



برآورد ضریب انتشار شعاعی جریان جت سطحی همگرا و شیب‌دار روی بستر افقی محیط پذیرنده ساکن

طوبی حیدری^۱، نیما شهنی کرم‌زاده^{۲*} و جواد احدیان^۳

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی رودخانه، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر.

۲- نویسنده مسئول، استادیار گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر.

n.karamzadeh@kmsu.ac.ir

۳- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

پذیرش: ۱۳۹۶/۳/۱۷

بازنگری: ۱۳۹۶/۳/۱۱

دریافت: ۱۳۹۵/۹/۱۰

چکیده

در مطالعه حاضر، انتشار جریان جت سطحی همگرا و شیب‌دار روی بستر افقی محیط پذیرنده ساکن و عمیق به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. بدین منظور از فلوم $۳/۲ \times ۰/۹ \times ۰/۶$ متر استفاده گردید. تخلیه‌کننده‌های سطحی، کانال‌های مستطیلی با عرض کف $۰/۰۶$ متر بودند که در چهار زاویه همگرایی $۱۲/۵$ ، ۲۵ ، ۴۵ و ۹۰ درجه و سه شیب متفاوت صفر، چهار و هشت درصد، سیال جت را مماس بر سطح آب پذیرنده تخلیه نمودند. سیال جت به صورت محلول آب-نمک در سه دبی متفاوت به محیط پذیرنده‌ای با عمق ثابت $۰/۷$ متر تزریق گردید. پس از اجرای آزمایش‌ها، تحلیل داده‌ها با استفاده از رونمایی تصاویر انجام گردید. مطابق نتایج، رابطه فاصله شعاعی با زمان به صورت توانی است که توان‌های حاصل به طور متوسط از شیب صفر به هشت درصد افزایش ۲۷ درصدی و از شیب صفر به ۴ درصد کاهش هفت درصدی را نشان دادند. ضرایب انتشار نیز برای فواصل شعاعی متوسط، بزرگ و کوچک به ترتیب ۲ ، $۴/۵$ و ۴ ارزیابی گردید.

کلید واژه‌ها: ضریب انتشار شعاعی، جت سطحی، همگرایی، محیط پذیرنده ساکن، محیط پذیرنده عمیق.

مقدمه

در چند دهه اخیر با توجه به رشد قابل ملاحظه جمعیت انسانی و ناکافی بودن منابع آبی، عملکرد کارخانه‌های نمک‌زدایی به عنوان نیازی فوری برای تولید آب شیرین ضرورت یافته است (Sanchez, 2009). این کارخانه‌ها آثار منفی بسیاری بر نواحی اطراف خود دارند. به عنوان نمونه مواد زائد مایعی که به صورت آب شور حاصل از فرآیند شیرین‌سازی در این کارخانه‌ها به دست می‌آیند از طریق کانال و یا خط لوله به دریا بازگردانده می‌شوند (Danoun, 2007; Jenkins et al. 2012). اهمیت رفتار جریان‌های تخلیه‌شونده در محیط پذیرنده آن‌ها، موجب گردیده که طی سال‌های اخیر مطالعه‌های وسیعی در ارتباط با تخلیه‌کننده‌های سطحی و مستغرق انجام گردد.

تخلیه‌کننده‌های مستغرق معمولاً پساب‌ها را از طریق خطوط لوله در محیط پذیرنده تخلیه می‌کنند که در این زمینه Zeitoun et al. (1972)، Pincine and List (1973)، Cipollina et al. (2005) و Bleninger and Jirka (2008) جت‌های شناور منفی مستغرق را در حالات مختلف تخلیه افقی، قائم و مایل مطالعه نمودند و به نتایجی پیرامون تراژکتوری و میزان رقیق‌شدگی جریان دست یافتند. Abessi و Roberts (2015b) در یک مطالعه آزمایشگاهی، پروفیل‌های غلظت جت‌های چگال زاویه‌دار در زوایای ۳۰ ، ۴۵ و ۹۰ درجه را بررسی نمودند. آن‌ها سه رژیم الف) جریان آب عمیق، ب) تماس سطحی و ج) آب کم‌عمق را شناسایی نمودند.

مطابق نتایج حاصل، مشاهده گردید که برای رژیم‌های تماس سطحی و آب کم‌عمق توزیع پروفیل‌های غلظت به شکل نیمه گوسی می‌باشند. بررسی خصوصیات جریان جت‌های چگال منفرد مایل در حداکثر ارتفاع بالا آمدگی و نقطه برخورد جریان به بستر در مطالعه‌های دیگر توسط Abessi و Roberts (2015a) انجام گردید. آن‌ها رقیق‌شدگی در نقطه برخورد را در زوایای بین ۴۵ - ۶۵ درجه به زاویه نازل حساس دیدند و در زاویه ۶۰ درجه بیشترین نرخ رقیق‌شدگی مشاهده گردید. تخلیه‌کننده‌های سطحی نیز که پساب‌ها را از طریق کانال و یا سرریز در محیط پذیرنده تخلیه می‌کنند بخشی از مطالعه‌های محققان را به خود اختصاص داده است. Abdelwahed (1981)، Moawad و Rajaratnam (1998) و Kashi et al. (2007) رفتار جریان را در جت‌های سطحی غیرشناور بررسی نمودند و به مطالعه تراژکتوری، پروفیل‌های سرعت و غلظت، خصوصیات اختلاط و نرخ رقیق‌شدگی پرداختند. آن‌ها با بررسی ضخامت و عرض جریان در مقاطع مشخص، ضرایب انتشار مجزا را ارائه نمودند و مشاهده کردند که پروفیل‌های سرعت در محدوده جت شکل در جهت عمودی نیمه گوسی و در جهت افقی تمام گوسی می‌باشد. Kassem et al. (2003) در یک مدل‌سازی عددی نقش پارامترهای مختلف جریان خروجی، بستر و محیط پذیرنده را بر مشخصات جریان‌های چگال خروجی از کانال‌های شیب‌دار و واگرا مورد بررسی قرار دادند. Abessi et al. (2012) نیز با هدف بررسی رقیق‌شدگی در

رسیدن به بستر ادامه می‌یابد. جریان پس از برخورد، تحت تأثیر شیب محیط پذیرنده به تدریج به حرکت خود ادامه می‌دهد. پارامترهای جریان در منبع شار اولیه جرم Q_{0j} ، شار مومنت اولیه M_0 و شار شناوری B_0 می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Q_{0j} = A_0 U_{0j}, \quad M_0 = U_{0j} Q_{0j}, \quad (1)$$

$$B_0 = g' Q_{0j}, \quad g' = g \frac{|\rho_j - \rho_a|}{\rho_a}$$

در رابطه‌ی (۱) A_0 : سطح مقطع جریان در خروجی کانال، U_{0j} : سرعت خروجی جریان جت، ρ_j و ρ_a : به ترتیب دانسیته سیال جت و سیال پذیرنده و g' : شتاب ظاهری جاذبه است. عدد فرود چگال در منبع نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_0 = \frac{U_{0j}}{\sqrt{g'd}} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)، d : عمق جریان در خروجی کانال تخلیه می‌باشد. مسافت طی شده از نقطه برخورد تا مرز بیرونی جریان گسترش یافته به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L(t) = (x_{i(t)}^2 + y_{i(t)}^2)^{1/2} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، $L(t)$: متغیر زمانی مسافت طی شده تا نقاط مرز بیرونی، $x_{i(t)}$: متغیر زمانی مختصات افقی مسافت طی شده و $y_{i(t)}$: متغیر زمانی مختصات قائم مسافت طی شده برای نقاط مرز بیرونی جریان است. در شکل (۲) نمایی از مرز بیرونی انتشار جریان چگال جت سطحی همگرا بر روی بستر افقی نشان داده شده است.

تحلیل ابعادی

پس از شناسایی پارامترهای حاکم بر پدیده جریان جت اقدام به تحلیل ابعادی بین آن‌ها گردید. پارامترهای مؤثر بر این پدیده را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

$$f(W, w, d, \theta, \varphi, U_{0j}, \mu_j, (\rho_j - \rho_a), g, H, R, A, B, t^n), \quad n < 1 \quad (4)$$

در رابطه (۴)، W : عرض بالادست کانال تخلیه، w : عرض کانال تخلیه در محل خروجی کانال، d : عمق جریان در محل خروجی کانال، θ : شیب کانال تخلیه نسبت به افق، φ : زاویه همگرایی کانال تخلیه، U_{0j} : سرعت خروجی جریان جت، μ_j : لزجت مطلق اولیه سیال جت، $(\rho_j - \rho_a)$: اختلاف دانسیته سیال جت و سیال محیطی، g : شتاب ثقل، H : عمق آب پذیرنده، R : فاصله شعاعی متوسط، A : فاصله شعاعی بزرگ، B : فاصله شعاعی کوچک، t : زمان انتشار و n : توان است که عددی کوچکتر از واحد می‌باشد.

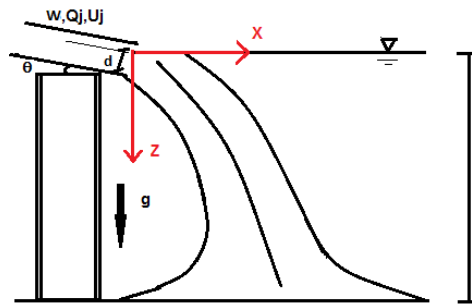
جت‌های چگال سطحی صفحه‌ای مشاهده نمودند که در حالت تخلیه سطحی نسبت به تخلیه مستغرق، رقیق‌شدگی جریان کاهش می‌یابد. در هر دو حالت تخلیه سطحی و مستغرق با شناوری منفی، پساب تخلیه‌شده در نهایت به بستر محیط پذیرنده می‌رسد و متناسب با شیب بستر در جهات مختلف گسترش می‌یابد. Kotsovinos (2000)، Kaye و Hunt (2004) و Papakonstantis و Christodolou (2010) به بررسی آزمایشگاهی انتشار جریان‌های چگال ناشی از برخورد جت‌های مستغرق بر سطح افقی پرداختند. مطابق نتایج حاصل از تحقیق Kotsovinos (2000) با هدف تخمین شعاع انتشار به صورت تابعی از زمان و پارامترهای موضعی جت، چهار رژیم متفاوت ارائه گردید. در مطالعه Kaye و Hunt (2004) مشاهده گردید که جریان شعاعی حاصل از یک پلوم آشفته پیش از تبدیل شدن به یک جریان متحرک متأثر از جاذبه، مشابه جت عمل می‌کند. Papakonstantis و Christodolou (2010) نیز جت‌های دایره‌ای شناور منفی و جت‌های شناور مثبت قائم و افقی را مطالعه نمودند. آن‌ها مرز بیرونی جریان چگال را برای جت‌های شناور منفی و جت‌های شناور مثبت قائم، دایروی دیدند. هم‌چنین مشاهده نمودند که فاصله شعاعی از نقطه برخورد تا مرز بیرونی جت با توان ۰/۵ به زمان وابسته می‌باشد. در کنار تخلیه‌کننده‌های سطحی و مستغرق بررسی انتشار آلودگی در یک کانال باز سهمی شکل در مطالعه Zebardast et al. (2015) انجام گرفت. آن‌ها تأثیر دبی و ضریب زبری‌های مختلف را بر ضریب پخشیدگی عرضی و حداکثر طول پخشیدگی بررسی نمودند. نتایج آزمایش‌ها مقادیر ضریب پخشیدگی عرضی را بین ۰/۲۳ تا ۰/۵۶ سانتی‌متر مربع بر ثانیه و طول پخشیدگی را ۱۰۸ تا ۱۷۰ متر برای زبری‌ها و دبی‌های مختلف نشان داد. هم‌چنین آن‌ها مشاهده نمودند که در ضریب زبری ثابت با افزایش دبی، طول پخشیدگی افزایش و در دبی‌های ثابت با افزایش ضریب زبری، طول پخشیدگی کاهش می‌یابد.

با توجه به مرور صورت گرفته بر مطالعات پیشین و اهمیت شناخت رفتار جریان چگال تخلیه‌شده پس از رسیدن به بستر به واسطه تأثیرات نامطلوب آن بر محیط‌زیست دریایی، نبود مطالعه‌های کافی در ارتباط با بررسی رفتار تخلیه‌کننده‌های سطحی احساس می‌شود. لذا در مطالعه حاضر انتشار جریان چگال تخلیه‌کننده سطحی همگرا و شیب‌دار روی بستر افقی محیط پذیرنده ساکن و عمیق بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

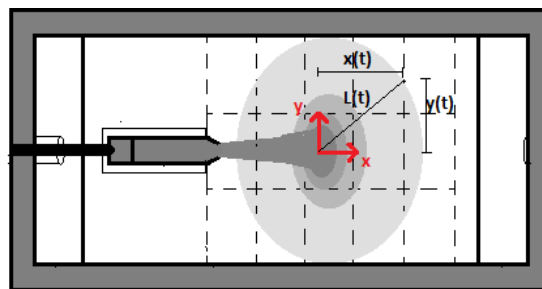
تئوری مسئله

در این مطالعه پارامترهای مورد بررسی، رابطه شعاع انتشار- زمان و ضریب انتشار می‌باشند. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود سیال خروجی ابتدا تحت تأثیر مومنت اولیه بخشی از مسیر را در مجاورت سطح طی می‌کند. سپس تحت تأثیر برآیند دو نیروی مومنت و شناوری به صورت منحنی پیشروی می‌نماید. با غلبه نیروی شناوری بر شرایط تخلیه، حرکت پایین‌رونده جریان تا



شکل ۱- تصویر شماتیک مسیر حرکت سیال جت سطحی همگرا و شیب‌دار

Fig. 1- Schematic picture of Jet fluid trajectory in an inclined and convergent surface jet



شکل ۲- مرز بیرونی انتشار جریان چگال جت سطحی همگرا و شیب‌دار روی بستر افقی

Fig. 2- Outer boundary of horizontal dense flow spreading of inclined and convergent surface jet on ambient water bed

در آزمایش‌های انجام گرفته در این مطالعه، بازه تغییرات دبی جریان جت در محدوده ۰/۰۴۲ تا ۰/۱۰۵ لیتر بر ثانیه و بازه تغییرات سرعت جریان جت در محدوده ۰/۱۲ تا ۰/۶۶۸ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. بازه تغییرات این متغیرها بر اساس محدوده گزارش شده در نمونه‌های واقعی و شرایط مدل هیدرولیکی موجود انتخاب گردید. در جدول (۱) مشخصات آزمایش‌های انجام گرفته در مطالعه حاضر ارائه گردیده است.

روش کار

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه، فلومی به طول ۳/۲، عرض ۰/۶ و ارتفاع ۰/۹ متر بود که دیواره‌ها و کف آن از پلکسی‌گلاس ساخته شدند. سیال جت از انحلال نمک در آب و در غلظت ۴۵ گرم بر لیتر فراهم می‌گردید. محلول حاصل به‌منظور آشکارسازی مسیر حرکت با پرمنگنات پتاسیم، رنگی می‌گردید. دبی سیال جت از طریق یک فلومتر الکترومغناطیس با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه در مقادیر ۰/۰۴۲، ۰/۰۸ و ۰/۱۰۵ لیتر بر ثانیه تنظیم می‌گردید. تزریق آن نیز از طریق کانال‌های مستطیلی با عرض ثابت ۰/۰۶ متر انجام می‌شد. این کانال‌ها در چهار زاویه همگرایی ۱۲/۵، ۲۵، ۴۵ و ۹۰ درجه ساخته شدند. عرض قسمت خروجی در تمامی کانال‌ها با رعایت نسبت همگرایی ۰/۰۳۵ متر در نظر گرفته شد. کانال‌های تخلیه‌کننده تزریق سیال جت را به‌صورت مماس بر سطح محیط پذیرنده انجام می‌دادند. لذا، کانال‌ها در زوایای

با استفاده از تحلیل ابعادی به روش Π باکینگهام روابط بدون بعد زیر به‌دست آمدند:

$$f\left(\theta, \varphi, \frac{W}{w}, \frac{H}{W}, \frac{H}{w}, \frac{\mu_j}{\rho_j U_{0j} d}, \frac{U_{0j}}{\sqrt{gd}}, \frac{U_{0j}}{\sqrt{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_a}\right)gd}}\right) = 0 \quad (5)$$

پارامترهای به‌دست آمده در رابطه (۵) به‌ترتیب عبارت‌اند از: شیب کانال تخلیه نسبت به افق، زاویه همگرایی کانال تخلیه، نسبت عرض بالادست کانال تخلیه به عرض آن در محل خروج، نسبت عمق آب پذیرنده به عرض بالادست کانال تخلیه، نسبت عمق آب پذیرنده به عرض کانال تخلیه در محل خروج، عدد رینولدز اولیه جریان، عدد فرود اولیه جریان، عدد فرود چگال اولیه جریان، ضریب انتشار فاصله شعاعی متوسط، ضریب انتشار فاصله شعاعی بزرگ، ضریب انتشار فاصله شعاعی کوچک. در رابطه (۵) از اثر پارامترهای $\frac{H}{W}$ و $\frac{H}{w}$ به‌علت ثابت بودن مقادیر آن‌ها در تمامی آزمایش‌ها صرف‌نظر گردید. هم‌چنین به‌دلیل قرارگیری عدد رینولدز جریان جت در محدوده جریان متلاطم (حداقل مقدار رینولدز ۲۲۰۰ مشاهده گردید) از اثر آن صرف‌نظر گردید. بنابراین می‌توان نوشت:

$$f(\theta, \varphi, Fr, Fr_d, C_r, C_a, C_b) = 0 \quad (6)$$

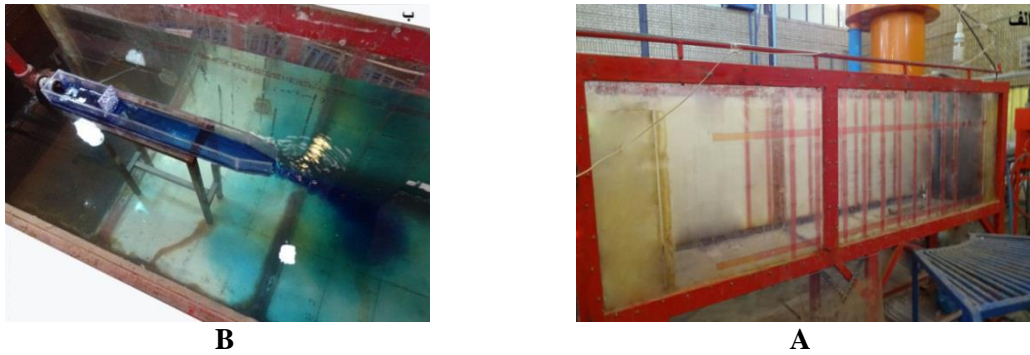
و ۵۰ قاب در ثانیه انجام می‌گردید. دوربین یک روی پایه‌ای با ارتفاع ۰/۷ متر و عمود بر صفحه افقی مرکزی جریان جت قرار داشت و تصاویری از پلان ثبت می‌نمود. دوربین دو روبه‌روی دیواره فلوم و عمود بر صفحه قائم مرکزی جریان قرار داشت و تصاویر آن برای تعیین محل دقیق برخورد جریان جت به کف فلوم استفاده می‌گردید. در تمامی آزمایش‌ها، برداشت داده‌ها با استفاده از روندیابی تصاویر از روی مش‌بندی کف فلوم و خط‌کش‌های نصب شده بر دیواره فلوم انجام گرفت. در شکل (۳) مدل آزمایشگاهی مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها و نمونه‌ای از تخلیه‌کننده‌های سطحی در زمان اجرای آزمایشگاهی نشان داده شده است.

همگرایی و شیب‌های مورد نظر (۰، ۴ و ۸ درصد) بر روی یک پایه تنظیم و نصب می‌شدند. عمق آب درون فلوم در تمامی آزمایش‌ها ثابت و ۰/۷ متر تنظیم می‌گردید. پیش از تزریق سیال جت از ساکن بودن سیال محیطی اطمینان حاصل می‌شد و در فاصله زمانی طی شده برای ساکن شدن سیال محیطی، دمای سیال جت و سیال محیطی با استفاده از ترمومتر و دانسیته آنها با استفاده از هیدرومتر اندازه‌گیری می‌شد. سیال جت با استفاده از یک پمپ با دبی نهایی ۱/۵ لیتر بر ثانیه به کانال‌های تخلیه انتقال می‌یافت. سپس از طریق کانال‌های تخلیه به محیط پذیرنده تزریق می‌گردید. در هر اجرای آزمایشگاهی ثبت مسیر حرکت سیال جت در محیط پذیرنده با استفاده از دو دوربین ویدئویی دیجیتال سونی با فرکانس‌های ۴۰

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌ها برای بررسی رفتار جریان تخلیه شده از جت‌های سطحی روی بستر

Table 1- Specifications of experiments for examining the behavior of discharged surface jets flowing over the bed

NO	θ (cm/cm)	ϕ (degree)	d(cm)	Q_{0j} (lit/s)	U_{0j} (cm/s)	Fr_d	C_r	C_a	C_b
1	0	90	1.20	0.08	19.05	2.88	4.12	-	-
2	0	45	1.10	0.08	20.78	3.28	2.07	-	-
3	0	25	0.95	0.08	24.06	4.09	3.38	-	-
4	0	12.5	0.60	0.042	20.00	4.22	4.36	-	-
5	0	25	0.70	0.042	17.14	3.35	4.79	-	-
6	0	45	0.80	0.042	15.00	2.74	3.94	-	-
7	0	90	1.00	0.042	12.00	2.01	5.75	-	-
8	0	45	1.40	0.105	21.43	3.02	3.65	-	-
9	0	25	1.00	0.105	30.00	5.01	2.22	-	-
10	0	12.5	0.95	0.105	31.58	5.41	3.06	-	-
11	0.04	90	1.00	0.08	22.86	3.79	-	2.01	5.2
12	0.08	90	0.70	0.08	32.65	6.47	-	1.61	3.92
13	0.04	45	0.70	0.08	32.65	6.47	-	2.09	4.6
14	0.04	25	0.65	0.08	35.17	7.23	-	2.16	4.2
15	0.08	25	0.45	0.08	50.79	12.55	-	2.09	5.15
16	0.08	12.5	0.40	0.08	57.14	14.98	-	2.09	4.12
17	0.04	12.5	0.60	0.08	38.10	8.15	-	2.1	4.67
18	0.04	12.5	0.40	0.042	30.00	7.76	-	2.67	4.59
19	0.08	12.5	0.30	0.042	40.00	11.95	-	1.19	5.14
20	0.08	25	0.35	0.042	34.29	9.48	-	1.85	5.63
21	0.04	25	0.50	0.042	24.00	5.55	-	2.09	3.95
22	0.04	45	0.60	0.042	20.00	4.33	-	2.1	4.47
23	0.08	45	0.40	0.042	30.00	7.96	-	1.46	4.19
24	0.08	90	0.50	0.042	24.00	5.70	-	2.18	4.9
25	0.04	90	0.70	0.042	17.14	3.44	-	2.76	5.49
26	0.04	90	1.30	0.105	23.08	3.38	-	2.4	4.02
27	0.08	90	0.80	0.105	37.50	7.00	-	1.57	3.52
28	0.08	45	0.60	0.105	50.00	10.77	-	1.88	4.43
29	0.08	25	0.50	0.105	60.00	14.16	-	2.38	3.96
30	0.08	12.5	0.45	0.105	66.67	16.58	-	2.24	4.42



شکل ۳- (A) مدل آزمایشگاهی (B) جت سطحی همگرا در یک اجرای آزمایشگاهی

Fig. 3 – a) The experimental model b) Convergent surface jet in an experimental run

در رابطه (۸)، B_{ave} متوسط فاصله شعاعی کوچک برای مرز بیرونی جریان جت در هر زمان خاص و B_1 و B_2 فاصله‌های شعاعی کوچک نقاط مرز بیرونی در راستای عرض فلوم در آن زمان خاص می‌باشند. در شکل (۴) انتشار جریان در حالات مختلف و متغیرهای تعریف شده نشان داده شده است. در شکل (۵)، تغییرات مسافت طی شده از نقطه برخورد تا مرز بیرونی با زمان برای فاصله شعاعی متوسط، فاصله شعاعی بزرگ و فاصله شعاعی کوچک ارائه گردیده است.

برای تعیین ارتباط بین فواصل شعاعی و زمان از برازش توانی استفاده گردید. بنابراین توان n در رابطه‌ی t^n برای هر آزمایش تخمین زده شد. مشاهده گردید که توان n برای هر یک از متغیرهای R ، A و B به‌طور محسوس تغییر نمی‌کند. لذا برای هر یک از حالات یک متوسط مقدار n تعریف گردید. متوسط مقادیر n به‌دست آمده در روابط (الف)، (ب) و (ج) بیان شده است.

$$n_{ave} = 0.45, R \sim t^{0.45} \quad (\text{الف})$$

$$n_{ave} = 0.57, A \sim t^{0.57} \quad (\text{ب})$$

$$n_{ave} = 0.42, B \sim t^{0.42} \quad (\text{ج})$$

در رابطه (۹)، R فاصله شعاعی متوسط، A فاصله شعاعی بزرگ و B فاصله شعاعی کوچک می‌باشد.

ضریب انتشار

با توجه به توان‌های تعیین شده و نتایج تحلیل ابعادی انجام شده، فاصله شعاعی متوسط، فاصله شعاعی بزرگ و فاصله شعاعی کوچک نرمال شده مشخص گردید. در شکل (۶) متغیرهای مکانی جریان جت چگال سطحی توسعه یافته بر یک بستر افقی در مقابل پارامترهای اولیه جریان جت نشان داده شده است.

نتایج و بحث

رابطه شعاع انتشار- زمان

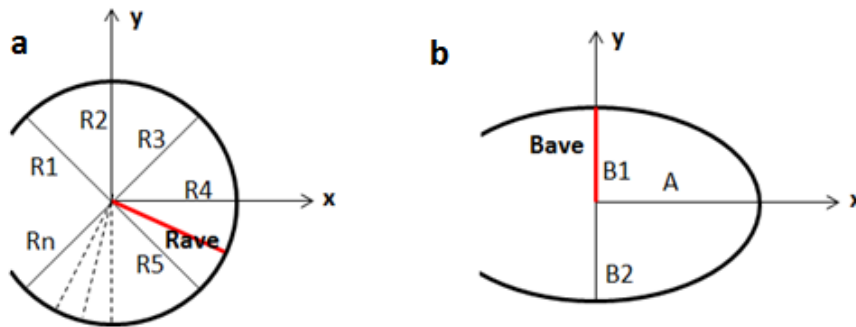
در تخلیه‌کننده‌های سطحی سیال جت پس از تخلیه به درون محیط پذیرنده، با طی مسیر منحنی شکل به بستر برخورد می‌کند. در این مطالعه نقطه برخورد سیال جت به بستر به‌عنوان مبدأ مختصات در نظر گرفته شد. پس از برخورد سیال جت با بستر در فواصل زمانی مشخص، عکس‌هایی از ویدئوهای ثبت شده به‌دست آمد. با استفاده از روندیابی تصاویر از روی مش‌بندی کف فلوم، مختصات دوبعدی نقاط مرز بیرونی جت استخراج گردید. سپس طبق رابطه (۳) مسافت طی شده از نقطه برخورد تا مرز بیرونی برای تمامی نقاط محاسبه گردید. در شیب صفر، مسافت طی شده از نقطه برخورد تا مرز بیرونی که فاصله شعاعی نامیده می‌شود، مقادیر تقریباً ثابتی می‌باشند. فواصل شعاعی نقاط مرز بیرونی برای تمامی آزمایش‌ها و در تمامی زمان‌ها محاسبه گردید. سپس در هر زمان خاص طبق رابطه (۷) مقدار فاصله شعاعی متوسط محاسبه گردید.

$$R_{ave} = R = \frac{\sum R_i}{k} \quad i = (1, 2, 3, \dots, k) \quad (\text{۷})$$

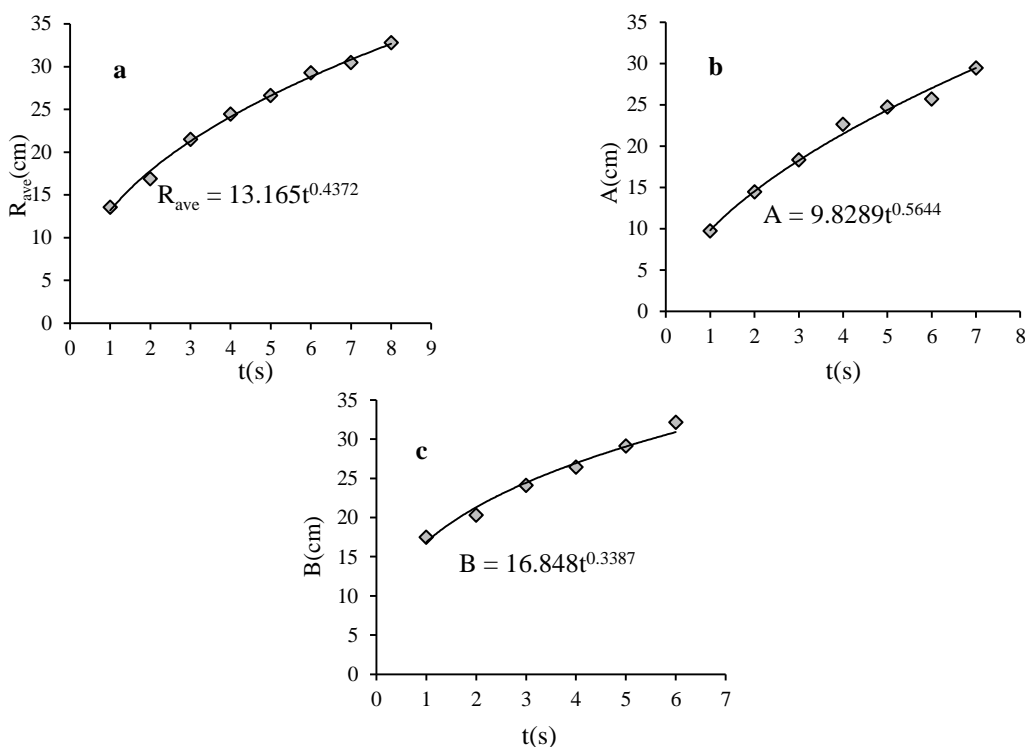
در رابطه (۷)، R_{ave} فاصله شعاعی متوسط برای مرز بیرونی جریان جت در هر زمان خاص و R_i فاصله شعاعی تمامی نقاط روی مرز بیرونی در آن زمان خاص می‌باشد.

در شیب‌های ۴ و ۸ درصد مسافت طی شده از نقطه برخورد تا آخرین نقطه در راستای طول فلوم فاصله شعاعی بزرگ و مسافت طی شده تا آخرین نقطه در راستای عرض فلوم فاصله شعاعی کوچک نامیده می‌شود. فواصل شعاعی بزرگ و کوچک برای تمامی آزمایش‌ها و در تمامی زمان‌ها محاسبه گردید. مقدار متوسط فاصله شعاعی کوچک در هر زمان خاص طبق رابطه (۸) محاسبه گردید.

$$B_{ave} = B = \frac{B_1 + B_2}{2} \quad (\text{۸})$$

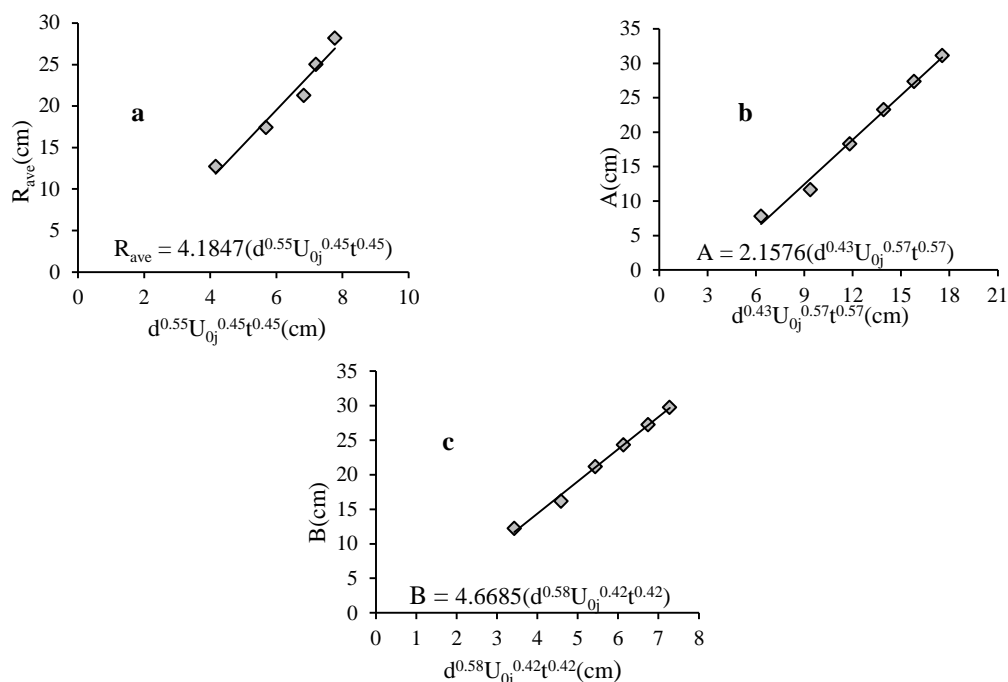


شکل ۴- (a) مرز بیرونی جریان جت چگال در شیب صفر، (b) مرز بیرونی جریان جت چگال در شیب صفر
Fig. 4- a) Outer boundary of dense jet at a slope of 0% b) outer boundary of inclined dense jet



شکل ۵- (a) تغییرات فاصله شعاعی متوسط با زمان در شیب صفر، زاویه همگرایی ۱۲/۵ درجه و دبی ۰/۰۴۲ لیتر بر ثانیه،
(b) تغییرات فاصله شعاعی بزرگ با زمان در شیب ۴ درصد، زاویه همگرایی ۲۵ درجه و دبی ۰/۰۴۲ لیتر بر ثانیه،
(c) تغییرات فاصله شعاعی کوچک با زمان در شیب صفر، زاویه همگرایی ۴۵ درجه و دبی ۰/۰۴۲ لیتر بر ثانیه

Fig. 5- a) Variations in average radial distance versus time at a slope of 0%, a convergence angle of 12.5°, and a flow rate of 0.042 L/s; (b) variations in major radial distance versus time at a slope of 4%, a convergence angle of 25°, and a flow rate of 0.042 L/s; (c) variations in minor radial distance versus time at a slope of 0%, a convergence angle of 45°, and a flow rate of 0.042 L/s



شکل ۶- a) ارتباط فاصله شعاعی متوسط با پارامترهای اولیه جریان جت سطحی در شیب صفر، زاویه همگرایی ۹۰ درجه و دبی ۰/۰۸ لیتر بر ثانیه، b) ارتباط فاصله شعاعی بزرگ با پارامترهای اولیه جریان جت سطحی در شیب ۴ درصد، زاویه همگرایی ۲۵ درجه و دبی ۰/۰۸ لیتر بر ثانیه، c) ارتباط فاصله شعاعی کوچک با پارامترهای اولیه جریان جت سطحی در شیب ۴ درصد، زاویه همگرایی ۱۲/۵ درجه و دبی ۰/۰۸ لیتر بر ثانیه

Figure 6- a) Relationship between average radial distance and initial surface jet flow parameters at a slope of 0%, a convergence angle of 90°, and a flow rate of 0.08 L/s b) relationship between major radial distance and initial surface jet flow parameters at a slope of 4%, a convergence angle of 25°, and a flow rate of 0.08 L/s c) relationship between minor radial distance and initial surface jet flow parameters at a slope of 4%, a convergence angle of 12.5°, and a flow rate of 0.08 L/s

در مطالعه‌های پیشین برای جت‌های مستغرق، مقادیر ضرایب انتشار در حالتی که فاصله شعاعی نسبت به پارامترهای اولیه جت و یا پارامترهای موضعی جت نرمال شده‌اند، گزارش شده است. اما گزارشی در ارتباط با ضرایب انتشار جت‌های سطحی بر روی بستر افقی ارائه نشده است. در جدول (۲) نتایج حاصل از محاسبه ضرایب انتشار مطالعه‌های پیشین و مطالعه حاضر بیان شده است. در مطالعه حاضر، فواصل شعاعی تنها با پارامترهای اولیه جت نرمال گردید. اختلاف مشاهده شده در مقادیر ضرایب انتشار مطالعه حاضر و مطالعه Papakonstantis and Christodolou (2010) را می‌توان ناشی از نوع تخلیه، نوع نازل و یا فرآیند اختلاط بین سیال جت و سیال محیطی در نظر گرفت. در تخلیه سطحی به دلیل تأثیر سطح آزاد آب، درگیری جریان خروجی با محیط پذیرنده کمتر و میزان پیشروی جریان در محیط بیشتر است. طی پیشروی جریان، آشفتگی و اختلاط‌های سطحی موجب کشش جریان محیطی به درون مرزهای حرکتی سیال جت می‌شود و سیال جت در محیط پذیرنده منتشر می‌گردد. بنابراین سیال جت در تخلیه سطحی نسبت به تخلیه مستغرق با وسعت انتشار بیشتری به بستر رسیده که بر انتشار روی بستر نیز تأثیر می‌گذارد. در نتیجه ضریب انتشار در حالت تخلیه سطحی بیشتر از تخلیه مستغرق خواهد بود.

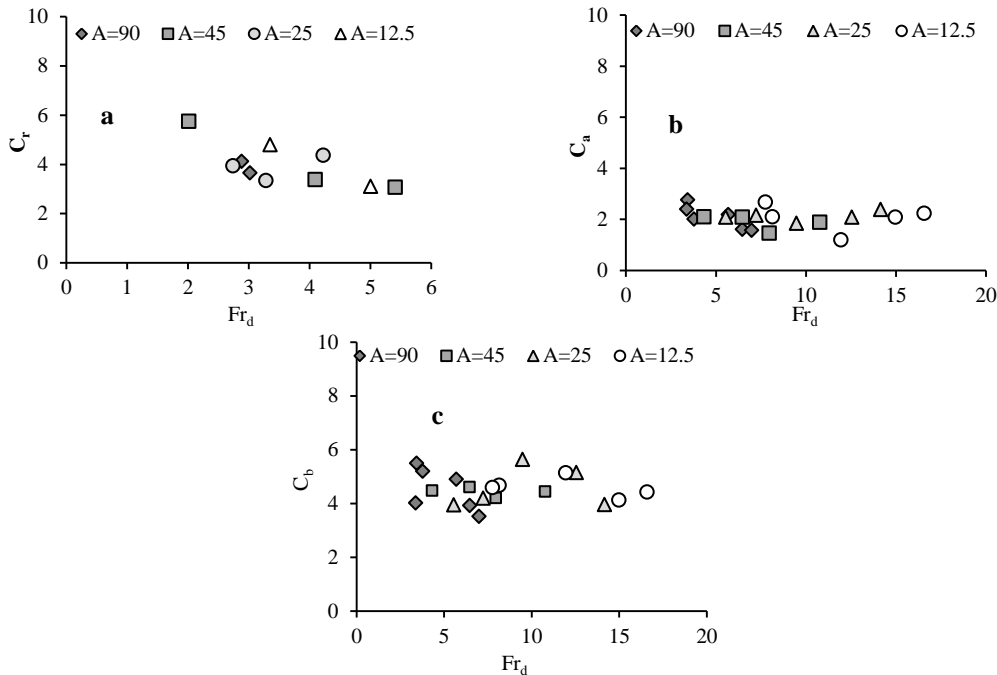
همان‌طور که مشاهده می‌گردد رابطه بین متغیرهای مکانی و پارامترهای اولیه جت با دقت قابل قبولی خطی می‌باشد. به عبارت دیگر، ضریب انتشار جریان جت سطحی را می‌توان از نسبت هر یک از متغیرهای مکانی به پارامتر اولیه مربوط به آن تخمین زد. در تمامی آزمایش‌ها، مقادیر ضریب انتشار تعیین گردید. مشاهده گردید که بازه تغییرات ضرایب انتشار برای فاصله شعاعی متوسط، بزرگ و کوچک محدود می‌باشد. لذا برای هر یک از حالات، یک متوسط مقدار ضریب انتشار تعریف گردید. متوسط مقادیر C_r ، C_a و C_b به دست آمده در روابط (۱۰الف)، (۱۰ب) و (۱۰ج) آمده است.

$$C_r = 4, R = 4 \left(d^{0.55} U_{0j}^{0.45} t^{0.45} \right) \quad (10\text{الف})$$

$$C_a = 2, A = 2 \left(d^{0.43} U_{0j}^{0.57} t^{0.57} \right) \quad (10\text{ب})$$

$$C_b = 4.5, B = 4.5 \left(d^{0.58} U_{0j}^{0.42} t^{0.42} \right) \quad (10\text{ج})$$

در رابطه (۱۰)، C_r ضریب انتشار فاصله شعاعی متوسط، C_a ضریب انتشار فاصله شعاعی بزرگ و C_b ضریب انتشار شعاعی کوچک می‌باشد. در شکل (۷)، مقادیر ضرایب انتشار در مقابل عدد فرود چگال برای همه زوایای همگرایی ترسیم گردیده است. مشاهده می‌گردد که ضرایب انتشار اساساً مستقل از زوایای همگرایی کانال تخلیه می‌باشند.



شکل ۷- (a) ضرایب انتشار جریان جت سطحی همگرا در مقابل عدد فرود چگال، الف) بدون شیب طولی،
ب) دارای شیب طولی در راستای طول فلوم، c) دارای شیب طولی در راستای عرض فلوم

Figure 7- Spreading coefficients of dense surface jet flow versus densimetric Froude number a) no longitudinal slope b) along an ellipse's major axis for dense inclined surface jet flow c) along an ellipse's minor axis for dense inclined surface jet flow

جدول ۲- مقایسه نتایج ضرایب انتشار

Table 2- comparison of The results spreading coefficients

Study	Initial and local spreading coefficients	
	C_{r0}	C_r
This study (surface jet without longitudinal slope)	4	-
This study (inclined surface jet) (in direction of the ellipse's major axis)	2	-
This study (inclined surface jet) (in direction of the ellipse's minor axis)	4.5	-
Papakonstantis & Christodoulou (2010) (negatively buoyant jets)	1.38 ($Fr_d > 20$) 1.16 ($Fr_d < 20$)	0.5
Papakonstantis & Christodoulou (2010) (positively buoyant jets)	1.15	0.48
Kotsovinos (2000)	-	0.55

مقادیر ضرایب انتشار برای فاصله شعاعی متوسط، فاصله شعاعی بزرگ و فاصله شعاعی کوچک به ترتیب ۴، ۲ و ۴/۵ تخمین زده شد. در نهایت با مقایسه مقادیر ضرایب انتشار مطالعه حاضر و مطالعات پیشین اختلافاتی ناشی از نوع تخلیه (سطحی و مستغرق)، نوع نازل (مستطیلی و دایروی) و شرایط اختلاطی سیال جت و سیال محیطی مشاهده گردید.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله نویسندگان از همکاری دانشگاه شهید چمران اهواز در انجام این پژوهش قدردانی می‌نمایند.

نتیجه گیری

در مطالعه حاضر با شبیه‌سازی فرآیند تخلیه در آزمایشگاه، پدیده انتشار جریان جت روی بستر افقی در تخلیه سطحی از کانال‌های مستطیلی همگرا و شیب‌دار در محیط‌های ساکن ارزیابی گردید. در این راستا رابطه فواصل شعاعی با زمان انتشار و ضرایب انتشار مورد بررسی قرار گرفت. پس از تحلیل داده‌ها با استفاده از روندیابی تصاویر مشاهده گردید که ارتباط فواصل شعاعی و زمان با یک برآزش توانی برقرار می‌گردد. توان n به‌دست آمده برای فاصله شعاعی متوسط، فاصله شعاعی بزرگ و فاصله شعاعی کوچک به ترتیب ۰/۴۵، ۰/۵۷ و ۰/۴۲ برآورد گردید. علاوه بر آن، پس از برآزش خطی بین فواصل شعاعی و پارامترهای اولیه جریان جت

References

- 1- Abdelwahed, M.S.T., 1981. Surface jets and surface plumes in cross-flows. Ph.D. Thesis, Mc Gill University, Montreal, Canada.
- 2- Abessi, O. and Roberts, P.J.W., 2015a. Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(8): 1-8.
- 3- Abessi, O. and Roberts, P.J.W., 2015b. Dense jets discharges in shallow water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1): 1-13.
- 4- Abessi, O., Saeedi, M., Bleninger, T. and Davidson, M., 2012. Surface discharge of negatively buoyant effluent in un-stratified stagnant water. *Journal of Hydro-environment Research*, 6: 181-193.
- 5- Bleninger, T. and Jirka, G.H., 2008. Modeling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants. *Desalination*, 221: 585-597.
- 6- Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F. and Nicosia, S., 2005. Bench-Scale investigation of inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(11): 1017-1022.
- 7- Danoun, R., 2007. Desalination plants: potential impacts of brine discharge on marine life. The ocean technology group, University of Sydney, Australia.
- 8- Jenkins, S., Paduan, J., Roberts, P., Schlenk, D. and Weis, J., 2012. Southern California coastal water research project. California water resources control board: 1-56.
- 9- Kashi, G., Martinuzzi, R.A. and Baddour, R.E., 2007. Mean flow field of a non-buoyant rectangular surface jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2): 234-239.
- 10- Kassem, A., Imran, J. and Khan, J., 2003. Three-dimensional modeling of negatively buoyant flow in diverging channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(12): 936-947.
- 11- Kaye, N.B. and Hunt, G.R., 2004. Out flow from a plume impinging on a horizontal boundary. 15th Australasian fluid mechanics conference. The University of Sydney, Sydney, Australia.
- 12- Kotsovinos, N.E., 2000. Axisymmetric submerged intrusion in stratified fluid. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(6): 446-456.
- 13- Moawad, A.K. and Rajaratnam, N., 1998. Dilution of multiple non-buoyant circular jets in cross-flows. *Journal of Environmental Engineering*, 124(1): 51-58.
- 14- Papakonstantis, I.G. and Christodoulou, G.C., 2010. Spreading of round dense jets impinging on a horizontal bottom. *Journal of Hydro-environment Research*, 4(2010): 289-300.
- 15- Pincine, A.B. and List, E.J., 1973. Disposal of brine into an estuary. *Journal of Water Pollutant*, 45: 2335-2344.
- 16- Sanchez, D., 2009. Near-field evolution and mixing of a negatively buoyant jet consisting of brine from a desalination plant. Masters' thesis. Department of building and environmental technology Lund University, Sweden.
- 17- Zebardast, S., Tabatabaei, S. H., Abbasi, F., Heidarpour, M. and Gualtieri, C., 2015. Study of the effect of discharge and bed roughness on the maximum solute diffusion length in a parabolic channel. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(3): 395-404. (in Persian).
- 18- Zeitoun, M.A., Raid, R.O., McHilheny, W.F. and Mitchell, T.M., 1972. Model studies of outfall systems for desalination plants. Part II: Numerical simulations and design considerations. *Res. and Devel. Progress reports*, 804, office of saline water, U. S. Department of interior, Washington, D. C.