

## بررسی میزان پس‌روی و حجم رسوب فرسایش پس‌رونده در مجاری با شیب تند

امیررضا سالمیان<sup>۱</sup>، محمود شفاعی بجنستان<sup>۲\*</sup>، امیر خسرو جردی<sup>۳</sup>، حسین بابازاده<sup>۴</sup> و حسین صدقی<sup>۵</sup>

۱) دانشجوی دکتری سازه‌های آبی؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ تهران؛ ایران

۲\*) استاد؛ گروه مهندسی آب؛ دانشگاه شهید چمران اهواز؛ اهواز؛ ایران

\*نویسنده مسئول مکاتبات: [m\\_shafai@yahoo.com](mailto:m_shafai@yahoo.com)

۳) و ۴) استادیار؛ گروه علوم و مهندسی آب؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ تهران؛ ایران

۵) استاد؛ گروه علوم و مهندسی آب؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ تهران؛ ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۰۹

### چکیده:

فرسایش پس‌رونده، در اثر یک تغییر ناگهانی در بستر آبراهه‌های با شیب تند شکل می‌گیرد و به سمت بالادست حرکت می‌کند. وقوع پدیده فرسایش پس‌رونده در آبراهه‌ها موجب گود افتادگی بستر و ناپایدار شدن سواحل خواهد شد، در نتیجه رودخانه تعریض شده و حاصل این پدیده انتقال حجم زیاد رسوب به پایین‌دست و مخزن سدها می‌باشد. در تحقیق حاضر تعداد پنج نمونه خاک چسبنده شامل رس و سیلت با درصد اختلاط متفاوت برای شیب بالادست ۲۵ و پایین‌دست پنج درصد برای دبی، سرعت و عمق‌های جریان مختلف مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. میزان حجم رسوب تولید شده به صورت لحظه‌ای و متوسط و نرخ پس‌روی و نیز دبی رسوب اندازه‌گیری شد. از جمله پدیده‌هایی که در این تحقیق مشاهده شد و نقش مهمی در تولید حجم رسوب و نرخ پس‌روی داشت عبارتند از وقوع پرش هیدرولیکی در محل اتصال شیب تند به ملایم، در سطح خاک و افزایش شیب بستر در حین آزمایش به دلیل فرسایش بود. بر اساس نتایج به دست آمده تغییر سه پارامتر میزان درصد رس و سرعت جریان با حجم فرسایش و نیز افزایش نرخ مهاجرت رسوبات و سرعت پس‌روی رابطه مستقیم دارد. در حالت رس خالص با افزایش سرعت جریان به میزان ۱/۵ برابر، حجم متوسط فرسایش ۱۳ درصد، سرعت پس‌روی ۴۰ درصد و دبی رسوب ۲۱ درصد افزایش یافت. با افزایش درصد رس به میزان ۵۰ درصد، متوسط حجم فرسایش ۱۲ درصد، سرعت پس‌روی ۳۸ درصد و دبی رسوب ۱۹ درصد افزایش یافت.

**لغات کلیدی:** حجم فرسایش؛ شیب تند؛ فرسایش پس‌رونده؛ فلو؛ نرخ فرسایش

### مقدمه:

بیش‌تر در سطح حوضه و در اثر تمرکز رواناب سطحی اتفاق می‌افتد متفاوت می‌باشد هر چند که میزان تولید رسوب در هر دو نوع فرسایش بسیار زیاد است. فرسایش آب‌کنندی مورد مطالعه محققان مختلفی قرار گرفته است ولی در خصوص فرسایش پس‌رونده تحقیقات اندک می‌باشد. فرسایش پس‌رونده (یا فرسایش خندقی) یکی از مشخص‌ترین انواع فرسایش در تلفات خاک است. (Kukul et al., 2002) و بیش از ۶۰ درصد فرسایش‌ها در

فرسایش پس‌رونده یکی از انواع فرسایش بستر آبراهه‌های با شیب تند می‌باشد که به دلیل تغییر ناگهانی بستر (وجود پرتگاه در بستر) و در زمان سیلابی اتفاق می‌افتد و باعث می‌شود تا پرتگاه به سمت بالادست حرکت کند که در نتیجه بستر آبراهه عمیق و در اثر ریزش سواحل عرض آبراهه نیز افزایش و حجم رسوب زیادی به پائین دست منتقل می‌شود. این نوع فرسایش با فرسایش آب‌کنندی که

گونه‌های گیاهی از این مناطق، دریافتند که به‌طور طبیعی تشکیل آبکند بر اثر تخریب اکوسیستم‌های خشک است و در نتیجه این فرایند، تولید اولیه پوشش گیاهی در کف دره کاهش می‌یابد (Saafan and Mohamed, 2003).

Duarte و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی فرسایش آبکندی در شمال شبه جزیره ایبری در (سنگ ماسه) پرداختند در مجموع ۱۳۳ کانال دائمی با شواهدی مبنی بر فرسایش آبکندی در منطقه مورد مطالعه به مساحت ۷۱/۸ کیلومتر مربع در دامنه شمالی این رشته کوه نقشه‌برداری شده است. ناهمواری‌های زمین نسبتاً تند، با متوسط شیب ۲۷ درجه است و سطح شیب تپه به‌طور کلی با پوشش گیاهی اقیانوس اطلس پوشیده شده است و تخریب نتیجه از بین رفتن پوشش گیاهی طبیعی پس از آتش سوزی جنگل است. پس از تحقیق دریافتند که همبستگی‌هایی قوی بین مورفومتری، ناهمواری و شدت فرسایش وجود دارد و نیز آبکند به شدت تحت تأثیر سنگ پوشش عمیق قرار دارد. اشکال فرسایش مشاهده شده و روابط توصیف شده نشان می‌دهد توسعه آبکند با فرآیندهای زمین‌لغزه همراه است، که در نهایت توسط حرکت آب زیر زمینی از طریق سنگ پوشش متخلخل کنترل می‌شود. نیروی بالاروی آب و جنگل‌زدایی، محتمل‌ترین علل فرسایش کانال و آبکند است.

Ndomba و همکاران (۲۰۰۹)، سهم فرسایش آبکندی در نرخ رسوب‌دهی حوضه آبریز در تانزانیا را برای خاک‌های (ماسه‌ای لومی، ماسه‌ای رسی) برآورد کردند. مشاهده کلی نشان می‌دهد آبکندها از ویژگی‌های محلی برخوردارند و از لحاظ فضایی پیوسته نیستند و عمدتاً در دامنه‌های کوهپایه قرار دارند. نرخ رسوب‌دهی برآورد شده فرسایش آبکندی ۶۸۰۰ تن در سال است که حدود ۱/۶ درصد نرخ رسوب‌دهی کلی بلند مدت حوضه آبریز است (Ndomba et al., 2009). روش عناصر محدود خطی یک بعدی، پیش‌بینی‌های بسیار خوبی برای فرایندهای

آبراهه‌های با شیب تند از نوع فرسایش پس‌رونده است (Alonso et al., 2002). فرسایش آبکندی یکی از مهم‌ترین منابع تولید رسوب در مناطق خشک است، به‌طوری که ۵۰ تا ۸۰ درصد رسوبات حاصل از فرسایش آبی را شامل می‌شود (Martinez et al., 2004). این پدیده یک تغییر ناگهانی در ارتفاع یا شیب است که آبکندها و دره‌هایی را ایجاد می‌کند و بسته به عوامل مختلف می‌تواند در محدوده‌ی ارتفاعی کم‌تر از یک اینچ تا چندین فوت تغییر نماید و به سمت بالادست حرکت کند (Brush et al., 1960). جریان فوق بحرانی برای تشکیل و توسعه پدیده فرسایش پس‌رونده ضروری است (Bryan, 1990).

Tarek Saafan و Mohamed (۲۰۰۳) به بررسی آزمایشگاهی نرخ فرسایش آبشستگی بستر (Db) و فرسایش آبکندی (Dh) پرداختند. برای شبیه‌سازی فرسایش تحت جریان متمرکز از پنج نمونه خاک (لوم، لوم رسی، لوم سیلتی، لوم ماسه‌ای و لوم رسی سیلتی) مختلف استفاده کردند. به‌منظور ایجاد تنش برشی ( $\tau$ ) بین مقدار کم ( $0/50$  Pa) تا مقدار متوسط ( $2/50$  Pa)، برای شیب‌های  $1/50$ ،  $3/50$  و  $5$  درصد، از نرخ جریان  $3/78$ ،  $5/67$ ،  $7/65$ ،  $11/34$ ،  $15/12$  لیتر بر دقیقه استفاده شد. مشاهده شد نرخ جدا شدن ذرات خاک، تابعی از شیب، سرعت جریان، و تنش برشی است و نیز رگرسیون‌های غیرخطی توانی با استفاده از تنش برشی ( $\tau$ )، به‌عنوان متغیر مستقل، در مقایسه با رگرسیون خطی ساده، پیش‌بینی‌کننده‌ی بهتری برای جدا شدن ذرات خاک هستند. مقدار آبشستگی بستر (Db)، برای تمام خاک‌ها در سرعت و جریان یکسان، حداقل چهار برابر بزرگ‌تر از فرسایش قهقرایی Db بود. stavi و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی اثرات شکل‌گیری آبکند و فرسایش پس‌رونده بر حاصلخیزی مراتع در بیابان‌های Boqer و Zipporim پرداختند. با نمونه‌برداری از پوشش گیاهی و تعداد

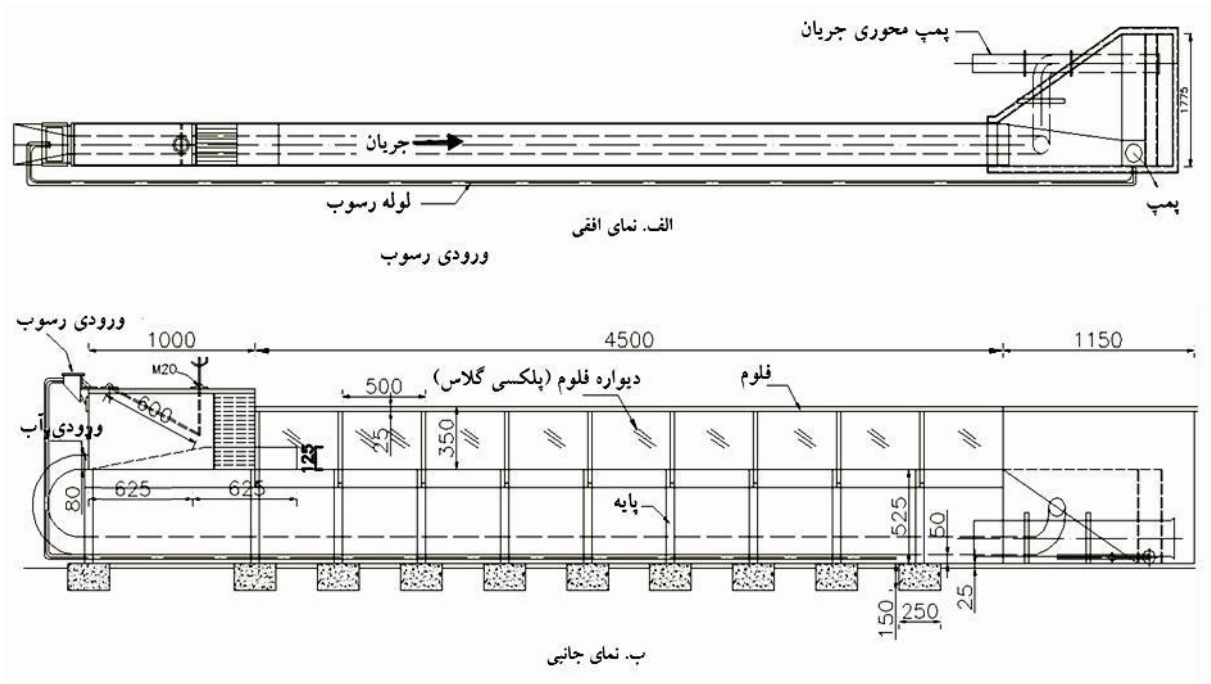
### مواد و روش‌ها

برای رسیدن به اهداف این تحقیق از فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۲ متر، عرض و ارتفاع نیم‌متر در آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات آب که مجهز به سیستم ورودی و خروجی آب و تجهیزات اندازه‌گیری دبی با دقت  $\pm 0.1$  لیتر بر ثانیه می‌باشد، استفاده شد. طولی به مسافت سه متر به‌عنوان محدوده‌ی آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. ابزار اندازه‌گیری هیدرولیکی شامل دبی جریان، سرعت جریان و عمق آب بوده است که از ابزار واسنجی شده‌ی آن مؤسسه استفاده گردید. ابزار اندازه‌گیری خصوصیات خاک نیز شامل تعیین بافت خاک و خصوصیات مکانیک خاکی نمونه‌ها نیز در آزمایشگاه مکانیک خاک همان مؤسسه انجام شد. ابزار اندازه‌گیری پروفیل بستر نیز متر لیزری بوده است که با دقت یک دهم میلی‌متر بوده است. البته به دلیل این‌که زمان فرسایش پس‌رونده بسیار سریع است از ابتدای هر آزمایش تا انتها با دوربین فیلم‌برداری می‌شد و سپس با استفاده از نرم‌افزار و دیجیتالیز کردن، تبدیل به فریم‌هایی در زمان‌های خاصی می‌شد و از این طریق نیز هم زمان پس‌روی و میزان حجم فرسایشی و یا عمق آب نیز مجدداً محاسبه می‌گردید. توضیح این‌که دیواره فلوم با استفاده از ورق‌های میلی‌متری شفاف پوشیده شده بود.

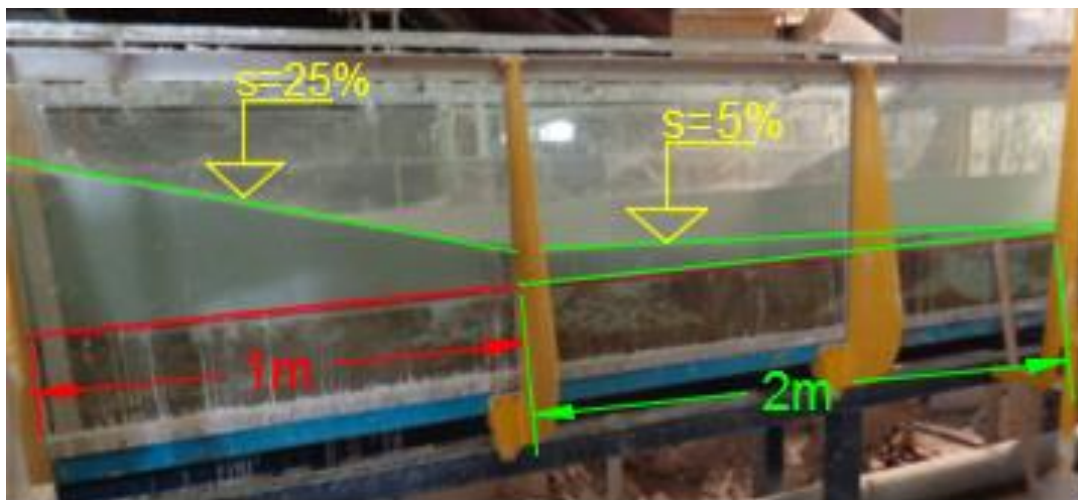
مصالح مورد استفاده رس کائولینیت و سیلت می‌باشند که برای سه طرح اختلاط رس خالص، رس ۵۰ درصد و سیلت ۵۰ درصد و رس ۳۰ درصد و سیلت ۷۰ درصد در شیب‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. با تغییر میزان درصد رس در طرح اختلاط برای آزمایش‌های مختلف تأثیر میزان چسبندگی بر فرسایش پس‌رونده روی شیب بررسی شد. بستر فلوم در بالادست محدوده آزمایشی به طول هشت متر توسط ذرات درشت شن پوشیده شد تا جریان تحت تأثیر زبری تا رسیدن به محدوده آزمایشی کاملاً متلاطم باشد. فلوم آزمایشگاهی در ابتدا مجهز به تلاطم‌گیر با بستر شنی بود.

فرسایش ارائه می‌کند. این روش ابزاری برای توسعه بیش‌تر مدل پیش‌بینی فرسایش خاک می‌باشد (Yana et al., 2015).

Solimanpour و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی تولید رسوب بر اثر فرسایش آب‌کندی در خاک‌های (ماسه، رس و سیلت) جنوب غربی ایران، استان فارس پرداختند با انتخاب شش منطقه آب‌کندی با مساحت فرسایش یافته‌ی بیش از ۵ کیلومتر مربع در مناطق مختلف آب و هوایی و بررسی حجم توسعه ۱۵ آب‌کنند با استفاده از شواهد تاریخی، نقشه‌های توپوگرافی، نقشه‌برداری و رصد میدانی و اندازه‌گیری فرسایش قهقراپی در آزمایشگاه مشاهده کردند که تولید رسوب به دلیل فرسایش آب‌کندی تحت تأثیر گرادیان شیب بالای قسمت فرسایش یافته پس‌رونده، حداکثر بارش روزانه، شن و عامل شکل‌گیری قرار دارد. مهم‌ترین عامل، شیب و کم اهمیت‌ترین عامل، عامل شکل‌گیری است. همان‌گونه که ملاحظه شد مطالعات آزمایشگاهی در خصوص فرسایش پس‌رونده بسیار محدود و تنها مطالعه آزمایشگاهی در یک آبراهه‌ی بدون شیب توسط عاشوریان و همکاران (۱۳۹۴) گزارش شده است. یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر نرخ فرسایش که در این مطالعه گزارش شده است تشکیل ترک‌های کششی بود. از طرفی با توجه به این‌که فرسایش پس‌رونده در آبراه‌های با شیب تند انجام می‌شود و مطالعه‌ای در این زمینه انجام نشده است، مطالعه حاضر انجام شده است. فرضیه این تحقیق بر این اصل استوار است که شیب آبراهه یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر فرسایش پس‌رونده است، که میزان تأثیر آن در کنار عواملی چون بافت خاک و سرعت جریان، نقش به‌سزایی در توسعه فرسایش پس‌رونده دارند و مطالعه میزان تأثیر آن‌ها از اهداف این مطالعه است.



شکل ۱. نمایی از فلوم آزمایشگاهی



شکل ۲. نمایی از فلوم آزمایشگاهی پس از آزمایش با شیب بالادست (۲۵٪) و شیب پایین دست (۵٪)

محل مورد نظر پرتگاه قرار داده می‌شد، سپس نمونه خاکی را که برای آزمایش مورد نظر از قبل آماده شده بود در بالادست و پائین دست دیواره پلکسی به صورت لایه لایه و با شیب مورد نظر اجرا می‌شد. سپس کل فلوم به مدت طولانی کاملاً پر آب نگه داشته می‌شد تا خاک به رطوبت اشباع برسد و تحکیم

برای آماده سازی بستر در محدوده آزمایشی، با توجه به مشخصات هر نمونه، مصالح ترکیب و سپس شیب اجرایی شده و پس از تثبیت به مدت یک هفته شیب به صورت طبیعی تحکیم یافته و شرایط جهت انجام آزمایش فراهم شد. نحوه اجرای شیب به این صورت است که ابتدا ورقه پلکسی در

محدوده شیب ۲۵ درصد به فواصل ۲/۵ سانتی‌متری تقسیم شد و با برداشت سطح شیب قبل و بعد از آزمایش میزان حجم پس‌روی اندازه‌گیری شد. در حین آزمایش مشاهده شد که در مواردی نحوه‌ی پس‌روی پرتگاه در عرض فلوم یکنواخت نیست و معمولاً در وسط کمی (شاید در حد پنج تا شش میلی‌متر) میزان پس‌روی بیش‌تر است. از طرفی امکان اندازه‌گیری دو بعدی نبود از این رو با تقریب میزان پس‌روی از طریق عکس‌های گرفته شده از دیواره فلوم مبنا قرار گرفت. البته پس از خاتمه آزمایش و در انتها به‌عنوان میزان پس‌روی انتهای آزمایش مورد استفاده قرار گرفت.

مشخصات آزمایش‌های انجام شده در جدول ۱ بیان شده است. برای پنج آزمایش انجام شده (در این تحقیق تعداد ۱۵ آزمایش انجام شد به‌دلیل مشکلات ناشی از اجرای شیب، هر آزمایش دوبار تکرار شد. لذا درکل ۳۰ بار بسترسازی انجام شد، که در هر آزمایش نسبت به دیگری با سرعت جریان ثابت، تنها درصد اختلاط رس و سیلت تغییر داده شد و در مرحله بعد با ثابت بودن درصد اختلاط مصالح، سرعت جریان متغیر در نظر گرفته شد)، شیب بالادست ۲۵ و پایین‌دست ۵ درصد و درصد اختلاط خاک رس و سیلت و نیز سرعت دبی و عمق جریان متفاوت در نظر گرفته شد. متغیر سرعت برای آزمایش‌های یک، دو و سه با آزمایش‌های چهار و پنج قابل بررسی است. تغییر درصد رس در آزمایش‌های یک، دو و سه و نیز تغییر درصد سیلت در آزمایش‌های سه، چهار و پنج قابل ارزیابی هستند.

جدول ۱. مشخصات آزمایش‌های انجام شده

شماره آزمایش	درصد سیلت	درصد رس	سرعت (متر بر ثانیه)	دبی (مترمکعب بر ثانیه)
۱	۰	۱۰۰	۰/۳	۰/۰۰۹
۲	۵۰	۵۰	۰/۳	۰/۰۰۹
۳	۷۰	۳۰	۰/۳	۰/۰۰۹
۴	۰	۱۰۰	۰/۴۵	۰/۰۱۸
۵	۵۰	۵۰	۰/۴۵	۰/۰۱۸

طبیعی نیز صورت گیرد. در این مدت نمونه خاک نیز اضافه می‌شد تا تراز سطح خاک در حد مورد قبول قرار گیرد. برای اندازه‌گیری حجم و نرخ فرسایش به کمک کاغذ شفاف مدرج نصب شده روی دیوار فلوم و از روش برداشت قبل و بعد و حین آزمایش استفاده شد. فلوم مجهز به دستگاه دبی‌سنج بود که برای آزمایش‌های مختلف دبی مورد نظر تنظیم شد. علاوه بر پارامترهای فوق، عمق جریان نیز برای هر آزمایش اندازه‌گیری شد. شیب بالادست در طول یک متر و به میزان ۲۵ درصد و شیب پایین‌دست به طول دو متر و به میزان ۵ درصد اجرا شد. چون ملاک مطالعه در آبراه‌های با شیب تند بود (پتانسیل رخداد فرسایش پس‌رونده در آبراه‌های با شیب تند بسیار زیاد است) و از طرفی محدودیت ابعاد فلوم بخصوص ارتفاع دیواره هم بود لذا شیب ۲۵ درصد که بیش‌ترین شیب قابل اجرا در این فلوم بود انتخاب گردید. برای طرح اختلاط رس خالص و رس ۵۰ درصد و سیلت ۵۰ درصد، آزمایش برای دو سرعت ۰/۳ و ۰/۴۵ متر بر ثانیه و برای طرح اختلاط رس ۳۰ درصد و سیلت ۷۰ درصد با سرعت ۰/۳ متر بر ثانیه انجام شد. فرسایش پس‌رونده معمولاً خیلی سریع اتفاق می‌افتد و عملاً امکان اندازه‌گیری دستی در حین آزمایش وجود ندارد. چون کل زمان انجام آزمایش ۲۰ دقیقه است. از این رو تمام مراحل آزمایش فیلم‌برداری گردید و سپس با بکاربردن نرم‌افزارهای مورد نظر فیلم را به فریم‌هایی در فواصل زمانی یک دقیقه تبدیل و از روی دیجیتایز کردن این فریم‌ها اطلاعات مورد نظر استخراج گردید. به کمک کاغذ شفاف مدرج طول یک متر

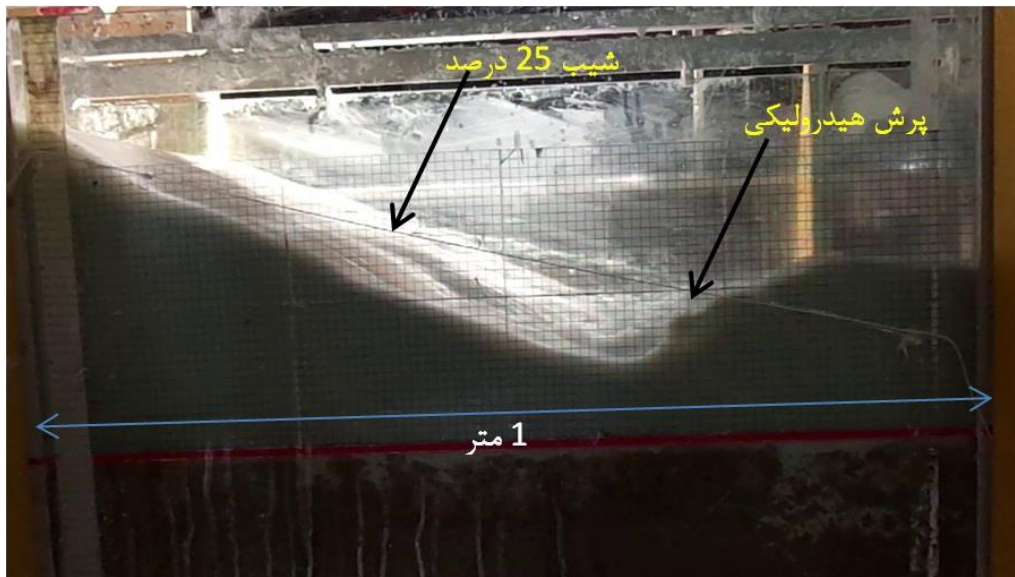
## نتایج و بحث

بر اساس مشاهدات، عوامل مختلفی می‌توانند در فرسایش پس‌رونده مؤثر باشند. با توجه به این‌که هدف آزمایش بررسی تأثیر شیب بر خصوصیات پس‌رونده می‌باشد، یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر میزان طول و سرعت پس‌روی و نیز حجم و دبی رسوب، پدیده پرش هیدرولیکی و چاله آبستگي است. (شکل‌های ۳ و ۴). چاله آبستگي در پائین‌دست پرتگاه شکل می‌گیرد که در حین آزمایش به دلیل انتقال رسوب چسبنده زیاد، توسط جریان آب واضح نیست و توده‌ای از گل و لای با تغییرات هندسی بسیار سریع دیده می‌شود. از این رو امکان اندازه‌گیری ابعاد آن حتی از طریق عکس‌های گرفته شده نیز میسر نبود. هرچند که با توجه به کدر بودن رنگ جریان آب، امکان اندازه‌گیری ابعاد چاله و تغییر ابعاد آن در حین آزمایش، امکان‌پذیر نبود، با این حال تلاش شد از طریق ماده رنگی اینکار امکان پذیر گردد ولی موفق نبود. در اثر این تلاطم عملیات رسوبات از بستر جدا شده و شروع به حرکت می‌کردند و در نتیجه این جداشدگی و حرکت رسوبات، عملیات پس‌روی در پای شیب شروع شده و به سمت بالادست حرکت می‌کرد. از جمله عوامل مهم و تأثیرگذار دیگر درصد رس موجود در مواد بستر می‌باشد. رس‌ها ریزترین ذرات تشکیل‌دهنده خاک هستند، که به خاطر ساختار ورقه‌ای و سیلیکاتی که دارند جاذب آب هستند. از آنجا که ملکول آب یک ملکول دوقطبی است، پیوند بسیار قوی با ذرات ورقه‌ای رس حاصل می‌نماید. ورق‌های رس از روی بعد مسطح روی هم قرار می‌گیرند و در برابر عوامل فرسایش به خصوص جریان آب

مقاوم هستند. از آنجا که ذرات سیلت خصوصیات شیمیایی و الکترونی رس را ندارند، در برابر فرسایش مقاومت کم‌تری دارند به خصوص اگر بین ورقه‌های رسی قرار گیرند با خواص غلتشی، فرسایش ناشی از جریان را تسریع می‌کنند، در نتیجه کاهش میزان حجم رس موجود در مواد تشکیل‌دهنده بستر که با افزایش میزان سیلت همراه خواهد بود، باعث افزایش حجم و دبی رسوبات و نیز سرعت و طول پس‌روی خواهد شد. از جمله عوامل مهم و تأثیرگذار دیگر بر فرسایش، سرعت جریان می‌باشد. همان‌گونه که می‌دانیم نوع جریان عبوری از شیب تند، جریان فوق بحرانی است. هرچه شیب بستر تندتر باشد، سرعت جریان عبوری از شیب نیز بیش‌تر خواهد شد. طبق رابطه انرژی مخصوص  $E = Y + (2g)(V^2)$  انرژی جریان با توان دوم سرعت رابطه مستقیم دارد به نحوی که افزایش مقدار کم سرعت، باعث افزایش قابل ملاحظه انرژی جریان خواهد شد، لذا سرعت بالای جریان روی شیب، باعث عبور جریان با انرژی زیاد از روی شیب بالادست خواهد شد که این انرژی زیاد باعث افزایش پارامترهای مورد مقایسه این تحقیق از جمله سرعت پس‌روی، طول پس‌روی، دبی رسوب و نیز حجم رسوبات منتقل شده به پایین‌دست خواهد شد. همان‌گونه که در نتایج تمامی آزمایش‌ها مشاهده شد، در شروع آزمایش‌ها معمولاً فرسایش به صورت سطحی و سپس به صورت توده‌ای با حجم و سرعت بالا بود و در نهایت تغییر پارامترهای مورد بحث مانند سرعت و طول پس‌روی و نیز دبی و حجم رسوبات نسبت به زمان به یک مقدار ثابت می‌رسد. مشخصات آزمایش‌های مورد مقایسه به شرح جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲. مشخصات آزمایش‌های مورد مقایسه

تغییرات میزان رس	تغییرات سرعت متوسط جریان بالادست شیب	آزمایش‌های مورد مقایسه
۷۰٪ کاهش	ثابت	آزمایش ۳ نسبت به آزمایش ۱ (کاهش درصد رس)
۲۰٪ کاهش	ثابت	آزمایش ۳ نسبت به آزمایش ۲ (کاهش درصد رس)
۵۰٪ کاهش	ثابت	آزمایش ۵ نسبت به آزمایش ۴ (کاهش درصد رس)
ثابت	۵۰٪ افزایش	آزمایش ۵ نسبت به آزمایش ۲ (افزایش سرعت جریان)



شکل ۳. وقوع پدیده پرش هیدرولیکی در طول آزمایش



شکل ۴. چاله‌های آبشستگی ایجاد شده در انتهایی آزمایش

عکس‌های تهیه شده از هر یک دقیقه آزمایش در محیط نرم‌افزاری اتوکد حجم رسوب تولید شده محاسبه شد که نتایج حاصله در جدول ۳ آورده شده و نیز نمودار تغییرات حجم رسوب هر آزمایش در مقابل زمان، در شکل شماره ۵ ترسیم شده است.

#### بررسی میزان حجم رسوب تولیدشده

با هدف مشاهده میزان حجم رسوب تولید شده در نمونه‌های مختلف و مقایسه نتایج آن‌ها، ابتدا برای هر آزمایش حجم رسوب تولید شده برحسب سانتی‌متر مکعب برآورد شد، (برای محاسبه حجم رسوب تولید شده به کمک

جدول ۳. نتایج ماکزیمم حجم رسوب (سانتی متر مکعب)

پارامترهای اندازه گیری شده	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵
حجم رسوب	۷۳۱۲۹	۸۸۵۸۷	۱۰۴۱۰۳	۱۱۵۴۸۴	۱۲۹۲۴۰

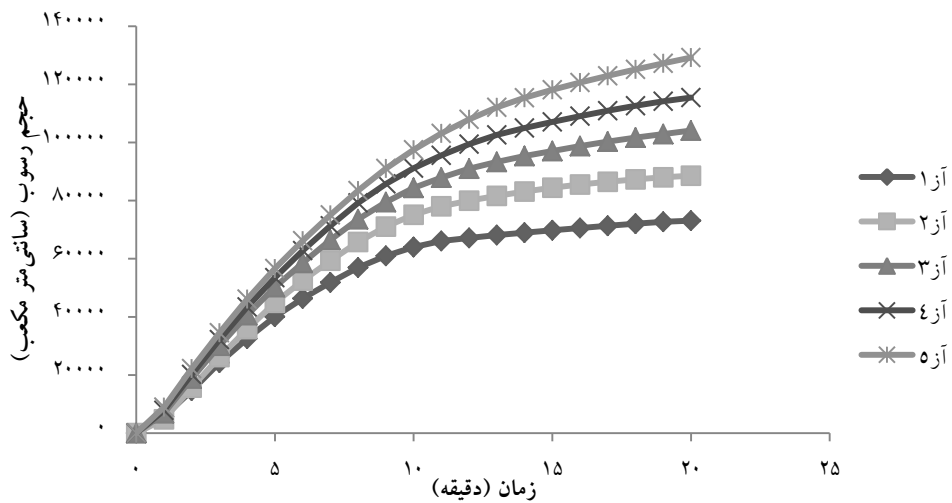
مطابق شکل ۵ در شروع آزمایش‌ها به دلیل فرسایش توده‌ای، حجم رسوب افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد. این روند صعودی از شروع آزمایش تا زمان ۱۰ دقیقه ادامه داشته و پس از آن روند تغییرات حجم رسوب تولید شده تا انتهای آزمایش به میزان ثابتی می‌رسد. همان‌گونه که از شکل پیداست در مرحله اول آزمایش‌ها یعنی از شروع آزمایش تا زمان ۱۰ دقیقه روند افزایش حجم رسوبات برای آزمایش‌های مختلف تقریباً مشابه و دارای مقادیر نزدیک به هم است و در مرحله دوم و از زمان ۱۰ دقیقه به بعد تغییرات درصد رسوب و نیز سرعت جریان باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در نتایج آزمایش‌ها خواهد شد، که به روند تغییرات کمی حجم رسوب نمونه‌های مورد مقایسه در ادامه اشاره شده است. بر اساس جدول ۳ حداکثر میزان حجم رسوب برابر ۱۲۹۲۴۰ سانتی متر مکعب در آزمایش پنج با رس ۵۰ درصد و سرعت جریان ۰/۴۵ متر بر ثانیه و حداقل آن برابر ۷۳۱۲۹ سانتی متر مکعب در آزمایش یک با رس ۱۰۰ درصد و سرعت جریان ۰/۳ متر بر ثانیه رخ داد. دلیل افزایش حجم رسوب آزمایش پنج در مقایسه با آزمایش یک می‌تواند کاهش درصد رس موجود در مصالح بستر، افزایش درصد سیلت و نیز افزایش سرعت جریان عبوری در فلوم باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار حجم رسوب در آزمایش سه نسبت به آزمایش یک به میزان ۴۲٪ (برای محاسبه درصد افزایش، حجم رسوب آزمایش یک یعنی ۷۳۱۲۹ سانتی متر مکعب را از حجم رسوب آزمایش سه، ۱۰۴۱۰۳ سانتی متر مکعب کم کرده سپس حاصل را بر ۷۳۱۲۹ تقسیم کرده و در نهایت نتیجه به دست آمده در ۱۰۰ ضرب شد) افزایش یافته است که

دلیل آن را می‌توان کاهش ۷۰٪ میزان رس دانست. این در حالی است که مقدار حداکثر حجم رسوب آزمایش سه در مقایسه با آزمایش دو تنها ۱۸٪ افزایش یافته زیرا درصد رس در نمونه خاک آزمایش سه، ۲۰٪ کم‌تر از آزمایش شماره دو بوده است. یکی دیگر از پارامترهایی که روی حجم رسوب تأثیر داشته است، میزان سرعت جریان است. به طور مثال سرعت جریان در آزمایش پنج نسبت به آزمایش دو به میزان ۵۰٪ افزایش یافته است و باعث شده تا میزان حجم رسوب تولید شده به مقدار ۴۶٪ افزایش یابد. و نیز با کاهش ۵۰ درصدی رس در آزمایش پنج نسبت به چهار، حجم رسوب به میزان ۱۲ درصد افزایش یافته است. با توجه به نتایج به دست آمده در حالت شیب تند، تأثیر تغییر سرعت نسبت به جنس خاک و میزان چسبندگی بر پارامترهای مورد مقایسه بیش‌تر است.

#### بررسی میزان دبی رسوب لحظه‌ای

به منظور مشاهده میزان دبی رسوب لحظه‌ای در نمونه‌های مختلف و مقایسه نتایج آن‌ها ابتدا برای هر آزمایش حجم رسوب تولید شده برحسب سانتی متر مکعب برآورد شده است (برای محاسبه حجم رسوب تولید شده به کمک عکس‌های تهیه شده از هر یک دقیقه آزمایش در محیط نرم‌افزاری اتوکلد حجم رسوب تولید شده محاسبه شد) و حاصل بر بازه زمانی مربوطه (با توجه به کل زمان آزمایش یعنی ۲۰ دقیقه حجم رسوب در بازه‌های زمانی یک دقیقه برآورد شد) تقسیم شد تا دبی رسوب لحظه‌ای هر آزمایش بر حسب سانتی متر مکعب بر دقیقه به دست آید، که نتایج حاصله در جدول ۴ آورده شده و نیز نمودار تغییرات دبی رسوب هر آزمایش در مقابل زمان، در شکل ۶ ترسیم شده است.





شکل ۵. حجم تجمعی رسوب

دلیل افزایش دبی رسوب آزمایش پنج در مقایسه با آزمایش یک می‌تواند کاهش درصد رس موجود در مصالح بستر، افزایش درصد سیلت و نیز افزایش سرعت جریان عبوری در فلوم باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار دبی رسوب لحظه‌ای حداکثر در آزمایش سه نسبت به آزمایش یک به میزان ۲۴٪ افزایش یافته است که دلیل آن را می‌توان کاهش ۷۰٪ میزان رس دانست. این در حالی است که مقدار حداکثر دبی رسوب لحظه‌ای آزمایش سه در مقایسه با آزمایش دو تنها ۱۰٪ افزایش یافته زیرا درصد رس در خاک مورد آزمایش سه، ۲۰٪ کم‌تر از آزمایش شماره دو بوده است. یکی دیگر از پارامترهایی که روی دبی رسوب لحظه‌ای تأثیر داشته است میزان سرعت جریان است. به‌طور مثال سرعت جریان در آزمایش پنج نسبت به آزمایش دو به میزان ۵۰٪ افزایش یافته است و باعث شده تا میزان دبی ماکزیمم رسوب به مقدار ۲۲٪ افزایش یابد، و نیز با کاهش ۵۰ درصدی رس در آزمایش پنج نسبت به چهار دبی ماکزیمم رسوب به میزان هشت درصد افزایش یافته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده درحالت شیب تند، تأثیر تغییر سرعت نسبت به جنس خاک و میزان چسبندگی بر پارامترهای مورد مقایسه بیش‌تر است. زمان وقوع حداکثر

مطابق شکل ۶ در شروع آزمایش‌ها به‌دلیل فرسایش توده‌ای دبی رسوب افزایش قاب ملاحظه‌ای دارد. این روند صعودی از شروع آزمایش تا زمان سه دقیقه ادامه داشته و پس از آن روند تغییرات دبی رسوب لحظه‌ای تا زمان ۱۲ دقیقه به تدریج سیر نزولی پیدا کرده و سپس تا انتهای آزمایش به میزان ثابتی می‌رسد. همان‌گونه که از شکل پیدا است در مرحله اول آزمایش‌ها یعنی از شروع آزمایش تا زمان سه دقیقه روند افزایش دبی رسوب برای آزمایش‌های مختلف تقریباً مشابه و دارای مقادیر نزدیک به هم است و در مرحله دوم و از زمان سه دقیقه تا ۱۲ دقیقه، تغییرات درصد رس و نیز سرعت جریان باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در نتایج آزمایش‌ها خواهد شد و در مرحله سوم یعنی از زمان ۱۲ دقیقه تا پایان آزمایش‌ها مجدداً نتایج مشابه و نزدیک به هم خواهند شد، که به روند تغییرات کمی دبی رسوب نمونه‌های مورد مقایسه در ادامه اشاره شده است.

آزمایش پنج با درصد رس ۵۰ و سرعت جریان ۰/۴۵ متر بر ثانیه بیش‌ترین مقدار دبی رسوب برابر ۱۳۲۹۶ سانتی‌مترمکعب بر دقیقه و آزمایش یک با ۱۰۰ درصد رس و سرعت جریان ۰/۳ متر بر ثانیه کم‌ترین میزان دبی رسوب برابر ۹۶۵۳ سانتی‌مترمکعب بر دقیقه را دارد. مقایسه مشخصات آزمایش‌های پنج و یک نشان می‌دهد

هر یک دقیقه میزان طول پس‌روی نسبت به انتهای شیب ۲۵ درصد محاسبه شد) که نتایج حاصله در جدول ۵ آورده شده و نیز نمودار تغییرات طول پس‌روی هر آزمایش در مقابل زمان، در شکل ۷ ترسیم شده است.

مطابق شکل ۷ در شروع آزمایش‌ها به دلیل فرسایش توده‌ای طول پس‌روی افزایش قابل‌ملاحظه‌ای دارد. این روند صعودی از شروع آزمایش تا زمان ۱۱ دقیقه ادامه داشته و پس از آن روند تغییرات طول پس‌روی تا انتهای آزمایش به میزان ثابتی می‌رسد. همان‌گونه که از شکل پیداست در مرحله اول آزمایش‌ها یعنی از شروع آزمایش تا زمان ۱۱ دقیقه روند افزایش حجم رسوبات برای آزمایش‌های مختلف تقریباً مشابه و دارای مقادیر نزدیک به هم است و در مرحله دوم و از زمان ۱۱ دقیقه به بعد تغییرات درصد رس و نیز سرعت جریان باعث ایجاد تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در نتایج آزمایش‌ها خواهد شد که به روند تغییرات کمی طول پس‌روی نمونه‌های مورد مقایسه در ادامه اشاره شده است.

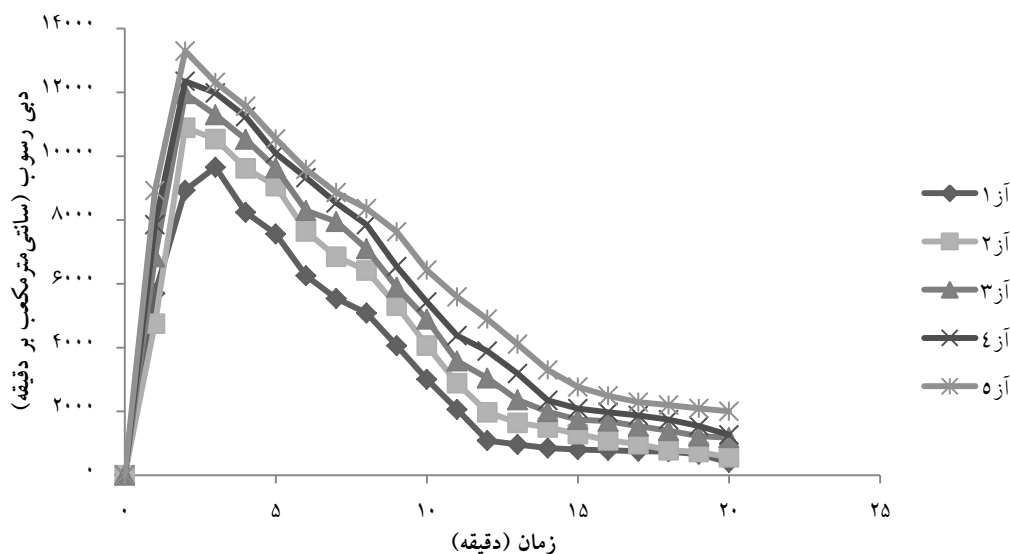
آزمایش برای هر نمونه متفاوت است و عدد بیست دقیقه‌ای که ذکر شد حداکثر برای این تحقیق بود. در واقع زمان آزمایش مدت زمان رسیدن پرتگاه به انتهای شیب ۲۵ درصد بود که با توجه به نوع نمونه خاک متفاوت بود. به‌طور مثال افزایش درصد رس در طولانی‌تر شدن زمان آزمایش و یا کاهش سرعت جریان خیلی مؤثر بود. در خصوص تفاوت آزمایش یک و چهار آزمایش دیگر نیز درصد رس مصرفی در سایر آزمایش‌ها نسبت به آزمایش یک کم‌تر و نیز سرعت جریان بیش‌تری نسبت به آزمایش یک دارند لذا به دلیل سرعت پس‌روی کم‌تر، زمان وقوع ماکزیمم آزمایش یک، کمی بیش‌تر است.

#### بررسی طول پس‌روی

به‌منظور مشاهده میزان طول پس‌روی در نمونه‌های مختلف و مقایسه نتایج آن‌ها ابتدا برای هر آزمایش طول پس‌روی برحسب سانتی‌متر برآورد شد. ( برای برآورد طول پس‌روی، ابتدا به کمک عکس تهیه شده و محیط نرم‌افزاری اتوکد، برای

جدول ۴. نتایج ماکزیمم دبی رسوب (سانتی‌متر مکعب بر دقیقه)

پارامترهای اندازه‌گیری شده	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵
دبی رسوب	۹۶۵۳	۱۰۸۹۵	۱۱۹۵۶	۱۲۳۴۶	۱۳۲۹۶



شکل ۶. دبی رسوب

آزمایش پنج با درصد رس ۵۰ و سرعت ۰/۴۵ متر بر ثانیه بیش‌ترین مقدار پس‌روی برابر ۹۹/۹۸ سانتی‌متر و آزمایش یک با ۱۰۰ درصد رس و سرعت ۰/۳ متر بر ثانیه کم‌ترین میزان پس‌روی برابر ۴۸/۴۱ سانتی‌متر را دارد. مقایسه مشخصات آزمایش‌های پنج و یک نشان می‌دهد دلیل افزایش طول پس‌روی آزمایش پنج در مقایسه با آزمایش یک می‌تواند کاهش درصد رس موجود در مصالح بستر، افزایش درصد سیلت و نیز افزایش سرعت جریان عبوری در فلوم باشد همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار طول پس‌روی در آزمایش سه نسبت به آزمایش یک به میزان ۷۰ درصد افزایش یافته است که دلیل آن را می‌توان کاهش ۷۰٪ میزان رس دانست. این درحالی است که مقدار حداکثر طول پس‌روی آزمایش سه در مقایسه با آزمایش دو تنها ۳۵٪ افزایش یافته زیرا درصد رس در خاک مورد آزمایش سه، ۲۰٪ کم‌تر از آزمایش شماره دو بوده است. یکی دیگر از پارامترهایی که روی طول پس‌روی تأثیر داشته است میزان سرعت جریان است. به‌طور مثال سرعت جریان در آزمایش پنج نسبت به

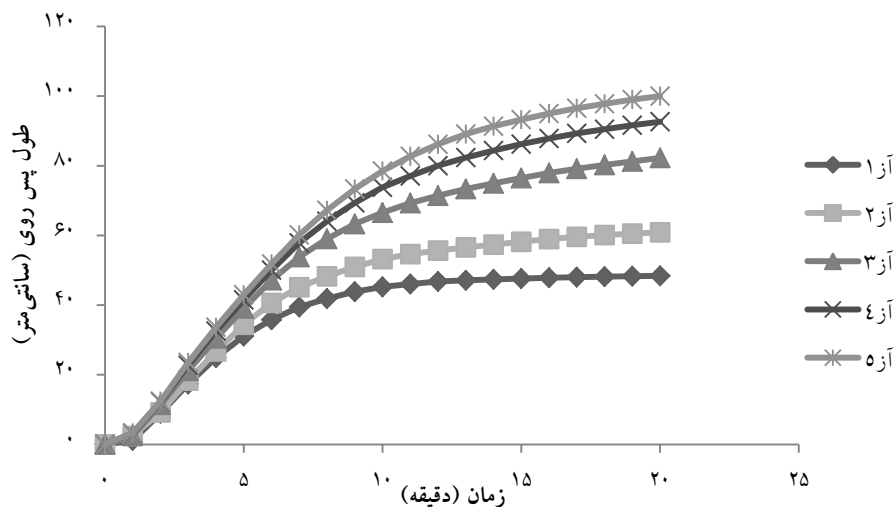
آزمایش دو به میزان ۵۰٪ افزایش یافته است و باعث شده تا میزان طول پس‌روی به مقدار ۶۴٪ افزایش یابد و نیز با کاهش ۵۰ درصدی رس در آزمایش پنج نسبت به چهار، ماکزیمم طول پس‌روی به میزان هشت درصد افزایش یافته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده درحالت شیب تند، تأثیر تغییر سرعت نسبت به جنس خاک و میزان چسبندگی بر پارامترهای مورد مقایسه بیش‌تر است.

#### بررسی سرعت پس‌روی ماکزیمم

به‌منظور مشاهده میزان سرعت پس‌روی ماکزیمم در نمونه‌های مختلف و مقایسه نتایج آن‌ها ابتدا برای هر آزمایش طول پس‌روی برحسب سانتی‌متر برآورد شد (برای برآورد طول پس‌روی، ابتدا به کمک عکس تهیه شده و محیط نرم‌افزاری اتوکد، برای هر یک دقیقه میزان طول پس‌روی نسبت به انتهای شیب ۲۵ درصد محاسبه شد) و حاصل را بر بازه زمانی مربوطه تقسیم نمودیم تا سرعت پس‌روی لحظه‌ای هر آزمایش بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه بدست آید که نتایج حاصله در جدول ۶ آورده شده و نیز نمودار تغییرات سرعت پس‌روی هر آزمایش در مقابل زمان، در شکل ۸ ترسیم شده است.

جدول ۵. نتایج ماکزیمم طول پس‌روی (سانتی‌متر)

پارامترهای اندازه‌گیری شده	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵
طول پس‌روی	۴۸/۴۱	۶۰/۹۱	۸۲/۲۴	۹۲/۶۳	۹۹/۹۸



شکل ۷. طول پس‌روی

آزمایش شماره دو بوده است. یکی دیگر از پارامترهایی که روی سرعت پس‌روی تأثیر داشته است میزان سرعت جریان است. به‌طور مثال سرعت جریان در آزمایش پنج نسبت به آزمایش دو به میزان ۵۰٪ افزایش یافته است و باعث شده تا میزان سرعت پس‌روی به مقدار ۲۳٪ افزایش یابد، و نیز با کاهش ۵۰ درصدی رس در آزمایش پنج نسبت به چهار، ماکزیمم سرعت پس‌روی به میزان شش درصد افزایش یافته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در حالت شیب تند، تأثیر تغییر سرعت نسبت به جنس خاک و میزان چسبندگی بر پارامترهای مورد مقایسه بیش‌تر است.

#### مقادیر متوسط سرعت پس‌روی

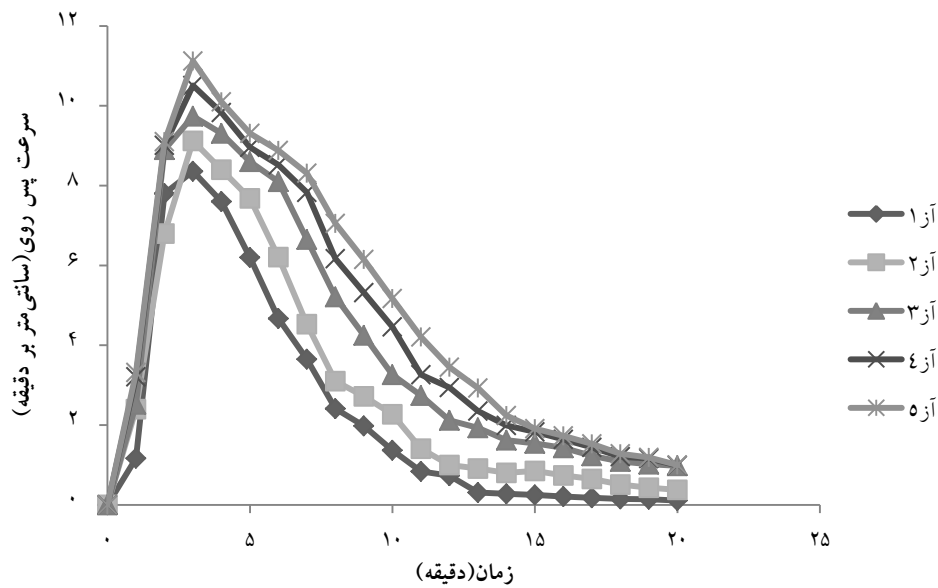
با هدف مقایسه متوسط سرعت پس‌روی نمونه‌های مختلف، مقادیر این پارامتر برای هر آزمایش به‌طور جداگانه محاسبه گردید (برای محاسبه سرعت پس‌روی، مقدار طول پس‌روی برای هر بازه یک دقیقه‌ای برآورد گردید سپس حاصل بر بازه زمانی تقسیم شد تا سرعت پس‌روی محاسبه شود) که نتایج حاصل به شرح جدول ۷ می‌باشد.

بر اساس نتایج کاهش درصد رس و افزایش درصد سیلت و نیز افزایش سرعت جریان باعث افزایش مقادیر متوسط پس‌روی خواهد شد. بیش‌ترین مقدار متوسط سرعت پس‌روی ۴/۷۶ سانتی‌متر بر دقیقه مربوط به آزمایش پنج و کم‌ترین آن ۲/۳ سانتی‌متر بر دقیقه مربوط به آزمایش یک بود. دلیل افزایش سرعت پس‌روی آزمایش پنج در مقایسه با آزمایش یک می‌تواند کاهش درصد رس موجود در مصالح بستر، افزایش درصد سیلت و نیز افزایش سرعت جریان عبوری در فلوم باشد.

مطابق شکل ۸، در شروع آزمایش‌ها به‌دلیل فرسایش توده‌ای سرعت پس‌روی افزایش قابل‌ملاحظه‌ای دارد این روند صعودی از شروع آزمایش تا زمان سه دقیقه ادامه داشته و پس از آن روند تغییرات سرعت پس‌روی تا زمان ۱۲ دقیقه به تدریج سیر نزولی پیدا کرده و سپس تا انتهای آزمایش به میزان ثابتی می‌رسد. همان‌گونه که از شکل پیداست در مرحله اول آزمایش‌ها یعنی از شروع آزمایش تا زمان سه دقیقه روند افزایش سرعت پس‌روی برای آزمایش‌های مختلف تقریباً مشابه و دارای مقادیر نزدیک به هم است و در مرحله دوم و از زمان سه دقیقه تا ۱۲ دقیقه، تغییرات درصد رس و نیز سرعت جریان باعث ایجاد تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در نتایج آزمایش‌ها خواهد شد و در مرحله سوم یعنی از زمان ۱۲ دقیقه تا پایان آزمایش‌ها مجدداً نتایج مشابه و نزدیک به هم خواهند شد، که به روند تغییرات کمی سرعت پس‌روی نمونه‌های مورد مقایسه در ادامه اشاره شده است. حداکثر میزان سرعت پس‌روی برابر ۱۱/۱۲ سانتی‌متر بر دقیقه در آزمایش پنج با رس ۵۰ درصد و سرعت ۰/۴۵ جریان متر بر ثانیه و حداقل آن برابر ۸/۳۶ سانتی‌متر بر دقیقه در آزمایش یک با رس ۱۰۰ درصد و سرعت جریان ۰/۳ متر بر ثانیه رخ داد. دلیل افزایش سرعت پس‌روی آزمایش پنج در مقایسه با آزمایش یک می‌تواند کاهش درصد رس موجود در مصالح بستر، افزایش درصد سیلت و نیز افزایش سرعت جریان عبوری در فلوم باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار سرعت پس‌روی در آزمایش سه نسبت به آزمایش یک به میزان ۱۶/۵ درصد افزایش یافته است که دلیل آن را می‌توان کاهش ۷۰٪ میزان رس دانست. این درحالی است که مقدار حداکثر سرعت پس‌روی آزمایش سه در مقایسه با آزمایش دو تنها ۷٪ افزایش یافته زیرا درصد رس در خاک مورد آزمایش سه، ۲۰٪ کم‌تر از

جدول ۶. نتایج ماکزیمم سرعت پس‌روی (سانتی‌متر بر دقیقه)

پارامترهای اندازه‌گیری شده	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵
سرعت پس‌روی	۸/۳۶	۹/۱۲	۹/۷۴	۱۰/۵۱	۱۱/۱۲



شکل ۸. سرعت پس‌روی

با توجه به نتایج به‌دست آمده در حالت شیب تند، تأثیر تغییر سرعت نسبت به جنس خاک و میزان چسبندگی بر پارامترهای مورد مقایسه بیش‌تر است. مسلماً پدیده‌ی فرسایش پس‌رونده یک پدیده‌ی سریع زمانی است و برای برآورد میزان حجم رسوب فرسایش یافته یا میزان فاصله‌ای که یک پرتگاه می‌تواند به بالادست منتقل شود مهم می‌باشد. از این رو مقادیر حداکثر که در یک زمان مشخصی از شروع اتفاق می‌افتد و البته میزان نرخ متوسط اهمیت دارد.

#### مقایسه نتایج نرخ پس‌روی ماکزیمم و متوسط

با هدف مقایسه نتایج نرخ پس‌روی ماکزیمم و متوسط، این مقادیر برای آزمایش‌ها برحسب سانتی‌متر بر دقیقه برآورد شد که نتایج حاصل برای آزمایش یک مطابق جدول ۸ می‌باشد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد نرخ پس‌روی ماکزیمم در آزمایش یک نسبت به مقدار متوسط آن حدود ۳/۷ برابر افزایش داشته است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار سرعت پس‌روی متوسط در آزمایش سه نسبت به آزمایش یک به میزان ۷۱ درصد افزایش یافته است که دلیل آن را می‌توان کاهش ۷۰٪ میزان رس دانست. این در حالی است که مقدار سرعت پس‌روی متوسط آزمایش سه در مقایسه با آزمایش دو تنها ۳۶٪ افزایش یافته زیرا درصد رس در خاک مورد آزمایش سه، ۲۰٪ کم‌تر از آزمایش شماره دو بوده است. یکی دیگر از پارامترهایی که روی سرعت پس‌روی متوسط تأثیر داشته است میزان سرعت جریان است. به‌طور مثال سرعت جریان در آزمایش پنج نسبت به آزمایش دو به میزان ۵۰٪ افزایش یافته است و باعث شده تا میزان سرعت پس‌روی متوسط به مقدار ۶۴٪ افزایش یابد، و نیز با کاهش ۵۰ درصدی رس در آزمایش پنج نسبت به چهار، ماکزیمم سرعت پس‌روی به میزان هشت درصد افزایش یافته است.

جدول ۷. نتایج متوسط سرعت پس‌روی (سانتی‌متر بر دقیقه)

پارامترهای اندازه‌گیری شده	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵
متوسط سرعت پس‌روی	۲/۳	۲/۹	۳/۹۲	۴/۴۱	۴/۷۶

جدول ۸. مقایسه نتایج سرعت پس روی ماکزیمم و متوسط برای آزمایش یک (سانتی متر بر دقیقه)

ردیف	نرخ پس روی ماکزیمم آزمایش یک	نرخ پس روی متوسط آزمایش یک
۱	۸/۳۶	۲/۳

**مقادیر متوسط دبی رسوب**

به منظور مقایسه مقادیر متوسط دبی رسوب آزمایش‌های مختلف، نتایج مربوطه برآورد شده و مقادیر متوسط دبی پنج نمونه مطابق جدول ۹ می‌باشد. بر اساس نتایج، کاهش درصد رس و افزایش درصد سیلت و نیز افزایش سرعت جریان، باعث افزایش مقادیر متوسط دبی رسوب خواهد شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار متوسط دبی رسوب در آزمایش سه نسبت به آزمایش یک به میزان ۴۲ درصد افزایش یافته است که دلیل آن را می‌توان کاهش ۷۰٪ میزان رس دانست. این درحالی است که مقدار متوسط دبی رسوب آزمایش سه در مقایسه با آزمایش دو تنها ۱۸٪ افزایش یافته زیرا درصد رس در خاک مورد آزمایش سه، ۲۰٪ کم‌تر از آزمایش شماره دو بوده است. یکی دیگر از پارامترهایی که روی متوسط دبی رسوب تأثیر داشته است میزان سرعت جریان است. به‌طور مثال سرعت جریان در آزمایش پنج نسبت به آزمایش دو به میزان ۵۰٪ افزایش یافته است و باعث شده تا میزان متوسط دبی رسوب به مقدار ۴۷٪ افزایش یابد، و نیز با کاهش ۵۰ درصدی رس در آزمایش پنج نسبت به چهار متوسط دبی رسوب به میزان ۱۲ درصد افزایش یافته است. بیش‌ترین مقدار متوسط دبی رسوب ۱۰۲/۶ سانتی‌متر مکعب بر ثانیه مربوط به آزمایش پنج و کم‌ترین آن ۵۸ سانتی‌متر مکعب بر ثانیه مربوط به آزمایش یک بود. دلیل افزایش دبی رسوب آزمایش پنج در مقایسه با

آزمایش یک می‌تواند کاهش درصد رس موجود در مصالح بستر، افزایش درصد سیلت و نیز افزایش سرعت جریان عبوری در فلوم باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده درحالت شیب تند، تأثیر تغییر سرعت نسبت به جنس خاک و میزان چسبندگی بر پارامترهای مورد مقایسه بیش‌تر است.

**میزان مقادیر متوسط حجم رسوب تولید شده**

با هدف مقایسه نتایج مقادیر متوسط حجم رسوب تولید شده نمونه‌های مختلف، این مقادیر برای هر نمونه محاسبه شد (ابتدا مقادیر حجم رسوب لحظه‌ای برای هر یک دقیقه برآورد شد، سپس از تقسیم مجموع رسوب لحظه‌ای بر تعداد کل متوسط حجم رسوب محاسبه شد) که نتایج حاصل به شرح جدول ۱۰ می‌باشد. بر اساس نتایج، کاهش درصد رس و افزایش درصد سیلت و نیز افزایش سرعت جریان باعث افزایش مقادیر متوسط حجم رسوب تولید شده خواهد شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار متوسط حجم رسوب در آزمایش سه نسبت به آزمایش یک به میزان ۳۵ درصد افزایش یافته است که دلیل آن را می‌توان کاهش ۷۰٪ میزان رس دانست. این درحالی است که مقدار متوسط حجم رسوب آزمایش سه در مقایسه با آزمایش دو تنها ۱۴٪ افزایش یافته زیرا درصد رس در خاک مورد آزمایش سه، ۲۰٪ کم‌تر از آزمایش شماره دو بوده است.

جدول ۹. نتایج متوسط دبی رسوب (سانتی‌متر مکعب بر دقیقه)

پارامترهای اندازه‌گیری شده	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵
دبی رسوب متوسط	۵۸	۷۰	۸۲/۶	۹۱/۶	۱۰۲/۶

شیب تند، تأثیر تغییر سرعت نسبت به جنس خاک و میزان چسبندگی بر پارامترهای مورد مقایسه بیش‌تر است.

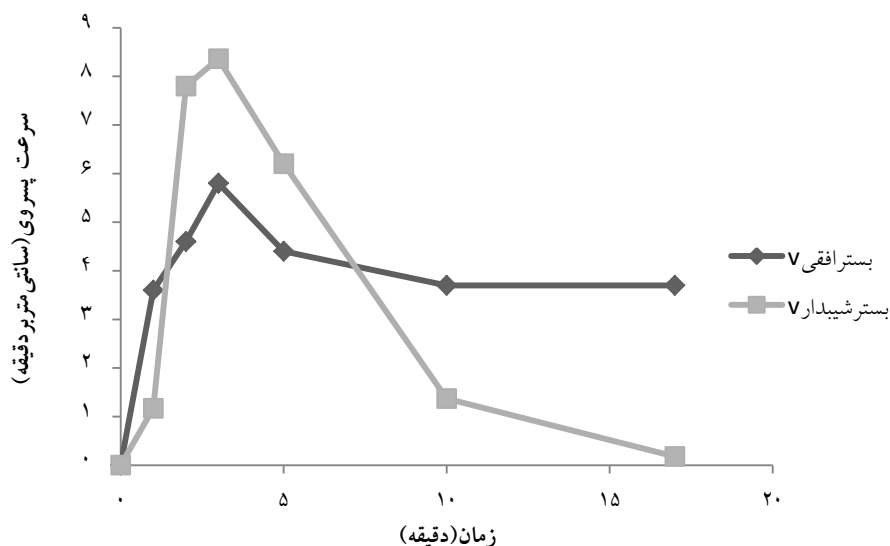
#### مقایسه نتایج سرعت پس‌روی در حالت بستر افقی با بستر شیبدار

عاشوریان و همکاران (۱۳۹۴) فرسایش پس‌رونده را بر روی خاک چسبنده و در فلوم با شیب افقی بررسی کردند مطابق شکل ۹ برای حالت بستر اجرا شده با رس ۱۰۰ درصد و سرعت جریان ۰/۳ متر بر ثانیه، میزان سرعت پس‌روی ماکزیمم را ۵/۸ سانتی‌متر بر دقیقه برآورد نمودند در حالی که در این تحقیق برای آزمایش انجام شده با خصوصیات مشابه کار ایشان، سرعت پس‌روی ماکزیمم برابر ۸/۳۶ سانتی‌متر بر دقیقه به‌دست آمد که میزان ۴۴ درصد افزایش در حالت بستر شیبدار نسبت به افق را نشان می‌دهد.

یکی دیگر از پارامترهایی که روی متوسط حجم رسوب تأثیر داشته‌است میزان سرعت جریان است. به‌طور مثال سرعت جریان در آزمایش پنج نسبت به آزمایش دو به میزان ۵۰٪ افزایش یافته است و باعث شده تا میزان متوسط حجم رسوب به مقدار ۳۶٪ افزایش یابد و نیز با کاهش ۵۰ درصدی رس در آزمایش پنج نسبت به چهار، ماکزیمم طول پس‌روی به میزان نه درصد افزایش یافته است. بیش‌ترین مقدار متوسط حجم رسوب ۸۳۹۹۰ سانتی‌متر مکعب مربوط به آزمایش پنج و کم‌ترین آن ۵۲۲۵۷ سانتی‌متر مکعب مربوط به آزمایش یک بود. دلیل افزایش حجم رسوب آزمایش پنج در مقایسه با آزمایش یک می‌تواند کاهش درصد رس موجود در مصالح بستر، افزایش درصد سیلت و نیز افزایش سرعت جریان عبوری در فلوم باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در حالت

جدول ۱۰. مقادیر متوسط حجم رسوب (سانتی‌متر مکعب)

پارامترهای اندازه‌گیری شده	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵
حجم رسوب	۵۲۲۵۷	۶۱۶۳۹	۷۰۵۵۲	۷۷۱۲۵	۸۳۹۹۰



شکل ۹. مقایسه سرعت پس‌روی حالت بستر افقی (عاشوریان و همکاران، ۱۳۹۴) با بستر شیبدار (مطالعه حاضر) در یک نمونه خاک رس خالص

**نتیجه‌گیری**

منتقل شده به پایین‌دست ۴۲ درصد افزایش داشته است. از طرفی با افزایش ۵۰ درصدی سرعت جریان مقادیر سرعت پس‌روی ۲۳ درصد و دبی رسوب ۲۲ درصد و حجم رسوبات فرسایش یافته ۴۶ درصد و طول پس‌روی ۶۴ درصد افزایش داشته است. در تحقیق حاضر با توجه به وقوع جریان فوق بحرانی روی شیب تند، و سرعت و نیز انرژی مخصوص زیاد جریان، سرعت جریان نسبت به سایر عوامل مورد بررسی، تأثیر بیشتری بر نتایج مشاهدات داشت.

**سپاسگزاری**

این تحقیق بخشی از نتایج رساله‌ی دکتری نویسنده اول می‌باشد که در مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انجام شده است و نویسندگان از مسئولین مؤسسه، خصوصاً آقای دکتر فولادفر، بخاطر در اختیار قراردادن امکانات، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با افزایش سرعت جریان و نیز کاهش درصد رس و افزایش درصد سیلت در هر آزمایش مقادیر سرعت پس‌روی، دبی رسوب، طول پس‌روی و نیز حجم رسوبات منتقل شده به پایین‌دست افزایش می‌یابد. و نیز مطابق مشاهدات، روند تغییرات سرعت پس‌روی و دبی رسوب نسبت به زمان در ابتدا حالت افزایشی با شیب تند دارند و پس از مدتی به تدریج سیر نزولی پیدا می‌کنند و در نهایت به میزان ثابتی می‌رسند. همچنین تغییرات حجم رسوب و طول پس‌روی در شروع آزمایش حالت صعودی با شیب تند داشتند و پس از مدتی به یک مقدار ثابت میل می‌کردند. ضمناً نتایج کمی تحقیق بدین شرح است که با کاهش ۷۰ درصدی رس، مقادیر سرعت پس‌روی ۱۶/۵ درصد، طول پس‌روی ۷۰ درصد، دبی رسوب ۲۴ درصد و حجم رسوبات

**فهرست منابع**

- عاشوریان، م.، شفاعی بجزستان، م و بابازاده ح. ۱۳۹۴. اثر میزان رس، ارتفاع آبشار و سرعت جریان در خاک‌های چسبنده بر فرسایش پس‌رونده، نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال چهارم، شماره ۴، تابستان ۱۳۹۴، ص ۲۵-۳۸.
- Alonso, C. V., Bennett, S. J., and Stein, O. R. 2002, Predicting head cut erosion and migration in concentrated flows typical of upland areas, *Water Resources Research*, 12: 15-39.
- Brush, L. M., Wolman, Jr., and Wolman, M. G. 1960, Knickpoint behavior in noncohesive material: a laboratory study. *Geological Society of America Bulletin*, 71: 59-74.
- Bryan, R. B., 1990, Knickpoint evolution in rillwash. In *Soil Erosion-Experiments and Models*, ed. R.B. Bryan, Cremlingen, Germany. 208 pp.
- Duarte, R.M., Marquinez, J., Menéndez, S.F., and Santos, R. 2007, Incised channels and gully erosion in Northern Iberian Peninsula: Controls and geomorphic setting. *Catena*, 71: 267-278.
- Kukul, S. S., and Matharu, G. S., 2002, Behavior of gully erosion in relation to catchment characteristics in foothills of lower shivaliks, world congress of soil science, 17:14-21.
- Martinez-Casasnovas, J.A., Ramos, M.C., and Poesen, j. 2004, Assessment of sidewall erosion in large gullies using multitemporal DEMs and logistic regression analysis. *Geomorphology* 58: 305-321
- Ndomba, P.M., and Mtalo, F. 2009, Estimating gully erosion contribution to large catchment sediment yield rate in Tanzania. *Physics and chemistry of the earth*, 34: 741-748
- Saafan, T.A., and Mohamed, I. M. G. 2003, Comparison between Channel Bed Scour and Head Cut Erosion Rates. *Mansoura engineering journal*, 28(4): 30-48.
- Soliemanpour, S.M., Soufi, M., Ahmadi, H. 2008, Sediment production by gully erosion in the southwest of Iran, Fars province. international soil conversation organization, Budapest, Hungary May 2008.
- Stavi, I.A., and Perevolotsky, Y.A. 2009, Effects of gully formation and headcut retreat on primary production in an arid rangeland: Natural desertification in action. *Journal of Arid Environment*, 74(2): 221-228.



Yana, L., Tingwu, L., Zhang, J., and Zhang, Q. 2015, Finite element method for one- dimensional rill erosion simulation on a curved slope. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(1): 28–41.



ISSN 2251-7480

## Study of the Rate of headcut and sediment volume Erosion in Channels with Steep Slope

Amirali Salemian<sup>1</sup>, Mahmood Shafai Bejestan<sup>2\*</sup>, Amir Khosrojerdi<sup>3</sup>, Hossein Babazadeh<sup>4</sup> and Hossein Sedghi<sup>5</sup>

1) Ph.D student, Water Science and Engineering Department, College of Agriculture and Natural Resources, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2\*) Professor, College of Water Science Engineering, Shahid Chamran University, Khozestan, Iran

\*Corresponding author email: [m\\_shafai@yahoo.com](mailto:m_shafai@yahoo.com)

3) Assistant Professor, Water Science and Engineering Department, College of Agriculture and Natural Resources, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4) ) Assistant Professor, Water Science and Engineering Department, College of Agriculture and Natural Resources, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

5) ) Professor, Water Science and Engineering Department, College of Agriculture and Natural Resources, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 29-06-2016

Accepted: 20-08-2016

### Abstract

Headcut erosion is a sudden change in height or slope that makes gullies and valleys and may change within a height ranged from less than one centimeter to several meters depending on several factors and upstream movement. Occurrence of headcut erosion phenomenon in the rivers will result in bed erosion and instability of beaches. As a result, the river is widened and the outcome of the phenomenon is the transfer of large amounts of sediment downstream and dams' reservoirs. Five adhesive soil samples including, clay and silt with different mixture percentages were examined and tested for 25% upstream and 5% downstream slopes for discharge, velocity and depths of several flows in the study. Volume of the produced sediment was measured in terms of real time and average. In addition, headcut rate and sediment discharge were measured. Some of the phenomena observed in the study that played an important role in the production of sedimentation volume and headcut rate include occurrence of hydraulic jump at the junction of steep slope to mild slope, tensile cracks on the soil surface and increased slope of bed during the experiment due to erosion. According to the results, changes in the three parameters of the amount of silt, upstream slope and flow rate are directly related to the increased rate of movement of sediments and headcut velocity. In pure clay, by increasing flow velocity 1.5 times the average volume of sediments, 13% headcut velocity and sedimentation discharge increased to 40% and 21%, respectively. Moreover, 50% increase of silt increased the average sediments volume, headcut velocity and sedimentation discharge by 12%, 38% and 19%, respectively.

**Keywords:** bed slope, erosion volume, erosion rate, flume, headcut erosion