



ISSN 2251-7480

نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال چهارم، شماره چهارم، تابستان ۱۳۹۴

## اثر میزان رس، ارتفاع آبشار و سرعت جریان در خاک‌های چسبنده بر فرسایش پس‌رونده

معصومه عاشوریان<sup>۱\*</sup>، محمود شفاعی بجزستان<sup>۲</sup> و حسین بابازاده<sup>۳</sup>

<sup>(۱)</sup> دانشجوی دکتری؛ گروه علوم و مهندسی آب؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد علوم و تحقیقات؛ تهران؛ ایران

\* نویسنده مسئول مکاتبات: m.ashourian@srbiau.ac.ir

<sup>(۲)</sup> استاد؛ دانشکده مهندسی علوم آب؛ دانشگاه شهید چمران؛ اهواز؛ ایران

<sup>(۳)</sup> دانشیار؛ گروه علوم و مهندسی آب؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد علوم و تحقیقات؛ تهران؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۲۱

### چکیده

فرسایش پس‌رونده 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 چند سانتی‌متر تا چند متر تغییر نماید و به سمت بالادست حرکت کند. این پدیده یکی از مشخص‌ترین انواع فرسایش در تلفات خاک و از مهم‌ترین منابع تولید رسوب است. از این رو شناخت این پدیده، میزان مهاجرت و میزان تولید رسوب آن حائز اهمیت است. در تحقیق حاضر تعداد هفت نمونه خاک چسبنده، با ترکیب متفاوت رس و سیلت تحت شرایط مختلف ارتفاع پیشانی آبشار و سرعت جریان مورد آزمایش قرار گرفت و در نهایت میزان تغییرات مهاجرت و رسوب تولید شده بررسی شد. آزمایش‌ها تا ثابت شدن میزان مهاجرت ادامه داشت. یکی از پدیده‌های تاثیرگذار در آزمایش‌ها، تشکیل ترک‌های کششی در سطح خاک می‌باشد. اندازه و تعداد ترک‌ها رابطه‌ی عکس با درصد رس دارد. هرچه چسبندگی رسوب بیش‌تر باشد، مهاجرت آبشار به سمت بالادست با زاویه‌ی قائم‌تری می‌باشد. زاویه شیب آبشار در شرایط رس خالص ۳۴/۶ درجه بود، اما در خاک با ۵۰ درصد رس، به ۴۰ درجه افزایش یافت. با کاهش ۵۰ درصدی رس، میزان پس‌روی و سرعت متوسط آن، ۳ برابر حالتی بود که در آن رس ۱۰ درصد کاهش داشت. همچنین کاهش تراز پیشانی ۳/۵ برابر، سرعت متوسط آن ۴/۵ برابر و دبی متوسط رسوب ۳ برابر افزایش داشت.

**کلید واژه‌ها:** آبکندها؛ ترک‌های کششی؛ رسوب؛ زاویه شیب پرتگاه

### مقدمه

فرسایش خاک در مقیاس جهانی، منطقه‌ای و محلی یکی از معضلات اساسی می‌باشد (صادقی و همکاران، ۱۳۹۴). رسوب ناشی از فرسایش خاک به عنوان مهم‌ترین نمایه‌های تخریب اراضی، چالشی مهم در بحث توسعه‌ی پایدار و تهدیدی بر زیست بوم‌ها تلقی می‌شود (خیرفام و وفاخواه، ۱۳۹۳). فرسایش پس‌رونده<sup>۱</sup> یکی از مشخص‌ترین انواع فرسایش در تلفات خاک است

(Kukul S.S, Matharu G.S., 2002). بیش‌تر از ۶۰ درصد

فرسایش‌ها در رودخانه‌ها از همین نوع است (Alonso et

al., 2002) فرسایش پس‌رونده یکی از مهم‌ترین منابع

تولید رسوب است، به طوری که ۵۰ تا ۸۰ درصد

رسوبات حاصل از فرسایش آبی را شامل

می‌شود (Martinez-Casasnovas et al., 2004) که برای

مخازن سدهای احداث شده، هدر رفت خاک و

رسوب‌گذاری رودخانه‌ها بسیار مهم است (قنواتی و

همکاران، ۱۳۹۲). این پدیده یک تغییر ناگهانی در ارتفاع

<sup>1</sup> Headcut Erosion

نیز در آزمایشگاه و برای خاک‌های غیرچسبنده و یا به صورت ترکیبی می‌باشد. در نظر گرفتن همزمان تمام متغیرهای موثر در مساله کنش و فرسایش در کارهای آزمایشگاهی کار بسیار مشکلی می‌باشد، بنابراین هر کدام از محققان با در نظر گرفتن برخی از متغیرها، آزمایش‌های خود را انجام داده‌اند (مکاریان و همکاران، ۱۳۹۴). زمان انجام این آزمایش‌ها از چند دقیقه تا ساعتها متغیر بود (Gardner, 1983).

Gardner (۱۹۸۳) به بررسی آزمایشگاهی مهاجرت پیشانی آبشار به بالادست پرداخت. او در ابتدا از نمونه خاکی را با ترکیب ۷۰ درصد ماسه، ۱۹ درصد رس سیلتی و ۱۱ درصد کائولینیت، به عنوان سنگ بستر قرار داد و بعد از چند هفته با ماسه‌ی ریزی که شامل ۲۰ درصد رس سیلتی و ۱۱ درصد شن ریز بود، سطح سنگ بستر را پوشش داد. مشاهده کرد که میزان فرسایش در لایه سطحی بیش‌تر از لایه زیرین، لایه چسبنده‌تر، بود. به این نتیجه رسید که میزان ناپیوستگی در رسوبات انتقالی ناشی از فرسایش در بالادست آبشار، در رسوبات چسبنده نسبت به رسوبات غیرچسبنده، به مراتب بیش‌تر است.

Robinson و Hanson (۲۰۰۱) به بررسی آزمایشگاهی فرسایش پس‌رونده یک نمونه خاک متراکم شده، شامل ۲۵ درصد رس، ۴۰ درصد سیلت و ۳۵ درصد ماسه، با مقادیر مختلف رطوبت، پرداختند. با بررسی رابطه چگالی و مقدار رطوبت به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقاومت خاک، دانسیته نیز زیاد می‌شود و میزان فرسایش پس‌رونده کاهش می‌یابد.

Gordon و همکاران (۲۰۰۷) تاثیر لایه‌بندی خاک بر توسعه فرسایش پس‌رونده در جریان‌های متمرکز را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نمونه خاک مورد استفاده به طور متوسط شامل ۲۸ درصد رس، ۱۵ درصد سیلت و ۵۷ درصد ماسه بود، که جهت یکنواختی از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. ضخامت خاک متراکم شده ۲ سانتی‌متر بود. بعد از آزمایش‌های بسیار، یک لایه خاک

یا شیب است که آبکندها و دره‌هایی را ایجاد می‌کند و بسته به عوامل مختلف می‌توانند در محدوده‌ی ارتفاعی کمتر از یک اینچ تا چندین فوت تغییر نمایند و به سمت بالادست حرکت کند (Brush and Wolman, 1960; Gardner, 1983). جریان فوق بحرانی برای تشکیل و توسعه پدیده فرسایش پس‌رونده ضروری است (Bryan, 1990). زمانی که بستر رودخانه از ماسه تشکیل شده باشد، این پدیده خیلی سریع‌تر اتفاق می‌افتد و زمانی که بستر چسبنده (رسی) باشد، این روند کندتر می‌شود (Papanicolaou et al., 2008). این نوع فرسایش می‌تواند خطری جدی در کمین ابنیه‌های فنی باشد (داودی راد و همکاران، ۱۳۸۶) و خسارات اقتصادی قابل توجهی را ایجاد کند (بالنده و همکاران، ۱۳۹۲). وقوع این پدیده بر خط‌القعر رودخانه‌ها، به ویژه رودخانه‌های کوچک، تاثیر می‌گذارد و عامل اولیه‌ای برای گسترش فرسایش و آبستنگی سواحل رودخانه‌ها می‌باشد (Papanicolaou et al., 2012). وقتی در پیشانی آبشار لایه‌ی سطحی نسبت به لایه‌های زیرین فرسایش‌پذیری کم‌تری داشته باشد، جریان آب باعث شسته شدن لایه زیرین می‌شود و پدیده غارکنی اتفاق می‌افتد. این پدیده باعث ناپایداری و ایجاد ترک‌هایی در سطح خاک شده، که باعث فرو ریختگی آبشار می‌شود (May, 1989). هرچه چسبندگی رسوب بستر بیش‌تر باشد، حرکت این آبشارها به سمت بالادست با زاویه‌ی قائم‌تری مشاهده می‌شود. پدیده فرسایش پس‌رونده می‌تواند در مناطق با چسبندگی کم‌تر هم دیده شود. هر چه چسبندگی کم‌تر باشد، سرعت حرکت بیش‌تر می‌شود (Wilcox et al., 2001). آبشارها در فرسایش پس‌رونده، براساس شکل آبشار (شامل تک پله‌ای و چند پله‌ای) و کف آبشار (شامل فرسایش‌پذیر و فرسایش‌ناپذیر)، تقسیم‌بندی می‌شوند (Zhu et al., 2005). مطالعات میدانی در خصوص فرسایش پس‌رونده از دهه ۶۰ شروع شده و هدف این مطالعات عمدتاً مربوط به یک ناحیه خاصی است. تعدادی از مطالعات منتشر شده

اهمیت بر فرسایش در کشور (مکاریان و همکاران، ۱۳۹۴)، تحقیقات کافی در این زمینه وجود ندارد. از آنجا که فرسایش پس‌رونده در خاک‌های چسبنده کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است، لذا این تحقیق با هدف بررسی آزمایشگاهی میزان پس‌روی و کاهش تراز پیشانی آبشار و تولید رسوب فرسایش پس‌رونده در خاک چسبنده، با ترکیب متفاوت رس و سیلت تحت شرایط مختلف ارتفاع پیشانی و سرعت جریان با تحکیم بلند مدت، انجام شده است.

#### مواد و روش‌ها سیستم آزمایشگاهی

به منظور انجام آزمایش‌ها، از فلوم آزمایشگاهی موجود در موسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو استفاده شد. فلوم به طول ۱۲ متر، ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و عرض ۴۵ سانتی‌متر می‌باشد. شکل ۱ سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

بازه مشاهداتی در تمامی آزمایش‌ها، به طول ۳ متر، عرض ۴۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر، می‌باشد (شکل ۲). طول بالادست آبشار ۱/۶ متر بود. در واقع آبشار تقریباً در وسط این بازه ایجاد شد. بدین ترتیب جریان در بالادست و پایین‌دست آبشار قابل مشاهده بود. همچنین در دوره‌ی زمانی انجام تمامی آزمایش‌ها، میزان پس‌روی در طول کمتر از ۱/۶ متر به یک مقدار ثابت رسید (شکل ۲) و فرصت برای توسعه یافتن جریان هنگام ورود به بازه مشاهداتی ایجاد شد. بالادست آبشار بدون شیب (سطح صاف) بوده، اما ارتفاع آبشار متفاوت است. در تمامی نمونه‌ها، ضخامت لایه خاک چسبنده در پایین‌دست آبشار برابر ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت آن در بالادست آبشار، مجموع ضخامت پایین‌دست و ارتفاع آبشار بود. با توجه به مغشوش بودن جریان در رودخانه، در بالادست بازه‌ی مشاهداتی شن ریز ریخته شده تا جریان مشابه جریان رودخانه‌ای در فلوم ایجاد شود.

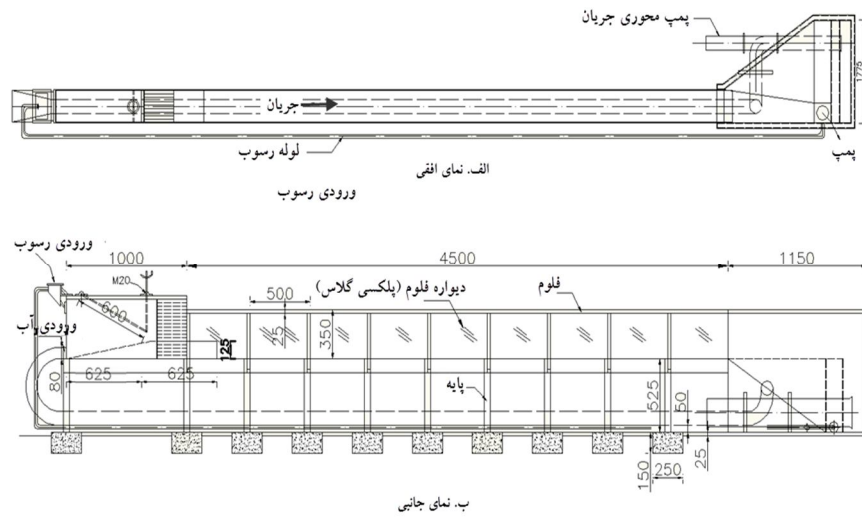
نسبتاً فرسایش‌ناپذیر ایجاد شد. وقتی این لایه در بستر (زیر چاله‌ی آبستگي) قرار داشت، بر شکل فرسایش پس‌رونده تأثیری نداشت. اما قرارگیری این لایه در بالای چاله‌ی آبستگي، باعث محدود شدن عمق فرسایش پس‌رونده شد. در حالی که میزان مهاجرت تقریباً ثابت بود، جریان رسوب کل به طور چشمگیری کاهش یافت. به این نتیجه رسیدند که عملیات کشاورزی (شخم و ...) موجب توسعه فرسایش پس‌رونده می‌شود.

Parker (۲۰۰۸) مشاهده کرد که اراضی کشاورزی در حوضه مورد بررسی به علت فرسایش پس‌رونده ۳۷/۹۱ درصد کم شده و میزان منطقه غیر قابل نفوذ افزایش یافته است.

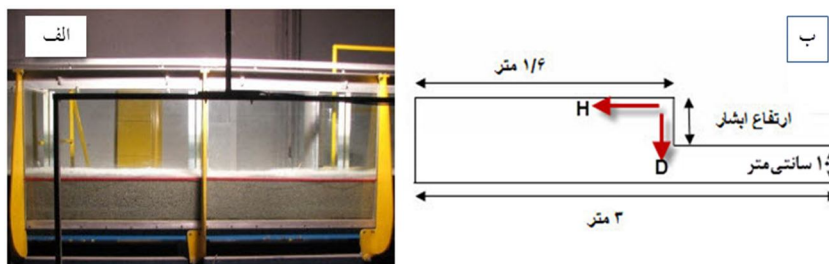
با حفظ شرایط طبیعی حوضه آبخیز، یعنی توجه به نوع جریان، رسوب و شیب آن، می‌توان از وقوع فرسایش پس‌رونده جلوگیری کرد (Ndolo Goy. and Jung, 2013).

در نواحی مختلف ایران تأثیرات مخرب فرسایش پس‌رونده (آبکندی) بر محیط زیست، به صورت میدانی، بررسی شده است. صوفی و ابوالوردی (۱۳۸۷) این پدیده را در جنوب استان فارس بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که مساحت و شیب لازم برای گسترش آبکندها در مناطق مختلف، به علت سازند زمین شناسی و خاک موجود در منطقه، تفاوت دارد. رحیمی و همکاران (۱۳۸۹) مشاهده کردند که رسوبات حاصل از فرسایش پس‌رونده در شمال غرب شیراز، در پشت سدهای احداثی ته‌نشین شده و آن‌ها را کاملاً پر کرده است.

روند فرسایش و رسوب‌گذاری ذرات دانه‌ای بسیار متفاوت از ذرات چسبنده و رسی می‌باشد و عموماً مهم‌ترین چالش‌ها در این زمینه، خصوصاً در مجاورت سازه‌های دریایی و آبی به چشم می‌خورد (محرمی و همکاران، ۱۳۹۴). به دلیل پیچیدگی‌های خاک چسبنده، علیرغم وجود سازندهای وسیع ریزدانه رسی موثر و حائز



شکل ۱. سامانه آزمایشگاهی



شکل ۲. الف) بازه مشاهداتی - ب) ابعاد خاک ریخته شده در فلوم

چسبندگی‌های متفاوت و دوره تحکیم بلندمدت اقدام شد. خاک چسبنده مورد استفاده، رس (کائولینیت) می‌باشد که توسط میزان اختلاط متفاوت با سیلت، میزان چسبندگی آن تغییر می‌کند. بدین ترتیب میزان تاثیر چسبندگی بر فرسایش پس‌رونده بررسی شد.

برای آماده‌سازی بستر، ابتدا رسوبات معلق یکنواخت با کمک مخزن اختلاط رسوب و تعبیه صفحه پخش رسوب، از مخزن به بازه مشاهداتی، از طریق ایجاد باران رسوبی، پمپاژ شد. از آب‌بند در فلوم و در دو طرف بازه مشاهداتی، به منظور خشک نگه داشتن بازه مشاهداتی، در دوره پر کردن فلوم، استفاده شد. سپس فرصت رسوب‌گذاری و تحکیم بلندمدت به رسوبات داده شد. در تمامی نمونه‌ها، تحکیم به صورت طبیعی و تحت وزن رسوبات انجام گرفت. به همین علت خاک‌های سطحی

به‌منظور اطمینان از ایجاد جریانی مشابه جریان رودخانه‌ای در فلوم، قبل از شروع آزمایش‌ها، بایستی تغییرات سرعت در عرض و ارتفاع جریان در فلوم را مورد بررسی قرار داد. این کار برای دبی‌ها و عمق‌های مختلف در تمام طول ۱۲ متری فلوم با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج یک جهت مغناطیسی انجام شد. شرایط کف بستر فلوم در زمان برداشت سرعت کاملاً صاف و صیقلی بوده و زبری کف روی پروفیل سرعت تاثیری ندارد. لذا سرعت‌های برداشت شده با پروفیل سرعت روی بستر نرم با تبعیت از قاعده لگاریتمی سرعت (قانون دیوار) برای بستر صاف، مقایسه شد. بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده هم‌خوانی قابل قبولی مشاهده شد.

به‌منظور انجام آزمایش‌های فرسایش پس‌رونده روی نمونه‌های رسوبی، در ابتدا نسبت به آماده‌سازی بستر برای

۱۷ می‌باشد. ۶ نقطه‌ی زمانی به عنوان مبنای اندازه‌گیری در نظر گرفته شده است (دقیقه‌های ۱، ۲، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۷). در طول انجام تمامی آزمایش‌ها، از تغییرات آبشار فیلم‌برداری و عکس‌برداری شد. حرکت پس‌روی و افت آبشار، در عرض ۴۵ سانتی‌متری فلوم، به صورت یکنواخت نبود. به همین علت در تمامی آزمایش‌ها، سه نقطه‌ی مکانی به عنوان مبنای اندازه‌گیری میزان پس‌روی و افت آبشار در نظر گرفته شد (شکل ۴). یک نقطه در وسط فلوم و دو نقطه دیگر به فاصله‌ی پنج سانتی‌متری از جداره فلوم (به منظور حداقل شدن اثر جداره‌ها بر اندازه‌گیری‌ها). میانگین اعداد برداشت شده از این سه نقطه، در بازه زمانی مربوطه، در تجزیه و تحلیل‌ها استفاده شد. متوسط عمق آب در بالادست آبشار در تمامی نمونه‌ها ۵ سانتی‌متر بود. چون خاک چسبنده است انتظار می‌رود که در ابتدای آزمایش‌ها حجم زیادی منتقل شود و سپس این میزان کاهش یابد. در آزمایش‌ها نیز همین روند برقرار بود.

فرسایش‌پذیری بیشتری دارند. توسط شکاف‌های موجود در کف فلوم آزمایشگاهی، زهکشی از یک سمت انجام شد. فرسایش پس‌رونده روی آبشار تک پله‌ای با کف فرسایش‌پذیر بررسی شد (طبق تقسیم بندی *Zhu et al., 2005*). برای اندازه‌گیری میزان پس‌روی و افت آبشار، از کاغذهای شفاف مدرج نصب شده بر روی فلوم (شکل ۴) استفاده شد. دبی جریان توسط دستگاه تنظیم فرکانس موتور پمپ قابل تنظیم می‌باشد.

مشخصات هفت آزمایش انجام شده، با تحکیم بلندمدت، در جدول ۱ ذکر شده است. به منظور بررسی این هفت نمونه، سه متغیر در نظر گرفته شد. در نهایت تاثیر این سه متغیر بر پارامترهای اندازه‌گیری شده (شامل پس‌روی، افت پیشانی و ...) بررسی می‌شود. متغیر اول: جنس خاک، که در چهار نمونه اول قابل بررسی است. متغیر دوم: ارتفاع آبشار، که در نمونه ۶ با نمونه ۱ و نمونه ۷ با نمونه ۵ قابل مقایسه می‌باشد. متغیر سوم: تغییرات همزمان سرعت جریان و ارتفاع آبشار، که در نمونه ۱ با نمونه ۷ و نمونه ۶ با نمونه ۷ مقایسه می‌شود. بازه زمانی مشاهداتی تمامی آزمایش‌ها یکسان و از دقیقه اول تا دقیقه

جدول ۱. مشخصات آزمایش‌های انجام شده

شماره آزمایش	جنس خاک	ارتفاع آبشار (سانتی‌متر)	سرعت متوسط بالادست آبشار (متر بر ثانیه)	دبی جریان (لیتر بر ثانیه)
۱	۱۰۰٪ زرس	۱۵	۰/۲۵	۵/۶
۲	۹۰٪ زرس + ۱۰٪ نسپلت	۱۵	۰/۲۵	۵/۶
۳	۷۰٪ زرس + ۳۰٪ نسپلت	۱۵	۰/۲۵	۵/۶
۴	۵۰٪ زرس + ۵۰٪ نسپلت	۱۵	۰/۲۵	۵/۶
۵	۱۰۰٪ زرس	۱۷	۰/۴۵	۱۰/۱
۶	۱۰۰٪ زرس	۱۳	۰/۲۵	۵/۶
۷	۱۰۰٪ زرس	۱۴	۰/۴۵	۱۰/۱

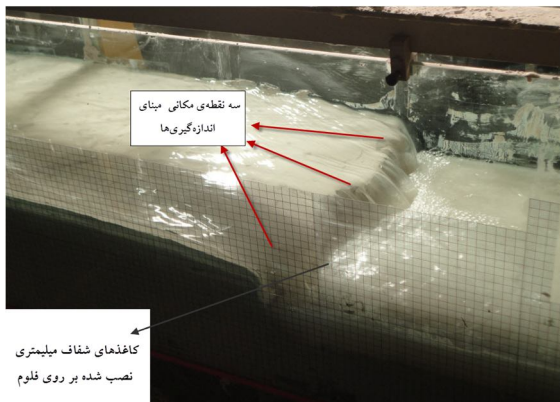
شکل ۳ الف ارائه شده است. وجود این ترک‌ها باعث شد که در ابتدای آزمایش فرسایش توده‌ای صورت بگیرد (شکل ۳ ب). به همین علت در ابتدای آزمایش، میزان مهاجرت پیشانی آبشار به بالادست بسیار زیاد بوده، ولی با

## نتایج و بحث مشاهدات

در شروع و یا در طی هر آزمایش، یکی از پدیده‌های تاثیرگذار تشکیل ترک‌های کششی بود، که بطور نمونه در

به یک زاویه ملایمی و پرتگاه به سطح شیبدار تبدیل شود. میزان تولید رسوب در این حالت بسیار کم و تابع مقاومت مصالح خاک به فرسایش بود. بنابراین فرسایش پس‌رونده در سه آزمایش فوق قابل بررسی نبود و آزمایش‌های این تحقیق در شرایط کم عمق انجام شد (شکل ۴).

منظور از شرایط جریان کم عمق (فوق بحرانی) حالتی است که عمق پایاب از ارتفاع آبشار کم‌تر باشد. همچنین حالت پرآبی (جریان زیر بحرانی) یعنی شرایطی که عمق پایاب از ارتفاع آبشار بیش‌تر است.



شکل ۴. فرسایش پس‌رونده در شرایط جریان با عمق کم

هرچه چسبندگی رسوب بیش‌تر باشد، مهاجرت پرتگاه به سمت بالادست با زاویه‌ی قائم‌تری می‌باشد. بطوریکه در شرایط رس خالص زاویه شیب پرتگاه ۳۴/۶ درجه است، اما در خاک با ۵۰ درصد رس به ۴۰ درجه افزایش یافت (جدول ۲). مطالعات Wilcox و همکاران (۲۰۰۱) نیز نشان داد که با افزایش درصد رس شیب پرتگاه عمودی‌تر است و این به دلیل چسبندگی بیش‌تر خاک رس و مقاومت خاک در مقابل فرسایش است.

جدول ۲. متوسط شیب سطوح شیبدار

شماره آزمایش	جنس خاک	متوسط زاویه سطح شیبدار (درجه)
آزمایش ۱	۱۰۰٪ رس	۳۴/۶ درجه
آزمایش ۲	۹۰٪ رس + ۱۰٪ نسپلت	۳۵/۷ درجه
آزمایش ۳	۷۰٪ رس + ۳۰٪ نسپلت	۳۷/۵ درجه
آزمایش ۴	۵۰٪ رس + ۵۰٪ نسپلت	۴۰ درجه

گذشت زمان این میزان کاهش یافت و بیش‌تر خاک توسط فرسایش سطحی به پائین دست منتقل شد. تعداد و ابعاد ترک‌ها از یک نمونه خاک به نمونه دیگر متفاوت بود. اندازه و فراوانی ترک‌ها رابطه‌ی عکس با درصد رس دارد. بطوریکه در نمونه‌هایی که میزان درصد رس کم بود، ابعاد و فراوانی این ترک‌ها بیش‌تر از نمونه خاکی است که درصد رس بیش‌تری دارد. ضمن اینکه فرسایش سطحی نیز در نمونه خاک با رس کم‌تر، بسیار بیش‌تر از نمونه خاک با درصد رس بیش‌تر است. در تمامی نمونه‌های این تحقیق، به علت تحکیم طبیعی ناشی از وزن رسوبات، فرسایش‌پذیری لایه‌های سطحی نسبت به لایه‌های زیرین بیشتر می‌باشد. بنابراین پدیده غارکنی یا زیرشویی دیده نشد و فرسایش توده‌ای پدیده غالب بود.



شکل ۳. الف. ترک‌های کششی. ب. فرسایش توده‌ای

به‌منظور بررسی نظر Bryan (1990)، که معتقد است فرسایش پس‌رونده تنها در شرایط جریان با عمق کم و فوق بحرانی اتفاق می‌افتد، تعداد سه آزمایش با در نظر گرفتن حالت پرآبی و جریان زیر بحرانی، انجام شد. مشاهدات گویای این واقعیت بود که عملاً در ابتدای آزمایش بخشی از خاک پیشانی آبشار تخریب و در پائین‌دست پیشانی تجمع کرد. فرسایش‌های بعدی نیز که بیش‌تر سطحی بودند باعث شد تا عملاً شیب قائم پیشانی

نتایج سه مورد ذکر شده در سه حالت بررسی می‌شود: تاثیر میزان رس، تاثیر ارتفاع آبشار و تاثیر سرعت جریان. سپس میزان تاثیر هر کدام از این موارد بر نتایج، تحلیل می‌شود. طبق جدول ۱، مشخصات آزمایش‌های مورد مقایسه استخراج و در جدول ۳ ارائه شده است. مقایسه برای سرعت‌ها و دبی لحظه‌ای، در ۵ بازه زمانی مشخص و ثابت، دو به دو بین نمونه‌ها انجام شد.

برای تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از نمونه‌های ۱ تا ۷، سه پارامتر مهم زیر نسبت به زمان، به صورت لحظه‌ای و متوسط، مورد بررسی قرار گرفت:

- ۱- تغییرات میزان پس‌روی (H در شکل ۲ ب) و سرعت پس‌روی آبشار نسبت به زمان ( $\Delta H/\Delta t$ )
- ۲- تغییرات میزان کاهش تراز پیشانی آبشار (D در شکل ۲ ب) و سرعت کاهش تراز پیشانی آبشار نسبت به زمان ( $\Delta D/\Delta t$ )
- ۳- تغییرات میزان حجم و دبی رسوب تولید شده از فرسایش پس‌رونده آبشار نسبت به زمان

جدول ۳. مشخصات آزمایش‌های مورد مقایسه

تغییرات سرعت متوسط جریان بالادست آبشار	تغییرات ارتفاع آبشار	تغییرات میزان رس	آزمایش‌های مورد مقایسه
ثابت	ثابت	کاهش ۱۰٪	آزمایش ۲ نسبت به آزمایش ۱
ثابت	ثابت	کاهش ۳۰٪	آزمایش ۳ نسبت به آزمایش ۱
ثابت	ثابت	کاهش ۵۰٪	آزمایش ۴ نسبت به آزمایش ۱
ثابت	کاهش ۱۳٪	ثابت	آزمایش ۶ نسبت به آزمایش ۱
ثابت	کاهش ۱۸٪	ثابت	آزمایش ۷ نسبت به آزمایش ۵
کاهش ۴۵٪	افزایش ۷٪	ثابت	آزمایش ۱ نسبت به آزمایش ۷
کاهش ۴۵٪	کاهش ۷٪	ثابت	آزمایش ۶ نسبت به آزمایش ۷

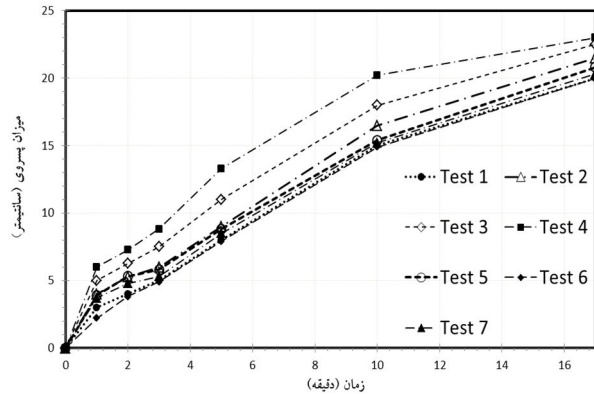
نمونه‌های ۲، ۳ و ۴، با کاهش ۱۰ تا ۵۰ درصدی رس و ۴۵ درصدی سرعت جریان، دارند. در واقع تاثیر کاهش چسبندگی بر روند پس‌روی به مراتب بیش‌تر از تاثیر تغییر در ارتفاع آبشار و یا سرعت جریان می‌باشد.

با تقسیم میزان پس‌روی‌ها بر بازه زمانی مربوطه، سرعت پس‌روی لحظه‌ای بدست می‌آید (شکل ۶). طبق این شکل، روند تغییرات سرعت پس‌روی در تمامی آزمایش‌ها مشابه، در ابتدا صعودی و سپس نزولی، می‌باشد. بیش‌ترین میزان تغییرات در ۱۰ دقیقه ابتدایی بوده و بعد از آن به یک مقدار ثابتی نزدیک می‌شود. بیش‌ترین سرعت پس‌روی در نمونه ۴ با کاهش ۵۰ درصدی رس و کم‌ترین سرعت پس‌روی در نمونه ۶ با کم‌ترین ارتفاع آبشار رخ داد. ترک‌های کششی و فرسایش توده‌ای در بیش‌تر بودن میزان تغییرات در ابتدای آزمایش‌ها موثر

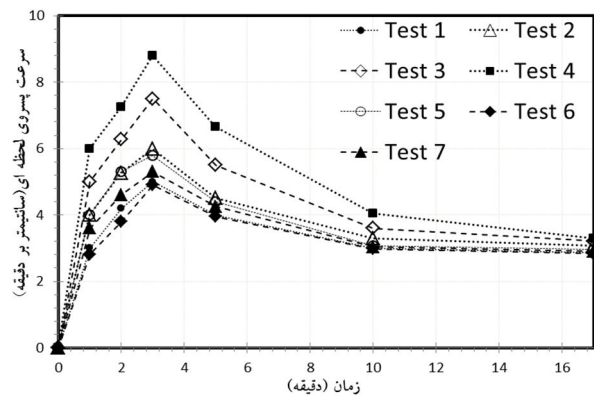
#### ۱- بررسی تغییرات میزان پس‌روی و سرعت پس‌روی لحظه‌ای آبشار نسبت به زمان

شکل ۵ میزان پس‌روی از پیشانی آبشار (پرتگاه) را نسبت به زمان نشان می‌دهد. در تمامی آزمایش‌ها، میزان پس‌روی بالادست آبشار نسبت به پیشانی با گذشت زمان، روندی صعودی دارد. بیش‌ترین میزان پس‌روی مربوط به نمونه ۴، با کاهش ۵۰ درصدی رس، و کم‌ترین آن مربوط به نمونه ۶، با کم‌ترین ارتفاع آبشار، می‌باشد. مشاهده می‌شود که با کاهش درصد رس در نمونه‌های ۲، ۳ و ۴، میزان پس‌روی افزایش یافته است و نمودار این سه آزمایش با سایر آزمایش‌ها اختلاف بیش‌تری دارند. نمونه‌های ۵ و ۷، با بیش‌ترین میزان رس و سرعت جریان، میزان پس‌روی به مراتب کم‌تری نسبت به

بودند. با گذشت زمان و متعادل شدن فرسایش، میزان تغییرات در تمامی حالات کاهش می‌یابد.



شکل ۵. میزان پس‌روی پیشانی پرتگاه نسبت به زمان



شکل ۶. سرعت پس‌روی لحظه‌ای پیشانی پرتگاه

طبق شکل ۶، بیشترین سرعت پس‌روی آزمایش ۱، ۵ سانتی‌متر بر دقیقه بود که این مقدار در آزمایش ۳، با کاهش ۳۰ درصدی رس، به ۷/۵ سانتی‌متر بر دقیقه و در آزمایش ۴، با کاهش ۵۰ درصدی رس، به ۸/۸ سانتی‌متر بر دقیقه افزایش یافت. به عبارت دیگر، سرعت پس‌روی در آزمایش ۳، ۵۰ درصد و در آزمایش ۴، ۷۶ درصد، نسبت به آزمایش ۱، افزایش داشت. با کاهش ارتفاع آبشار و سرعت متوسط جریان بالادست آبشار، سرعت پس‌روی آزمایش ۶ (۴/۹ سانتی‌متر بر دقیقه) نسبت به آزمایش ۷ (۵/۳ سانتی‌متر بر دقیقه) ۷/۵ درصد کاهش داشت. با کاهش ۱۸ درصدی ارتفاع آبشار در نمونه ۷ نسبت به نمونه ۵، سرعت پس‌روی از ۵/۸ سانتی‌متر بر دقیقه به ۵/۳ سانتی‌متر بر دقیقه (تقریباً ۹ درصد)، کاهش یافت. با کاهش یکسان سرعت متوسط جریان بالادست آبشار،

هرچقدر ارتفاع آبشار کم‌تر شود، سرعت پس‌روی میزان بیش‌تری کم می‌شود. تاثیر تغییرات میزان رس بر روی سرعت پس‌روی، به مراتب بیش‌تر از تاثیر تغییرات ارتفاع آبشار و سرعت متوسط جریان است.

## ۲- بررسی تغییرات میزان کاهش تراز پیشانی آبشار

### و سرعت لحظه‌ای آن نسبت به زمان

شکل ۷ میزان کاهش تراز پیشانی آبشار (پرتگاه) را نسبت به زمان نشان می‌دهد. در این شکل میزان کاهش تراز پیشانی آبشار با توجه به ضخامت بالادست آبشار، یعنی مجموع ارتفاع آبشار و ضخامت پایین دست آبشار (شکل ۲ ب)، بیان شد. کاهش تراز پیشانی آبشار با گذشت زمان روندی نزولی دارد که این روند بعد از گذشت ۱۰ دقیقه به یک مقدار ثابت نزدیک می‌شود. آزمایش ۵ با بیش‌ترین ارتفاع آبشار، کم‌ترین میزان کاهش تراز را دارد. با کاهش ۴۵ درصدی سرعت جریان و ۷ درصدی ارتفاع آبشار در آزمایش ۶ نسبت به آزمایش ۷، میزان کاهش تراز پیشانی در این دو آزمایش تقریباً یکسان بود، که نشان‌دهنده تاثیر بیش‌تر سرعت متوسط جریان بالادست آبشار بر میزان کاهش تراز پیشانی می‌باشد. بیش‌ترین میزان کاهش تراز مربوط به آزمایش‌ها ۳ و ۴ به ترتیب با کاهش ۳۰ و ۵۰ درصدی رس بود. همچنین روند کاهش تراز پیشانی در آزمایش ۲ با کاهش ۱۰ درصدی نزدیک به روند آزمایش ۶ است. طبق جدول ۱، کم‌ترین ارتفاع آبشار مربوط به آزمایش ۶ می‌باشد، اما روند کاهش تراز آزمایش ۳ و ۴ بیش‌تر از آزمایش ۶ بود. به عبارت دیگر تاثیر کاهش درصد رس و چسبندگی در افزایش میزان کاهش تراز پیشانی، به مراتب بیش‌تر از تاثیر افزایش سرعت متوسط جریان و ارتفاع آبشار است. با مقایسه آزمایش‌ها با ارتفاع آبشار یکسان، مشاهده می‌شود که هر چه میزان رس کم‌تر شود، میزان کاهش تراز بیش‌تر می‌شود.



درصدی رس، به  $\frac{4}{3}$  سانتی‌متر بر دقیقه افزایش یافت. در واقع، سرعت کاهش تراز پیشانی در آزمایش ۳، تقریباً ۴۱ درصد و در آزمایش ۴، ۶۰ درصد، نسبت به آزمایش ۱، افزایش داشت. با کاهش ارتفاع آبشار و سرعت متوسط جریان بالادست آبشار سرعت کاهش تراز پیشانی آزمایش ۶ ( $\frac{2}{6}$  سانتی‌متر بر دقیقه) نسبت به آزمایش ۷ ( $\frac{2}{85}$  سانتی‌متر بر دقیقه) تقریباً ۹ درصد کاهش داشت. با کاهش ۱۸ درصدی ارتفاع آبشار در نمونه ۷ نسبت به نمونه ۵، سرعت کاهش تراز پیشانی از ۳ سانتی‌متر بر دقیقه به  $\frac{2}{85}$  سانتی‌متر بر دقیقه (تقریباً ۵ درصد)، کاهش یافت. تاثیر تغییرات سرعت متوسط جریان بر سرعت کاهش تراز پیشانی، به مراتب بیش‌تر از تاثیر تغییرات ارتفاع آبشار بود.

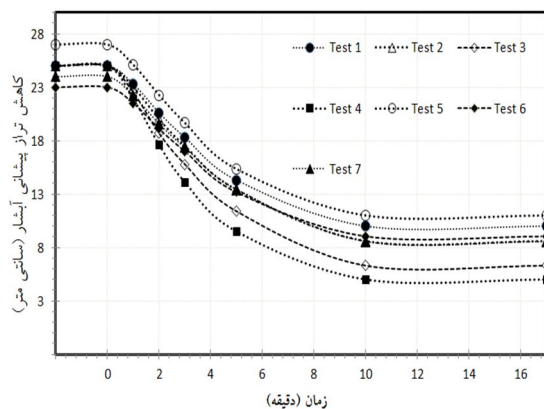
### ۳- بررسی تغییرات میزان حجم و دبی رسوب تولید

شده از فرسایش پس‌رونده آبشار نسبت به زمان

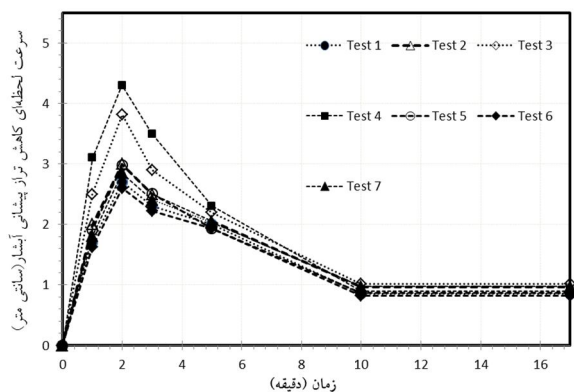
شکل ۹ حجم تجمعی رسوبات نسبت به زمان را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، در ابتدا مقدار حجم رسوب آزمایش‌ها نزدیک به هم بوده اما این مقدار با گذشت زمان در نمونه‌های ۳ و ۴، به ترتیب با ۳۰ و ۵۰ درصد کاهش رس نسبت به سایر نمونه‌ها، به طور چشمگیری بیش‌تر شده است. آزمایش ۶، با کم‌ترین میزان ارتفاع آبشار، کم‌ترین میزان حجم رسوب را دارد. نمونه‌های ۱، ۵، ۶ و ۷ حداکثر میزان رس، ارتفاع آبشار و سرعت متوسط جریان متفاوت، حجم رسوب نزدیکی دارند که این میزان حجم به نسبت آزمایش ۲، با ۱۰ درصد کاهش رس، کم‌تر می‌باشد و این نشان دهنده‌ی تاثیر بیش‌تر کاهش درصد رس بر میزان رسوب است. حجم رسوب با کاهش چسبندگی افزایش یافت.

با تقسیم حجم رسوب لحظه‌ای بر بازه زمانی مربوطه، دبی رسوب لحظه‌ای بدست آمد (شکل ۱۰). تغییرات دبی رسوب لحظه‌ای با روندی شبیه به شکل ۶ و ۸، در ابتدا صعودی و سپس نزولی بوده تا به یک مقدار ثابت نزدیک شود. بیش‌ترین دبی رسوبی مربوط به

با تقسیم میزان کاهش تراز بر بازه زمانی مربوطه، سرعت لحظه‌ای کاهش تراز پیشانی آبشار بدست آمد (شکل ۸). روند تغییرات سرعت لحظه‌ای کاهش تراز پیشانی در ابتدا صعودی و سپس نزولی بود، تا به یک مقدار ثابت نزدیک شد. بیش‌ترین سرعت لحظه‌ای کاهش تراز پیشانی مربوط به آزمایش ۴، با کم‌ترین میزان رس، و کم‌ترین سرعت لحظه‌ای کاهش تراز پیشانی مربوط به آزمایش ۶، با کم‌ترین ارتفاع آبشار، می‌باشد.



شکل ۷. کاهش تراز پیشانی آبشار نسبت به زمان



شکل ۸. سرعت لحظه‌ای کاهش تراز پیشانی آبشار

با کاهش میزان رس سرعت کاهش تراز پیشانی در تمامی بازه‌های زمانی افزایش داشته و با کاهش ارتفاع آبشار و سرعت متوسط جریان، سرعت کاهش تراز پیشانی کم می‌شود. طبق شکل ۸، بیش‌ترین میزان سرعت کاهش تراز پیشانی آزمایش ۱،  $\frac{2}{7}$  سانتی‌متر بر دقیقه بود که این مقدار در آزمایش ۳، با کاهش ۳۰ درصدی رس، به  $\frac{3}{8}$  سانتی‌متر بر دقیقه و در آزمایش ۴، با کاهش ۵۰

آزمایش ۷ (۹۷ سانتی مترمکعب بر دقیقه) تقریباً ۱۹ درصد کاهش داشت. با کاهش ۱۸ درصدی ارتفاع آبشار در نمونه ۷ نسبت به نمونه ۵، دبی رسوب لحظه‌ای از ۱۰۲ سانتی مترمکعب بر دقیقه به ۹۷ سانتی مترمکعب بر دقیقه (تقریباً ۵ درصد)، کاهش یافت. تاثیر کاهش چسبندگی بیش‌تر از تاثیر تغییرات ارتفاع آبشار و سرعت متوسط جریان است.

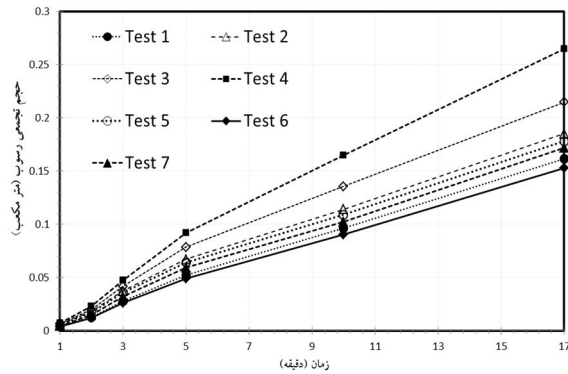
#### مقایسه مقادیر متوسط

در این قسمت تاثیر تغییرات درصد رس، ارتفاع آبشار و سرعت جریان بر متوسط پارامترهای اندازه‌گیری شده (جدول ۴)، بررسی می‌شود. طبق جدول ۴، با کاهش تدریجی چسبندگی در نمونه‌های ۱ تا ۴ تمامی پارامترها افزایش داشت و حداکثر مقدار پارامترها در نمونه ۴، با کم‌ترین میزان چسبندگی، رخ داد. با کاهش ارتفاع آبشار، پارامترها کاهش یافت و حداقل آنها در نمونه ۶ مشاهده شد. افزایش سرعت متوسط جریان موجب افزایش سرعت پس‌روی و سایر پارامترها می‌شود، اما کاهش درصد رس موثرترین نقش را در افزایش پارامترهای اندازه‌گیری شده دارد. نتایج مقایسه مقادیر جدول ۴ در جداول ۵، ۶ و ۷ ارائه شده است.

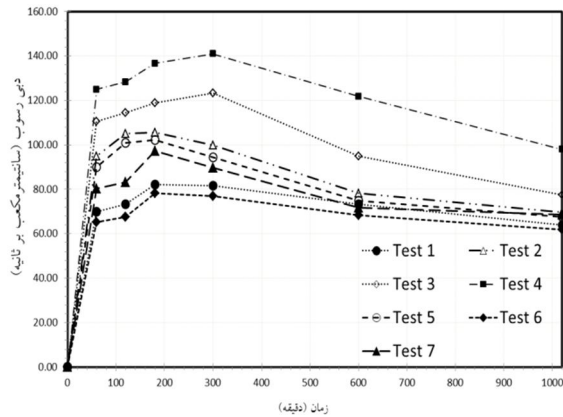
طبق جدول ۵، با کاهش ۳۰ درصدی رس نسبت به کاهش ۱۰ درصدی آن، یعنی ۲۰ درصد کاهش بیش‌تر، به صورت تقریبی مقادیر پس‌روی کل و سرعت متوسط آن ۲ برابر، کاهش تراز پیشانی آبشار و سرعت لحظه‌ای آن ۳ برابر و دبی متوسط ۲ برابر افزایش یافت. با کاهش ۵۰ درصدی رس نسبت به کاهش ۱۰ درصدی آن، یعنی ۴۰ درصد کاهش بیش‌تر، به صورت تقریبی مقادیر پس‌روی کل و سرعت متوسط آن ۳ برابر، کاهش تراز پیشانی آبشار ۳/۵ و سرعت لحظه‌ای آن ۴/۵ برابر و دبی متوسط رسوب ۳ برابر افزایش یافت.

در جدول ۶، تاثیر تغییرات ارتفاع آبشار در دو حالت، با کاهش ۱۳ و ۱۸ درصدی یعنی ۵ درصد کاهش بیش‌تر، به صورت تقریبی ارائه شد. این میزان کاهش بیش‌تر در

آزمایش ۴، با کم‌ترین میزان چسبندگی، و کم‌ترین دبی رسوبی مربوط به آزمایش ۶، با کم‌ترین ارتفاع آبشار، می‌باشد.



شکل ۹. حجم تجمعی رسوب



شکل ۱۰. دبی رسوب لحظه‌ای

با کاهش میزان رس دبی رسوب لحظه‌ای در تمامی بازه‌های زمانی افزایش و با کاهش ارتفاع آبشار و سرعت جریان، دبی رسوب لحظه‌ای کاهش یافت. با توجه به شکل ۱۰، حداکثر میزان دبی رسوب لحظه‌ای در آزمایش ۱، ۸۲ سانتی مترمکعب بر دقیقه است که این مقدار در آزمایش ۳، با کاهش ۳۰ درصدی رس، به ۱۱۹ سانتی مترمکعب بر دقیقه و در آزمایش ۴، با کاهش ۵۰ درصدی رس، تقریباً به ۱۴۰ سانتی مترمکعب بر دقیقه افزایش یافت. میزان دبی رسوب لحظه‌ای در آزمایش ۳، تقریباً ۴۵ درصد و در آزمایش ۴، ۷۱ درصد، نسبت به آزمایش ۱، افزایش داشت. با کاهش ارتفاع آبشار و سرعت متوسط جریان بالادست آبشار سرعت کاهش تراز پیشانی آزمایش ۶ (۷۹ سانتی مترمکعب بر دقیقه) نسبت به

و ارتفاع آبشار، پس‌روی کل، سرعت متوسط آن و دبی متوسط رسوب به مراتب بیش‌تر از حالتی است که سرعت ثابت و ارتفاع آبشار کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر تاثیر سرعت جریان بر پارامترهای اندازه‌گیری شده، بیش‌تر از تاثیر ارتفاع آبشار و تاثیر کاهش میزان رس به مراتب از این دو بیش‌تر است.

با مقایسه‌ی مقادیر متوسط و لحظه‌ای می‌توان گفت که موثرترین عامل بر پارامترهای اندازه‌گیری شده، به ویژه کاهش تراز پیشانی و سرعت آن، میزان رس و چسبندگی خاک است. هر چه چسبندگی بیش‌تر باشد، خاک مقاومت بیش‌تری در برابر فرسایش دارد.

ارتفاع آبشار، موجب ۱/۶ برابر کاهش بیش‌تر پس‌روی کل و سرعت متوسط آن، ۱/۲ برابر کاهش بیش‌تر دبی متوسط رسوب می‌شود. اما کاهش تراز پیشانی کل نصف و سرعت متوسط آن ۰/۶۵ برابر کم شد.

مطابق با نتایج جدول ۷، با کاهش ۴۵ درصدی سرعت متوسط جریان و کاهش ۷ درصدی ارتفاع آبشار، پس‌روی کل، سرعت متوسط آن و دبی رسوبی تقریباً ۱/۷۵ برابر نسبت به همین مقدار کاهش سرعت متوسط جریان و ۷ درصد افزایش ارتفاع آبشار، کاهش بیش‌تری داشت. همچنین کاهش چشمگیری در کاهش تراز پیشانی و سرعت متوسط آن مشاهده می‌شود. با مقایسه جداول ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که با کاهش همزمان سرعت جریان

جدول ۴. مقادیر متوسط تغییرات

نمونه ۷	نمونه ۶	نمونه ۵	نمونه ۴	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	پارامترهای اندازه‌گیری شده
۵۷/۶	۵۳/۷	۶۰	۷۸	۷۰	۶۲	۵۵	پس‌روی کل (cm)
۳/۳۹	۳/۱۶	۳/۵	۴/۶	۴/۱۲	۳/۶۵	۳/۲۴	سرعت متوسط پس‌روی (cm/min)
۱۵/۴۳	۱۳/۹۶	۱۶	۲۰	۱۸/۷	۱۶/۴	۱۵	کاهش تراز پیشانی کل آبشار (cm)
۱/۷۶	۱/۵۹	۱/۸۷	۲/۵	۲/۲۴	۱/۹۲	۱/۷۴	سرعت متوسط کاهش تراز پیشانی (cm/min)
۷۰/۱۲	۵۹/۷۳	۷۵/۷۲	۱۰۸/۴۲	۹۱/۳۸	۷۹/۰۷	۶۳/۵۲	متوسط دبی رسوب (cm <sup>3</sup> /s)

جدول ۵. بررسی تاثیر تغییرات درصد رس

دبی متوسط رسوب	سرعت متوسط کاهش تراز پیشانی	کاهش تراز پیشانی	پس‌روی کل و سرعت متوسط آن	تغییرات رس	نمونه‌های مورد مقایسه
۲۴/۵٪ افزایش	۱۰٪ افزایش	۹٪ افزایش	۱۳٪ افزایش	۱۰٪ کاهش	نمونه ۲ نسبت به نمونه ۱
۴۴٪ افزایش	۲۹٪ افزایش	۲۵٪ افزایش	۲۷٪ افزایش	۳۰٪ کاهش	نمونه ۳ نسبت به نمونه ۱
۷۱٪ افزایش	۴۴٪ افزایش	۳۳٪ افزایش	۴۲٪ افزایش	۵۰٪ کاهش	نمونه ۴ نسبت به نمونه ۱

جدول ۶. بررسی تاثیر تغییرات ارتفاع آبشار

دبی متوسط رسوب	سرعت متوسط کاهش تراز پیشانی	کاهش تراز پیشانی	پس‌روی کل و سرعت متوسط آن	ارتفاع آبشار	نمونه‌های مورد مقایسه
۶٪ کاهش	۹٪ کاهش	۷٪ کاهش	۲/۵٪ کاهش	۱۳٪ کاهش	نمونه ۶ نسبت به نمونه ۱
۷٪ کاهش	۶٪ کاهش	۳/۵٪ کاهش	۴٪ کاهش	۱۸٪ کاهش	نمونه ۷ نسبت به نمونه ۵

جدول ۷. بررسی تاثیر تغییرات سرعت متوسط جریان و ارتفاع آبشار

نمونه‌های مورد مقایسه	سرعت متوسط جریان	ارتفاع آبشار	پس‌روی کل و سرعت متوسط آن	کاهش تراز پیشانی	سرعت متوسط کاهش تراز پیشانی	دبی متوسط رسوب
نمونه ۱ نسبت به نمونه ۷	کاهش ۴۵٪	افزایش ۷٪	کاهش ۴٪	کاهش ۳٪	کاهش ۱٪	کاهش ۹٪
نمونه ۶ نسبت به نمونه ۷	کاهش ۴۵٪	کاهش ۷٪	کاهش ۷٪	کاهش ۹/۵٪	کاهش ۱۰٪	کاهش ۱۵٪

## نتیجه‌گیری

خالص زاویه شیب پرتگاه ۳۴/۶ درجه بود و در خاک با ۵۰ درصد رس، به ۴۰ درجه افزایش یافت. مطالعات *Wilcox et al. (2001)* نیز نشان داد که با افزایش درصد رس شیب پرتگاه عمودی‌تر است و این به دلیل چسبندگی بیشتر خاک رس و مقاومت خاک در مقابل فرسایش است. مشاهدات نشان داد که این نوع فرسایش نیاز به تحقیقات و آزمایش‌های گسترده‌تری دارد. انجام آزمایش‌ها برای طیف وسیع‌تری از سرعت‌ها و عمق‌ها، و یا بررسی‌های عمیق‌تر نحوه‌ی ایجاد ترک‌های کششی روی آبشار و تاثیر آنها بر سرعت پس‌روی و رسوب تولید شده، می‌تواند موضوعات مهمی برای تحقیق باشند.

## سپاسگزاری

این تحقیق در مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انجام شده است و نویسندگان از مسئولین مؤسسه، خصوصاً آقای دکتر فولادفر، بخاطر در اختیار قرار دادن امکانات، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

در تحقیق حاضر تعداد هفت نمونه خاک چسبنده، با ترکیب متفاوت رس و سیلت، تحت شرایط مختلف ارتفاع پیشانی آبشار و سرعت متوسط جریان آزمایش شد و در نهایت میزان تغییرات مهاجرت و رسوب تولید شده، بررسی شد. وجود ترک‌های کششی، تعداد و ابعاد آن‌ها، در سطح خاک باعث شد که در ابتدای آزمایش فرسایش پس‌رونده بصورت توده‌ای اتفاق بیفتد. اندازه و تعداد ترک‌ها رابطه‌ی عکس با درصد رس داشت. تاثیر میزان رس بر پارامترهای اندازه‌گیری شده به مراتب بیش‌تر از اثر سرعت جریان و ارتفاع آبشار بود. با کاهش ۵۰ درصدی رس، پس‌روی و سرعت متوسط آن ۴۲ درصد بیشتر شد و سه برابر حالتی بود که در آن رس ۱۰ درصد کاهش داشت، و کاهش تراز پیشانی ۳/۵ برابر و سرعت متوسط آن ۴/۵ برابر افزایش داشت. هرچه چسبندگی رسوب بیش‌تر بود، مهاجرت پرتگاه به سمت بالادست با زاویه‌ی قائم‌تری مشاهده شد. بطوریکه در شرایط رس

## فهرست منابع

- بالنده، ن.، حیدری چپانه، ل. و طالب پور ششوان، ب. ۱۳۹۲. ارزیابی میزان خسارات اقتصادی فرسایش آب‌کنندی و روش‌های پیشگیری از آن. اولین همایش ملی علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، آذربایجان غربی، ایران.
- خیرفام، ح. و وفاخواه، م. ۱۳۹۳. ارزیابی روش‌های آزمون گاما، تحلیل خوشه‌ای، تحلیل تابع تشخیص و منحنی‌های اندرو در تفکیک آبخیزهای همگن برای آنالیز منطقه‌ای رسوب معلق. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۴ (۲): ۸۵-۶۵.
- داودی راد، ع.، صوفی، م. و بیات، ر. ۱۳۸۶. فرسایش آب‌کنندی خطر جدی در کمین ابنیه فنی. سومین کنگره ملی مهندسی عمران، تبریز، ایران.
- رحیمی، م.، صوفی، م.، احمدی، ح.، سلیمانپور، م. و نیکنام، م. ۱۳۸۹. ارزیابی تاثیرات اقدامات آبخیزداری با استفاده از برنامه WOCAT در حوزه آبخیز نسیم آباد، شمال غرب شیراز. ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری و چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب، تهران، ایران.

صادقی، س.ح.ر.، بهرامی، ح.ع. و کریمی، ز. ۱۳۹۴. تأثیر نوع و سطح مصرف پلی‌آکریل‌آمید بر هدررفت خاک. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال چهارم، ۴ (۳): ۲۹-۳۸.

صوفی، م. و ابوالوردی، ز. ۱۳۸۷. بررسی آستانه توپوگرافی در گسترش آبکندهای جنوب فارس. اولین همایش ملی مدیریت و توسعه کشاورزی پایدار در ایران، اهواز، ایران.

قنواتی، ر.، صوفی، م. و عباسی زاده، م. ۱۳۹۲. بررسی تأثیر گونه‌های گیاهی مناسب جهت به دام انداختن رسوب و کنترل فرسایش آبکندهای ملی مخاطرات محیط زیست زاگرس، لرستان، ایران.

محرمی، س.، میرقاسمی، ع.ا. و بایسته، ح. ۱۳۹۴. راهنما بررسی تأثیر نوع کانی در روند رسوب‌گذاری خاک‌های رسی با استفاده از روش اجزای مجزا. دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، تبریز، ایران.

مکاریان، ز.، حسینی، س.ه.، صانعی، س.م. و حسینی، م. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی اثر میزان رس موجود در مصالح کناره رودخانه در فرسایش کناری رودخانه. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، ۷ (۱)، ۷۷-۸۴.

- Alonso, C. V., Bennett, S. J. and O. R., Stein. 2002. Predicting head cut erosion and migration in concentrated flows typical of upland areas. *Water Resources Research*, 12: 39-1—39-15.
- Brush, L.M., Wolman, Jr. and M. G., Wolman. 1960. Knickpoint behavior in noncohesive material: a laboratory study. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 71:59-74
- Bryan, R. B. 1990. Knickpoint evolution in rillwash. In *Soil Erosion-Experiments and Models*, ed. R.B. Bryan, It I-132. *Catena Supplement* 17.
- Gardner, T.W. 1983. Experimental study of knickpoint and longitudinal profile evolution in cohesive, homogenous material. *Geol. Soc. Am. Bull.* 94: 664-672.
- Gordon, L. M., Bennett, S. J., Wells, R. R and C. V. Alonso. 2007. Effect of soil stratification on the development and migration of headcuts in upland concentrated flows, *Water Resour. Res.*, 43, W07412.
- Kukul, S. S. and G. S., Matharu. 2002. Behavior of gully erosion in relation to catchment characteristics in foothills of lower shivaliks , *WCSS*, 17: paper no. 628.
- Martinez-Casasnovas, J.A., Ramos, M.C. and J. Poesen 2004. Assessment of sidewall erosion in large gullies using multitemporal DEMs and logistic regression analysis, *Geomorphology*, 58: 305–321.
- May, J. H. 1989. Report 4: Geologic and hydrodynamic controls on the mechanics of knickpoint migration. In *Geotechnical aspects of rock erosion in emergency spillway channels*. Technical Report REMR-GT;3. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Ndolo Goy, P. and Y. Jung. 2013. Headcut Prevention. Colorado State University. College of Engineering. [www.engr.colostate.edu/~pierre/ce\\_old/classes/.../HW4\\_Headcut.pdf](http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/classes/.../HW4_Headcut.pdf).
- Parker, S., 2008. The effect of urbanization on headcut migration. University of Vermont, Burlington 05401.
- Papanicolaou, T., Admiraal, M.D. and C., Wilson. 2012. Monitoring the effects of knickpoint erosion on bridge pier and abutment structural damage due to scour. Final reports and technical briefs from Mid-America Transportation Center.
- Papanicolaou, T., Wilson, C., Dermisis, D., Elhakeem, M. and J., Thomas. 2008. The effects of headcut and knickpoint propagation on bridges in Iowa. Final Report IIHR - Hydroscience & Engineering
- Robinson, M. K. and J. G., Hanson. 2001. Headcut erosion research. *Proceedings of the Seventh Federal Interagency sedimentation Conference: V-15 – V-22*.
- Wilcox, J., Benoit, T. and L., Mink. 2001. Evaluation of geomorphic restoration techniques applied to fluvial systems. Feather River Coordinated Resource Management Group, Section 4.
- Zhu, Y., Visser, J. P. and K. J., Vrijling. 2005. Soil headcut erosion: process and mathematical modeling. *Sediment and Ecohydraulics*, 9: 125-136.



## The effect of clay amount, waterfall height, and flow velocity in cohesive soils on headcut erosion

Masoumeh Ashourian<sup>1\*</sup>, Mahmood Shafai-Bajestan<sup>2</sup> and Hossein Babazadeh<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Ph.D Student, Water Sci. and Eng. Dept., Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

\* Corresponding Author email: [m.ashourian@srbiau.ac.ir](mailto:m.ashourian@srbiau.ac.ir)

<sup>2</sup> Professor, College of Water Science Engineering, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran.

<sup>3</sup> Associate professor, Water Sci. and Eng. Dept., Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: 08-03-2015

Accepted: 12-09-2015

### Abstract

Headcut erosion is a sudden change in height or slope, which creates gullies and valleys and depending on different factors, it may vary from a height range of less than one inch to some feet and move upstream. This is one of the most significant types of erosions in soil losses and the major sources of sediment yield. Therefore, knowing this phenomenon, migration rate and sediment yield are important. In this study, seven samples of cohesive soils with different compositions of clay and silt, tested under different circumstances of waterfall height and flow velocity, and discussed migration rate and sediment yield. Tests were continued to reach a constant migration rate. One of the effective phenomenons in all tests was tensional cracks on soil surface. The size and number of these cracks have inverse relation with clay percent. The higher is the adhesion of sediment, the more vertical is the angle of waterfall migration upward. Waterfall slope angle under pure clay conditions was 34.6 degrees, but it increased to 40 degrees in the soil with 50 percent clay. With the 50 percent clay reduction, headcut movement and its average velocity were 3 times more than the one with 10 percent reduction of clay. Moreover, waterfall decline, its mean velocity, and average flow rate of sediment increased by 3.5, 4.5, and 3 times, respectively.

**Keywords:** gullies, sediment, tensional cracks, waterfall slope angle