

## تأثیر نانو رس بر تنش برشی بحرانی مصالح چسبنده در کانال‌های انتقال آب

مرضیه بهاری<sup>۱\*</sup>، علیرضا عمادی<sup>۲</sup> و علی شاهنظری<sup>۳</sup>

### چکیده

بررسی چگونگی حرکت و ته‌نشینی رسوبات چسبنده، به علت دخالت ماهیت شیمیایی و الکترومغناطیسی ذرات، تحقیق در این زمینه را اندکی مشکل کرده است. این مسأله در رودخانه‌هایی که وجود این ذرات در بار رسوبی آن‌ها قابل ملاحظه است، باعث تأثیر جدی در برآورد بار رسوبی معلق می‌شود. هدف از مطالعه حاضر، بررسی تأثیر نانو رس بر تنش برشی بحرانی مصالح چسبنده در کانال‌های انتقال آب است. آزمایش‌های هیدرولیکی برای بررسی آستانه حرکت مصالح بستر کانال خاکی  $C_{25}$  (انشعابی از بند انحرافی گنج افروز در محدوده پروژه البرز) و همچنین بررسی عملکرد نانو رس بر فرسایش خاک انجام شد. نتایج نشان داد مقدار تنش برشی بحرانی و سرعت بحرانی رسوبات بعد از اختلاط رسوب با نانو رس به ترتیب به میزان ۵۰ و ۱۲/۷۱ درصد افزایش یافت. در نتیجه از آنجایی که افزایش تنش برشی بحرانی نشان‌دهنده پایداری بیشتر ذرات در مقابل فرسایش است؛ بنابراین با کمک نانو رس‌ها می‌توان بر مشکلات ناشی از فرسایش و رسوب‌گذاری در کانال‌ها و حتی رودخانه‌ها فایز آمد.

**واژه‌های کلیدی:** تنش برشی، رسوبات چسبنده، فرسایش، کانال، نانو رس.

ارجاع: بهاری م. عمادی ع. و شاهنظری ع. ۱۳۹۶. تأثیر نانو رس بر تنش برشی بحرانی مصالح چسبنده در کانال‌های انتقال آب. مجله پژوهش آب ایران. ۲۰-۱۳: ۲۴.

۱- دانشجوی دکترای آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.  
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.  
۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

\* نویسنده مسئول: [mbahari198551@yahoo.com](mailto:mbahari198551@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۱۲

## مقدمه

رسوبات ته‌نشین شده در کانال‌های آبیاری دو نوع هستند: رسوبات درشت‌دانه یا غیرچسبنده (ماسه و ذرات درشت‌تر از آن) و رسوبات ریزدانه یا چسبنده. رسوبات چسبنده، رسوباتی هستند که بین ذرات آن‌ها پیوند الکتروشمیایی و چسبندگی وجود داشته باشد. معمولاً به کانی‌های رسی با اندازه کمتر از ۲ میکرون، رسوبات چسبنده<sup>۱</sup> اطلاق می‌شود (موریس و فان، ۱۹۹۸). خاصیت چسبندگی این رسوبات ناشی از نیروهای الکتروشمیایی بین ذرات است. این نیروها که نیروهای غالب بین ذرات‌اند، از لحاظ مقدار از نیروی وزن ذرات بزرگ‌تر و در ضمن با بسیاری از عوامل محیطی رسوبات و ترکیبات آن‌ها مرتبط هستند. این مسأله سبب پیچیدگی در بررسی پدیده‌های هیدرولیکی مربوط به رسوبات چسبنده، از جمله آستانه حرکت ذرات شده است (وجدانی و قمشی، ۱۳۸۱). رسوبات چسبنده شامل ریزدانه‌هایی مانند لای و رس که دارای سطوح بزرگی هستند که قابلیت جذب یکدیگر و حتی مواد ریز دیگری را نیز دارند و منجر به تشکیل ساختارهای خاکدانه‌ای و کلوخه‌ای شکل (فلوکوله شدن<sup>۲</sup>) در تنش‌های برشی کم می‌شوند، همچنین این ساختارها در تنش‌های برشی زیاد دچار شکست خواهند شد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۱). مطابق با تئوری ایجاد و شکستن تصادفی لایه‌های آرام اینیشتن و هون لی، برای فرسایش یک ذره رس هم باید شکستن تصادفی زیر لایه آرام اتفاق افتد و هم اینکه نیروهای هیدرولیکی اعمال شده بر ذرات بر نیروهای مقاوم بین ذرات غالب شوند (وجدانی و قمشی، ۱۳۸۵ ب). لحظه‌ای که ذرات در اثر فرآیند فرسایش، شروع به حرکت می‌کنند، در اصطلاح آستانه حرکت ذرات<sup>۳</sup> می‌گویند. شروع حرکت ذرات به خصوصیات جریان مانند سرعت و عمق، همچنین خصوصیات مواد رسوبی مانند اندازه، شکل و چگالی ذره در مورد رسوبات غیرچسبنده و میزان پیوند الکتروشمیایی و چسبندگی بین ذرات در رسوبات چسبنده بستگی دارد (شفاعی بجستان، ۱۳۸۴ و کریشنامرتی، ۱۹۸۳). شرایط هیدرولیکی لحظه‌ی آستانه حرکت ذرات معمولاً با تنش برشی بحرانی (تنش برشی

جریان در آستانه حرکت) یا سرعت بحرانی تعریف می‌شود (وجدانی و قمشی، ۱۳۸۵ الف). به طور کلی فرسایش رسوبات چسبنده بستر، زمانی اتفاق می‌افتد که سرعت جریان یا تنش برشی ناشی از جریان از یک مقدار بحرانی بیشتر شود (ژو اونگ هوی و همکاران، ۲۰۰۸). در مورد رسوبات غیرچسبنده، وزن ذرات مهم‌ترین عامل مقاوم در برابر حرکت رسوبات است. در مورد رسوبات چسبنده، وزن ذرات در مقایسه با نیروهای الکتروشمیایی بین ذرات بسیار جزئی است. برای حرکت این رسوبات، نیروهای به نسبت بزرگی (در مقایسه با رسوبات غیرچسبنده) به منظور شکستن پیوندهای بین ذرات لازم است. تنش برشی بحرانی رسوبات چسبنده برخلاف رسوبات غیرچسبنده نسبت معکوس با قطر ذرات دارد و متناسب با  $d^{1/3}$  تا  $d^{4/3}$  بوده، که  $d$  قطر ذرات است (رادکیوی، ۱۹۹۰). آبشویی رسوبات چسبنده در چند مرحله اتفاق می‌افتد. به این ترتیب که ابتدا ذراتی به صورت پراکنده و به دنبال آن توده‌های کوچکی از کف جدا و با جریان شسته می‌شوند. این عمل منجر به ایجاد بستری زبرتر نسبت به حالت اولیه می‌شود که به موجب آن تکان‌های ناشی از نیروهای کششی و بالابرنده افزایش می‌یابد؛ در نتیجه پیوند بین توده‌های رسوب بستر به تدریج سست می‌شود تا حدی که این توده‌ها به صورت آنی از بستر کنده شده و پس از معلق شدن و از هم پاشیدن به صورت ذرات ریزی با جریان حمل می‌شوند و چرخه‌های بعدی را طی می‌کنند (هافمن و ورهیح، ۱۹۹۷). پدیده فرسایش رسوبات چسبنده، به پارامترهایی چون اندازه ذرات، نسبت پراکندگی رس‌ها، درصد رس، حدود اثربرگ، مقاومت برشی و کششی رسوبات، درصد رطوبت، مقدار نمک، درجه حرارت محیط رسوبات، نسبت جذب سدیم<sup>۴</sup>، ظرفیت تبادل کاتیونی<sup>۵</sup> بستگی دارد (رادکیوی و تان، ۱۹۸۴؛ هام و میگنیوت، ۱۹۹۳ و شی لیانگ کیانگ و همکاران، ۲۰۰۷). تان گوانگ مینگ و همکاران (۲۰۱۰) فرآیند فرسایش رسوب چسبنده پس از تحکیم را در یک سیستم مجرای بسته آزمایش کردند و آثار وزن مخصوص خشک رسوب تحکیم یافته را بر نرخ آبستگي بررسی و رابطه‌ای نیز برای نرخ آبستگي بر پایه نتایج آزمایشگاهی به دست آوردند.

1- Cohesive Sediment

2- flocculation

3- Incipient Motion

4- Sodium Adsorption Ratio (SAR)

5- Cation-Exchange Capacity (CEC)

با میزان سیلت و رس کمتر از ۴۵٪ و از نوع بد دانه‌بندی شده است، بنابراین جزء رسوبات ریزدانه می‌باشد. فلوم یا کانال روباز مورد استفاده، کانالی مستطیلی شکل است که چهار چوب آن از جنس آهن و دیواره‌های آن از جنس شیشه و پلکسی گلاس است. عرض فلوم ۵۰ سانتی‌متر، طول آن ۱۰ متر و ارتفاع آن ۷۰ سانتی‌متر بود. فلوم دارای حوضچه‌ای از جنس بتن مسلح می‌باشد که از آب استخراج شده از چاه آرتزین تغذیه می‌کند. سیستم آب فلوم به صورت مدار بسته و چرخشی عمل می‌کند. حداکثر دبی ورودی به کانال با یک پمپ با دبی ۳۰ لیتر در ثانیه تأمین می‌شد. کنترل دبی با یک شیرفلکه که روی لوله رانش سیستم پمپاژ قرار داشت، انجام می‌گرفت. با قرائت عمق‌سنج پایین‌دست کانال که هد آب روی سرریز را اندازه‌گیری می‌کند و با توجه به اطلاعات دبی - ارتفاع سرریز مربوطه، دبی عبوری از فلوم به دست آمد. عمق آب درون فلوم با عمق‌سنج، اندازه‌گیری شد. شیب کانال با یک الکتروموتور که در زیر فلوم نصب شده، قابل تغییر بود که در این تحقیق فلوم به ترتیب در شیب‌های مختلف ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳، ۰/۰۰۶ و ۰/۰۰۸ قرار داده شد. اندازه‌گیری مقدار دبی عبوری از کانال با یک سرریز مثلثی ۹۰ درجه انجام گرفت که در پایین‌دست کانال نصب شده بود. به منظور انجام آزمایش‌ها، نمونه‌های دست خورده بایستی کف فلوم پهن شوند. برای جلوگیری از برخورد مستقیم آب به نمونه، کف کانال به وسیله ورق‌های پلکسی‌گلاس به ارتفاع ۶ سانتی‌متر بالا آورده شد. بدین ترتیب که ۳ متر از ابتدای کانال را به ارتفاع ۶ سانتی‌متر بالا آورده بعد از آن ۶۰ سانتی‌متر از طول کانال برای قرار دادن نمونه خالی گذاشته شد، سپس ۲ متر دیگر که بعد از محل قرارگیری نمونه بود نیز به ارتفاع ۶ سانتی‌متر بالا آورده شد، بنابراین با بالا آوردن کف کانال در محدوده‌ای معین و ایجاد محفظه‌ای به ابعاد ۶ × ۵۰ × ۶۰ سانتی‌متر درون آن، امکان قرار دادن نمونه در کف کانال و حرکت جریان آب از روی نمونه ایجاد شد (شکل ۱). شایان ذکر است که ورق‌های پلکسی‌گلاس به کار برده شده، ورق‌هایی با ضخامت ۶ میلی‌متر بودند که در ابعاد لازم بریده و با چسب آکواریوم و دستگاه تزریق تفنگی، در محل مورد نظر نصب و آب‌بندی شدند. برای پیدا کردن آستانه حرکت رسوبات چسبنده، میزان فرسایش از طریق

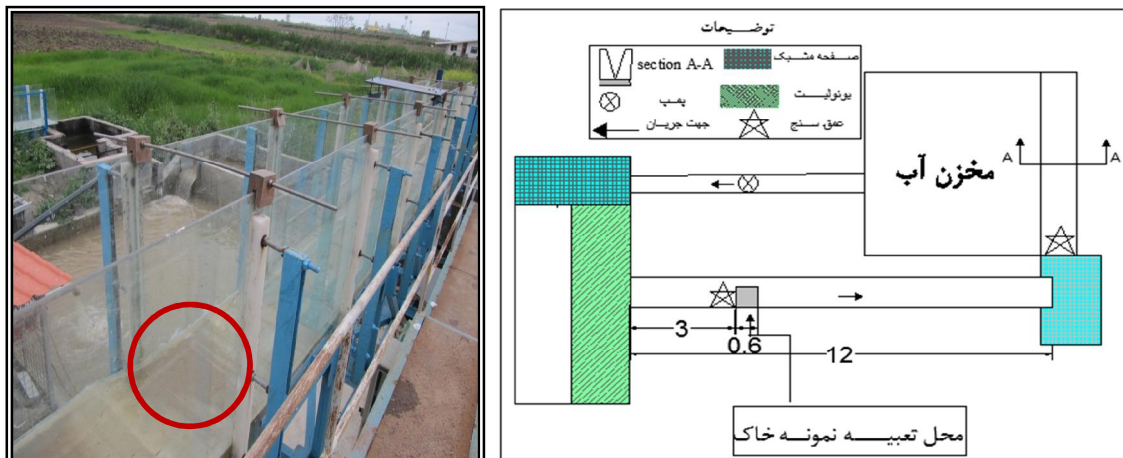
نانو رس‌ها کانی‌هایی در مقیاس نانومتر هستند که از سطح ویژه‌ای در حدود ۷۵۰ متر مربع بر گرم برخوردارند (ژونگ ژونگ، ۲۰۰۸). نانو رس مورد استفاده از نوع نانو رس تجاری کلوزایت B 30 است که از رس مونت‌موریلونیت تهیه شده است و گستردگی قابل توجهی در جهان دارد، همچنین به دلیل داشتن سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، توانایی جذب آب بالایی دارد (بهاری و همکاران، ۲۰۱۲). خسروانی‌مقدم و قربانی (۱۳۹۰)، تأثیر ماده نانو رس بر بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک‌های چسبنده را مطالعه کردند. افزایش نانو رس به خاک ماسه‌ای رس‌دار باعث بهبود خواص خاک می‌شود (محمدزاده ثانی و همکاران، ۱۳۸۹). دنیل و همکاران (۲۰۰۹)، با انجام آزمایش تراکم روی خاکستر بادی و با افزایش مقدار ارگانوسیلان<sup>۱</sup> در ابعاد نانو نتیجه گرفتند که اصلاح خاک با ارگانوسیلان، افزایش مقاومت، کاهش پتانسیل تورم و کاهش چشمگیر رسانایی هیدرولیکی را به همراه داشته است.

مقابله با مشکل رسوب‌گذاری کانال‌ها، از جمله مسایلی است که در طراحی و برنامه‌ریزی شبکه‌های آبیاری باید گنجانده شود. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در استفاده از موادی با مقیاس نانو، بررسی عملکرد استفاده از این مواد و موارد پیرامون آن در کاهش فرسایش بستر کانال‌های خاکی انتقال آب ضروری است. بدین منظور در این تحقیق از نانو رس استفاده شده است. در این مطالعه با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تأثیر نانو رس بر تنش برشی بحرانی مصالح چسبنده بستر کانال‌های خاکی بررسی شد.

### مواد و روش‌ها

برای بررسی آستانه حرکت، همچنین شناخت خواص فیزیکی خاک، از مصالح بستر کانال خاکی C<sub>25</sub> (انشعابی از بند انحرافی گنج افروز در محدوده پروژه البرز در عرض جغرافیایی بین ۱۵°، ۳۶° تا ۴۶°، ۳۶° شمالی و طول جغرافیایی ۳۵°، ۵۲° تا ۵۳°، ۰۰° شرقی) نمونه‌برداری به صورت دست‌خورده انجام شد. آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری روی سه کیلوگرم از این خاک انجام و منحنی دانه‌بندی خاک رسم شد. با رسم منحنی دانه‌بندی مشخص گردید که خاک منطقه از نوع سیلتی رسی (SiC)

اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری رسوبات و حجم فرسایش یافته رسوبی بعد از هر آزمایش به دست آمد.



شکل ۱- پلان و نمایی از فلوم آزمایشگاهی و محل قرارگیری نمونه خاک

مخصوص ظاهری لازم هستند در دو وضعیت قبل و بعد از ترکیب رسوبات با نانو رس آمده است. منظور از حجم فرسایش یافته رسوبات، حجمی از بستر است که بعد از هر آزمایش فرسایش می‌یابد و به صورت حفره‌هایی در بستر نمایان می‌شود. با توجه به این‌که این حفره‌ها بعد از آزمایش از آب پر می‌شوند، حجم آن‌ها از طریق مکش به وسیله سرنگی با حجم ۲۰ سی‌سی و در صورت بزرگ بودن حفره‌های ایجاد شده، حجم آن‌ها با پیپت مدرج اندازه‌گیری شد.

نمونه مورد نظر با استفاده از یک سیلندر استوانه‌ای به قطر ۶/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۴/۶ سانتی‌متر از بستر رسوبی تحت آزمایش برداشت شد. بدین ترتیب که بعد از ریختن رسوبات در محل مورد نظر، وقتی که نمونه کاملاً جاسازی و آماده آزمایش شد، به وسیله سلیندر مذکور، نمونه‌ای استوانه‌ای از بستر آزمایش برداشت شد، با اندازه‌گیری وزن آن و با توجه به اینکه حجم سیلندر استوانه‌ای معلوم است، می‌توان جرم مخصوص ظاهری رسوبات را به دست آورد. در جدول ۱ اندازه‌گیری‌هایی که برای محاسبه جرم

جدول ۱- نتایج حاصل از اندازه‌گیری پارامترهای لازم برای محاسبه جرم مخصوص ظاهری رسوبات

$\rho$	$V_c$	$m_2$	$m_1$	A
۱/۴۱۴	۱۵۲/۶۴	۹۸/۹۲	۴۰۰/۷۲	قبل از ترکیب با نانو رس
۱/۲۶۸	۱۵۲/۶۴	۹۷/۹۴	۳۷۶/۷۳	بعد از ترکیب با نانو رس

A، وضعیت خاک؛  $m_1$ ، وزن نمونه با استوانه (gr)؛  $m_2$ ، وزن استوانه خالی (gr)؛  $V_c$ ، حجم استوانه (cm)؛  $\rho$ ، جرم مخصوص ظاهری.

عرض کف فلوم با اندازه‌گیری عمق جریان با دستگاه عمق‌سنج فلوم، در هر حالت قابل محاسبه است. شیب کف نیز از روی دستگاه تنظیم شیب فلوم که در زیر فلوم قرار دارد، قابل قرائت است.

میزان فرسایش رسوبات، با اندازه‌گیری حجم فرسایش و جرم مخصوص ظاهری رسوبات، همچنین با داشتن مدت زمان آزمایش قابل محاسبه است. بدین ترتیب که با داشتن حجم فرسایش ( $v$ ) و جرم مخصوص ظاهری رسوبات ( $\rho$ ) از رابطه (۲):

$$m = \rho \cdot v \quad (2)$$

برای تعیین تنش برشی بحرانی رسوبات باید رابطه‌ی بین تنش برشی جریان و میزان فرسایش رسوبات به دست آید (اوتسوب، ۱۹۸۸؛ پرچر و مهتا، ۱۹۸۵ و رونت و شوئند، ۱۹۹۹)، تنش برشی کف از رابطه ذیل قابل محاسبه است:

$$\tau = \gamma R S \quad (1)$$

که در آن  $\tau$  متوسط تنش برشی جریان وارده بر کف؛ R شعاع هیدرولیکی جریان؛  $\gamma$  وزن مخصوص آب و S شیب خط انرژی (که در این‌جا با توجه به یکنواخت بودن جریان، برابر شیب کف فلوم است). شعاع هیدرولیکی جریان با توجه به مقطع مستطیلی فلوم و معلوم بودن

یافت که پنج بار این عمل تکرار شد. شایان ذکر است که آزمایش‌ها با دبی ثابت  $1/46$  l/s انجام گرفت و شیب فلوم عامل متغیر در انجام آزمایش‌ها بود. سپس خاک مورد نظر در کیسه‌های پلاستیکی جداگانه قرار داده و به میزان یک درصد وزنی هر کدام از کیسه‌ها نانو رس به آن‌ها اضافه شد. بعد از بستن کامل، کیسه‌ها به شدت تکان داده شد تا عمل اختلاط به خوبی صورت گیرد. سپس نمونه خاک‌ها در کف فلوم پهن گردیدند و آزمایش‌ها با دبی ثابت و شیب‌های متغیر طبق مراحل قبل، تکرار شد.

در آزمایش‌های هیدرولیکی، نمونه استوانه‌ای از بستر رسوبی به منظور تعیین جرم مخصوص ظاهری رسوبات، هد سرریز مثلثی ( $H_w$ ) عمق آب درون فلوم ( $H_f$ )، شیب فلوم ( $S$ )، مدت زمان هر آزمایش ( $T$ ) و حجم فرسایش یافته رسوبات بعد از آزمایش ( $V_e$ ) برداشت شد. سپس پارامترهای جرم مخصوص ظاهری رسوبات ( $\rho$ )، سرعت آب درون فلوم ( $V$ )، دبی جریان ( $Q$ )، تنش برشی جریان ( $\tau$ ) و میزان فرسایش رسوبات ( $E$ ) برای پیدا کردن شرایط هیدرولیکی آستانه حرکت رسوبات محاسبه شدند.

### نتایج و بحث

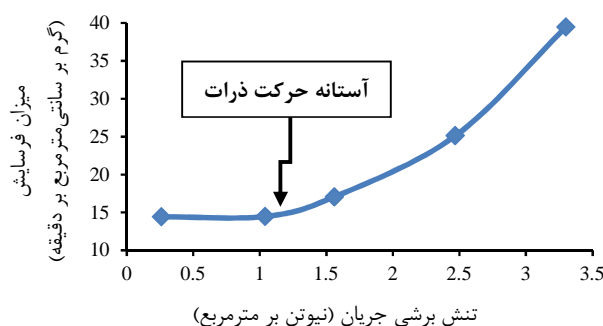
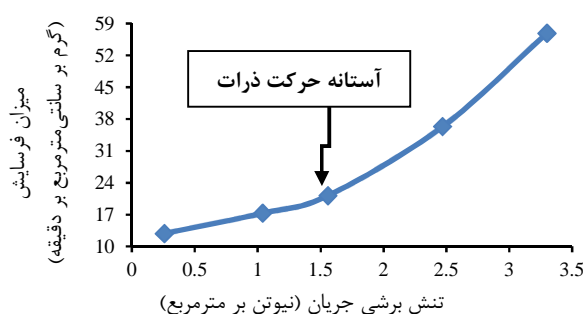
برای تعیین شرایط هیدرولیکی آستانه حرکت رسوبات چسبنده، آزمایش‌های هیدرولیکی انجام شد که برخی از پارامترهای اندازه‌گیری شده در جدول ۲ آمده است. برای پیدا کردن شرایط هیدرولیکی آستانه حرکت رسوبات چسبنده، باید رابطه‌ی بین تنش برشی جریان و عاملی که نشان دهنده میزان حرکت رسوبات است، پیدا شود. در مورد رسوبات چسبنده این عامل، می‌تواند غلظت مواد معلق (رسوبات فرسایش یافته معلق) یا اینکه میزان فرسایش رسوبات در طول آزمایش باشد. در تحقیق حاضر میزان فرسایش رسوبات، به عنوان عامل نشان دهنده میزان حرکت رسوبات، انتخاب و اندازه‌گیری شد؛ بنابراین برای پیدا کردن تنش برشی بحرانی رسوبات، کافی است رابطه بین تنش برشی جریان و میزان فرسایش رسوبات پیدا شود. رابطه‌ی بین این دو عامل برای رسوبات منطقه در دو حالت قبل و بعد از افزودن نانو رس به خاک به ترتیب، در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

جرم رسوبات فرسایش یافته ( $m$ ) به دست آمده و با داشتن مدت زمان آزمایش و سطح فرسایش، میزان فرسایش برحسب گرم در سانتی‌مترمربع در دقیقه به دست می‌آید. منظور از سطح فرسایش، سطحی است که تحت فرسایش قرار می‌گیرد که در این‌جا برابر سطح خارجی نمونه است که باتوجه به عرض فلوم ( $50$  سانتی‌متر) و طول محل نمونه ( $60$  سانتی‌متر) این سطح برابر  $3000$  سانتی‌متر مربع است.

شیوه انجام آزمایش‌ها به این ترتیب است: ابتدا خاک در محل در نظر گرفته شده درون فلوم، ریخته و با چکش فیبر فشرده به صورت لایه به لایه متراکم شد. نمونه خاک با آب اشباع گردید و بعد از گذشتن  $24$  ساعت و خشک شدن خاک، نمونه‌ی مرطوب و با ماله سطح نمونه کاملاً صاف شد. همچنین به منظور اندازه‌گیری وزن مخصوص ظاهری خاک، با استفاده از سیلندر استوانه‌ای، نمونه‌ای از بستر برداشته شد و برای توزین به آزمایشگاه مکانیک خاک منتقل شد. محل برداشت نمونه استوانه‌ای دوباره با خاک پر شده و برای انجام آزمایش آماده شد. بعد از آماده شدن بستر، شیب فلوم روی صفر تنظیم شد و سپس پمپ را روشن کردیم تا جریان آب درون فلوم برقرار شود، مدت  $10$  دقیقه این حالت ادامه داشت. این حالت که در ابتدای هر آزمایش رعایت شد، به منظور یکنواخت شدن جریان پمپ و ایجاد شرایطی مناسب و اولیه برای زیاد کردن شیب بود و هیچ اندازه‌گیری در این حالت صورت نگرفت. در مرحله بعد، شیب فلوم را زیاد کرده و به مدت  $30$  دقیقه جریان درون فلوم با این شیب، ادامه داشت. در این حالت هد سرریز مثلثی به منظور به دست آوردن دبی و عمق آب درون فلوم، با عمق‌سنج، به منظور محاسبه تنش برشی و سرعت جریان قرائت شدند. بعد از خاموش کردن پمپ، حجم فرسایش که به صورت حفره‌هایی در سطح نمونه آشکار شده بود، اندازه‌گیری گردید. حفره‌های ایجاد شده در سطح بستر با خاک پر و سطح نمونه به منظور انجام آزمایش بعدی، کاملاً صاف و صیقلی شدند. آزمایش بعدی که با شیب بیشتری نسبت به حالت قبل انجام می‌گرفت، ابتدا با شیب صفر شروع و بعد از  $10$  دقیقه شیب فلوم به شیب مورد نظر رسانده شد. این حالت نیز  $30$  دقیقه ادامه داشت و اندازه‌گیری‌ها مانند حالت قبل انجام شدند. انجام آزمایش‌ها با زیاد کردن شیب به طریق فوق، تا مشاهده فرسایش با حجم به نسبت زیاد ادامه

جدول ۲- داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها برای تعیین آستانه حرکت رسوبات

شیب فلوم	رسوب با نانو رس ( $\text{cm}^3$ )	رسوب بدون نانو رس ( $\text{cm}^3$ )	حجم فرسایش در هر آزمایش ( $\text{cm}^3$ )
۰/۰۰۰۵	۱۰۱۳/۸	۱۰۱۸/۳۹	آزمایش اول ( $V_{e1}$ )
۰/۰۰۰۲	۱۳۶۴/۹	۱۰۲۳/۲۵	آزمایش دوم ( $V_{e2}$ )
۰/۰۰۰۳	۱۶۷۱	۱۲۰۵/۹	آزمایش سوم ( $V_{e3}$ )
۰/۰۰۰۶	۲۸۶۶	۱۷۷۶/۷	آزمایش چهارم ( $V_{e4}$ )
۰/۰۰۰۸	۴۴۸۵/۵	۲۷۹۱/۱	آزمایش پنجم ( $V_{e5}$ )

شکل ۲- رابطه بین تنش برشی و میزان فرسایش برای رسوبات کانال  $C_{25}$  قبل از افزودن نانو رس به خاکشکل ۳- رابطه بین تنش برشی و میزان فرسایش برای رسوبات کانال  $C_{25}$  بعد از افزودن نانو رس به خاک

در این تحقیق با توجه به مشاهدات انجام شده در هنگام آزمایش‌ها و با توجه به رابطه تنش برشی جریان و میزان فرسایش رسوبات، آستانه حرکت ذرات، لحظه‌ای در نظر گرفته شده که میزان فرسایش به طور ناگهانی زیاد شده است؛ یعنی نقطه‌ای از نمودار مذکور که شیب آن تغییر قابل توجهی پیدا کرده است. تنش برشی و سرعت جریان در این لحظه، به ترتیب تنش برشی بحرانی و سرعت بحرانی رسوبات است که در جدول ۳ این پارامترها آورده شده است. همان‌طوری که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش تنش برشی جریان، میزان فرسایش زیاد می‌شود؛ ولی این افزایش در میزان فرسایش تا قبل از لحظه‌ای آستانه حرکت رسوبات مقداری کم و جزئی بوده است بعد از لحظه آستانه حرکت رسوبات شیوه افزایش

میزان فرسایش تغییر کرده است و گرادیان میزان فرسایش تا چندین برابر افزایش یافته که علت آن تبدیل نحوه‌ی فرسایش از حالت ذرات تکی رس به فرسایش توده‌ای رسوبات است که از این نظر، با تحقیقات وجدانی و قمشی (۱۳۸۱) مطابقت دارد. قطعات رسوب که بدین صورت از کف جدا می‌شوند، ابتدا به صورت غلطان به حرکت در می‌آیند، پس از مدتی به قطعات کوچک‌تری خرد می‌شوند و در انتها در پایین دست جریان به حالت ذرات ریز معلق در می‌آیند.

قبل از حالت بحرانی رسوبات حفره‌هایی کوچک و پراکنده در سطح بستر نمایان می‌شود و بعد از حالت بحرانی، حفره‌هایی بزرگ که در نتیجه بزرگ شدن حفره‌های کوچک اولیه هستند، در سطح بستر دیده می‌شود. در

شرایط بعد از حالت بحرانی که حفره‌هایی به نسبت بزرگ در سطح بستر ایجاد می‌شود، پروفیل سطح آب همسو با حفره‌های ایجاد شده بود؛ یعنی در محل حفره‌ها فرورفتگی سطح آب مشاهده شد.

جدول ۳- تنش برشی و سرعت بحرانی رسوبات چسبنده مورد آزمایش

وضعیت	تنش برشی بحرانی (N/m <sup>2</sup> )	سرعت بحرانی (m/s)
قبل از افزودن نانو رس	۱/۰۴	۰/۵۴۳
بعد از افزودن نانو رس	۱/۵۶	۰/۶۱۲

### نتیجه‌گیری

برای طراحی کانال‌های انتقال آب در مناطقی که رسوبات از نوع چسبنده و ریزدانه، در ترکیب رسوبات ورودی به کانال زیاد است، به جای استفاده از معیار حرکت رسوبات غیرچسبنده (که به طور معمول استفاده می‌شود) بهتر است از معیارهای موجود برای رسوبات چسبنده از جمله روش تنش برشی بحرانی رسوبات چسبنده برای طراحی کانال‌ها (وجدانی و قمشی، ۱۳۸۱) استفاده شود. با افزودن نانو رس به خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک به میزان ۱۰/۳۳ درصد کاهش یافته است که این امر به ریزساختارهای با حفرات زیاد و باز ساختار توده‌ای خاک‌های ترکیب شده با نانوذرات نسبت داده می‌شود که هم به دلیل تخلخل بالای میکرو توده‌ها و هم به دلیل نانوحفرات درون ذره‌ای است. ذرات نانو با توجه به سطح ویژه بالای خود (که ناشی از ریز بودن ذرات آن است) و بار سطحی که دارند باعث فعل و انفعالات بین ذره‌ای و قفل و بست‌دهندگی ذرات خاک و در نتیجه ایجاد توده‌های متراکم به نسبت قوی‌تر و بزرگ‌تری در توده خاک می‌شوند؛ به دلیل پیوستگی این توده‌ها، مقدار تنش برشی بحرانی و سرعت بحرانی رسوبات بعد از اختلاط رسوب با نانو رس به ترتیب به میزان ۵۰ و ۱۲/۷۱ درصد افزایش یافت؛ اما بعد از لحظه آستانه، حرکت به علت یکپارچگی ذرات خاک فرسایش به صورت توده‌ای اتفاق افتاد که این عمل منجر به افزایش جرم و حجم فرسایش رسوبات بعد از ترکیب خاک با نانو رس شده است، هرچه شیب بیشتر افزایش می‌یافت، این افزایش فرسایش مشهودتر بود. ساختار توده‌ای به وجود آمده با نانو رس و مکانیسم مقاوم شدن به علت بهبود چسبندگی بین ذره‌ها و بافندگی ذرات باعث شد در آزمایش اول که شیب بسیار کم بود، حتی کاهش فرسایش مشاهده شد؛ ولیکن از آنجایی که شرایط هیدرولیکی لحظه آستانه حرکت ذرات به طور معمول با

تنش برشی بحرانی یا سرعت بحرانی تعریف می‌شود و این پارامتر در طراحی کانال‌های پایدار اهمیت بسیار زیادی دارد؛ لذا افزایش این پارامتر تأثیر قابل ملاحظه‌ای در طراحی‌ها دارد. افزایش تنش برشی بحرانی نشان‌دهنده‌ی پایداری بیشتر ذرات در مقابل فرسایش است و بدین ترتیب با کمک نانو رس‌ها می‌توان بر مشکلات ناشی از فرسایش و رسوبگذاری در کانال‌ها و حتی رودخانه‌ها فایز آمد.

### منابع

- حسینی خ. جعفری ندوشن ا. و خیرخواهان م. ۱۳۹۱. پیش بینی نرخ فرسایش رسوبات چسبنده با استفاده از مدل فازی- عصبی. یازهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. ۱- ۵.
- خسروانی مقدم ع. ر. و قربانی ع. ۱۳۹۰. بررسی اثر نانو رس بر خواص مهندسی خاک‌های چسبنده. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان. ۱- ۵.
- شفاعی بجستان م. ۱۳۸۴. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. ۴۷۰ ص.
- محمدزاده ثانی ا. عربانی م. خداپرست حقی ا. و جمشیدی چناری ر. ۱۳۸۹. تأثیر نانو رس بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه‌های رس‌دار. چهارمین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران. ۱- ۷.
- وجدانی ن. و قمشی م. ۱۳۸۱. تعیین تنش برشی بحرانی فرسایش رسوبات چسبنده و نقش آن در طراحی کانال‌های روباز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۱۵۷ ص.
- وجدانی ن. و قمشی م. ۱۳۸۵ الف. بررسی آزمایشگاهی تنش برشی بحرانی فرسایش رسوبات

- River delta. Coastal Engineering Journal. 49: 25-43.
20. TAN Guang-ming, JIANG Lei, SHU Cai-wen, LV Ping and WANG Jun. 2010. Experimental Study of Scour Rate in Consolidated Cohesive Sediment. Journal of Hydrodynamics. 22: 51-57.
21. Zhongzhong Q. 2008. Preparation and X Characterization of MMT- Silica Nanocomposite: a Sol-Gel Approach Modifying Clay Surface. Physic B. 403: 3231-3238.
22. Zhuong H. Lu J. Liao H. Wang J. Fan B. and Yao S. 2008. Research on cohesive sediment erosion by flow: An overview, Science in China, Series E: Technological Sciences. 51(11): 2001-2012.
- چسبنده شش کانال آبیاری در استان خوزستان. مجله علمی کشاورزی. ۲۹(۴): ۴۵-۵۶.
۷. وجدانی ن. و قمشی م. ۱۳۸۵ ب. تنش برشی بحرانی فرسایش رسوبات چسبنده و نقش آن در طراحی کانال‌های روباز. همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۱-۱۱.
8. Bahari A. Sadeghi nik A. Roodbari M. Taghavi K. and Mirshafiei S. E. 2012. Synthesis and Strength Study of Cement Mortars Containing Sic NanoParticles. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures. 7(4): 1427-1435.
9. Daniels J. M. Mehta P. Vaden M. Sweem D. Mason M. D. Zavareh M. and Ogunro V. 2009. Nano- Scale Organo- Silane Applications in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Journal of Terraspace Science and Engineering. 1(1): 21-30.
10. Haffman G. J. and Verheij H. J. 1997. Scour manual, Balkema, A. A. Publishing Co.Inc., Rotterdam: 19-22.
11. Hamm L. and Migniot C. 1993. Elements of cohesive sediment deposition consolidation and erosion, In: Abbott, M.B.; Price, W.A. (Eds, (Coastal, estuarial and harbour engineer's refrence book)), London, Chapman & Hall. pp. 93-106
12. Krishnamurthy M. 1983. Incipient motion of cohesive soils, Proc. 4th Conf. of ASCE, New York. pp. 96-101
13. Morris G.L., and Fan J. 1998. Reservoir sedimentation handbook. McGraw-Hill Pub., New York. 848 pp.
14. Otsube K. 1988. Critical shear stress of cohesive bottom sediment, Journal of hydraulic engineering, ASCE. 114: 1241-1256.
15. Purchure T. M. and Mehta A. J. 1985. Erosion of soft cohesive sedimen deposition, Journal of hydraulic engineering, ASCE. 111: 1308-1326.
16. Raudkivi A. J. and Tan S. K. 1984. Erosion of cohesive soils. Journal of hydraulic research. 22: 217-233.
17. Raudkivi A. J. 1990. Loose boundary hydraulic, Pergamon Press, New York, USA. 496 p.
18. Ravents T. M. and Schwend P. M. 1999. Flume measurement of sediment erodibility in Boston habor. Journal of hydraulic engineering, ASCE. 125: 998-1005.
19. SHI Liang-qiang, LI Jiu-Fa and DONG Ping. 2007. An experiment study of erosion characteristics of sediment bed at the Yellow