

بر آورد ضریب انتشار عمقی جریان جت سطحی صفحه‌ای همگرا در محیط پذیرنده عمیق

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

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۱/۱۹

^۱- کارشناس ارشد مهندسی رودخانه، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

^۲- استادیار گروه سازه‌های دریایی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

^۳- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: theidari90@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق، ضریب انتشار عمقی در تخلیه سطحی جریان جت چگال از کانال‌های مستطیلی همگرا و شیب‌دار در محیط پذیرنده ساکن و عمیق بررسی شده است. بدین‌منظور آزمایش‌های مطالعه حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران در فلومی به طول ۳/۲ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۹ متر انجام گردید. برای دستیابی به اهداف تحقیق حاضر سیال جت تخلیه‌شونده در سه غلظت و سه دبی متفاوت تزریق گردید. هم‌چنین برای تخلیه سطحی از یک کانال مستطیلی با عرض کف ۶ سانتی‌متر و در چهار زاویه همگرایی مختلف ۱۲/۵، ۲۵، ۴۵ و ۹۰ درجه استفاده گردید. کانال مذکور به‌منظور تخلیه سطحی سیال جت به‌صورت مماس بر سطح سیال پذیرنده در سه شیب صفر، ۴ و ۸ درصد نصب گردید. پس از انجام کلیه آزمایش‌ها، تحلیل داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از روندیابی تصاویر تهیه شده انجام گردید. سپس ضریب انتشار عمقی جریان محاسبه و نتایج مربوطه استخراج گردید. نتایج نشان می‌دهند که افزایش شیب و کاهش زاویه همگرایی کانال تخلیه و افزایش عدد فرود چگال موجب افزایش ضریب انتشار عمقی می‌گردد. از نظر کمی نتایج نشان می‌دهند که تغییر شیب کف از صفر به ۸ درصد به‌طور متوسط باعث افزایش ۳۴ درصدی در ضریب انتشار و تغییر زاویه همگرایی از ۹۰ به ۱۲/۵ درجه باعث افزایش ۲۷ درصدی در این ضریب می‌گردد. در نهایت، با استفاده از داده‌ها رابطه‌ای آماری جهت ارتباط ضریب انتشار و سایر پارامترها استخراج گردید که ریشه میانگین مجموع مربعات خطای آن ۰/۰۲۴ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: جت سطحی، ضریب انتشار عمقی، عدد فرود چگال، کانال مستطیلی، همگرایی

Estimating Depth Spreading Coefficient of Convergent Plane Surface Jet Flow Into Deep Ambient

T Heidari^{1*}, N Shahni Karamzadeh², J Ahadian³

Received: 10 November 2015

Accepted: 08 April 2017

¹ M.Sc. Graduate., River Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Iran

² Assist. Prof., Marine Structures Dept., Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Iran

³ Assoc. Prof., Water Engineering Dept., Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

*Corresponding Author, Email: theidari90@yahoo.com

Abstract

In this study, the depth spreading coefficient in surface discharge of dense jet flow from convergent and inclined rectangular channels into deep and stagnant ambient have been investigated. Therefore, the experiments were done in the hydraulic laboratory of Shahid Chamran University on a flume with 3.2-meter length, 0.6-meter width and 0.9-meter depth. For purposes of this research, the jet flow was injected with three different flow rates and concentrations. Also, for surface discharge of the jet flow, a rectangular channel with floor width of 6 cm and four different convergence angles of 12.5, 25, 45 and 90 degrees was used. The discharge channel was installed in three slopes of 0, 4 and 8 percent in order to be the surface discharge of the jet fluid tangent to the ambient water surface. After conducting the tests, the data were analyzed using the routing process of the prepared images. Then, the coefficients of depth spreading were calculated and the results were extracted. The results showed that increasing the channel slope, reducing the convergence angle and increasing densimetric Froude number increased the depth spreading coefficient. Quantitatively, the results showed that change of channel slope from 0 to 8 percent caused an increase in the spreading coefficient up to 34 percent and the change of convergence angle from 90 to 12.5 degrees caused an increase up to 27 percent. Finally, a statistical relationship between spreading coefficient and the other relevant parameters was extracted that its root mean square error was obtained 0.024.

Keywords: Convergence, Densimetric Froude number, Depth spreading coefficient, Rectangular channel, Surface jet

مقدمه

در طول چند دهه گذشته، با توجه به رشد چشم گیر جمعیت‌های انسانی و فعالیت‌های صنعتی تقاضا برای آب شیرین و قابل استفاده افزایش یافته است. نمک زدایی می‌تواند به عنوان راه کاری جهت انتخاب منابع جدید آب شیرین به حساب آید. کارخانجات نمک زدایی، پساب‌های چگال را به درون منابع پذیرنده‌ای که معمولاً دریا است تخلیه می‌کنند (دل بن و همکاران ۱۹۹۴). تخلیه پساب سنگین می‌تواند بر زندگی موجودات دریایی مانند توسعه گونه‌های گیاهی و جانوری، بقای لاروها و جنبه‌های پرورش و تولیدمثل آن‌ها تأثیرگذار باشد. به همین دلیل، مطالعه فرآیندهای اختلاط برای جلوگیری از تمرکز جریان چگال که ممکن است مشکلات زیست محیطی فراوانی به همراه داشته باشد، دارای اهمیت است. یک روش برای افزایش نرخ رقیق‌شدگی آب‌های تخلیه شده در دریا و کاهش اثرات منفی حاصل از آن‌ها استفاده از تخلیه‌کننده‌هایی با شناوری منفی است (احدیان و موسوی ۲۰۰۹). طراحی و ساخت تخلیه‌کننده‌های دریایی به گونه‌ای که کمترین آسیب‌ها را داشته باشد مستلزم شناخت رفتار هندسی و هیدرولیکی جریان تخلیه‌شونده است (عابسی و همکاران ۱۳۹۰). این موضوع را می‌توان با استفاده از مدل سازی فیزیکی در آزمایشگاه تا حدودی مرتفع نمود. طی سال‌های اخیر مطالعات وسیعی برای بررسی رفتار جریان‌های غلیظ تخلیه‌شونده در محیط‌های پذیرنده انجام گرفته است. گوستافسون و لارسن (۱۹۷۰) جت افقی تخلیه‌شونده در آب‌های لایه‌بندی شده و ساکن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها حرکت سیال جت تحت تأثیر شناوری را مورد تحلیل قرار داده و روشی را جهت تخمین بیشینه ارتفاع صعود جت ارائه نمودند. شهربانی و دیتمارس (۱۹۷۶) به بررسی رفتار هیدرولیکی جت‌های مستغرق صفحه‌ای تحت اثر شناوری منفی در محیط پذیرنده ساکن پرداختند. بر اساس نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها، مشخص گردید که جریان تخلیه‌شونده ناشی از جت در اثر وجود مرزهای صلب باعث ایجاد یک جریان تلاطمی اضافی می‌گردد که شرایط هیدرولیکی جت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در بررسی

جت‌های حرارتی سطحی اوگینو و کاتائی (۱۹۹۴) از طریق یک کانال مستطیلی، سیال جت با دمای پایین را به درون محیط پذیرنده‌ای با دمای بالا تخلیه نمودند و با بررسی پروفیل‌های دما و سرعت، تشابه را در آن‌ها ملاحظه نمودند. در جریان‌های محیطی غیریکنواخت نش و جیرکا (۱۹۹۶) تخلیه سطحی شناور را مورد تحلیل قرار دادند. آن‌ها مشاهده نمودند که در تخلیه سطحی شناور در جریان‌های محیطی غیریکنواخت، اختلاط خود همسان شکل می‌گیرد. همچنین ملاحظه نمودند که در جریان‌های متغیر زمانی و عمیق در صورتی که نسبت مقیاس‌های طولی جریان یکنواخت به جریان غیریکنواخت بیش از ۰/۵ باشد، غیریکنواختی بر شرایط حاکم می‌گردد. داویدسون و ونگ (۲۰۰۲) خصوصیات جریان را در جت‌های انحراف‌یافته‌ای که در جهت جریان تریق می‌شوند با استفاده از تکنیک‌های لیزری و پردازش تصاویر مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نقاط متقابل میان جت‌های انحراف‌یافته قوی و ضعیف و تأثیر آن‌ها روی رفتار جریان را بررسی نمودند. مطابق یافته‌های آن‌ها در ناحیه انحراف‌یافته قوی، ضریب انتشار تغییر می‌کند و تغییر ساختار جریان موجب ایجاد اختلاف در پروفیل‌های سرعت و غلظت می‌شود. در زمینه تخلیه سطحی جریان‌های با شناوری منفی از طریق تخلیه‌کننده‌های صفحه‌ای واگرا کاسم و همکاران (۲۰۰۳) مدل سازی سه بعدی جریان را برای مشاهده تأثیر زاویه واگرایی و غلظت سیال جت بر موقعیت شیرجه انجام دادند. آن‌ها کاهش طول موقعیت شیرجه را در زوایای واگرایی بزرگتر و همچنین اعداد فرود کوچکتر مشاهده نمودند. بررسی جت‌های شناور آشفته در شرایط محیطی لایه‌بندی شده و محدود نشده در مطالعات جیرکا (۲۰۰۴) با استفاده از یک مدل انتگرالی صورت گرفت. مدل انتگرالی پیشنهادی برای تحلیل جریان در مرزهای جانبی کارآمد، اما در مدل کردن شرایط مرزی نامحدود و نیز پدیده پرش هیدرولیکی دارای محدودیت بود. در زمینه مدیریت صحیح تخلیه آب شور کارخانجات نمک زدایی بلنینگر و جیرکا (۲۰۰۸) با استفاده از مدل‌های CORJET، جت انتگرال و CORMIX برای تخلیه‌کننده‌های مستغرق، زوایای نازل

بررسی شرایط تخلیه سطحی از طریق کانال‌های تخلیه-کننده صفحه‌ای همگرا و شیب‌دار کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ در تحقیق حاضر انتشار عمقی جریان جت غلیظ که توسط یک کانال مستطیلی همگرا به سیال پیرامون تزریق می‌شود، بررسی می‌گردد. در این میان تغییر شیب و همگرایی کانال تخلیه‌کننده و غلظت سیال تخلیه‌شونده می‌توانند بر چگونگی انتشار جریان غلیظ در محیط پذیرنده تأثیر گذارند. در این راستا فرآیند تخلیه در آزمایشگاه با استفاده از یک مدل هیدرولیکی انجام گرفت و تأثیر متغیرها بر گسترش عرضی جریان جت سطحی با استفاده از روندیابی مشاهدات آزمایشگاهی بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

همان گونه که اشاره شد ضریب انتشار عمقی در جریان جت سطحی به واسطه شناخت نحوه اختلاط در محیط پذیرنده بسیار حائز اهمیت است. در تحقیق حاضر پارامترهای مؤثر بر مومنتم جریان خروجی که شامل شیب و زاویه همگرایی در کانال مستطیلی است، بررسی و سپس سایر پارامترهای هیدرولیکی ارزیابی شد. برنامه‌ریزی آزمایش‌ها با توجه به پارامترهای مؤثر بر پدیده صورت پذیرفت. بر این اساس، این پارامترها را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

$$f(B, b, y, S, A, H, \rho_j, \rho_a, \mu_j, g, U_{0j}, \beta_z) = 0 \quad [1]$$

در رابطه ۱، B: عرض بالادست کانال تخلیه، b: عرض کانال تخلیه در محل خروجی کانال، y: عمق جریان در محل خروجی کانال، S: شیب کانال تخلیه نسبت به افق، A: زاویه همگرایی کانال تخلیه، H: عمق آب در محیط پذیرنده، ρ_j : جرم حجمی سیال جت، ρ_a : جرم حجمی سیال پذیرنده، μ_j : لزجت مطلق اولیه سیال جت، g: شتاب ثقل، U_{0j} : سرعت سیال جت در محل خروجی کانال تخلیه و β_z : ضریب انتشار عمقی می‌باشد. در شکل ۱ مسیر حرکت سیال جت، کانال‌های تخلیه‌کننده و تعدادی از پارامترهای ذکر شده نمایش داده شده است.

مسطح ۳۰ تا ۴۵ درجه را از نظر طراحی بهینه‌تر دیدند. تخلیه سیال جت در محیط پذیرنده به علت وقوع اختلاف سرعت موجب ایجاد گردابه‌هایی در میدان جریان می‌شود، در این زمینه مانابندرا و همکاران (۲۰۰۸) اقدام به تخلیه سیال جت از طریق کانال مستطیلی به صورت عمود بر جریان محیطی و در محیط پذیرنده‌ای با عرض کم نمودند. آن‌ها مشاهده نمودند که با افزایش نسبت سرعت، اندازه گردابه‌ها کاهش می‌یابد. بلننگر و همکاران (۲۰۰۹) مدلی را به صورت محاسبه‌گر ارائه نمودند. این مدل قادر بود با مقایسه خصوصیات فاضلاب و محیط پذیرنده، شرایط تخلیه پایه را برای ارزیابی اثرات کارخانجات نمک زدایی روی محیط زیست دریایی توصیف کند. عابسی و همکاران (۱۳۹۰)، (۱۳۹۱) در یک بررسی آزمایشگاهی تخلیه سطحی جریان‌های سنگین تخلیه‌شونده از کانال مستطیلی در محیط‌های ساکن را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که جریان در ارتباط مستقیم با عمق محیط و شارهای اولیه جریان خروجی قرار دارد. همچنین با مقایسه نتایج مطالعات خود با داده‌های مربوط به آزمایش‌های مستغرق، افزایش میزان پیشروی جریان، افزایش میزان پخشیدگی عرضی جریان و کاهش رقیق‌شدگی جریان را مشاهده نمودند. پالومار و همکاران (۲۰۱۲) با هدف بررسی تخلیه آب شور در میدان نزدیک از میان مدل‌های عددی موجود، برای جت‌ها در حالات مختلف بهترین مدل را معرفی نمودند. به‌عنوان نمونه برای جت منفرد مدل‌های CORJET، UM3 و Jetlag را نسبت به CORMIX1 و CORMIX2 به علت سهولت امکان مدل کردن، مناسب‌تر دیدند. وسترو و همکاران (۲۰۱۵) نیز با بررسی جت‌های صفحه‌ای مستغرق مورب با شناوری منفی و مقایسه نتایج آزمایشگاهی خود با مطالعات پیشین مشاهده نمودند که بیشینه ارتفاع صعود سیال در جت‌های صفحه‌ای مورب با زاویه ۴۵ درجه کمتر از جت‌های دایره‌ای می‌باشد. بر اساس آنچه که در مروری بر منابع گذشت، میزان انتشار و گسترش عرضی جریان غلیظ پارامتر مهمی است که می‌تواند نشان‌دهنده شرایط رقیق‌شدگی آن در محیط پذیرنده باشد. از آنجا که

آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه فلومی به طول ۳/۲ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۹ متر بود که از آب شرب شهری تا ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر پر می‌گردید. تخلیه‌کننده سطحی مورد مطالعه کانال مستطیلی با عرض کف ۶ سانتی‌متر بود که در چهار زاویه همگرایی ۱۲/۵، ۲۵، ۴۵ و ۹۰ درجه و سه شیب متفاوت صفر، ۴ و ۸ درصد پس از تنظیم شرایط تخلیه، سیال جت را تماس بر سطح محیط پذیرنده تخلیه می‌نمود. سیال جت مورد استفاده از طریق انحلال نمک در آب شرب مهیا می‌گردید که برای سه غلظت مختلف ۵، ۱۵ و ۴۵ گرم بر لیتر فراهم می‌شد. به‌منظور آشکارسازی منحنی پایین-افتادگی جریان جت تخلیه‌شونده در محیط پذیرنده از ماده‌ای رنگی استفاده شد؛ به‌گونه‌ای که کل سیال جت با استفاده از این ماده که اثری در تغییر میزان دانسیته و یا غلظت آن نداشت، رنگی می‌گردید. پس از تهیه سیال جت و تنظیم دبی جریان، کانال تخلیه با زاویه همگرایی مورد نظر و در شیب تنظیم شده از طریق پایه بر روی فلوم مستقر می‌گردید. برای اندازه‌گیری دبی سیال جت از یک دبی‌سنج الکترومغناطیس با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه استفاده شد. پس از تخلیه سیال جت در محیط پذیرنده تمامی مراحل آزمایش از طریق دوربین فیلم-برداری با سرعت ۵۰ فریم بر ثانیه ثبت گردید. داده‌های مربوط به آزمایش‌ها با استفاده از خطکش‌های نصب شده بر کاغذهای شفاف ترانس‌پرانت که با فواصل مشخصی بر دیواره‌های فلوم که از جنس پلکسی‌گلاس بودند، برداشت شدند. مناسب‌ترین موقعیت این خط-کش‌ها پس از اجرای چندین آزمایش تعیین گردید. از طرفی برای افزایش دقت برداشت‌ها، از یک سیستم مش-بندی که به وضوح در فیلم‌برداری مشخص است، استفاده شد. بیشینه فاصله نقاط شبکه مش از یکدیگر ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

با استفاده از تحلیل ابعادی بین پارامترهای فوق روابط بدون بعد زیر برای این پدیده استخراج شد:

$$f\left(S, A, \beta_z, \frac{y}{B}, \frac{b}{H}, \frac{U_{0j}}{\sqrt{gy}}, \frac{U_{0j}}{\sqrt{(\Delta\rho/\rho_a)gy}}, \frac{\rho_j U_{0j} y}{\mu_j}\right) = 0 \quad [2]$$

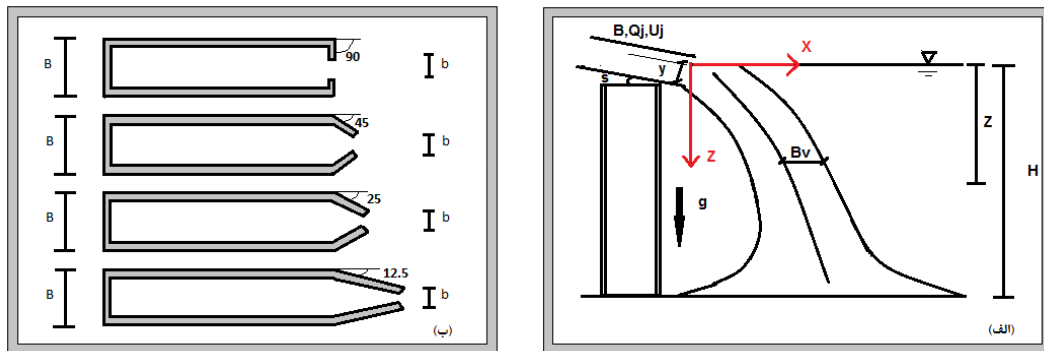
در رابطه ۲ پارامتر چهارم نسبت عمق جریان جت به عرض کانال، پارامتر پنجم نسبت عرض کانال تخلیه در محل خروج به عمق سیال پذیرنده، پارامتر ششم عدد فرود جریان تخلیه‌شونده، پارامتر هفتم عدد فرود چگال و پارامتر هشتم عدد رینولدز جریان تخلیه‌شونده می‌باشد. از آن جا که اثر عمق جریان در کانال مستطیلی، y ، در سایر پارامترها وارد شده است، در تحلیل ابعادی از اثر مستقیم آن صرف‌نظر گردید. پارامتر b/H حاصل ترکیب دو پارامتر b/y و H/y می‌باشد که به دلیل ثابت بودن مقدار این پارامتر در تمام آزمایش‌ها از اعمال اثر آن صرف‌نظر گردید. همچنین، قابل ذکر است که به علت قرارگیری عدد رینولدز جریان جت در محدوده جریان متلاطم، از اثر عدد رینولدز صرف‌نظر شد. کمینه مقدار رینولدز مشاهده شده در آزمایش‌های این تحقیق ۲۲۰۰ بود، بر این اساس می‌توان نوشت:

$$\beta_z = f(Fr, Fr_d, S, A) \quad [3]$$

برنامه‌ریزی آزمایش‌ها به گونه‌ای انجام شد که کانال مستطیلی دارای عرض ثابت برابر با ۶ سانتی‌متر باشد. از طرفی کلیه آزمایش‌ها در چهار زاویه همگرایی، سه شیب، سه دبی و سه غلظت متفاوت انجام شد. جدول ۱ متغیرهای تحقیق حاضر را نمایش می‌دهد.

مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران انجام گردید. مدل



شکل ۱- (الف) مسیر حرکت سیال جت در تخلیه سطحی و پارامترهای مربوطه (ب) کانال‌های تخلیه‌کننده سیال جت.

جدول ۱- متغیرهای مورد آزمایش در تحقیق حاضر.

غلظت (gr L^{-1})	دبی (L s^{-1})	شیب (m m^{-1})	زاویه‌ی همگرایی (درجه)
۵	۰/۰۴۲	۰	۱۲/۵
۱۵	۰/۰۸	۴	۲۵
۴۵	۰/۱۰۵	۸	۴۵
			۹۰

همگرایی کانال تخلیه و عدد فرود چگال بر ضریب انتشار عمقی در دو غلظت ۱۵ و ۴۵ گرم بر لیتر نشان داده شده است. بدین‌منظور داده‌های آزمایشگاهی در شرایط شیب ثابت صفر و دبی ۰/۰۴۲ لیتر بر ثانیه مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۳ نیز تأثیر شیب کانال تخلیه و عدد فرود چگال بر ضریب انتشار عمقی در دو غلظت ۱۵ و ۴۵ گرم بر لیتر نشان داده شده است. تأثیر شیب نیز در شرایطی که زاویه همگرایی کانال تخلیه ثابت و برابر ۲۵ درجه و دبی ۰/۰۴۲ لیتر بر ثانیه می‌باشد، آورده شده است.

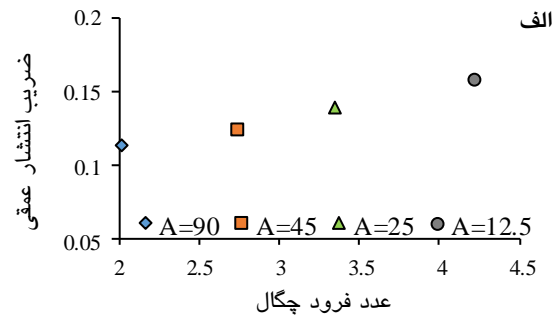
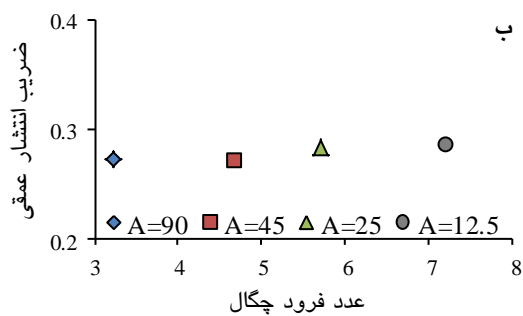
با توجه به داده‌های ارائه شده در جدول ۲ و شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌گردد که افزایش شیب و کاهش زاویه همگرایی کانال تخلیه‌کننده موجب افزایش ضریب انتشار عمقی می‌شود. همچنین افزایش اختلاف دانسیته بین سیال جت و سیال محیط پذیرنده موجب کاهش ضریب انتشار عمقی می‌گردد.

نتایج و بحث

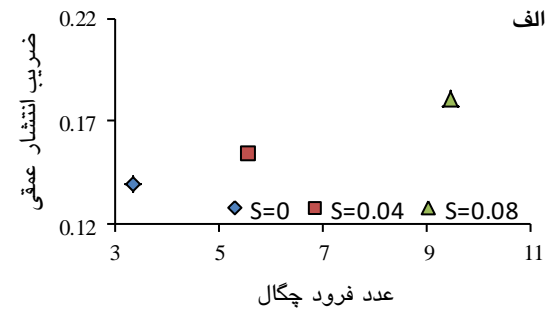
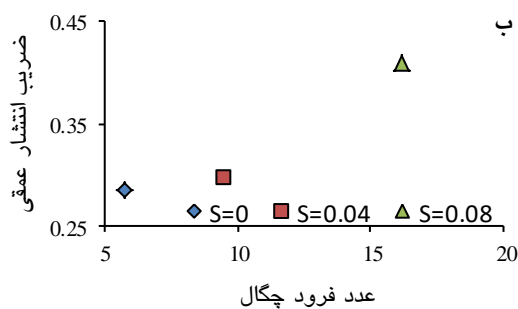
اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در جت‌های صفحه‌ای توسط محققانی مانند آلبرتسون و همکاران (۱۹۵۰)، میلر و کامینگز (۱۹۵۷) و برادبری (۱۹۶۵) مشخص نمود که پخشیدگی جت به‌صورت خطی با آهنگ $\frac{db}{dx} = 0.1$ رشد می‌نماید. با در نظر گرفتن رابطه $b = \beta_G x$ ، مقدار β_G (آهنگ پخشیدگی جریان جت) در این مطالعات برآورد گردید. در این مطالعه نیز با در نظر گرفتن حد بالایی مرز حرکتی جریان جت، عرض پخشیدگی جریان قابل محاسبه است. به این ترتیب طبق رابطه $B_v = \beta_z Z$ مقدار β_z که ضریب انتشار عمقی تعریف شده است، محاسبه می‌شود. در این رابطه Z : فاصله از سطح آب محیط پذیرنده و B_v : نصف عرض پخشیدگی در هر مقطع Z است. در جدول ۲ داده‌های مربوط به ضریب انتشار عمقی در آزمایش‌های انجام شده برای دبی ثابت ۰/۰۸ لیتر بر ثانیه، غلظت‌های مختلف ۵، ۱۵ و ۴۵ گرم بر لیتر، سه شیب متفاوت صفر، ۴ و ۸ درصد و چهار زاویه همگرایی ۱۲/۵، ۲۵، ۴۵ و ۹۰ درجه آورده شده است. در شکل ۲ تأثیر زاویه

جدول ۲- داده‌های ضریب انتشار عمقی در جریان جت سطحی همگرا و محیط پذیرنده عمیق.

C=5 gr L ⁻¹				C=15 gr L ⁻¹				C=45 gr L ⁻¹			
S (m m ⁻¹)	A(°)	Q (L s ⁻¹)	β_z	S (m m ⁻¹)	A(°)	Q (L s ⁻¹)	β_z	S (m m ⁻¹)	A(°)	Q (L s ⁻¹)	β_z
۰	۹۰	-/۰.۸	۰/۴۴	۰	۹۰	-/۰.۸	۰/۲۸۸	۰	۹۰	-/۰.۸	۰/۱۳۳
-/۰.۴	۹۰	-/۰.۸	-/۰.۵۰۴	-/۰.۴	۹۰	-/۰.۸	-/۰.۳۲۳	-/۰.۴	۹۰	-/۰.۸	-/۰.۱۵۲
-/۰.۸	۹۰	-/۰.۸	-/۰.۵۴۴	-/۰.۸	۹۰	-/۰.۸	-/۰.۳۵۹	-/۰.۸	۹۰	-/۰.۸	-/۰.۱۷۳
-/۰.۸	۴۵	-/۰.۸	-/۰.۵۶۷	-/۰.۸	۴۵	-/۰.۸	-/۰.۳۶۸	-/۰.۸	۴۵	-/۰.۸	-/۰.۱۹۶
-/۰.۴	۴۵	-/۰.۸	-/۰.۵۱۱	-/۰.۴	۴۵	-/۰.۸	-/۰.۳۳۸	-/۰.۴	۴۵	-/۰.۸	-/۰.۱۵۹
۰	۴۵	-/۰.۸	-/۰.۴۵۱	۰	۴۵	-/۰.۸	-/۰.۲۹۸	۰	۴۵	-/۰.۸	-/۰.۱۴۷
۰	۲۵	-/۰.۸	-/۰.۴۷۹	۰	۲۵	-/۰.۸	-/۰.۳۰۸	۰	۲۵	-/۰.۸	-/۰.۱۵۶
-/۰.۴	۲۵	-/۰.۸	-/۰.۵۱۲	-/۰.۴	۲۵	-/۰.۸	-/۰.۳۴	-/۰.۴	۲۵	-/۰.۸	-/۰.۱۶۶
-/۰.۸	۲۵	-/۰.۸	-/۰.۵۹۳	-/۰.۸	۲۵	-/۰.۸	-/۰.۴۴۲	-/۰.۸	۲۵	-/۰.۸	-/۰.۲۱۴
-/۰.۸	۱۲/۵	-/۰.۸	-/۰.۶۱۲	-/۰.۸	۱۲/۵	-/۰.۸	-/۰.۴۸۳	-/۰.۸	۱۲/۵	-/۰.۸	-/۰.۲۳۱
-/۰.۴	۱۲/۵	-/۰.۸	-/۰.۵۱۶	-/۰.۴	۱۲/۵	-/۰.۸	-/۰.۴۵۲	-/۰.۴	۱۲/۵	-/۰.۸	-/۰.۱۸۲
۰	۱۲/۵	-/۰.۸	-/۰.۴۹۸	۰	۱۲/۵	-/۰.۸	-/۰.۴۰۴	۰	۱۲/۵	-/۰.۸	-/۰.۱۷



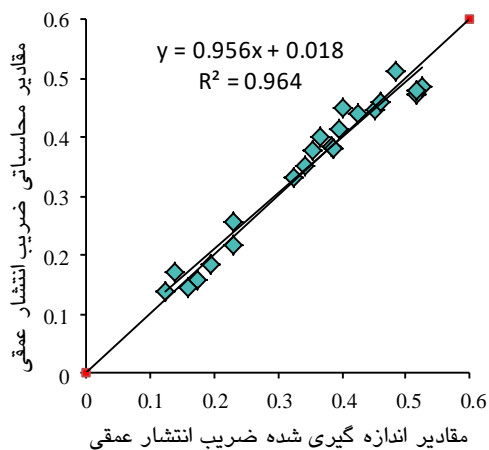
شکل ۲- تأثیر زاویه همگرایی کانال تخلیه بر ضریب انتشار عمقی (الف) غلظت ۴۵ گرم بر لیتر (ب) غلظت ۱۵ گرم بر لیتر.



شکل ۳- تأثیر شیب کانال تخلیه بر ضریب انتشار عمقی (الف) غلظت ۴۵ گرم بر لیتر (ب) غلظت ۱۵ گرم بر لیتر.

گردابه‌های کوچک می‌گردد. بر این اساس یک آشفتگی القائی در مرزهای پیرامون جت شکل می‌گیرد و در نتیجه کشش سیال پذیرنده به داخل مرزهای حرکتی را تخلیه‌شونده، پدیده انتشار ملکولی و پخشیدگی جریان رخ می‌دهد و مقدار ضریب انتشار عرضی جریان

با افزایش شیب کانال‌های تخلیه‌کننده و نیز کاهش زاویه همگرایی، مومنت اولیه و سرعت تخلیه جریان افزایش می‌یابد. این موضوع باعث ایجاد ناپایداری و وقوع به دنبال خواهد داشت. با ورود سیال محیطی از مرزهای خارجی به درون مرزهای حرکتی جریان



شکل ۴- مقادیر محاسباتی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده برای ضریب انتشار عمقی.

ضریب تبیین در این حالت نمایه‌ای از میزان دقت رابطه آماری می‌باشد.

مقایسه با سایر تحقیقات گذشته

با هدف تحلیل تأثیر زاویه همگرایی کانال تخلیه-کننده به‌عنوان یک متغیر هندسی مؤثر بر ضریب انتشار عمقی در شرایط تخلیه سطحی، نتایج مطالعه حاضر با داده‌های آزمایشگاهی عابسی و همکاران (۱۳۹۰) مقایسه گردید. لازم به ذکر است که هر دو تحقیق در شرایط تخلیه با شناوری منفی از کانال‌های مستطیلی در محیط پذیرنده عمیق صورت گرفت.

در شکل ۵ با محاسبه L_M که توسط عابسی و همکاران مقیاس طولی جت به پلوم معرفی شد و نرمال کردن تغییرات عرض جریان در امتداد مسیر حرکت (B_v) و عمق محیط پذیرنده (Z) نسبت به این پارامتر تأثیر همگرایی در کانال‌های تخلیه‌کننده مشاهده می‌گردد.

$$L_M = \frac{(U_0 Q_0)^{3/4}}{\left(\frac{\Delta \rho}{\rho_a} g Q_0\right)^{1/2}} \quad [5]$$

در رابطه ۵، U_0 : سرعت جریان خروجی از کانال تخلیه‌کننده، Q_0 : دبی جریان خروجی از کانال تخلیه-

افزایش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش غلظت جریان تخلیه‌شونده، اثرات آشفتگی‌های القا شده در مرزها با فاصله زمانی بیشتر به خط مرکزی جریان جت سطحی رسیده و انتشار ملکولی و در نتیجه پخشیدگی کمتری اتفاق می‌افتد و به دنبال آن ضریب انتشار کمتر خواهد شد.

در این مطالعه بر اساس نتایج آزمایش‌ها به-منظور مشاهده نحوه ارتباط ضریب انتشار عمقی و پارامترهای مؤثر بر آن با استفاده از نرم‌افزار SPSS یک رابطه آماری استخراج گردید. ضریب انتشار عمقی برای زاویه‌های همگرایی، شیب‌ها، دبی‌ها و غلظت‌های مختلف محاسبه و به‌عنوان تابعی از پارامترهای ذکر شده بررسی گردید. در این میان عدد فرود چگال که شامل حالت‌های مختلف دبی و غلظت می‌باشد به‌عنوان نماینده‌ای از این متغیرها در نظر گرفته شده است.

بنابراین روابط آماری مختلف مورد بررسی قرار گرفت و از میان آن‌ها، یک رابطه غیرخطی به‌عنوان بهترین رابطه به‌صورت زیر معرفی شد.

$$\beta_z = a \ln(Fr) + b \ln(Fr_a) + c(S)^2 + d(S) + e \ln(A) \quad [4]$$

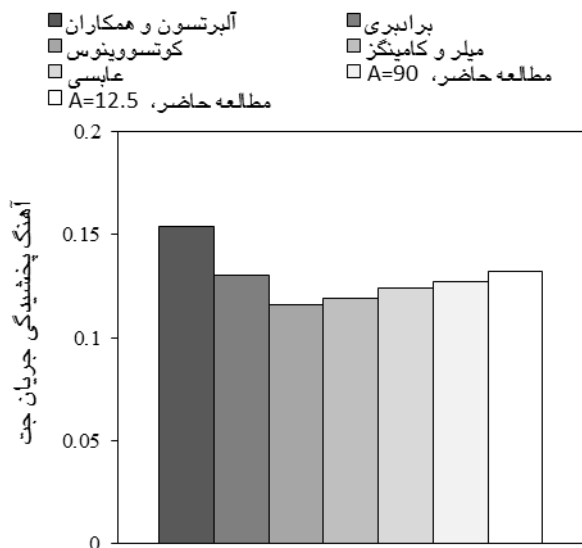
در جدول ۳ بهترین ضرایب رابطه به‌دست آمده که با استفاده از SPSS محاسبه گردید، ارائه شده است.

جدول ۳- ضرایب مربوط به مدل ضریب انتشار عمقی.

پارامتر	a	b	c	d	e
ضریب	-۰/۵۳۸	۰/۴۹	۹/۴۳۱	۰/۳۴۷	-۰/۰۷۲

رابطه آماری به‌دست آمده برای ۸۰ درصد داده-ها استخراج گردید و باقی‌مانده داده‌ها جهت برآورد دقت و صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفتند. با استفاده از رابطه آماری به‌دست آمده برای آزمایش‌های مختلف مقادیر ضریب انتشار عمقی محاسبه و در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده ترسیم گردید. شکل ۴ مقادیر محاسباتی برای این ضریب را در مقابل مقادیر اندازه-گیری شده نمایش می‌دهد.

توان رشد پخشیدگی جت را به صورت خطی با آهنگ $0/1$ تأیید نمود. اختلافات اندک مشاهده شده در مقادیر به دست آمده نیز می‌تواند ناشی از خصوصیات نازل، سیال تخلیه‌شونده و سیال پذیرنده باشد.



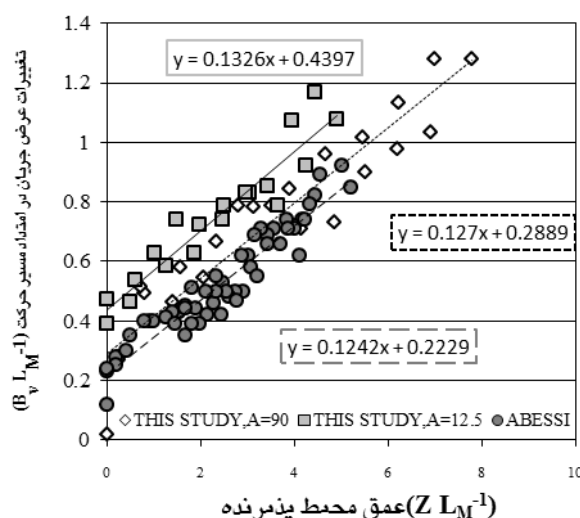
شکل ۶- مقایسه نتایج ضرایب انتشار مطالعه حاضر و مطالعات پیشین.

نتیجه‌گیری کلی

در مطالعه حاضر، با مدل سازی فرآیند تخلیه در آزمایشگاه و روندیابی تصاویر به دست آمده، ضریب انتشار عمقی در تخلیه سطحی جریان چگال از کانال-های مستطیلی همگرا و شیب‌دار در محیط‌های ساکن و عمیق مورد بررسی قرار گرفت. پس از تحلیل ابعادی و ترسیم نمودارهای بدون بعد تأثیر متغیرهای شیب و زاویه همگرایی کانال تخلیه و نیز غلظت سیال جت بر ضریب انتشار مشاهده گردید. با افزایش شیب و کاهش زاویه همگرایی کانال تخلیه‌کننده، مقدار ضریب انتشار عمقی افزایش می‌یابد. افزایش غلظت سیال تخلیه‌شونده، نیز موجب کاهش مقدار ضریب انتشار عمقی می‌گردد. با مشخص شدن پارامترهای مؤثر بر ضریب انتشار عمقی معادله‌ای با $R^2 = 0.88$ ارتباط این ضریب و پارامترهای وابسته را برای تمامی داده‌ها ارائه نمود. در نهایت با بررسی مقایسه‌ای نتایج به دست آمده و نتایج آزمایشگاهی مربوط به کانال تخلیه‌کننده مستطیلی

کننده، g : شتاب ثقل، ρ_a : جرم حجمی سیال محیط پذیرنده و $\Delta\rho$: اختلاف دانسیته سیال تخلیه‌شونده و محیط پذیرنده می‌باشد.

مطابق شکل ۵ مشاهده می‌گردد که الگوی تغییرات سطحی مربوط به کانال‌های همگرا مشابه کانال‌های مستطیلی ساده است و اختلاف مشاهده شده در شیب نمودارها ناشی از تأثیر زاویه همگرایی می‌باشد، به گونه‌ای که با در نظر گرفتن همگرایی در کانال‌های تخلیه‌کننده میزان پخشیدگی عرضی جریان در عمق محیط پذیرنده و ضریب انتشار عمقی افزایش می‌یابد. کاهش زاویه همگرایی نیز افزایش میزان شیب نمودار، افزایش میزان پخشیدگی عرضی و افزایش ضریب انتشار عمقی را در پی خواهد داشت.



شکل ۵- مقایسه داده‌های مطالعه حاضر و مطالعات عابسی (۱۳۹۰).

نتایج مقایسه آهنگ پخشیدگی جریان جت مربوط به مطالعات محققان پیشین و مطالعه حاضر نیز در شرایط تخلیه مستغرق و سطحی در شکل ۶ ارائه گردیده است. در این شکل نتایج مطالعه آلبرتسون و همکاران (۱۹۵۰)، میلر و کامینگز (۱۹۵۷)، برادبری (۱۹۶۵) و کوتسوینوس (۱۹۷۶) در زمینه تخلیه‌کننده-های مستغرق و مطالعه عابسی (۱۳۹۰) در زمینه تخلیه-کننده‌های سطحی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد نوع شرایط تخلیه تأثیر چندانی بر تغییر مقدار این پارامتر ندارد. به گونه‌ای که مطابق نظر محققان پیشین با تقریب نسبتاً خوبی می-

گونه‌ای که مطابق نظر محققان پیشین می‌توان رشد پخشیدگی جت را به صورت خطی با آهنگ $0/1$ تأیید نمود.

سطحی، تأثیر همگرایی کانال تخلیه بر افزایش مقدار پخشیدگی جریان مشاهده گردید. هم‌چنین به نظر می‌رسد که نوع شرایط تخلیه به صورت مستغرق یا سطحی تأثیر چندانی بر تغییر مقدار پخشیدگی جریان ندارد. به-

منابع مورد استفاده

- Abessi O, Saeedi M, Hajizadeh-Zaker N and Kheirkhah H, 2010. Flow characterization dilution in surface discharge of negatively buoyant flow in stagnant and non-stratified water bodies. *Journal of Water and Wastewater* 4: 71-82.
- Abessi O, Saeedi M, Hajizadeh-Zaker N and Kheirkhah-Gildeh H, 2011. Waste field characteristics, ultimate mixing and dilution in surface discharge of dense jets into stagnant water bodies. *Journal of Water and Wastewater* 1: 2-14.
- Ahadian J and Musavi-Jahromi SH, 2009. Effects of jet hydraulic properties on geometry of trajectory in circular buoyant jets in the static ambient flow. *Journal of Applied Sciences* 9(21): 3843-3849.
- Albertson ML, Dai YB, Jensen RA and Rouse H, 1950. Diffusion of submerged jets. *Trans* 115: 639-644.
- Bleninger T and Jirka GH, 2008. Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants. *Desalination* 221: 585-597.
- Bleninger T, Neipelt A and Jirka GH, 2009. Desalination plant discharge calculator. Clean water and energy Conference. May 17-20 Baden-Baden Germany.
- Bradbury LJS, 1965. The structure of a self-preserving turbulent plant jet. *Journal of Fluid Mechanic* 23: 31-64.
- Davidson MJ and Wang HJ, 2002. Strongly advected jet in a coflow. *Journal of Hydraulic Engineering* 128(8): 742-752.
- Del Ben JV, Jirka GH and Largier J, 1994. Ocean brine disposal. *Journal of Hydraulic Engineering* 97(1-3): 365-372.
- Gustaffson B and Larsen I, 1970. Jet diffusion in stagnant stratified waters. *Journal of Water Research* 4:353-361.
- Jirka GH, 2004. Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part I: Single round jet. *Environmental Fluid Mechanics* 4: 1-56.
- Kassem A, Imran J and Khan J, 2003. Three-Dimensional modelling of negatively buoyant flow in diverging channels. *Journal of Hydraulic Engineering* 129(12): 936-947.
- Kotsovinos NE, 1976. A note on the spreading rate and virtual origin of a plane turbulent jet. *Journal of Fluid Mechanic* 77: 305-311.
- Manabendra P, Anoop D and Anupam D, 2008. An investigation of turbulent rectangular jet discharged into a narrow channel weak crossflow. *Journal of Hydrodynamics* 20: 154-163.
- Miller D and Comings E, 1957. Static pressure distribution in the free turbulent jet. *Journal of Fluid Mechanic* (3): 1-16.
- Nash JD and Jirka GH, 1996. Buoyant surface discharges into unsteady ambient flow. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 24: 75-84.
- Ogino F and Katai K, 1994. Buoyancy effect on three-dimensional turbulent surface jet. *Journal of Heat Mass Transfer* 37(1): 281-289.
- Palomar P, Lara LJ and Rodrigo M and Alvarez A, 2012. Near field brine discharge modelling. Part 1: Analysis of commercial tools. *Desalination* 290: 14-27.
- Shahrabani DM and Ditmars JD, 1976. Negatively buoyant slot jets. *Coastal Engineering* 29: 2976-2993.
- Voustrou MK, Yannopoulos PC and Christodoulou GC, 2015. Experiments on plane negatively buoyant jets. *Proceedings of the 36th JAHR World Congress* 28 June- 3 July, Hague, Netherlands.