

## پیش بینی رژیم های حاکم بر جریان تخلیه سطحی فاضلاب چگال در مقایسه با نتایج مدل شبیه ساز کرمیکس

محسن سعیدی<sup>۱\*</sup>

[Msaedi@iust.ac.ir](mailto:Msaedi@iust.ac.ir)

عزیر عابسی<sup>۲</sup>

آرش علی آبادی فراهانی<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۱/۱۰

تاریخ دریافت: ۸۹/۰۶/۲۵

### چکیده

**زمینه و هدف:** تخلیه فاضلاب های سنگین تولیدی در مناطق ساحلی در دریا از طریق کانال های ساحلی روشی متداول در دفع این پساب ها در محیط زیست محسوب می گردد. جریان های تخلیه ای بسته به شرایط تخلیه و محیط پذیرنده الگوهای متفاوتی خواهند یافت. در این تحقیق سه الگوی جریان جت آزاد، جت چسبیده به کرانه و پلوم که در مطالعه های آزمایشگاهی و میدانی مختلف گزارش گردیده، در نظر گرفته شده است. D-CORMIX یک مدل شبیه ساز رایانه ای است که برای مدلسازی اختلاط فاضلاب های چگال در تخلیه جریان به پیکره های آبی توسعه داده شده است. این مدل برای تعیین الگوی حرکتی جریان در تخلیه سطحی از مبانی مربوط به فاضلاب های شناور بهره می گیرد. از اینرو به نظر می آید با مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی الگوهای حرکتی فاضلاب چگال با نتایج D-CORMIX تفاوت های قابل توجهی حاصل شود.

**روش بررسی:** مدل D-CORMIX تحت شرایط مختلف محیطی و تخلیه اجرا گردید. همین شرایط عینا با استفاده از یک فلوم آزمایشگاهی که برای شبیه سازی تخلیه سطحی جریان های چگال از کانال های مستطیلی توسعه داده شده، شبیه سازی گردید. یافته ها: الگوهای جریان استخراج شده از اجرای مدل D-CORMIX و مشاهده های آزمایشگاهی هریک جداگانه در قالب یک نمودار بی بعد که محورهای افقی و قائم آن در برگیرنده مجموع شرایط آزمایش اند توسعه داده شد و محدوده وقوع هر الگو تعیین گردید. نتیجه گیری: موارد اختلاف دو نمودار به همراه علل آن مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

**واژه های کلیدی:** تخلیه سطحی، فاضلاب چگال، الگوهای جریان، کرمیکس.

\*۱- (مسئول مکاتبات): استاد گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد آب و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

## **Prediction of Flow Pattern in Surface Discharge of Negatively Buoyant Wastewater Compared with the Results from CORMIX Model**

**Mohsen Saeedi** <sup>1\*</sup>

[Msaeedi@iust.ac.ir](mailto:Msaeedi@iust.ac.ir)

**Ozeair Abessi** <sup>2</sup>

**Arash Aliabadi Farahani** <sup>3</sup>

### **Abstract**

**Background and Objective:** Surface discharge of dense jet produced in coastal areas is considered as a common way for the disposal of brine in marine environment. Discharging flow patterns varies depending on the characteristic of discharge and receiving ambient water. Three flow patterns: free jet, shoreline attached jet and plume that have been reported in various field and laboratory studies are considered in this research. D-CORMIX is a computer simulation model that is used for the simulation of entrainment and mixing of negatively buoyant flow into water bodies. This model uses the principals of motion for bouyant flow to determin the flow patern in surface discharge. Thus, it seems that significant differences could be observed by comparing the experimental results of flow configurations for dense discharge using D-CORMIX.

**Method:** D-CORMIX model was run for different discharge and ambient conditions. Same conditions simulated with a flume in a laboratory especially designed for the investigation of dense surface discharge from a rectangular channel.

**Results:** The flow pattern predicted from running D-CORMIX model with laboratory observation was developed separately in non-dimensional diagrams in a way that vertical and horizontal cordinates showed the range of experimental conditions, to identify the area that each flow patern happens.

**Conclusion:** Finanly, the differences between two diagrams and the reasons are discussed.

**Keywords:** Surface Discharge, Negatively Buoyant Wastewater, Flow Pattern, CORMIX Model.

---

1- Professor, Department of Water and Environmental Engineering, School of Civil Engineering, Science and Technology University, Tehran, Iran. *\*(Corresponding Author)*

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

3- MSc. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Science and Technology University, Tehran, Iran.

## مقدمه

تخلیه مستقیم فاضلاب در دریا از روش‌های معمول در دفع پساب‌های تولیدی در مناطق ساحلی محسوب می‌گردد. پساب‌های شهری، فاضلاب‌های بهداشتی، پساب‌های حرارتی نیروگاه‌ها و پساب‌های بسیار شور آب‌شیرین‌کنها نمونه‌هایی از فاضلاب‌های تولیدی در نواحی ساحلی هستند که از طریق انواع تخلیه‌کننده‌های سطحی و مستغرق در محیط دریا تخلیه می‌گردند. این تخلیه‌کننده‌ها با پخش فاضلاب در دریا و از طریق ترقیق آن تا میزان قابل تحمل برای محیط، از پیامدهای نامطلوب آن کاسته و تخلیه پیوسته فاضلاب در محیط را ممکن می‌سازند. کانال‌های ساحلی پیشرونده در این میان قدیمی‌ترین نوع تخلیه‌کننده‌های دریایی محسوب می‌گردند که استفاده از آن‌ها به جهت هزینه پایین و سهولت ساخت آن‌ها بسیار متداول می‌باشد. به منظور تحلیل رفتار جریان‌های خروجی از تخلیه‌کننده‌های سطحی تاکنون مطالعه‌های بسیاری انجام گرفته است (۱-۶).

این مطالعه‌ها عمدتاً بر تخلیه سطحی فاضلاب‌های شناور تمرکز داشته و معیارهای حاکم بر وقوع حالت‌های مختلف جریان و روابط پیش‌بینی‌کننده میزان ترقیق در هر حالت را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مطالعه‌ها با شبیه‌سازی آزمایشگاهی فرایند تخلیه، مشخصه‌های جریان از طریق تحلیل‌های ابعادی به روش مقیاس طولی (Length scale) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. با توجه به فرایندهای پیچیده حاکم، استفاده از روش مقیاس طولی در مطالعه تخلیه‌کننده‌های دریایی به عنوان روشی ساده و کارآمد همواره مورد توجه بوده است (۷).

در این روش، جریان به رژیم‌های متفاوتی تقسیم می‌شود که در هر یک از این رژیم‌ها، یکی از مشخصه‌های جریان نظیر شار شناوری، شار مومنتم و جریانات محیطی غالب است. در هر یک از این رژیم‌ها مشخصه‌های سیال از طریق یک رابطه حدی ساده از معادله‌های پایه استخراج می‌شود. مدل‌هایی که از این راه حل‌های حدی استفاده می‌کند به دلیل استفاده از مقیاس‌های طولی برای توصیف محدوده رژیم‌ها، مدل مقیاس طولی نام گرفته‌اند. در این روش با انجام مشاهده‌های آزمایشگاهی نسبت به شبیه‌سازی پدیده در حالت‌های مختلف تخلیه اقدام می‌گردد. نتایج این مشاهده‌ها از طریق ترسیم در نمودارهای بی‌بعد، نحوه ارتباط متغیرهای جریان به مشخصه‌های مورد بررسی را نشان خواهد داد. در این نمودارها، پارامترهای بی‌بعد از متغیرهای جریان و عامل‌هایی با بعد طول تحت عنوان مقیاس‌های طولی تشکیل یافته‌اند. مقیاس‌های طولی از طریق دسته‌بندی جریان به رژیم‌های ساده‌تر، استخراج نمودارهای تجربی حاکم در هر حالت را ممکن می‌سازند.

(1961) Csanady اولین کسی بود که مقیاس‌های طولی را برای جت شناور معرفی کرد. او مقیاس طولی پلوم به جریان متقاطع<sup>۱</sup> را اولین بار پیشنهاد نمود که البته با مقیاس طولی پلوم به جریان متقاطع استفاده شده در این متن متفاوت است. مطالعه‌های Csandy توسط (1965) Briggs و (1966) Moore ادامه یافت. (1969) Hoult, Fay and Forney اولین

کسانی بودند که مقیاس طولی جت به جریان متقاطع<sup>۲</sup> را استفاده کردند و روابطی ساده برای ناحیه‌ای که مومنتم غالب است ارائه کردند. Chu and Goldberg (1974) سعی کردند که ناحیه مومنتم غالب را با شناوری غالب ربط دهند. مطالعه‌های Fay, Hoult و Forney توسط Hoult and Weil (1972) گسترش یافت. آن‌ها موفق شدند روابطی برای سه رژیم انحراف ضعیف جت<sup>۳</sup>، انحراف قوی جت<sup>۴</sup> و انحراف قوی پلوم<sup>۵</sup> به دست بیاورند. در ضمن آن‌ها معیارهایی برای انتقال بین رژیم‌های متفاوت ارائه کردند. Wright (1977) مدل مقیاس طولی Hoult and Weil را در طی یک مطالعه جامع بر جت شناور عمودی در حالت وجود جریان محیطی عمومیت بخشید. Wright از چهار مقیاس طولی استفاده کرد: مقیاس طولی تخلیه  $(L_Q)$ ، مقیاس طولی جت به پلوم  $(L_M)$ ، مقیاس طولی جت به جریان جانب  $(L_m)$  و مقیاس طولی به جریان جانبی  $(L_b)$  (۹و۸).

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

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

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

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

در این روابط  $Q=U_0.A$  دبی تخلیه،  $M_0=Q_0.U_0$  شار مومنتم و  $B_0=g'.Q_0$  شار شناوری جریان خروجی و  $u_a$  سرعت محیطی است (A سطح مقطع کانال،  $U_0$  سرعت خروجی و  $g'$  شتاب اصلاح شده ثقل می‌باشد

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

مقیاس طولی تخلیه  $(L_Q)$  نشان‌دهنده اهمیت نسبی شار حجمی به شار مومنتم جریان خروجی است. این پارامتر مشخص‌کننده ناحیه‌ای از جریان است که هندسه کانال مشخصه جریان در آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مقیاس طولی جت به پلوم  $(L_M)$  نیز که بیان‌گر اهمیت نسبی مومنتم خروجی به شار شناوری فاضلاب است، بیان‌گر محدوده غالب بودن هر یک از شارهای فوق در مسیر جریان است. مقیاس طولی جت به سرعت جانبی  $(L_m)$  نیز که نشان‌دهنده اهمیت نسبی شار مومنتم خروجی به سرعت جانبی محیط است. مقیاس طولی پلوم به سرعت جانبی  $(L_b)$  بطور مشابه بیان‌گر اهمیت نسبی شار شناوری اولیه به سرعت جانبی محیط بوده و نشان‌دهنده طولی از مسیر است که جریان شناور در جهتی خلاف جریان محیطی در محیط گسترش می‌یابد.

- 2- Jet to Cross flow
- 3- Weakly deflected jet
- 4- Strongly deflected jet
- 5- Strongly deflected plume

- 1- Plume to cross flow

Chu and Jirka (1986) سه نوع الگوی جریان جت آزاد<sup>۴</sup>، جت چسبیده به کرانه<sup>۵</sup> و پلوم نفوذ یافته<sup>۶</sup> که در مطالعه‌های آزمایشگاهی و میدانی مختلف گزارش شده است را در تخلیه سطحی فاضلاب شناور در نظر گرفته‌اند. این سه الگو در زیر شرح داده شده است:

جت آزاد: این جت به تدریج توسط جریان محیطی خم می‌شود ولی به خط ساحلی برخورد نمی‌کند. در تخلیه چگال به علت سنگین‌تر بودن فاضلاب تخلیه شده، انحراف جت به سمت اعماق بیشتر نیز اتفاق می‌افتد.

جت چسبیده به کرانه: انحراف قوی و پیوستگی به ساحل پایین‌دست از مشخصه‌های بارز تخلیه در رودخانه‌ها و جریان‌های محیطی تند است. هم جریان محیطی بالا و هم عمق کم این نوع جریان را ارتقا می‌دهند. وجود بازچرخش جریان مشخصه بارز این رژیم است. انحراف جت سبب ایجاد ناحیه محصور می‌شود که به آن ناحیه باد پناه<sup>۷</sup> جت می‌گویند، چرخش جریان و پیوستگی به خط ساحلی در این ناحیه اتفاق می‌افتد. این پدیده به دو علت می‌تواند اتفاق بیفتد. اول یک جریان جانبی قوی می‌تواند جت را منحرف کند تا جایی که به ساحل پیوندد. دوم، تخلیه می‌تواند کل عمق محیط را به طور موثری مسدود کند و باعث کشیده شدن جریان به سمت ساحل می‌شود. لازم به ذکر است در این رژیم هم انحراف جت به اعماق را در حالت تخلیه چگال خواهیم داشت.

پلوم نفوذ یافته به سمت بالا: پخشیدگی گرانشی قوی‌ای در همه جهات از جمله بالادست نشان می‌دهد. از آنجا که مدل کرمیکس برای فاضلاب چگال، پلوم را در نظر نگرفته ما نیز این الگو را در نظر نگرفته ایم.

برای تفکیک این سه الگو از یکدیگر در تخلیه شناور Chu and Jirka (1986) نمودار بی بعدی را پیشنهاد می‌کنند (شکل ۱) که محورهای عمودی و افقی آن دربرگیرنده مجموع شرایط تخلیه و محیط است. در این نمودار محور افقی معکوس عدد فرود چشمه است که در آن عدد فرود برابر است با:

$$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{g a_0^{0.5}}} = \frac{L_Q}{L_M} \quad (7)$$

عدد یک روی این محور رژیم جت شناور را از رژیم پلوم خالص جدا می‌کند.

محور عمودی با پارامتر  $\frac{u_a}{U_0} * \frac{L_M}{H}^{3/2}$  مشخص شده است. این ضرب

می‌توان به عنوان ترکیبی از مکانیسم انحراف جت (نسبت سرعت جریان

مقاطع محیطی به سرعت تخلیه جت)  $\frac{L_Q}{L_M}$  و مکانیسم بلوکه

شدن به علت پارامتر کم عمقی<sup>۸</sup>  $\frac{L_M}{H}$  (نسبتی از اندازه عمق ماکزیمم جت<sup>۹</sup>

از زمان انتشار مقاله Wright، محققان برای تعمیم روابط آن برای حالت‌های دیگر جت تلاش کردند. یکی از این مطالعه‌ها توسط Buhler and Hauenstein (1979) صورت گرفت که مطالعه Wright را به حالت تخلیه افقی به محیط متحرک تعمیم داده است. مطالعه‌های بیش‌تر توسط Knudson (1988) صورت گرفت که مطالعه Wright را به تخلیه افقی به محیط ساکن، محیط با جریان هم جهت با تخلیه<sup>۱</sup>، محیط با جریان در خلاف جهت تخلیه<sup>۲</sup>، محیط با جریان متقاطع<sup>۳</sup> تعمیم داده است (۸). تلاش‌ها برای گسترش مقیاس طولی به جت شناور سطحی هم صورت گرفت. اولین استفاده از مدل مقیاس طولی برای جت شناور سطحی توسط Jirka et al. (1981) پیشنهاد شد. وی معیارهای مشابهی با حالت مستغرق برای تفکیک رژیم‌های جریان به انحراف قوی و انحراف ضعیف پیدا نمود. مطالعه‌های مشابهی هم توسط Abdelwahed and Chu (1981) صورت گرفت. Chu and Jirka (1986) همچنین از مقیاس‌های طولی برای تعیین الگوی جریان تخلیه شده بهره بردند. مقیاس‌های طولی در ادامه برای توصیف پلوم با نفوذ به بالادست و جت چسبیده به کناره به ترتیب توسط Jones et al. (1985) و Chu and Abdelwahed (1990) مورد استفاده قرار گرفت (۸).

به سبب تاثیر نیروهای متعدد بر جریان خروجی از تخلیه‌کننده‌های سطحی، الگوی عمومی رفتار جت در این حالت ترکیبی بسیار پیچیده از پارامترهای تاثیرگذار خواهد بود. این پارامترها عبارتند از مشخصه‌های تخلیه کننده شامل عمق (h<sub>0</sub>) و عرض کانال (b<sub>0</sub>)، مشخصه‌های جریان اعم از شار حجمی (Q<sub>0</sub>)، شار مومنتم (M<sub>0</sub>)، شار شناوری جریان خروجی (B<sub>0</sub>) و مشخصه‌های محیطی شامل سرعت‌های جانبی (u<sub>a</sub>) و عمق آب در پیکره آبی پذیرنده (H).

Chu and Jirka (1986) با انجام مطالعه جامع در ارتباط با تخلیه سطحی فاضلاب‌هایی با شناوری مثبت، مشخصه‌های جریان در این حالت را به صورت زیر تابعی از متغیرهای محیطی و مشخصه‌های جریان و تخلیه کننده عنوان نموده‌اند.

$$\theta = F(Q_0, M_0, B_0, H, h_0, b_0) \quad (5)$$

ایشان با استفاده از پارامترهای توسعه داده شده از تحلیل‌های ابعادی و براساس روش مقیاس طولی، رابطه بالا را به شکل زیر نوشته‌اند:

$$\Theta = f\left(\frac{L_Q}{L_M}, \frac{L_Q}{L_m}, \frac{L_M}{H}, \frac{L_Q}{H}, \frac{L_m}{H}, \frac{L_b}{H}, \frac{h_0}{b_0}, \theta_0\right) \quad (6)$$

در رابطه فوق  $\Theta$  یک پارامتر بی بعد از مشخصه‌های جریان، L<sub>m</sub>، L<sub>M</sub>، L<sub>Q</sub> و L<sub>b</sub> مقیاس‌های طولی،  $\theta_0$  زاویه تخلیه، H عمق محیط h<sub>0</sub> عمق آب در کانال، b<sub>0</sub> عرض کانال و h<sub>0</sub>/b<sub>0</sub> نسبت شکل در کانال تخلیه است.

4- Free Jet

5- Shore Attached Jet

6- Upstream Intruding Plume

7- Lee Side Of Jet

8- Shallowness Parameter

۹- Jirka et al. (1981) نشان داد که ماکزیمم عمق یک جت در تخلیه شناور سطحی با LM متناسب است.

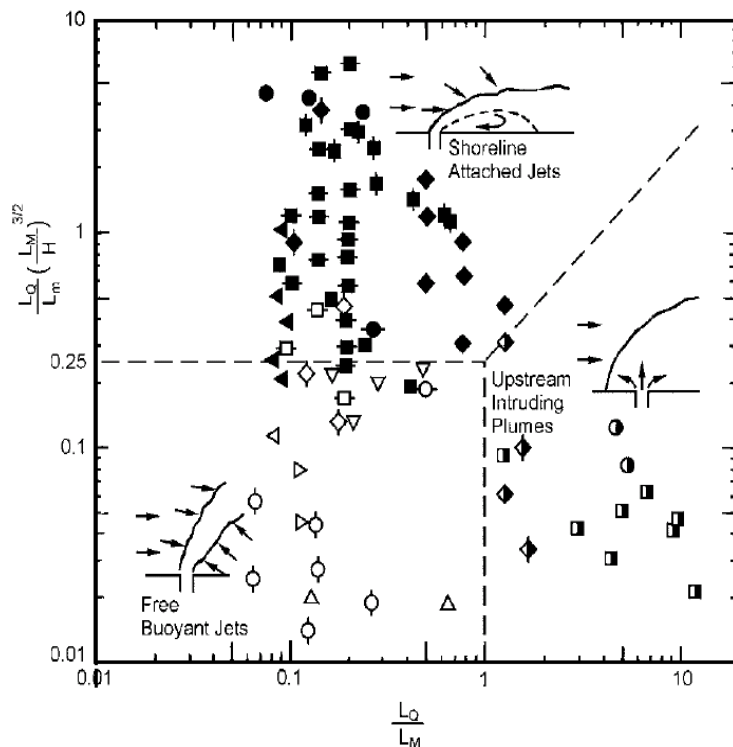
1- Coflow

2- Counterflow

3- Crossflow

می‌رود با بالا رفتن عدد روی محور قائم، جریان تخلیه شده به الگوی جت چسبیده به کرانه تمایل پیدا کند (۴).

به عمق کل محیط آبی) دانست. همانطور که انتظار می‌رود ترکیب جریان جانبی بالا و مقدار زیاد برای پارامتر کم عمقی (نسبت بالاتر میزان عمق جت به عمق کل)، شرایط جت چسبیده به کرانه را ایجاد می‌نماید. بنابراین انتظار



شکل ۱- نمودار طبقه‌بندی جریان در تخلیه سطحی فاضلابهای سبک در پیکره‌های آبی همراه با جریان‌های جانبی (۱)

Figure 1- The diagram of flow classification for surface buoyancy discharge into flowing ambient water

آنچه که در CORMIX1 و CORMIX3 استفاده شده، می‌باشد البته همراه با یک سری اصلاح‌ها. به طور کلی رفتار پلوم در D-CORMIX از طریق خاصیت "آینه تصاویر" کرمیکس ۱ و ۳ تحلیل می‌شود یعنی سطح آب آینه‌وار با کف محیط آبی جایگزین می‌شود و بالعکس. اما برای حالت تخلیه سطحی همان کلاس‌های جت آزاد و جت چسبیده به کرانه از کرمیکس ۳ بدون "آینه سازی" حالت مزبور بکار می‌روند (۱۰). Doneker and Jirka (2001) نیز در مطالعه خود با اشاره به توانایی‌های مدل تجمیعی CORMIX در پیش‌بینی مشخصه‌های جریان، بر ضعف ساختاری این مدل جهت شبیه‌سازی جریان‌های سنگین خروجی از تخلیه‌کننده‌های سطحی تاکید نموده‌اند (۱۱). Doneker et al. (2004) نیز با بیان عدم دسترسی با مطالعه‌های آزمایشگاهی و میدانی کافی جهت دسته‌بندی و شبیه‌سازی رژیم‌های حاکم در تخلیه سطحی جریان‌های چگال، پیش‌بینی حالت مختلف تخلیه در این حالت را با تقریب فراوان عنوان نموده است (۱۲).

در این تحقیق به دنبال آن هستیم که تا با اجرای مدل کرمیکس برای حالت‌های مختلف تخلیه سطحی فاضلاب‌های سنگین و عینا شبیه‌سازی این حالت‌ها توسط فلوم آزمایشگاهی، نتایج مدل کرمیکس را با مشاهده‌های آزمایشگاهی مقایسه کرده، تقریب‌ها و عدم دقت‌های موجود را شناسایی شده

مجموع مطالعه‌های انجام شده در ارتباط با رفتار جت‌های شناور خروجی از تخلیه‌کننده‌های سطحی جهت دسته‌بندی جریان در توسعه مدل CORMIX3 مورد استفاده قرار گرفته است (۸). مدل CORMIX3 مشارکت سازمان حفاظت از محیط زیست امریکا (USEPA)، دفتر عمران ایالات متحده (U.S. BUREAU OF RECLAMATION)، دانشگاه کرنل (Cornell)، دانشگاه ارگان (Oregon)، دانشگاه کارلسروهه (Carlsruhe)، دانشگاه پرتلند (Portland) و موسسه MixZon در سال ۱۹۸۵ ارایه شده و طی سال‌های گذشته تکمیل، تصحیح و تدقیق گردیده است. این مدل دارای چهار هسته می‌باشد: CORMIX1، CORMIX2، CORMIX3 و D-CORMIX که به ترتیب قادر به شبیه‌سازی وضعیت جت خروجی در تخلیه‌کننده‌های تک مجرای، چند مجرای، تخلیه‌کننده‌های سطحی و تخلیه فاضلاب‌های چگال می‌باشد. مدل D-CORMIX ابتدا در سال ۹۵ با نام CD-CORMIX و در قالب یک نسخه تحت DOS ارایه شده و در سال ۱۹۹۷ در نسخه‌ای تحت ویندوز و به همراه سایر بخش‌های CORMIX تجمیع یافته و منتشر گردید. ساختارهای تخلیه متعددی در D-CORMIX در نظر گرفته شده است، شامل مستغرق، سطحی و تخلیه در بالای سطح. مدول‌هایی که در D-CORMIX استفاده می‌شوند شبیه

جریان استفاده می‌گردد. داده‌های استخراج شده از مشاهده‌های آزمایشگاهی به تفکیک رژیم‌های مشاهده‌ای در نمودار دسته‌بندی جریان ترسیم شده است. به منظور تفکیک رژیم‌های مشاهده‌ای از یکدیگر در این تحقیق از نتایج تجزیه و تحلیل فیلم‌های برداشت شده از فرایند تخلیه و مقایسه آن با الگوهای تصویری و تحلیلی ارایه شده برای هر رژیم استفاده شده است.

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  $0.998 \frac{gr}{cm^3}$  تا ارتفاع مشخص پر شده است (شکل ۲). تخلیه‌کننده سطحی مورد مطالعه در این تحقیق یک کانال مستطیلی به عرض ۸/۶ 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. سیستم مکانیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان محیطی در این مدل متشکل از صفحه‌ای متحرک به ابعاد  $0.18 \times 1.18$  متر است که توسط یک موتور الکتریکی، گیربکس و کابل متصل به آن در روی یک سیستم ریلی بطور یکنواخت به حرکت در می‌آید. کنترل سرعت حرکت صفحه از طریق کنترل دور موتور الکتریکی و به وسیله یک سیستم الکترونیکی مجهز به اینورتر انجام می‌گیرد. به این ترتیب کانال مستطیلی مورد استفاده به اتصال به این صفحه متحرک قابلیت حرکت در امتداد طولی فلوم با سرعت‌های مختلف را خواهد یافت.

و الگوی مناسب جهت دسته‌بندی جریان‌ها را ارایه نماییم. علت انتخاب کانال مستطیلی توانایی محدود مدل کرمیکس در شبیه‌سازی تنها این حالت است و کانال دایره‌ای را در حالت مستغرق و زمانی که بیش از نصف قطر مستغرق نشده باشد در نظر می‌گیرد.

### روش بررسی

در این تحقیق به منظور برآورده سازی اهداف مشروح انجام مجموعه‌ای از مشاهده‌های آزمایشگاهی با استفاده از یک فلوم آزمایشگاهی، پیش‌بینی شده است. مشخصه‌های فنی و تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه در ادامه تشریح گردیده است. در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی جریان‌های محیطی، از روش مورد استفاده در مطالعه‌های (Roberts et al. (1989), Tian et al. (2004), Daviero and Roberts (2006) و Jirka (2007) استفاده شده است. در این روش طبق قانون سرعت‌های نسبی، برای شبیه‌سازی سرعت‌های محیطی در محیط‌های ساکن، منبع تخلیه از طریق اتصال به یک سیستم مکانیکی بطور یکنواخت در امتداد طولی فلوم به حرکت در می‌آید. در این آزمایش‌ها همچنین به منظور ایجاد سرعت‌های مختلف در دهانه خروجی کانال تخلیه از یک پمپ چرخشی استفاده شده است. به این ترتیب مدل فوق قادر به شبیه‌سازی حالت‌های مختلف تخلیه در محدوده وسیعی از سرعت‌های محیطی ( $8.0 - 8.18 \frac{cm}{s}$ ) و سرعت‌های تخلیه ( $3 - 140 \frac{cm}{s}$ ) می‌باشد. در این مطالعه همان‌طور که بیان شد از تحلیل‌های ابعادی مبتنی بر روش مقیاس طولی جهت تفسیر رفتار جریان استفاده شده است. در این زمینه با توجه سابقه مطالعه‌های مشروح (۱۰۴) از پارامترهای بی‌بعد  $(LQ/Lm).(LM/H)^{3/2}$  و  $(LQ/LM)$  جهت ترسیم نمودار طبقه‌بندی



شکل ۲- نمایشی از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

Figure 2- The view of utilized experimental model

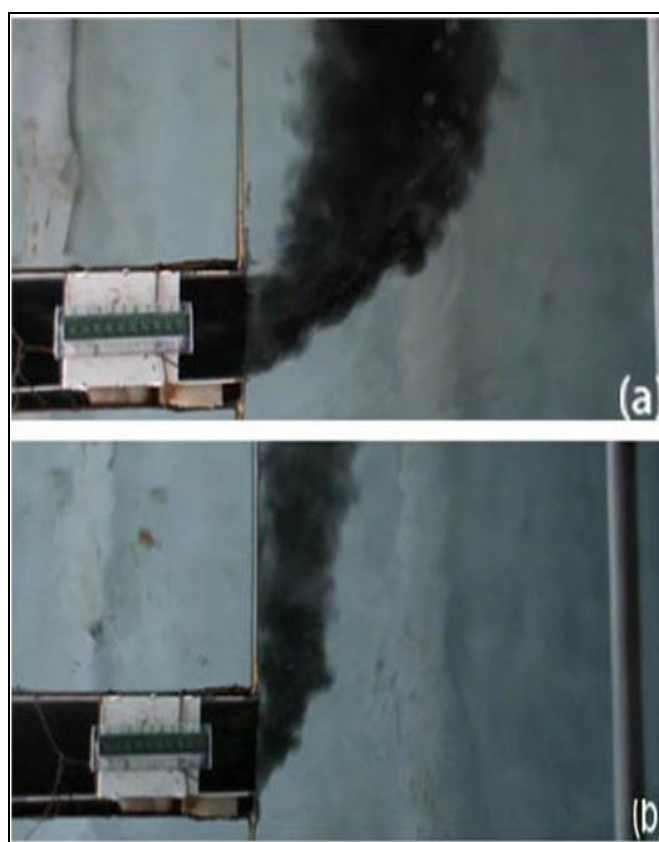
منظور تعیین الگوی حرکت جریان فاضلاب در محیط و رژیم حاکم با انتقال به رایانه مورد پردازش قرار می‌گیرند.

#### یافته ها

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد مدل D-CORMIX برای شرایط مختلف تخلیه و محیطی اجرا شد و نتایج الگوهای پیش‌بینی شده توسط این مدل در فرم نمودار بی‌بعدی با پارامتر  $(L_M/H)^{3/2}$  را در محور قائم و پارامتر  $L_Q/L_M$  را در محور افقی توسعه داده شد (شکل ۴). نمونه‌ای از هر یک از رژیم‌های مشاهده شده در آزمایش‌ها شامل جت آزاد و جت چسبیده به کرانه در شکل ۳ آمده است.

فاضلاب سنگین مورد استفاده در آزمایش نیز آب شور ناشی از انحلال کلرید سدیم (NaCl) در آب شیرین است که در غلظت‌های مختلف (۷ تا ۶۲ ppt)، جریانی از پساب با جرم‌های حجمی متفاوت (از ۱۰۰۷ تا ۱۰۶۲

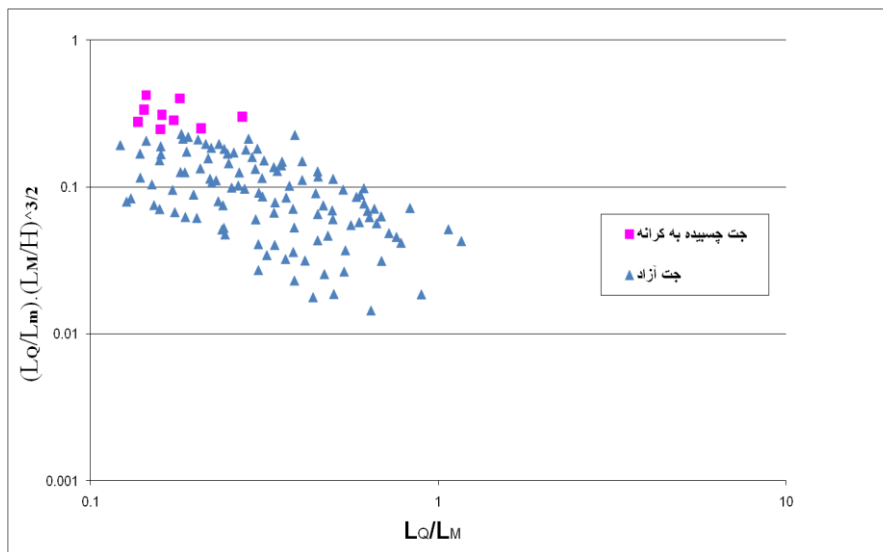
$\frac{kg}{m^3}$ ) را ایجاد می‌نماید. جهت ثبت مسیر حرکت جت پس از خروج از کانال و نیز تعیین مشخصه‌های ظاهری پلوم در پیکره آبی، از رنگ و دوربین دیجیتال نوع SONY DCR-SR47 استفاده شده است. دوربین فوق با اتصال به سیستم متحرک مورد اشاره، قابلیت ثبت جریان تخلیه از بالا و حرکت توأمان به کانال را دارا می‌باشد. تصاویر دیجیتال برداشت شده به



شکل ۳- نمونه‌ای از فریم‌های مجزا از حالت‌های جریان در تخلیه سطحی فاضلاب‌های سنگین (دید از بالا) (a) رژیم جت آزاد ،

(b) رژیم جت چسبیده به دیواره

Figure 3- The view of individual frames of flow behavior in surface discharge of dense flow (Top view) a) Free Jet regime, b) Shoreline Attached Jet regime

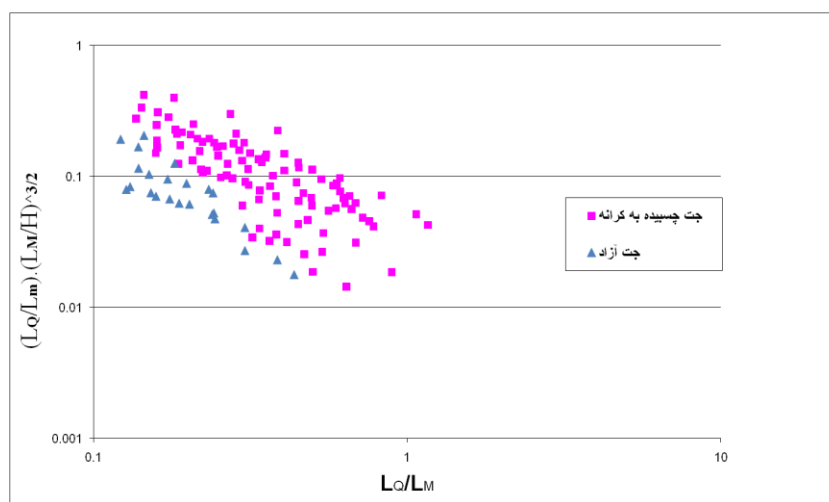


شکل ۴- نمودار توسعه داده شده جهت طبقه بندی جریان، حاصل از اجرای مدل D-CORMIX

Figure 4- Developed diagram for the flow classification resulted from D-CORMIX model run

هر آزمایش مورد تجزیه و تحلیل واقع شد و نتایج تحلیل در فرم نمودار بی‌بعدی مشابه نمودار قبلی ارائه گردید (شکل ۵).

سپس شرایط تخلیه و محیطی اجرا شده توسط مدل D-CORMIX در هر مورد، عینا توسط فلوم آزمایشگاهی شبیه‌سازی و رژیم‌های مشاهده شده در



شکل ۵- نمودار توسعه داده شده جهت طبقه بندی جریان در تخلیه سطحی چگال

Figure 5- The developed diagram for the classification of flow in dense surface discharges

#### بحث و نتیجه گیری

از مقایسه دو نمودار ارائه شده چند ناحیه مجزا در شکل ۶ قابل تشخیص است:

۱. نقاطی که کرمیکس برای آن شرایط مفروض، جت آزاد پیش‌بینی می‌کند و نتایج آزمایشگاهی هم آن را تایید می‌کند.
۲. نقاطی که کرمیکس برای آن شرایط مفروض، جت چسبیده به کرانه پیش‌بینی می‌کند و نتایج آزمایشگاهی هم آن را تایید می‌کند. نمونه‌ای از این نقاط در شکل (۷) آورده شده است. این نقاط دارای مشخصات  $0.22 < L_M / H < 0.509$  با میانگین

۰.۳۹ و  $0.92 < u_a / U_0 < 2.83$  با میانگین ۱/۴۷ می‌-

$$\text{باشد } \left( \frac{u_a}{U_0} = \frac{L_0}{L_m} \right).$$

۳. نقاطی که کرمیکس آن‌ها را جت آزاد پیش‌بینی می‌کند ولی مشاهده‌های آزمایشگاهی رژیم جت چسبیده به کرانه را تایید می‌کند.
۴. این نقاط که زیر مجموعه دسته قبلی هستند نقاطی هستند که مشاهده‌های آزمایشگاهی آن‌ها را به شدت چسبیده به کرانه نشان می‌دهد ولی کرمیکس این نقاط را جت آزاد پیش‌بینی می‌کند، در



واقع نقاطی هستند که کرمیکس به شدت اشتباه دارد. نمونه‌ای از این نقاط در شکل (۸) آمده است. این نقاط با مشخصات

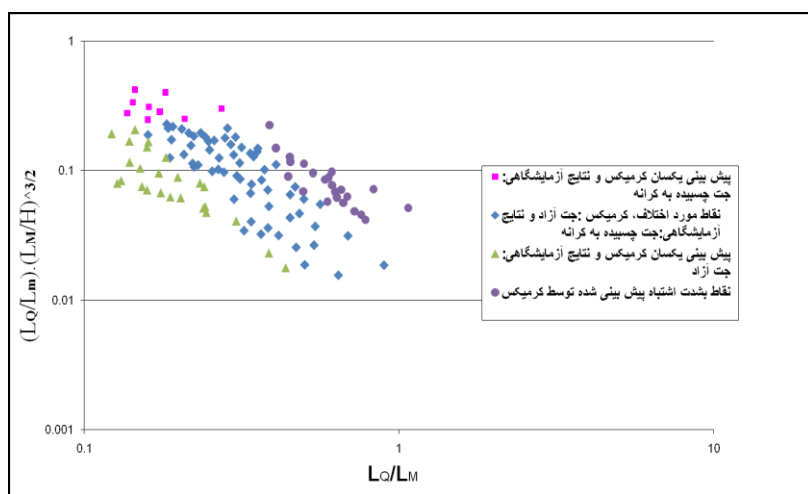
$0.041 < L_M/H < 0.15$  با میانگین  $0.85$  و  $2 < u_a/U_0 < 5.5$  با میانگین  $3/41$  می‌باشد.

پیش بینی یکسان کرمیکس و نتایج آزمایشگاهی: جت چسبیده به کرانه

نقاط مورد اختلاف: کرمیکس: جت آزاد و نتایج آزمایشگاهی: جت چسبیده به کرانه

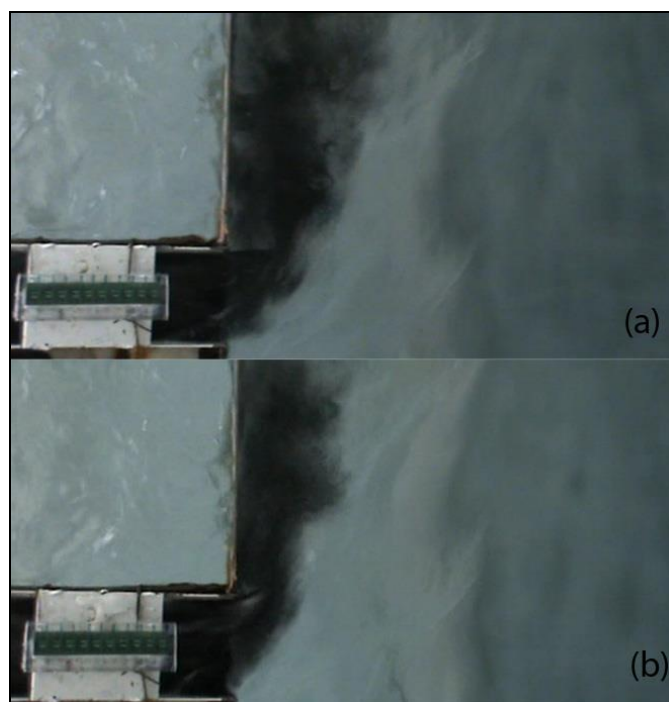
پیش بینی یکسان کرمیکس و نتایج آزمایشگاهی: جت آزاد

نقاط اشتباه پیش بینی شده توسط کرمیکس



شکل ۶- نواحی مجزایی که از مقایسه دو نمودار تفکیک الگوهای جریان در مشاهده‌های آزمایشگاهی (شکل ۵) و اجرای مدل D-CORMIX (شکل ۴) حاصل می‌شود

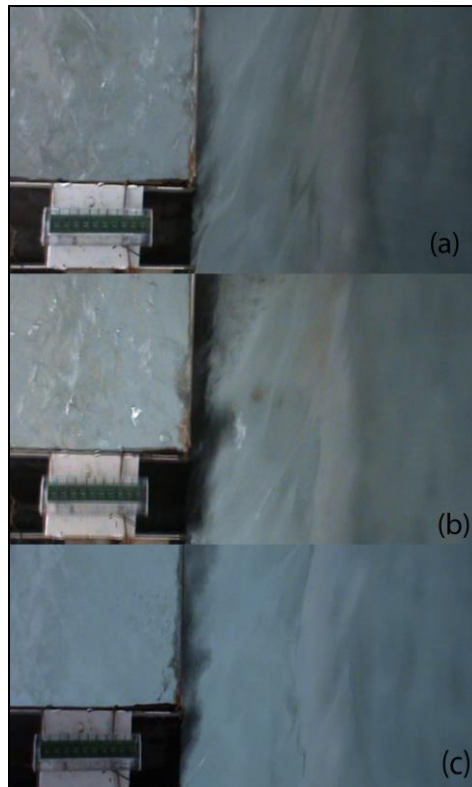
Figure 6- Separated areas observed comparing flow diagrams developed from experimental observations (Fig5) and D-CORMIX model runs (Fig4)



شکل ۷- دو نمونه از نقاطی که توسط کرمیکس جت چسبیده به کرانه پیش‌بینی شدند و مشاهده‌های آزمایشگاهی آنرا تأیید می‌کند. (دید از بالا)

Figure 7- Sample of two Exps that predicted shoreline attached jet by the CORMIX and the experimental observation confirms (Topview)

$$\frac{L_M}{H} = 0.39, \frac{u_a}{u_0} = 1.16, u_a = 63.3 \frac{cm}{s}, u_0 = 54.4 \frac{cm}{s} \quad (b) \quad \frac{L_M}{H} = 0.509, \frac{u_a}{u_0} = 0.92, u_a = 63.3 \frac{cm}{s}, u_0 = 68.59 \frac{cm}{s} \quad (a)$$



شکل ۸- نمونه ای از نقاط که توسط کرمیکس جت آزاد پیش‌بینی شدند در حالیکه آزمایش‌ها نشان می‌دهد به شدت چسبیده به کرانه هستند  
 Figure 7- Sample of the Expts that predicted Free Jet by the CORMIX model while experimental observations show are strongly

$$\text{shoreline attached (Topview)} \quad u_0 = 18.5 \frac{cm}{s}, u_a = 78.9 \frac{cm}{s}, \frac{L_M}{H} = .14, \frac{u_a}{u_0} = 4.25(a)$$

$$u_0 = 17.7 \frac{cm}{s}, u_a = 58.5 \frac{cm}{s}, \frac{L_M}{H} = .087, \frac{u_a}{u_0} = 3.3(c) \quad u_0 = 33.3 \frac{cm}{s}, u_a = 78.9 \frac{cm}{s}, \frac{L_M}{H} = .13, \frac{u_a}{u_0} = 2.37(b)$$

می‌رود. آنچه بیان شد در ارتباط با نقش پارامتر  $\frac{L_M}{H}$  در تخلیه سطحی

شناور بود؛ اکنون مشاهده‌های بالا را در ارتباط با تاثیر پارامتر  $\frac{L_M}{H}$  در تخلیه

چگال مرور می‌کنیم: در موارد متعددی مشاهده شد که آزمایش‌هایی با

داشتن نقش مقادیر تقریباً مساوی  $\frac{u_a}{U_0}$ ، کاهش  $\frac{L_M}{H}$  نه تنها افزایش

احتمال جت آزاد را به همراه نداشت بلکه مورد مشاهده شده تمایل بیشتری

به کرانه (خط ساحلی) پیدا کرد (موارد a و c شکل ۹). البته در مواردی هم

تفاوت‌های آشکاری با تغییر  $\frac{L_M}{H}$  مشاهده نشد (شکل ۹ موارد e و f). ولی

در هر صورت آنچه در این تحقیق در تخلیه فاضلاب چگال در مورد تاثیر

دید شده مشابه تاثیر این پارامتر در تخلیه شناور نبوده است.

علاوه بر نواحی که در مورد آن‌ها صحبت شد نکته دیگری که از مقایسه دو نمودار بدست می‌آید این است که مرز تفکیک رژیم جت آزاد و جت چسبیده به کرانه در D-CORMIX افقی است (شکل ۴) و این در حالیست که مرز تفکیک در نمودار حاصل از مشاهده‌های آزمایشگاهی شیب منفی دارد (شکل ۵).

همان‌طور که پیش‌تر در مقدمه بیان شد در تخلیه شناور، کم عمقی و جریان جانبی شدید چسبیدگی به کرانه را ارتقا می‌دهند (۴). در عبارت  $(L_Q/L_m).(L_M/H)^{3/2}$  که مبنای تفکیک جت آزاد و چسبیده به کرانه است پارامتر  $\frac{L_M}{H}$  بعنوان فاکتور کم عمقی برای سنجش کم عمقی و پارامتر

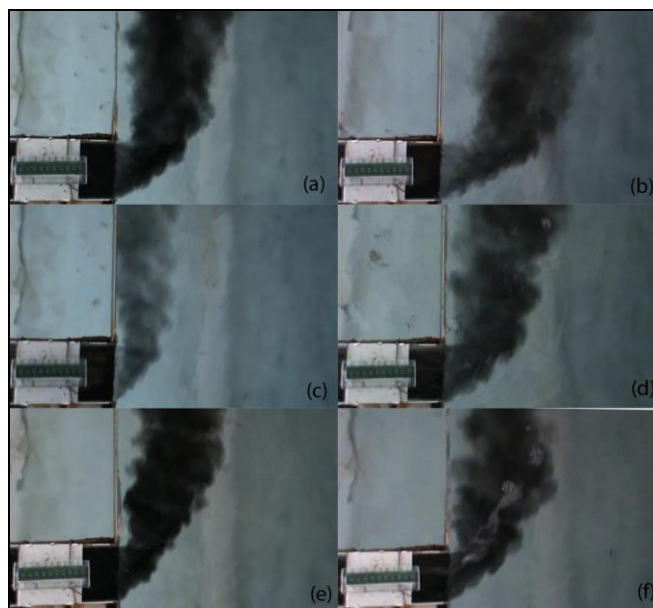
$\frac{L_Q}{L_m} (= \frac{u_a}{U_0})$  معیاری از اندازه سرعت محیطی قرار گرفته است. چنان‌که در

شکل ۱ هم معلوم است با ثابت بودن  $\frac{L_Q}{L_m} (= \frac{u_a}{U_0})$  و افزایش  $\frac{L_M}{H}$  (افزایش

عمق حداکثر جت به عمق محیطی) مقدار  $(L_Q/L_m).(L_M/H)^{3/2}$  افزایش

می‌یابد و جریان از جت آزاد به سمت جت چسبیده به کرانه پیش می‌رود و با

کاهش این پارامتر جریان از جت چسبیده به کرانه به سمت جت آزاد پیش



شکل ۹- تصاویر گرفته شده از آزمایشها با  $\frac{u_a}{U_0}$  تقریباً مساوی و  $\frac{L_M}{H}$  متفاوت

Figure 9- Photos of the experiments with equal  $\frac{u_a}{U_0}$  and different  $\frac{L_M}{H}$

$$\frac{L_M}{H} = 0.172, \frac{u_a}{U_0} = 0.323, \rho = 1062 \text{ (a)} \quad \frac{L_M}{H} = 0.323, \frac{u_a}{U_0} = 0.335, \rho = 1015 \text{ (b)}$$

$$\frac{L_M}{H} = 0.089, \frac{u_a}{U_0} = 0.53, \rho = 1062 \text{ (c)} \quad \frac{L_M}{H} = 0.38, \frac{u_a}{U_0} = 0.52, \rho = 1025 \text{ (d)}$$

$$\frac{L_M}{H} = 0.27, \frac{u_a}{U_0} = 0.54, \rho = 1012 \text{ (e)} \quad \frac{L_M}{H} = 0.45, \frac{u_a}{U_0} = 0.54, \rho = 1007 \text{ (f)}$$

چسبیده به کرانه و جت آزاد بازگردد را فراهم سازد. پس افقی بودن مرز تفکیک در تخلیه شناور امری توجیه‌پذیر است.

با توجه به آنچه در ارتباط با این مشاهده‌ها در مورد  $\frac{L_M}{H}$  برای تخلیه چگال بیان شد، به وضعیت شیب مرز تفکیک در تخلیه چگال (نمودار ۵) می‌پردازیم: فرض می‌شود مانند فاضلاب شناور مرز تفکیک افقی است. افقی بودن این مرز مستلزم این است که:

$$\frac{u_a}{U_0} * \left(\frac{L_M}{H}\right)^{\frac{3}{2}} = \text{cons} \tan t$$

لذا اگر یک نقطه مرزی بین جت آزاد و جت چسبیده به کرانه (منظور از نقطه مرزی موقعیتی است که نه جت آزاد باشد نه جت چسبیده به کرانه بلکه

روی مرز تفکیک باشد) در نظر بگیریم کاهش  $\frac{L_M}{H}$  افزایش  $\frac{u_a}{U_0}$  را

به دنبال خواهد داشت. با توجه به مشاهده‌های ما در ارتباط با تاثیر پارامتر  $\frac{L_M}{H}$ ، کاهش این پارامتر باعث افزایش احتمال جت آزاد شدن نمی‌شود و

افزایش  $\frac{u_a}{U_0}$ ، افزایش احتمال چسبیدگی به کرانه را به دنبال خواهد

همانطور که پیشتر گفته شد مبنای تئوریک دسته‌بندی الگوهای جریان مدل D-CORMIX در تخلیه سطحی از مباحث مربوط به تخلیه فاضلاب شناور گرفته شده است. پس در بررسی چرایی افقی بودن مرز تفکیک در D-CORMIX لازم است حالت تخلیه شناور را در نظر بگیریم. افقی بودن این مرز مستلزم این است که در مرز تفکیک:

$$\frac{u_a}{U_0} * \left(\frac{L_M}{H}\right)^{\frac{3}{2}} = \text{cons} \tan t$$

لذا اگر یک نقطه مرزی بین جت آزاد و جت چسبیده به کرانه (منظور از نقطه مرزی موقعیتی است که نه جت آزاد باشد نه جت چسبیده به کرانه بلکه

دقیقا روی مرز تفکیک باشد) در نظر بگیریم افزایش  $\frac{L_M}{H}$  (افزایش عمق

ماکزیمم جت به عمق محیط آبی) کاهش  $\frac{u_a}{U_0}$  را دنبال خواهد داشت.

افزایش  $\frac{L_M}{H}$  در تخلیه شناور افزایش احتمال چسبیدگی به کرانه و

کاهش  $\frac{u_a}{U_0}$ ، افزایش احتمال جت آزاد شدن را به همراه دارد. مجموع این

دو اثر می‌تواند این امکان را که جریان دوباره به یک نقطه مرزی بین جت

می‌کند. علت را می‌توان در مقدار بالاتر  $\frac{L_M}{H}$  (0.39, 0.509) در  $\frac{L_M}{H}$

شکل a,b-7 جستجو کرد که باعث می‌شود علی‌رغم  $\frac{u_a}{U_0}$  پایین‌تر

(0.92, 1.16)  $\frac{u_a}{U_0}$  نسبت به اشکال a,b,c-8

مقدار  $\frac{L_M}{H}^{3/2} * \frac{u_a}{U_0}$  افزایش یابد و در زمره جت چسبیده به کرانه قرار

گیرد. این امر در مورد نقاط دیگر ناحیه‌ای که توسط کرمیکس به درستی جت چسبیده به کرانه تشخیص داده شد نیز صادق می‌باشد یعنی در آنها نیز

مقادیر به نسبت بالاتر  $\frac{L_M}{H}$  (0.509 <  $\frac{L_M}{H}$  < 0.22) با متوسط

(0.39) باعث در زمره جت چسبیده به کرانه قرار گرفتن آنها شده در حالیکه نقاط چسبیده‌تر به کرانه از آنها هم موجود می‌باشد که کرمیکس آن‌ها را جت آزاد پیش‌بینی کرده است.

مدل D-CORMIX برای حالت‌های مختلفی از تخلیه سطحی فاضلاب‌های سنگین و به منظور پیش‌بینی الگوهای حاکم بر جریان اجرا شد. سپس شرایط تخلیه و محیطی اجرا شده توسط مدل کرمیکس عینا توسط فلوام آزمایشگاهی شبیه‌سازی گردید و با در نظرگیری دو الگوی جریان جت آزاد و جت چسبیده به کرانه نتایج آزمایش‌ها تحلیل شده و این الگوها شناسایی گردیدند. نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل D-CORMIX و نیز نتایج حاصل از تحلیل مشاهده‌های آزمایشگاهی هریک در دو نمودار جداگانه بی‌بعد که محورهای افقی و قائم آن دربرگیرنده مجموع شرایط آزمایش بودند توسعه داده شد و محدوده وقوع هر الگو در این نمودارها تعیین گردید. با مقایسه دو نمودار معلوم گردید که پیش‌بینی‌های مدل D-CORMIX در برخی قسمت‌ها با مشاهده‌های آزمایشگاهی هم‌خوانی داشت و در بسیاری از نقاط عدم هم‌خوانی به چشم می‌خورد و البته در بعضی نقاط که مشخصه‌های آنها معلوم گردید کرمیکس اشتباه‌های فاحشی داشت بدین معنا که نقاطی که بشدت چسبیده به کرانه بودند را جت آزاد پیش‌بینی می‌کرد. همچنین از مقایسه دو نمودار معلوم گردید که شیب مرز تفکیک در D-CORMIX (که از دسته‌بندی الگوها در تخلیه شناور بهره می‌گیرد) افقی است ولی در مشاهده‌های آزمایشگاهی ما این مرز تفکیک با شیب منفی تشخیص داده شد. با توجه به آنچه مشاهده‌های ما درباره تاثیر متفاوت پارامتر  $\frac{L_M}{H}$  در تخلیه چگال نسبت به تخلیه شناور نشان داد می‌توان علت شیب منفی مرز تفکیک، علت اشتباه‌های فاحش کرمیکس و نیز علت پیش‌بینی درست نقاطی که چسبیده به کرانه تشخیص داده شده‌اند را توجیه کرد.

#### منابع

- 1- Jones, G., Nash, D., Doneker, L., and Jirka, H., 2007. Buoyant Surface Discharge into Water Bodies. I: Flow Classification and Prediction

داشت. در مجموع پس از تاثیر این دو امکان بازگشت دوباره جریان به حالت مرزی منفی می‌باشد پس می‌توان نتیجه گرفت که در حالت تخلیه چگال شیب مرز تفکیک افقی نمی‌تواند افقی باشد.

اگر در نمودار ۵ یک نقطه مرزی بین جت چسبیده به کناره و جت آزاد را در نظر بگیریم (نقطه‌ای روی مرز تفکیک)، در ازای ثابت بودن سطح مقطع کانال (و نتیجتاً  $L_Q = A^{1/2}$ ) و عمق آب محیطی H، اگر در امتداد افقی به سمت راست حرکت کنیم پارامتر فرود کم می‌شود (محور افقی  $1/F_r$  است). با کاهش Fr پارامتر  $\frac{L_M}{H}$  نیز کم می‌شود. با توجه به آنچه درباره

مشاهده‌های ما در ارتباط با تاثیر  $\frac{L_M}{H}$  در تخلیه چگال گفته شد در ازای

ثابت بودن پارامتر  $\frac{u_a}{U_0}$ ، کاهش  $\frac{L_M}{H}$  جریان را چسبیده‌تر به کناره

کرد و یا تفاوت چندانی ایجاد نمود، با توجه به این امر برای حفظ شرایط

مرزی پارامتر  $\frac{u_a}{U_0}$  یا باید ثابت بماند یا باید کاهش یابد که در هر دو

صورت عبارت  $\frac{L_M}{H}^{3/2} * \frac{u_a}{U_0}$  کاهش می‌یابد بنابراین مرز تفکیک

نمودار شیب منفی پیدا می‌کند که با یافته‌های ما در نمودار ۵ سازگاری دارد.

با توجه به مشاهده‌ها راجع به تاثیر پارامتر  $\frac{L_M}{H}$  در الگوی جریان در تخلیه

چگال می‌توان علت اشتباه‌های فاحش کرمیکس در اطلاق عنوان جت آزاد به

نقاطی که به شدت چسبیده به کرانه هستند و نیز علت پیش‌بینی درست نقاطی که آنها را جت چسبیده به کرانه تعیین کرده توجیه نمود: نقاطی که

کرمیکس در آنها به شدت اشتباه دارد، نقاطی هستند که  $\frac{L_M}{H}$  آنها نسبت به

نقاط دیگر خیلی پایین می‌باشد ( $0.041 < \frac{L_M}{H} < 0.15$ ). کوچک

بودن این پارامتر باعث می‌شود که علی‌رغم بالا بودن پارامتر  $\frac{u_a}{U_0}$  (با

میانگین ۳/۴۲) عرض نقاط  $\frac{L_M}{H}^{3/2} * \frac{u_a}{U_0}$  کاهش یافته و زیر مقدار

۰/۲۵ (که در D-CORMIX مبنای تفکیک جت آزاد و جت چسبیده به کرانه است) قرار گیرد و در زمره جت آزاد قرار گیرد و این در حالی است

که تقلیل  $\frac{L_M}{H}$  بنابر آن چه در مشاهده‌ها گزارش شد تاثیری در افزایش

احتمال جت آزاد شدن در تخلیه چگال ندارد. تصاویر شکل ۸ هم گویای این مطلب هستند که این نقاط به شدت چسبیده به کرانه است.

اگر به اشکال a,b,c-8 توجه کنیم می‌بینیم که این اشکال خیلی چسبیده‌تر به کرانه از شکل a,b-7 هستند ولی D-CORMIX شکل a,b-7 را جت چسبیده به کرانه تشخیص داده ولی اشکال a,b,c-8 را جت آزاد پیش‌بینی

- 8- 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.
- 9- Wright, S.J., 1977. Mean behavior of buoyant jets in a crossflow. Journ. Hyd. Div., ASCE, Vol. 103, No. HY5, pp. 499-513.
- 10- Doneker L.R., Jirka G.H., 1997. D-CORMIX continuous discharge disposal mixing zone water quality model laboratory and field data validation study. U.S. environmental protection agency, Washington.
- 11- Doneker, R.L., Jirka G.H., 2001. CORMIX-GI Systems for Mixing Zone Analysis of Brine Wastewater Disposal , Desalination, Vol 139, pp. 263-274
- 12- Doneker, R.L., Nash, J.D., Jirka, G.H., 2004. Pollutant Transport and Mixing Zone Simulation of Sediment Density Currents. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 130, No. 4, pp. 349-359.
- Methodology. J. Hydr. Engrg, ASCE, 133(9), pp.1010-1020.
- 2- Jirka, G., Adams, E., and Stolzenbach, K., 1981. Properties of surface buoyant jets. J. of Hydraulics Div., ASCE, 106 (HY11).
- 3- Kim D.G, 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, pp.501-518.
- 4- Chu, V. H., and Jirka, G. H., 1986. Chapter 25: Surface Buoyant Jets, Encyclopedia of Fluid Mechanics, Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- 5- 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.
- 6- 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, 1997.
- 7- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, C. Y., Imberger, J. and Brooks, N. H., 1979. Mixing in Inland and Coastal waters. Academic Press, Inc., Orlando, Florida.