

# بررسی مکانیسم‌های حمل ذرات رسوب در فرسایش ورقه‌ای با استفاده از آزمایش فلوم

مجید محمودآبادی<sup>۱</sup>، استادیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان  
 الهام سیرجانی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۰۸/۳۰

دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۰۲/۱۰

## چکیده

فرسایش خاک فرآیندی پویاست که توزیع اندازه ذرات رسوب حاصل از آن تغییرات زیادی دارد. شناخت دینامیکی توزیع اندازه ذرات رسوب، مبنای مدل‌سازی فرسایش‌پذیری خاک، انتقال عناصر غذایی، آلاینده‌ها و ذرات ریز در اثر فرسایش می‌باشد. تحقیق حاضر با هدف بررسی فرآیندها و مکانیسم‌های انتقال ذرات ناشی از فرسایش ورقه‌ای بر روی دو خاک (زراعی و ماسه‌ای) با توزیع اندازه ذرات متفاوت و با استفاده از فلوم آزمایشگاهی اجرا شد. آزمایش‌ها از طریق ایجاد ترکیب‌های مختلف شیب (۱/۵ و دو درصد) و دبی جریان (۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵ و ۲۰۰ میلی‌لیتر در ثانیه) انجام شد. نتایج نشان داد که شرایط هیدرولیکی جریان و هم‌چنین خاک، نقش مهمی در انتقال انتخابی ذرات رسوب ایفا می‌کند، به نحوی که در خاک زراعی، دو نقطه پیک در توزیع اندازه ذرات رسوب مشاهده شد. در پیک اول (ذرات ریز با اندازه ۰/۰۴۲ میلی‌متر)، مکانیسم غالب حمل ذرات، بار معلق-جهشی بود و در پیک دوم (ذرات درشت با قطر ۱/۵ میلی‌متر)، مکانیسم حمل بار بستر غالب بود. از سویی، با افزایش قدرت جریان ناشی از افزایش شیب و یا شدت جریان، شرایط به تدریج از حالت انتخابی برای ذرات ریز خارج شد و ذرات ریز و ذرات درشت هر دو منتقل شدند. در خاک ماسه‌ای، تنها یک پیک برای ذرات با دامنه اندازه ۰/۱۰۹ تا ۰/۱۷۵ میلی‌متر مشاهده شد. در این خاک، مکانیسم حمل به صورت جهشی، بیش‌ترین نقش را در انتقال ذرات رسوب داشت. به علاوه، در طبقه‌های اندازه کوچک‌تر از ۰/۰۱۵ میلی‌متر با افزایش شدت جریان، درصد ذرات ریز در رسوب کاهش نشان داد. در مقابل، با افزایش شدت جریان، درصد ذرات در طبقه‌های اندازه بزرگ‌تر از ۰/۲۱۸ میلی‌متر افزایش یافت. با افزایش قدرت جریان در هر دو خاک، اهمیت نسبی انتقال به صورت بار معلق و بار بستر به ترتیب کاهش و افزایش پیدا کرد. یافته‌های این تحقیق نشان داد که توزیع اندازه ذرات رسوب و در نتیجه مکانیسم حمل ذرات، به شرایط هیدرولیکی جریان نظیر شیب و شدت جریان و در نتیجه قدرت جریان بستگی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** توزیع اندازه رسوب، رواناب، شبیه‌سازی، فرسایش خاک، قدرت جریان

## مقدمه

از میان جنبه‌های مختلف تخریب اراضی، فرسایش خاک تهدیدی جدی برای حفاظت منابع خاک و آب کشور می‌باشد. طبق تخمین سازمان خواروبار جهانی، هر سال بیش از ۷۵ میلیارد تن خاک از سطح کره زمین فرسایش می‌یابد که این رقم تقریباً معادل ۵۰۰ تن در کیلومتر مربع می‌باشد. مسأله تخریب خاک در حدود یک سوم از سطح خشکی‌های زمین را تحت تأثیر قرار داده است (رفاهی، ۱۳۸۵). در مقیاس حوزه آبخیز، عامل رواناب اهمیت بیش‌تری

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول mahmoodabadi@mail.uk.ac.ir

نسبت به باران در فرسایش و تولید رسوب دارد. با این روی کرد، رواناب سطحی و فرسایش خاک، تهدیدهای اصلی برای کشاورزی پایدار بوده و از این رو، توجه ویژه سازمان‌های ملی و بین‌المللی را به دنبال داشته است (Le Bissonnais و همکاران، ۲۰۰۱). کاهش میزان و شدت رواناب و رسوب در هر حوزه آبخیز، یکی از مباحث مهم در مدیریت منابع طبیعی از نظر آبخیزداری و حفاظت خاک است. با توجه به این که فرسایش، تولید رواناب و رسوب از جمله پدیده‌های پیچیده طبیعی محسوب می‌شود لذا، شناخت عوامل موثر در آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است (احمدی و همکاران، ۱۳۸۶).

یکی از انواع مهم فرسایش در اراضی کشاورزی و البته حوزه آبخیز، فرسایش ورقه‌ای است (Merritt و همکاران، ۲۰۰۳). این نوع فرسایش که در سطح خاک رخ می‌دهد، یک تهدید جدی برای بسیاری از کشورها به ویژه کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود (Descroix و همکاران، ۲۰۰۸). کاهش حاصل‌خیزی خاک به دلیل هدررفت مواد آلی و عناصر غذایی قابل دست‌رس گیاه، از بین رفتن بذر یا گیاهان جوان، کاهش توانایی خاک در ذخیره آب، آسیب به محصولات کشاورزی و مراتع، کاهش کیفیت آب، رسوب‌گذاری در بستر رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مخازن سدها از تبعات این نوع فرسایش می‌باشد. همچنین، فرسایش ورقه‌ای منجر به آلودگی آب و خاک در اراضی پایین دست شده و در نتیجه افت کیفیت منابع آب حوزه آبخیز را به دنبال دارد (Aba Idah و همکاران، ۲۰۰۸). تشخیص این فرسایش در حوزه‌های آبخیز بسیار دشوار بوده و عمدتاً از طریق تلفات خاک سطحی، تغییر رنگ در سطح و گاهی تجمع رسوبات در پشت موانع نظیر مهار کننده‌های چوبی امکان می‌پذیرد (رفاهی، ۱۳۸۵).

از دیدگاه فرآیندی، فرسایش ورقه‌ای در اثر جریان رواناب سطحی کم‌عمق و انتقال ذرات حساس خاک رخ می‌دهد (Dlamini و همکاران، ۲۰۱۰). جریان‌های سطحی کم‌عمق، ذرات خاک را از سطح تخلیه نموده و این مواد با توجه به اندازه، چگالی، شکل و شرایط حاکم بر جریان به شکل‌های مختلف به سمت پایین دست منتقل می‌شوند (Kinnell، ۲۰۰۶). هم‌زمان با جریان رواناب حاوی رسوب به سمت پایین دست، سطح خاک از طریق شسته شدن ورقه‌های پی‌درپی، فرسایش می‌یابد. با توجه به قدرت کم جریان، بیش‌تر ذرات فرسایش یافته در این نوع فرسایش، ریز هستند (Descroix و همکاران، ۲۰۰۸).

عوامل متعددی بر شدت فرسایش ورقه‌ای تأثیر می‌گذارند. به‌طور کلی، این نوع فرسایش تحت تأثیر خصوصیات باران، شرایط توپوگرافی، ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی قرار می‌گیرد (Chaplot و Le Bissonnais، ۲۰۰۳؛ Dlamini و همکاران، ۲۰۱۰). از خصوصیات خاک که فرسایش ورقه‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد، می‌توان به ساختمان، بافت خاک، کانی‌شناسی رس و میزان مواد آلی اشاره کرد. عوامل یاد شده از طریق تأثیر بر توزیع نیروهای فرساینده و همچنین نفوذپذیری خاک، بر قابلیت جدا شدن ذرات تأثیر می‌گذارند (Dlamini و همکاران، ۲۰۱۰). علاوه بر این، عوامل مؤثر بر هیدرولیک جریان نیز حائز اهمیت است. شیب، شدت جریان، سرعت رواناب و عمق جریان متغیرهای هیدرولیکی مهمی هستند که جدا شدن و انتقال رسوب را در جریان ورقه‌ای کنترل می‌کنند (Gimenez و Govers، ۲۰۰۲). عامل شیب از جمله عوامل مهمی است که فرسایش خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Pimentel و kounang، ۱۹۹۸؛ Fu و همکاران، ۲۰۱۱). به‌طور کلی، در شیب‌های تندتر به دلیل افزایش سرعت رواناب، تلفات خاک نیز بیش‌تر است (Gabriels، ۱۹۹۹).

در زمینه فرسایش ورقه‌ای، نتایج مختلفی توسط محققان گزارش شده است. یافته‌های پژوهش‌های Zhang و همکاران (۲۰۰۲ و ۲۰۰۳) نشان داد که با افزایش شیب و شدت جریان، شدت جدا شدن ذرات به وسیله جریان سطحی افزایش می‌یابد. با افزایش شیب نیروی برشی وارد شده به وسیله سرعت جریان افزایش می‌یابد، در حالی که عمق رواناب کاهش می‌یابد (Shi و همکاران، ۲۰۱۲). این عوامل از طریق افزایش شدت جدا شدن ذرات خاک و یا محدود نمودن اثر حفاظتی لایه نازک رسوب، شدت فرسایش را افزایش می‌دهد (Fox و Bryan، ۱۹۹۹؛ Shi و همکاران، ۲۰۱۲). نتایج بررسی‌های Kinnell (۲۰۰۰) نشان داد که با افزایش شیب به خصوص در مقادیر بیش از ۱۰ درصد، غلظت رسوب افزایش چشم‌گیری می‌یابد. Shi و همکاران (۲۰۱۲) نیز گزارش نمودند که غلظت رسوب، به شدت وابسته به شیب بوده، به نحوی که میانگین غلظت رسوب در شیب‌های تندتر، بیش‌تر است.

انتقال ذرات رسوب می‌تواند به بار معلق، بار جهشی و بار بستر تقسیم شود که هر یک به‌طور معمول دامنه‌ای از اندازه ذرات را در بر می‌گیرد (Moss و همکاران، ۱۹۷۹). از سویی، فرسایش خاک فرآیندی دینامیک است که دارای تغییرات زمانی زیادی است (محمودآبادی و روحی‌پور، ۱۳۹۰). پژوهش‌های گذشته نشان داده که در فرسایش ناشی از رواناب سطحی، تغییرات دینامیکی در توزیع اندازه ذرات رسوب وجود دارد (Hogarth و همکاران، ۲۰۰۴؛ Shi و همکاران، ۲۰۱۲). به‌طور کلی، توزیع اندازه ذرات رسوب متأثر از عواملی نظیر توزیع اندازه ذرات خاک اصلی، میزان و نحوه خرد شدن خاک‌دانه‌ها در حین فرسایش، سرعت ته‌نشینی ذرات در اندازه‌های مختلف و انتقال انتخابی ذرات با اندازه‌های مختلف می‌باشد (Rose و همکاران، ۲۰۰۷؛ محمودآبادی و روحی‌پور، ۱۳۹۰؛ Asadi و همکاران، ۲۰۱۱). این در حالی است که توزیع اندازه ذرات، ارتباط نزدیکی با فرآیندهای انتقال و ته‌نشینی ذرات رسوب دارد (Shi و همکاران، ۲۰۱۲). این موضوع در انتقال عناصر غذایی و آلاینده‌ها و همچنین لای‌گیری بندها و سدها در اراضی کشاورزی و حوزه‌های آبخیز اهمیت زیادی دارد. از این‌رو، شناخت بهتر دینامیک توزیع اندازه ذرات رسوب درک فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری را بهبود بخشیده و در نتیجه باعث توسعه مدل‌های فرسایش می‌شود. همچنین، می‌تواند پایه‌ای برای مدل‌سازی دقیق‌تر انتقال عناصر غذایی و آلاینده‌ها باشد (Pimentel، ۲۰۰۶؛ Tromp-van Meerveld و همکاران، ۲۰۰۸). بر این اساس و با توجه به اهمیت فرسایش ورقه‌ای در کاهش کیفیت خاک، تحقیق حاضر به بررسی توزیع اندازه ذرات رسوب ناشی از فرسایش ورقه‌ای و همچنین تأثیر شیب و شدت جریان بر این توزیع با استفاده از آزمایش فلوم می‌پردازد.

## مواد و روش‌ها

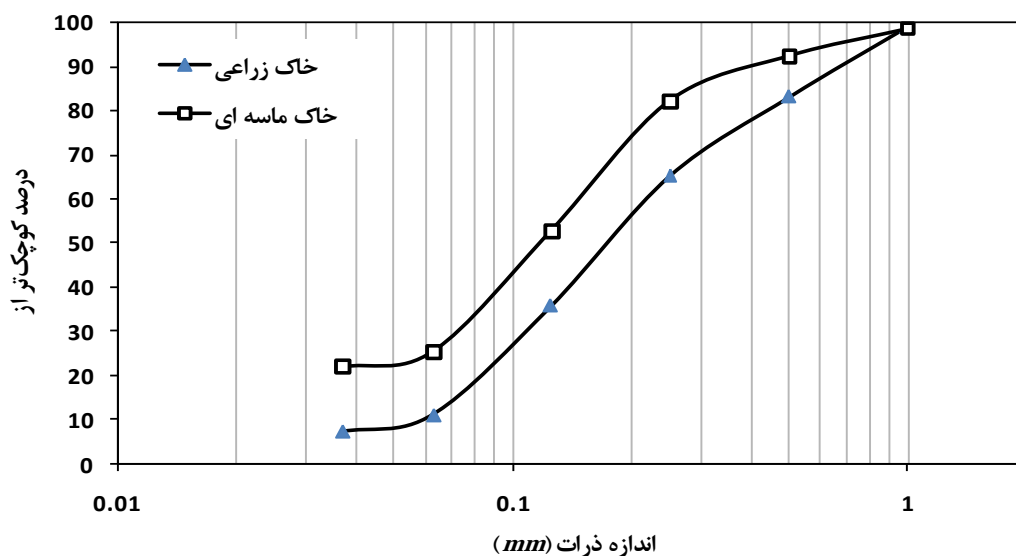
**نمونه‌برداری و آنالیز ویژگی‌های خاک:** با توجه به هدف تحقیق، دو نمونه خاک با توزیع اندازه ذرات متفاوت یکی از اراضی ماسه‌ای و دیگری از اراضی زراعی واقع در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان تهیه شد که از این پس به ترتیب با اسامی خاک ماسه‌ای و خاک زراعی از آن‌ها نام برده می‌شود. پس از هوا خشک کردن، نمونه‌های خاک از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و سپس بخشی از آن‌ها برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی و بخشی برای انجام آزمایش‌های فلوم مورد استفاده قرار گرفت. ویژگی‌های فیزیکی از جمله بافت به‌روش هیدرومتری و توزیع اندازه ذرات ثانویه با استفاده از شیکر و سری الک در حالت تر اندازه‌گیری شد (Page و همکاران، ۱۹۹۲). همچنین، ویژگی‌های شیمیایی از جمله اندازه‌گیری غلظت کاتیون‌های محلول با استفاده از عصاره‌گیر آب مقطر و قرائت غلظت سدیم و پتاسیم به‌وسیله فلم‌فوتومتر و کلسیم و منیزیم با استفاده از تیتراسیون انجام شد. میزان pH گل اشباع با دستگاه pHسنج، EC عصاره اشباع با استفاده از ECسنج، کربن آلی به‌روش Walkley و Black (۱۹۳۴)، آهک به‌روش تیتراسیون، کلر از طریق تیتراسیون با نیترات نقره و همچنین کربنات و بی‌کربنات اندازه‌گیری شد (Pansu و Gautheyrou، ۲۰۰۶).

**انجام آزمایش‌های فلوم:** به‌منظور شبیه‌سازی فرسایش ورقه‌ای از یک دستگاه فلوم شیب‌پذیر متعلق به آزمایشگاه فرسایش و رسوب دانشگاه شهید باهنر کرمان استفاده شد. این فلوم دارای طول و عرض دو در نیم متر بوده که برای اشباع نمودن نمونه‌ها از زیر، در کف آن سیستم زهکش از نوع صفحه مشبک تعبیه شده است. با استفاده از این فلوم می‌توان شیب و شدت‌های مختلف جریان را شبیه‌سازی نمود. برای شبیه‌سازی فرسایش ورقه‌ای و جلوگیری از ایجاد شیار، ابعاد سطح آزمایش به‌روش آزمون و خطا، به یک در ۰/۲ متر کاهش داده شد. در هر آزمایش پس از انتقال نمونه خاک به داخل فلوم، سطح خاک تسطیح شده و سپس به آرامی از زیر اشباع‌سازی صورت می‌گرفت. پس از اشباع کامل به‌مدت ۲۴ ساعت، آب زهکش تخلیه و با تنظیم شیب، بلافاصله آزمایش شروع شد. برای ایجاد جریان ورقه‌ای، آزمایش‌ها به‌صورت ترکیب دو شیب (۱/۵ و دو درصد) و شش دبی (۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵ و ۲۰۰ میلی‌لیتر در ثانیه) روی هر خاک انجام شد.

پس از تنظیم و تثبیت شیب و جریان رواناب، قدرت جریان‌های مختلف به سطح خاک وارد شد. در زمان‌های معین از رواناب حاوی رسوب خروجی، نمونه‌برداری صورت گرفت. مدت هر آزمایش تا رسیدن به شرایط پایدار و پیش از متمرکز شدن جریان و ایجاد شیار، بین ۲۰ تا ۴۰ دقیقه متغیر بود. پس از خشک کردن نمونه‌های رواناب حاوی رسوب در آن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، رسوب خشک شده توزین شد. بر این اساس، شدت رواناب خروجی و هم‌چنین غلظت و بار رسوب تعیین شد. علاوه بر این، در تمام آزمایش‌ها یک نمونه رواناب از دقیقه یک تا پنج برای تعیین توزیع اندازه ذرات رسوب تهیه شد. برای تعیین توزیع اندازه ذرات رسوب، از روش الک تر و الک‌های با چشمه یک، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵، ۰/۰۶۳ و ۰/۰۳۷ میلی‌متر استفاده شد. با استفاده از داده‌های الک تر مربوط به دو نمونه خاک مورد مطالعه، هر خاک به ۱۰ دامنه از اندازه ذرات با درصد جزء یک‌سان (۱۰ درصد) تقسیم شد. سپس، با استفاده از مرزهای به دست آمده برای هر نمونه خاک، درصد جزء برای نمونه رسوب خروجی در آن دامنه از اندازه ذرات تعیین شد (Hogarth و همکاران، ۲۰۰۴).

## نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. خاک ماسه‌ای دارای بافت لوم رسی شنی و بافت خاک زراعی لوم رسی می‌باشد. میزان کربن آلی خاک زراعی بیش‌تر از خاک ماسه‌ای است. هدایت الکتریکی در خاک ماسه‌ای بیش‌تر از خاک زراعی و البته در هر دو بیش از چهار می‌باشد. مقدار کربنات کلسیم معادل در هر دو خاک، قابل توجه و بیش از ۱۵ درصد است. از بین کاتیون‌های محلول کلسیم بیش‌ترین و پتاسیم کم‌ترین مقدار را در هر دو خاک به خود اختصاص دادند. هم‌چنین، غلظت کلر و بی‌کربنات خاک ماسه‌ای بیش‌تر از خاک زراعی است. شکل ۱ توزیع اندازه ذرات ثانویه در حالت تر را برای دو خاک نشان می‌دهد. توزیع اندازه ذرات در هر دو خاک دارای روند تقریباً مشابهی بود با این تفاوت که خاک زراعی به دلیل فرآیند خاک‌دانه‌سازی، ذرات درشت‌تری داشت.



شکل ۱- توزیع اندازه ذرات ثانویه در حالت تر برای خاک‌های زراعی و ماسه‌ای

**تأثیر شدت جریان بر توزیع اندازه ذرات رسوب:** شکل ۲ درصد جزء ۱۰ طبقه اندازه رسوب خروجی حاصل از فرسایش ورقه‌ای در خاک زراعی را برای تمام شدت جریان‌ها در دو شیب ۱/۵ درصد (شکل ۲، الف) و دو درصد (شکل ۲، ب) نشان می‌دهد. در شکل‌های ۲ تا ۵، میانگین اندازه هر طبقه اندازه در محور افقی و درصد جزء هر طبقه روی محور عمودی نشان داده شده است. هم‌چنین، درصد جزء هر ۱۰ طبقه اندازه برای خاک اصلی (فرسایش نیافته) برابر با ۱۰ درصد می‌باشد. بر این اساس می‌توان عنوان داشت که درصد جزء رسوب بالای ۱۰ درصد برای هر طبقه

اندازه، به صورت انتخابی حمل شده است (Asadi و همکاران، ۲۰۱۱). همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود، در تمام شدت جریان ها و در هر دو شیب، درصد ذرات در ریزترین طبقه اندازه یعنی ۰/۰۴۲ میلی متر، حداکثر و بیش تر از ۱۰ درصد می باشد. به عبارتی، ذرات رسوب در این طبقه اندازه به صورت انتخابی حمل شده است. هم چنین، در هر دو شیب، سهم این طبقه اندازه در رسوب خروجی در شدت جریان ۷۵ میلی لیتر در ثانیه در مقایسه با سایر شدت جریان ها بیش تر می باشد. از سویی، در دو شیب ۱/۵ و دو درصد، به ترتیب بیش از ۵۰ و ۴۰ درصد از رسوب خروجی را این اندازه طبقه تشکیل می دهد. به تدریج با افزایش شدت جریان و در نتیجه افزایش قدرت جریان، درصد مربوط به این طبقه اندازه در رسوب خروجی کاهش می یابد. در مقابل با افزایش قدرت جریان، سهم بزرگ ترین طبقه اندازه (۱/۵ میلی متر) به تدریج افزایش پیدا کرده به نحوی که، در دو شیب ۱/۵ و دو درصد فلولم، به ترتیب برای شدت جریان های بیش تر از ۱۵۰ و ۱۲۵ میلی لیتر در ثانیه، سهم این طبقه ذرات بیش از ۱۰ درصد می شود.

جدول ۱- برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد مطالعه در آزمایش های فلولم

ویژگی	واحد	خاک ماسه ای	خاک زراعی
رس	درصد	۲۴	۳۴/۴
سیلت	درصد	۴/۳۶	۳۲
شن	درصد	۷۱/۶	۳۳/۶
کربن آلی	درصد	۰/۲۷	۰/۸۲
کربنات کلسیم معادل	درصد	۱۹	۲۱
هدایت الکتریکی	دسی زیمنس بر متر	۴/۴۵	۴/۱۹
pH	-	۸/۳۴	۸/۴۵
سدیم	میلی اکی والان بر لیتر	۱/۳	۲/۴
پتاسیم	میلی اکی والان بر لیتر	۰/۱۹	۰/۲۴
کلسیم	میلی اکی والان بر لیتر	۲۰	۱۴
منیزیم	میلی اکی والان بر لیتر	۱۶	۲/۵
کلر	میلی اکی والان بر لیتر	۴۸	۲۶
کربنات	میلی اکی والان بر لیتر	-	-
بی کربنات	میلی اکی والان بر لیتر	۱۰	۵

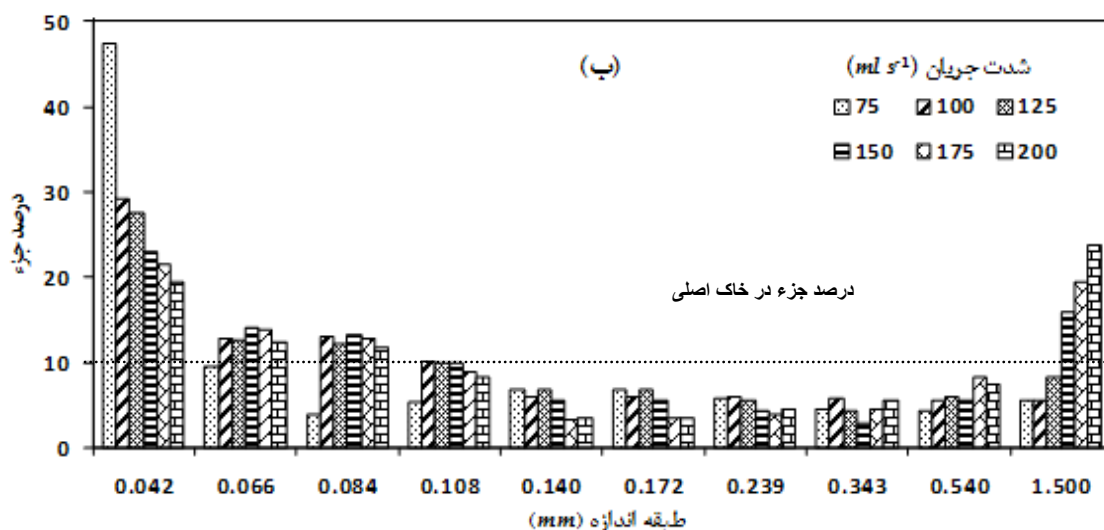
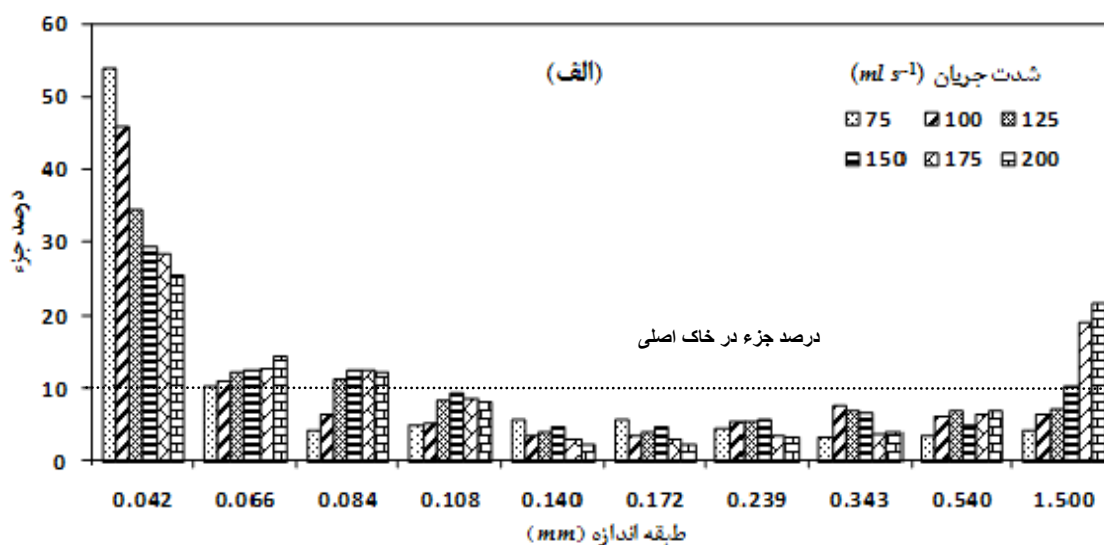
توزیع اندازه ذرات رسوب در خاک زراعی دو پیک دارد. این یافته با نتایج Asadi و همکاران (۲۰۱۱) هم خوانی دارد که دریافتند، در قدرت جریان های کم، اندازه ذرات رسوب دارای توزیعی به شکل دو پیکی می باشد که در یک پیک، ذرات با دامنه اندازه ریز و در پیک دیگر، ذرات با اندازه بزرگ غالب می باشد. این محققان گزارش کردند که در پیک اول که ناشی از ذرات ریز می باشد، مکانیزم غالب حمل ذرات، بار معلق-جهشی<sup>۱</sup> (SS) است و در پیک دوم که ناشی از حمل ذرات درشت تر می باشد، مکانیزم حمل بار بستر<sup>۲</sup> (BL) غالب است. Cummings (۱۹۸۱) عنوان داشت که ذرات با اندازه کوچک تر از ۰/۰۳۱ میلی متر غالباً به صورت بار معلق، ذرات با اندازه بین ۰/۰۳۱ و ۰/۲۱۱ میلی متر از طریق حرکت جهشی و ذرات با اندازه بزرگ تر از ۰/۲۱۱ میلی متر به صورت بار بستر حرکت می کنند. این موضوع نشان می دهد که در شدت جریان و شیب کم که قدرت جریان نیز کم تر است، ذرات ریز به صورت انتخابی حمل می شوند. با افزایش قدرت جریان ناشی از افزایش شیب و یا شدت جریان رواناب، شرایط به تدریج از حالت انتخابی برای ذرات ریز خارج شده و در نتیجه هم ذرات ریز و هم ذرات درشت می توانند حمل شوند. به طور مشابهی، Shi و همکاران (۲۰۱۲)

<sup>1</sup> Suspension-Saltation

<sup>2</sup> Bed load

عنوان داشتند که اهمیت نسبی SS با افزایش قدرت جریان کاهش می‌یابد در حالی که، اهمیت نسبی BL در قدرت جریان‌های بیش‌تر افزایش پیدا می‌کند.

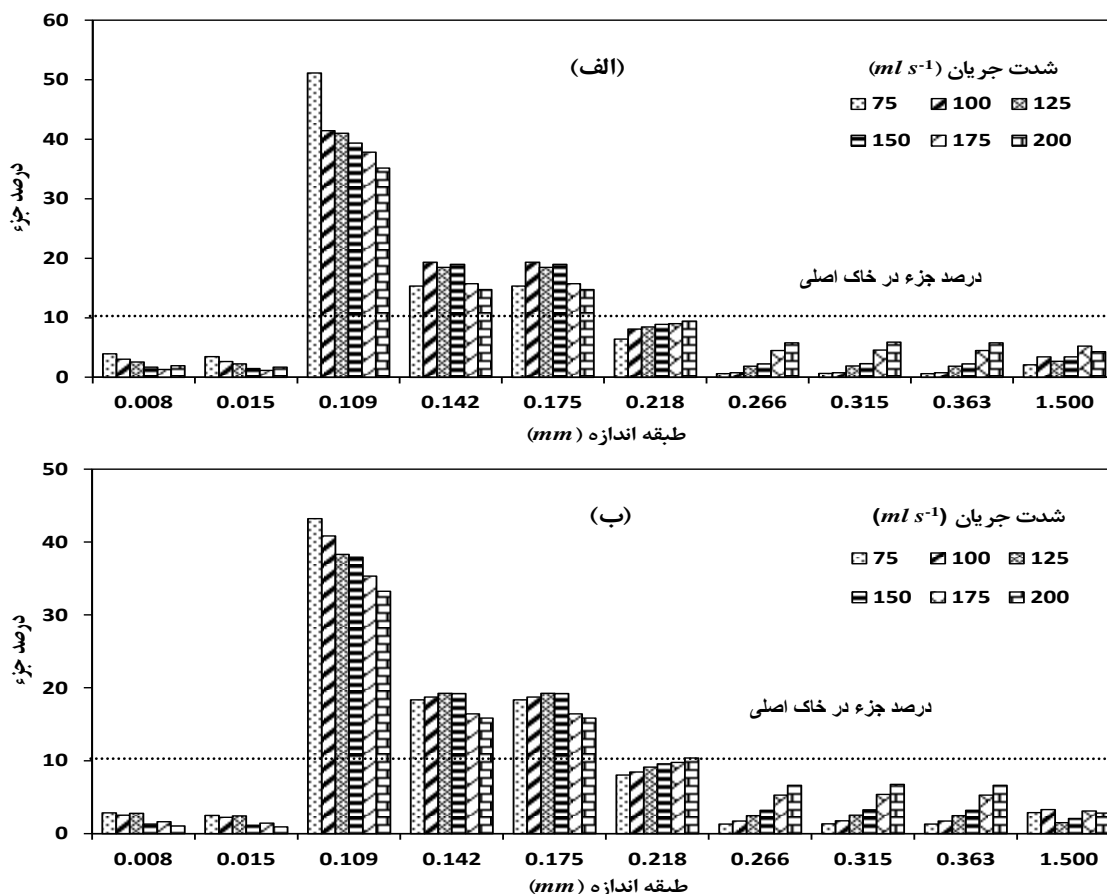
هم‌چنین، در خاک زراعی دامنه اندازه بین ۰/۱۴ تا ۰/۵۴ میلی‌متر، کم‌ترین درصد را به‌خود اختصاص داده است. در این خاک ذرات ریزتر از این دامنه، با مکانیسم SS حمل شده در حالی که درصد ذرات بزرگ‌تر از این دامنه، به‌تدریج در رسوب افزایش یافته، به‌نحوی که مکانیزم حمل BL غالب می‌شود. Asadi و همکاران (۲۰۱۱) دامنه ۰/۱۸-۰/۳۸ میلی‌متر را برای خاک شنی رودخانه‌ای و ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر را برای خاک جنگلی و هم‌چنین Shi و همکاران (۲۰۱۲) دامنه ۰/۰۵۴-۰/۱۵۲ میلی‌متر را برای خاک لوم رسی، به‌عنوان مرز بین این دو مکانیسم حمل گزارش کرده‌اند.



شکل ۲- درصد جزء ۱۰ طبقه اندازه رسوب در شدت‌های مختلف جریان در مقایسه با خاک زراعی در دو شیب (الف) ۱/۵ و (ب) دو درصد

شکل ۳، درصد جزء ۱۰ طبقه اندازه را در رسوب خروجی برای خاک ماسه‌ای در تمام شدت جریان‌ها در دو شیب ۱/۵ (شکل ۳، الف) و دو درصد (شکل ۳، ب) نشان می‌دهد. در هر دو شیب و برای تمام شدت جریان‌ها، سه طبقه اندازه ۰/۱۰۹، ۰/۱۴۲ و ۰/۱۷۵ میلی‌متر بیش‌تر از سایر طبقه‌های اندازه، در رسوب وجود داشته که به‌صورت انتخابی حمل شده‌اند. این دامنه از اندازه ذرات، در محدوده حساس‌ترین ذرات در فرسایش آبی یعنی دو تا ۲۰۰ میکرومتر

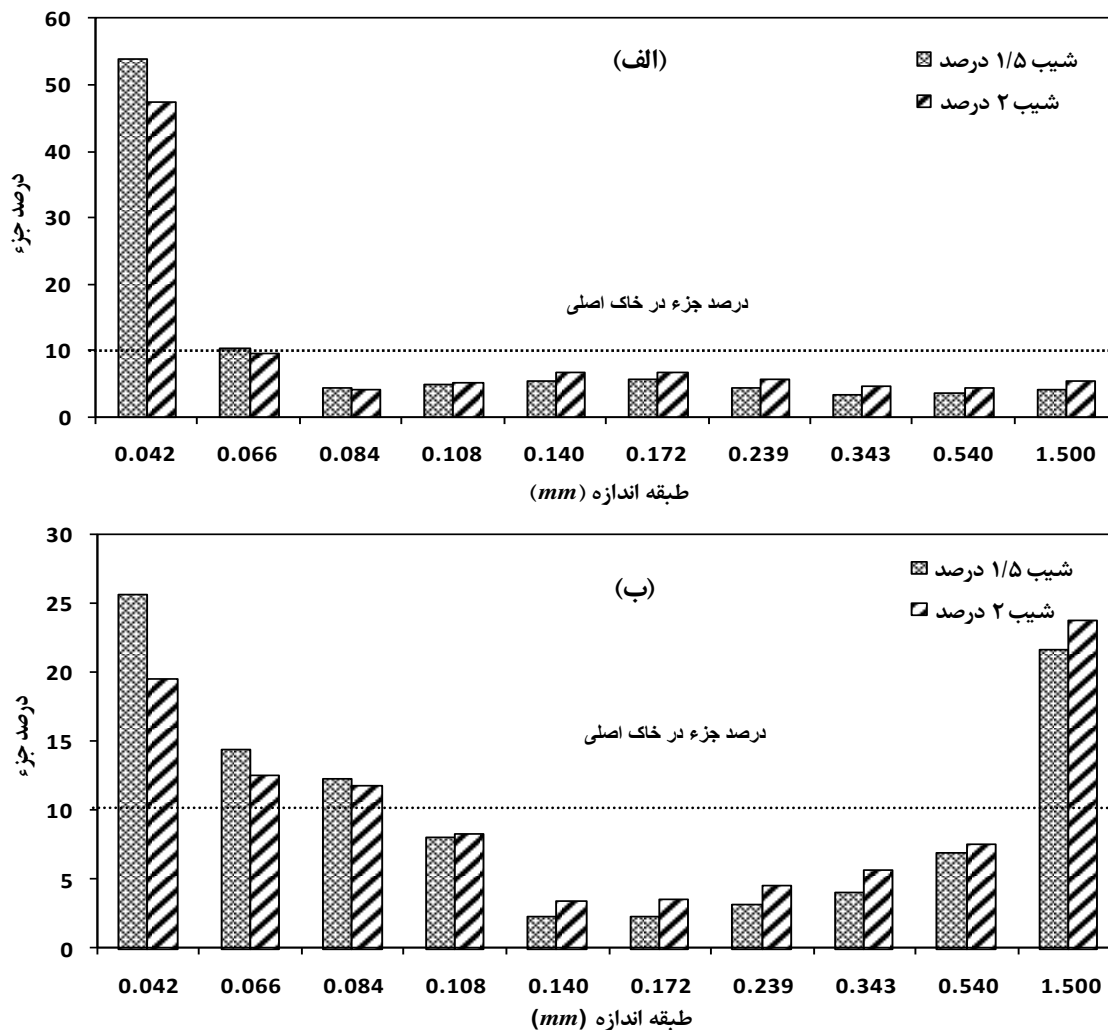
(رفاهی، ۱۳۸۵) قرار دارد که مقاومت آن‌ها هم از نظر چسبندگی و هم از نظر اندازه کم می‌باشد. از سویی، درصد طبقه‌های اندازه کوچک‌تر و بزرگ‌تر از این اندازه‌ها در رسوب خروجی بسیار کم‌تر است. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که در طبقه‌های اندازه ۰/۰۰۸ و ۰/۰۱۵ میلی‌متر، با افزایش شدت جریان، درصد ذرات ریز در رسوب کاهش یافته است. در مقابل با افزایش شدت جریان، درصد ذرات در طبقه‌های اندازه بزرگ‌تر از ۰/۲۱۸ میلی‌متر افزایش می‌یابد. به عبارتی، با افزایش شدت جریان در یک شیب مشخص، اهمیت نسبی انتقال به صورت بار معلق و بار بستر به ترتیب کاهش و افزایش یافته است. با توجه به این نتایج می‌توان چنین عنوان داشت که در این خاک، مکانیزم بار جهشی بیش‌ترین نقش را در انتقال ذرات داشته است.



شکل ۳- درصد جزء ۱۰ طبقه اندازه رسوب در شدت‌های مختلف جریان در مقایسه با خاک ماسه‌ای در دو شیب (الف) ۱/۵ و (ب) دو درصد.

**تأثیر شیب بر توزیع اندازه ذرات رسوب:** شکل ۴ توزیع اندازه ذرات رسوب را در ۱۰ طبقه اندازه در دو شیب ۱/۵ و دو درصد برای خاک زراعی برای دو شدت جریان ۷۵ و ۲۰۰ میلی‌لیتر در ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شدت جریان ۷۵ میلی‌لیتر در ثانیه (شکل ۴، الف) توزیع اندازه ذرات رسوب، دارای یک پیک در طبقه اندازه ۰/۰۴۲ میلی‌متر می‌باشد، در حالی که در شدت جریان ۲۰۰ میلی‌لیتر در ثانیه (شکل ۴، ب) توزیع اندازه ذرات رسوب دو پیک دارد. پیک اول مربوط به ذرات ریز در طبقه‌های اندازه ۰/۰۸۴، ۰/۰۶۶ و ۰/۰۴۲ میلی‌متر و پیک دوم مربوط به ذرات درشت در طبقه اندازه ۱/۵ میلی‌متر است. به عبارتی، در قدرت جریان کم‌تر، ذرات ریز به صورت انتخابی فرسایش یافته حال آن‌که با افزایش قدرت جریان، علاوه بر ذرات ریز ذرات درشت نیز در رسوب غالب شده است.

از سویی در هر دو شدت جریان، درصد ذرات در طبقه‌های ریزتر از  $0/084$  میلی‌متر در شیب  $1/5$  درصد بیش‌تر از شیب دو درصد بوده و در مقابل درصد ذرات در طبقه‌های درشت‌تر از  $0/108$  میلی‌متر، در شیب دو درصد بیش‌تر از شیب  $1/5$  درصد بوده است. این نتیجه به‌خوبی نشان می‌دهد که در شدت جریان یک‌سان، در شیب ملایم‌تر به‌دلیل قدرت جریان به‌نسبت کم‌تر، شرایط انتخابی حاکم بوده و بیش‌تر ذرات ریز حمل می‌شوند. با افزایش شیب و در نتیجه افزایش قدرت جریان، جریان قادر به حمل ذرات درشت‌تر می‌شود و به‌این ترتیب از درصد ذرات ریز کاسته می‌شود و فراوانی ذرات درشت در رسوب افزایش می‌یابد که البته این وضعیت در شدت جریان بیش‌تر ( $200$  میلی‌لیتر در ثانیه) با وضوح بیش‌تری مشاهده می‌شود. این یافته بیان‌گر آن است که توزیع اندازه ذرات رسوب و در نتیجه مکانیزم حمل ذرات، به‌شرایط هیدرولیکی جریان نظیر شیب و شدت جریان و در نتیجه قدرت جریان بستگی دارد.



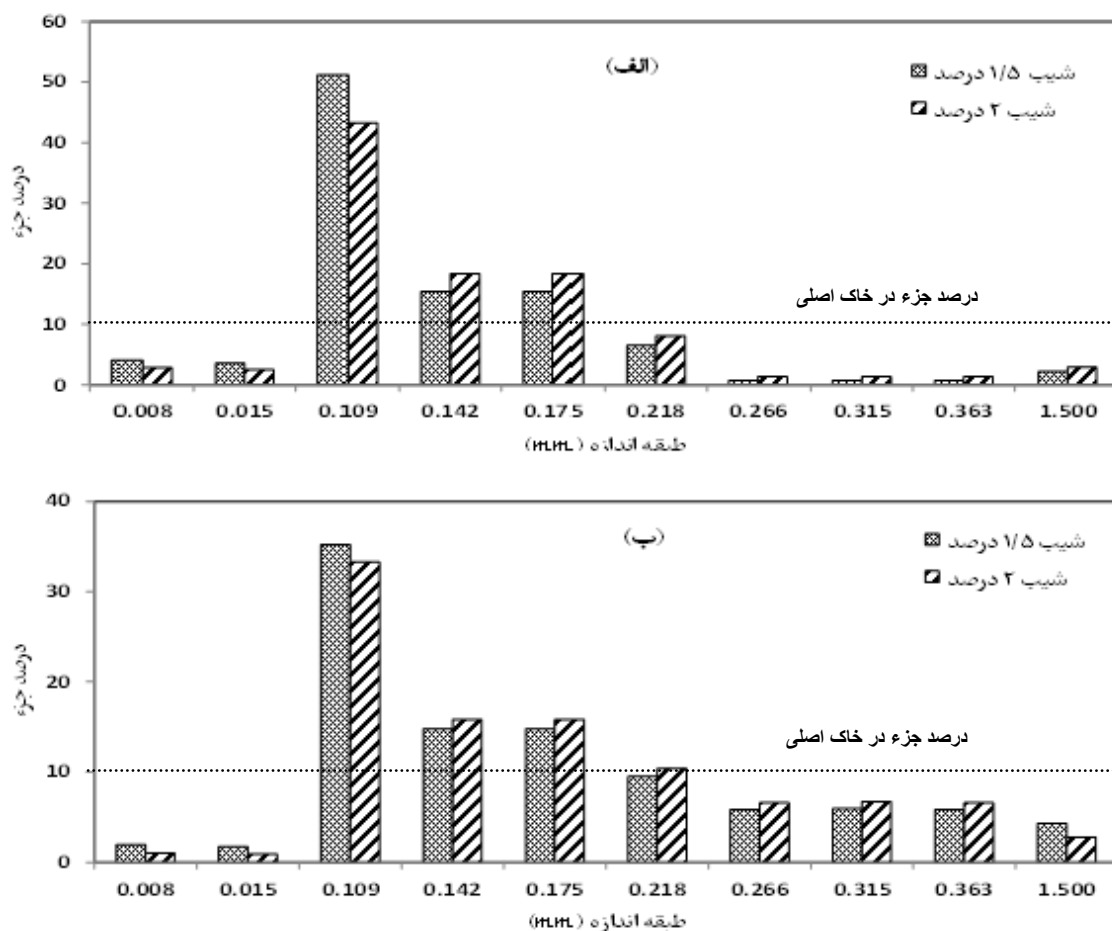
شکل ۴- درصد جزء ۱۰ طبقه اندازه رسوب در مقایسه با خاک زراعی در دو شدت جریان (الف) ۷۵ و (ب) ۲۰۰ میلی‌لیتر در ثانیه

شکل ۵، توزیع اندازه ذرات رسوب را در  $10$  طبقه اندازه در دو شیب  $1/5$  و دو درصد برای خاک ماسه‌ای برای دو شدت جریان  $75$  و  $200$  میلی‌لیتر در ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو شدت جریان، درصد ذرات در سه طبقه اندازه  $0/109$ ،  $0/142$  و  $0/175$  میلی‌متر بیش‌تر از  $10$  درصد بوده که این موضوع دلالت بر انتخابی بودن انتقال این ذرات دارد. هم‌چنین، درصد ذرات در این سه طبقه اندازه در شدت جریان  $75$  میلی‌لیتر در ثانیه، بیش‌تر از شدت جریان  $200$  میلی‌لیتر در ثانیه است. به‌علاوه، درصد ذرات رسوب در طبقه‌های اندازه بزرگ‌تر از  $0/218$  میلی‌متر در شدت جریان  $200$  میلی‌لیتر در ثانیه نسبت به‌شدت جریان  $75$  میلی‌لیتر در ثانیه، بیش‌تر است. این به آن معنی است که در این شرایط با افزایش قدرت جریان، امکان حمل ذرات درشت، افزایش یافته است.



بررسی توزیع اندازه ذرات رسوب ناشی از فرسایش ورقه‌ای در دو خاک مختلف نشان داد که در خاک زراعی، توزیع اندازه ذرات رسوب دارای دو پیک است. در پیک اول که ناشی از انتقال انتخابی ذرات ریز (طبقه اندازه ۰/۰۴۲ میلی‌متر) می‌باشد، مکانیزم غالب حمل ذرات، بار معلق-جهشی بوده و بسته به شیب، بیش از ۴۰ تا ۵۰ درصد ذرات به این صورت منتقل می‌شوند. در پیک دوم که ناشی از انتقال انتخابی ذرات درشت‌تر رسوب (طبقه اندازه ۱/۵ میلی‌متر) است، مکانیزم حمل بار بستر غالب می‌شود. از سویی، با افزایش قدرت جریان ناشی از افزایش شیب و یا شدت جریان رواناب، شرایط به تدریج از حالت انتخابی برای ذرات ریز خارج شده و در نتیجه هم ذرات ریز و هم ذرات درشت می‌توانند حمل شوند.

در خاک ماسه‌ای، درصد ذرات در سه طبقه اندازه ۰/۱۰۹، ۰/۱۴۲ و ۰/۱۷۵ میلی‌متر بیش از ۱۰ درصد بوده و ذرات در این دامنه اندازه، به صورت انتخابی حمل می‌شوند. هم‌چنین، در این خاک، مکانیزم حمل ذرات به صورت جهشی، بیش‌ترین نقش را در انتقال ذرات دارد. به علاوه، درصد ذرات در این سه طبقه اندازه در شدت جریان ۷۵ میلی‌لیتر در ثانیه بیش‌تر از شدت جریان ۲۰۰ میلی‌لیتر در ثانیه است. از سویی، درصد طبقه‌های اندازه کوچک‌تر و بزرگ‌تر از این اندازه‌ها در رسوب خروجی بسیار کم‌تر بود. در طبقه‌های اندازه کوچک‌تر از ۰/۰۱۵ میلی‌متر با افزایش شدت جریان، درصد ذرات ریز در رسوب کاهش نشان می‌دهد. در مقابل با افزایش شدت جریان، درصد ذرات در طبقه‌های اندازه بزرگ‌تر از ۰/۲۱۸ میلی‌متر افزایش می‌یابد. به عبارتی، با افزایش شدت جریان در یک شیب مشخص، اهمیت نسبی انتقال به صورت بار معلق و بار بستر به ترتیب کاهش و افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۵- درصد جزء ۱۰ طبقه اندازه رسوب در مقایسه با خاک ماسه‌ای در دو شدت جریان (الف) ۷۵ و (ب) ۲۰۰ میلی‌لیتر در ثانیه

از منظر دیگر، در خاک زراعی در شدت جریان ۷۵ میلی‌لیتر در ثانیه، توزیع اندازه ذرات رسوب دارای یک پیک در طبقه اندازه ۰/۰۴۲ میلی‌متر می‌باشد، در حالی که در شدت جریان ۲۰۰ میلی‌لیتر در ثانیه دو پیک وجود دارد. پیک اول مربوط به ذرات ریز در طبقه‌های اندازه ۰/۰۸۴، ۰/۰۶۶ و ۰/۰۴۲ میلی‌متر و پیک دوم مربوط به ذرات درشت در طبقه اندازه ۱/۵ میلی‌متر است. از سویی در شدت جریان یک‌سان، در شیب ملایم‌تر به دلیل قدرت جریان کم‌تر، شرایط انتخابی حاکم بوده و بیش‌تر ذرات ریز حمل می‌شوند. با افزایش شیب و در نتیجه افزایش قدرت جریان، جریان قادر به حمل ذرات درشت‌تر نیز می‌شود. به این ترتیب، از درصد ذرات ریز کاسته می‌شود و فراوانی ذرات درشت در رسوب افزایش می‌یابد. یافته‌های این تحقیق نشان داد که توزیع اندازه ذرات رسوب و در نتیجه مکانیزم حمل ذرات، به شرایط هیدرولیکی جریان نظیر شیب و شدت جریان و در نتیجه قدرت جریان بستگی دارد.

### منابع مورد استفاده

۱. احمدی، ح. م.، جعفری، ع.، گلکاریان، ا.، ابریشم، س. و ج. لافلن. ۱۳۸۶. برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از مدل WEPP مطالعه موردی در حوزه آبخیز باراریه نیشابور. پژوهش و سازندگی، ۷۵: ۱۶۱-۱۷۲.
۲. رفاهی، ح. ق. ۱۳۸۵. فرسایش آبی و کنترل آن. انتشارات دانشگاه تهران، ۶۷۱ صفحه.
۳. محمودآبادی، م. و ح. روحی‌پور. ۱۳۹۰. بررسی روند تغییرات برخی شاخص‌های فرسایش‌پذیری و ترسیب با استفاده از شبیه‌ساز باران. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۸(۴): ۱۴۵-۱۶۶.
4. Aba Idah, P., H.I. Mustapha, J.J. Musa and J. Dike. 2008. Determination of erodibility indices of in owerri west local government area of Imo State. Nigeria. A.U. J.T, 12(2): 130-133.
5. Asadi, H., A. Moussavi, H. Ghadiri and C.W. Rose. 2011. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment. Journal of Hydrology, 406: 73-81.
6. Chaplot, V.A.M. and Y. Le Bissonnais. 2003. Runoff Features for interrill erosion at different rainfall intensities, slope lengths, and gradients in an Agricultural Loessial Hillslope. Soil Sci. Soc. Am. J., 67: 844-851.
7. Cummings, D. 1981. Soil erodibility determinations from laboratory rainfall simulation. M. Agric. Sci. Thesis, Univ. Melb. Australia.
8. Descroix, L., J.L. González Barrios, D. Viramontes, J. Poulencard, E. Anaya, M. Esteves, and J. Estrada. 2008. Gully and sheet erosion on subtropical mountain slopes: Their respective roles and the scale effect. Catena, 72: 325-339.
9. Dlamini, P., C. Orchard, G. Jewitt, S. Lorentz, L. Titshall and V. Chaplot. 2010. Controlling factors of sheet erosion under degraded grasslands in the sloping lands of KwaZulu-Natal, South Africa. Agricultural Water Management, 8 p.
10. Fox, D.M.R. and B. Bryan. 1999. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. Catena, 38: 211-222.
11. Fu, S., B. Liu, H. Liu, L. Xu. 2011. The effect of slope on interrill erosion at short slopes. Catena, 84: 29-34.
12. Gabriels, D. 1999. The effect of slope length on the amount and size distribution of eroded silt loam soils: short slope laboratory experiments on interrill erosion. Geomorphology, 28: 169-172.
13. Gimenez, R. and G. Govers. 2002. Flow Detachment by Concentrated Flow on Smooth and Irregular Beds. Soil Sci. Soc. Am. J., 66:1475-1483.
14. Hogarth, W.L., C.W. Rose, J.Y. Parlange, G.C. Sander, and G. Carey. 2004. Soil erosion due to rainfall impact with no inflow: a numerical solution with spatial and temporal effects of sediment settling velocity characteristics. Journal of Hydrology, 294: 229-240.
15. Kinnell, P.I.A. 2000. The Effect of Slope Length on Sediment Concentrations Associated with Side-Slope Erosion. Soil Sci. Soc. Am. J., 64:1004-1008.
16. Kinnell, P.I.A. 2006. Simulations demonstrating interaction between coarse and fine sediment loads in rain-impacted flow. Earth Surface Processes and Landforms, 31: 355-367.
17. Le Bissonnais, Y., C. Montier M. Jamagne J. Daroussin and D. King. 2001. Mapping erosion risk for cultivated soil in France. Catena, 46: 207-220.
18. Merritt, W.S., R.A. Letcher and A.J. Jakeman. 2003. A review of erosion and sediment transport models. Environmental Modelling and Software, 18: 761-799.
19. Moss, A.J., P.H. Walker, J. Hutka. 1979. Raindrop-stimulated transportation in shallow water flows: An experimental study. Sediment Geol., 22: 165-184.
20. Page, A.L., R.H. Miller and D.R. Jeeney. 1992. Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical properties. SSSA Pub., Madison. 1750 p.
21. Pansu, M. and J. Gautheyrou. 2006. Handbook of Soil Analysis, Mineralogical, Organic and Inorganic Methods. Springer. 993 p.

22. Pimentel, D. and N. Kounang. 1998. Ecology of soil erosion in ecosystem. *Ecosystems*, 1: 416-426.
23. Pimentel, P. 2006. Soil erosion: A food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, 8: 119-137.
24. Rose, C.W., B. Yu, H. Ghadiri, H. Asadi, J.Y. Parlange, W.L. Hogarth and J. Hussein. 2007. Dynamic erosion of soil in steady sheet flow. *Journal of Hydrology*, 333, 449-458.
25. Shi, Z.H., N.F. Fang, F.Z. Wu, L. Wang, B.J. Yue and G.L. Wu. 2012. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *Journal of Hydrology*, 454-455:123-130.
26. Tromp-van Meerveld, H.J., J.Y. Parlange, D.A. Barry, M.F. Tromp, G.C. Sander, M.T. Walter, and M.B. Parlange. 2008. Influence of sediment settling velocity on mechanistic soil erosion modeling. *Water Resources Research*, 44.
27. Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.*, 37: 29-38.
28. Zhang, G.H., B.Y. Liu, G.B. Liu, X.W. He and M.A. Nearing. 2003. Detachment of Undisturbed Soil by Shallow Flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67: 713-719.
29. Zhang, G.H., B.Y. Liu, M.A. Nearing, C.H. Huang and K.L. Zhang. 2002. Soil detachment by shallow flow. *Trans. ASAE.*, 45: 351-357.

# Study on sediment transport mechanisms due to sheet erosion using flume experiment

Majid Mahmoodabadi<sup>1</sup>, Assistant Professor, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

Elham Sirjani, MSc Student, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

Received: 29 April 2011

Accepted: 20 November 2011

## Abstract

Soil erosion is a dynamic process with high variability in sediment size distribution. Dynamic recognition of sediment size distribution is as a base for modeling of soil erodibility and movement of nutrients, pollutants and fine particles in consequence of erosion. This study focused on sediment transport mechanisms due to sheet erosion on two different soils (cropland and sandy) using flume experiment. The experiment was performed applying different flume slopes (1.5 and 2 %) and flow rates (75, 100, 125, 150, 175 and 200 ml/s). The result showed that hydraulic condition as well as soil type, played an important role in selective transport of sediment particles so that, in the sediment size distribution of cropland soil two peaks were observed. For the first (fine particles with size of 0.042 mm), the dominant transport mechanism was attributed to suspension- saltation, while for the second peak (large particles with diameter of 1.5 mm), bed load was known as the main transport mechanism. Moreover, increasing stream power, the selectivity of fine particles declined therefore, both fine and large particles were transported by the flow. For sandy soil, only one peak for the range of 0.109 to 0.175 mm was observed. In this soil, saltation was the main mechanism in transporting sediment. Increasing flow rate, the frequency of particles smaller than 0.015 diminished, whereas particles larger than 0.218 mm increased. For both soils at higher stream powers, the relative importance of transport as suspension and bed load decreased and increased, respectively. The findings of this research reveal that sediment size distribution and also transport mechanisms depend on hydraulic condition such as slope and flow rate.

**Key words:** Flume, Particle size distribution, Runoff, Simulation, Soil erosion, Stream power

---

<sup>1</sup> Corresponding author: mahmoodabadi@mail.uk.ac.ir