

شبیه‌سازی هیدرولیکی تخلیهٔ پساب شبکه‌های آبیاری و زهکشی با جت دایره‌ای کفی بر اثر تغییر زاویهٔ عمودی

جواد احدیان*، سعید پی‌پل‌زاده و منا امیدواری نیا**

* نگارنده مسئول: دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. تلفن: ۰۶۱)۳۳۷۳۸۱۵۹، پیام‌نگار: ja_ahadiyan@yahoo.com

** به ترتیب: دکترای سازه‌های هیدرولیکی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب؛ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی؛ و دانش‌آموخته دکتری مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز
تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۱۴

چکیده

یکی از دشواری‌های پیش روی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، تخلیهٔ پساب زهکشی به منابع آب پذیرنده از جمله رودخانه‌هاست. به دلیل ایجاد اغتشاش در محیط پذیرنده، یکی از راه‌های مؤثر و سریع برای رقیق‌سازی جریان‌های دفعی، جت‌های مستغرق هستند. در تحقیق حاضر جت مستغرق در زاویه‌های عمودی و غلظت‌های سیال متفاوت با استفاده از Flow-3D مدل‌سازی شد. برای این منظور، زاویه‌های ۳۰، ۳۷/۵، ۴۵، ۵۲/۵ و ۶۰ درجه و غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ گرم بر لیتر با دبی‌های متفاوت در نظر گرفته شد. میدان مدل‌سازی شامل یک میلی‌متر آزمایشگاهی به طول ۷ متر، عرض ۷۲ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر بود. یک نازل به عنوان جت در بخش ابتدایی فلوم با قابلیت تغییر در زاویه و در کف آن تعبیه شد. برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل‌سازی‌ها از داده‌های اندازه‌گیری شده در تحقیقات احدیان و همکاران استفاده شد که از مدل فیزیکی آزمایشگاهی بهره‌گیری کرده بودند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که مدل تلاطمی $k-\epsilon$ RNG با خطای حدود ۹/۵ درصد در پیش‌بینی مشخصات جریان خروجی جت دقت قابل قبولی دارد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که با افزایش طول معیار (LM) ارتفاع اوج منحنی‌های خروجی کاهش می‌یابد. از نظر کمی، نتایج نشان می‌دهد که اختلاف بین نسبت طولی نقطهٔ اوج تراژکتوری در جت با زاویهٔ ۴۵ درجه برای اعداد فرود چگال مختلف در حدود ۲ برابر بیشتر است تا با زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه. نتایج مدل نشان می‌دهد که حداکثر و حداقل عدد رقیق‌شدگی در نقطهٔ اوج به ترتیب برابر با ۰/۶۸ و ۰/۴۸ است که در برنامه‌ریزی عملکرد تخلیه‌کننده‌ها بسیار با اهمیت است در حالی که برای نقطهٔ بازگشت (خط مرکزی منحنی خروجی جریان جت مربوط به حداکثر طول طی شده) حداکثر عدد رقیق‌شدگی برابر با ۰/۴۲ و حداقل آن برابر با ۰/۰۳ به دست می‌آید.

واژه‌های کلیدی

جت دایره‌ای مستغرق، عدد رقیق‌شدگی، عدد فرود چگال، مدل‌سازی

مقدمه

زیاد دشواری‌هایی را برای محیط زیست منطقه ایجاد می‌کنند؛ به خصوص موقعی که به منابع آب پذیرنده از جمله رودخانه‌ها و یا دریا منتهی می‌شوند، مشکلات بیشتری به همراه خواهند داشت. مناطق جنوبی استان خوزستان چنین وضعیتی دارند. به همین منظور همواره

در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، یکی از مشکلات پیش رو تخلیهٔ پساب زهکشی در اثر شستشوی اراضی و نیز آب مازاد آبیاری است. در اراضی با شوری زیاد این مشکلات بیشتر می‌باشد. معمولاً پساب‌ها به دلیل شوری

استاندارد طراحی تخلیهٔ پساب‌های شور اعلام شده است. در مطالعات سئو و همکاران (Seo et al., 2004) مشخصات جت‌های خروجی چندگانه افقی بررسی شده است. این محققان پارامترهای اندازه‌گیری شده در جت منفرد افقی در آب‌های ساکن کم‌عمق را با نتایج حاصل از تحقیق خود مقایسه کردند. در تحقیق آنها برای تعیین خط مرکزی جت در شرایطی که عدد رینولدز کمتر از ۲۰۰۰ است، ضریب اصلاحی اعمال شده است. زاویهٔ جت نسبت به افق یکی از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر رقیق‌سازی سیال دفعی است.

جیرکا (Jirka, 2008) در تحقیق خود پیرامون اصلاح وضعیت دفع پساب شور توسط جریان جت مستغرق اشاره می‌کند که زاویهٔ ۶۰ درجه به منظور افزایش رقیق‌سازی در دفع پساب‌های شور در پاره‌ای موارد قابل اعتماد نیست. در واقع وی اشاره دارد به نتایج زیتون و همکاران (Zeitoun et al., 1969) و محققانی که پس از آن نتایج تحقیقات ایشان را تأیید کرده‌اند. نتایج مطالعات جیرکا (Jirka, 2008) نشان می‌دهد که برای رسیدن به حداکثر رقیق‌سازی، زاویه‌ای بین ۳۰ تا ۴۵ درجه بهترین زاویه است این نتایج به خصوص در شرایط دفع پساب در نزدیکی سواحل و شرایطی اهمیت بیشتری دارد که سرعت جریان منبع پذیرنده کم است. در تحقیقات دیگر در این زمینه، پارامتر بدون بعد "عدد فرود چگال"^۳ در کنار زاویهٔ جت به عنوان مؤثرترین پارامترها بر خصوصیات کمی و کیفی تراژکتوری "جت‌های مستغرق مایل منفی" ذکر شده‌اند. محمدی (Mohammadi, 2012) در تحقیقی با بررسی آزمایشگاهی مقدار رقیق‌شدگی سیال دفعی جت‌های چگال منفی نشان داد که مقدار رقیق‌شدگی جریان در زاویه‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به عدد فرود چگال وابسته است. وی نشان داد که در بازه‌های عدد فرود کوچکتر از ۱۰، بیشترین رقیق‌شدگی در زاویه ۶۰ درجه رخ می‌دهد.

تلاش می‌شود که این پساب‌ها پیش از پیوستن به رودخانه‌ها و دریاها، ابتدا کمی تصفیه و پس از آن در فاصلهٔ زمانی کوتاهی با آب رودخانه‌ها یا دریاها مخلوط شود تا بدین وسیله با پایین آمدن غلظت، تأثیرات آلودگی آنها نیز پایین آید (Ahadiyan & Musavi-Jahromi, 2009). یکی از راه‌های مؤثر و سریع برای رقیق کردن آلودگی‌های صنعتی که به رودخانه‌ها یا دریاها می‌ریزند، استفاده از جت‌های مستغرق متلاطم است. جریان جت‌های متلاطم و پلوم‌ها نوعی از جریان‌های آشفته هستند که بر اساس نیروهای مومنتم و شناوری ارزیابی می‌شوند. جریان جت معمولاً توسط یک منبع مداوم و تحت تاثیر نیروهای مومنتم انتشار می‌یابد، در حالی که جریان پلوم^۱ عموماً توسط نیروهای شناوری از منبع مداوم انتشار می‌یابد. جریان جت و پلوم از نظر ظاهری تقریباً مشابه هستند اما مکانیزم‌های حاکم بر آنها متفاوت است. عامل اختلاط جریان جت، جریان‌های گردابه‌ای^۲ هستند، در حالی که عامل اختلاط در پلوم نیروهای شناوری درون مرزهای جریان است (Mohhamadi, 2014). جریان جت به دلیل ایجاد تلاطم بسیار با محیط پیرامون، در فاصلهٔ زمانی کوتاهی سیال پذیرنده را به دروم مرزهای خود می‌کشد و از غلظت مایع جت (تخلیه‌شونده) می‌کاهد. مستغرق بودن جت اشاره به شرایطی دارد که چگالی سیال دفعی و چگالی منبع پذیرنده نزدیک به هم بوده و خروجی جت به طور کامل در داخل منبع پذیرنده باشد. شرایط منفی نشان می‌دهد که جهت خروج جت چگال برخلاف جهت نیروی شناوری باشد (Mohammadi, 2014).

زیتون و همکاران (Zeitoun et al., 1970) جت‌های مورب را با زاویه‌های ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق و در منبع پذیرنده ساکن آزمایش کردند. بر اساس حداکثر مقدار صعود تراژکتوری جت، این محققان نتیجه گرفتند که زاویهٔ ۶۰ درجه باعث بیشترین رقیق‌سازی می‌شود. بر اساس این نتایج، زاویهٔ ۶۰ درجه به عنوان

1- Plume

3- Densimetric Froude Number

2- Eddy

شناوری منفی باید به تحقیق ریاضی-آزمایشگاهی اولیور و همکاران (Oliver *et al.*, 2013) اشاره نمود که تأثیر مرزهای جدار بر شناوری منفی را بررسی و از مدل انتگرالی اصلاح شده برای پیش‌بینی شناوری منفی در نزدیکی میدان تخلیه استفاده کرده و نشان دادند که در این ناحیه کاهش شار شناوری باعث می‌شود که مدل انتگرالی اصلاح شده در عین سادگی دقت بالایی نیز داشته باشد. احدیان و همکاران (Ahadiyan *et al.*, 2014) در یک تحقیق آزمایشگاهی اثر زاویهٔ فئم در جت منفرد را بررسی کرده و نشان دادند که زاویه‌های بین ۵۰ تا ۶۰ درجه بیشترین اختلاط را با محیط پیرامون به همراه دارد. خیرخواه گیلده و همکاران (Kheirkhah-Gildeh *et al.*, 2015a) به بررسی عددی جت چگال تحت زاویهٔ ۳۰ و ۴۵ درجه در آب‌های ساحلی کم‌عمق پرداختند؛ در آب‌های کم‌عمق معمولاً زاویه‌های کمتر به دلیل اختلاط با محیط پیرامون شرایط بحرانی‌تری ایجاد می‌کنند. در تحقیق آنها از مدل احجام محدود OpenFOAM استفاده شده و مدل‌های تلاطمی مختلفی از جمله κ - ϵ RNG، مدل غیر خطی لزوجت تلاطمی و مدل تنش رینولدزی LRR مورد آزمون واقع شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیق آنها مدل‌های κ - ϵ و LRR با دقت قابل قبولی مطابق با داده‌های آزمایشگاهی می‌توانند جریان جت صفحه‌ای را مدلسازی کنند. خیرخواه گیلده و همکاران (Kheirkhah-Gildeh *et al.*, 2015) با بررسی مدلسازی سه بعدی جریان جت چگال مایل تحت شناوری منفی، عدد فرود چگال را بین ۱۰ تا ۳۴ در نظر گرفتند. آنچه مشخص است زاویه‌های جت کفی بین ۳۰ تا ۶۰ درجه بیشترین تأثیر را در میزان رقیق‌شدگی دارد. از طرفی، مرور منابع مشخص می‌کند که استفاده از مدل‌های ریاضی CFD که بتوانند نواحی نزدیک و دور جت را به طور همزمان مدلسازی کنند، کمتر به کار گرفته شده است. در اکثر مدل‌های ریاضی پیشین، ناحیهٔ نزدیک جت

سیپولینا و همکاران (Cipollina *et al.*, 2005) تحقیقات آزمایشگاهی خود را در زمینهٔ بررسی خصوصیات هندسی جت‌های مایل (زاویه‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) در منبع پذیرندهٔ دارای جریان انجام داده‌اند ولی اندازه‌گیری‌ها را به تراژکتوری جت محدود کرده و پارامترهای ارزیابی زیست‌محیطی، مانند رقیق‌سازی را اندازه‌گیری نکردند. وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2013) خصوصیات جت مستغرق با دمای متفاوت نسبت به منبع پذیرنده را با استفاده از تکنیک‌های عددی بررسی کردند. این محققان قوانین جریان توسعه یافته در جت‌های مستغرق را تحلیل و با نتایج تحقیقات سایر محققان مقایسه کردند. از پارامترهای مورد مقایسهٔ آنها می‌توان به توزیع سرعت کاهش دما در طول خط مرکزی جت، نسبت رقیق‌شدگی و اختلاف فشار هستهٔ جت با محیط پیرامون اشاره کرد. این محققان دریافتند که تغییر موقعیت سرعت خط مرکزی ماکزیمم تدریجی است.

بسالداس و همکاران (Besalduch *et al.*, 2014) ناحیهٔ نزدیک‌شونده در جریان جت مستغرق چگال منفی و نیز جریان متقارن خروجی از جت مایل را بررسی و با استفاده از سیستم پردازش تصاویر توزیع سرعت را در ناحیه نزدیک جت مطالعه کردند. نتایج تحقیقات این محققان نشان می‌دهد که ناحیهٔ نزدیک و دور جت بر یکدیگر تأثیر بسزایی دارند و تحلیل پخشیدگی جت تنها بر اساس ناحیهٔ نزدیک جت نمی‌تواند تشریح شود. در مورد جت‌های سطحی می‌توان به تحقیق کریس و ژوزف (Joseph & Chris 2012) اشاره کرد که در خصوص جت‌های سطحی با زاویه‌های حملهٔ مختلف در منابع آب پذیرنده ساکن به آزمایش‌هایی پرداختند. در این تحقیق که اثر زاویه بر نحوهٔ جریان خروجی از جت بررسی شده نشان دادند که در زاویه‌های حملهٔ بیشتر و غلظت‌های بالاتر، منحنی‌های پایین‌افتادگی اختلاط شدیدتری در منابع آب پذیرنده ایجاد می‌کنند. از طرفی، در خصوص

تغییرات پارامترهای چگالی سیال جت در محل صعود بیشینه و نقطه بازگشت نیز بررسی شد. سیال جت در این تحقیق، یک سیال چگال نسبت به سیال پذیرنده است و تزریق آن در سیال پذیرنده باعث ایجاد منحنی‌های پایین‌افتادگی از سیال چگال خواهد شد. عامل مهم حرکت جریان جت در سیال پذیرنده تأثیر نیروهای شناوری، اصطکاکی و مومنتم خواهد بود. تفاوت دانسیته بین سیال جت و سیال پذیرنده عامل اصلی اهمیت نیروی شناوری است. برآیند نیروی وزن و نیروی شناوری باعث توسعه جریان جت مستغرق چگال^۱ در جریان پذیرنده می‌شود؛ از این رو، با تغییر این نیرو شرایط جریان جت تغییر می‌کند به طوری که باعث ایجاد منحنی‌های پایین‌افتادگی مختلف در سیال پیرامون می‌شود. در این تحقیق مطابق با کلیه برنامه آزمایش‌ها که در جدول ۱ خلاصه شده است، همه منحنی‌های پایین‌افتادگی ترسیم و نتایج آن استخراج شد.

با استفاده از روش‌های انتگرالی اولرین و ناحیه دور از جت با استفاده از روش‌های عددی لاگرانژین شبیه‌سازی شده است. از این رو در تحقیق حاضر با توجه به اهمیت زاویه کف، گام‌های کوچکتر تغییر زاویه در تخلیه جریان جت و شرایط هیدرولیکی مورد بحث قرار می‌گیرد. همچنین، به اثر عدد فرود چگال بر خصوصیات کمی منحنی تراژکتوری خروجی جریان جت، ارتفاع اوج تراژکتوری، نسبت طولی نقطه اوج و نقطه بازگشت نیز پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

هدف مهم این تحقیق، بررسی تأثیر زاویه جت‌های وارد شده به منابع پذیرنده از کف و بررسی تأثیر عدد فرود چگال در بازه‌های مختلف بر مشخصات تراژکتوری در جت‌های مستغرق است. در این پژوهش، برای شبیه‌سازی جریان جت چگال از مدل ریاضی Flow-3D استفاده و

جدول ۱- برنامه‌ریزی شبیه‌سازی‌ها

ماده سیال جت	اختلاف چگالی سیال جت و منبع پذیرنده (کیلوگرم بر مترمکعب)	سرعت اولیه جت (متر بر ثانیه)	زاویه جت (درجه)
آب نمک	۱۰	۰/۷۲	۳۰
	۲۰		۳۷/۵
	۳۰	۴۵	
	۴۰	۱/۰	۵۲/۵
			۶۰

استفاده از تقریب‌های حجم محدود^۲ حل می‌کند. در این مدل، محیط شبیه‌سازی با سلول‌های مستطیلی ثابت تقسیم‌بندی می‌شوند. برای هر سلول مقدارهای میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد، یعنی همه متغیرها، به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول محاسبه می‌شود، در مرکز سلول محاسبه می‌شوند.

در این تحقیق از سیستم مختصات کارتزین استفاده شده است. مدلسازی سیالات در مدل ریاضی Flow-3D دارای هشت بخش است: بخش عمومی، فیزیک، مشخصات

مطابق با جدول ۱ که در مجموع ۴۰ شبیه‌سازی را در بر می‌گیرد، ابتدا کلیه منحنی‌های پایین‌افتادگی به صورت پارامتر مختصاتی (X,Z) رسم شدند که X نمایش طولی و Z نمایش ارتفاعی منحنی‌ها را بر عهده داشت.

مدلسازی ریاضی

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی عددی معادلات حاکم بر جریان از مدل عددی Flow-3D استفاده شد. مدل Flow-3D معادلات حاکم بر حرکت سیال را با

سه بعدی، از دیگر معادله‌ها در حل جریان است که به صورت روابط ۳ و ۴ نشان داده می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (5)$$

که در آن،

(G_x, G_y, G_z) = شتاب‌های جرم (متر بر مجذور ثانیه)؛ و (f_x, f_y, f_z) = شتاب‌های لزوجت (متر بر مجذور ثانیه). مولفه‌های سرعت در راستای x, y, z به ترتیب u, v, w هستند و پارامتر p مربوط به فشار هیدرواستاتیک سیال است. از طرفی، برای انتشار و پخشیدگی در مدل ریاضی Flow-3D هنگام فعال کردن جریان دو فازی معادلهٔ انتشار-پخشیدگی^۱ (ADE)، نیز وارد محاسبات می‌شود و تحت مدل Macro-Segregation جریان را تحلیل می‌کند. این معادله به صورت رابطه ۶ نوشته می‌شود:

$$v_f \frac{\partial c}{\partial t} + (uA_x \frac{\partial c}{\partial x} + vA_y \frac{\partial c}{\partial y} + wA_z \frac{\partial c}{\partial z}) = \frac{\partial}{\partial x} (A_x D_x \frac{\partial c}{\partial x}) + R \frac{\partial}{\partial y} (R A_y D_y \frac{\partial c}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z D_z \frac{\partial c}{\partial z}) \quad (6)$$

که در آن،

c = غلظت؛ $D_x = D_l$ = ضریب انتشار طولی در سیال؛ $D_y = D_s$ = ضریب انتشار عرضی؛ و $D_z = D_e$ = ضریب انتشار عمقی (متر مربع بر ثانیه). در مدل ریاضی Flow-3D در اکثر جریان‌های دو فازی ضریب‌های انتشار به طور کلی در راستاهای مختلف برابر و به میزان D در نظر گرفته می‌شوند. از طرفی، این ضریب از طریق رابطهٔ ساده شدهٔ γ در هر تراز زمانی و مکانی در سیال محاسبه می‌شود.

سیال‌ها، مش‌بندی و شکل هندسی، شرایط مرزی، شرایط اولیه، خروجی‌های مدل، و مباحث عددی. روش حل معادلات در این مدل بر اساس روش حجم محدود است که معادله‌های جریان شامل معادلهٔ پیوستگی و مومنتم و دیگر معادله‌ها مانند معادله پخشیدگی را عددی حل می‌کند. فرم کلی معادله پیوستگی به صورت رابطه ۱ نوشته می‌شود (Batchelor, 1983):

$$v_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (1)$$

که در آن،

V_f = کسری از حجم باز جریان در راستای x ؛ و A_x, A_y و A_z = به طور مشابه کسر سطح باز جریان به ترتیب در راستای x, y و z . در این معادله، R و ضریب ξ اپراتور سیستم مختصاتی هستند. در حالتی که سیستم مختصاتی کارتزین باشد، R برابر با یک و در همین حال ξ برابر با صفر می‌شود. عبارت اول سمت راست معادلهٔ ۱، ترم پخشیدگی تلاطمی است و از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود (Batchelor, 1983; Anon, 2012):

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} (v_p A_x \frac{\partial \rho}{\partial x}) + R \frac{\partial}{\partial y} (v_p A_y R \frac{\partial \rho}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_p A_z \frac{\partial \rho}{\partial z}) + \xi \frac{\rho v_p A_x}{x} \quad (2)$$

که در آن،

v_p = ضریبی است برابر با $\rho c_p \mu / \rho$ که در آن، μ = ضریب پخشیدگی مومنتم و c_p = ضریب وابسته به عدد اشمیت تلاطم.

این عبارت پخشیدگی جرم مربوط به سنجش مراحل اختلاط تلاطم است و تنها برای حالتی به کار می‌رود که دانسیتهٔ سیال کاربردی غیریکنواخت باشد. عبارت آخر در رابطهٔ ۲ مربوط به ورود آلاینده است و در شرایط سیال دو فازی می‌تواند به کار رود. معادله‌های حرکت ناویر استوکس در سیالی با مولفه‌های سرعت (u, v, w) در مختصات

$$\rho D = \alpha \mu + \beta \quad (7)$$

که در آن،

ρ = دانسیته سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)؛ μ = لزوجت دینامیکی (پاسکال.ثانیه)؛ و α = ضریب افزایشی پخشیدگی تلاطم که در جریان‌های دو فازي تحت عنوان ضریب افزایشدهنده پخشیدگی تلاطم کسر سیال و برابر با عکس عدد اشمیت و β ضریب پخشیدگی مولکولی است. در هر مرحله، با توجه به مشخصات فیزیکی سیال، ضریب انتشار محاسبه و معادله انتقال - انتشار تحلیل می‌شود. یادآوری می‌شود که ابتدا مدل ریاضی Flow-3D، معادلات مومنتم و پیوستگی جریان و پس از آن معادله انتقال - انتشار را حل می‌کند. در این معادله، مدل ترم‌های سرعت جریان را از نتیجه حل معادلات مومنتم و پیوستگی جریان دریافت و با قراردادن در معادله انتقال - انتشار، حل معادلات آلودگی را آغاز می‌کند.

برای مدلسازی، ابتدا هندسه مدل بر مبنای مدل آزمایشگاهی (که در ادامه تشریح می‌شود) به نرم‌افزار معرفی و پس از آن مش‌بندی انجام شد. با توجه به کوچک بودن ابعاد جت در مقابل میدان محاسباتی (فلوم) نیاز به معرفی حداقل دو مش بلوک است. از نظر استحکام مش‌بندی، شرایط مش بلوک‌ها باید به گونه‌ای باشد که ابعاد هر یک نسبت به یکدیگر از بیست درصد سطح بازشدگی برای هر دو گره متوالی از یک مش بلوک به مش بلوک دیگر بیشتر نشود. با توجه به میدان جریان محاسباتی، شرایط اولیه و مرزی برای هر مش بلوک معرفی شد. بدین گونه که برای مش بلوک بزرگ شرایط اولیه به عنوان منبع پذیرنده ساکن در نظر گرفته شد. در این حالت تا ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر از فلوم سیال آب زلال در نظر گرفته و مشخصات فیزیکی آن به مدل معرفی شد. شرایط مرزی برای تزریق جت بدین صورت انتخاب شد که X_{min} ، دبی ورودی و X_{max} ، جریان خروجی

یا *outflow* معرفی شد. عرض‌ها و کف فلوم که شامل Y_{min} و Y_{max} است، به عنوان دیوار یا *Wall* و نیز Z_{max} به دلیل مرز با هوا به عنوان *Symmetry* معرفی شد. یادآوری می‌شود که در مش بلوک کوچک به دلیل این که در مدلسازی و مش‌بندی از روش Nested استفاده شده است، برای انتقال محاسبات به میدان جریان مرزهای مشترک به صورت *continuative* معرفی شدند. در کلیه مش‌بلوک‌ها نیز شرایط استحکام مش برقرار گردید. در این تحقیق برای هر یک از سناریوهای آزمایشی، مدل ریاضی اجرا و جریان جت چگال روی شیب شبیه‌سازی شد. سرانجام نتایج شبیه‌سازی شده با مدل ریاضی با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شدند. مقادیر اندازه‌گیری شده جریان جت مستغرق از نتایج آزمایشگاهی در فلومی به طول ۷ متر، عرض ۷۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر استفاده شد (Ahadiyan *et al.*, 2014). در این فلوم جت کفی در زاویه‌های مختلف مطابق با سناریوهای آزمایشی نصب و منحنی‌های پایین‌افتادگی خروجی برداشت شده است. شکل ۱ تصاویری از فلوم آزمایشگاهی را نمایش می‌دهد.

روش اندازه‌گیری در مدل آزمایشگاهی بدین صورت بوده که ابتدا فلوم آزمایش‌ها از سیال پذیرنده تا عمق مد نظر (برابر با ۶۰ سانتی‌متر) پر و سیال جت با غلظت مدنظر تهیه شد؛ پس از آن، با تنظیم دبی‌سنج الکترومغناطیس با دقت ۰/۲ درصد، تزریق به سیال پذیرنده صورت گرفته است. در این حالت، سیال جت که به صورت رنگی در محیط پذیرنده منتشر گردیده، مختصات طولی و ارتفاعی آن برداشت و تغییرات غلظت در طول منحنی خروجی جریان یادداشت شده است. برای برداشت داده‌ها از ارايه سه بعدی استفاده شد که به همین منظور ساخته شده است. برای بررسی بهتر نتایج و مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری در این تحقیق از پارامترهای ویژه مقیاس طولی استفاده شد. جدول ۲ پارامترهای ویژه مقیاس طولی را نمایش می‌دهد.



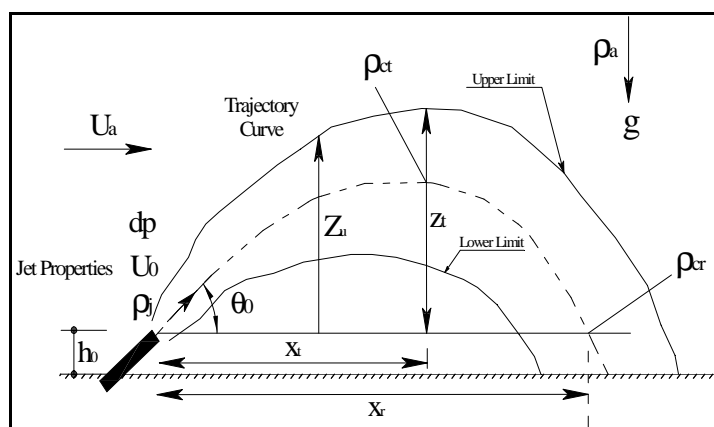
شکل ۱- تصویر مدل آزمایشگاهی، (الف) نمای کلی (ب) تنظیم آزمایش‌ها

جدول ۲- پارامترهای ویژهٔ مقیاس‌های طولی در جریان جت مستغرق

توضیحات	ویژگی	مقیاس طولی ویژه
این مقیاس طولی، محدوده دور و نزدیک جت را مشخص می‌کند.	مقیاس طولی نسبت نیروی مومنتم به شناوری	$l_M = \frac{M_0^{\frac{3}{4}}}{\sqrt{B}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{\frac{1}{4}} d_p \cdot Fr_d$
این پارامتر شرایط طولی از تراژکتوری را که هندسه اولیه جت بر آن تأثیرگذار استرا نشان می‌دهد.	مقیاس طول مشخصه برای تعیین شرایط شبه پلوم و شبه جت در طول تراژکتوری	$L_Q = \frac{Q_0}{M_0^{0.5}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{0.5} d_p$

محیط پذیرنده که برابر با شتاب ثقل در اختلاف دانسیته نسبی است. پارامترهای اصلی جت مستغرق متقاطع با جریان منبع پذیرنده به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

در جدول ۲، M_0 = مومنتم اولیهٔ جت (نیوتن)؛ Q_0 = دبی اولیهٔ جت (مترمکعب بر ثانیه)؛ B = نیروی شناوری (نیوتن)؛ d_p = قطر جت (متر)؛ و Fr_d = عدد فرود چگال می‌باشد. همچنین g' = شتاب ثقل تغییر یافته در اثر اختلاف دانسیتهٔ جریان خروجی از جت و



شکل ۲- جت مستغرق متقاطع با جریان منبع پذیرنده

کلیه پارامترهای رابطه ۹ در بخش‌های گذشته توضیح داده شده‌اند. از آنجا که h_0 در آزمایش‌ها ثابت است، در تحلیل و بررسی‌ها از اثر آن صرف‌نظر شده است و لذا پارامترهای بدون بعد حاکم به شرح رابطه ۹ نوشته می‌شوند:

$$f\left(\frac{\rho_a}{\Delta\rho}, \frac{\rho_j U_0 d_p}{\mu_j}, \frac{U_0}{\sqrt{g'd_p}}, \theta_0, \frac{x_t}{d_p}, \frac{x_r}{d_p}, \frac{z_t}{d_p}, \frac{gd_p}{U_0^2}, \frac{\rho_{ct} - \rho_a}{\Delta\rho}, \frac{\rho_{cr} - \rho_a}{\Delta\rho}\right) = 0 \quad (9)$$

در رابطه ۹، عبارت اول نشان دهنده تغییرات دانسیته نسبی، عبارت دوم عدد رینولدز فلاکس در محل ورود جت به منبع پذیرنده، عبارت سوم عدد فرود چگال، Fr_d است و عبارت چهارم زاویه نازل جت با صفحه افقی است. عبارت‌های پنجم و ششم به ترتیب پارامترهای طولی فاصله افقی نقطه اوج و نقطه بازگشت منحنی خروجی جت هستند. عبارت هفتم مربوط به حداکثر ارتفاع منحنی است و عبارت هشتم نماینده عدد فرود جریان خروجی از نازل است. عبارت‌های نهم و دهم مربوط به میزان رقیق‌سازی در محل اوج و نقطه بازگشت جت به صورت نرمال شده است (عدد رقیق‌شدگی) که در واقع میزان کاهش نیروی شناوری را بیان می‌کند. از آنجا که پارامتر L_M پارامتری است طولی و نسبت اهمیت نیروی مومنتم به نیروی شناوری را نشان می‌دهد، می‌توان آن را در برخی از پارامترهای بدون بعد وارد تحلیل‌ها کرد. این نسبت طولی در واقع حاصل ضرب قطر نازل و عدد فرود چگال با اعمال ضریب ثابت است و از این رو نماینده هندسی-هیدرولیکی جریان جت خروجی است. با گذاشتن L_M به جای d_p در برخی از روابط بدون بعد می‌توان نوشت (رابطه ۱۰):

$$f\left(\frac{U_0}{\sqrt{g'd_p}}, \theta_0, \frac{x_t}{d_p}, \frac{x_r}{d_p}, \frac{z_t}{L_M}, \frac{gL_M}{U_0^2}, \frac{\rho_{ct} - \rho_a}{\Delta\rho}, \frac{\rho_{cr} - \rho_a}{\Delta\rho}\right) = 0 \quad (10)$$

در شکل ۲: d_p = قطر خروجی در جت‌های دایره‌ای (متر)؛ U_0 = سرعت اولیه جت (متر بر ثانیه)؛ U_a = سرعت یکنواخت سیال پذیرنده (که با توجه به ساکن بودن منبع پذیرنده برابر صفر است) (متر بر ثانیه)؛ و θ_0 = زاویه جت نسبت به جهت مثبت محور X (درجه). به طور کلی، در این شکل زیرنویس a مربوط به پارامترهای مرتبط با سیال پذیرنده^۱، زیرنویس‌های j و c به ترتیب مربوط به پارامترهای جت^۲ و موقعیت خط مرکزی^۳ منحنی خروجی، زیرنویس 0 مربوط به شرایط اولیه، زیرنویس t مربوط به نقطه اوج منحنی و زیرنویس r مربوط به نقطه بازگشت^۴ جت به ارتفاع h_0 است. بر این اساس ρ_a ، دانسیته سیال پذیرنده و ρ_j ، دانسیته سیال جت است. از آنجا که اختلاف چگالی سیال جت و منبع پذیرنده، $\Delta\rho$ ، در نیروی شناوری اهمیت می‌یابد، در تحلیل‌ها از این پارامتر استفاده شده است. پارامتر μ_j ، لزوجت مطلق اولیه سیال جت (پاسکال.ثانیه)؛ U_m ، سرعت خط مرکزی در مکان‌های مختلف از محل جت (متر بر ثانیه)؛ z_u ، مختصات ارتفاعی مرز بالایی فلاکس جت (متر)؛ h_0 ، ارتفاع نازل جت نسبت به سطح مبنا (متر)؛ z_t ، ارتفاع منحنی خروجی جت در محل اوج آن (متر)؛ ρ_{ct} ، دانسیته خط مرکزی در نقطه اوج (کیلوگرم بر متر مکعب)؛ و ρ_{cr} ، دانسیته خط مرکزی در محل نقطه بازگشت به ارتفاع h_0 (کیلوگرم بر متر مکعب)؛ x_t ، فاصله افقی نازل جت تا نقطه اوج منحنی خروجی (متر)؛ و x_r ، فاصله افقی نازل جت تا نقطه بازگشت جت به ارتفاع اولیه نازل (متر) است.

پارامترهای بدون بعد حاکم بر جریان جت مایل چگال

بر اساس برنامه‌ریزی‌ها و با توجه به شرایط وجود جریان جت در منبع پذیرنده ساکن، متغیرهای حاکم بر پدیده جریان خروجی جت در این پژوهش به شرح رابطه ۸ است:

$$f(d_p, \theta_0, h_0, \rho_a, \Delta\rho, \mu_j, U_0, z_t, \rho_{ct}, x_t, x_r, \rho_{cr}, g) = 0 \quad (8)$$

که از لحاظ انتقال جریان از یک سیستم به سیستم دیگر حداقل خطا وجود داشته باشد. این تنظیم‌ها با اجراهای مختلف و آزمون و خطا دنبال می‌شد تا بهترین نتیجه از نظر مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی حاصل از تحقیق احدیان و همکاران (Ahadiyan *et al.*, 2014) به دست آید. حال با تکیه بر این موضوع بعد خطی بلوک مش‌ها^۱ حداکثر برابر با ۱/۰۵ و بعد صفحه‌ای بلوک مش‌ها^۲ در هر سه صفحهٔ مختصاتی حداکثر برابر ۱/۶۵ به دست آمده است. برای اینکه مش‌بندی استحکام کافی داشته باشد باید بعد خطی بلوک‌های مش حداکثر ۱/۲۵ و بعد صفحه‌ای آن حداکثر ۳ باشد. همچنین، مدل تلاطمی به کار گرفته شده در Flow-3D مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ اصلاح شده (RNG) است که نسبت به سایر مدل‌ها نتایج بهتری در بر دارد. در این راستا مدل‌های تلاطمی مختلفی آزمایش شدند که برخی به دلیل دوفازی بودن جریان به طور کلی قابل استفاده نبودند و برخی دیگر خطای بیشتری نسبت به مدل یاد شده داشتند. با این توصیف، برای زاویه‌های جت ۶۰ درجه این مقایسه‌ها با داده‌های آزمایشگاهی انجام و بهترین نتایج استخراج شد. جدول ۳ نمونه‌ای از پارامترهای استخراج شده از مدل ریاضی را نمایش می‌دهد.

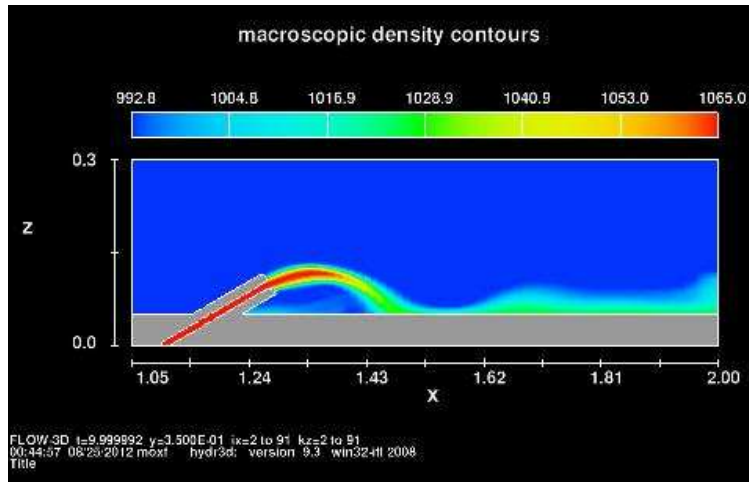
مطابق با جدول ۳، داده‌های مورد نظر از اجرای مدل ریاضی Flow-3D استخراج شده‌اند. این جدول برای جت با دانسیتهٔ سیال ۱۰۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب و سرعت ۱/۰ متر ثانیه ارائه شده است. دانسیتهٔ سیال پذیرنده در تمامی حالات برابر با ۹۹۴/۶ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. برای دانسیته‌های سیال جت برابر با ۱۰۱۵، ۱۰۲۵ و ۱۰۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب نیز محاسبات مشابه انجام و داده‌های مدنظر استخراج شد.

با توجه به این روابط، در کلیهٔ مدلسازی‌ها پارامترهای مختلف در روابط بدون بعد محاسبه شد. یادآوری می‌شود که پارامتر اول در رابطهٔ ۱۰ در مخرج عدد فرود چگال وجود دارد و از این رو بررسی با عدد فرود چگال این پارامتر را نیز شامل می‌شود. از طرفی، کلیهٔ مدل‌سازی‌ها در شرایط جریان آشفته بوده است و از این رو اثر عدد رینولدز ناچیز در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

با توجه به آنچه در بخش‌های گذشته گفته شد، تحقیق حاضر بر مبنای مدل‌سازی جریان خروجی از جت‌های کفی در زاویه‌های مختلف پایه‌گذاری شد. شکل ۳ نمونه‌ای از اجرای مدل ریاضی را نشان می‌دهد که دانسیتهٔ سیال جت برابر با ۱۰۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب و سرعت اولیه ۱/۰ متر بر ثانیه است.

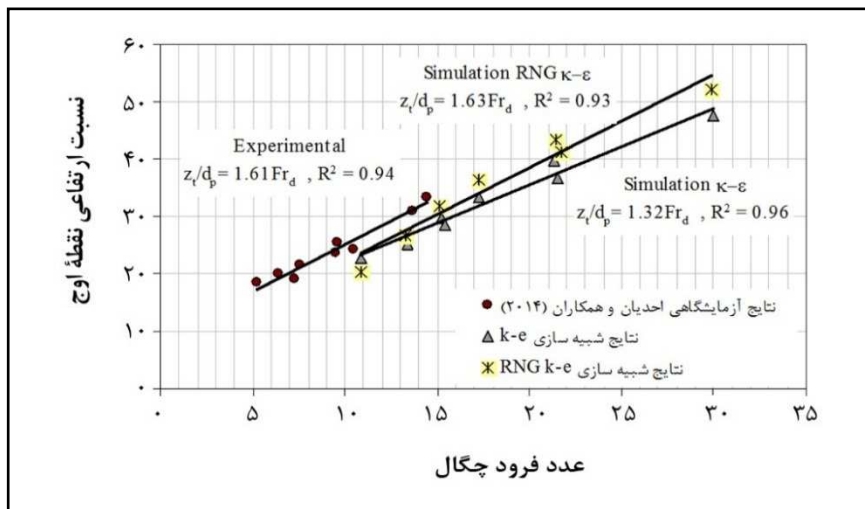
بر اساس نمایش جریان در محیط Flow-3D مطابق با شکل ۳، مسیر حرکتی جریان خروجی جت در شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی در سیستم مختصات دکارتی به صورت یک فایل خروجی، استخراج شد. یادآوری می‌شود که در این شکل منحنی خروجی جت با تغییرات دانسیته در طول حرکتی خود مشخص شده است. بر اساس برنامه‌ریزی‌ها، در مدل Flow-3D جریان دوفازی تحت تغییر در دانسیته مد نظر قرار گرفت. مش‌بندی در نرم‌افزار با دو پارامتر طولی و صفحه‌ای کنترل می‌شد تا همواره استحکام مش برقرار باشد. برای مش‌بندی از دو سیستم مش - بلوک استفاده شد که سیستم اول محیط پذیرنده و سیستم دوم هندسهٔ جت را در بر می‌گرفت. ابعاد بلوک‌ها نسبت به یکدیگر چنان در نظر گرفته شدند



شکل ۳- مدل‌سازی ریاضی جت ۳۰ درجه
(دانشیتة سیال جت=۱۰۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب؛ سرعت اولیه= ۱/۰ متر بر ثانیه)

جدول ۳- مقادیر محاسباتی جریان جت خروجی

ρ_{cr}	ρ_{ct}	X_T	X_t	Z_t	θ_0	ردیف
(کیلوگرم بر مترمکعب)	(کیلوگرم بر مترمکعب)	(سانتی‌متر)	(سانتی‌متر)	(سانتی‌متر)	(درجه)	
دانشیتة سیال ۱۰۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب و سرعت ۱/۰ متر ثانیه						
۹۹۵/۳	۹۹۹/۶	۵۱/۸۰	۲۶/۴۰	۱۶/۱۰	۳۰	۱
۹۹۸	۱۰۰۰/۸	۴۱/۲۵	۳۵/۲۵	۴۲/۰	۳۷/۵	۲
۹۹۵/۵	۱۰۰۰/۳	۶۴/۴۰	۴۲/۵۰	۴۴/۰	۴۵	۳
۹۹۶	۱۰۰۰/۵	۴۶/۷۰	۴۸/۷۵	۵۳/۶	۵۲/۵	۴
۹۹۴/۹	۹۹۵/۸	۲۹/۶۰	۲۴/۱۳	۶۸/۹۰	۶۰	۵



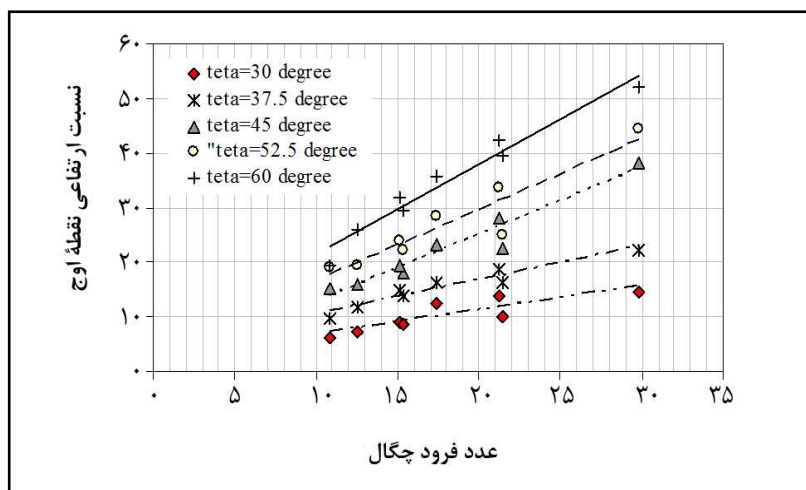
شکل ۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی برای زاویه ۶۰ درجه

بر اساس نتایج به دست آمده از شکل ۴ و شیب خط برازش داده شده، مشخص است که مدل RNG نتایج بهتری را به همراه داشته است. از طرفی، با محاسبه و مقایسه می‌توان دریافت که به طور کلی خطای محاسباتی شبیه‌سازی‌ها برای مدل تلاطمی و $k-\epsilon$ و $k-\epsilon$ RNG نسبت به داده‌های آزمایشگاهی به ترتیب برابر با ۹/۵ و ۱۸/۰۵ درصد است. دلیل این اختلاف را می‌توان در خود معادلات میزان استهلاك انرژی جنبشی جستجو کرد. در مجموع، مدل تلاطمی

بر اساس نتایج به دست آمده از شکل ۴ و شیب خط برازش داده شده، مشخص است که مدل RNG نتایج بهتری را به همراه داشته است. از طرفی، با محاسبه و مقایسه می‌توان دریافت که به طور کلی خطای محاسباتی شبیه‌سازی‌ها برای مدل تلاطمی و $k-\epsilon$ و $k-\epsilon$ RNG نسبت به داده‌های آزمایشگاهی به ترتیب برابر با ۹/۵ و ۱۸/۰۵ درصد است. دلیل این اختلاف را می‌توان در خود معادلات میزان استهلاك انرژی جنبشی جستجو کرد. در مجموع، مدل تلاطمی

جدول ۴- پارامترهای آماری حاصل از مقایسهٔ نسبت ارتفاعی نقطه اوج نتایج مدل ریاضی با داده‌های آزمایشگاهی

ردیف	میانگین داده‌ها (X)	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	قدر مطلق میانگین خطا (MAE)	RMSE/X (درصد)	MAE/X (درصد)	خطای استاندارد (درصد)
مدل آزمایشگاهی	۳۳/۰۷	-	-	-	-	-
مدل ریاضی $k-\epsilon$	۲۸/۷۷	۴/۷۶	۴/۳۰	۱۴/۳۹	۱۳/۰۱	۱۸/۰۵
مدل ریاضی $k-\epsilon$ RNG	۳۰/۳۳	۳/۰۸	۲/۷۶	۹/۳۲	۸/۳۵	۹/۵۵



شکل ۵- نتایج مدل‌سازی اثر زاویه بر نسبت ارتفاعی منحنی خروجی جت

به عنوان عامل حرکت عمودی جریان جت در محیط پذیرنده افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش نسبت ارتفاعی می‌شود. بررسی این موضوع به لحاظ عددی حائز اهمیت است زیرا با تخلیهٔ جریان جت هم‌فاز

در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با تغییر زاویه از ۳۰ به ۶۰ درجه، افزایشی قابل توجه در نسبت ارتفاعی منحنی خروجی جریان جت به وجود می‌آید. به طور کلی با افزایش زاویه، مؤلفهٔ عمودی مومنتم جریان

یاد شده افزایش نسبت ارتفاعی را به همراه دارد ولی میزان کمی آن اهمیت دارد. جدول ۵ درصد مقادیر افزایش یافته نسبت ارتفاعی را در زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد.

در محیط پذیرنده، علاوه بر نیروهای مومنتی، نیروی شناوری و وزن و همچنین نیروی اصطکاکی فشاری عوامل موثر بر توسعه جریان جت هستند. از نظر کیفی روشن است که غلبه نیروی مومنت بر نیروهای

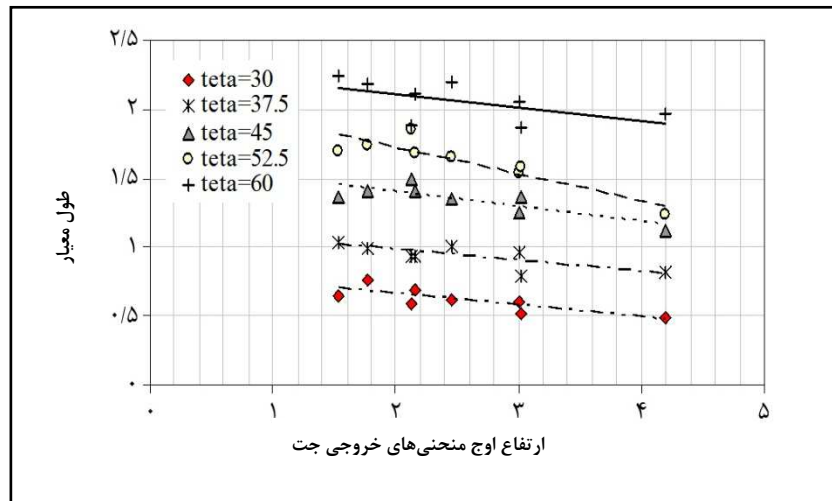
جدول ۵- درصد اختلاف نسبت ارتفاعی در زاویه‌های متفاوت

زاویه	۳۰	۳۷/۵	۴۵	۵۲/۵	۶۰
۳۰	صفر	+۵۰/۵۶	+۱۲۰/۲۰	+۱۶۲/۷۴	+۲۳۶/۸۷
۳۷/۵	-۳۳/۵۸	صفر	+۴۶/۳۱	+۷۴/۵۱	+۱۳/۷۴
۴۵	-۵۴/۶۰	-۳۱/۶۴	صفر	+۱۹/۲۷	+۵۲/۹۳
۵۲/۵	-۶۱/۹۴	-۴۲/۶۹	-۱۶/۱۶	صفر	۲۲/۲۸
۶۰	-۷۰/۳۱	-۵۵/۳۰	-۳۴/۶۱	-۲۲/۰۰	صفر

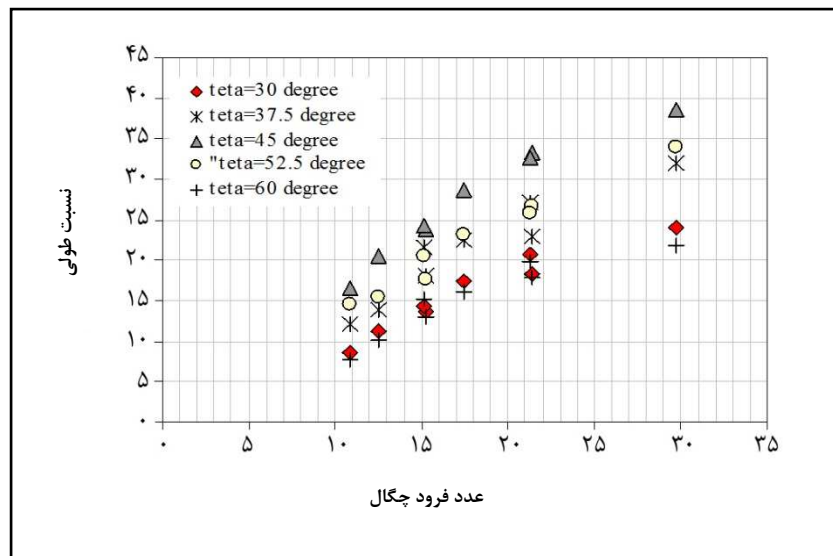
جریان پلوم تبدیل می‌شود. مسیر حرکت جت در حالت کلی تحت تأثیر برآیند نیروهای شناوری و مومنت در مرزهای داخلی جت و همچنین زاویه تخلیه آن است. برای ارتفاع بیشینه منحنی خروجی جریان جت این موضوع بررسی شده است و شکل ۶ آن را نمایش می‌دهد.

بر اساس شکل ۶ با افزایش طول معیار، ارتفاع اوج منحنی‌های خروجی کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان بدین صورت تحلیل کرد که با افزایش طول معیار در واقع ناحیه نزدیک جت افزایش و نیروهای شناوری بر نیروی اینرسی جریان خروجی جت غلبه یافته است و از این رو حداکثر ارتفاع اوج منحنی‌های خروجی کاهش یافته است. نکته قابل توجه این است که محور x ها در شکل ۶ عکس عامل نیروی شناوری به عدد فرود چگال جریان خروجی جت است که افزایش یافتن طول معیار در واقع نشان‌دهنده افزایش اثر نیروی شناوری است. برای مشخصات طولی نقطه اوج منحنی‌های خروجی جت نیز به شکلی مشابه بررسی شد. شکل ۷ تغییرات نسبت طولی نقطه اوج را در مقابل عدد فرود چگال در زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد.

برابر جدول ۵، اعداد مثبت و منفی به ترتیب به منزله درصد افزایش یافته و درصد کاهش یافته نسبت ارتفاعی هستند. برای مثال، برای تغییر زاویه از ۳۰ به ۴۵ درجه، نسبت ارتفاعی به مقدار ۱۲۰/۲۰ درصد افزایش می‌یابد (نسبت به زاویه ۳۰ درجه) و مقدار آن برای تغییر زاویه از ۴۵ به ۳۰ درجه ۵۴/۶۰ درصد (نسبت به زاویه ۴۵ درجه) کاهش خواهد داشت. نتیجه مهم حاصل از این جدول این است که برای تغییر زاویه از ۳۰ تا ۴۵ درجه، نسبت ارتفاعی به شدت افزایش اما برای تغییر زاویه از ۴۵ به ۵۲/۵ و از ۵۲/۵ به ۶۰ درجه، اختلاف به شدت کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع آن است که در زاویه‌های کمتر از ۴۵ درجه اثر نیروهای وزن سیال خروجی و به تبع آن نیروی شناوری نسبت به مولفه عمودی نیروهای مومنتی خیلی بیشتر و برای زاویه‌های بیشتر بالعکس است. تغییرات ارتفاع بیشینه منحنی خروجی جریان جت را می‌توان بر اساس طول معیار، L_M نیز ارائه کرد. تأثیر نیروی شناوری و مومنت در فاصله $x = L_M$ کاملاً مشهود است به طوری که در فاصله‌های زیاد از منبع رفتار جت مستغرق همانند رفتار پلوم خواهد شد. نکته قابل توجه این است که در اعداد فرود کوچک جریان جت سریعاً به



شکل ۶- تغییرات ارتفاع اوج منحنی‌های خروجی جت بر اساس طول معیار



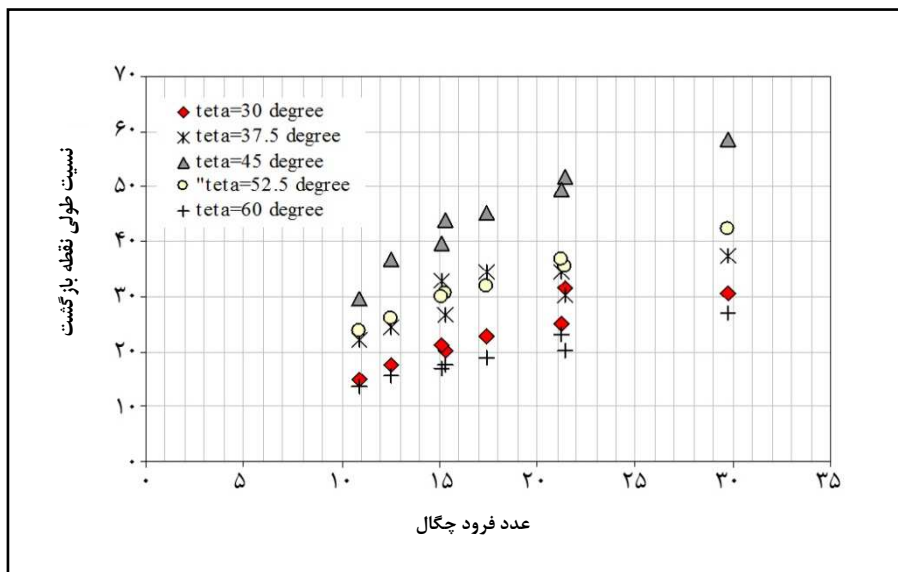
شکل ۷- نسبت طولی نقطهٔ اوج منحنی در مقابل عدد فرود چگال در زاویه‌های مختلف

غلبهٔ نیروهای حرکتی شامل نیروی اینرسی و مومنتم باعث افزایش مختصات نقطه‌ی اوج می‌شود. نکتهٔ قابل توجه این است که تغییرات بازه‌ی نسبت طولی در مقایسه با نسبت ارتفاعی نقطهٔ اوج در زاویه‌های مختلف کمتر است زیرا بر اساس قوانین پرتابی، در نقطهٔ اوج نسبت ارتفاعی با توان دوم سینوس زاویه در ارتباط است و نسبت طولی با توان اول آن، از این رو بازهٔ تغییرات نسبت ارتفاعی نقطهٔ اوج بیشتر خواهد بود. از طرفی از نظر کمی، اختلاف بین نسبت طولی در زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه به طور متوسط

همان طوری که در شکل ۷ مشخص است افزایش عدد فرود چگال باعث افزایش نسبت طولی منحنی‌های خروجی می‌شود؛ در این موضوع دو حالت امکان وقوع دارد: اول اینکه با افزایش عدد فرود چگال، به طور مستقیم سرعت خروجی جت افزایش می‌یابد و بر اساس قوانین پرتابه مختصات نقطهٔ اوج منحنی افزایش نشان می‌دهد. دوم اینکه افزایش عدد فرود چگال با کاهش دانسیتهٔ سیال خروجی جت رخ می‌دهد که در این حالت وزن سیال خروجی جت و به تبع آن نیروی شناوری کاهش می‌یابد و

زاویه ۴۵ درجه جت نسبت طولی تقریباً ۱/۲۵ برابر بیشتر از این دو زاویه ایجاد می‌کند. یادآوری می‌شود که نسبت طولی نقطه بازگشت نیز روندی مشابه با نسبت طولی نقطه اوج خواهد داشت. شکل ۸ تغییرات نقطه بازگشت را در مقابل عدد فرود چگال در زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد.

در اعداد فرود چگال مختلف در حدود ۵/۵ درصد است ولی برای زاویه ۴۵ درجه، نسبت به دو زاویه ۳۰ و ۶۰ درجه، این اختلاف در حدود ۲ برابر بیشتر است. به عبارت دیگر، طول طی شده نقطه اوج در زاویه ۴۵ درجه تقریباً دو برابر زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه است. همچنین برای دو زاویه ۳۷/۵ و ۵۲/۵ درجه نیز بررسی‌های نشان می‌دهد که

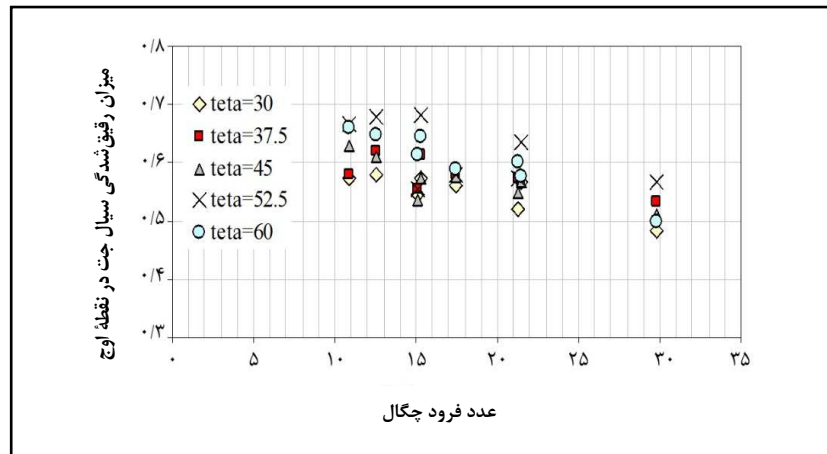


شکل ۸- نسبت طولی نقطه بازگشت منحنی در مقابل عدد فرود چگال در زاویه‌های مختلف

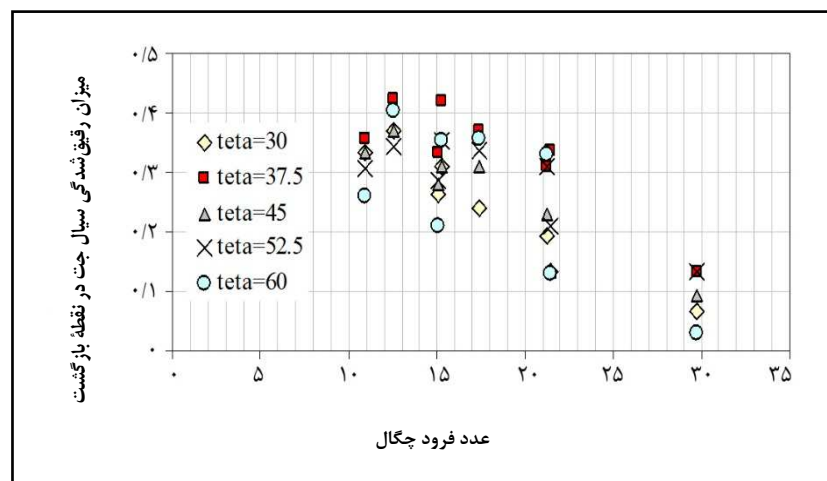
محیطی آنها را کاهش داد و در حالتی که زاویه آن ۴۵ درجه باشد حداکثر طول طی شده را به همراه خواهد داشت. این نکته را باید لحاظ کرد که هر چه ارتفاع اوج منحنی خروجی بیشتر باشد، لایه‌های سطحی جریان پذیرنده بیشتر تحت تأثیر اثرهای مخرب جریان غلیظ قرار می‌گیرند که بنابراین باید هر دو مشخصات، یکی حداکثر طول تراژکتوری و دیگری حداکثر ارتفاع آن، مدنظر قرار گیرد. یکی دیگر از مباحث تغییرات دانسیته سیال جت در طول مسیر منحنی خروجی است. هنگام کاربرد جت‌های کفی، تغییرات دانسیته نیز از نکات مهم به شمار می‌رود. در تحقیق حاضر، مطابق با برنامه‌ریزی‌ها، این موضوع نیز بررسی شد. بر این اساس دانسیته خط مرکزی منحنی تراژکتوری خروجی در نقطه اوج، ρ_{ct} ، و همچنین نقطه

بر اساس شکل ۸، بازه نسبت طولی نقطه بازگشت در زاویه ۳۰ و ۶۰ درجه بین ۱۳ تا ۳۰ است و برای زاویه جت ۴۵ درجه نسبت به افق، از ۳۰ تا حدود ۶۰ است. یعنی حداکثر طول طی شده منحنی خروجی جت برای زاویه ۴۵ درجه در حدود ۲ برابر زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه است. کاربرد این مبحث را می‌توان در مسائل زیست محیطی بیان کرد که در آن جریانی بسیار غلیظ به محیط پذیرنده با شرایط بهتر وارد می‌شود. برای مثال، پساب تاسیسات آب شیرین‌کن، که آب دریا را تصفیه می‌کنند، بسیار غلیظ‌تر و شورتر از آب دریا هستند؛ یا حتی فاضلاب‌هایی که به دریا یا رودخانه‌ها منتهی می‌شوند بسیار غلیظ‌تر از آب منبع پذیرنده هستند. در واقع، با استفاده از جت مستغرق کفی می‌توان اثرهای زیست

بازگشت، ρ_{cr} ، بررسی شد. شکل‌های ۹ و ۱۰ تغییرات میزان رقیق‌شدگی سیال جت در نقطهٔ اوج و نقطهٔ بازگشت منحنی تراژکتوری را نسبت به عدد فرود چگال در زاویه‌های مختلف جت کفی نشان می‌دهد.



شکل ۹- تغییرات میزان رقیق‌شدگی سیال جت در نقطهٔ اوج منحنی تراژکتوری جت



شکل ۱۰- تغییرات میزان رقیق‌شدگی سیال جت در نقطهٔ بازگشت منحنی تراژکتوری جت

فلاکس جریان خروجی جت می‌شود و از این‌رو میزان رقیق‌شدگی افزایش می‌یابد. نکتهٔ قابل توجه این‌است که اگر اعداد بدون بعد $\frac{\rho_{cr} - \rho_a}{\rho_j - \rho_a}$ و $\frac{\rho_{ct} - \rho_a}{\rho_j - \rho_a}$ اعداد رقیق‌شدگی در نقاط اوج و بازگشت منحنی خروجی جت نام‌گذاری شوند، حداکثر عدد رقیق‌شدگی در نقطهٔ اوج برابر با ۰/۴۸ و حداقل آن در زاویه‌های جت مختلف برابر ۰/۴۸ به دست آمده است در حالی که برای نقطهٔ بازگشت

شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود چگال میزان رقیق‌شدگی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش سرعت خروجی جت یا کاهش دانسیتهٔ سیال جت، میزان رقیق‌شدگی در نقاط اوج و بازگشت بیشتر خواهد بود. در واقع اگر عدد محور λ ها در شکل‌های بالا به یک نزدیک باشد حداقل رقیق‌شدگی و اگر به صفر نزدیک باشد حداکثر رقیق‌شدگی روی می‌دهد زیرا در اعداد فرود چگال بیشتر، سیال پیرامون سریع‌تر وارد

منحنی‌های خروجی می‌شود؛ تغییرات بازه نسبت طولی، در مقایسه با نسبت ارتفاعی نقطه اوج، در زاویه‌های مختلف کمتر است. از نظر کمی، اختلاف بین نسبت طولی در زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه به طور متوسط در اعداد فرود چگال مختلف در حدود ۵/۵ درصد، ولی برای زاویه ۴۵ درجه نسبت به زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه در حدود ۲ برابر بیشتر است. به عبارت دیگر، طول طی شده نقطه اوج در زاویه ۴۵ درجه تقریباً دو برابر طول طی شده زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه است. برای دو زاویه ۳۷/۵ و ۵۲/۵ درجه نیز بررسی‌ها نشان می‌دهد که زاویه ۴۵ درجه جت تقریباً نسبت طولی ۱/۲۵ برابر بیشتر از این دو زاویه ایجاد می‌کند.

- با نام‌گذاری اعداد بدون بعد $\frac{\rho_{cr} - \rho_a}{\rho_j - \rho_a}$ و

به عنوان اعداد رقیق‌شدگی در نقاط اوج و

بازگشت منحنی خروجی جت، هر چه عدد رقیق‌شدگی به یک نزدیک باشد حداقل رقیق‌شدگی و اگر به صفر نزدیک باشد حداکثر رقیق‌شدگی روی می‌دهد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود چگال میزان رقیق‌شدگی افزایش می‌یابد. حداکثر عدد رقیق‌شدگی در نقطه اوج برابر با ۰/۶۸ و حداقل آن در زاویه‌های مختلف جت برابر با ۰/۴۸ به دست آمد در حالی که برای نقطه بازگشت حداکثر عدد رقیق‌شدگی ۰/۴۲ و حداقل آن برابر با ۰/۰۳ به دست آمد. یادآوری می‌شود که تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در نقطه اوج زاویه‌های ۵۲/۵ و ۶۰ درجه حداقل و زاویه‌های ۳۰ و ۳۷/۵ درجه حداکثر رقیق‌شدگی را دارند.

حداکثر عدد رقیق‌شدگی ۰/۴۲ و حداقل آن ۰/۰۳ به دست آمد. یادآوری می‌شود که تحلیل‌ها و نیز شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند که زاویه‌های ۵۲/۵ و ۶۰ درجه در نقطه اوج حداقل رقیق‌شدگی و زاویه‌های ۳۰ و ۳۷/۵ درجه حداکثر رقیق‌شدگی را دارند.

نتیجه‌گیری

- نتایج مدل‌سازی با Flow-3D نشان داد که مدل تلاطمی اصلاح شده $k-\epsilon$ RNG نتایج بهتری را نسبت به مدل تلاطمی $k-\epsilon$ معمولی دارد. خطای محاسباتی شبیه‌سازی‌ها برای مدل تلاطمی و $k-\epsilon$ و $k-\epsilon$ RNG، نسبت به داده‌های آزمایشگاهی، به ترتیب برابر با ۹/۵ و ۱۸/۰۵ درصد است. دیگر مدل‌های تلاطمی موجود در Flow-3D یا قابل اجرا نبودند یا خطای بسیار زیاد داشتند.

- با تغییر زاویه از ۳۰ تا ۴۵ درجه، نسبت ارتفاعی در نقطه اوج منحنی خروجی جت به شدت افزایش می‌یابد در حالی که برای تغییر زاویه از ۴۵ به ۵۲/۵ و از ۵۲/۵ به ۶۰ درجه، اختلاف به شدت کاهش می‌یابد.

- تأثیر نیروی شناوری و مومنتم در فاصله $x = L_M$ کاملاً مشهود است به طوری که در فاصله‌های زیاد از منبع، رفتار جت مستغرق مانند رفتار پلوم‌ها خواهد شد. نکته قابل توجه این است که در اعداد فرود کوچک، جریان جت سریعاً به جریان پلوم تبدیل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش طول معیار ارتفاع اوج منحنی‌های خروجی کاهش می‌یابد.

- افزایش عدد فرود چگال باعث افزایش نسبت طولی

مراجع

Ahadiyan, J. and Musavi-Jahromi, S. H. 2009. Effects of jet hydraulic properties on geometry of trajectory in circular buoyant jets in the static ambient flow. J. Appl. Sci. 9 (21): 3843-3849.

- Ahadiyan, J., Mohhamadi, F. and Bahrami, H. 2014. Effect of vertical angle and hydraulic properties on flow distribution of single dense jet using physical model. *J. Khoramshahr Marine Sci. Technol.* 13(1): 51-60. (in Persian)
- Anon. 2012. *Flow-3D Documentation*. Flow Science, Inc.
- Batchelor, G. K. 1983. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press.
- Besalduch, L. A., Badas, M. G., Ferrari, S. and Querzoli, G. 2014. On the near field behavior of inclined negatively buoyant jets. *EPJ Conferences*. Vol. 67. University of Cagliari. DICAAR (Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura). Cagliari. Italy.
- Chris, C. K. L. and Joseph, H.W. L. 2012. Mixing of inclined dense jets in stationary ambient. *J. Hydro-Environ. Res.* 6(1): 9-28.
- Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F. and Nicosia, S. 2005. Bench scale investigation of inclined dense jets. *J. Hydraul. Eng.-ASCE*. 131(11): 1017-1022.
- Jirka, G. H. 2008. Improved discharge configurations for brine effluents from desalination plants. *J. Hydraul. Eng.-ASCE*. 134(1): 116-120.
- Kheirkhah-Gildeh, H., Mohammadian, A., Nistor, I. and Qiblawey, H. 2015a. Numerical modeling of 30° and 45° inclined dense turbulent jets in stationary ambient. *Environ. J. Fluid Mech.* 15(3): 537-562.
- Kheirkhah-Gildeh, H., Mohammadian, A., Nistor, I., Qiblawey, H. and Yan, X. 2015b. CFD modeling and analysis of the behavior of 30° and 45° inclined dense jets-new numerical insights. *J. Appl. Water Eng. Res.* 10.1080/23249676.2015.1090351, 1-16.
- Mohammadi, F. 2012. Effect of buoyant jet condition on dilution and wastewater in the ambient flow using physical model. Ph. D. Thesis. Shahid Chamran University (SCU). Ahwaz. Iran. (in Persian)
- Oliver, C. J., Davidson, M. J. and Nokes, R. I. 2013. Predicting the near-field mixing of desalination discharges in a stationary environment. *Desalination*, 30, 148-155.
- Seo, I. W., Kwon, S. J. and Yeo, H. K. 2004. Merging characteristics of buoyant discharges from rosette-type diffusers in shallow water. *KSCE- J. Civil Eng.* 8(6): 679-688.
- Wang, Y., Huang, Y., Liu, J., Wang, H. and Liu, Q. 2013. Flow-field characteristics of high-temperature annular buoyant jets and their development laws influenced by ventilation system. *Sci. World J.* Article ID 826514.
- Zeitoun, M. A., Mcilhenney, W. F. and Reid, R. O. 1969. Disposal of effluents from desalination plants. *Chemical Engineering Progress Symposium, Series/Water*. No. 6597. 156-166.
- Zeitoun, M. A., Reid, R. O., Mchilhenney, W. F. and Mitchell, T. M. 1970. Model studies of outfall system for desalination plants. *Research and Development Progress Report*. 804. Office of Saline Water. U.S. Department of Interior. Washington, D. C.

Hydraulic Simulation of Sewage Discharge in an Irrigation and Drainage System by Changing the Vertical Angle of the Bottom Circular Buoyant Jet

J. Ahadiyan^{*}, S. Pipelzadeh and M. Omidvarinia

^{*} Corresponding Author: Ph. D. in Hydraulic Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University (SCU), Ahwaz, Iran. Email: ja_ahadiyan@yahoo.com

Received: 23 August 2015, Accepted: 5 December 2015

Sewage discharged into an ambient water system such as a river or sea is a serious problem in irrigation and drainage networks. Concerns about pollution require decreasing the initial dilution for disposal of brine wastewater into ambient environments. A quick and effective way to dilute dense waste flow is turbulence from a submerged jet. The present research investigated use of a buoyant jet at different vertical angles and fluid injection rates on dilution. Flow-3D was used for modeling. Angles of 30°, 37.5°, 45°, 52.5° and 60° were considered at concentrations of 10, 20, 30 and 40 g/l and different jet injection discharges. The experimental data was then used for verification and validation. The results showed that the RNG κ - ϵ turbulence model with an error of about 9.5% had acceptable accuracy in the prediction of jet trajectory properties of injection flow. These results also showed that increasing the length (L_M) decreased the peak height of the trajectory curve. The quantitative findings showed that the difference between the distance ratio of the peak trajectory at a 45° angle was twice that of the 30° and 60° angles at the different densimetric Froude numbers. The maximum and minimum dilution values at the peak trajectory were 0.68 and 0.48, respectively. At the peak for the return point, the maximum and minimum values were 0.42 and 0.03, respectively.

Keywords: Circular Round Buoyant Jet, Densimetric Froude Number, Dilution Number, Mathematical Model