نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال سوم / شماره هشتم / بهار ۱۳۹۵

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
3rd Year / No. 8 / June 2016

مدل آزمایشگاهی جت ثقلی منفی در جریان جانبی

هومن حاجی کندی *[۱]
شایان برجسته ملکی[۲]

چکیده

امروزه مکانیسم جت ثقلی منفی جهت رقیق‌سازی سریع آلاینده‌های زیست‌محیطی محلول در آب مانند فلزات سمی یا نمک حاصل از تأسیسات آب‌شیرین‌کن، یک راهکار مؤثر محسوب می‌شود. نیروی مومنتوم 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 متریک کوچک، بین ۳/۴۴ و ۱۱/۳۵ به داخل سیال دارای جریان می‌پردازد. درمجموع ۳۶ آزمایش برای زوایای تخلیه ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰ و ۱۱۵ 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 متریک 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 مورداستفاده قرار می‌گیرند.

واژه های کلیدی

جت ثقلی منفی، زاویه نازل، عدد فروید، مسیر جت، جریان آشفته.

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.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۱۰

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.3.1]

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 ppt۱۰۰ است. پساب یک کارخانه آب‌شیرین‌کن با ظرفیت ۱۰ میلیون گالن در روز دارای غلظت حدود ppt ۶۰ تحت دبی ۰/۶ مترمکعب در ثانیه است (تانگ و استولزن باخ[1]، 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 پروژه‌های عملی لازم است. یک راه‌حل ساده و مؤثر برای تخلیه ایمن این مواد به داخل محیط‌های آبی استفاده از مکانیسم جت و ورود سریع سیال محیطی به داخل آلاینده جهت رقیق‌سازی آن است. شدت رقیق‌سازی آلاینده 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 به‌صورت نازل‌های چندتایی (چند ردیف) طراحی می‌شوند. به‌طورکلی جت ثقلی واژه‌ای 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 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[2] 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[3] (۱۹۶۷) جت ثقلی منفی عمودی در سیال ساکن را به‌طور آزمایشگاهی بررسی نمود و یک مدل تحلیلی برای تعیین ارتفاع صعود بیشینه ارائه نمود. فن و بروکز[4] در سال ۱۹۶۸ نیز مسیر حرکت جت را به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه نمودند و نشان دادند که ارتفاع صعود بیشینه تابع عدد فروید انسی متریک جت و قطر جت خروجی است. جیمز[5] 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 متریک، هندسه نازل نیز پارامتر مهمی است. ژانگ و بادور[6] (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[7] و همکاران (۱۹۹۰) به‌طور آزمایشگاهی حرکت جت عمودی تزریق شده در سیال ساکن را مطالعه نمودند و جریان چگال در بستر کانال 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

[1] Tong & Stolzenbach
[2] Turner
[3] Abraham
[4] Fan & Brooks
[5] James
[6] Zhang & Baddour
[7] Baines

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.3.1]

پدیده باعث افزایش غلظت می‌شود. فراری و کوورزولی[1] (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[2] 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[3] (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 به‌دست‌آمده توسط بینز و همکاران (۱۹۹۰) مطابقت دارد. سیپولینا[4] و همکاران (۲۰۰۵) خصوصیات هندسی جت مایل تحت زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه را اندازه گرفتند. کیکرت و همکاران (۲۰۰۷) نیز مطالعه مشابهی برای زوایای ۵ تا ۷۵ درجه انجام دادند. کیکرت[5] (۲۰۰۶) غلظت سیال در نقاط مختلف جت را اندازه‌گیری کرد. پاپاکونستانتیس[6] و همکاران (۲۰۰۷) ارتفاع صعود اولیه و نهایی جت را در زوایای ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه اندازه گرفتند. پاپاکونستانتیس و همکاران (۲۰۱۱) شش زاویه تخلیه بین ۴۵ تا ۹۰ درجه را بررسی کردند و مسیر حرکت جت را به‌صورت تجربی بیان نمودند. بلوم‌فیلد و کر (۲۰۰۰) یک مدل تئوری برای جت متقارن 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 موردتوجه برخی از پژوهشگران بوده است. پینسینس و لیست[7] (۱۹۷۳) جت مایل تحت زاویه ۶۰ درجه در یک سیال دارای جریان را مطالعه نمودند. آزمایش‌های آن‌ها در محدوده عدد فروید انسی متریک 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 جریان جانبی، رقیق‌شدگی جت نیز افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین به اهمیت اغتشاش جریان جانبی در میزان رقیق‌شدگی جریان در ناحیه میدان دور اشاره نمودند. اندرسون[8] و همکاران (۱۹۷۳) آزمایش‌هایی روی جت عمودی، ۴۵ و ۶۰ درجه همراه با جریان جانبی هم‌راستا با محور طولی جت انجام دادند. اکثر آزمایش‌های آن‌ها در سرعت‌های بالا صورت گرفت؛ یعنی در محدوده اعداد فروید نزدیک ۸ برای جریان جانبی و اعداد فروید انسی متریک 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[9] (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 متریک بین ۱۱/۷ و ۲۱/۲ و نسبت‌های سرعت ۱۰/۸۶ و ۱۰۰ مطالعه نمودند. رابرتز و تامز[10] (۱۹۸۷) مشخصات جت ثقلی منفی در جریان جانبی با سرعت‌های متفاوت را به‌طور آزمایشگاهی مطالعه نمودند. آن‌ها جت مایل با زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق را در نظر گرفتند و ارتفاع صعود بیشینه و رقیق‌شدگی در نقاط مختلف را اندازه گرفتند. دامنه اعداد فروید انسی متریک به‌کاررفته 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 برحسب عدد فروید انسی متریک جت و یک عدد فروید انسی متریک دیگر برحسب سرعت جریان جانبی که قبلاً توسط تانگ و استولزنباخ (۱۹۷۹) معرفی شده بود، تعریف نمودند. گانگر[11] و همکاران (۲۰۰۹) رفتار جت اغتشاشی چگال در جریان جانبی را بررسی نمودند. اعداد فروید انسی متریک به‌کاررفته در آزمایش‌های آن‌ها بین ۱۹ و ۲۳/۷ و

[1] Ferrari &Querzoli
[2] Zeitun
[3] Bloomfield & Kerr
[4] Cipollina
[5] Kikkert
[6] Papakonstantis
[7] Pincince& List
[8] Anderson
[9] Chu
[10] Robberts & Toms
[11] Gunger

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.3.1]

نسبت سرعت‌ها بین ۲۷/۴۵ و ۹۷/۵ بودند. آن‌ها نشان دادند که در سرعت‌های کم مسیر حرکت جت عمودی، به‌صورت عمودی باقی می‌ماند. درحالی‌که در سرعت‌های جانبی بالا، جت برگشتی (ریزشی) به‌صورت مورب جریان می‌یابد.

همان‌طور که اشاره شد، اکثر مطالعات قبلی محدود به بررسی جت تحت تعداد محدودی زاویه بین ۴۵ تا ۹۰ درجه، از کف کانال به سمت سطح جریان در سیال ساکن و برخی مطالعات محدود نیز به بررسی انتشار جت در جریان جانبی تحت اعداد فروید انسی متریک بالا پرداختند. در این مطالعات نسبت سرعت جت به سرعت جریان جانبی، بالا بود به‌طوری‌که اثر مومنتوم جریان جانبی بر روی انتشار جت در ناحیه میدان نزدیک کاهش می‌یافت.

این تحقیق به نتایج مطالعات آزمایشگاهی بر روی جت ثقلی مایل تحت شش زاویه ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰ و ۱۱۵ درجه تحت اثر متقابل مومنتوم اولیه جت و جریان جانبی تخصیص یافته است. نوآوری موجود در این تحقیق مربوط به محدوده اعداد فروید انسی متریک کم (کوچک‌تر از ۲۰) 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:

$$F(L, U_a, U_j, \rho_a, \rho_j, d_j, \theta, g, \mu) = 0 \qquad (۱)$$

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 محیطی، 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 محیطی.

به کمک تحلیل ابعادی رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\frac{L}{d_j} = G(Fr_d, R, \theta) \qquad (۲)$$

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

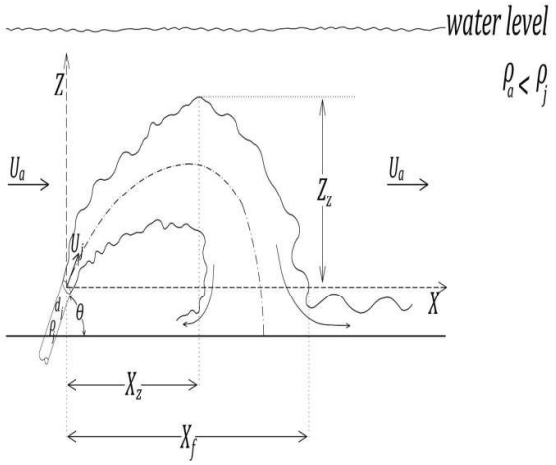
$$Fr_d = \frac{U_j}{\sqrt{g d_j \frac{\rho_j - \rho_a}{\rho_a}}} \qquad (۳)$$

$$R = \frac{U_j}{U_a} \qquad (۴)$$

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

هندسه مسئله موردمطالعه

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



شکل (۱): هندسه جت موردمطالعه به‌طور شماتیک

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

$$D\left(\frac{Zz}{d_j}\right)/D(Fr_d{}^a R^b) = C_1 \qquad (۵)$$

$$D\left(\frac{Xz}{d_j}\right)/D(Fr_d{}^a R^b) = C_2 \qquad (۶)$$

$$D\left(\frac{Xf}{d_j}\right)/D(Fr_d{}^a R^b) = C_3 \qquad (۷)$$

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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.3.1]

مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک فلوم به طول ۶ متر و عرض ۰/۵ متر و عمق ۰/۵ متر انجام شدند. دهانه نازل از اعضای مفصلی قابل‌انعطاف ساخته شد به‌طوری‌که 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 کانال و ۲ متر پایین‌تر از ورودی فلوم قرار داشت. ارتفاع نازل از کف کانال ۶ سانتی‌متر بود به‌طوری‌که جریان چگال حاصل در کف کانال اثری روی انتشار جت نداشته باشد. دو نوع محلول آب‌نمک رنگی (رنگ‌شده با رنگ خوراکی) با چگالی نسبی ۱/۱۲ گرم بر سانتی مترمکعب و ۱/۲۱ گرم بر سانتی مترمکعب به‌عنوان محلول آلاینده مورداستفاده قرار گرفتند. چگالی محلول توسط دستگاه غلظت سنج هدایتی (شرکت لورتن – مدل YK-2014 CD) اندازه گرفته شد. این وسیله چگالی محلول را از روی دما و میزان شوری آن می‌سنجد. محلول آب‌نمک در یک تانک به حجم ۱ مترمکعب آماده شد و سپس به یک مخزن در ارتفاع ۲/۵ متری پمپاژ گردید. مخزن محلول جت را تأمین می‌کند و برای حذف نوسانات پمپ و تأمین شرایط جریان ماندگار تعبیه گردیده است. سرعت جت به کمک یک ونتوری متر با دقت ۰/۵٪ ± دبی جریان که در خط لوله احداث شده بود، اندازه‌گیری می‌شد. از آب با چگالی ۰/۹۹۸ گرم بر سانتی مترمکعب به‌عنوان سیال محیطی استفاده شد و سرعت آن با استفاده از سرعت‌سنج صوتی با دقت ۰/۵٪ ± شدت‌جریان اندازه‌گیری شد. این سرعت‌سنج به دیواره خارجی لوله متصل شده بود. شکل (۲) مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل (۲): مدل آزمایشگاهی

روش کار

شش زاویه تخلیه از ۳۰ تا ۱۱۵ درجه و درمجموع ۳۶ آزمایش برای اعداد فروید انسی متریک بین ۳/۴۴ تا ۱۱/۳۴ و نسبت‌های سرعت ۶/۳۳ و ۲۰/۹۲ در نظر گرفته شدند. سرعت جت در آزمایش‌های مختلف بین ۱/۲۳ تا ۱/۶۲ متر بر ثانیه و سرعت جریان جانبی بین ۵/۸ تا ۲۵ سانتیمتر بر ثانیه بودند. حرکت جت توسط یک دوربین دیجیتالی با وضوح ۱۰۲۴ در ۵۷۶ پیکسل و سرعت تصویربرداری ۲۵ 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[1] فواصل محاسبه شدند.

نتایج

اثر زاویه

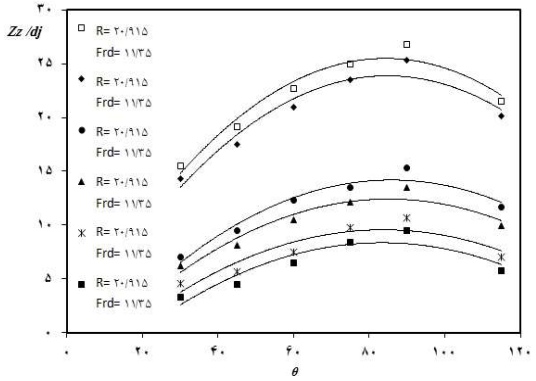
شکل (۳) تغییرات ارتفاع صعود نهایی با زاویه نازل را نشان می‌دهد. ارتفاع صعود بیشینه در حالت نازل عمودی رخ می‌دهد. مطالعات قبلی روی جت ثقلی منفی در سیال ساکن نشان می‌دهند که ارتفاع صعود نهایی در حالت زاویه ۸۰ درجه به بیشینه می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد (بلوم‌فیلد و کر (۲۰۰۲)، پاپاکونستانتیس و همکاران (۲۰۱۱)). 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 ۷۵ درجه است (فراری و کوئر زولی، ۲۰۱۰). 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 رابرتز (۲۰۰۹) دارد. در ضمن همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود، ارتفاع صعود نهایی با افزایش زاویه از ۳۰ تا ۹۰ درجه افزایش می‌یابد و سپس تا ۱۱۵ درجه کاهش می‌یابد. خطوط رسم شده در منحنی‌های موجود در شکل (۳) و همین‌طور اشکال (۴) و (۵) با استفاده از برازش منحنی به‌دست‌آمده‌اند. شکل (۴) تغییرات طول ناحیه برخورد با زاویه برای اعداد فروید مختلف و نسبت‌های

[1] Autocad

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

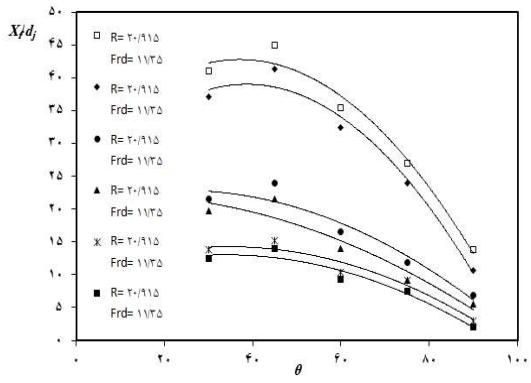
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.3.1]

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.



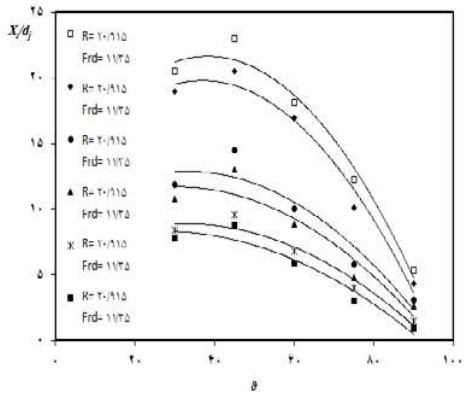
شکل (۳): تغییرات ارتفاع صعود نهایی جت با زاویه

نکته جالب این است که در محدوده این پژوهش با افزایش زاویه از ۳۰ تا ۴۵ درجه طول ناحیه برخورد افزایش می‌یابد؛ زیرا در حالت ۳۰ درجه، جت به دلیل زاویه کوچکی که با افق دارد نمی‌تواند به‌اندازه کافی در عمق آب نفوذ کند و قبل از اینکه از نازل فاصله قابل‌توجهی بگیرد به دلیل نیروی شناوری به تراز اولیه برمی‌گردد.



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.



شکل (۵): تغییرات X_z با زاویه

جدول (۱) مقادیر X_f/Xz را برای زوایای مختلف ارائه می‌دهد. مقدار بیشینه X_f/X_z در زاویه ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد. علت این است که در این زاویه X_z کمینه است درحالی‌که X_f به دلیل وجود جریان جانبی و انتقال جت به سمت پایین‌دست بزرگ است.

جدول (۱): نسبت X_f/X_z

شماره آزمایش	θ =30°	θ =45°	θ =60°	θ =75°	θ =90°	θ = 115°
۱-۶	۲,۰	۱,۹۵	۱,۹۶	۲,۱۹	۲,۶۰	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	۲,۲۲	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 انسی متریک

چو (۱۹۷۵) دو معادله به شرح زیر، برای تعیین ارتفاع صعود بیشینه جت و فاصله نقطه برخورد تا نازل ارائه نمود.

$$\frac{z_z}{d_j}=1.48R^{1/3}Fr_d^{2/3} \quad (۸)$$

$$\frac{X_f}{d_j}=3.6Fr_d^{2}R^{-3} \quad (۹)$$

به‌طور مشابه تانگ و استولزنباخ (۱۹۷۹) نیز روابط زیر را برای جت عمودی در جریان جانبی ارائه نمودند.

$$\frac{z_z}{d_j}=1.7R^{-2}Fr_d \quad (۱۰)$$

$$\frac{X_f}{d_j}=2.8Fr_d^{2}R^{-3} \quad (۱۱)$$

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

$$\frac{z_z}{d_j}=2.8Fr_d \qquad for\ 0.2<Fr_d/R<0.8 \quad (۱۲)$$

$$\frac{z_z}{d_j}=2.5R^{1/3}Fr_d^{2/3} \qquad for\ Fr_d/R>0.8 \quad (۱۳)$$

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

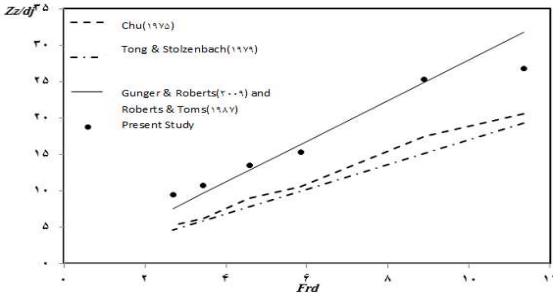
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.3.1]

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.

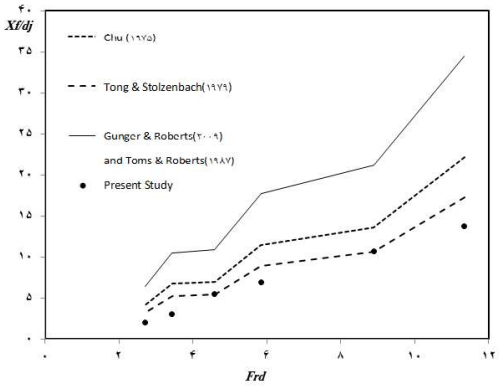
$$\frac{X_f}{d_j} = 5.6 Fr_d^2 R^{-1} \qquad (۱۴)$$

شکل‌های (۶) و (۷) تغییرات مقادیر ارتفاع صعود بیشینه جت را به ترتیب با اعداد فروید و نسبت سرعت‌های متفاوت برای حالت جت 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 جت اندازه‌گیری شدند درحالی‌که در این تحقیق برای بالا بردن دقت و با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در محاسبه محور مرکزی جت از مرز خارجی جت برای توصیف استفاده شده است. به‌طور مشابه در شکل (۷) مشاهده می‌شود که مقادیر محاسبه‌شده از روابط ارائه‌شده قبلی کمتر از مقادیر حاصل از این پژوهش هستند.



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



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

درمجموع می‌توان گفت که جت ثقلی منفی تحت اثر هم‌زمان عدد فروید 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.

$$\frac{Z_z}{d_j} = C_1 Fr_d{}^a R^b + C_1' \qquad (۱۵)$$

$$\frac{X_z}{d_j} = C_2 Fr_d{}^a R^b + C_2' \qquad (۱۶)$$

$$\frac{X_f}{d_j} = C_3 Fr_d{}^a R^b + C_3' \qquad (۱۷)$$

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=۱ و b=۵/۰ 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
θ =۳۰°	۰/۲۸	۱/۹۱	۰/۲۹	۶/۱۳	۰/۶۵	۸/۸۵
θ =۴۵°	۰/۳۳	۲/۸۷	۰/۳۱	۷/۵۴	۰/۷۱	۹/۸۸
θ =۶۰°	۰/۳۷	۴/۶۱	۰/۲۸	۴/۴۵	۰/۶۱	۵/۰۵
θ =۷۵°	۰/۳۸	۶/۲۹	۰/۲۰	۱/۹۰	۰/۴۵	۳/۹۶
θ =۹۰°	۰/۴۰	۷/۳۶	۰/۰۹	۰/۸۸	۰/۲۴	۱/۱۹
θ = ۱۱۵°	۰/۳۵	۴/۲۲	۰/۱۹	۰/۸۷	۰/۳۸	۲/۸

نتیجه‌گیری

جت ثقلی منفی در جریان جانبی به‌صورت آزمایشگاهی موردبررسی قرار گرفت. شش زاویه تخلیه جت نسبت به افق در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها نشان دادند که عدد فروید انسی متریک جت و نسبت سرعت‌ها، پارامترهای تعیین‌کننده‌ی مقیاس‌های طولی–هندسی جت هستند. طراحی تخلیه کننده‌های مستغرق بر اساس تئوری جت 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 دیگری خواهد شد. محدوده اعداد فروید به‌کاررفته در تخلیه کننده‌های مستقر در محیط‌های دریایی عموماً بزرگ‌تر از ۲۰ است و جنبه نوآوری مقاله موجود، استفاده از اعداد فروید 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. ازنظر طراحی،

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.3.1]

درصورتی‌که شرایط اولیه مشابه اعداد به‌کاررفته 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 رقیق‌شدگی را نتیجه می‌دهد.

تشکر و قدردانی

آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک پیشرفته در دانشگاه آزاد اسلامی – واحد تهران مرکزی، دانشکده فنی و مهندسی انجام‌شده‌اند و هزینه پژوهش در قالب یک طرح پژوهشی با بودجه تخصیص‌یافته 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 می‌نمایند. علاوه بر این از همکاری و مساعدت دلسوزانه جناب آقای مهندس بهار دوست، ریاست محترم آزمایشگاه‌های مهندسی عمران نیز به خاطر کمک‌هایی که در پیشبرد طرح انجام دادند تشکر می‌شود.

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 Mech*anics. 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 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, Massachusette.

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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.3.1]

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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.3.1]

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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.3.1]

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