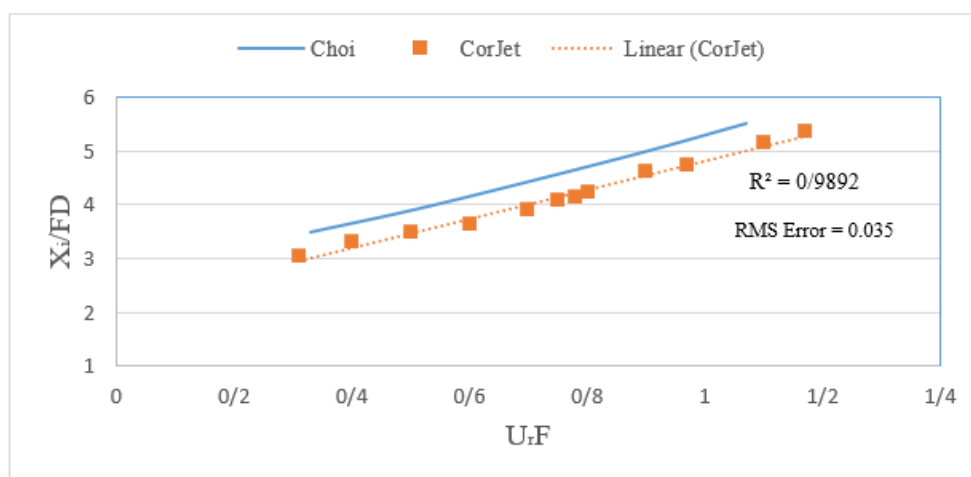
نظر نمی‌گیرد و فقط برای میدان نزدیک کاربرد دارد و رقیق‌سازی در میدان دور را پیش‌بینی نمی‌کند. CorJet توانایی شبیه‌سازی محیط چند لایه و با چگالی‌های متفاوت را دارا است [۱۵]. با توجه به نتایج مطالعات محققان مختلف [۱۵-۱۶] مدل CorJet توانایی بالایی در شبیه‌سازی پساب چگال تخلیه شده در محیط پویا دارد. تغییرات ماهیت فیزیکی پساب در طول مسیر حرکت در میدان نزدیک به صورت خودکار توسط مدل، با حل معادلات حاکم در نظر گرفته می‌شود. در مدت زمان کوتاه حرکت پساب در میدان نزدیک می‌توان از واکنش‌های شیمیایی صرف نظر نمود و بنابراین مدل واکنش‌های شیمیایی را در نظر نمی‌گیرد. این مدل با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده شرایط تخلیه پساب، نتایج دقیقی را ارائه می‌کند و به همین دلیل به عنوان یکی از پرکاربردترین مدل‌ها برای پیش‌بینی تخلیه پساب چگال در محیط آبی مورد استفاده محققان مختلف قرار گرفته است. از این رو در این تحقیق برای شبیه‌سازی پساب چگال تخلیه شده در محیط پویا، از مدل CorJet استفاده شده است.

۲-۲- صحت‌سنجی مدل

اعتبار و ارزش نتایج به دست آمده توسط هر مدل عددی، با انجام صحت‌سنجی آن مدل مشخص می‌شود. روش‌های مختلفی برای تعیین



(الف)



(ب)

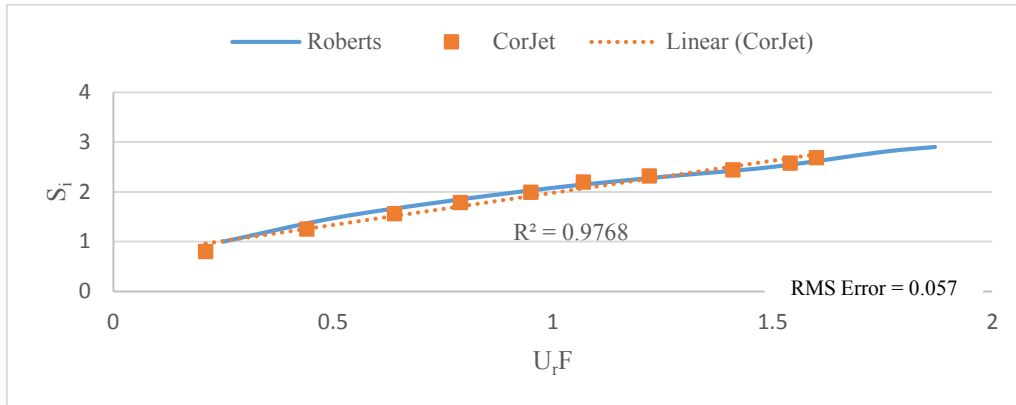
شکل ۳. مقایسه نتایج محل افقی برخورد به زمین پساب چگال تخلیه شده با زاویه ۶۰ درجه مدل CorJet، با مطالعات تجربی [۱۷-۱۸]. الف) محیط ساکن. ب) محیط پویا ($\phi = 0$).

Fig. 3. Comparison of the results of the horizontal location of the impact point from the discharger for the discharged dense effluent with an angle of 60 degrees, CorJet model, with experimental studies [17-18]. A) Static environment. B) Dynamic environment ($\phi=0$).

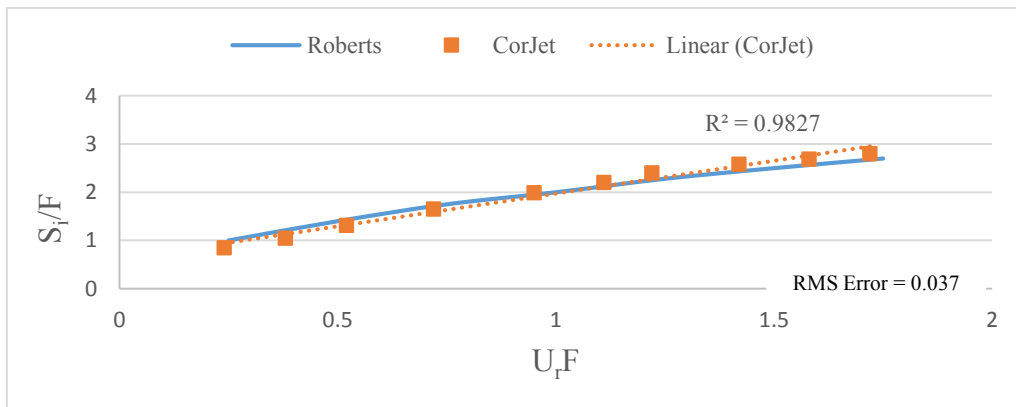
مطالعه تجربی چوی و همکاران [۱۸] با انحرافی در حدود ۱۳ درصد دست پایین تخمین می‌زند.

در ادامه برای صحت‌سنجی مدل CorJet، نتایج به دست آمده توسط مدل، برای میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین به ازای سرعت‌های نسبی (U_i) و اعداد فرود مختلف، با کارهای آزمایشگاهی رابرتز و تامز [۸] و گانگور و همکاران [۱۹] در شکل‌های ۴ و ۵ مقایسه شده است.

می‌باشد. با توجه به شکل ۳-الف، مدل CorJet مقدار پارامتر بدون بعد X_i/FD را برای تخلیه پساب چگال در محیط ساکن، برای تمام اعداد فرود مقداری تقریباً ثابت (۲/۱۲) و با انحرافی در حدود ۷ درصد دست پایین نسبت به نتیجه مطالعه تجربی تخمین می‌زند. برای تخلیه پساب چگال در محیط پویا، با افزایش پارامتر $U_i F$ مقدار پارامتر X_i/FD به صورت خطی افزایش می‌یابد (شکل ۳-ب). مدل CorJet مقدار پارامتر X_i/FD را در مقایسه با



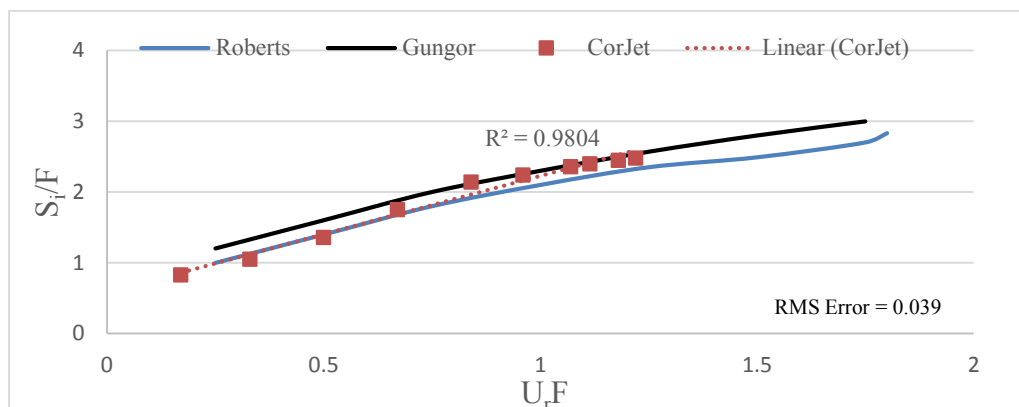
(الف)



(ب)

شکل ۴. مقایسه نتایج رقیق سازی پساب چگال تخلیه شده در محیط پویا با زاویه ۶۰ درجه مدل CorJet با مطالعه تجربی [۸]. الف) $\phi = 0$. ب) $\phi = 90$.

Fig. 4. Comparison of dilution rate of dense effluent discharged with a 60° angle in the dynamic environment obtained from the CorJet model and experimental results. A) $\phi=0$. B) $\phi=90$.



شکل ۵. مقایسه نتایج رقیق‌سازی پساب چگال تخلیه‌شده در محیط پویا با زاویه ۹۰ درجه مدل CorJet با مطالعات تجربی [۸] و [۱۹].

Fig. 5. Comparison of dilution results of dense effluent discharged in a dynamic environment with a 90 degree angle of CorJet model with experimental study.

۲-۳- مدل‌سازی

در این تحقیق با استفاده از مدل انتگرالی CorJet به بررسی تاثیر جهت و مقدار سرعت جریان محیط، بر مشخصات پساب تخلیه شده (X_m ، X_i و S_i) به صورت مستغرق مایل با قطر تخلیه ۰/۳ متر و با زاویه‌های تخلیه ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه پرداخته می‌شود. برای این منظور یک محیط فرضی به عمق ۲۰ متر (که جت خروجی با سطح آب یا دیواره برخورد نداشته باشد)، با سرعت محیطی متغیر ($0/5 \text{ m/s} < U_a < 0/5 \text{ m/s}$) معادل ($0/3 < U_i/F < 1/9$) در نظر گرفته می‌شود. برای بررسی میزان تاثیر جریان محیط بر مقدار طول مسیر حرکت پساب (جت و پلوم)، عدد فرود تخلیه برابر ۱۹/۵۳ و برای تعیین میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین، عدد فرود برابر ۱۹/۵۳ و ۲۵ در نظر گرفته می‌شود. تخلیه پساب در سه حالت هم‌راستا، عمود و مخالف با جهت جریان محیط صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه در پساب حاصل از کارخانه‌های آب شیرین‌کن دمای پساب تقریباً تغییری نمی‌کند، اختلاف دمای پساب و محیط تخلیه برای ساده‌سازی (همانند اکثر مطالعات موجود در این زمینه) یکسان فرض شده است. غلظت پساب حدوداً دو برابر غلظت محیط پذیرنده است. مشخصات تخلیه کننده و

همان گونه که مشاهده می‌شود میزان رقیق‌سازی پساب، با افزایش سرعت جریان محیط افزایش می‌یابد. در شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی پساب برای دو حالت تخلیه در جریان محیط هم‌راستا (شکل ۴-الف) و عمود بر جهت جریان محیط ($\phi = 90$) (شکل ۴-ب) ارائه شده است. طبق نتایج، مدل میزان رقیق‌سازی پساب چگال تخلیه شده در محیط پویا را با انحرافی در حدود ۴ تا ۸ درصد نسبت به نتایج تجربی پیش‌بینی می‌کند. شکل ۵ نتایج مدل را در پیش‌بینی میزان رقیق‌سازی پساب چگال تخلیه شده در محیط پویا با استفاده از تخلیه کننده قائم را در مقایسه با مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد. نتایج مدل نسبت به مطالعات آزمایشگاهی مطابقت مناسبی داشته و با انحرافی در حدود ۴ تا ۱۰ درصد تخمین زده شده است.

طبق نتایج ارائه شده در این قسمت، نتایج مدل CorJet مطابقت منطقی‌ای با نتایج مطالعات آزمایشگاهی در محیط پویا دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نتایج ارائه شده توسط این مدل برای تعیین مشخصات پساب چگال تخلیه شده (X_m ، X_i و S_i) در محیط پویا به صورت مستغرق مایل، قابل اعتماد می‌باشد.

جدول ۱. اطلاعات ورودی به مدل

Table 1. Input information to the model

D (m)	U_a (m/s)	F	θ °	ϕ °	H (m)	ΔT c	ρ_0 (kg/m ³)	ρ_a (kg/m ³)
۰/۳	$۰/۰۵ < U_a < ۰/۵$	۱۹/۵۳ ۲۵	۳۰ ۶۰ ۹۰	۰ ۹۰ ۱۸۰	۲۰	۰	۱۰۵۱/۵	۱۰۲۸/۶

پساب در جدول ۱ خلاصه شده است.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت به ارائه نتایج مدل CorJet در تخمین فاصله افقی ارتفاع ماکزیمم صعود جت از تخلیه کننده، فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین از تخلیه کننده و میزان رقیق سازی پساب در نقطه برخورد به زمین پرداخته می شود.

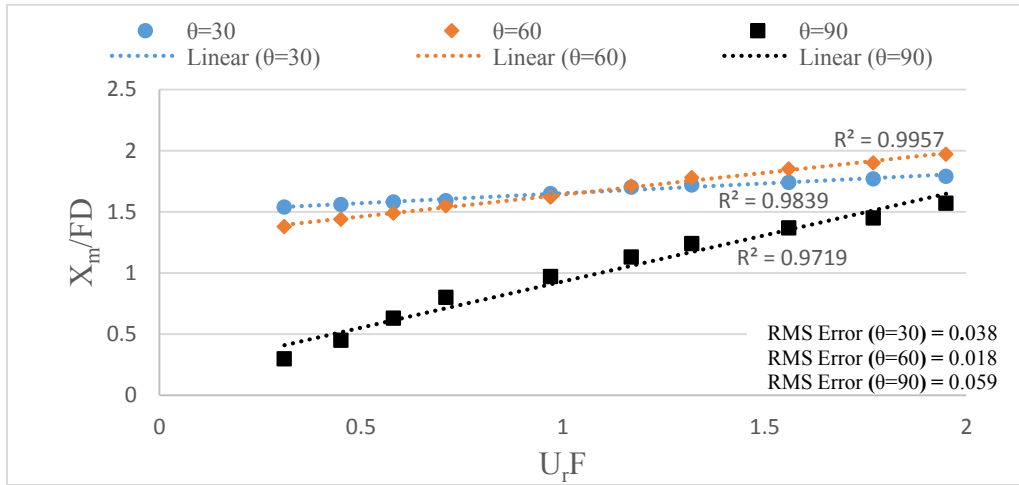
۳-۱- فاصله افقی محل ارتفاع صعود ماکزیمم جت از تخلیه کننده (X_m)
در این قسمت به بررسی تاثیر جهت و اندازه سرعت جریان محیط بر فاصله افقی ارتفاع ماکزیمم صعود جت پساب از تخلیه کننده (X_m) پساب پرداخته می شود. پساب با عدد فرود تخلیه ۱۹/۵۳ از تخلیه کننده هایی با زاویه های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه، در محیط پویا تخلیه می شود. نتایج با توجه به زاویه بین جهت تخلیه پساب و جهت جریان محیط به سه قسمت تقسیم شده است.

تغییرات مربوط به مقدار پارامتر بدون بعد X_m/FD پساب تخلیه شده به صورت هم راستا و در سرعت های محیطی مختلف، در شکل ۶ نشان داده شده است. طبق نتایج، در تخلیه پساب چگال در محیط های با سرعت محیطی کم ($U_F < ۱$)، مقدار X_m برای تخلیه کننده های با زاویه ۳۰ و ۹۰ درجه به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار است. با افزایش سرعت جریان محیط، مقدار X_m به صورت خطی و با انحراف معیار رگرسیون بسیار ناچیز برای همه زاویه ها، افزایش می یابد که این موضوع به دلیل نیروی وارده از طرف جریان محیط به جت است که باعث افزایش طول مسیر حرکت جت تخلیه شده، توسط جریان محیط می شود. هر چه سرعت جریان محیط بیشتر

باشد محل ارتفاع صعود ماکزیمم جت در فاصله افقی بیشتری از تخلیه کننده قرار می گیرد. در قسمت هایی از مسیر حرکت جت که سرعت جریان محیط بیشتر از سرعت جت باشد ($U_a > U_j$)، جهت حرکت جت وابسته به جهت حرکت جریان محیط می شود. با توجه به اینکه سرعت جت در نزدیکی نقطه ماکزیمم ارتفاع صعود جت ناچیز است ($U_j \approx ۰$)، در این قسمت جریان محیط بیشترین تاثیر را بر رفتار جت خواهد داشت و هر چه جریان محیط بیشتر شود مقدار فاصله افقی ارتفاع صعود ماکزیمم جت از تخلیه کننده افزایش می یابد. همچنین طبق نتایج با افزایش سرعت جریان محیط، مقدار پارامتر X_m/FD برای تخلیه کننده با زاویه ۹۰ درجه با نرخ بیشتری نسبت به تخلیه کننده با زاویه ۳۰ و ۶۰ درجه افزایش می یابد. در این مورد می توان گفت هر چه جت به صورت قائم و یا نزدیک به قائم تخلیه شود انتقال پساب توسط جریان محیط با نرخ بیشتری افزایش می یابد.

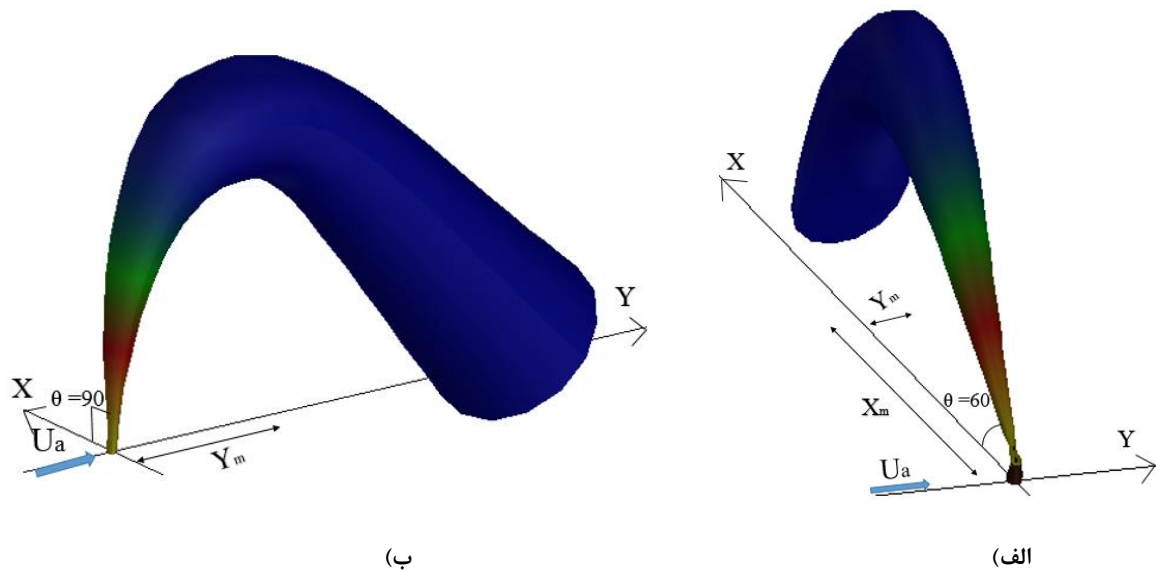
در صورتی که جهت جریان محیط، عمود بر جهت جت خروجی باشد ($\phi = ۹۰$)، ابتدا جت خروجی به دلیل مومنتوم بالا در جهت X عمود بر جریان محیط) حرکت می کند و هنگامی که سرعت جت نسبت به سرعت محیط کاهش می یابد ($U_a > U_j$)، جت توسط جریان محیط از مسیر خود منحرف شده و در جهت جریان محیط (محور Y) حرکت می کند. در این حالت محل ارتفاع صعود ماکزیمم جت، به مقدار Y_m از راستای تخلیه کننده منحرف می شود (شکل ۷-الف).

شکل ۸ تاثیر جریان محیطی (با سرعت های مختلف) عمود بر جهت تخلیه پساب را بر مقدار پارامتر بدون بعد X_m/FD نشان می دهد. با افزایش سرعت جریان محیط، مقدار X_m برای تخلیه پساب چگال با زاویه ۳۰ و ۶۰ درجه به صورت خطی کاهش می یابد. هنگامی که سرعت جت به کمتر از



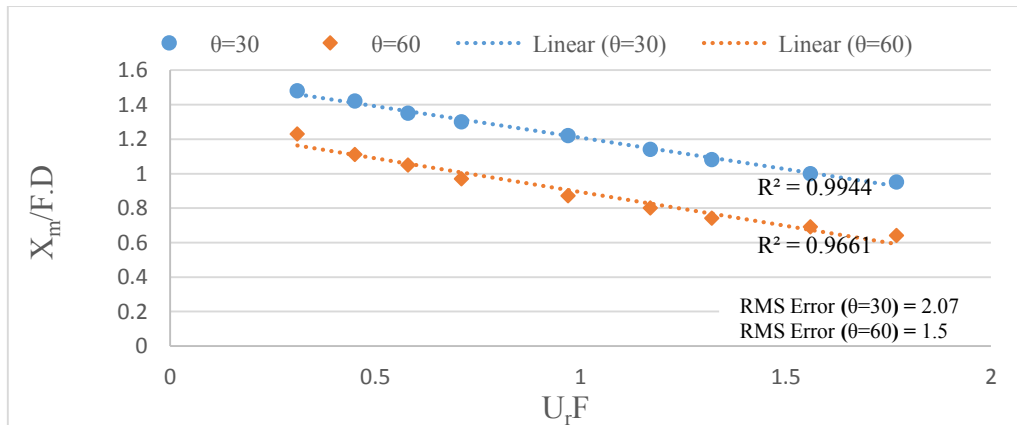
شکل ۶. مقایسه فاصله افقی محل ارتفاع صعود ماکزیمم جت از تخلیه‌کننده برای زاویه‌های مختلف تخلیه‌کننده در حالت $\phi = 0$.

Fig. 6. Comparison of the horizontal location of the centerline peak from the discharger for the effluent discharged with different angles in the case of $\phi = 0$.



شکل ۷. شماتیک تخلیه پساب چگال در حالت $\phi = 90$. الف) $\theta = 60$ ب) $\theta = 90$.

Fig. 7. Schematic diagram of dense effluent discharge at $\phi=90$. A) $\theta = 60$. B) $\theta = 90$.



شکل ۸. فاصله افقی محل ارتفاع ماکزیمم صعود جت از تخلیه‌کننده برای پساب تخلیه‌شده با زاویه‌های مختلف در حالت $\phi = 90$.

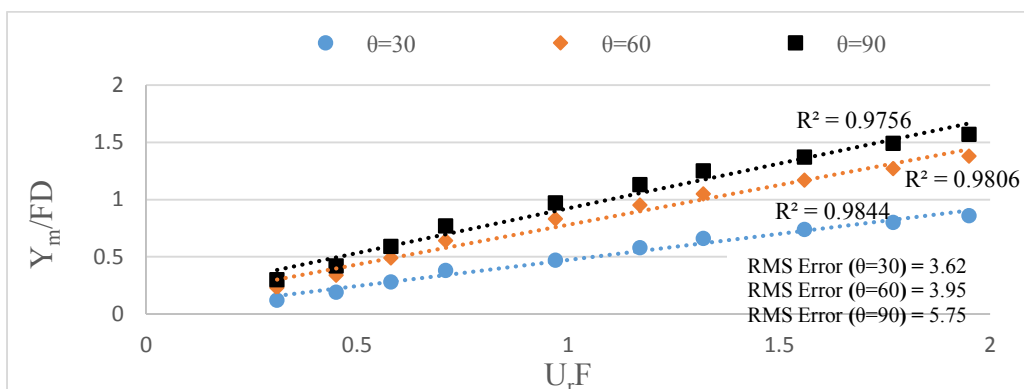
Fig. 8. Comparison of the horizontal location of the centerline peak from the discharger for the effluent discharged with different angles in the case of $\phi = 90$.

جریان محیط، مقدار Y_m برای همه زاویه‌های تخلیه به صورت خطی (با خطای رگرسیون ناچیز برای تمام زاویه‌ها) افزایش می‌یابد. همانطور که در قسمت قبل گفته شد، برای حالتی که سرعت جریان محیط بیشتر از سرعت جت شود، جت توسط جریان محیط از مسیر خود منحرف شده و توسط جریان محیط (در جهت جریان محیط) منتقل می‌شود. بنابراین هر چه سرعت جریان محیط افزایش می‌یابد جت انحراف بیشتری را توسط جریان محیط پیدا می‌کند و مقدار Y_m افزایش و مقدار X_m کاهش می‌یابد. مقدار Y_m برای جت خروجی با زاویه‌های ۹۰ و ۳۰ درجه به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار را دارد که این موضوع به دلیل بیشتر بودن نیروی وارده از طرف جریان محیط به جت تخلیه شده از تخلیه‌کننده با زاویه ۹۰ درجه، نسبت به جت‌های تخلیه شده از تخلیه‌کننده با زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه است.

در صورتی که پساب در خلاف جهت جریان محیط ($\phi = 180$) تخلیه شود، جت خروجی ابتدا به دلیل مومنتوم بالا و سرعت بیشتر نسبت به سرعت جریان محیط، در خلاف جهت جریان محیط حرکت می‌کند. با پیشروی جت در خلاف جهت جریان محیط، نیروی وارده از طرف جریان محیط باعث کاهش مومنتوم جت می‌شود. هنگامی که سرعت جریان محیط بیشتر از سرعت جت شود، جت توسط جریان محیط کاملاً منحرف شده و در جهت جریان محیط حرکت می‌کند (شکل ۱۰). در این حالت جریان محیط تاثیر

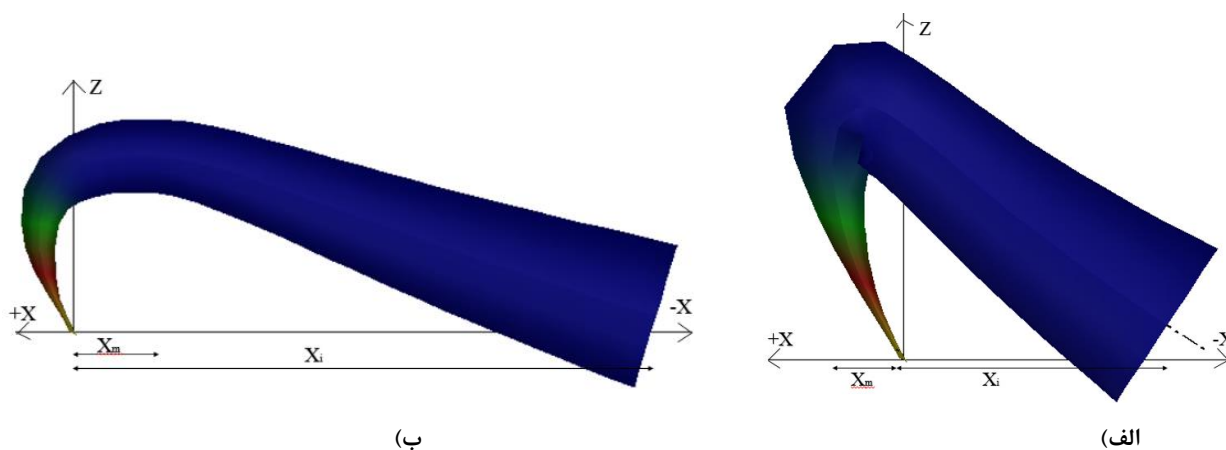
سرعت جریان محیط برسد، جت کاملاً از مسیر خود منحرف شده و در جهت جریان محیط حرکت می‌کند و به همین دلیل هر چه سرعت محیط افزایش پیدا می‌کند جت زودتر از مسیر خود منحرف شده و مقدار X_m کاهش می‌یابد. همچنین طبق شکل مقدار X_m برای همه سرعت‌های محیطی ($0 < U_d F < 1/3$)، برای پساب تخلیه شده با زاویه ۳۰ درجه بیشتر از پساب تخلیه شده با زاویه ۶۰ درجه است. در این مورد می‌توان گفت هر چه زاویه تخلیه‌کننده کمتر شود مسافت افقی و عمودی طی شده توسط جت خروجی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد و عکس همین موضوع نیز برقرار است و هر چه زاویه تخلیه‌کننده افزایش پیدا کند مسافت افقی و عمودی طی شده توسط جت خروجی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. در این نوع تخلیه ($\phi = 90$)، جت خروجی از تخلیه‌کننده قائم ابتدا به دلیل مومنتوم بالا به صورت عمودی حرکت می‌کند و در مرحله بعد ($U_a > U_j$)، جت توسط جریان محیط به سمت محور Y منحرف می‌شود و به این ترتیب جت هیچ مسافتی را در جهت محور X طی نمی‌کند (شکل ۷-ب).

شکل ۹ مقدار پارامتر بدون بعد انحراف محل ارتفاع ماکزیمم جت از راستای تخلیه‌کننده ($Y_m / F D$) را برای سرعت‌های محیطی مختلف عمود بر جهت تخلیه پساب ($\phi = 90$) را نشان می‌دهد. طبق نتایج، جریان محیط باعث انحراف محل ارتفاع صعود ماکزیمم جت (Y_m) به سمت جهت جریان محیط (Y) می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت



شکل ۹. مقدار انحراف محل ارتفاع صعود ماکزیمم جت توسط جریان محیط برای پساب چگال تخلیه شده با زاویه های مختلف در حالت $\phi = 90$.

Fig. 9. The amount of deviation of the location of the maximum jet ascent height by the ambient flow for the effluent discharged with different angles in the case of $\phi = 90$.



شکل ۱۰. شکل شماتیک تخلیه مستغرق پساب چگال با زاویه 60° در حالت $\phi = 180$. الف) $U_a = 0/05$. ب) $U_a = 0/5$.

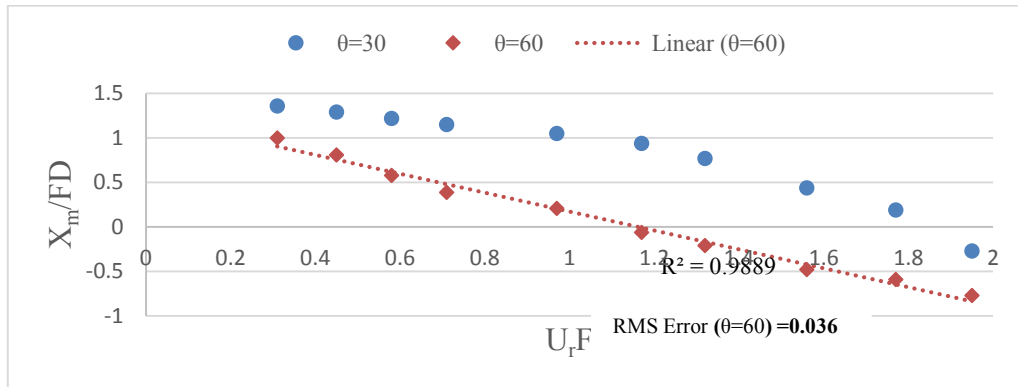
Fig. 10. Schematic of submerged discharge of dense effluent with an angle of 60 degrees in the case of $\phi = 180$.

A) $U_a = 0/05$. B) $U_a = 0/5$.

X_m مربوط به مقدار مسافتی است که جت در خلاف جهت جریان محیط (در جهت مثبت محور X) طی می کند و مقادیر منفی X_m مربوط به مقدار مسافتی است که جت در جهت جریان محیط (در جهت منفی محور X) طی می کند. همانطور که مشاهده می شود با افزایش سرعت جریان محیط مقدار X_m در قسمت مثبت محور X کاهش و در قسمت منفی محور X

زیادی بر طول مسیر حرکت پساب در حالت پلوم دارد اما بر طول مسیر حرکت پساب در حالت جت تاثیر چندانی ندارد.

شکل ۱۱ نتایج مربوط به شبیه سازی مقدار پارامتر بدون بعد X_m/FD را برای تخلیه پساب در محیط پویا با سرعت های محیطی مختلف در خلاف جهت تخلیه پساب ($\phi = 180$) را نشان می دهد. در این شکل مقادیر مثبت



شکل ۱۱. مقایسه فاصله افقی محل ارتفاع ماکزیم صعود جت از تخلیه‌کننده برای پساب تخلیه شده با زاویه‌های مختلف در حالت $\phi = 180$.

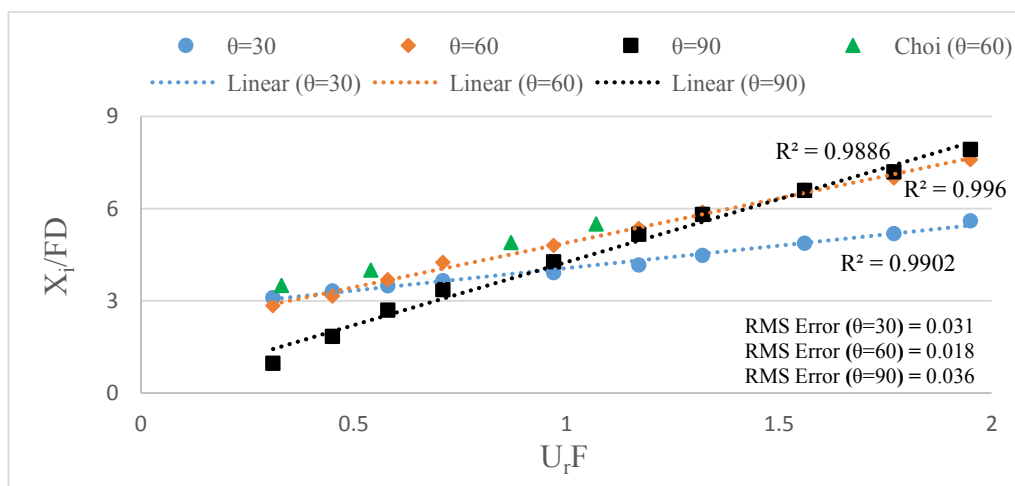
Fig. 11. Comparison of the horizontal location of the centerline peak from the discharger for the effluent discharged with different angles in the case of $\phi = 180$.

درجه، در یک محیط پویا با سرعت‌های محیطی مختلف تخلیه می‌شود. همانطور که در قسمت ۳-۱ گفته شد جریان محیط باعث افزایش طول مسیر حرکت پساب در حالت جت می‌شود. هنگامی که سرعت جت به صفر برسد، پساب از حالت جت به پلوم تبدیل می‌شود. حرکت پساب چگال در حالت پلوم به واسطه 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 شده پساب در حالت جت و پلوم افزایش می‌یابد. شکل ۱۲ مقدار پارامتر بدون بعد X_1/FD را برای سرعت‌های محیطی مختلف هم‌راستا با جهت تخلیه پساب را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۲ نتایج به دست آمده برای تخلیه پساب با زاویه ۶۰ و ۳۰ درجه توسط مدل CorJet، به خوبی نتایج مطالعه تجربی چوی و همکاران [۱۸] را دنبال می‌کند. با افزایش سرعت جریان محیط، مقدار X_1 برای تمام زاویه‌های تخلیه به صورت خطی افزایش می‌یابد. همچنین برای تمام زاویه‌ها خطای معیار رگرسیون خطی داده‌ها بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است. در تخلیه پساب چگال در محیط‌های با سرعت محیطی کم ($U_F < 0.3$)، مقدار X_1 برای تخلیه‌کننده‌های با زاویه ۳۰ و ۹۰ درجه به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار است و در مکان‌هایی با سرعت محیطی بالا ($U_F > 1/5$)، مقدار X_1 برای تخلیه‌کننده‌های با زاویه ۳۰ و ۹۰ درجه، به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار را دارد. برای تخلیه پساب چگال در محیط ساکن و یا نزدیک

افزایش می‌یابد (اعداد در جهت منفی محور X بزرگتر می‌شوند). مقدار X_m برای جت‌های تخلیه شده با زاویه ۳۰ و ۶۰ درجه در سرعت‌های محیطی کم (برای زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه به ترتیب $U_F < 1/8$ و $U_F < 1/2$)، مثبت است و با افزایش سرعت محیط مقدار X_m کاهش می‌یابد. هنگامی که پساب در خلاف جهت جریان محیط تخلیه شود جریان محیط نیرویی در خلاف جهت حرکت جت، به جت وارد می‌کند و به همین دلیل با افزایش جریان محیط، مقدار X_m کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. اما در صورتی که سرعت جریان محیط خیلی بالا باشد (برای زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه به ترتیب $U_F > 1/8$ و $U_F > 1/2$)، در این حالت جت توسط جریان محیط مسافت بیشتری را حمل می‌شود و ارتفاع صعود ماکزیم جت در پشت تخلیه‌کننده (در قسمت منفی محور X)، قرار می‌گیرد و هر چه مقدار سرعت جریان محیط افزایش یابد، مقدار X_m در جهت منفی محور X افزایش می‌یابد. در این نوع تخلیه ($\phi = 180$)، پساب تخلیه شده از تخلیه‌کننده‌های قائم همانند حالت $\phi = 0$ و $\phi = 90$ عمل می‌کند و هیچ مسافتی را در خلاف جهت جریان محیط طی نمی‌کند.

۳-۲- فاصله افقی محل برخورد پساب به زمین از تخلیه‌کننده (X_1)

جهت و میزان سرعت جریان محیط یکی از مهم‌ترین عوامل در تعیین مقدار X_1 است. به همین دلیل در این قسمت به بررسی تاثیر جهت و میزان سرعت جریان محیط بر مقدار X_1 پرداخته می‌شود. در این قسمت عدد فرود تخلیه پساب ۱۹/۵۳ است که از تخلیه‌کننده‌هایی با زاویه ۳۰، ۶۰ و ۹۰



شکل ۱۲. مقایسه فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین از تخلیه‌کننده برای پساب چگال تخلیه‌شده با زاویه های مختلف در حالت $\phi = 0$.

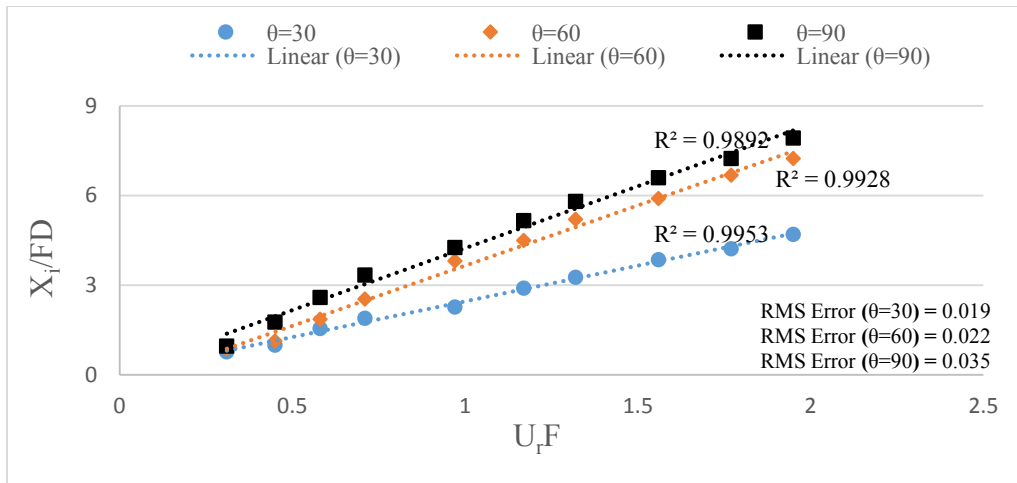
Fig. 12. Comparison of the horizontal location of the impact point from the discharger for the discharged dense effluent with different angles in the case of $\phi=0$.

جت) ابتدا به دلیل مومنتوم بالا در جهت عمود بر جریان محیط حرکت می‌کند. پساب بعد از رسیدن به نقطه ارتفاع ماکزیمم صعود جت، از حالت جت به پلوم تبدیل می‌شود و حرکت پساب در حالت پلوم علاوه بر شار شناوری وابسته به سرعت و جهت جریان محیط نیز است و هر چه سرعت جریان محیط و ارتفاع سقوط پلوم افزایش یابد مقدار X_i افزایش می‌یابد. طبق نتایج به دست آمده برای این نوع تخلیه ($\phi = 90$)، پساب تخلیه شده از تخلیه کننده قائم نسبت به تخلیه کننده‌های دیگر در فاصله افقی دورتری از تخلیه کننده با زمین برخورد خواهد کرد و هر چه زاویه تخلیه کننده نسبت به افق، کمتر شود فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین از تخلیه کننده کاهش می‌یابد.

شکل ۱۴ مقدار پارامتر بی‌بعد X_i/FD را برای حالتی که پساب در خلاف جهت جریان محیط تخلیه می‌شود را نشان می‌دهد. در این شکل مقادیر مثبت X_i مربوط به حالتی است که پساب در مقابل دهانه تخلیه کننده (در جهت مثبت محور X) با زمین برخورد می‌کند و مقادیر منفی X_i مربوط به حالتی است که پساب توسط جریان محیط منحرف شده و در پشت تخلیه کننده (در جهت منفی محور X) با زمین برخورد می‌کند. در این حالت هر چه اعداد در جهت منفی محور X بزرگ‌تر می‌شوند (از ۰ تا -۸)، بدین معنی است که پساب در نقطه دورتری از تخلیه کننده (در قسمت عقب تخلیه کننده) با زمین برخورد می‌کند. با افزایش سرعت جریان محیط، مقدار X_i در قسمت مثبت محور X کاهش و در قسمت منفی محور X افزایش می‌یابد.

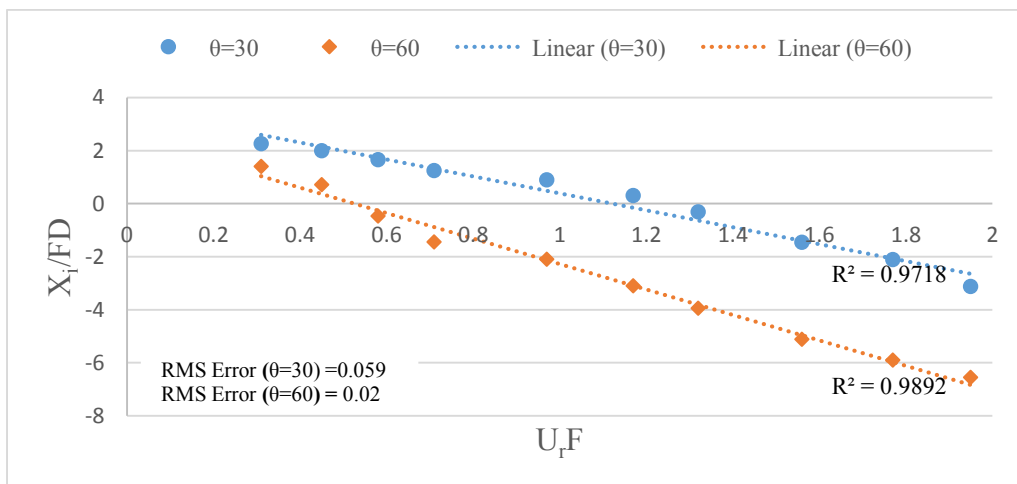
به ساکن ($U_i/F < 0.3$) هر چه زاویه تخلیه کننده کمتر باشد مسافت افقی و عمودی طی شده توسط جت خروجی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. اما برای تخلیه پساب چگال در محیط پویا با سرعت محیطی بالا ($U_i/F > 0.3$)، هر چه زاویه تخلیه کننده افزایش یابد ماکزیمم ارتفاع صعود جت و ارتفاع سقوط پلوم، افزایش می‌یابد و پساب (پلوم) در هنگام سقوط به سمت بستر، بیشتر در معرض نیروی وارده از طرف جریان محیط قرار می‌گیرد و در نتیجه مسافت افقی بیشتری را قبل از برخورد به زمین توسط جریان محیط منتقل می‌شود. با توجه به شکل ۱۲، برای $U_i/F > 1$ و $U_i/F > 1/6$ ، مقدار X_i برای تخلیه پساب با زاویه ۹۰ درجه به ترتیب بیشتر از مقدار X_i برای تخلیه پساب با زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه است. همچنین برای $U_i/F > 0.6$ نیز مقدار X_i برای تخلیه پساب با زاویه ۶۰ درجه، بیشتر از مقدار X_i برای تخلیه پساب با زاویه ۳۰ درجه است. بنابراین در تخلیه پساب چگال در محیط پویا، هر چقدر سرعت جریان محیط و زاویه تخلیه کننده افزایش یابد پساب در فاصله افقی بیشتری از تخلیه کننده با زمین برخورد می‌کند.

نتایج مربوط به تاثیر جریان‌های محیطی عمود بر جهت تخلیه پساب ($\phi = 90$) بر پارامتر بی‌بعد X_i/FD ، در شکل ۱۳ آورده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت محیط و زاویه تخلیه کننده، فاصله افقی محل برخورد پساب به زمین به صورت خطی و با انحراف بسیار کمی نسبت به رگرسیون خطی، افزایش می‌یابد. در این نوع تخلیه، پساب



شکل ۱۳. مقایسه فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین از تخلیه‌کننده برای پساب چگال تخلیه‌شده با زاویه‌های مختلف در حالت $\phi = 90$.

Fig. 13. Comparison of the horizontal location of the impact point from the discharger for the discharged dense effluent with different angles in the case of $\phi=90$.

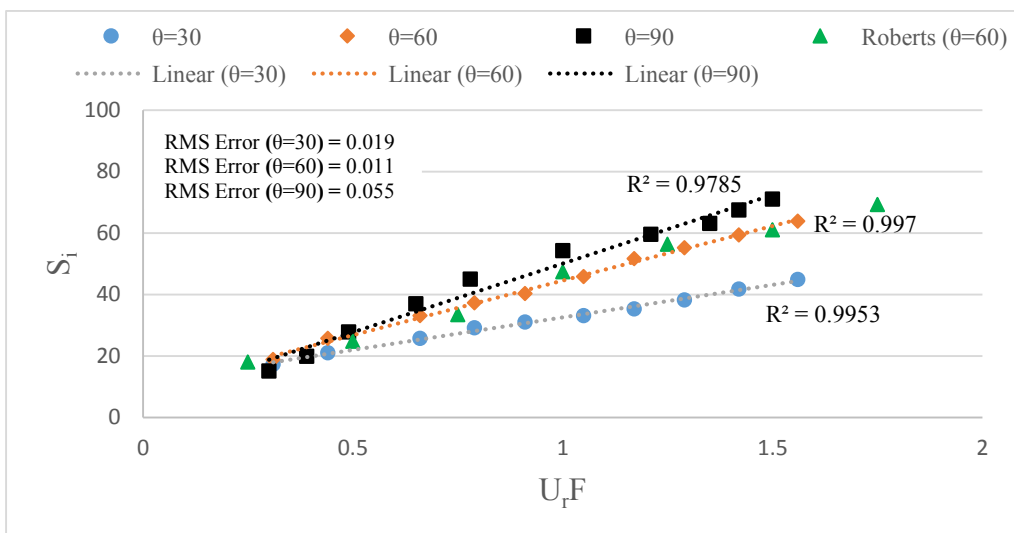


شکل ۱۴. مقایسه فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین از تخلیه‌کننده برای پساب چگال تخلیه‌شده با زاویه‌های مختلف در حالت $\phi = 180$.

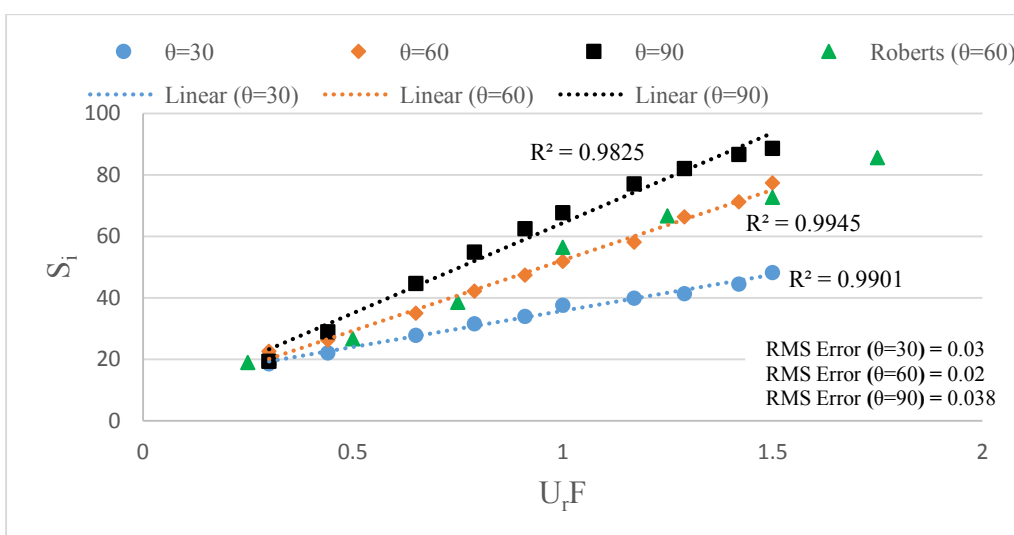
Fig. 14. Comparison of the horizontal location of the impact point from the discharger for the discharged dense effluent with different angles in the case of $\phi=180$.

تخلیه‌کننده، ارتفاع سقوط پساب (پلوم) بیشتر می‌شود. بنابراین می‌توان گفت هر چه زاویه تخلیه‌کننده افزایش یابد، پساب قبل از برخورد به زمین توسط جریان محیط مسافت بیشتری را منتقل می‌شود. مقدار پارامتر X_i برای تخلیه پساب چگال به صورت قائم، مستقل از زاویه بین جهت جریان محیط و جهت تخلیه پساب است و برای همه جهت‌های جریان محیط نسبت به جهت تخلیه پساب ($0 < \phi < 180$)، مقداری ثابت دارد.

(اعداد در قسمت منفی محور X بزرگ‌تر می‌شود). همچنین طبق نتایج به دست آمده در محیط با سرعت بالا ($U_r F > 1$) پساب تخلیه شده با زاویه 60 درجه نسبت به پساب تخلیه شده با زاویه 30 درجه در فاصله دورتری از تخلیه‌کننده (مقادیر منفی بزرگتر)، با زمین برخورد می‌کند. همان‌طور که در قسمت‌های قبل گفته شد هر چه ارتفاع سقوط پساب (پلوم) افزایش یابد نیروی وارده از طرف جریان محیط بر پساب افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه



(الف)



(ب)

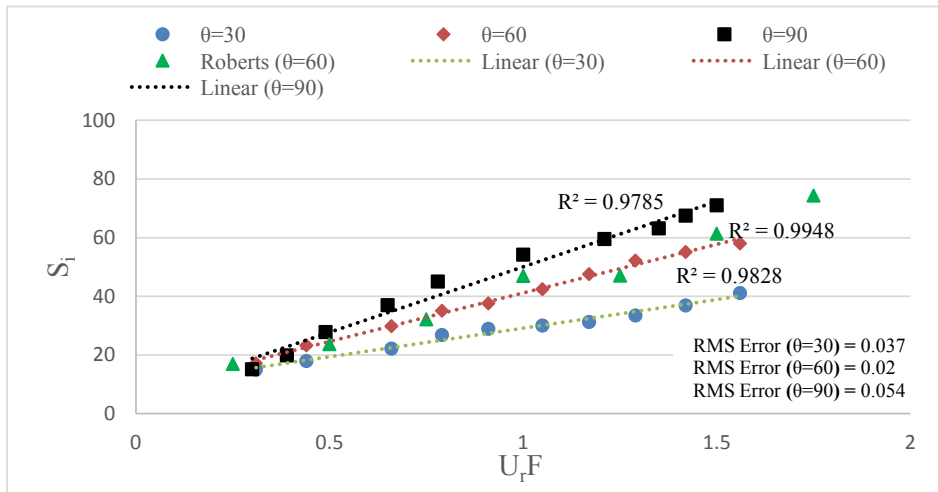
شکل ۱۵. مقایسه میزان رقیق‌سازی پساب چگال تخلیه‌شده با زاویه‌های مختلف در حالت $\phi = 0$ (الف) $F=19.53$ (ب) $F=25$.

Fig. 15. Comparison of dilution of discharged dense effluent with different angles in the case of $\phi=0$. A) $F=19.53$. B) $F=25$.

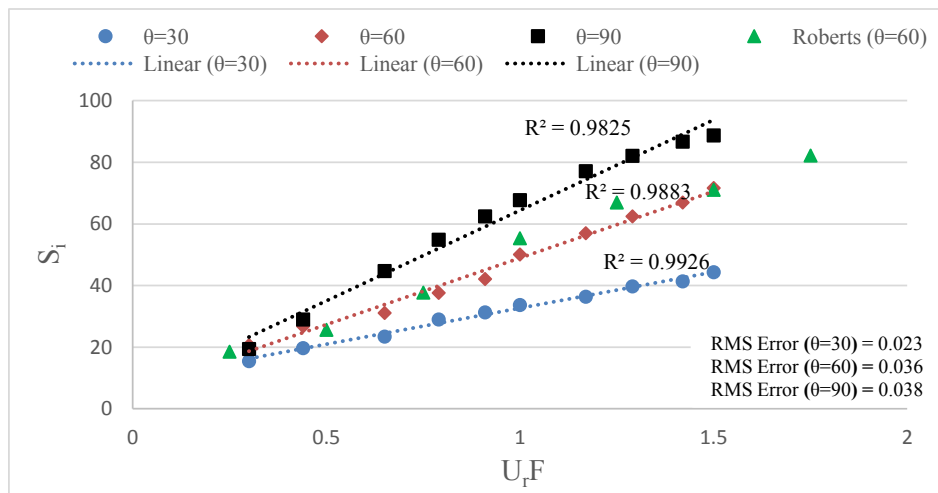
رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل ۱۵ نتایج مدل برای تخلیه پساب با زاویه ۶۰ درجه همخوانی بسیار خوبی با مطالعه رابرتز و تامز [۸] دارد. با افزایش سرعت جریان محیط، میزان رقیق‌سازی در تمام تخلیه‌کننده‌ها (با زاویه بررسی شده) تقریباً به صورت خطی و با خطای ناچیزی بین داده‌ها و رگرسیون خطی، افزایش می‌یابد. در سرعت‌های محیطی کم ($U_T F < 0.5$)، زاویه ۶۰ درجه بالاترین میزان رقیق‌سازی را دارد و در سرعت‌های محیطی بالا ($U_T F > 0.5$) زاویه

۳-۳- رقیق‌سازی (S_i)

در این قسمت به بررسی تاثیر میزان سرعت جریان محیط و همچنین تاثیر زاویه بین جهت جریان محیط و جهت تخلیه پساب بر میزان رقیق‌سازی پساب چگال در نقطه برخورد به زمین پرداخته می‌شود. نتایج برای پساب چگال تخلیه شده با اعداد فرود ۱۹/۵۳ و ۲۵، از تخلیه‌کننده‌هایی با زاویه‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه در محیط پویا ارائه شده است. شکل ۱۵ تاثیر جریان محیطی هم‌راستا با جهت تخلیه پساب، بر میزان



(الف)



(ب)

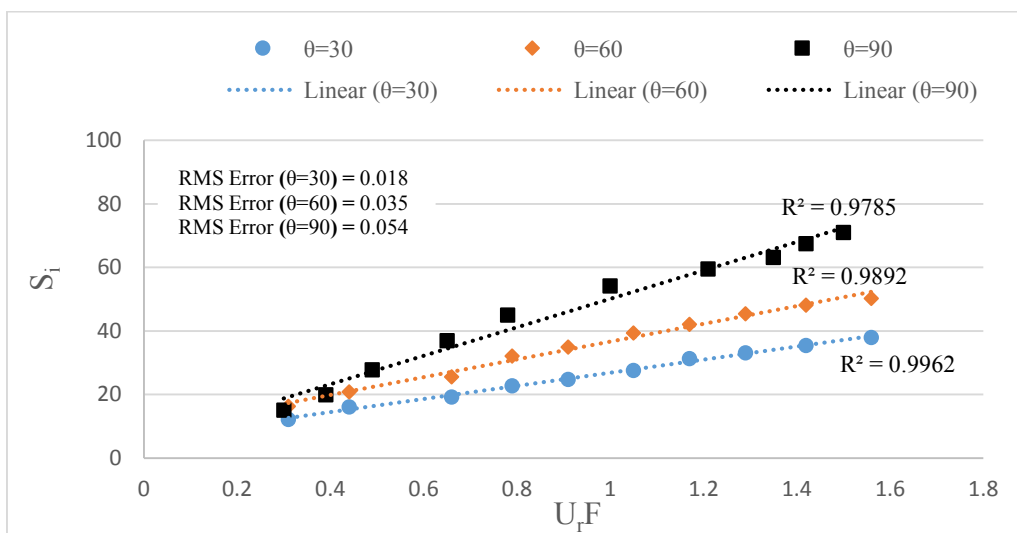
شکل ۱۶. مقایسه میزان رقیق‌سازی پساب چگال تخلیه‌شده با زاویه‌های مختلف در حالت $\phi = 90^\circ$ (الف) $F = 19.53$ (ب) $F = 25$.

Fig. 16. Comparison of dilution of discharged dense effluent with different angles in the case of $\phi=90^\circ$. A) $F=19.53$. B) $F=25$.

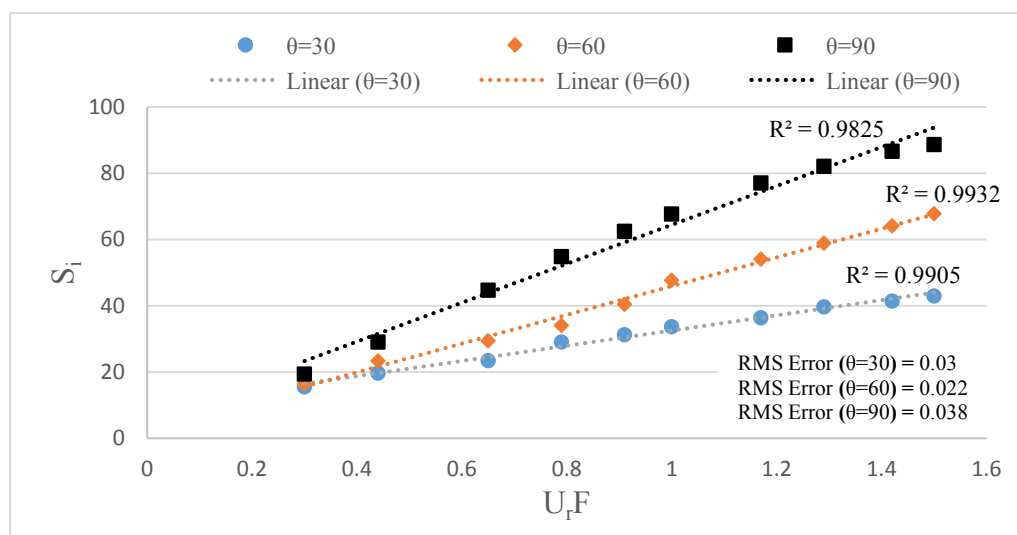
رقیق‌سازی افزایش می‌یابد.

شکل ۱۶ مقایسه میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین را برای زاویه‌های مختلف تخلیه‌کننده و در سرعت‌های محیطی مختلف عمود بر جهت تخلیه پساب ($\phi = 90^\circ$) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۶، نتایج به دست آمده توسط مدل CorJet برای تخلیه پساب با زاویه 60° درجه، همخوانی مطلوبی با مطالعه رابرتز و تامز [۸] دارد. میزان رقیق‌سازی پساب تخلیه شده در هر دو عدد فرود (به خصوص در سرعت‌های محیطی بالا $U_i F > 0.5$) با افزایش زاویه تخلیه‌کننده از 0° تا 90° درجه، به صورت خطی و با خطای رگرسیون خطی ناچیزی افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج با نتایج

90° درجه رقیق‌سازی بالاتری را نشان می‌دهد. طبق نتایج، در سرعت‌های محیطی بالا ($U_i F > 0.5$)، هر چه زاویه تخلیه پساب افزایش می‌یابد میزان رقیق‌سازی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه تخلیه پساب، ارتفاع سقوط پساب (پلوم) بیشتر شده و پساب بیشتر تحت تاثیر رقیق‌سازی توسط جریان محیط قرار می‌گیرد. در این حالت مقدار مسافتی که پساب توسط جریان محیط منتقل می‌شود افزایش یافته و در نتیجه میزان رقیق‌سازی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در تخلیه پساب‌های چگال در مکان‌های با سرعت محیطی بالا ($U_i F > 0.5$)، هر چه زاویه تخلیه‌کننده نسبت به افق بیشتر باشد ارتفاع سقوط پلوم و مسافت طی شده پساب بیشتر می‌شود و در نتیجه میزان



(الف)



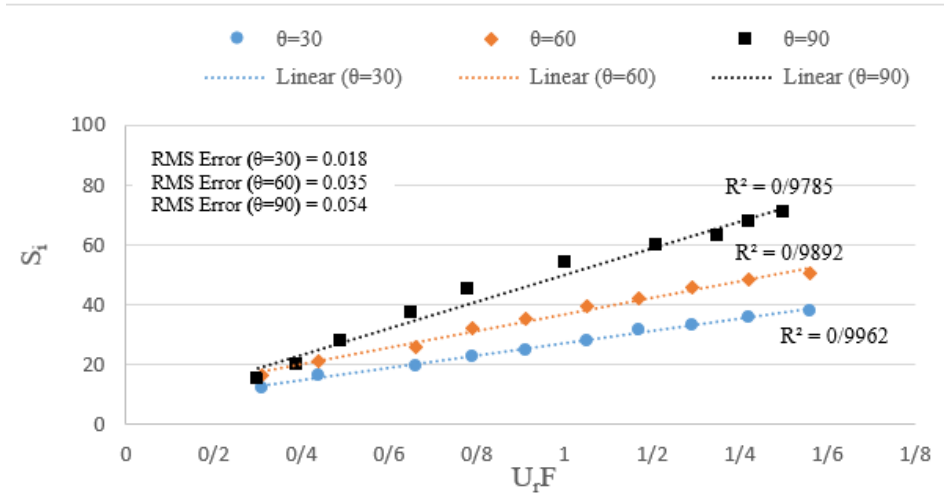
(ب)

شکل ۱۷. مقایسه میزان رقیق‌سازی پساب چگال تخلیه‌شده با زاویه‌های مختلف در حالت $\phi = 180^\circ$ (الف) $F = 19.53$ (ب) $F = 25$.

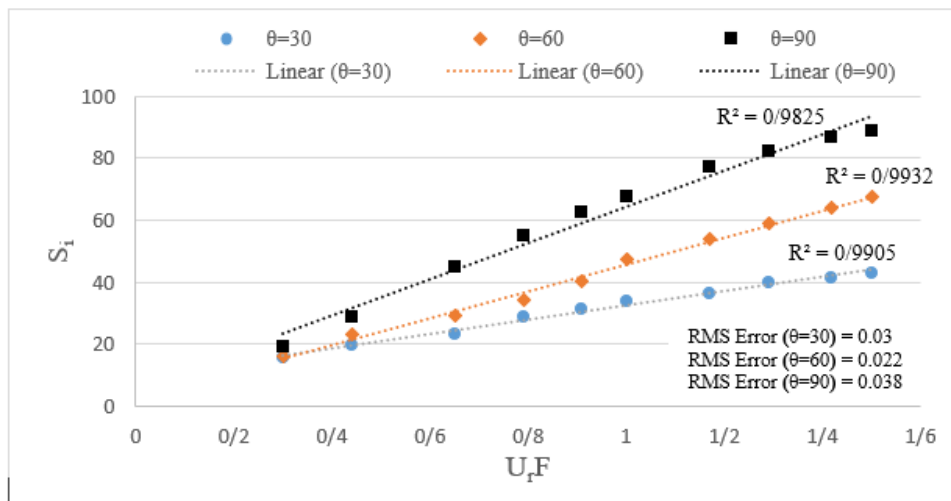
Fig. 17. Comparison of dilution of discharged dense effluent with different angles in the case of $\phi=180^\circ$. A) $F=19.53$. B) $F=25$.

باعث می‌شود ارتفاع سقوط پلوم نیز در حالت $\phi = 90^\circ$ نسبت به حالت جریان همراستا کاهش یابد. بنابراین میزان رقیق‌سازی پساب تخلیه شده در جهت عمود بر جریان محیط، نسبت به تخلیه پساب همراستا با جریان محیط به دلیل کاهش طول مسیر حرکت جت، مقداری کاهش می‌یابد. میزان رقیق‌سازی (در نقطه برخورد به زمین) پساب تخلیه شده در جهت مخالف جهت جریان محیط ($\phi = 180^\circ$) برای زاویه‌های مختلف تخلیه کننده و در سرعت‌های محیطی مختلف در شکل ۱۷ مقایسه شده‌اند.

جریان همراستا نشان می‌دهد که رقیق‌سازی پساب در حالت جریان محیطی عمود بر جت خروجی، نسبت به حالت جریان همراستا مقداری کاهش پیدا می‌کند. طبق نتایجی که در قسمت‌های قبل به دست آمد جریان محیط در حالت همراستا با جهت تخلیه پساب، باعث افزایش طول حرکت جت می‌شود، در صورتی که اگر جریان محیط عمود بر جت خروجی باشد ($\phi = 90^\circ$)، نیرویی که جریان محیط بر جت وارد می‌کند باعث انحراف نسبی جت شده و طول مسیر حرکت جت کاهش می‌یابد. کاهش طول حرکت جت



(الف)



(ب)

شکل ۱۸. مقایسه میزان رقیق‌سازی پساب چگال تخلیه شده با زاویه‌های مختلف در حالت $\phi = 180^\circ$ (الف. $F = 19.53$ (ب. $F = 25$)

Fig. 18. Comparison of dilution of dense effluent discharged at different angles for the case of $\phi = 180^\circ$. A) $F = 19.53$. B) $F = 25$

جهت مخالف جهت جریان محیط، نسبت به تخلیه پساب در حالت هم‌راستا و عمود بر جریان محیط کاهش پیدا می‌کند. در این نوع تخلیه ($\phi = 180^\circ$)، با توجه به جهت جریان محیط و جهت تخلیه پساب، طول حرکت جت در محیط آبی کاهش می‌یابد که این موضوع باعث کاهش هم‌آوری سیال محیط به درون جت می‌شود و در نتیجه میزان رقیق‌سازی پساب کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج به دست آمده توسط مدل، می‌توان رابطه‌ای بین

در این حالت نیز همانند حالت‌های $\phi = 90^\circ$ و $\phi = 0^\circ$ در محل‌هایی با سرعت محیطی کم ($U_r F < 0.5$)، زاویه تخلیه کننده تاثیر چندانی بر اختلاط پساب ندارد و زاویه ۶۰ درجه بیشترین میزان رقیق‌سازی را دارد. اما در محل‌هایی با سرعت محیطی بالا ($U_r F > 0.5$)، اختلاط پساب کاملاً تحت تاثیر زاویه تخلیه کننده قرار می‌گیرد و میزان رقیق‌سازی با افزایش زاویه تخلیه کننده به صورت تقریباً خطی و با خطای معیار رگرسیون خطی نزدیک به صفر، افزایش می‌یابد. میزان رقیق‌سازی پساب تخلیه شده در

جدول ۲. مقادیر پارامتر A و B رابطه ۴ برای حالت‌های مختلف تخلیه پساب

Table 2. Parameter values A and B of Equation 4 for different effluent discharge modes.

	$\theta = 30^\circ$			$\theta = 60^\circ$			$\theta = 90^\circ$
	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 180^\circ$	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 180^\circ$	$0^\circ < \phi < 180^\circ$
A	۱	۰/۹۸	۰/۹۷	۱/۹	۱/۷۸	۱/۵۸	۲/۴
B	۱۲/۵	۹/۵	۸	۶	۶	۶	۲/۵

جلو و یا پشت تخلیه‌کننده با زمین برخورد می‌کند. با افزایش سرعت جریان محیط، میزان رقیق‌سازی پساب تخلیه شده به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. طبق نتایج، در سرعت‌های محیطی کم ($U_r F < 0/5$)، پساب تخلیه شده از تخلیه‌کننده با زاویه ۶۰ درجه، تماس بیشتری با محیط آبی داشته و اختلاط بیشتری با محیط آبی صورت می‌گیرد. اما در سرعت‌های محیطی زیاد ($U_r F > 0/5$)، هر چه زاویه تخلیه‌کننده نسبت به افق بیشتر باشد، پساب تخلیه شده همراه جریان محیط مسیر افقی بیشتری را طی می‌کند که این مسئله باعث افزایش میزان رقیق‌سازی می‌شود. نتایج نشان داد بهترین حالت تخلیه پساب چگال (برای دسترسی به بیشترین مقدار رقیق‌سازی) در محل‌های با سرعت محیطی بالا ($U_r F > 0/5$)، استفاده از تخلیه‌کننده‌هایی با زاویه ۹۰ درجه (قائم) است.

۵- فهرست علائم

D	قطر تخلیه‌کننده، m
U_a	سرعت جریان محیط، m/s
U_j	سرعت خروجی پساب از تخلیه‌کننده، m/s
$U_r = U_a / U_j$	سرعت نسبی
S_i	میزان رقیق‌سازی پساب در نقطه برخورد به زمین
X_i	فاصله افقی نقطه برخورد پساب به زمین از تخلیه‌کننده، m
X_m	فاصله افقی محل ارتفاع صعود ماکزیمم جت از تخلیه‌کننده، m
F	عدد فرود تخلیه
Y_m	مقدار انحراف محل ارتفاع صعود ماکزیمم جت از راستای تخلیه‌کننده، m
ϕ	زاویه بین جهت تخلیه پساب و جهت جریان محیط
θ	زاویه دهانه تخلیه‌کننده نسبت به افق
ΔT	اختلاف دمای محیط و پساب، C
H	عمق محل تخلیه، m

میزان رقیق‌سازی و سرعت جریان محیط به صورت زیر ارائه نمود:

$$S_i = A(U_r F^2) + B \quad (4)$$

مقادیر A و B برای حالت‌های مختلف تخلیه پساب ($\phi = 0^\circ$ ، $\phi = 90^\circ$ و $\phi = 180^\circ$) در جدول ۲ آورده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل انتگرالی CorJet به بررسی تاثیر میزان سرعت و جهت جریان محیط بر مقدار X_i ، X_m و S_i پرداخته شد. طبق نتایج به دست آمده سرعت و جهت جریان محیط عامل مهمی در تغییر دینامیک و اختلاط پساب چگال است. وقتی پساب در جهت جریان محیط تخلیه شود، جریان محیط باعث افزایش طول مسیر حرکت پساب در حالت جت و پلوم می‌شود و به همین دلیل میزان رقیق‌سازی پساب افزایش می‌یابد. اگر جهت تخلیه پساب و جهت جریان محیط با هم تفاوت داشته باشند ($\phi \neq 0^\circ$)، نیروی وارده از طرف جریان محیط باعث انحراف و کاهش طول مسیر حرکت جت می‌شود که این مسئله باعث کاهش مقدار X_i می‌شود. هر چه زاویه بین جهت تخلیه پساب و جهت جریان محیط بیشتر شود ($0^\circ < \phi < 180^\circ$)، مقدار طول مسیر حرکت جت کاهش می‌یابد و بنابراین میزان رقیق‌سازی پساب کاهش می‌یابد. در صورتی که پساب در خلاف جهت جریان محیط تخلیه شود، طول مسیر حرکت جت و میزان رقیق‌سازی در مقایسه با دیگر زاویه‌های بین جهت تخلیه پساب و جهت جریان محیط ($0^\circ < \phi < 180^\circ$)، کمترین مقدار را خواهند داشت. در این حالت ($\phi = 180^\circ$)، با توجه به کم یا زیاد بودن سرعت جریان محیط، پساب در

water. Journal of Hydraulic Engineering. 2015 Jul 2;142(1):04015033.

- [10] Jiang B, Law AW, Lee JH. Mixing of 30 and 45 inclined dense jets in shallow coastal waters. Journal of Hydraulic Engineering. 2013 Aug 22;140(3):241-53.
- [11] Abessi O, Roberts PJ. Multiport diffusers for dense discharges. Journal of Hydraulic Engineering. 2014 Apr 1;140(8):04014032.
- [12] Loya-Fernández Á, Ferrero-Vicente LM, Marco-Méndez C, Martínez-García E, Vallejo JJ, Sánchez-Lizaso JL. Quantifying the efficiency of a mono-port diffuser in the dispersion of brine discharges. Desalination. 2018 Apr 1;431:27-34.
- [13] Papakonstantis IG, Tsatsara EI. Mixing Characteristics of Inclined Turbulent Dense Jets. Environmental Processes. 2019 Jun 15;6(2):525-41.
- [14] Jirka GH, Doneker RL, Hinton SW. 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.
- [15] Palomar P, Lara JL, Losada IJ, Rodrigo M, Álvarez A. Near field brine discharge modelling part 1: Analysis of commercial tools. Desalination. 2012 Mar 30;290:14-27.
- [16] Bleninger T, Jirka GH. Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants. Desalination. 2008 Mar 1;221(1-3):585-97.
- [17] Cipollina A, Brucato A, Grisafi F, Nicosia S. Bench-scale investigation of inclined dense jets. Journal of hydraulic engineering. 2005 Nov;131(11):1017-22.
- [18] Choi KW, Lai CC, Lee JH. Mixing in the intermediate field of dense jets in cross currents. Journal of Hydraulic Engineering. 2016 Jan 1;142(1):04015041.
- [19] Gungor E, Roberts PJ. Experimental studies on vertical dense jets in a flowing current. Journal of Hydraulic Engineering. 2009 Jun 1;135(11):935-48.

اختلاف دمای محیط و پساب، C	ΔT
عمق محل تخلیه، m	H
پارامتر ثابت رابطه رقیق سازی (رابطه ۴)	B
ضریب شیب رابطه رقیق سازی (رابطه ۴)	A
چگالی پساب، kg/m^3	ρ_0
چگالی محیط، kg/m^3	ρ_a

منابع

- [1] Shahabi MP, McHugh A, Ho G. Environmental and economic assessment of beach well intake versus open intake for seawater reverse osmosis desalination. Desalination. 2015 Feb 2;357:259-66.
- [2] Jiang B, Law AW, Lee JH. Mixing of 30 and 45 inclined dense jets in shallow coastal waters. Journal of Hydraulic Engineering. 2014 Mar 1;140(3):241-53.
- [3] Miller S, Shemer H, Semiat R. Energy and environmental issues in desalination. Desalination. 2015 Jun 15;366:2-8.
- [4] Einav R, Lokiec F. Environmental aspects of a desalination plant in Ashkelon. Desalination. 2003 Aug 1;156(1-3):79-85.
- [5] Bleninger T. Coupled 3D hydrodynamic models for submarine outfalls: Environmental hydraulic design and control of multiport diffusers. PhD Thesis, University of Karlsruhe. Germany; 2007.
- [6] Zeitoun MA, McIlhenny WF. Conceptual designs of outfall systems for desalination plants. In Offshore Technology Conference 1971 Jan 1. Offshore Technology Conference. Texas.
- [7] Pincince AB, List EJ. Disposal of brine into an estuary. Journal (Water Pollution Control Federation). 1973 Nov 1:2335-44.
- [8] Roberts PJ, Toms G. Inclined dense jets in flowing current. Journal of Hydraulic Engineering. 1987 Mar;113(3):323-40.
- [9] Abessi O, Roberts PJ. Dense jet discharges in shallow

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

V. Babaiynejad, B. Khorsandi, *Influence of ambient flow on the behavior of dense effluent discharged into the water environment*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(9) (2021) 4081-4102.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18190.6798](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18190.6798)



