

Experimental Study of Hydraulic Behavior of Vertical Submerged Jet Under Types of Formation and Submergence Depth

Masoud Sakhaei¹, Amirhamzeh Haghiabi^{2*}, Atefeh Parvaresh Rizi³, Hasan Torabi Podeh²

1- Ph.D. Candidate in Hydraulic Structures, Water Engineering Department, Lorestan University.

2- Professor in Hydraulic Structures, Water Engineering Department, Lorestan University.

3-Associate Professor, Irrigation and Reclamation Engineering Department, University of Tehran.

* haghiabi.a@lu.ac.ir

Received: 18 August 2024

Accepted: 12 December 2024

Discussion: 22 December 2025



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The co-phase submerged jets of flow with the surrounding environment are generally analyzed under the influence of momentum parameters. Therefore, in the hydrodynamic analysis of these jets, the Euler equation, which describes the governing relationships of the flow momentum, is used. Since the change in flow velocity represents the amount of the momentum, the flow velocity parameter is considered one of the main parameters in the analysis of submerged flow jets. In submerged jets, because the jet is surrounded by a co-phase environment, complexities arise in the flow equations that require experimental studies for understanding. Consequently, numerous experimental studies have been conducted on flow jets.

The force resulting from the misalignment of the dominant inertial movement direction with the gravitational force in upward vertical submerged jets means that the governing equations and jet behavior differ from those of downward vertical submerged jets, the governing equations and jet behavior differ from those of downward vertical submerged jets. Therefore, in this study, the hydraulic characteristics of upward vertical submerged jets are examined by measuring the flow velocity parameter, influenced by factors such as velocity, geometry, and the degree of submersion of the jet nozzle.

Methodology: For conducting this research, a water jet was directed through a pipe with a diameter of 110 mm, with five different flow rates ranging from 2 to 10 liters per second in 2 liter increments, into a plunge pool with dimensions of 1.8×1.2 meters and a fixed water depth of 73 cm. The experiments were conducted under two conditions, with initial levels of 6 centimeters and 20 centimeters above the bottom of the pool. The flow velocity measurements in all conditions were taken at levels of 23, 40, and 60 centimeters above the bottom, as longitudinal profiles, using a three-dimensional velocity meter (ADV). In the first condition, the measurements focused solely on the mentioned jet flow without any changes to its geometry. However, in the second condition, in addition to raising the jet nozzle level from 6 centimeters to 20 centimeters above the bottom, two divergent nozzle angles of 4 and 11 degrees were also examined. Data filtering and processing were performed using Win ADV software to eliminate potential errors.

Results and Discussion: For the first test case, the longitudinal velocity profiles, plotted along the axis

passing through the center of the jet at different levels, were examined. The results indicate that due to the turbulent effect of the flow after exiting the jet nozzle and the effect of gravity, the flow mass undergoes dispersion, with the flow velocity initially decreasing in a relatively linear manner and then gradually decreasing exponentially, eventually flowing as a horizontal jet at the water surface. The intensity of changes in the initial sections of the curve is low, numerically ranging from 6% to 11%, and then increasing to around 20% (the slope increases with increasing flow rate). The shape of the velocity profiles transitions from sharp to gradually broadening as the distance from the jet nozzle increases. The measured turbulence intensities at the central axis of the jet for the tested flow rates ranged from 0.32 to 0.50.

In the second test case, with the first measurement section closer to the jet nozzle, the measurements show that the velocity along the central axis of the jet initially remains unchanged relative to the jet nozzle for a certain distance before decreasing. This change in velocity along the central axis of the jet appears as a break in the velocity graphs. By adding two divergence sections to the experiments and repeating the data collection, the velocity profiles and central axis velocities of the jet were compared in three scenarios. In the case of a 4-degree divergence angle, although the flow profile pattern is largely similar to the non-divergent case, the central axis velocities of the jet decrease. Increasing the divergence angle from 4 to 11 degrees shows a significant change in flow patterns and central axis velocities compared to the non-divergent condition. The turbulence intensity values are also affected by these changes in jet geometry, with turbulence intensity increasing noticeably with the divergence angle. Besides the impact of jet geometry, comparing velocity values between the two test cases under non-divergent conditions, influenced by two different submersion heads at the jet nozzle, indicates that increasing the submersion head increases the collapse rate of the jet core due to the effect of the water weight in the basin on the jet nozzle.

Conclusion: The hydraulic behavior of an upward vertical submerged jet was examined under the influence of the geometric parameters of the environment, the submersion depth of the jet nozzle, and the nozzle divergence, with five different flow rates in the velocity range of 0.25 to approximately 1.25 meters per second. Using an ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) for velocity measurements, the mean and oscillatory velocity profiles along the axis passing through the center of the jet were analyzed. The analysis shows that increasing the submersion depth of the nozzle leads to an increased collapse rate of the jet core. Quantitatively, this impact results in a 20% to 25% reduction in mean velocity values at the central core of the jet when there is approximately a 37% increase in the submersion head. Additionally, the results indicate that increasing the divergence from 0 to 4 degrees reduces mean velocity values by about 25%. For a divergence angle of 11 degrees, the reduction in average velocity at the jet core's breakdown point is about 32% compared to the normal condition.

Keywords: Submerged Jet, Turbulence Intensity, Jet Nozzle Divergence, Submersion Depth.

ارزیابی آزمایشگاهی رفتار هیدرولیکی جت مستغرق عمودی، تحت تأثیر نوع شکل گیری و عمق استغراق

مسعود سخائی^۱، امیر حمزه حق‌آبی^{۲*}، عاطفه پرورش ریزی^۳، حسن ترابی پوده^۲

۱- دانشجوی دکتری سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان.

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان.

۳- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

* haggiabi.a@lu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۲، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱ ❁❁❁ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: جریان جت‌های سیال مستغرق هم‌فاز با محیط، بطور عمومی تحت تأثیر فراسنجه اصلی مومنتم تحلیل می‌شوند و به همین دلیل در تحلیل هیدرودینامیکی جریان آنها، مشابه عموم جریان سیال‌ها از رابطه اولر که بیان کننده رابطه‌های حاکم بر مومنتم جریان است استفاده می‌شود. از آنجایی که تغییرات سرعت جریان بیانگر میزان مومنتم آن است، فراسنجه سرعت بایستی به عنوان یکی از فراسنجه‌های اصلی در جریان جت‌ها بررسی شود. در جت‌های مستغرق به واسطه احاطه شدن جت توسط محیط هم‌فاز، پیچیدگی‌هایی در معادله جریان بروز می‌نماید که شناخت آنها نیازمند بررسی و ارزیابی آزمایشگاهی است. در این تحقیق نیمرخ‌های سرعت در جت جریان مستغرق عمودی رو به بالا، تحت تأثیر فراسنجه‌های سرعت اولیه، نوع شکل‌گیری و عمق استغراق بر روی دهانه جت مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. هدف اصلی از این آزمایش ارزیابی تأثیر این پارامترها بر نرخ تغییرات سرعت در توده جت و به تبع آن تغییر در مقادیر شدت آشفستگی است. نتایج نشان داد که کارکرد هندسه خروجی جت به شکل اثرگذاری بر محدوده میدان جریان در گستره و تسریع در رسیدن به ناحیه توسعه‌یافتگی آن است. به همین ترتیب، با افزایش واگرایی دهانه جت مقدار سرعت‌های میانگین در مرکز توده جت با سرعت بیشتری نزولی خواهند شد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش واگرایی دهانه خروجی جت جریان وارده به حوضچه، کاهش ۳۲ درصدی در مقادیر میانگین سرعت متوسط در نقطه شکست هسته جت از زاویه ۰ تا ۱۱ درجه رخ می‌دهد. علاوه بر این، افزایش میزان عمق استغراق روی دهانه جت به واسطه تقابل تأثیر آن بر اینرسی حرکتی جت، منجر به کاهش مقادیر سرعت میانگین شد. به نحوی که با افزایش ۳۷ درصدی عمق استغراق روی دهانه جت، مقادیر سرعت متوسط در مرکز توده جریان جت در حدود ۲۵ درصد کاهش نشان داد.

کلیدواژگان: جت مستغرق، شدت آشفستگی، واگرایی دهانه، عمق استغراق.

۱- مقدمه

یکی دیگر از نمودهای پدیده انتشار و اختلاط جریان که ممکن است به شکل طبیعی و یا مصنوعی رخ دهد جت جریان است. از نظر هیدرولیکی به جریان آشفته‌ای که به طور پیوسته از یک منبع خارج و وارد یک محیط پذیرنده هم‌فاز یا غیر هم‌فاز شود جت جریان اطلاق می‌شود. محیط پذیرنده می‌تواند هوا، آب یا هر سیال دیگری باشد. در صورتی که جت به سیالی از جنس خود تزریق شود، جت مستغرق و در غیر این صورت جت آزاد تلقی می‌شود. در

انتشار و اختلاط جریان از جمله پدیده‌های متداول هیدرولیکی است که در محیط‌های آبی همواره در حال رخ دادن است. به عنوان نمونه ورود جریان از یک آبراهه فرعی به شاخه اصلی رودخانه بیانگر حالتی از انتشار و اختلاط جریان است که خود تابع فراسنجه‌های چندی از جمله مشخصه‌های هیدرولیکی دو جریان، هندسه محیط و ویژگی‌های سیال همچون غلظت آن است.

ویژگی‌هایی مانند سه‌بعدی بودن جریان جت و نبود راه حل مشخص و معین برای تعیین سرعت و فشارهای نوسانی در درون توده جریان، عامل بازدارنده از بررسی دقیق تحلیلی این گونه جریان‌ها است. افزون بر این تغییر نرخ سرعت جریان جت وارده به محیط پذیرنده ساکن به معنای انتقال مومنت درون سیالی است که نتیجه آن در قالب پدیده انتشار می‌تواند قابل توصیف باشد. بر این اساس، استفاده از مدل‌سازی فیزیکی یکی از بنیادی‌ترین روش‌ها برای بررسی متغیرهای هیدرولیکی و هیدروپنماتیکی این پدیده است.

معادله‌های حاکم بر جریان جت‌های آشفته به‌طور عام همانند جریان‌های آشفته است که نسبت به جریان آرام دارای بخش اضافه فراسنجه‌های نوسانی (تنش‌های رینولدز) هستند. فرم عمومی این معادله‌ها که در شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شوند برای پیوستگی جریان و انتقال مومنت به شکل رابطه‌های زیر است (Schlichting, 1979).

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

معادله مومنت:

$$(2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\rho \partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (v \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j})$$

که در آن i و j نشان دهنده راستا هستند، u_i مولفه سرعت در راستای x_i ، ρ چگالی سیال، v لزجت ملکولی و g_i مولفه شتاب ثقل در جهت i و p فشار در هر نقطه از سیال است. در جریان جت‌های آزاد نشان داده شده که جت مایع برای کمینه کردن انرژی سطحی خود تمایل به شکسته شدن و تبدیل شدن به قطره را دارد که مساحت کمتری نسبت به ستون جت مایع دارد (Jaberi et al., 2018)، اما در جت‌های مستغرق به واسطه احاطه جت توسط محیط هم‌فاز پیچیدگی‌هایی در معادله‌های جریان جت ایجاد می‌شود که حل آنها را دشوار می‌کند. از سوی دیگر، به‌واسطه وارد نشدن جریان هوا به درون جت مستغرق،

واقع در جریان جت‌های آزاد آشفته، جداره محدود کننده‌ای وجود ندارد که بر رفتار جت تاثیرگذار باشد. (Ahadian, 2012).

از جمله کاربری جت جریان مستغرق در کارهای مهندسی استفاده از نیروی جنبشی ناشی از سرعت آن در لایروبی حوضچه‌ها و خارج کردن اجسامی مانند لنگر از درون بسترهای رسوبی بنادر است. در این راستا ابعاد حفره آبشستگی و شرایط بحرانی برای آغاز آبشستگی مهم‌ترین فراسنجه‌هایی هستند که مورد تحلیل قرار می‌گیرند. ابعاد سوراخ آبشستگی که به نوعی بیانگر نیروی جت است، تابعی از سرعت جت، مدت زمان آبشستگی، ارتفاع برخورد، قطر نازل جت، محتوی رسوب‌های آب و تنش برشی بحرانی مصالح بستر است. (Chuanming et al., 2020).

برای استهلاک انرژی جریان سرریز سدها که به شکل جت ریزش می‌کند از حوضچه‌های استغراق در پایاب سد کمک گرفته می‌شود که در زمینه آن بررسی‌های زیادی انجام شده است. با پیشرفت فناوری، تولید جت‌های جریان با هدف‌هایی چون تولید انرژی در نیروگاه‌های برق‌آبی، استهلاک انرژی جریان در حوضچه‌های آرامش تاسیسات آبی و همچنین با کاربری‌های خاص در صنایع شیمیایی و غذایی با اهدافی مانند تغلیظ و اختلاط، رقیق‌سازی آلودگی، ماشین‌کاری و برش‌کاری در صنایع و ... توسعه یافت. با هدف شناخت ویژگی جت‌های جریان آزاد تحقیق‌های گسترده‌ای در زمینه جنبه‌های مختلف موضوع از جمله تحلیل هیدروپنماتیک نیروهای وارده بر سازه مستهلک کننده جریان و تاثیر فرسایشی آن، چگونگی پخشیدگی جت حاوی جریان‌های غلیظ در محیط پذیرنده، تاثیر فرم و هندسه نازل جت بر فراسنجه‌های هیدرولیکی آن در کاربری‌های صنعتی و ... صورت گرفته است، اما در زمینه شناخت رفتار جت‌های جریان مستغرق در تاسیسات آب و فاضلاب تحقیقات کاملی انجام نشده است. این مجموعه نتایج بخشی از بررسی و ارزیابی‌های انجام شده بر روی جت جریان مستغرق است که با هدف شناخت رفتار هیدرولیکی جت جریان مستغرق وارده به یک حوضچه از کف، به حالت عمود و به سمت بالا (Upward flow) طرح‌ریزی شده است.

$$\frac{L_b}{D_0 \times F_0} = \frac{1.05}{C^{0.82}} \quad (3)$$

$$C = 1.14 T_u F_0^2 \quad (4)$$

که در آنها T_u ، C ، F_0 ، D_0 و L_b به ترتیب شدت آشفتگی، فراسنجه آشفتگی جت، عدد فرود، قطر دهانه جت و طول شکست جت هستند. سه فراسنجه اول بدون بعد و فراسنجه‌های چهارم و پنجم برحسب متر هستند. شدت آشفتگی بروفق تعریف متداول آن در هیدرودینامیک سیال‌ها مقیاسی برای سنجش میزان آشفتگی جریان است که بر مبنای رابطه (۵) تعریف می‌شود.

$$Tu = \frac{U'}{U_0} \quad (5)$$

در این رابطه U_0 و U' به ترتیب جذر میانگین مربع سرعت‌های نوسانی و میانگین سرعت انتشار جت هستند که بر حسب روابط زیر تعریف می‌شوند.

$$U = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (6)$$

$$U' = \sqrt{u'^2 + v'^2 + w'^2} \quad (7)$$

در این رابطه u ، v ، w ، u' ، v' ، w' به ترتیب سرعت‌های میانگین و میانگین سرعت‌های نوسانی در راستای X ، Y و Z هستند (Ervin and Falvey, 1987). ناحیه‌بندی جریان برای پیکره یک جت جریان مستغرق عمودی رو به پائین در شکل ۱ آمده است.

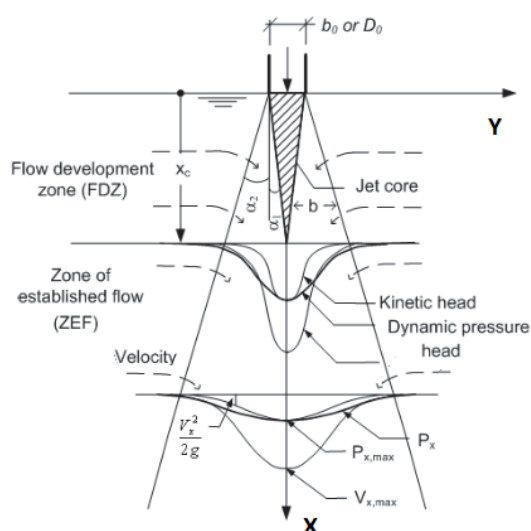


Fig. 1 General view of a submergence downward jet (Manso, 2006)

شکل ۱ نمای کلی جت مستغرق رو به پائین (Manso, 2006)

تحلیل جریان را می‌توان بدون ورود به پیچیدگی‌های جریان‌های دوفازی، در محیط تک‌فازی انجام داد. در بررسی آزمایشگاهی اندازه‌گیری دقیق متغیرهای آزمایش دارای اهمیت بالایی است و براین مبنا استفاده از ابزارهای مناسب و کاربردی برای اندازه‌گیری دقیق ویژگی‌های جریان بسیار مهم است. در میدان جریان آشفته، اندازه‌گیری سرعت سه‌بعدی می‌تواند منجر به شناخت مطلوبی از شرایط توده جریان شود.

در صورتی که محیط بی‌نهایت فرض شود، جریان جت به شکل شعاعی و در همه جهتها منتشر می‌شود، اما در شرایط آزمایشگاهی و حتی میدانی جریان وارد شده جت به یک محیط پذیرنده، تحت تاثیر مرزهای محیط و خروجی جریان قرار خواهد گرفت و بینهایت فرض کردن محیط به شکل مطلق صحیح نیست.

نظریه توزیع دو بعدی سرعت^۱ با استفاده از فرض توزیع هیدرواستاتیک فشار در حوضچه استغراق دلالت بر آن دارد که سرعت جت نفوذی در یک محیط آب راکد بر مبنای رشد و افزایش ضخامت لایه برشی در ازای کاهش مومنتم جریان است. در نظریه پخش دوبعدی جت، ویژگی‌های ساختار جریان در حوضچه استغراق به صورت میانگین زمانی تعریف شده و از نوسان‌های لحظه‌ای صرف‌نظر می‌شود (Bollaert and Schleiss, 2003).

ساختار عمومی جت‌های جریان عمودی رو به پائین، متشکل از دو ناحیه اصلی در حال توسعه^۲ و ناحیه توسعه یافته^۳ است (Manso, 2006). در ناحیه در حال توسعه جت توده مرکزی جریان همچنان به شکل یک هسته صلب قابل تشخیص است در حالی که در ناحیه توسعه‌یافتگی جت، هسته جریان از بین رفته و به تعبیری شکسته شده و به اصطلاح این فاصله را طول شکست جت نامیده‌اند. به بیان دیگر طول شکست یا فروپاشی، اختلاف تراز ارتفاعی بین تراز انتشار و تراز است که جت به شکل کامل توسعه می‌یابد (Fathi-moghadam et al., 2019).

رابطه‌های (۳) و (۴) برای برآورد طول شکست جت‌های دایروی توسط Ervin et al. (1997) پیشنهاد شده است:

3. Established flow zone

1. Two-dimensional Jet Diffusion Theory
2. Flow development

حوضچه با عمق آب محدود، آزمایشی را ترتیب دادند و با اندازه‌گیری فراسنجه سرعت به تحلیل این‌گونه جریان‌ها پرداختند. در تحقیق آنان در محدوده میدان اثر جریان جت چهار ناحیه مختلف مطابق شکل ۲ تعریف شده است. ناحیه شکل‌گیری جریان^۲ (ZFE)، ناحیه جریان شکل‌گرفته^۳ (ZEF)، ناحیه برخورد سطحی^۴ (ZSI) و ناحیه جت‌های افقی^۵ (ZJ). نتایج این تحقیق نشان داده اگر عدد رینولدز جریان به اندازه کافی بزرگ باشد که منجر به تولید جت آشفته شود، جریان مستقل از مقدار عددی رینولدز جریان ورودی به حوضچه است. همچنین جریان جت در ناحیه شکل‌گیری ناهمسان بوده و با دولایه برشی آزاد در امتداد لبه روزنه خروجی جت مشخص می‌شود ولی در ناحیه جریان شکل‌گرفته، جریان خودمشابه^۶ است. این تحقیق همچنین نشان داده که گسترش جت‌های عمودی محدود شده، بزرگ‌تر از جت‌های آزاد است، بنابراین واپاشی سریع‌تر سرعت مربوط به محور مرکزی جت است. جت آشفته عمودی بعد از برخورد به ناحیه سطحی آب با آشفتگی شدید به دو جت صفحه‌ای افقی با جهت مخالف یکدیگر تبدیل می‌شود و در نهایت، سرعت جت در ناحیه ZHJ به شکل نمایی کاهش می‌یابد.

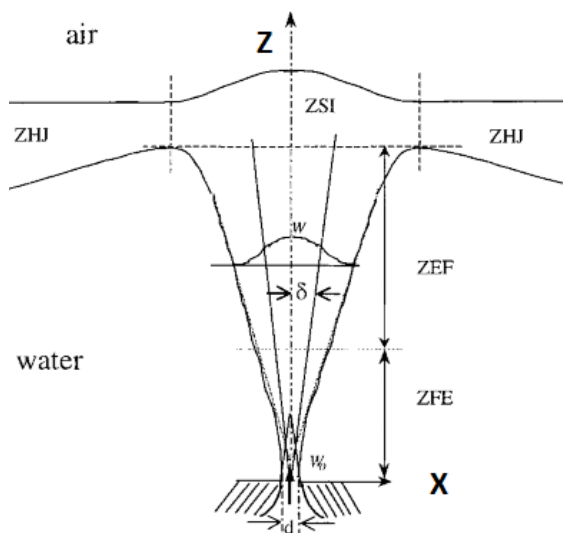


Fig. 2 General view of Vertical Turbulent Upward Plane Jet Impinging onto Free Surface. (Kuang et al. 2001)

شکل ۲ نمای کلی از یک جت مستغرق عمودی آشفته روبه بالا، به سمت سطح آزاد (Kuang et al. 2001)

بنا بر نتایج تحقیق یادشده، فرایند انتقال مومنتم در ناحیه در حال توسعه جت منجر به زوال هسته درونی جت با یک زاویه تقریبی در حدود ۴/۵ درجه می‌شود. افزون بر این زاویه بیرونی توسعه‌یافتگی جت نیز در حدود ۱۱ درجه ذکر شده است. همچنین برای جت آزاد فاصله نقطه رکود جت^۱ تا دهانه آن در حدود ۶/۲ برابر قطر دهانه جت برآورد شده است. این درحالی است که Belatos et al. (1977) این فاصله توسعه یافتگی جت از دهانه آن را در حدود ۱۰ برابر قطر جت تعیین کرده‌اند و فاصله‌های کمتر از ۶ برابر قطر دهانه را همچنان ناحیه در حال توسعه منظور نموده‌اند. Manso (2006) این فاصله را برای جت جریان ۴ تا ۶ برابر قطر دهانه جت برآورد کرد. پخشیدگی یا مستهلک شدن جت تابعی از فراسنجه‌های سرعت اولیه جت، چگالی سیال، شدت آشفتگی، هندسه جت و محیط است. از آنجا که این رابطه‌ها برای جت جریان رو به پائین ارائه شده، فراسنجه ثقل همسو با جهت انتشار جت است. در این شرایط دو پارامتر اصلی در تقابل با یکدیگر وجود دارند که بر روی هندسه جت اثر گذار هستند. جت آب در اثر آشفتگی منبسط و در اثر شتاب جاذبه منقبض می‌شود. در صورتی که برای یک جت جریان مستغرق روبه بالا، جهت غالب جریان جت در خلاف جهت ثقل بوده و در نتیجه معادله‌های طرح شده برای جت روبه پائین در این حالت صادق نیستند.

Garrad and Patric (1983) تغییر عمودی سرعت در امتداد محور جت و سرعت‌های شعاعی جت جریان مستغرق روبه بالا را در حالت بدون واگرایی دهانه آن با سه تراز مختلف سطح آزاد آب در سه مقطع عرضی بررسی و ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که فروپاشی سرعت محوری برای جت برخوردی به سطح آزاد در آغاز همانند جت آزاد است، اما با نزدیک شدن به سطح آزاد، سرعت به تندی کاهش می‌یابد. افزون بر این نیمرخ‌های سرعت شعاعی سطح آزاد با کاهش فاصله از محور جت، تغییر شکل محسوسی نشان داده‌اند. (Kuang et al. 2001) برای بررسی شرایط جریان جت عمودی انتشار یافته از کف یک

4. Zone of surface impingement
5. Zone of horizontal jets
6. Self-Similar

1. stagnatin point
2. Zone of flow establishment
3. Zone of established flow

آبی، تصفیه آب و فاضلاب و همچنین صنایع شیمیایی و غذایی در مقیاس‌های کاربردی، لازم است بررسی و ارزیابی متناسبی صورت پذیرد.

هدف از این تحقیق مطالعه و بررسی نیمرخ‌ها و میدان سرعت جت‌های مستغرق عمودی رو به بالا، متاثر از فراسنجه‌های عمق استغراق بر روی دهانه و همچنین تاثیر واگرایی دهانه جت به شکل آزمایشگاهی است که وضعیت کاملی از عوامل موثر بر رفتار جت را نشان دهد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- وسایل و تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های این تحقیق بر روی یک حوضچه پلکسی گلس با ابعاد $1/8 \times 1/2$ متر و ارتفاع $0/90$ متر انجام شد. ورودی جریان به حوضچه، از کف و در قسمت میانی توسط لوله‌ای با قطر 110 میلی‌متر از جنس پلیکا در نظر گرفته شد. بالاترین تراز آب قابل تنظیم در حوضچه بواسطه تعبیه یک سرریز جانبی بر روی دیواره حوضچه 73 سانتی‌متر به دست آمد که با رسیدن آب به این تراز، جریان مازاد از سرریز حوضچه به بیرون تخلیه می‌شود. اندازه‌گیری تراز سطح آب بوسیله اشل عمودی نصب شده در دورترین نقطه به محل ورود جت به محیط با دقت 1 میلی‌متر قابل انجام است. برای تنظیم سطح آب در ترازهای پایین‌تر و برای دبی‌های مختلف دو خروجی لوله‌ای مجهز به شیرکنترل 2 اینچ در گوشه‌هایی از کف حوضچه و یک خروجی همانند دیگر بر روی دیوار حوضچه تعبیه شده است. جریان ورودی به حوضچه از محل مخزن هوایی آزمایشگاه و از مسیر شبکه لوله‌کشی مربوط به آن تامین شد. میزان دبی ورودی به حوضچه با نصب یک جریان‌سنج مغناطیسی 4 اینچ مدل MF300 با دقت $0/5$ درصد که بر روی لوله جریان، پیش از ورود به حوضچه اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری مولفه‌های سرعت سه‌بعدی تحقیق بوسیله سرعت‌سنج سه‌بعدی ADV مدل Nortek Vectrino و با بسامد نمونه برداری 200 هرتز آن انجام شد. دقت اندازه‌گیری این سرعت‌سنج در حدود ± 1 میلی‌متر بر ثانیه است و محدوده سرعت در این ابزار از $\pm 0/1$ تا ± 4

نسبت‌های منظور شده برای ناحیه‌بندی جت‌های جریان عمودی روبه بالا در تحقیق یادشده بر مبنای نسبت فراسنجه فاصله نقطه از دهانه جت (Z)، به قطر دهانه جهت (d) است. براین مبنا ناحیه‌بندی به این شکل است: بازه $z/d \leq 25$ ناحیه شکل‌گیری جریان، بازه $25 \leq z/d \leq 100$ ناحیه جریان ایجاد شده و بازه $100 \leq z/d \leq 130$ ناحیه برخورد سطحی.

نتایج تجزیه و تحلیل‌ها برای جت‌های با عمق نامحدود آب نشان‌دهنده جت در ناحیه (ZFE) با افزایش Z توسعه یافته و سرعت جریان در خط مرکزی در قالب نمایی و به شکل $Z^{(-1/2)}$ کاهش می‌یابد. در مقایسه بین دو حالت جت عمودی رو به بالا و رو به پایین باید گفت: ناحیه شکل‌گیری جریان در واقع ناحیه وجود یک هسته بالقوه بوده و از آنجا که جریان در این ناحیه می‌تواند تحت تاثیر هندسه دهانه خروجی جت باشد، باور بر آن است که در محدوده $0 < z/d < 6$ قرار می‌گیرد. در این رابطه Z فاصله طولی از دهانه جت و d قطر دهانه جت است (Kuang et al., 2001). Qiao & Homan (2023) آزمایش‌هایی را برای بررسی شرایط جت جریان مستغرق رو به بالا انجام دادند که در آن برای اندازه‌گیری سرعت از سرعت‌سنج لیزری (LDV) استفاده کردند. دامنه اندازه‌گیری سرعت در این تحقیق $4 \leq z/d \leq 20$ است. نتایج نشان داده که مقدار شدت آشفتگی در برابر نسبت فاصله اندازه‌گیری به قطر دهانه جت (Z/d) تا حدود 12 بصورت خطی افزایش یافته و پس از آن تقریباً به مقدار ثابت $0/25$ نزدیک می‌شود. افزایش مقدار شدت آشفتگی ناشی از اعمال تنش‌های برشی محلی بر روی مقدارهای سرعت میانگین شناخته شده است. همچنین در این تحقیق مشخص شد که مقدارهای سرعت در مقابل فاصله شعاعی از محور نسبت به قطر جت (Z/d)، به شکل خطی و افزایشی است.

مرور کارهای انجام شده نشان می‌دهد که عمده بررسی‌های پیشین دربرگیرنده شرایطی است که مقیاس متناسب با کاربرد در تاسیسات آبی را (به دلیل قرارگیری در دامنه‌های بزرگ از نسبت عمق به قطر دهانه جت) ندارند. براین مبنا برای انجام بررسی‌های عمیق‌تر در این زمینه و برای شرایط و ابعاد متناسب با سازه‌های آبی متعارف در سامانه‌های

مقدار آنها در دوره‌های زمانی به همگرایی برسند. به بیان دیگر هرچقدر شمار داده‌ها بیشتر باشد، فراسنجه‌های آماری به‌دست آمده به مقدار واقعی خود نزدیک‌تر هستند. بنابراین در آغاز لازم است مشخص شود که پارامترهای آماری مورد نظر با چند داده به همگرایی خواهند رسید (Korsandi, 2016).

نمای کلی حوضچه آزمایشگاهی در شکل ۳ ارائه شده است.

متر بر ثانیه قابل تنظیم است که بایستی متناسب با دامنه سرعت جریان مورد آزمایش، تعیین شود. حجم نمونه‌برداری به ترتیب با قطر و ارتفاع ۶ و ۹ میلی‌متر تنظیم شده و فاصله بین مرکز حجم نمونه برداری تا حسگرهای دستگاه بر مبنای تنظیم اولیه آن ۵ سانتی‌متر است. مدت زمان اندازه‌گیری مناسب برای به‌دست آوردن مقادیرهای صحیح فراسنجه‌های مورد نظر از دوره‌های زمانی داده‌های اندازه‌گیری شده، باید به گونه‌ای باشد که

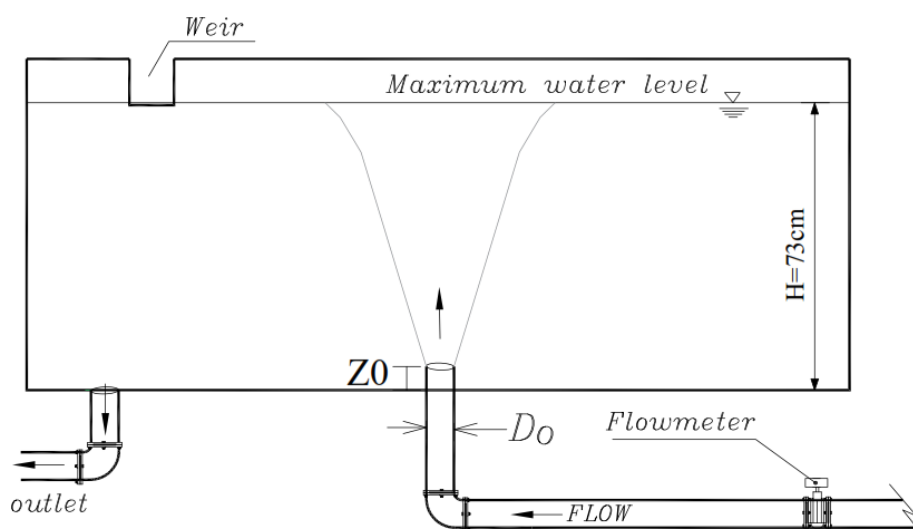


Fig. 3 General view of Experimental Setup

شکل ۳ نمای کلی حوضچه آزمایشگاهی

مختلف، انجام آزمایش با ۵ دبی مختلف در دامنه ۲ تا ۱۰ لیتر بر ثانیه با گام‌های ۲ لیتر بر ثانیه انجام پذیرفته است. ارتفاع بیرون‌زدگی لوله ورودی به حوضچه از کف آن معادل ۶ سانتی‌متر می‌باشد که با هدف مقایسه شرایط واگرایی دهانه در سه حالت مختلف، در نظر گرفته شد. دو تبدیل فلزی با ارتفاع گلولی ۱۴ سانتی‌متر با دهانه‌های ۱۲۵ و ۱۶۰ میلی‌متر و یک حالت بدون واگرایی اجرا شد. افزون بر متغیر دبی که در قالب عدد فرود جریان قابل تعریف بوده و فراسنجه زاویه واگرایی دهانه جت، متغیر عمق آب روی دهانه خروجی جت جریان که از آن به عمق استغراق تعبیر می‌شود نیز بررسی شد.

در حالت اول آزمایش‌های انجام شده با ۵ دبی مختلف، با ورود جریان مستقیم از دهانه جت به محیط پذیرنده در ترازهای مختلف رقوم تثبیت شده میانگین سطح آب،

بر مبنای صحت‌سنجی انجام شده با دوره‌های زمانی مختلف و به منظور تعیین مدت زمان داده‌برداری با دستگاه در هر نمونه، با توجه به میانگین فراسنجه‌های اندازه‌گیری، بهینه‌سازی حجم محاسبه و زمان انجام کار، زمان ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شد. لذا با توجه به بسامد ۲۰۰ هرتز انتخابی، در هر نمونه برداری در حدود ۱۲،۰۰۰ داده ثبت شد.

۲-۲- روش و شرایط انجام آزمایش‌ها

از آنجا که امکان تغییر قطر لوله ورودی به حوضچه آزمایش به دلیل دشواری آب‌بندی آن به آسانی امکان پذیر نیست، در همه مرحله‌های آزمایش قطر درونی دهانه لوله ورودی به حوضچه ثابت و مقدار آن بر مبنای اندازه‌گیری انجام شده با کولیس ۱۰۵ میلی‌متر تعیین شد. برای حصول اعداد فرود

ازای ۵ دبی مختلف و ۵ تراز اندازه‌گیری، ۲۵ نیمرخ سرعت است. حالت دوم آزمایش مربوط به شرایطی است که در آن افزون بر تغییر تراز قرارگیری دهانه جت نسبت به کف در مقایسه با حالت پیش و افزایش آن از ۶ سانتی‌متر به ۲۰ سانتی‌متر، دو حالت واگرایی نیز برای مقطع دهانه جت تعریف شده که در شکل (۴- b) قابل مشاهده است. زاویه واگرایی بر مبنای تبدیل‌های متداول بازار انتخاب شده که مقطع لوله ورودی را به ۵ و ۶ اینچ در خروجی آن تغییر داده است. در مجموع شمار ۴۵ نیمرخ سرعت برای این حالت آزمایش برداشت شده است. بر این اساس مطابق شکل ۵، زاویه‌های واگرایی برای حالت بدون تبدیل مقطع، صفر درجه، حالت تبدیل قطر دهانه از ۴ به ۵ اینچ معادل واگرایی ۴ درجه و تبدیل قطر دهانه از ۴ به ۶ اینچ معادل واگرایی ۱۱ درجه است. این تغییرها برای بررسی تاثیر عمق استغراق بر روی دهانه جت و همچنین تاثیر واگرایی مقطع دهانه جت بر روی میدان جریان در مقایسه با حالت پیش است. حالت‌های برنامه‌ریزی شده برای انجام آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

سرعت جریان به وسیله ADV از مرکز جت و در چند تراز متفاوت برداشت شد. برای کاهش اثر تداخلی حضور ابزار اندازه‌گیری در محیط از حالت دید پهلو استفاده شد. به دلیل محدودیت‌های ابعادی، پایین‌ترین تراز استقرار حسگر دستگاه ۲۳ سانتی‌متر بالاتر از کف حوضچه قرار گرفته و از سویی به دلیل نوسان‌های سطحی ناشی از انتقال مومنتم به سطح آب، بالاترین تراز اندازه‌گیری، ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر از کف حوضچه می‌باشد. بر این مبنا برداشت نیمرخ سرعت در ترازهای ۲۳، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متری از کف حوضچه انجام شد. در شکل (۴- a) تصویر نمای کلی از موقعیت دهانه لوله، تراز بیشینه سطح آب و موقعیت‌های مختلف استقرار حسگر این حالت از آزمایش نشان داده شده است. سطح تنظیم‌شده آب در حوضچه برای انجام این حالت از آزمایش‌ها، تراز بیشینه قابل تنظیم یعنی ۷۳ سانتی‌متر نسبت به کف است. با توجه به ثابت بودن قطر و عمق استغراق دهانه جت، متغیرها در این حالت شامل دبی جریان و تراز برداشت نیمرخ سرعت نسبت به دهانه جت هستند. بنابراین مجموع شمار تکرار در این آزمایش به

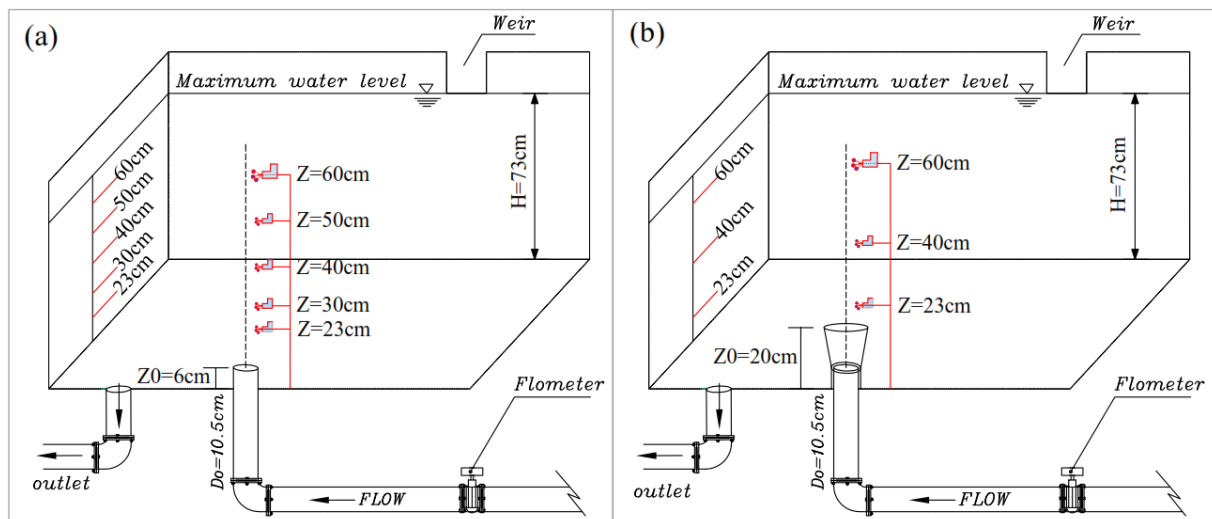


Fig. 4 General view of experimental setup in (a) first case, and (b) second case.

شکل ۴ نمای کلی مجموعه آزمایشگاهی در (a) حالت اول آزمایش و (b) حالت دوم آزمایش

ثابته در نظر گرفته شد. لذا با توجه به بسامد ۲۰۰ هرتر انتخابی، در هر نمونه برداری در حدود ۱۲۰۰۰ داده ثبت شد.

بر مبنای صحت‌سنجی انجام شده با دوره‌های زمانی مختلف و به منظور تعیین مدت زمان داده‌برداری با دستگاه در هر نمونه، با توجه به میانگین فراسنجه‌های اندازه‌گیری، بهینه‌سازی حجم محاسبه‌ها و زمان انجام کار، زمان ۶۰

۲-۳- پردازش داده‌ها

نظر به اینکه ممکن است خطاهایی در داده‌های برداشت شده توسط سرعت سنج سه بعدی بواسطه وجود عامل‌های اثرگذار محیطی که با عنوان دو عامل داپلر نویز^۱ و اسپایک^۲ (پدیده هم اثرسازی سیگنال) شناخته می‌شوند بروز کند، به منظور حصول نتیجه بهتر بایستی دوره‌های زمانی از داده‌ها که دارای کیفیت پایین‌تری هستند پالایش شده و میانگین‌گیری فراسنجه‌ها بر مبنای داده‌های با صحت بالا انجام گیرد (Goring, 2002). پالایش داده‌ها به طور معمول با استفاده از همبستگی سیگنال (COR)، نسبت سیگنال به پارازیت (SNR) و حذف نقطه‌های نوک‌تیز (Spike) انجام می‌شود. پالایش کردن برحسب دو فراسنجه (COR) و (SNR) داده‌هایی را که از یک مقدار بحرانی تعریف شده کمتر هستند حذف خواهد نمود. مقدار توصیه شده در منبع‌های مختلف برای فراسنجه (COR) عدد ۷۰ و کمینه مقدار برای فراسنجه (SNR) برای ویژگی‌های متوسط جریان ۵ است. البته انتخاب این فراسنجه‌ها تا حدودی قراردادی بوده و از آنجا که (COR) تابع شرایط جریان است، ممکن است مقدار کمتر از ۷۰ برای آن، ناشی از نمونه‌برداری در جریان با انرژی زیاد باشد و به حتم به معنای داده‌های با کیفیت پایین نیست. برای پالایش کردن داده‌ها در این تحقیق از نرم‌افزار WinADV که از متداول‌ترین نرم‌افزارها برای حذف نویز و اسپکتروم داده‌ها است، استفاده شده است.

۲-۴- صحت سنجی داده‌ها

فراسنجه‌ای که در این تحقیق بایستی مورد نظارت پیوسته قرار گیرد، میزان دبی جریان ورودی به سامانه می‌باشد که به شکل مستقیم بر فراسنجه اصلی موضوع تحقیق یعنی سرعت تاثیرگذار است. دبی بوسیله یک شیر فلکه نصب شده در محل انشعاب‌گیری از شبکه لوله آب آزمایشگاه قابل کنترل است. با تنظیم دبی بر روی یک مقدار مشخص در طی انجام آزمایش‌ها شرایطی که گویای نوسان دبی در حد نامتعارف باشد مشاهده نشد. بیشینه نوسان‌های پذیرفته شده در شرایط آزمایش برای دبی‌های پایین و بالا

جدول ۱ حالت‌های برنامه‌ریزی شده انجام آزمایش

Case Number	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
	2	4	6	8	10
	25.5	51	76.4	10	12
				7	7.4
Case 1	Z ₀ (cm) 6				
	Z(cm) 23, 30, 40, 50, 60				
	Θ(°) 0				
	H(cm) 73				
Case 2	Z ₀ (cm) 20				
	Z(cm) 23, 40, 60				
	Θ(°) 0, 4, 11				
	H(cm) 73				

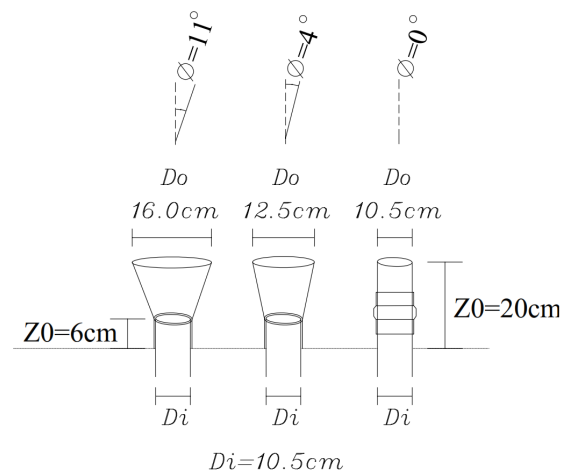


Fig. 5 General view of the divergent inlet section

شکل ۵ نمای کلی از مقطع‌های واگرایی ورودی به حوضچه

برای اطمینان از آشفتگی بودن جریان در شرایط آزمایش و پذیرش فرض وابسته نبودن شرایط جریان به عدد رینولدز، مقدار آن برای همه مقادیر دبی جریان از رابطه ۸ محاسبه شده است. برای دبی‌های کمینه و بیشینه آزمایش به ترتیب به میزان ۲ و ۱۰ لیتر بر ثانیه مقدار عدد رینولدز محاسبه شده ۲۶،۶۷۲ و ۱۳۳،۳۵۸ است که بیانگر آشفتگی جریان در همه شرایط آزمایش است.

$$Re = (WD) / \nu \quad (8)$$

در این رابطه Re , D , W , ν به ترتیب عدد رینولدز، سرعت جریان (متر بر ثانیه)، قطر داخلی دهانه جت (متر) و لزجت جنبشی سیال (مترمربع بر ثانیه) هستند.

2. Spike

1. Doppler noise

در جدول شماره ۱ عنوان شده است، جریان با ۵ دبی مختلف، با عمق استغراق یکسان ۶۷ سانتی متر بر روی مقطع خروجی، وارد محیط حوضچه آزمایش می‌شود. نیمرخ‌های سرعت جریان در راستای محور جت (Z) در تراز رقمی ۲۳، ۴۰ و ۶۰ سانتی متر نسبت به کف حوضچه در شکل ۶ ارائه شده است. شکل عمومی نیمرخ‌های سرعت همان گونه که انتظار می‌رفت گنبدی بوده و به شکل نسبی از تابع گوسین پیروی می‌کند. در یک تراز مشخص با افزایش دبی، نیمرخ سرعت به سمت بالا کشیده شده و از سویی در دبی‌های پایین تر حالت کشیده تری دارد، زیرا با افزایش فاصله از نقطه خروجی دهانه جت، سرعت کاهش می‌یابد. نکته عمومی در این نیمرخ‌ها که متاثر از محیط آزمایش است، نداشتن تقارن نسبی منحنی‌ها و کشیدگی تدریجی آن‌ها به سمت خروجی جریان از حوضچه است که با فاصله گرفتن از دهانه جت به شکل مشهود قابل تشخیص است. مقدار داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده در این حالت در جدول ۲ ارائه شده است.

به ترتیب ۵ و ۲ درصد بوده که در صورت لزوم در شرایط نوسان دبی آزمایش تکرار شد. صحت مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده توسط سرعت‌سنج سه‌بعدی برمبنای میزان سرعت قابل انتظار در محدوده دهانه جت که با توجه به دبی ورودی قابل محاسبه است، در طی آزمایش مدیریت شده است.

۳- یافته‌ها و بحث

نتایج این تحقیق در قلب نیمرخ‌های سرعت متوسط، نمودارهای بدون بعد از حالت‌های مقایسه‌ای میدان سرعت جریان در مرکز توده جت، شکست در هسته جت، تاثیر تغییر عمق استغراق و همچنین تاثیر واگرایی دهانه بر روی فراسنجه‌های وابسته به سرعت، در دو حالت آزمایش انجام شده در ادامه ارائه شده است.

۳-۱- نتایج آزمایش حالت اول

در نخستین حالت از آزمایش‌های انجام شده همان گونه که

جدول ۲ مقادیر میانگین سرعت اندازه‌گیری شده در مرکز جت در ترازهای داده‌برداری - حالت اول

Table 2 Average values of the velocity along the jet centerline in the levels of the data measurement-first series

W ₀ (cm/s)	Q (li/s)	Fr	W _c (cm/s)				
			Z=17cm	Z=24cm	Z=34cm	Z=44cm	Z=54cm
25.5	2	0.25	25.17	23.75	19.63	16.83	16.64
51.0	4	0.50	49.08	46.90	40.76	32.73	27.46
76.4	6	0.75	75.36	69.50	59.43	54.56	42.83
107.0	8	1.05	105.1	97.80	85.51	69.92	62.38
127.4	10	1.26	121.78	113.28	97.82	88.76	72.71

تغییرپذیری سرعت در بازه اندازه‌گیری نشان دهنده نیمرخ‌های سرعت تا حدودی شبیه نیمرخ سرعت در راستای محور قائم، با مقدارهای پایین تر سرعت می‌باشند. شکل ۷ یک نمونه از نیمرخ‌های سرعت ترسیم شده در راستای Y را نشان می‌دهد. روند تغییرپذیری سرعت جریان با تغییر فاصله نسبت به نقطه انتشار که مقدارهای عددی آن در راستای محور مرکزی جت در جدول ۲ ارائه شده است، در شکل ۸ قابل مشاهده است و نشان دهنده کاهش خطی دبی‌های مختلف در راستای سرعت غالب جریان یعنی محور Z می‌باشد. با

آشفستگی و انتقال مومنت درون توده جریان منجر به تولید سرعت در جهت‌های مختلف می‌شود. از آنجا که ابزار اندازه‌گیری مورد استفاده قادر به اندازه‌گیری سرعت در سه جهت است، می‌توان نیمرخ سرعت جریان را افزون بر جهت ورود جت جریان به محیط، در راستاهای دیگر هم بررسی کرد. در حالت عادی با توجه به توسعه شعاعی جت، انتظار می‌رود که سرعت در راستای X و Y تا حدود زیادی به هم نزدیک باشند. البته طبیعی است که این موضوع تحت تاثیر گرایش بردارهای سرعت به سمت خروجی جریان و هندسه محیط قرار بگیرد. بررسی روند

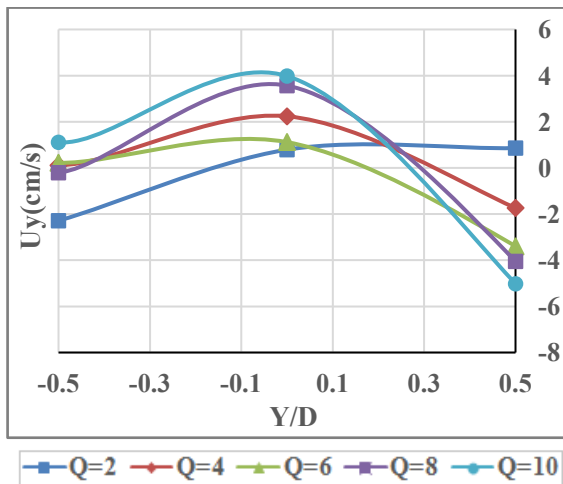


Fig. 7 Jet velocity profiles at different discharge in Y direction

شکل ۷ نیمرخ سرعت جت در دبی‌های مختلف در راستای Y

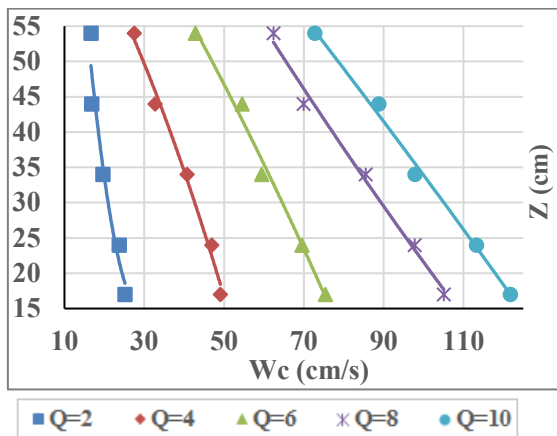


Fig. 8 Mean velocity changes along jet centerline

شکل ۸ تغییرپذیری سرعت میانگین در راستای محور جت

توسعه یافته شده و شکست هسته جت پیش از رسیدن به این مقطع رخ داده است.

شکل بی بعد شده فراسنجه سرعت در مقابل فاصله در شکل ۹ نمایش داده شده است. تصویر نشان می‌دهد که شکل کلی نمودارها کاهشی و همگی مانند هم هستند.

بررسی داده‌ها و همچنین منحنی‌های ترسیم شده نشان می‌دهد که شدت تغییر در بخش‌های اولیه منحنی که بین دو اندازه‌گیری اولیه یعنی ($Z/d < 2.3$) واقع است کم و به لحاظ عددی در دامنه ۶ تا ۱۱ درصد واقع شده است (میزان شیب نمودار متناظر با هر دبی آزمایش با افزایش آن دبی، افزایش نسبی دارد)، که با یافته‌های تحقیق (Kuang et al., 2001) همخوانی دارد. در نسبت‌های بالاتر از Z/d ، شدت تغییرها نسبت به بازه اولیه یاد شده بالاتر است.

افزایش دبی، شیب خط این روند کاهشی تندتر شده است. خطی بودن این روند می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که جت جریان پیش از رسیدن به نقطه اولین اندازه‌گیری یعنی تراز ۱۷ سانتی‌متری نسبت به دهانه جت وارد ناحیه

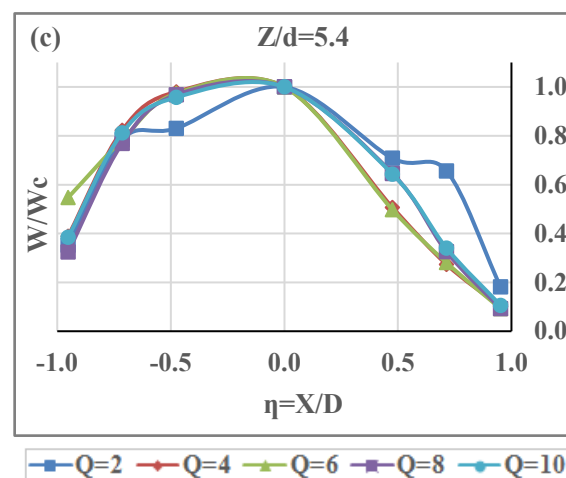
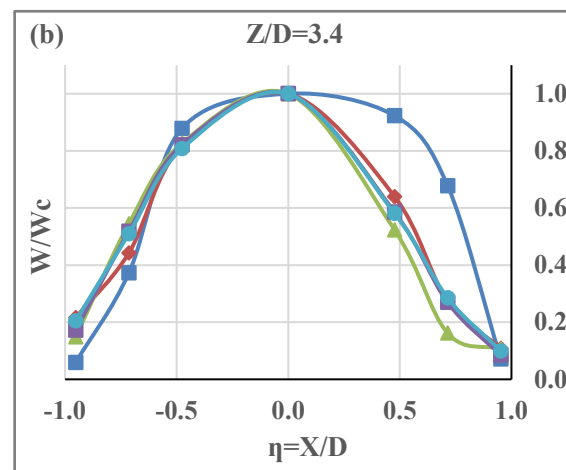
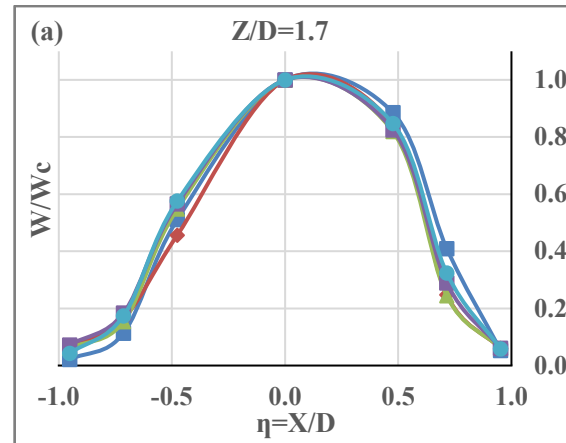


Fig. 6 Jet velocity profiles at different relative distances from the orifice at (a) 1.7, (b) 3.4 and (c) 5.4.

شکل ۶ نیمرخ سرعت در فاصله‌های نسبی مختلف از دهانه جت (a) ۱/۷، (b) ۳/۴ و (c) ۵/۴.

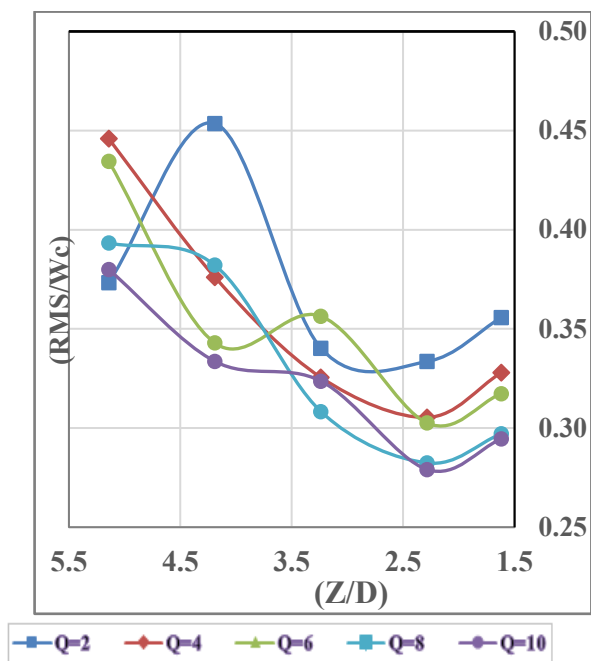


Fig. 10 Variation of Turbulent Intensity along Jet Centerline.

شکل ۱۰ تغییرپذیری شدت آشفتگی در امتداد خط مرکزی جریان

حالت واگرایی دهانه جت نیز بررسی شده است. برای بررسی تاثیر کاهش عمق استغراق بر شکل جت خروجی، روند تغییرات سرعت در این حالت برای مقایسه با شرایط همانند در حالت اول در شکل ۱۱ ارائه شده است. بررسی الگوی سرعت در این حالت بیانگر آن است که هسته مرکزی جت تا فاصله‌ای از نقطه خروجی دهانه بدون تغییر خاصی جریان یافته و پس از آن شکست می‌یابد.

برای مقایسه کمی بین مقادیر سرعت در ترازهای اندازه‌گیری نسبت به دهانه جت و همچنین در واگرایی‌های برنامه‌ریزی شده تحقیق، داده‌های میانگین سرعت در راستای خروجی جت و در نقطه مرکزی توده جت، در جدول ۲ ارائه شده است. متغیرهای این جدول شامل دبی جریان، زاویه واگرایی دهانه (با سه مقدار واگرایی ۰، ۴ و ۱۱ درجه) و تراز اندازه‌گیری پروفیل سرعت (نسبت به دهانه خروجی جت جریان)، در نظر گرفته شده است.

شکل (۱۱-b) بیانگر این است که در محدوده $(0 < Z/d < 2)$ هسته جریان همچنان به شکل یک توده یک‌پارچه جریان یافته و پس از آن به تدریج دچار فروپاشی شده است. الگوی کاهش سرعت پس از این نقطه به الگوی مشابه آن در شکل ۸ شباهت دارد.

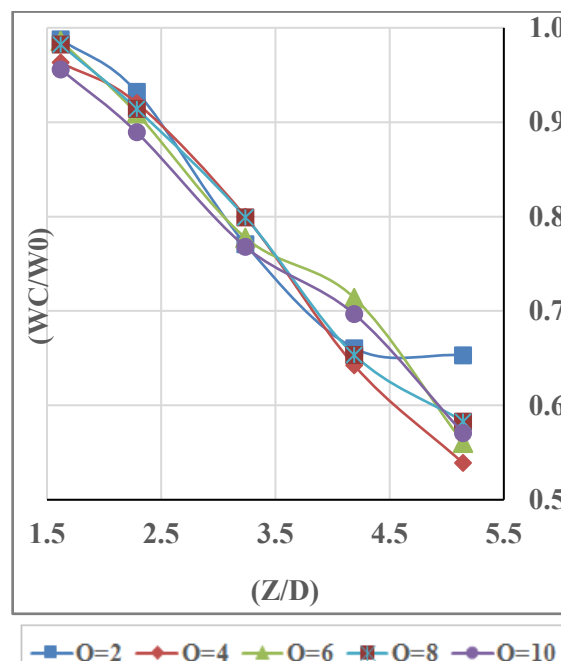


Fig. 9 Decrease of Mean Velocity along Jet Centerline

شکل ۹ کاهش سرعت متوسط در امتداد خط مرکزی جت

روند کاهش سرعت میانگین در خط مرکزی تحت تاثیر آشفتگی یا به تعبیری شدت آشفتگی است که عامل اختلاط جریان می‌باشد. این فراسنجه در ناحیه‌های اولیه که جت از نازل خارج شده ضعیف بوده و با افزایش z شدت آن افزایش یافته و میانگین سرعت خط مرکزی با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد. روند تغییرپذیری شدت آشفتگی در مقیاس بدون بعد (Z/d) در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. میانگین مقدار آشفتگی برای دبی‌های بیشینه و کمینه آزمایش به میزان ۲ و ۱۰ لیتر بر ثانیه، به ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۵۰ است و برای دیگر دبی‌ها در این دامنه واقع است.

۲-۳- نتایج آزمایش حالت دوم

حالت دوم آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به لحاظ ساختار کلی شبیه به حالت اول است، با این تفاوت که دهانه خروجی جت نسبت به حالت پیش ۱۴ سانتی‌متر بالاتر قرار گرفته $(Z_0=20\text{cm})$ که این مسئله به معنی کاهش عمق استغراق روی دهانه جت است. ازسویی امکان اندازه‌گیری سرعت در نزدیکی دهانه جت یعنی ناحیه‌ای که هنوز احتمال وجود هسته یک‌پارچه وجود دارد را فراهم کرده است. افزون براین، در این سری از آزمایش‌ها دو

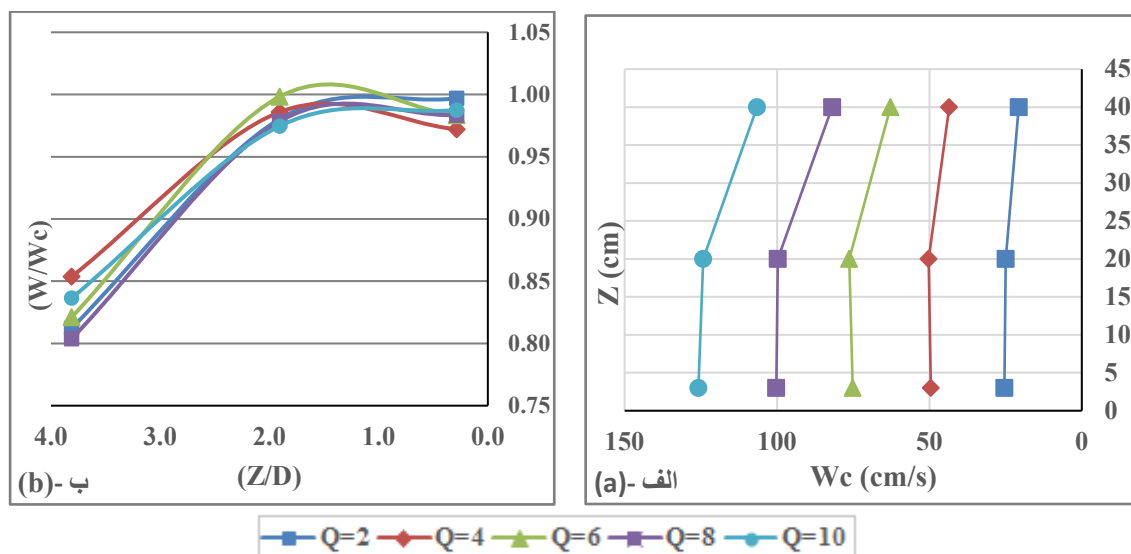


Fig. 11 Variations of flow mass velocity in the core of jet at (a) normal scale and (b) Dimensionless scale.

شکل ۱۱ تغییر سرعت توده جریان در هسته جت در (a) مقیاس عادی و (b) مقیاس بدون بعد.

جدول ۳ مقادارهای میانگین سرعت در مرکز توده جت در ترازها و زاویه‌های واگرایی داده‌برداری

Table 3 Average values of the velocity in the center of the jet mass in the levels and divergence angles of the data measurement

Divergence angle	Measurement level (cm)	Discharge range (lit/s)				
		Q=2	Q=4	Q=6	Q=8	Q=10
Ø=0°	Z=3	25.68	49.53	75.17	100.22	125.80
	Z=20	24.98	50.24	76.30	99.71	124.17
	Z=40	20.70	43.50	62.76	81.91	106.56
Ø=4°	Z=3	20.19	37.47	60.66	70.73	95.29
	Z=20	10.98	36.24	56.94	70.92	93.69
	Z=40	7.49	28.60	46.57	54.44	77.01
Ø=11°	Z=3	18.48	34.65	48.27	64.70	81.17
	Z=20	18.20	23.74	34.42	46.56	58.59
	Z=40	14.35	19.46	25.17	29.01	44.62

شکل ۱۳ تاثیر زاویه واگرایی بر مقدارهای میانگین سرعت و همچنین نرخ کاهش سرعت، به ازای یک دبی مشخص را نشان می‌دهد. این نمودارها برای ۳ دبی ۲، ۶ و ۱۰ لیتر بر ثانیه ترسیم شده‌اند. نکته با اهمیتی که در این نمودارها قابل مشاهده می‌باشد، آن است که در شرایط بدون واگرایی و زاویه واگرایی ۴ درجه نمودارها حالت تحذب داشته و در زاویه واگرایی ۱۱ درجه شکل نمودار به حالت تقعر تبدیل شده است.

بررسی داده‌ها و شکل مربوط به حالت بدون واگرایی مقطع دهانه جت، بیانگر آن است که تا فاصله مشخصی از دهانه خروجی جت، میزان سرعت تا حدودی بدون تغییر است و جت همچنان در ناحیه توسعه خود قرار دارد. در ترازهای

با افزودن دو مقطع تبدیل با زاویه واگرایی ۴ و ۱۱ درجه به مجموعه آزمایش که تراز دهانه خروجی آنها هم‌تراز با دهانه خروجی جت در حالت بدون واگرایی است، داده‌های سرعت میانگین و نوسانی در راستای محور جت ارزیابی شده و روند تغییرپذیری‌های سرعت به ازای دبی‌های مختلف در این حالت ترسیم شده است (شکل ۱۲). تاثیر زاویه واگرایی مقطع دهانه جت بر روند تغییر سرعت جریان به شکل ملموسی در این شکل قابل مشاهده است. نمودار تغییرات سرعت در زاویه واگرایی ۴ درجه مقطع دهانه جت، به لحاظ الگویی مشابه حالت جت بدون واگرایی است اما با افزایش زاویه واگرایی دهانه این الگو به روشنی به شکل متفاوتی دیده می‌شود.

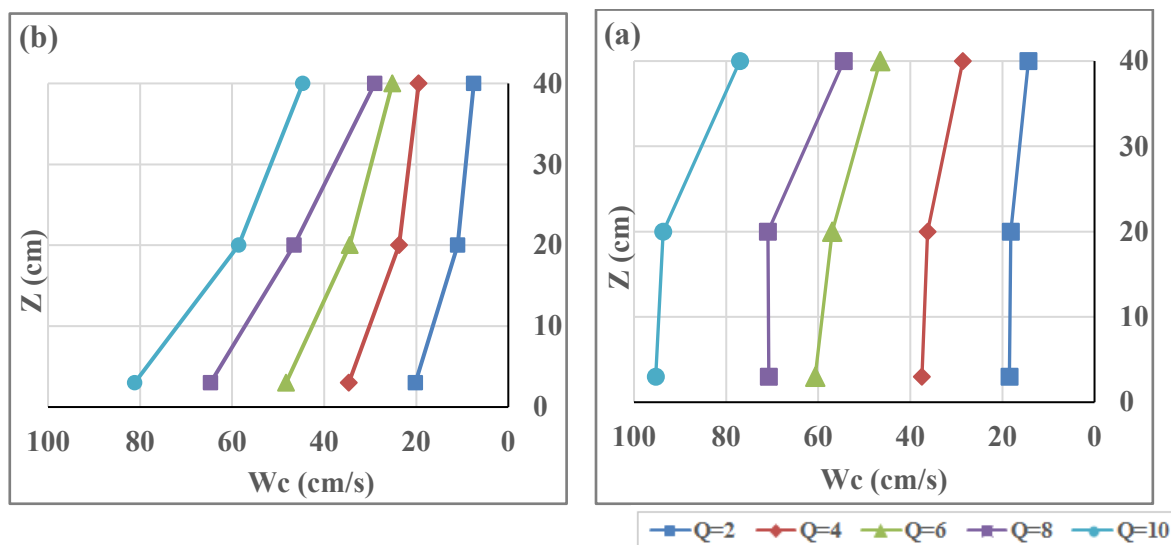


Fig. 12 Divergence effect of the jet opening on the trend of changes in the velocity of the jet with (a) divergence angle of 4 degrees and (b) 11 degrees.

شکل ۱۲ تاثیر واگرایی دهانه خروجی بر روند تغییرپذیری سرعت جت با (a) زاویه واگرایی ۴ درجه و (b) ۱۱ درجه.

عنوان سرعت مینا منظور شود، مقدارهای سرعت به ازای دبی‌های مختلف در تراز اندازه‌گیری ($Z=23\text{cm}$) در دامنه ۹۷ تا ۱۰۰ درصد آن قرار دارند و در تراز اندازه‌گیری ($Z=40\text{cm}$) مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده در دامنه ۸۱ تا ۸۸ درصد این مقدار مینا متغیر هستند. مقدارهای سرعت اندازه‌گیری شده در مرکز توده جت در زاویه واگرایی ۴ درجه مقطع نسبت به حالت بدون واگرایی در تراز ($Z=23\text{cm}$) در دامنه ۷۱ تا ۸۱ درصد قرار دارند. این به این معنی است که با واگرایی مقطع به میزان ۴ درجه، مقادیر سرعت در توده مرکزی جت به شکل متوسط در حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

مقدارهای سرعت میانگین در توده مرکزی جت در زاویه واگرایی ۱۱ درجه نسبت به حالت بدون واگرایی در همین تراز، در دامنه ۶۴ تا ۷۲ درصد اندازه‌گیری شده و لذا میزان کاهش سرعت در این شرایط در حدود ۳۲ درصد برآورد شد. مقدارهای نسبی سرعت کاهش یافته در زاویه‌های واگرایی ۴ و ۱۱ درجه در تراز ۲۰ سانتی‌متری از دهانه جت به ترتیب ۲۷ درصد و ۵۴ درصد به دست آمد. این مقادیر در تراز ۴۰ سانتی‌متری خروجی جت نیز به ترتیب در حدود ۳۰ درصد و ۶۰ درصد مقدار سرعت در حالت بدون واگرایی آن محاسبه شد. متناظر با شکل ۱۳، تغییرپذیری‌های سرعت‌های نوسانی یا به عبارتی تغییرات

بالتر از این نقطه سرعت جریان جت شکسته شده و به اصطلاح جریان جت وارد ناحیه توسعه‌یافتگی شده و به‌طور طبیعی انتظار مشاهده هسته یک‌پارچه در راستای محور مرکزی جت وجود ندارد.

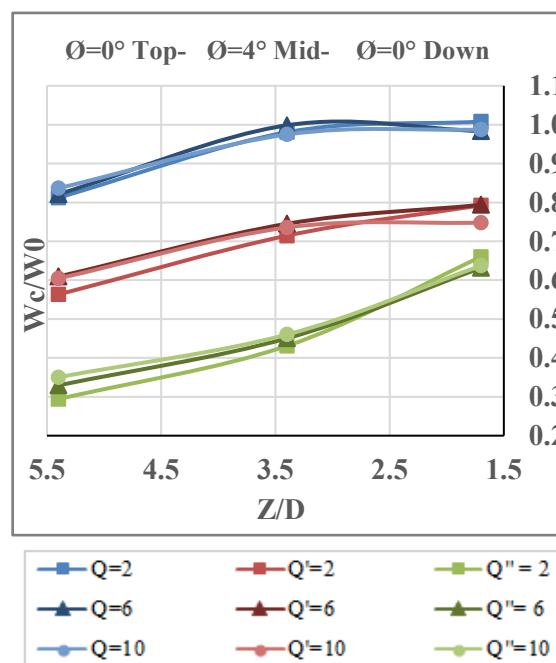


Fig. 13 Comparison of the trend of mean velocity changes in the center of jet mass with the change in divergence angle of the jet opening.

شکل ۱۳ مقایسه روند تغییرپذیری سرعت میانگین در مرکز توده جت با تغییر زاویه واگرایی دهانه جت

اگر سرعت اندازه‌گیری شده در نزدیکی دهانه جت به

در مرکز نیمرخ عرضی جت جریان بیانگر آن است که همچنان سرعت در محور مرکزی جت جریان نسبت به حاشیه جریان در محدوده قطری معادل دهانه جت، بالاتر بوده و آشفتگی در این محور بر سرعت توده جریان غالب نشده است.

برای دیگر دبی‌های استفاده شده نیز شکل عمومی نیمرخ‌های سرعت میانگین در راستای محور مرکزی جت (w) و همچنین مجذور میانگین مربع سرعت‌های نوسانی ($RMS(w')$) از الگویی مشابه تبعیت می‌نمایند. روند این تغییرپذیری‌ها در شکل ۱۶ نشان داده شده است. شکل (۱۶-ا) مربوط به تغییر سرعت متوسط در محور مرکزی جت و (۱۶-ب) مربوط به تغییر شدت آشفتگی در دبی‌های مختلف آزمایش با تغییر زاویه واگرایی دهانه جت می‌باشند. همان‌گونه که نمودارها نشان می‌دهند تغییرپذیری سرعت متوسط در هر دبی مشخص با افزایش واگرایی کاهش می‌شود.

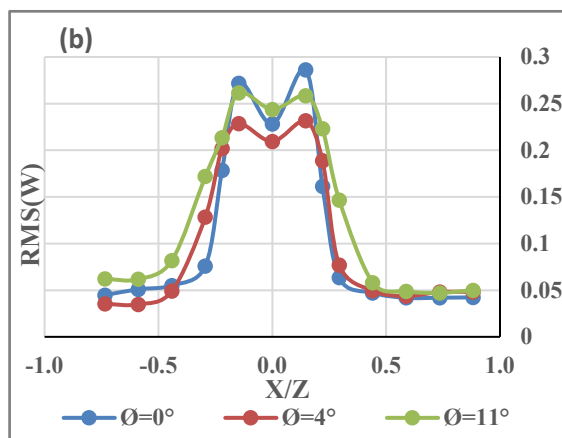
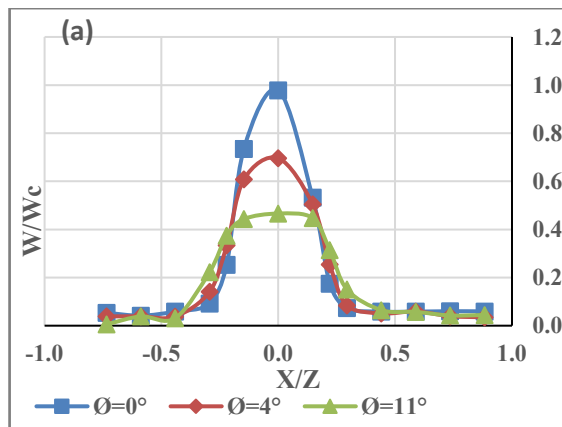


Fig. 15 Comparison the dimensionless profile at a flow rate of 8 lit/s on three modes of divergence for (a) velocity and (b) intensity of turbulence.

شکل ۱۵ مقایسه نیمرخ بدون بعد در دبی ۸ لیتر بر ثانیه و سه حالت واگرایی برای (a) سرعت و (b) شدت آشفتگی

شدت آشفتگی جریان، در سه حالت واگرایی در شکل ۱۴ به تصویر کشیده شده است.

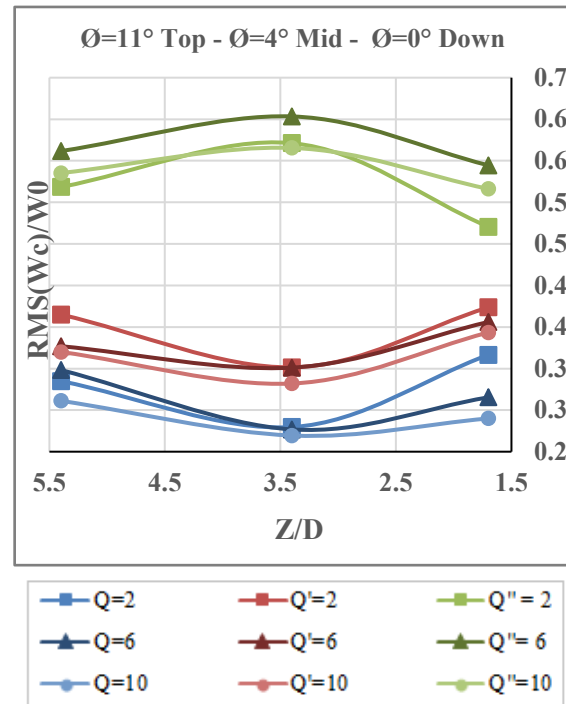


Fig. 14 Comparison of the changes in turbulence intensity at the center of the jet mass with the change of the divergence angle of the jet opening.

شکل ۱۴ مقایسه روند تغییرپذیری‌های شدت آشفتگی در مرکز توده جت با تغییر زاویه واگرایی دهانه جت

این نمودار به خوبی بیانگر آن است که شدت آشفتگی بیشتر، منجر به کاهش بیشتر مقادیر سرعت میانگین می‌شود.

مقدارهای متناظر مجذور میانگین مربع سرعت‌های نوسانی در مقابل مقدار سرعت میانگین بدون بعد در دبی ۸ لیتر بر ثانیه و تراز ۳۴ سانتی‌متری از دهانه جت به شکل نیمرخ آن در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. نمودارها به خوبی بیانگر آن است که تغییر زاویه واگرایی، نیمرخ‌های سرعت، شدت آشفتگی و در نتیجه پخشیدگی جت را در درون محیط به شکل قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌دهد. نکته مهم دیگر در ارتباط با شدت آشفتگی در این تصویر آن است که مقدار متوسط آشفتگی در حدود ۰/۲۵ می‌باشد که به مقدار ارائه شده آن در تحقیق انجام شده توسط (Kuang et al. 2001) نزدیک است.

کم بودن مقدارهای مجذور میانگین مربع سرعت‌های نوسانی

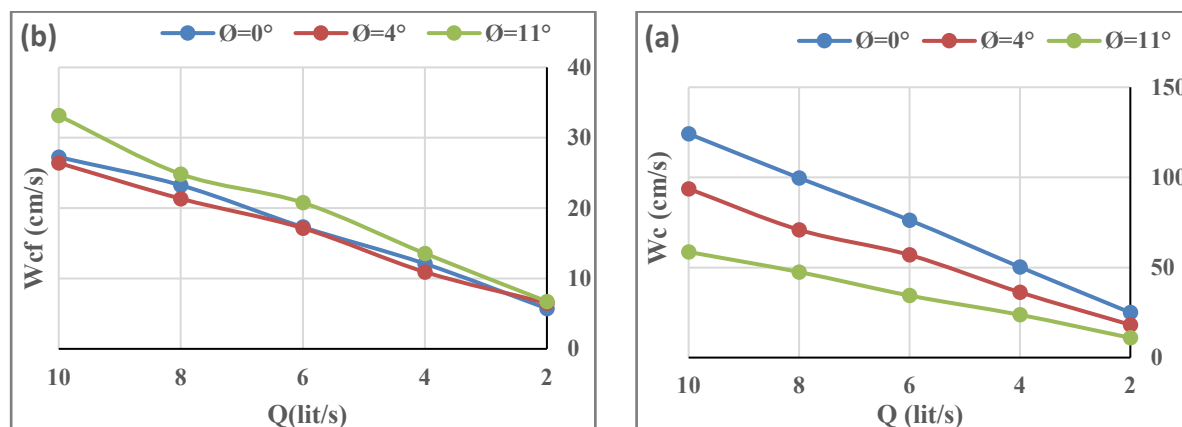


Fig. 16 Changes along the jet centerline with change the angle of divergence for (a) mean velocity and (b) mean fluctuation velocity.

شکل ۱۶ تغییرپذیری در راستای محور مرکزی جت با تغییر زاویه واگرایی برای (a) سرعت متوسط و (b) مجذور میانگین مربع سرعت‌های نوسانی

نسبی $(Z/D=3.4)$ و $(Z/D=5.4)$ برای حالتی که عمق استغراق نسبی (Z/D) به میزان عددی معادل $1/4$ کاهش یافته به ترتیب در حدود ۸۰ درصد و ۷۵ درصد است.

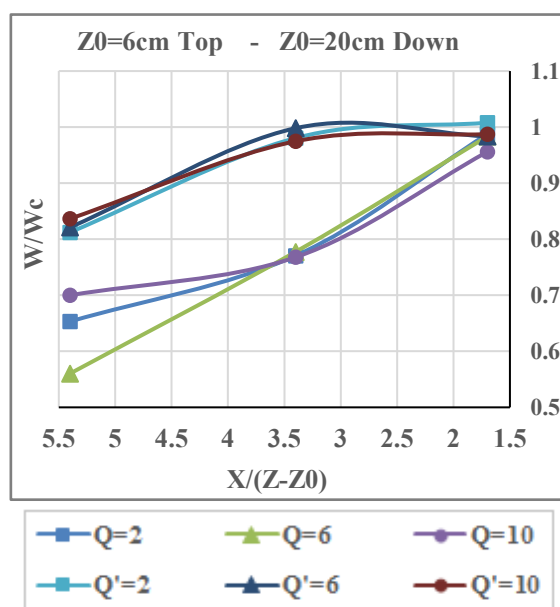


Fig. 17 Submergence head on the jet opening effect on mean velocity along the jet centerline

شکل ۱۷ تاثیر عمق استغراق روی دهانه جت بر میانگین مقدارهای سرعت در محور مرکزی جت

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای بررسی رفتار هیدرولیکی یک جت جریان مستغرق عمودی روبه‌بالا، متاثر از فراسنجه‌های هندسی محیط، عمق استغراق دهانه جت و همچنین زاویه واگرایی دهانه جت، مدل آزمایشگاهی ساخته شده و

است و شدت آشفتگی با زاویه واگرایی رابطه مستقیم دارد. هر چند تغییرپذیری شدت آشفتگی در زاویه واگرایی ۴ درجه نسبت به حالت بدون واگرایی ملموس نیست اما با افزایش واگرایی به ۱۱ درجه این تغییرپذیری‌ها قابل مشاهده است.

افزون بر تاثیرگذاری زاویه واگرایی دهانه جت بر روند تغییر سرعت در درون توده هسته جت، تاثیر عمق استغراق دهانه جت نیز در این تحقیق بررسی شده است. به این منظور داده‌های مربوط به سرعت در هسته جت در سه تراز مختلف ۱۷، ۳۴ و ۵۴ سانتی‌متری از دهانه جت $(Z_0=6\text{cm})$ ، در حالت بدون واگرایی دهانه جت و $(Z_0=20\text{cm})$ ، استخراج و بررسی شده‌اند. از آنجا که نیروی ثقل درخلاف جهت اینرسی سرعتی عمل می‌کند، انتظار می‌رود که با افزایش عمق استغراق روی دهانه، سرعت فروپاشی هسته افزایش یابد. این تغییرپذیری‌ها در شکل ۱۷ قابل مشاهده هستند.

به لحاظ کمی مقدارهای عددی سرعت میانگین در محور مرکزی جت برای دو حالت موقعیت استقرار دهانه جت $(Z_0=6\text{cm}, Z_0=20\text{cm})$ در نزدیکی دهانه همسان هستند. علت این مسئله آن است که همچنان هسته جت در این ناحیه دچار فروپاشی نشده است. با فاصله گرفتن از دهانه خروجی جریان جت، نرخ کاهش سرعت برای حالتی که عمق استغراق بیشتری بر روی دهانه جت وجود دارد، سریع‌تر است. به‌طور متوسط مقدارهای سرعت در دو تراز

Belatos, S. & Rajaratnam, N. (1977). Impingement Of Axisymmetric Developing Jets. *Journal of Hydraulic Research*, 15(4), 311-326.

Bollaert, E. & Schleiss, A. (2003). Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I. *Journal of Hydraulic Research*, 41(5), 451-464.

Chuanming, D., Guoliang, Y., Huaixin, Z. & Minxi, Z., (2020). Scouring by submerged steady water jet vertically impinging on a cohesive bed. *Ocean Engineerin.*, 196, 106781, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106781>.

Ervin, D.A., Falvey, H.T. & Withers, W. (1997). Pressure fluctuation on plunge pool floors. *Journal of Hydraulic Research*, 35(2), 257-279.

Ervin, D.A. & Falvey, H.T. (1987). Behavior of Turbulent Water Jets in The Atmosphere and in Plunge Pools. Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 1987, 83, Mar., 295-314.

Fathi-moghadam, M., Salemnia, A. & Kiani, S. (2019). Core Impact Force of Vertical Water Jets on Smooth and Rough Surfaces. *Scientia Iranica*, 26(2), 690-698. (In Persian)

Garrad, A.D. & Patric, M.A. (1983). The velocity field produced by a submerged jet directed upwards at a free surface. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 26(7), 1029-1036.

Goring, D.G. & Nikora, V.I. (2002). Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data., *J. Hydraulic Eng.*, 128(1), 117-126.

Jaberi, A. (2018). Experimental study of fracture characteristics of water jets with elliptical, rectangular and circular sections. *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, 30(1), 1-16. (In Persian)

Kuang, J., Hsu, C. & Qiu, H. (2001). Experiments On Vertical Turbulent Plane Jets in Water of Finite Depth. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(1), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2001\)127:1\(18\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:1(18)).

Korsandi, B. (2016). Investigatoin On Acuraccy of Velocitymetrey in Turbulent Curent wite ADV. 15nd Congress of Iran Hydraulics., Ghazvin, Iran.

Manso, P.A. (2006). The influence of pool geometry and induced flow patterns on rock scour by high-velocity plunging jets. PhD Thesis, U.T. Lisboa, Portugal, 345p.

Qiao, Y. & Homan, k.O.A. (2023). Investigation Of Intermittency In The Near-Field Region Of A Transitional jet by LDV. PhD Thesis, Missouri University of Science and Technology, 112p.

Schlichting, H. (1979). Boundary- Layer Theory, McGraw-Hill, NewYork.

سرعت متوسط جریان و همچنین مجذور میانگین سرعت‌های نوسانی در جهت‌های مختلف با سرعت‌سنج سه بعدی اندازه‌گیری شده‌اند. بررسی نیمرخ‌های سرعت در حالت بدون واگرایی دهانه جت با دو تراز مختلف قرارگیری دهانه نسبت به تراز سطح آب که به معنی تغییر عمق استغراق روی دهانه است، نشان‌دهنده آن است که افزایش عمق استغراق که متناظر با افزایش نیروی ثقل وارده بر توده جریان است، منجر به افزایش سرعت فروپاشی هسته جت می‌شود. این تاثیر در ازای افزایش ۳۷ درصدی عمق استغراق، در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد کاهش در مقدار سرعت میانگین در هسته مرکزی جت ایجاد می‌نماید. افزون بر تغییر عمق استغراق، تاثیر واگرایی دهانه جت بر نیمرخ‌های میانگین مقادیر سرعت و همچنین مجذور میانگین مربع سرعت‌های نوسانی در محور مرکزی جت نیز بررسی شده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد که با افزایش واگرایی از ۰ به ۴ درجه مقدارهای میانگین سرعت در حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد و به ازای زاویه واگرایی ۱۱ درجه، کاهش مقدارهای سرعت متوسط نسبت به حالت بدون واگرایی در شرایط مشابه، در نقطه شکست هسته جت به حدود ۳۲ درصد رسیده است.

۵- فهرست نشانه‌ها

g	شتاب ثقل (m/s)
Z ₀	تراز مبنا از کف (cm)
Z	تراز اندازه‌گیری (cm)
d	قطر دهانه جت (cm)
W ₀	سرعت در دهانه جت (m/s)
W _c	سرعت در محور مرکزی جت (m/s)
W _{cf}	سرعت نوسانی در محور مرکزی جت (m/s)
W	سرعت در راستای محور قائم (m/s)
W'	سرعت نوسانی (m/s)
Q	دبی جریان (lit/s)
∅	زاویه واگرایی

۶- منبع‌ها

Ahadian, J. (2012). The effect of converging angle on mixing length in submersible jets using physical and mathematical model. PhD Thesis, University of Shahid Chamran, Ahvaz, 196p.



© 2025 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.