

Research Paper

Experimental Investigation of Plunging Jet Characteristics in Aeration to the Stagnant Water Reservoir

Meysam soltani nejad¹,Majid rahimpour²,Mohammad reza madadi³

¹M.Sc. student, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Email address: meysam.soltani5142@gmail.com

²Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Email address: rahimpour@uk.ac.ir

³Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran., Email address: madadi@ujiroft.ac.ir (*Corresponding author)



10.22125/IWE.2023.168164

Received:
July 2, 2020
Accepted:
November 1, 2021
Available online:
April 18, 2023

Keywords:
Image analysis, Oxygen injection, Wastewater treatment, Plunging jet, Penetration depth.

Abstract

A flow jet is a narrow stream of liquid that exits through a small diameter nozzle with a high velocity. Today, the use of hydraulic jets is common in various fields of engineering and industry. In this research, the properties of plunging jet in aeration into a stagnant water reservoir was investigated. For this purpose, first a physical model of reservoir was made and a circular nozzle was used to create a plunging jet. The experiments were performed for two discharges (Q) of 0.036 and 0.067 L/s, six vertical distances between the nozzle and the water surface (L_j) from 2 to 12 cm, six jet angles (θ) from 15° to 90°, and five concentrations of reservoir fluid (C) from 0 to 200 gr/L. High-speed imaging technique was employed to investigate the characteristics of plunging jet. The results showed that for $L_j=2$ cm and $\theta=90^\circ$, by increasing the Q from 0.036 to 0.067 L/s, the h_p increased by 13.3 %. Also, with increasing the L_j from 2 to 12 cm, at $Q=0.067$ L/s and $\theta=90^\circ$, the h_p increased by 10.4%. In addition, the results showed that at $L_j=2$ cm, $Q=0.067$ L/s, and $\theta=90^\circ$, by increasing the concentration of stagnant fluid from 0 to 200 gr/L, the h_p decreased by 4.1%. For the experiments of this study, the highest penetration depth was observed at $Q=0.067$ L/s, $\theta=90^\circ$, $L_j=2$ cm at the concentration of $C=0$.

1. Introduction

A flow jet is a narrow stream of liquid that exits through a small diameter nozzle with a high velocity. Today, the use of hydraulic jets is common in various fields of engineering and industry such as the use of flow jets in water and wastewater treatment plants, material dilution systems, sediments removal from rivers and reservoirs, mixing processes in the dam reservoir to eliminate the thermal stratification, aeration of aquaculture ponds, industrial cutting, dentistry, mixing fluids in the chemical industry, and washing various surfaces for health purposes. A review of the literature shows that the laboratory studies that have been done to identify the characteristics of the plunging jet phenomenon are limited and still different aspects of this phenomenon need to be investigated. Therefore, it is necessary to conduct a more comprehensive study on the characteristics of these jets in different geometric and hydraulic conditions. In this regard, the present study investigates the characteristics of a plunging flow jet in a stagnant water reservoir.

2. Materials and Methods

For this purpose, first a physical model of reservoir was made with lengths, width and height of 0.8m, 0.6m, and 0.6m, respectively. The walls of the reservoir were made of glass with a thickness of 0.008m to provide the possibility of observation and measurement based on the rapid photography and image analysis. A circular nozzle with inner diameter of 4mm was used to create a plunging jet. The experiments were performed for two discharges (Q) of 0.036 and 0.067 L/s, six vertical distances between the nozzle and the water surface (L_j) from 2 to 12 cm, six jet angles (θ) from 15 to 90, and five concentrations of reservoir fluid (C) from 0 to 200g/L (104 tests in total). The penetration depth of the jet into the reservoir was measured using the Kodak PIXPRO AZ651 digital camera together with the high-speed imaging technique. To analyze the captured videos, the Pandora KMP software was used to extract the frames of the recorded videos in the form of images. Then, based on the obtained images, the jet penetration depth was measured at different time intervals and the maximum penetration value in each experiment was considered as the jet penetration depth.

3. Results

The results showed (at a vertical distance of 2 cm between the edge nozzle and the water surface and the angle of placement of 90 degrees jet nozzle) with increasing the flow rate from 0.036 to 0.067 liters per second, the penetration depth of the jet increased by 13.3 %. Also, with increasing the vertical distance between the nozzle edge and the water surface (at a constant flow rate of 0.067 liters per second and a 90 degree angle of the jet nozzle) from 2 to 12 cm, the penetration depth of the fluid jet increased by 10.4 %. In addition, the test results showed that (at a vertical distance of 2 cm between the nozzle edge and the water surface, the flow rate of 0.067 liters per second and the 90-degree angle of the jet nozzle) with increasing density of static fluid in the tank from 0 g / cm³ to 50, 100, 150 and 200 g / l, fluid jet penetration depth is reduced by 0.6, 2, 2.7 and 4.1%, respectively. It seems that a combination of scenarios used in this study can be used to improve oxygenation processes in aquaculture ponds as well as wastewater aeration processes in treatment plants. It seems that a combination of scenarios used in this study can be used to improve oxygenation processes in aquaculture ponds as well as wastewater aeration processes in treatment plants. Also, the aeration effect of submersible jets increases with increasing jet flow and this result can be generalized.

4. Discussion and Conclusion

Experimental observations revealed that in a constant distance between the nozzle and the water surface, with increasing the flow rate from 0.036 to 0.067 L/s, the penetration depth of the flow jet increases in all experiments. As the flow rate increased, the area of jet flow field increased (the dimensions of the jet flow mixing zone in the stagnant fluid became larger). As the jet flow rate increases, which in fact indicates an increase in the jet flow velocity, the aeration efficiency of the plunging jets increases significantly. As the nozzle distance from the water surface increases, the penetration depth of the flow jet also increases. For example, at flow rates of 0.036 and 0.067 L/s, when the vertical distance from the nozzle to the water surface changes from 2 cm to 12 cm, the penetration depth of the inlet jet increases by 13.3% and 10.4%, respectively. At a fixed vertical distance, for example 2cm, by reducing the angle of jet from 90 to 15 degrees, the penetration depth of jet in the two discharges of 0.036 and 0.067 L/s decreased by 37.7% and 42.4%, respectively. With increasing the fluid concentration inside the reservoir, the jet penetration depth decreased in all L_j values. For example, for the flow rate of 0.067 L/s and a nozzle distance from the water surface of 2 cm, the penetration depth of the jet at a concentration of 50 g/l was 8.1cm, while for the same condition, the penetration depth in the concentration of 200 g/l has reached 7.5cm. This was observed at different nozzle distances from the reservoir water surface as well as different collision angles at both discharges. At a flow rate of 0.036 L/s, the nozzle angle of 15 degrees and the vertical distance of 12cm between the nozzle and the water surface, with increasing the fluid concentration up to 200 g/l, the jet penetration depth relative to pure water condition was reduced by 7.7%. Also, in the experiment with the flow rate of 0.067 L/s, the nozzle angle of 90 degrees, the nozzle distance from the water surface of 2cm and the fluid with a concentration of 100 g/l, the penetration depth of the flow jet was 14.1 cm, while by increasing the concentration to 200g /l, jet penetration depth decreased to 13.8 cm, which is equivalent to 2.1% reduction in flow jet penetration depth. In fact, by increasing the concentration of fluid in the reservoir, the penetration and movement of the flow jet inside the reservoir decreases. Also, it was observed that with the increase of

flow rate from 0.036 to 0.067 L/s, when the nozzle distance from the water surface was 2 cm and the jet angle was 15 degrees, the penetration depth at the concentration of 200 g/L was approximately 1.1 times the pure water. It can be concluded that in order to increase the penetration depth and to enhance the performance of the plunging jet at high concentrations, a jet with more flow rate is required.

5. Six important references

- 1) Al-Anzi, B. (2020). Effect of primary variables on a confined plunging liquid jet reactor. *Water*, 12(3), 764. doi: 10.3390/w12030764.
- 2) Bagatur, T., Baylar, A., & Sekerdag, N. (2002). The effect of nozzle type on air entrainment by plunging water jets. *Water Quality Research Journal*, 37(3), 599-612.
- 3) Erlich, G., & Horvath, T. (2011). U.S. Patent No. 7,900,308. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- 4) Guyot, G., Cartellier, A., & Matas, J. P. (2020). Penetration depth of a plunging jet: from microjets to cascades. *Physical Review Letters*, 124(19), 194503.
- 5) Horvath, E. (2004). Water jet reversing propulsion and directional controls for automated swimming pool cleaners. United States patent, 6, 742, 613 B2.
- 6) Qu, X., Goharzadeh, A., Khezzar, L., & Molki, A. (2010). Experimental Characterization of Air-Entrainment in a Plunging Water Jet System Using Particle Image Velocimetry (PIV). In *Fluids Engineering Division Summer Meeting* (Vol. 49484, pp. 2767-2772).

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



بررسی آزمایشگاهی مشخصه‌های جت غوطه‌ور در فرآیند هوادهی به مخزن سیال ساکن

میثم سلطانی نژاد^۱، مجید رحیم پور^۲، محمدرضا مددی^۲

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰

مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد

چکیده

جت جریان، باریکه‌ای از مایع است که با سرعت بالا از یک نازل با قطر کم خارج می‌شود. امروزه کاربرد جت‌های هیدرولیکی در شاخه‌های مختلف مهندسی و صنعت فراگیر شده است. در این پژوهش، مشخصه‌های جت غوطه‌ور در فرآیند هوادهی به مخزن سیال ساکن به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا مدل فیزیکی یک مخزن آب ساخته شد و از یک نازل دایره‌ای برای ایجاد جت غوطه‌ور استفاده شد. آزمایش‌ها برای دو دبی جت جریان (Q) ۰/۰۳۶ و ۰/۰۶۷ لیتر بر ثانیه، شش فاصله عمودی بین خروجی نازل و سطح آب (L_j) از ۲ تا ۱۲ سانتی‌متر، شش زاویه برخورد جت با سطح سیال درون مخزن (θ) از ۱۵ تا ۹۰ درجه و پنج غلظت مختلف سیال مخزن (C) از صفر تا ۲۰۰ گرم بر لیتر، انجام شد. از روش تصویربرداری سریع برای بررسی مشخصه‌های جت استفاده شد. نتایج نشان داد برای $L_j=2\text{cm}$ و $\theta=90^\circ$ ، با افزایش دبی از ۰/۰۳۶ به ۰/۰۶۷ لیتر بر ثانیه، عمق نفوذ جت (h_p)، ۱۳/۳ درصد افزایش یافت. همچنین برای $Q=0.067\text{ L/s}$ و $\theta=90^\circ$ ، با افزایش L_j از ۲ به ۱۲ سانتی‌متر، مشخصه h_p به مقدار ۱۰/۴ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، برای $L_j=2\text{cm}$ ، $Q=0.067\text{ L/s}$ و $\theta=90^\circ$ ، با افزایش مقدار غلظت سیال از صفر (آب خالص) به ۲۰۰ گرم بر لیتر، مشخصه h_p به مقدار ۴/۱ درصد کاهش یافت. برای آزمایش‌های این پژوهش، بالاترین عمق نفوذ در آزمایش با $Q=0.067\text{ L/s}$ ، $\theta=90^\circ$ ، $L_j=12\text{cm}$ و کمترین غلظت مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل تصویر، تزریق اکسیژن، تصفیه فاضلاب، جت مستغرق، عمق نفوذ.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران، ۰۹۱۳۳۴۹۵۱۴۲، meysam.soltani5142@gmail.com

^۲ دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران، ۰۹۱۳۱۹۹۰۶۱۴، rahimpour@uk.ac.ir
^۳ استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه جیرفت، ایران، ۰۹۱۱۹۲۳۱۶۰۶، madadi@ujiroft.ac.ir (نویسنده مسول)

مقدمه

پدیده جت غوطه‌ور، که در آن یک جت جریان بر روی سیالی دیگر با همان ویژگی یا ویژگی‌های مختلف برخورد می‌کند، در بسیاری از فرایندهای صنعتی مشاهده می‌شود. امروزه کاربرد جت‌های هیدرولیکی در شاخه‌های مختلف مهندسی و صنعت فراگیر شده است. از جمله این کاربردها می‌توان به استفاده از جت جریان در تصفیه-خانه‌های آب و فاضلاب (زحمتکش، ۱۳۹۱)، سامانه‌های رقیق‌سازی مواد (احدیان و موسوی جهرمی، ۱۳۸۸)، لای‌روبی رسوبات رودخانه‌ای و مخازن (مددی و همکاران، ۱۳۹۷)، ایجاد اختلاط در مخزن سد برای از بین بردن پدیده لایه‌بندی حرارتی (کیانوش و احمدیار، ۱۳۹۴)، هوادهی (تزریق اکسیژن) به حوضچه‌های پرورش آبزیان (ساجدی سابق و همکاران، ۱۳۹۵)، برشکاری در صنعت (تکفلی و همکاران، ۱۳۸۸)، دندانپزشکی (Yamada et al, 2017)، اختلاط سیالات در صنایع شیمیایی (صادق-زاده نامور و صادق مقدس، ۱۳۹۰) و شست‌وشوی سطوح مختلف با اهداف بهداشتی (Erlich et al, 2011)، اشاره کرد. تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه بررسی فرآیند هوادهی توسط یک جت جریان در حال غوطه‌وری انجام شده است که در ادامه به مطالعات آزمایشگاهی مرتبط اشاره می‌شود:

باگاتور و همکاران در یک پژوهش آزمایشگاهی ارتباط شکل سطح مقطع نازل را با هوای ورودی به وسیله یک جت آب به داخل یک مخزن سیال مورد بررسی قرار دادند (Bagatur et al. 2002). در این آزمایش از سه نوع نازل دایره‌ای، بیضوی و مربعی استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که شکل نازل عامل مهمی در عملکرد هوادهی است به طوری که بیشترین عمق نفوذ جت در نازل بیضوی و کمترین عمق نفوذ در نازل مربعی ایجاد شد. همچنین مشاهدات آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که میزان هوای ورودی از طریق جت به مخزن سیال در نازل مربعی از دو نازل دیگر (مربعی و دایروی) بیشتر بوده است که نمایانگر آن است که این نازل دارای کارایی انتقال اکسیژن بهتری نسبت به انواع دیگر نازل‌ها بوده

است. (Qu et al. (2013) هوای ورودی به یک مخزن مایع توسط یک جت آب را با استفاده از روش تصویربرداری سریع مورد بررسی قرار دادند و ارتباط میان سرعت جت، طول جت و عمق نفوذ جت در سیال ساکن را به دست آوردند. (Tavakoli (2014) در یک پژوهش آزمایشگاهی، به اندازه‌گیری حباب‌های تشکیل شده از حرکت یک جت افقی با سرعت‌های مختلف در مخزن یک سیال حاوی آب معمولی و آب شور به روش سایه‌نگاری پالسی پرداخت. نتایج نشان داد که نسبت تعداد حباب-های کوچک به تعداد حباب‌های بزرگ با افزایش عمق به صورت محسوسی افزایش می‌یابد. همچنین، تعداد حباب‌های آب شور به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت در حالی که اندازه (قطر) آن‌ها کوچک‌تر شده بود. (Warjito et al. (2019) در یک مطالعه آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع جت بر فرآیند هوای ورودی به وسیله یک لوله را بررسی کردند و گزارش دادند که هرچه ارتفاع جت بیش‌تر باشد، مقدار عمق نفوذ، مساحت پراکندگی حباب و میزان حباب ورودی بیشتر خواهد بود. (Al-Anzi (2020) تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و هیدرولیکی حالت خاصی از جت جریان نظیر قطر نازل، قطر لوله و سرعت جت را بر میزان هوای ورودی به مخزن سیال مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که افزایش قطر نازل به افزایش قطر جت در محل برخورد و در نتیجه به افزایش میزان هوای ورودی منجر می‌شود. (Guyot et al. (2020) در یک مطالعه آزمایشگاهی عمق نفوذ جت جریان را در قطرهای مختلف نازل و سرعت‌های مختلف جت اندازه‌گیری کردند و گزارش دادند عمق نفوذ با افزایش سرعت جت و همچنین افزایش قطر نازل افزایش می‌یابد. همچنین، آن‌ها یک مدل ریاضی را برای عمق نفوذ جت با استفاده از معادله مومنتم ارائه نمودند.

بررسی سابقه تحقیق نشان می‌دهد که مطالعات آزمایشگاهی که در زمینه شناخت ویژگی‌های پدیده جت غوطه‌ور جریان صورت گرفته محدود می‌باشد و هنوز ابعاد مختلفی از این پدیده نیازمند بررسی می‌باشد. با توجه به کاربردهای فراوانی که جت‌های جریان در شاخه‌های



ثانیه، لوله از جنس پلی اتیلن به قطر ۲۰ میلی متر، شیر فلکه پلیمری، نازل دایروی به قطر دهانه ۴ میلی متر و سایر اتصالات مطابق با شکل (۱) می باشد.

روش انجام آزمایش ها

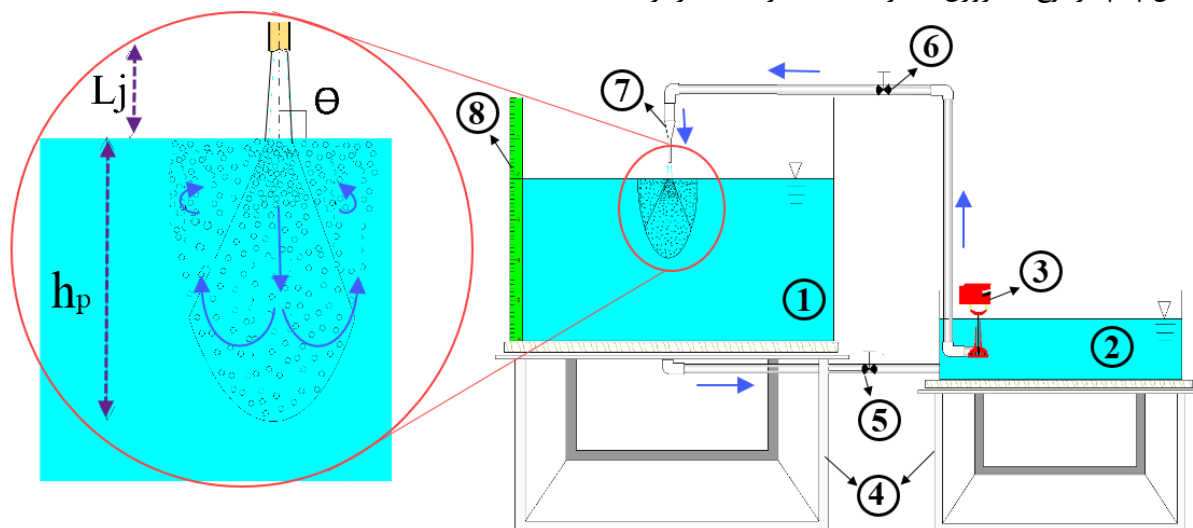
آزمایش های این پژوهش مطابق با جدول (۱) برای دو دبی جت جریان، شش فاصله عمودی مختلف بین لبه نازل و سطح آب داخل مخزن، شش زاویه قرارگیری نازل و پنج غلظت سیال ساکن درون مخزن (در مجموع ۱۰۴ آزمایش) انجام گرفت. در ابتدای آزمایش ها، مخزن اصلی تا رقوم مشخصی از آب پر شد و فاصله نازل از سطح آب و زاویه جت جریان مطابق با مقادیر درج شده در جدول (۱) تنظیم شد. در ادامه، دوربین فیلم برداری در موقعیت مناسبی در روبروی مدل آزمایشگاهی بر روی یک پایه در ارتفاع مشخص تنظیم و راه اندازی شد. همزمان با روشن شدن پمپ، دوربین شروع به ضبط تصاویر نمود و تا انتهای هر آزمایش، فرآیند تصویربرداری ادامه یافت.

مختلف علوم و مهندسی دارند و نظر به اهمیت ویژه جت های غوطه ور جریان در علوم و مهندسی آب و هیدرولیک، لازم است مطالعه جامع تری بر روی خصوصیات این جت ها در شرایط هندسی و هیدرولیکی مختلف صورت گیرد. در این راستا، پژوهش حاضر به بررسی آزمایشگاهی مشخصه های جت جریان غوطه ور در مخزن سیال ساکن می پردازد. در این آزمایش، عمق نفوذ جت جریان در دو دبی مختلف، شش زاویه قرارگیری نازل جت، شش فاصله عمودی بین نازل و سطح آب داخل مخزن و پنج غلظت سیال درون مخزن اندازه گیری می شود.

مواد و روش ها

مدل آزمایشگاهی

به منظور انجام آزمایش ها، مدل فیزیکی یک مخزن مکعب مستطیل به طول ۰/۸ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۶ متر طراحی و ساخته شد (شکل ۱). دیواره های مخزن از جنس شیشه با ضخامت ۰/۰۰۸ متر انتخاب شد تا امکان مشاهده و اندازه گیری مبتنی بر عکس برداری سریع و تحلیل تصاویر فراهم گردد. اجزای سیستم تأمین آب شامل پمپ از نوع الکتروژن با ظرفیت حداکثر ۱/۴ لیتر بر



شکل (۱): شماتیک مدل آزمایشگاهی و جت غوطه ور و سیستم چرخش جریان

(۱) مخزن اصلی آب ساکن ۲- مخزن تأمین آب برای جت جریان ۳- پمپ آب ۴- شاسی ۵- شیر تخلیه ۶- شیر تنظیم جریان جت ۷- نازل جت ۸- اشل مدرج

جدول (۱): طرح آزمایش‌ها و معرفی مقادیر متغیرهای مورد بررسی در آزمایش‌ها

Q (لیتر بر ثانیه)	Lz (سانتی‌متر)	θ (درجه)	C (گرم بر لیتر)
۰/۰۳۶	۲	۱۵	۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰
		۹۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰	۰
	۴	۹۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰	۰
	۶	۹۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰	۰
	۸	۹۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰	۰
	۱۰	۹۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰	۰
	۱۲	۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵	۰
		۹۰	۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰
۰/۰۶۷	۲	۱۵	۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰
		۹۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰	۰
	۴	۹۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰	۰
	۶	۹۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰	۰
	۸	۹۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰	۰
	۱۰	۹۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰	۰
	۱۲	۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵	۰
		۹۰	۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰

آزمایش‌های بررسی مشخصه چگالی سیال درون مخزن، از نمک خوراکی برای غلیظ کردن سیال استفاده شد. عمق نفوذ جت وارد شده به داخل مخزن با استفاده از دوربین فیلم‌برداری دیجیتال Kodak مدل PIXPRO AZ651 و روش عکس‌برداری سریع و تحلیل تصاویر ضبط شده، اندازه‌گیری شد. بدین صورت که پس از فیلم‌برداری، جهت تحلیل تصویر، با استفاده از نرم افزار Pandora KMP، فریم‌های تصاویر ضبط شده در قالب عکس استخراج شدند. سپس، بر اساس عکس‌های موجود، عمق نفوذ جت در فواصل زمانی مختلف اندازه‌گیری شد و بیشترین مقدار نفوذ در هر آزمایش به عنوان عمق نفوذ جت در نظر گرفته شد. این روش در پدیده‌های هیدرولیکی از نوع متغیر سریع روش کارآمدی است و نتایج مطلوبی را ارائه می‌کند. این روش قبلاً در مطالعات Warjito et al. و Qu et al. (2010) توسط و Warjito et al. (2019) مورد استفاده قرار گرفته است.

در این مدل آزمایشگاهی، سیستم تأمین آب یک مخزن در مجاورت مخزن اصلی بود که آب ذخیره شده در آن از طریق یک پمپ از نوع الکتروژن به وسیله یک لوله پلی-اتیلن سفید به قطر ۲۰ میلی‌متر به سمت نازل با مجرای دایره‌ای و قطر داخلی ۴ میلی‌متر جریان می‌یافت و بعد از خروج از نازل به شکل جت وارد مخزن اصلی شده و نهایتاً توسط یک شیر تخلیه از مخزن اصلی خارج شده و به مخزن تأمین آب برگشت می‌کرد. تنظیم جریان خروجی از نازل توسط یک شیر پروانه‌ای که روی لوله قرار داشت، صورت گرفت. دبی جریان جت به روش حجمی اندازه‌گیری شد. همچنین به منظور ثابت نگه داشتن رقوم سطح آب داخل مخزن، یک شیر تخلیه در کف مخزن تعبیه شد که در هنگام انجام آزمایش، به اندازه‌ای باز می‌شد که میزان جریان ورودی به مخزن اصلی با جریان خروجی از آن برابر باشد. در این آزمایش‌ها مدت زمان انجام هر آزمایش ۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد. علاوه بر این، در



نتایج و بحث

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر دبی جت جریان، فاصله عمودی نازل تا سطح آب، زاویه قرارگیری نازل و غلظت سیال ساکن درون مخزن بر عمق نفوذ جت ورودی به مخزن سیال انجام شد. در این قسمت نتایج مشاهدات آزمایشگاهی در قالب جدول و نمودار ارائه و تحلیل می‌شود.

تأثیر دبی جت جریان بر عمق نفوذ جت

در جدول‌های (۲) و (۳) مقادیر عمق نفوذ جت غوطه‌ور به ازای دبی ۰/۰۳۶ و ۰/۰۶۷ لیتر بر ثانیه جت جریان در زاویه‌های مختلف قرارگیری نازل و در شش فاصله عمودی مختلف نشان داده شده است.

جدول (۲): عمق نفوذ جت جریان در آزمایش با دبی ۰/۰۳۶ لیتر بر ثانیه به ازای زوایا (θ) و فواصل (L_j) مختلف جت (θ بر حسب درجه، L_j بر حسب سانتی‌متر)

$\theta=90$	$\theta=75$	$\theta=60$	$\theta=45$	$\theta=30$	$\theta=15$	
۱۲/۷	۱۲/۱	۱۱	۹/۵	۸/۷	۷/۹	$L_j=2$
۱۳	۱۲/۴	۱۱/۲	۹/۷	۹	۸/۲	$L_j=4$
۱۳/۴	۱۲/۷	۱۱/۵	۱۰/۱	۹/۲	۸/۴	$L_j=6$
۱۳/۸	۱۳	۱۱/۸	۱۰/۴	۹/۵	۸/۶	$L_j=8$
۱۴/۱	۱۳/۳	۱۲	۱۰/۶	۹/۷	۸/۸	$L_j=10$
۱۴/۴	۱۳/۵	۱۲/۲	۱۰/۸	۱۰	۹	$L_j=12$

جدول (۳): عمق نفوذ جت جریان در آزمایش با دبی ۰/۰۶۷ لیتر بر ثانیه به ازای زوایا (θ) و فواصل (L_j) مختلف جت (θ بر حسب درجه، L_j بر حسب سانتی‌متر)

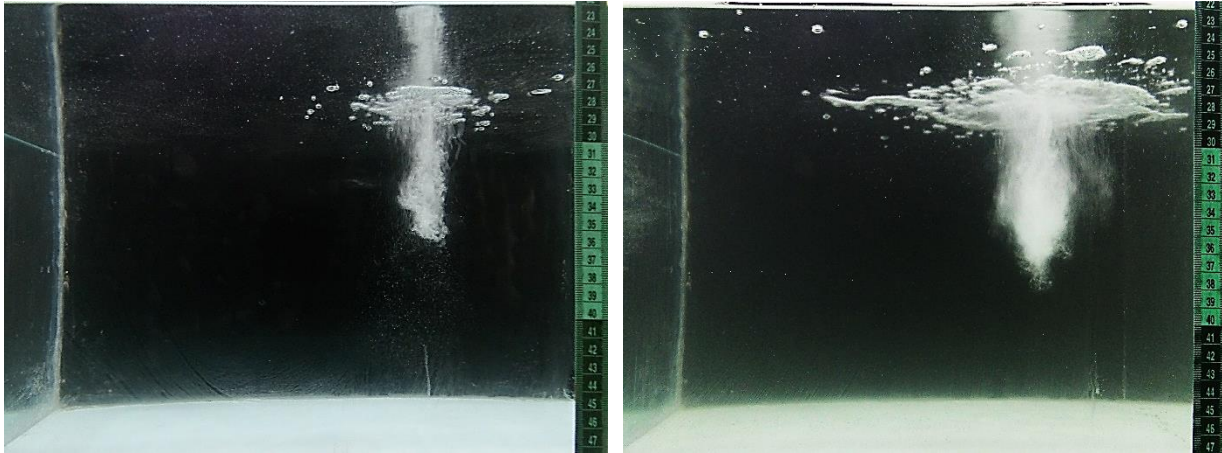
$\theta=90$	$\theta=75$	$\theta=60$	$\theta=45$	$\theta=30$	$\theta=15$	
۱۴/۴	۱۳/۶	۱۱/۸	۱۰/۳	۹/۲	۸/۳	$L_j=2$
۱۴/۷	۱۳/۸	۱۲/۲	۱۰/۶	۹/۵	۸/۶	$L_j=4$
۱۵	۱۴/۱	۱۲/۵	۱۱	۹/۷	۸/۸	$L_j=6$
۱۵/۳	۱۴/۴	۱۲/۸	۱۱/۳	۱۰	۹/۱	$L_j=8$
۱۵/۶	۱۴/۷	۱۳/۲	۱۱/۶	۱۰/۲	۹/۴	$L_j=10$
۱۵/۹	۱۴/۹	۱۳/۶	۱۱/۹	۱۰/۵	۹/۷	$L_j=12$

انتشار جت ورودی نیز افزایش یافته است (ابعاد ناحیه اختلاط جریان جت در سیال ساکن بزرگتر شده است). هرچه جت جریان ناحیه وسیع‌تری را تحت پوشش قرار دهد، عملکرد موثرتری را برای سامانه‌های تصفیه فاضلاب، سامانه‌های هوادهی در حوضچه‌های پرورش آبزیان و نیز عملیات حذف لایه‌بندی حرارتی در مخازن سدها خواهد داشت. از این رو، می‌توان ادعان داشت با افزایش دبی

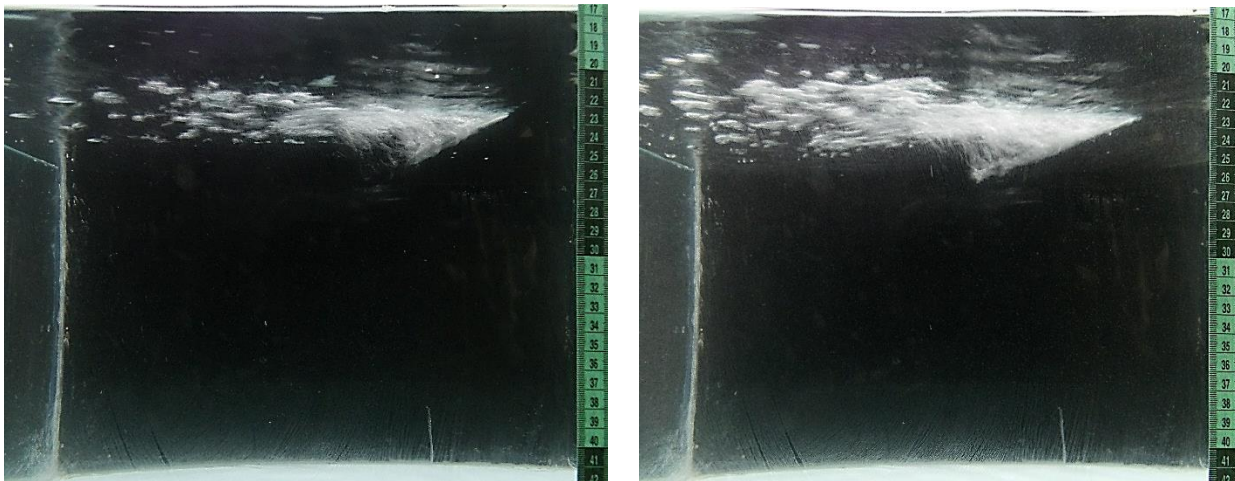
مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در یک فاصله ثابت بین نازل و سطح آب، با افزایش دبی جریان از ۰/۰۳۶ به ۰/۰۶۷ لیتر بر ثانیه، عمق نفوذ جت جریان نیز در همه آزمایش‌ها افزایش می‌یابد. شکل‌های ۲ و ۳ لحظه ورود جت جریان به داخل مخزن را برای این دو دبی در دو زاویه برخورد ۹۰ درجه و ۱۵ درجه نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، با افزایش دبی جریان، گستره

غوطه‌ور افزایش چشمگیری می‌یابد.

جریان خروجی از نازل جت که در واقع افزایش سرعت
جریان جت را نشان می‌دهد، کارایی هوادهی در جت‌های



شکل (۲): جت غوطه‌ور در مخزن برای دبی $0/067$ لیتر بر ثانیه (تصویر راست) و $0/036$ لیتر بر ثانیه (تصویر چپ) در زاویه برخورد 90 درجه در آب خالص



شکل (۳): جت غوطه‌ور در مخزن برای دبی $0/067$ لیتر بر ثانیه (تصویر راست) و $0/036$ لیتر بر ثانیه (تصویر چپ) در زاویه برخورد 15 درجه در آب خالص

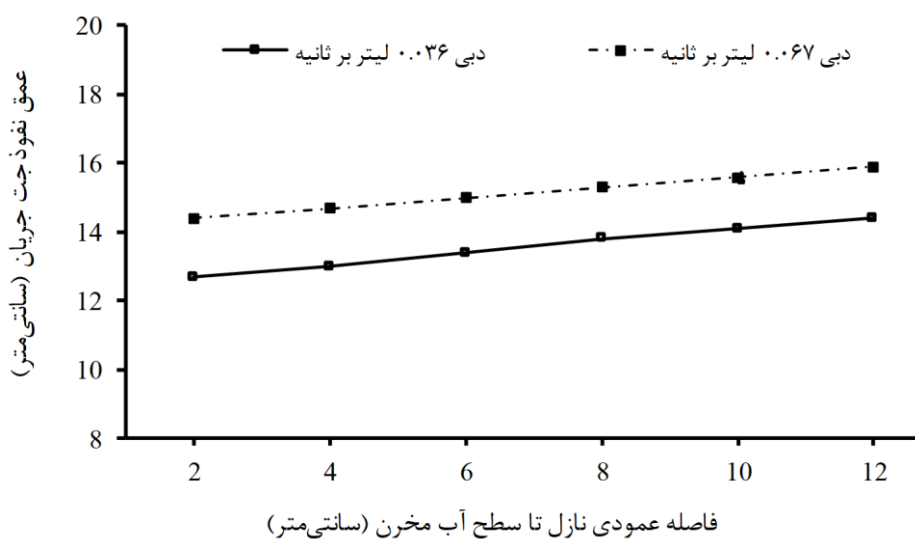
افزایش فاصله نازل از سطح آب، عمق نفوذ جت جریان نیز
افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در دبی‌های $0/036$ و
 $0/067$ لیتر بر ثانیه، وقتی فاصله عمودی نازل تا سطح
آب از 2 سانتی‌متر به 12 سانتی‌متر تغییر می‌کند، عمق
نفوذ جت ورودی به ترتیب $13/3$ و $10/4$ درصد افزایش
می‌یابد. همچنین با مقایسه این دو شکل می‌توان به این

تأثیر فاصله عمودی بین نازل و سطح آب بر عمق نفوذ جت جریان

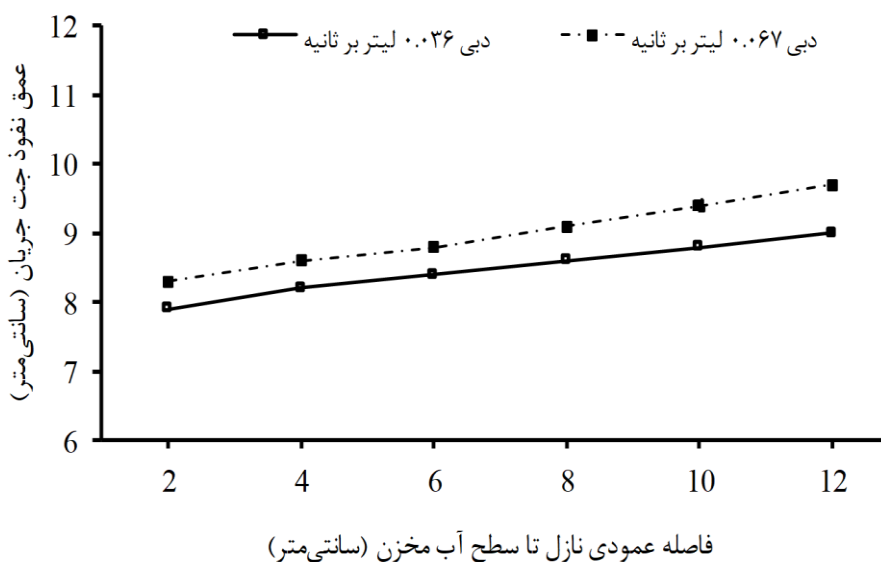
شکل‌های 4 و 5 تغییر عمق نفوذ جت جریان را در
مقابل فاصله عمودی بین نازل تا سطح آب مخزن برای
دبی‌های مورد آزمایش در دو زاویه برخورد 90 و 15
درجه نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، با

بیشتر باشد، اثربخشی فرآیندهای هوادهی مطلوبتر خواهد بود. بنابراین، در سیستم‌های تصفیه فاضلاب، با افزایش عمق نفوذ جت جریان، ناحیه اختلاط ابعاد بزرگتری پیدا می‌کند و این امر منجر به ارتقای عملکرد سیستم‌های تصفیه می‌شود.

نتیجه رسید که در فاصله عمودی ثابت مثلاً ۲ سانتی‌متر با کاهش زاویه برخورد نازل جت به سطح آب از ۹۰ به ۱۵ درجه، عمق نفوذ هوای ورودی در دو دبی ۰/۰۳۶ و ۰/۰۶۷ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۳۷/۷ و ۴۲/۴ درصد کاهش یافته است. همان‌طور که قبلاً گفته شد، هر چه عمق نفوذ



شکل (۴): تأثیر فاصله نازل تا سطح آب بر عمق نفوذ جت جریان در دو دبی مختلف در حالت زاویه برخورد ۹۰ درجه

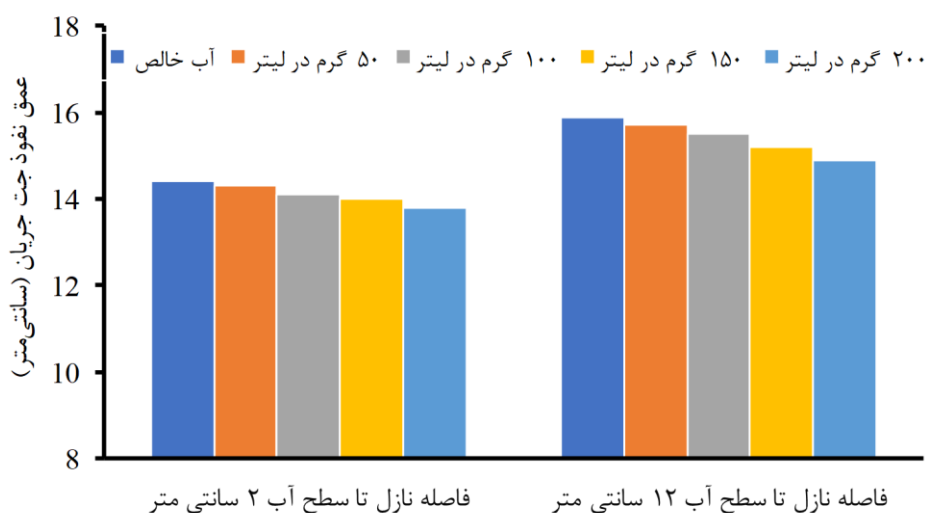


شکل (۵): تأثیر فاصله نازل تا سطح آب بر عمق نفوذ جت جریان در دو دبی مختلف در حالت زاویه برخورد ۱۵ درجه

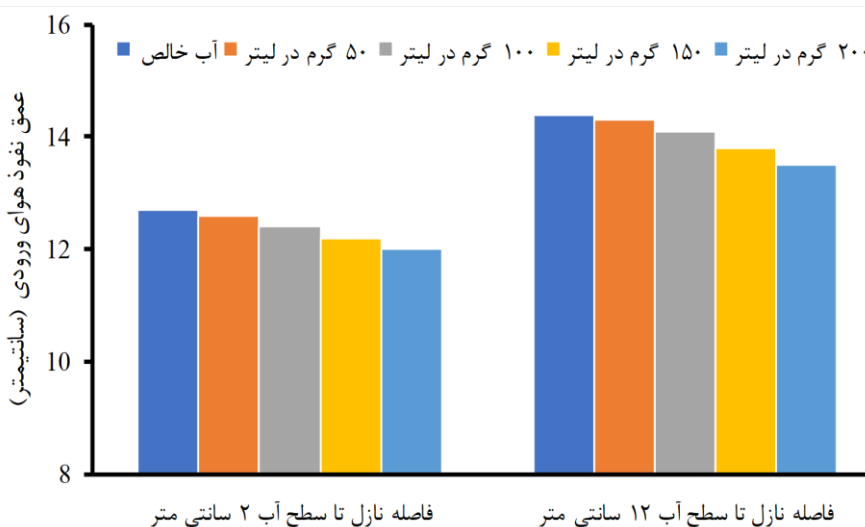
افزایش غلظت سیال به ۲۰۰ گرم در لیتر، عمق نفوذ جت نسبت به آب خالص به میزان ۷/۷ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در آزمایش با دبی ۰/۰۶۷ لیتر بر ثانیه، زاویه نازل ۹۰ درجه، فاصله نازل از سطح آب ۲ سانتی‌متر و سیال با غلظت ۱۰۰ گرم در لیتر، عمق نفوذ جت جریان سیال ۱۴/۱ سانتی‌متر بوده است که با افزایش غلظت به ۲۰۰ گرم در لیتر، عمق نفوذ جت به ۱۳/۸ سانتی‌متر کاهش یافته که معادل با ۲/۱ درصد کاهش عمق نفوذ جت جریان است. در واقع با افزایش غلظت سیال درون مخزن، نفوذ و حرکت جت جریان در داخل مخزن به دلیل ایجاد تنش‌های بیشتر با مقاومت بیشتری روبرو شده و اصطکاک مزاد ایجاد شده مانع از نفوذ بیشتر جت جریان می‌شود. همچنین از شکل‌های ۶ و ۷ مشخص است که با افزایش فاصله نازل از سطح آب، عمق نفوذ جت نیز افزایش می‌یابد که در این خصوص در قسمت‌های قبل توضیح داده شد. بنابراین، جهت افزایش کارایی هوادهی در غلظت‌های بالا باید یا از دبی بیشتری استفاده نمود یا فاصله نازل را از سطح سیال افزایش داد و یا زوایای نزدیک به قائم را برای جت به کار برد تا عملکرد هوادهی مطلوب‌تر شود.

تأثیر غلظت سیال ساکن درون مخزن بر عمق نفوذ جت جریان

برای بررسی تأثیر غلظت سیال ساکن بر عمق نفوذ جت جریان، آزمایش‌ها علاوه بر آب معمولی (با غلظت صفر) برای چهار غلظت ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ گرم در لیتر انجام شد. این غلظت‌ها با اضافه کردن نمک طعام در هر مرحله به دست آمدند. شکل ۶ تغییرات عمق نفوذ جت جریان را در سیال با غلظت‌های مختلف برای مقادیر Lz مورد بررسی، نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت سیال داخل مخزن، عمق نفوذ جت در کلیه مقادیر Lz کاهش یافته است. به طور مثال برای دبی ۰/۰۶۷ لیتر بر ثانیه و فاصله نازل از سطح آب ۲ سانتی‌متر، مقدار عمق نفوذ جت در غلظت ۵۰ گرم در لیتر ۸/۱ سانتی‌متر بوده است در حالی که برای همین شرایط، عمق نفوذ در غلظت ۲۰۰ گرم بر لیتر به ۷/۵ سانتی‌متر رسیده است. این روند در فواصل مختلف نازل از سطح آب درون مخزن و نیز زوایای مختلف برخورد در هر دو دبی مشاهده شد (شکل ۷). برای نمونه، در دبی ۰/۰۳۶ لیتر بر ثانیه، زاویه قرارگیری نازل ۱۵ درجه و فاصله عمودی ۱۲ سانتی‌متری بین نازل تا سطح آب، با



(۶): عمق نفوذ جت در غلظت‌های مختلف سیال درون مخزن برای آزمایش با مشخصه $Q=0/067 \text{ L/s}$, $\theta=90^\circ$

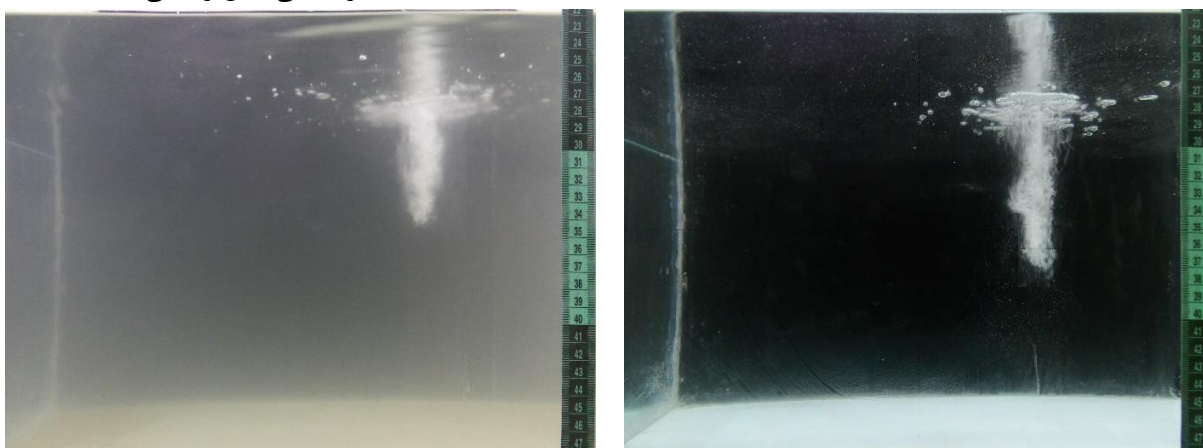


شکل (۷): عمق نفوذ جت در غلظت‌های مختلف سیال درون مخزن برای آزمایش با مشخصه $Q=0/036 \text{ L/s}$ ، $\theta=15^\circ$

تر به سرعت مستهلک شده و تا عمق کمتری پیشروی نموده است.

همچنین، در آزمایش‌های بررسی اثر غلظت، مشاهده شد که با افزایش دبی از $0/036$ به $0/067$ لیتر بر ثانیه، زمانی که فاصله نازل از سطح آب ۲ سانتی‌متر و زاویه جت ۱۵ درجه بود، عمق نفوذ در غلظت ۲۰۰ گرم در لیتر، تقریباً $1/1$ برابر آب خالص شد. می‌توان نتیجه گرفت برای افزایش عمق نفوذ و کارایی بهتر جت غوطه‌ور در غلظت‌های بالا، نیاز به دبی بیش‌تری می‌باشد.

شکل (۸) درک بهتری را از تاثیر غلظت سیال درون مخزن بر عمق نفوذ جت در لحظه ورود جت به درون مخزن نشان می‌دهد. در این شکل، تصویر سمت راست لحظه ورود جت عمودی با دبی $0/036$ لیتر بر ثانیه را در آب خالص، و تصویر سمت چپ، آزمایش متناظر را در سیال با غلظت ۲۰۰ گرم بر لیتر نشان می‌دهد (تار به نظر رسیدن این تصویر به دلیل غلظت بالای سیال می‌باشد). همان‌طور که مشاهده می‌شود، نفوذ جت در سیال غلیظ-



شکل (۸): ورود جت جریان در مخزن آب خالص (راست) و آب با غلظت ۲۰۰ گرم بر لیتر (چپ)؛ $Q=0.036 \text{ L/s}$ و $\theta=90^\circ$

نتیجه گیری

این مطالعه آزمایشگاهی به منظور بررسی مشخصه‌های جت جریان ورودی به سیال ساکن و شناسایی عوامل موثر بر عمق نفوذ جت به داخل سیال ساکن صورت گرفت. تاثیر عوامل مختلفی نظیر دبی خروجی از نازل، زاویه جت جریان نسبت به سیال ساکن، فاصله نازل تا سطح آب مخزن، و غلظت سیال داخل مخزن بر عمق نفوذ جت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد عمق نفوذ جت در سیال ساکن با افزایش دبی جت، افزایش فاصله نازل از سطح آب و کاهش غلظت سیال درون مخزن افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که وقتی فاصله نازل از سطح آب ۱۲ سانتی‌متر، زاویه برخورد جت با سطح آب ۹۰ درجه بود، با افزایش دبی جت از ۰/۰۳۶ به ۰/۰۶۷،

عمق نفوذ جت در آب خالص ۱/۱ برابر شد. همچنین در دبی ۰/۰۳۶ لیتر بر ثانیه و زاویه جت ۹۰ درجه، با افزایش فاصله بین نازل و سطح آب از ۲ به ۱۲ سانتی‌متر، عمق نفوذ جت در آب خالص ۱۳/۳ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، نتایج آزمایش‌ها بیانگر این بود که در آزمایش با دبی ۰/۰۳۶ لیتر بر ثانیه و زاویه قرارگیری ۹۰ درجه، زمانی که فاصله نازل از سطح آب ۱۲ سانتی‌متر بود، با افزایش غلظت سیال ساکن درون مخزن تا ۲۰۰ گرم بر لیتر، عمق نفوذ جت جریان تا ۶/۲ درصد کاهش می‌یابد. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان یک دستورالعمل برای ارتقای عملکرد اختلاط در فرآیند هوادهی فاضلاب در تصفیه‌خانه‌ها و نیز فرآیند اکسیژن‌دهی در حوضچه‌های پرورش آبزیان مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- احدیان، ج.، و موسوی جهرمی، س. ۱۳۸۸. بررسی عوامل موثر بر توسعه جریان جت‌های مستغرق در منابع آب پذیرنده ساکن. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۳(۴): ۱۷۹-۱۹۲.
- تکفلی، م. و یوسفی کما، ع. ۱۳۸۸. مدل‌سازی اجزای محدود برش ماده فولادی با جت آب دارای ذرات برنده، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران. ۴۳(۴): ۴۸۹-۴۹۹.
- توکلی، م. ۱۳۹۳. اندازه‌گیری حباب‌های ایجاد شده توسط جت سیال متحرک با استفاده از روش سایه نگاری پالسی. بیست و دومین کنفرانس سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران. اردیبهشت ماه، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- زحمتکش، م.، ۱۳۹۱، اثر هوادهی بر روی تغییرات نیتروژن پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شیراز در مقیاس پایلوت. پایان-نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز.
- ساجدی سابق، م.، صانعی، م.، عبدالحی، ح.، بهمنش، ش. و متین‌فر، ع. ۱۳۹۵. مطالعه آزمایشگاهی هیدرولیک جریان در مخزن استوانه‌ای پرورش ماهی. مهندسی و مدیریت آب‌خیز. ۸(۲): ۲۰۳-۲۰۹.
- صادق‌زاده نماور، ع.، و صادق مقدس، ج. ۱۳۹۰. اثر زاویه تزریق در اختلاط جتی. نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران. ۳۰(۲): ۵۳-۶۰.
- کیانوش، ب. و احمدیار، د. ۱۳۹۴. بررسی اثر قدرت لایه‌بندی حرارتی بر بازده اختلاط مصنوعی. فصلنامه هیدرولیک. ۱۰(۴): ۳۳-۱۷.
- مددی، ز. احمدی، م. و رحیم پور، م. ۱۳۹۷. مطالعه آزمایشگاهی اثر جریان جت دایره‌ای بر رسوب‌شویی مخازن. فصلنامه هیدرولیک. ۱۳(۴): ۱۱۱-۱۲۰.



- Bagatur, T., Baylar, A., & Sekerdag, N. (2002). The effect of nozzle type on air entrainment by plunging water jets. *Water Quality Research Journal*, 37(3), 599-612.
- Erlich, G., & Horvath, T. (2011). U.S. Patent No. 7,900,308. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Guyot, G., Cartellier, A., & Matas, J. P. (2020). Penetration depth of a plunging jet: from microjets to cascades. *Physical Review Letters*, 124(19), 194503.
- Horvath, E. (2004). Water jet reversing propulsion and directional controls for automated swimming pool cleaners. United States patent, 6, 742, 613 B2.
- Qu, X., Goharzadeh, A., Khezzar, L., & Molki, A. (2010). Experimental Characterization of Air-Entrainment in a Plunging Water Jet System Using Particle Image Velocimetry (PIV). In *Fluids Engineering Division Summer Meeting* (Vol. 49484, pp. 2767-2772).
- Qu, X., Goharzadeh, A., Khezzar, L., & Molki, A. (2013). Experimental characterization of air-entrainment in a plunging jet. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 51-61.
- Warjito, Budiarso, Pramono, I. A., Samosir, M. L., & Adanta, D. (2019). The effect of jet height in air entrainment process of vertical plunging jet with downcomer. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2062, No. 1, p. 020023). AIP Publishing LLC.
- Yamada, J., Takiguchi, T., Saito, A., Odanaka, H., Soyama, H., & Yamamoto, M. (2017). Removal of oral biofilm on an implant fixture by a cavitating jet. *Implant dentistry*, 26(6), 904-910.



Investigation of Plunging Jet Characteristics in Aeration to the Stagnant Water Reservoir

Meysam Soltaninejad¹, Majid Rahimpour², Mohamad Reza Madadi^{3*}

Abstract

A flow jet is a narrow stream of liquid that exits through a small diameter nozzle with a high velocity. Today, the use of hydraulic jets is of importance in various fields of engineering and industry. In this research, the characteristics of plunging jet in aeration into a stagnant water reservoir was investigated. For this purpose, first a physical model of reservoir was made and a circular nozzle was used to create a plunging jet. The experiments were performed for two discharges (Q) of 0.036 and 0.067 L/s, six vertical distances between the nozzle and the water surface (L_j) from 2 to 12 cm, six jet angles (θ) from 15° to 90°, and five densities of reservoir fluid (C) from 0 to 200 gr/L. High-speed imaging technique was employed to investigate the characteristics of plunging jet. The results showed that for $L_j=2$ cm and $\theta=90^\circ$, by increasing the Q from 0.036 to 0.067 L/s, the h_p increased by 13.3 %. Also, with increasing the L_j from 2 to 12 cm, at $Q=0.067$ L/s and $\theta=90^\circ$, the h_p increased by 10.4%. In addition, the results showed that at $L_j=2$ cm, $Q=0.067$ L/s, and $\theta=90^\circ$, by increasing the density of stagnant fluid from 0 to 200 gr/L, the h_p decreased by 4.1%. For the experiments of this study, the highest penetration depth was observed at $Q=0.067$ L/s, $\theta=90^\circ$, $L_j=2$ cm at the density of $C=0$, which can be used as a recommendation in the aeration of sewage treatment plants, and at the oxygenation to the aquaculture ponds.

Keywords: Image analysis, Oxygen injection, Wastewater treatment, Plunging jet, Experimental study.

¹ M.Sc. student, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Tel: 09133495142, Email address: meysam.soltani5142@gmail.com

² Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Tel: 09131990614, Email address: rahimpour@uk.ac.ir

³ Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran. Tel: 09119231606, Email address: madadi@ujiroft.ac.ir (*Corresponding author)