

مدل آزمایشگاهی جت ثقلی منفی در جریان جانبی

هومن حاجی کندی^{۱*}

شايان برجسته ملکي^۲

چکیده

امروزه مکانیسم جت ثقلی منفی جهت رقیق‌سازی سریع آلاینده‌های زیست‌محیطی محلول در آب مانند فلزات سمی یا نمک حاصل از تأسیسات آب‌شیرین کن، یک راهکار مؤثر محسوب می‌شود. نیروی مومنتوム اولیه جت و نیروی شناوری ناشی از اختلاف وزن مخصوص آب و محلول آلاینده، به ورود سیال محیطی به داخل جت و رقیق‌سازی آن کمک می‌کنند. این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی جت ثقلی منفی مایل در اعداد فروید انسی متريک کوچک، بین $۱۱/۳۵$ و $۳/۴۴$ به داخل سیال دارای جریان می‌پردازد. درمجموع ۳۶ آزمایش برای زوایای تخلیه، ۴۵ ، ۳۰ ، ۷۵ ، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق تحت سه نسبت سرعت جت به سرعت جریان جانبی مختلف، بین $۶/۳۳$ و $۲۰/۹۲$ انجام شدند. متغیرها شامل سه مقیاس هندسی مربوط به مسیر انتشار جت شامل عمق نفوذ بیشینه، فاصله افقی نازل تا نقطه نفوذ بیشینه و فاصله افقی نازل تا نقطه برخورد هستند. روابط تجربی برای تعیین مقیاس‌های هندسی برحسب عدد فروید دنسی متريک جت، نسبت سرعت جت به سرعت جریان جانبی و زاویه جت نسبت به افق ارائه شده‌اند. این روابط برای طراحی تخلیه کننده‌ها در آب‌های کم‌عمق مورد استفاده قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی

jet, negative buoyancy, angle of attack, Froude number, discharge coefficient.

۱*. استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، دانشکده فنی و مهندسی، h_hajikandi@iauctb.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری، گروه مکانیک سیالات زیست محیطی و صنعتی، دانشگاه تریست، ایتالیا.

می‌کنند. فرآیند اختلاط در جت ثقلی منفی در دو فاز انجام می‌شود. فاز اول شامل اتفاقاتی است که اصطلاحاً در میدان نزدیک رخ می‌دهند. این ناحیه، محدوده نازل تا ارتفاع صعود بیشینه را در بر می‌گیرد. اختلاط در این ناحیه تحت تأثیر خصوصیات اولیه جت شامل شدت مومنتوم، شدت شناوری و تابع هندسه نازل است. فاز دوم که از نقطه ارتفاع صعود بیشینه شروع می‌شود و تا فاصله‌ای معادل چند صد برابر قطر نازل در پایین‌دست امتداد می‌یابد، ناحیه‌ای است که در آن خصوصیات جریان محیطی غالب است و نحوه انتشار تحت تأثیر مشخصات اولیه قرار ندارد. این ناحیه اصطلاحاً ناحیه میدان دور نامیده می‌شود.

مطالعه جت‌های ثقلی منفی اولین بار توسط ترنر^۲ در سال ۱۹۶۶ انجام شد. او یک مدل تئوریکی ساده بر اساس تحلیل مقیاس‌های طولی و آنالیز ابعادی پیش‌بینی رفتار جت ثقلی منفی عمودی در سیال ساکن ارائه نمود. آبراهام^۳ (۱۹۶۷) جت ثقلی منفی عمودی در سیال ساکن را به طور آزمایشگاهی بررسی نمود و یک مدل تحلیلی برای تعیین ارتفاع صعود بیشینه ارائه نمود. فن و بروکر^۴ در سال ۱۹۶۸ نیز مسیر حرکت جت را به صورت آزمایشگاهی مطالعه نمودند و نشان دادند که ارتفاع صعود بیشینه تابع عدد فروید انسی متريک جت و قطر جت خروجی است. جيمز^۵ و همکاران (۱۹۸۳) مطالعات آزمایشگاهی بر روی جت ثقلی منفی در سیال محیطی ساکن انجام دادند و نشان دادند که علاوه بر عدد فروید انسی متريک، هندسه نازل نیز پارامتر مهمی است. زانگ و بادور^۶ (۱۹۹۸) عمق نفوذ بیشینه جت ثقلی عمودی در سیال ساکن را بررسی کردند و نشان دادند که خصوصیات جریان تابع دو پارامتر شدت مومنتوم و شدت شناوری است. این پارامترها اعداد بدون بعدی هستند که به ترتیب معرف شدت نیروی مومنتوم و شناوری وارد بر جت هستند. بینز^۷ و همکاران (۱۹۹۰) به طور آزمایشگاهی حرکت جت عمودی تزریق شده در سیال ساکن را مطالعه نمودند و جریان چگال در بستر کanal را اندازه‌گیری کردند.

عیب اصلی جت عمودی در سیال ساکن این است که جت بعد از رسیدن به ارتفاع صعود بیشینه، بر روی خودش می‌افتد. این

مقدمه

امروزه تخلیه پساب‌های صنعتی به داخل رودخانه‌ها و اقیانوس‌ها یک روش متداول محسوب می‌شود. این نوع مواد معمولاً از ترکیبات شیمیایی تشکیل شده‌اند که برای محیط‌زیست مضر محسوب می‌شوند. آب‌شور حاصل از یک میدان نفتی دارای شوری حدود ppt ۱۰۰ میلیون گالن در روز دارای غلظت حدود ppt ۶۰ تحت دبی ۰/۶ مترمکعب در ثانیه است (زانگ و استولزن باخ، ۱۹۷۹). علاوه بر شوری، مواد سمی دیگری مانند فلزات مس، روی، سرب، آرسنیک، نیکل و کادمیوم نیز در این پساب‌ها مشاهده شده‌اند. به دلیل غلظت بالای این مواد، توجه ویژه‌ای در پرورش‌های عملی لازم است. یک راه حل ساده و مؤثر برای تخلیه این مواد به داخل محیط‌های آبی استفاده از مکانیسم جت و ورود سریع سیال محیطی به داخل آلاتینده جهت ریقیق‌سازی آن است. شدت ریقیق‌سازی آلاتینده تابعی از شرایط هیدرولیکی اولیه جت و سیال محیطی و زاویه تخلیه جت نسبت به سیال محیطی است. اهمیت تحقیق بر روی این موضوع به‌ویژه در ایران که دارای رودخانه‌های مهمی چون کرخه و کارون است و هر دو با مشکلات زیستمحیطی مواجه هستند، روشن است. مطالعه جت ثقلی منفی در تخلیه آب‌شور و پساب‌های صنعتی به داخل اقیانوس‌ها و رودخانه‌ها اهمیت دارد. این نوع تخلیه-کننده‌ها عموماً به صورت نازل‌های چندتایی (چند ردیف) طراحی می‌شوند. به طور کلی جت ثقلی و ازهای است که برای اشاره به تخلیه یک سیال به داخل سیالی دیگر، با چگالی متفاوت، تحت اثر نیروی مومنتوم به کار می‌رود. حالت تخلیه یک نوع سیال داخل سیالی سبک‌تر و از سطح به کف و یا تخلیه به داخل سیال سنگین‌تر از کف به سطح اصطلاحاً جت ثقلی مثبت نامیده می‌شود. در این نوع جت نیروی مومنتوم اولیه جریان و نیروی شناوری هر دو هم‌راستا هستند. در نقطه مقابل، حالت تخلیه یک سیال سنگین به داخل سیال سبک‌تر از کف به سطح و یا تخلیه سیال سبک به داخل سیال سنگین‌تر از سطح به کف، جت ثقلی منفی است. در این نوع جت نیروی مومنتوم و شناوری در خلاف جهت هم‌دیگر عمل

^۶ Zhang & Baddour
^۷ Baines

^۱ Tong & Stolzenbach
^۲ Turner
^۳ Abraham
^۴ Fan & Brooks
^۵ James

جريان جانبی، رقیق شدگی جت نیز افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین به اهمیت اغتشاش جریان جانبی در میزان رقیق شدگی جریان در ناحیه میدان دور اشاره نمودند. اندرسون^۸ و همکاران (۱۹۷۳) آزمایش‌هایی روی جت عمودی، ۴۵ و ۶۰ درجه همراه با جریان جانبی هم‌راستا با محور طولی جت انحراف دادند. اکثر آزمایش‌های آن‌ها در سرعت‌های بالا صورت گرفت؛ یعنی در محدوده اعداد فروید نزدیک ۸ برای جریان جانبی و اعداد فروید انسی متريک بالاتر از ۲۰ برای جت. آن‌ها از مدل‌های انتگرالی برای شبیه‌سازی استفاده کردند و نتیجه گرفتند که این مدل‌ها از دقت کافی برای شبیه‌سازی مسیر حرکت جت برخوردار نیستند. چو^۹ (۱۹۷۵) یک مدل اختلاط برای جت عمودی و مایل تحت زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه در صفحه‌ای عمود بر محور جریان جانبی ارائه نمود. او فرض کرد که مؤلفه افقی سرعت انتشار تقریباً با سرعت جریان جانبی یکسان باشد. این فرض زمانی درست است که هم سرعت جت و هم سرعت جریان جانبی زیاد باشند. تانگ و استولزنباخ (۱۹۷۹) انتشار جت ثقلی منفی تحت زوایای ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه را در جریان جانبی برای اعداد فروید انسی متريک بین ۱۱/۷ و ۲۱/۲ و نسبت‌های سرعت ۱۰/۸۶ و ۱۰۰ مطالعه نمودند. رابرتس و تامز^{۱۰} (۱۹۸۷) مشخصات جت ثقلی منفی در جریان جانبی با سرعت‌های متفاوت را به طور آزمایشگاهی مطالعه نمودند. آن‌ها جت مایل با زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق را در نظر گرفتند و ارتفاع صعود بیشینه و رقیق شدگی در نقاط مختلف را اندازه گرفتند. دامنه اعداد فروید انسی متريک به کاررفته در آزمایش‌ها آن‌ها بین ۲۴/۵ و ۲۵/۸ و نسبت سرعت‌ها (سرعت جت به سرعت جریان محیطی) بین ۱۳ تا ۱۱۳ بود. آن‌ها یک مقیاس طولی بدون بعد بر حسب عدد فروید انسی متريک جت و یک عدد فروید انسی متريک دیگر بر حسب سرعت جریان جانبی که قبلًاً توسط تانگ و استولزنباخ (۱۹۷۹) معرفی شده بود، تعريف نمودند. گانگر^{۱۱} و همکاران (۲۰۰۹) رفتار جت اغتشاشی چگال در جریان جانبی را بررسی نمودند. اعداد فروید انسی متريک به کاررفته در آزمایش‌های آن‌ها بین ۱۹ و ۲۳/۷ و

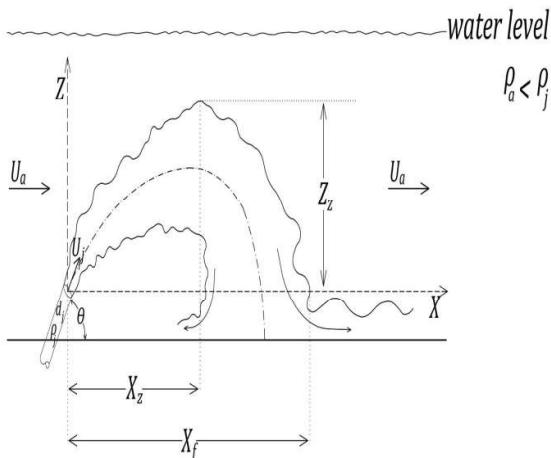
پدیده باعث افزایش غلظت می‌شود. فراری و کوورزوی^۱ (۲۰۱۰) فرآیند نفوذ مجدد جت در خودش را بررسی کردند و نشان دادند که برای جت مایل با زاویه بزرگ‌تر از ۷۵ درجه، در سیال ساکن، افزایش غلظت ناشی از نفوذ مجدد وجود دارد. قدیمی‌ترین مطالعه بر روی جت مایل توسط زیتون^۲ و همکاران (۱۹۷۰) انجام شد. آن‌ها زوایای ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به راستای افقی را برای تخلیه جت به سیال ساکن در نظر گرفتند و نتیجه گرفتند که زاویه ۶۰ درجه منجر به طولانی‌ترین خط مسیر خواهد شد. بلومفیلد و کر^۳ (۲۰۰۲) نتایج آزمایشگاهی تزریق دود به داخل سیال همگن و نیز سیال با چگالی لایه‌لایه تحت زوایای ۳۰ درجه تا ۹۰ درجه را تحلیل نمودند و نشان دادند که زاویه ۸۰ درجه بالاترین ارتفاع صعود را می‌دهد. آن‌ها همچنین نشان دادند که نتایج حاصل با داده‌های به دست آمده توسط بیز و همکاران (۱۹۹۰) مطابقت دارد. سیپولینا^۴ و همکاران (۲۰۰۵) خصوصیات هندسی جت مایل تحت زوایای ۴۵، ۳۰ و ۶۰ درجه را اندازه گرفتند. کیکرت و همکاران (۲۰۰۷) نیز مطالعه مشابهی برای زوایای ۵ تا ۷۵ درجه انجام دادند. کیکرت^۵ (۲۰۰۶) غلظت سیال در نقاط مختلف جت را اندازه گیری کرد. پاپاکونستانسیس^۶ و همکاران (۲۰۰۷) ارتفاع صعود اولیه و نهایی جت را در زوایای ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه اندازه گرفتند. پاپاکونستانسیس و همکاران (۲۰۱۱) شش زاویه تخلیه بین ۴۵ تا ۹۰ درجه را بررسی کردند و مسیر حرکت جت را به صورت تجربی بیان نمودند. بلومفیلد و کر^۷ (۲۰۰۰) یک مدل تئوری برای جت متقاضن در محیط همگن و نیز لایه‌لایه ارائه دادند که قابلیت تخمین سیال تداخلی به داخل جت را نیز داشت. جت چگال در جریان جانبی نیز مورد توجه برخی از پژوهشگران بوده است. پینسینس و لیست^۸ (۱۹۷۳) جت مایل تحت زوایه ۶۰ درجه در یک سیال دارای جریان را مطالعه نمودند. آزمایش‌های آن‌ها در محدوده عدد فروید انسی متريک برابر ۵۰ به ازای سه سرعت جریان جانبی ۰/۰۶، ۰/۰۹ و ۰/۲۳ متر بر ثانیه که سه نسبت سرعت جت به جریان جانبی ۳۷، ۲۵ و ۱۰ را منجر می‌شد، انجام گرفت. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش سرعت

⁷ Pincince & List⁸ Anderson⁹ Chu¹⁰ Robberts & Toms¹¹ Gunger¹ Ferrari & Querzoli² Zeitun³ Bloomfield & Kerr⁴ Cipollina⁵ Kikkert⁶ Papakonstantis

تحلیل داده‌های حاصل نشان می‌دهد که در محدوده شرایط اولیه به کار رفته در این آزمایش‌ها، خصوصیات هندسی جت با پارامتر بدون بعد $R^{5/0} Fr_d$ به صورت خطی متناسب است.

هندسه مسئله مورد مطالعه

شکل (۱) هندسه جت ثقلی منفی و پارامترهای طولی موردنظر را نشان می‌دهد. ماده آلاینده با چگالی ρ_j و سیال محيطی با چگالی ρ_a ، قطر نازل d_j و زاویه آن با θ نشان داده شده‌اند. مقیاس‌های طولی بر روی یک سیستم مختصات صحده‌اند. پارامترهای X_z و Z_z مختصات نقطه صعود بیشینه و شده‌اند. فاصله طولی نقطه برخورد تا محل نازل است که بر حسب X_f فاصله افقی مرز بالادست جت در تراز نازل سنجیده می‌شود.



شکل (۱): هندسه جت مورد مطالعه به‌طور شماتیک

با در نظر رابطه (۲) و به کار بردن سه مقیاس طولی موردنظر می‌توان هندسه جت را به صورت رابطه (۵) تعریف کرد:

$$D \left(\frac{Z}{d_j} \right)^2 / D(Fr_d^a R^b) = C_1 \quad (5)$$

$$D \left(\frac{X_z}{d_j} \right)^2 / D(Fr_d^a R^b) = C_2 \quad (6)$$

$$D \left(\frac{X_f}{d_j} \right)^2 / D(Fr_d^a R^b) = C_3 \quad (7)$$

که برای $i=1,2,3$ C_i ضرایب وابسته به زاویه نازل و عامل‌گر مشتق. در سیال محيطی ساکن U_a در تحلیل ابعادی وارد نمی‌شود و درنتیجه R از لیست پارامترهای مؤثر حذف می‌شود. پاپا کونستانسیس و همکاران (۲۰۱۱) مقیاس‌های طولی در جت ثقلی منفی در سیال ساکن را بر حسب عدد فروید انسی متريک جت بیان کردند. هدف اصلی در این تحقیق پیدا کردن مقادیر ثابت‌های به کار رفته در معادلات (۵) تا (۷) است.

نسبت سرعت‌ها بین $27/45$ و $97/5$ بودند. آن‌ها نشان دادند که در سرعت‌های کم مسیر حرکت جت عمودی، به صورت عمودی باقی می‌ماند. در حالی که در سرعت‌های جانبی بالا، جت برگشتی (ریزشی) به صورت مورب جریان می‌یابد.

همان‌طور که اشاره شد، اکثر مطالعات قبلی محدود به بررسی جت تحت تعداد محدودی زاویه بین 45° تا 90° درجه، از کف کanal به سمت سطح جریان در سیال ساکن و برخی مطالعات محدود نیز به بررسی انتشار جت در جریان جانبی تحت اعداد فروید انسی متريک بالا پرداختند. در این مطالعات نسبت سرعت جت به سرعت جریان جانبی، بالا بود به طوری که اثر مومنتوم جریان جانبی بر روی انتشار جت در ناحیه میدان نزدیک کاهش می‌یافتد.

این تحقیق به نتایج مطالعات آزمایشگاهی بر روی جت ثقلی مایل تحت شش زاویه 30° , 45° , 60° , 75° , 90° و 115° درجه تحت اثر متقابل مومنتوم اولیه جت و جریان جانبی تخصیص یافته است. نوآوری موجود در این تحقیق مربوط به محدوده اعداد فروید انسی متريک کم (کوچک‌تر از 20°) در مقایسه با مقالات قبلی است. کاربرد عملی این نوع جت می‌تواند در طراحی تخلیه کننده‌های پساب یا آبنمک حاصل از کارخانه‌های آب‌شیرین‌کن در آب‌های کم‌عمق و رودخانه‌ها تحت اعداد فروید کوچک باشد.

مواد و روش‌ها

پارامترهای مؤثر در انتشار جت عبارت‌اند از:

$$F(L, U_a, U_j, \rho_a, \rho_j, d_j, \theta, g, \mu) = 0 \quad (1)$$

که در آن L = مقیاس طولی، U_j و U_a = سرعت‌های جت و جریان جانبی و ρ_j و ρ_a = چگالی جت و سیال محيطی، θ = زاویه نازل نسبت به افق و d_j = قطر جت در مقطع خروجی از نازل و g و μ = شتاب ثقل و لزجت دینامیکی سیال محيطی. به کمک تحلیل ابعادی رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\frac{L}{d_j} = G(Fr_d R, \theta) \quad (2)$$

که در آن Fr_d = عدد فروید انسی متريک جت و R = نسبت سرعت‌ها که به ترتیب از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند:

$$Fr_d = \frac{U_j}{\sqrt{gd_j \frac{\rho_j - \rho_a}{\rho_a}}} \quad (3)$$

$$R = \frac{U_j}{U_a} \quad (4)$$

مدل آزمایشگاهی

روش کار

شش زاویه تخلیه از 30° تا 115° درجه و در مجموع ۳۶ آزمایش برای اعداد فرود انسی متريک بين $2/44$ تا $11/34$ و $20/92$ در نظر گرفته شدند. سرعت نسبت‌های سرعت $3/33$ و $6/36$ در $1/23$ تا $1/62$ متر بر ثانیه و جت در آزمایش‌های مختلف بين $5/8$ تا 25 سانتيمتر بر ثانیه بودند. سرعت جریان جانبی بين $5/8$ تا $10/24$ در 576 پیکسل و سرعت تصویربرداری 25 فریم در ثانیه ثبت گردید. دوربین در فاصله یک متری دیواره فلوم نصب شده بود. بعد از هر آزمایش خصوصیات هندسی جت از متوسط گیری از چند فریم تخمین زده شد. سپس به کمک نرمافزار اتوکد^۱ فواصل محاسبه شدند.

نتایج

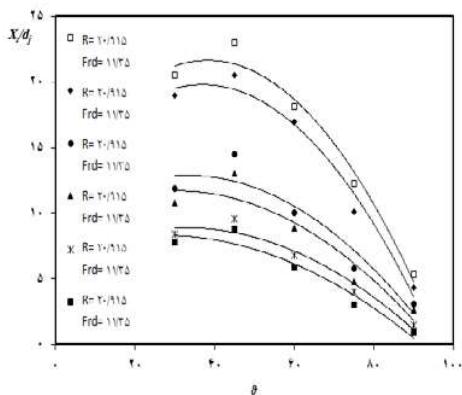
اثر زاویه

شکل (۳) تغییرات ارتفاع صعود نهایی با زاویه نازل را نشان می‌دهد. ارتفاع صعود بیشینه در حالت نازل عمودی رخ می‌دهد. مطالعات قبلی روی جت شلی منفی در سیال ساکن نشان می‌دهند که ارتفاع صعود نهایی در حالت زاویه 80° درجه به بیشینه می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد (بلومفیلد و کر^(۲)، پاپاکونستانسیس و همکاران^(۳)). علت این کاهش در ارتفاع صعود نهایی در جت عمودی در سیال ساکن شروع فرآیند ورود مجدد سیال به جت در اثر اختلاط با سیال محیطی در زوایای بیش از 75° درجه است (فراری و کوئر زولی،^(۴) ۲۰۱). این پدیده نفوذ مجدد موجب انحنای جت و درنتیجه کاهش ارتفاع صعود و افزایش غلظت می‌شود. در حالت وجود جریان جانبی و در محدوده آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، پدیده ورود مجدد جریان به جت مشاهده نشد؛ بنابراین ارتفاع صعود بیشینه در حالت جت عمودی اتفاق افتاد که تطابق خوبی با نتایج گانگر و رابرترز^(۵) دارد. در ضمن همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود، ارتفاع صعود نهایی با افزایش زاویه از 30° تا 90° درجه افزایش می‌یابد و سپس تا 115° درجه کاهش می‌یابد. خطوط رسم شده در منحنی‌های موجود در شکل (۳) و همین‌طور اشکال (۴) و (۵) با استفاده از برازش منحنی به دست آمدند. شکل (۴) تغییرات طول ناحیه برخورد با زاویه برای اعداد فرود مختلف و نسبت‌های

آزمایش‌ها در یک فلوم به طول 6 متر و عرض $5/0$ متر و عمق $5/0$ متر انجام شدند. دهانه نازل از اعضای مفصلی قابل انعطاف ساخته شد به طوری که امکان زاویه دادن به دبی خروجی را امکان پذیر می‌نمود. مقطع جت خروجی دایره‌ای به قطر یک سانتی‌متر بود. در ضمن نازل در فاصله نصف عرض فلوم از دیواره کanal و 2 متر پایین‌تر از ورودی فلوم قرار داشت. ارتفاع نازل از کف کanal 6 سانتی‌متر بود به طوری که جریان چگال حاصل در کف کanal اثری روی انتشار جت نداشته باشد. دو نوع محلول آبنمک رنگی (رنگ شده با رنگ خوراکی) با چگالی نسبی $1/12$ گرم بر سانتی‌مترمکعب و $1/21$ گرم بر سانتی‌مترمکعب به عنوان محلول آلاینده مورد استفاده قرار گرفتند. چگالی محلول توسط دستگاه غلظت سنج هدایتی (شرکت لورتن - مدل CD YK-2014) اندازه گرفته شد. این وسیله چگالی محلول را از روی دما و میزان شوری آن می‌سنجد. محلول آبنمک در یک تانک به حجم 1 مترمکعب آماده شد و سپس به یک مخزن در ارتفاع $2/5$ متری پمپاژ گردید. مخزن محلول جت را تأمین می‌کند و برای حذف نوسانات پمپ و تأمین شرایط جریان ماندگار تعییه گردیده است. سرعت جت به کمک یک ونتوری متر با دقت $\pm 0/5\%$ دبی جریان که در خط لوله احداث شده بود، اندازه گیری می‌شد. از آب با چگالی $0/998$ گرم بر سانتی‌مترمکعب به عنوان سیال محیطی استفاده شد و سرعت آن با استفاده از سرعت‌سنج صوتی با دقت $\pm 0/5\%$ شدت جریان اندازه گیری شد. این سرعت‌سنج به دیواره خارجی لوله متصل شده بود. شکل (۲) مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل (۲): مدل آزمایشگاهی

شکل (۵): تغییرات X_z با زاویه

جدول (۱) مقداری X_f/X_z را برای زوایای مختلف ارائه می‌دهد. مقدار بیشینه X_f/X_z در زاویه 90° درجه اتفاق می‌افتد. علت این است که در این زاویه X_z کمینه است در حالی که X_f به دلیل وجود جریان جانبی و انتقال جت به سمت پایین دست بزرگ است.

جدول (۱): نسبت X_f/X_z

شماره آذین	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=75^\circ$	$\theta=90^\circ$	$\theta=115^\circ$
۱-۶	۲.۰	۱.۹۵	۱.۹۶	۲.۱۹	۲.۳۰	۲.۱۳
۷-۱۲	۱.۹	۲.۰۱	۱.۹۰	۲.۳۷	۲.۴۹	۲.۰۵
۱۸-۲۳	۱.۸	۱.۶۵	۱.۶۵	۲.۰۳	۲.۱۲	۲.۴۸
۱۹-۲۴	۱.۸	۱.۶۴	۱.۵۷	۱.۹۳	۲.۱۱	۲.۵۱
۲۵-۳۰	۱.۶۴	۱.۵۸	۱.۵۲	۲.۳	۲.۰۰	۲.۳۱
۳۱-۳۶	۱.۶	۱.۵۹	۱.۵۸	۲.۴۸	۲.۱۹	۲.۱۶

اثر عدد فروید انسسی متريک

چو (۱۹۷۵) دو معادله به شرح زير، برای تعين ارتفاع صعود بيشينه جت و فاصله نقطه برخورد تا نازل ارائه نمود.

$$\frac{Z_z}{d_j} = 1.48 R^{1/3} F_{rd}^{2/3} \quad (8)$$

$$\frac{X_f}{d_j} = 3.6 F_{rd}^2 R^{-3} \quad (9)$$

به طور مشابه تانگ و استولزنباخ (۱۹۷۹) نيز روابط زير را برای جت عمودي در جریان جانبی ارائه نمودند.

$$\frac{Z_z}{d_j} = 1.7 R^{-2} F_{rd} \quad (10)$$

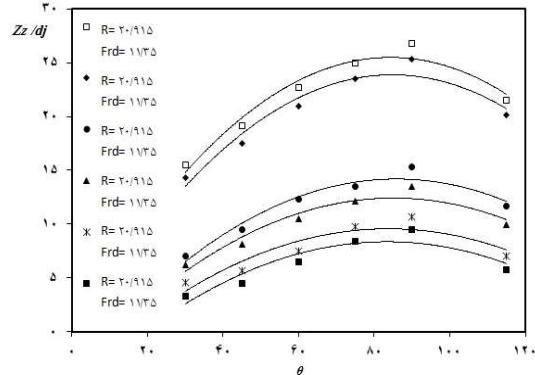
$$\frac{X_f}{d_j} = 2.8 F_{rd}^2 R^{-3} \quad (11)$$

رابرتز و تامز (۱۹۸۷) جت ثقلی در جریان جانبی را مطالعه نمودند و روابط زير را ارائه دادند.

$$\frac{Z_z}{d_j} = 2.8 F_{rd} \quad \text{for } 0.2 < F_{rd}/R < 0.8 \quad (12)$$

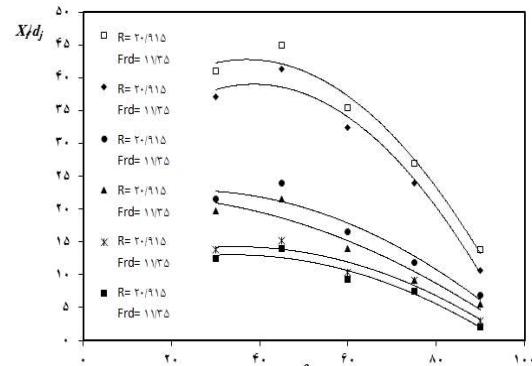
$$\frac{Z_z}{d_j} = 2.5 R^{1/3} F_{rd}^{2/3} \quad \text{for } F_{rd}/R > 0.8 \quad (13)$$

سرعت متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود فاصله بیشینه جت تا نقطه برخورد در زاویه ۴۵ درجه مشاهده می‌شود و کمینه طول ناحیه برخورد در دبی عمودی رخ می‌دهد.



شکل (۳): تغییرات ارتفاع صعود نهایی جت با زاویه

نکته جالب این است که در محدوده این پژوهش با افزایش زاویه از 30° تا 45° درجه طول ناحیه برخورد افزایش می‌یابد، زیرا در حالت 30° درجه، جت به دلیل زاویه کوچکی که با افق دارد نمی‌تواند به اندازه کافی در عمق آب نفوذ کند و قبل از اینکه از نازل فاصله قابل توجهی بگیرد به دلیل نیروی شناوری به تراز اولیه بر می‌گردد.



شکل (۴): تغییرات طول ناحیه برخورد با زاویه

شکل (۵) تغییرات X_z با زاویه برای اعداد فروید و نسبت سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. از مقایسه اشکال (۴) و (۵) باهم مشاهده می‌شود که روند کلی تغییرات هر دو مؤلفه طول افقی مشابه است.

در مجموع می‌توان گفت که جت ثقلی منفی تحت اثر هم‌زمان عدد فرود و نسبت سرعت‌ها در ناحیه میدان نزدیک جریان قرار دارد و لذا بیان یک رابطه کلی که برای تمام شرایط اولیه برقرار باشد غیرممکن است.

با توجه به روابط (۵) تا (۷) می‌توان به روابط زیر رسید.

$$\frac{Z_z}{d_j} = C_1 Fr_d^a R^b + C_1' \quad (15)$$

$$\frac{X_z}{d_j} = C_2 Fr_d^a R^b + C_2' \quad (16)$$

$$\frac{X_f}{d_j} = C_3 Fr_d^a R^b + C_3' \quad (17)$$

با انجام رگرسیون چند متغیره مقادیر ثابت‌های به کار رفته در معادلات (۱۵) تا (۱۷) به دست می‌آیند. مقادیر ثابت‌های نمایی به ترتیب برابرند با $a=1$ و $b=5/0$ و ضرایب ثابت دیگر هم در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

جدول (۲): ضرایب ثابت مربوط به روابط (۱۵) تا (۱۷)

ضرایب ثابت	C_1	C_1'	C_2	C_2'	C_3	C_3'
$\theta = 30^\circ$	۰/۲۸	۱/۹۱	۰/۲۹	۶/۱۳	۰/۶۵	۸/۸۵
$\theta = 45^\circ$	۰/۳۳	۲/۸۷	۰/۳۱	۷/۵۴	۰/۷۱	۹/۸۸
$\theta = 60^\circ$	۰/۳۷	۴/۶۱	۰/۲۸	۴/۴۵	۰/۶۱	۵/۰۵
$\theta = 75^\circ$	۰/۳۸	۶/۲۹	۰/۲۰	۱/۹۰	۰/۴۵	۳/۹۶
$\theta = 90^\circ$	۰/۴۰	۷/۳۶	۰/۰۹	۰/۸۸	۰/۲۴	۱/۱۹
$\theta = 115^\circ$	۰/۳۵	۴/۲۲	۰/۱۹	۰/۸۷	۰/۳۸	۲/۸

نتیجه‌گیری

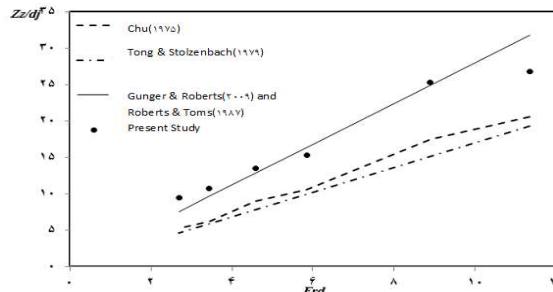
jet ثقلی منفی در جریان جانبی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. شش زاویه تخلیه jet نسبت به افق در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها نشان دادند که عدد فرود عدد فرود به کار رفته شد. آزمایش‌ها نشان دادند که عدد فرود انسی متريک jet و نسبت سرعت‌ها، پارامترهای تعیین‌کننده مقیاس‌های طولی-هندرسی jet هستند. طراحی تخلیه کننده‌های مستغرق بر اساس تئوری jet ثقلی منفی تابع شرایط اولیه جریان هستند؛ بنابراین نتایج حاصل در این مقاله صرفاً مربوط به شرایط اولیه موجود هستند و هرگونه تغییر در این اعداد منجر به نتایج دیگر خواهد شد. محدوده اعداد فرود به کار رفته در تخلیه کننده‌های مستقر در محیط‌های دریابی عموماً بزرگ‌تر از ۲۰ است و جنبه نوآوری مقاله موجود، استفاده از اعداد فرود پایین، سازگار با محیط رودخانه‌ای است. علاوه بر این وجود سرعت جریان جانبی نیز فقط در محل رودخانه قابل توجیه است. در ضمن روابط تجربی بر اساس همین پارامترها معرفی شدند. از نظر طراحی،

درنهایت گانگر و همکاران (۲۰۰۹) ضمن تأیید رابطه رابرتز و تامز (۱۹۸۷) برای ارتفاع صعود بیشینه رابطه زیر را برای محاسبه طول نقطه برخورد ارائه دادند.

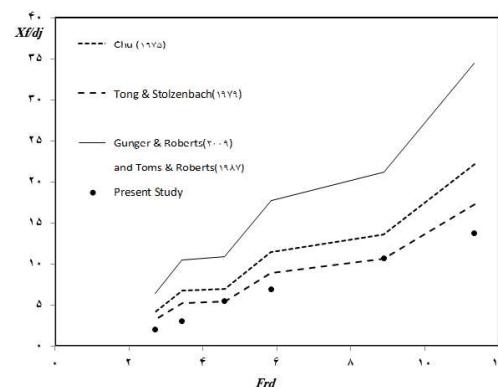
$$\frac{X_f}{d_j} = 5.6 Fr_d^2 R^{-1} \quad (14)$$

شکل‌های (۶) و (۷) تغییرات مقادیر ارتفاع صعود بیشینه jet را به ترتیب با اعداد فرود و نسبت سرعت‌های مختلف برای حالت jet عمودی نشان می‌دهند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر حاصل از داده‌های آزمایشگاهی در این تحقیق بزرگ‌تر از مقادیر حاصل توسط فرمول‌های تجربی پیشنهادی توسط پژوهشگران قبلی است. این اختلاف تا حدودی مربوط به نحوه تعریف نقطه برخورد و ارتفاع صعود نهایی است. در تحقیقات قبلی، ارتفاع صعود از محور مرکزی jet اندازه‌گیری شدند در حالی که در این تحقیق برای بالا بردن دقت و با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در محاسبه محور مرکزی jet از مرز خارجی jet برای توصیف استفاده شده است. به طور مشابه در شکل (۷) مشاهده می‌شود که مقادیر محاسبه شده از روابط ارائه شده قبلی کمتر از مقادیر حاصل از این پژوهش هستند.



شکل (۶): مقایسه نتایج ارتفاع صعود نهایی jet با کارهای قبلی



شکل (۷): مقایسه تغییرات طول نقطه برخورد با عدد فرود در حالت عمودی با کارهای قبلی

- inclined dense jets.” *Journal of Hydraulic Engineering.* 131(11), 1017-1022.
- 8- Fan, L. N. and Brooks, N. H. (1968). “Dilution of waste gas discharge from campus building.” *Report 68-1.* W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- 9- Ferrari, S. and Querzoli, G. (2010). “Mixing and re-entrainment in a negatively buoyant jet.” *Journal of Hydraulic Research.* 48(5), 632-640.
- 10- Gungor, E., Philip, J. W. and Roberts, F. (2009). “Experimental studies on vertical dense jets in a flowing current.” *Journal of Hydraulic Engineering.* 135 (11), 935-948.
- 11- Kikkert, G. A. (2006). “Buoyant jets with two and three dimensional trajectories.” *PhD Thesis.* University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- 12- Kikkert, G. A., Davidson, M. J. and Nokes, R. I. (2007). “Inclined negatively buoyant discharges.” *Journal of Hydraulic Engineering.* 133(5), 545-554.
- 13- James, W. P., Vergara, I. and Kim, K. (1983). “Dilution of a dense vertical jet.” *Journal of Environmental Engineering.* 109(6), 1273-1283.
- 14- Papakonstantis, I. and Christodoulou, G. (2010). “Spreading of round dense jets impinging on a horizontal bottom.” *Journal of Hydro-Environmental Research.* 4(2010), 289-300.
- 15- Papakonstantis, I., Christodoulou, G. and Papanicolaou, P. (2011). “Inclined Negatively Buoyant Jets 1: Geometrical Characteristics.” *Journal of Hydraulic Research.* 49(1), 3-12.
- 16- Tong, S. S. and Stolzenbach, K. D. (1979). “Submerged discharges of dense effluent.” *Report Number. 243,* Ralph M. Parsons Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- 17- Turner, J. S. (1966). “Jets and Plumes with negative or reversing buoyancy.” *Journal of Fluid Mechanics.* 26(4), 779-792.
- 18- Robberts, P. J. W. and Toms, G. (1987). “Inclined dense jets in flowing current.” *Journal of Hydraulic Engineering.* 113(3), 323-341.
- 19- Zhang, H. and Baddour, R. E. (1998). “Maximum penetration of vertical round dense

در صورتی که شرایط اولیه مشابه اعداد به کاررفته در این مقاله باشند، بهترین زاویه تخلیه ۶۰ درجه است زیرا بیشترین طول مسیر حرکت قبل از رسیدن به نقطه برخورد را داشته و بیشترین رقیق شدگی را نتیجه می دهد.

تشکر و قدردانی

آزمایش های انجام شده در این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک پیشرفتی در دانشگاه آزاد اسلامی – واحد تهران مرکزی، دانشکده فنی و مهندسی انجام شده اند و هزینه پژوهش در قالب یک طرح پژوهشی با بودجه تخصیص یافته توسط دانشگاه آزاد اسلامی – واحد تهران مرکزی تأمین شده است. به همین دلیل مؤلفان صمیمانه از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه و مدیریت پژوهشی دانشکده فنی تشکر می نمایند. علاوه بر این از همکاری و مساعدت دلسوزانه جناب آقای مهندس بهار دوست، ریاست محترم آزمایشگاه های مهندسی عمران نیز به خاطر کمک هایی که در پیشبرد طرح انجام دادند تشکر می شود.

مراجع

- 1- Abraham, G. (1967). “Jets with negative buoyancy in homogeneous fluid.” *Journal of Hydraulic Research.* 5(4), 235-248.
- 2- Anderson, J. L., Parker, F. L. and Benedict, B. A. (1973). “Negatively buoyant jets in a cross flow.” *Report Number EPA-660/2-73-012,* U.S. Environmental Protection Agency.
- 3- Baines, W. D., Turner, J. S. and Cambell, I. H. (1990). “Turbulent fountains in an open chamber.” *Journal of Fluid Mechanics.* 212(March 2010), 557-592.
- 4- Bloomfield, L. J. and Kerr, R. C. (2000). “A theoretical model of a turbulent fountain.” *Journal of Fluid Mechanics.* 424(December 2000), 197-216.
- 5- Bloomfield, L.J. and Kerr, R.C. (2002). “Inclined turbulent fountains.” *Journal of Fluid Mechanics.* 451(January 2002), 283-294.
- 6- Chu, V. H. (1975). “Turbulent dense plumes in a laminar cross flow.” *Journal of Hydraulic Research.* 13(3), 253-279.
- 7- Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F. and Nicosia, S. (2005). “Bench scale investigation of

jets at small and large Froude numbers.” *Journal of Hydraulic Engineering*. 124(5), 550-553.

- 20- Zeitoun, M. A., Mellhenny, W. F. and Reid, R. O. (1970). “Conceptual designs of outfall systems for desalting plants.” *Research and Developement Progress Report 550*. Office of saline water, US Dept. of Interior, Washington DC.

Experimental Model of Negatively Buoyant Jets into Cross Flow

Hooman Hajikandi ^{1*}
Shayan Barjestehmaleki ²

Abstract

Nowadays, application of negatively buoyant jet as a known remedy for dilution of brine generated at desalination plants and effluents from industrial units is quite common. The initial momentum of the jet with the buoyant force induced due to the density difference between the jet and the ambient fluid entrain the ambient fluid into the jet and dilute the effluent. This research focuses on the experimental study of negatively buoyant jets at low densimetric Froude numbers, values between 3.44 and 11.35 in a co-flow. 36 tests for discharge horizontal angles of 30, 45, 60, 75, 90 and 115 degree were done under three jet to ambient flow velocities between 6.33 and 20.92. Variables are including three length scales related to the jet trajectory including maximum penetration depth, horizontal distance of the nozzle to the point of maximum penetration depth and the horizontal distance from nozzle to the impact point. Empirical equations are derived for the geometrical length scales in terms of the densimetric Froude number, velocity ratios and discharge angle. The results are applicable to design submerged outfalls in shallow streams.

Keywords

Discharge angle, Froude number, jet trajectory, negatively buoyant jet, turbulent jet.

^{1*} Assistant Professor, Islamic Azad university, Central Tehran Branch, Faculty of Engineering, h_hajikandi@iauctb.ac.ir.
² Phd.Candidate, Department of Environmental and Industrial Fluid Mechanics, University of Trieste, Triests, Italy.
Received: 2016/01/17 Accepted: 2016/05/30