

مطالعه آزمایشگاهی عوامل مؤثر بر کارایی سامانه مکش آبی

عاطفه مقبلی*^۱

محمدجواد خانجانی^۲

سید رضا هاشمی نژاد^۳

چکیده

رسوب‌زدایی دریاچه سدها با روش‌های مختلف از جمله سامانه مکش آبی انجام می‌شود. برای طراحی دقیق اجزای سامانه مکش آبی و افزایش کارایی آن لازم است ابتدا روند رسوب‌زدایی آن، از طریق مدل فیزیکی مطالعه گردد. از جمله پارامترهای مؤثر در کارایی این سامانه می‌توان به قطر لوله مکش، زاویه دهانه مکش نسبت به سطح رسوب و هد مؤثر (اختلاف ارتفاع میان سطح آب درون مخزن و خروجی سامانه) اشاره نمود. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مذکور بر غلظت رسوب خروجی، مدل فیزیکی یک مخزن طراحی، ساخته و مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش نحوه تأثیر این پارامترها بر کارایی سامانه مکش آبی در قالب طرح ۳ فاکتوریل کامل (۳^۳) ارزیابی شد. نتایج این پژوهش نشان داد، حداکثر غلظت رسوب خروجی در آزمایش با حداکثر مقادیر متغیرهای قطر لوله مکش ۲/۲ سانتی‌متر، زاویه دهانه مکش ۹۰ درجه و هد مؤثر ۸۰ سانتی‌متر مشاهده شد که با گذشت زمان از شروع آزمایش غلظت رسوب خروجی از سامانه مکش آبی در تمامی آزمایش‌ها کاهش یافت. همچنین با بررسی کلی نتایج آزمایش‌ها مشخص شد که با افزایش پارامترهای قطر لوله مکش از ۱/۱ به ۲/۲ سانتی‌متر، زاویه دهانه مکش از ۳۰ به ۹۰ درجه و هد مؤثر از ۵۰ به ۸۰ سانتی‌متر، غلظت رسوب خروجی به ترتیب ۶۶۹٪، ۳۷٪ و ۲۰/۹٪ بیشتر شد؛ بنابراین افزایش پارامترهای مذکور موجب افزایش غلظت رسوب خروجی از سامانه مکش آبی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی

رسوب‌زدایی مخازن، کارایی سامانه مکش آبی، غلظت رسوب خروجی، مدل فیزیکی، طرح فاکتوریل کامل

*۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، Atefeh.moghbeli@gmail.com

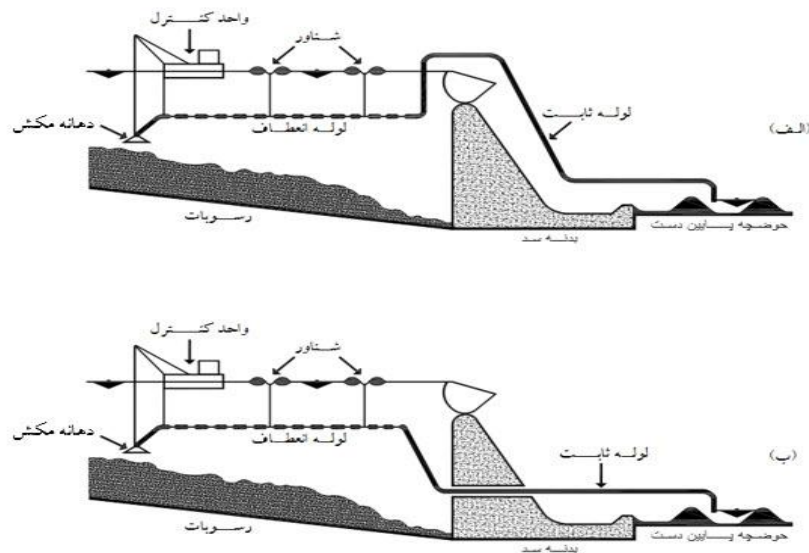
۲. استاد در گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۳. دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی در گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

مقدمه

نیروگاه می‌گردد (امامقلی زاده و فتاحی مقدم^۲، ۲۰۱۴)؛ بنابراین، انجام اقداماتی برای جلوگیری از ورود رسوب به مخازن سدها و تخلیه آن‌ها الزامی و اجتناب‌ناپذیر است (موریس و فان^۳، ۱۹۹۷). همچنین، در خصوص تخلیه رسوب، نیاز به کنترل زمان و مقدار رسوب تخلیه‌شده با توجه به شرایط محیط زیستی رودخانه پایین‌دست سد است. از جمله روش‌های رایج تخلیه رسوب از مخازن سدها می‌توان به فلاشینگ، عبوردهی جریان چگال، سامانه کنارگذر و لایروبی مکانیکی اشاره کرد. باین‌حال شرایط استفاده از این روش‌ها محدود و کنترل مقدار دقیق کمیت رسوب تخلیه‌شده توسط این روش‌ها دشوار است (مقصودلونداد و همکاران^۴، ۱۳۹۴).

با ساخت سد، روند انتقال رسوب رودخانه مختل شده و رسوب ورودی به جریان پایین‌دست کاهش می‌یابد. این امر موجب بروز مشکلات محیط زیستی مانند فرسایش بستر رودخانه و عدم تجدید مواد آن می‌گردد (هاتچکیس و هوانگ^۱، ۱۹۹۵). همچنین کاهش حجم ذخیره مفید، کاهش توانایی تولید برق در سدهای برقایی، مسدود شدن دریچه‌ها و آبگیرها، تخریب سازه‌های تخلیه و ماشین‌های هیدرولیکی از مهم‌ترین پیامدهای ته‌نشینی و تجمع رسوب در مخازن است (مددی و همکاران، ۱۳۹۵). علاوه بر این، افزایش رقوم سطح رسوب منجر به افزایش ریسک ورود ذره‌های رسوبی به نیروگاه و تخریب تأسیسات و تجهیزات



شکل (۱): سامانه مکش آبی برداشت رسوبات: (الف) روگذر (ب) زیرگذر (هاتچکیس و هوانگ، ۱۹۹۵)

از جمله روش‌های متداول لایروبی مخازن سدها، سامانه مکش آبی است که با استفاده از خاصیت هیدرولیکی سیفون رسوب ته‌نشین شده در مخزن را به پایین‌دست سد منتقل می‌کند. این سامانه ممکن است به صورت روگذر، یعنی لوله انتقال از روی سد عبور کند یا به صورت زیرگذر، یعنی عبور لوله مکش از محل دریچه‌های تحتانی باشد (شکل (۱) چن و همکاران^۵، ۲۰۱۰). سامانه مکش آبی برخی معایب سایر روش‌های رسوب‌زدایی مانند مصرف انرژی، توقف بهره‌برداری از مخزن، هدر رفت آب، تخلیه رسوب بیش از

ظرفیت حمل جریان پایین‌دست، برداشت موضعی رسوب و غیره را ندارد (پیشگر و همکاران^۶، ۱۳۹۴). این سامانه، به دلیل عدم نیاز به انرژی خارجی برای انتقال رسوب، همواره به‌عنوان یکی از راهکارهای برتر حل مشکل رسوب مخازن مطرح بوده است. کشور چین با بالاترین نرخ رسوب‌گذاری در جهان (سالانه ۲/۳ درصد) بیشترین استفاده را از این روش داشته است (هاتچکیس و هوانگ، ۱۹۹۵).

^۴. Maghsodlonejad et al

^۵. Chen et al

^۶. Pishgar et al

^۱. Hotchkiss and Huang

^۲. Emamgholizadeh and Fathi-Moghdam

^۳. Morris and Fan

داد که با فرورفتن دهانه مکش زیر سطح رسوب حفره آب شستگی به شدت توسعه می‌یابد. همچنین نتایج بررسی‌های وی نشان داد که در تمامی آزمایش‌ها، پس از تعادل حفره آب شستگی، زیر محور مرکزی لوله مکش یک تپه رسوبی کوتاه تشکیل می‌شد (الاح و همکاران، ۲۰۰۵). چن و همکاران (۲۰۱۲) فشار مکش در اطراف دهانه ورودی سامانه مکش آبی را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد، نقاط زیر دهانه مکش دارای بیشترین فشار مکش و بیشترین آب شستگی بودند. همچنین مشاهده کردند که همراه با افزایش فاصله از ورودی، فشار مکش و عمق آب شستگی کاهش می‌یابد (چن و همکاران، ۲۰۱۰). شریستا^۴ (۲۰۱۲) از نیروی جت آب در اطراف دهانه مکش برای افزایش کارایی سامانه مکش آبی استفاده کرد. او عملکرد سامانه ابداعی خویش را برای تخلیه رسوب‌های مترکم شده در شرایط صحرائی بررسی کرد. نتایج آزمایش‌های او نشان داد که با نصب جت آب راندمان تخلیه رسوب کاهش می‌یابد اما مشکل انسداد سامانه مکش آبی در طول انجام عملیات رسوب‌زدایی حل می‌شود (شریستا، ۲۰۱۲). تاو و همکاران^۵ (۲۰۱۲) ائتلاف انرژی در سامانه مکش آبی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تأثیر خصوصیات هندسی و هیدرولیکی سامانه مکش آبی را بر ائتلاف 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 ائتلاف انرژی نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که ائتلاف انرژی با قطر لوله مکش رابطه معکوس دارد (تاو و همکاران، ۲۰۱۲). بعلاوه، پژوهش‌های اخیر نشان داد که ایجاد نوسان در جریان اطراف دهانه مکش سبب افزایش غلظت رسوب خروجی و ابعاد حفره آب شستگی می‌گردد (آسیابان و همکاران^۶، ۲۰۱۶). همچنین بررسی‌ها نشان داده که بهترین زمان اجرای عملیات رسوب-زدایی سامانه مکش آبی بلافاصله پس از ته‌نشینی رسوب-های موجود در جریان چگال و قبل از تراکم آن‌ها است (که و همکاران^۷، ۲۰۱۶).

غلظت رسوب در جریان خروجی از سامانه مکش آبی را می‌توان مطابق با ظرفیت انتقال رسوب رودخانه پایین دست سد تنظیم کرد؛ بنابراین، می‌توان با رهاسازی رسوب‌های برداشت‌شده در زمانی طولانی‌تر با مقدار کمتر، اثرات منفی تخلیه رسوب به جریان پایین دست را کاهش داد. در نتیجه، با رهاسازی رسوب مطابق ظرفیت انتقال پایین دست می‌توان شرایط قبل از احداث سد را در رودخانه برقرار کرد (هاتچکس و هوانگ، ۱۹۹۵).

مطالعه‌های مختلفی بر روی سامانه مکش آبی انجام شده است. این مطالعه‌ها اغلب به بررسی مکانیسم رسوب برداری این سامانه پرداخته‌اند. رهبیندر^۱ (۱۹۹۴) فرضیه اینکه جریان ورودی به سامانه مکش آبی 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 سامانه مکش آبی، تنش برشی موجب حرکت ذرات رسوبی نمی‌شود؛ بلکه حرکت آن‌ها به دلیل وجود نیروی بالابرنده آب در لایه رسوبی است (رهبیندر، ۱۹۹۴). هاتچکس و هوانگ (۱۹۹۵) تأثیر شکل دهانه مکش سامانه مکش آبی را بر غلظت رسوب خروجی از آن بررسی کردند. بدین منظور سه دهانه مکش مورد آزمایش قرار گرفت. دهانه مکش اول سبک‌وزن (۹ کیلوگرم) و به شکل خاک‌انداز و با بازشدگی به ارتفاع ۵ سانتی‌متر و عرض ۶۰ سانتی‌متر طراحی شد. دهانه مکش دوم سنگین‌وزن (۲۰ کیلوگرم) و مانند دهانه مکش اول طراحی شده بود. دهانه مکش دوم نسبت به لوله مکش با زاویه 45° به طرف پایین 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 سامانه مکش آبی 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 پایین دست سد را مطابق با ظرفیت انتقال آن تنظیم کرد (هاتچکس و هوانگ، ۱۹۹۵). الاح^۲ (۲۰۰۵) تأثیر فاصله دهانه مکش تا سطح رسوب را بر ابعاد حفره آب شستگی مورد مطالعه قرار داد. فاصله مورد بررسی توسط وی از ۶/۴ تا ۱۰/۱۶- میلی‌متر متغیر بود. نتایج آزمایش‌های وی نشان

^۴. Shrestha

^۵. Tao et al

^۶. Asiaban et al

^۷. Ke et al

^۱. Rehbinder

^۲. Ullah

^۳. Chen et al

با استفاده از آنالیز ابعادی و تئوری π باکینگهام، متغیرهای بیان شده در معادله (۱) به فرم اعداد بدون بعد (معادله (۲)) تبدیل می‌شوند.

$$f \left(\frac{C_{SR}}{\rho_w}, \frac{C_{SR}L'}{\alpha D \rho_w}, \frac{C_{SR}L^2}{h D \rho_w}, \frac{CL'}{\alpha h \rho_w}, \frac{h D \alpha}{D_{50}^2}, \frac{t \sqrt{2gh}}{D_{50}}, \frac{n}{D_{50}}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{\rho_w \sqrt{2ghd}}{\mu}, \frac{D_{50}}{t \sqrt{gh_w}}, C_u \right) = C \quad (2)$$

عدد بی‌بعد $\rho_w \sqrt{2ghd} / \mu$ نشان‌دهنده عدد رینولدز است. در طول آزمایش‌ها حداقل مقدار عدد رینولدز برابر ۱۰۰۰۰ بوده که بیانگر آشفتگی بودن جریان و عدم تأثیر نیروی لزجت در این تحقیق است. برای اهداف پژوهش حاضر مقادیر n ، D_{50} ، t و g در آزمایش‌ها ثابت بودند بنابراین مقدار پارامترهای بی‌بعد n/D_{50} و $D_{50}/t \sqrt{gh_w}$ ثابت هستند. همچنین از یک نوع رسوب استفاده شد که موجب می‌شود مقادیر C_u و ρ_s/ρ_w نیز ثابت باشند؛ بنابراین اعداد بی‌بعد ثابت از معادله ۲ حذف و به فرم معادله ۳ تبدیل می‌شود.

$$f \left(\frac{C_{SR}}{\rho_w}, \frac{C_{SR}L'}{\alpha D \rho_w}, \frac{C_{SR}L^2}{h D \rho_w}, \frac{CL'}{\alpha h \rho_w}, \frac{h D \alpha}{D_{50}^2}, \frac{t \sqrt{2gh}}{D_{50}} \right) = C \quad (3)$$

رابطه موردنظر این پژوهش از آنالیز ابعادی عبارت است از:

$$\frac{C_{SR}}{\rho_w} = f \left(\frac{C_{SR}L'}{\alpha D \rho_w}, \frac{C_{SR}L^2}{h D \rho_w}, \frac{CL'}{\alpha h \rho_w} \right) \quad (4)$$

اعداد بدون بعد بیان شده توسط معادله ۴، در شکل‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ بکار برده می‌شوند.

شرح مدل فیزیکی

برای شناخت تأثیر پارامترهای موردبررسی و انجام آزمایش‌های موردنظر، یک مخزن به طول ۷۰ سانتی‌متر، عرض ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه سازه‌های هیدرولیکی بخش مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان طراحی و ساخته شد. جنس سه وجه مدل ساخته‌شده از فلز و یک وجه آن از پلکسی‌گلاس (برای مشاهده اندرکنش جریان و رسوب حین عملیات مکش آبی) است. پلان و پروفیل طولی مدل در شکل ۲ نشان داده‌شده که اجزاء آن عبارت‌اند از مخزن جمع‌آوری و انتقال جریان خروجی از سرریز، سرریز کنترل رقوم سطح آب، ناحیه

در مطالعات پیشین تأثیر برخی از ویژگی‌های هیدرولیکی و هندسی سامانه مکش آبی و رسوب‌ها بر عملکرد سامانه موردتوجه قرار گرفته است، لیکن بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد تاکنون بررسی آزمایشگاهی که تأثیر پارامترهای قطر لوله مکش، زاویه دهانه مکش نسبت به سطح رسوب و هد مؤثر را مورد ملاحظه قرار دهد، به انجام نرسیده است. لذا در تحقیق حاضر تلاش شده است تا گامی برای پر کردن این خلأ برداشته شود. به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای مذکور بر کارایی سامانه مکش آبی ۲۷ آزمایش طراحی و انجام شد. هرکدام از آزمایش‌ها سه مرتبه تکرار شد و از میانگین برداشت تکرارها برای آنالیز نتایج استفاده گردید. آزمایش‌ها شامل ترکیب‌های مختلفی از سه قطر برای لوله مکش، سه زاویه دهانه مکش و سه هد مؤثر حاکم بر سامانه می‌شد.

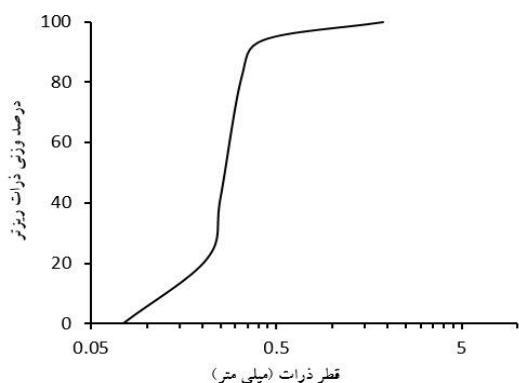
مواد و روش‌ها

گردابه‌ها و اغتشاش در اطراف دهانه مکش باعث اعمال تنش برشی بر سطح رسوب می‌گردد. این نیرو با سرعت جریان رابطه مستقیم دارد. بعلاوه، این مشخصه جریان تحت تأثیر پارامترهای سامانه مکش آبی (قطر لوله مکش، زاویه دهانه مکش و هد مؤثر) است؛ بنابراین، پارامترهای ذکرشده بر عملکرد سامانه مکش آبی تأثیر داشته که در پژوهش حاضر موردبررسی قرار گرفته‌اند.

آنالیز ابعادی

غلظت رسوب خروجی (C_{SR}) (نسبت جرم رسوب به حجم آب) از سامانه مکش آبی به متغیرهای مختلفی بستگی دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از لزجت (μ)، جرم ویژه آب (ρ_w)، جرم ویژه رسوب (ρ_s)، قطر ذرات رسوب (D_{50})، هد مؤثر ناشی از اختلاف میان سطح آب و نقطه خروجی سامانه مکش آبی (h)، قطر لوله مکش (D)، زاویه دهانه مکش نسبت به افق (α)، زمان تجمعی برداشت نمونه (t)، شتاب گرانش (g)، ضریب مانینگ لوله (n)، ضریب یکنواختی (C_u)، ارتفاع آب داخل مخزن (h_w) و طول لوله مکش انتقال (L'). لذا غلظت رسوب خروجی را می‌توان به‌صورت تابعی از متغیرهای فوق مطابق رابطه (۱) بیان کرد.

$$C_{SR} = f \left(\mu, \rho_w, \rho_s, D_{50}, h, D, \alpha, t, \Delta t, g, n, C_u, h_w, L' \right) \quad (1)$$



شکل (۳): منحنی دانه‌بندی رسوبات

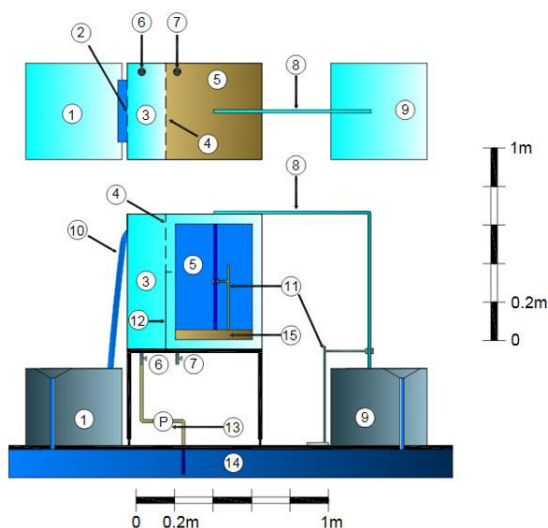
سامانه تأمین آب مدل شامل یک مخزن فلزی بود که آب خروجی از مدل به آن وارد شده و سپس توسط یک پمپ دوباره به مدل انتقال داده می‌شد. برای ثابت ماندن رقوم سطح آب درون مخزن و اندازه‌گیری دبی مازاد، یک سرریز مستطیلی به عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در قسمت ورودی مدل تعبیه گردید تا آب مازاد ورودی به مدل، از طریق آن سرریز شده و به مخزن تأمین آب برگشت داده شود.

آزمایش‌ها

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر پارامترهای قطر لوله مکش، زاویه دهانه مکش نسبت به سطح رسوب و هد مؤثر بر غلظت رسوب خروجی از سامانه مکش آبی، ۲۷ آزمایش در قالب طرح سه فاکتوریل کامل (۳^۳) طرح و انجام شد. آزمایش‌ها برای سه قطر مختلف لوله مکش سامانه مکش آبی D₁ برابر ۲/۲ سانتی‌متر، D₂ برابر ۱/۵ سانتی‌متر و D₃ برابر ۱/۱ سانتی‌متر؛ سه زاویه دهانه مکش نسبت به سطح افق α_1 برابر ۹۰ درجه، α_2 برابر ۶۰ درجه و α_3 برابر ۳۰ درجه؛ سه هد مؤثر h₁ برابر ۸۰ سانتی‌متر، h₂ برابر ۶۵ سانتی‌متر و h₃ برابر ۵۰ سانتی‌متر به صورت کاملاً تصادفی انجام گردید. ترکیب پارامترها در جدول (۱) ارائه شده است.

برای آماده‌سازی مدل به منظور انجام هر آزمایش ابتدا سطح رسوب تراز می‌شد. زاویه دهانه مکش مطابق با شرایط هر آزمایش تنظیم می‌گردید و سپس دهانه مکش مماس به سطح رسوب ثابت می‌شد و تا انتهای آزمایش در مکان اولیه خود باقی می‌ماند. همچنین برای تنظیم هد مؤثر، مکان خروجی سامانه مکش آبی نسبت به سطح آب درون مخزن تنظیم و تا پایان آزمایش ثابت می‌گردید (شکل (۴)). علاوه بر این، به منظور بررسی تغییرات غلظت رسوب خروجی

آرام‌کننده جریان، دیوار مشبک، مخزن مدل، شیر تنظیم جریان ورودی به مدل، شیر تخلیه، سامانه مکش آبی، حوضچه رسوب‌گیر، جریان مازاد خروجی، گیره تنظیم دهانه ورودی و خروجی سامانه مکش آبی، دیواره فلزی، پمپ، منبع تأمین آب و در آخر بستر رسوبی. همچنین، در بخش ورودی مدل ناحیه‌ای برای آرام کردن جریان تعبیه شد. در این ناحیه، از ورق‌های مشبک و توری‌های غوطه‌ور آرام‌کننده، باهدف از بین بردن تلاطم، حذف گردابه‌های ورودی و آرام نمودن جریان استفاده شد. به منظور ثابت نگه داشتن هد آب در انجام آزمایش‌ها جریان آب به طور پیوسته توسط پمپ وارد مدل می‌شد و جریان مازاد پس از عبور از یک سرریز مستطیلی از مخزن خارج و به مخزن جمع‌آوری وارد می‌شد.



شکل (۲): پلان و پروفیل طولی مدل فیزیکی.

یک‌لایه ماسه غیر چسبنده با چگالی ۲/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر با مشخصه‌های قطر متوسط ۰/۲۳ میلی‌متر، ضریب یکنواختی ۲/۱۷ و ضریب انحنای ۰/۱۷، به عنوان رسوب در مدل استفاده شد. منحنی دانه‌بندی رسوبات یکنواخت و فاقد ریزدانه است (شکل (۳)). همچنین، در کف مخزن و زیر لایه ماسه، یک‌لایه شن درشت برای زهکشی بهتر رسوب ریخته شد.



شکل (۴): مدل مخزن و سامانه مکش آبی

نسبت به زمان، در بازه‌های زمانی ۱۰ ثانیه (Δt) و به مدت ۴۰ ثانیه (t) از خروجی سامانه مکش آبی نمونه برداری شد.

جدول (۱): ترکیب آزمایش‌ها

شماره آزمایش	نام آزمایش	قطر لوله مکش D (سانتی-متر)	زاویه دهانه مکش α (درجه)	هد مؤثر h (سانتی-متر)
۱	$D_1\alpha_1h_1$	۲/۲	۹۰	۸۰
۲	$D_1\alpha_1h_2$	۲/۲	۹۰	۶۵
۳	$D_1\alpha_1h_3$	۲/۲	۹۰	۵۰
۴	$D_1\alpha_2h_1$	۲/۲	۶۰	۸۰
۵	$D_1\alpha_2h_2$	۲/۲	۶۰	۶۵
۶	$D_1\alpha_2h_3$	۲/۲	۶۰	۵۰
۷	$D_1\alpha_3h_1$	۲/۲	۳۰	۸۰
۸	$D_1\alpha_3h_2$	۲/۲	۳۰	۶۵
۹	$D_1\alpha_3h_3$	۲/۲	۳۰	۵۰
۱۰	$D_2\alpha_1h_1$	۱/۵	۹۰	۸۰
۱۱	$D_2\alpha_1h_2$	۱/۵	۹۰	۶۵
۱۲	$D_2\alpha_1h_3$	۱/۵	۹۰	۵۰
۱۳	$D_2\alpha_2h_1$	۱/۵	۶۰	۸۰
۱۴	$D_2\alpha_2h_2$	۱/۵	۶۰	۶۵
۱۵	$D_2\alpha_2h_3$	۱/۵	۶۰	۵۰
۱۶	$D_2\alpha_3h_1$	۱/۵	۳۰	۸۰
۱۷	$D_2\alpha_3h_2$	۱/۵	۳۰	۶۵
۱۸	$D_2\alpha_3h_3$	۱/۵	۳۰	۵۰
۱۹	$D_3\alpha_1h_1$	۱/۱	۹۰	۸۰
۲۰	$D_3\alpha_1h_2$	۱/۱	۹۰	۶۵
۲۱	$D_3\alpha_1h_3$	۱/۱	۹۰	۵۰
۲۲	$D_3\alpha_2h_1$	۱/۱	۶۰	۸۰
۲۳	$D_3\alpha_2h_2$	۱/۱	۶۰	۶۵
۲۴	$D_3\alpha_2h_3$	۱/۱	۶۰	۵۰
۲۵	$D_3\alpha_3h_1$	۱/۱	۳۰	۸۰
۲۶	$D_3\alpha_3h_2$	۱/۱	۳۰	۶۵
۲۷	$D_3\alpha_3h_3$	۱/۱	۳۰	۵۰

شاخص‌های آماری ارزیابی رابطه بدون بعد

به منظور بررسی دقت معادله برآورد غلظت رسوب جریان خروجی بر مبنای متغیرهای مورد بررسی باید از شاخص‌های خطا سنجی استفاده نمود. شاخص‌های خطا سنجی فراوانی امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند. هیچ‌یک از این شاخص‌ها به طور مطلق بر دیگری برتری ندارد. معادلات به کار گرفته شده در مورد هر یک از شاخص‌های آماری خطا سنجی در این پژوهش به شرح زیر است:

۱- ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE):^۱

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۵)$$

که در این معادله و معادلاتی که در ادامه ذکر شده است، P_i مقادیر غلظت رسوب برآورد شده، O_i مقادیر غلظت رسوب اندازه‌گیری شده، i اندیس شماره داده‌ی غلظت و n تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده (برآورد شده) است. هر چه مقدار شاخص RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل از دقت بیشتری برخوردار خواهد بود.

۲- میانگین انحراف خطا (MBE):^۲

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \quad (۶)$$

در نهایت رسوب‌های موجود در هر نمونه توسط کاغذ صافی از آب جدا و پس از خشک شدن، جرم خالص آن‌ها توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم و حجم آب نیز توسط استوانه مدرج با دقت ۰/۰۱ لیتر اندازه‌گیری شد.

^۱. Root of Mean Square error

^۲. Mean of Bios Error

نیروی فرساینده ایجاد شده در اثر جریان آب به درون سامانه مکش آبی مکیده شدند. این نیرو در لحظه‌های ابتدایی ناشی از حرکت آب حفره‌ای بین ذرات رسوب است که کوتاه‌ترین مسیر را از لابه‌لای ذرات رسوبی طی می‌کند. پس از مدتی، سطح بستر رسوبی که در ابتدا مماس بر دهانه مکش بود، پایین رفته و از این پس بیشتر تنش برشی اعمال شده بر سطح رسوب در اثر جریان آب، در فاصله ایجاد شده میان بستر رسوبی و دهانه مکش، موجب فرسایش و تخلیه آن‌ها می‌گردد. با توسعه حفره آب شستگی در طول و عمق، جریان‌های گردابی شکل می‌گیرند. این جریان‌ها به تدریج جای جریان‌های مستقیم را گرفته و موجب اعمال تنش برشی و در نهایت فرسایش و حمل رسوب به داخل دهانه مکش می‌شدند. این گردابه‌ها که در طول زمان تعداد و قدرت آن‌ها متناوباً کم‌و زیاد می‌شد. با توسعه بیشتر حفره آب شستگی سرعت جریان عبوری از روی رسوب و در نتیجه تنش برشی اعمال شده به آن‌ها نیز کاهش می‌یابد. در نهایت تنش برشی اعمال شده به رسوب از تنش برشی آستانه حرکت آن‌ها کمتر شده و فرسایش رسوب توسط جریان آب به درون سامانه مکش آبی متوقف شده و حفره آب شستگی به تعادل می‌رسد.

در ابتدا محور این گردابه‌ها عمودی بوده ولی با گذشت زمان محور آن‌ها مایل شده و سبب برداشت رسوب از دیواره حفره می‌گردد. برداشت رسوب از دیواره حفره موجب برهم خوردن تعادل دیواره و ریزش مقداری از ذرات رسوبی به کف حفره می‌شد (شکل (۵)). همچنین، با گذشت زمان و افزایش فاصله میان دهانه مکش و بستر رسوبی، رسوب‌های جمع شده در کف حفره درشت‌دانه‌تر می‌شدند (شکل (۶)). این فرایند نشان می‌دهد که افزایش فاصله میان دهانه مکش و بستر رسوبی، موجب کاهش قدرت گردابه‌ها برای معلق سازی و نیروی مکش برای انتقال رسوب می‌شود؛ بنابراین غلظت رسوب خروجی کاهش می‌یابد.

میانگین انحراف خطا می‌تواند هر عددی را به خود اختصاص دهد. مقدار صفر نشانگر تطبیق کامل مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری می‌باشد. این شاخص نشان‌دهنده میزان انحراف معادله به سمت بیش برآورد و یا کم برآورد نمودن است.

۳- میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE):^۱

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (7)$$

هرچه مقدار شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد، معادله از دقت بیشتری برخوردار خواهد بود.

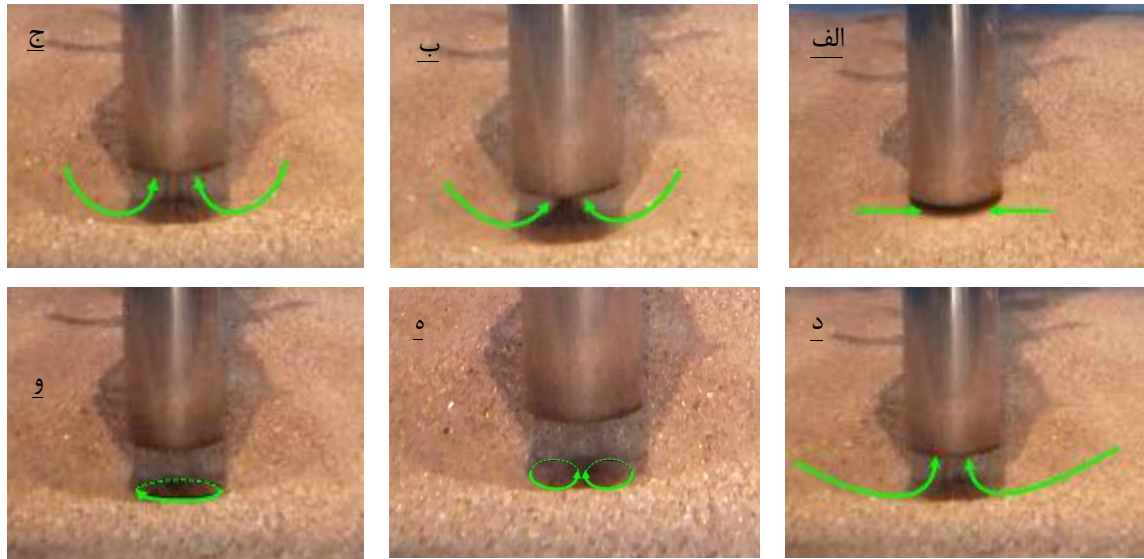
۴- ضریب تعیین (R^2):^۲

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2}} \right] \quad (8)$$

که در آن \bar{O}_i میانگین مقادیر رسوب اندازه‌گیری شده و \bar{P}_i میانگین مقادیر رسوب برآورد شده است. مقدار بهینه این شاخص آماری یک است، به عبارتی هرچه مقدار این شاخص به عدد یک نزدیک‌تر باشد معادله از صحت بیشتری برخوردار خواهد بود و نشان می‌دهد که رابطه بدست آمده صحیح‌تر است. برعکس هر چه این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده این است که رابطه استخراج شده از صحت کمتری برخوردار می‌باشد.

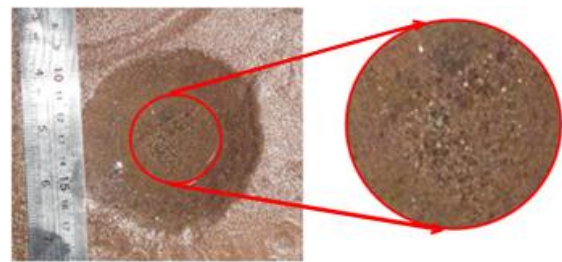
نتایج و بحث

بلافاصله پس از باز شدن شیر خروجی و برقراری جریان مشاهده شد که رسوب‌های مقابل دهانه مکش به دلیل



شکل (۵): مکش رسوب سامانه مکش آبی در زمان‌های: الف، آغاز آزمایش؛ ب، ۵ ثانیه؛ ج، ۱۵ ثانیه؛ د، ۲۰ ثانیه؛ ه، ۳۰ ثانیه؛ و ۴۰ ثانیه.

مکش در حرکت است. جریان مرئی شده در شکل‌های a-۷ و b-۷ نسبت به شکل c-۷ با پراکندگی کمتری وارد سامانه مکش آبی می‌شود؛ بنابراین، سرعت جریان در محدوده‌های مرئی شده در شکل‌های a-۷ و b-۷ بیشتر از قسمت تحتانی دهانه مکش است. بعلاوه، در جریان تحتانی ورودی به سامانه مکش آبی گردابه‌های نامنظمی ایجاد می‌شود. این جریان‌های گردابی بر اساس طبقه‌بندی ناس (۱۹۸۷) در دسته جریان‌های گردابی مستغرق قرار می‌گیرند. توزیع سرعت و فشار در جریان‌های گردابی مستغرق به این نحو است که در مرکز گردابه سرعت مماسی بیشینه و فشار کمینه است و با دور شدن از مرکز گردابه سرعت مماسی کاهش و فشار افزایش می‌یابد (تاکاهید، ۲۰۰۳).



شکل (۶) درشت‌دانه‌های بجا مانده در کف حفره آب شستگی

به‌منظور بررسی جریان ورودی به سامانه مکش آبی از تزریق محلول پرمنگنات پتاسیم در اطراف دهانه مکش استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، جریان ورودی به سامانه مکش آبی به سمت محور مرکزی دهانه



شکل (۷): جریان اطراف دهانه مکش؛ a، جریان مماس بر دهانه مکش؛ b، جریان میانی دهانه مکش و سطح رسوب؛ c، گردابه‌های جلوی دهانه مکش.

شکل (۸): اثر هد مؤثر بر غلظت رسوب جریان خروجی نسبت به زمان؛ h_1 : هد مؤثر؛ D : قطر لوله؛ α : زاویه دهانه مکش؛ p_w : دانسیته سیال؛ t : زمان تجمعی برداشت نمونه؛ Δt : بازه زمانی برداشت نمونه.

بررسی تأثیر زاویه دهانه مکش بر غلظت رسوب در جریان خروجی

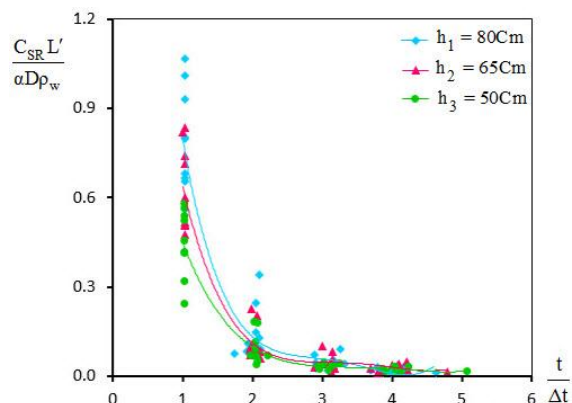
در نقاط نزدیک به دهانه مکش خطوط جریان به یکدیگر نزدیک می‌شوند که موجب افزایش سرعت جریان می‌گردد. از طرف دیگر با افزایش زاویه دهانه مکش نسبت به سطح افق، فاصله آن تا سطح رسوب کمتر می‌گردد؛ بنابراین، سرعت جریان عبوری از روی سطح رسوب بیشتر شده که موجب افزایش تنش برشی اعمال شده به سطح رسوب و حرکت آن‌ها به داخل لوله مکش می‌شود.

پس از شروع به کار سامانه مکش آبی، فقط در محدوده شعاع تأثیر آن به رسوب نیروی مکش اعمال می‌گردد و با دور شدن از دهانه مکش، این نیرو کم و نهایتاً صفر می‌شود. در حالتی که زاویه دهانه مکش نسبت به سطح افق ۹۰ درجه است، سطح مقطع آن به‌طور کامل مماس بر بستر رسوبی قرار می‌گیرد. در لحظه‌های ابتدایی عملیات ساکشن فاصله میان سطح رسوب و دهانه مکش کم است؛ بنابراین، غلظت رسوب در جریان زیاد است که با گذشت زمان و افزایش فاصله میان سطح رسوب و دهانه مکش از تأثیر نیروی مکش بر ذرات رسوبی کم شده و موجب کاهش غلظت رسوب جریان خروجی می‌شود. کاهش زاویه دهانه مکش نسبت به سطح افق موجب افزایش فاصله دهانه مکش با سطح رسوب و خطوط جریان عبوری از روی رسوب می‌گردد؛ بنابراین، کاهش زاویه دهانه مکش نسبت به سطح افق، موجب افت غلظت رسوب جریان خروجی می‌شود.

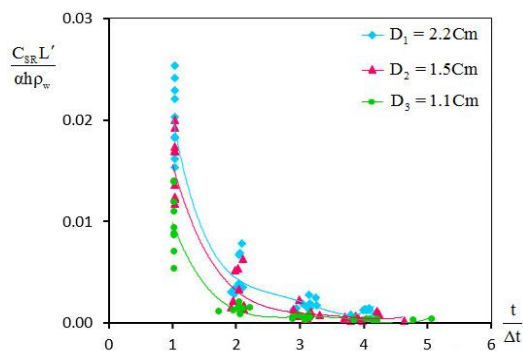
در شکل (۹) منحنی‌های α_1 ، α_2 و α_3 به ترتیب مربوط به زوایای ۹۰، ۶۰ و ۳۰ درجه می‌باشند. در این شکل محور افقی زمان بدون بعد $t/\Delta t$ را نشان می‌دهد و محور عمودی نیز $C_{SR} L^2 / h D p_w$ که شاخصی از غلظت است را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، به ازای قطر و هد مؤثر ثابت، افزایش زاویه دهانه مکش فقط در ثانیه‌های آغازین عملیات ساکشن منجر به افزایش غلظت رسوب جریان می‌شود؛ بنابراین، با گذشت زمان از آغاز عملیات ساکشن اختلاف غلظت رسوب در جریان خروجی

بررسی تأثیر هد مؤثر بر غلظت رسوب در جریان خروجی

با توجه به معادله برنولی با افزایش هد مؤثر سرعت جریان ورودی به لوله مکش بیشتر می‌شود. از طرفی افزایش سرعت منجر به افزایش تنش برشی وارد شده به سطح رسوب و فرسایش بیشتر آن‌ها می‌گردد. بعلاوه، افزایش هد مؤثر منجر به افزایش شعاع تأثیر سامانه مکش آبی شده و ذرات رسوبی را از فواصل دورتری به سمت دهانه مکش منتقل می‌کند، بدین ترتیب برداشت رسوب و غلظت رسوب خروجی بیشتر می‌شود. در شکل (۸) منحنی‌های h_1 ، h_2 و h_3 به ترتیب مربوط به هد مؤثر ۸۰، ۶۵ و ۵۰ سانتی‌متر می‌باشند. در این شکل محور افقی زمان بدون بعد $t/\Delta t$ را نشان می‌دهد و محور عمودی نیز $C_{SR} L^2 / \alpha D p_w$ که شاخصی از غلظت است را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، به ازای قطر، زاویه و دهانه مکش ثابت، افزایش هد مؤثر فقط در ثانیه‌های آغازین عملیات ساکشن رسوب منجر به افزایش غلظت می‌شود. پس از مدتی اختلاف غلظت رسوب جریان خروجی تحت هدهای مؤثر متفاوت کاهش می‌یابد و به صفر نزدیک می‌شود. برای مثال در حالتی که قطر لوله مکش ۲/۲ سانتی‌متر و زاویه دهانه مکش نسبت به افق ۹۰ درجه و هد مؤثر به ترتیب ۸۰، ۶۵ و ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد، غلظت رسوب جریان خروجی در ۱۰ ثانیه آغازین عملیات ساکشن به ترتیب ۹/۶۰، ۸/۶۵ و ۸/۳۰ گرم بر لیتر می‌شود. در مجموع مقایسه کمی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد، زمانی که هد مؤثر از ۵۰ به ۶۵ سانتی‌متر (۳۰ درصد افزایش هد مؤثر) و همچنین از مقدار ۵۰ به ۸۰ سانتی‌متر (۶۰ درصد افزایش هد مؤثر) افزایش می‌یابد، موجب شده غلظت رسوب جریان خروجی به ترتیب ۹/۴۸ و ۲۰/۹ درصد بیشتر شود.



در شکل ۱۰ منحنی‌های D_1 ، D_2 و D_3 به ترتیب مربوط به قطر ۲/۲، ۱/۵ و ۱/۱ سانتی‌متر است. در این شکل محور افقی زمان بدون بعد $t/\Delta t$ را نشان می‌دهد و محور عمودی نیز $C_{SR}L'/\alpha h p_w$ که شاخصی از غلظت است را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌کنید، به ازای هد مؤثر و زاویه دهانه مکش ثابت، افزایش قطر فقط در ثانیه‌های ابتدایی عملیات ساکشن منجر به افزایش غلظت رسوب در جریان می‌شود. با گذشت زمان از آغاز عملیات مکش اختلاف غلظت رسوب جریان خروجی تحت بارهای آبی متفاوت کاهش می‌یابد و نزدیک به صفر می‌شود. برای مثال در حالتی که هد مؤثر ۸۰ سانتی‌متر و زاویه دهانه مکش نسبت به سطح افق ۹۰ درجه و قطرهای مورد بررسی ۲/۲، ۱/۵ و ۱/۱ سانتی‌متر باشند، غلظت رسوب جریان خروجی در ۱۰ ثانیه آغازین عملیات مکش به ترتیب ۹/۶۰، ۷/۲۸ و ۹/۱۲ گرم بر لیتر می‌شود. در مجموع مقایسه کمی نتایج حاصل از اندازه‌گیری آزمایش‌ها نشان می‌دهد، هنگامی که قطر لوله مکش از ۱/۱ به ۱/۵ سانتی‌متر (۳۶/۴ درصد افزایش قطر) و از مقدار ۱/۱ به ۲/۲ سانتی‌متر (۱۰۰ درصد افزایش) افزایش می‌یابد، غلظت متوسط رسوب جریان خروجی به ترتیب ۶۳۵ و ۶۶۹ درصد بیشتر می‌شود.

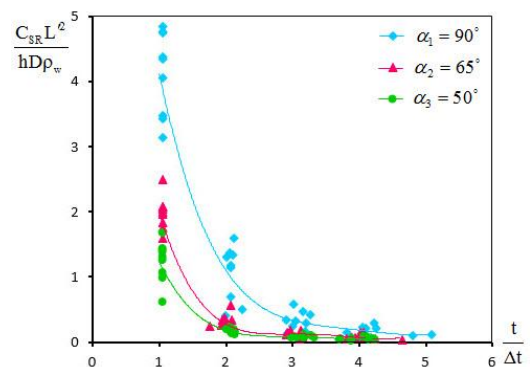


شکل (۱۰): اثر قطر لوله مکش بر غلظت رسوب جریان خروجی نسبت به زمان؛ D_i : قطر لوله؛ α : زاویه دهانه مکش؛ h : هد مؤثر؛ p_w : دانسیته سیال؛ t : زمان تجمعی برداشت نمونه؛ Δt : بازه زمانی برداشت نمونه.

رابطه بدون بعد برای تعیین غلظت رسوب جریان خروجی

به‌منظور بررسی ارتباط میان غلظت رسوب جریان خروجی و دیگر پارامترهای تأثیرگذار در مسئله مانند هد مؤثر، زاویه

تحت زوایای مختلف کاهش می‌یابد و نزدیک به صفر می‌شود. برای مثال درحالتی که قطر لوله مکش ۲/۲ سانتی‌متر و هد مؤثر ۸۰ سانتی‌متر و زوایای دهانه مکش نسبت به سطح افق ۹۰، ۶۰ و ۳۰ درجه می‌باشند، غلظت رسوب جریان خروجی در ۱۰ ثانیه ابتدایی عملیات ساکشن به ترتیب ۹/۶۰، ۵/۳۵ و ۳/۸۶ گرم بر لیتر می‌شود. در مجموع مقایسه کمی نتایج حاصل از اندازه‌گیری آزمایش‌ها نشان می‌دهد، همراه با افزایش زاویه دهانه مکش از ۳۰ به ۶۰ درجه (۱۰۰ درصد افزایش زاویه دهانه مکش) و همچنین از مقدار ۳۰ به ۹۰ درجه (۲۰۰ درصد افزایش زاویه دهانه مکش) موجب شده غلظت رسوب جریان خروجی به ترتیب ۴۲/۲ و ۲۰۳/۷ درصد افزایش یابد.



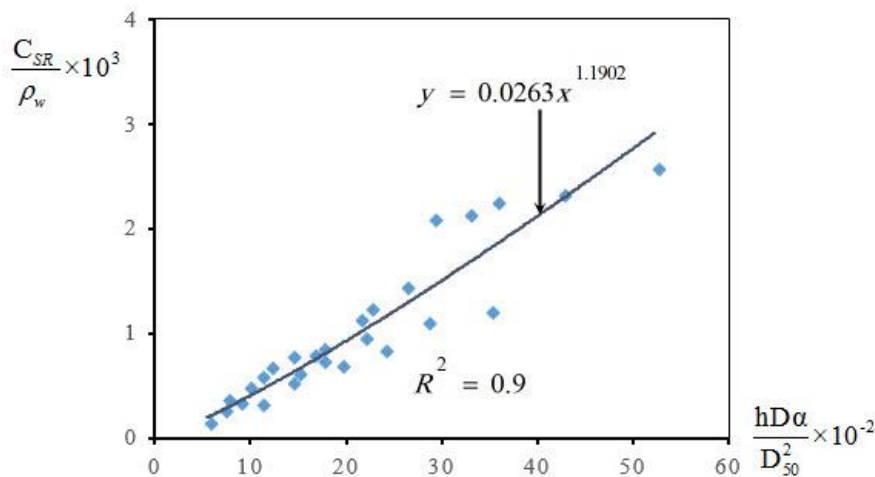
شکل (۹): اثر زاویه دهانه مکش بر غلظت رسوب جریان خروجی نسبت به زمان؛ α_i : زاویه دهانه مکش؛ D : قطر لوله؛ h : هد مؤثر؛ p_w : دانسیته سیال؛ t : زمان تجمعی برداشت نمونه؛ Δt : بازه زمانی برداشت نمونه.

بررسی تأثیر قطر لوله مکش بر غلظت رسوب در جریان خروجی

افت سرعت جریان درون لوله سامانه مکش آبی را می‌توان با استفاده از معادله دارسی-ویسباخ^۱ محاسبه کرد که در آن مقدار افت سرعت جریان با قطر لوله مکش (D) رابطه عکس دارد؛ بنابراین، افزایش قطر لوله مکش موجب کاهش افت درون سامانه مکش آبی و افزایش سرعت جریان عبوری از آن می‌شود. از طرفی افزایش سرعت جریان هم‌زمان منجر به افزایش دبی جریان و تنش برشی واردشده به رسوب و فرسایش بیشتر آن‌ها می‌شود؛ بنابراین، تأثیر افزایش سرعت بر تخلیه رسوب بیشتر از تخلیه آب بوده است.

^۱. Darcy-Weisbach

دهانه مکش نسبت به سطح افق و قطر لوله مکش معادله (۹) و شکل (۱۱) ارائه شده است. در این شکل محور افقی عدد بدون بعد $hD\alpha/D_{50}^2$ که شاخصی از هد مؤثر، قطر لوله و زاویه دهانه مکش می باشد را نشان می دهد و محور عمودی غلظت رسوب بدون بعد C_{SR}/ρ_w را نشان می دهد.



شکل (۱۱): رابطه بدون بعد غلظت رسوب خروجی (C_{SR}) با پارامترهای مؤثر: هد مؤثر (h)، قطر لوله مکش (D) و زاویه دهانه مکش (α)

هندسی هد مؤثر، زاویه دهانه مکش و قطر لوله مکش بر غلظت رسوب جریان خروجی بررسی شد. بر این اساس از سه هد مؤثر، سه زاویه دهانه مکش و سه قطر لوله مکش استفاده شد و غلظت جریان خروجی برای هر آزمایش برداشت شد. نتایج این آزمایش ها نشان داد که بزرگترین قطر لوله مکش، بیشترین حجم تخلیه رسوب را داشته است. همچنین، افزایش زاویه دهانه مکش منجر به افزایش غلظت رسوب خروجی و بهبود عملکرد آن شد. بعلاوه، با افزایش هد مؤثر حجم رسوب برداشت شده بیشتر شد. به عنوان نمونه در صورت افزایش قطر لوله مکش از ۱/۱ به ۲/۲ سانتی متر (۱۰۰ درصد افزایش) غلظت رسوب حدود ۶ برابر، با افزایش زاویه دهانه مکش از ۳۰° به ۹۰° (۲۰۰ درصد افزایش)، غلظت رسوب حدود ۲ برابر و با افزایش هد مؤثر از ۵۰ به ۸۰ سانتی متر (۶۰ درصد افزایش) غلظت رسوب حدود ۰/۲ برابر شد. مطابق با نتایج ارائه شده تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر غلظت جریان خروجی از زیاد به کم برابر است با قطر لوله مکش، زاویه دهانه مکش و هد مؤثر.

در نهایت رابطه بی بعدی برای محاسبه غلظت رسوب خروجی با توجه به متغیرهای مؤثر ارائه گردید. رابطه ارائه شده فقط برای شرایط آزمایشگاهی حاضر مورد تأیید است. پیشنهاد می شود که آزمایش های این پژوهش در مخازن و شرایط

$$\frac{C_{SR}}{\rho_w} = 0.0263 \left(\frac{hD\alpha}{D_{50}^2} \right)^{1.1902} \quad (9)$$

جدول (۲): ارزیابی دقت رابطه ۹ بر اساس شاخص های آماری

R^2	MARE	MBE	RMSE
۰/۸۸	۲/۰۳	۷۸/۱	۳۵۳/۴

شاخص های آماری محاسبه شده در جدول (۲) نشان می دهد، رابطه (۹) دقت قابل قبولی برای شرایط آزمایشگاهی پژوهش حاضر دارد.

نتیجه گیری

سامانه مکش آبی تخلیه رسوب، یک روش مؤثر برای رسوب زدایی دریاچه سدها می باشد که در دهه اخیر مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. در حال حاضر تحقیقات روی عملکرد این سامانه بسیار محدود است. در این پژوهش آزمایشگاهی با استفاده از یک مدل فیزیکی، تأثیر سه پارامتر

cavitation in a pump intake by means of PIV. Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan.

14- Tao, Y., Li, C., Min, X., Min, Z. (2012). Siphon Pipeline Resistance Characteristic Research. *Procedia Engineering*, 28, 99 – 104.

15- Ullah, S. M. Mazurek, N. Rajaratnam, S. (2005). Siphon Removal of Cohesionless Materials. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 131(3), 115-122.

آزمایشگاهی مختلف بررسی شود تا کارایی نتایج و رابطه ارائه شده در مخازن سدها تأیید شود.

منابع

۱- پیشگر، ر. ایوب زاده، ع. صانعی، م. قدسیان، م. (۱۳۹۴). بررسی آزمایشگاهی اثر آرایش روزنه‌های مکش رسوب بر عملکرد روش لوله دفن شونده در لایروبی مخازن. *هیدرولیک*، ۱۰(۱)، ۱-۱۲.

۲- مقصودلوئزاد، ع. احمدی، ا. صانعی، م. امامقلی زاده، ص. (۱۳۹۴). تأثیر سرعت در لوله مکش بر راندمان روش مکش آبی. *کنفرانس ملی مهندسی معماری، عمران و توسعه شهری*.

۳- مددی، م. ر. رحیم‌پور، م. قادری، ک. (۱۳۹۵). افزایش راندمان رسوب‌شویی تحت فشار مخازن با اتصال سازه PBC به دریچه تخلیه رسوب. *مجله تحقیقات کاربردی مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*، ۱۷(۶۶)، ۷۱-۸۶.

4- Asiaban, P. S. Kouchakzadeh, S. Asiaban. (2016). Enhanced hydrosuction performance for cohesive sediment removal in low-head reservoirs. *Journal of Ain Shams Engineering*, Article in press.

5- Chen, S.C., Wang, S.C., Wu, c.h. (2010). Sediment removal efficiency of siphon dredging with wedge-type suction head and float tank. *Sediment Research*, 2(25), 149-160.

6- Emamgholizadeh, S. Fathi-Moghdam, m. (2014). Pressure Flushing of Cohesive Sediment in Large Dam Reservoirs. *Hydrologic Engineering*, 19(4), 674-681.

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

8- 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).

9- Knauss, J. (1987). Swirling Flow Problems at Intakes, *Hydraulic Structures Design Manual*. A.A. Balkema, Rotterdam.

10- Morris, G.L. Fan, J. (1977). Reservoir sedimentation hand book. McGraw Hill book co, New York

11- Shrestha, s. h. (2012). Application of Hydrosuction Sediment Removal System (HSRS) on Peaking Ponds. *Hydro Nepal: Journal of Water, Energy and Environment* (11), 43-48.

12- Rehbinder, G. (1994). Sediment removal with a siphon at critical flux. *Journal of hydraulic research*, 32(6), 845-860.

13- Takahide, N. Toshiyuki, S. Tomoyoshi, O. (2003). Measurement of the flow around the submerged vortex

Laboratory study of effective factors on hydrosuction efficiency

Atefeh Moghbeli^۱
Mohammad Javad Khanjani^۲
SeyedReza HashemiNejad^۳

Abstract

Dam reservoirs sediment desilting is accomplished by various methods such as hydrosuction. Precise design of hydrosuction system resulting in both higher sediment removal efficiency and lower reservoir water wastes. Therefore, comprehensive experimental study of sediment desilting process has fundamental importance. The suction pipe diameter, the angle of suction pipe relative to the bed surface, and the effective head (head difference between reservoir water level and system outlet) are the main parameters which influence the hydrosuction efficiency. A reservoir physical model with hydrosuction system model were designed and constructed to investigate these factors effect on outflow density. A three level full factorial design (3^3) was utilized to design and analysis the experiments. Results show that the outflow got denser by increasing the amount of these parameters. The effective head increases from 50 cm to 80 cm caused the outflow density increased 20.9%. Moreover, the increase of the suction pipe diameter and its angle from low level to their high level, resulted in 669% and 203.7% density increase of the outflow, respectively

Key word:

Desilting of reservoirs, Hydroduction system efficiency, Output flow concentration, Physical model, full factorial design

۱.* M.Sc. of Water Structures, Faculty of Water Engineering, Department of Agriculture, University of Shahid-Bahonar Kerman, Iran.

۲. Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Shahid-Bahonar University, Kerman.

۳. PhD Candidate, Hydraulics Structures, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Shahid-Bahonar University, Kerman.