

خصوصیات جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین در پیکره‌های آبی ساکن و لایه‌بندی نشده

عزیر عابسی^۱ محسن سعیدی^۲ ناصر حاجی‌زاده ذاکر^۳ حسین خیرخواه^۴

(دریافت ۸۸/۱۲/۲ پذیرش ۹۰/۳/۲)

چکیده

در این مقاله نتایج مشاهدات آزمایشگاهی انجام شده به منظور تعیین مشخصات جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین از کانالهای مستطیلی در محیطهای ساکن و غیرلایه‌بندی شده، ارائه گردید. در تحقیق حاضر، رفتار هندسی جریان از طریق شبیه‌سازی فرایند تخلیه در اتاق تاریک، ثبت شد و از طریق پردازش رقومی تصاویر به‌دست آمده، مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش‌ها همچنین برای اندازه‌گیری میزان ترقیق، از نتایج حسگرهای الکتروشیمیایی هدایت الکتریکی که در امتداد مسیر جانمایی شده بودند، استفاده شد. به این ترتیب، علاوه بر مشخصات هندسی جریان، رفتار اختلاطی آن نیز تعیین و در قالب مجموعه‌ای از گراف‌های بی‌بعد ارائه گردید. پروفیل‌های غلظت، مسیر خود همسان جریان، تغییرات عرض و میزان ترقیق جریان در امتداد مسیر آن، از جمله پارامترهایی هستند که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به خاصیت خود همسانی جریان در محیطهای پذیرنده، الگوهای مشاهده شده از مشخصات جریان، از طریق تقسیم بر مقیاسهای طولی جت به پلوم به‌دست آمده برای آزمایش، نرمال گردید. پارامترهای به‌دست آمده با قرار گرفتن بر روی یکدیگر، رفتار عمومی جریان در محیط پذیرنده را نشان می‌دهند. نتایج به‌دست آمده در نهایت به‌منظور به‌دست آوردن تصویری مناسب از فرایند تخلیه با مشاهدات آزمایشگاهی سایر محققان در حالت تخلیه مستغرق فاضلابهای سبک مقایسه گردید. بررسی مقایسه‌ای رفتار جریان در این دو حالت بیانگر آن است که علی‌رغم الگوی رفتاری مشابه، به‌دلیل تأثیر سطح آزاد محیط، مشخصات جریان در تخلیه‌های سطحی و مستغرق تاحدی متفاوت از یکدیگر است. در این حالت مسیر حرکت جریان دارای پیشروی افقی بیشتری نسبت به تخلیه‌های مستغرق بوده و شیب تغییرات عرض و ترقیق جریان نیز متفاوت از حالت مستغرق است.

واژه‌های کلیدی: تخلیه فاضلاب، تخلیه‌کننده‌های سطحی، شناوری منفی، نمک‌زدایی، اختلاط

Flow Characterization Dilution in Surface Discharge of Negatively Buoyant Flow in Stagnant and Non-Stratified Water Bodies

Ozeair Abessi¹ Mohesn Saeedi² Naser Hajizadeh Zaker³ Hossine Khirkhah⁴

(Received Feb. 21, 2009 Accepted May 23, 2010)

Abstract

In this study the results of the experiments conducted in surface discharge of negatively buoyant flows in stagnant and non-stratified body are presented. Geometrical behavior of flow have been studied by simulating of discharged in a dark room and digital possessing of the photos. To determine the mixing behavior of flow the data obtained from 20 conductivity probes located along the trajectory of flow were utilized. Flow concentration profiles, flow self similar trajectory, variation in flow width and changes in flow dilution are the flow characteristics that were studied here. Regarding flow self similar properties the non dimensional behavior of

1. Ph.D. Student of Water and Environment, School of Civil Eng., Iran University of Science and Tech., Tehran
2. Assoc. Prof. of Water and Environment, School of Civil Eng., Iran University of Science and Tech., Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 77240399 msaeedi@iust.ac.ir
3. Assoc. Prof. of Environment, Dept. of Environmen, Tehran University, Tehran
4. B.S. Student of Civil Eng., School of Civil Eng., Iran University of Science and Tech., Tehran

- ۱- دانشجوی دکتری آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
- ۲- دانشیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران (نویسنده مسئول) (۰۲۱) ۷۷۲۴۰۳۹۹ msaeedi@iust.ac.ir
- ۳- دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران
- ۴- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

flow will show similar behavior for different conditions of discharge. To have a comparative scale the experimental results were compared with the behavior that formerly reported for submerge horizontal discharges of positively buoyant flows. The analysis of flow behavior in these two discharges showed that despite the fact the flow general behavior is similar, geometric and mixing characteristics of flow in surface discharges are different from the those observed in submerge discharges. In surface discharges flow protrudes more in comparison to submerge discharges. The changes of flow width and dilution were also different from the one reported for submerge discharges.

Keywords: Wastewater Discharge, Surface Outfall, Negative Buoyancy, Desalination, Mixing.

۱- مقدمه

توسعه شهرنشینی و فعالیتهای صنعتی در مناطق ساحلی با تولید حجم بسیار بالایی از انواع فاضلابهای بهداشتی و صنعتی همراه است. تخلیه این فاضلابها در دریا از طریق تخلیهکنندههای دریایی^۱ از روشهای متداول در دفع پسابهای تولیدی در مناطق ساحلی محسوب می‌گردد. در این حالت با استفاده از انواع تخلیهکنندههای مستغرق (تک مجرای یا چند مجرای) و سطحی نسبت به پخش فاضلاب در محیط با حداکثر اختلاط و تریق اقدام می‌گردد [۱]. فاضلابهای تخلیه شونده در پیکره‌های آبی معمولاً به دلیل وجود املاح محلول یا حرارت، دارای چگالی بیشتر یا کمتری نسبت به آب محیط هستند. در این حالت تخلیه فاضلابهایی با چگالی متفاوت باعث ایجاد جریان‌هایی با شناوری منفی (فاضلابهای سنگین) و شناوری مثبت (فاضلابهای سبک) در محیط پذیرنده می‌گردد. تخلیه فاضلابهای شیرین مناطق و شهرهای ساحلی در آبهای شور دریاها و اقیانوسها از نمونه‌های معمول در تخلیه فاضلابهای سبک در پیکره‌های آبی محسوب می‌شود.

در سالهای اخیر تخلیه پسابهای سنگین در نواحی ساحلی نیز رشد بسیار چشمگیری داشته است. این پسابها عمدتاً در نمکزداهای ساحلی، صنایع استخراج و پالایش نفت و گاز، صنایع تولید کود و سم و صنایع ساحلی برداشت شن و ماسه تولید می‌گردند [۲، ۳] و [۴]. با توجه به توسعه روزافزون صنایع ساحلی نمکزدایی آب دریا، طی سالهای اخیر استفاده از تخلیهکنندههای سطحی که تاکنون بیشتر در تخلیه فاضلابهای بسیار حجیم نیروگاههای ساحلی مورد استفاده بوده، برای تخلیه فاضلابهای شور و سنگین تولیدی در این تأسیسات نیز مورد توجه قرار گرفته است.

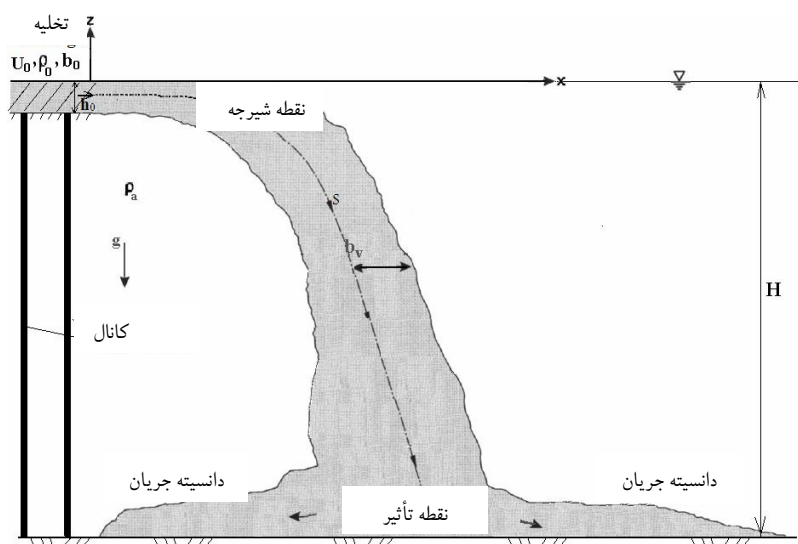
در طراحی و ساخت تخلیهکنندههای دریایی، اولین گام، پیش‌بینی رفتار هندسی و اختلاطی جریان در حالات مختلف تخلیه و محیط پذیرنده است. طی سالهای گذشته مطالعات بسیار وسیعی برای تعیین رفتار جریانهای سنگین خروجی از تخلیهکنندههای مستغرق تک مجرای در محیطهای ساکن انجام شده است [۵-۹]. رابرتز و همکاران^۲ در سال ۱۹۹۷، زانگ^۳ و بادور^۴ در سال ۱۹۹۸،

سیپولینا و همکاران^۵ در سال ۲۰۰۵ و کیکرت و همکاران^۶ در سال ۲۰۰۷ در مطالعات گسترده خود بر روی تخلیه مستغرق فاضلابهای سنگین، جنبه‌های متفاوت حاکم بر رفتار این جریانها را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۵-۸]. پروفیل غلظت جریان، حداکثر ارتفاع خیزش، مسیر حرکت جریان در زوایای مختلف تخلیه و میزان تریق جریان در طول مسیر از جمله پارامترهایی هستند که در مطالعات این محققان مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در حالت تخلیهکننده سطحی فاضلابهای سبک نیز سابقه مطالعه آزمایشگاهی به مطالعات سالهای دور هایشی^۷ و شاتو^۸ در سال ۱۹۶۷، استولزناخ^۹ و هارلمن^{۱۰} در سال ۱۹۷۱، چاو^{۱۱} و گولدربرگ^{۱۲} در سال ۱۹۷۴ و آدام و همکاران^{۱۳} در سال ۱۹۷۵، دان و همکاران^{۱۴} در سال ۱۹۷۵، ویوف^{۱۵} در سال ۱۹۷۸، ژیرکا و همکاران^{۱۶} در سال ۱۹۸۱ و چاو و ژیرکا^{۱۷} در سال ۱۹۸۶ بر می‌گردد [۹-۱۶]. ایشان در بررسی پدیده تخلیه سطحی فاضلابهای سبک، حالتیهای مختلف تخلیه جریانها در محیطهای ساکن و متحرک را مورد مطالعه قرار داده‌اند. جونز و همکاران^{۱۸} در سال ۱۹۹۶ مجموعه مطالعات انجام گرفته در ارتباط با تخلیه سطحی فاضلابهای سبک را تجمیع نموده و در قالب توسعه مدل کرمیکس III^{۱۹} عملیاتی ساخته‌اند [۱۷].

در ارتباط با تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین نیز علویان در سال ۱۹۸۶، هوانستین^{۲۰} و دراکس^{۲۱} در سال ۱۹۸۳ و کاسم و همکاران^{۲۲} در سال ۲۰۰۳ رفتار جریان در تخلیه فاضلابهای

4 Baddour
5 Cipollina et al.
6 Kikkert et al.
7 Hayashi
8 Shuto
9 Stolzenbach
10 Harleman
11 Chu
12 Goldberg
13 Adam et al.
14 Dunn et al.
15 Wiuff
16 Jirka et al.
17 Jirka
18 Jonnes et al.
19 CORMIX3
20 Hauenstein
21 Dracos
22 Kassem et al.

1 Marine Outfall
2 Roberts et al.
3 Zhang



شکل ۱- الگوی عمومی ترسیم شده برای حرکت جریان در تخلیه سطحی جریانهای سنگین در محیطهای ساکن

محسوب می‌گردند، پس از خروج با طی بخشی از مسیر در مجاورت سطح، به تدریج بیشتر به سمت اعماق محیط منحرف شده و در نهایت با رسیدن به بستر، در مجاور آن آرامش می‌یابند. الگوی عمومی حرکت جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین در محیطهای ساکن و همگن به صورت شکل ۱ ترسیم شده است. در این شکل h_0 و b_0 به ترتیب عمق و عرض جریان تخلیه‌ای، ρ_0 و ρ_a چگالی فاضلاب تخلیه شونده و سیال محیط و H عمق محیط پذیرنده است. در الگوی حرکت ترسیم شده محور S ، بیانگر خط مرکزی جریان و b_v عرض جریان است.

در این تحقیق با توجه به عدم وجود مطالعات جامع در زمینه تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین از کانال‌های ساحلی پیشرونده در محیط، مشخصات هندسی و اختلاطی پلوم در حالت‌های مختلف جریان خروجی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. برای این منظور، شبیه‌سازی فرایند تخلیه در آزمایشگاه با استفاده از یک مدل هیدرولیکی و تحلیل رقومی مشاهدات آزمایشگاهی انجام گرفته و تعیین پارامترهای حرکت در محدوده وسیعی از متغیرها با استفاده از توسعه یک روش پردازش رقومی انجام شد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- روش کار

در این تحقیق توسعه مجموعه‌ای از نمودارهای بی‌بعد برای پیش‌بینی نحوه پخشیدگی عرضی، مسیر حرکت، تغییرات عرض و نحوه زوال غلظت در امتداد خط مرکزی جریان در حالت تخلیه فاضلابهای سنگین از کانال‌های ساحلی مستطیلی شکل مورد نظر

سنگین از کانال سطحی شیب‌دار و واگرا مشابه حالت تخلیه جریان‌های رسوبی به مخازن سدها را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۸، ۱۹ و ۲۰]. الگوی حرکت جریان ثقلی شکل گرفته و پارامترهای هندسی و اختلاطی جریان، از جمله مواردی است که در مطالعات مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طور کلی بررسی سابقه مطالعات انجام گرفته بر روی تخلیه‌کننده‌های سطحی بیانگر آن است که علی‌رغم مطالعات وسیع انجام گرفته بر روی تخلیه سطحی فاضلابهای سبک، تخلیه فاضلابهای شور و سنگین از این تخلیه‌کننده‌ها تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در مطالعات محدود انجام گرفته نیز صرفاً تخلیه جریان‌های چگال خروجی از کانال‌های ساحلی شیب‌دار واگرا مورد بررسی قرار گرفته و کانال‌های ساحلی پیشرونده در محیط کمتر مورد توجه بوده‌اند.

در حالت تخلیه جریان از کانال‌های سطحی پیشرونده در محیط، جریان خروجی در صورت دارا بودن سرعت اولیه، الگویی از حرکت تحت عنوان رژیم جت سطحی ایجاد خواهد نمود [۲۱]، [۲۲ و ۲۳]. پروفیل عرضی سرعت و غلظت در این حالت گوسی و پروفیل عمقی آنها نیمه گوسی است [۱۷ و ۲۴]. جریان سطحی تخلیه شونده در صورت اختلاف چگالی با سیال محیط، الگوی متفاوتی از حرکت جریان در محیط تحت عنوان رژیم جت شناور ایجاد خواهد نمود [۲۵]. در این حالت جریان، بخشی از مسیر را به دلیل سرعت اولیه خود در مجاورت سطح طی نموده سپس تحت تأثیر شناوری سیال خروجی به تدریج به سمت سطح یا کف انحراف می‌یابد. پسابهای سنگین خروجی از تخلیه‌کننده‌های سطحی که به دلیل اختلاف چگالی خود با سیال محیط از نوع جت‌های شناوری

الکترومغناطیسی اندازه‌گیری گردید و براساس عمق قرائت شده در دهانه خروجی، سرعت جریان محاسبه شد. فاضلاب مورد استفاده در این آزمایش‌ها، آب شور ناشی از انحلال کلرید سدیم در آب شیرین بود که در غلظت‌های مختلف، جریانی از پساب با جرم‌های حجمی متفاوت ایجاد می‌نمود. برای ثبت مسیر حرکت جریان و تعیین مشخصات ظاهری پلوم، از رنگ سیاه محلول در آب و دوربین دیجیتال نوع سونی^۱ مدل DCR-SR47 استفاده شد.

آزمایش‌ها در اتاق تاریک و در شرایطی که یک منبع نور سفید یکنواخت به طول ۲ و ارتفاع ۱/۳ متر متشکل از ۲۵ لامپ فلورسنت در پشت پنجره میانی جانمایی شده بود، انجام پذیرفت. ثبت دیجیتال مسیر حرکت جریان رنگی فاضلاب در یک زمینه یکنواخت نور سفید به این ترتیب امکان پردازش رقومی آزمایش‌های انجام شده را به نحو مطلوب فراهم ساخت. در این تحقیق برای اولین بار از یک روش تحلیل رقومی برای تفسیر تصاویر دیجیتال ثبت شده، استفاده شد. در این روش، ویدیوی ثبت شده از آزمایش‌ها با استخراج فریم‌های مجزای آزمایش، میانگین‌گیری شد. سپس با انتخاب سطح آزاد آب و دهانه خروجی کانال به‌عنوان مبدأ تصاویر، محدوده تخلیه از تصویر میانگین‌گیری شده هر آزمایش استخراج گردید. در نهایت تصاویر میانگین به‌دست آمده با تبدیل به یک تصویر مقیاس خاکستری^۲، به‌منظور تحلیل رقومی با استفاده از برنامه توسعه داده شده در نرم افزار Matlab مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت.

در این مطالعه همچنین به‌منظور تعیین میزان اختلاط و تریق فاضلاب شور خروجی، از تعداد ۲۰ حسگر الکتروشیمیایی هدایت الکتریکی از نوع YK-2014CD از محصولات شرکت لوترون^۳ استفاده شد. این حسگرها از طریق یک صفحه الکترونیکی که به‌منظور اتصال آنها و اندازه‌گیری در زمان در طراحی پلوم به‌کار رفته بودند، برای نمونه‌برداری هم‌زمان هدایت الکتریکی آب در نقاط مختلف پلوم مورد استفاده قرار گرفتند. مقادیر اندازه‌گیری شده از طریق کابل انتقال داده، به رایانه فرستاده شد و در آن ذخیره گردید. در شکل ۲ نمایی سه بعدی از مدل هیدرولیکی توسعه داده شده در تحقیق حاضر آورده شده است.

۳- تحلیل ابعادی

در کمی‌سازی نتایج آزمایش‌ها به‌روش مقیاس طولی، به‌منظور از بین بردن اثرات ابعادی در مقیاس آزمایشگاهی و استفاده از روابط

¹ SONY

² Grayscale

³ Lutron

بود. به این منظور از یک روش ابعادی مبتنی بر بهره‌گیری از مقیاس طولی برای نرمال سازی و تفسیر آزمایش‌ها و استخراج نمودارهای تجربی حاکم استفاده شد. در این روش متغیرهای مرتبط با نیروهای شرکت‌کننده در پدیده اختلاط در قالب گروه‌هایی با بعد طول با عنوان مقیاس طولی دسته‌بندی می‌گردند. این مقیاسها بیانگر اهمیت نسبی شار حجمی، شار مومنتم، شار شناوری، سرعت محیطی و لایه‌بندی محیط در کنترل رفتار جریان بوده و محدوده‌ای را نشان می‌دهند که کمیتهای دینامیک فوق رفتار جریان در محیط را کنترل می‌نمایند. نسبت‌های بین مقیاسهای طولی، گروه‌های بی‌بعدی تشکیل می‌دهند که می‌توان از آنها در تغییر مقیاس نتایج مطالعات آزمایشگاهی به موارد واقعی استفاده نمود. استخراج روابط بی‌بعد برای توصیف رفتار جریان از طریق این پارامترهای بی‌بعد، مرحله اصلی از تحلیل آزمایش‌ها به‌روش مقیاس طولی است. این کار با استفاده از تئوری باکینگهام و از طریق تعیین نوع ارتباط بین متغیرهای درگیر با مشخصات جریان نسبت به فاصله از منبع تخلیه انجام می‌شود. در این آزمایش‌ها بازه تغییر متغیرها متناسب با نمونه‌های واقعی انتخاب می‌شود تا نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده قابل استفاده و اعمال در مقیاس واقعی باشند. روابط بی‌بعد استخراج شده به این روش به این ترتیب می‌توانند برای پیش‌بینی رفتار ساختارهای مشابه در زمینه واقعی مورد استفاده قرار گیرند.

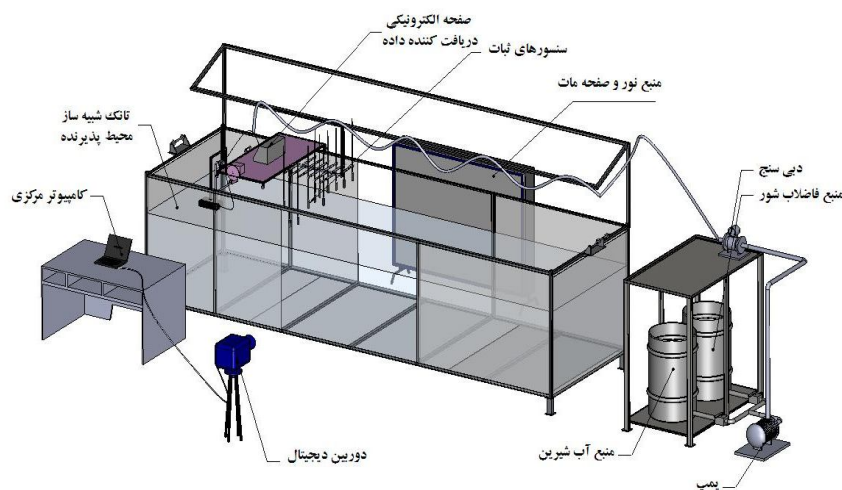
در آزمایش‌های انجام گرفته در این مطالعه، بازه تغییر پارامترهای جریان اعم از دبی، سرعت و چگالی فاضلاب خروجی به‌ترتیب در محدوده ۰/۱۶۳ تا ۰/۹۴۴ لیتر بر ثانیه، ۱۸ تا ۷۰ سانتی‌متر بر ثانیه و ۱۰۱۴ تا ۱۰۶۲ گرم بر سانتی‌مترمکعب در نظر گرفته شد. بازه تغییرات این متغیرها بر اساس محدوده معمول در تخلیه این نوع جریان‌ها با رجوع به نمونه‌های واقعی در حال فعالیت انتخاب گردید. آزمایش‌های بالا در مدل آزمایشگاهی تحقیقات هیدرولیک محیط‌زیست دانشگاه علم و صنعت و در شرایط تخلیه در آب ساکن با اعماق ۴۷ تا ۶۱ سانتی‌متر انجام پذیرفت. در جدول ۱ مشخصات آزمایش‌های انجام گرفته در تحقیق حاضر آورده شده است.

۲-۲- مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده تانکی به‌طول ۶، عرض ۱/۸ و عمق ۱/۵ متر بود که از آب شیر با چگالی ۰/۹۹۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب پر شد. کانال مستطیلی مستقر در سطح که تخلیه‌کننده سطحی مورد استفاده در این آزمایش‌ها بود، از طریق یک سیستم پمپاژ، فاضلاب مصنوعی تولید شده را با سرعت‌های مختلف در داخل تانک تخلیه می‌نمود. به‌منظور اندازه‌گیری سرعت در محل تخلیه، دبی جریان عبوری از طریق دبی‌سنج

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌های انجام گرفته به منظور تعیین مشخصات حرکت در تخلیه سطحی فاضلابهای با شناوری منفی

پارامترهای محاسبه شده				تخلیه				پارامترهای محیط				پارامترهای فاضلاب				ردیف	
L_M	L_Q	Fr_d	Fr_0	g'	$\frac{h_0}{H_a}$	h_0 (cm)	B_0 (cm)	ρ_a ($\frac{g}{cm^3}$)	H_a (cm)	S (ppt)	T (c)	ρ_0 ($\frac{g}{cm^3}$)	T (c)	S (ppt)	μ_0 (cm/s)		Q_0 ($\frac{cm^3}{s}$)
۱۰/۶۷	۲/۴۷	۴/۳۳	۰/۸۸	۱۵/۷۴	۰/۰۱۹	۰/۹۵	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۴۸/۹۵	۱/۵۱	۲۲/۵	۱/۰۱	۲۴	۲۲/۹۵	۲۶/۹۶	۱۶۳/۸۹	۱
۸/۴	۲/۵۷	۳/۲۷	۰/۹	۲۹/۸۶	۰/۰۲۱	۱/۰۳	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۴۹/۰۳	۱/۱	۲۲	۱/۰۳	۲۴/۵	۴۲/۲۴	۲۸/۶۵	۱۸۸/۸۹	۲
۱۵/۴۳	۲/۳۳	۶/۶۱	۱/۳۸	۱۵/۵۵	۰/۰۱۷	۰/۸۵	۶/۴	۰/۹۹۸۷	۴۸/۸۵	۱/۲۵	۲۲	۱/۰۱	۲۴	۲۲/۹۵	۳۹/۸۳	۲۱۶/۶۷	۳
۱۰/۲۴	۲/۴۷	۴/۱۵	۱/۱۷	۲۹/۸۶	۰/۰۱۹	۰/۹۵	۶/۴	۰/۹۹۸۸	۴۸/۹۵	۱/۱۵	۲۱/۵	۱/۰۳	۲۴	۴۲/۲۴	۳۵/۶۴	۲۱۶/۶۷	۴
۶/۵	۲/۲۶	۶/۵	۱/۹	۲۹/۶۱	۰/۰۱۹	۰/۹۵	۶/۴	۰/۹۹۸۷	۴۸/۸	۱/۱	۲۱/۵	۱/۰۳	۲۴	۴۱/۸۹	۵۳/۱۷	۲۷۲/۲۲	۵
۲۱/۸۹	۲/۲۹	۹/۵۵	۲/۰۲	۱۵/۶۲	۰/۰۱۶	۰/۸۲	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۴۸/۸۲	۱/۱۵	۲۲	۱/۰۱	۲۴	۲۲/۹۵	۵۷/۱۶	۳۰۰	۶
۲۵/۵۲	۲/۹۴	۸/۶۸	۱/۶۱	۱۵/۴۵	۰/۰۲۷	۱/۳۵	۶/۴	۰/۹۹۸۷	۴۹/۳۵	۱/۲	۲۲	۱/۰۱	۲۴/۵	۲۲/۹۵	۵۸/۵۱	۵۰۵/۵۶	۷
۱۹/۰۵	۲/۸۸	۶/۶۱	۱/۷۱	۲۹/۶۵	۰/۰۲۶	۱/۳	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۴۹/۳	۱/۱۵	۲۲/۵	۱/۰۳	۲۴/۵	۴۱/۸۹	۶۱/۱	۵۰۸/۳۳	۸
۲۴/۶۴	۳/۶۷	۶/۷۲	۱/۵۵	۲۹/۸۱	۰/۰۴۱	۲/۱	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۵۰/۱	۱/۱۵	۲۲/۵	۱/۰۳	۲۴	۴۱/۸۹	۷۰/۲۷	۹۴۴/۴۴	۹
۳۴/۴۲	۳/۶۲	۹/۵	۱/۵۸	۱۵/۳۸	۰/۰۴	۲/۰۵	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۵۰/۰۵	۱/۱	۲۲	۱/۰۱	۲۵	۲۲/۹۵	۷۰/۹۳	۹۳۰/۵۶	۱۰
۱۶/۲۱	۲/۷۱	۵/۹۸	۱/۵۸	۲۹/۲۲	۰/۰۲۲	۱/۱۵	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۵۱/۱۵	۱/۱۵	۲۲/۵	۱/۰۳	۲۴/۵	۴۱/۳۱	۵۳/۲۲	۳۹۱/۶۷	۱۱
۱۵/۵۸	۳/۲۵	۴/۸	۱/۲۷	۳۴/۸۵	۰/۰۳۱	۱/۶۵	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۵۱/۶۵	۱/۱۵	۲۲	۱/۰۳	۲۴	۴۸/۷۸	۵۱/۰۳	۵۳۸/۸۹	۱۲
۱۵/۲۸	۲/۸۸	۵/۳	۱/۲۸	۲۵/۸۵	۰/۰۳۲	۱/۶۵	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۵۱/۳	۱	۲۱/۵	۱/۰۲	۲۴	۳۶/۷۴	۴۵/۷۴	۳۸۰/۵۶	۱۳
۱۶/۵۷	۳/۲۵	۷/۱۶	۱/۴۱	۳۷/۸۴	۰/۰۳۱	۱/۶۵	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۵۱/۶۵	۱/۱	۲۲	۱/۰۴	۲۴/۵	۵۲/۹۳	۵۶/۵۶	۵۷۹/۲۲	۱۴
۸/۱۹	۲/۸۸	۴/۲۳	۰/۶۱	۲۰/۲۷	۰/۰۲۱	۱/۳	۶/۴	۰/۹۹۸۴	۶۰/۳	۱/۵	۲۴	۱/۰۲	۱۹	۲۷/۱۹	۲۱/۷	۱۸۰/۵۶	۱۵
۶/۸	۲/۸۸	۳/۵۱	۰/۵	۲۰/۲۷	۰/۰۲۱	۱/۳	۶/۴	۰/۹۹۸۴	۶۰/۳	۱/۵	۲۴	۱/۰۲	۱۹	۲۷/۱۹	۱۸/۰۳	۱۵۰	۱۶
۹/۹۹	۳/۰۵	۴/۷۵	۰/۶۸	۲۰/۲۳	۰/۰۲۳	۱/۴۵	۶/۴	۰/۹۹۸۴	۶۰/۴۵	۱/۵	۲۴	۱/۰۲	۱۹/۲	۲۷/۱۹	۲۵/۷۴	۲۳۸/۸۹	۱۷
۱۱/۶	۳/۲۵	۵/۰۱	۰/۷۲	۲۰/۲۳	۰/۰۲۷	۱/۶۵	۶/۴	۰/۹۹۸۴	۶۰/۶۵	۱/۵	۲۴	۱/۰۲	۱۹/۲	۲۷/۱۹	۲۸/۹۴	۳۰۵/۵۶	۱۸
۷/۲۱	۳/۳۹	۲/۱۲	۰/۶۹	۵۵/۶	۰/۰۲۹	۱/۸	۶/۴	۰/۹۹۸۴	۶۰/۸	۱/۵	۲۴	۱/۰۶	۱۹/۲	۷۳/۸۵	۲۹/۱۸	۳۳۶/۱۱	۱۹
۶/۶۱	۳/۲۵	۲/۰۴	۰/۶۸	۵۵/۶	۰/۰۲۷	۱/۶۵	۶/۴	۰/۹۹۸۴	۶۰/۶۵	۱/۵	۲۴	۱/۰۶	۱۹/۲	۷۳/۸۵	۲۷/۳۶	۲۸۸/۸۹	۲۰
۵/۰۵	۲/۷۷	۱/۸۲	۰/۶۶	۵۵/۶	۰/۰۱۹	۱/۲	۶/۴	۰/۹۹۸۴	۶۰/۲	۱/۵	۲۴	۱/۰۶	۱۹/۲	۷۳/۸۵	۲۲/۶۱	۱۷۳/۶۱	۲۱



شکل ۲- نمایی سه بعدی از مدل آزمایشگاهی توسعه داده شده در این تحقیق

ایشان با استفاده از استدلالهای فیزیکی و ابعادی، مقیاسهای طولی مذکور را به منظور ناحیه بندی رژیم های مختلف جریان و تفکیک خصوصیات جت های شناور به صورت زیر پیشنهاد نموده اند

$$L_Q = \frac{Q}{M^{1/2}} \quad (2)$$

$$L_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad (3)$$

که در این روابط

L_Q نشان دهنده اهمیت نسبی شار حجمی به شار مومنتم جریان فاضلاب خروجی است. این پارامتر ناحیه ای از جریان که هندسه کانال، مشخصات جریان خروجی را تحت تأثیر قرار می دهد، مشخص می نماید. L_M نیز که بیانگر اهمیت نسبی مومنتم خروجی به شار شناوری فاضلاب است، نشان دهنده محدوده غالب بودن هر یک از شارهای مذکور در جریان خروجی است. رابرتز و رایت در سال ۱۹۸۱ در راستای توسعه روابط تجربی حاکم، مشخصات جریان در تخلیه جت های شناور را به صورت تابعی از دو پارامتر بی بعد دربرگیرنده این مقیاسهای طولی عنوان نموده اند [۲۶]

$$\Theta = f\left(\frac{H}{L_Q}, \frac{H}{L_M}\right) \quad (4)$$

که در این رابطه

Θ پارامتر بی بعد در بردارنده یکی از مشخصات جریان است که از طریق تحلیل های ابعادی به دست می آید.

رابرتز و همکاران در سال ۱۹۹۷ در بررسی جت های شناور، نقش شار حجمی در مقابل شار مومنتم و شار شناوری را قابل اغماض دانسته اند [۳]. بر این اساس، ایشان مشخصات جریان در

استخراجی در طراحی نمونه های واقعی، پارامترهای تأثیرگذار در قالب یک پارامتر بی بعد در برگیرنده کمیت مورد نظر، بررسی شدند. رابرتز^۱ و رایت^۲ در مطالعات خود در سال ۱۹۸۱ مشخصات جریان در تخلیه جریان های شناور در محیط های ساکن را طبق رابطه زیر تابعی از شارهای حجمی، مومنتم، شناوری، مشخصات منبع تخلیه و عمق محیط پذیرنده عنوان نموده اند [۲۶].

$$Q = f(Q_0, M_0, B_0, b_0, h_0, H) \quad (1)$$

که در این رابطه

Q_0 شار حجمی ($Q_0 = u_0 \cdot A$), M_0 شار مومنتم ($M_0 = Q_0 \cdot u_0$) و B_0 شار شناوری ($B_0 = g \cdot Q_0$) جریان خروجی در یک سیستم ابعادی است. h_0 و b_0 در این رابطه عرض و ارتفاع جریان در کانال تخلیه و H عمق آب در محیط پذیرنده فاضلاب محسوب می گردد. در روابط ارائه شده، u_0 سرعت اولیه جریان خروجی بر حسب متر بر ثانیه، A سطح مقطع جریان بر حسب مترمربع، g شتاب اصلاح شده ثقل یا $g' = \frac{\rho_0 - \rho_a}{\rho_a} \cdot g$ بر حسب متر بر مجدوز ثانیه، ρ_a چگالی آب محیط و ρ_0 چگالی اولیه فاضلاب است.

پینسین^۳ و لیست^۴ در سال ۱۹۷۳ و رایت در سال ۱۹۷۷ در مطالعات خود با صرف نظر کردن از تأثیرات شکل تخلیه کننده، متغیرهای بالا را در قالب دو مقیاس طولی تخلیه^۵ (L_Q) و مقیاس طولی جت به پلوم^۶ (L_M) با بعد طول، تجمیع نموده اند [۲۷ و ۲۸].

¹ Roberts

² Wright

³ Pincince

⁴ List

⁵ Discharge Length Scale

⁶ Jet to Plume Length Scale

بررسی رفتار هندسی جریان‌های تخلیه شونده در پیکره‌های آبی، فاصله نقطه‌ای با ۳۷ درصد غلظت بیشینه از خط مرکزی جریان $(b_v = \frac{1}{e} \cdot I_{max})$ به‌عنوان عرض جریان در آن مقطع در نظر گرفته می‌شود [۲۹]. در شکل ۴ الگوی کلی پروفیل‌گوسی غلظت جریان و نحوه تعیین عرض در امتداد مسیر جریان ترسیم گردیده است. در شکل ۵ نیز پروفیل‌های گوسی نرمال به‌دست آمده برای غلظت جریان در مقاطع مختلف نشان داده شده در شکل ۳، آورده شده است. در این شکل محور عمودی نسبت شدت نور هر نقطه به شدت نور بیشینه آن مقطع (I/I_{max}) و محور افقی موقعیت هر نقطه نسبت به عرض جریان در آن مقطع (r/b_v) است.

به این ترتیب با ترسیم مقادیر نرمال شدت نور جریان به موقعیت نرمال آنها در هر مقطع، پروفیل‌های گوسی و خود همسان غلظت جریان در مقاطع مختلف به‌دست آمد. خود همسانی جریان به این معنی است که پارامترهای جریان در صورتی که به‌درستی نرمال گردند با قرار گرفتن بر روی یکدیگر، الگوی عمومی حرکت جریان در حالات مختلف تخلیه را نشان می‌دهند. در این حالت پروفیل‌های غلظت در امتداد مسیر حرکت جریان در محیط، دارای حالت و الگوی مشابهی هستند. براساس تعریف بالا، پروفیل‌های مذکور علاوه بر مقاطع مختلف یک آزمایش برای آزمایش‌های مختلف یک نوع تخلیه خاص نیز مشابه بوده و بیان‌کننده مشخصه اختلاطی جریان در آن نوع تخلیه هستند.

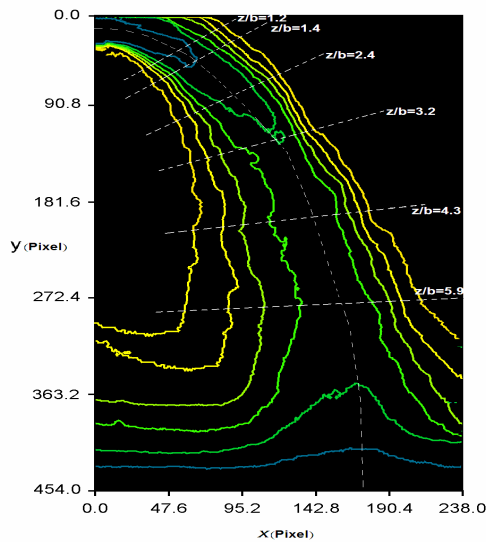
بررسی جت‌های شناور را تنها وابسته به مقیاس طولی L_M و تابعی از پارامتر بدون بعد $\frac{H}{L_M}$ عنوان نموده‌اند

$$\Theta = f\left(\frac{H}{L_M}\right) \quad (5)$$

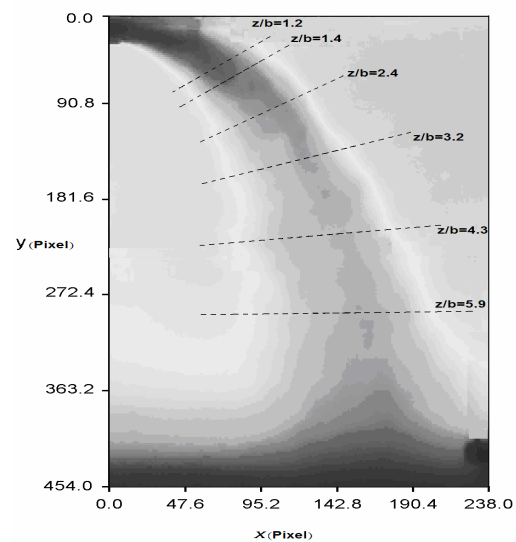
۴- نتایج و بحث

۴-۱- پروفیل‌های غلظت

در تخلیه‌کننده‌های سطحی، پروفیل غلظت در ناحیه جت شکل در محدوده‌ای که جریان با حفظ تماس خود با سطح آب به حرکت در می‌آید، در جهت عمودی نیمه گوسی و در جهت افقی تمام گوسی است. در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین، با استهلاک سرعت اولیه و شیرجه جریان به سمت اعماق بیشتر، جریان خروجی به تدریج استغراق یافته و به سمت اعماق بیشتر محیط، پیشروی می‌نماید. در شکل ۳-الف به‌عنوان نمونه الگوی عمومی حرکت جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین برای آزمایش ۱ (جدول ۱) و در شکل ۳-ب منحنی‌های با شدت نور یکسان به‌دست آمده برای این آزمایش ترسیم گردیده است. در این مطالعه پروفیل غلظت جریان در محدوده مستغرق جریان از طریق تهیه یک برش عرضی از شدت نور سیاه در مقاطع مختلف جریان استخراج گردید. بر طبق تعریف لی و چاو در سال ۲۰۰۳، در

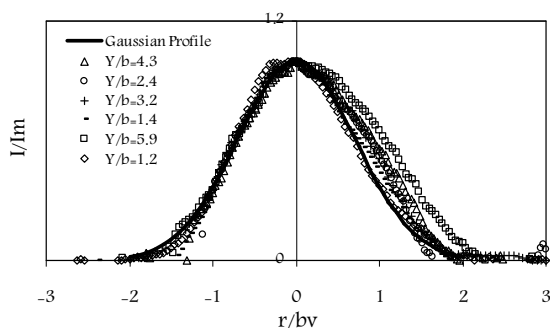


(ب)



(الف)

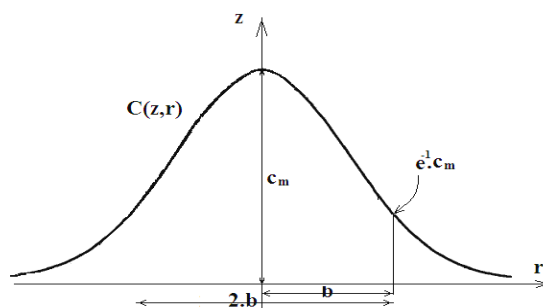
شکل ۳- مسیر حرکت جریان (الف) و منحنی‌های هم شدت نور (ب) در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین از کانال‌های مستطیلی پیشرونده در محیط‌های ساکن



شکل ۵- پروفیل‌های گوسی و خود همسان غلظت در ناحیه مستغرق جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین در محیط‌های ساکن

آمد. این مقدار کمی ثابت نبوده و در هر آزمایش با توجه به مشخصات جریان، متفاوت از آزمایش‌های دیگر بوده و در واقع نماینده مشخصات تخلیه در همان آزمایش می‌باشد. به این ترتیب نقاط پراکنده به دست آمده از مجموع آزمایش‌ها با نرمال‌سازی هر آزمایش نسبت به L_M به دست آمده برای آن آزمایش، استاندارد شدند. این نقاط با قرار گرفتن بر روی یکدیگر، الگوی عمومی و خود همسان رفتار جریان را نشان می‌دهند. نظر به عدم وجود مطالعات آزمایشگاهی مرتبط با تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین و با توجه به مکانیسم مشابه حرکت جریان در این حالت با تخلیه مستغرق فاضلابهای سبک، با در نظر گرفتن خاصیت آینه‌گون حرکت، نتایج به دست آمده با نتایج مطالعات آزمایشگاهی سایر محققان مقایسه گردید.

در تخلیه افقی جریان‌های مستغرق فاضلابهای سبک، جت خروجی بعد از خروج با طی بخشی از مسیر به صورت افقی، به دلیل اختلاف چگالی با سیال محیط به تدریج به سمت سطح منحرف می‌گردد. در محیط‌های همگن این حرکت تا رسیدن سیال به سطح آب ادامه یافته و بعد از آن جریان بر اثر پخشیدگی ناشی از شناوری در مجاورت سطح گسترش یافته، پخش می‌گردد. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که الگوی خود همسان به دست آمده برای مسیر حرکت جریان در این مطالعه نزدیک به مشاهدات فن^۳ در سال ۱۹۶۷ و دیویدسون^۴ و پان^۵ در سال ۲۰۰۰ و تا حدی دورتر از نتایج هندسن^۶ و اسشریدر^۷ در سال ۱۹۶۸ و شیائو و همکاران^۸ در سال ۲۰۱۰ است [۳۰-۳۳]. در این شکل به‌طور کلی الگوی حرکت به دست آمده در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین کمی فزاینده از مشاهدات آزمایشگاهی گزارش شده در تخلیه مستغرق



شکل ۴- نمایی کلی از پروفیل گوسی غلظت و موقعیت نقطه‌ای با غلظت $I/e.C_{max}$ به عنوان عرض جریان

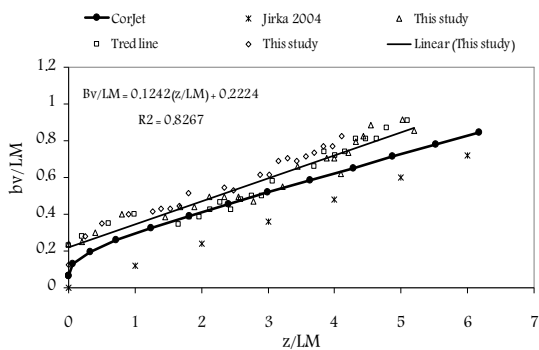
در شکل ۵ پروفیل گوسی استاندارد به معادله $c(x,y) = c_m \exp(-\frac{y^2}{b^2})$ به نحوی که بهترین برازش را بر داده‌های مشاهده شده داشته باشد، ترسیم گردیده است. در این حالت عرض پروفیل گوسی برازش داده شده برابر با یک ($b=1$) به دست آمده است. عرض به دست آمده معرف نحوه پخشیدگی عرضی جریان در محیط بوده و مشخصه اختلاطی آن نوع جریان در محیط است. شائو^۱ و لا^۲ در سال ۲۰۱۰ و کیکرت و همکاران در سال ۲۰۰۷ نیز در مطالعات خود بر روی جت‌های مستغرق فاضلاب سنگین، میزان عرض پروفیل گوسی نماینده را برابر ۱ به دست آورده‌اند که این موضوع مکانیسم پخشیدگی مشابه جریان در حالت مستغرق و ناحیه استغرق یافته جریان‌های سطحی را نشان می‌دهد [۷ و ۳۰].

۲-۴- مسیر حرکت جریان

با توجه به پروفیل‌های گوسی شکل غلظت جریان در عرض به منظور تعیین مسیر حرکت جریان، موقعیت نقاطی با شدت نور یا غلظت بیشینه در برشهای عرض متفاوت، به عنوان موقعیت خط مرکزی جریان انتخاب گردید. در شکل ۶ از طریق اتصال این نقاط در آزمایش‌های مختلف در حالتی که مشخصات حرکت نسبت به مقیاس طولی جت به پلوم نرمال شده‌اند، مسیر حرکت جریان ترسیم گردیده است. با توجه به خاصیت خود همسانی جریان، با نرمال نمودن محورهای این نمودار، الگوی عمومی رفتار جریان در محیط، فارغ از مقدار پارامترهای تخلیه به دست می‌آید. در این حالت مقدار مقیاس طولی جت به پلوم برای هر آزمایش به‌طور مجزا به دست

³ Fan
⁴ Davidson
⁵ Pun
⁶ Hansen
⁷ Schroder
⁸ Shao et al.

¹ Shao
² Law



شکل ۷- تغییرات عرض جریان در امتداد مسیر حرکت در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین در محیطهای ساکن، نقاط هندسی توخالی نتایج آزمایشهای مجزای انجام گرفته در این تحقیق هستند.

۴-۴- تغییرات میزان ترقیق جریان

در این مطالعه به منظور تعیین تغییرات میزان ترقیق جریان در جهت عمودی از داده‌های به دست آمده از حسگرهای الکتروشیمیایی هدایت الکتریکی که در امتداد خط مرکزی جریان جانمایی شده بودند، استفاده شد. این حسگرها با نمونه برداری در زمان از نقاط مختلف پلوم، میزان هدایت الکتریکی جریان در هر نقطه و در نتیجه میزان ترقیق جریان در آن نقطه را تعیین می‌نمایند. در این بخش میزان ترقیق جریان در امتداد مسیر از طریق اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در هر نقطه و با استفاده از رابطه زیر برآورد گردید

$$S = \frac{C_0 - C_a}{C - C_a} \quad (6)$$

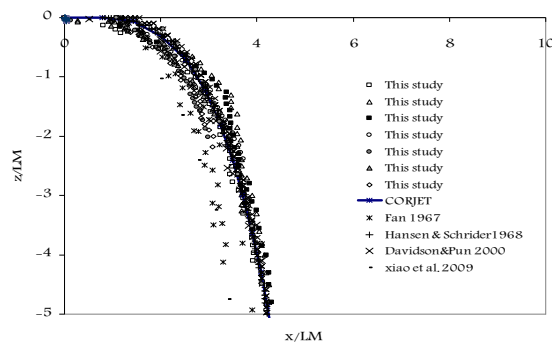
که در این رابطه

S میزان ترقیق فاضلاب در نقطه نمونه برداری، C_0 هدایت الکتریکی فاضلاب خروجی، C_b هدایت الکتریکی زمینه‌ای محیط پذیرنده و C هدایت الکتریکی جریان در هر نقطه است.

در این تحقیق بر طبق مطالعات رابرتز و همکاران در سال ۱۹۹۷ و بلینگر^۱ و ژیرکا در سال ۲۰۰۸ و میزان ترقیق جریان در هر نقطه نسبت به عدد فرود چگالی^۲ (Fr_d)، که خود متناسب است با نسبت مقیاس طولی تخلیه به مقیاس طول جت به پلوم ($Fr_d \propto \frac{L_0}{L_M}$)، نرمال شد و در قالب شکل ۸ نسبت به پارامتر نرمال مکان (z/L_M) ترسیم گردید [۳ و ۸]. به منظور انجام مقایسه در این مطالعه نتایج مشاهدات آزمایشگاهی انجام شده همراه با نتایج مطالعات هندسین و اسشریدر در سال ۱۹۶۸، لیس^۳ در سال ۱۹۷۰ و شیوا و همکاران در سال ۲۰۰۹ که رفتار اختلاطی جریان در تخلیه مستغرق فاضلابهایی با شناوری مثبت را مورد مطالعه

¹ Bleninger
² Densimetric Froude number
³ Liseth

جریان‌های سبک است. عدم تطابق کامل مسیر جریان در این دو حالت را می‌توان ناشی از تأثیرات سطح آزاد آب در تغییر الگوی عمومی حرکت جریان‌های سطحی دانست. دلیل هیدورلیکی این موضوع را می‌توان درگیری کمتر جریان خروجی با سیال محیط در تخلیه‌های سطحی و استهلاك کمتر و در نتیجه دیرتر مومنت خروجی جریان در این حالات دانست که پیشروی بیشتر سیال خروجی در محیط را به همراه خواهد داشت.



شکل ۶- مسیر حرکت خود همسان و بی‌بعد جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین در پیکره‌های آبی ساکن به همراه داده‌های آزمایشگاهی سایر محققان. نقاط هندسی توخالی ترسیم شده، نتایج آزمایشهای مجزای انجام گرفته در تحقیق حاضر است.

۴-۳- تغییرات عرض جریان

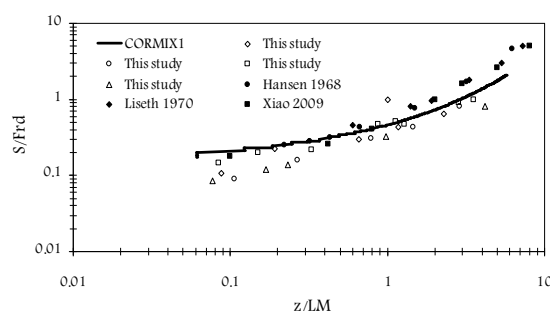
جریان فاضلاب به محض ورود به محیط پذیرنده با کشیدن آب محیط به داخل خود در جهات مختلف گسترش می‌یابد. به منظور تعیین عرض جریان در امتداد مسیر حرکت آن، مطابق روش معمول، فاصله نقطه‌ای با غلظت $I_{max} 37\%$ از مرکز پروفیل غلظت به عنوان عرض جریان در آن مقطع در نظر گرفته شد [۲۹]. در این حالت از طریق تعیین عرض جریان در برشهای عرض مختلف، شکل ۷ ترسیم گردید. در این شکل عرض جریان در محور عمودی (b_v) و موقعیت آن در محور افقی (z) در حالتی که هر دو نسبت به L_M نرمال شده‌اند ترسیم گردیده است. به منظور مقایسه نتایج به دست آمده، الگوی تغییرات غلظت همراه با الگویی که پیشتر توسط ژیرکا در سال ۲۰۰۴ در حالت تخلیه مستغرق جریان‌های جت شکل گزارش شده ($b_v = 0.12z + C$)، ترسیم گردید [۳۴]. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود نرخ افزایش عرض یا شیب نمودار در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین بسیار نزدیک به میزان گزارش شده برای تخلیه‌های مستغرق فاضلابهای سبک است. علت تفاوت اندک مشاهده شده می‌تواند ناشی از تأثیرات سطح و مکانیسم اختلاطی متفاوت جریان در این دو حالت باشد.

تخلیه، پروفیل‌های خود همسان غلظت، مسیر حرکت، تغییرات عرض جریان و نحوه افزایش ترقیق در امتداد مسیر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. نتایج کمی به دست آمده از طریق بعدسازی پارامترهای حاکم به روش مقیاس طولی، در نهایت در قالب مجموعه از نمودارهای بی بعد ترسیم گردید. بررسی مقایسه‌ای نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی حالات مشابه، تفاوت رفتار هندسی و اختلاطی جریان در حالت تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین را با تخلیه مستغرق فاضلابهایی با شناوری مثبت نشان می‌دهد. در الگوی به دست آمده برای حرکت جریان در این حالت، مشاهده شد که به دلیل تأثیرات سطح آزاد آب، درگیری جریان خروجی با محیط پذیرنده کمتر و میزان پیشروی جریان در محیط بیشتر بود. علاوه بر آن، میزان پخشیدگی عرضی جریان در این حالت، کمی بیشتر از تخلیه‌های مستغرق بود. بررسی رفتار اختلاطی جریان با استفاده از حسگرهای هدایت الکتریکی در این مطالعه، ترقیق کمتر جریان در امتداد مسیر حرکت آن از سطح تا کف را نشان داد. عدم دستیابی به ترقیق کافی، در حد ترقیق مشاهده شده در تخلیه کننده‌های مستغرق، از جمله مواردی است که استفاده از این تأسیسات برای تخلیه فاضلابهای بسیار آلوده در محیط‌های ساحلی را محدود می‌سازد. با استخراج الگوی کمی رفتار جریان در محیط از طریق نمودارهای بی بعد توسعه داده شده در این مطالعه به این ترتیب، امکان پیش‌بینی مشخصات جریان و طراحی نمونه‌های واقعی از این تخلیه کننده‌ها به نحو مطلوبی فراهم می‌گردد.

۶- قدردانی

به این وسیله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه علم و صنعت ایران بابت فراهم‌سازی زیرساخت‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در مطالعه حاضر تشکر و قدردانی می‌گردد.

قرار داده‌اند، ترسیم گردید [۳۳، ۳۵ و ۳۶]. در این شکل نقاط توپر، نتایج آزمایش‌های سایر محققان و نقاط هندسی تو خالی، نتایج آزمایش‌های تحقیق حاضر می‌باشند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود میزان ترقیق جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین، کمتر از حالت تخلیه مستغرق فاضلابهای سبک است. کاهش میزان ترقیق جریان در حالت تخلیه سطحی را می‌توان ناشی از تأثیرات سطح آزاد آب دانست. عدم تماس جریان خروجی با محیط از جانب سطح، درگیری کمتر جریان با سیال محیط و کاهش میزان اختلاط و آشفتگی جریان خروجی را به همراه خواهد داشت. کاهش القای آشفتگی به این ترتیب ترقیق کمتر جریان فاضلاب در امتداد مسیر را به همراه خواهد داشت.



شکل ۸- الگوی به دست آمده برای تغییرات میزان ترقیق جریان در جهت عمق در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین در پیکره‌های آبی ساکن، نقاط هندسی تو خالی نتایج آزمایش‌های مجزای انجام گرفته در این تحقیق می‌باشند و نقاط تو پر نتایج سایر محققان است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از طریق شبیه‌سازی فرایند تخلیه در آزمایشگاه و تفسیر رقومی رفتار هندسی و اختلاطی جریان در حالات مختلف

۷- مراجع

- 1- Abessi, O., and Saeedi, M. (2009). "Wastewater discharge into the seas." *J. of Water and Environmental*, 73, 34-41. (In Persian)
- 2- Ahmed, M., Shayya, W. H., Hoey, D., and Al-Handaly, J. (2001). "Brine disposal from reverse osmosis desalination plants in Oman and the United Arab Emirates." *J. Desalination*, 133, 135-147.
- 3- Roberts, P.J.W., Ferrier, A., and Daviero, G. (1997). "Mixing in inclined dense jet." *J. Hydraulic Engineering*, 123(8), 693-699.
- 4- Jones, G., Nash, D., Doneker, L., and Jirka, H. (2007). "Buoyant surface discharge into water bodies. I: Flow classification and prediction methodology." *J. Hydraulic Engineering*, 133(9), 1010-1020.
- 5- Zhang, H., and Baddour, E. (1998). "Maximum penetration of vertical round dense jets at small and large fround numbers." *J. Hydraulic Engineering*, 124(5), 550-553.
- 6- Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F., and Nicosia, S. (2005). "Bench-scale investigation of inclined dense jets." *J. Hydraulic Engineering*, 131(11), 1017-1022.

- 7- Kikkert, G., Davidson, J., and Noles, I. (2007). "Inclined negatively buoyant ischrges." *J. Hydraulic Engineering*, 133 (5), 545-554.
- 8- Bleninger, T., and Jirka G. H. (2008). "Modeling and environmentally sound management of brine discharge from desalination plants." *J. Desalination*, 221, 585-597.
- 9- Hayashi, T., and Shuto, N. (1967). "Diffusion of warm water jets discharged horizontally at water surface." *Proc. of the 12 Conf. of the Intern'l. Assoc. for Hyd. Res.*, Fort Collins, Colorado, 47-59.
- 10- Stolzenbach, K.D., and Harleman, D.R.F. (1971). *An analytical and experimental investigation of surface discharges of heated water*, Technical Rep. No. 135, R. M. Parsons Lab for Water Resources and Hydrodynamics Massachusetts, USA.
- 11- Chu, V. H., and Goldberg, M.B. (1974). "Buoyant forced plumes in cross flow." *J. Hydraulics Division*, 122(1), 27-34.
- 12- Adams, E.E., Stolzenbach, K.D., and Harleman, D.R.F. (1975). *Near and far field analysis of buoyant surface discharges into large bodies of water*, Technica Report 201, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- 13- Dunn, W. E., Policastro, A. J., and Paddock, R. A. (1975). *Surface thermal plumes: Evaluation of mathematical models for the near and complete field*, Argonne National Laboratory Report ANL/WR-75-3-Part One, USA.
- 14- Wiuff, R. (1978) "Experiments on surface buoyant jet." *J. Hydraulic Division*, 104(5), 667-679.
- 15- Jirka, G.H., Adams, E.E., and Stolzenbach, K.D. (1981). "Buoyant surface jets." *J. Hydraulic Division*, 107(11), 1467-1487.
- 16- Chu, V. H., and Jirka, G. H. (1986). "Surface buoyant jets." *Encyclopedia of fluid mechanics*, Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- 17- Jones, R.G., Nash, D. J., and Jirka, H.G. (1996). *CORMIX3: An experimental system for mixing zone analysis and prediction of buoyant surface discharges*, User Manual, Office of Science and Technology, Environmental protection Agency, Washington. D.C.
- 18- Alavian, V. (1986) "Behavior of density currents on an incline." *J. of Hydraulic Engineering*, 112 (1), 27-42.
- 19- Hauenstein, W., and Dracos, T. (1983). "Investigation of plunging density currents generated by inflows in lakes." *J. Hydraulic Research*, 22(3), 157-179.
- 20- Kassem, A., Jasim, I., and Jamil, A.K. (2003). "Three-Dimensional modeling of negatively buoyant flow in diverging channels." *J. Hydraulic Engineering*, 129 (12), 936-947.
- 21- Abdelwahed, M. S. T., and Chu, V. H. (1981). *Surface Jets and surface plumes in cross-flows*, Technical Report No. 81-1, Fluid Mechanics Laboratory, McGill University, Montreal.
- 22- Jen, Y., Wiegel, R. L., and Mobarek, I. (1966). "Surface discharges of horizontal warm water jets." *J. Power Div.*, 92(2), 1-29.
- 23- Jirka, G., Adams, E., and Stolzenbach, K. (1981). "Properties of surface buoyant jets." *J. of Hydraulics Division*, 106, 1467-1487.
- 24- Nash, J. D., and Jirka, G. H. (1996). "Buoyant surface discharges into unsteady ambient flows." *J. Dyn. Atmos. Oceans*, 24(1-4), 75-84.
- 25- Fischer, B., List, J.E., Imberger, J., and Brooks, H. N. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*, Acadmce Press, INC.San Diego, California.
- 26- Roberts, J.W., and Wright, S.J. (1981). "Vertical round buoyant jet in shallow water." *J. Hydraulic Engineering*, 72, 490-496.

- 27- Pincince, A. B., and List, E. J. (1973). "Disposal of brine into an estuary." *J. Water Pollut. Control Fed.*, 45, 2335-2344.
- 28- Wright, S. J. (1977). *Effects of ambient cross flow and density stratification on the characteristic behavior of round turbulent buoyant jets*, Report No. KH-R-36, W.M. Keck Lab. of Hydr. and Water Resour., California Inst. of Tech., Pasadena, California.
- 29- Lee, J.H.W., and Chu, V.H. (2003). *Turbulent jets and plumes a lagrangian approach*, Kluweer Academic Publishers, Boston.
- 30- Shao, O., and Law A.W.K. (2010) "Mixingandboundaryinteractionsof 30° and 45° inclined Dense jets", *Environmental Fluid Mechanics*, 10, 521-553.
- 31- Fan, L. N. (1967). *Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids*, KH-R- 15, W. M. Keck Laboratory of Hydraulic and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- 32- Davidson, M.J., and Pun, K.L. (2000). "Weakly advected jets in cross-flow." *J. Hydraulic Engineering*, 125(1), 47-58.
- 33- Hansen, J., and Schroder, H. (1968). *Horizontal jet dilution studies by use of radioactive isotopes*, Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Building Construction Series Ci 49, 24, USA.
- 34- Jirka, G.H. (2004). "Integral model for turbulent buoyant Jets in unbounded stratified flows part 1: Single round Jet." *J. Environmental Fluid Mechanics*, 4, 1-56.
- 35- Liseth, P. (1970). *Mixing of merging buoyant jets from a manifold in stagnant receiving water of uniform density*, Rep. No. HEL 23-1, Hydraulic Engineering Laboratory, Univ. of California, Berkeley, Calif.
- 36- Xiao, J., Travis, J.R., and Breitung, W. (2009). "Non-Boussinesq integral model for horizontal turbulent buoyant round Jets." *Science and Technology of Nuclear Installations*, 3, 225-232.