

# The Impact of Channel Shape at Surface Discharge from Rectangular and Trapezoid Sections into Stagnant and Non-stratified Water Bodies

F. Shacheri<sup>1</sup>, O. Abessi<sup>2</sup>, J. Mohammadvali Samani<sup>3</sup>, M. Saeedi<sup>4</sup>

1. MSc Student of Water Structure Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2. Assist. Prof., School of Civil Engineering, Nooshiravani University of Technology, Babol, Iran  
(Corresponding Author) [Oabessi@nit.ac.ir](mailto:Oabessi@nit.ac.ir)
3. Prof. of Water Structure Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
4. Prof. of Water and Environment, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

(Received Nov. 1, 2017 Accepted June 1, 2017)

#### To cite this article :

Shacheri F., Abssi, O., Mohammadvali, J., 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. Doi: 10.22093/wwj.2017.49230.2140. (In Persian)

#### Abstract

In recent years, with growing population and industrialization of the world, desalination techniques have developed drastically to supply the rising needs of coastal cities to fresh water. The brine is the second product of the producing fresh water process in the desalination facilities, that is usually discharged into the sea through marine outfalls (surface and submerged). The main purpose of the outfall is to enhance the dilution and reduce the impact on the local environment. In this study, in order to investigate the impact of the shape of the surface discharge channel, rectangular and trapezoidal sections with the equivalent diameter were used to discharge wastewater with negative buoyancy into stagnant and non-stratified water bodies. Experiments have been carried out in a dark room and processed using digital analysis. The location of plunge point, impact point and the dilution in this point, and the location of the ultimate point and dilution at this point were the flow characteristics studied in this research. According to the shape impact and less hydraulic conflict with the surroundings, trapezoidal section had better geometric characteristics compared to rectangular section. Results of the experiments were presented in the form of non-dimensional diagrams and equations. Finally, statistical indices such as Root Mean Square Error (RMSE) and R-Square ( $R^2$ ) were used to verify the accuracy of the presented dimensionless equations. The results indicated that the closer the shape of surface channel discharge is to the best hydraulic cross section (semicircular), the better geometric and mixing characteristics would be obtained for the flow along near-field area. In this way, prediction of flow characteristics and design of actual samples of these outfalls will be possible.

**Keywords:** Shape Impact, Dense Flow, Surface Discharge, Mixing, Densimetric Froude Number.

# تأثیر شکل کانال در تخلیه سطحی جریان چگال از دو مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای در محیط‌های ساکن و همگن

فاطمه شاجری<sup>۱</sup>، عزیر عابسی<sup>۲</sup>، جمال محمدولی سامانی<sup>۳</sup>، محسن سعیدی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استادیار گروه عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروان بابل

(نویسنده مسئول) [Oabessi@nit.ac.ir](mailto:Oabessi@nit.ac.ir)

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴- استاد گروه آب و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

پذیرش ۹۶۳/۱۱

(دریافت ۹۵/۲/۱۲)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

شاجری، ف.، عابسی، ع.، محمدولی سامانی، ج.، سعیدی، م.، ۱۳۹۷، "تأثیر شکل کانال در تخلیه سطحی جریان چگال از دو مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای در محیط‌های ساکن و همگن"، مجله آب و فاضلاب، ۲۹(۲)، ۱۱۳-۱۰۱. Doi: 10.22093/wwj.2017.49230.2140

## چکیده

در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت و صنعتی شدن جهان، صنایع نمک‌زدایی از آب دریا به منظور تأمین نیازهای فزاینده شهرهای ساحلی به آب شیرین، گسترش زیادی یافته‌اند. پساب بسیار شور، محصول ثانویه فرایند تولید آب شیرین در تأسیسات نمک‌زدایی آب دریا است که معمولاً با استفاده از انواع تخلیه‌کننده‌های دریایی سطحی و مستغرق به محیط دریا تخلیه می‌شود. هدف اصلی تخلیه‌کننده‌ها دستیابی به ترقیق مناسب و کاهش اثرات مخرب محیط‌زیستی تخلیه فاضلاب بر محیط زیست است. در این پژوهش اثر شکل کانال در تخلیه سطحی پساب‌های با شناوری منفی از دو مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای با قطر معادل یکسان در محیط ساکن و همگن مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در اتاق تاریک و با استفاده از دوربین دیجیتال انجام شد و از طریق تحلیل رومی تصاویر، مورد پردازش قرار گرفت. موقعیت نقطه غوطه‌وری، نقطه برخورد و میزان ترقیق در نقطه برخورد همراه با موقعیت و ترقیق نهایی جریان در محیط از جمله پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش بود. نتایج مشاهدات آزمایشگاهی به صورت کمی در قالب مجموعه‌ای از نمودارها و روابط بی‌بعد ارائه شد. در نهایت از سنجش‌های آماری مانند مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای بررسی دقت روابط بی‌بعد ارائه شده، استفاده شد. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که هرچه شکل کانال تخلیه‌کننده به شکل بهترین مقطع هیدرولیکی (نیم دایره) نزدیک‌تر باشد، جریان در امتداد ناحیه میدان نزدیک، مشخصات هندسی و اختلاط بهتری خواهد داشت.

**واژه‌های کلیدی:** تأثیر شکل، جریان چگال، تخلیه سطحی، اختلاط، عدد فرود دنسیمتریک

## ۱- مقدمه

تأثیرگذار در این رابطه است (Kikkert 2006). به‌طور معمول تخلیه فاضلاب به دریا از طریق تخلیه‌کننده‌های دریایی<sup>۱</sup> و به صورت سطحی یا مستغرق انجام می‌گیرد. هدف اصلی تخلیه‌کننده‌ها، افزایش ترقیق جریان در پیکره آبی و کاهش تأثیرات مخرب محیط‌زیستی فاضلاب در محیط پذیرنده است. برای کاهش این تأثیرات، تخلیه‌کننده‌ها باید به‌گونه‌ای طراحی شود که پلوم یا

۸۰ درصد شهرهای عمده جهان در مجاورت ساحل واقع شده‌اند. در این مناطق تخلیه فاضلاب به محیط‌های آبی به‌عنوان گزینه‌ای اقتصادی و مطلوب از نظر محیط‌زیستی نسبت به تخلیه در خشکی، همواره مطرح بوده است. ویژگی‌های مطلوب فیزیکی و شیمیایی محیط‌های دریایی برای تجزیه مواد آلی در درون خود و قابلیت پیکره‌های آبی برای ترقیق فاضلاب‌های تجمعی از جمله عوامل

<sup>1</sup> Marine Outfalls

نامطلوب بسیار زیادی برای محیط زیست دریایی به همراه داشته باشد. این تأثیرات ناشی از شوری زیاد فاضلاب خروجی و مواد آلاینده آن بر موجودات دریایی، به ویژه جانداران کفزی است که کمینه سازی آن تنها از طریق طراحی مناسب و رعایت نمودن الزامات مورد نیاز برای اختلاط حداکثری جریان در محیط ممکن است (Crowe et al. 2012; Lia & Lee 2012; Oliver et al. 2013).

جریان خروجی در صورت دارا بودن سرعت اولیه و آشفتگی بالا، امکان مناسبی برای ترقیق و اختلاط با آب محیط فراهم خواهد کرد. پیش بینی رفتار جریان در تخلیه فاضلاب های شور از انواع تخلیه کننده های دریایی اولین گام در طراحی این سیستم ها محسوب می شود (Shao & Law 2010). در این زمینه مطالعات گسترده ای برای تعیین رفتار جریان های بسیار شور و چگال خروجی از تخلیه کننده های مستغرق تک مجرای و چند مجرای در محیط های ساکن و متحرک انجام گرفته است. در این مطالعات مشخصات هندسی و اختلاطی جریان اعم از حداکثر ارتفاع خیزش، مسیر حرکت، میزان ترقیق در طول مسیر و اثر برهمکنش جت ها بر یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است (Robert et al. 1997; Cipollina et al. 2005; Kikkert et al. 2007; Tarrade et al. 2010; Marti et al. 2011; Abessi & Roberts 2014; Abessi & Roberts 2015 a, b).

در ارتباط با تخلیه کننده های سطحی نیز تخلیه پساب های حرارتی سبک با شناوری مثبت نسبت به تخلیه پساب های با شناوری منفی تاکنون بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند. پژوهش های انجام شده بر روی تخلیه سطحی فاضلاب های حرارتی و سبک، تاکنون مشخصات هندسی و اختلاطی جریان در محیط ساکن و الگوی طبقه بندی جریان های سطحی در محیط های متحرک را آشکار ساخته است. این پژوهش ها در قالب مدل کرمیکس<sup>۳</sup> برای شبیه سازی جریانات سطحی فاضلاب های سبک در حالات مختلف تخلیه و محیط پذیرنده برای طراحی و استفاده های مهندسی جمع شده است. در این مدل رژیم های مختلف جریان در محیط های متحرک با سرعت های جانبی کم تا بسیار زیاد و تأثیر شرایط کم عمقی پیکره آبی پذیرنده نیز در نظر گرفته شده است (Chu & Jirka 1986; Nash & Jirka 1996; Amon & Benner 1998; Jirka 2007a).

جت تخلیه شده، استانداردهای تجویز شده را در ناحیه ای کوتاه از محل تخلیه برآورده کند (USEPA 1980a). پساب خروجی از تخلیه کننده ها تحت تأثیر سه فاز مجزای اختلاط در میدان نزدیک، اختلاط در میدان دور و اختلاط دراز مدت در محیط دریا پخش می شود. فاز اول که مرحله اختلاط اولیه<sup>۱</sup> یا اختلاط در ناحیه میدان نزدیک<sup>۲</sup> است، ناحیه ای در مجاورت دهانه تخلیه کننده است که طی آن مشخصات جریان خروجی اعم از شار مومنتم، شار شناوری، نوع و شکل کانال تخلیه کننده، تعیین کننده رفتار جریان در محیط می باشد. در این ناحیه میزان اختلاط و ترقیق بالا و اثرات محیط بر اختلاط جریان ناچیز است. آشفتگی القاء شده توسط شارهای جریان خروجی در انتهای میدان نزدیک از بین می رود و این محدوده تنها ناحیه ای از اختلاط جریان در محیط است که توسط مهندس طراح قابل کنترل است. مهندس طراح با شناسایی پارامترهای تأثیرگذار بر فرایند اختلاط در این ناحیه، تنها از طریق انتخاب مناسب پارامترهای هیدرولیکی جریان خروجی قادر به دستیابی به حداکثر ترقیق برای دستیابی به استانداردهای محیط زیستی خواهد بود.

تخلیه کننده های مستغرق که در اعماق آب در بستر محیط پذیرنده کار گذاشته می شوند، شامل دو دسته تخلیه کننده های تک مجرای و چند مجرای می باشند. تخلیه کننده های مستغرق متداول تر و دارای بازده بالاتری هستند، با این وجود تخلیه کننده های سطحی برای تخلیه پساب های حجیم در شرایطی که ترقیق پایین تری مورد نیاز باشد، به دلیل راحتی و هزینه کمتر همواره مورد توجه بوده اند. تخلیه سطحی فاضلاب به دریا در این حالت با استفاده از کانال های ساحلی پیش رونده که پساب را در فاصله کافی از ساحل در سطح آب پذیرنده رها می کنند، انجام می گیرد (Jones et al. 2007).

در سال های اخیر با افزایش جمعیت و صنعتی شدن جهان، استفاده از نمک زدایی به عنوان یک روش ماندگار و در برخی موارد تنها منبع تأمین آب شرب شهرها و صنایع مورد توجه بسیار قرار گرفته است. این موضوع باعث توسعه صنایع نمک زدایی آب دریا در ساحل و افزایش موارد تخلیه فاضلاب های شور و سنگین به این پیکره های آبی باز شده است. تخلیه های آب شور می تواند اثرات

<sup>1</sup> Initial Mixing<sup>2</sup> Near Field Mixing<sup>3</sup> CORMIX

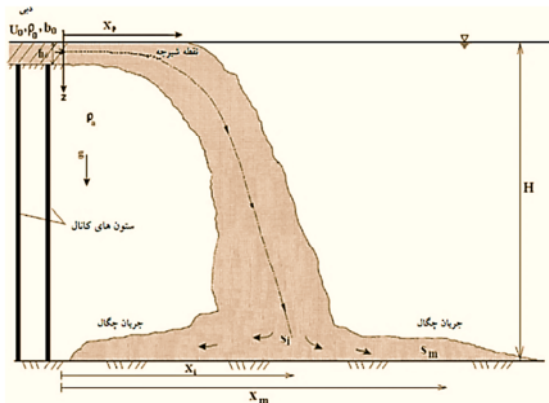


Fig 1. Schematic view of dense surface discharge in stagnant environment (Abessi et al. 2012)

شکل ۱- الگوی توسعه جریان در تخلیه سطحی پساب‌های سنگین در محیط ساکن (Abessi et al. 2012)

این معنی که برای سرعت‌های پایین ( $Fr_d < 20$ )، طولی از جریان که در جلوی تخلیه‌کننده است متأثر از شکل مجرای تخلیه است و با تغییر آن تغییر می‌کند. به دلیل آن که در تخلیه‌کننده‌های مستغرق عمدتاً سرعت تخلیه و عدد فرود جریان بالا است، همواره می‌توان از تأثیر شکل هندسی منبع تخلیه در این شرایط صرف نظر کرد (Roberts et al. 1997). در تخلیه‌کننده‌های سطحی به دلیل ماهیت ثقلی جریان، سرعت و عدد فرود پایین است لذا شکل منبع تخلیه عاملی تأثیرگذار در شکل‌گیری جریان خروجی محسوب می‌شود. علی‌رغم اهمیت اثر شکل هندسی منبع تخلیه در رفتار جریان‌های سطحی فاضلاب‌های چگال، تاکنون هیچ پژوهش نظام‌مندی در این زمینه انجام نگرفته است. در پژوهش‌های محدود انجام شده در رابطه با تأثیر شکل هندسی منبع در تخلیه سیالات تراکم‌پذیر، مشاهده شده است که مقاطع با گوشه‌های تیز نسبت به مقاطع دایره‌ای از ویژگی‌های اختلاط بهتری برخوردارند (Miller et al. 1995).

در این پژوهش، به منظور بررسی اثر شکل مقطع بر تخلیه سطحی پساب‌های با شناوری منفی در محیط ساکن از دو مقطع مستطیل و دوزنقه استفاده شد. برای دو مقطع مذکور، قطر معادل یکسان ( $D_e = 9/98$  cm) در نظر گرفته شد. مقاطع با قطر معادل یکسان متناظر هستند با دایره‌ای که مساحتی معادل با این مقاطع دارد. در این پژوهش، به منظور ارزیابی تأثیر شکل منبع در تخلیه سطحی پساب‌های با شناوری منفی از کانال‌های پیش‌رونده، از

در مورد جریان‌های با شناوری خنثی و منفی پژوهش‌های کمتری انجام گرفته شده است (Kassem & Khan 2003; Law Adrian et al. 2004; Gholamreza-Kashi et al. 2007; Abessi 2011; Abessi et al. 2012 Saeedi et al., 2012) به دلیل عدم وجود اطلاعات آزمایشگاهی و میدانی کافی، مدل‌های ریاضی از تقریب‌هایی با دقت پایین برای پیش‌بینی مشخصات جریان‌های سطحی چگال استفاده می‌کنند و این موضوع طراحی علمی و بهره‌برداری مناسب از این تأسیسات را با مشکل مواجه ساخته است. استفاده از مدل‌های فیزیکی برای مدل‌سازی تخلیه سطحی فاضلاب‌های سنگین در محیط آزمایشگاه، امکان شناخت بهتر از فرایند اختلاط و ترفیق جریان‌های سطحی چگال در محیط دریا را میسر می‌سازد.

در برخی پژوهش‌ها در سال‌های اخیر ویژگی‌های اختلاطی و هندسی جریان چگال از تخلیه‌کننده سطحی با مقطع مستطیلی در محیط‌های ساکن مورد بررسی قرار گرفته است (Abessi 2011; 2012; Saeedi et al. 2012). مسیر حرکت جریان، میزان ترفیق در امتداد مسیر، موقعیت نقطه برخورد، موقعیت نقطه غوطه‌وری، پروفیل غلظت، الگوی عمومی حرکت و الگوی طبقه‌بندی جریان‌های چگال در محیط‌های متحرک از جمله پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش‌ها بوده است. الگوی توسعه داده شده در ارتباط با حرکت جریان در تخلیه سطحی پساب‌های با شناوری منفی در محیط‌های ساکن و لایه‌بندی نشده توسط عابسی در شکل ۱ نشان داده شده است (Abessi et al. 2012). همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود جریان خروجی از تخلیه‌کننده ابتدا تحت تأثیر سرعت اولیه خود یک مسیر افقی کوتاه را طی کرده سپس با استهلاك شار مومنت اولیه و غلبه نیروی شناوری در نقطه غوطه‌وری ( $X_p$ ) به سمت بستر محیط پذیرنده منحرف می‌شود. جریان خروجی در نهایت به شکل یک جریان چگال در مجاورت بستر آرام گرفته و در جهت شیب کف به آهستگی به حرکت در می‌آید.

جریان خروجی از تخلیه‌کننده‌های دریایی به منظور دستیابی به اختلاط و ترفیق مناسب معمولاً دارای سرعت اولیه زیاد و نتیجتاً عدد فرود و رینولدز بالا می‌باشد. اثر شکل هندسی مجرای تخلیه‌کننده بر مشخصات میدان نزدیک جریان، برای اعداد فرود بالا قابل صرف نظر کردن بوده و تنها به ازای عدد فرود کوچک‌تر از ۲۰ قابل ملاحظه است (Roberts et al. 1997)؛ به

دهانه خروجی کانال، سرعت جریان محاسبه شد. پساب مورد استفاده در این آزمایش‌ها، آب شور ناشی از انحلال نمک طعام (سدیم کلرید) در آب شیرین بود که جریانی از پساب در غلظت‌های مختلف با جرم‌های حجمی متفاوت ایجاد می‌نمود. مشخصات ظاهری پلوم در محیط پذیرنده، با رنگ محلول در آب به‌عنوان آشکارساز مشخص می‌شد و ثبت مسیر حرکت در زمینه نور سفید با استفاده از دوربین دیجیتال سونی مدل DCR-SR47 انجام شد. آزمایش‌ها از طریق ثبت دیجیتال مسیر حرکت جریان در اتاق تاریک در مقابل یک منبع نور سفید یکنواخت به طول ۲ و ارتفاع ۱/۳ متر انجام شد که متشکل از ۲۵ لامپ فلورسنت بود که در پشت مخزن جانمایی شده بود. شکل ۲ نمایی از طرح سه بعدی مدل است که با استفاده از نرم‌افزار Solidworks ترسیم شد و نحوه ارتباط و جانمایی هر یک از اجزا، را نشان می‌دهد.

شکل ۳، نیز نمایی از تخلیه سطحی پساب با شناوری منفی از دو مقطع مستطیل و دوزنقه را در محیط ساکن و همگن نشان می‌دهد. موقعیت نقاط غوطه‌وری و برخورد و همچنین مسیر حرکت جریان برای هر یک از این مقاطع در این شکل نشان داده شده است. با انجام و ثبت آزمایش‌ها در اتاق تاریک، امکان پردازش رقومی تصاویر دیجیتال برداشت شده به‌منظور تعیین مشخصات حرکت جریان به نحو مطلوب فراهم شد. در این پژوهش، از روش تحلیل رقومی که پیشتر توسط عابسی و همکاران در سال ۲۰۱۲ توسعه داده شده بود، استفاده شد. در این روش پس از استخراج تصاویر مجزا از ویدیوی ثبت شده از هر یک از آزمایش‌ها، با

طریق انجام یکسری آزمایش‌ها در شرایط مختلف نسبت به بررسی رفتار جریان در محیط ساکن و لایه‌بندی نشده برای هر یک از مقاطع و مقایسه آن‌ها با یکدیگر اقدام شد. نتایج مشاهدات کمی به‌صورت نمودار و روابط بی‌بعد ارائه شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- روش کار

در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، بازه تغییر پارامترهای جریان اعم از دبی، سرعت و چگالی فاضلاب خروجی به ترتیب ۱۶۶ تا ۱۰۰۰ سانتی‌متر مکعب بر ثانیه، ۲۰ تا ۳۶ سانتی‌متر بر ثانیه و ۱۰۱۳/۹ تا ۱۰۵۳/۱ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. بازه تغییر متغیرها در این آزمایش‌ها متناسب با نمونه‌های واقعی انتخاب شده تا نتایج آزمایشگاهی حاصل در مقیاس واقعی قابل استفاده شود (Bleninger & Jirka 2008). این آزمایش‌ها در مدل آزمایشگاهی تحقیقات هیدرولیک محیط زیست دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت در آب ساکن به عمق ۶۰/۷ تا ۶۲/۵ سانتی‌متر انجام گرفته است. در این پژوهش، اثر شکل هندسی سطح مقطع کانال تخلیه‌کننده بر پارامترهایی مانند موقعیت نقطه غوطه‌وری، موقعیت نقطه برخورد، تریق در این نقطه، موقعیت دستیابی به تریق نهایی و میزان تریق تجمعی در این نقطه با توجه به اهمیت محیط‌زیستی و طراحی این پارامترها مورد بررسی قرار گرفت.

### ۲-۲- مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده، مخزنی به طول ۶ متر، عرض ۱/۸ متر و عمق ۱/۵ متر بود. چارچوب فولادی این مخزن امتداد طولی آن را به سه پنجره ۲ متری تقسیم کرده بود و دو طرف آن با شیشه‌ای به ضخامت ۲۰ میلی‌متر پوشانیده شده بود. مخزن از آب با چگالی ۹۹۸ کیلوگرم بر متر مکعب پر شد. کانال‌هایی با مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای به عرض ۱۰ سانتی‌متر به‌عنوان تخلیه‌کننده سطحی در این آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. این کانال‌ها، فاضلاب مصنوعی تولید شده را توسط یک سیستم پمپاژ با سرعت‌های مختلف در داخل مخزن و در مجاورت سطح آب تخلیه می‌کردند. از دبی سنج الکترونیکی برای اندازه‌گیری میزان دبی فاضلاب خروجی استفاده شد، سپس بر اساس عمق قرائت شده در

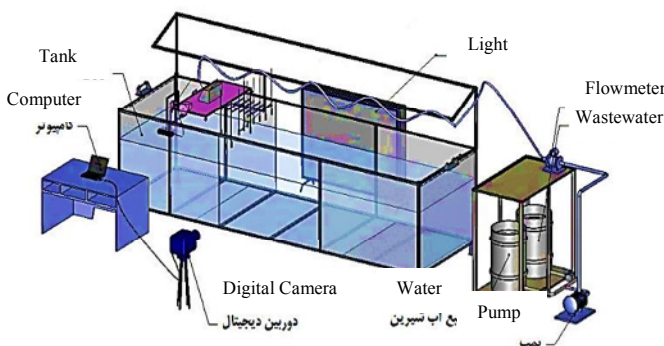


Fig 2. Schematic diagram of experimental setup  
شکل ۲- نمایی از طرح سه بعدی مدل آزمایشگاهی



تأثیر فرایندهای ناحیه میدان نزدیک تعیین می‌شود. استفاده از تحلیل‌های ابعادی در این پژوهش‌ها، بر دو فرض اولیه آشفستگی کامل جریان برای صرف‌نظر کردن از تأثیرات لزجت و فرض تقریب بوسینسک استوار است (Jirka et al. 1981). طبق پژوهش‌های صورت گرفته، مشخصات جریان خروجی در محدوده میدان نزدیک در محیط‌های ساکن تابع متغیرهای تأثیرگذار از جمله شار حجمی ( $Q_0 = U_0 \cdot A_0$ )، اندازه حرکت ( $M_0 = Q_0 \cdot U_0$ )، شناوری ( $B_0 = Q_0 \cdot g_0$ )، فاصله از دهانه تخلیه‌کننده ( $X$ )، عمق آب محیط ( $H$ )، عرض و عمق کانال تخلیه‌کننده ( $b_0, h_0$ ) و زاویه خروجی ( $\theta_0$ ) است (Jones et al. 1996). در معادلات ارائه شده  $A_0$  سطح مقطع جریان بر حسب سانتی‌متر مربع،  $U_0$  سرعت اولیه جت خروجی از منبع بر حسب سانتی‌متر بر ثانیه و  $g_0$  شتاب ثقل کاهش یافته است که برابر است با  $g_0 = (P_0 - P_a / \rho_a) * g$  مشخصات جریان ( $\Theta$ ) را به صورت معادله ۱ به این متغیرها وابسته دانسته‌اند

$$\Theta = f_1(Q_0, M_0, B_0, X, H, b_0, h_0, \theta_0) \quad (1)$$

در محیط‌های عمیق و در حالت تخلیه افقی ( $\theta_0 = 0$ )، با صرف نظر کردن از متغیرهای وابسته ( $\theta_0$ ) مشخصات جریان به صورت معادله ۲ و تابع شارهای اولیه جریان خروجی ( $Q_0, M_0, B_0$ )، فاصله از محل تخلیه ( $X$ ) و مشخصات هندسی منبع است

$$\Theta = f_2(Q_0, B_0, M_0, h_0, b_0, X, H) \quad (2)$$

در این پدیده با توجه به فرایندهای پیچیده حاکم، استفاده از روش مقیاس طولی در مطالعه تخلیه‌کننده‌های دریایی به‌عنوان روشی ساده و کارآمد همواره مورد توجه بوده است (Fischer et al. 1979). در این روش با ترکیب مقادیر نسبی متغیرهای با نیروهای مؤثر شرکت کننده در پدیده اختلاط، می‌توان این متغیرها را در گروه‌هایی با بعد طول تحت عنوان مقیاس طولی دسته‌بندی نمود. مرحله اصلی از تحلیل آزمایش‌ها به روش مقیاس طولی، ارائه روابط و نمودارهای بدون بعد برای توصیف رفتار جریان از طریق این پارامترهای بی‌بعد است. این امر با استفاده از شارهای اولیه جریان و تئوری باکینگهام میسر می‌شود. در اینجا می‌توان مشخصات جریان خروجی از طریق تجمیع در قالب مقیاس‌های طولی تأثیرگذار ( $L_Q, L_M$ ) را به صورت معادله ۳ عنوان کرد

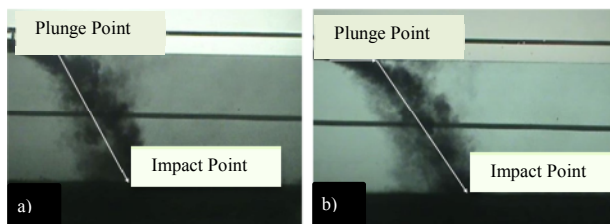


Fig 3. Schematic view of dense surface discharge in stagnant environment, a) rectangular channel b) trapezoidal channel

شکل ۳- نمایی از تخلیه سطحی پساب با شناوری منفی در محیط ساکن، الف) کانال مستطیل ب) کانال دوزنقه

استفاده از نرم‌افزار Image Stream 7.0، تصاویر آزمایش میانگین‌گیری شده و یک تصویر مستقل از زمان (شکل ۴) برای پردازش رقومی ایجاد می‌شود (Nokes 2008). تصویر رنگی میانگین‌گیری شده آزمایش به تصویر مقیاس خاکستری<sup>۱</sup> که تنها توانایی آشکارسازی شدت رنگ سیاه در بازه صفر تا ۲۵۵ (صفر) برای سفید خالص و ۲۵۵ برای سیاه خالص) را دارا می‌باشد، تبدیل شد. این تصویر به منظور تحلیل رقومی با استفاده از برنامه توسعه داده شده در نرم‌افزار Matlab مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. تصویر مذکور در قالب یک ماتریس  $m \times n$  معرفی شد که در آن  $m$  تعداد نقاط افقی و  $n$  تعداد نقاط عمودی هر تصویر بود و مقدار هر مؤلفه ماتریس بیانگر شدت نور سیاه نقطه متناظر با آن می‌باشد.



Fig 4. Averaged image of surface discharge in stagnant environment

شکل ۴- تصویر میانگین‌گیری شده در تخلیه سطحی فاضلاب‌های سنگین در محیط‌های ساکن

### ۳-۲- تحلیل ابعادی

رفتار کلی جریان خروجی از تخلیه‌کننده‌های دریایی عمدتاً تحت

<sup>1</sup> Grayscale

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- نقطه غوطه‌وری

موقعیت نقطه غوطه‌وری جریان، محدوده‌ای است که در آن جریان به‌طور کامل ارتباط خود را با سطح از دست داده و استغراق می‌یابد (Abessi et al. 2012). در این پژوهش موقعیت نقطه غوطه‌وری از طریق بررسی نحوه تغییرات غلظت جریان در نقاط مجاور سطح برآورد شد. در این حالت محدوده‌ای در مجاور سطح در تصویر میانگین‌گیری شده که در آن یک پرش بزرگ در غلظت جریان یا یک کاهش ناگهانی در شدت رنگ سیاه مشاهده شده، به‌عنوان موقعیت نقطه غوطه‌وری جریان انتخاب شد. شکل ۵ موقعیت افقی نقطه غوطه‌وری ( $x_p$ ) (برای هر دو مقطع مورد پژوهش) در برابر مقیاس طولی جت به پلوم نشان می‌دهد و هر دو نسبت به شار حجمی ( $L_Q$ ) بی‌بعد شده‌اند، در این شکل نتایج پژوهش‌های دیگر نیز ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که پیشروی افقی نقطه غوطه‌وری جریان در تخلیه سطحی فاضلاب‌های سنگین تابع عدد فرود دنسیمتریک جریان است. ملاحظه می‌شود که در هر دو مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای، با افزایش عدد فرود دنسیمتریک، پیشروی افقی جریان با روند کلی مشابه افزایش می‌یابد. در شکل ۵، با مقایسه دو مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای ملاحظه می‌شود، مقطع دوزنقه‌ای نسبت به مقطع مستطیلی، با افزایش عدد فرود دنسیمتریک جریان از پیشروی افقی بیشتری برخوردار است. علت آن را می‌توان این‌طور تفسیر کرد که در فرودهای کوچک‌تر از ۲۰ ( $Fr_d < 20$ )، مقیاس طولی تخلیه ( $L_Q$ ) که نشان‌دهنده شکل هندسی کانال تخلیه است، اهمیت بیشتری یافته (Roberts et al. 1997)، از این رو، علی‌رغم بی‌بعدسازی نسبت به  $L_M$ ،  $L_M \propto Fr_d$  به دلیل تأثیر شکل هندسی کانال تخلیه بر رفتار جریان، در کانال‌های دوزنقه‌ای با توجه به درگیری هیدرولیکی کمتر این مقطع با محیط، جریان سطحی، پیشروی افقی بیشتری داشته و نقطه غوطه‌وری در فاصله طولانی‌تری از منبع اتفاق می‌افتد. بنابراین به ازای فرودهای کوچک، مشاهده می‌شود که مقیاس طولی تخلیه و در نتیجه آن شکل هندسی کانال، بر رفتار جریان در میدان نزدیک به‌طور معنی‌داری تأثیرگذار است. رابطه خطی برآزش شده بر داده‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر (۱/۱۱۷ برای مقطع مستطیل)، با شیب خط گزارش شده توسط

(۳)  $f_3(b_0, L_Q, L_M, X, H, h_0) =$  خصوصیات جت با بعد طول در این معادله ( $L_Q = \frac{Q_0}{M_0^{1/2}}$ ) مقیاس طولی تخلیه،  $(L_M = M_0^{3/4} / B_0^{1/2})$  مقیاس طولی جت به پلوم، ( $b_0$ ) عرض کانال تخلیه‌کننده، ( $h_0$ ) عمق کانال تخلیه‌کننده و  $X$  فاصله از محل تخلیه است. در این معادله تمام پارامترها با بعد طول می‌باشند. مقیاس طولی تخلیه ( $L_Q$ ) ناحیه‌ای را که در آن هندسه کانال تخلیه، خصوصیات جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، نشان می‌دهد و در واقع نشان‌دهنده اهمیت نسبی شار حجمی اولیه به شار مومنت اولیه است (Xiao et al. 2009). مقیاس طولی جت به پلوم ( $L_M$ ) بیانگر فاصله‌ای است که در آن انتقال از ناحیه غلبه اندازه حرکت (رفتار جت مانند جریان) به ناحیه غلبه شناوری (رفتار پلوم شکل جریان) در محیط‌های ساکن و همگن اتفاق می‌افتد. نسبت این دو مقیاس طولی به‌عنوان عدد فرود دنسیمتریک ( $Fr_d = \frac{u_0}{\sqrt{g \cdot A_0^{1/2}}} \propto \frac{L_M}{L_Q}$ ) بیان می‌شود. برای  $1 \ll \frac{L_M}{L_Q}$ ، تأثیر دینامیکی شار حجمی منبع نادیده گرفته می‌شود و  $L_Q$  از دسته پارامترهای تأثیرگذار حذف می‌گردد (Belenger & Jirka 2008). بنابراین، با استفاده از آنالیز ابعادی، شکل بدون بعد پارامتر جریان،  $\Phi^*$ ، را می‌توان به‌صورت تابعی از نسبت‌های بدون بعد زیر توصیف کرد (Jones et al. 1996)

$$\Phi^* = f\left(\frac{L_Q}{L_M}, \frac{X}{L_M}, \frac{H}{L_M}, AR\right) \quad (4)$$

که در آن  $AR$ ، نسبت شکل کانال تخلیه است که به‌صورت  $\frac{h_0}{b_0}$  تعریف شده است. پژوهشگران زیادی در پژوهش‌های خود به‌منظور تعیین مشخصات هندسی و اختلاطی جریان و توسعه گراف‌های بی‌بعد، به ترتیب پارامتر بدون بعد  $(X/L_M)$  و  $(S/Fr_d)$  را به‌عنوان پارامتر هندسی و ترقیق نرمال (بدون بعد) جت مورد استفاده قرار دادند (Roberts et al. 1997; Bleninger & Jirka 2008)

$$\frac{X}{L_M} = f_5\left(\frac{H}{L_M}, \frac{h_0}{b_0}, \frac{L_M}{L_Q}\right) \quad (5)$$

$$\frac{S_m}{Fr_d} = f\left(\frac{H}{L_M}\right) \quad (6)$$

نرم افزار لب فیت<sup>۱</sup> استفاده شد (Silva et al. 1999). با جایگذاری ضرایب به دست آمده شکل نهایی این روابط برای پیش بینی موقعیت نقطه غوطه وری به ترتیب برای مقطع مستطیل و دوزنقه با عدد فرود در محدوده  $1.7 < Fr_d < 5$  به صورت زیر ارائه شد

$$\frac{X_p}{L_M} = 0.96 \left(\frac{H}{L_M}\right)^{0.71} * \left(\frac{h_0}{b_0}\right)^{0.196} * \left(\frac{L_M}{L_Q}\right)^{-0.2} \quad (8)$$

$$R^2 = 0.93 \quad RMSE = 0.35$$

$$\frac{X_p}{L_M} = 0.044 \left(\frac{H}{L_M}\right)^{2.57} * \left(\frac{h_0}{b_0}\right)^{0.995} * \left(\frac{L_M}{L_Q}\right)^{2.1} \quad (9)$$

$$R^2 = 0.85 \quad RMSE = 0.25$$

به منظور صحت سنجی آماری روابط بی بعد ارائه شده، از شاخص های مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> (RMSE) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده شده است. برای محاسبه شاخص ریشه میانگین مربعات خطا از معادله ۱۰ استفاده شد

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - X_{(cal)})^2}{n}} \quad (10)$$

در این معادله RMSE، ریشه میانگین مربعات خطا،  $X_j$  مقدار اندازه گیری شده پارامتر مورد نظر،  $X_{(cal)}$  مقدار برآورد شده آن از فرمول های ارائه شده و  $n$  تعداد دفعات آزمایش است. شاخص مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا یکی از شاخص های اصلی صحت سنجی معادلات است. اگر مقدار این شاخص کوچک تر از ۰/۱ باشد برازندگی مدل بسیار خوب است. اگر بین ۰/۱ و ۰/۵ باشد برازندگی مدل خوب است و اگر بین ۰/۵ و ۰/۸ باشد برازندگی مدل متوسط است (MacCallum et al. 1996). مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) به ترتیب برای مستطیل ۰/۳۵، ۰/۹۳ و برای دوزنقه ۰/۲۵ و ۰/۸۵ به دست آمد. همانطور که ملاحظه می شود هر دو معادله دقت قابل قبولی دارند و از این معادلات می توان برای پیش بینی موقعیت نقطه غوطه وری در هر یک از این مقاطع مذکور استفاده کرد.

<sup>1</sup> LAB Fit

<sup>2</sup> Root Mean Square Error (RSME)

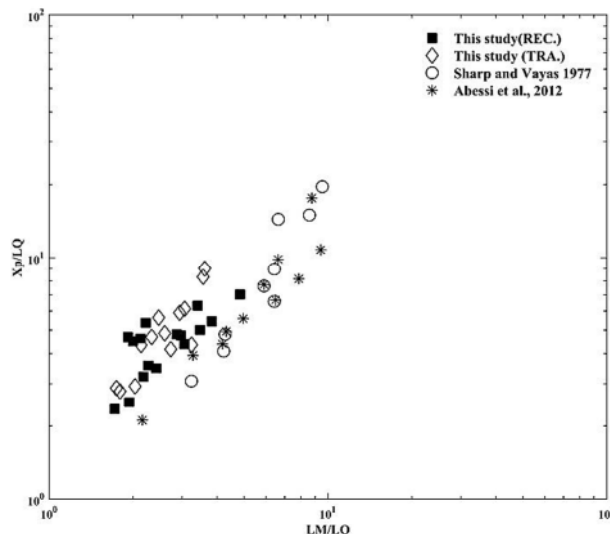


Fig 5. The plunge point location of dense surface discharge

شکل ۵- موقعیت نقطه غوطه وری در تخلیه سطحی فاضلاب های سنگین

عابسی و همکاران در سال ۲۰۱۲ که معادل ۱/۰۷۶ بوده است، اندکی متفاوت است (Abessi et al. 2012). این تفاوت می تواند به دلیل تأثیر شکل هندسی کانال در عدد فرودهای کوچک باشد که علی رغم بی بعد بودن گراف ها، با افزایش عرض کانال مستطیلی از ۶/۴ سانتی متر به ۱۰ سانتی متر نیز اثر خود را نشان داده است. در ادامه با استفاده از آنالیز ابعادی ارائه شده که در آن تمام پارامترهای مؤثر لحاظ شده، می توان معادله ۵ را برای پیش بینی موقعیت نقطه غوطه وری به صورت زیر ارائه نمود

$$\frac{X_p}{L_M} = a_1 \left(\frac{H}{L_M}\right)^\alpha * \left(\frac{h_0}{b_0}\right)^\beta * \left(\frac{L_M}{L_Q}\right)^\gamma \quad (7)$$

در این معادله هدف، تعیین ضرایب  $a_1$ ،  $\alpha$ ،  $\beta$ ،  $\gamma$  و در نهایت استخراج روابط بی بعدی برای پیش بینی موقعیت نقطه غوطه وری برای هر یک از مقاطع مورد مطالعه است. به این منظور داده های به دست آمده به دو دسته تقسیم شدند. دسته اول، ۸۰ درصد داده ها هستند که تحت عنوان داده های آموزش و دسته دوم، ۲۰ درصد داده ها به عنوان داده های تست نام گذاری شدند. انتخاب داده های تست به صورت تصادفی بوده است. از دسته اول برای به دست آوردن ضرایب  $a_1$ ،  $\alpha$ ،  $\beta$ ،  $\gamma$  و از دسته دوم داده ها برای اعتبار سنجی این روابط استفاده شد. برای تعیین ضرایب موجود با استفاده از داده های آموزش، از آنالیز رگرسیونی غیرخطی در



## ۳-۲- نقطه برخورد

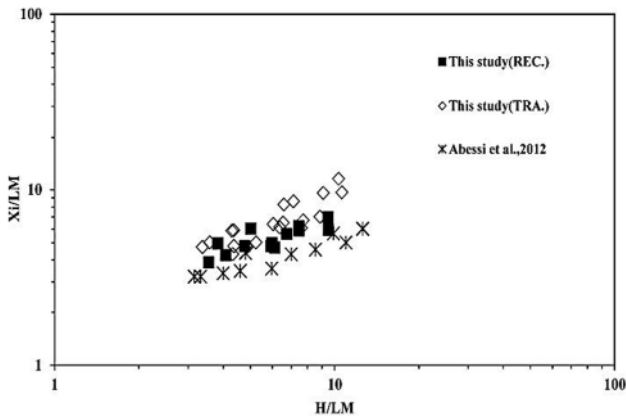


Fig. 6. The location of the impact point of dense surface discharge

شکل ۶- موقعیت نقطه برخورد در تخلیه سطحی فاضلاب‌های سنگین

همانطور که قبلاً اشاره شد، ضرایب  $b_1$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  و در نهایت استخراج معادلات بی‌بعد به ترتیب برای هر یک از مقاطع مستطیل و دوزنقه در محدوده  $1.7 < Fr_d < 5$  به صورت زیر به دست آمد

$$\frac{X_i}{L_M} = 0.922 \left(\frac{H}{L_M}\right)^{0.86} * \left(\frac{h_0}{b_0}\right)^{0.18} * \left(\frac{L_M}{L_Q}\right)^{0.59} \quad (12)$$

$$R^2 = 0.82 \quad RMSE = 0.48$$

$$\frac{X_i}{L_M} = 2.85 \left(\frac{H}{L_M}\right)^{0.44} * \left(\frac{h_0}{b_0}\right)^{-0.09} * \left(\frac{L_M}{L_Q}\right)^{-0.34} \quad (13)$$

$$R^2 = 0.98 \quad RMSE = 0.18$$

نتایج نشان می‌دهد که هر دو معادله دقت قابل قبولی دارند و از این معادله‌ها می‌توان برای پیش‌بینی موقعیت نقطه برخورد در هر یک از مقاطع مذکور استفاده کرد.

در این پژوهش به منظور تعیین میزان ترقیق در نقطه برخورد  $(S_i)$ ، از نسبت شدت یکپارچه نور سیاه در نقطه برخورد  $(I_i)$  به شدت نور بیشینه  $(I_{max})$ ، که همان شدت نور در مبدأ است) استفاده شد. در شکل ۷ نسبت ترقیق پساب در نقطه برخورد به عدد فرود چگال  $(\frac{S_i}{Fr_d})$  در برابر پارامتر بی‌بعد عمق  $(\frac{H}{L_M})$  همراه با نتایج ترسیم شده است (Abessi et al. 2012). شکل ۷ نشان می‌دهد که ترقیق جریان در نقطه برخورد به طور مستقیم تابع  $\frac{H}{L_M}$  است، به این ترتیب تغییر عمق محیط پذیرنده  $(H)$  و پارامترهای اولیه تخلیه  $(L_M \cdot Fr_d)$  منجر به تغییر ترقیق جریان در نقطه برخورد  $(S_i)$  می‌شود. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، تخلیه سطحی

پژوهش‌های محیط‌زیستی با توجه به حساسیت زیستگاه اعماق دریا، اغلب به ارزیابی موقعیت نقطه برخورد و میزان ترقیق در این نقطه می‌پردازند و دستیابی به حداکثر ترقیق در بستر از جمله اهداف مهم در طراحی تخلیه‌کننده‌های دریایی است. در این پژوهش برای تعیین موقعیت نقطه برخورد، تغییرات شدت نور سیاه در ردیف‌های افقی مجاور بستر در تصویر میانگین آزمایش، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در شکل ۶، موقعیت بدون بعد نقطه برخورد  $(\frac{X_i}{L_M})$  در برابر پارامتر بدون بعد  $(\frac{H}{L_M})$  برای دو مقطع مستطیل و دوزنقه همراه با مطالعات پیشین ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهد که موقعیت افقی نقطه برخورد، به عمق محیط پذیرنده بستگی دارد. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده، با افزایش عمق محیط پذیرنده، فاصله نقطه تماس جریان با کف بیشتر خواهد شد. از مقایسه دو مقطع مذکور ملاحظه می‌شود که در مقطع دوزنقه‌ای نسبت به مقطع مستطیلی، موقعیت نقطه برخورد با بستر در تخلیه سطحی جریان‌های چگال، با افزایش عمق سریع‌تر افزایش یافته و امتداد طول نقطه برخورد به طور نسبی بزرگ‌تر است. در کانال مستطیلی نقطه غوطه‌وری زودتر حادث شده و شیب مسیر حرکت نسبت به کانال دوزنقه‌ای بیشتر است؛ به عبارت دیگر جریان خروجی از کانال مستطیلی با سرعت بیشتری نسبت به کانال دوزنقه‌ای سقوط می‌کند. این امر سبب می‌شود که مقطع دوزنقه نسبت به مقطع مستطیل دارای مسیر حرکت طولانی‌تری باشد و برخورد در فاصله بیشتری از محل تخلیه رخ دهد. از این رو کانال با مقطع دوزنقه‌ای از مشخصات ترقیق مناسب‌تری نسبت به مقطع مستطیلی برخوردار خواهد بود. برای اعداد فرود کوچک در تخلیه جریان به دلیل اهمیت شکل تخلیه‌کننده، مقطع هندسی کانال یک پارامتر تأثیرگذار بوده و الگوی حرکت جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در شکل ۶ نتایج این پژوهش و پژوهش‌های پیشین ترسیم شده که روند مشابهی در الگوی تغییرات نقطه برخورد را نشان می‌دهد.

به منظور پیش‌بینی موقعیت نقطه برخورد، معادله ۵ را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\frac{X_i}{L_M} = b_1 \left(\frac{H}{L_M}\right)^\alpha * \left(\frac{h_0}{b_0}\right)^\beta * \left(\frac{L_M}{L_Q}\right)^\gamma \quad (11)$$

### ۳-۳- اختلاط نهایی جریان در محیط<sup>۱</sup>

پس از برخورد جریان با بستر، فاضلاب خروجی با مصرف باقیمانده شارهای اولیه به ترقیق نهایی خود در محیط دست می‌یابد. ترقیق نهایی ( $S_m$ ) در واقع حداکثر ترقیقی است که بر اثر شارهای اولیه جریان خروجی حاصل می‌شود و پس از آن تنها کاهش ناچیزی در غلظت جریان فاضلاب خروجی مشاهده می‌شود. رابرتز و همکاران در سال ۱۹۹۷، محدوده‌ای در مجاورت بستر، که در آن ترقیق جریان تقریباً به صورت مجانب در آمده و غلظت جریان (شدت نور سیاه) در امتداد مسیر در جهت  $X$ ، به طور محسوس تغییر نکرده را به عنوان موقعیت ترقیق نهایی ( $X_m$ ) معرفی نموده‌اند. این نقطه در واقع ابتدای محدوده‌ای است که غلظت جریان بعد از آن، به طور محسوس تغییر نکرده و کاهش نمی‌یابد. در این پژوهش نیز از همین روش برای تعیین موقعیت ترقیق نهایی ( $X_m$ ) استفاده شده است. در شکل ۸، موقعیت ترقیق نهایی ( $X_m$ ) در برابر عمق محیط پذیرنده برای هر دو مقطع یاد شده ترسیم و هر دو نسبت به  $L_M$  نرمال سازی شده‌اند. همانطور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود از نظر موقعیت نقطه ترقیق نهایی جریان در محیط، تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین دو مقطع مذکور مشاهده نمی‌شود.

در شکل ۸ مشاهده می‌شود که نتایج پژوهش حاضر با پژوهش پیشین از انطباق خوبی برخوردار است. اما تفاوت معنی‌داری بین مقادیر به دست آمده برای مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای مشاهده نشد.

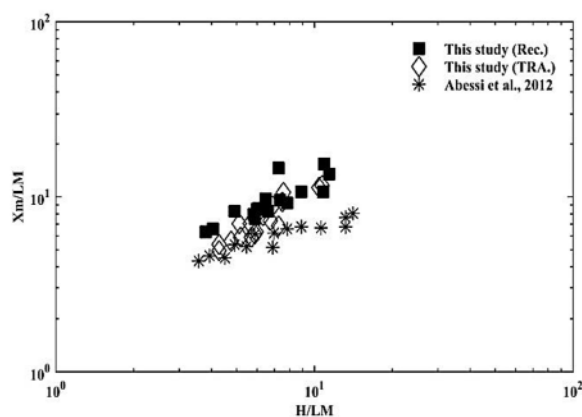


Fig. 8. The location of the ultimate dilution of dense surface discharge

شکل ۸- موقعیت رسیدن جبهه آلودگی به حداکثر میزان ترقیق خود در تخلیه سطحی فاضلاب‌های سنگین

پساب‌های سنگین در آب‌های عمیق‌تر امکان بهتری برای ترقیق جریان در نقطه برخورد را فراهم خواهد ساخت و این ضرورت فاصله گرفتن از ساحل برای دستیابی با عمق‌های بیشتر در تخلیه سطحی فاضلاب‌های شور را نشان می‌دهد. در شکل ۷ با مقایسه دو مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای مشاهده می‌شود به ازای مقدار یکسان ( $H/L_M$ )، مقطع دوزنقه‌ای نسبت به مقطع مستطیلی ترقیق بهتری خواهد داشت. علت این امر را می‌توان این طور تفسیر کرد که در فرودهای کوچک، تأثیر شکل در فاصله زیادی از نقطه تخلیه همچنان برقرار خواهد بود. به دلیل شکل مقطع دوزنقه‌ای، جریان در مجاورت سطح پخش می‌شود و مسیر طولانی‌تری را در مجاورت سطح قبل از غلبه نیروی شناوری طی می‌کند؛ در حالی که در مقطع مستطیلی به علت درگیری بیشتر جریان با آب محیط، نیروی مومنت که عامل رانش افقی جریان است، سریع‌تر مستهلک شده و نیروی شناوری در فاصله کوتاه‌تری غلبه می‌یابد. به این ترتیب مقطع دوزنقه از فرصت بیشتری برای اختلاط با محیط پذیرنده پیش از رسیدن به کف برخوردار بوده و بیشتر رقیق می‌شود. این موضوع بیانگر آن است که هرچه شکل کانال تخلیه‌کننده به شکل بهترین مقطع هیدرولیکی (نیم دایره) نزدیک‌تر باشد، درگیری هیدرولیکی جریان خروجی با محیط کمتر، مسیر حرکت طولانی‌تر و سقوط جریان آهسته‌تر خواهد بود، در نتیجه فاضلاب فرصت بیشتری برای پخشیدگی و ترقیق در محیط پذیرنده در اختیار خواهد داشت. مقایسه نتایج حاضر با پژوهش (Abessi et al. 2012) روند مشابهی داشت.

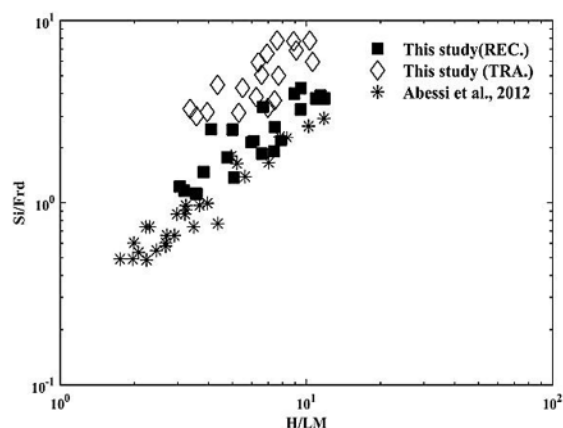


Fig. 7. The dilution in the impact point

شکل ۷- ترقیق جریان در نقطه برخورد جریان چگال با بستر

<sup>1</sup> Flow Ultimate Dilution

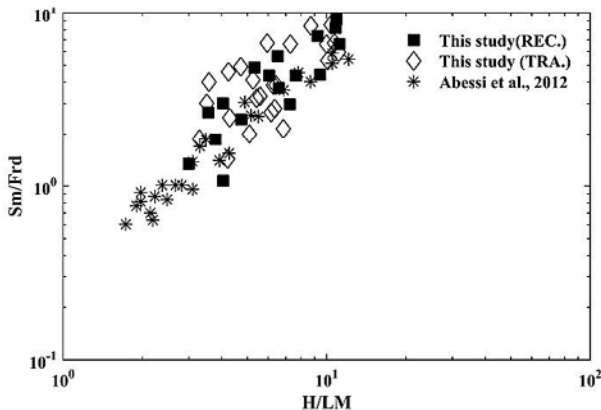


Fig. 9. The ultimate flow dilution of dense surface discharge into stagnant non-stratified ambient

شکل ۹ - ترقیق نهایی در تخلیه سطحی فاضلاب‌هایی با شناوری منفی در محیط ساکن و لایه‌بندی نشده

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمایشگاهی به منظور مقایسه مشخصات هندسی و اختلاطی جریان در تخلیه سطحی پساب‌های سنگین از دو مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای، در محدوده عدد فرود دنسیمتریک ۵-۱/۷ ارائه شد.

در این پژوهش مشاهده شد شکل هندسی کانال تخلیه بر مشخصات هندسی و اختلاطی جریان تأثیرگذار و تعیین‌کننده موقعیت نقطه غوطه‌وری، نقطه برخورد و میزان ترقیق در نقطه برخورد است. همچنین در بررسی مقایسه‌ای این دو کانال مشاهده شد که به‌طور کلی مقادیر این پارامترها برای مقطع دوزنقه‌ای بیشتر از مقطع مستطیلی است. پارامترهای دیگر مورد بررسی ترقیق نهایی و موقعیت دستیابی به آن بوده که با توجه به فاصله بیشتر این نقاط از مجرای تخلیه برای دو مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای مقادیر آنها تقریباً یکسان محاسبه شده است. برای اعداد فرود کوچک مورد بررسی در فاصله زیاد از مجرای تخلیه، تأثیر شکل هندسی مقطع بر مشخصات جریان خروجی از بین رفته و مشخصات جریان در این نقطه مستقل از شکل کانال می‌باشند، لذا برای شارهای یکسان خروجی موقعیت ترقیق نهایی ( $X_m$ ) و میزان ترقیق در این نقطه ( $S_m$ ) برای دو مقطع یکسان خواهد بود.

به این ترتیب در شرایطی که در طراحی، طول مسیر حرکت جریان یا ترقیق در نقطه برخورد مدنظر باشد، مقطع دوزنقه مناسب است و در صورتی که موقعیت و ترقیق نهایی مدنظر باشد، این دو

نزدیکی در موقعیت دستیابی به حداکثر ترقیق جریان در محیط برای مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای را می‌توان به فاصله بیشتر این نقطه از دهانه تخلیه مرتبط دانست زیرا مقیاس طولی تخلیه ( $L_{DQ}$ )، بیانگر محدوده‌ای است که در آن هندسه کانال تخلیه، خصوصیات جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این محدوده تنها طولی کوچک از امتداد جریان را در بر گرفته و تأثیر آن در فاصله طولانی از مجرای تخلیه مستهلک می‌شود. از اینرو در نقطه دستیابی به ترقیق نهایی که در فاصله بیشتری از مجرای تخلیه قرار دارد، عملاً تأثیر شکل هندسی مجرای تخلیه از بین رفته و مشخصات جریان مستقل از آن می‌باشند، لذا موقعیت ترقیق نهایی برای دو مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای تقریباً یکسان است.

میزان ترقیق نهایی ( $S_m$ )، در واقع حداکثر کاهش غلظت جریان در محیط بر اثر شارهای اولیه جریان خروجی است. بعد از دستیابی جریان به ترقیق نهایی، کاهش غلظت آلاینده در محیط بسیار جزئی و تنها ناشی از فرایند انتقال و انتشار مولکولی است. در این پژوهش برای تعیین ترقیق نهایی روند کاهش، شدت نور یکپارچه شده در صفحه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. مقدار این پارامتر مستقیماً با استخراج شدت نور، از طریق برش‌های افقی از تصاویر میانگین در مجاورت بستر به دست آمده است. شکل ۹ نسبت ترقیق نهایی به عدد فرود ( $\frac{S_m}{Fr_d}$ ) در برابر نسبت عمق محیط‌پذیرنده به مقیاس طولی جت به پلوم ( $\frac{H}{L_M}$ ) را برای مقاطع فوق‌الذکر در مقایسه با پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که ترقیق و افزایش اختلاط جریان با عمق، امکان مطلوبی برای تخلیه فاضلاب در مناطق ساحلی عمیق فراهم خواهد ساخت. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود مشابه حالت قبل، میزان ترقیق نهایی فاضلاب در محیط در تخلیه سطحی جریان‌های با شناوری منفی، برای دو مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای تقریباً مشابه بوده و تفاوت قابل ملاحظه‌ای در آن مشاهده نمی‌شود. با استفاده از آنالیز ابعادی انجام شده، معادله بی‌بعد به دست آمده از نرم افزار LABFIT به منظور پیش‌بینی ترقیق نهایی برای مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای برای اعداد فرود کوچک در محدوده  $1.7 < Fr_d < 5$  برابر است با

$$\frac{S_m}{Fr_d} = 0.712 \left( \frac{H}{L_M} \right) - 0.0623 \quad (14)$$

$$R^2 = 0.85 \quad RMSE = 0.3$$

قبولی برخوردار است و می توان از آنها برای پیش بینی پارامترهای جریان استفاده کرد. مهندس طراح با آگاهی از استانداردها و کنترل پارامترهای تأثیرگذار در نهایت قادر به طراحی تخلیه کننده های مشابه برای تخلیه سطحی پساب های سنگین با استفاده از کانال های سطحی پیش رونده در شرایط بهینه خواهد بود.

#### ۵- قدردانی

به این وسیله از حمایت های معاونت پژوهشی دانشگاه های علم و صنعت ایران و تربیت مدرس، بابت فراهم سازی امکانات پژوهشی و زیرساخت های آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش تشکر و قدردانی می شود.

مقطع دارای تأثیرات یکسان تشخیص داده شده اند. از مقایسه دو مقطع مستطیلی و دوزنقه ای نیز نتیجه می شود که هرچه شکل کانال تخلیه کننده به شکل بهترین مقطع هیدرولیکی (نیم دایره) نزدیک تر باشد، مسیر حرکت طولانی تر و سقوط جریان چگال طی آن آهسته تر و ترقیق فاضلاب خروجی بیشتر است. به عبارت دیگر، مقاطع نزدیک به بهترین مقطع هیدرولیکی از مشخصات هندسی و اختلاطی بهتری برخوردار خواهند بود. نتایج حاصل از این پژوهش به صورت یک سری گراف ها و روابط بی بعد ارائه شد، برای صحت سنجی آماری روابط ارائه شده از مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده شد. میزان خطای محاسبه شده بیانگر آن است که روابط ارائه شده از دقت قابل

#### References

- Abessi, O. & Roberts, W.P., 2015, "Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments", *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE), HY.1943-7900.0001032, 06015009.
- Abessi, O. & Roberts, W.P., 2015, "Dense jet discharges in shallow water", *Journal Hydraulic Engineering*, ISSN 0733-9429/04015033(13).
- Abessi, O., 2011, "Analysis of surface discharge of negatively buoyant effluents into non-stratified water bodies", PhD Thesis, Iran University of Science and Technology, School of Civil Engineering, Tehran, Iran. (In Persian)
- Abessi, O., Roberts, W.P., 2014, "Multiport diffusers for dense discharges", *Journal Hydraulic Engineering*, 140 (8), 04014032-1-04014032-12.
- Abessi, O., Saeedi, M., Davidson, M. & Hajizadeh Zaker, N., 2012, "Flow classification of negatively buoyant surface discharges in an ambient current", *Journal Coastal Research*, DOI 10.2112/JCOASTRES-D-10-00131.1, 28 (1-a), 148-155.
- Abessi, O., Saeedi, M., Bleninger, T. & Davidson, M., 2012, "Surface discharge of negatively effluent in unstratified stagnant water", *Journal of Hydro-Environment Research*, 6, 181-193.
- Amon, R.M.W. & Benner, R., 1998, "Seasonal patterns of bacterial abundance and production in the Mississippi River plume and their importance for the fate of enhanced primary production", *FEMS Microbiology Ecology*, 35 (3), 289-300.
- Bleninger, T. & Jirka, G., 2008, "Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants", *Journal of Desalination*, 221, 585-597.
- Chu, V.H. & Jirka, G.H., 1986, "Surface buoyant jets" In: *Encyclopedia of fluid mechanics*, Chap. 25, Gulf, Houston.
- Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F. & Nicosia, S., 2005, "Bench-scale investigation of inclined dense jets", *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(11), 1017-1022.
- Crowe, A.T., Davidson, M.J., & Nokes, R.I., 2012, "Maximum height and return point velocities of desalination brine discharges", *18<sup>th</sup> Australasian Fluid Mechanics Conference Launceston*, Australia.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, C. Y., Imberger, J. & Brooks, N. H., 1979, *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press, Inc., Orlando, Florida.
- Gholamreza-Kashi, S., Martinuzzi, R.J. & Baddour, R.E., 2007, "Mean flow field of a nonbuoyant rectangular surface jet", *Journal of Hydraulic Engineering*, 133 (2), 234-239.
- Jirka, G.H., 2007a, "Buoyant surface discharges into water bodies. II: jet integral model", *Journal of Hydraulic Engineering*, 133 (9), 1021-1036.

- Jirka, G.H., Adams, E.E. & Stolzenbach, K.D., 1981, "Buoyant surface jets", *Journal of Hydraulics Division.*, 107, (11), 1467-1487.
- Jones, G., Nash, D., Doneker, L. & Jirka, G.H., 2007, "Buoyant surface discharge into water bodies I: Flow classification and prediction methodology", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 9, 1010-1020.
- Jones, G.R., Nash, J.D. & Jirka, G.H., 1996, "CORMIX3: An expert system for mixing zone analysis and prediction of buoyant surface discharge", *DeFrees Hydraulics Laboratory*, Cornell University.
- Kikkert, G., A., 2006, "Buoyant jets with tow and three-dimensional trajectories", PhD Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Kassem, J.A.M. & Khan, J.A., 2003, "Three-dimensional modeling of negatively buoyant flow in diverting channels", *Journal Hydraulic Engineering*, 129 (12), 936-947.
- Kikkert, G., Davidson, J. & Nokes, I., 2007, "Inclined negatively buoyant discharges", *Journal of Hydraulic Engineering*, 133, 545-554.
- Law Adrian, W.K., Fun Ho, W. & Monismith, S.G., 2004, "Double diffusive effect on desalination discharges", *Journal of Hydraulic Engineering*, 130 (5), 450-457.
- Lia, C.C.K. & Lee, J.H.W., 2012, "Mixing of inclined dense jets in stationary ambient", *Journal of Hydro-Environment Research*, 6, 9-28.
- MacCallum, R. C., Browne, M. W. & Sugawara, H. M., 1996, "Power analysis and determination of sample size for covariance structure modelling", *Psychological Methods*, 1, 130-149.
- Marti, C. L., Antenucci, J. P., Luketina, D., Okely, P. & Imberger, J., 2011, "Near-field dilution characteristics of a negatively buoyant hypersaline jet generated by a desalination plant", *Journal Hydraulic of Engineering*, 137(1), 57-65.
- Miller, R.S., Madnia, C.K. & Givi, P., 1995, "Numerical simulation of non-circular jets", *Journal Computers and Fluids*, 24, (1), 1-25.
- Nash, J.D. & Jirka, G.H., 1996, "Buoyant surface discharges into unsteady ambient flows", *Journal of Dynamics Atmospheres and Oceans*, 24 (1-4), 75-84.
- Nokes, R., 2008, Image Stream Version 7.00, User's Guide, Department of Civil and Natural Resources Engineering University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Oliver, C.J., Davidson, M.J. & Nokes, R.I., 2013, "Removing the boundary influence on negatively Pincince, A.B., List, E.J., 1973. Disposal of brine into an estuary", *Journal of Water Pollut. Control Fed.*, 45, 2335-2344.
- Roberts, P.J.W., Ferrier, A. & Daviero, G., 1997, "Mixing in inclined dense jets", *Journal of Hydraulic Engineering*, 123 (8), 693-699.
- Saedi, M., Farahani, A. Abessi, O. & Bleninger, T., 2012, "Laboratory studies defining flow regimes for negatively buoyant surface discharges into crossflow", *Journal of Environmental Fluid Mechanics*, 12, 439-449, DOI 10.1007/s10652-012-9245-4.
- Shao, D., Law, A.W.K., 2010, "Mixing and boundary interactions of 30 and 45 inclined dense jets", *Journal of Environmental Fluid Mechanics*, 10 (5), 521-553.
- Silva, W.P. & Silva, C.M.D.P.S., 1999-2011, "LAB Fit curve fitting software (nonlinear regression and treatment of data program)", V 7.2.48, Online, available at the World Wide Web at: www.labfit.net
- Tarrade, L., Miller, B. & Smith, G., 2010, "Physical modelling of brine dispersion of desalination plant outfalls", *6<sup>th</sup> International Conference on Marine Wastewater Discharges*, MWWD 2010, Langkawi, Malaysia, 25 - 29.
- USEPA, 1980a, *Ambient water quality criteria*, EPA 440/5-80-015 to 079, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Xiao, J., Travis, J.R. & Breitung, W., 2009, "Non-boussinesq integral model for horizontal turbulent buoyant round jets", *Science and Technology of Nuclear Installations*, doi:10.1155/2009/862934.

