

«یادداشت تحقیقاتی»

بررسی آزمایشگاهی تنش برشی آستانه فرسایش رسوبات ریزدانه (مطالعه موردی رسوبات مخزن سد کرخه)

حسین صمدی بروجنی^{1*}، میلاد خواستار بروجنی²، روح الله فتاحی³، مرضیه قاسمی⁴ و زهرا طاهری²

1- دانشیار، گروه مهندسی آب و رئیس مرکز تحقیقات منابع آب، دانشگاه شهرکرد

2- دانشجوی دکتری، سازه‌های آبی دانشگاه فردوسی مشهد و کارشناس شرکت آب منطقه ای چهارمحال و بختیاری

3- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

4- کارشناس ارشد، مرکز تحقیقات منابع آب، دانشگاه شهرکرد

5- دانشجوی دکتری، سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد

*samadi@agr.sku.ac.ir

(دریافت مقاله: 96/10/10؛ پذیرش مقاله: 96/12/11)

چکیده - برای تخلیه رسوبات تجمع یافته در پشت بدنه سدها، بررسی شرایط آستانه فرسایش رسوبات و تعیین نرخ فرسایش آن‌ها امری ضروری است. در این تحقیق به بررسی رسوبات مخزن سد کرخه و تعیین آستانه فرسایش رسوبات آن پرداخته شده است. بدین منظور از فلوم دایره‌ای استفاده شد و رسوبات مورد آزمایش از پشت بدنه سد کرخه تهیه گردید. این رسوبات از نوع ریزدانه بوده و قبل از انجام آزمایش‌های اصلی، روند ته‌نشینی و تحکیم رسوبات در ستون‌های ته‌نشینی برای دوره‌های مختلف تحکیم (3، 14 و 30 روز) مورد آزمایش قرار گرفت. بر این اساس، رسوبات در فلوم دایره‌ای آماده سازی و آزمایش‌ها به ازای تنش برشی‌های مختلف انجام و در حین آزمایش روند تغییرات غلظت رسوبات فرسایشی، تنش برشی آستانه فرسایش و نرخ فرسایش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که غلظت رسوبات فرسایش یافته تابعی از زمان تحکیم رسوبات و تنش برشی بستر است. همچنین مشخص شد زمان تحکیم بر تنش برشی آستانه فرسایش رسوبات تأثیرگذار است به طوری که مقدار تنش برشی آستانه شروع فرسایش برای زمان‌های تحکیم 3، 14 و 30 روز به ترتیب 0/16، 0/22 و 0/31 نیوتن بر متر مربع بدست آمد. نتایج نشان داد نرخ فرسایش با دوره تحکیم رابطه معکوس دارد، به طوری که در تنش برشی یکسان، افزایش دوره تحکیم موجب کاهش نرخ فرسایش می‌شود.

کلیدواژگان: فرسایش، رسوبات ریزدانه، تنش برشی بحرانی، فلوم دایره‌ای، تحکیم.

1- مقدمه

آگاهی از خصوصیات رسوب و شرایطی که در آن رسوبات در محیط رودخانه‌ای ته‌نشین شده یا فرسایش می‌یابند، برای شناخت و مدیریت رسوبگذاری در رودخانه‌ها و مخازن حائز اهمیت زیاد است (Samadi Boroujeni, 2005). به طور کلی هیدرولیک انتقال رسوبات ریزدانه را می‌توان

شامل فرایندهای ته‌نشینی، تحکیم و فرسایش دانست. رسوبات معلق به دلیل خاصیت چسبندگی و برخورد بین ذرات، توده‌های بزرگتری به نام فلوک را تشکیل می‌دهند. توده‌های بزرگ‌تر نسبت به توده‌های کوچک سریع‌تر ته‌نشین شده و نتیجه‌ی آن لایه‌ای شدن بستر است که ذرات ریزتر بر لایه فوقانی قرار می‌گیرند. ذرات ته‌نشین شده

درشت دانه این مقدار کاهش می‌یابد (Huang et al. 2006). تنش برشی آستانه فرسایش یکی از پارامترهای مهم در مدل‌های انتقال رسوبات چسبنده است. برای رسوبات چسبنده مقدار تنش برشی بحرانی برای فرسایش بزرگ‌تر از تنش برشی بحرانی ته‌نشینی است (Huang et al. 2006). شاید بتوان کارهای پارتنیاداس (1962) را به عنوان اولین آزمایش‌های طبقه‌بندی شده در مورد تنش برشی آستانه فرسایش رسوبات چسبنده دانست. این محقق دو سری آزمایش در یک کانال مستقیم مستطیلی با رسوبات خلیج سان فرانسیسکو انجام داد. سری اول آزمایش‌ها با مدل کردن چگالی واقعی رسوبات صورت گرفت این در حالی است که در سری دوم آزمایش‌ها به رسوبات اجازه ته‌نشینی و سپس تحکیم داده شد. نتایج هر دو آزمایش نشان داد که در کوچکترین تنش‌های برشی بستر مقدار فرسایش کوچک و غیر صفر است. Winterwerp et al. (2012) معتقدند این موضوع حاکی از این است که تنش برشی آستانه فرسایش نباید وجود داشته باشد یا بسیار کوچک است. پژوهشگران بسیاری در دهه‌های 70 تا 90 میلادی با استفاده از فلوم‌های دایره‌ای به بررسی فرایند فرسایش رسوبات چسبنده پرداخته و مدل‌های متفاوتی از نرخ فرسایش ارائه داده‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

Lavelle and et al. (1984) نرخ فرسایش (E) را از طریق اندازه‌گیری جریان و کدورت در پنج متری از کف Puget Sound ایالت واشنگتن با عمق 202 متر از سطح آب مورد بررسی قرار دادند. این محققان نرخ فرسایش را به صورت نمایی با تنش بستر (τ) در ارتباط دانستند.

$$E = \alpha \tau^\beta \quad (1)$$

در این رابطه α و β ضرایب تجربی هستند.

Bui (2000) فرسایش رسوبات از بستر به عنوان جرم رسوبات جابه‌جا شده توسط تنش برشی بستر در نظر گرفته و رابطه (2) را ارائه داد:

$$E = \varepsilon(\tau_b - \tau_s) \quad (2)$$

در این معادله E نرخ فرسایش، ε ضریب فرسایش، τ_b تنش برشی بستر و τ_s تنش مقاومتی بستر است. Wang (2002) به بررسی تنش برشی آستانه فرسایش رسوبات جزیره Long Sound پرداخت. این محقق تنش

زیرین به تدریج تحکیم می‌گردند و ذرات ته‌نشین شده در لایه‌های سطحی، با امکان فرسایش بیشتری روبرو هستند (Krestenitis et al., 2007).

ذرات ته‌نشین شده یک بستر رسوبی اشباع را تشکیل می‌دهد. پس از تشکیل بستر رسوبی فاز تحکیم آغاز و رسوب ته‌نشین شده متراکم می‌شود. خصوصیات رفتاری رسوبات هنگامی که متراکم می‌شوند تغییر کرده و پارامترهای مورد استفاده برای توصیف رسوبات چسبنده بر مبنای وزن مخصوص ظاهری تغییر می‌کند (Yang and Wang, 1996). معمولاً برای رسوبات ریزدانه دو نوع تحکیم اولیه و ثانویه مد نظر است. تحکیم اولیه به دلیل وزن خود رسوبات است. زمانی که وزن ذرات بیش از نیروی منفذی باشد تحکیم اولیه اتفاق می‌افتد (Mehta et al., 1989).

تحکیم تحت وزن خود رسوبات چسبنده پدیده‌ی پیچیده‌ای است که می‌تواند تابع فرایندها و متغیرهای فیزیکی گوناگونی باشد. معمولاً دو نوع آزمایش ستون ته‌نشینی و سانتریفیوژ برای تحکیم تحت وزن ذرات بکار می‌رود. Scully et al. (1984) با انجام آزمایشات ته‌نشینی و تحکیم در یک ستون ته‌نشینی به قطر 6 سانتی‌متر و ارتفاع 36 سانتی‌متر و همچنین انجام آزمایش در دستگاه سانتریفیوژ رابطه‌ای بین نتایج دو روش بدست آورد و ارائه نمود.

فرسایش‌پذیری رسوبات چسبنده توسط پارامترهای بسیاری نظیر اندازه ذرات، ترکیب مواد معدنی، میزان مواد آلی، شوری، pH، فرایندهای بیولوژیکی و مقاومت بستر (تحکیم) و غیره... کنترل می‌شود (Amelia et al., 2010). Wang, 2002 و et al., 2009). در فرسایش رسوبات چسبنده، ذرات منفرد و توده‌های کوچک توسط نیروی هیدرودینامیک، مثل نیروی دراگ و نیروی لیفت، از توده خاک جدا می‌شوند (Millar and Quick, 1998).

آزمایش‌های Roberts et al. (1998) به منظور بررسی تأثیر اندازه ذرات رسوبی و چگالی آن‌ها بر روی نرخ فرسایش نشان داد که نرخ فرسایش به شدت تابع دانسیته ذرات بوده و ضمن این که این حالت برای ذرات درشت به راحتی مشاهده نشده است. همچنین برای ذرات ریزدانه، در یک دانسیته و تنش برشی مشخص، مشاهده شده که با افزایش قطر ذرات چسبنده میزان فرسایش به سرعت افزایش می‌یابد و بعد از رسیدن به یک مقدار حداکثر، برای ذرات

مخزن 7 میلیارد و 300 میلیون مترمکعب، بزرگترین دریاچه مصنوعی ایران را با طول 60 کیلومتر پدید آورده است.

حوضه آبریز کرخه با مختصات جغرافیایی بین 46 درجه و 6 دقیقه تا 49 درجه و 10 دقیقه طول شرقی، 30 درجه و 58 دقیقه تا 34 درجه و 56 دقیقه عرض شمالی، یکی از زیرحوضه‌های بزرگ و مهم کشور محسوب می‌شود (پرهت، 1390).

2-2- رسوبات مورد آزمایش

نمونه‌برداری رسوب با استفاده از دستگاه گِرپ در چهار نقطه واقع در مخزن سد، پایین‌دست سریز، خروجی دریاچه‌های تحتانی و پشت دریاچه تخلیه رسوب سد تنظیمی انجام شد. سپس نمونه‌های رسوب با یگدیگر ترکیب و در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. موقعیت جغرافیایی محل برداشت نمونه رسوبات در شکل 1 قابل مشاهده است. همچنین منحنی دانه‌بندی نمونه‌های مختلف رسوب در شکل 2 ارائه شده است.

حدود روانی، خمیری و شاخص خمیری برای رسوبات سد کرخه با انجام آزمایش حدود اثربرگ تعیین شد که نتایج نشان داد حد روانی، خمیری و شاخص خمیری رسوبات بسیار ناچیز بوده و این نتیجه بیانگر پائین بودن خاصیت پَسبندگی رسوبات است.

2-3- تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور بررسی فرایند فرسایش رسوبات سد کرخه از فلوم دایره‌ای موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد استفاده شد. قطر داخلی، خارجی و متوسط این فلوم به ترتیب 1/3، 1/9 و 1/6 متر می‌باشد که از ورق گالوانیزه با پنجره‌های پلکسی‌گلس ساخته شده است. درپوش از جنس پلکسی‌گلس با قطر 1/6 متر در داخل فلوم بگونه‌ای طراحی شده که از دیواره‌های فلوم دو سانتی‌متر فاصله دارد. 16 عدد شیر نمونه‌گیری در چهار موقعیت مختلف فلوم و در فواصل 5/3، 10/5، 18/3 و 25 سانتی‌متر از کف جهت سنجش غلظت مواد معلق در ستون آب، تعبیه شده است. فلوم دارای دو الکتروموتور مجزا برای چرخش فلوم و درپوش می‌باشد

برشی بحرانی فرسایش رسوبات را 0/4 نیوتن بر متر مربع برآورد کرد.

(Lumborg 2005) با استفاده از روش‌های عددی و مدل MIKE3 تنش‌برشی بحرانی فرسایش رسوبات منطقه از دریای بالتیک در مرز کشور سوئد و دانمارک را بیش از 0/5 نیوتن بر متر مربع گزارش کرد.

(Droppo 2009) مقاومت برشی رسوبات چسبنده را برای 5 گروه مجزای آب برای انواع دوره‌های تحکیم و تنش برشی بستر اندازه‌گیری کرد.

(Glasbergen 2014) خصوصیات انتقال رسوبات چسبنده حوضه رودخانه البو¹ در کانادا را با استفاده از یک فلوم دوار به قطر 5 متر با بستر صاف مورد بررسی قرار داد که میزان تنش‌برشی بحرانی فرسایش رسوبات چسبنده را برای هر دو دوره تحکیم 39 و 113 ساعت، 0/212 نیوتن بر متر مربع به دست آورد. این نتایج با یافته‌های مطالعات Stone et al. (2008) و (Krishnappan 2006) مطابقت داشت.

(Droppo 2009) با هدف تعیین مشخصات فرسایش، انتقال و انباشت رسوبات چسبنده بستر و بررسی اثر اجتماع باکتری‌ها در فرسایش، انتقال و انباشت رسوبات، آزمایش‌هایی در یک فلوم دوار با قطر 2 متر و دوره‌های 1، 3 و 7 روز انجام داد. نتایج این محقق نشان داد تنش‌برشی بحرانی کف برای وقوع فرسایش از 0/05 به 0/19 پاسکال (برای دوره زمانی یک تا هفت روز) افزایش یافته است.

در این تحقیق با استفاده از فلوم دایره‌ای به بررسی فرایند فرسایش رسوبات ریزدانه مخزن سد کرخه شامل روند فرسایش رسوبات، تنش‌برشی آستانه فرسایش و نرخ فرسایش پرداخته شده است.

2- مواد و روش‌ها

1-2- منطقه مورد مطالعه

سد کرخه با ارتفاع 127 متر از پی در 22 کیلومتری شمال غربی شهرستان اندیمشک در استان خوزستان و بر روی رودخانه کرخه احداث شده است. این سد با تراز تاج 234 متر از سطح دریا و طول تاج 3030 متر از لحاظ حجم بدنه، بزرگترین سد تاریخ ایران محسوب می‌شود که با حجم

¹ Elbow River

اولین مقطع در 5 سانتی متری دیواره داخلی قرار گرفته و مقاطع بعدی به سمت دیواره خارجی حرکت می کند. در هر مقطع عمودی، چهار سرعت اندازه گیری و سرعت متوسط جریان با توجه به منطقه تأثیر نقاط اندازه گیری، بصورت وزنی محاسبه شده است. تنش برشی نیز براساس تغییرات مولفه های سرعت و با استفاده از روش تنش رینولدز محاسبه گردید (خواستار بروجنی و صمدی بروجنی، 1391). در این مطالعه درپوش و فلوم برعکس یکدیگر چرخانده شده و از نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم مختلف استفاده گردید که نسبت معادل 1/1 نشان داد پروفیل سرعت این فلوم بیشترین شباهت را با جریان کانال های باز داشته و به معادله لگاریتمی برازش بهتری نشان داده است. بر اساس این اندازه گیری ها و بررسی ها، رابطه مشخصی بین سرعت متوسط و تنش برشی جریان با مجموع سرعت چرخش فلوم و درپوش بدست آمد که به صورت روابط (3) و (4) می باشد.

$$V = 0.2085 \ln(\omega) - 0.0556 \quad R^2 = 0.98 \quad (3)$$

$$\tau = 0.0254 \omega^{1.1777} \quad R^2 = 0.99 \quad (4)$$

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. در این تحقیق از روابط فوق برای تعیین سرعت و تنش برشی جریان به ازای سرعت های مختلف چرخش فلوم و درپوش استفاده می شود.

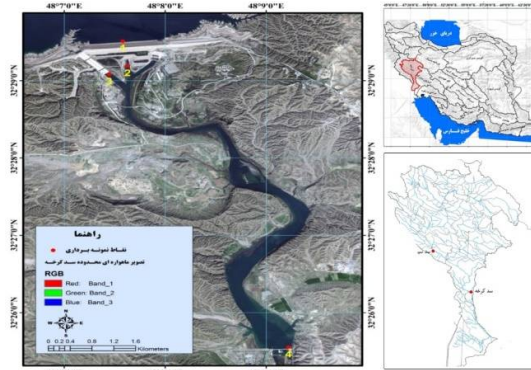
2-4- مراحل انجام آزمایش ها

برای بررسی تنش برشی آستانه فرسایش رسوبات سد کرخه در فلوم دایره ای، لازم است رسوبات مورد آزمایش در بستر فلوم با شرایط فیزیکی و مکانیکی مشابه با رسوبات موجود در بستر مخزن سد مورد مطالعه (سد کرخه) قرار داده شوند. لذا با روش ریختن مخلوط آب و رسوب در فلوم و فرصت دادن به رسوبات برای ته نشینی و تحکیم (به دلیل ریزدانه بودن آنها) می توان این شرایط را بوجود آورد.

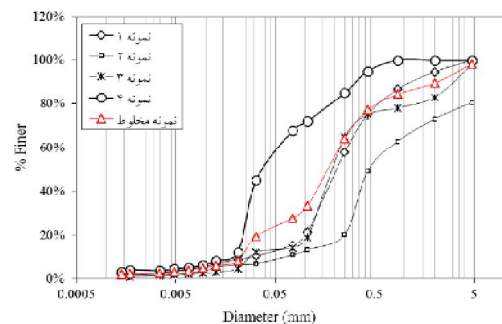
برای بررسی ته نشینی و تحکیم رسوبات در شرایط سکون، از ستون های ته نشینی از جنس پلی اتیلن با قطر 6 سانتی متر و ارتفاع کلی 60 سانتی متر استفاده شد (شکل 4). در این آزمایش ها سطح مشترک آب و رسوب در ستون های

که قابلیت حرکت در جهت های مختلف و خلاف یکدیگر را فراهم نموده است. شکل 3 نمای شماتیک و قسمت های مختلف این فلوم را نشان می دهد.

به منظور بررسی پارامترهای هیدرولیکی فلوم دایره ای، با استفاده از سرعت سنج صوتی (ADV) سه بعدی، سرعت و تنش برشی جریان در پنج مقطع عمودی اندازه گیری شد.



شکل 1 موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و نقاط برداشت رسوب



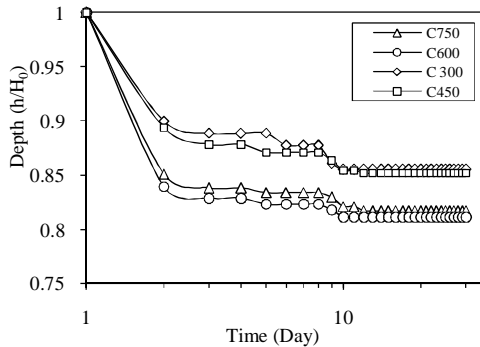
شکل 2 منحنی دانه بندی رسوبات سد کرخه



شکل 3 نمای شماتیک و اجزای فلوم دایره ای مورد استفاده

ته‌نشینی، در زمان‌های مختلف قرائت گردید.

رسوبات، با توقف کامل فلوم و درپوش، اجازه ته‌نشینی به رسوبات تا رسیدن به زمان‌های تحکیم مورد نظر داده شد.



شکل 5 میزان تغییرات عمق روزانه به عمق اولیه رسوبات در غلظت‌های مختلف آزمایش تحکیم



شکل 4 ستون‌های ته‌نشینی رسوب

غلظت‌های اولیه رسوب در این آزمایش‌ها معادل 300، 450 و 600 گرم بر لیتر انتخاب شد و زمان انجام قرائت پائین رفتن سطح رسوب ته نشین شده در ستون ناشی از ته‌نشینی و تحکیم رسوبات از لحظه شروع آزمایش تا 30 روز در فواصل مختلف زمانی یک ساعت تا یک روز (بسته به میزان پائین رفتن سطح رسوب) انجام پذیرفت. شکل 5 تغییرات عمق روزانه رسوبات نسبت به عمق اولیه را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که پس از 12 روز، غلظت رسوبات و عمق اولیه ته‌نشینی بر میزان تحکیم تأثیر قابل ملاحظه ندارد. با توجه به این موضوع به منظور بررسی زمان تحکیم بر تنش‌برشی آستانه فرسایش، زمان‌های تحکیم 3، 14 و 30 روز در نظر گرفته شد. شایان ذکر است تحکیم رسوبات در این مطالعه، تنها شامل تحکیم تحت وزن خود رسوبات بوده و این فرایند متفاوت از مفهوم تحکیم خاک‌های ریزدانه تحت بارگذاری خارجی است.

در آزمایش‌های اصلی پس از ریختن رسوبات در فلوم دایره‌ای، ابتدا برای مخلوط شدن کامل رسوبات و خرد شدن کامل فلوک‌ها، فلوم و درپوش به مدت 30 دقیقه بر خلاف جهت هم به چرخش درآمدند. پس از مخلوط شدن کامل

پس از گذشت زمان تحکیم، برای بررسی تنش‌برشی آستانه فرسایش و نرخ فرسایش، فلوم و درپوش با کمترین سرعت در خلاف یکدیگر و با نسبت چرخش 1/1 به حرکت درآمدند (خواستار بروجنی و صمدی بروجنی، 1391). اگر سرعت و تنش اعمال شده از تنش‌برشی آستانه فرسایش کمتر باشد، رسوبات بدون تغییر و در بستر باقی می‌مانند اما اگر بیشتر باشد رسوبات شروع به فرسایش و معلق شدن می‌کنند. در حالت دوم زمان اعمال تنش‌برشی تا رسیدن به یک حالت تعادل به طول می‌انجامد پس از آن سرعت و تنش‌برشی دوم و به همین ترتیب تنش‌های بعدی اعمال می‌شود. جدول 1 مشخصات هیدرولیکی جریان در طول آزمایش فرسایش را نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها، در هر تنش‌برشی، هر ده دقیقه از عمق‌های مختلف نمونه‌گیری بعمل آمد و بعد از خشک کردن نمونه‌ها در آون، غلظت رسوبات معلق با توجه به فاصله قرارگیری شیرهای نمونه‌گیری، به روش وزنی محاسبه شد.

جدول 1 زمان و تنش‌برشی جریان در آزمایش‌های فرسایش

زمان (دقیقه)	0-60	60-245	245-395	395-705	705-1105
سرعت چرخش فلوم و درپوش (m/s)	2/5	4/1	5/8	7/4	9/5
تنش‌برشی (N/m ²)	0/13	0/31	0/58	0/90	1/40
سرعت (m/s)	0/14	0/24	0/31	0/36	0/41
عدد فرود	0/10	0/17	0/22	0/26	0/30

3- نتایج و بحث

3-1- تغییرات زمانی غلظت رسوبات فرسایش یافته

به منظور بررسی نرخ و تنش برشی آستانه فرسایش، تغییرات زمانی غلظت برای دوره‌های متفاوت تحکیم در برابر تنش برشی جریان ترسیم شد که نتایج در شکل 6 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمام آزمایش‌ها با افزایش تنش برشی بستر، غلظت رسوبات معلق نیز افزایش می‌یابد. به بیان دیگر افزایش تنش برشی موجب افزایش نرخ فرسایش رسوبات بستر می‌شود. همچنین در یک تنش برشی ثابت و زمان مشخص از شروع آزمایش با افزایش زمان تحکیم، غلظت رسوبات معلق کاهش می‌یابد. به طور مثال پس از گذشت 480 دقیقه از زمان آزمایش که تنش برشی 0/9 نیوتن بر متر مربع اعمال شده، مقدار غلظت رسوبات معلق برای رسوبات سه روز تحکیم یافته بیشتر از رسوبات دو هفته‌ای و یک ماهه است. همچنین مشاهده می‌شود که رسوبات با دوره تحکیم کمتر نسبت به افزایش تنش برشی تغییرات بیشتری نشان می‌دهند.

نتایج نشان می‌دهد در مقادیر تنش برشی بزرگ‌تر اختلاف غلظت رسوبات فرسایش یافته در زمان‌های 14 و 30 روزه کم می‌باشد ولی با رسوبات سه روز تحکیم یافته بیشتر است. این موضوع مشابه آزمایش‌های ستون ته‌نشینی است که نشان داد تفاوتی زیادی بین مقدار تحکیم با دوره 14 و 30 روز وجود ندارد. به نظر می‌رسد در تنش‌های برشی کمتر از 0/9 نیوتن بر متر مربع فرسایش به صورت سطحی باشد اما در تنش‌های بزرگتر، مقاومت ذرات رسوب ته‌نشین شده کمتر از قدرت آشفته‌گی جریان است که این امر موجب فرسایش توده‌ای از سطح بستر می‌شود.

Winterwerp et al. (2012) فرسایش سطحی و توده‌ای را تابعی از تنش برشی متوسط بستر می‌دانند.

3-2- تنش برشی آستانه فرسایش

برآورد تنش برشی آستانه فرسایش بر اساس افزایش غلظت رسوبات معلق صورت گرفت. در حقیقت با توجه به زمان‌های تحکیم و فرصت کافی برای ته‌نشینی رسوبات، در شروع آزمایش‌های فرسایش غلظت رسوبات معلق بسیار نزدیک به صفر است. از این رو در این تحقیق با اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق از شروع آزمایش‌های فرسایش، تنش برشی که غلظت متوسط رسوبات معلق را به 0/1 گرم بر لیتر رساند، به عنوان تنش برشی آستانه فرسایش در نظر گرفته شد. بر همین اساس مقدار متوسط غلظت رسوبات معلق در هر تنش برشی بدست آمد و رابطه‌ای بین این مقادیر و تنش برشی جریان برای دوره‌های تحکیم 3 تا 30 روز برقرار شد که به ترتیب در روابط (5) تا (7) ارائه شده است. همان‌طور که مشخصات آماری این روابط نشان می‌دهد برآورد تنش برشی آستانه فرسایش با استفاده از این معادله‌ها از دقت قابل قبولی به ویژه در مطالعات رسوبی برخوردار است. مقادیر تنش برشی آستانه فرسایش رسوبات ریزدانه سد کرخه در جدول 2 ارائه شده است.

$$C_e = 3.4805 * \tau_b - 0.453 \quad R = 0.94 \quad (5)$$

$$C_e = 3.2371 * \tau_b - 0.611 \quad R = 0.95 \quad (6)$$

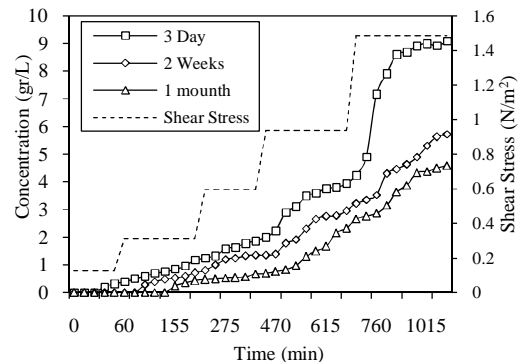
$$C_e = 2.7098 * \tau_b - 0.731 \quad R = 0.93 \quad (7)$$

در این روابط C_e غلظت رسوبات فرسایش یافته (گرم بر لیتر) و τ_b تنش برشی بستر (نیوتن بر متر مربع) می‌باشد.

در ادامه با توجه به نتایج بدست آمده رابطه (8) به منظور تخمین تنش برشی آستانه فرسایش بر اساس زمان تحکیم رسوبات بستر بدست آمد که نتایج آن در شکل (7) نیز ارائه شده است.

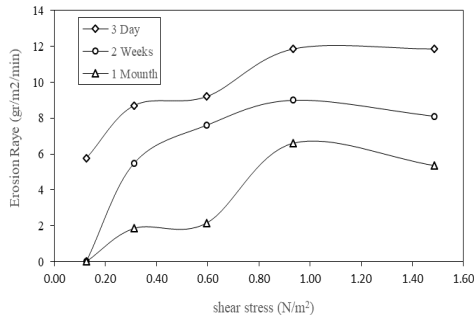
زمان تحکیم (روز)	3	14	30
تنش برشی آستانه فرسایش (N/m^2)	0/16	0/22	0/31
سرعت آستانه فرسایش (m/s)	0/15	0/18	0/21
عدد فرود	0/11	0/13	0/15

$$\tau_{ET} = 0.1516e^{0.0243 C_T} \quad R^2 = 0.99 \quad (8)$$



شکل 6 تغییرات زمانی غلظت رسوبات معلق برای دوره‌های تحکیم مختلف

محکم‌تری را تشکیل می‌دهند و در نتیجه مقاومت بیشتری به فرسایش از خود نشان می‌دهند.



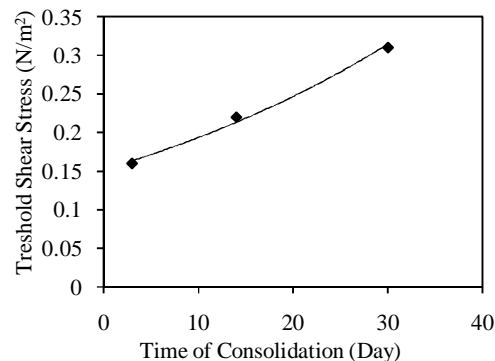
شکل 8 تغییرات نرخ فرسایش در دوره‌های مختلف تحکیم

همچنین مشاهده می‌شود که برای هر سه دوره تحکیم در تنش‌برشی پنجم (1/4 نیوتن بر متر مربع) نرخ ته‌نشینی کاهش داشته که در تحکیم یک ماهه این کاهش مشهودتر است. همچنین در تنش‌برشی سوم (0/58 نیوتن بر متر مربع) نیز کاهش نرخ فرسایش در تحکیم سه روزه و یک ماهه قابل مشاهده است که دلیل این موضوع را می‌توان با دوباره ته‌نشین شدن رسوبات فرسایش یافته که نهایتاً در مقدار نرخ فرسایش تأثیرگذار است، توجیه نمود.

4- نتیجه‌گیری

آزمایش‌های فرسایش رسوبات سد کرخه با استفاده از فلوم دایره‌ای انجام شد. دوره تحکیم و تنش‌برشی بستر از عوامل تأثیر گذار بر میزان فرسایش رسوبات می‌باشد به طوری که به ازای یک تنش‌برشی مشخص، دوره تحکیم تعیین کننده میزان فرسایش است. فرسایش رسوبات در دوره‌های تحکیم کمتر، به میزان بیشتری اتفاق می‌افتد. نتایج نشان داد در تنش‌های برشی بزرگتر از 0/9 نیوتن بر متر مربع فرایند فرسایش رسوبات سه روزه از حالت سطحی به حالت توده‌ای تغییر می‌یابند. در این تحقیق تنش‌برشی آستانه شروع فرسایش برای دوره‌های تحکیم 3، 14 و 30 روزه رسوبات به ترتیب 0/16، 0/22 و 0/31 نیوتن بر مترمربع برآورد شد که عدد فرود جریان متناظر با این تنش‌های برشی به ترتیب 0/11، 0/13 و 0/15 بدست آمد. همچنین رابطه تجربی بر اساس دوره تحکیم رسوبات سد کرخه برای میزان تنش برشی آستانه فرسایش بدست آمد که با توجه به زمان

در این رابطه، T_{ET} تنش‌برشی آستانه فرسایش (نیوتن بر متر مربع) و C_T زمان تحکیم رسوبات ته‌نشین شده (روز) می‌باشد. همان‌طور که مشخص است با افزایش زمان تحکیم رسوبات، تنش‌برشی آستانه فرسایش نیز افزایش می‌یابد که این تغییرات به صورت رابطه نمایی می‌باشد.



شکل 7 رابطه بین تغییرات تنش‌برشی آستانه فرسایش و زمان تحکیم

3-3- نرخ فرسایش

برای محاسبه نرخ فرسایش از رابطه (9) استفاده شد. در این رابطه از حاصل ضرب اختلاف دو غلظت متوالی در حجم سیال، جرم رسوب فرسایش مشخص می‌شود. از تقسیم جرم رسوبات بر فاصله زمانی دو نمونه‌گیری و بر سطح فلوم، نرخ متوسط فرسایش در واحد زمان و واحد سطح بستر فلوم بدست می‌آید.

$$Q_E = \frac{(C_2 - C_1) \times V_{flume}}{(t_2 - t_1) \times A} \quad (9)$$

در رابطه (9)، Q_E نرخ فرسایش (gr/m²/min)، C غلظت رسوبات معلق (گرم بر لیتر)، V حجم سیال موجود در فلوم (لیتر)، t_i زمان (دقیقه) و A مساحت بستر فلوم (m²) می‌باشد.

بر اساس نتایج بدست آمده، نرخ فرسایش برای هر تنش برشی و دوره‌های مختلف تحکیم محاسبه و در شکل 8 ارائه شده است. با توجه به شکل 8 می‌توان اظهار نمود که نرخ فرسایش با دوره تحکیم رابطه معکوس دارد، به طوری که در تنش‌برشی یکسان، افزایش دوره تحکیم موجب کاهش نرخ فرسایش می‌شود. در حقیقت نیروهای چسبندگی رسوبات ریزدانه در دوره‌های تحکیم بیشتر، توده‌های چگال‌تر و

Amelia V.C.M., Teixeira, C.F.J., Senhorinha. Teixeira, F.C.F.S. (2010). Physical characterization of estuarine sediments in the northern coast of Portugal. *Journal of Coastal Research*, 26.2: 301-311.

Bui, T.D. (2000). Cohesive Sediment Transport in Natural Streams. *Water Resources* 2000. 129.97.146.103

Droppo, I.G. (2009). Biofilm structure and bed stability of five contrasting freshwater sediments. *Marine and Freshwater Research*. 60: 690-699.

Giardino, A., Ibrahim, E., Adam, S., Toorman, E.A., Monbaliu, J. (2009). Hydrodynamics and Cohesive sediment transport in the Ijzer Estuary, Belgium: case steady. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering (ACSE)*, 135:176-184.

Glasbergen, K. (2014). The Effect of Coarse Gravel on Cohesive Sediment Entrapment in an Annular Flume. presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the Degree of master of Science In Geography. Waterloo, Ontario, Canada.

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

Krestenitis, Y.N., Kombiadou, D.K., Savvidis, Y.G. (2007). Modelling the cohesive sediment transport in marine environment: the case of Themaikos Gulf. *Ocean Science*, 3:91-104.

Krishnappan, B.G. (2006). Cohesive sediment transport studies using a rotating circular flume. The 7th Int. Conf. on Hydroscience and Engineering (ICHE), Sep10-13, Philadelphia, USA.

Lumborg, U. (2005). Modeling the deposition, erosion, and flux of cohesive sediment through Oresund. *Journal of Marine System*, 56:179-193.

Mehta, A.J., E.J. Hayter, W.R. Parker, R.B. Krone, and A.M. Teeter (1989). "Cohesive Sediment Transport. I: Process Description," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 115, No. 8, pp. 1076-1093.

Millar, R.G., and M.C. Quick (1998). "Stable width and depth of gravel bed rivers with cohesive banks," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124(10), 1005-1013

Krestenitis, Y.N., Kombiadou, D.K., Savvidis, Y.G. (2007). Modelling the cohesive sediment transport in marine environment: the case of Themaikos Gulf. *Ocean Science*, 3:91-104.

Lavelle, J. W., Mofjeld, H. O., & Baker, E. T. (1984). An in-situ erosion rate for a fine-grained marine

ته نشینی رسوبات می توان از عدد فرود متناظر با تنش برشی آستانه فرسایش به منظور طراحی و نگهداری سازه های آبی در شرایط غیر رسوبگذار استفاده نمود. نتایج نرخ فرسایش حاکی از رابطه معکوس بین این پارامتر و عمر ته نشینی رسوبات بود. با توجه به اطلاعات بدست آمده می توان در مدیریت مخزن به منظور خروج جریان های غلیظ، رسوب شویی مخزن و همچنین مدیریت شبکه انتقال و توزیع آب در پایین دست استفاده نمود.

نتایج این تحقیق در مقایسه با تحقیقات Wang (2003) و Glasbergen و Droppo (2009) و Lumborg (2005) (2014) که آستانه تنش برشی شروع فرسایش بستر را که به ترتیب معادل 0/5، 0/4، 0/5، 0/212 و 0/19 نیوتن بر متر مربع به دست آورد، به ترتیب 22/5٪، 38/0٪، 46/2٪ و 63/2٪ اختلاف دارد. دلیل این تفاوت را می توان مربوط به نوع رسوبات و زمان تحکیم آزمایش ها دانست.

5- فهرست علائم

C	غلظت رسوبات
C_E	غلظت رسوبات فرسایش یافته
C_T	زمان تحکیم
Q_E	نرخ فرسایش
v	سرعت جریان
y	عمق جریان
τ_b	تنش برشی بستر
τ_{ET}	تنش برشی آستانه فرسایش
ω	سرعت چرخشی

6- منابع

پرهمت. ج، پرهمت. ر، (1390). تحلیل و بررسی منطقه ای دبی پایه حوضه های کارستی مطالعه موردی حوضه کرخه، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

خواستار بروجنی، م، صمدی بروجنی، ج، (1391). بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان در فلوم دوار با استفاده از سرعت سنج صوتی (ADV). *مجله هیدرولیک ایران*. دوره 7، شماره 2، صص. 75-88.

- Stone, M., krishnappan, B.G., Emelko, M.B. (2008). The effect of bed age and shear stress on the particle morphology of eroded cohesive river sediment in an annular flume. *Journal of Water Research*. 42: 4179–4187.
- Wang, Y.H., (2002). The intertidal erosion rate of cohesive sediment: a case study from Long Island Sound. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56: 891-896.
- Winterwerp, J. C. van Kestern, W. G. M. van Prooijen, B. (2012). A conceptual framework for shear flow-induced erosion of soft cohesive sediment beds.
- Yang, S.S and J.Y. Wang. (1996). Morphogenesis, ATP content and oxytetracycline production by *Streptomyces rimosus* in solid state cultivation. *Journal of Appl. Bacteriol*. 80:545-550.
- sediment. *Journal of Geophysical Research* 89, 6543–6552.
- Roberts, J, R. Jepsen, D. Gotthard, and W. Lick (1998). "Effects of Particle Size and Bulk Density on Erosion of Quartz Particles," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 12, pp. 1261-1267.
- Samadi-Boroujeni, H., Fathi-Moghaddam, M., Shafaie-Bajestan, M., Vali-Samani, M.H. (2005). Modelling of sedimentation and self-weight consolidation of cohesive sediments. *Sediment and Ecohydraulics Intercoh (Elsevier B.V)*. 1stEdn. Oxford, UK, ISBN: 978-444-53184-1.
- Scully, R.W., Shiffman, R.L., Olsen, H.W. and Ko,H.Y., (1984). Validation of Consolidation Properties of Phosphatic Clay at Very High Void Ratios, ASCE Symposium on Sedimentation/Consolidation Models, San Francisco.