

پیش‌بینی رژیمهای حاکم در تخلیه سطحی فاضلابهای با شناوری منفی در پیکره‌های آبی غیرساکن

عزیز عابسی^۱، محسن سعیدی^{۲*}، ناصر حاجی زاده ذاکر^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: Abessi@iust.ac.ir

۲- آزمایشگاه تحقیقاتی محیط زیست، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: Msaedi@iust.ac.ir

۳- گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، پست الکترونیکی: Nhzaker@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: مرداد ۱۳۸۹

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: بهمن ۱۳۸۸

نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۸۹، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

چکیده

تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین در محیطهای متحرک، تحت تاثیر مجموعه‌ای پیچیده از فرایندهای هیدرولیکی و فیزیکی قرار دارد. در مطالعه حاضر با توجه به مکانیزمهای متفاوت حاکم بر حرکت فاضلابهای سنگین، حالات مختلف جریان در تخلیه سطحی این نوع پسابها مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق با استفاده از روش مقیاس طولی و از طریق یک فلوم آزمایشگاهی که صرفاً برای این نوع مطالعات طراحی و ساخته شده است، حالات مختلف جریان در مقیاس آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده و الگوهای رفتاری حاکم مورد مطالعه قرار گرفته است. در نتیجه این مطالعه، معیارهای مشاهده رژیمهای سه گانه جت آزاد، جت چسبیده به کرانه و پلوم نفوذ یافته به سمت بالادست برای تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین تدقیق شده و محدوده‌ی وقوع هر رژیم از طریق توسعه یک نمودار بی‌بعد تعیین گردیده است. محورهای این نمودار، پارامترهایی بی‌بعد دربرگیرنده متغیرهای جریان بوده که در نقاط مرزی، معیارهای تفکیک رژیمهای مشاهده شده از یکدیگر را نشان می‌دهند. معیارهای کمی استخراج شده، در ادامه جهت توسعه نمودار درختی طبقه‌بندی جریان در تخلیه سطحی فاضلاب سنگین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با استفاده از نتایج این مطالعه از طریق تشخیص محدوده وقوع هر رژیم و در پی آن زیر رژیمهای حاکم، پیش‌بینی مشخصات جریان به وسیله معادلات تجربی استخراج شده برای هر حالت ممکن خواهد شد.

کلمات کلیدی: تخلیه‌کننده‌های دریایی، فاضلاب، شناوری منفی، کانالهای ساحلی، تخلیه سطحی

۱. مقدمه

شیرین‌کنها نمونه‌هایی از پسابهای تولیدی در نواحی ساحلی هستند که از طریق انواع تخلیه‌کننده‌های سطحی و مغروق در محیط دریا تخلیه می‌گردند. این تخلیه‌کننده‌ها با پخش فاضلاب در دریا و از طریق ترقیق و کاهش غلظت آن تا حد قابل تحمل، از پیامدهای نامطلوب آلاینده‌های موجود کاسته و تخلیه پیوسته فاضلاب در

تخلیه فاضلاب در دریا از روشهای معمول در دفع پسابهای تولیدی در مناطق ساحلی محسوب می‌گردد. فاضلابهای بهداشتی شهرها، پسابهای حرارتی نیروگاه‌ها و پسابهای بسیار شور آب

می‌سازند. مقیاسهای طولی ارائه شده توسط Csanady طی سالهای گذشته بطور گسترده توسط محققین مختلف جهت دسته بندی و تفکیک جریان و توسعه معادلات حرکت مورد استفاده قرار گرفته است (Hoult *et al.* 1969, Pincine and Roberts and Tome List 1971, Roberts and Wright 1981; Roberts and Tome List 1971, Roberts 1989, Wright 1977, 1987). این مقیاسها، که بر مبنای تحلیل‌های ابعادی و استدلال‌های فیزیکی و از روی متغیرهای عمومی تاثیرگذار استخراج گردیده‌اند، در قالب دو مقیاس طولی تخلیه^۲ (L_Q) و مقیاس طولی جت به پلوم^۳ (L_M) به صورت زیر ارائه گردیده‌اند:

$$l_Q = \frac{Q_0}{M_0^{1/2}} \quad (1)$$

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

در این روابط، Q_0 دبی تخلیه، M_0 شار تکانه و B_0 شار شناوری جریان خروجی است. Chu و Jirka (۱۹۸۶) و Abdelwahed و Chu (۱۹۸۱) به منظور ناحیه بندی رژیم‌های جریان در تخلیه جتهای شناور در محیط‌های غیرساکن (u_a سرعت محیط) دو پارامتر دیگر تحت عنوان مقیاس طولی جت به جریان جانبی^۴ (L_m) و مقیاس پلوم به جریان جانبی^۵ (L_b) را به عنوان مقیاسهای طولی دینامیک به صورت زیر ارائه نموده‌اند:

$$L_m = \frac{M_0^{1/2}}{u_a} \quad (3)$$

$$L_b = \frac{B_0}{u_a^3} \quad (4)$$

طبق تعریف، مقیاس طولی تخلیه (L_Q) نشان‌دهنده اهمیت نسبی شار حجمی به شار تکانه جریان خروجی است. این پارامتر مشخص کننده ناحیه‌ای از جریان است که هندسه‌ی کانال مشخصات جریان در آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مقیاس طولی جت به پلوم (L_M) بیانگر اهمیت نسبی تکانه‌ی خروجی

محیط را ممکن می‌سازند. در سالهای اخیر به جهت هزینه پایین و سهولت ساخت، استفاده از کانالهای ساحلی که از قدیمی ترین انواع تخلیه کننده‌های دریایی محسوب می‌گردند، گسترش یافته است. به منظور پیش‌بینی و تحلیل جریانات خروجی از تخلیه کننده‌های سطحی تاکنون مطالعات بسیار وسیعی انجام شده است (Jones *et al.* 2007, Jirka *et al.* 1981, Kim and Cho 2006, Jen *et al.* 1966, Jirka *et al.* 1981, Chu and Jirka 1986, Amon and Benner 1998, Abdelwahed and Chu 1996, Nash and Jirka 1981). در این مطالعات، معیارهای وقوع حالات مختلف جریان و روابط پیش‌بینی کننده میزان تدقیق در تخلیه سطحی فاضلابهای سبک مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

در مطالعه تخلیه کننده‌های دریایی به دلیل فرایندهای هیدرولیکی بسیار پیچیده‌ی حاکم، شبیه سازی آزمایشگاهی پدیده و تحلیل مشاهدات به روش مقیاس طولی^۱ به عنوان تکنیکی ساده و کارآمد همواره مورد تاکید قرار گرفته است (Fischer *et al.* 1979 و Jirka 1981). در این روش جریان به رژیم‌های ساده‌ای، که در هر رژیم یکی از مشخصه‌های حرکت نظیر شار شناوری، شار تکانه و جریانات محیطی غالب است، تقسیم می‌گردد. در هر یک از این رژیمها مشخصات سیال از طریق تعدادی رابطه تجربی، که از معادلات پایه در بردارنده متغیرهای جریان استخراج می‌گردد، قابل محاسبه خواهد بود. در روش مقیاس طولی به منظور توسعه روابط تجربی حاکم در حالت بی بعد نسبت به شبیه سازی آزمایشگاهی پدیده در حالات مختلف تخلیه اقدام می‌گردد. نتایج کمی مشاهدات انجام شده پس از ترسیم در نمودارهای بی بعد، نحوه ارتباط متغیرهای جریان به مشخصات مورد بررسی را نشان خواهد داد. در این نمودارها پارامترهای بی بعد مورد استفاده در هر محور، ترکیبی از متغیرهای جریان و پارامترهایی با بعد طول تحت عنوان مقیاسهای طولی هستند. مقیاسهای طولی که برای اولین بار توسط Csanady (۱۹۶۱) توسعه داده شده‌اند، نشان‌دهنده اهمیت نسبی هر یک از شارهای خروجی بوده و محدوده‌ای از جریان که در آن غلبه یکی از شارها تعیین کننده رفتار جریان است را مشخص می‌نمایند. مقیاسهای طولی از طریق دسته بندی جریان به رژیم‌های ساده‌تر، استخراج روابط تجربی مورد نیاز جهت پیش بینی مشخصات جریان در هر حالت را ممکن

² Discharge Length Scale

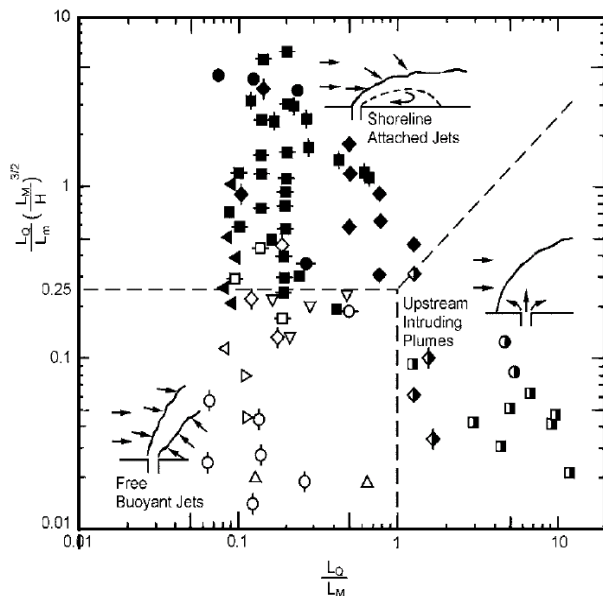
³ Jet to Plume Length Scale

⁴ Jet to Cross flow

⁵ Plume to Cross flow

^۱ Length scale

است. در شکل ۱ محدوده مشاهده هر یک از رژیمهای فوق در تخلیه سطحی فاضلابهای با شناوری مثبت نشان داده شده است (Jones et al. 2007). شکل ۲ نیز نمودار درختی تقسیم بندی رژیمهای مختلف جریانات سطحی را نشان می‌دهند. این نمودار با توجه به محدوده‌های مورد اشاره در شکل ۱ توسعه داده شده و پایه انجام محاسبات در نرم افزار CPRMIX3 است (Jones et al. 2007).



شکل ۱- نمودار طبقه بندی جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سبک در پیکره‌های آبی همراه با جریانات جانبی (Jones et al. 2007)

در تخلیه‌ی سطحی فاضلاب در محیط، جتهای با شناور منفی در صورتی ایجاد می‌گردند که جریانی از سیال با چگالی بیشتر از آب محیط پذیرنده در آن تخلیه گردد (عابسی و همکاران ۱۳۸۸). افزایش چگالی نسبت به آب محیط در این حالات می‌تواند ناشی از تفاوت دمای سیال با آب محیط (پسابهای سایت‌های LNG)، وجود ترکیبات و املاح محلول (پسابهای آب شیرین‌کنها) و نیز وجود ذرات معلق (مواد لایروبی) در جریان باشد (Roberts et al. 1997).

رفتار جت خروجی از تخلیه‌کننده‌های سطحی در این حالت مشابه تخلیه جتهای شناور، تابعی از مشخصات هندسی محیط پذیرنده، شکل تخلیه‌کننده، شارهای اولیه جریان خروجی و وجود یا عدم وجود جریانات جانبی است. به‌منظور تدوین معیارهای متفاوت حاکم در طبقه‌بندی تخلیه سطحی پسابهای سنگین تاکنون مطالعات بسیار محدودی انجام شده است

به شار شناوری فاضلاب بوده و نشان‌دهنده‌ی محدوده‌ی غالب بودن هر یک از شارهای فوق در مسیر جریان است. مقیاس طولی جت به سرعت جانبی (L_m) نیز نشان دهنده‌ی اهمیت نسبی شار تکانه خروجی به سرعت جانبی محیط بوده و نقطه‌ای را نشان می‌دهد که جریان توسط سرعت جانبی منحرف می‌شود. مقیاس طولی پلوم به سرعت جانبی (L_b) به‌طور مشابه بیانگر اهمیت نسبی شار شناوری اولیه به سرعت جانبی محیط بوده و نشان‌دهنده‌ی طولی از مسیر است که جریان شناور در جتهی خلاف جریان محیطی در محیط گسترش می‌یابد.

Chu و Jirka (۱۹۸۶) در بررسی جتهای شناور تخلیه شونده از تخلیه‌کننده‌های سطحی از پارامترهای فوق استفاده نموده‌اند. آنها با استفاده از ترکیباتی از این پارامترها، سه الگوی رفتاری متمایز در حرکت جتهای سطحی تحت عنوان رژیم جت آزاد^۱، جت چسبیده به کناره^۲ و پلوم نفوذ یافته به سمت بالادست^۳ را برای اولین بار مشاهده نموده و معیارهایی برای تفکیک هر حالت پیشنهاد نموده‌اند. دسته‌بندیهای آنها تطابق مطلوبی با مطالعات پیشتر انجام شده بر روی رژیم جتهای چسبیده توسط Naudascher و Schatzmann (۱۹۸۰) از خود نشان داده است. انجام مطالعات مشابهی نیز توسط Abdelwahed و Chu (۱۹۸۱)، مرکز هیدرولیک دلفت (۱۹۸۳)، Brocard (۱۹۸۴) و Nash و همکاران (۱۹۹۵) بر روی تخلیه سطحی فاضلابهای سبک در محدوده وسیعتری از متغیرهای جریان گزارش شده است. مجموع مطالعات انجام شده در ارتباط با رفتار جتهای شناور خروجی از تخلیه‌کننده‌های سطحی جهت دسته‌بندی رژیمهای مختلف جریان در مدل CPRMIX3 مورد استفاده قرار گرفته است (Jones et al. 1996). این نرم‌افزار در سال ۱۹۹۶ توسط سازمان حفاظت از محیط زیست امریکا (USEPA) با همکاری پرفسور Jones و Jirka توسعه داده شده و متداولترین مدل در طراحی تخلیه‌کننده‌های سطحی فاضلاب سبک محسوب می‌گردد (Jones et al. 1996). مدل CPRMIX3 با تفکیک جریان به رژیمهای ساده‌تر، از طریق معادلات تجربی استخراج شده از مشاهدات آزمایشگاهی، رفتار جریان در هر رژیم را تخمین می‌زند. Jones در مطالعات تکمیلی خود در سال ۲۰۰۷ جزئیات الگوی جریان در هر یک از زیر رژیمهای ارائه شده را تشریح و ثابتهای ارائه شده را تدقیق نموده

¹ Free jet

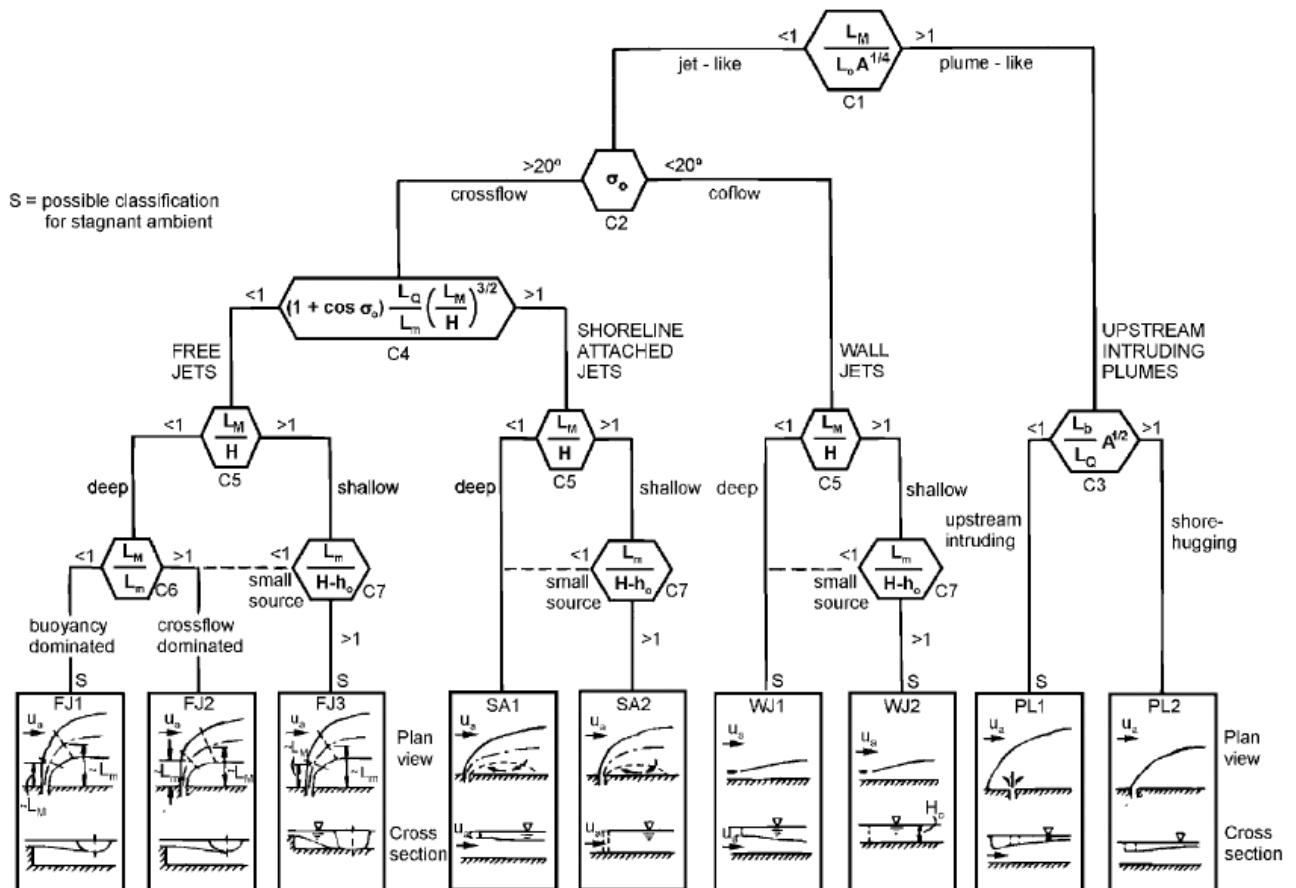
² Shore line attached jet

³ Upstream intruding plume

Doneker و همکاران (۲۰۰۴) نیز با بیان عدم دسترسی به مطالعات آزمایشگاهی و میدانی کافی جهت دسته بندی و شبیه‌سازی رژیمهای حاکم در تخلیه سطحی جریانات چگال، پیش‌بینی حالت مختلف تخلیه در این حالت را با تقریب فراوان عنوان کردند.

فاضلابهای سنگین (ناشی از لایروبی یا پسابهای شور) به دلیل چگالی بالای خود نسبت به آب محیط، از نظر کمی دارای شناوری به مراتب بیشتری نسبت به فاضلابهای سبک (حرارتی) هستند. این موضوع علاوه بر تغییر مکانیزمهای هیدرولیکی حاکم، بازه تغییرات بسیار محدودتری را برای مقیاسهای طولی مرتبط و معیارهای استخراجی از آنها به دنبال خواهد داشت. این مطلب به‌طور آشکار، عدم دقت استفاده از معیارهای ارائه شده برای فاضلابهای سبک، جهت طبقه بندی جریانات با شناوری منفی را نشان می‌دهد.

عابسی و همکاران (۱۳۸۸). Doneker و Jirka (۱۹۹۷) جهت شبیه‌سازی جریانات سنگین خروجی از کانالهای سطحی، با توجه به سابقه بسیار محدود مطالعاتی موجود، از معیارهای ارائه شده در تخلیه سطحی فاضلابهای سبک به‌عنوان نزدیکترین تقریب استفاده نموده‌اند. آنها با اعتراف به عدم دقت این معیارها، از آنها جهت ارائه تخمینی اولیه از رژیمهای مشاهده‌ای در تخلیه سطحی جریانهای سنگین در مدل D-CORMIX استفاده نمودند (Doneker and Jirka 1997). مدل D-CORMIX عضوی از مجموعه مدلهای CORMIX بوده و جهت پیش‌بینی مشخصات جریان در تخلیه فاضلابهای سنگین در حالات مختلف سطحی و مغروق توسعه داده شده است. Doneker و Jirka (۲۰۰۱) در مطالعه خود با اشاره به تواناییهای مدل CORMIX در پیش‌بینی مشخصات جریان، بر ضعف ساختاری این مدل جهت شبیه‌سازی جریانات سنگین خروجی از تخلیه‌کننده‌های سطحی تاکید نمودند.



شکل ۲- نمودار درختی دسته بندی رژیمهای مختلف جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سبک (Jones et al. 2007)

در این حالت را به صورت زیر تابعی از متغیرهای محیطی و مشخصات جریان و تخلیه کننده عنوان نموده‌اند.

(۶)

$$\theta = F(Q_0, M_0, B_0, H, h_0, b_0)$$

ایشان با استفاده از پارامترهای توسعه داده شده از تحلیل‌های ابعادی و براساس روش مقیاس طولی، مشخصات جریان را به صورت رابطه زیر تابع متغیرهای جریان عنوان کرده‌اند.

$$\Theta = f\left(\frac{L_Q}{L_M}, \frac{L_Q}{L_m}, \frac{L_M}{H}, \frac{L_Q}{H}, \frac{L_m}{H}, \frac{L_b}{H}, \frac{h_0}{b_0}, \theta_0\right) \quad (7)$$

در رابطه فوق Θ یک پارامتر بی بعد از مشخصات جریان، L_Q ، L_M ، L_m و L_b مقیاسهای طولی، θ_0 زاویه تخلیه، H عمق محیط در محل انحراف، h_0 عمق آب در کانال، b_0 عرض کانال و h_0/b_0 نسبت شکل در کانال تخلیه است.

Chu و Jirka (۱۹۸۶) با استفاده از این رابطه، پارامتر بی بعدی $(L_M/H)^{3/2}$ را تحت عنوان عامل برهم کنش جریان جانبی - کم عمقی^۱ و پارامتر (L_Q/L_M) را تحت عنوان عامل مشخصات منبع تخلیه^۲ را به عنوان معیارهای تفکیک کننده جریان جهت دسته بندی حالات مختلف پیشنهاد نموده‌اند. نحوه تاثیر سایر پارامترهای مورد اشاره در رابطه ۷ اعم از b_0 ، h_0 و θ_0 در توسعه این پارامترها در نظر گرفته نشده است. آنها مجموعه مقادیر کمی به دست آمده از مشاهدات آزمایشگاهی خود را با ترسیم در یک نمودار تحت عنوان آنها طبقه بندی^۳ جریان ارائه نموده‌اند (شکل ۱- نسخه بروز شده). در این نمودار معیارهای تفکیک سه رژیم جت آزاد، جت چسبیده به کرانه و پلوم نفوذ یافته به سمت بالا دست به عنوان رژیمهای اصلی حاکم در تخلیه سطحی فاضلابهای سبک ارائه گردیده است. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد پارامتر $(L_M/H)^{3/2}$ برابر با $۰/۲۵$ در روی محور عمودی به عنوان معیار تفکیک جت آزاد از رژیم جت چسبیده به کرانه و پارامتر (L_Q/L_M) برابر با $۱/۵$ در روی محور افقی به عنوان معیار تفکیک حالت جت مانند از حالت پلوم شکل ارائه گردیده است. در تحقیق حاضر با توجه به عدم دقت این تقسیم بندی در تفکیک رژیمهای جریانهای سنگین خروجی از تخلیه کننده های سطحی از طریق انجام مجموعه های از مشاهدات آزمایشگاهی و توسعه

به این ترتیب، اصلاح معیارهای ارائه شده در نمودار درختی دسته بندی جریان سطحی (شکل ۲) برای تخلیه فاضلابهای سنگین، ضروری و آشکار به نظر می‌رسد.

۲. طبقه بندی جریان

نمایی از پیکره آبی پذیرنده و نحوه تخلیه سطحی فاضلاب در محیطهای غیرساکن در شکل ۳ آورده شده است. وضعیت پیکره آبی جهت ساده سازی به صورت فوق نشان داده شده است. در این شکل u_a سرعت جانبی محیط، h_0 عمق آب در کانال و H عمق آب در محیط پذیرنده است. در مطالعه تخلیه کننده های سطحی، بررسی رژیمهای حرکت در نزدیکی محل تخلیه در امتداد طولی که خصوصیات جریان تحت تاثیر شارهای اولیه خروجی و سرعتهای محیطی قرار دارد، مورد نظر است. در طول این ناحیه سرعت اولیه جریان عامل پیشروی افقی فاضلاب در داخل پیکره آبی و شناوری منفی آن عامل گسترش عمودی جبهه فاضلاب در محیط است (عابسی و همکاران ۱۳۸۸). در این حالت به دلیل شناوری منفی و حرکات پایین رونده جریان، سطح آزاد آب متفاوت از تخلیه جتهای سبک، نقشی در محدود نمودن جریان نداشته و جبهه‌ی آلودگی با آزادی بیشتر در جهت عمودی گسترش می‌یابد. در پیکره‌های آبی سرعتهای محیطی با تحت تاثیر قرار دادن جریان خروجی، انحراف جریان و تغییر جهت آن به سمت پایین دست را به همراه خواهند داشت. به سبب تاثیر نیروهای متعدد بر جریان خروجی از تخلیه کننده های سطحی الگوی عمومی رفتار جت در این حالت ترکیبی بسیار پیچیده از پارامترهای تاثیرگذار خواهد بود. این پارامترها عبارتند از مشخصات تخلیه کننده شامل عمق (h_0) و عرض کانال (b_0)، مشخصات جریان اعم از شار حجمی (Q_0)، شار تکانه (M_0)، شار شناوری جریان خروجی (B_0) و مشخصات محیطی شامل سرعتهای جانبی (u_a) و عمق آب در پیکره آبی پذیرنده (H).

$$B_0 = g' \cdot Q_0, \quad M_0 = Q_0 \cdot u_0, \quad Q_0 = u_0 \cdot A \quad (5)$$

در این معادلات Q_0 دبی جریان، A سطح مقطع کانال، u_0 سرعت خروجی و g' شتاب اصلاح شده گرانش است.

$$\left(g' = \frac{\rho_0 - \rho_a}{\rho_a} g\right)$$

Chu و Jirka (۱۹۸۶) با انجام مطالعاتی جامع در ارتباط با

تخلیه سطحی فاضلابهایی با شناوری مثبت، مشخصات جریان

¹ Cross flow to shallowness interaction factor

² Source parameters

³ Classification diagram

برداشت شده از فرایند تخلیه و مقایسه آن با الگوهای تصویری و تحلیلی ارائه شده برای هر رژیم استفاده شده است. جهت تحلیل آزمایشات، تصاویر میانگین‌گیری شده فرایند تخلیه، از طریق نرم افزار Image stream از روی فیلمهای ضبط شده استخراج و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نرم‌افزار که توسط پرفسور Nokes در دانشگاه Canterbury توسعه داده شده قابلیت بالایی در تجزیه و تحلیل فیلمهای دیجیتال در مشاهدات آزمایشگاهی پدیده‌های هیدرولیکی دارا است (Kikerts et al. 2007).

۳-۲ مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه فلومی به طول ۶ متر، عرض ۱/۸۰ متر و عمق ۱/۵۰ متر است که از آب شیرین با چگالی 0.998 g/cm^3 تا ارتفاع مشخص پر شده است (شکل ۴).



شکل ۴- نمایی از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

تخلیه‌کننده سطحی مورد مطالعه در این تحقیق یک کانال دایره‌ای به قطر ۵/۲۵ سانتیمتر است که فاضلاب تولیدی را با سرعتهای مختلف در مجاورت سطح و مماس بر آن تخلیه می‌کند. دبی عبوری از تخلیه‌کننده از طریق یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی (نوع WELLTECH COPA-XE WT4300)، نصب شده در مسیر جریان اندازه‌گیری می‌شود. به این ترتیب براساس عمق قرائت شده در دهانه خروجی کانال، سرعت متوسط جریان در محل تخلیه فاضلاب محاسبه می‌گردد. سامانه‌ی مکانیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان محیطی در این مدل متشکل از صفحه‌ای متحرک به ابعاد 0.8×1.8 است که توسط یک موتور الکتریکی، گیربکس و کابل متصل به آن در روی یک سامانه‌ی ریلی به‌طور یکنواخت و بدون کوچکترین لرزش به حرکت در می‌آید. کنترل

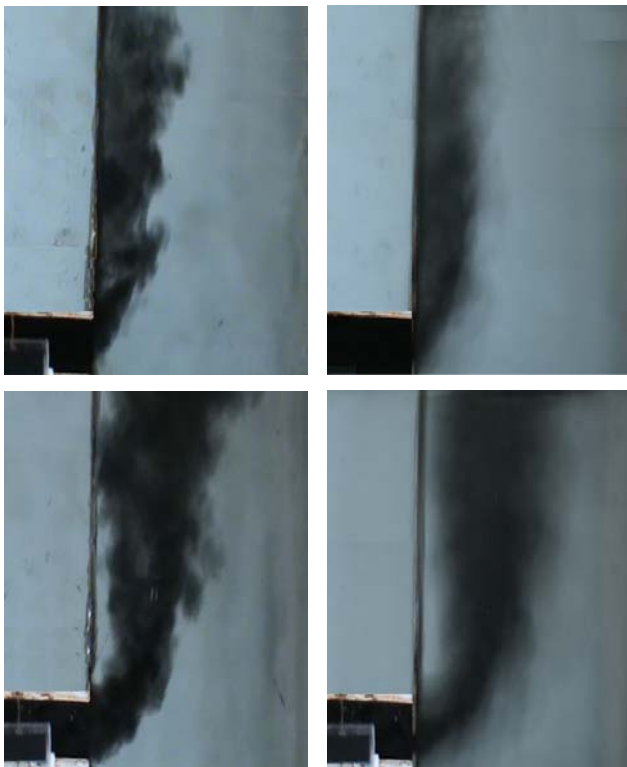
نموداری مشابه شکل ۱، نسبت به اصلاح و تدقیق معیارهای کمی فوق برای تخلیه فاضلابهای سنگین اقدام می‌گردد. در این تحقیق تصحیح معیارهای حاکم بر سطح اول نمودار درختی طبقه‌بندی جریان (شکل ۲) مورد نظر بوده و تعیین معیارهای تفکیک سایر رژیمهای و زیر رژیمها موجود به مطالعات آتی واگذار می‌گردد.

۳. مواد و روشها

۳-۱ روش کار

در این تحقیق به منظور برآورده سازی اهداف مشروح انجام مجموعه‌ای از مشاهدات آزمایشگاهی با استفاده از یک فلوم آزمایشگاهی پیش بینی شده است. مشخصات فنی و تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه در ادامه تشریح گردیده است. در انجام مشاهدات آزمایشگاهی به منظور شبیه‌سازی جریانهای محیطی، از روش مورد اشاره در مطالعات Roberts و همکاران (۱۹۸۹)، Tian و همکاران (۲۰۰۴)، Daviero و Roberts (۲۰۰۶) استفاده شده است. در این روش طبق قانون سرعتهای نسبی، برای شبیه‌سازی سرعتهای محیطی در محیطهای ساکن، منبع تخلیه از طریق اتصال به یک سامانه‌ی مکانیکی به‌طور یکنواخت در امتداد طولی فلوم به حرکت در می‌آید. در انجام آزمایشات همچنین به منظور ایجاد سرعتهای مختلف در دهانه خروجی کانال تخلیه از یک پمپ چرخشی استفاده شده است. با استفاده از تجهیزات مشروح به این ترتیب مدلسازی آزمایشگاهی حالات مختلف تخلیه در محدوده بسیار وسیعی از سرعتهای جانبی ($80-1/8 \text{ cm/s}$) و سرعت تخلیه ($3-140 \text{ cm/s}$) ممکن می‌گردد. همان‌طور که پیشتر بیان شد به منظور از بین بردن اثرات ابعادی انجام مشاهدات در مقیاس آزمایشگاهی و جهت ایجاد امکان استفاده از معیارهای استخراجی در نمونه‌های واقعی در این مطالعه از روش مقیاس طولی و پارامترهای بی بعد بدست آمده از تحلیل‌های ابعادی استفاده شده است. در این زمینه با توجه سابقه مطالعات مشروح (Chu and Jirka 1986, Jones et al. 2007) از دو پارامتر بی‌بعد $(L_M/H)^{3/2}$ ، (L_Q/L_M) و (L_Q/L_M) جهت ترسیم نمودار طبقه‌بندی جریان استفاده می‌گردد. داده‌های استخراج شده از مشاهدات آزمایشگاهی به تفکیک رژیمهای مشاهده‌ای در نمودار دسته‌بندی جریان ترسیم شده و ناحیه تمایز هر یک از رژیم‌ها تعیین گردیده است. به‌منظور تفکیک رژیم‌های مشاهده‌ای از یکدیگر در این تحقیق از نتایج تجزیه و تحلیل فیلمهای

جریان گردشی در پایین دست محل خروج می‌شود. در این حالت نیز جریان تحت تاثیر شناوری منفی خود ممکن است ارتباط خود را با سطح از دست داده و مغروق شود. پلوم نفوذ یافته به سمت بالا دست، دیگر رژیم محتمل در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین، حالتی از جریان است که در آن نیروی دراگ ناشی از جریان محیطی در تعادل با توانایی نفوذ پلوم به سمت بالادست قرار می‌گیرد. در این حالت‌ها جریان خروجی به دلیل غلبه شار شناوری اولیه نسبت به شار تکانه جریان حالت جت مانند نداشته و به صورت پلوم وارد محیط پذیرنده می‌شود. این حالت از جریان تنها در تخلیه جریانهای با اختلاف چگالی بالا نسبت به آب محیط و در محیطهایی با سرعت جانبی بسیار کم مشاهده می‌گردد. نمایی از فریمهای مجزا از تخلیه جریان و تصاویر میانگین‌گیری شده از رژیم جت آزاد و جت چسبیده به کناره در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵- نمونه‌ای از فریم‌های مجزا (ستون چپ) و تصاویر میانگین‌گیری شده (ستون راست) از حالات جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین (a) رژیم جت چسبیده به دیواره، (b) رژیم جت آزاد (دید از بالا)

با تفکیک رژیمهای مشاهده‌ای در هر حالت و از طریق ترسیم کمی پارامترهای بی بعد توسعه داده شده، نمودار اصلاح شده طبقه‌بندی جریان به‌عنوان یافته نهایی این تحقیق در قالب نمودار شکل ۶ ارائه گردیده است.

سرعت حرکت صفحه از طریق کنترل دور موتور الکتریکی و به وسیله‌ی یک سامانه‌ی الکترونیکی مجهز به اینورتر انجام می‌شود. به این ترتیب کانال دایره‌ای مورد استفاده به اتصال به این صفحه متحرک قابلیت حرکت در امتداد طولی فلوم با سرعتهای مختلف را دارا است. فاضلاب سنگین مورد استفاده در آزمایش نیز آب شور ناشی از انحلال کلرید سدیم (NaCl) در آب شیرین است که در غلظتهای مختلف، جریانی از پساب با جریمهای حجمی متفاوت ایجاد می‌نماید. جهت ثبت مسیر حرکت جت پس از خروج از کانال و نیز تعیین مشخصات ظاهری پلوم در پیکره آبی، از رنگ و دوربین دیجیتال نوع SONY DCR-SR47 استفاده شده است. دوربین فوق با اتصال به سامانه‌ی متحرک مورد اشاره، قابلیت ثبت جریان تخلیه از بالا و حرکت توامان به کانال را دارا است. تصاویر دیجیتال برداشت شده به منظور تعیین الگوی حرکت جریان فاضلاب در محیط و رژیم حاکم با انتقال به رایانه مورد پردازش قرار گرفته‌اند.

۴. نتایج و بحث

در این مطالعات جهت توسعه نمودار دسته‌بندی جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین از نتایج افزون بر ۱۱۰ آزمایش مجزا استفاده شده است. متغیرهای جریان در این آزمایشات سرعتهای محیطی در بازه $7.0-9.0 \text{ cm/s}$ ، سرعتهای تخلیه در محدوده $8-13.5 \text{ cm/s}$ و چگالی فاضلاب در بازه $1055-1070 \text{ kg/m}^3$ هستند. آزمایشات در محیطی با چگالی 998 kg/m^3 و برای اعماق ۴۸ تا ۶۳ سانتیمتر انجام شده‌اند. در این مطالعه مشابه تخلیه فاضلابهای سبک، سه رژیم جت آزاد، جت چسبیده به کرانه و پلوم نفوذ یافته به سمت بالا دست مشاهده شده و از یکدیگر تفکیک گردیده‌اند. رژیم جت آزاد در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین الگویی از جریان است که در آن جت خروجی تحت تاثیر برهم‌کنش شارهای اولیه خروجی و سرعت جانبی محیط به‌طور آهسته منحرف شده و بدون تماس با دیواره، همراه با جریانات محیطی به سمت پایین دست حمل می‌گردد. جریان خروجی در این حالت، به دلیل وزن نسبی بالای خود به سمت اعماق بیشتر نیز کشیده شده و به صورت مغروق در می‌آید. جت چسبیده به کناره الگویی دیگر از جریان است که در آن جریان خروجی تحت تاثیر سرعتهای محیط به صورت ناگهانی به سمت پایین دست منحرف می‌شود تا حدی که به دیواره جانبی برخورد می‌نماید. تماس جت با دیواره جانبی در این حالت باعث شکل‌گیری یک

جت چسبیده به کناره عمده‌ترین تفاوت نمودار توسعه داده شده در تحقیق حاضر با نمودار توسعه داده شده برای تخلیه سطحی فاضلابهای سبک محسوب می‌گردد. در تخلیه سطحی فاضلابهای سبک محدوده وقوع رژیم پلوم گسترش یافته به سمت بالا دست در بازه

$$\frac{L_Q}{L_M} > 1.5$$

و محدوده وقوع رژیم جت چسبیده به دیواره در بازه

$$\left(\frac{L_Q}{L_m}\right) \cdot \left(\frac{L_M}{H}\right)^{3/2} > 0.25$$

گزارش شده است (Jones et al. 2007) این در حالی است که یافته‌های تحقیق حاضر نشان می‌دهد که این محدوده‌ها در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین در بازه

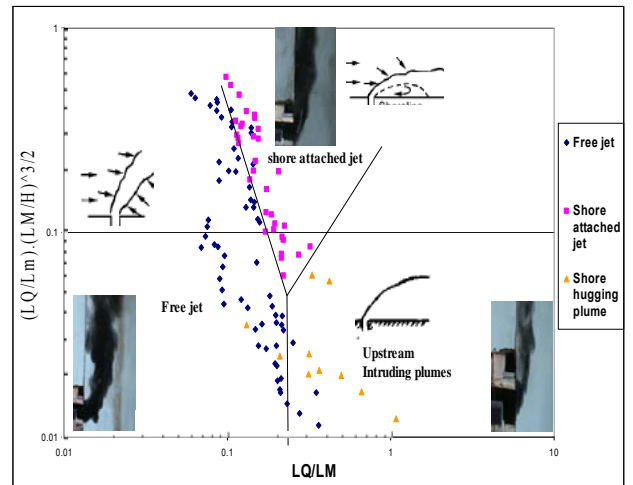
$$\frac{L_Q}{L_M} > 0.22$$

برای تفکیک جریان پلوم شکل از رژیم جت مانند و محدوده

$$\left(\frac{L_Q}{L_m}\right) \cdot \left(\frac{L_M}{H}\right)^{3/2} > 0.0016 \times \left(\frac{L_Q}{L_M}\right)^{-2.35}$$

برای تفکیک رژیم جتهای آزاد از رژیم جت چسبیده به کناره هستند.

با توجه به معیارهای ارائه شده در شکل فوق و براساس نتایج تحقیق حاضر، نمودار درختی تفکیک رژیمهای جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای با شناوری منفی در شکل ۷ ارائه شده است. این نمودار ضعف اطلاعاتی موجود در ارتباط با معیارهای دسته‌بندی حالات جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین را رفع نموده و می‌تواند جهت طبقه‌بندی رژیمهای محتمل در این حالت مورد استفاده قرار گیرد. جایگزینی معیارهای ارائه شده در نمودار درختی فوق، با معیارهای مورد استفاده در مدل D-CORMIX علاوه بر تدقیق رژیمهای مشاهده‌ای، امکان انجام تخمینهای مطلوبتر از مشخصات ظاهری پلوم و میزان ترقیق جریان در هر حالت را ممکن خواهد ساخت. در نمودار شکل ۷ رژیم جت متصل به دیواره از مرحله‌ی اول تقسیم‌بندی جریانات سطحی مورد بررسی قرار نگرفته است. بررسی این رژیم و زیررژیمهای موجود در هر حالت حائز اهمیت بوده و بررسی آن در مطالعات تکمیلی آتی مورد تاکید قرار می‌گیرد.



شکل ۷- نمودار توسعه داده شده جهت طبقه بندی رژیمهای جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای با شناوری منفی

همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود معیارهای تفکیک رژیمهای مختلف در حالت تخلیه جریانهای سنگین دارای مقادیری کاملاً متفاوتی در مقایسه با جریانهای سبک هستند. این نمودار همچنین در تفاوت آشکار با نمودار ارائه شده توسط Jones و همکاران (۲۰۰۷)، معیار تفکیک رژیم جت آزاد از حالت جت چسبیده به دیواره در حالت تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین را غیر ثابت و خطی نشان می‌دهد. در این نمودار معیار بی بعد ارائه شده در محور عمودی عبارت است از:

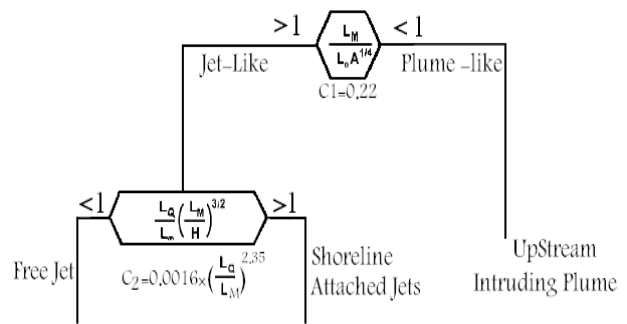
$$\frac{L_Q}{L_m} \cdot \left(\frac{L_M}{H}\right)^{3/2} = \left(\frac{\frac{Q}{M_0^{1/2}}}{\frac{M_0^{1/2}}{u_a}}\right) \cdot \left(\frac{\frac{M_0^{3/4}}{J_0^{1/2}}}{H}\right)^{3/2} = \frac{u^{2.5} \cdot A^{1.375}}{u_a \cdot g^{3/2} \cdot H^{3/2}} \quad (\lambda)$$

وزنهای نسبی متغیرهای جریان در این پارامتر نشان می‌دهد که معیار بی بعد فوق با سرعت تخلیه به توان ۲/۵، سرعت محیط به توان ۱ و عمق محیط به توان ۱/۵ تغییر می‌نماید. در این حالت آشکار است که تغییر سرعت خروجی به ازای ثبات شرایط محیطی، تشدید رژیم جت آزاد را به همراه خواهد داشت. در این نمودار به ازای شرایط ثابت تخلیه با افزایش سرعت محیطی، حالت جریان به درستی به سمت رژیم جت چسبیده به دیواره متمایل می‌گردد. تاثیر ترکیبی سرعتهای محیطی و سرعت تخلیه در تغییر الگوی جریان از جت آزاد به جت چسبیده به کناره به‌طور آشکار در مرز مایل میان این دو رژیم نمود یافته است. به این ترتیب علاوه بر محدوده متفاوت معیارهای تفکیک کننده جریان، مرز مایل و غیرثابت میان دو رژیم جت آزاد به

هر یک از این رژیم‌های به زیررژیمها مرتبط از مواردی است که بررسی آنها در ادامه این تحقیق پیشنهاد می‌گردد. در مطالعات انجام شده بر روی تخلیه کننده‌های سطحی همچنین نحوه تاثیر شکل تخلیه کننده یا نسبت عرض به طول بر معیارهای دسته‌بندی جریان تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است. این موضوع که در ارتباط با تخلیه کننده‌های ثقیلی دارای اهمیت بیشتر است، از دیگر مواردی است بررسی آن در مطالعات آتی مورد تاکید قرار می‌گیرد. بررسی مشخصات جریان در هر یک از زیر رژیمهای به دست آمده آخرین گام در پیش بینی وضعیت جریان در تخلیه فاضلابهای سنگین از کانالهای ساحلی است که ضرورت بررسی آن در مطالعات آتی مورد تاکید قرار می‌گیرد.

منابع

- عابسی، ع. و سعیدی، م. ۱۳۸۸. تخلیه فاضلاب در دریا. مجله آب و محیط زیست. صفحات، ۴۱-۳۴.
- عابسی، ع؛ سعیدی، م. و ذاکر، ن. ۱۳۸۸. بررسی پدیده تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین در پیکره‌های آبی در حالت عدم وجود جریانات جانبی. مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست. نوبت چاپ.
- عابسی، ع؛ سعیدی، م. و ذاکر، ن. ۱۳۸۸. تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین در پیکره‌های آبی I: مشخصات جبهه آلودگی در نقطه شیرجه. مجله آب و فاضلاب. نوبت چاپ.
- Abdelwahed, M. S. T. and Chu, V. H. 1981. Surface jets and surface plumes in cross-flows. Technical Rep. No. 81-1. Fluid Mechanics Laboratory. McGill Univ. Montreal.
- Amon, R. M. W. and 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 Microbiol. Ecol. 35(3): 289-300.
- Brocard, D. N. 1984. Surface buoyant jets in reversing and steady cross-flows. 1: Experiments. Technical Rep. No. 18-84/M424F. Alden Research Laboratory. Worcester. Mass.



شکل ۷- نمودار درختی توسعه داده شده برای دسته بندی جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین

۵. جمع بندی و نتیجه گیری

در تحقیق حاضر از طریق توسعه مجموعه‌ای از مشاهدات آزمایشگاهی، محدوده وقوع رژیم‌های جت آزاد، جت چسبیده به کرانه و رژیم پلوم شکل در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین مورد بررسی قرار گرفته است. در نتیجه‌ی این مطالعه، معیارهای ارائه شده در نمودار درختی طبقه بندی رژیمهای جریان برای تخلیه فاضلابهایی با شناوری منفی مورد بازنگری قرار گرفته و معیارهایی متناسب ارائه گردیده است. در این نمودار کمیت

$$\frac{L_d}{L_m} = 0.22 \quad (9)$$

به‌عنوان معیار تفکیک جریان پلوم شکل از رژیمهای جت مانند و کمیت

$$\left(\frac{L_d}{L_m}\right) \left(\frac{L_m}{H}\right)^{\frac{1}{2}} = 0.0016 \times \left(\frac{L_d}{L_m}\right)^{-2.35} \quad (10)$$

به‌عنوان معیار تفکیک رژیم جت آزاد از رژیم جت چسبیده به دیواره ارائه گردیده است. این معیارها در مقایسه با معیارهای ارائه شده در تخلیه فاضلابهای سبک دارای کمیتی به مراتب کوچکتر است و مرز غیر ثابت مابین رژیمهای جت آزاد و جت چسبیده به کرانه را به‌طور مطلوبتری نشان می‌دهند. معیارهای فوق با تدقیق الگوی مشاهده هر رژیم، به این ترتیب امکان شبیه‌سازی دقیقتر حالات جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سنگین را فراهم خواهند ساخت. با توجه به اهمیت نقش عمق محیط پذیرنده در تعیین مشخصات جریان تخلیه شونده در محیط، تعیین معیارهای مشاهده این حالات در آبهای کم‌عمق و عمیق و نیز معیارهای تقسیم بندی

- User manual. Office of science and technology. Environmental Protection Agency. Washington.
- Jones, G.; Nash, D.; Doneker, L. and Jirka, H. 2007. Buoyant surface discharge into water bodies. I: Flow classification and prediction methodology. *J. Hydr. Engrg. ASCE*. 133(9): 1010-1020.
- Kikkert, G.; Davidson, J. and Noles I. 2007. Inclined negatively buoyant discharges, *J. Hydr. Engrg. ASCE*. 133 (5): 545-554.
- Kim, D.G. and Cho, H.Y. 2006. Modeling the buoyant flow of heated water discharged from surface and submerged side outfalls in shallow and deep water with a cross flow. *Environ Fluid Mech*. 6:501-518.
- Nash, J. D. and Jirka, G. H. 1995. Buoyant discharges in reversing ambient currents: Experimental investigation and prediction. Technical Rep. DeFrees Hydraulics Laboratory. Cornell Univ. Ithaca, N.Y. _also published by Maryland Dept. of natural resources. Tech. Rep. No. CBWP-MANTA-TR-97-2.
- Nash, J. D. and Jirka, G. H. 1996. Buoyant surface discharges into unsteady ambient flows. *Dyn. Atmos. Oceans*. 24(1-4): 75-84.
- Pincince, A.B. and List, E.J. 1973. Disposal of brine into an estuary. *J. Water Pollut. Control Fed*. 45: 2335-2344.
- Roberts, P. J. W, Tome .G., 1987: Inclined dense jets in flowing current, *J. Hydr. Engrg. ASCE*. 113(3): 323-341.
- Roberts, P. J. W.; Snyder W. H. and Baumgartner, D. J. 1989. Ocean outfalls. I: Submerged waste field formation. *J. Hydr. Engrg. ASCE*. 115(1): 49-69.
- Roberts, P.J. 1989. Outfall design consideration. *J. Hydr. Engrg. ASCE*. 115: 661-689.
- Roberts, J. W. and Wright, S. J. 1981. Vertical Round buoyant jet in shallow water. *J. Hydr. Engrg. ASCE*. 72: 490-496.
- Roberts, P. J. W.; Ferrier, A. and Daviero, G. 1997. Mixing in inclined dense jet. *J. Hydr. Engrg. ASCE*. 123(8): 693-699.
- Chu, V.H. and Jirka, G.H. 1986. Chapter 25. Surface buoyant jets, encyclopedia of fluid mechanics, Persian Gulf publishing Company. Houston. Texas.
- Daviro, J. and Roberts, P. J. W. 2006. Marin waste water discharge from multiport diffusers. III: Stratified stationary water, *J. Hydr. Engrg. ASCE*. 132(4): 404-410.
- Delft Hydraulics. 1983. Buoyant surface jets in crossflow. Rep. on Experimental Investigation-S350-II. Delft Hydraulics Laboratory. Delft. The Netherlands.
- Doneker, L.R. and Jirka, G. H. 1997. D- CORMIX continues derge disposal mixing zpne water quality model laboratory and filed data validation study. U.S. Environmental protection agency. Washington.
- Doneker, R.L. and Jirka, G. H. 2001. CORMIX- GI systems for mixing zone analysis of brine waste water disposal. *Desalination*. 139:263-274.
- Doneker, R.L.; Nash, J.D. and Jirka, G. H. 2004. Pollutant transport and mixing zone simulation of sediment density currents. *J. Hydraul Eng*. 130(4): 349-359.
- Fischer, B.; List, J. E; Imberger, J. and Brooks, H. N. 1979. Mixing in inland and coastal waters. Acadmce Press. INC. Book.
- Hoult, D.P.; Fay J.A. and Forney L.J. 1969. A theory of plume rise compared with field observations. *Journ. Air Pollution Control Assoc*. 19(8): 585-590.
- Jen, Y.; Wiegel, R. L. and Mobarek, I. 1966. Surface discharges of horizontal warm water jets. *J. Power Div*. 92(2): 1-29.
- Jirka, G.; Adams, E. and Stolzenbach, K. 1981. Properties of surface buoyant jets. *J. of Hydraulics Div. ASCE*. 106 (HY11).
- Jirka, G.H.; Adams, E. E. and Stolzenbach, K. D. 1981. Buoyant surface jets. *J. Hydr. Div*. 107(11): 1467-1487.
- 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.

Tian, X.; Roberts, P. J. W. and Daviro, J. 2004. Marine waste water discharge from multiport diffusers. II: Unstratified flowing water. J. Hydr. Engrg. ASCE. 130(12): 1147-1155.

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.

Wright, S.J. 1984. Buoyant jets in density-stratified crossflow. J. Hydraul. Eng. 110(5): 643-656.