

مطالعه آزمایشگاهی عمق انسداد مجرای سیفون لایروبی در شرایط هیدرولیکی متفاوت

امین مهدوی میمند، محمد ذونعمت کرمانی و کورش قادری

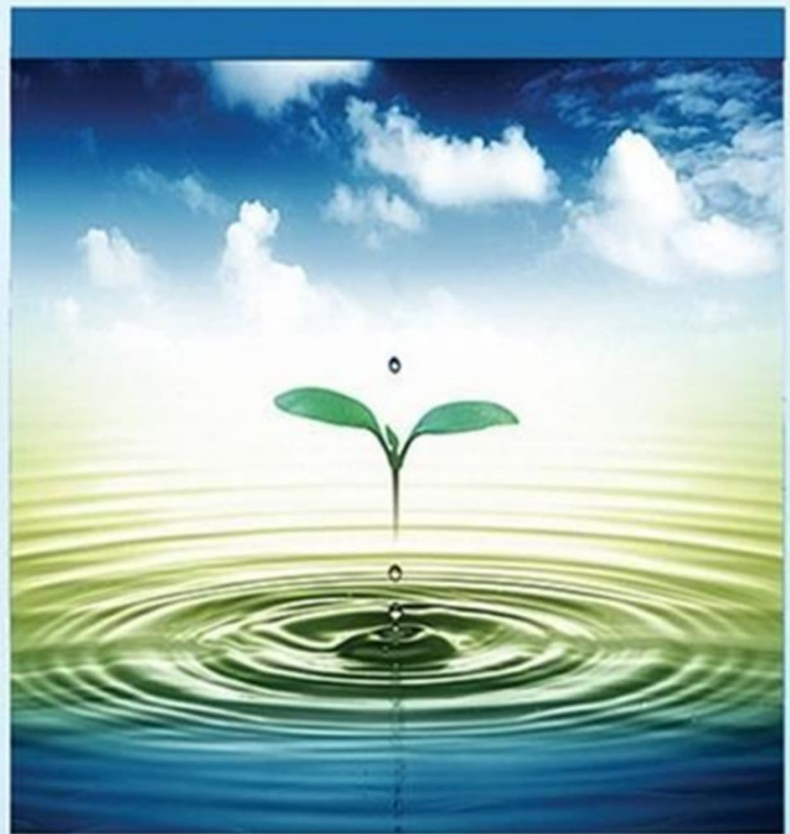
دوره ۶، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹، صفحات ۲۴۴-۲۳۴

Vol. 6(3), Autumn 2020, 234 – 244

DOI: 10.22034/jewe.2020.240501.1390

Experimental Study of Hydro-Suction Dredging  
Blockage Depth Under Different Hydraulic  
Conditions

Mahdavi-Meymand A., Zounemat-Kermani M.  
and Qaderi K.



[www.jewe.ir](http://www.jewe.ir)

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

مهدوی میمند ا.، ذونعمت کرمانی م. و قادری ک. (۱۳۹۹). مطالعه آزمایشگاهی عمق انسداد مجرای سیفون لایروبی در شرایط هیدرولیکی متفاوت. محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۶، شماره ۳، صفحات: ۲۴۴-۲۳۴.

**Citing this paper:** Mahdavi-Meymand A., Zounemat-Kermani M. and Qaderi K. (2020). Experimental study of hydro-suction dredging blockage depth under different hydraulic conditions. Environ. Water Eng., 6(3), 234–244. DOI: 10.22034/jewe.2020.240501.1390.

## مطالعه آزمایشگاهی عمق انسداد مجرای سیفون لایروبی در شرایط هیدرولیکی متفاوت

امین مهدوی میمند<sup>۱</sup>، محمد ذونعمت کرمانی<sup>۲\*</sup> و کورش قادری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

\*نویسنده مسئول: [zounemat@uk.ac.ir](mailto:zounemat@uk.ac.ir)

### مقاله اصلی

تاریخ دریافت: [۱۳۹۹/۰۴/۳۱]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۹/۰۵/۲۶]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۹/۰۵/۲۷]

### چکیده

سیفون لایروبی یا هیدروساکشن یک روش مناسب و اقتصادی برای تخلیه رسوبات نهشته شده در مخازن سدها است. در این پژوهش با ساخت مدل فیزیکی یک سیستم سیفون لایروبی و با طراحی و انجام مجموعه آزمایش‌هایی روی آن به بررسی عمق انسداد لوله سیفون پرداخته شد. تعداد ۸۰ آزمایش با سه قطر لوله ( $d$ )، سه هد آب ( $H$ ) و فرورفتگی‌های متفاوت دهانه لوله (از سطح رسوبات تا عمق انسداد با گام ۵ mm) انجام گرفت. نتایج نشان داد که هرچه میزان فرورفتگی دهانه لوله در رسوبات بیشتر شود، راندمان سیستم افزایش خواهد یافت. در اطراف دهانه مکش در بعضی از آزمایش‌ها گردابه‌هایی مشاهده گردید. تحلیل نتایج نشان داد تشکیل این گردابه‌ها اثر مثبتی بر عملکرد سیستم دارد. همچنین نتایج انسداد لوله حاکی از آن بود که مجرای سیفون لایروبی با قطر لوله بزرگ‌تر و هد جریان بیشتر، عمق انسداد ( $Z_b$ ) بیشتر تری دارد. بررسی عدد فرود ( $F_r$ ) نیز نشان داد به‌طور کلی افزایش آن موجب افزایش عملکرد سیستم سیفون لایروبی و افزایش عمق انسداد می‌شود. همچنین بر اساس نتایج، در قطر لوله ثابت، به‌طور میانگین با افزایش ۶۶/۶۶ و ۱۳۳/۳۳ درصدی  $H/d$ ، نسبت  $Z_b/d$  به‌ترتیب ۵۸/۸۹ و ۱۱۲/۲۲٪ افزایش یافت.

**واژه‌های کلیدی:** رسوب‌گذاری؛ مخزن سد؛ مدل فیزیکی؛ هیدروساکشن.

## ۱- مقدمه

پروژه عملی مورد بررسی قرار دادند و از شکل‌های مختلف دهانه ورودی برای سیفون استفاده کردند. نتایج نشان داد سیستم سیفون لایروبی توانایی استخراج رسوبات را دارد. Ullah et al. (2005) مجموعه آزمایش‌هایی روی سیفون لایروبی با قطرهای مختلف انجام و اثر فاصله دهانه لوله از بستر رسوبی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد با افزایش میزان فرورفتگی دهانه مکش در بستر رسوبی میزان ذرات برداشت‌شده بیش‌تر شده و حفره آب شستگی بزرگ‌تری تشکیل خواهد شد. همچنین در مشاهدات خود تشکیل گردابه‌هایی در اطراف دهانه لوله مکش در بعضی از مدل‌های آزمایش‌شده را گزارش نمودند. Chen et al. (2010) از دهانه‌های ساده، گوه‌ای و گوه‌ای با حفره‌های کناری برای سیفون لایروبی استفاده کردند. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد حداکثر مکش سیستم هنگامی ایجاد می‌شود که فاصله دهانه ورودی تا بستر رسوبی به اندازه ۲۵٪ قطر دهانه ورودی باشد. همچنین نتایج نشان داد دهانه گوه‌ای با زاویه ۲۰° و دارای ۳ سوراخ جانبی بهترین بازده را در میان مدل‌های آزمایش‌شده دارد. Shrestha (2012) عملکرد جت آب در اطراف دهانه مکش سیستم سیفون لایروبی را مورد مطالعه قرار داد. مدل معرفی‌شده خود را در شرایط صحرائی آزمایش نمود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد سیستم جت استفاده‌شده عملکرد سیفون را کاهش می‌دهد اما در برطرف نمودن مشکل انسداد لوله مؤثر است.

Maghsoudlou-Nezhad et al. (2015) تغییرات سرعت روی راندمان تخلیه ذرات رسوبی در روش لوله مدفون‌شده را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد افزایش سرعت لوله بازده سیستم را افزایش می‌دهد. همچنین در سرعت ثابت جریان، افزایش اندازه متوسط ذرات رسوبی باعث کاهش راندمان سیستم تخلیه رسوب می‌گردد.

Pishgar et al. (2015) عملکرد آرایش و فاصله روزنه‌های لوله مکش دفن‌شده در بستر رسوبی را در تخلیه رسوبات مورد آزمایش قرار دادند. در این روش رسوبات از طریق روزنه‌های تعبیه‌شده روی لوله به داخل مجرا مکیده شده و در نهایت به خارج از مخزن منتقل می‌شوند. نتایج نشان داد آرایش و فاصله روزنه‌ها تأثیر زیادی بر تخلیه رسوبات

فرسایش خاک و انتقال آن به وسیله رودخانه‌ها از فرآیندهای پیچیده و مهم هیدرودینامیکی است که موجب نهشته شدن ذرات حمل‌شده در آبراهه‌ها، مخازن سدها و بندرها می‌شود. به‌طور متوسط سالانه در حدود ۰/۳٪ از حجم کل سدهای جهان در اثر رسوب‌گذاری از بین می‌رود که این رقم در آسیا به حدود ۱٪ می‌رسد (Olesen and Basson, 2004). از دست رفتن این مقدار حجم از مخزن باعث کاهش عمر مفید سد و در نتیجه کاهش مزایای سد از قبیل کنترل سیلاب، تولید انرژی، تأمین آب کشاورزی و شرب خواهد شد. از آنجاکه احداث سد جدید هزینه زیادی را در پی خواهد داشت روش‌های تخلیه رسوبات مورد توجه طراحان قرار گرفته است. روش‌های تخلیه شامل فلاشینگ آزاد و تحت فشار، عبور جریان غلیظ، تخلیه مکانیکی و سیفون لایروبی می‌باشند. سیفون لایروبی یک روش تخلیه رسوب است که می‌تواند بدون خالی کردن مخزن و با استفاده از هد آب موجود و بدون نیاز به انرژی اضافی رسوبات انباشته‌شده در نقاط مختلف مخازن سدها را به پایین دست منتقل کند (Ke et al. 2016). در ادامه به پژوهش‌هایی که در زمینه سیفون لایروبی توسط پژوهش‌گران انجام‌شده است اشاره خواهد شد.

از کاربردهای عملی سیستم سیفون لایروبی می‌توان به استفاده از آن در سد مخزنی دجی-دیووا در الجزایر اشاره نمود. سیفون استفاده‌شده در این سد دارای قطر ۶۱ cm و طول ۱/۶ km بود. سیستم به مدت ۲ y در سد مذکور فعالیت داشت و تنها در دو سال اول در حدود ۱/۴ Mm<sup>3</sup> گل‌ولای از مخزن استخراج گردید (Brown, 1943).

Slota (1968) شعاع حفره آب شستگی ایجادشده به وسیله سیفون عمودی برای رسوبات غیرچسبنده را تعیین نمود. Reh binder (1994) مجموعه آزمایش‌هایی روی سیستم سیفون لایروبی انجام و راه‌حلی تئوری برای آن توسعه داد. برای توسعه این راه‌حل تئوری فرض شد جریانی که وارد دهانه سیفون می‌شود به صورت سینک است و باعث ایجاد توزیع فشاری در بالای بستر رسوبی می‌شود. این توزیع فشار باعث ایجاد جریانی در بستر رسوبی می‌گردد. این جریان نفوذی ایجادشده در بستر رسوبی نقش مهمی در برداشت ذرات دارد. Hotchkiss and Huang (1995) سیستم سیفون لایروبی را در یک

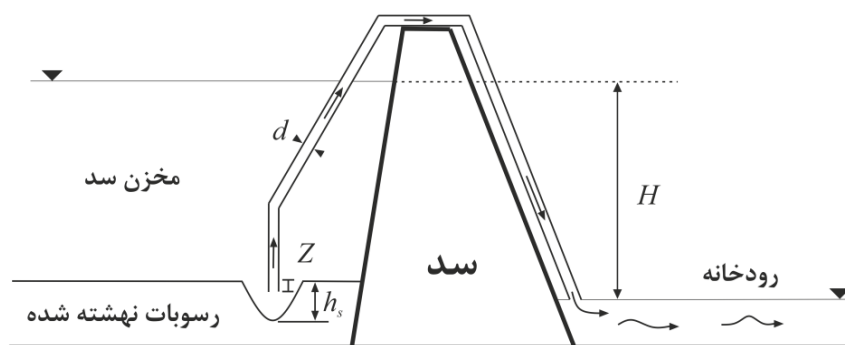
با توجه به مرور پژوهش‌های انجام‌گرفته، افزایش بازده سیستم سیفون لایروبی همگام با افزایش میزان فرورفتگی دهانه در بستر رسوبی محرز گشته است (Eghlidi et al. 2019; Ullah et al. 2005). با این وجود فرورفتگی بیش‌ازحد آستانه قابل انتقال سیفون موجب مسدود شدن مجرا خواهد شد. تاکنون مطالعه‌ای جامع برای بررسی عمق انسداد و عوامل تأثیرگذار بر آن صورت نگرفته است در نتیجه، هدف و نوآوری این پژوهش بررسی آزمایشگاهی حداکثر عمق انسداد لوله سیفون لایروبی می‌باشد. به این منظور مجموعه آزمایش‌هایی طراحی شد که در آن‌ها هد آب و قطر مجرا متغیر بود و میزان عمق انسداد، به ازای آن‌ها اندازه‌گیری شد. در کنار بررسی عمق انسداد، به‌واسطه تعداد زیاد آزمایش‌ها عملکرد سیفون لایروبی به‌طور جامع تحلیل شد و اثر گردابه‌های تشکیل‌شده در زیر دهانه مکش که توسط مراجع به آن‌ها اشاره‌شده است نیز مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- آنالیز ابعادی

با برقرار شدن جریان، سیفون شروع به برداشت رسوبات می‌کند و حفره‌ای در زیر دهانه مکش ایجاد می‌گردد. حداکثر عمق این حفره ( $h_s$ ) به پارامترهای سرعت متوسط جریان در داخل لوله مکش ( $V$ )، هد آب ( $H$ )، قطر مجرا ( $d$ )، اندازه متوسط ذرات رسوبی ( $D_{50}$ )، لزجت دینامیکی سیال ( $\mu$ )، چگالی ذرات ( $\rho_s$ )، چگالی آب ( $\rho_w$ )، شتاب ثقل ( $g$ )، طول مجرا ( $L$ ) و میزان فرورفتگی دهانه مکش در بستر رسوبی ( $Z$ ) بستگی دارد. در شکل (۱) طرح‌واره‌ای از نحوه عمل سیفون لایروبی و پارامترهای یادشده نشان داده شده است.

دارد. بهترین آرایش روزنه‌ها مربوط به زمانی است که روزنه‌ها روی خم لوله قرار دارند. (Ke et al. 2016) اثر تحکیم ذرات رسوبی در عملکرد سیفون لایروبی را مورد مطالعه و آزمایش قراردادند. نتایج نشان داد در درجه‌های تحکیم بالای ۹۰٪ ذرات رسوبی تحکیم یافته در مقابل برداشته شدن از خود مقاومت نشان می‌دهند و باعث کاهش عملکرد سیفون لایروبی می‌شوند. Moghbeli et al. (2018) اثر سه پارامتر هد آب، قطر لوله مکش و زاویه دهانه مکش را روی بازده سیفون لایروبی مورد آزمایش قراردادند. نتایج نشان داد با افزایش مقدار پارامترهای یادشده غلظت رسوب خروجی و در نتیجه بازده سیفون لایروبی بیش‌تر خواهد شد. Forutan-Eghlidi et al. (2019) اثر فاصله دهانه مکش سیفون از سطح رسوبات را در یک مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه قراردادند. نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش میزان فرورفتگی دهانه در بستر رسوبی میزان تخلیه ذرات بیش‌تر خواهد شد؛ اما چنانچه این فرورفتگی بیش‌تر از آستانه قابل انتقال لوله باشد، مجرا مسدود خواهد شد. (Kiani Nejad et al. 2019) عملکرد سیستم جت-مکش را مورد آزمایش قراردادند. نتایج نشان داد استفاده از جت آب در کنار دهانه مکش سیفون لایروبی تأثیر زیادی بر عملکرد آن دارد و راندمان تخلیه تا ۱۷ برابر افزایش می‌یابد. Moghanloo et al. (2020) اثر تغییر شکل دهانه لوله سیفون لایروبی بر بازده آن را بررسی نمودند. دهانه‌های استفاده‌شده شامل دهانه ساده و گوه‌ای از میان لوله و با چهار زاویه ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰° نسبت به امتداد لوله بودند. نتایج نشان داد در زاویه ۶۰° افزایش عملکرد سیفون قابل مشاهده است. همچنین نتایج نشان داد با افزایش زاویه انحراف لوله غلظت رسوب خارج‌شده افزایش خواهد یافت.



شکل ۱- طرح‌واره‌ای از نحوه عملکرد سیستم سیفون لایروبی

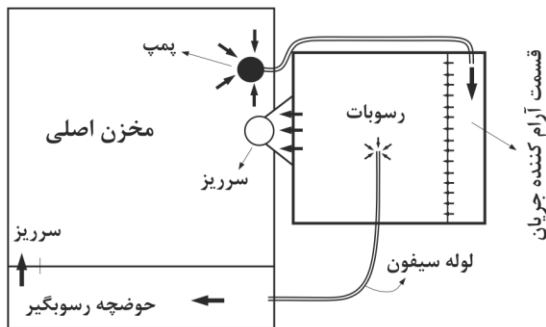
Fig. 1 A schematic view of the application of hydro-suction system

رابطه (۱) پارامتر  $\frac{\mu}{Vd\rho_w}$  عدد رینولدز و  $\frac{gd}{V^2}$  عدد فرود می‌باشد لذا این رابطه به صورت رابطه (۲) خواهد بود.

$$f_1 = \left( \frac{H}{d} + \frac{D_{50}}{d} + \frac{Z}{d} + \frac{h_s}{d} + \frac{L}{d} + \frac{\mu}{Vd\rho_w} + \frac{gd}{V^2} \right) = 0 \quad (1)$$

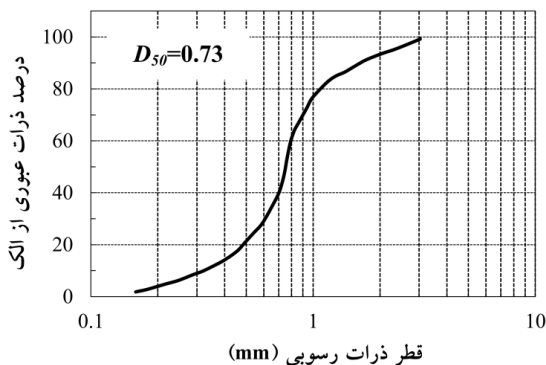
$$f_1 = \left( \frac{H}{d} + \frac{D_{50}}{d} + \frac{Z}{d} + \frac{h_s}{d} + \frac{L}{d} + R_e + \frac{\rho_s}{\rho_w} + F_r \right) = 0 \quad (2)$$

روی یک صفحه پلکسی گلاس سوراخ‌های ریز بی‌شماری ایجاد گردید و با یکپارچه نفوذپذیر پوشانده شد و در cm ۲۰ ابتدای مدل نصب گردید. افزون بر این، از یک پمپ شناور با قدرت hp ۰/۳ که داری حداکثر دبی ۹۰ l/min و ۱۵/۳ m هد می‌باشد، برای برقراری جریان در مدل استفاده گردید. در شکل (۲) طرح‌واره‌ای از مدل ساخته‌شده نشان داده شده است.



شکل ۲- طرح‌واره‌ای از مدل فیزیکی ساخته‌شده

Fig. 2 Schematic layout of experimental setup



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی ذرات استفاده‌شده

Fig. 3 The used particle size distribution curve

در این پژوهش، از ذرات سیلیس شسته شده و غیرچسبنده با اندازه متوسط  $D_{50} = 0.75$  mm، چگالی نسبی  $g/cm^3$  ۲/۶۵، ضریب یکنواختی  $(C_u)$  ۲/۵۱ و ضریب انحنای  $(C_c)$  ۱/۴۶ به‌عنوان ذرات رسوبی در مدل استفاده شد. ذرات سیلیس استفاده‌شده توسط شرکت کههد کرمان زمین

با در نظر گرفتن پارامترهای  $d$ ،  $V$  و  $\rho_w$  به‌عنوان متغیرهای تکراری پارامترهای بی‌بعد استخراج‌شده با استفاده از تئوری  $\pi$  باکینگهام به صورت رابطه (۱) خواهند بود. در

در آزمایش‌های انجام‌شده عدد رینولدز در محدوده جریان آشفته قرار دارد لذا اثر آن می‌توان صرف‌نظر کرد. نسبت  $\frac{\rho_s}{\rho_w}$  نیز در تمام آزمایش‌ها ثابت است در نتیجه اعداد بی‌بعد باقی‌مانده که از آن‌ها در تحلیل عملکرد و عمق انسداد سیفون لایروبی استفاده شد شامل رابطه (۳) می‌باشد:

$$f_2 = \left( \frac{H}{d} + \frac{D_{50}}{d} + \frac{Z}{d} + \frac{h_s}{d} + \frac{L}{d} + F_r \right) = 0 \quad (3)$$

## ۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک و سازه‌های آبی بخش مهندسی آب دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام گرفت. یک مخزن با طول ۹۰، عرض ۸۰ و ارتفاع ۷۰ cm از جنس شیشه با ضخامت mm ۱۶ ساخته شد. برای زهکشی مدل مذکور سوراخی به قطر ۶ cm در کف مخزن تعبیه و یک شیر در آن محل نصب گردید. به‌منظور تأمین آب موردنیاز سیستم، مخزن دیگری به طول ۱۵۰، عرض ۱۲۵ و ارتفاع ۵۰ از جنس آهن با ضخامت ۲ mm طراحی و ساخته شد. ۴۰ cm از طول این مخزن با یک ورق آهنی جدا و در انتهای آن یک سرریز مستطیلی با طول ۱۵ cm و ارتفاع دیواره ۵ cm ایجاد شد. از این قسمت برای جداسازی رسوبات منتقل‌شده از مخزن شیشه‌ای و انتقال آب زلال به مخزن اصلی استفاده گردید. برای ایجاد هد آب ثابت در مدل باید جریان ورودی به مخزن بیشتر از میزان خارج شدن آن به‌وسیله سیفون باشد. از این رو سرریزی با پلان دوزنقه در یکی از وجه‌های آن از جنس پلکسی گلاس شفاف با ضخامت ۲/۸ mm طراحی و نصب شد تا آب اضافی مدل از آن خارج شود. در انتهای سرریز از یک لوله PVC به قطر ۱۶۰ mm و طول ۱۳۰ cm برای انتقال آب خروجی از سرریز به مخزن اصلی استفاده شد. برای کاهش تلاطم جریان ورودی به مدل،

که هد موردنظر را ایجاد می کند نصب گردد. سپس جریان داخل لوله سیفون برقرار شد. مدت زمان انجام آزمایش ها  $h$  ۲ در نظر گرفته شد چراکه پس از این زمان غلظت جریان خروجی صفر شده و حفره ایجاد شده به حالت تعادل رسیده بود. بعد از اتمام زمان آزمایش، آب موجود داخل مدل تخلیه می گردید. شیر نصب شده در کف مخزن باعث می شد آب داخل حفره تخلیه شده و اندازه گیری حداکثر عمق حفره آبستگي ایجاد شده با دقت بیش تری صورت گیرد. برای اندازه گیری حداکثر عمق حفره ایجاد شده، یک عمق-سنج دستی با دقت  $0.2 \text{ mm}$  طراحی و ساخته شد و از آن استفاده گردید. با ثابت بودن هد آب داخل مدل و قطر لوله سیفون، میزان فرورفتگی دهانه لوله با گام  $5 \text{ mm}$  تغییر داده شد. میزان فرورفتگی دهانه که باعث قطع جریان سیفون لایروبی می شد به عنوان عمق انسداد در نظر گرفته شد.

### ۳- یافته ها و بحث

#### ۳-۱- نوع حرکت ذرات

مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در بیش تر حالت های آزمایش شده، رسوبات دو نوع حرکت به سمت دهانه مکش دارند. حرکت نوع اول از ابتدای آزمایش شروع شده و در طول آن حجم زیادی از رسوبات توسط دهانه مکیده می-شود. مدت زمان این نوع حرکت در آزمایش های مختلف متفاوت است. با وجود اینکه برای بعضی از آزمایش ها به مدت  $40 \text{ min}$  طول کشید، اما در اکثر آزمایش ها کوتاه مدت بوده (زیر  $5 \text{ min}$ ) و سریع به پایان می رسد. حرکت نوع دوم پس از اتمام حرکت نوع اول شروع شده و طی آن گردابه هایی زیر دهانه لوله تشکیل می شود و ذرات به صورت مارپیچی به داخل سیفون هدایت می گردند. این نوع حرکت تا زمان رسیدن به شرایط پایدار حفره ادامه پیدا می کند. تشکیل این گردابه ها و افزایش زمان پایداری حفره آبستگي در مواردی که گردابه ها به وجود می آیند توسط Ullah et al. (2005) نیز گزارش شده بود که با مشاهدات این پژوهش مطابقت دارد. با ظاهر شدن گردابه ها و برداشته شدن ذرات توسط آن ها، دیواره های حفره ایجاد شده به داخل حفره ریزش کرده و این ذرات نیز در ادامه توسط گردابه ها برداشته می شوند. این فرآیند موجب توسعه حفره می گردد. در شکل (۴) گردابه های ایجاد شده

تولید می گردد. در شکل (۳) منحنی دانه بندی این ذرات نشان داده شده است.

#### ۳-۲- طرح آزمایش ها

در این پژوهش تعداد ۸۰ آزمایش برای بررسی سیفون لایروبی در شرایط مختلف هیدرولیکی طراحی شد. آزمایش ها در سه هد مختلف شامل  $300 \text{ mm}$ ،  $500 \text{ mm}$  و  $700 \text{ mm}$  و سه قطر لوله سیفون شامل  $13 \text{ mm}$ ،  $16 \text{ mm}$  و  $20 \text{ mm}$  انجام شد. طول لوله سیفون در این آزمایش ها ثابت و برای هر سه قطر لوله  $250 \text{ cm}$  در نظر گرفته شد. میزان فرورفتگی دهانه لوله در بستر رسوبی، از سطح رسوبات تا عمقی که لوله مسدود می گردد و با گام  $5 \text{ mm}$  در نظر گرفته شد. در جدول (۱) محدوده پارامترهای متغیر در آزمایش ها نشان داده شده است.

جدول ۱- محدوده پارامترهای متغیر در آزمایش ها  
Table 2 the range of variable parameters in the experiments

محدوده	پارامتر	
15, 25, 35	H/d	
0-3.25	Z/d	d=20 mm
4.15, 3.51, 2.68	$F_r$	
36796, 31067, 23784	Re	
18.75, 31.25, 43.75	H/d	
0-3.44	Z/d	d=16 mm
3.35, 2.69, 2.11	$F_r$	
21231, 17045, 13416	Re	
23.08, 38.46, 53.84	H/d	
0-3.08	Z/d	d=13 mm
2.52, 2.08, 1.54	$F_r$	
11694, 9676, 7169	Re	

به منظور انجام آزمایش ها در ابتدا لایه ای به ضخامت  $20 \text{ cm}$  از رسوب موردنظر داخل مدل ساخته شده مسطح گردید. سپس با روشن شدن پمپ، آب وارد مدل شد. هنگامی که مدل از آب پر شد لوله سیفون از قبل هواگیر شده روی پایه نگه دارنده و در فاصله موردنظر دهانه از بستر رسوبی نصب گردید. سمت دیگر لوله نیز باید در ارتفاعی

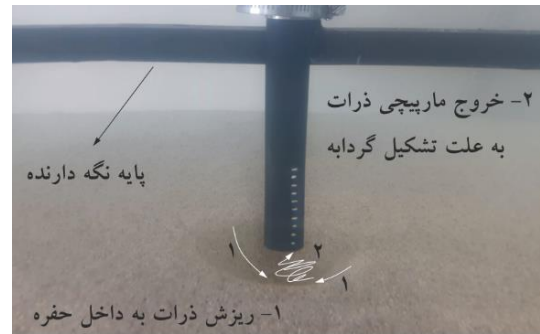
### ۳-۲- بررسی حداکثر عمق حفره آبشستگی

نتایج نشان داد که به‌طور کلی با افزایش میزان فرورفتگی دهانه لوله در بستر رسوبی، بیشینه عمق حفره سیستم لایروبی افزایش خواهد یافت. با افزایش میزان فرورفتگی لوله مکش در رسوبات، حجم مکش رسوبات در نوع اول حرکت ذرات بیشتر می‌گردد؛ به این معنی که حجم رسوبات مکیده شده به داخل مجرا در شروع آزمایش افزایش خواهد یافت. این در حالی است که چنانچه میزان رسوبات بیشتر از حد آستانه قابل انتقال مجرا باشد، لوله مسدود می‌گردد. در شکل (۵) نتایج حداکثر عمق حفره آبشستگی ایجاد شده در قالب نمودار نشان داده شده است.

شکل (۵) نشان می‌دهد در قطر ثابت، افزایش نسبت‌های  $H/d$  و  $Z/d$  و عدد فرود ( $F_r$ ) موجب افزایش نسبت  $h_s/d$  و در نتیجه افزایش حداکثر عمق حفره آبشستگی خواهد شد. در حالتی که قطر لوله متغیر باشد نیز به‌طور کلی سیفون لایروبی با عدد فرود بزرگ‌تر راندمان بالاتری دارد. شکل (۵) نشان می‌دهد قطر لوله ( $d$ ) و هد آب ( $H$ ) اثر مثبتی بر عملکرد سیستم سیفون لایروبی دارند، به‌گونه‌ای که با افزایش هر کدام از آنها حداکثر عمق حفره آبشستگی ایجاد شده بیشتر خواهد شد. در نمودارهای رسم شده در شکل (۵) با فرورفتن بیش‌تر دهانه مکش از میزان فرورفتگی آخرین نقطه مربوط به هر خط رسم شده، مجرای سیفون مسدود خواهد شد. با توجه به نمودارهای رسم شده مشخص است که در قطر ثابت، افزایش نسبت‌های  $H/d$  و  $Z/d$  و عدد فرود باعث افزایش عمق انسداد خواهد شد. در نمودارهای مربوط به  $d = 16$  mm و  $d = 13$  mm نقاطی مشاهده می‌شود که با افزایش  $F_r$  حداکثر عمق حفره ( $h_s/d$ ) کاهش پیدا کرده است. دلیل ایجاد این روند در ارتباط با نوع حرکت ذرات رسوبی است. برای همه آزمایش‌های انجام شده، هنگامی که دهانه مکش دقیقاً روی سطح رسوبی قرار گرفته بود، جریان گردابی زیر دهانه مکش ایجاد شد؛ لذا هر دو نوع حرکت ذرات که پیش از این توضیح داده شدند تشکیل شد. برای قطر سیفون  $d = 20$  mm در همه نسبت‌های  $H/d$  و  $Z/d$  و اعداد فرود، جریان گردابی تشکیل شد.

در قطر  $d = 13$  mm و  $H/d = 23/0.8$  جریان گردابی تنها در  $Z/d = 0$  تشکیل گردید که دلیل کم‌تر بودن

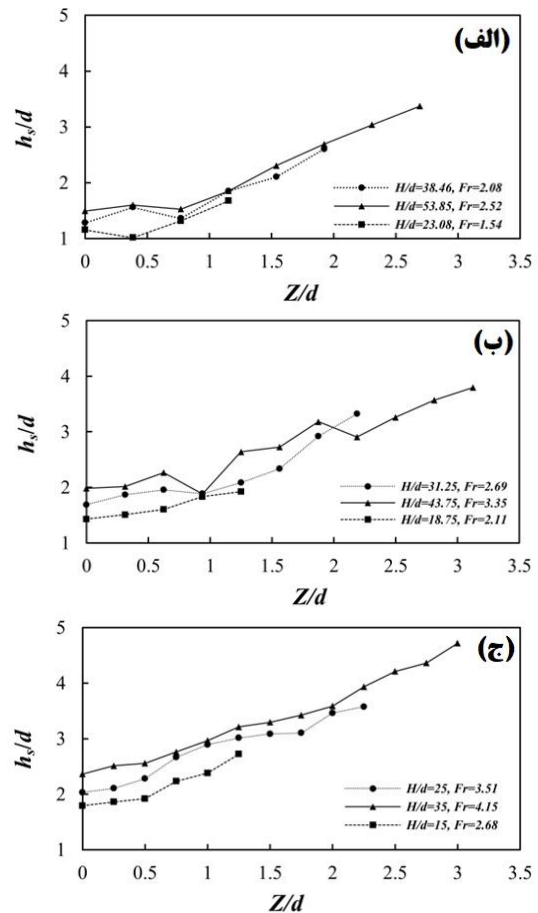
و همچنین نحوه ریزش ذرات به داخل حفره، برای قطر  $d = 20$  mm و نسبت‌های بی‌بعد  $F_r = 4/15$  و  $Z/d = 0$  نشان داده شده است.



شکل ۴- تشکیل گردابه‌ها در زیر دهانه مکش ( $F_r = 4/15$ ) و

$$(Z/d = 0)$$

Fig. 4 The formation of vortex below suction mouth ( $F_r = 4.15$  and  $Z/d = 0$ )



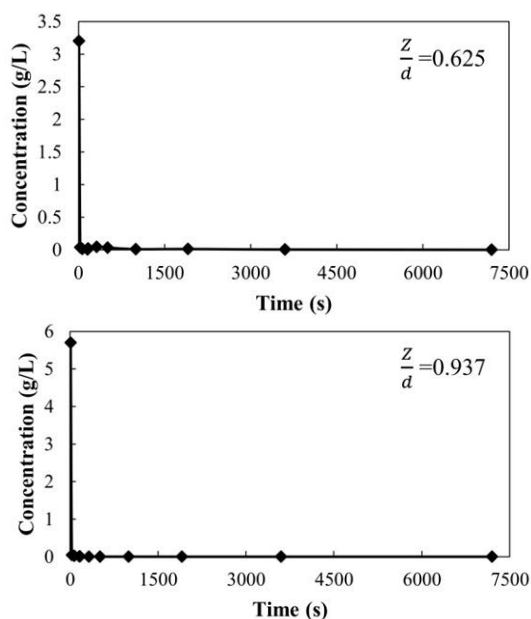
شکل ۵- حداکثر عمق حفره آبشستگی مشاهده‌ای در سیفون

لایروبی (در الف)  $d = 13$ ، (ب)  $d = 16$ ، و (ج)  $d = 20$  mm  
Fig. 5 The observed results for the maximum scour depth of the hydro-suction system at a)  $d = 13$ , b)  $d = 16$ , and c)  $d = 20$  mm

عدد فرود اشاره نشده بود، اما نتایج نشان داد که با افزایش هد آب عملکرد سامانه بیش‌تر می‌شود که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

### ۳-۳- غلظت خروجی از سامانه

روش دیگری که برای مقایسه عملکرد سیفون در شرایط مختلف هیدرولیکی وجود دارد اندازه‌گیری غلظت رسوبات خروجی از مجرا در طول آزمایش می‌باشد. در این پژوهش برای اندازه‌گیری غلظت جریان خروجی، تعداد ۱۰ نمونه به مدت ۱۰ s (مدت زمان جمع‌آوری نمونه) از ابتدا تا انتهای هر آزمایش گرفته شد. از آنجا که تغییرات غلظت جریان خروجی در ابتدای آزمایش‌ها بیش‌تر است، بیش‌تر نمونه‌ها در بازه ابتدایی آزمایش‌ها برداشته شد. برای مشخص‌شدن اثر گردابه‌ها در عملکرد سیفون لایروبی، برای مجرای با قطر  $d = 16 \text{ mm}$  و نسبت  $H/d = 43/75$  و برای دو عمق  $Z/d = 0/937$  و  $Z/d = 0/625$  فرورفتگی دهانه شامل رسوب خروجی در شکل (۶) رسم شده است.



شکل ۶- نمودار غلظت رسوبات خروجی از سیفون لایروبی در زمان‌های مختلف

Fig. 6 Graphs of temporal variations of sediments concentrations of the hydro-suction system

شکل (۶) نشان می‌دهد با افزایش نسبت  $Z/d$  از  $0/625$  به  $0/937$  غلظت رسوب خارج‌شده از سیفون در اولین نمونه‌گیری (فاصله زمانی ۰ تا ۱۰ s) افزایش چشمگیری داشته است؛ و با توجه شکل (۶) به‌نظر می‌رسد که سایر نمونه‌ها

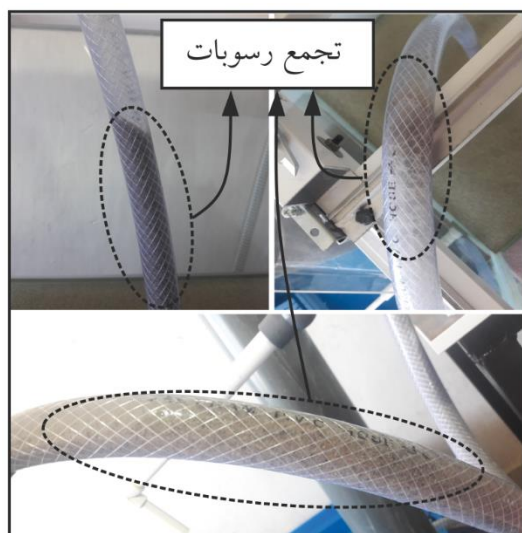
عملکرد سیفون در نقطه  $Z/d = 0/38$  ( $Z = 5 \text{ mm}$ ) می‌باشد. این مسئله نشان می‌دهد تشکیل گردابه‌ها در افزایش بهره‌وری سیستم سیفون مؤثر است. در این قطر در نسبت‌های  $H/d = 38/46$  و  $H/d = 35/5$  (به‌ترتیب هدهای ۵۰۰ و ۷۰۰ mm) در نقاط  $Z/d = 0$  و  $Z/d = 0/38$  ( $Z = 0$ ) و  $Z/d = 5$  ( $Z = 5 \text{ mm}$ ) جریان گردابی تشکیل شد و از نقطه  $Z/d = 0/78$  تا عمق انسداد،  $Z/d = 10$  ( $Z = 10 \text{ mm}$ ) تا عمق انسداد، گردابه‌ها تشکیل نشده و ذرات رسوبی تنها با نوع اول حرکت به سمت دهانه حرکت نمودند.

برای تمام حالت‌هایی که قطر لوله  $d = 16 \text{ mm}$  و  $d = 18/75$   $H/d =$  می‌باشد، گردابه‌ها ایجاد گردید. برای این قطر و در نسبت‌های  $H/d = 31/25$  و  $H/d = 43/75$  (به‌ترتیب هدهای ۵۰۰ و ۷۰۰ mm) گردابه‌ها از  $Z/d = 0$  تا  $Z/d = 0/625$  تشکیل شدند. در نقطه  $Z/d = 0/937$  ( $Z = 10 \text{ mm}$ )  $Z/d = 15$  ( $Z = 15 \text{ mm}$ ) گردابه ایجاد نشد که نتیجه آن افت عملکرد سیفون می‌باشد. نمودار  $d = 16 \text{ mm}$  و  $d = 43/75$   $H/d$  نشان می‌دهد عملکرد در  $Z/d = 1/25$  ( $Z = 20 \text{ mm}$ ) افزایش قابل‌ملاحظه‌ای داشته است که علت آن ظاهر شدن گردابه‌ها می‌باشد که تا نقطه  $Z/d = 1/875$  ( $Z = 30 \text{ mm}$ ) دیده شد. از نقطه  $Z/d = 2/19$  ( $Z = 30 \text{ mm}$ ) تا عمق انسداد دوباره گردابه‌ها ناپدید شدند. در این قطر برای نسبت  $H/d = 31/25$  ( $H = 500 \text{ mm}$ ) از نقطه  $Z/d = 1/56$  ( $Z = 25 \text{ mm}$ ) تا عمق انسداد گردابه‌ها تشکیل شدند.

Ullah et al. (2005) و Forutan-Eghlidi et al. (2019) نیز نشان دادند که با افزایش فرورفتگی دهانه مکش در بستر رسوبی، بهره‌وری سیستم سیفون لایروبی افزایش می‌یابد که با یافته‌های این پژوهش هم‌سو می‌باشد. شایان ذکر است که برخلاف پژوهش‌های پیشین، در پژوهش حاضر تحلیل گردابه‌ها و نقش آن‌ها در افزایش حداکثر عمق حفره آبشستگی نیز ارائه شده است. در آزمایش‌های Forutan-Eghlidi et al. (2019)، هد جریان و قطر لوله ثابت، در نتیجه عدد فرود ثابت بوده و اثر آن در نظر گرفته نشده است. در آزمایش‌های Moghbeli et al. (2018)، هد آب و قطر مجرا متغیر در نظر گرفته شده بود، اما میزان فرورفتگی دهانه در سطح رسوبی میزان ثابتی تنظیم شده بود. همچنین به نقش گردابه‌ها و



در بازه ابتدایی آزمایش است (حرکت نوع اول). با افزایش میزان فرورفتگی دهانه در رسوبات، حجم بیش‌تری از ذرات در شروع آزمایش به داخل مجرا مکیده می‌شود (شکل (۶)). در شکل (۸) انسداد ایجاد شده برای لوله با قطر mm به دست آمده برای عمق انسداد سیفون‌های مختلف ارائه شده است.

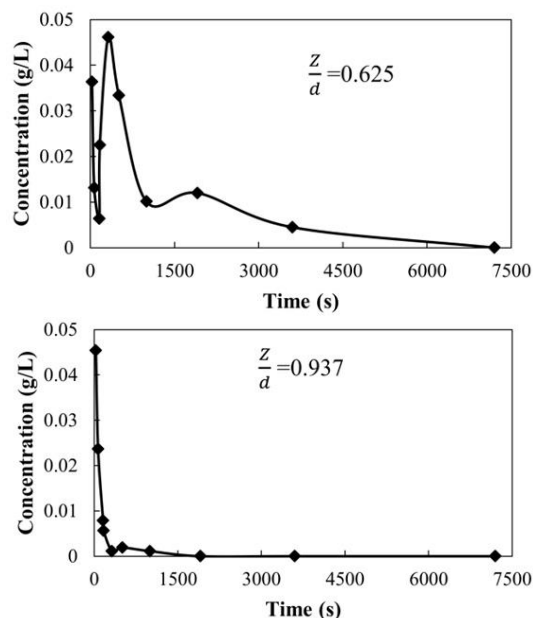


شکل ۸- انسداد لوله سیفون با قطر  $d = 200$  mm و  $H/d = 35$

Fig. 8 Hydro-suction pipeline blockage with  $d=200$  mm and  $\frac{H}{d}=35$

جدول (۲) بیانگر آن است که هد آب ( $H$ ) و قطر لوله سیفون ( $d$ ) اثر مثبتی بر افزایش عمق انسداد دارند؛ زیرا همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش هر کدام از آنها عمق انسداد افزایش پیدا خواهد کرد. تعمیم نتایج کاربردی از یافته‌های جدول (۲)، مستلزم ارائه نتایج به صورت بی‌بعد است. با توجه به اینکه اثر عدد فرود در نسبت بی‌بعد  $H/d$  وجود دارد، بنابراین عدد فرود از رابطه (۳) حذف شد. با تلفیق نمودن نسبت‌های بی‌بعد  $D_{50}/d$  و  $Z_b/d$ ، نسبت بی‌بعد  $Z_b/D_{50}$  و با تلفیق نسبت‌های بی‌بعد  $H/d$ ،  $L/d$  و  $D_{50}/d$ ، پارامتر بی‌بعد  $dH/D_{50}L$  استخراج شد. با در نظر گرفتن این دو پارامتر، نتایج عمق انسداد در قالب نمودار در شکل (۹) نشان داده شده است.

به هم نزدیک باشند. از این‌رو در نگاه اول انتظار می‌رود که حداکثر عمق حفره مربوط به  $Z/d = 0.937$  نیز بیش‌تر باشد اما نتایج اندازه‌گیری خلاف آن را نشان می‌دهد. برای بررسی علت آن در شکل (۷) نمودار غلظت با حذف اولین نمونه‌گیری رسم شده است.



شکل ۷- نمودار غلظت رسوبات خروجی از سیفون لایروبی در زمان‌های مختلف (حذف اولین نمونه‌گیری)

Fig. 7 Graphs of temporal variations of sediments concentrations of the hydro-suction system (with the exclusion of the first sample)

شکل (۷) نشان می‌دهد اکثر نقاط نمودار غلظت  $Z/d = 0.625$  بالاتر از مقادیر نمودار  $Z/d = 0.937$  قرار دارند. که بالاتر بودن عملکرد سیفون لایروبی در این عمق را توجیه می‌کند. اما نکته قابل توجه در دو نمودار رسم شده این است که برای نمودار  $Z/d = 0.937$  روند غلظت نمونه‌های برداشت شده نزولی بوده اما در نمودار  $Z/d = 0.625$  گرچه غلظت نمونه‌ها در انتهای آزمایش به صفر رسیده اما روندی نوسانی نیز دارد. علت نوسان مشاهده شده در این نمودار تشکیل گردابه‌ها می‌باشد. این نمودارها به خوبی اثر گردابه‌ها در افزایش بهره‌وری سیفون لایروبی را نشان می‌دهد.

### ۳-۴- بررسی عمق انسداد مجرا

همان‌طور که پیش از این عنوان شد در این پژوهش عمق انسداد مجرای سیفون لایروبی تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت مورد آزمایش و تحلیل قرار گرفت. علت مسدود شدن مجرای سیفون لایروبی هجوم ذرات به داخل مجرا

جدول ۲- نتایج عمق انسداد سیفون لایروبی

Table 2 Results of depth blockage of the hydro-suction system

$d$ (mm)	$V$ (m/s)	$H$ (mm)	$Q$ (l/s)	$D_{50}$ (mm)	$Z_b$ (mm)
20	1.553	500	0.488	0.73	50
20	1.840	700	0.578	0.73	65
20	1.189	300	0.374	0.73	30
16	0.838	300	0.169	0.73	25
16	1.065	500	0.214	0.73	40
16	1.065	700	0.214	0.73	55
13	0.551	300	0.0732	0.73	20
13	0.744	500	0.0988	0.73	30
13	0.899	700	0.119	0.73	40

همچنین در قیاس با پژوهش مذکور، گام افزایش میزان فرورفتگی دهانه نیز در پژوهش حاضر کوچک‌تر بود که باعث افزایش دقت در تعیین عمق انسداد شده است.

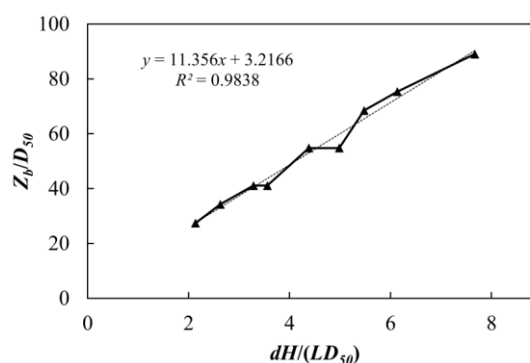
#### ۴- نتیجه‌گیری

سیفون لایروبی یک روش مناسب برای تخلیه رسوبات از مخازن سدها بدون نیاز به خالی کردن آب ذخیره‌شده می‌باشد. در این پژوهش با طراحی و انجام آزمایش‌هایی به بررسی عمق انسداد مجرای سیفون لایروبی و همچنین آنالیز عملکرد آن در شرایط مختلف هیدرولیکی پرداخته شد. نتایج کلی که از این تحقیق استخراج شده شامل موارد زیر است:

۱- مشاهدات آزمایشگاهی دو نوع حرکت ذرات رسوبی به سمت دهانه مکش را بروز داد. در نوع اول، ذرات به سمت دهانه مکیده شده و دارای حرکت چرخشی نیستند. این نوع حرکت از ابتدای آزمایش شروع شده و معمولاً کوتاه‌مدت خواهد بود. در نوع دوم، به دلیل تشکیل جریان چرخشی در زیر دهانه مکش، ذرات به صورت مارپیچی به سمت مجرا هدایت می‌شوند. این نوع حرکت پس از اتمام حرکت اول شروع شده و تا انتهای آزمایش ادامه دارد.

۲- نتایج اندازه‌گیری نشان داد در مواردی که گردابه‌ها در زیر دهانه تشکیل می‌شوند عملکرد سیستم بهتر خواهد بود و اثر مؤثر آن‌ها در افزایش کارایی سیفون لایروبی مشخص گردید.

۳- به‌طورکلی با افزایش میزان فرورفتگی دهانه لوله سیفون در بستر رسوبی و افزایش عدد فرود ( $Fr$ )، بهره‌وری سامانه افزایش می‌یابد.



شکل ۹- نتایج بی‌بعد عمق انسداد سیفون لایروبی

Fig. 9 Dimensionless results of depth blockage of the hydro-suction system

در شکل (۹) طول لوله،  $D_{50}$  اندازه متوسط ذرات رسوبی و  $Z_b$  عمق انسداد است. با استفاده از رگرسیون خطی، رابطه استخراج شده برای محاسبه عمق انسداد نیز به صورت رابطه (۴) خواهد بود:

$$Z_b = 11/356dH/L + 3/2166D_{50} \quad (4)$$

لازم به یادآوری است که صحت رابطه (۴) تنها برای مقدار  $D_{50}$  ارائه شده در پژوهش حاضر و توجه به وجود سایر متغیرها در محدوده استفاده شده (جدول ۱) می‌باشد. ضمن این که برای شرایط  $1/54 \leq Fr \leq 4/15$  معتبر است. این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش طول لوله عمق انسداد کاهش پیدا می‌کند که با توجه به افت ایجاد شده در اثر افزایش طول مجرا، توجیه پذیر است.

Forutan-Eghlidi et al. (2019) نیز نشان دادند که با افزایش فرورفتگی دهانه لوله سیفون احتمال انسداد مجرا وجود دارد. در آزمایش‌های ایشان هد آب و قطر لوله ثابت در نظر گرفته شده بود، اما در پژوهش حاضر هد آب و قطر مجرا نیز متغیر بوده و اثر آن در نتایج ملحوظ است.

### سپاسگزاری

از مدیریت و پرسنل محترم شرکت کههد کرمان زمین به واسطه در اختیار قرار دادن و همکاری در خصوص تهیه سیلیس موردنیاز این پژوهش قدردانی می‌شود.

۴- نتایج بررسی عمق انسداد نشان داد که با افزایش قطر مجرا ( $d$ ) و هد آب ( $H$ ) (افزایش عدد فرود)، عمق انسداد افزایش خواهد یافت.

### References

- Brown C. B. (1943). The control of reservoir silting. United States Department of Agriculture, Miscellaneous.
- Chen S. C., Wang S. C. and Wu C. H. (2010). Sediment removal efficiency of siphon dredging with wedge-type suction head and float tank. *Int. J. Sediment Rese.*, 25, 149–160.
- Forutan-Eghlidi M., Zounemat-Kermani M., Rahimpour M. and Moghbeli A. (2019). Experimental study on the effect of distance of suction tube mouth from sediment surface on the hydrosuction system performance. *J. Hydraul.*, 13(3), 47-58. [in Persian].
- Hotchkiss R. H. and Huang X. (1995). Hydrosuction sediment-removal systems (HSRS): principles and field test. *J. Hydraul. Eng.*, 121(6), 479-489.
- 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. *J. Hydraul. Eng.*, 142(10).
- Kiani Nejad M., Zounemat-Kermani M. and Golestani Kermani S. (2019). Experimental study the effect of hydraulic jets distance relative to sediment surface on efficiency of hydrosuction quadrate jet method. *J. Irrig. Sci. Eng.*, (In Press) [in Persian].
- Maghsoudlou-Nezhad A., Ahmadi A., Saanei M. and emamgholizadeh S. (2015). Influence of suction pipe velocity on the efficiency of hydrosuction method. National Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development. Oct. 29. Shahrood University of Technology [in Persian].
- Moghanloo R., Zounemat- Kermani M., Barani G. A. and Mahdavi- Meymand A. (2020). Experimental Study on the Effects of Suction Mouth Deformation on Sediment Discharge Efficiency of Dams Reservoirs using Hydrosuction Systems. *Irrig. Drain. Struct. Eng. Res.*, 21(78), 41-56 [In Persian].
- Moghbeli A., Khanjani M. J. and HashemiNejad S. (2018). Laboratory study of effective factors on hydrosuction efficiency. *Dam Hydroelectric Powerplant*, 5(17), 50-61 [in Persian].
- Olesen K. W. and Basson G. (2004). 1D and 2D modeling of sedimentation and flushing in shallow reservoirs. Conference proceeding of Hydraulic of Dams and River Structures, Tehran, Iran [In Persian].
- Pishgar R., Ayyoubzadeh S. A., Saneie M. and Ghodsian M. (2015). Experimental Investigation of Suction Pipe Holes Arrangement Effect on the Burrowing-type Dredging Method Performance. *J. Hydraul.*, 10(1), 1-12 [In Persian].
- Publication, No. 521, Washington, D. C. Slotta L. S. (1968). Flow visualization techniques used in dredge cutterhead evaluation. Proc., 1968 World Dredging Conf. (WODCON II), World Organization of Dredging Associations, Amsterdam, The Netherlands, 56–77.
- Rehbinder G. (1994). Sediment removal with a siphon at critical flux. *J. Hydraul. Res.*, 32(6), 845-860.
- Shrestha S. H. (2012). Application of hydrosuction sediment removal system (hsrs) on peaking ponds. *Hydro Nepal. J. Water Energy Environ.*, 11, 43-48.
- Ullah S.M., Mazurek K. A., Rajaratnam N. and Reitsma S. (2005). Siphon removal of cohesionless materials. *J. Waterway, Port Coast. Ocean Eng.*, 131(3), 115-122.

## Experimental Study of Hydro-suction Dredging Blockage Depth Under Different Hydraulic Conditions

Amin Mahdavi-Meymand<sup>1</sup>, Mohammad Zounemat-Kermani<sup>2\*</sup> and Kourosh Qaderi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD Scholar, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

<sup>2</sup>Assoc. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Beheshti University of Kerman, Kerman, Iran

\*Corresponding author: [zounemat@uk.ac.ir](mailto:zounemat@uk.ac.ir)

### Original Paper

Received: July 21, 2020

Revised: August 16, 2020

Accepted: August 17, 2020

### Abstract

Hydro-suction is an appropriate and economical method for dredging deposited sediment at reservoirs. In this study, a physical model was made and some experiments were designed to analyze the ranges of blockage depth in different hydraulic conditions. In the model, 80 tests were conducted using three diameters ( $d$ ), three water heads ( $H$ ) and different diving depths of pipe inlet ( $Z$ ) from the sediment level to the blockage depth. In general, the results indicated that the more increase in the diving depth, the higher hydro-suction efficiency. In some of the experiments, a vortex flow was observed under the pipe inlet. The results indicated that the formed vortex flow have a positive effect on the hydro-suction efficiency. The results associated to the blockage depth approved that hydro-suction systems with larger pipe diameter and more water head have a greater blockage depth ( $Z_b$ ). The Froude number ( $F_r$ ) analysis indicated that an increase in  $F_r$  would cause increment efficiency and blockage depth of hydro-suction system. Subject to a constant pipe diameter, the results revealed that increasing the  $H/d$  ratio equal to 66.66 and 133.33%, would enhance the  $Z_b/d$  ratio equal to 58.89 and 112.22%, respectively.

**Keywords:** Dam Reservoir; Hydro-Suction; Physical Model; Sedimentation.