

بررسی آزمایشگاهی تأثیر فاصله دهانه مکش از سطح رسوب بر عملکرد سیستم هیدروساکشن

مریم فروتن اقلیدی¹، محمد زوننمت کرمانی^{2*}، مجید رحیمپور³ و عاطفه مقبلی⁴

3و2- دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان
4و4- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

* zounemat@uk.ac.ir

(دریافت مقاله: 96/9/5؛ پذیرش مقاله: 97/5/17)

چکیده - یکی از روش‌هایی که در دهه‌های اخیر برای لایروبی رسوب‌های نهشته شده در پشت سدها استفاده می‌شود، سیستم هیدروساکشن برداشت رسوب است. این روش دارای محاسنی نسبت به دیگر روش‌های حذف رسوب از جمله عدم نیاز به انرژی به دلیل استفاده از اختلاف انرژی سطح آب در بالا دست و پایین دست سد و امکان انتقال رسوب‌های برداشت شده به مناطق مورد نظر می‌باشد. از جمله عوامل مؤثر در عملکرد سیستم هیدروساکشن می‌توان قطر لوله مکش (Dp)، هد آب یا اختلاف ارتفاع آب بالادست و پایین دست سد (H) و فاصله دهانه مکش از سطح رسوب (hp) را نام برد. در این تحقیق اثرات فاصله دهانه مکش از سطح رسوب با استفاده از مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. رسوب مورد استفاده در این آزمایش‌ها از نوع ماسه بدانه‌بندی شده (SP) می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عمق دهانه مکش از رسوبات، میزان تخلیه رسوب و همچنین غلظت جریان خروجی بیشتر می‌شود. بررسی‌ها حاکی از آن بود که افزایش تخلیه رسوب تا $h_p/D_p = 1/33$ ادامه دارد و پس از آن به دلیل تجمع رسوب در دهانه ورودی، لوله مسدود می‌شود.

کلیدواژگان: حفره آبستگي، هیدروساکشن، مدل فیزیکی، مخزن سده رسوب‌زایی.

1- مقدمه

رسوب‌گذاری در مخازن سدها از جمله مشکلات جدی استفاده پایدار از آن‌ها است. برای کاهش مشکلات تجمع رسوب‌ها در مخازن، روش‌های مختلفی استفاده می‌شود (Madadi, et al. 2017). مهمترین این روش‌ها عبارتند از رسوب‌شویی (فلاشینگ)¹، لایروبی مکانیکی²، جلوگیری از ورود جریان حاوی رسوب به مخزن سد با استفاده از تونل کنارگذر³ و سیستم هیدروساکشن. از

میان این روش‌ها سیستم هیدروساکشن از روش‌های اقتصادی لایروبی مخازن سدها است که امروزه در سطح گسترده استفاده می‌شود. این روش با استفاده از اختلاف تراز سطح آب داخل مخزن و تراز نقطه خروجی سیستم به عنوان نیروی برداشت و انتقال رسوب‌ها استفاده می‌کند. از مزیت‌های این روش نسبت به دیگر روش‌های لایروبی می‌توان به عدم نیاز به انرژی، سازگاری با محیط زیست به دلیل قابلیت کنترل غلظت رسوب در جریان ورودی به رودخانه پایین دست و هزینه کم اجرای سیستم اشاره کرد (Atkinson, 1998). توانایی

¹ Flushing

² Mechanical dredging

³ By-passing

تمامی آزمایش‌ها، پس از تعادل حفره لایروبی، زیر محور مرکزی لوله مکش یک تپه رسوبی کوتاه تشکیل می‌شد (Ullah, et al. 2005). چن و همکاران (2012) فشار مکش در اطراف دهانه ورودی هیدروساکشن را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد، نقاط زیر دهانه مکش دارای بیشترین فشار مکش و بیشترین لایروبی بودند. همچنین مشاهده کردند که همراه با افزایش فاصله از ورودی، فشار مکش و عمق لایروبی کاهش می‌یابد (Chen, et al. 2010). شریستا (2012) از نیروی جت آب در اطراف دهانه مکش برای افزایش کارایی هیدروساکشن استفاده کرد. او عملکرد سیستم ابداعی خویش را برای تخلیه رسوب‌های متراکم شده در شرایط صحرائی بررسی کرد. نتایج آزمایش‌های او نشان داد که با نصب جت آب راندمان تخلیه رسوب کاهش می‌یابد اما مشکل انسداد سیستم هیدروساکشن در طول انجام عملیات رسوب‌زدایی حل می‌شود (Shrestha, 2012). تاو و همکاران (2012) اتلاف انرژی در سیستم هیدروساکشن را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تأثیر خصوصیات هندسی و هیدرولیکی هیدروساکشن را بر اتلاف انرژی، سرعت سیال و غلظت رسوب در جریان خروجی مطالعه کردند. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد که همراه با کاهش غلظت رسوب در جریان، سرعت افزایش می‌یابد. این مطلب نشان می‌داد که با افزایش غلظت رسوب در جریان اتلاف انرژی نیز بیشتر می‌شود. همچنین آن‌ها دریافتند که اتلاف انرژی با قطر لوله مکش رابطه معکوس دارد (Tao, et al. 2012). بعلاوه، پژوهش‌های اخیر نشان داد که ایجاد نوسان در جریان اطراف دهانه مکش سبب افزایش غلظت رسوب خروجی و ابعاد حفره لایروبی می‌گردد (Asiaban, et al. 2014). همچنین بررسی‌ها نشان داده که بهترین زمان اجرای عملیات رسوب‌زدایی توسط هیدروساکشن بلافاصله پس از ته‌نشینی رسوب‌های موجود در جریان چگال و قبل از تراکم آن‌ها می‌باشد (Ke, et al. 2016). بررسی مطالعات انجام شده روی سیستم هیدروساکشن

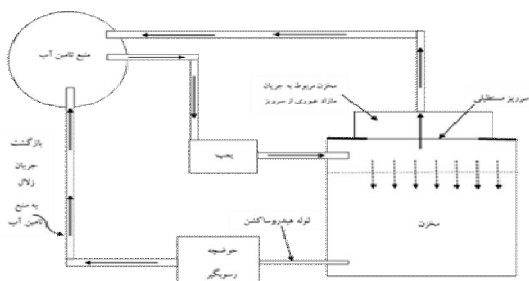
متمرکز کردن لایروبی به یک منطقه خاص از دیگر مزایای سیستم هیدروساکشن است (Asiaban, et al. 2014). مطالعات مختلفی روی سیستم هیدروساکشن انجام شده است. این مطالعات اغلب به بررسی مکانیسم رسوب برداری این سامانه پرداخته‌اند. ربیندر (1994) فرضیه اینکه جریان ورودی به هیدروساکشن به صورت سینک است، را بیان کرد. با توجه به این فرضیه، جریان آب در سطح رسوب موجب اعمال تنش برشی و برداشت رسوب می‌شود. اما نتایج آزمایش‌ها نشان داد، در شروع به کار هیدروساکشن، تنش برشی موجب حرکت ذرات رسوبی نمی‌شود؛ بلکه حرکت آن‌ها به دلیل وجود نیروی بالابرنده آب در لایه رسوبی می‌باشد (Rehbinder, 1994). هاتچکس و هوانگ (1995) تأثیر شکل دهانه مکش هیدروساکشن را بر غلظت رسوب خروجی از آن بررسی کردند. بدین منظور سه دهانه مکش مورد آزمایش قرار گرفت. دهانه مکش اول سبک وزن (9 کیلوگرم) و به شکل خاک انداز و با باز شدگی به ارتفاع 5 سانتی‌متر و عرض 60 سانتی‌متر طراحی شد. دهانه مکش دوم سنگین وزن (20 کیلوگرم) و مانند دهانه مکش اول طراحی شده بود با این تفاوت که دهانه مکش دوم نسبت به لوله مکش با زاویه 45° به طرف سطح رسوب منحرف شده بود. دهانه مکش سوم به شکل یک لوله مکش فولادی مستقیم و ساده طراحی شده بود. نتایج پژوهش‌های آن‌ها نشان داد که شکل دهانه مکش هیدروساکشن در غلظت رسوب خروجی از آن تأثیر مستقیم دارد. آن‌ها نتیجه گرفتند که با تغییر در شکل دهانه مکش می‌توان غلظت رسوب ورودی به رودخانه پایین‌دست سد را مطابق با ظرفیت انتقال آن تنظیم کرد (Hotchkiss and Huang, 1995). آلاح (2005) تأثیر فاصله دهانه مکش تا سطح رسوب را بر ابعاد حفره لایروبی مورد مطالعه قرار داد. فاصله مورد بررسی توسط وی از $6/4$ تا $101/6$ میلی‌متر متغیر بود. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد که با فرو رفتن دهانه مکش زیر سطح رسوب حفره لایروبی به شدت توسعه می‌یابد. همچنین نتایج بررسی‌های وی نشان داد که در

امواج به قسمت اصلی مخزن محل اجرای آزمایش‌ها وارد می‌گردد. شکل 1-ب، شکل شماتیک سیستم تأمین آب و گردش آب در مدل را نشان می‌دهد. علاوه بر این برای ساخت سیستم هیدروساکشن از یک لوله انعطاف‌پذیر شفاف به قطر 3 سانتی‌متر و دو پایه نگه‌دارنده به منظور تنظیم ورودی و خروجی سیستم استفاده شد. در نهایت از رسوب‌های ماسه‌ای با اندازه متوسط 0/51 میلی‌متر به عنوان ماده ته‌نشین شده در مخزن استفاده شد (شکل 2). ضریب یکنواختی (C_{U1}) و ضریب انحنای (C_c) برای ماده رسوبی مورد استفاده به ترتیب 3/32 و 1/02 محاسبه شد.

عمق رسوب در مخزن 10 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به منظور اندازه‌گیری توپوگرافی حفره لایروبی از عمق‌سنج دستی² و برای اطمینان از قائم بودن دهانه لوله و همچنین افقی بودن سطح رسوب، از ترازسنج لیزری³ استفاده شد.



(الف)



(ب)

شکل 1 الف) تصویری از مخزن ساخته شده؛ ب) شکل شماتیک سیستم تأمین آب و گردش آب در مدل

رسوب تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم دارد و به اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته است. از طرفی بررسی نحوه تأثیر پارامتر مذکور بر رسوب‌برداری این سیستم جهت شناخت، طراحی و استفاده بهینه از آن ضروری است.

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر پارامتر فاصله دهانه مکش از سطح رسوب بر عملکرد سیستم هیدروساکشن، 8 آزمایش با سه مرتبه تکرار طرح و به صورت کاملاً تصادفی انجام گردید. در نهایت در بخش نتایج و تحلیل داده‌ها، میزان تأثیر این پارامترها توسط تحلیل‌های آماری در قالب جداول و نمودارهای متفاوت مورد بررسی قرار گرفته و ارائه می‌گردد.

2- مواد و روش‌ها

2-1- مدل آزمایشگاهی

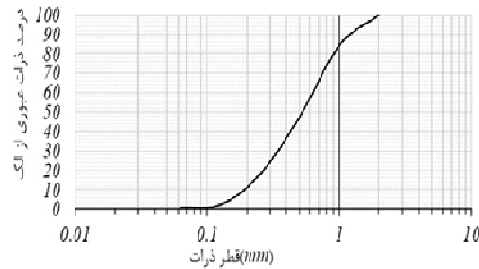
برای نیل به اهداف این تحقیق یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک و سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه باهنر کرمان طراحی و ساخته شد. مدل فیزیکی شامل یک مخزن سد به طول 100 سانتی‌متر و عرض 100 سانتی‌متر و ارتفاع 70 سانتی‌متر از جنس شیشه با اسکلت فلزی است. همچنین برای مشاهده بهتر اندرکنش جریان آب و رسوب دو وجه مخزن توسط بر چسب تیره و در بالای مدل سیستم روشنایی نصب شد. علاوه بر این در 30 سانتی‌متر ابتدای قسمت ورودی مدل، به منظور حذف تلاطم امواج ورودی به مخزن و کاهش قدرت فرسایشی آن‌ها، ناحیه آرام‌کننده جریان در نظر گرفته شد. همچنین یک سرریز¹ لبه تیز مستطیلی با هدف تنظیم سطح آب و ارتفاع آب روی سطح رسوب‌ها تعبیه شد (شکل 1-الف). جهت تأمین آب مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها از سیستم تأمین آب که شامل یک مخزن ذخیره اصلی آب با حجم ذخیره 1/58 متر مکعب و یک پمپ با تأمین بیشینه دبی 1/75 لیتر بر ثانیه می‌باشد استفاده گردید. جریان از مخزن ذخیره توسط پمپ وارد قسمت آرام‌کننده مدل شده و پس از حذف تلاطم

² Point gage

³ Stabila lazer

¹ Overflow

مخلوط آب و رسوب سیستم هیدروساکشن هر 10 ثانیه به مدت یک دقیقه درون ظروف نمونه برداری جمع آوری می‌گردید. آب و رسوب جمع آوری شده در نمونه‌های هر آزمایش توسط کاغذ صافی جدا و اندازه‌گیری شد. همچنین سرعت جریان خروجی با روش حجمی تعیین شد. در نهایت، پس از تعادل حفره لایروبی توپوگرافی آن توسط عمق سنج دستی در نقاط با فاصله یک سانتی‌متر اندازه‌گیری می‌شد.



شکل 2 منحنی دانه‌بندی رسوب استفاده شده

2-2- طرح آزمایشات

در این پژوهش 8 آزمایش با سه تکرار، برای بررسی تأثیر پارامتر فاصله دهانه مکش از سطح رسوب در عملکرد سیستم هیدروساکشن انجام شد. روش اجرای آزمایش برای تمامی آن‌ها یکسان بود. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا 10 سانتی‌متر از رسوب مورد نظر در بستر مدل قرار داده شد و متناسب با شرایط هر آزمایش فاصله ورودی لوله هیدروساکشن از سطح رسوب تنظیم می‌شد. در تمامی آزمایش‌ها هد مؤثر، اختلاف ارتفاع میان سطح آب درون مخزن و خروجی سیستم هیدروساکشن، 51 سانتی‌متر تنظیم شده بود. لازم به ذکر است که برای برقراری جریان درون سیستم هیدروساکشن لوله هیدروساکشن قبل از نصب درون مدل هواگیری می‌شد. پس از روشن نمودن پمپ انتقال جریان آب به مدل، سیکل جریان درون مدل برقرار می‌گردد. همچنین برای تنظیم ارتفاع آب درون مدل از یک سرریز مستطیلی به عرض 60 و ارتفاع 5 سانتی‌متر در دیواره جانبی ناحیه آرام کننده جریان، با هدف انتقال جریان مازاد ورودی به مدل، تعبیه شد. بنابراین ارتفاع آب درون مدل در طول تمامی آزمایش‌ها ثابت نگه داشته می‌شد و هد مورد نظر تأمین می‌گردید.

برای اجرای آزمایش خروجی سیستم هیدروساکشن باز شده و عملیات انتقال جریان آغاز می‌شد. پس از برقراری جریان درون سیستم، همراه با حرکت آب، ذرات رسوبی از بستر جدا و به درون دهانه مکش حرکت می‌کنند. در نتیجه برای بررسی تأثیر متغیر مذکور در کارایی سیستم هیدروساکشن لازم است غلظت جریان خروجی و توپوگرافی حفره لایروبی برداشت و آنالیز شود. به منظور برداشت غلظت جریان خروجی از سیستم هیدروساکشن،

2-3- آنالیز ابعادی¹

همراه با شروع به کار سیستم هیدروساکشن رسوب‌های اطراف دهانه مکش تحت تأثیر نیروی مکش هیدروساکشن قرار گرفته و حفره‌ای به شکل مخروط وارونه در قسمت تحتانی دهانه مکش ایجاد می‌شود. راندمان رسوب‌زدایی و ابعاد حفره لایروبی (حجم، طول و عرض) سیستم هیدروساکشن به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: سرعت متوسط جریان درون لوله (V)، دبی جریان (Q)، قطر لوله هیدروساکشن (D_p)، ارتفاع آب در بالای رسوب‌ها (H_w)، هد مؤثر (H)، قطر متوسط رسوب‌ها (D₅₀)، لزجت دینامیکی سیال (μ)، چگالی آب (ρ_w)، چگالی رسوب (ρ_s)، دبی رسوب (Q_s)، شتاب ثقل (g)، زمان (t)، فاصله دهانه مکش از سطح رسوب (h_p)، غلظت جریان (C)، عمق حفره لایروبی (L)، قطر حفره لایروبی (R) و حجم حفره لایروبی (Λ).

با انتخاب پارامترهای D_p، ρ_w و V بعنوان متغیرهای تکراری و با استفاده از روش باکینگهام²، 13 گره بدون بعد برای پارامترهای مشخصه (متغیرهای مستقل و مؤثر) بدست آمد (جدول 1).

در نتیجه رابطه کلی شامل 10 پارامتر بدون بعد به صورت رابطه (1) خواهد بود:

$$f\left(\frac{\rho_s}{\rho}, \frac{\mu}{\rho D_p V}, \frac{L}{D_p}, \frac{g D_p}{V^2}, \frac{TV}{D_p}, \frac{D_{50}}{D_p}, \frac{R}{D_p}, \frac{H}{D_p}, \frac{H_w}{D_p}, \frac{Q_s D_p^2}{V}, \frac{\Lambda}{D_p^3}, \frac{Q D_p^2}{V}, \frac{E}{\rho_w}\right) = 0 \quad (1)$$

¹ Dimensional analysis

² Buckingham Method

جدول 1- معرفی پارامترهای بدون بعد مد نظر در تحلیل

سیستم هیدروساکشن با بکارگیری روش باکینگهام

$\Pi_1 = \rho_s / \rho_w$	$\Pi_2 = \mu / \rho_w D_p V$	$\Pi_3 = L / D_p$
$\Pi_4 = g D_p / V^2$	$\Pi_5 = TV / D_p$	$\Pi_6 = D_{50} / D_p$
$\Pi_8 = H_w / D_p$	$\Pi_9 = H / D_p$	$\Pi_{10} = Q_s D_p^2 / V$
$\Pi_{11} = \Lambda / D_p^3$	$\Pi_{12} = Q D_p^2 / V$	$\Pi_{13} = C \rho_w$

ملاحظه می‌شود که Π_2 ، عدد بدون بعد رینولدز، و Π_4 ، عدد بدون بعد فرود را نشان می‌دهد. در نتیجه می‌توان رابطه فوق را بصورت رابطه (2) بیان نمود:

$$f\left(\frac{\rho_s}{\rho}, Re, \frac{L}{D_p}, F_r, \frac{TV}{D_p}, \frac{D_{50}}{D_p}, \frac{R}{D_p}, \frac{H}{D_p}, \frac{H_w}{D_p}, \frac{Q_s D_p^2}{V}, \frac{\Lambda}{D_p^3}, \frac{Q D_p^2}{V}, \frac{E}{\rho_w}\right) = 0 \quad (2)$$

با ترکیب D_{50}/D_p ، ρ_s/ρ_w و $Q_s D_p^2/V$ رابطه (3) حاصل می‌شود که در آن F_0 همان عدد فرود ذرات است.

$$F_0 = \frac{V}{\sqrt{g\left(\frac{\rho}{\rho_s} - 1\right)D_{50}}} \quad (3)$$

در پدیده‌های هیدرولیکی یک یا چند نوع نیرو از انواع نیروها، بی‌تأثیر بوده و یا اثر آن‌ها در به‌وجود آوردن آن پدیده هیدرولیکی خاص، بسیار ناچیز می‌باشد. به عبارت دیگر، می‌توان از تشابه‌سازی نیروهایی که تأثیر کمی در به‌وجود آوردن پدیده هیدرولیکی دارند صرف‌نظر نمود. برای مدل‌سازی فیزیکی جریان‌های با سطح آزاد عموماً تشابه دینامیکی بین مدل و نمونه اصلی بر پایه عدد فرود جریان قرار داده می‌شود که این به معنی اهمیت نیروی ثقل در رفتار جریان این سازه‌ها است. با مطالعه روی سیستم هیدروساکشن مشخص شد که ورودی و خروجی آن‌ها، به شدت متأثر از شرایط مجاری روباز می‌باشد. در سازه هیدروساکشن، نیروی غالب و کنترل‌کننده نیروی ثقل است. مدل‌سازی‌های مبنی بر تساوی عدد فرود، مدل‌های فرودی نامیده می‌شوند.

3- نتایج و تحلیل داده‌ها

در این تحقیق جهت بررسی تأثیر پارامتر فاصله دهانه مکش از سطح رسوب (h_p) بر ابعاد حفره لایروبی، حجم حفره لایروبی، غلظت جریان و راندمان سیستم

هیدروساکشن، 8 فاصله از +2 تا -5 سانتی‌متر در نظر گرفته شد که پارامتر بی‌بعد h_p/D_p در محدوده +0/66 تا -1/66 قرار می‌گیرد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که به ازای h_p/D_p برابر با +0/66، نیروی مکش سیستم هیدروساکشن موفق به برداشت رسوب نشد. بنابراین در این فاصله رسوب‌زدائی انجام نشد و تنها لایه‌ای از ذرات ریز سطحی رسوب برداشت شد. همچنین در h_p/D_p برابر با -1/66، حجم زیاد رسوب اطراف دهانه مکش موجب انسداد در ورودی شده و سیستم موفق به رسوب‌زدائی نگردید. در این مورد رسوب تا ارتفاع 71/7 سانتی‌متر درون لوله هیدروساکشن پیشروی کرد و حفره‌ای به قطر 10/7 سانتی‌متر تشکیل گردید که پس از آن لوله مسدود شد (شکل 3). بنابراین h_p برابر با 5 سانتیمتر زیر سطح رسوب، عمق انسداد نام دارد.

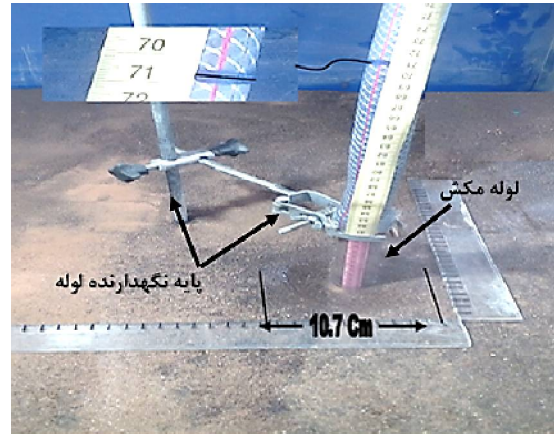
3-1- تأثیر فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب

بر ابعاد حفره لایروبی

به منظور بررسی تأثیر پارامتر فاصله دهانه مکش از سطح رسوب (h_p) بر قطر (R) و عمق (L) حفره لایروبی، h_p در دامنه +2 تا -5 قرار گرفت و نتایج حاصل در جدول 3 ارائه شده‌اند. در جدول 3 پارامترهای بی‌بعد h_p/D_p ، R/D_p و L/D_p به ترتیب فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب، قطر نسبی حفره لایروبی و عمق نسبی حفره لایروبی را نشان می‌دهند. مطابق با نتایج ارائه شده در جدول 3 همراه با کاهش مقدار فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب مقادیر پارامترهای قطر نسبی حفره لایروبی و عمق نسبی حفره لایروبی افزایش می‌یابند. حالتی که h_p/D_p برابر صفر، یعنی دهانه مکش مماس به سطح رسوب، است به عنوان آزمایش شاهد در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول 3 مشاهده می‌شود، در بالای سطح رسوب همراه با افزایش فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب، قطر نسبی حفره لایروبی و عمق نسبی حفره لایروبی به شدت کاهش می‌یابند تا جایی که نسبت‌های R/D_p و L/D_p به ازای h_p/D_p برابر +0/66، صفر می‌شوند.

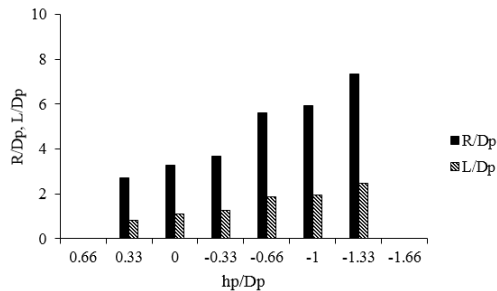


(ب)



(الف)

شکل 3 الف) انسداد لوله مکش در عمق 5- سانتی متر از سطح رسوب؛ ب) عدم مکش رسوب در فاصله 2+ سانتی متر از سطح رسوب



شکل 4 تغییرات قطر و عمق حفره لایروبی با تغییر فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب در مقایسه با آزمایش شاهد

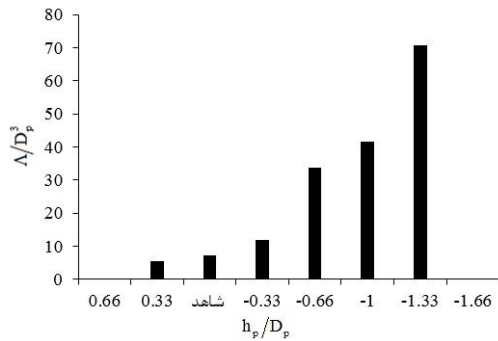
3-2- تأثیر فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب در حجم حفره لایروبی

حجم حفره لایروبی علاوه بر اینکه شاخصی برای سنجش کارایی سیستم هیدروساکشن است، جهت محاسبه راندمان رسوبزدائی نیز استفاده می‌شود. با استفاده از داده‌های توپوگرافی برداشت شده از حفره لایروبی و نرم‌افزار SURFER، توپوگرافی آن رسم و حجم حفره‌های لایروبی برای هر آزمایش محاسبه و در جدول 4 ارائه شده است. همانطور که از داده‌های داخل جدول مشخص است، با کاهش مقدار h_p/D_p ، حجم حفره لایروبی شده افزایش پیدا می‌کند. شکل 5 تأثیر فاصله بی‌بعد دهانه مکش از سطح رسوب را بر مشخصه حجم حفره لایروبی نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با تغییر فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب

از سوی دیگر همراه با افزایش نسبت h_p/D_p در زیر سطح رسوب، R/D_p و L/D_p بیشتر شده. همچنین بیشترین مقادیر R/D_p و L/D_p قبل از عمق انسداد به ازای h_p/D_p برابر $-1/33$ رخ می‌دهند. شکل 4 تأثیر فاصله بی‌بعد دهانه مکش از سطح رسوب را بر دو مشخصه قطر و عمق حفره لایروبی نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با تغییر فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب از $+0/33$ بالای سطح رسوب به $-1/33$ زیر سطح رسوب قطر و عمق ماکزیمم نسبی حفره لایروبی نسبت به آزمایش شاهد به ترتیب $1/25$ و $1/26$ برابر شده است.

جدول 3 تأثیر فاصله دهانه مکش از سطح رسوب بر ابعاد حفره لایروبی

حفره لایروبی				
درصد تغییر L/D_p	L/D_p	درصد تغییر R/D_p	R/D_p	h_p/D_p
	0	0	0	+0/66
	0/81	-17/18	2/71	+0/33
شاهد	1/10	شاهد	3/26	0
	1/25	+12/58	3/67	-0/33
	1/88	+72/1	5/61	-0/66
	1/94	+82/2	5/94	-1
	2/49	+125	7/36	-1/33
انسداد	انسداد	انسداد	انسداد	-1/66



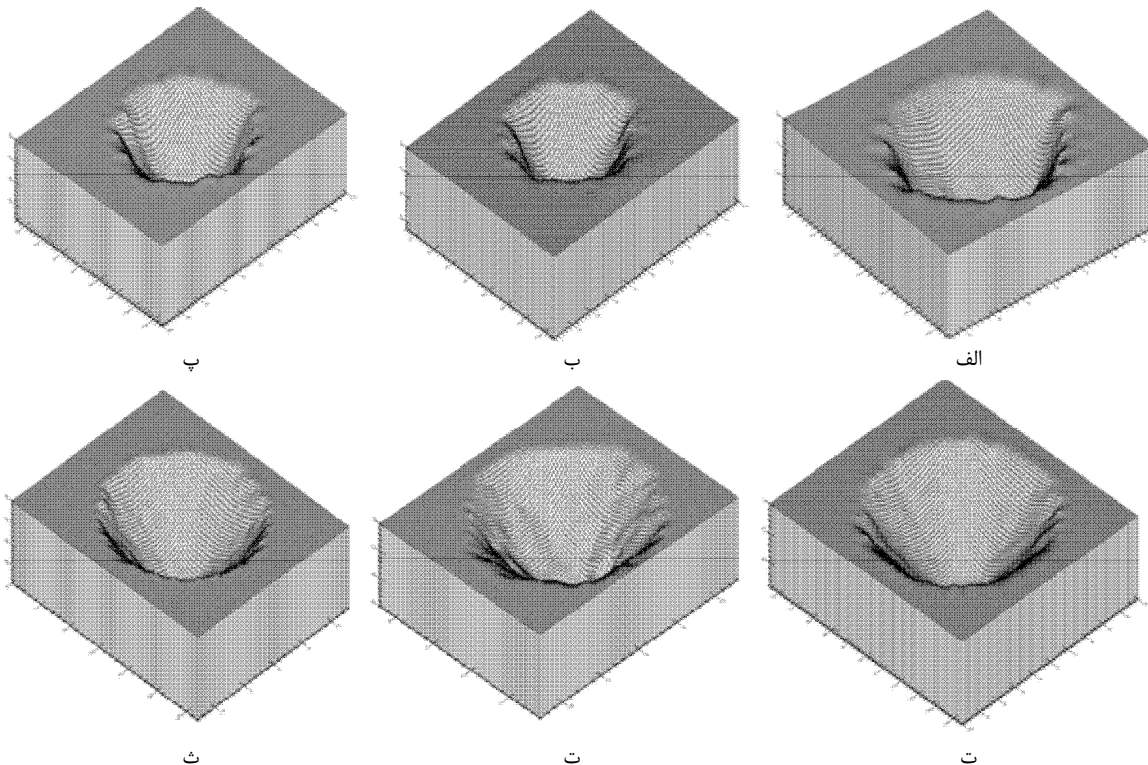
شکل 5 تغییرات حجم نسبی حفره لایروبی با تغییر فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب در مقایسه با آزمایش شاهد

از $0/33$ بالای سطح رسوب به $-1/33$ زیر سطح رسوب، حجم نسبی حفره لایروبی نسبت به آزمایش شاهد به ترتیب $8/85$ برابر شده است. رابطه (4) میزان اثر فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب (h_p/D_p) را بر حجم نسبی حفره آبشستگی (Λ/D_p^3) نشان می‌دهد. همچنین توپوگرافی‌های رسم شده در شکل 6 ارائه شده‌اند.

$$\frac{\Lambda}{D_p^3} = -0.023 \left(\frac{h_p}{D_p} \right)^{-0.974} \quad (4)$$

جدول 4 تأثیر فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب (h_p/D_p) بر حجم نسبی حفره لایروبی (Λ/D_p^3)

h_p/D_p	0/66	0/33	0	-0/33	-0/66	-1	-1/33	-1/66
Λ/D_p^3	0	5/64	7/19	11/86	33/66	41/73	70/86	انستداد
درصد تغییر Λ/D_p^3	0	-21/6	شاهد	64/9	368	480	885	انستداد



شکل 6 الف) توپوگرافی حفره لایروبی در $h_p/D_p = +0.33$ ب) توپوگرافی حفره لایروبی در آزمایش شاهد $h_p/D_p = 0$ پ) توپوگرافی حفره لایروبی در $h_p/D_p = -0.33$ ت) توپوگرافی حفره لایروبی در $h_p/D_p = -0.66$ ث) توپوگرافی حفره لایروبی در $h_p/D_p = -1$ ج) توپوگرافی حفره لایروبی در $h_p/D_p = -1.33$

3-3- تأثیر فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب بر غلظت رسوب در جریان خروجی از سیستم هیدروساکشن

به منظور ارزیابی تأثیر تغییرات فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب بر غلظت جریان خروجی، از لحظه شروع رسوبزدائی در فواصل زمانی 10 ثانیه به مدت یک دقیقه، جریان برداشت شده توسط سیستم هیدروساکشن جمع آوری شد. پس از اندازه‌گیری حجم آب، مخلوط آب و رسوب با کاغذ صافی از هم جدا شدند. نتایج ارائه شده در جدول 5 نشان می‌دهد، بلافاصله پس از شروع به کار سیستم هیدروساکشن رسوبها همراه با جریان آب از مخزن خارج می‌شوند. ذرات رسوب ناپایداری که در اطراف حفره لایروبی قرار دارند و یا ذراتی که درون حفره هستند و به سمت مرکز حفره حرکت کرده و برداشت می‌شوند. همچنین با گذشت زمان از شروع آزمایش غلظت جریان خروجی به شدت کاهش می‌یابد، بطوری که در 10 ثانیه ششم غلظت جریان نزدیک به صفر می‌شود.

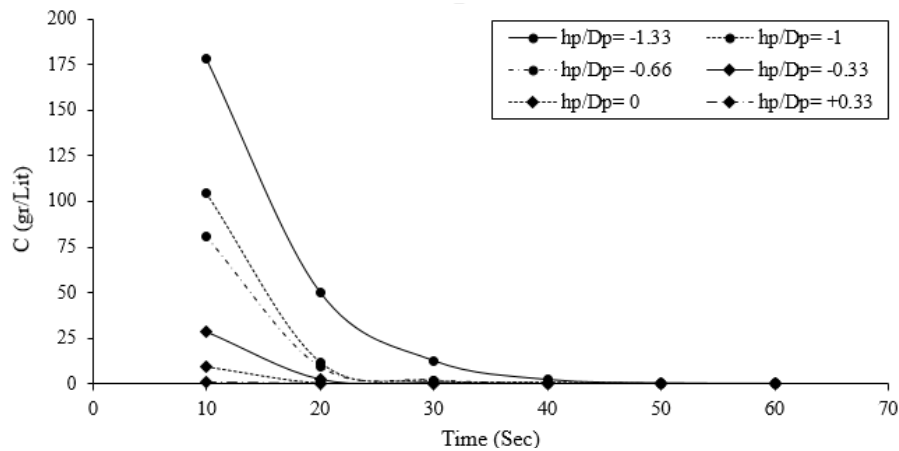
همان‌گونه که در جدول 5 مشخص است با پیشروی آزمایش مقدار غلظت جریان روند نزولی دارد. برای رسوب $h_p/D_p = +0.33$ در 10 ثانیه اول رسوبزدایی، غلظت رسوب 1/10 گرم بر لیتر محاسبه شده است. در 10 ثانیه دوم این مقدار با کاهش 81/64 درصدی به 0/202 گرم بر لیتر می‌رسد. به همین ترتیب مقدار غلظت جریان در 10 ثانیه سوم با کاهش 89/1 درصدی به 0/120 گرم بر لیتر، در 10 ثانیه چهارم با کاهش 91/64 درصدی به

0/092 گرم بر لیتر، در 10 ثانیه پنجم با کاهش 94/91 درصدی به 0/056 گرم بر لیتر و در 10 ثانیه ششم با کاهش 95 درصدی به 0/055 گرم بر لیتر می‌رسد. از ابتدای شروع مکش تا انتهای دقیقه اول، غلظت رسوب کاهش 95 درصدی دارد. با توسعه حفره لایروبی، ذرات رسوبی از دیواره‌های حفره به درون آن سقوط کرده که در قعر حفره تحت تأثیر گرداب‌های مستغرق به داخل لوله هیدروساکشن کشیده می‌شوند. همراه با گسترش حفره و بزرگ شدن قطر و عمق آن، به علت افزایش فاصله میان ذرات رسوب از دهانه مکش، سیستم هیدروساکشن قادر به مکش رسوب نیست. در واقع ذرات رسوبی خارج از محدوده شعاع تأثیر هیدروساکشن قرار می‌گیرند. پس از گذشت مدت زمان یک دقیقه، حرکت ذرات رسوبی داخل و اطراف حفره کم می‌شود، بطوری که اندازه‌گیری غلظت جریان ممکن نیست. در نهایت متناسب با نسبت h_p/D_p حدود 30-60 دقیقه زمان تعادل به طول می‌انجامد. جدول 5 تأثیر تغییرات نسبت h_p/D_p را بر غلظت رسوب در جریان خروجی نشان می‌دهد.

نمودارهای شکل 7، تأثیر تغییرات فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب بر غلظت رسوب در جریان نسبت به زمان را نشان می‌دهند. همانگونه که در شکل 7 مشاهده می‌شود، سیر نزولی غلظت جریان با گذر زمان برای تمامی فاصله‌های نسبی دهانه مکش از سطح رسوب مشهود است.

جدول 5 تغییرات غلظت رسوب در جریان خروجی با تغییر فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب در طول زمان

$\frac{h_p}{D_p} = -1.66$	$\frac{h_p}{D_p} = -1.33$	$\frac{h_p}{D_p} = -1$	$\frac{h_p}{D_p} = -0.66$	$\frac{h_p}{D_p} = -0.33$	$\frac{h_p}{D_p} = 0$	$\frac{h_p}{D_p} = +0.33$	$\frac{h_p}{D_p} = +0.66$	زمان (Sec)									
C (%)	C (%)	C (%)	C (%)	C (%)	C (%)	C (%)	C (%)	نمونه‌برداری (gr/Lit)									
انسداد	انسداد	0	178/20	0	104/75	0	80/59	0	28/83	0	9/95	0	1/10	0	0	0	0-10
انسداد	انسداد	71/8	50/24	88/3	12/23	88/2	9/51	91/4	2/47	94/5	0/55	81/6	0/202	0	0	0	10-20
انسداد	انسداد	92/9	12/67	98/0	2/08	97/2	2/24	97/7	0/64	97/5	0/25	89/1	0/120	0	0	0	20-30
انسداد	انسداد	98/7	2/36	98/9	1/15	99/4	0/46	99/6	0/11	98/9	0/11	91/6	0/092	0	0	0	30-40
انسداد	انسداد	99/7	0/49	99/6	0/44	99/7	0/24	99/7	0/07	99/1	0/08	94/9	0/056	0	0	0	40-50
انسداد	انسداد	99/9	0/24	99/8	0/17	99/8	0/15	99/8	0/05	99/5	0/05	95	0/055	0	0	0	50-60



شکل 7 تأثیر تغییرات فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب بر غلظت رسوب در جریان نسبت به زمان

و هم‌زمان با پیشرفت زمانی آزمایش، قطر و عمق حفره لایروبی گسترش پیدا می‌کند و پس از آن سیستم مکش قادر به برداشت و انتقال ذرات رسوبی دورتر و یا درشت دانه نمی‌باشد. هنگامی که مقدار نسبت h_p/D_p برابر با $0/66+$ باشد، نیروی مکش قادر به برداشت ذرات رسوب نبوده و تنها لایه‌ای سطحی از رسوب برداشته می‌شود. به بیان دیگر، غلظت جریان خروجی از دهانه مکش معادل صفر است. علاوه بر این مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که در عمق قراگیری دهانه مکش برابر با 5 سانتی‌متر زیر سطح رسوب (معادل نسبت h_p/D_p برابر با $-1/66$)، به علت تجمع رسوب در دهانه مکش، انسداد لوله صورت می‌گیرد و سیستم هیدروساکشن قادر به برداشت رسوب نمی‌باشد.

بر راندمان سیستم هیدروساکشن

و m_d جرم آب تخلیه شده می‌باشد. جدول 6 تغییرات راندمان سیستم هیدروساکشن نسبت به زمان را به ازای تغییر فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب (h_p/D_p) نشان می‌دهد. مطابق با نتایج ارائه شده در جدول 6 و شکل 8 ماکزیمم راندمان سیستم هیدروساکشن در 10 ثانیه اول آزمایش‌ها مشاهده می‌شود. همراه با گذشت زمان از شروع مکش سیستم هیدروساکشن راندمان به سرعت کاهش می‌یابد و در نهایت صفر می‌شود. لازم به ذکر است که در 10 ثانیه ششم نمونه برداری برای تمامی آزمایش‌ها کاهش راندمان نسبت به شروع مکش بیش از 90 درصد است. به منظور بررسی تأثیر تغییرات فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب بر میانگین راندمان سیستم هیدروساکشن در 60 ثانیه ابتدایی آزمایش، h_p/D_p برابر صفر به عنوان آزمایش شاهد در نظر گرفته شد (شکل 9).

همراه با افزایش فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب، در بالای سطح رسوب، راندمان سیستم هیدروساکشن کاهش می‌یابد. مطابق با شکل 9 راندمان سیستم هیدروساکشن در h_p/D_p برابر $0/33+$ نسبت به آزمایش شاهد 85 درصد کاهش یافته و به ازای h_p/D_p برابر $0/66+$ ، راندمان صفر می‌شود. از سوی دیگر، همراه با افزایش فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب درون رسوب‌ها، راندمان رسوب زدائی نسبت به آزمایش شاهد بهبود می‌یابد.

3-4- تأثیر فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب

بر راندمان سیستم هیدروساکشن

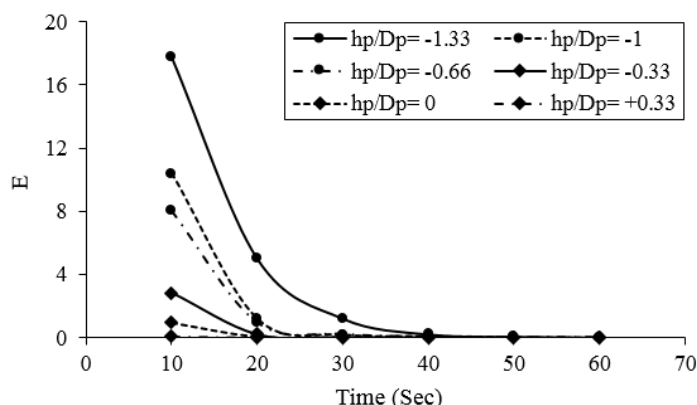
راندمان رسوب‌شویی شاخصی برای سنجش میزان موفقیت رسوب‌شویی است (مددی و همکاران، 1395). بنابراین تأثیر تغییرات فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب بر راندمان سیستم هیدروساکشن بررسی شد. همچنین راندمان توسط معادله (5) محاسبه و مقادیر آن در جدول 6 ارائه شده‌اند.

$$E = \frac{m_0}{m_d} \quad (5)$$

که در این رابطه E راندمان، m_0 جرم رسوب تخلیه شده

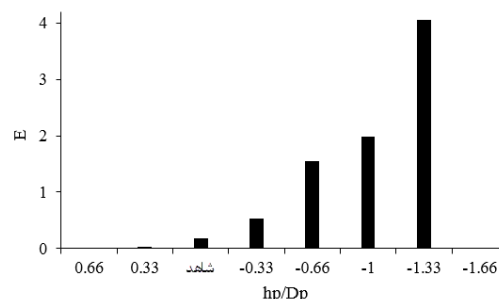
جدول 6 تأثیر تغییر مقدار نسبت h_p/D_p بر راندمان سیستم هیدروساکشن

$\frac{h_p}{D_p} = -1.66$	$\frac{h_p}{D_p} = -1.33$	$\frac{h_p}{D_p} = -1$	$\frac{h_p}{D_p} = -0.66$	$\frac{h_p}{D_p} = -0.33$	$\frac{h_p}{D_p} = 0$	$\frac{h_p}{D_p} = 0.33$	$\frac{h_p}{D_p} = +0.66$	زمان (s)
E (%)	E (%)	E (%)	E (%)	E (%)	E (%)	E (%)	E (%)	E
انسداد	انسداد	0	17/78	0	10/38	0	8/05	0
2/85	0	0/97	0	0/1	0	0	0	10
71/8	5/02	88/3	1/21	88	0/94	91/6	0/24	94/8
0/05	80	0/02	0	0	0	0	0	20
93	1/23	98	0/20	97/3	0/22	97/9	0/06	97/9
0/02	90	0/01	0	0	0	0	0	30
98/7	0/23	98/9	0/11	99/5	0/04	99/5	0/015	98/9
0/01	92	0/008	0	0	0	0	0	40
99/6	0/07	99/6	0/04	99/7	0/02	99/7	0/009	99/1
0/008	95	0/005	0	0	0	0	0	50
99/8	0/02	99/9	0/01	99/8	0/01	99/8	0/006	99/5
0/005	96	0/004	0	0	0	0	0	60



شکل 8 تأثیر تغییرات فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب بر راندمان سیستم هیدروساکشن نسبت به زمان

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد هنگامی که لوله مکش بالاتر از ارتفاع بحرانی از بستر قرار گیرد، هیچگونه رسوب‌زدائی صورت نمی‌گیرد. شایان ذکر است که ایجاد شرایط بحرانی برای ذرات رسوبی از جنس شن و ماسه هنگامی که جریان مکش برای برداشت ذرات بیش از حد ضعیف شود، مهیا می‌گردد (Rehbinder 1994, Ullah 2005). در همین راستا در پژوهش حاضر، شرایط بحرانی برای حالتی که ورودی مکش بیش از یک سانتی‌متر بالای سطح رسوب قرار می‌گرفت مشاهده شد. از سوی دیگر شرایط بحرانی برای رسوب‌های تازه ته‌نشین شده حاوی رس مانند یک لایه متراکم و لایه چسبنده همگن، رفتار می‌کند. این در حالی است که در برداشت رسوب‌های متراکم نیروی برشی ماده شروع به مداخله می‌کند (Zriek et al. 1998). بنابراین در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که هرچه فاصله دهانه مکش در بالای رسوب از سطح رسوب کمتر شود سیستم



شکل 9 تأثیر تغییرات فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب بر میانگین راندمان سیستم هیدروساکشن در 60 ثانیه ابتدایی آزمایش

ماکزیمم راندمان در h_p/D_p برابر $-1/33$ قبل از عمق انسداد رخ می‌دهد که حدود 21 برابر راندمان آزمایش شاهد است. اکنون تفسیرها و مشاهدات مطالعه‌های قبلی را می‌توان با توجه به یافته‌های جدید مورد بحث و بررسی قرار داد.

ابتدایی شروع مکش سیستم هیدروساکشن مشاهده شد و با گذشت زمان برداشت رسوب به سرعت کاهش می‌یابد. علاوه بر این، برای تمام آزمایش‌ها مشاهده شد، پس از یک دقیقه راندمان نزدیک به صفر می‌شود. از سوی دیگر مشاهده شد با افزایش فاصله نسبی دهانه مکش از سطح رسوب، در بالای سطح رسوب، کارایی سیستم هیدروساکشن به شدت کاهش می‌یابد، به طوری که با کاهش h_p/D_p از صفر به +0/33، راندمان حدود 85 درصد کم می‌شود.

5- فهرست علائم

C	غلظت جریان آب و رسوب
D_{50}	قطر متوسط رسوبات
D_p	قطر لوله سیفون
H	هد مؤثر
h_p	فاصله دهانه مکش از سطح رسوب
H_w	ارتفاع آب در بالای رسوبات
Q	دبی جریان
V	سرعت متوسط لوله‌ی مکش
μ	لزجت دینامیکی سیال
ρ_s	چگالی رسوب
ρ_w	چگالی آب

6- منابع

- Asiaban, P., Kouchakzadeh, S. and Asiaban, S. (2014). "Enhanced hydrosuction performance for cohesive sediment removal in low-head reservoirs", *J. Ain Shams Engineering*.
- Atkinson, E. (1998). The Feasibility of flushing sediment from the reservoir, Report OD 137.
- 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", *J. Sediment Research*, Vol. 25, No. 2, pp. 149-160.
- Hotchkiss, R. H., Huang, X. (1995). "Hydrosuction sediment-removal systems (HSRS): Principles and field test". *Hydraulic Engineering*, 6(121), pp. 479-489.
- Ke, W. T., Chen, H. C., Hsu, K., Toigo, W. C., Weng, H. (2016). "Influence of sediment consolidation on hydrosuction performance". *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(10).

هیدروساکشن برداشت حجم رسوب و راندمان بیشتری دارد (Hotchkiss et al. 1995, Chen et al. 2010). جنبه دیگر بررسی عملیات رسوب‌زدائی توسط هیدروساکشن، مربوط به شعاع نفوذ و تغییر شکل سطح رسوب‌های ته‌نشین شده در شرایط جاسازی لوله ورودی درون رسوب است. برای رسوب‌های غیر چسبنده از جنس شن و ماسه یک حفره لایروبی مخروطی شکل اطراف لوله مکش همراه با یک تپه کوچک رسوبی در مقابل آن تشکیل می‌گردد (Ullah et al. 2005). ذراتی که از دیواره‌های جانبی حفره لایروبی ریزش می‌کردند به میزان قابل ملاحظه‌ای کم شده و این ذرات توسط آب منفذی برداشت می‌شوند. هنگامی که ذرات رسوبی در فواصل دورتری قرار می‌گیرند و راندمان سیستم پایین می‌آید، نیروی برشی به جای نیروی بالابردنده آب منفذی موجب بلندکردن ذرات رسوبی می‌شود. همچنین طبق تحقیقات ربیندر بیشینه نیروی قابل حمل رسوب در شرایط $r \approx 0.8Z_0$ اعمال می‌شود که در آن Z_0 فاصله میان ورودی سیستم و سطح رسوب و r شعاع تأثیر نیرو است (Rehbinder, 1995).

4- نتیجه‌گیری

در مخازن بزرگ، ته‌نشینی رسوب‌ها در نزدیکی بدنه سد می‌تواند موجب بروز مشکلات متعددی مانند انسداد دریچه‌های تحتانی و کاهش ظرفیت ذخیره شود. برای مقابله با چنین مشکلاتی هیدروساکشن می‌تواند یک روش مؤثر حذف رسوب، بسته به میزان تحکیم رسوب‌ها و طراحی هیدرولیکی و هندسی آن، باشد. در این پژوهش تأثیر تغییرات نسبت h_p/D_p بر ابعاد حفره لایروبی (قطر، عمق و حجم حفره)، غلظت جریان خروجی و راندمان سیستم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سیستم هیدروساکشن بهترین عملکرد را به ازای h_p/D_p برابر 1/33- قبل از عمق انسداد دارد. در این مورد قطر حفره لایروبی، عمق حفره لایروبی، حجم حفره لایروبی، غلظت رسوب در جریان خروجی و راندمان سیستم هیدروساکشن ماکزیمم می‌شوند. همچنین بیشترین رسوب‌زدائی در 10 ثانیه

pipeline resistance characteristic research". *Procedia Engineering*, 28, pp. 99-104.

Ullah, S. M., Mazurek, K.A., Rajaratnarn, N. and Reitsma, S. (2005). "Siphon removal of cohesionless materials", *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 131, No. 3.

Zreik, A. D., Krishnappan, B. G., Germaine, J. T., Madsen, O. S., Ladd, C. C. (1998). "Erosional and mechanical strengths of deposited cohesive sediments". *J. Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 11, pp. 1076-1085.

Madadi, M. R., Rahimpour, M., Qaderi, K. (2017). "Improving the Pressurized Flushing Efficiency in Reservoirs: an Experimental Study", *J. Water Resource Management*, 31(14), pp. 4633-4647.

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

Rehbinder, G. 1994. Sediment Removal with a Siphon at Cirtical Flux, *J.Hydraulic Research*. Vol.32, 845-860.

Tao, Y., Li, C., Min, X., Min, Z. (2012). "Siphon