

Journal of Water and Wastewater, Vol. 32, No.2, pp: 91-102

Experimental Study of Geometrical Characteristics of Free and Boundary-Affected 30° Inclined Dense Jets in Unstratified Stagnant Environments

M. M. Ramezani¹, O. Abessi², A. Rahmani Firoozjaee³

1. MSc Student, School of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
2. Assist. Prof., School of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
(Corresponding Author) oabessi@nit.ac.ir
3. Assist. Prof., School of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

(Received July 10, 2020 Accepted Oct. 14, 2020)

To cite this article:

Ramezani, M. M., Abessi, O., Rahmani Firoozjaee, A. 2021. "Experimental study of geometrical characteristics of free and boundary-affected 30° inclined dense jets in unstratified stagnant environments"
Journal of Water and Wastewater, 32(2), 91-102. Doi: 10.22093/wwj.2020.238900.3047. (In Persian)

Abstract

Submerged outfalls by discharging buoyant jets in the depth of seawater are widely used for the disposal of various types of effluents into the marine environment. A 60° inclined jet to the horizontal is accepted as the optimal angle of inclination for dense flow, but this angle is comparatively problematic for shallow waters; hence smaller inclination is preferred. The present paper investigates the geometrical characteristics of free (far from boundaries) and boundary-affected 30° inclined dense jets in unstratified stagnant ambient using laser-induced fluorescence technique. The major geometrical characteristics, including the centerline trajectory, centerline peak, terminal rise height, and horizontal location of return point, were analyzed by normalized data and plots. The free jets generally follow trends in previous experimental studies. It was observed that a dramatic reduction in the bed proximity parameter results in an asymmetry in the centerline trajectory and a decrease in the horizontal distance of the return point.

Keywords: Marine Outfalls, Buoyant Jets, Dense Jets, Coanda Effect.



مجله آب و فاضلاب، دوره 32، شماره 2، صفحه: 91-102

مطالعه آزمایشگاهی مشخصات هندسی جت‌های سنگین مورب ۳۰ آزاد و متأثر از بستر در محیط‌های ساکن لایه‌بندی نشده

محمد مهدی رضانی^۱، عزیر عباسی^۲، علی رحمانی فیروزجایی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
 ۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
 (نویسنده مسئول) oabessi@nit.ac.ir
 ۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

(دریافت ۹۹/۴/۲۰ پذیرش ۹۹/۷/۲۳)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

رضانی، م. م.، عباسی، ع.، رحمانی فیروزجایی، ع.، ۱۴۰۰، "مطالعه آزمایشگاهی مشخصات هندسی جت‌های سنگین مورب ۳۰ آزاد و متأثر از بستر در محیط‌های ساکن لایه‌بندی نشده" مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۲)، ۹۱-۱۰۲. [Doi: 10.22093/wwj.2020.238900.3047](https://doi.org/10.22093/wwj.2020.238900.3047)

چکیده

تخلیه‌کننده‌های دریایی مستغرق با تخلیه جریان شناور در عمق دریا به صورت گسترده برای دفع انواع پساب‌های تولیدی در محیط‌های دریایی استفاده می‌شوند. برای پساب‌های سنگین، تخلیه مورب تحت زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق به عنوان زاویه‌ای با بهترین عملکرد مورد پذیرش عمومی قرار گرفته است، اما این زاویه به دلیل ارتفاع زیاد حاصله برای آب‌های ساحلی کم عمق مشکل‌آفرین بوده و زوایای کوچکتر در این شرایط ارجحیت دارند. در این پژوهش مشخصات هندسی تخلیه جت‌های سنگین ۳۰ درجه آزاد (دور از مرزهای جانبی) و متأثر از بستر در محیط ساکن و لایه‌بندی نشده را با استفاده از روش فلورسنت تحریک شده با لیزر بررسی شد. مهم‌ترین مشخصات هندسی جریان شامل خط سیر جت، حداکثر ارتفاع خط مرکزی، حداکثر ارتفاع صعود جریان و فاصله افقی نقطه بازگشت از طریق داده‌ها و نمودارهای بی‌بعد ارائه و مورد بررسی مقایسه‌ای قرار گرفتند. جت‌های سنگین آزاد به طور کلی از روند گزارش شده در پژوهش‌های آزمایشگاهی پیشین پیروی می‌کنند، اما مشاهده شد که کاهش فاصله نازل از بستر و تأثیر مرز ثابت در رفتار جریان، منجر به عدم تقارن در خط سیر جریان و کاهش فاصله افقی نقطه بازگشت می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تخلیه‌کننده‌های دریایی، جت شناور، جت سنگین، اثر کواندا

۱- مقدمه

که در آن جریان هم‌زمان تحت تأثیر مومنتم اولیه و شناوری جریان خروجی است. در اثر اختلاط پساب با آب دریا که به واسطه این فرایند رخ می‌دهد، میزان غلظت اولیه پساب به مقدار مطلوبی کاهش خواهد یافت و آسیب کمتری به جوامع گیاهی و جانوری در

تخلیه‌کننده‌های دریایی مستغرق، سازه‌هایی به شکل لوله‌های تک یا چند مجرایی هستند که در کف دریا کار گذاشته می‌شوند و پساب‌ها را در فاصله کافی از ساحل، در یک یا چند نقطه تخلیه می‌کنند. رفتار جریان در این سازه‌ها به صورت جت‌های شناور است



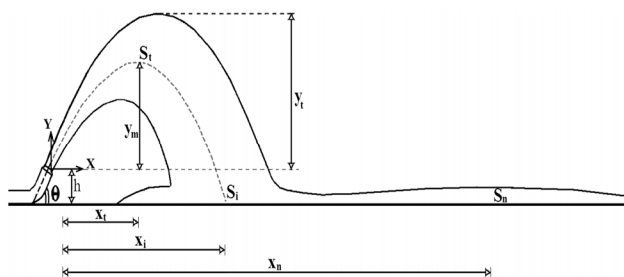


Fig. 1. A view of an inclined dense jet (Abessi and Roberts, 2015)

شکل ۱- نمایی از یک جت سنگین مورب (Abessi and Roberts, 2015)

تخلیه با بستر برخورد می‌کند. در طول خط سیر جریان از نازل تا نقطه برخورد، غلظت میانگین ابتدا کاهش و سپس در یک لایه نازک روی بستر به صورت موضعی افزایش می‌یابد که این افزایش موضعی غلظت به افزایش تناوب آشفتگی و انباشت المان‌های سیال شور در نزدیکی بستر نسبت داده می‌شود (Abessi and Roberts, 2015). پس از برخورد با بستر، جریان که انرژی اولیه آن تا حد زیادی مستهلک شده است، به صورت یک جریان چگال به حرکت خود روی بستر ادامه می‌دهد تا در انتهای ناحیه میدان نزدیک به حداکثر ترقیق خود در محیط ناشی از مشخصات اولیه جریان می‌رسد. بنابر تعریف، انتهای میدان نزدیک جایی است که میزان نوسانات غلظت به کمتر از ۵ درصد مقدار میانگین برسد (Roberts et al., 1997).

در تأسیساتی که حجم پساب خروجی زیاد باشد، به طور معمول با استفاده از تخلیه‌کننده‌های تک‌مجریایی نمی‌توان استانداردهای محیط‌زیستی را ارضا کرد و در این شرایط از تخلیه‌کننده‌های چند مجریایی و یا رز شکل استفاده می‌شود. این دست از تخلیه‌کننده‌ها بهتر است به صورتی طراحی شوند که از برخورد و ادغام جریان خروجی از مجاری تخلیه اجتناب شود، چراکه در این حالت اختلاط به خوبی انجام نشده، ارتفاع صعود و در نهایت میزان ترقیق در نقطه برخورد به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. مشاهده شده است چنانچه پارامتر بی بعد $s/d.Fr_d$ که s فاصله بین مجاری تخلیه و Fr_d عدد فرود چگالی هستند، بیشتر از ۲ باشد، آنگاه ادغامی بین جریان خروجی از مجاری تخلیه انجام نشده و رفتار جریان خروجی از هر مجرای تخلیه مشابه یک تخلیه‌کننده تک‌مجریایی بوده و حداکثر میزان ترقیق و اختلاط اتفاق می‌افتد (Abessi and Roberts, 2017, Abessi and Roberts, 2018).

محدوده تخلیه می‌رسد (Abessi et al., 2012a, Abessi et al., 2012b).

فرایند تخلیه به سه فاز اختلاط در میدان نزدیک، اختلاط در میدان دور و اختلاط درازمدت تقسیم‌بندی می‌شود که تنها اختلاط در میدان نزدیک تحت کنترل مهندس طراح است. میزان اختلاط در میدان نزدیک، یعنی جایی که مشخصات تخلیه‌کننده مانند شار مومنت، شار شناوری و شکل دهانه تخلیه‌کننده، تعیین‌کننده رفتار جریان است، بسیار بیشتر از دو فاز دیگر است (Shacheri et al., 2018, Takdastan et al., 2005).

به جریان در حالت خاصی از تخلیه که در آن پساب خروجی از تخلیه‌کننده دارای چگالی بیشتری نسبت به محیط پذیرنده است مانند تخلیه شورابه حاصل از نمک‌زدایی آب دریا جت سنگین^۱ یا جت با شناوری منفی^۲ اطلاق می‌شود. تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی جت‌های سنگین برای یافتن حالت بهینه تخلیه، از جمله بهترین زاویه تمایل نسبت به افق انجام شده است. در پژوهش‌های اولیه توافقی میان پژوهشگران بین زاویه ۴۵ تا ۶۰ درجه به عنوان بهترین زاویه تمایل وجود نداشته است (Cederwall, 1968, Zeitoun et al., 1970)، اما اکنون به استناد پژوهش‌های آزمایشگاهی وسیعی که در این حوزه انجام شده است، تخلیه با زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق برای داشتن طولانی‌ترین خط سیر و بیشترین میزان ترقیق در نقطه برخورد به عنوان یک استاندارد عملی مورد پذیرش عمومی قرار گرفته است (Abessi and Roberts, 2015, Pincince and List, 1973, Roberts and Toms, 1987, Roberts et al., 1997).

البته پژوهش‌های دیگری هم وجود دارد که به جای یک زاویه خاص، بازه‌ای از زوایا را به دلیل ناچیز بودن تغییرات میزان ترقیق در نقطه برخورد آنها، به عنوان حالت بهینه تخلیه پیشنهاد شده است (Lai and Lee, 2012, Oliver et al., 2013).

در شکل ۱، نمایی از یک جت سنگین نشان داده شده است. جریان با سرعت اولیه U_0 و زاویه θ نسبت به افق از نازلی با قطر d در محیط دریا تخلیه می‌شود. به دلیل مومنت اولیه، جریان با رفتاری جت مانند تا ارتفاع y_i صعود می‌کند. پس از این نقطه جریان با رفتاری پلوم مانند به سمت بستر سقوط کرده و در فاصله x_i از منبع

¹ Dense Jet

² Negatively Buoyant Jet



با استفاده از روش فلورسنت تحریک شده با لیزر^۱ بررسی شد. علاوه بر جت‌های آزاد (جت‌هایی که دور از مرزهای جامد قرار دارند)، جت‌های مجاور به بستر یعنی جت‌هایی که بر اساس پژوهش شائو و لاو، پارامتر مجاورت بستر آنها، y_0/L_M در زاویه ۳۰ درجه کمتر از ۰/۱۵ است (Shao and Law, 2010) و تأثیرات احتمالی اثر کواندا بر مشخصات هندسی این حالت خاص از تخلیه نیز بررسی شد. به این منظور دو سری آزمایش توسعه داده شد. در سری اول نازل در فاصله کافی از بستر قرار گرفت که رفتار جریان خروجی تداعی‌کننده جت‌های آزاد باشند. در سری دیگر، نازل در فاصله‌ای بسیار نزدیک به بستر قرار گرفت تا امکان وقوع اثر کواندا و تأثیر احتمالی آن بر روی مشخصات هندسی جریان از طریق مقایسه این دو سری آزمایش امکان‌پذیر شود.

میزان مجاورت نازل به بستر y_0 توسط دو پارامتر قطر نازل d و مقیاس طولی جت به پلوم L_M بی‌بعد می‌شود. به y_0/L_M پارامتر مجاورت بستر^۲ اطلاق می‌شود. مقیاس طولی جت به پلوم فاصله‌ای است از دهانه نازل که شناوری، مومنتی تقریباً به اندازه شار مومنت اولیه تولید می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود (Roberts et al., 1997)

$$L_M = \frac{M_0^{3/4}}{B_0^{1/2}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} d Fr_d \quad (1)$$

که در آن

شار مومنت M_0 ، شار شناوری B_0 و عدد فرود چگالی Fr_d از معادلات زیر به دست می‌آیند

$$M_0 = U_0 Q_0 \quad (2)$$

$$B_0 = \rho_0 g_0 Q_0 \quad (3)$$

$$Fr_d = \frac{U_0}{\sqrt{g_0 d}} \quad (4)$$

$$Q_0 = \frac{1}{4} \pi d^2 U_0 \quad (5)$$

$$g_0 = g \left(\frac{\Delta \rho_0}{\rho_a} \right) = g \left(\frac{\rho_0 - \rho_a}{\rho_a} \right) \quad (6)$$

عمق در محل تخلیه و همچنین ارتفاع تخلیه‌کننده از بستر از جمله پارامترهای تأثیرگذار در طراحی تخلیه‌کننده‌های دریایی هستند. اگرچه تخلیه با زاویه ۶۰ درجه به دلیل داشتن بیشترین میزان ترقیق در نقطه برخورد با بستر توصیه شده است، اما ارتفاع صعود جریان در این حالت نسبتاً زیاد بوده و امکان برخورد جریان با سطح آب در سواحل کم عمق (زمانی که $d.Fr_d/H$ که در آن H عمق آب است بیشتر از ۰/۶۴ باشد) وجود دارد (Abessi and Roberts, 2016)

برخورد جریان با سطح آب باعث به هم ریختگی سطح آب و در شرایطی بسته به مقدار $d.Fr_d/H$ منجر به کاهش اختلاط و ترقیق شورابه می‌شود. از این رو در این سواحل استفاده از نازل با زوایای کوچکتر پیشنهاد می‌شود (Shao, 2010, Abessi and Roberts, 2016)

در زوایای کوچکتر اما زمانی که نازل در فاصله‌ای نزدیک به یک سطح نفوذناپذیر قرار می‌گیرد، نفوذ سیال محیطی به درون جریان از یک سمت به صورت قابل ملاحظه‌ای محدود می‌شود. در حالی که از جهات دیگر چنین محدودیتی وجود ندارد. در نتیجه بر اساس اصل برنولی یک اختلاف فشار در مقطع جت سنگین ایجاد شده و فشار پایین منجر به انحراف جت سنگین به سمت بستر می‌شود. این پدیده در ادبیات فنی به اثر کواندا مشهور است. وقوع این پدیده و تأثیر آن بر روی رفتار جت‌های افقی که در مجاورت بستر تخلیه می‌شوند در پژوهش‌های متعددی بررسی و مشاهده شده است که این پدیده باعث چسبیدن لبه جت در محلی که دارای محدودیت در نفوذ سیال محیطی است به بستر و کاهش میزان ترقیق جریان می‌شود (Sobey et al., 1988, Law and Herlina, 2002). این در حالی است که بررسی کواندا در جت‌های سنگین مورب بسیار محدود بوده و بنابر اطلاع نویسندگان تنها محدود به یک پژوهش آزمایشگاهی می‌شود.

شائو و لاو گزارش کردند در جت‌های سنگین مورب ۳۰ درجه، در صورتی که پارامتر بی‌بعد y_0/L_M که در آن y_0 فاصله دهانه نازل تا بستر و L_M مقیاس طولی جت به پلوم است، کمتر از ۰/۱۵ باشد، وقوع این پدیده باعث عدم تقارن خط سیر جت و کاهش میزان ترقیق می‌شود (Shao and Law, 2010).

در این پژوهش مشخصات هندسی جت‌های سنگین مورب ۳۰ درجه در محیط‌های ساکن لایه‌بندی نشده به صورت آزمایشگاهی و

¹ Laser Induced Fluorescence (LIF)

² Bed Proximity Parameter



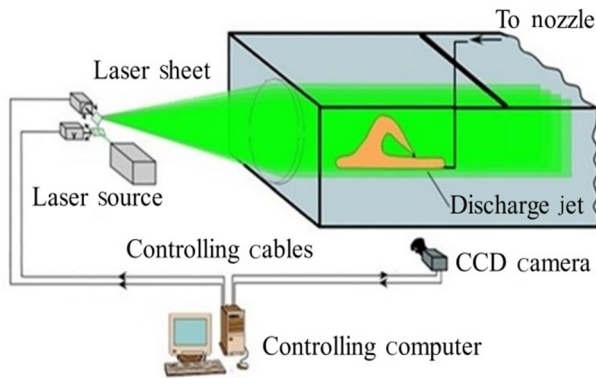


Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup

شکل ۲- نمایش شماتیک از تجهیزات آزمایشگاهی

به دست می‌آیند در نرم‌افزار NIT-LIF تصحیح شده و مقدار متوسط میدان غلظت به عنوان خروجی برای تحلیل‌های بعدی استفاده شد.

در شکل ۳-a و ۳-b به ترتیب می‌توان تصویر برداشت شده از میدان جریان توسط دوربین CCD در یک لحظه خاص و همچنین کانتور غلظت میانگین خروجی از نرم‌افزار NIT-LIF را مشاهده کرد. برای اطلاعات بیشتر در مورد سیستم آزمایشگاهی و نحوه تحلیل تصاویر به ترتیب می‌توان به عابسی و همکاران و تیان و رابرتز مراجعه کرد (Abessi et al., 2020, Tian and Roberts, 2003).

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش به منظور بررسی مشخصات هندسی تخلیه جت‌های سنگین مورب ۳۰ درجه در حالت آزاد و نزدیک به بستر در مجموع ۶ آزمایش در دو سری انجام شد. مشخصات این آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در این جدول و در ادامه این پژوهش آزمایش‌هایی که در سری آزاد قرار دارند با حرف F و آزمایش‌هایی که در سری نزدیک به بستر قرار دارند با حرف N مشخص می‌شوند. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، فاصله مرکز نازل‌ها تا بستر در سری N برابر ۲/۱۰ میلی‌متر و در سری F برابر ۲۲/۳۰ میلی‌متر است. از این رو پارامترهای مجاورت بستر در سری N بسیار کوچکتر از سری F هستند که این امر برای قضاوت در میزان تأثیرگذاری فاصله نازل تا بستر بر روی مشخصات هندسی جریان است. علت انتخاب زاویه ۳۰ درجه نسبت به افق در این پژوهش به دلیل ارجحیت نسبی این زاویه در آب‌های کم عمق نسبت به

که در آنها

ρ_a و ρ_0 ، $\Delta\rho_0$ ، g_0 ، g ، U_0 ، Q_0 جت، شتاب گرانشی، شتاب گرانشی اصلاح شده، تفاوت چگالی اولیه، چگالی جت و چگالی سیال محیطی هستند.

۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در مخزنی به ابعاد ۱/۸ متر طول، ۱/۵ متر عرض و ۱/۰ متر عمق انجام شد. بر روی کف مخزن یک بستر کاذب با قابلیت تنظیم ارتفاع برای تنظیم ارتفاع نازل تا بستر و جلوگیری از تأثیر جریان برگشتی از دیواره مخزن بر روی میدان جریان قرار داده شد. در انتهای این بستر کاذب شکافی ایجاد شد تا نازل در آن قرار بگیرد. نازل از طریق لوله‌هایی برای کنترل میزان دبی جریان خروجی به فلومتر، پمپ و مخزن حاوی مخلوط آب شور و فلورسنت متصل شد. در این پژوهش Rhodamine 6G با غلظت ۵۰۰ میکروگرم در لیتر به عنوان ماده فلورسنت، نمک سدیم کلرید برای افزایش چگالی آب و همچنین سدیم تیوسولفات برای کلرزایی از آب استفاده شد.

برای اندازه‌گیری میدان غلظت از سامانه فلورسنت تحریک شده با لیزر موجود در آزمایشگاه هیدرولیک محیط زیست دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل که نمایشی از آن در شکل ۲ نشان داده شده، استفاده شد. اساس روش LIF بر این فرض است که تغییرات شدت نور دریافتی از ماده فلورسنت متناسب با تغییرات غلظت این ماده است. سیستم مورد استفاده متشکل است از یک لیزر با توان ۰/۱ وات و طول موج ۵۱۴ نانومتر که به کمک آینه‌ای که با سرعت بسیار زیادی نوسان می‌کند، یک چشمه نور صفحه‌ای ایجاد کرده و همراه با سامانه کنترلی و دوربین CCD به یک پردازشگر مرکزی برای کنترل فرایندهای آزمایش متصل شد.

دوربین CCD مورد استفاده از محدوده بررسی شده با فرکانس ۱۰۰ فریم بر ثانیه و با دقت ۶۴۰ در ۴۸۰ پیکسل تصویربرداری کرده و به پردازشگر مرکزی می‌فرستد. این تصاویر از نوع خاکستری بوده که در آنها شدت نور هر پیکسل تصویر از سیاه مطلق تا سفید کامل در ۲۵۶ حالت مختلف متغیر است. به منظور جلوگیری از تداخل نور محیطی، آزمایش‌ها در اتاق تاریک انجام شد و بر روی لنز دوربین فیلتر نارنجی قرار داده شد. تصاویر برداشت شده با کمک ضرایبی که از طریق فرایند کالیبراسیون



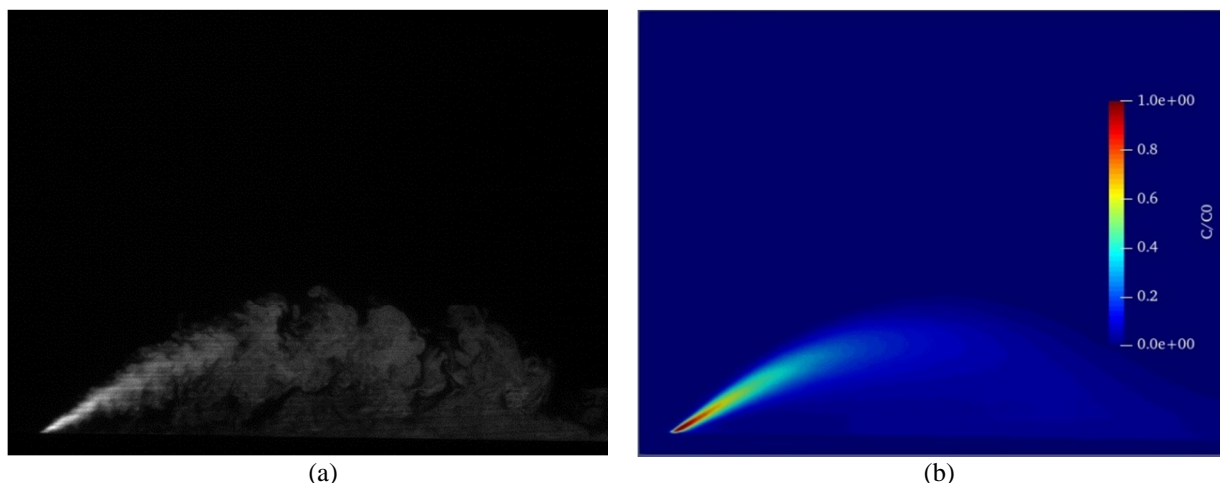


Fig. 3. a) Instantaneous image of flow field captured by CCD camera, b) Contour of mean concentration
 شکل ۳- a) تصویر لحظه‌ای ثبت شده توسط دوربین CCD، b) کانتور غلظت متوسط

جدول ۱- شرایط جریان در آزمایش جت‌های سنگین آزاد و نزدیک به بستر در تخلیه مستغرق ۳۰ درجه

Table 1. Flow conditions in free and close to bed 30° inclined submerged dense jets

Case. No.	Inclined angle θ	Nozzle diameter d (mm)	Distance y_0 (mm)	$\Delta\rho/\rho_a$ (%)	Discharge velocity U_0 (m/s)	Reynolds number Re	Densimetric Froude number Fr_d	Jet to plume characteristic length scale L_M (mm)	Bed proximity parameter y_0/L_M
F1	30	3.17	22.30	2.284	0.666	2144	25.0	74.60	0.30
F2	30	3.17	22.30	2.284	0.799	2573	30.0	89.52	0.25
F3	30	3.17	22.30	2.284	0.999	3216	37.5	111.90	0.20
N1	30	4.40	2.10	1.866	0.457	1810	16.1	66.66	0.03
N2	30	4.40	2.10	1.866	0.685	2716	24.1	99.98	0.02
N3	30	4.40	2.10	1.866	0.913	3621	32.2	133.31	0.02

دو پارامتر مومنتم و شناوری است. زمانی که جت سنگین در ابتدای امر در محیط پذیرنده تخلیه می‌شود، به دلیل غلبه مومنتم به طرف بالا صعود می‌کند، اما در همین حین مولفه عمودی مومنتم به دلیل معکوس بودن شناوری، به طور پیوسته کاهش می‌یابد و در نهایت پس از حداکثر ارتفاع خط مرکزی جهت حرکت عوض شده و به سمت بستر می‌شود. تحلیل‌های ابعادی نشان می‌دهند که کمیت‌های اختلاطی و هندسی جت‌های مختلف را می‌توان با استفاده از دو پارامتر عدد فرود چگالی و قطر نازل با یکدیگر متناسب و بی‌بعد کرد (Roberts et al., 1997). در شکل ۴ خط سیر جریان با استفاده از پارامتر مقیاس طولی جت به پلوم بی‌بعد شده (به صورت معادل

زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه و همچنین افزایش احتمال وقوع پدیده کواندا در زوایای کمتر بود (Abessi and Roberts, 2016, Shao and Law, 2010)

۳-۱- خط سیر جت

خط سیر یا خط مرکزی جت یکی از ساده‌ترین و مهمترین مشخصات توصیف‌کننده رفتار جریان است که از طریق اتصال مقدار بیشینه سرعت و یا غلظت در مقاطع عمود بر جریان به دست می‌آید. خط سیرهایی که از این دو کمیت به دست می‌آیند تقریباً منطبق بر یکدیگر هستند، اما خط سیر حاصل از متغیر غلظت کمی زودتر نزولی می‌شود (Shao, 2010). خط سیر جریان متأثر از هر



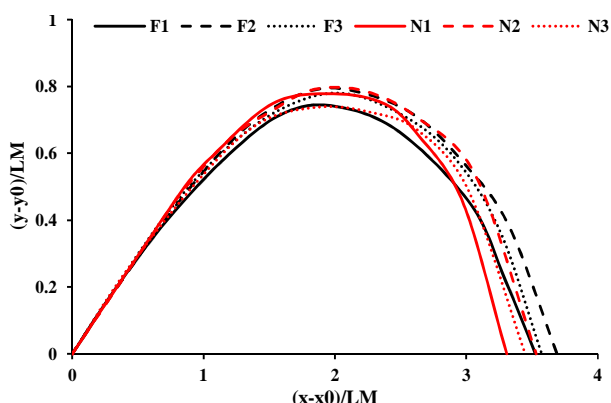


Fig. 4. Normalized centerline trajectories

شکل ۴- خطوط سیر نرمال شده

در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب موقعیت‌های افقی و عمودی حداکثر ارتفاع خط مرکزی جت‌ها که با قطر نازل نرمال شده، ارائه و با پژوهش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی پیشین مقایسه شده است. موقعیت افقی و عمودی حداکثر ارتفاع خط مرکزی جریان به‌طور کلی در هر دو سری از سایر پژوهش‌های آزمایشگاهی انجام شده پیروی می‌کنند که البته فاصله نسبتاً زیادی از آزمایش‌های سیپولینا و همکاران به‌ویژه در موقعیت افقی این نقطه مشاهده می‌شود (Cipollina et al., 2005). همچنین موقعیت افقی و عمودی این نقطه در هر دو سری اندکی بیشتر از نتایج حاصل از روابط تحلیلی کیکرت هستند (Kikkert, 2006).

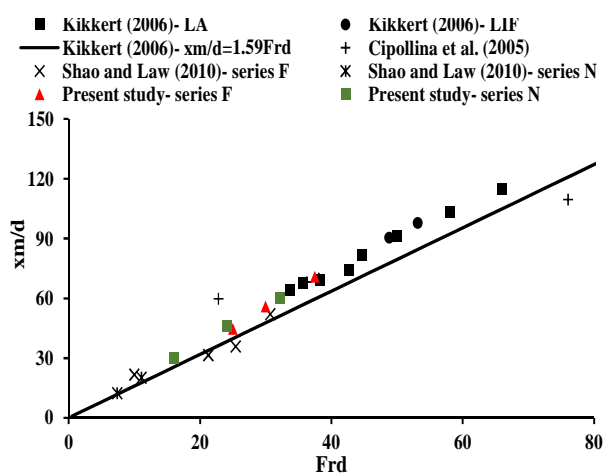


Fig. 5. Normalized horizontal location of centerline peak versus Fr_d

شکل ۵- موقعیت افقی نرمال شده حداکثر ارتفاع خط مرکزی جریان برحسب Fr_d

می‌توان از dFr_d نیز استفاده کرد) و به‌صورت مقایسه‌ای برای حالات مختلف آمده است. در این شکل خطوط سیر جت‌های سنگین آزاد تقریباً متقارن هستند، یعنی قسمت صعودی و نزولی آنها تقریباً قرینه یکدیگرند. این تقارن در خط سیر جت‌های سنگین آزاد در تطابق با پژوهش شائو و لاو بوده و عدم تقارنی که فراری و کوئرزولی گزارش کرده‌اند در اینجا مشاهده نمی‌شود (Shao and

Law, 2010, Ferrari and Querzoli, 2004)

در سری N که عدد مجاورت بستر نمونه‌ها به‌صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است، مشاهده می‌شود خطوط سیر از حالت تقارن خارج شده و پس از رسیدن به حداکثر ارتفاع خط مرکزی با شیب تندتری به سمت بستر سقوط می‌کنند که مطابق پیش‌بینی اولیه، این امر به دلیل اثر کواندا بر روی جریان است. بر اساس پژوهش غیور و همکاران ناحیه پلوم شکل که در آن تأثیر مومنت اولیه جریان ناچیز بوده و جریان بر اثر مومنت القایی ناشی از شناوری منفی به حرکت در می‌آید، بلافاصله بعد از نقطه اوج آغاز می‌شود (Ghayoor et al., 2019).

در این ناحیه جریان دارای شدت آشفتگی زیاد و تناوب بالا بوده و به دلیل مومنت ناچیز، سست و لخت است. به‌همین دلیل، تأثیرات کواندا یا ناحیه با فشار کمتر در ناحیه زیرین جریان که در محدوده جت شکل قابل تشخیص نبوده در این ناحیه محسوس‌تر شده و باعث انحراف و تغییر شکل جریان می‌شود. این موضوع باعث کشیدگی بیشتر جریان به سمت بستر در امتداد ناحیه پلوم شکل و کاهش طول نقطه برگشت جریان (به تراز تخلیه) می‌شود. در ادامه، نقاط کلیدی هندسی جت‌های سنگین ۳۰ درجه و تأثیر کواندا در مختصات آنها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۲- حداکثر ارتفاع خط مرکزی جت

موقعیت حداکثر ارتفاع خط مرکزی جت را می‌توان از روی خط سیر به‌دست آورد. در این نقطه شار مومنت تولیدی توسط شناوری منفی جریان با مولفه عمودی مومنت اولیه یکسان است. از این رو حداکثر ارتفاع خط مرکزی در جایی به وقوع می‌پیوندد که رفتار جریان هنوز جت مانند (و نه پلوم شکل) است (Kikkert et al., 2007, Ghayoor et al., 2019)



۳-۳- حداکثر ارتفاع صعود جریان

همان طور که پیش تر بیان شد، جت سنگین به دلیل شار مومنتم اولیه به سمت بالا صعود می‌کند تا به ارتفاع بیشینه‌ای برسد. در این نقطه مؤلفه عمودی شار مومنتم اولیه به صفر رسیده و جریان به دلیل شناوری منفی با رفتاری پلوم مانند به سمت بستر سقوط می‌کند. این نقطه از جمله مهم‌ترین نقاط در طراحی تخلیه‌کننده‌های دریایی است، زیرا در طراحی‌ها برای جلوگیری از بهم‌ریختگی سطح آب و همچنین کاهش اختلاط جت با سیال محیطی، تلاش می‌شود تا مانع برخورد جریان با سطح آزاد شود. اجماعی بین پژوهشگران در روش تعیین این ارتفاع وجود ندارد، از این رو ممکن است اختلافات قابل ملاحظه‌ای در مقدار گزارش شده از این ارتفاع در پژوهش‌های مختلف مشاهده شود. برای مثال، لای و لی مرز بصری را جایی در نظر می‌گیرند که غلظت محلی در هر مقطع عمود بر خط مرکزی جریان به $0/25$ غلظت بیشینه آن مقطع برسد. در این محل میزان تناوب آشفتگی یعنی بخشی از زمان که این محل توسط بسته‌های جریان آشفته اشغال شده است، برابر $0/5$ است (Lai and Lee, 2012).

عابسی و رابرتز این مرز بصری را در فاصله‌ای شعاعی از خط مرکزی جت که غلظت محلی به 10 درصد غلظت بیشینه در مقطع عمود بر خط مرکزی می‌رسد، در نظر گرفته‌اند (Abessi and Roberts, 2015). این نسبت را در مدل عددی CORJET می‌توان از میان دو مقدار 3 و یا 25 درصد انتخاب کرد (Jirka, 2008). شائو و لایو نیز مقدار حداکثر ارتفاع صعود جریان را در $0/3$ حداکثر غلظت بیشینه مقطع عمود بر خط مرکزی در محل دارای بیشترین ارتفاع جریان گزارش کرده‌اند (Shao and Law, 2010). در این پژوهش این نسبت برابر 3 درصد در نظر گرفته شد. در شکل ۷ نمودار ارتفاع حداکثر ارتفاع صعود جریان در دو سری آزمایش‌های انجام شده که با قطر نازل نرمال شده‌اند برحسب عدد فرود چگالی ارائه شده است. مشاهده می‌شود جت‌های سنگین آزاد به‌طور کلی از روند پژوهش‌های پیشین پیروی می‌کنند. اما در سری N که جت‌های سنگین با کاهش چشمگیر عدد مجاورت بستر همراه هستند، مقدار حداکثر ارتفاع صعود جریان افزایش یافته است. این افزایش در ارتفاع صعود جریان به‌صورت کمی در جدول ۲ که میانگین نرمال شده دو سری آزمایش ارائه شده، قابل مشاهده است.

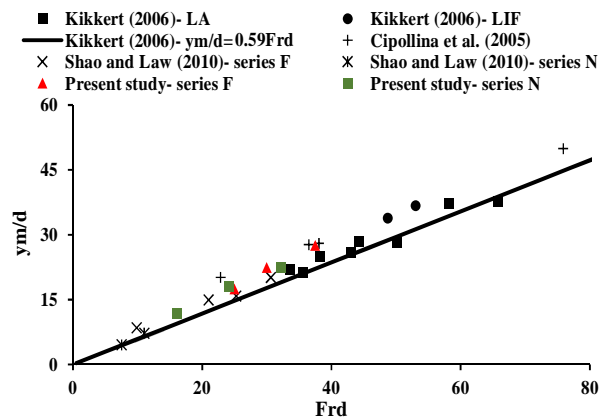


Fig. 6. Normalized vertical location of centerline peak versus Fr_d

شکل ۶- موقعیت عمودی نرمال شده حداکثر ارتفاع خط مرکزی جریان برحسب Fr_d

شائو و لایو با توجه به مشاهدات خود که در شکل ۵ نیز ترسیم شده، استدلال کردند که در سری آزمایشی که نازل‌ها در فاصله نسبتاً زیادی از بستر قرار گرفته‌اند (سری F)، با افزایش عدد فرود چگالی و در نتیجه افزایش مقیاس طولی جت به پلوم (با ثابت ماندن قطر نازل و سایر شرایط آزمایشی) زمانی که پارامتر مجاورت بستر به کمتر از $0/15$ می‌رسد، موقعیت افقی حداکثر ارتفاع خط مرکزی نزدیک به مقدار آن در آزمایش‌های نزدیک به بستر (سری N) قرار می‌گیرد.

به این ترتیب پارامتر مجاورت بستر y_0/L_M برابر با $0/15$ ، مرز میان جت‌های سنگین آزاد و متأثر از بستر در تخلیه با زاویه 30 درجه است (Shao and Law, 2010).

این در حالی است که در این پژوهش با وجود پارامتر مجاورت بستر بسیار کمتر از آزمایش‌های این گروه، تفاوت معنی‌داری که نشان‌دهنده تأثیر مجاورت به بستر بر روی موقعیت حداکثر ارتفاع خط مرکزی جریان باشد، مشاهده نشد.

همچنین در جدول ۲ میانگین موقعیت افقی و عمودی حداکثر ارتفاع خط مرکزی جت در هر دو سری که با dFr_d نرمال شده‌اند، ارائه شده است.

در این جدول به‌طور واضح مشاهده می‌شود که مجاورت به بستر تأثیر چشمگیری در موقعیت افقی و عمودی حداکثر ارتفاع خط مرکزی جریان نداشته است این در حالی است که این موضوع تأثیر معنی‌داری در موقعیت نقطه بازگشت داشته است.



جدول ۲- مقایسه آزمایشگاهی

Table 2. Comparison of experimental coefficients

Quantity	Proportionality coefficients	Present study		(Shao and Law, 2010)		(Lai and Lee, 2012)	(Kikkert et al., 2006)			(Abessi and Roberts, 2015)
		Series F	Series N	0.10 ≤ y ₀ /L _M ≤ 0.15	y ₀ /L _M ≥ 0.15		LA data	LIF data	Model prediction	
Terminal rise height	y _t /d. Fr _d	1.15	1.27	1.05	-	0.95	1.00	1.19	1.02	1.17
Horizontal location of return point	x _r /d. Fr _d	3.39	3.23	2.88	3.00	3.18	3.14	3.44	2.95	-
Vertical location of centerline peak	y _m /d. Fr _d	0.73	0.73	0.66	-	0.65	0.56	0.66	0.62	0.79
Horizontal location of centerline peak	x _m /d. Fr _d	1.85	1.88	1.70	1.54	1.95	1.75	1.85	1.70	-

داده شده است، مشاهده نمی‌شود و هر دو سری نزدیک و دور در مشاهدات آنها از یک روند مشابه پیروی می‌کنند (Shao and Law, 2010).

۳-۴- فاصله افقی نقطه بازگشت

جت سنگین پس از صعود تحت اثر مومنتم اولیه، به دلیل شناوری منفی به سمت بستر سقوط کرده و در نهایت در نقطه‌ای با بستر برخورد می‌کند که به آن نقطه برخورد اطلاق می‌شود. موقعیت نقطه برخورد به ارتفاع نازل از بستر و همچنین شیب بستر وابسته بوده و بنابراین به مشخصات نقطه تخلیه بستگی دارد. از این رو در برخی پژوهش‌ها برای اینکه نتایج به صورت کلی قابل استفاده باشند، نقطه‌ای مجازی تحت عنوان نقطه بازگشت که بنا بر تعریف، محلی است که جریان به سطح ارتفاعی منبع تخلیه باز می‌گردد را به جای نقطه برخورد در نظر می‌گیرند. البته لازم به ذکر است با توجه به اینکه در شرایط واقعی میزان ارتفاع منبع تخلیه و شیب بستر در مقایسه با طول ناحیه اختلاط ناچیز است، از این رو موقعیت این دو نقطه و میزان ترقیق آنها تقریباً یکسان است. در صورتی که ارتفاع منبع تخلیه و شیب محلی بسیار زیاد باشد، آنگاه اثرات این دو پارامتر نیز باید در نظر گرفته شود که خارج از محدوده مورد بررسی این

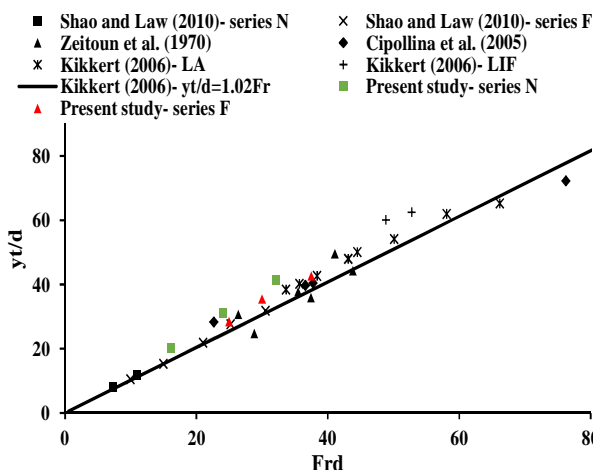


Fig. 7. Terminal rise height for free and boundary-affected 30° inclined dense jets

شکل ۷- حداکثر ارتفاع صعود جریان در حالت تخلیه جت سنگین ۳۰ درجه آزاد و نزدیک به بستر

با کنار هم قرار دادن افزایش ارتفاع صعود جریان و سقوط زودتر جریان می‌توان نتیجه گرفت که تخلیه جت سنگین در فاصله بسیار نزدیک به بستر باعث جمع‌شدگی جریان در راستای افقی و بازشدگی در راستای ارتفاعی می‌شود. این افزایش ارتفاع ناشی از تأثیر نزدیکی به بستر در داده‌های شائو و لاو که در شکل ۷ نشان



رفتار این جریانات به شمار می‌رود. پژوهش اثر بستر بر رفتار جت‌های سنگین اما محدود به تنها یک پژوهش آزمایشگاهی است، بنابراین ابعاد زیادی از رفتار این نوع جریانات تحت تأثیر فاصله از بستر همچنان نامشخص و مبهم است.

در این پژوهش مشخصات هندسی جت‌های سنگین مورب ۳۰ درجه آزاد و نزدیک به بستر مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. به این منظور دو سری آزمایش با استفاده از تکنیک فلورسنت تحریک شده با لیزر توسعه داده شد. مشخصات هندسی جریان شامل خط سیر جریان، حداکثر ارتفاع خط مرکزی، حداکثر ارتفاع صعود جریان و فاصله افقی نقطه بازگشت با استفاده از نمودارها و جدول‌های نرمال شده بررسی شدند.

رفتار جریان در جت‌های سنگین آزاد مورد بررسی در تطابق خوبی با آزمایش‌های پیشین قرار داشتند، اما در جت‌های سنگین نزدیک به بستر مشاهده شد که با نزدیک شدن به مرز پایینی و کاهش پارامتر مجاورت بستر، خط سیر جریان نامتقارن شده و جت‌های سنگین با شیب بیشتری در ناحیه پلوم شکل به سمت بستر منحرف می‌شوند. بنابراین در فاصله نزدیکتری نسبت به محل تخلیه به بستر برخورد می‌کند. این فشردگی جریان در راستای افقی، همراه با افزایش ارتفاع است. مشاهدات انجام شده در این پژوهش با تنها پژوهش آزمایشگاهی مشابه، که پیشتر توسط شاو و لاو گزارش شده (Shao and Law, 2010)، مقایسه و تطابقت و تضادهایی مشاهده شد که لزوم بررسی و انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی بیشتری را ایجاب می‌کند.

۵- قدرتدانی

نویسندگان پژوهش مراتب قدرتدانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره BNUT/390035/99 اعلام می‌دارند.

References

- Abessi, O., Ramani Firoozjaye, A., Hamidi, M., Bassam, M. & Khodabakhshi, Z. 2020. Three dimensional laser scanning system for illumination of fluorescent flow for the environmental hydraulic researches, *Journal of Hydraulics*, 14(4), 69-81.
- Abessi, O. & Roberts, P. J. W. 2016. Dense jet discharges in shallow water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1), 4015033.

پژوهش است. فاصله افقی نقاط بازگشت آزمایش‌ها که با قطر نازل نرمال شده‌اند برحسب عدد فرود چگالی در شکل ۸ ترسیم شده است. مشاهده می‌شود هر دو سری بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل تحلیلی کیکرت هستند (Kikkert, 2006).

همچنین جت‌های سنگین متأثر از بستر در مقایسه با جت‌های سنگین آزاد زودتر به سطح ارتفاعی نازل باز می‌گردند که این امر به دلیل تأثیر کواندا در رفتار جریان بوده و در تطابق با مشاهدات شائو و لاو است (Shao and Law, 2010). اختلاف بین این دو سری آزمایش در جدول ۲ که مقدار میانگین فاصله افقی نقطه بازگشت با dFr_d نرمال شده نیز قابل مشاهده است.

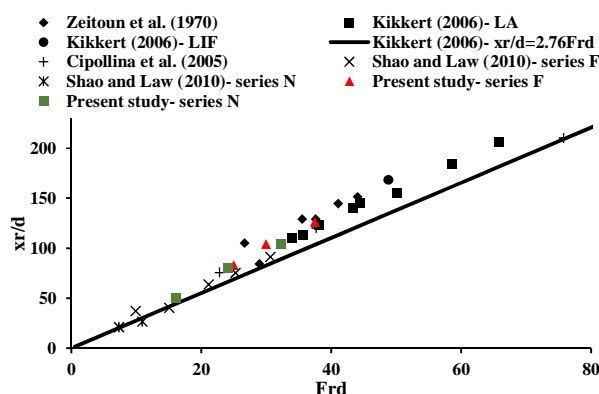


Fig. 8. Normalized horizontal location of return point versus Fr_d

شکل ۸- فاصله افقی نقطه بازگشت نرمال شده برحسب Fr_d

۴- نتیجه‌گیری

جت‌های سنگین مورب روشی رایج در تخلیه شورابه حاصل از شیرین‌سازی آب دریا هستند. اگرچه استانداردهای طراحی موجود زاویه ۶۰ درجه را به عنوان زاویه بهینه پیشنهاد می‌کنند، اما جت‌های سنگین با زوایای کمتر در سواحل کم عمق دارای ارجحیت هستند. فاصله جت‌های شناور از بستر از جمله پارامترهای تأثیرگذار در



- Abessi, O. & Roberts, P. J. W. 2015. Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(8), 6015009.
- Abessi, O. & Roberts, P. J. W. 2017. Multiport diffusers for dense discharge in flowing ambient water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(8), 04014032.
- Abessi, O. & Roberts, P. J. W. 2018. Rosette diffusers for dense effluents in flowing currents. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(1), 06017024.
- Abessi, O., Saeedi, M., Hajizadeh Zaker, N. & Kheirkhah Gildeh, H. 2012a. Flow characterization dilution in surface discharge of negatively buoyant flow in stagnant and non-stratified water bodies. *Journal of Water and Wastewater*, 22(4), 71-82. (In Persian)
- Abessi, O., Saeedi, M., Hajizadeh Zaker, N. & Kheirkhah Gildeh, H. 2012b. Waste field characteristics, ultimate mixing and dilution in surface discharge of dense jets into stagnant water bodies. *Journal of Water and Wastewater*, 23(1), 2-14. (In Persian)
- Cederwall, K. 1968. Hydraulics of marine waste water disposal. Chalmers tekniska högskola.
- Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F. & Nicosia, S. 2005. Bench-scale investigation of inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(11), 1017-1022.
- Ferrari, S. & Querzoli, G. 2004. Sea discharge of brine from desalination plants: a laboratory model of negatively buoyant jets. In MWWD & IEMES 2004-3rd International Conference on Marine Wastewater Discharges and Marine Environment Proceeding, Catania, Italy.
- Ghayoor, S., Hamidi, M. & Abessi, O. 2019. Experimental analysis of turbulent flows in brine discharge of coastal desalination plants. *Journal of Oceanography*, 10(39), 101-111. (In Persian)
- Jirka, G. H. 2008. Improved discharge configurations for brine effluents from desalination plants. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 116-120.
- Kikkert, G. A. 2006. Buoyant jets with two and three-dimensional trajectories. PhD Thesis, University of Canterbury, Newzeland.
- Kikkert, G. A., Davidson, M. J. & Nokes, R. I. 2007. Inclined negatively buoyant discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(5), 545-554.
- Lai, C. C. K. & Lee, J. H. W. 2012. Mixing of inclined dense jets in stationary ambient. *Journal of Hydro-Environment Research*, 6(1), 9-28.
- Law, A. W. K. & Herlina, H. 2002. An experimental study on turbulent circular wall jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(2), 161-174.
- Oliver, C. J., Davidson, M. J. & Nokes, R. I. 2013. Behavior of dense discharges beyond the return point. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(12), 1304-1308.
- Pincince, A. B. & List, E. J. 1973. Disposal of brine into an estuary. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 2335-2344.
- Roberts, P. J. Ferrier, A. & Daviero, G. 1997. Mixing in inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(8), 693-699.
- Roberts, P. J. & Toms, G. 1987. Inclined dense jets in flowing current. *Journal of Hydraulic Engineering*,



113(3), 323-340.

- Shacheri, F., Abessi, O., Samani, J. M. & Saeedi, M. 2018. The impact of channel shape at surface discharge from rectangular and trapezoid sections into stagnant and non-stratified water bodies. *Journal of Water and Wastewater*, 29(2), 101-113. (In Persian)
- Shao, D. 2010. Desalination discharge in shallow coastal waters. *In Nanyang Technological University*, Beijing, China.
- Shao, D. & Law, A. W. K. 2010. Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets. *Environmental Fluid Mechanics*, 10(5), 521-553.
- Sobey, R. J., Johnston, A. J. & Keane, R. D. 1988. Horizontal round buoyant jet in shallow water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8), 910-929.
- Takdastan, A., Hajizadeh, N. & Jafarzadeh, N. 2005. Outfall as a suitable alternative for disposal of municipal wastewater in coastal areas. *Journal of Water and Wastewater*, 15(3), 66-75. (In Persian)
- Tian, X. & Roberts, P. J. 2003. A 3D LIF system for turbulent buoyant jet flows. *Experiments in Fluids*, 35(6), 636-647.
- Zeitoun, M. A., Reid, R., McHilheny, W. F. & Mitchell, T. M. 1970. Model studies of outfall system for desalination plants. Dow Chemical Co., Freeport, Tex pub, Washington, DC. USA.

