Shahid Chamran University of Ahvaz

**Irrigation Sciences and Engineering (JISE)**
**Vol. 46, No. 1, Spring 2023, p. 33-45**

**Research Paper**

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

**EXTENDED ABSTRACT**

# Experimental Study on the Effect of Quadrate Hydraulic Jet Distance relative to Sediment Surface on the Efficiency of Hydrosuction Systems

M. Kiani Nejad[1], M. Zounemat-Kermani*[2] and S. Golestani Kermani[3]

*1-M.Sc. Graduated, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman.*
*2*-Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman. zounemat@uk.ac.ir*
*3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman.*

**ARTICLE INFO**

*Artlcle history:*
Received: 23 April 2019
Revised: 22 November 2019
Accepted: 24 November 2019

*Keywords:*
Multiple jets, Hydraulic Jet Arrangement, Hydrosuction System.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Kiani Nejad, M., Zounemat-Kermani, M., Golestani Kermani, S. (2023). 'Experimental Study on the Effect of Quadrate Hydraulic Jet Distance relative to Sediment Surface on the Efficiency of Hydrosuction Systems', Irrigation Sciences and Engineering, 46(1), pp. 33-45. doi: 10.22055/jise.2019.29167.1839.

## Introduction

The entry of sediments into the lakes of dams over many years and the sedimentation within the reservoirs are inevitable phenomena, and it is expected that with the reduction of reservoir volume of dams, planning for the exploitation of dams and water allocation for various issues such as agriculture, industry, and drinking will become difficult (Ashrafi Vaghefi et al., 2008). Reducing the volume of the reservoir will shorten the useful life of the dams, and any neglect of this issue, especially in arid and semi-arid countries around the world, can be a serious threat (Emamgholi Zadeh 2008). One of the most effective methods for sediment removal from reservoirs of dams is the hydro suction method. In this method, the difference between the water level in the reservoir and downstream is used as suction force for sediment transfer. In this method, using the minimum volume of water, the maximum amount of sediment is discharged, saving costs (Chin et al., 2010). Also, other advantages of this method can be environmental compatibility due to the controllable amount of outlet sediments, low mud, the ability to concentrate dredging in one area, the ability to transfer siphon dredging, the low cost of constructing and installing it, the ability to perform even in low water seasons, the waste of less water, and non-interrupted operation. It seems that combining hydrosuction and water jet methods, in addition to having the advantages mentioned, increases sediment removal efficiency, which has received less attention from researchers. Therefore, in this research, the effect of jet arrangement and hydraulic jet distance relative to the sediment surface on improving sediment removal in the jet hydrosuction method has been studied.

## Methodology

In order to investigate the effect of arrangement and hydraulic jet distance relative to the sediment surface on the efficiency of the jet-hydrosuction method, a physical model was used, whose shematic design is presented in figure (1).

 *DOI:* 10.22055/JISE.2019.29167.1839

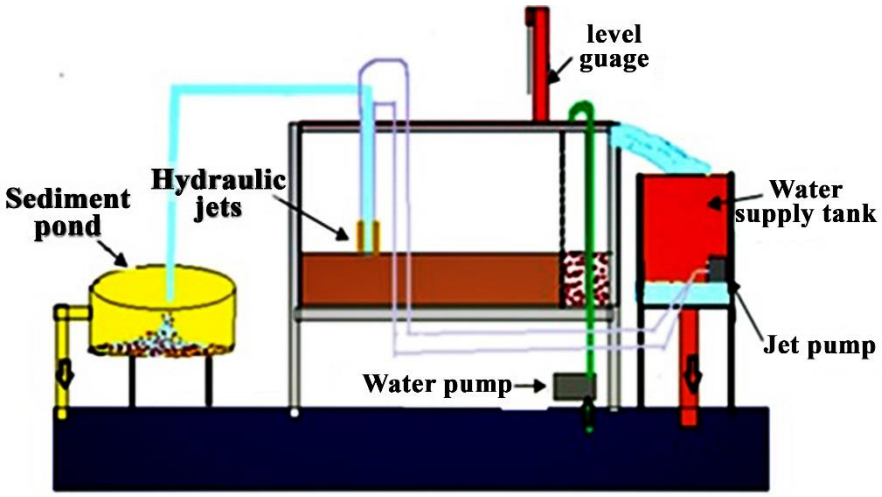



**Fig. 1- Schematic design of the model**

A non-cohesive, poorly granulated sediment (SP) with a density of 2.5 gr/cm3 was poured inside the reservoir at a height of 15cm. The inlet suction tube was then set up vertically on the surface of the sediment. After the jet pump started to work, sediments were separated and suspended by the water jet. Then the vortex flow was created by opening the pipe outlet, and the suction tube acted as a vacuum cleaner and drained all the sediments into it. In the present study, all experiments were carried out at an inflow discharge of 1.85 L/S in both jet and jet-free modes (control). The control test was performed in three effective heads (0.75, 0.7, and 0.65m). Also, jet experiments in a square arrangement were performed with a jet flow rate of 1.03 m/s, three different distances of hydraulic jet relative to the sediment surface (0.02 m above the surface of sediments, tangent to the surface of sediments, and 0.02m below the surface of sediments), and three effective heads (0.75, 0.7, and 0.65m). Then, the sediment discharge efficiency and scour hole volume were calculated in this treatment and compared with control and single jet samples, Which were previously done in the same conditions (Moghbeli Mehni, 2017).

**Results and Discussion**

The results of this study showed that sediment discharge efficiency in the quadratic jet-hydro suction method was increased in the jet square arrangement compared to the single-jet and control samples, except in one case (effective head of 0.75m and jet distance of 2cm above the sediment surface). The jet square arrangement makes the water jet dig up a wide range of sediment from the bed and diffuse it into the space around the inlet of the suction tube. Also, for fixed effective heads and hydraulic jet arrangements, reducing the hydraulic jet distance relative to the sediment surface increased the sediment discharge and scour hole volume. The maximum efficiency (0.67%) was observed at a 0.75 m effective head and a jet distance of 0.02 m below the sedimentation level. Also, the ratio of scour hole volume increased in the quadratic jet tests. Scour hole volume in this arrangement to control scour hole volume and the scour hole volume of a single jet sample were calculated at 14.53 and 1.54, respectively.

**Conclusion**

In this study, the effect of arrangement and hydraulic jet distance relative to the sediment surface on the efficiency of the jet-hydrosuction method was studied. The results showed that with a fixed effective head and hydraulic jet distance in a square arrangement of jets, the sediment discharge efficiency and sour hole volume were 17.18 and 14.53 times higher than the observed values in the control sample and 1.52 and 1.51 times higher than the observed values in a single jet, respectively.

In general, the best efficiency for discharge sediment was observed in the square arrangement of jets with an effective head of 75cm and a jet distance of 0.02 below the sedimentation level.

**Acknowledgment**

Author are thankful to H. Moghbeli Mehni and the Hydraulic laboratory of water engineering department of Shahid Bahonar University of Kerman for their valuable contributions.

**References**

1-Ashrafi Vaghefi, S.S., Bani Hashemi, S.M. and Rahmanian, M., 2008. The Effect of Desalination Operations on the Rehabilitation of Dams Reserves (case study:Sefidrood dam). *In 2th National Conference on Dam and Hydropower, Tehran, Iran* (In persian).

2-Chin, C.H.E.N., Shun-Chang, W.A.N.G. and Chun-Hung, W.U., 2010. Sediment removal efficiency of siphon dredging with wedge-type suction head and float tank. *International Journal of Sediment Research, 25(2),* PP. 149-160.

3-Emamgholi Zadeh, S. and Jahani, H., 2008. Hydraulic investigation of flow in pressure-dewatering sediment using laboratory results, *In 4th National Congress on Civil Engineering, Tehran, Iran* (In persian).

4- Moghbeli Mehni, H., 2017. Laboratory study of removal sediment from dam reservoir with jet-hydrosuction method, M.Sc Thesis, *Shahid Bahonar University of Kerman*, Iran (In Persian).

© 2023 Shahid Chamran Universiry of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم و مهندسی آبیاری جلد ٤٦، شماره‌ی۱، بهار ۱٤۰۲، مقاله پژوهشی، ص. ٤٥-۳۳

# بررسی آزمایشگاهی تاثیر فاصله جت‌های هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب برکارایی روش جت چهارگانه- مکش آبی

مینو کیانی نژاد[۱]، محمد ذونعمت کرمانی[۲*] و سودابه گلستانی کرمانی[۳]

۱- دانش اموخته مقطع کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.
۲*- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان. zounemat@uk.ac.ir
۳- استادیار ، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۳ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۰۱ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۳

## چکیده

**با توجه به افزایش پدیده رسوب‌گذاری در مخازن سدهای ایران وگرفتگی دهانه آبگیرها، ارایه روشی که با کمترین هزینه به‌طور موضعی رسوبات را تخلیه نماید، ضروری است. روش مکش آبی با توجه به قابلیت کنترل رسوبات خروجی و سازگاری با محیط‌زیست، روش مقرون به صرفه‌ای است و به نظر می‌رسد که می‌توان در روش‌هایی مانند جت- مکش آبی با چیدمان مناسب جت‌ها و هم‌چنین تنظیم فاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب، عملکرد سیستم در تخلیه رسوبات را بهبود بخشید که در تحقیق حاضر به آن پرداخته شده است. بدین منظور تأثیر چیدمان چهارگانه جت‌ها (آرایش مربعی) در سه فاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب (۲+ سانتی‌متر،۰، ۲- سانتی‌متر) و سه هد مؤثر (٦٥ سانتی‌متر،۷۰ سانتی‌متر، ۷٥ سانتی‌متر) بر کارایی روش مکش آبی بررسی گردید و مقادیر ثبت شده با مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده در حالت بدون جت (نمونه شاهد) و تک جت مقایسه شد. بررسی نتایج به‌دست آمده نشان داد که حداکثر راندمان تخلیه رسوب و حجم حفره آب‌شستگی در هد مؤثر ۷٥ سانتی‌متر و فاصله ۲- سانتی‌متری جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب رخ داده و شاخص‌های مذکور در چیدمان مربعی جت‌ها نسبت به نمونه بدون جت به‌ترتیب ۱۷/۱۸ و ۱٤/٥۳ برابر و نسبت به نمونه تک جت ۱/٥۲و۱/٥۱ برابر شده است.**

**کلید واژه‌ها :** جت چندگانه، چیدمان جت هیدرولیکی، سیستم مکش آبی.

## مقدمه

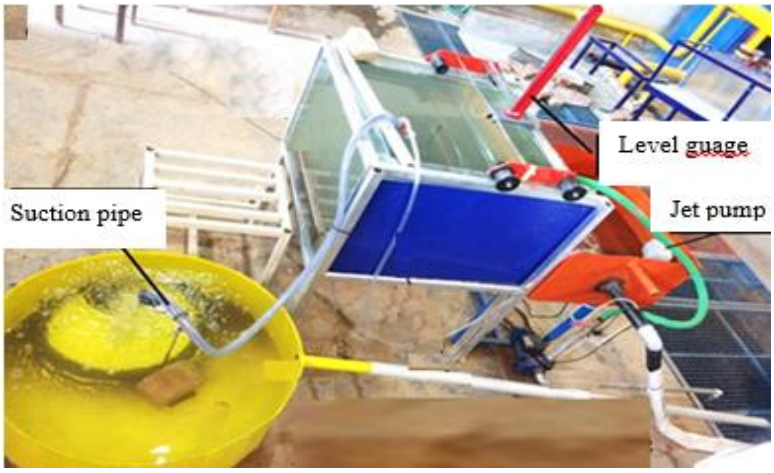
رسوب‌گذاری در مخازن سدها امری اجتناب‌ناپذیر است. این پدیده آثار نامطلوب زیادی در مخازن سدها مانند کاهش پایداری سد، عملکرد نامناسب دریچه‌های بهره‌برداری، مسدود کردن دریچه‌ها و مدخل آبگیری، فقدان مزایای کنترل سیلاب در پایین‌دست، افزایش سیل در بالادست به‌دلیل رسوب‌گذاری بار کف در نواحی دلتایی و ورود رسوب به تأسیسات برق‌آبی را به دنبال دارد. علاوه بر این رسوب‌گذاری بر تولید انرژی، عملکرد توربین‌ها، تولید و تأمین آب و ایمنی سدها تأثیرگذار است (Valizadegan et al., 2011). تاکنون روش‌های گوناگونی برای رسوب‌زدایی مخازن سدها ارایه شده است که بیشتر آن‌ها به‌علت هزینه زیاد و مصرف بالای آب و ایجاد مشکلات زیست‌محیطی در پایین‌دست نامناسب بوده‌اند. یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر به‌دلیل صرفه‌جویی در مصرف آب و انرژی مورد توجه قرارگرفته است، رسوب‌زدایی مخزن سد با استفاده از روش سیفون است. در این روش از اختلاف تراز آب داخل مخزن و پایین‌دست به‌عنوان نیروی مکش برای انتقال رسوبات استفاده می‌شود و به انرژی خارجی نیاز ندارد (Chin et al., 2010). از مزایای دیگر این روش نسبت به سایر روش‌های لایروبی می‌توان به سازگاری با محیط‌زیست به‌دلیل قابل کنترل بودن میزان رسوبات خروجی، گل‌آلودگی کم و توانایی متمرکز کردن لایروبی به یک منطقه (تخلیه موضعی) و هم‌چنین قابلیت انتقال سیفون لایروبی اشاره کرد (Atkinson, 1996; Asiaban et al., 2017). به‌علاوه در این روش به‌دلیل پیوستگی در رهاسازی رسوبات، تخلیه ناگهانی و ضربه‌های وارده به دریچه و بدنه سد که مختص روش آبشویی سریع می‌باشد، وجود ندارد (Hotchkiss and Huang, 1995). با توجه به مزایای مطرح شده و لزوم تخلیه رسوبات از مخازن جهت حفظ حجم مفید و کارایی مخزن، روش مکش آبی مورد توجه محققین قرار گرفته و تحقیقات متعددی در زمینه بررسی عملکرد آن انجام شده است. Sakurai و Hakoishi (2012) با استفاده از اختلاف تراز آب بین ناحیه بالادست و پایین‌دست، مدل تخلیه رسوبات به روش دفن‌شونده را

ارایه کردند و نشان دادند که غلظت رسوبات نسبت به زمان افزایش می‌یابد .Yan et al(2012) مشخصه هیدرولیکی و پایداری لوله سیفون را در دو حالت آب زلال و آب گل‌آلود مورد بررسی قرار داده و بیان کردند که پایداری لوله با افزایش قطر لوله کاهش می‌یابد. Shrestha (2012) از یک جت هیدرولیکی برای افزایش غلظت جریان خروجی و جلوگیری از انسداد لوله استفاده کرد. .Miyakawa et al (2014) خصوصیات هیدرولیکی و قابلیت کاربرد لوله مکش را به‌صورت آزمایشگاهی و میدانی مورد بررسی قرار دادند و کارایی این روش را برای حذف مواد رسوبی غیرچسبنده از مخازن کوچک تأیید کردند. Cheraghali (2015)، Pishgar (2015) و .Maghsoodlo Nejad et al (2015) به بررسی کارایی لوله مدفون شده مکش رسوبات در شرایط مختلف پرداختند. نتایج تحقیقات Moghbeli (2015) نشان داد که افزایش پارامترهایی مانند قطر لوله مکش، هد مؤثر و زاویه دهانه مکش موجب افزایش راندمان روش مکش آبی می‌گردد. .ke et al (2016) در یک بررسی آزمایشگاهی، تأثیر پارامتر درجه تحکیم رسوبات ریزدانه (سیلت و رس) بر عملکرد روش مکش آبی را بررسی کردند. هم‌چنین نتایج تحقیقات Forutan Eghlidi (2017) نشان داد که افزایش چسبندگی ذرات رسوب موجب کاهش راندمان تخلیه و کاهش فاصله دهانه مکش از سطح رسوب موجب افزایش راندمان می‌شود. Moghbeli Mehni (2017) از جت هیدرولیکی برای افزایش کارایی روش مکش آبی استفاده کرد و نتایج به‌دست آمده نشان داد که افزایش سرعت جت موجب افزایش راندمان تخلیه رسوبات می‌گردد. .Asiaban et al (2017) از یک دستگاه توربین خاص جهت برهم زدن رسوبات و افزایش کارایی روش هیدروساکشن استفاده کردند.

بررسی پیشینه مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که کاربرد روش ترکیبی جت–مکش آبی و بررسی تأثیرگذاری عوامل مختلف بر عملکرد آن مورد مطالعه قرار نگرفته است. بنابراین در پژوهش حاضر به بررسی عملکرد روش مکش آبی و جت‌های هیدرولیکی (با چیدمان مربعی) بر بهبود راندمان تخلیه رسوب و حجم حفره آب‌شستگی پرداخته شده است. هم‌چنین تأثیر فاصله جت‌ها نسبت به سطح رسوبات، در آرایش چهارگانه (چیدمان مربعی) و در سه هد مؤثر بر راندمان تخلیه رسوب و حجم حفره آب‌شستگی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج آن با نمونه شاهد (بدون جت) و نمونه تک جت (اطلاعات گردآوری شده از Moghbeli Mehni, 2017 ) مقایسه گردید.

## مواد و روش‌ها

برای بررسی کارایی روش جت–مکش آبی و مطالعه تأثیر فاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب بر بازده این روش، از مدل فیزیکی موجود در آزمایشگاه هیدرولیک بخش مهندسی آب دانشگاه شهید باهنر کرمان استفاده شد. مدل مذکور شامل یک مخزن شیشه‌ای به طول ۱۰۰ سانتی‌متر، عرض ۱۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر مجهز به ناحیه آرام‌کننده، سرریز مستطیلی و حوضچه رسوب‌گیر بود که نمای مدل مورد استفاده در شکل‌های (۱) و (۲) ارایه شده است. در مرحله اول درون مخزن مدل ۱۵ سانتی‌متر رسوب غیرچسبنده از نوع ماسه بد دانه‌بندی شده (Sand Poorly Graded) با چگالی ۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب ($D_{30}$=0.35mm, $D_{10}$=0.19mm, $D_{60}$=0.63mm) ریخته شد. به‌منظور افزایش دقت در روش مکش آبی، ابتدا لوله مکش هواگیری شد. سپس دهانه ورودی لوله مکش به‌صورت قائم روی سطح رسوبات و دهانه خروجی لوله مکش در تراز تخلیه مورد نظر تنظیم شد.




**Physical model Fig.1-**
**شکل ۱- مدل فیزیکی**

DOI: 10.22055/JISE.2019.29167.1839

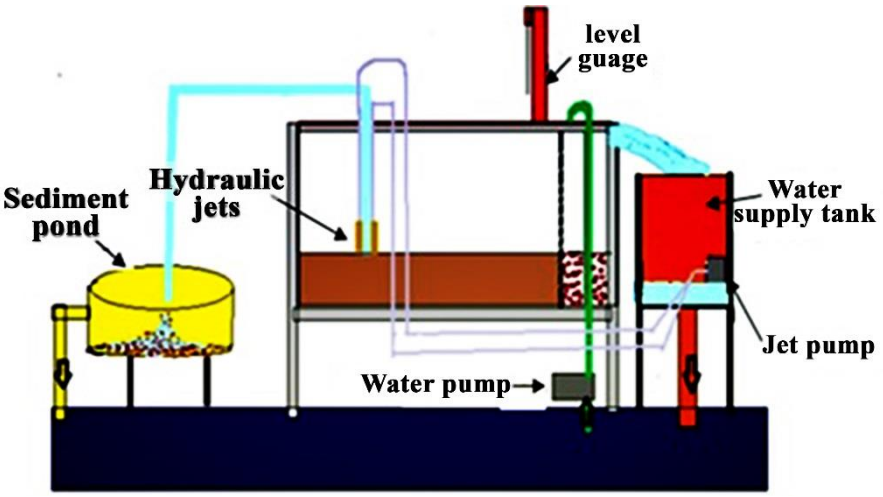



**Fig. 2- Schematic design of the model**
**شکل۲- طرح شماتیک مدل**

پس از شروع به کار پمپ، جریان آب ابتدا وارد ناحیه آرام کننده و سپس وارد مخزن اصلی گردید و بعد از آن وارد مخزن تأمین‌کننده آب جت‌ها شد. پس از شروع به کار پمپ جت، رسوبات توسط جت آب ناشی از نازل‌ها از سطح جدا شده و به صورت معلق درآمدند. سپس با بازکردن دهانه خروجی لوله، جریان گردابه‌ای ایجاد شد و لوله مکش مانند یک جارو برقی عمل کرده و تمامی رسوبات را به درون خود کشید. جریان خروجی از لوله مکش در ظروف مدرج در فواصل زمانی ده ثانیه و به مدت ۱۲۰ ثانیه جمع‌آوری گردید. سپس با استفاده از رابطه (۱) راندمان تخلیه رسوب محاسبه گردید.

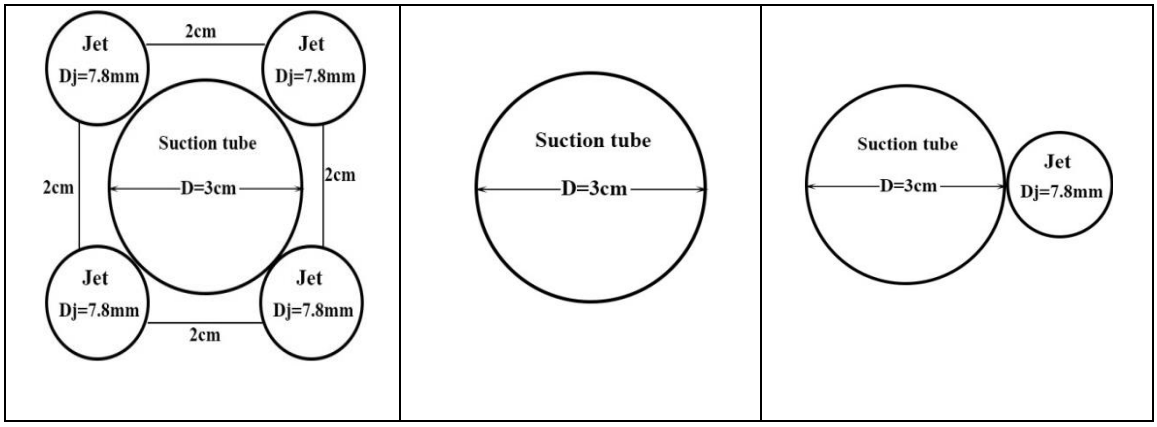
$$\eta = \frac{V_s}{V_w} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، $\eta$ راندمان تخلیه رسوبات از روش هیدروساکشن، $v_s$ حجم رسوبات تخلیه‌شده و $v_w$ حجم آب خروجی برحسب مترمکعب می‌باشد. میانگین راندمان تخلیه رسوب محاسبه شد و مقادیر به‌دست آمده با مقادیر حاصل از نمونه شاهد (بدون جت) و نمونه تک جت (Moghbeli Mehni, 2017) که در همین مخزن و در شرایط کاملاً مشابه انجام شده بود، مقایسه گردید. شکل (۳) طرح شماتیک مربوط به چیدمان جت‌ها در سیستم جت –مکش آبی را نشان می‌دهد. پس از زمان تعادل (پنج ساعت) آب مخزن به‌طور کامل تخلیه شد. سپس ابعاد حفره آب‌شستگی توسط سطح‌سنج اندازه‌گیری شد و با نرم‌افزار Surfer ترسیم گردید و سپس نسبت حجم حفره آب‌شستگی به حجم حفره نمونه شاهد و نمونه تک جت محاسبه شد. در تحقیق حاضر،کلیه آزمایش‌ها در دبی ورودی ۱/۸۵ لیتر بر ثانیه در دو حالت بدون جت (شاهد) و همراه با جت انجام شد. آزمایش‌های شاهد در سه هد مؤثر ۰/۶۵، ۰/۷ و ۰/۷۵ متر انجام گردید. آزمایش‌های همراه با جت در چیدمان چهارگانه (آرایش مربعی) در سرعت جریان خروجی از جت ۱/۰۳ متر بر ثانیه و ارتفاع آب ۰/۵ متر، فواصل مختلف جت هیدرولیکی ۰/۰۲ متر بالاتر از سطح رسوبات، مماس بر سطح رسوبات و ۰/۰۲ متر زیر سطح رسوبات و در سه هد مؤثر ۰/۶۵، ۰/۷ و ۰/۷۵ متر انجام گردید. در مجموع ۱۲ آزمایش هر یک با سه تکرار (۳۷ آزمایش با چیدمان مربعی و نه آزمایش بدون جت) برای بررسی تأثیر فاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوبات $(Hj)$ بر راندمان تخلیه رسوب و حجم حفره آب‌شستگی در دو حالت انجام شد.

### آنالیز ابعادی

با توجه به تحقیقات انجام‌شده پارامترهای متعددی بر عملکرد روش مکش آبی تأثیر دارند که عبارتند از: سرعت جریان در لوله مکش آبی $(V)$، سرعت خروجی جت $(V_j)$، چگالی آب $(\rho_w)$، فاصله لوله مکش نسبت به سطح رسوب$(y)$، فاصله قرارگیری جت از لوله مکش $(x)$، قطر لوله مکش$(D)$، قطر نازل جت $(D_n)$، قطر رسوبات تجمع‌یافته $(D50)$، هد مؤثر $(h)$، ارتفاع آب روی سطح رسوبات $(h_w)$، فاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب$(Hj)$، طول لوله مکش $(L)$، طول لوله جت $(L_j)$، دبی جریان در لوله مکش $(Q)$، لزجت دینامیکی $(\mu)$، زاویه‌لوله مکش نسبت به محور افق $(\alpha)$، زاویه نازل با محور افق $(\beta)$، شتاب گرانش$(g)$، زمان از شروع فرایند $(t)$، تعداد جت $(N)$. این پارامترها با تابع F رابطه (۲) نشان داده می‌شوند.

$$F= f\ (V, V_j, \rho_w, y, x, D, D_n\ , D_{50}\ , h, h_w\ , H_j\ ,L, L_j\ , Q,\mu, \alpha, \beta, g, t, N\ ) \qquad (۲)$$




**(a)** **(b)** **(c)**

**Fig. 3- Schematic plan of jet arrangement in jet-hydrosuction system a) square arrangement b) control treatment c) single jet**

**شکل۳ - طرح شماتیک مربوط به چیدمان جت‌ها درسیستم جت- مکش آبی الف) چیدمان مربعی ب) نمونه شاهد ج) تک جت**

**جدول ۱- مقادیر ثابت پارامترهای بدون بعد**

**Table 1- Values of dimensionless parameters**

| Dimensionless Ratio | $\frac{y}{D}$ | $\frac{x}{D}$ | $\beta$ | $\alpha$ | $\frac{h_w}{D}$ | $\frac{D_n}{D}$ | $\frac{D_{50}}{D}$ | $\frac{Lj}{D}$ | $\frac{L}{D}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Value | 0.00 | 0.00 | $\frac{\Pi}{2}$ | $\frac{\Pi}{2}$ | 18.33 | 0.26 | 0.017 | 66.67 | 83.33 |

سپس با استفاده از روش باکینگهام پارامترهای بی‌بعد به‌صورت رابطه (۳) تعیین گردید.

$$F=f\left(\frac{V_j}{V}, \frac{y}{D}, \frac{X}{D}, \frac{D_n}{D}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{h}{D}, \frac{h_w}{D}, \frac{H_j}{D}, \frac{L_j}{D}, \frac{L}{D}, \frac{Q}{VD^2}, \frac{\rho_w VD}{\mu}, \alpha, \beta, \frac{V^2}{gD}, \frac{tV}{D}, N\right) \quad (۳)$$

در این تحقیق، کلیه نسبت‌های بی‌بعد ذکرشده در رابطه (۳) به‌دلیل ثابت بودن پارامترهایی نظیر فاصله دهانه مکش تا سطح رسوب، قطر نازل جت، قطر ذرات رسوب، قطر لوله جت، ارتفاع آب روی سطح رسوبات، طول لوله مکش، طول لوله جت و زاویه لوله مکش و زاویه نازل نسبت به سطح رسوبات ثابت می‌باشند. عدد رینولدز نیز برای تمام آزمایش‌ها در محدوده جریان آشفته (۲۹۸۵۰/۷۵-۲۶۸۶۵/۶۷) قرار دارد که می‌توان تأثیر آن را بر نتایج آزمایش‌ها نادیده گرفت. جدول (۱) مقادیر ثابت پارامترهای بی‌بعد را نشان می‌دهد. بنابراین شکل کلی رابطه بدون بعد که بیانگر عملکرد سیستم جت چندگانه-مکش آبی در این تحقیق است، به صورت رابطه (۴) می‌باشد.

$$F = f\left(\frac{h}{D}, \frac{Hj}{D}, \frac{tv}{D}, Fr, N\right) \quad (۴)$$

هم‌چنین به‌منظور بررسی تغییرات زمانی راندمان تخلیه رسوب در روش جت چندگانه-مکش آبی قبل از زمان تعادل از رابطه (۵) استفاده شد که پارامترهای آن در قسمت بالا شرح داده شده است.

$$t^* = \frac{tv}{D} \quad (۵)$$

## نتایج و بحث

در تحقیق آزمایشگاهی حاضر به بررسی راندمان تخلیه رسوب و حجم حفره آب‌شستگی در روش جت چندگانه- مکش آبی در شرایط استفاده از چهار جت هیدرولیکی پرداخته شده است و نتایج به‌دست آمده با نتایج حاصل از نمونه شاهد (بدون جت) و نمونه‌تک جت مورد مقایسه قرار گرفت.

### الف) آزمایش‌های شاهد(بدون جت)

در هنگام آزمایش بلافاصله پس از باز شدن دهانه خروجی لوله مکش، مقدار زیادی رسوبات نزدیک دهانه مکش همراه با جریان خروجی تخلیه شدند. یعنی حداکثر غلظت جریان خروجی در ده ثانیه اول مشاهده شد.

با خارج شدن این توده رسوب به‌دلیل وجود تعدادی گردابه، حفره آب‌شستگی (حفره مخروطی ) در نزدیکی دهانه ورودی لوله مکش تشکیل شد. پس از تشکیل مخروط، غلظت جریان خروجی به شدت کاهش یافت تا به تعادل رسید. تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست آمده نشان داد در آزمایش شاهد با افزایش ۱۵/۳۶ درصدی هد مؤثر، راندمان تخلیه رسوب ۴۴/۴۴ درصد، حجم حفره آب-شستگی ۴۳/۶۱ درصد و عدد فرود چگال ۳/۷۹ درصد افزایش یافت.

*DOI:* 10.22055/JISE.2019.29167.1839

**ب) آزمایش‌های جت چهارگانه-مکش آبی**

**ب-۱) بررسی تأثیر چیدمان چهارگانه جت هیدرولیکی بر راندمان تخلیه رسوبات در مقایسه با نمونه شاهد و تک جت**

به‌منظور بررسی تأثیر چیدمان جت هیدرولیکی بر راندمان تخلیه رسوبات، تغییر میانگین راندمان تخلیه رسوبات در چیدمان مربعی جت هیدرولیکی با سه هد مؤثر ۰/۶۵، ۰/۷ و ۰/۷۵ متر و فواصل مختلف جت هیدرولیکی ۰/۰۲متر بالاتر از سطح رسوبات، مماس بر سطح رسوبات و ۰/۰۲ متر زیر سطح رسوبات در مقایسه با نمونه شاهد و نمونه تک جت مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است. بررسی نتایج ارایه شده نشان داد که راندمان تخلیه رسوب در روش جت چهارگانه-مکش آبی، در چیدمان مربعی جت‌ها نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. هم‌چنین راندمان تخلیه رسوب در آرایش مربعی جت‌ها نسبت به حالت تک جت به جز در یک مورد (هد مؤثر ۰/۷۵ متر با نسبت بدون بعد ۲۵) و فاصله جت دو سانتیمتر بالای سطح رسوب (نسبت بی‌بعد ۰/۶۶) افزایش یافت. زیرا در چیدمان مربعی و در دبی یکسان، برای این‌که سرعت آب خروجی هر یک از نازل‌ها مساوی با سرعت تک جت باشد، سطح مقطع خروجی نازل‌ها کاهش یافت. در نتیجه با وجود چهار نازل با سرعت خروجی ۱/۰۳ متر بر ثانیه قدرت تخریب و تنش برشی ناشی از فشار آب افزایش داشت.

هم‌چنین چیدمان چهارگانه جت‌ها باعث می‌شود جت آب خروجی از نازل‌ها محدوده وسیع‌تری رسوب را از بستر جدا کرده و در فضای پیرامون دهانه ورودی لوله مکش منتشر کند. در واقع در این حالت شعاع تأثیر بیشتر شد. بنابراین نسبت حجم رسوبات خروجی به حجم آب (راندمان) افزایش یافت. این روند تا زمانی که تنش برشی ناشی از جریان ورودی نازل‌ها بیشتر از آستانه حرکت ذرات رسوبی باشد، ادامه یافت. تنها در آزمایش شماره (A7) راندمان تخلیه رسوب در چیدمان مربعی نسبت به تک جت تغییر نکرد که می‌تواند ناشی از گرفتگی جزیی جت‌ها باشد. در مجموع بررسی نتایج به‌دست آمده نشان داد که چیدمان جت‌ها به‌صورت مربعی و مماس بر لوله مکش در فاصله ۰/۰۲متر زیر سطح رسوبات، به بهترین نحو رسوبات نهشته‌شده را زیر و رو کرده و باعث افزایش غلظت رسوبات خروجی می‌گردد. هم‌چنین بررسی نمودارهای رسم‌شده در شکل (۴) نشان می‌دهد که چیدمان مربعی موجب افزایش نسبت حجم حفره آب‌شستگی به حجم حفره در نمونه شاهد و تک جت (Moghbeli Mehni, 2017) شده است. اما این افزایش از روند منظمی پیروی نکرده است و به‌طور میانگین نسبت حجم حفره آب‌شستگی در آزمایش‌های جت چهارگانه به مقادیر نمونه شاهد۱۴/۵۳و به مقادیر نمونه تک جت ۱/۵۴محاسبه شد. هم‌چنین حداکثر نسبت حجم حفره آب‌شستگی در آزمایش‌های تک جت به نمونه شاهد۱۲/۸۳ به‌دست آمد که این نسبت در چیدمان مربعی برابر با ۱۸/۸۲ محاسبه شد. در چیدمان چهارگانه جت‌ها، به‌دلیل شعاع تأثیر بیشتر پیرامون لوله مکش و هم‌چنین نیروی برشی حاصل از جریان خروجی چهار نازل، دیواره حفره شروع به ریزش کرده و ابعاد حفره آب‌شستگی افزایش یافت.

**جدول۲- تأثیر چیدمان جت هیدرولیکی بر راندمان تخلیه رسوب**

**Table 2- Effect of hydraulic jet arrangement on sediment discharge efficiency**

| Treatment | Effective head (m) | Dimensionless ratio of effective head | Jet number | Jet distance to sediment surface(m) | Dimensionless ratio of jet distance to sediment surface | Efficiency | Sediment discharge efficiency increased relative to control (%) | Sediment discharge efficiency increased relative to single jet (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | 0.65 | 21.67 | 4 | 0.02 | 0.66 | 0.31 | 1058.43 | 18.96 |
| A2 | 0.65 | 21.67 | 4 | 0.00 | 0.00 | 0.46 | 1622.85 | 64.29 |
| A3 | 0.65 | 21.67 | 4 | -0.02 | -0.66 | 0.53 | 1882.40 | 23.33 |
| A4 | 0.7 | 23.33 | 4 | 0.02 | 0.66 | 0.34 | 896.40 | 34.96 |
| A5 | 0.7 | 23.33 | 4 | 0.00 | 0.00 | 0.5 | 1373.62 | 38.89 |
| A6 | 0.7 | 23.33 | 4 | -0.02 | -0.66 | 0.55 | 1520.98 | 30.95 |
| A7 | 0.75 | 25 | 4 | 0.02 | 0.66 | 0.36 | 843.34 | 0.00 |
| A8 | 0.75 | 25 | 4 | 0.00 | 0.00 | 0.53 | 1275.55 | 43.24 |
| A9 | 0.75 | 25 | 4 | -0.02 | -0.66 | 0.67 | 1638.90 | 52.27 |

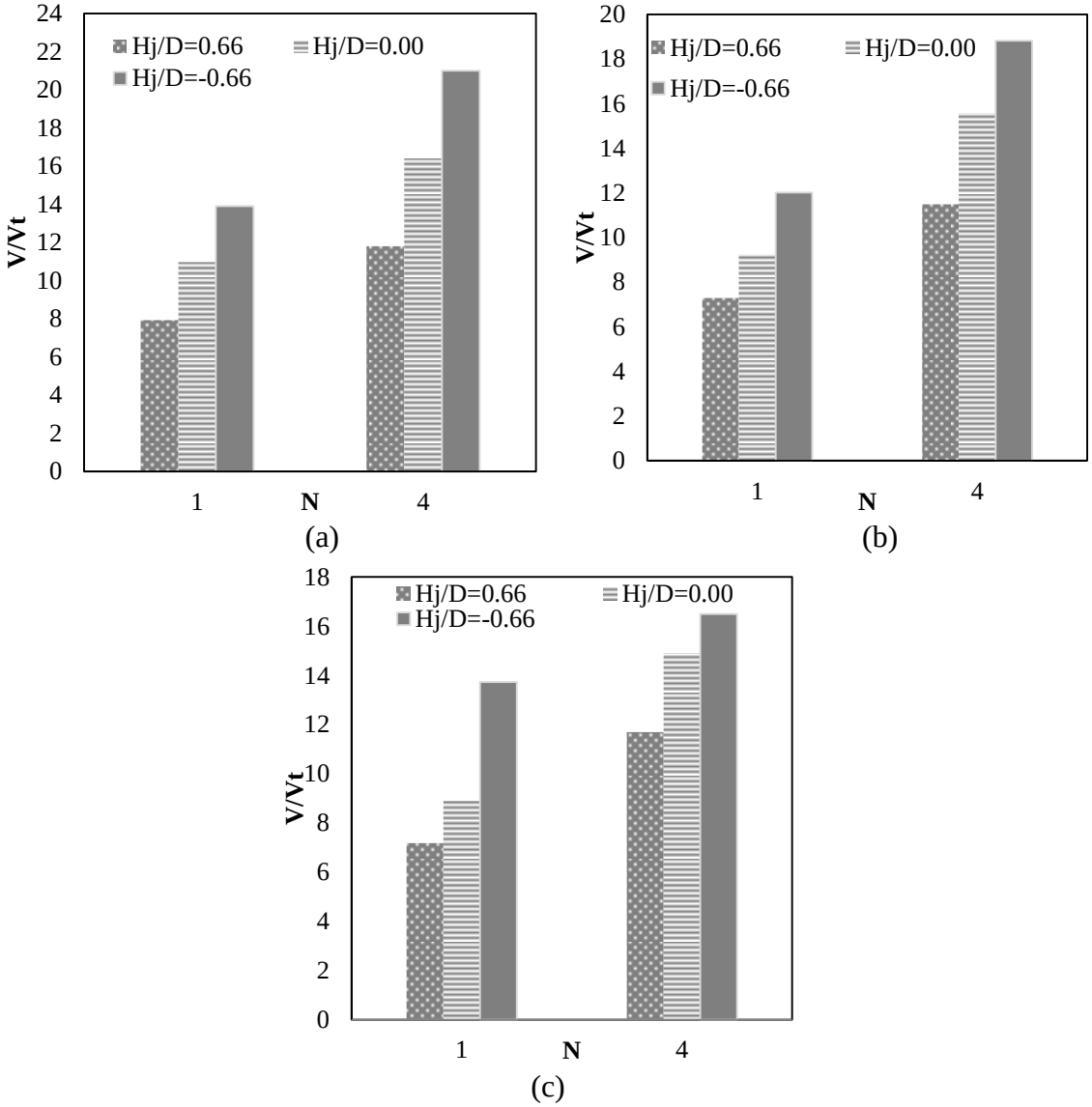



**Fig. 4- Effect of hydraulic jet arrangement on scour hole volume in effective head a) 0.65m b) 0.7m c) 0.75m**

**شکل٤- تأثیر چیدمان جت هیدرولیکی بر حجم حفره آب‌شستگی در هد مؤثر الف) ۰/٦٥ متر ب) ۰/۷ متر ج) ۰/۷۵ متر**

**ب-۲) بررسی تأثیر فاصله جت هیدرولیکی در چیدمان چهارگانه بر راندمان تخلیه رسوبات**

**در مقایسه با نمونه شاهد و تک جت**

بررسی نتایج ارایه شده در جدول (۲) نشان داد به ازای هد مؤثر (h) و چیدمان جت هیدرولیکی ثابت (N)، کاهش فاصله جت هیدرولیکی از سطح رسوبات موجب افزایش راندمان تخلیه رسوب شد. به‌طوری‌که حداکثر راندمان تخلیه (۰/۶۷) در هد مؤثر ۰/۷۵ متر و نسبت بی‌بعد فاصله جت هیدرولیکی ۰/۶۶- (۰/۰۲ متر زیر سطح رسوب) مشاهده شد. در واقع با افزایش فاصله جت هیدرولیکی از سطح رسوبات به‌دلیل افزایش مقاومت مولکول‌های آب، تنش برشی ناشی از برخورد جریان خروجی از نازل‌ها با سطح رسوبات کاهش می‌یابد. در نتیجه نسبت حجم رسوبات خارجی نسبت به حجم آب (راندمان) کاهش می‌یابد. در حالتی‌که جت هیدرولیکی زیر سطح رسوبات قرار گیرد، مقاومت مولکول‌های آب کم شده و راندمان افزایش می‌یابد. در این حالت تعداد گردابه‌های تشکیل‌شده بیشتر می‌شود. این جریان‌های گردابی رسوب را از کف مخروط رسوب‌شویی به داخل خود کشانده و توسط دهانه ورودی لوله مکش خارج می‌کنند. بنابراین برای داشتن حداکثر راندمان تخلیه رسوب لازم است تا جایی‌که شرایط بهره‌برداری از سیستم اجازه می‌دهد، فاصله جت هیدرولیکی را نسبت به سطح رسوبات کاهش داد. در شکل (۵) نمودارهای راندمان تخلیه رسوبات نسبت به زمان تحت تأثیر فواصل متفاوت جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوبات در سه هد مؤثر ۰/۶۵، ۰/۷ و ۰/۷۵ متر و در چیدمان‌های مربعی جت هیدرولیکی نشان داده شده است. بررسی نمودارهای ارایه شده نشان داد که بیشترین راندمان تخلیه رسوب در ده ثانیه

DOI: 10.22055/JISE.2019.29167.1839

اول اتفاق افتاد که به دلیل تماس مستقیم دهانه لوله مکش با رسوبات می‌باشد. با ادامه مکش به علت زیاد شدن فاصله نازل‌ها از سطح رسوبات، توانایی جریان جت‌ها برای معلق کردن رسوبات کاهش یافت و تقریباً به صفر رسید و راندمان تخلیه رسوب به شدت کاسته شد.

هم‌چنین در شکل (۶) نمودار تأثیر فاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوبات در سه حالت ۰/۰۲ متر بالاتر از سطح رسوبات، مماس بر سطح رسوبات و۰/۰۲ متر زیر سطح رسوبات در سه هد مؤثر ۰/۶۵، ۰/۷ و ۰/۷۵ متر با چیدمان مختلف جت هیدرولیکی بر حجم حفره آب‌شستگی در روش جت چهارگانه مکش آبی و تک جت ارایه شده است. بررسی نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد به ازای هد مؤثر (h) و چیدمان جت هیدرولیکی ثابت با کاهش فاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوبات ($Hj$) حجم حفره آب‌شستگی افزایش یافت. به طور کلی حداکثر حجم حفره آب‌شستگی با تغییر مکان جت از بالای رسوب به حالت مماس بر رسوب و زیر رسوب به‌ترتیب ۱/۷۸ و ۱/۲۸ برابر شده است. شکل(۷) نیز پروفیل حفره آب‌شستگی در فاصله دو سانتی‌متر بالای رسوب، مماس برسطح رسوب و دو سانتی‌متر زیر سطح رسوب را نشان می‌دهد.

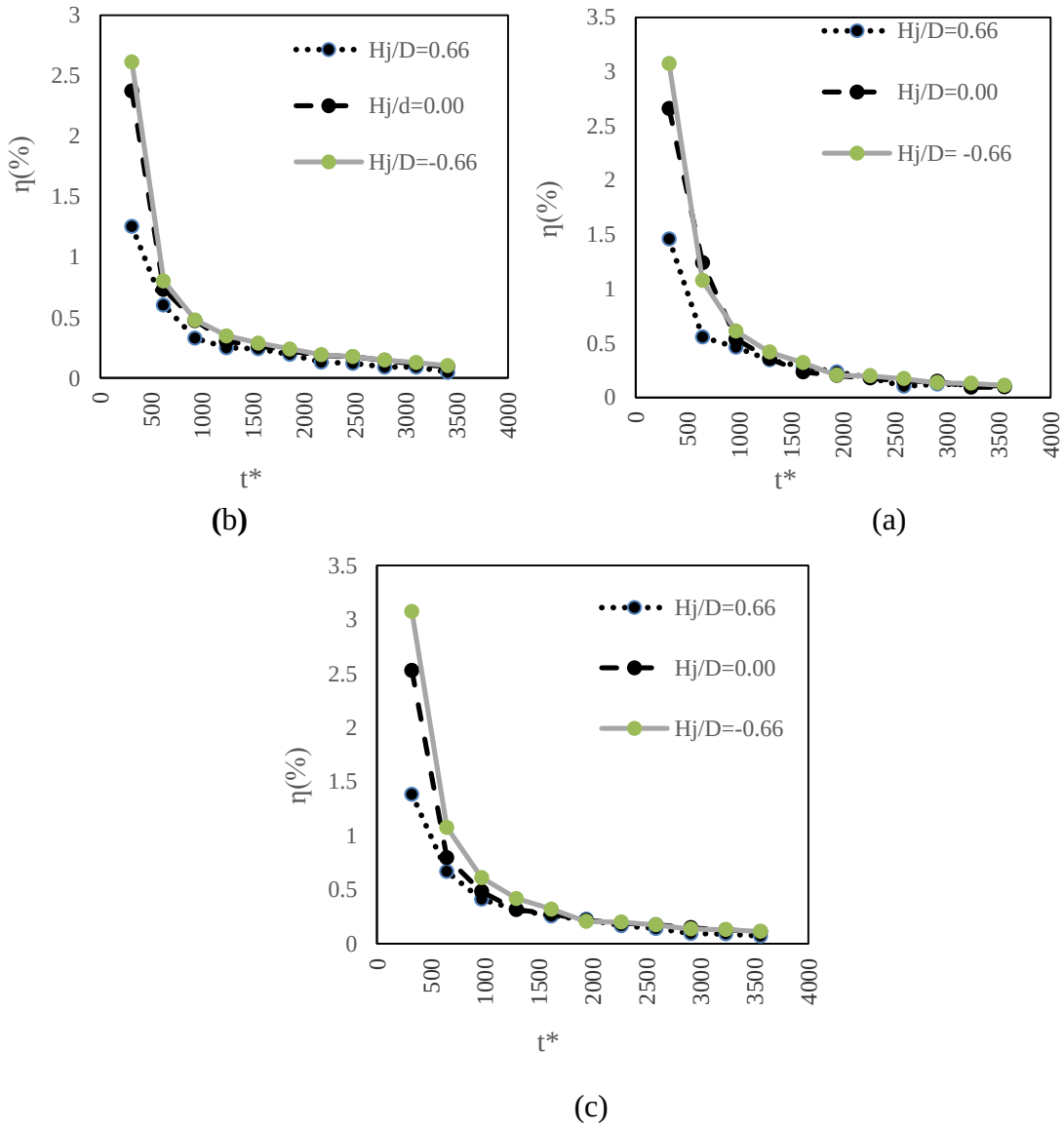



**Fig. 5- Effect of hydraulic jet arrangement on the efficiency of sediment discharge relative to time in effective head a) 0.65m b) 0.7m c) 0.75m**

**شکل۵- تأثیرچیدمان جت هیدرولیکی بر راندمان تخلیه رسوب نسبت به زمان در هد مؤثرالف) ۰/٦۵ متر ب) ۰/۷ متر ج) ۰/۷۵ متر**

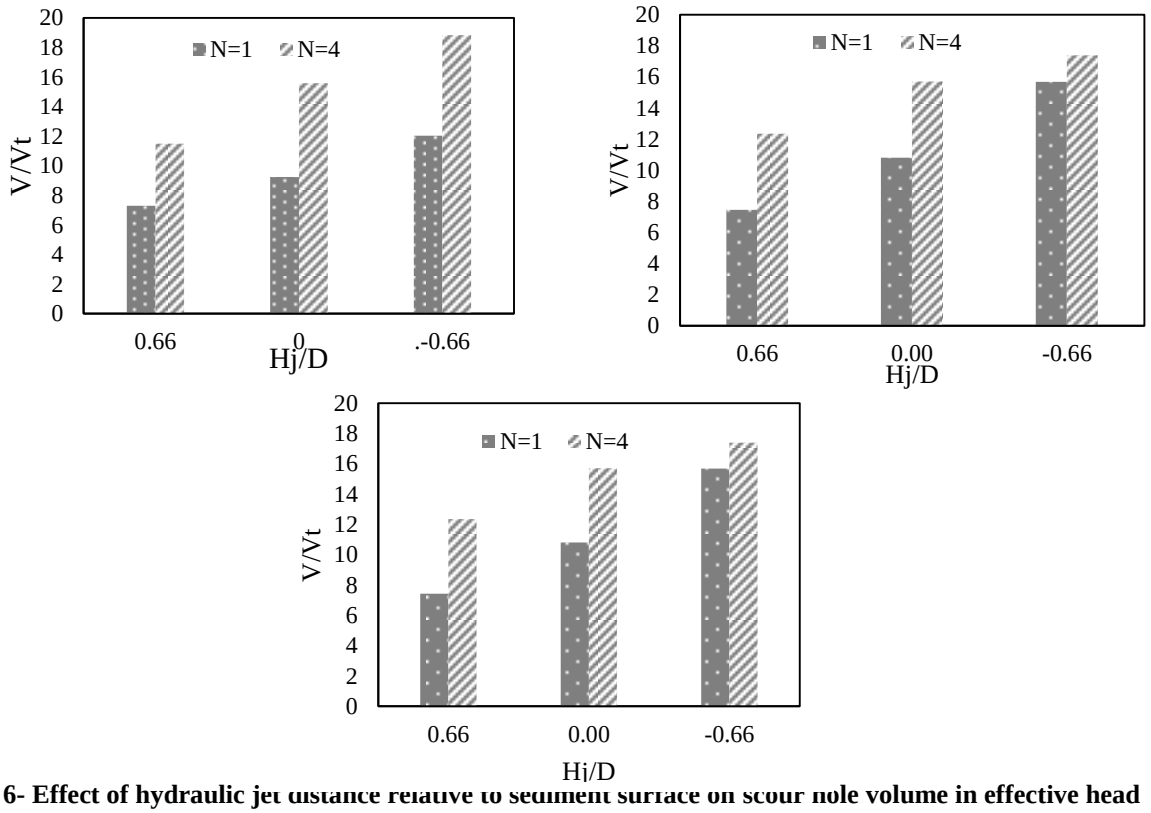



**Fig. 6- Effect of hydraulic jet distance relative to sediment surface on scour hole volume in effective head a) 0.65m b) 0.7m c) 0.75m**

**شکل٦- تأثیرفاصله جت هیدرولیکی نسبت به سطح رسوب بر حجم حفره آب‌شستگی در هد مؤثر الف)٠/٦٥متر ب) ٠/٧ متر ج)٠/٧٥ متر**

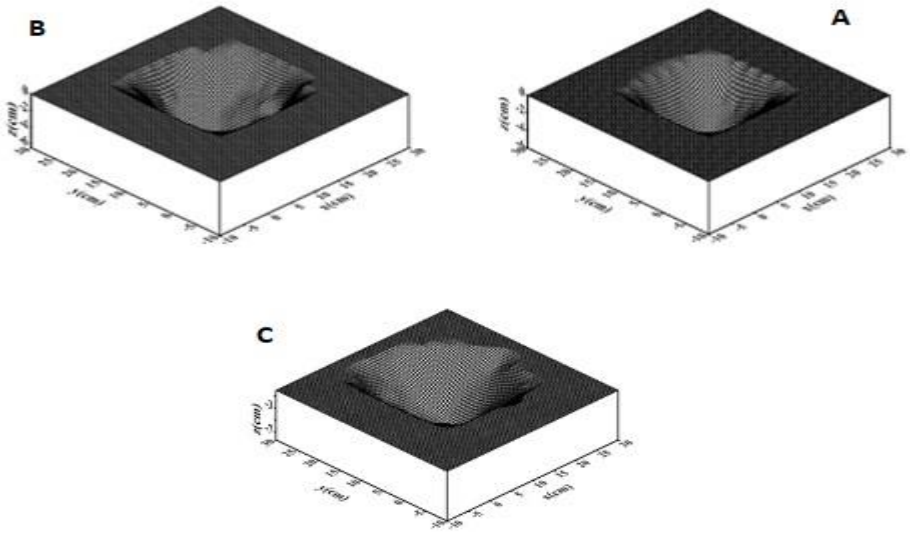



**Fig. 7- Scour hole profile a) 2 cm above sediment b) tangent on sediment c) 2 cm below sediment**

**شکل٧- پروفیل حفره آب‌شستگی الف) در فاصله ٢ سانتی‌متر بالای رسوب، ب) مماس بر سطح رسوب ج) ٢ سانتی‌متر زیرسطح رسوب**

*DOI:* 10.22055/JISE.2019.29167.1839

## نتیجه‌گیری

روش هیدروساکشن، به‌دلیل هزینه کم و سازگاری با محیط‌زیست، به‌عنوان یک روش کارا برای رسوب‌زدایی مخازن مورد توجه قرار گرفته است. اما ارایه یک راه‌کار مناسب برای افزایش شعاع تأثیر گامی مؤثر برای تخلیه موضعی رسوبات خصوصاً رسوبات جلوی آبگیرها در روش مکش آبی می‌باشد و در نهایت می‌تواند باعث بهبود راندمان تخلیه رسوبات در این روش گردد. در این تحقیق از چهار جت با چیدمان مربعی به‌منظور افزایش راندمان روش مکش آبی استفاده شده است و نتایج آن با راندمان تخلیه رسوب در نمونه شاهد (بدون جت) و نمونه تک جت مقایسه شده است. هم‌چنین تأثیر فاصله جت‌های هیدرولیکی نسبت به سطح رسوبات نیز مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست آمده نشان داد در آزمایش شاهد، با افزایش ۱۵/۳۶ درصدی هد مؤثر، راندمان تخلیه رسوب ۴۴/۴۴ درصد و حجم حفره آب‌شستگی ۴۳/۶۱ درصد و عدد فرود چگال ۳/۷۹ درصد افزایش یافت. هم‌چنین نتایج نشان داد که در هد مؤثر و فاصله جت هیدرولیکی ثابت در چیدمان مربعی جت‌ها به‌ترتیب راندمان تخلیه رسوب و حجم حفره آب‌شستگی نسبت به نمونه شاهد ۱۷/۱۸ و ۱۴/۵۳ برابر و نسبت به نمونه تک جت ۱/۵۲و ۱/۵۱ برابر شده است. به‌طورکلی بهترین راندمان برای تخلیه رسوب در چیدمان چهارگانه جت‌ها (آرایش مربعی) و نسبت بی‌بعد هد مؤثر ۲۵ (۷۵ سانتی‌متر) و نسبت بی‌بعد فاصله جت هیدرولیکی (دو سانتی‌متر زیر سطح رسوب) مشاهده شد. لازم به یادآوری است از آن‌جا که ماهیت عمده رسوبات نهشته‌شده در مخازن سد از نوع رسوبات چسبنده می‌باشد، لذا تعمیم نتایج حاصل از این تحقیق به آن دسته از رسوبات، به‌صورت کامل امکان‌پذیر نبوده و برای درک مناسب‌تر کاربرد جت در تخلیه رسوبات چسبنده، انجام تحقیقات آتی غیرقابل اجتناب به نظر می‌رسد. با این وجود، یافته‌های حاصل از این تحقیق در به‌کارگیری موفقیت‌آمیز جت در افزایش راندمان لایروبی، لزوم امکان‌سنجی به‌کارگیری این شیوه را برای صرف هزینه و آماده‌سازی تمهیدات برای انجام مطالعه‌های فیزیکی تخلیه رسوبات چسبنده در سیستم‌های دوگانه جت–مکش آبی مهیا می‌سازد. در همین راستا، با مطالعه دست‌آوردهای تحقیقات پیشین و نتایج به‌دست آمده از تحقیق پیش‌رو، موارد زیر در رابطه با نحوه عملکرد سیستم‌های سیفون–لایروبی در تخلیه رسوبات چسبنده، تلویحاً قابل بیان است.

با عنایت به نتایج تحقیقات Forutan Eghlidi (2017) در ارتباط با مقایسه عملکرد سیستم مکش آبی در لایروبی رسوبات غیرچسبنده و چسبنده، مشخص شد که این سیستم در تخلیه رسوبات در هر دو حالت موفق عمل کرده است. با این حال روند شکل‌گیری حفره لایروبی در حالت رسوبات غیرچسبنده متمایز از حالت چسبنده می‌باشد، به‌طوری‌که شکل حفره متقارن نبوده و روند زمانی غلظت تخلیه رسوبات منظم نیست.

با توجه به این‌که تخلیه رسوبات چسبنده به صورت اجزای دانه‌های رسوب انجام نمی‌شود و معمولا به‌صورت جدا شدن بخشی لخته مانند از بدنه رسوبات صورت می‌گیرد، امکان گرفتگی و مسدود شدن لوله در صورت عدم گزینش مناسب قطر لوله مکش وجود دارد. اهمیت این مسئله در هنگام استفاده از جت در جداسازی رسوبات دوچندان می‌گردد.

نتایج حاصل از این تحقیق مبین آنست که نزدیک‌تر نمودن جت هیدرولیکی به سطح رسوبات موجب بهبود عملکرد سیستم جت مکش آبی می‌شود. روا بودن این مهم در رابطه با رسوبات چسبنده جهت حصول به یک فاصله آستانه بهینه نیازمند بررسی‌های بیشتر در آینده می‌باشد.

## تشکر و قدردانی

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از همکاری ارزشمند خانم مهندس هانیه مقبلی مهنی تشکر می‌گردد.

## References

1- Asiaban, P., Kouchakzadeh, S. and Asiaban, S., 2017. Enhanced hydrosuction performance for cohesive sediment removal in low-head reservoirs. *Ain Shams Engineering Journal, 8(4*), pp. 491-497.

2- Atkinson, E., 1996. The feasibility of flushing sediment from the reservoirs. *Report OD137, HR Wallingford.*

3- Cheraghali, M., 2015. Laboratory study the effect of water reservoir level and optimum suction tube drainage level on sediment discharge efficiency in siphon hydrosuction method, M.Sc Thesis, *Shahrood University of Technology*, Iran. 150p. (In Persian).

4- Chin, C.H.E.N., Shun-Chang, W.A.N.G. and Chun-Hung, W.U., 2010. Sediment removal efficiency of siphon dredging with wedge-type suction head and float tank. *International Journal of Sediment Research, 25(2*), pp. 149-160.

5- Forutan Eghlidi, M., 2017. Laboratory study the performance of hydrosuction method for sticky and non-sticky sediment, M.Sc Thesis, *Shahid Bahonar University of Kerman*, Iran. 170 P. (In Persian).

6- Hotchkiss, R.H. and Huang, X., 1995. Hydrosuction sediment-removal systems (HSRS): principles and field test. *Journal of Hydraulic Engineering*, *121(6)*, pp. 479-489.

7- Ke, W.T., Chen, Y.W., Hsu, H.C., Toigo, K., Weng, W.C. and Capart, H., 2016. Influence of sediment consolidation on hydrosuction performance. *Journal of Hydraulic Engineering, 142(10*), pp.1-13.

8- Maghsoodlo Nejad, A., Ahmadi, A., Sanei, M. and Emamgholi Zadeh, S., 2015. Effect of speed in suction tube on the efficiency of hydrosuction method. *In National Conference on Architectural and Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. (In Persian).*

9- Miyakawa, M., Hakoishi, N. and Sakurai, T., 2014. Development of the sediment removal suction pipe by laboratory and field experiments. *In International Symposium on Dams In A Global Enviromental Challenges, Canada*.

10- Moghbeli, A., 2015. Laboratory and numerical study of evacuation of removal sediment in dam reservoir, M.Sc Thesis, *Shahid Bahonar University of Kerman*, Iran. 180p. (In Persian).

11- Moghbeli Mehni, H., 2017. Laboratory study of removal sediment from dam reservoir with jet-hydrosuction method, M.Sc Thesis, *Shahid Bahonar University of Kerman*, Iran. 173p. (In Persian).

12- Pishgar, R., 2015. Experimental investigation of the suction pipe geometrical and mechanical characteristics effect on the sediment removing efficiency of hydrosuction method. *Modares Civil Engineering Journal, 16(2)*, pp.67-80. (In Persian).

13- Sakurai, T. and Hakoishi, N., 2012. Hydraulic characteristics of the burrowing type sediment removal suction pipe. *In International Symposium on Dams For a Changing World-Need for Knowledge Transfer across the Generations and the World, Japan*.

14- Shrestha, H.S., 2012. Application of hydrosuction sediment removal system (HSRS) on peaking ponds. *Journal of Water, Energy and Environment*, *11*, pp. 43-48.

15- Valizadegan, A., Shafaei Bajestan, M. and Mohammad Vali Samani, H., 2011. Minimization of sedimentation in dams reservoirs with optimal operation of lower drainage systems. *Journal of Water and Soil Science, 15(55)*, pp.57-66. (In Persian).

16- Yan, T., Chen, L., Xu, M. and Zhou, M. A., 2012. Siphon pipeline resistance characteristic research, *In International Conference on Modern Hydraulic Engineering, China.*