

مشخصات جبهه آلودگی، اختلاط و ترقیق نهایی در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین به آبهای ساکن

عزیر عابسی^۱

محسن سعیدی^۲

ناصر حاجی زاده ذاکر^۳

حسین خیرخواه گیلده^۴

(دریافت ۸۸/۷/۲۴ پذیرش ۸۹/۵/۱۲)

چکیده

تخلیه فاضلابهای شهری و صنعتی در پیکره‌های آبی از طریق تخلیه‌کننده‌های دریایی از روشهای معمول در دفع پسابهای تولیدی در مناطق ساحلی محسوب می‌گردد. تخلیه‌کننده‌های دریایی با تشدید فرایند اختلاط در فاصله محدودی از جلوی تخلیه‌کننده، غلظت آلاینده‌ها را تا حد تحمل محیط پذیرنده، پایین آورده و تخلیه پیوسته فاضلاب در محیط دریا را ممکن می‌سازند. طی سالیان اخیر به واسطه توسعه روزافزون نمک‌زداهای ساحلی، تولید و تخلیه سطحی فاضلابهای شور و سنگین در دریا، به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. در این تحقیق تخلیه سطحی جریان‌های سنگین خروجی از کانال مستطیلی از طریق شبیه‌سازی آزمایشگاهی آن در محیط‌های ساکن مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. موقعیت نقطه شیرجه، نقطه برخورد جریان با بستر و موقعیت نقطه دستیابی جریان به ترقیق نهایی خود در محیط از جمله پارامترهایی هستند که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین از طریق جانمایی تعدادی حسگر هدایت الکتریکی در مجاورت بستر، میزان ترقیق جریان در نقطه برخورد و ترقیق نهایی آن در مجاورت بستر برآورد و نتایج آن در قالب مجموعه‌ای از نمودارهای بی‌بعد ارائه گردید. نتایج به‌دست آمده بیانگر رابطه مستقیم مشخصات جریان با عمق محیط و شارهای اولیه جریان خروجی است.

واژه‌های کلیدی: تخلیه سطحی، تخلیه‌کننده‌های دریایی، شناری منفی، اختلاط، جت، پلوم

Waste Field Characteristics, Ultimate Mixing and Dilution in Surface Discharge of Dense Jets into Stagnant Water Bodies

Ozeair Abessi¹

Mohsen Saeedi²
Hossein Kheirkhah Gildeh⁴

Naser Hajizadeh Zaker³

(Received Oct. 16, 2009 Accepted Aug. 3, 2010)

Abstract

Direct discharges of municipal and industrial waste waters into water bodies through marine outfalls are considered as a common way to dispose the generated waste in coastal zones. Marine discharge, intensifying flow mixing and entrainment, decrease the concentration of pollutant up to accepted concentration and meet the guideline values and to make possible continues discharge of flow into marine environment. During last years due to quick development of coastal desalination plants, surface discharge of produced salty water into seas and oceans has increased significantly. In this study, releases of dense jets from surface rectangular channel into stagnant bodies are experimentally studied. The location of flow plunge point, impact point and discharge ultimate dilution were drown out by a digital video technology. In addition, using some conductivity probes located in ambient floor, waste filed dilution in flow impact point and discharge ultimate dilution were identified. Finally the obtained results were plotted and explained along with some diagrams to show flow non-dimensional behavior. The results showed that the properties of flow are changing directly with ambient water depth and discharge initial fluxes.

Keywords: Surface Discharge, Marin Outfall, Negative Buoyancy, Mixing, Jet, Plume.

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

- 1- دانشجوی دکتری آب و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
- 2- دانشیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران (نویسنده مسئول) ۷۷۲۴۰۳۹۹ (۰۲۱) msaeedi@iust.ac.ir
- 3- دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران
- 4- دانشجوی کارشناسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۱- مقدمه

تخلیه فاضلاب خام در دریا یا تخلیه آن پس از انجام تصفیه اولیه از جمله روشهای دفع فاضلاب در مناطق ساحلی محسوب می‌گردد. در این مناطق، پسابهای تولیدی بسته به مشخصات محیط پذیرنده و فاضلاب تولیدی از طریق انواع تخلیه‌کننده‌های سطحی و مستغرق تک‌مجریایی یا چندمجریایی در محیط دریا تخلیه می‌گردند [۱]. بر طبق قوانین سازمان حفاظت از محیط زیست امریکا^۱ و مؤسسه سلطنتی حفاظت از محیط زیست انگلیس^۲ تخلیه فاضلاب در دریا تنها به شرط ارضای استانداردهای سختگیرانه حاکم بر کیفیت آب در محیط‌های پذیرنده، برای حداقل نمودن خسارتها و پیامدهای زیست‌محیطی فاضلاب بر محیط‌زیست مجاز است [۳، ۴]. استانداردهای مذکور در تفاوت آشکار با استانداردهای موجود در رودخانه‌ها، فاصله‌ای از جلوی تخلیه‌کننده تحت عنوان ناحیه میدان نزدیک^۳ را برای تریق و کاهش غلظت جریان در محیط مورد توجه قرار می‌دهند. جریان خروجی، حداکثر طول این ناحیه را برای پخش در محیط و کاهش غلظت آلاینده تا حد استانداردهای محیط زیستی در اختیار دارد. امتداد این ناحیه که تحت عنوان ناحیه اختلاط اولیه^۴ شناخته می‌شود تابعی از شکل و نوع تخلیه‌کننده، مشخصات جریان تخلیه‌ای، سرعتهای محیطی و وضعیت لایه‌بندی پیکره آبی پذیرنده است [۱].

به منظور برآورد کمی مشخصات جریان در جت‌های خروجی از انواع تخلیه‌کننده‌های دریایی، تاکنون مطالعات بسیار گسترده‌ای انجام گرفته است [۵-۱۵]. تخلیه‌کننده‌های سطحی در مقایسه با تخلیه‌کننده‌های مستغرق در این میان مطالعات کمتری را به خود اختصاص داده‌اند. این تخلیه‌کننده‌ها که بیشتر در تخلیه فاضلابهای بسیار حجیم نیروگاههای حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند با توجه به حجم بسیار بالای پساب تولیدی و تریق کمتر مورد نیاز، از دیدگاه اقتصادی روشی مطلوب‌تر تلقی می‌گردند [۱۶]. در سالهای اخیر با رشد فعالیتهای استحصال مواد معدنی در سواحل و توسعه تأسیسات نمک‌زدایی آب دریا در این نواحی، استفاده از تخلیه‌کننده‌های سطحی برای تخلیه پسابهای سنگین و بسیار حجیم تولیدی این صنایع مورد توجه قرار گرفته به نحوی که در حال حاضر تخلیه‌کننده‌های سطحی متعددی در نقاط مختلف دنیا برای تخلیه این فاضلابها در حال فعالیت هستند [۱۷]. احمد و همکاران در

سال ۲۰۰۱ در مطالعات خود استفاده از کانال‌های ساحلی را روشی مناسب از نظر فنی و اقتصادی، به منظور تخلیه حجم بسیار بالای پسابهای تولیدی در نمک‌زدهای ساحلی عنوان نموده‌اند [۱۷]. کانال‌های ساحلی پیشرونده در محیط علاوه بر ارجحیت اقتصادی، به دلیل فاصله از ساحل کناره به‌عنوان حساس‌ترین نقطه متأثر از آلودگی، تخفیف بیشتر پیامدهای نامطلوب فاضلاب بر محیط زیست ساحلی را نیز نسبت به تخلیه‌های درجا در مجاورت ساحل به‌همراه خواهند داشت [۱۶].

جت ساده^۵ ساده‌ترین حالت از تخلیه است که در آن جریانی با مشخصات مشابه آب محیط ($\rho_0 = \rho_a$) از طریق یک روزنه یا مجرا در آن تخلیه می‌شود [۱۸]. مشخصات جریان در این حالت از تخلیه، تنها تابعی از شار حجمی و شار مومنتم فاضلاب خروجی عنوان گردیده است. در مطالعات متعدد انجام شده بر روی جت‌های ساده مستغرق، پروفیل عمودی سرعت و غلظت جریان به‌صورت گوسی گزارش شده است [۱۹-۲۲]. این در حالی است که پروفیل‌های سرعت و غلظت جریان در جت‌های سطحی در جهت افقی، گوسی و در جهت عمودی، نیم‌گوسی است [۱۵].

پلوم ساده^۶ به تخلیه جریانی بدون شار مومنتم و شار حجمی بالا اطلاق می‌گردد که در آن مشخصات جریان تنها تابعی از شناوری فاضلاب خروجی است [۱۸]. اختلاف چگالی جریان خروجی با محیط در حالت پلوم ساده عامل تعیین‌کننده حرکت بالارونده یا پایین‌رونده جریان در راستای قائم محسوب می‌گردد. جریان خروجی در صورت تخلیه با سرعت اولیه و اختلاف چگالی (مثبت یا منفی) با آب محیط، الگوی سومی از جریان در محیط تحت عنوان جت شناور^۷ را ایجاد خواهند نمود [۱۸]. جریان پسابهای سنگین خروجی از تخلیه‌کننده‌های دریایی به دلیل داشتن سرعت و اختلاف دانسیته با آب محیط از نوع جت‌های شناور محسوب می‌گردند [۱۷، ۲۲ و ۲۳]. این جت‌ها پس از ورود به محیط به دلیل اختلاف دانسیته خود با آن، حرکتی پایین‌رونده‌ای به سمت اعماق بیشتر محیط پذیرنده به‌خود می‌گیرند. جت خروجی در حالت شناور تحت تأثیر شارهای مومنتم و شناوری جریان خروجی، در ابتدا الگوی حرکت جت مانند^۸ و سپس حالت پلوم شکل^۹ به‌خود می‌گیرد. در این حالت در فاصله کافی از منبع شکل پلوم مانند، جریان خروجی بر مشخصات جت مانند آن برتری یافته و حالت جریان از قالب جت به قالب پلوم تبدیل می‌گردد [۱۸]. در این

⁵ Simple Jet

⁶ Simple plume

⁷ Buoyant Jet

⁸ Jet like

⁹ Plume like

¹ Environmental Protection Agency (EPA)

² Royal Commission on Environmental Pollution

³ Near Field

⁴ Initial Mixing

محدوده گرادیان سرعت جریان با سیال محیط باعث القای آشفستگی در جریان خروجی می‌شود. آشفستگی‌های القایی از طریق کشیدن آب محیط به داخل، تریقیق فاضلاب خروجی و کاهش غلظت آلاینده در محدوده‌ای از جلوی تخلیه کننده را سبب می‌گردد [۱۸].

الگوی توسعه داده شده در ارتباط با حرکت جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین در محیط‌های ساکن به صورت شکل ۱ ارائه شده است. در این شکل X_p موقعیت نقطه شیرجه یا حداکثر پیشروی جریان نسبت به نقطه خروج در مجاورت سطح، X_i موقعیت نقطه برخورد جریان با بستر و X_m موقعیت دستیابی جریان به تریقیق نهایی خود در محیط است. علاوه بر این S_i میزان تریقیق فاضلاب در محل تماس جبهه فاضلاب خروجی با بستر و S_m میزان تریقیق حداکثر فاضلاب در محیط ناشی از شارهای اولیه جریان خروجی است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود جت سنگین خروجی از تخلیه‌کننده‌های سطحی پس از گذار از حالت جت مانند و پلوم شکل، به دلیل شناوری منفی خود در نهایت در بستر پیکره آبی ته‌نشین می‌گردد. در بسترهای افقی جریان مذکور در قالب یک جریان عمقی چگال باعث شکل‌گیری یک دشت شور با مرکزیت نقطه برخورد می‌گردد. با آرامش یافتن جریان فاضلاب در بستر و استهلاک نیروهای حاکم، عوامل ایجاد آشفستگی از بین رفته و تریقیق جریان ناشی از شارهای اولیه خروجی متوقف می‌گردد. در طول این ناحیه، جریان با مصرف آشفستگی‌های پیشتر القا شده در فاصله کوتاهی از محل برخورد به تریقیق نهایی خود در محیط می‌رسد.

سابقه تحقیقات انجام شده در ارتباط با تخلیه فاضلابهای سنگین، نشان‌دهنده آن است که مطالعات انجام گرفته طی سالیان گذشته بیشتر بر تخلیه‌کننده‌های مستغرق تک‌مجرایی تمرکز داشته‌اند. در این زمینه مطالعات رابرتز و همکاران^۱ در سال ۱۹۹۷، زانگ و همکاران^۲ در سال ۱۹۹۸، سیپولینا و همکاران^۳ در سال ۲۰۰۵، نملیوگلو^۴ و رابرتز^۵ در سال ۲۰۰۶، کیکرت و همکاران^۶ در سال ۲۰۰۷ و بلنینگر^۷ و ژیرکا^۸ در سال ۲۰۰۸ قابل ذکر است [۲۰-۲۴]. در مطالعات ایشان مشخصات تریقیق و اختلاط اولیه در شرایط مختلف فاضلاب خروجی، سرعت‌های محیطی و وضعیت تخلیه‌کننده مورد بررسی قرار گرفته و روابطی نیز برای تخمین مشخصات جبهه آلودگی در محیط ارائه گردیده است. علی‌رغم مطالعات گسترده انجام شده بر روی تخلیه فاضلابهای سنگین از

تخلیه‌کننده‌های مستغرق، تخلیه سطحی این فاضلابها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هوانستین^۹ و دارکس^{۱۰} در سال ۱۹۸۳، علویان در سال ۱۹۸۶ و کاسم و همکاران^{۱۱} در سال ۲۰۰۳ از محدود محققانی بوده‌اند که مشخصات جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین از کانال‌های واگرا و شیبدار در شرایطی مشابه ورود جریان‌های رسوبی به مخازن سدها را مورد بررسی و مطالعه قرار داده‌اند [۱۹، ۲۸ و ۲۹]. لا و همکاران^{۱۲} نیز در سال ۲۰۰۴ میزان تریقیق و اختلالات جریان ناشی از تخلیه پسابهای با شناوری خنثی از تخلیه‌کننده‌های سطحی مستقر در سطح در محیط‌های ساکن را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۲۱].

در این پژوهش با توجه به عدم وجود مطالعات جامع در زمینه تخلیه فاضلابهای سنگین از کانال‌های سطحی پیشرونده، از طریق توسعه یک مدل تحقیقاتی و انجام مشاهدات آزمایشگاهی در حالت مختلف تخلیه نسبت به بررسی مشخصات حرکت و میزان تریقیق جت شناور خروجی در نقاط شیرجه، برخورد و نقطه دستیابی جریان به تریقیق نهایی در حالت تخلیه در محیط‌های ساکن اقدام گردید.

۲- مواد و روشها

۲-۱- روش کار

در مطالعه حاضر به منظور مطالعه رفتار جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین، فرایند تخلیه در حالت مختلف جریان خروجی در محیط آزمایشگاه شبیه‌سازی شد. با توجه به اهمیت نقطه شیرجه در الگوی عمومی حرکت و اختلاط جت‌های شناور خروجی از تخلیه‌کننده‌های سطحی، در مرحله اول از تفسیر این آزمایش‌ها، نحوه تغییرات پارامتر X_p به‌عنوان حد انتهای پیشروی افقی جریان نسبت به محل خروج یا موقعیت نقطه شیرجه، مورد بررسی قرار گرفت. سپس موقعیت نقطه برخورد و محدوده دستیابی جریان به تریقیق نهایی و میزان تریقیق فاضلاب در این دو نقطه با توجه به اهمیت آنها در طراحی تخلیه‌کننده‌های دریایی مورد مطالعه قرار گرفت.

به منظور شبیه‌سازی پدیده در شرایطی مشابه محیط‌های طبیعی، تغییرات دبی فاضلاب خروجی در بازه ۰/۳۳ تا ۱/۴۶۱ لیتر بر ثانیه، میزان سرعت در بازه ۱۴ تا ۱۰۵ سانتی‌متر بر ثانیه و چگالی فاضلاب خروجی در بازه ۱۰۰۸ تا ۱۰۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب در محیط‌های ساکن با اعماق ۴۸ تا ۶۵ سانتی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به مقیاس موجود بین مدل ساخته شده و نمونه‌های

⁹ Hauenstein

¹⁰ Dracos

¹¹ Kassem et al

¹² Law et al.

¹ Roberts et al.

² Zhang et al.

³ Cipollina et al.

⁴ Nemlioglu

⁵

⁶ Roberts

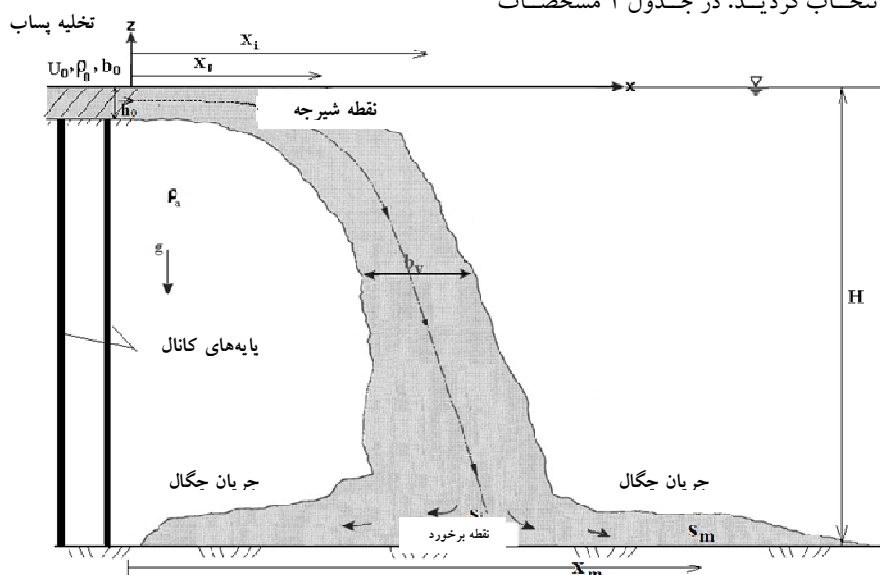
⁷ Kikkert

⁸ Bleninger

Jirka

آزمایش‌های انجام گرفته در تحقیق حاضر آورده شده است.

واقعی، بازه تغییرات این متغیرها بر اساس محدوده گزارش شده در نمونه‌های واقعی انتخاب گردید. در جدول ۱ مشخصات



شکل ۱- الگوی توسعه داده شده در این مطالعه برای حرکت جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین در محیطهای ساکن

پینسین^۴ و لیست^۵، رایت^۶ و رابرتز و رایت به ترتیب در سالهای ۱۹۷۳، ۱۹۷۷ و ۱۹۸۱ بر مبنای تحلیلهای ابعادی، با صرف نظر کردن از تأثیرات شکل تخلیه‌کننده، پارامترهای تأثیرگذار مذکور را در قالب دو مقیاس طولی تخلیه^۷ (L_Q) و مقیاس طولی جت به پلوم^۸ (L_M)، برای پیش‌بینی مشخصات جت‌های شناور خروجی از تخلیه‌کننده‌های تک مجرای تجمیع و مورد استفاده قرار داده‌اند [۲۲، ۲۳ و ۳۱]. ایشان با استفاده از استدلالهای فیزیکی و ابعادی، مقیاسهای طولی مذکور را به صورت روابط ۲ و ۳ به منظور ناحیه بندی رژیم‌های مختلف جریان پیشنهاد نموده‌اند.

$$L_Q = \frac{Q}{M_0^{1/2}} \quad (2)$$

$$L_M = \frac{M_0^{3/4}}{B_0^{1/2}} \quad (3)$$

به منظور از بین بردن اثرات ابعادی در مشاهدات انجام گرفته در مقیاس آزمایشگاهی و به منظور استفاده از روابط استخراجی در طراحی نمونه‌های واقعی، از روش مقیاس طولی استفاده شد. در این روش پارامترهای مورد بررسی در قالب پارامتری بی‌بعد در برگیرنده کمیت مورد نظر، ارائه و نوع رابطه میان آنها و متغیرهای تأثیرگذار از طریق مشاهدات آزمایشگاهی تعیین گردید. روش مقیاس طولی پیشتر توسط عابسی و همکاران در سال ۱۳۹۰ به طور مبسوط تشریح گردید [۳۰].

فیشر و همکاران^۱ در سال ۱۹۷۹ و رابرتز^۲ و رایت^۳ در سال ۱۹۸۳ در بررسی جت‌های شناور در محیط ساکن، مشخصات جریان‌های خروجی را به صورت تابع شارهای حجمی، مومنتم و شناوری جریان خروجی، مشخصات تخلیه‌کننده و عمق محیط عنوان نموده‌اند [۱۹ و ۵].

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

که در این رابطه

Q_0 شار حجمی، M_0 شار مومنتم، B_0 شار شناوری جریان خروجی در یک سیستم ابعادی، b_0 و h_0 عرض و ارتفاع آب در کانال تخلیه و H عمق آب در محیط پذیرنده محسوب می‌گردد.

⁴ Pincine

⁵ List

⁶ Wright

⁷ Discharge Length Scale

⁸ Jet to Plume Length Scale

¹ Fischer

² Roberts

³ Wright

در بررسی پدیده تخلیه جت‌های شناور به روش مقیاس طولی،
مشخصات جریان در یک نقطه مشخص در امتداد مسیر جریان را
به صورت زیر می‌توان تابعی از دو پارامتر بالا عنوان کرد [۲۴].

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌های انجام گرفته در تحقیق حاضر برای تعیین مشخصات نقطه شیرجه، برخورد و ترفیق نهایی در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین

پارامترهای محاسبه شده					کانال تخلیه			مشخصات محیط پذیرنده					مشخصات جریان خروجی				ردیف
L_M	L_Q	Fr_d	Fr	g'	$\frac{h_0}{H_n}$	h_0 (cm)	B_0 (cm)	ρ_a ($\frac{g}{cm^3}$)	Ha (cm)	S (ppt)	T (c)	ρ_0 ($\frac{g}{cm^3}$)	T (c)	S (ppt)	u_0 (cm/s)	Q_0 ($\frac{cm^3}{s}$)	
۲۳/۸	۳/۴۲	۹/۵۹	۱/۶۲	۲۸/۲۲	۰/۰۲۷	۱/۸	۶/۴	۰/۹۹۸۳	۶۵	۱/۵	۲۴/۵	۱/۰۲۷	۲۴/۵	۳۹/۶۶	۶۰/۳۷	۸۰۰	۱
۱۳/۶۲	۳/۶۹	۱۳/۶۲	۲/۳۵	۲۹/۳۸	۰/۰۳۲	۲/۱	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۶۵/۵	۱/۵	۲۴/۵	۱/۰۲۸۴	۲۴/۵	۴۱/۱۶	۱۰۷/۰۴	۱۴۶۱/۱۱	۲
۳۳/۲۸	۲/۷۷	۱۸/۲۵	۳/۱۳	۲۸/۸۶	۰/۰۱۸	۱/۲	۶/۴	۰/۹۹۸۴	۶۵	۱/۵	۲۴/۵	۱/۰۲۷۸	۲۴/۵	۴۰/۴۹	۱۰۵/۷۶	۸۲۵	۳
۲۴/۷۳	۱/۹۱	۲۲/۷۲	۳/۸۶	۲۸/۸۴	۰/۰۰۹	۰/۶	۶/۴	۰/۹۹۸۳	۶۵/۳	۱/۵	۲۴/۵	۱/۰۲۷۶	۲۴/۵	۴۰/۴۹	۶۴/۵۱	۳۶۸/۶۱	۴
۲۶/۸۲	۳/۸۶	۸/۹۹	۱/۵	۲۷/۶۴	۰/۰۳۵	۲/۳	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۶۴/۳	۱/۲۵	۲۴/۵	۱/۰۲۶۶	۲۴/۵	۳۸/۸۳	۷۱/۷	۱۰۷۲/۲۲	۵
۳۱/۸۵	۴/۳۴	۸/۹	۱/۵۱	۲۷/۹	۰/۰۴۴	۲/۹	۶/۴	۰/۹۹۸۳	۶۵	۱/۲۵	۲۴/۵	۱/۰۲۶۷	۲۴/۵	۳۹/۲۳	۸۰/۷۵	۱۵۲۲/۲۲۸	۶
۱۷/۶۸	۲/۶۷	۱۰/۳۱	۱/۷۱	۲۷/۱۳	۰/۰۲۲	۱/۱	۶/۴	۰/۹۹۸۴	۵۰/۲	۱/۲۵	۲۴/۵	۱/۰۲۶	۲۴/۵	۳۸/۱۷	۵۶/۳۳	۴۰۲/۷۷	۷
۲۳/۲۹	۳/۱۲	۱۰/۷۶	۱/۷۸	۲۷/۱۳	۰/۰۳	۱/۵	۶/۴	۰/۹۹۸۴	۵۰	۱/۲۵	۲۴/۵	۱/۰۲۶	۲۴/۵	۳۸/۱۷	۶۸/۶۶	۶۶۹/۴۴	۸
۳۳/۸۱	۲/۵۲	۲۱/۲۶	۳/۱۸	۲۲/۰۴	۰/۰۲	۱	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۴۹	۱/۵	۲۴/۵	۱/۰۲۱۱	۲۴/۵	۳۱/۲۸	۹۹/۸	۶۳۸/۸۸	۹
۲۰/۵۸	۲/۲۶	۱۵/۵	۲/۳۲	۲۲/۰۴	۰/۰۱۶	۰/۸	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۴۸	۱/۵	۲۴/۲۵	۱/۰۲۱	۲۴/۲۵	۳۱/۲۸	۶۵/۱	۳۳۳/۳۳	۱۰
۲۸/۲۶	۲/۱۳	۲۳/۱۳	۳/۳۷	۲۰/۹۲	۰/۰۱۴	۰/۷	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۴۸	۱/۵	۲۴/۲۵	۱/۰۱۹۹	۲۴/۲۵	۲۹/۷۷	۸۸/۵۲	۴۰۲/۷۷	۱۱
۲۵/۴۲	۲/۸۶	۱۳/۴۷	۱/۷۲	۱۶/۱۴	۰/۰۲۶	۱/۲۵	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۴۸	۱/۵	۲۴/۲۵	۱/۰۱۵۱	۲۴/۲۵	۲۳/۳۳	۶۰/۵۱	۴۹۱/۶۶	۱۲
۲۳/۷۱	۲/۶۷	۱۳/۸۲	۱/۷۷	۱۶/۱۴	۰/۰۲۲	۱/۱	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۴۸/۵	۱/۵	۲۴/۵	۱/۰۱۵۱	۲۴/۵۲	۲۳/۳۳	۵۸/۲۷	۴۱۶/۶۶	۱۳
۲۰/۶۱	۲/۵۳	۱۲/۶۳	۱/۶۶	۱۶/۱۴	۰/۰۲	۱	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۴۷/۳	۱/۵	۲۴/۵	۱/۰۱۵۱	۲۴	۲۳/۳۳	۵۲/۰۸	۳۳۳/۳۳	۱۴
۲۴/۱	۲/۹	۱۲/۴۲	۲/۱	۲۸/۲۵	۰/۰۲۷	۱/۳	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۴۷/۵	۱/۵	۲۴/۵	۱/۰۲۷۴	۲۴	۳۹/۶۱	۷۵/۲۷	۶۳۶/۱۱	۱۵
۲۱/۱۳	۲/۴۲	۱۴/۳۲	۱/۸	۱۵/۵۸	۰/۰۱۸	۰/۹	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۴۸/۴	۱/۵	۲۴/۵	۱/۰۱۴۵	۲۴	۲۲/۵۷	۵۳/۶۵	۳۱۳/۸۸	۱۶
۱۹/۱۹	۲/۱۳	۱۵/۷۷۱	۱/۹۸	۱۵/۵۸	۰/۰۱۴	۰/۷	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۴۸/۵	۱/۵	۲۴/۵	۱/۰۱۴۵	۲۴	۲۲/۵۷	۵۱/۸۹	۲۳۶/۱۱	۱۷
۲۱/۴۹	۲/۵۴	۱۳/۴۶	۱/۹۹	۲۱/۴۸	۰/۰۲	۱	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۴۸	۱/۵	۲۴/۵	۱/۰۲۰۵	۲۴	۳۰/۵۲	۶۲/۳۹	۴۰۵/۵۵	۱۸
۱۹/۶۷	۲/۲	۱۵/۲۸	۲/۲۴	۲۱/۲	۰/۰۱۵	۰/۷۵	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۴۸/۲	۱/۵	۲۴/۵	۱/۰۲۰۲	۲۴	۳۰/۱۵	۶۰/۹۶	۲۷۹/۲۲	۱۹
۱۶/۰۷	۲/۱۳	۱۳/۱۵	۱/۹۳	۲۱/۲	۰/۰۱۴	۰/۷	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۴۷	۱/۵	۲۴/۵	۱/۰۲۰۲	۲۴	۳۰/۱۵	۵۰/۶۷	۲۳۰/۵۵	۲۰
۱۷/۶۶	۲/۲۸	۱۳/۰۸	۱/۵۲	۱۳/۳۴	۰/۰۱۶	۰/۸	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۴۷	۱/۲۵	۲۴/۵	۱/۰۱۲۲	۲۴	۳۰/۵۸	۴۲/۷۳	۲۲۲/۲۲	۲۱
۱۸/۵۲	۲/۶۷	۱۰/۰۸	۱/۰۸	۹/۹۵	۰/۰۲۱	۱/۱	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۵۱/۵	۱/۲۵	۲۴/۵	۱/۰۰۸۵	۲۴	۱۴/۹۹	۳۵/۷۴	۲۵۵/۵۵	۲۲
۲۴	۲/۵۴	۱۵/۰۳	۱/۵۱	۹/۹۵	۰/۰۱۹	۱	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۵۱	۱/۲۵	۲۴/۵	۱/۰۰۸۵	۲۴	۱۴/۹۹	۴۷/۴۳	۳۰۸/۳۳	۲۳
۲۳/۲	۲/۳۵	۱۶/۴۱	۱/۶۵	۹/۹۵	۰/۰۱۶	۰/۸۵	۶/۴	۰/۹۹۸۴	۵۱/۵	۱/۲۵	۲۴	۱/۰۰۸۵	۲۴	۱۴/۹۹	۴۷/۷۳	۲۶۳/۸۸	۲۴
۱۹/۲۲	۲/۵۱	۱۲/۳۲	۱/۶۲	۱۷/۱۳	۰/۰۱۹	۰/۹۷	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۵۱/۲	۱/۲۵	۲۴	۱/۰۱۵۸	۲۴	۲۴/۷	۵۰/۲۲	۳۱۶/۶۶	۲۵

ادامه جدول ۱- مشخصات آزمایش‌های انجام گرفته در تحقیق حاضر برای تعیین مشخصات نقطه شیرجه، برخورد و ترقیق نهایی در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین

پارامترهای محاسبه شده		کانال تخلیه						مشخصات محیط پذیرنده					مشخصات جریان خروجی				ردیف
L_M	L_Q	Fr_d	Fr	g'	$\frac{h_0}{H_a}$	h_0 (cm)	B_0 (cm)	ρ_a ($\frac{g}{cm^3}$)	Ha (cm)	S (ppt)	T (c)	ρ_0 ($\frac{g}{cm^3}$)	T (c)	S (ppt)	u_0 (cm/s)	Q_0 ($\frac{cm^3}{s}$)	
۱۵/۹۵	۲/۷۳	۹	۱/۵۵	۲۹/۴۶	۰/۰۲۲	۱/۱۵	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۵۱	۱/۵۲	۲۴	۱/۰۲۸۴	۲۴	۴۱/۳	۵۲/۳۹	۳۹۱/۶۶	۲۶
۶/۶	۳/۲۷	۶/۶	۱/۲۴	۳۵/۰۶	۰/۰۳۲	۱/۶۵	۶/۴	۰/۹۹۸۶	۵۰/۵	۱/۵	۲۴	۱/۰۳۴۱	۲۴	۴۸/۷۷	۵۰/۲۴	۵۳۸/۸۸	۲۷
۱۵/۰۳	۲/۹	۷/۷۳	۱/۲۵	۲۶/۰۸	۰/۰۲۵	۱/۳	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۵۰	۱/۵	۲۴/۵	۱/۰۲۵۱	۲۴	۳۶/۷۴	۴۵/۰۳	۳۸۰/۵۵	۲۸
۱۶/۳	۳/۲۷	۷/۰۱	۱/۳۸	۳۸/۲۱	۰/۰۳۲	۱/۶۵	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۵۱	۱/۵	۲۴	۱/۰۳۷۴	۲۴	۵۲/۹۳	۵۵/۶۸	۵۹۷/۲۲	۲۹
۶/۶۲	۳/۱۲	۶/۶۲	۱/۳	۳۸/۲۱	۰/۰۲۹	۱/۵	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۵۱/۲	۱/۵	۲۴	۱/۰۳۷۴	۲۴	۵۲/۹۳	۵۰/۱۵	۴۸۸/۸۸	۳۰
۱۳/۲۹	۲/۹	۶/۸	۱/۰۹	۲۵/۱۵	۰/۰۲۵	۱/۳	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۵۱/۳	۱/۵	۲۴	۱/۰۲۴۱	۲۴	۳۵/۴۹	۳۹/۱۱	۳۳۰/۵۵	۳۱
۱۱/۵	۲/۵۴	۷/۲۴	۱/۱۵	۳۶/۳۲	۰/۰۱۹	۱	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۵۱/۶	۱/۵	۲۳/۵	۱/۰۲۴۱	۲۴	۳۵/۴۹	۳۶/۳۲۸	۲۳۶/۱۱	۳۲
۱۱/۳	۲/۲	۸/۷۸	۱/۴	۲۵/۱۸	۰/۰۱۴	۰/۷۵	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۵۰/۸	۱/۵	۲۳/۵	۱/۰۲۴۱	۲۴	۳۵/۴۹	۳۸/۱۷	۱۸۶/۱۱	۳۳
۱۲/۵۸	۱/۹۷	۱۱/۵۶	۱/۵۵	۱۷/۷۶	۰/۰۱۱	۰/۶	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۵۰/۷	۱/۵	۲۳/۵	۱/۰۱۶۶	۲۴	۲۵/۵۳	۳۷/۷۴	۱۴۷/۲۲	۳۴
۱۲/۷	۱/۸	۱۳/۴۸	۱/۸۱	۱۷/۷۶	۰/۰۰۹	۰/۵	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۵۲	۱/۵	۲۳/۵	۱/۰۱۶۶	۲۴	۲۵/۵۳	۴۰/۱۷	۱۳۰/۵۵	۳۵
۸/۳۲	۲/۹	۱۴/۲۸	۰/۵۹	۱۹/۱۵	۰/۰۲۱	۱/۳	۶/۴	۰/۹۹۸۵	۶۰/۲	۱/۵	۲۳/۵	۱/۰۱۹	۲۳/۵	۲۷/۱۹	۲۱/۳۶	۱۸۰/۵۵	۳۶
۶/۹۱	۲/۹	۳/۵۵	۰/۴۹	۱۹/۱۵	۰/۰۲۱	۱/۳	۶/۴	۰/۹۹۹۳	۶۰	۱/۵	۱۹	۱/۰۱۹	۲۳/۵	۲۷/۱۹	۱۷/۷۵	۱۵۰	۳۷
۵/۶۱	۲/۷۳	۳/۱۶	۰/۴۴	۱۹/۱۵	۰/۰۱۹	۱/۱۵	۶/۴	۰/۹۹۹۳	۶۱	۱/۵	۱۹/۲	۱/۰۱۹	۲۳/۵	۲۷/۱۹	۱۴/۸۶	۱۱۱/۱۱	۳۸
۱۰/۱۵	۳/۰۷	۴/۸۱	۰/۶۷	۱۹/۱۵	۰/۰۲۴	۱/۴۵	۶/۴	۰/۹۹۹۴	۶۰/۶	۱/۵	۱۹/۲	۱/۰۱۹	۲۳/۵	۲۷/۱۹	۲۵/۳۴۸	۲۳۸/۸۸	۳۹
۱۱/۷۸	۳/۲۷	۵/۰۶	۰/۷	۱۹/۱۵	۰/۰۲۷	۱/۶۵	۶/۴	۰/۹۹۹۴	۶۰/۸	۱/۵	۱۹	۱/۰۱۹	۲۳/۵	۲۷/۱۹	۲۸/۴۹	۳۰۵/۵۵	۴۰
۱۱/۱۶	۳/۲۷	۴/۷۶	۰/۶۶	۱۹/۱۵	۰/۰۲۷	۱/۶۵	۶/۴	۰/۹۹۹۴	۶۱	۱/۵	۱۹	۱/۰۱۹	۲۳/۵	۲۷/۱۹	۲۶/۹۳	۲۸۸/۸۸	۴۱
۷/۱۹	۳/۴۲	۲/۹	۰/۶۸	۵۴/۴۸	۰/۰۳	۱/۸	۶/۴	۰/۹۹۹۵	۶۰/۶	۱/۲۵	۱۹	۱/۰۵۵	۲۳/۵	۷۳/۸۳	۲۸/۷۲	۳۳۶/۱۱	۴۲
۶/۶	۳/۲۷	۲/۸۴	۰/۶۶	۵۴/۴۸	۰/۰۲۷	۱/۶۵	۶/۴	۰/۹۹۹۵	۶۰	۱/۲۵	۱۹	۱/۰۵۵	۲۳/۵	۷۳/۸۳	۲۶/۹۳	۲۸۸/۸۸	۴۳
۵/۶۵	۳/۰۹	۲/۶۲	۰/۶۱	۵۴/۴۸	۰/۰۲۵	۱/۵	۶/۴	۰/۹۹۹۵	۶۲	۱/۲۵	۱۹	۱/۰۵۵	۲۳/۵	۷۳/۸۳	۲۳/۷۲	۲۲۷/۷۷	۴۴
۵/۰۳	۲/۷۹	۲/۷۵	۰/۶۴	۵۴/۴۸	۰/۰۲	۱/۲	۶/۴	۰/۹۹۹۵	۶۲	۱/۲۵	۱۹	۱/۰۵۵	۲۳/۵	۷۳/۸۳	۲۲/۲۵	۱۷۳/۶۱	۴۵

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

رابرتز و رایت در سال ۱۹۸۱ و فیشر و همکاران در سال ۱۹۷۹ در بررسی جت‌های خروجی با شناوری بالا، نقش شار جمعی (Q_0) در مقابل شار مومنت (M_0) و شار شناوری (B_0) را ناچیز دانسته و مشخصات جریان را تنها وابسته به مقیاس طولی L_M عنوان نموده‌اند [۱۹ و ۲۴]. به این ترتیب، ایشان مشخصات جریان در جت‌های شناور را به صورت رابطه زیر صرفاً تابعی از پارامتر بی بعد $\frac{H}{L_M}$ ارائه نموده‌اند

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

رابرتز و همکاران در سال ۱۹۹۷ و بلینگر و ژیرکا در سال ۲۰۰۸ در مطالعات خود به منظور توسعه گراف‌های تجربی حاکم، به ترتیب پارامتر بی بعد $\frac{S}{Fr_d}$ را در تعیین میزان تریق و پارامتر $\frac{X}{L_M}$ را در تعیین مشخصات حرکت جریان مورد استفاده قرار داده‌اند [۲۲ و ۲۸]. در این پارامترها S میزان تریق فاضلاب در محیط بوده و از رابطه ۶ به دست می‌آید

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

که در این رابطه

C_0 هدایت الکتریکی فاضلاب، C هدایت الکتریکی جریان در نقطه مورد بررسی و C_a هدایت الکتریکی زمینه آلاینده در محیط پذیرنده است.

۲-۲- مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه فلومی به طول ۶ متر، عرض ۱/۸۰ متر و عمق ۱/۵۰ متر بود که از آب شیرین با چگالی ۰/۹۹۸ گرم بر سانتی متر مکعب تا ارتفاع مشخص پر شد (شکل ۲). تخلیه‌کننده سطحی مورد مطالعه در این تحقیق یک کانال مستطیلی بود که از طریق یک سیستم پمپاژ، فاضلاب تولیدی را با سرعت‌های مختلف در مجاورت سطح محیط پذیرنده تخلیه می‌نمود. دبی عبوری از تخلیه‌کننده از طریق یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی مدل ولتک-کوپا^۱ ۴۳۰۰، نصب شده در مسیر جریان اندازه‌گیری می‌شد.

¹ WELLTECH COPA-XE WT 4300

به این ترتیب براساس عمق قرائت شده در دهانه خروجی کانال، سرعت جریان در محل تخلیه فاضلاب محاسبه گردید.

فاضلاب مورد استفاده در آزمایش، آب شور ناشی از انحلال کلرید سدیم^۲ در آب شیرین بود که جریانی از پساب در غلظتهای مختلف با جرمهای حجمی متفاوت ایجاد می‌نمود.

به منظور تعیین مشخصات ظاهری پلوم در پیکره آبی، از رنگ محلول در آب به عنوان آشکارساز و ثبت مسیر حرکت در زمینه نور سفید با استفاده از دوربین دیجیتال سونی مدل DCR-SR47 استفاده شد. تصاویر دیجیتال برداشت شده به منظور تعیین مشخصات ظاهری جبهه فاضلاب در محیط مورد پردازش رقومی قرار گرفتند. روش رقومی توسعه داده شده برای تحلیل تصاویر به دست آمده پیشتر توسط عابسی و همکاران در سال ۱۳۹۰ تشریح گردیده است [۳۰]. با استفاده از این روش از طریق ردیابی شدت نور سیاه در پیکسل‌های افقی مجاور سطح، موقعیت نقطه جدایی جریان از سطح یا محدوده نقطه شیرجه تعیین می‌گردد. به روش مشابه از طریق تعیین حداکثر شدت نور در پیکسل‌های افقی نزدیک به بستر، موقعیت نقطه برخورد نیز برآورد می‌شود. در این مطالعه همچنین به منظور تعیین میزان اختلاط و تریق فاضلاب شور خروجی در محیط از تعداد ۲۰ حسگر الکتروشیمیایی هدایت الکتریکی از نوع YK-2014CD از محصولات شرکت لوترون^۳ استفاده شد. این حسگرها، در ابتدای هر آزمایش از طریق محلولهای استاندارد صحت‌سنجی شدند. حسگرهای مذکور از طریق یک صفحه الکترونیکی که به منظور اتصال آنها و اندازه‌گیری در زمان از مشخصات پلوم طراحی شده است، برای نمونه‌برداری از میزان هدایت الکتریکی آب در نقاط مختلف پلوم مورد استفاده قرار گرفتند. مقادیر اندازه‌گیری شده هدایت الکتریکی از طریق کابل انتقال داده به‌طور هم‌زمان برای ذخیره‌سازی و رویت به رایانه فرستاده می‌شدند. شوری محل نمونه‌برداری که به این ترتیب با استفاده از هدایت الکتریکی قابل محاسبه است، در واقع شاخص میزان تریق فاضلاب در هر نقطه از جبهه آلودگی در محیط خواهد بود. در شکل ۲ نمایی از طرح سه بعدی مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر آورده شده است.

۳- نتایج و بحث

جریان سنگین تخلیه شونده از کانال‌های سطحی در محیط‌های ساکن تحت تأثیر دو نیروی افقی مومنت و نیروی عمودی شناوری در محیط پذیرنده پیشروی می‌نماید. در بخش ابتدایی مسیر ناشی

² NaCl

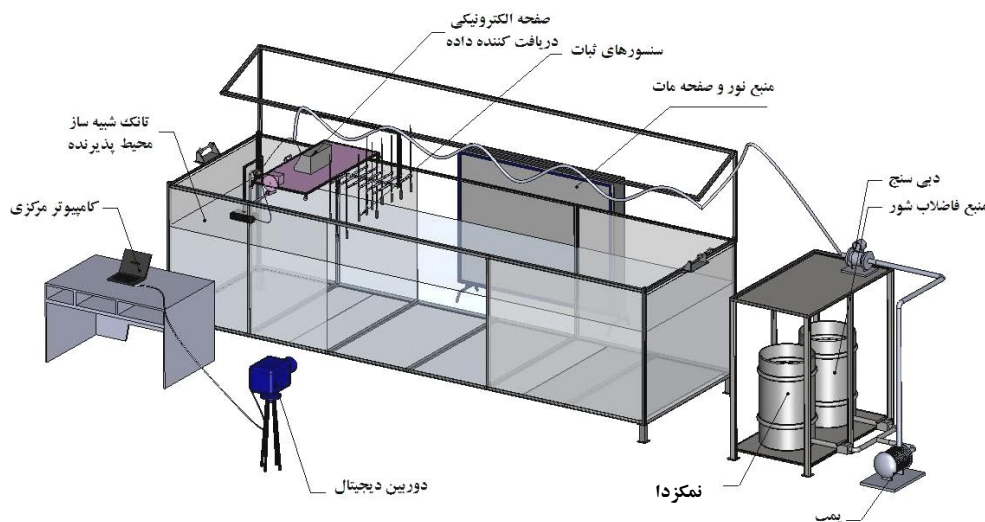
³ Lutron

برای ترقیق فاضلاب قبل از برخورد آن به بستر دریا فراهم می‌سازد. با توجه به تأثیرات محتمل عمق در میزان ترقیق فاضلاب در نقطه برخورد، به این ترتیب عمق آب در نقطه شیرجه باید به‌عنوان عمق مؤثر محیط در نظر گرفته شود. علاوه بر شار مومنتم جریان خروجی، موقعیت نقطه شیرجه با تغییرات شناوری فاضلاب خروجی نیز تغییر خواهد کرد. در تصاویر شکل ۳ مشاهده می‌شود که در فاضلابهای شورتر، به‌ازای شرایط یکسان جت خروجی، موقعیت نقطه شیرجه در فاصله‌ای نزدیک‌تر به محل خروجی اتفاق می‌افتد.

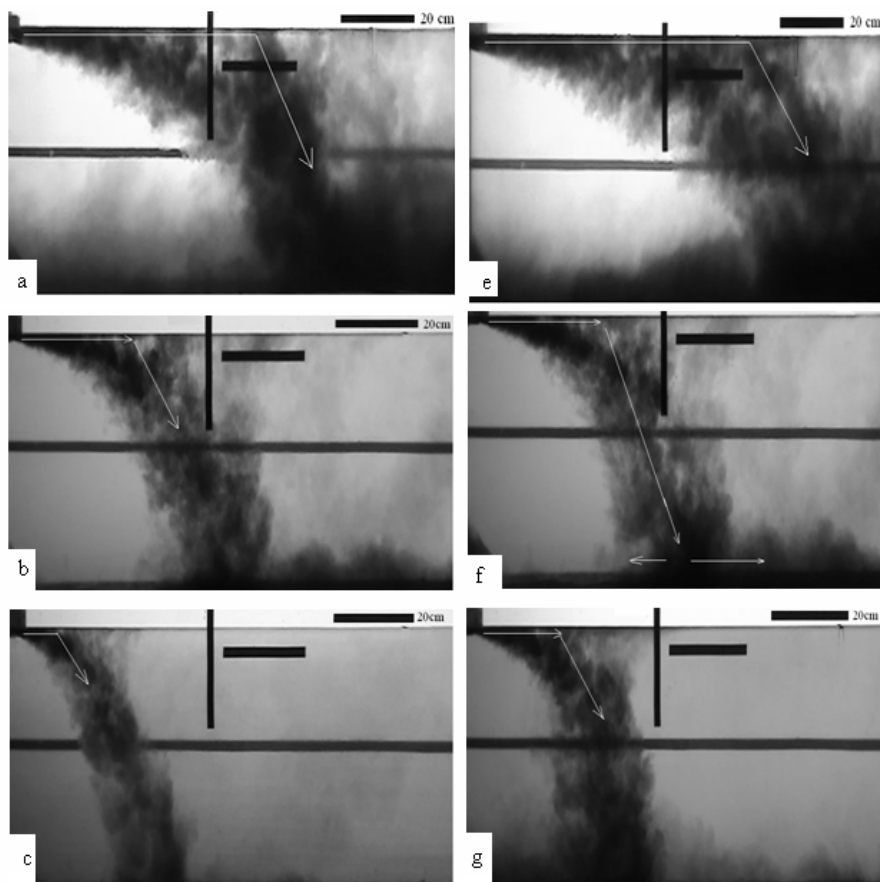
در شکل ۴ نتایج آزمایش‌های انجام شده در ارتباط با موقعیت نقطه شیرجه نسبت به عمق محیط در حالتی که هر دو پارامتر نسبت به مقیاس طولی جت به پلوم (L_M) نرمال شده‌اند ترسیم گردیده است. مقدار L_M کمی ثابت نبوده و برای هر آزمایش با توجه به مشخصات جریان خروجی به‌طور مجزا محاسبه گردید. در این حالت پارامترهای به‌دست آمده برای هر آزمایش با تقسیم به مقیاس طولی به‌دست آمده برای همان آزمایش با قرارگیری در کنار یکدیگر الگوی عمومی و بی‌بعد رفتار جریان در محیط را نشان خواهند داد. در شکل ۴ ملاحظه می‌شود که موقعیت نرمال نقطه

شیرجه ($\frac{X_p}{L_M}$) در آزمایش‌های مختلف در محدوده ۱/۰۵ واقع می‌شود ($X_p = \alpha_p \cdot L_M$, $\alpha_p = 1.05$). این مقدار به این ترتیب محدوده انتقال جریان از حالت جت به پلوم یا موقعیت نقطه شیرجه در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین را نشان می‌دهد.

از سرعت اولیه جریان، حرکت جت به صورت افقی و در مجاورت سطح خواهد بود. با کاهش اثر مومنتم در محدوده‌ای که منطقه شیرجه نامیده می‌شود، نیروی شناوری غلبه یافته و جریان سطحی با از دست دادن ارتباط خود با سطح آزاد آب به صورت یک پلوم مستغرق تغییر شکل می‌یابد. حرکت فاضلاب در این ناحیه تحت تأثیر برابند نیروهای افقی و عمودی حاکم، به صورت مایل است. در صورت عدم وجود لایه‌بندی وزنی در محیط، جریان به حرکت پایین‌رونده خود در محدوده پلوم شکل ادامه داده و در نقطه‌ای تحت عنوان نقطه تماس به بستر محیط پذیرنده برخورد می‌نماید. میزان پیشروی جریان در محیط و محدوده شکل‌گیری نقطه برخورد در این حالت تابعی از شار مومنتم و چگالی سیال خروجی (شناوری سیال) است. در شکل ۳ مسیر حرکت فاضلاب سنگین خروجی از تخلیه‌کننده‌های سطحی در محیط‌های ساکن در شرایط مختلف شارهای جریان خروجی آورده شده است. بررسی مقایسه‌ای این تصاویر به‌طور آشکار نحوه تغییر مشخصات حرکت ناشی از تغییر شارهای اولیه جریان خروجی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت تخلیه، جت ایجاد شده به واسطه مومنتم اولیه خود مسیر طولانی‌تری را در مجاورت سطح طی نموده و نقطه شیرجه در فاصله بیشتری از محل خروجی به وقوع می‌پیوندد. با طولانی‌تر شدن مسیر حرکت جریان، محدوده برخورد جریان با بستر نیز در فاصله طولانی‌تری حادث خواهد شد. در سواحل شنی شیب‌دار حرکت طولانی‌تر جریان در مجاورت سطح، باعث دستیابی جریان به عمقهای بیشتر و طولانی‌تر شدن مسیر در محدوده پلوم شکل می‌شود. این موضوع امکان بیشتری را



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

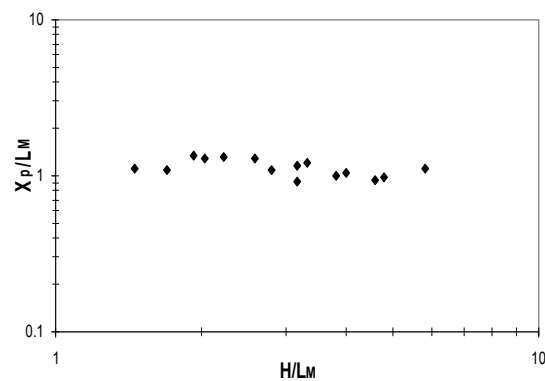


شکل ۳- مسیر حرکت و محل نقطه سقوط در تخلیه فاضلاب سنگین از کانال‌های ساحلی مستطیلی

$$\rho = 1.030 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, u_0 = 40 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \quad (\text{c } \rho = 1.030 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, u_0 = 52 \frac{\text{cm}}{\text{s}}) \quad (\text{b } \rho = 1.030 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, u_0 = 72 \frac{\text{cm}}{\text{s}}) \quad (\text{a } \rho = 1.015 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, u_0 = 40 \frac{\text{cm}}{\text{s}}) \quad (\text{g } \rho = 1.015 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, u_0 = 52 \frac{\text{cm}}{\text{s}}) \quad (\text{f } \rho = 1.015 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, u_0 = 72 \frac{\text{cm}}{\text{s}}) \quad (\text{e})$$

سنگین پیش‌بینی غلظت و موقعیت نقطه برخورد به این دلیل حائز اهمیت است که این نقطه اولین نقطه تماس فاضلاب با بستر دریا که محل زندگی و تولید مثل انواع جانوران کفزی و ماهی‌ها است، محسوب می‌گردد. دستیابی به ترقیق حداکثر فاضلاب در این نقطه هدف اصلی در طراحی تخلیه‌کننده‌های دریایی محسوب می‌گردد. در شکل ۵ نتایج آزمایش‌های انجام شده در ارتباط با موقعیت نقطه برخورد جریان با کف، ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود موقعیت نقطه برخورد جریان با بستر در تخلیه‌های سطحی فاضلاب‌های سنگین مقداری غیرثابت بوده که با تغییرات عمق محیط پذیرنده تغییر می‌نماید. رابطه به‌دست آمده در این شکل نحوه تغییرات موقعیت نقطه برخورد نسبت به عمق محیط و پارامترهای تخلیه را نشان می‌دهد.

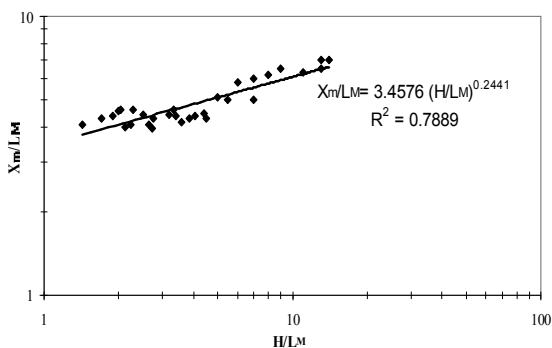
در شکل ۶ نیز نتایج به‌دست آمده از حسگرهای الکتروشیمیایی هدایت الکتریکی در ارتباط با غلظت فاضلاب در نقطه برخورد ترسیم گردیده است. در این شکل میزان ترقیق جریان در نقطه



شکل ۴- نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های مختلف در ارتباط با موقعیت نقطه شیرجه در تخلیه سطحی فاضلاب‌های سنگین در محیط‌های ساکن

جریان خروجی با از دست دادن تماس خود با سطح با طی فاصله‌ای کوتاه از نقطه شیرجه در نهایت به بستر محیط پذیرنده برخورد می‌نماید. در طراحی تخلیه‌کننده‌های سطحی فاضلاب

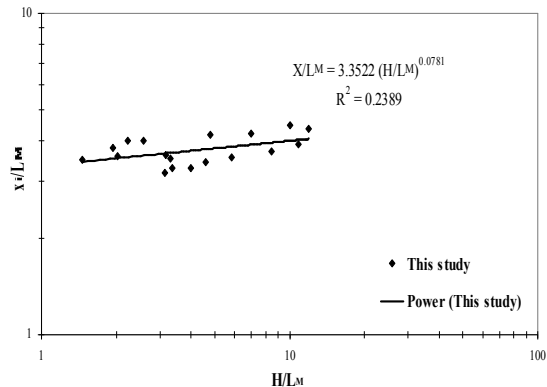
خروجی بوده و بعد از آن تنها کاهش جزئی در غلظت آلاینده آن هم ناشی انتقال یا دیفیوژن مولکولی به وقوع خواهد پیوست. تعیین موقعیت دقیق نقطه دستیابی جریان به تریق نهایی از طریق ارزیابی نحوه زوال آشفستگی یا استهلاك نوسانات غلظت در امتداد مسیر حرکت جریان ممکن است. به اعتقاد رابرتز و همکاران در سال ۱۹۹۷ زمانی که نوسانات غلظت در امتداد مسیر جریان به حداقل میزان خود می‌رسد، نیروهای القاکننده آشفستگی از بین رفته و جریان به تریق نهایی خود در محیط می‌رسد [۲۲]. ایشان بر این اساس، موقعیتی را که در آن تریق جریان به صورت مجانب در آمده را به عنوان نقطه دستیابی جریان به تریق نهایی پیشنهاد نموده‌اند. این نقطه در واقع ابتدای محدوده‌ای است که غلظت جریان بعد از آن، به‌طور محسوسی تغییر نخواهد کرد. در این مطالعه به منظور تعیین موقعیت نقطه مذکور از داده‌های به دست آمده از حسگرهای جانمایی شده در مجاورت بستر استفاده شد. در این بخش ابتدای محدوده‌ای که تریق جریان در آن به حالت مجانب وار خود می‌رسد به عنوان نقطه دستیابی جریان تریق نهایی انتخاب گردید. به این ترتیب با ترسیم نتایج به دست آمده، نمودار شکل ۷ برای تعیین موقعیت دستیابی جریان به تریق نهایی در محیط‌های ساکن با بستر افقی به دست آمد.



شکل ۷- موقعیت رسیدن جبهه آلودگی به حداکثر میزان تریق خود در محیط در تخلیه سطحی فاضلابهای با سنگین از کانال‌های مستطیلی در بسترهای افقی

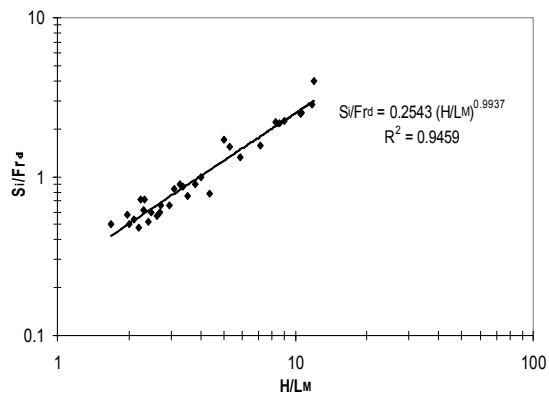
در این شکل ملاحظه می‌شود که همانند حالت قبل، موقعیت دستیابی جریان به تریق نهایی، تابعی از عمق محیط پذیرنده (H) و پارامترهای جریان تخلیه شونده (L_M) است. همان‌طور که در این رابطه مشاهده می‌شود موقعیت این نقطه نسبت به نقطه برخورد به میزان بیشتری به عمق محیط و به میزان کمتری به شارهای جریان خروجی بستگی دارد.

در شکل ۸ نتایج به دست آمده از حسگرهای هدایت الکتریکی در ارتباط با میزان تریق نهایی جریان بر اثر شارهای اولیه خروجی



شکل ۵- نمودار بی‌بعد به دست آمده در ارتباط با موقعیت نقطه برخورد در تخلیه سطحی فاضلابهای چگال در محیط‌های ساکن

برخورد نسبت به عدد فرود چگالی^۱ نرمال شده (S_i/Fr_d) و در روی محور عمودی و پارامتر نرمال عمق نسبت به مقیاس طولی جت به پلوم (H/L_M) در محور افقی ترسیم گردیده است.

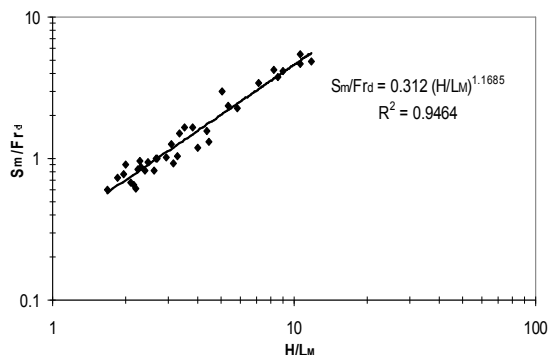


شکل ۶- میزان تریق جریان‌های سطحی فاضلابهای سنگین در نقطه برخورد با بستر

در این شکل ملاحظه می‌شود که نحوه تغییرات میزان تریق جریان در نقطه برخورد، وابستگی بیشتری نسبت به پارامتر (H/L_M) دارا است. رابطه قوی میزان تریق در نقطه برخورد با عمق محیط و شارهای جریان خروجی بیانگر نقش قابل توجه پارامترهای تخلیه در دستیابی جریان به تریق مناسب است.

بعد از برخورد، جریان با استقرار در مجاورت بستر محیط پذیرنده، با مصرف باقیمانده انرژی و آشفستگی‌های پیشتر القاء شده به تریق نهایی خود در محیط دست می‌یابد. این تریق، در واقع حداکثر کاهش غلظت جریان در محیط بر اثر شارهای جریان

^۱ Densimetric Froude number



شکل ۸- میزان ترقیق نهایی جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین در محیطهای لایه بندی نشده با بستر افقی

تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین در محیطهای ساکن و همگن مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. موقعیت نقطه شیرجه، موقعیت نقطه برخورد و میزان ترقیق نهایی و محدود دستیابی جریان به ترقیق نهایی و میزان ترقیق جریان در این نقطه از جمله پارامترهایی هستند که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج مشاهدات انجام شده در این تحقیق بیانگر آن است که جریان در فاصله‌ای برابر با $X_p = 1.05 \times L_M$ ارتباط خود را به طور کامل با سطح از دست داده و با شیرجه به سمت اعماق، بیشتر از حالت یک جت سطحی به صورت یک جریان مستغرق تغییر شکل می‌دهد. در این حالت جریان در فاصله‌ای متناسب با عمق محیط (H) با بستر برخورد نموده و در مجاورت آن آرامش می‌یابد. با برخورد جریان با بستر محیط، جریان شکل گرفته در فاصله کافی از نقطه برخورد از طریق مصرف آشفتگی‌های بیشتر القا شده به ترقیق نهایی خود در محیط می‌رسد. نتایج به دست آمده از این تحقیق بیانگر آن است که موقعیت دستیابی جریان به ترقیق نهایی و میزان آن در این نقطه تابعی مستقیم از پارامتر H/L_M است. این موضوع نشان‌دهنده آن است که علاوه بر شارهای اولیه جریان خروجی، عمق محیط پذیرنده نیز مؤلفه‌ای تأثیرگذار در دستیابی جریان به حداکثر ترقیق خود در محیط است. به این ترتیب در حالت تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین در آبهای با عمق بالا، امکان مطلوبی برای کاهش غلظت آلاینده‌های جریان تا حد تحمل محیط فراهم می‌گردد که این امر تخلیه پیوسته فاضلابهای شور و سنگین تولیدی در مناطق ساحلی از طریق تخلیه‌کننده‌های سطحی را ممکن می‌سازد.

۵- قدردانی

به این وسیله از حمایت‌های معاونت پژوهشی دانشگاه علم و صنعت ایران، بابت فراهم سازی زیرساخت‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

ترسیم گردیده است. این ترقیق، حداکثر ترقیق جریان در محیط بوده و مقدار آن در واقع بیانگر میزان ترقیق جریان در محدوده‌ای است که غلظت جریان به صورت مجانب در می‌آید. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود میزان ترقیق جریان در محدوده اختلاط اولیه نیز تابعی مستقیم از پارامتر H/L_M است با این تفاوت که در این نقطه میزان ترقیق مشاهده شده وابستگی بیشتری به عمق محیط و رابطه کمتری با شارهای جریان خروجی از خود نشان داده است. نمودار به دست آمده نشان می‌دهد که در این حالت دسترسی به عمق کافی، امکان ترقیق فاضلاب در محیط را به نحو مطلوب‌تری فراهم خواهد ساخت.

با تعیین موقعیت و میزان ترقیق فاضلاب در نقطه برخورد و نقطه دستیابی جریان به ترقیق نهایی به این ترتیب امکان پیش‌بینی مشخصات هندسی و اختلاطی جریان در نقاط شاخص طول مسیر به نحو مطلوبی فراهم می‌گردد. با توجه به ضرورت طراحی علمی سیستم‌های تخلیه سطحی در دفع محیط زیستی فاضلابهای بسیار شور تولیدی در نمک‌زدهای ساحلی، به این ترتیب امکان مدل‌سازی جریان و پیش‌بینی مشخصات حرکت در محیط‌های ساکن به عنوان بحرانی‌ترین حالت در تخلیه فاضلاب در پیکره‌های آبی به نحو مطلوبی فراهم می‌گردد.

۴- نتیجه گیری

فاضلابهای سنگین با چگالی بیشتر از آب پذیرنده از جمله پسابهایی هستند که با توجه به گسترش فزاینده نمک‌زدهای ساحلی در سالهای اخیر در حجم بسیار زیادی تولید شده و در محیط دریا تخلیه می‌گردند. در این زمینه، هزینه کمتر کانال‌های ساحلی در مقابل تخلیه‌کننده‌های مستغرق باعث توجه بیشتر بهره‌برداران این تاسیسات به استفاده از تخلیه‌کننده‌های سطحی برای دفع پسابهای تولیدی در محیط دریا شده است. در تحقیق حاضر، از طریق شبیه‌سازی فرایند تخلیه در محیط آزمایشگاه، رفتار جریان در

- 1- Abessi, O., and Saeedi, M. (2009). "Marine wastewater discharge." *J. Water and Environmental*, 73, 34-41. (In Persian)
- 2- USEPA. (1980a). *Ambient water quality criteria*, EPA 440/5-80-015 to 079, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C
- 3- USEPA. (1994). *Dilution models for effluent discharges*, Office of Research and development, EPA/600/R-94/086, Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- 4- Gameson, A. L. H. (1984). *Bacterial mortality, Part I, in investigation of sewage discharge to some British coastal waters*, Chapter 8mWRc Technical report TR 201, Medmenham, U.K.
- 5- Roberts, J.W., and Wright, S.J. (1983). "Discussion of Vertical round buoyant jet in shallow water." *J. Hydrulic Engineering*, 109 (3), 490-496.
- 6- Roberts, P. J. (1989). "Outfall design consideration." *J. Hydrulic Engineering*, 115, 661-689.
- 7- Roberts, P.J.W., Snyder, W.H., and Baumgartner, D.J. (1989). "Ocean outfalls. I: Submerged waste field formation." *J. Hydrulic Engineering*, 115(1), 49-69.
- 8- Roberts, P. J. W., Snyder W. H., and Baumgartner, D.J. (1989). "Ocean outfalls. II: Spatial evolution of submerged waste field." *J. Hydrulic Eng.*, 115(1), 26-47.
- 9- Roberts, P. J. W., Snyder, W.H., and Baumgartner, D.J. (1989). "Ocean outfalls. III: Effect of diffuser design on submerged waste field." *J. Hydrulic Engineering*, 115(1), 1-25.
- 10- Tian, X., Roberts, P. J. W., and Daviro, J. (2004). "Marin wastewater discharge from multiport diffusers. I: Unstratified stationary water." *J. Hydrulic Engineering*, 130(12), 1137-1146.
- 11- Tian, X., Roberts, P. J. W., and Daviro, J. (2004). "Marin waste water discharge from multiport diffusers. II: Unstratified flowing water." *J. Hydrulic Eng.*, 130(12), 1147-1155.
- 12- Yu, D., Ali, M.S., and Lee, J. H. W. (2006). "Multiple tandem jets in cross-flow." *J. Hydrulic Engineering*, 132(9), 971-982.
- 13- Tian, X., Roberts, P. J. W., and Daviro, J. (2006). "Marin waste water discharge from multiport diffusers. IV: Stratified flowing water." *J. Hydrulic Engineering*, 132(4), 411-419.
- 14- Jirka, G. H. (1996). *User's manual for CORMIX: A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters*, DeFrees Hydraulics Laboratory, Cornell University, Ithaca, N.Y.
- 15- Jones, R.G., Nash, D. J., and Jirka, H.G. (1996). *User manual: CORMIX3: An experimental system for mixing zone analysis and prediction of buoyant surface discharges*, Office of Science and Technology U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- 16- Jones, G., Nash, D., Doneker, L., and Jirka, H. (2007). "Buoyant surface discharge into water bodies. I: Flow classification and prediction methodology." *J. Hydrulic Engineering*, 133(9), 1010-1020.
- 17- 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.
- 18- Fischer, B., List, J.E., Imberger, J., and Brooks, H. N. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*, Acadmce Press, Inc., San Diego, California.
- 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- Nemlioglu, S., Roberts, P.J.W., and Bayat, C. (2006). "Experimental techniques for two dimensional analyses of cool-water outfalls laboratory model tests." *4th International Conference on Marine Waste Water Disposal (MWWDD)*, Antalya, Turkey.