



بررسی آزمایشگاهی فرآیند ته‌نشینی رسوبات معلق در مخزن سد کرخه

میلاذ خواستار بروجنی^۱، حسین صمدی بروجنی^۲، روح الله فتاحی^۳، مرضیه قاسمی^۴، آرزو نقش‌بندی^۴، مهرداد حیدری^۵

^۱ دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم مهندسی آب، خراسان رضوی، ایران

^۲ دانشگاه شهرکرد، دانشکده کشاورزی، چهارمحال و بختیاری، ایران

^۳ مرکز تحقیقات منابع آب دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران

^۴ سازمان آب و برق خوزستان، خوزستان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۷ مهرماه ۱۳۹۶

بازنگری: ۲۹ فروردین ماه ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۶ اردیبهشت ماه ۱۳۹۷

ارائه آنلاین: ۲۱ خردادماه ۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

تنش برشی بحرانی

نرخ ته‌نشینی

رسوب‌گذاری

سرعت غیر رسوبگذار

سد کرخه

چکیده: یکی از پیش نیازهای اصلی مدیریت رسوب در مخازن سدها، شناخت ویژگی و پارامترهای موثر ته‌نشینی رسوبات در مخزن سد می‌باشد. در این تحقیق به بررسی فرآیند ته‌نشینی رسوبات معلق سد کرخه پرداخته شده است. به همین منظور پس از نمونه برداری از رسوبات مخزن سد کرخه، آزمایش‌های ته‌نشینی در فلوم دایره‌ای آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد با هدف تعیین شرایط هیدرولیکی مناسب به منظور رسوب‌شویی مخزن این سد انجام گرفت. آزمایش‌ها در غلظت‌های اولیه ۵ و ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر انجام شد و تنش برشی آستانه و ته‌نشینی کامل، سرعت غیر رسوبگذار و نرخ ته‌نشینی رسوبات مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس تنش برشی آستانه ته‌نشینی معادل ۰/۱ نیوتن بر متر مربع به دست آمد. هم‌چنین مشخص شد در حالتی که سرعت جریان بیشتر از ۰/۶۱ متر بر ثانیه باشد، رسوبات به صورت معلق باقی مانده و ته‌نشینی نمی‌شوند که در این شرایط، تنش برشی معادل ۲/۵۵ نیوتن بر متر مربع و عدد فرود جریان برابر ۰/۴۳ به دست آمد. هم‌چنین نتایج نشان داد در غلظت‌های رسوب بیشتر، افزایش تنش برشی جریان در کاهش نرخ ته‌نشینی تاثیر بیشتری دارد.

۱- مقدمه

سیستم‌های آبی، به دلیل سطح ویژه‌ی بالا می‌توانند مواد آلاینده و فلزات سنگین را نیز منتقل کنند که این موضوع بر کیفیت آب مخازن بسیار تاثیر گذار است [۲]. هم‌چنین ته‌نشینی رسوبات چسبنده در سدها موجب کاهش حجم ذخیره آن‌ها شده که می‌تواند مشکلات بسیاری را برای تجهیزات نیروگاه و شبکه‌های آبیاری پایین دست به همراه داشته باشد. رسوبات ریزدانه معلق با اندازه کوچک‌تر از ۲ میکرون دارای خاصیت چسبندگی هستند و به طور کلی رُس، سیلت، مواد آلی را شامل می‌شوند. کانی‌های رُسی (سیلیکا، آلومینا، مونت‌موریونیت، ایلیت و کائولونیت)^۲ کوچک‌ترین جز جامد در رسوبات چسبنده است که نقش عمده‌ای در تعیین خصوصیات این نوع رسوبات به همراه مواد آلی دارد [۳]. سطح تماس رسوبات چسبنده نسبت به جرم آن‌ها بیشتر است که این موضوع موجب ظرفیت بالای تبادل کاتیونی این ذرات می‌شود. وجود ذرات کاتیون و آنیون در رسوبات ریزدانه به همراه خاصیت چسبندگی آن‌ها موجب برخورد ذرات کوچک‌تر به یکدیگر و تشکیل توده‌های بزرگ‌تر می‌شود. به این عمل در اصطلاح هم‌آوری (فلوکوله‌شدن)^۳ می‌گویند. در حقیقت هم‌آوری شدن روند تجمع ذرات کوچک‌تر و تبدیل به یک ذره بزرگ‌تر

بیشتر تمدن‌های باستانی به منظور تامین آب و کشتیرانی در کنار رودخانه‌ها شکل گرفته‌اند. وقوع خشک‌سالی‌ها و به‌دنبال آن کمبود آب سبب احداث بندها و سدها بر روی رودخانه‌ها شده است. سدهایی که در مسیر رودخانه ساخته می‌شوند بر خصوصیات جریان آن تاثیر گذاشته و باعث می‌شوند که بخشی از رسوبات در حال انتقال در مخزن سد ته‌نشین شود. به طور کلی رسوباتی که همراه با آب حرکت می‌کنند به سه بخش بار بستر، بار معلق و بار شسته تقسیم می‌شوند. بار بستر با توجه به خصوصیات فیزیکی معمولاً در ابتدای مخازن ته‌نشین می‌شوند اما رسوبات ریزدانه به صورت معلق تحت پدیده جریان غلیظ^۱ تا نزدیکی بدنه سد حرکت کرده و سپس ته‌نشین می‌شوند [۱]. بدین ترتیب عمده رسوبات ته‌نشین شده پشت بدنه سد از نوع ریزدانه و چسبنده هستند که بایستی در زمان تخلیه رسوبات از طریق دریچه‌های تحتانی سد، این موضوع را مد نظر قرار داد.

ورود رسوبات ریزدانه به سدهای مخزنی که تامین کننده آب شرب هستند بسیار با اهمیت است زیرا این ذرات علاوه بر تغییر در زیست‌بوم

2 Silica· Alumina· Montmorillonite· Illite· Kaolinite

3 Flocculation

1 Turbidity Current

Hossein.Samadi-Boroujeni@uts.edu.au: نویسندگان مکاتبات

در این رابطه τ : تنش برشی بستر، $\tau_{d,full}$: تنش برشی کامل برای ته نشینی کامل است.

ته نشینی جزئی زمانی که تنش برشی کف بزرگتر از تنش برشی بحرانی برای ته نشینی کامل باشد، اتفاق می افتد. مقدار تنش برشی بحرانی، برای ته نشینی جزئی کوچک می باشد. در محدوده تنش برشی بستر، توده های نسبتاً قوی ته نشین شده و توده های ضعیف به طور معلق باقی می مانند. ته نشینی جزئی از رابطه ۳ که حالت اصلاح شده رابطه ی نرخ ته نشینی کرون [۶] است و برای حالت بروز تعادل بین بستر و مخلوط معلق آب و رسوب قابل کاربرد است به دست می آید [۱]. در این رابطه c_{eq} غلظت تعادلی و دیگر پارامترها مشابه روابط قبلی است.

$$Q_d = P_d \omega (c - c_{eq}) \quad , \quad \text{for } \tau_{d,full} < \tau < \tau_{d,part} \quad (3)$$

$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,part}} \quad , \quad \tau_c \leq \tau \leq \tau_{d,part} \quad (4)$$

در حال حاضر، تعیین تنش برشی بحرانی برای ته نشینی کامل و جزئی قابل پیش بینی و مسلم نمی باشد. اما باید خاطر نشان کرد که دقت در مدل های ته نشینی کاملاً وابسته به مقدار صحیح آن ها است. بنابراین، زمانی که مقدار واقعی تنش برشی بحرانی برای ته نشینی کامل و جزئی نامعلوم است، ابتدا باید پارامتر برای تعیین دبی ته نشینی کالیبره شود. آزمایش های بسیاری برای تعیین مقدار تنش برشی بحرانی برای ته نشینی کامل رسوبات چسبنده انجام شده است. تنش برشی بحرانی دارای مقدار کوچکی است و به طور کلی مقدار ۰/۵ تا ۰/۱ نیوتن بر متر مربع در آزمایش ها به دست آمده است [۷].

کرون [۶]، با انجام یک سری آزمایش در فلوم مستقیم مقدار تنش برشی بحرانی را برای ته نشینی کامل، تعیین نمود. این محقق برای رسوبات خلیج سان فرانسیسکو مقادیر زیر را به دست آورد.

$$\tau_{(d,full)} = 0.06 \frac{N}{m^2} \quad \text{for } c < 0.3 \quad \frac{g}{l}; \quad \tau_{(d,full)} = 0.078 \frac{N}{m^2} \quad \text{for } c < 0.3 - 10 \quad \frac{g}{l}$$

مهتا و پارتندیس^۲ [۸] مقدار تنش برشی ۰/۱۵ نیوتن بر متر مربع، برای رس کائولونیت در آب مقطر به دست آوردند [۱]. هم چنین در آزمایش های کریشناپان^۳ و استفان [۹] مقدار تنش برشی بحرانی ته نشینی برای رسوبات رودخانه آتاباسکا^۴ ۰/۱۰ نیوتن بر متر مربع به دست آمد.

میلبورن و کریشناپان^۵ [۷] دریافتند که رسوبات رودخانه ها با تنش برشی بزرگتر از ۰/۴ نیوتن بر متر مربع به صورت معلق باقی می مانند. مائ^۶ و همکاران [۱۰] نیز با انجام آزمایش هایی در فلوم دوار

(فلوک) است که توزیع اندازه ذرات در ستون آب راتحت تاثیر قرار می دهد [۴]. نرخ همآوری ذرات وابسته به تنش برشی جریان، غلظت ذرات، سرعت سقوط، شوری، یون های محلول، دما و فرآیندهای بیولوژیکی است [۲]. فرآیندهای موثر در انتقال رسوبات ریزدانه شامل ته نشینی، تحکیم و فرسایش می شود که عمدتاً از طریق مطالعات کنترل شده و دقیق آزمایشگاهی در فلوم ها مورد بررسی قرار می گیرد [۵].

فرآیند ته نشینی رسوبات ریزدانه و درشت دانه کاملاً متفاوت است. در رسوبات غیر چسبنده زمانی که تنش برشی جریان از تنش برشی بحرانی (نقطه ای که حرکت ذرات اتفاق می افتد) بزرگتر باشد، فرسایش و ته نشینی هم زمان اتفاق می افتد. در شرایط دائمی، زمانی که تنش برشی بستر برابر با تنش برشی بحرانی باشد، نرخ ته نشینی و فرسایش برابر است. این در حالی است که فرسایش و رسوب گذاری برای رسوبات چسبنده در هیچ تنش برشی نمی تواند به طور هم زمان اتفاق بیفتد. دلیل این امر این است که زمانی که ذرات چسبنده ته نشینی می شوند، فرآیندهای الکتروشمیایی و بیولوژیکی موجب اتصال این ذرات به بستر می شود. بنابراین تنش برشی بزرگتری برای انتقال مجدد این ذرات نسبت به زمانی که ته نشین شده اند نیاز است، چرا که علاوه بر غلبه بر جرم ذرات جهت انتقال و دوباره معلق شدن باید بر نیروی چسبندگی نیز غلبه کند. به همین دلیل رسوبات چسبنده دارای دو تنش برشی بحرانی مجزا، یکی برای رسوب گذاری و دیگری برای فرسایش هستند [۴].

بر این اساس دو نوع ته نشینی کامل و جزئی، برای رسوب چسبنده تعریف می شود. زمانی که تنش برشی بستر از تنش برشی بحرانی کوچکتر باشد، ته نشینی کامل صورت می گیرد و تمام ذرات رسوبی و توده ها ته نشین می شوند. رابطه ۱ موسوم به رابطه ته نشینی کرون^۱ [۶] به عنوان یکی از روابط پایه برای محاسبه نرخ ته نشینی است و در بیشتر مطالعات مورد استفاده قرار می گیرد.

$$Q_d = P_d \omega c \quad , \quad \text{for } \tau \leq \tau_{d,full} \quad (1)$$

در این رابطه Q_d : نرخ ته نشینی رسوب، P_d : احتمال ته نشینی، ω : سرعت سقوط توده ها و c : غلظت رسوبات چسبنده معلق است.

پارامتر P_d در واقع احتمال چسبیدن ذرات به بستر هستند که همراه با جریان جابه جا نمی شوند. بخشی از این رسوبات چسبنده در ناحیه نزدیک بستر نمی تواند در برابر تنش برشی بزرگ در ناحیه مشترک آب و بستر مقاومت کند و به سمت بالا حرکت کرده و به صورت معلق در می آید. احتمال ته نشینی از رابطه ۲ به دست می آید.

$$P_d = \frac{1 - \tau}{\tau_{d,full}} \quad , \quad \text{for } \tau \leq \tau_d \quad (2)$$

2 Metha and Partheniades

3 Krishnappan

4 Athabasca

5 Milburna and Krishnappan

6 Maa

1 Krone

[۱۹]، میلیورن و کریشناپان [۷]، پارتندیس و همکاران [۲۰]، شنگ^۷ [۲۱]، مهتا و پارتندیس [۸]، فوکودا و لیک^۸ [۲۲]، خواستار و همکاران [۱۱] و دیگر موارد را نام برد.

هدف از این تحقیق بررسی آزمایشگاهی فرآیند ته‌نشینی رسوبات ریزدانه مخزن سد کرخه با استفاده از یک فلوم دایره‌ای است. چرا که همانطور که پیش از این بیان شد فرآیند ته‌نشینی رسوبات ریزدانه در مخازن از مهم‌ترین مسائل در بهره‌برداری و نگهداری سدها و شبکه‌های آبیاری پایین دست آن محسوب می‌شود. از این رو آگاهی از پارامترهای ته‌نشینی رسوبات می‌تواند در مدیریت جریان‌های سیلابی و جریان‌های غلیظ برای خروج رسوبات از مخزن و هم‌چنین طراحی کانال‌های پایین دست به صورت غیررسوب‌گذار با اهمیت باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

سد کرخه با ارتفاع ۱۲۷ متر از پی در ۲۲ کیلومتری شمال غربی شهرستان اندیمشک در استان خوزستان و بر روی رودخانه کرخه احداث شده است. این سد با تراز تاج ۲۳۴ متر از سطح دریا و طول تاج ۳۰۳۰ متر از لحاظ حجم بدنه، بزرگ‌ترین سد تاریخ ایران محسوب می‌شود که با حجم مخزن ۷ میلیارد و ۳۰۰ میلیون مترمکعب، بزرگ‌ترین دریاچه مصنوعی ایران را با طول ۶۰ کیلومتر پدید آورده است.

حوضه آبریز کرخه با مختصات جغرافیایی بین ۴۶ درجه و ۶ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۶ دقیقه عرض شمالی، یکی از زیرحوضه‌های بزرگ و مهم کشور محسوب می‌شود. این حوضه به لحاظ تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی جزئی از حوضه خلیج فارس به شمار می‌رود که از شمال به حوضه رودخانه‌های سیروان، قزل اوزن و قره‌چای و از مغرب به حوضه رودخانه‌های مرزی ایران و عراق، از مشرق به رودخانه دز محدود می‌شود و از جنوب به قسمتی از مرز غربی کشور محدود می‌شود. مساحت این حوضه در خاک ایران حدود ۵۰۷۶۴ کیلومتر مربع است که ۴۲۱۷۵ کیلومتر مربع در بالادست سد کرخه و ۸۵۸۹ کیلومتر مربع در پایین دست سد قرار دارد. هم‌چنین از کل حوضه کرخه حدود ۲۷۶۴۵ کیلومتر مربع از آن در مناطق کوهستانی و حدود ۲۳۱۱۹ کیلومتر مربع آن را دشت‌ها، که عموماً در بخش‌های شمالی و جنوبی قرار دارند، می‌پوشانند [۲۳].

۲-۲- رسوبات

نمونه‌برداری رسوب با استفاده از دستگاه گرب^۹ در چهار نقطه واقع

تنش برشی حداقل برای جلوگیری از ته‌نشینی رسوبات چسبنده از نوع کائولونیت را ۰/۸۳ نیوتن بر مترمربع به دست آوردند.

خواستار بروجنی و همکاران^۱ [۱۱] با بررسی تاثیر پساب تصفیه شده شهری بر فرآیند ته‌نشینی رسوبات چسبنده با استفاده از فلوم دایره‌ای نشان دادند به طور متوسط پساب سبب افزایش ۳۰٪ میزان ته‌نشینی رسوبات می‌شود و درصد‌های مختلف پساب تقریباً نقش یکسانی در میزان ته‌نشینی رسوبات دارند. این محققان نشان دادند پساب تصفیه شده شهری تنش برشی آستانه و ته‌نشینی کامل رسوبات را به ترتیب ۶ و ۳۷ درصد افزایش می‌دهد.

وجدانی و قمشی [۱۲] به بررسی پدیده فرسایش و تنش برشی بحرانی فرسایش رسوبات چسبنده در شش کانال آبیاری در خوزستان پرداختند. نتایج آزمایشگاهی این محققان نشان داد تنش برشی بحرانی فرسایش رسوبات کانال‌های مورد مطالعه بین ۰/۹۶ تا ۲/۳ نیوتن بر مترمربع برای منطقه هندیمان متغیر است.

مهتا و همکاران [۱۳] پس از کرون [۶]، یک سری آزمایش مشابه در کانال مستقیم انجام دادند. این محققین دریافتند که ته‌نشینی کامل وابسته به طول کانال است [۱۴]. از این رو محققین بسیاری برای حل این مشکل و رفع این محدودیت اقدام به ساخت فلوم‌های دایره‌ای نموده‌اند و با چرخش این فلوم‌ها، تنش برشی و سرعت مورد نیاز را به وجود آورده‌اند. در فلوم دایره‌ای چرخش درپوش و فلوم به دور خودشان موجب ایجاد جریان می‌شود و احتیاجی به پمپ برای ایجاد جریان نیست. این جایگزینی تضمین خواهد کرد که ذرات به هم چسبیده رسوبات چسبنده، به وسیله عامل خارجی یعنی پمپ از هم جدا نخواهند شد و تنها تنش برشی جریان بر آن اثر خواهد گذاشت. با چرخش فلوم و درپوش در جهت مخالف یکدیگر جریان‌های ثانویه و نیروی گریز از مرکز حاصل از چرخش فلوم به حداقل می‌رسد، که به موجب این مزیت، جریان تولید شده در داخل فلوم به خوبی گسترش یافته و سبب توزیع یکنواخت تنش برشی در جهت جریان می‌شود.

پارتندیس^۲ و همکاران [۱۵] اولین کسانی بودند که از فلوم دایره‌ای برای مطالعه رسوبات چسبنده استفاده کردند. محققان زیادی با استفاده از این نوع فلوم به بررسی رسوبات چسبنده پرداختند که از این جمله می‌توان کوفالا^۳ و همکاران [۱۶]، لائو و دروپا^۴ [۱۷]، ما و همکاران [۱۰]، کریشناپان [۴]، کلوتیر^۵ و همکاران [۱۸]، هارالمپیدس^۶ و همکاران

1 Khaštar Boroujeni

2 Partheniades

3 Cofalla

4 Droppo

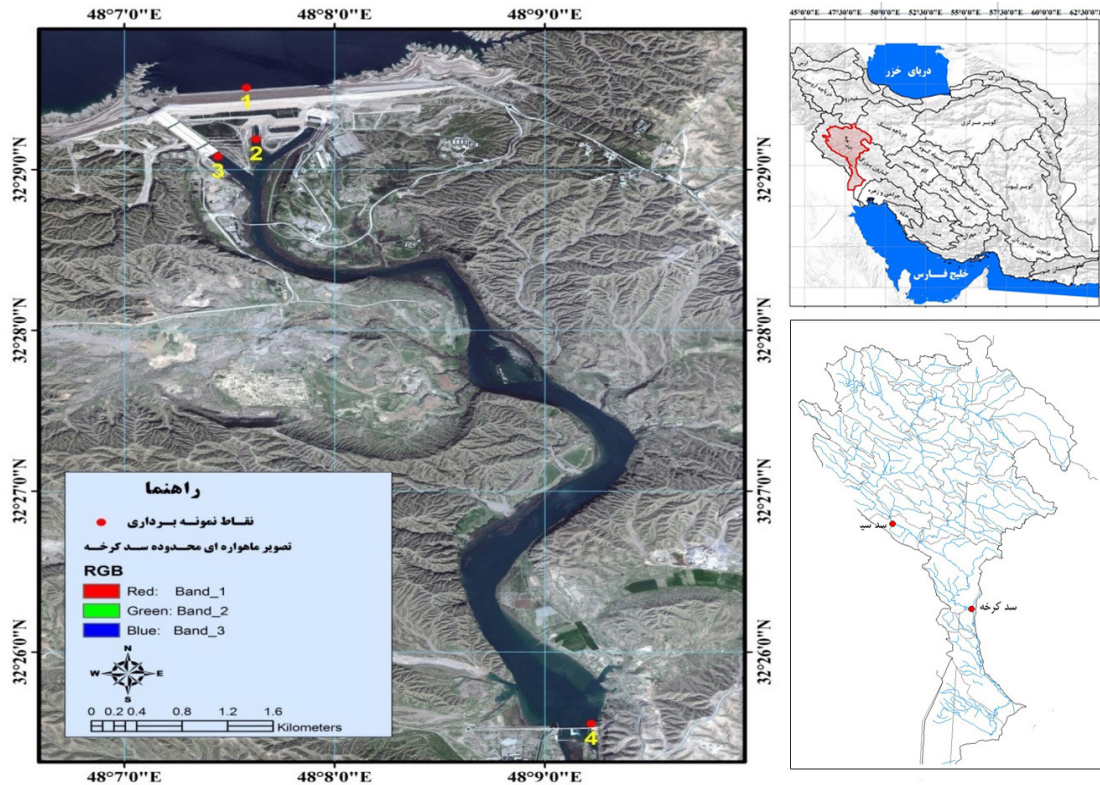
5 Cloutier

6 Haralampides

7 Sheng

8 Fukuda and Lick

9 Grab



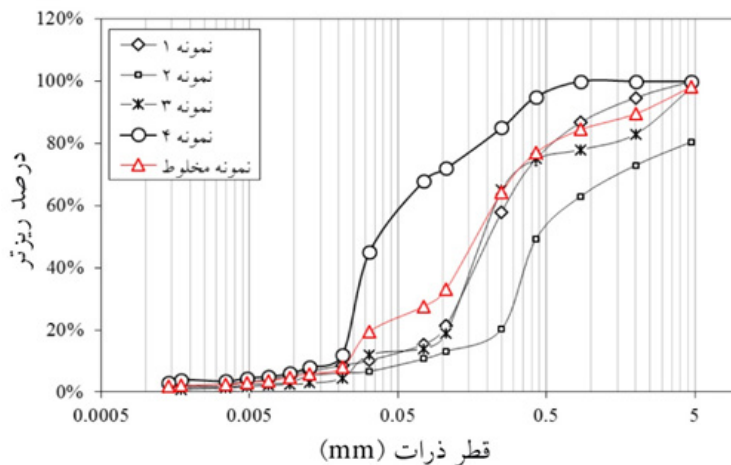
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
location of the Studied Area

حل و سپس از الک شماره ۲۰۰ استاندارد ASTM عبور داده شد. شکل ۲ منحنی دانه بندی رسوبات ریزدانه سد کرخه را نشان می دهد. تعیین حدود روانی، خمیری و شاخص خمیری برای رسوبات سد کرخه با انجام آزمایش حدود اتربرگ تعیین شد که نتایج شان داد این رسوبات فاقد حد روانی، خمیری و شاخص خمیری هستند.

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده

به منظور بررسی فرآیند ته نشینی رسوبات سد کرخه از فلوم

در مخزن سد، پایین دست سریز، خروجی دریاچه های تحتانی و پشت دریاچه تخلیه رسوب سد تنظیمی انجام شد. با توجه به این که رسوبات برداشت شده از سایت های مختلف هر کدام به نحوی معرف رسوبات مخزن سد کرخه می باشند؛ از نمونه مخلوط به منظور انجام آزمایش های اصلی استفاده شد. موقعیت جغرافیایی محل برداشت نمونه رسوبات در شکل ۱ قابل مشاهده است. با توجه به هدف تحقیق، در ابتدا به منظور جداسازی رسوبات ریزدانه، نمونه های رسوبی به صورت مجزا در آب



شکل ۲: منحنی دانه بندی رسوبات تخلیه شده از دریاچه های مخزن سد کرخه
Sediment Gradation Curve – Sediments Sampled from the Gates of the Karkheh dam

بچرخند و نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم ۱/۱ باشد؛ پروفیل سرعت در این فلوم مشابه کانال های باز و به صورت لگاریتمی است. هم چنین این محققین نشان دادند در این حالت توزیع تنش برشی در عرض فلوم رامی توان به صورت یکنواخت در نظر گرفت و بر این اساس می توان نتایج به دست آمده از فلوم دایره ای را به کانال های مستقیم تعمیم داد. بر اساس این تحقیق ارتباط سرعت متوسط و تنش برشی جریان با مجموع سرعت چرخش فلوم و درپوش به شرح روابط ۵ و ۶ است.

$$V = 0.2085 \ln(\omega) - 0.0556 \quad R^2 = 0.98 \quad (5)$$

$$\tau = 0.0254 \omega^{1.1777} \quad R^2 = 0.99 \quad (6)$$

در رابطه های بالا V : سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)، τ : تنش برشی جریان (نیوتن بر متر مربع) و ω : مجموع سرعت چرخشی رینگ و فلوم (دور بر دقیقه) است.

۳-۲- طراحی آزمایش ها

آزمایش ها در سه غلظت رسوب ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر و پنج سرعت چرخش درپوش و فلوم انجام شد. به منظور تعیین سرعت های چرخش فلوم و درپوش آزمایش های اولیه به نحوی صورت گرفت که برای غلظت های کمینه و بیشینه، سرعتی که ۸۰٪ رسوبات معلق ته نشین شدند به عنوان سرعت کمینه و سرعتی که تقریباً ۸۰٪ رسوبات به صورت معلق باقی ماندند، به عنوان سرعت بیشینه انتخاب شد. سرعت های دیگر بین سرعت کمینه و بیشینه در نظر گرفته شد. با توجه به سرعت های به دست آمده و رابطه های ۵ و ۶ سرعت و تنش برشی آزمایش ها به دست آمد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

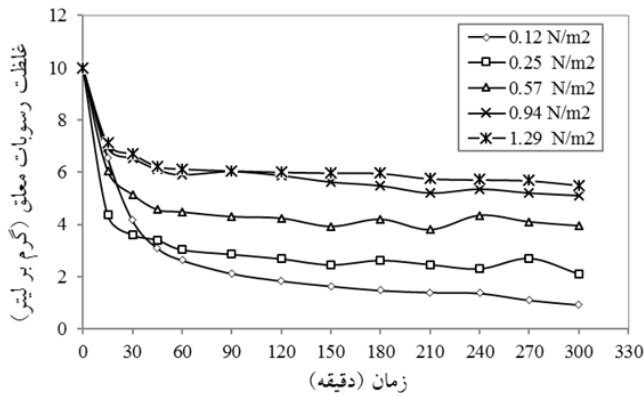
در ادامه فلوم دایره ای برای غلظت های مورد نظر تا ارتفاع ۲۰ سانتی متری با استفاده از مخلوط آب و رسوب پر شد. برای کامل مخلوط شدن آب رسوب و خرد شدن توده های رسوبی، فلوم و درپوش در جهت مخالف یکدیگر به مدت ۳۰ دقیقه با بیشترین سرعت (مجموع دور فلوم و درپوش ۳۱ دور بر دقیقه)، که تنش برشی برابر با ۱۱/۲ نیوتن بر متر مربع ایجاد می کند، به گردش درآمد. بر اساس تحقیقات کرون [۶]، در تنش برشی ۲/۲ نیوتن بر متر مربع، هیچ فلوکی در مقابل تنش برشی جریان مقاومت نکرده و تمام ذرات از یکدیگر مجزا خواهند شد [۲۵]. کریشناپان [۴]، هارلمپایدس و همکاران [۱۹] و اسکافیل و کریشناپان [۲۶] در تحقیقات خود پیرامون رسوبات ریزانه با استفاده از فلوم دوار دریافتند با چرخش فلوم و درپوش با بیشترین سرعت (۶/۰ نیوتن بر متر مربع) ۲۰ دقیقه زمان برای معلق شدن کامل رسوبات کافی است.

دایره ای موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد استفاده شد. قطر داخلی، خارجی و متوسط این فلوم به ترتیب ۱/۳، ۱/۹ و ۱/۶ متر می باشد که از ورق گالوانیزه با پنجره های پلکسی گلس ساخته شده است. درپوش از جنس پلکسی گلس با قطر ۱/۶ متر در داخل فلوم بگونه ای طراحی شده که از دیواره های فلوم دو سانتی متر فاصله دارد. ۱۶ عدد شیر نمونه گیری در چهار موقعیت مختلف فلوم و در فواصل ۵/۳، ۱۰/۵، ۱۸/۳ و ۲۵ سانتی متر از کف جهت سنجش غلظت مواد معلق در ستون آب، تعبیه شده است. فلوم دارای دو الکتروموتور مجزا برای چرخش فلوم و درپوش است که قابلیت حرکت در جهت های مختلف و خلاف یکدیگر را فراهم نموده است. شکل ۳ قسمت های مختلف این فلوم را نشان می دهد.



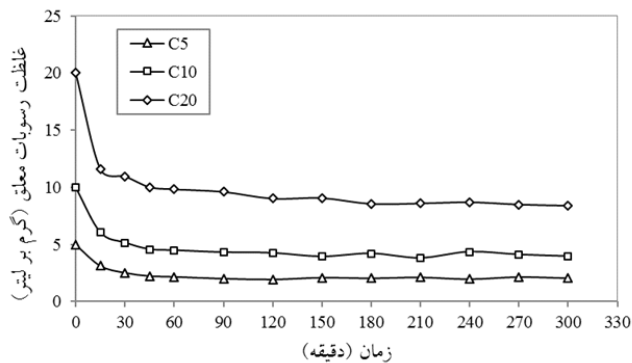
شکل ۳: اجزای فلوم دایره ای
Rotating Flume Assembly

خواستار بروجنی و صمدی بروجنی [۲۴] به بررسی پارامترهای هیدرولیکی در فلوم دایره ای پرداختند. در این تحقیق با استفاده از سرعت سنج صوتی محاسبه سرعت جریان در سه بعد و در پنج مقطع عمودی انجام شد. بدین منظور اولین مقطع در ۵ سانتی متری دیواره داخلی قرار گرفته و دیگر مقاطع به سمت دیواره خارجی حرکت می کنند. در هر مقطع عمودی، چهار سرعت اندازه گیری و سرعت متوسط جریان با توجه به منطقه تاثیر نقطه اندازه گیری، بصورت وزنی محاسبه شده است. این محققین دریافتند زمانی که درپوش و فلوم در خلاف جهت یکدیگر



شکل ۴: تغییرات زمانی غلظت رسوبات معلق - غلظت اولیه ۱۰ گرم بر لیتر

Variations of Suspended Sediment Concentration - Initial Concentration 10 g/L



شکل ۵: تاثیر غلظت اولیه رسوبات بر غلظت تعادلی ($\tau=0.57 \frac{N}{m^2}$)

Effect of Initial Concentration on Equilibrium Concentration ($\tau=0.57 \frac{N}{m^2}$)

۳-۲- تنش برشی آستانه و بحرانی ته نشینی

همانطور که پیش از این بیان شد در فرآیند ته نشینی رسوبات چسبنده دو تنش برشی مد نظر قرار می‌گیرد. تنش برشی آستانه ته نشینی، که مقدار تنش برشی است که رسوبات در آن شروع به ته نشین شدن می‌کنند. به عبارت دیگر در تنش برشی آستانه ته نشینی نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه رسوبات برابر با یک ($\frac{C_{eq}}{C_0} = 1$) خواهد بود و تنش برشی بحرانی (ته نشینی کامل) مقدار تنش برشی است که کل رسوبات معلق بتوانند به طور کامل ته نشین شوند. در این حالت نسبت $\frac{C_{eq}}{C_0}$ بسیار نزدیک به صفر خواهد بود. حال با توجه به مقدار تنش برشی جریان، می‌تواند ته نشینی جزئی یا کامل اتفاق بیفتد.

جدول ۲ مقادیر این نسبت را برای غلظت‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر و تنش برشی متفاوت نشان می‌دهد. ارقام این جدول نشان می‌دهد که درصد ته نشینی در هر تنش برشی برای غلظت‌های مختلف یکسان

پس از خرد شدن کامل رسوبات سرعت چرخش فلوم و درپوش تا رسیدن به سرعت مورد نظر آزمایش کاهش یافت و هر آزمایش ۳۰۰ دقیقه به طول انجامید. در یک ساعت اول هر ۱۵ دقیقه یکبار و بعد از آن هر ۳۰ دقیقه یکبار از سه عمق ۵/۵، ۱۰/۳ و ۱۸/۳ سانتی متر بستر نمونه‌گیری انجام شد. بعد از خشک کردن نمونه‌ها در آون، غلظت رسوبات معلق با توجه به فاصله قرارگیری شیرهای نمونه‌گیری، به روش وزنی محاسبه شد.

جدول ۱: مشخصات هیدرولیکی جریان در آزمایش‌ها Hydraulic Flow Characteristics in Experiments

پارامتر	شماره آزمایش				
	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم
سرعت چرخش فلوم (rpm)	۱/۱	۱/۸	۲/۷	۳/۶	۴/۳
سرعت چرخش درپوش (rpm)	۱/۲	۱/۸	۳/۰	۴/۰	۴/۸
سرعت متوسط (m/s)	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۳۱	۰/۳۷	۰/۴۰
تنش برشی (N/m^2)	۰/۱۲	۰/۲۵	۰/۵۷	۰/۹۴	۱/۲۹
عدد فرود	۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۲۲	۰/۲۶	۰/۲۹

۳- نتایج و بحث

بر اساس داده‌های آزمایشگاهی فرآیند ته نشینی رسوبات سد کرخه شامل تغییرات زمانی غلظت رسوبات معلق، غلظت تعادلی، نرخ و زمان ته نشینی مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- روند ته نشینی رسوبات

نتایج این تحقیق نشان داد غلظت رسوبات معلق سد کرخه در تمامی تنش‌های برشی و غلظت‌های اولیه در ۱۵ دقیقه ابتدایی دارای یک افت ناگهانی است و سپس به صورت تدریجی کاهش می‌یابد. کاهش غلظت رسوبات معلق تا رسیدن به یک حالت تعادلی ادامه می‌یابد. شکل ۴ به طور نمونه تغییرات زمانی غلظت رسوبات معلق را برای غلظت اولیه ۱۰ گرم بر لیتر نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در غلظت‌های اولیه دیگر نیز نتیجه مشابه حاصل شد.

شکل ۵ نقش غلظت اولیه رسوبات بر افزایش مقدار غلظت تعادلی برای تنش برشی ۰/۵۷ نیوتن بر متر مربع را نشان می‌دهد. وابسته بودن غلظت تعادلی به غلظت اولیه رسوبات یکی از تفاوت‌های بارز در رفتار رسوبات چسبنده نسبت به رسوبات غیرچسبنده است. در رسوبات غیرچسبنده، غلظت تعادلی فقط تابعی از تنش برشی بستر است و غلظت اولیه رسوبات بی‌تاثیر است.

است که طبق تحقیقات موسسه USBR اگر عدد فرود در محدوده ۰/۱۲ تا ۰/۳۵ باشد، هیچ‌گونه ته‌نشینی رسوب در کانال نخواهیم داشت. براساس نتایج اندازه‌گیری‌های این تحقیق، حداقل عدد فرود در شرایط غیررسوبگذار به شرح ردیف سوم جدول ۳ است. با توجه به عدد غیر رسوبگذار رسوبات معلق سد کرخه می‌توان شرایط هیدرولیکی رادرسبکه آبیاری سد کرخه اعمال نمود تا از ته‌نشینی رسوبات در کانال و به دنبال آن کاهش ظرفیت انتقال و مشکلات بهره‌برداری شبکه جلوگیری شود.

جدول ۳. تنش برشی بحرانی رسوبات سد کرخه

Critical Shear Stresses for Sediments of Karkhe Dam

ردیف	پارامتر	تنش برشی ته نشینی کامل	شرایط غیررسوب‌گذار
۱	تنش برشی (N/m^2)	۰/۱	۲/۵۵
۲	سرعت (m/s)	۰/۱	۰/۶۱
۳	عدد فرود (Fr)	۰/۰۷	۰/۴۳

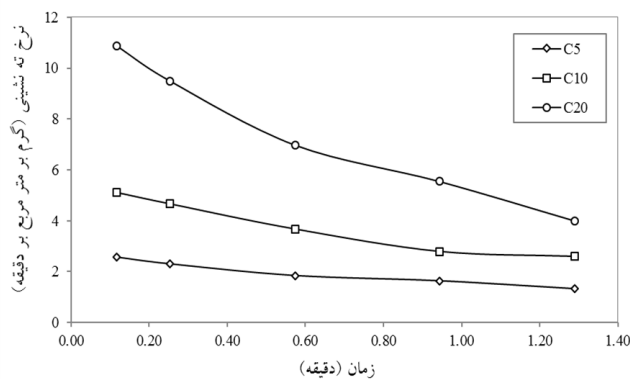
۳-۳- نرخ ته‌نشینی

برای محاسبه نرخ ته‌نشینی از رابطه ۸ استفاده شد. از حاصل ضرب اختلاف دو غلظت متوالی در حجم سیال، جرم رسوب ته‌نشینی مشخص می‌شود. از تقسیم جرم رسوبات بر فاصله زمانی دو نمونه‌گیری و بر سطح فلوم، نرخ متوسط ته‌نشینی در واحد زمان و واحد سطح بستر فلوم به دست می‌آید.

$$Q_d = \frac{(C_2 - C_1) \times V_{flume}}{(t_2 - t_1) \times A} \quad (8)$$

در رابطه فوق، Q_d : نرخ ته‌نشینی (g/m^2 ، min)، غلظت رسوبات معلق (گرم بر لیتر)، V : حجم سیال موجود در فلوم (لیتر)، t : زمان (دقیقه) و A : مساحت بستر فلوم (m^2) است.

شکل ۷ تغییرات نرخ ته‌نشینی را در طول آزمایش (۰-۳۰۰ دقیقه) نشان می‌دهد. قابل ذکر است که در محاسبه نرخ ته‌نشینی در طول



شکل ۷: تغییرات نرخ ته‌نشینی در تنش‌های برشی متفاوت در طول آزمایش

Variations of Deposition Rate in Different Bed Shear Stress

است. به بیان دیگر غلظت تعادلی وابسته به تنش برشی جریان است.

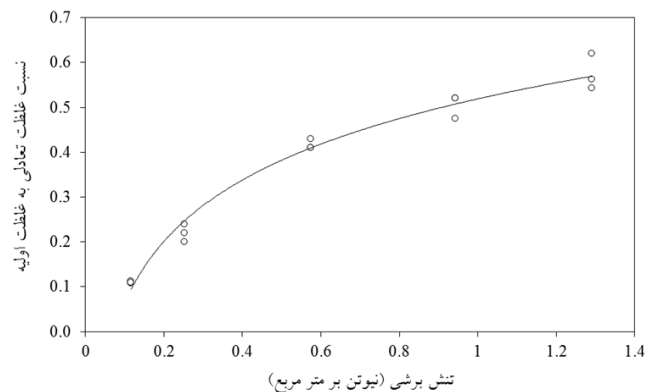
جدول ۲. نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه برای غلظت‌ها و تنش برشی‌های مختلف

Ratio of the Equilibrium Concentration to the Initial Concentration for Different Concentration and Shear Stresses

غلظت (گرم بر لیتر)	تنش برشی (نیوتن بر متر مربع)				
۱/۲۹	۰/۹۴	۰/۵۷	۰/۲۵	۰/۱۲	۰/۱۲
۵	۰/۵۴۳	۰/۴۷۵	۰/۴۱۰	۰/۲۲۰	۰/۱۰۸
۱۰	۰/۵۶۳	۰/۵۲۰	۰/۴۱۰	۰/۲۴۰	۰/۱۱۳
۲۰	۰/۶۲۰	۰/۵۲۰	۰/۴۳۰	۰/۲۰۰	۰/۱۱۰

با توجه به نتایج غلظت تعادلی، رابطه‌ای بین نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه بر اساس تنش برشی، برای رسوبات معلق سد کرخه به صورت نمودار شکل ۶ به دست آمد. لازم به توضیح است که مقدار خطای متوسط داده‌های محاسباتی در این رابطه ۷/۷ درصد به دست آمد.

$$\frac{C_{eq}}{C_0} = 0.1974 \ln(\tau) + 0.5189 \quad R^2 = 0.98 \quad (7)$$



شکل ۶. رابطه بین نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه در برابر تنش برشی بستر

Relationship of Ratio of the Equilibrium Concentration to the Initial Concentration Versus the Bed Shear Stress

با توجه به رابطه ۷ برای رسوبات چسبنده سد کرخه مقادیر تنش برشی ته‌نشینی کامل ($\frac{C_{eq}}{C_0} = 0.05$) برابر ۰/۱ نیوتن بر متر مربع و تنش برشی آستانه ته‌نشینی ($\frac{C_{eq}}{C_0} = 0.9$) برابر ۰/۹۱ نیوتن بر متر مربع به دست آمد.

با توجه به مقادیر تنش برشی غیررسوبگذار و روابط ۵ و ۶، سرعت غیررسوبگذار نیز محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. براین اساس سرعت غیررسوبگذار رسوبات چسبنده سد کرخه ۰/۶۱ متر بر ثانیه به دست آمد که تنش برشی معادل آن برابر ۲/۵۵ نیوتن بر متر مربع است.

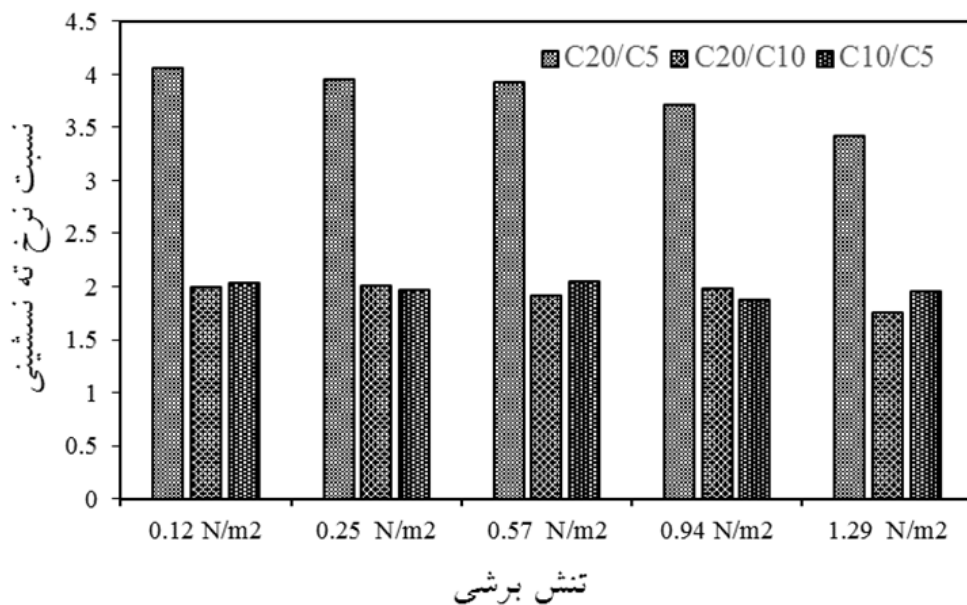
از معیار دیگر در انتخاب شرایط هیدرولیکی غیررسوبگذار، عدد فرود

زمانی که غلظت اولیه رسوبات ثابت است، با افزایش تنش برشی، نرخ ته‌نشینی رسوبات سد کرخه کاهش یافته و این کاهش در غلظت‌های بزرگ‌تر مشهودتر است. در تنش‌های بزرگ گرچه افزایش غلظت سبب افزایش برخورد بین ذره‌های رسوبی شده، اما تاثیر تنش برشی در شکستن توده‌های رسوبی بیشتر است.

شکل ۸ نسبت نرخ ته‌نشینی در غلظت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، نرخ ته‌نشینی در هر تنش برشی بستر کاملاً وابسته به غلظت اولیه رسوبات است. به طور مثال در تنش برشی ۱۲/۰ نیوتن بر مترمربع، نسبت نرخ ته‌نشینی غلظت‌های ۲۰ و ۵ حدود دو برابر غلظت‌های ۲۰ و ۱۰ یا ۱۰ و ۵ گرم بر لیتر است. با توجه به نمودار شکل ۸ مقادیر متوسط نسبت نرخ ته‌نشینی در کل آزمایش‌ها برای $\frac{C_{20}}{C_5}$ ، $\frac{C_{20}}{C_{10}}$ و $\frac{C_{10}}{C_5}$ به ترتیب ۳/۸، ۱/۹ و ۲/۰ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود متوسط نرخ ته‌نشینی در $\frac{C_{20}}{C_5}$ تقریباً دو برابر حالت‌های دیگر است این در حالی است که نسبت غلظت‌های اولیه نیز در این حالت دو برابر حالت‌های دیگر است. با توجه به این موضوع می‌توان دریافت که نرخ ته‌نشینی کاملاً وابسته به غلظت اولیه

آزمایش، از غلظت متوسط که به صورت وزنی محاسبه شد، استفاده گردید. در این روش محاسبه، تاثیر هر غلظت در بازه زمانی در نظر گرفته شد که زمان اندازه‌گیری غلظت مورد نظر مرکز ثقل بازه زمانی مذکور باشد. به بیان دیگر بازه زمانی بین دو نمونه‌گیری به دو بخش مساوی تقسیم و هر کدام از این دو بخش به یکی از غلظت‌های موجود در ابتدا و انتهای بازه مذکور مرتبط شده است.

با توجه به شکل ۷، می‌توان اثر تنش برشی و غلظت اولیه رسوبات را در تغییرات نرخ ته‌نشینی مشاهده نمود. چنان‌که برای هر مقدار مشخصی از تنش برشی افزایش غلظت رسوبات، افزایش تماس بین توده‌های رسوبی را در پی دارد که به دنبال آن توده‌های بزرگ‌تری تشکیل می‌شود و نرخ ته‌نشینی افزایش می‌یابد. شیب خطوط ترسیم شده نشان می‌دهد، افزایش نرخ ته‌نشینی به دلیل غلظت اولیه متفاوت، در تنش‌های برشی کوچک، بیشتر است که این امر حاکی از نقش مضاعف تنش برشی در ساختار و آرایش توده‌های رسوبی دارد. تنش برشی بزرگ علاوه بر افزایش برخورد بین توده‌های رسوبی، سبب شکسته شدن توده‌های ضعیف می‌شود.



شکل ۸: نسبت نرخ ته‌نشینی در غلظت‌های اولیه متفاوت
Ratio of Deposition Rate in Different Initial Concentration

- مقادیر منفی مشخص می‌کند که در آن بازه زمانی فرسایش اتفاق افتاده و توده‌های سست در بستر دوباره شکسته شده و به صورت معلق در می‌آیند.
- در یک تنش برشی خاص، افزایش غلظت سبب افزایش نرخ ته‌نشینی می‌شود.

رسوبات است.
مقادیر محاسبه شده نرخ ته‌نشینی رسوبات سد کرخه در بازه‌های زمانی مختلف در جدول‌های ۴ الی ۶ ارائه شده است که بر اساس مقادیر آن چند نکته قابل استنباط است.
- در هر آزمایش بیشترین نرخ ته‌نشینی در ۱۵ دقیقه اولیه اتفاق می‌افتد.

جدول ۴: نرخ ته‌نشینی رسوبات سد کرخه در بازه‌های زمانی مختلف - غلظت اولیه ۵ گرم بر لیتر
Deposition Rate of Sediment of Kharkhe Dam for Different Time - Initial Concentration 5 g/L

زمان	نرخ ته‌نشینی در تنش‌های برشی متفاوت (gr/m ² /min)				۱/۲۹ N/m ^۲
	۰/۱۲ N/m ^۲	۰/۲۵ N/m ^۲	۰/۵۷ N/m ^۲	۰/۹۴ N/m ^۲	
۰-۱۵	۳۶/۹	۲۸/۱	۲۴/۷	۲۶/۸	۱۸/۷
۱۵-۳۰	۳/۷	۶/۵	۸/۱	۴	۴/۹
۳۰-۴۵	۶	۸/۹	۳/۹	۲/۹	۱/۲
۴۵-۶۰	۲/۳	۲	۰/۹	-۰/۴	۲/۱
۶۰-۹۰	۰/۹	۰/۸	۱	-۱/۴	-۱/۴
۹۰-۱۲۰	۰/۱	۰/۶	۰/۵	۲/۵	۱/۳
۱۲۰-۱۵۰	۱/۵	۰/۹	-۱/۱	-۰/۲	۰/۲
۱۵۰-۱۸۰	۲/۱	۰/۴	۰/۴	-۱/۱	۱
۱۸۰-۲۱۰	-۰/۴	-۰/۵	-۰/۵	۰/۹	-۰/۶
۲۱۰-۲۴۰	۰/۹	۰/۶	۱	-۰/۲	۱/۱
۲۴۰-۲۷۰	۰/۴	۰/۲	-۱/۲	۰/۷	۰/۲
۲۷۰-۳۰۰	-۰/۳	۱	۰/۷	-۰/۵	۰/۱
۰-۳۰۰	۳	۲/۷	۲	۱/۷	۱/۵
متوسط وزنی	۲/۶	۲/۳	۱/۸	۱/۶	۱/۳
متوسط بازه‌های زمانی	۴/۵	۴/۱	۳/۲	۲/۸	۲/۴
غلظت تعادلی	۳	۲/۶	۲	۱/۷	۱/۵

جدول ۵: نرخ ته‌نشینی رسوبات سد کرخه در بازه‌های زمانی مختلف - غلظت اولیه ۱۰ گرم بر لیتر
Deposition Rate of Sediment of Kharkhe Dam for Different Time - Initial Concentration 10 g/L

زمان	نرخ ته‌نشینی در تنش‌های برشی متفاوت (gr/m ² /min)				۱/۲۹ N/m ^۲
	۰/۱۲ N/m ^۲	۰/۲۵ N/m ^۲	۰/۵۷ N/m ^۲	۰/۹۴ N/m ^۲	
۰-۱۵	۴۵/۷	۷۴/۸	۵۲/۳	۴۰/۶	۳۸/۳
۱۵-۳۰	۳۱/۸	۱۰	۱۲	۵/۴	۵/۶
۳۰-۴۵	۱۴/۱	۲/۷	۷/۷	۵/۷	۶/۲
۴۵-۶۰	۶/۲	۴/۹	۱/۲	۲/۷	۱/۳
۶۰-۹۰	۳/۴	۱/۲	۱/۲	-۰/۸	۰/۵
۹۰-۱۲۰	۱/۹	۱/۱	۰/۴	۱	۰/۳
۱۲۰-۱۵۰	۱/۳	۱/۵	۲/۱	۱/۶	۰/۲
۱۵۰-۱۸۰	۱/۱	-۱/۱	-۱/۸	۰/۹	۰/۱
۱۸۰-۲۱۰	۰/۵	۱/۱	۲/۷	۱/۹	۱/۴
۲۱۰-۲۴۰	۰/۲	۱/۱	-۳/۶	-۱	۰/۳
۲۴۰-۲۷۰	۱/۸	-۲/۷	۱/۷	۱	۰/۲
۲۷۰-۳۰۰	۱/۲	۴	۱	۰/۷	۱/۲
۰-۳۰۰	۶	۵/۲	۴	۳/۲	۳
متوسط وزنی	۵/۱	۴/۷	۳/۷	۲/۸	۲/۶
متوسط بازه‌های زمانی	۹/۱	۸/۲	۶/۴	۵	۴/۶
غلظت تعادلی	۵/۹	۵/۱	۳/۹	۳/۲	۲/۹

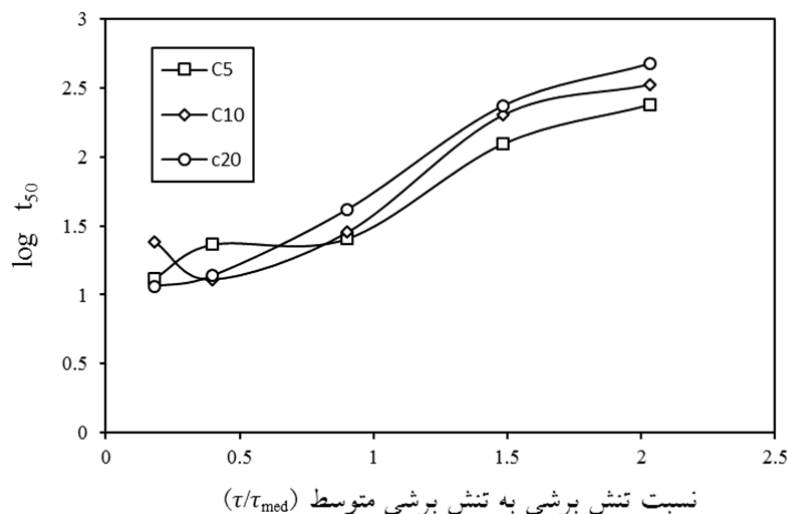
جدول ۶. نرخ ته‌نشینی رسوبات سد کرخه در بازه‌های زمانی مختلف - غلظت اولیه ۲۰ گرم بر لیتر
Deposition Rate of Sediment of Kharkhe Dam for Different Time - Initial Concentration 20 g/L

زمان دقیقه	نرخ ته‌نشینی در تنش‌های برشی متفاوت (gr/m ² /min)				
	۰/۱۲ N/m ^۲	۰/۲۵ N/m ^۲	۰/۵۷ N/m ^۲	۰/۹۴ N/m ^۲	۱/۲۹ N/m ^۲
۰-۱۵	۱۷۰/۸	۱۴۲/۷	۱۱۱/۵	۸۹/۲	۴۰/۸
۱۵-۳۰	۱۴/۴	۱۶/۴	۸/۴	۱۳/۱	۱۵
۳۰-۴۵	۱۴/۶	۱۸/۴	۱۲/۵	۶/۱	۲۱/۹
۴۵-۶۰	۱۰/۹	۱۰/۶	۲/۵	۰/۹	-۸/۹
۶۰-۹۰	۳/۴	۱/۶	۱/۵	۱	-۰/۷
۹۰-۱۲۰	۳/۴	۲/۴	۳/۹	-۲/۳	۲/۷
۱۲۰-۱۵۰	۳/۶	۱/۷	-۰/۳	-۱/۹	۵/۶
۱۵۰-۱۸۰	۱/۵	۱	۳/۴	۵/۳	۳/۱
۱۸۰-۲۱۰	۲/۶	-۰/۷	-۰/۳	۴/۳	۳/۳
۲۱۰-۲۴۰	-۱/۲	۵/۳	-۰/۷	۴	-۱/۳
۲۴۰-۲۷۰	-۱/۳	۱	۱/۳	-۲	۳/۳
۲۷۰-۳۰۰	۲/۳	-۱	۰/۷	۱/۳	۲
۰-۳۰۰	۱۲	۱۰/۵	۷/۷	۶/۴	۵/۲
متوسط وزنی	۱۰/۹	۹/۵	۷	۵/۵	۴
متوسط بازه‌های زمانی	۱۸/۸	۱۶/۶	۱۲	۹/۹	۷/۲
غلظت تعادلی	۱۱/۹	۱۰/۶	۷/۶	۶/۴	۵

یکی دیگر از معیارهای محاسبه نرخ ته‌نشینی، زمان رسیدن به مقدار مشخص ته‌نشینی است که توسط مهتا و پارتندیس [۸] مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار رسوباتی که می‌توانند ته‌نشین شوند، برابر با $C_0 - C_{eq}$ خواهد بود. از طرفی میزان رسوباتی که در زمان t ته‌نشین می‌شوند با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۷].

$$C^* = \frac{C_0 - C}{C_0 - C_{eq}} \quad (9)$$

در رابطه فوق C : غلظت رسوبات در زمان t است. برای مطالعه زمان و نرخ ته‌نشینی می‌توان C^* را در برابر $\frac{t}{t_{50}}$ ترسیم نماییم که t_{50} زمان لازم برای ته‌نشینی ۵۰ درصد رسوبات است. با توجه به شکل ۹ مشخص است با افزایش تنش برشی زمان لازم برای ته‌نشینی ۵۰ درصد رسوبات افزایش می‌یابد و هم‌چنین مشاهده می‌شود مقدار متوسط t_{50} با افزایش غلظت اولیه افزایش می‌یابد که البته این اختلاف زیاد نیست.



شکل ۹: متوسط t_{50} در غلظت‌های اولیه متفاوت در برابر تنش برشی بستر
Average of t_{50} in Different Initial Concentration Versus Bed Shear Stress

جدول ۷. درصد احتمال ته نشین شدن توده های رسوبی

Variations of Deposition Rate in Different Bed Shear Stress

غلظت اولیه (g/L)	تنش برشی (نیوتن بر متر مربع)				
	۰/۱۲	۰/۲۵	۰/۵۷	۰/۹۴	۱/۲۹
۵	٪۹۹	٪۹۷	٪۹۴	٪۹۰	٪۸۶
۱۰	٪۹۸	٪۹۷	٪۹۲	٪۸۷	٪۸۲
۲۰	٪۹۸	٪۹۵	٪۸۹	٪۸۲	٪۷۵
متوسط	٪۹۸	٪۹۶	٪۹۲	٪۸۷	٪۸۲

از مقادیر جدول ۷ استنباط می شود که در این پژوهش تغییرات غلظت تاثیر نامحسوسی بر احتمال ته نشینی رسوبات دارد. با توجه به رابطه ۴ مشخص است که تنها متغیر تاثیرگذار در محاسبه احتمال ته نشینی در غلظت های مختلف، تنش برشی آستانه ته نشینی است. بر این اساس می توان دریافت که تغییرات غلظت رسوبات تاثیر کمی بر مقدار تنش برشی کامل و آستانه ته نشینی دارد.

در اینجا لازم است به ذکر این نکته پرداخته شود که در محاسبه احتمال ته نشینی فلوک ها با استفاده معادله اصلاح شده کرون [۶]، درصد احتمال در طول زمان هر آزمایش ثابت است، در صورتی که با توجه به نتایج این تحقیق و مشاهدات محققین قبلی مشخص است احتمال ته نشینی در زمان ابتدایی آزمایش بیشتر از مقدار آن در زمان انتهایی است. این موضوع می تواند یکی از ایرادات وارد بر معادله اصلاح شده کرون جهت محاسبه نرخ ته نشینی باشد.

۴- نتیجه گیری

به طور کلی بر اساس پژوهش انجام شده نتایج زیر را می توان بیان نمود. مشاهده شد که غلظت رسوبات معلق در تمامی تنش های برشی و غلظت های اولیه در ۱۵ دقیقه ابتدایی دارای یک کاهش سریع بوده و سپس به آرامی کاهش و تا رسیدن به یک حالت تعادلی ادامه دارد. هم چنین رسیدن به حالت تعادلی در تنش های برشی بزرگ تر، در زمان کوتاه تری اتفاق می افتد.

نسبت غلظت تعادلی رسوبات به غلظت اولیه برای هر تنش برشی، ثابت است. به بیان دیگر مقدار ته نشینی برای غلظت های مختلف در یک تنش برشی یکسان، تقریباً برابر است.

روند ته نشینی رسوبات سد کرخه پس از یک افت ناگهانی تار رسیدن به یک روند تعادلی ادامه می یابد و با افزایش تنش برشی و غلظت اولیه جریان، غلظت تعادلی نیز افزایش می یابد. با توجه به نتایج نرخ ته نشینی می توان اظهار داشت میزان نرخ ته نشینی در هر تنش برشی کاملاً وابسته به غلظت اولیه رسوبات است. هم چنین مشخص شد

شکل ۱۰ زمان متوسط ته نشینی ۵۰ درصد رسوبات معلق سد کرخه را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود زمان متوسط برای تنش های برشی مختلف در رسوبات با غلظت اولیه ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر حدود یک، دو و دو نیم ساعت است. با توجه به اینکه محدوده تنش های برشی آزمایش بین تنش برشی آستانه ته نشینی و ته نشینی کامل رسوبات انتخاب شده است، این گونه می توان نتیجه گیری نمود که از زمان ورود سیلاب به مخزن سد، بر اساس غلظت رسوبات معلق، زمان ته نشینی ۵۰ درصد غلظت اولیه بین یک تا دو و نیم ساعت به طول می انجامد. بر این اساس می توان تمهیدات لازم برای مدیریت دریاچه ها به منظور خروج جریان غلیظ را لحاظ نمود. البته لازم به ذکر است که اگر تنش برشی جریان بیشتر از تنش برشی آستانه ته نشینی باشد، هیچ گونه ته نشینی رسوب اتفاق نخواهد افتاد.



شکل ۱۰: متوسط ۵۰ درصد تنش های برشی مختلف در برابر غلظت اولیه

Average of t50 in Different Bed Shear Stress Versus Initial Concentration

۴-۳ پارامتر احتمال ته نشینی

با توجه به مشخص بودن مقادیر تنش برشی آستانه ته نشینی رسوبات سد کرخه و تنش برشی بستر و نظر به این که آزمایش های ته نشینی این تحقیق از نوع ته نشینی جزئی است، احتمال ته نشینی را می توان به شکلی که در رابطه ۴ بیان شد، محاسبه نمود.

$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,part}}, \quad \tau_c \leq \tau \leq \tau_{d,part} \quad (4)$$

از آنجایی که تنش برشی بستر در آزمایش ها کوچک تر از مقدار تنش برشی آستانه ته نشینی می باشد، احتمال ته نشینی همواره بزرگ تر از صفر خواهد بود.

همان طور که از مقادیر جدول ۷ مشخص است، رابطه معکوس خطی بین احتمال ته نشینی و تنش برشی برقرار است به طوری که با افزایش تنش برشی احتمال ته نشینی کاهش می یابد. به منظور دقت بیشتر در تعیین سرعت سقوط توده های رسوبی، احتمال ته نشینی برای غلظت های مختلف نیز محاسبه شد.

an annular flume, in: Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences 2015, pp. 5.

[3] F. MAGGI, Flocculation dynamics of cohesive sediment, Technische Universiteit Delft, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, 2005.

[4] B.G. Krishnappan, COHESIVE SEDIMENT TRANSPORT STUDIES USING A ROTATING CIRCULAR FLUME, in: 7th Int. Conf. on Hydroscience and Engineering (ICHE), Philadelphia, USA, 2006, pp. 15.

[5] B.G. Krishnappan, P. Engel, Distribution of Bed Shear Stress in Rotating Circular Flume, JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING, 130(4) (2004) 8.

[6] R.B. Krone, Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes, Technical Report, Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley California, (1962).

[7] D. Milburna, B.G. Krishnappan, Modelling Erosion and Deposition of Cohesive Sediments from Hay River, Northwest Territories, Canada, in: 13' Northern Res. Basins/Workshop, Nordic Hydrology, Territories, Canada, 2001, pp. 14.

[8] A.J. Mehta, E. Partheniades, Depositional Behavior of Cohesive Sediments, Univ. of Florida, Gainesville, Florida, 1973.

[9] B.G. Krishnappan, R. Stephens, Critical shear stresses for erosion and deposition of fine suspended sediment from the Athabasca River, Northern River Basins Study Project, 1996.

[10] J.P. Maa, J. Kwon, K. Hwang, H.K. Ha, Critical bed shear stress for cohesive sediment deposition under steady flows, Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 134(12) (2008) 5.

[11] M. Khashtar-Boroujeni, K. Esmaili, H. Samadi-Boroujeni, A. Ziaei, Wastewater Effect on the Deposition of Cohesive Sediment, Journal of Environmental Engineering, ASCE, (2018).

[12] N. Vojdani, M. Ghomshi, Erosion critical shear stress of cohesive sediment and its role in the design of open channels, in: national conference on irrigation and drainage network management, Sh Chamran University, 2006.

[13] A. Mehta, E. Partheniades, J.G. Dixit, W.H. McAnally, Properties of deposited kaolinite in a long flume, in: Research to Hydrodynamic Practice, ASCE Hydraulics Division Conference, 1982, pp. 594-603.

[14] J.C. Winterwerp, on the sedimentation rate of cohesive sediment, Estuarine and Coastal Fine Sediments Dynamics. (2007) 18.

[15] E. Partheniades, J.F. Kennedy, R.J. Etter, R.P. Hoyer, Inves-

افزایش تنش برشی جریان، موجب کاهش نرخ ته‌نشینی رسوبات سد کرخه شده و این کاهش در غلظت‌های بزرگ‌تر مشهودتر است.

نتایج نشان داد تنش برشی آستانه ته‌نشینی کامل رسوبات سد کرخه برابر ۱/۰ نیوتن بر مترمربع و تنش برشی غیر رسوب‌گذار برابر ۲/۵۵ نیوتن بر مترمربع می‌باشد. هم‌چنین سرعت جریان برای آستانه ته‌نشینی کامل رسوبات برابر ۱/۰ متر بر ثانیه و سرعت غیر رسوب‌گذار برابر ۰/۶۱ متر بر ثانیه است. در این دو حالت عدد فرود جریان به ترتیب برابر ۰/۰۷ و ۰/۴۳ به دست آمد.

۵- تشکر و قدردانی

بدینوسیله مراتب قدردانی و سپاس خود را از مسئولان سازمان آب و برق خوزستان به ویژه مدیر دفتر تحقیقات و پژوهش‌های کاربردی آن سازمان که هزینه انجام این پژوهش را تأمین نمودند، اعلام می‌داریم.

۶- فهرست علائم

پارامتر	لاتین	فارسی
α	Rotational Speed Ratio of Flume to the Ring	نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم
τ_b	Bed Shear Stress	تنش برشی بستر
τ_c	Critical Shear Stress	تنش برشی بحرانی
$\tau_{d, Part}$	Shear Stress for Part Depositin	تنش برشی برای ته‌نشینی جزئی
$\tau_{d, Full}$	Shear Stress for Full Deposition	تنش برشی برای ته‌نشینی کامل
C	Suspended Sediment Concentration	غلظت رسوبات معلق
C_{eq}	Equilibrium Concentration	غلظت تعادلی
C_0	Initiaki Concentration	غلظت اولیه رسوبات
Fd	Fraction Deposition	درصد ته‌نشینی
Pd	Deposition Probability	احتمال ته‌نشینی
Qd	Deposition Rate	نرخ ته‌نشینی
V	Flow Velocity	سرعت جریان
Ws	Fall Velocity	سرعت سقوط

مراجع

[1] J. Huang, R.C. Hilldate, B.P. Greiman, Erosion and sedimentation manual, in, U.S. Department of the interior. United States Bureau of Reclamation, 2006.

[2] K. Glasgerben, M. Stone, B. Krishnappan, J. Dixon, U. Silins, The effect of coarse gravel on cohesive sediment entrapment in

- Sediment Erosion and Deposition Studies, Coastal Research, S15 (1988) 10.
- [22] M.K. Fukuda, W. Lick, The Entrainment of Cohesive Sediments in Fresh Water, Geophysical Research, 85(C5) (1980) 11.
- [23] J. porhemaat, R. Porhemaat, Regional Analysis and Investigation of Base Discharge of Karstic Basin (case Study of Karkhe Basin), in: Fourth Iranian Water Resources Management, Tehran University of Technology Amirkabir, 2011.
- [24] M. Khashtar-Borujeni Boroujmi, H.S. Borujeni, Hydraulic flow characteristics in rotating flume using the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), Journal of Hydroulic, 7(2) (2013) 9.
- [25] M. Khashtar-Borujeni, Experimental Study on the effect of waste water in flocculation of suspended cohesive sediments in water channels, Ferdowsi of Mashhad, 2012.
- [26] M.G. Skafel, B.G. Krishnappan, a Laboratory investing of depositional characteristics of mud from an Inland Harbour using a rotating circular flume, . Water, Air, and Soil Pollution, 112 (1999) 19.
- [27] E. Partheniades, Cohesive Sediments in Open Channels, Elsevier Inc, Burlington, USA, 2009.
- Investigations of the Depositional Behavior of Fine Cohesive Sediments in an Annular Rotating Channel, MIT Cambridge Massachusetts., 1966.
- [16] C. Cofalla, S. Roger, M. Brinkmann, S. Hudjetz, H. Hollert, H. Schüttrumpf, Floodsearch- hydrtoxic investigations of contaminated sediments in an annular flum, in: PIANC MMX Congress, Liverpool 2010, pp. 14.
- [17] Y.L. LAU, I.G. DROPPA, INFLUENCE OF ANTECEDENT CONDITIONS ON CRITICAL SHEAR STRESS OF BED SEDIMENTS, Water Resource, 34(2) (2000) 5.
- [18] D. Cloutier, N.M. LeCouturier, C.L. Amos, P.R. Hill, The effects of suspended sediment concentration on turbulence in an annular flume, Aquatic Ecology, 40 (2006) 11.
- [19] K. Haralampides, J.A. McCorquodale, B.G. Krishnappan, Deposition Properties of Fine Sediment, JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING, ASCE, 129(3) (2003) 5.
- [20] E. Partheniades, J.F. Kennedy, R.J. Etter, R.P. Hoyer, Investigations of the Depositional Behavior of Fine Cohesive Sediments in an Annular Rotating Channel, 1966.
- [21] Y.P. Sheng, Consideration of Flow in Rotating Annuli for

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Khashtar-Boroujeni, H. Samadi- Boroujeni , R. Fattahi- Naftchi, M. Ghasemi, A. Naghshbandi, M. Heydari, Experimental study on suspended sediment deposition process in Karkheh dam reservoir *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(2)(2019)327-339.
DOI:10.22060/ceej.2018.13490.5420

