

تغییرپذیری غلظت و توزیع اندازه موثر ذرات رسوب در مراحل ابتدایی و تکاملی تولید رواناب از شیبها و شدتهای مختلف بارندگی

محبوبه کیانی هرچگانی^۱، سید حمیدرضا صادقی^{۲*} و حسین اسدی^۳

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، مازندران، نور، ^۲ استاد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، مازندران، نور و ^۳ دانشیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۱۶

چکیده

فرسایش آبی خاک دارای فرایندهای مختلف جدایش، ورود به جریان، انتقال و رسوب گذاری است. رسوبات خروجی از حوزه آبخیز ترکیبی از ذرات با اندازه‌های مختلف می‌باشد. توزیع اندازه ذرات در حال انتقال عاملی بسیار تاثیرگذار در فرایند انتقال و رسوب گذاری می‌باشد. حال آن که تغییرپذیری مولفه‌های توزیع اندازه ذرات طی شرایط مختلف جریان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر همین اساس پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرپذیری برخی مولفه‌های توزیع اندازه موثر ذرات رسوب با استفاده از دانه‌بندی لیزری در شرایط جریان ناپایدار ابتدایی و پایدار تکاملی در یک نوع خاک تهیه شده از منطقه کدیر در استان مازندران در مقیاس پلات‌های آزمایشگاهی برنامه‌ریزی شد. به این منظور شبیه‌سازی بارندگی در پلات‌های ۱×۶ متر در شیب‌های پنج، ۱۵ و ۲۵ درصد و در شدتهای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت و در سه تکرار به وسیله شبیه‌ساز باران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق بیانگر تبعیت بیشتر غلظت رسوب از شیب نسبت به شدت بارندگی در شرایط مختلف جریان بود. همچنین، مقایسه مقادیر درصد ذرات کوچک‌تر از دو میکرون و مولفه D_{10} در شیب‌های مختلف بیانگر اختلاف معنی‌دار آن‌ها در شیب پنج درصد در شدت بارندگی ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در سطح اطمینان ۹۵ درصد در شرایط مختلف جریان بود. در صورتی که ذرات بزرگ‌تر از دو میکرون در شرایط جریان ناپایدار و پایدار فقط در شیب پنج درصد در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر بر ساعت اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد داشتند. در همین راستا مولفه D_{50} رفتار بسیار پیچیده‌ای در شیب‌ها و شدت‌های مختلف داشت، ولی مولفه D_{90} از هیچ‌کدام از شیب‌ها و شدت‌ها در مراحل ابتدایی و تکاملی جریان در سطح اطمینان ۹۰ درصد به دلیل عدم توان جریان در انتقال ذرات بزرگ‌تر از ۶۳ میکرون و مخصوصاً مولفه D_{90} تاثیر نپذیرفت.

واژه‌های کلیدی: استان مازندران، پلات فرسایشی، دانه‌بندی لیزری، شبیه‌ساز باران، مدل‌سازی خطی

مقدمه

ذرات خاک به وسیله بارندگی و رواناب از بستر اصلی خود جدا شده و به مکان دیگر حمل می‌شوند. انتقال

فرسایش آبی خاک فرایندی است که طی آن

Yan و همکاران، ۲۰۰۸؛ Shi و همکاران، ۲۰۱۰) و آزمایشگاه (Fox و Bryan، ۱۹۹۹، Assouline و Ben-Hur، ۲۰۰۶؛ Rose و همکاران، ۲۰۰۷؛ Huang و همکاران، ۲۰۱۲؛ Shen و همکاران، ۲۰۱۴) شبیه‌سازی شده است.

در رابطه با مطالعه تغییرپذیری توزیع اندازه ذرات رسوبی در شرایط مختلف، Martinez-Mena و همکاران (۲۰۰۲) در مناطق نیمه‌خشک مدیترانه (جنوب شرقی اسپانیا) مشاهده کردند که شرایط جدایش در شدت‌های بارندگی زیاد و شرایط انتقال در وقایع با شدت متوسط بارندگی رخ می‌دهد که این تفاوت به‌خاطر تغییر در انرژی جنبشی شدت بارندگی بوده و در توزیع اندازه ذرات رسوبی منعکس شده است. همچنین برای وقایع با شدت بالا کاهش اجزاء بزرگ و افزایش اجزاء کوچک مشاهده شد. Parsons و Stone (۲۰۰۶) نیز تاثیر الگوهای شدت بارش بر میزان جدایش رسوبات و توزیع اندازه آن‌ها را موثرتر از بقیه مولفه‌ها دانسته و ذکر کرده‌اند مقدار و توزیع اندازه ذرات رسوبی در رگبار با شدت ثابت متفاوت از شدت‌های مختلف می‌باشد. نتایج همچنین نشان داد که رسوبات منتقل شده در رگبار با شدت ثابت دارای محتوی رس کم‌تری نسبت به رگبارهای با شدت‌های مختلف بوده است.

Armstrong و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی تغییرات توزیع اندازه ذرات رسوب در فرسایش بین‌شیاری اظهار داشتند که تغییرات غلظت رسوبات در شیب‌های بین سه درصد و بیشتر مشهود بود و رسوبات ریز در شیب‌های سه درصد منتقل شدند، اما در شیب‌های بیشتر تفاوت در اندازه ذرات بسیار محدود بود. همچنین Shi و همکاران (۲۰۱۲) به بیان تغییرپذیری توزیع اندازه ذرات طی فرایند فرسایش بین‌شیاری و سپس فرسایش شیاری پرداختند و بیان کردند رسوبات کوچک‌تر از ۵۴ میکرون در فرایند فرسایش بین‌شیاری و ذرات رسوبی بزرگ‌تر از ۱۵۲ میکرون بعد از توسعه فرسایش شیاری و با افزایش شیب منتقل شدند. Shi و Wang (۲۰۱۵) نیز گزارش دادند که با افزایش شیب، ذرات بزرگ‌تر نسبت به ذرات کوچک‌تر بیشتر منتقل شدند که دلیل آن

ذرات رسوبی یا به‌صورت ذرات رسوبی موثر^۱ (خاک‌دانه) یا مطلق^۲ (مواد معدنی اولیه) بوده که متفاوت از هم ارزیابی شده است (Walling و Moorehead، ۲۰۰۴)، اما ذرات رسوبی موثر از اهمیت بیشتری نسبت به ذرات رسوبی مطلق در مطالعات انتقال رسوب برخوردار هستند (Martinez-Mena و همکاران، ۲۰۰۲) و یک عامل تاثیرگذار در فرایند انتقال و رسوب‌گذاری محسوب می‌شوند (Rienzi و همکاران، ۲۰۱۳، Wang و همکاران، ۲۰۱۴). لذا پایش غلظت رسوبات موثر و توزیع اندازه آن‌ها برای افزایش درک و مدیریت فرایندهای مربوط به فرسایش و رسوب در سامانه‌های طبیعی مثل رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، مصب رودخانه‌ها و در طرح‌های هیدرولیکی، برق‌آبی، آبیاری و یا حفاظت از سیل اهمیت بیشتری نسبت به ذرات رسوبی مطلق دارد (Felix و همکاران، ۲۰۱۳).

تغییرات پویای مولفه‌های توزیع اندازه ذرات رسوبات موثر، از بسیاری از عوامل مثل عامل فرسایش‌دگی (بارش و رواناب)، نوع هیدرولیک جریان (صفحه‌ای یا شیاری)، میزان بارش یا جریان، شیب و نوع خاک (Asadi و همکاران، ۲۰۰۷؛ Rose و همکاران، ۲۰۰۷) تاثیر می‌پذیرد. از این بین، عامل پویایی بارش بسیار مهم و تاثیرگذار در فرسایش خاک محسوب می‌شود (Martinez-Mena و همکاران، ۲۰۰۲؛ Asadi و همکاران، ۲۰۱۱؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین، Armstrong و همکاران (۲۰۱۱) نیز بیان کردند که عامل بارش و شیب در بسیاری از مدل‌ها و روش‌های ارزیابی خطر از جایگاه مهمتری نسبت به سایر عوامل موثر بر فرسایش خاک برخوردار هستند. در همین راستا پژوهش‌های متعددی در رابطه با مطالعه توزیع اندازه رسوبات معلق خروجی از حوزه‌های آبخیز (Walling و همکاران، ۲۰۰۰؛ Walling و Woodward، ۲۰۰۰؛ Woodward و Walling، ۲۰۰۴؛ Walling، ۲۰۰۷)، تاثیر شیب و شدت‌های مختلف بارش در فرسایش‌های پاشمانی، بین‌شیاری و شیاری پلات‌های مستقر در عرصه‌های طبیعی (Chaplot و Bissonais، ۲۰۰۰؛

¹ Effective Sediment Particles

² Absolute Sediment Particles

۷/۶۴ میلی‌زیمنس بر متر، ۲/۶۱ درصد و 3 ± 12 درصد به‌دست آمد. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام پذیرفته، خاک منطقه با ماده آلی نسبتاً بالا، در رده خاک‌های با مرغوبیت بالا با رنگ خاکستری تیره و دانه‌بندی، تهویه و ظرفیت نگهداری آب خاک مناسب ارزیابی شد.

آزمایش‌های شبیه‌سازی باران: برای انجام پژوهش حاضر از سه شیب و شدت بارندگی با توجه به شرایط عمومی منطقه مادری خاک مورد استفاده و باران‌های با دوره برگشت ۲۵ تا ۳۰ سال استفاده شد. با توجه به شرایط خاص موجود در منطقه مثل دما، توپوگرافی، خاک، پوشش گیاهی و دخالت‌های انسانی، کاربری‌های اراضی دست‌خوش تغییرات زیادی شده است. لذا، در نظر گرفتن شیب‌های مختلف برای تحلیل شرایط مختلف و به‌ویژه بررسی نقش تغییرات کاربری اراضی و فرایندهای فرسایش حائز اهمیت است. بر این اساس برای انجام آزمایش‌ها سه شیب پنج، ۱۵ و ۲۵ درصد متناسب با اراضی کشاورزی استاندارد، شرایط عمومی و غالب حاکم بر اراضی کشاورزی دیم کشور و عرصه‌های منابع طبیعی انتخاب شد. همچنین آزمایش‌های شبیه‌سازی باران در شرایط رطوبتی خاک متناسب با شرایط عمومی حاکم بر منطقه قبل از وقوع بارندگی و با اندازه‌گیری رطوبت حجمی در منطقه و آزمایشگاه به روش توزین نمونه تر و خشک و حفظ شرایط نسبتاً مشابه در آزمایش‌های پیش‌بینی شده انجام شد. همچنین آزمایش‌ها در شدت‌های تقریبی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت با دوام‌های به‌ترتیب ۳۰، ۱۵ و ۱۰ دقیقه متناسب با هر یک از شدت‌های مزبور با استفاده از نمودارهای شدت، مدت و فراوانی تهیه شده در ایستگاه باران‌نگاری کجور برای منطقه اجرا شد. همچنین تلاش لازم برای حذف اثر رطوبت پیشین از طریق اندازه‌گیری مکرر رطوبت حجمی خاک قبل از آزمایش‌ها و تا حصول شرایط نسبتاً مشابه صورت گرفت.

کلیه شبیه‌سازی باران‌ها روی پلات‌های متوسط آزمایشگاهی با طول و عرض به‌ترتیب شش و یک متر و در سه تکرار در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. در مرحله آماده‌سازی پلات‌ها از ۲۰

تاثیرپذیری بیشتر آن‌ها از نیروی گرانشی زمین در راستای شیب بیان شده است.

در ایران نیز Asadi و همکاران (۲۰۰۷a) به تعامل مثبت بین بارندگی و رواناب تحت شرایط جریان ماندگار (ثابت) در فرسایش بین‌شیاری و افزایش ذرات ریز در طول فرسایش اشاره داشتند. همچنین، Asadi و همکاران (۲۰۰۷b) بیان کردند که انتقال ذرات در فرسایش ناشی از جریان با شدت بیشتری در طبقه ذرات کوچک‌تر از 0.01 میلی‌متر و همچنین طبقه بزرگ‌تر از یک تا دو میلی‌متر مشاهده شد و ذرات بین 0.1 تا 0.5 میلی‌متر در مقابل انتقال به‌وسیله جریان مقاومت نشان دادند. Asadi و همکاران (۲۰۱۱) فرسایش ناشی از جریان رواناب در برجاگذاری و انتقال اجزاء خاک در پلات سه در 0.2 در 0.05 متر برای دو نمونه خاک مختلف را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که ذرات معلق و انتقال خزشی ذرات بیشتر در قدرت جریان کم و انتقال غلطشی بار بستر در قدرت جریان‌های بیشتر از حد آستانه رخ داده است. لذا با توجه به اهمیت موضوع، در تحقیق حاضر مطالعات کمی و تحلیل‌های مقایسه‌ای تغییرپذیری توزیع اندازه ذرات رسوبی در شدت و شیب‌های مختلف در مراحل ابتدایی و تکاملی جریان به‌ترتیب به‌عنوان نمایه‌های شرایط پایدار و ناپایدار تولید رواناب از سطح پلات‌های آزمایشگاهی مدنظر قرار گرفت، نتایج حاصل می‌تواند زمینه‌ساز افزایش دقت مدل‌سازی و طبعاً مدیریت صحیح منابع خاک در سطح حوزه‌های آبخیز شود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری از خاک: پژوهش حاضر روی یک نمونه خاک برداشت شده از منطقه‌ای واقع در مراتع ییلاقی دامنه‌های شمالی البرز در حد فاصل جاده کدیر-کجور با طول شرقی $44^{\circ} 51'$ و عرض شمالی $36^{\circ} 24'$ انجام پذیرفت. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها مانند درصد ماسه، لای و رس، جرم مخصوص ظاهری، واکنش خاک، هدایت الکتریکی، ماده آلی و رطوبت حجمی برای حذف اثر رطوبت پیشین در زمان نمونه‌برداری اندازه‌گیری شد. مقادیر این ویژگی‌ها به‌ترتیب ۳۱، ۵۵ و ۱۴ درصد، $1/46$ گرم بر سانتی‌متر مکعب، $1/65$ ،

از شروع آزمایش‌ها، نمونه‌های خاک برای رسیدن به رطوبت طبیعی منطقه در زمان نمونه‌برداری، با یک بارش غیر فرساینده با شدت پنج میلی‌متر بر ساعت مرطوب شدند (Darvishan Khaledi و همکاران، ۲۰۱۴).

اندازه‌گیری رواناب، رسوب و دانه‌بندی رسوبات: زمان ظهور اولین نشانه‌های رواناب در خروجی هر پلات به‌عنوان مراحل اولیه تولید رواناب و اثر مشترک بارندگی و جریان در ایجاد فرسایش و انتقال رسوبات با استفاده از زمان سنج ثبت و سپس حجم رواناب در فواصل زمانی یک دقیقه‌ای اندازه‌گیری شد. در همین راستا، آزمایش‌ها در سه سری طرح‌ریزی شدند. بعد از هر سری خاک درون پلات به‌طور کامل تخلیه و گونی‌های کنفی آن تعویض شد و آماده‌سازی و بازسازی شرایط اولیه پلات برای انجام آزمایش‌های سری بعد صورت پذیرفت. نمونه‌های آب و رسوب از خروجی پلات در هر واقعه باران با توجه به شیب و شدت‌های بارندگی مورد استفاده، با فاصله زمانی یک دقیقه و با استفاده از بشرهای یک لیتری برداشت شد. در همه آزمایش‌ها، سرعت رواناب با استفاده از پرمنگنات پتاسیم اندازه‌گیری شد (Govers, ۱۹۹۲). سپس غلظت رسوب در فرسایش بین شیار به روش برجاگذاری به مدت ۲۴ ساعت و تخلیه آبرویی و در نهایت خشک نمودن رسوب تغلیظ شده در دمای ۱۰۵ درجه آون مشخص شد (Saeidi و Sadeghi, ۲۰۱۰؛ Shi و همکاران، ۲۰۱۲). پس از اندازه‌گیری حجم رواناب از تقسیم آن به زمان و مساحت پلات شدت رواناب به‌دست آمد. سپس داده‌های حاصل از شدت رواناب یا جریان و غلظت رسوب در مراحل ابتدایی و تکاملی تولید رواناب در Excel 2010 دسته‌بندی و بانک اطلاعاتی آن‌ها تهیه شد. توزیع اندازه ذرات رسوب به شیوه تر برای حدود ۱۳۳ نمونه رسوب مربوط به شرایط جریان ناپایدار (مراحل ابتدایی) و پایدار (مراحل تکاملی) در شیب‌ها و شدت‌های مختلف با استفاده از دستگاه دانه‌بندی لیزری Malvern Mastersizer 2000 دانشگاه شهید چمران بدون استفاده از مواد پخش‌کننده تعیین و نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها را در صفحه گسترده GRADISTAT (Pye و Blott, ۲۰۰۱) برای تعیین مولفه‌های توزیع

سانتی‌متر لایه سطحی منطقه، خاک مورد نظر تهیه و به محل آزمایشگاه منتقل شد. سپس نمونه خاک، هوا خشک و سنگ‌ریزه و بقایای گیاهی برای ساده‌سازی شرایط پیچیده طبیعی و امکان مطالعه جامع در زمان و شرایط محدود، حذف و از الک هشت میلی‌متری عبور داده و به‌خوبی مخلوط شد (Agassi و Bradford, ۱۹۹۹؛ Sarkar و Kukal, ۲۰۱۱). قبل از انتقال خاک به درون پلات، لایه زهکشی از جنس پوکه معدنی به‌صورت تغییر تدریجی اندازه ذرات از بادامی تا ریزدانه به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در کف پلات تعبیه شد (Khaledi Darvishan و همکاران، ۲۰۱۴). نمونه خاک مورد نظر در دو لایه پنج سانتی‌متری در پلات ریخته شد و تا رسیدن به جرم مخصوص خاک منطقه مادری غلطک زده شد. برای حصول اطمینان برای حداکثر تشابه جرم مخصوص خاک غلطک خورده در شرایط آزمایشگاهی با جرم مخصوص خاک منطقه مادری و تعیین تعداد دفعات غلطک زدن از لوله پی وی سی پر شده از سیمان استفاده شد (Hawke و همکاران، ۲۰۰۶). بعد از ریخته شدن لایه اول، خاک به‌صورت عرضی شیار داده شده تا از انقطاع بین لایه اول و دوم جلوگیری شود. پس از آماده‌سازی پلات‌ها شبیه‌سازی باران انجام گرفت. در این آزمایش‌ها از آب چاه با pH ۷/۲۷، هدایت الکتریکی ۵/۱۲ میلی‌زیمنس بر متر، اکسیژن محلول ۳۰/۷ درصد، فسفر ۰/۱۷ میلی‌گرم بر لیتر و نیترات ۴/۴۱ میلی‌گرم بر لیتر برای شبیه‌سازی باران استفاده شد. میانگین توان باران در شیب‌های سه، نه و ۱۵ درجه و برای شدت‌های بارش ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت با میانگین اندازه قطرات باران به ترتیب ۱/۵، ۱/۵۷ و ۱/۵۸ میلی‌متر (Sadeghi و همکاران، ۲۰۱۳) و همچنین سرعت متناظر ۶/۸۶، ۶/۹۱ و ۶/۶۷ متر بر ثانیه (Khaledi Darvishan و همکاران، ۲۰۱۴) به ترتیب ۰/۱۹، ۰/۳۹ و ۰/۵۴ وات بر متر مربع به‌دست آمد و میانگین توان رواناب نیز به ترتیب ۰/۱۷، ۰/۳۳ و ۰/۴۷ وات بر متر مربع به‌دست آمد.

بعد از هر آزمایش، سه تا هفت سانتی‌متر از خاک مورد نظر در پلات‌ها برای آزمایش‌های بعدی تعویض شد (Armstrong و همکاران، ۲۰۱۱). در ادامه و قبل

زمان تقریباً نصف شده است. در شدت باران ۹۰ میلی‌متر بر ساعت و در شیب ۲۵ درصد در حالتی که شدت جریان پایدار بود شیارهای بسیار کوچک در انتهای پلات و در نزدیک خروجی در هر سه تکرار مشاهده شد. لذا می‌توان حالت پایدار شدت جریان را اساساً به مراحل فرسایش بین‌شیاری و مراحل ابتدایی شیاری شدن نسبت داد.

در شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت مقادیر غلظت رسوب در شیب پنج درصد روند معکوس با مقادیر شدت جریان را نشان داد به طوری که با افزایش شدت جریان مقادیر غلظت رسوب کاهش یافت اما در شیب ۱۵ و ۲۵ درصد مقادیر غلظت رسوب غیر از دقیق ابتدایی هم‌سو با افزایش شدت جریان افزایش پیدا کرده است. در شدت بارندگی ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت از شیب پنج تا ۲۵ درصد روند مقادیر غلظت رسوب معکوس با شدت جریان بوده به طوری که با افزایش شدت جریان مقادیر غلظت رسوب کاهش پیدا کرده است. به طور کلی با توجه به شکل ۱ می‌توان بیان کرد الگوی رفتاری غلظت رسوب نسبت به شدت جریان از شیب بیشتر از شدت بارندگی تاثیر پذیرفته است.

اختلاف میانگین مولفه‌های توزیع اندازه ذرات رسوبی مثل درصد ذرات کوچک‌تر از دو میکرون، دو تا ۶۳ میکرون، بزرگ‌تر از ۶۳ میکرون، D_{10} ، D_{50} و D_{90} بر حسب میکرون، شدت جریان و غلظت رسوب در شرایط جریان ناپایدار و پایدار در شدت‌های مختلف در سطح اطمینان ۹۵ درصد با استفاده از آزمون توکی محاسبه و نتایج آن در شکل ۲ ارائه شده است. دقت در شکل ۲ بیان‌گر عدم تاثیرپذیری ذرات بزرگ‌تر از دو میکرون در مراحل ابتدایی و تکاملی جریان از شدت بارندگی‌های مختلف بود ولی درصد ذرات کوچک‌تر از دو میکرون در شدت بارندگی ۶۰ میلی‌متر بر ساعت دارای اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد بین جریان ناپایدار و پایدار بود. همین‌طور مولفه‌های D_{10} و D_{50} در شدت بارندگی‌های ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در جریان ناپایدار و پایدار نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار و در شدت بارندگی ۶۰ میلی‌متر بر ساعت دارای اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد بودند.

اندازه ذرات رسوبی نمونه‌ها شامل درصد ذرات کوچک‌تر از دو میکرون (ذرات در اندازه رس)، درصد ذرات بین دو تا ۶۳ میکرون (ذرات در اندازه لای)، درصد ذرات بزرگ‌تر از ۶۳ میکرون (ذرات در اندازه ماسه)، D_{10} ، D_{50} و D_{90} وارد نموده و در نهایت بانک اطلاعاتی مولفه‌های توزیع اندازه ذرات برای شیب‌ها و شدت‌های مختلف در محیط Excel 2010 تهیه شد.

تجزیه و تحلیل‌های آماری: بعد از تهیه بانک اطلاعاتی مربوط به مولفه‌های توزیع اندازه موثر ذرات رسوب، مثل درصد ذرات کوچک‌تر از دو میکرون، درصد ذرات بین دو تا ۶۳ میکرون، درصد ذرات بزرگ‌تر از ۶۳ میکرون، D_{10} ، D_{50} و D_{90} بر حسب میکرون و شدت جریان و غلظت رسوب در شرایط جریان ناپایدار (ابتدایی) و پایدار (تکاملی) در شیب‌ها و شدت‌های مختلف، برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون توکی^۱ و برای مقایسه مقادیر مولفه‌ها در شرایط جریانی مورد مطالعه از تحلیل واریانس دو طرفه در مدل‌های خطی^۲ نرم‌افزار RStudio استفاده شد (Lane, ۲۰۰۲).

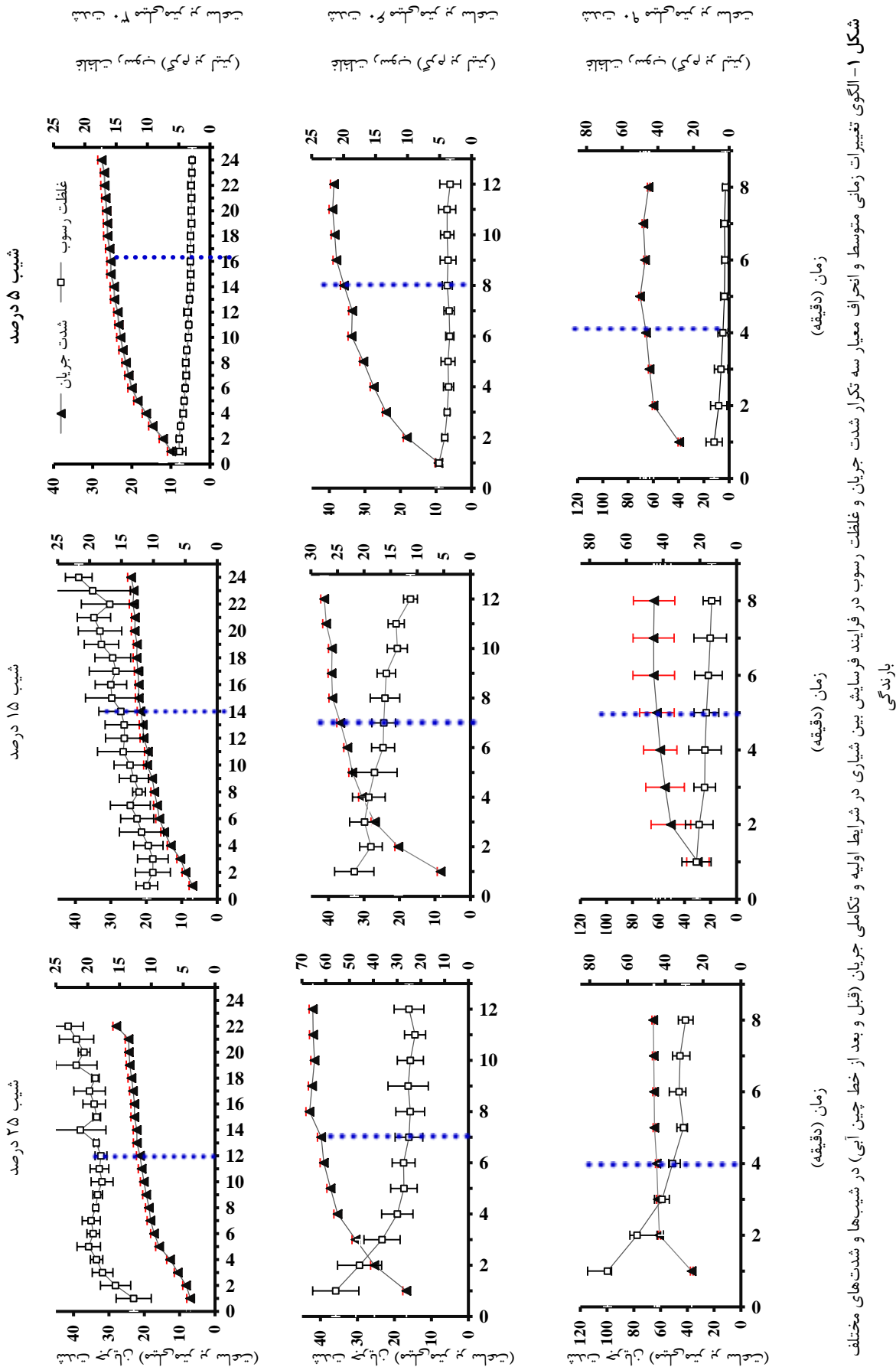
نتایج و بحث

بانک اطلاعاتی داده‌های مربوط به مراحل مختلف ابتدایی و تکاملی جریان (ناپایدار و پایدار) در شیب‌ها و شدت‌ها مختلف تهیه و شکل ۱ نشان‌دهنده الگوی تغییرات زمانی غلظت رسوب موثر (میلی‌گرم بر لیتر) و شدت جریان (میلی‌متر بر ساعت) در شرایط مختلف می‌باشد.

دقت در شکل ۱ بیان‌گر وجود حالت ناپایدار شدت جریان تا دقایق ۱۲ تا ۱۴، برای شدت باران ۳۰ میلی‌متر بر ساعت در شیب‌های پنج تا ۲۵ درصد و سپس دستیابی به حالت پایدار بود. در شدت باران ۶۰ میلی‌متر بر ساعت، مقادیر شدت جریان تا دقایق هفت تا هشت، حالت ناپایدار و سپس حالت پایدار در شیب‌های مختلف به وجود آمد و در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت تا دقایق چهار تا پنج، شدت جریان حالت ناپایدار داشت و سپس به حالت پایدار رسید. با افزایش شدت بارندگی، رسیدن به حالت پایدار برای شدت جریان سریع‌تر رخ داده و از شدت ۳۰ به ۹۰

¹ Tukey's Test

² Linear Model (LM)



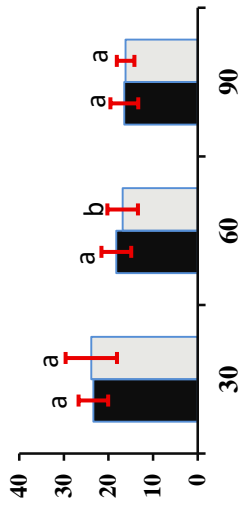
شکل ۱- الگوی تغییرات زمانی متوسط و انحراف معیار سه تکرار شدت جریان و غلظت رسوب در فرایند فرسایش بین شیارهای در شرایط اولیه و تکاملی جریان (قبل و بعد از خط چین آبی) در شیبها و شدت‌های مختلف بارندگی

زمان (دقیقه)

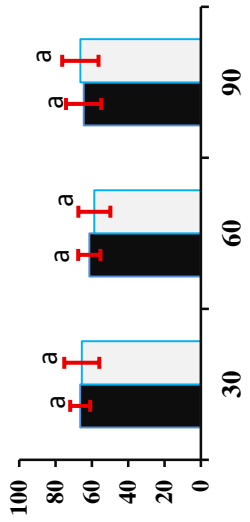
زمان (دقیقه)

زمان (دقیقه)

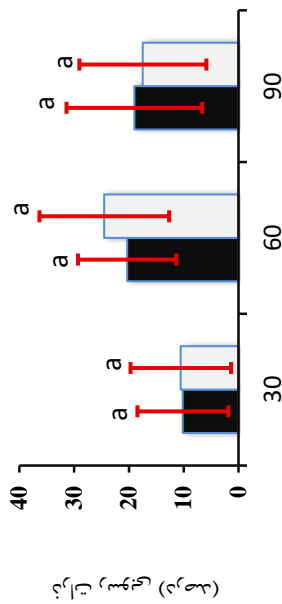
۳-۲ میکرون (درصد)



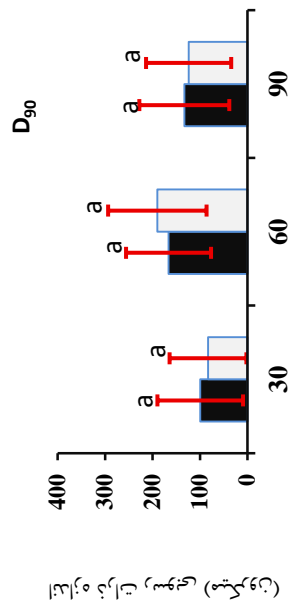
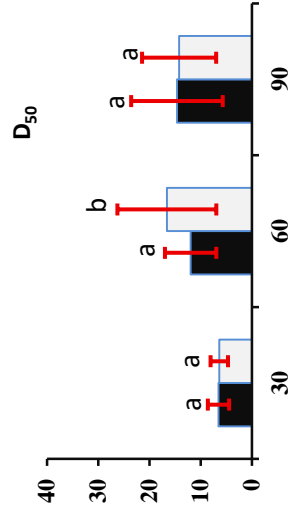
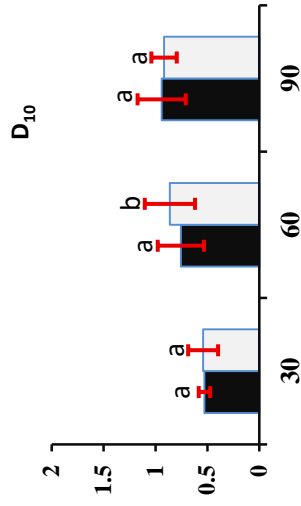
۳-۲ میکرون (درصد)



۶۳ میکرون (درصد)

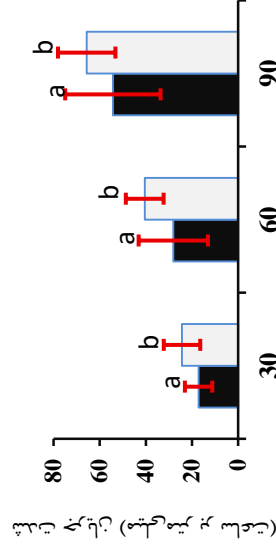


ذرات رسوبی (درصد)

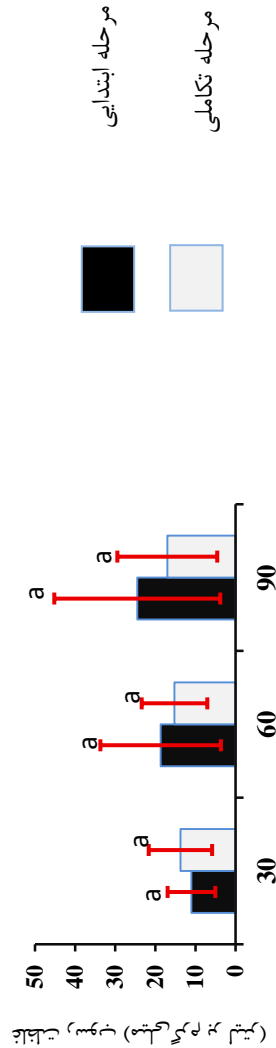


اندازه ذرات رسوبی (میکرون)

شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)



شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)



تعداد ذرات رسوبی (میلی‌متر بر ساعت)

شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)

شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)

شکل ۲ - مقایسه میانگین مولفه‌های توزیع اندازه ذرات رسوبی، شدت جریان و متوسط غلظت رسوب در شرایط جریان ناپایدار و پایدار در شدت‌های مختلف در سطح اطمینان ۹۵ درصد (حروف مشابه a به معنی عدم اختلاف معنی‌دار و حروف غیر مشابه a و b به معنی اختلاف معنی‌دار است)

درصد در شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت دارای اختلاف معنی‌دار ($P < 0/01$) بوده است. این یافته نشان‌دهنده تاثیرپذیری بیشتر مقادیر غلظت رسوب از شیب‌های مختلف در مقایسه با شدت‌های مختلف بارندگی در شرایط جریان ناپایدار با پایدار می‌باشد که با نتایج Parsons و Stone (۲۰۰۶) مبنی بر تاثیر شدت بارندگی بر میزان جدایش رسوبات مغایرت داشت ولی با نتایج Armstrong و همکاران (۲۰۱۱) مبنی بر تاثیرپذیری غلظت رسوبات از شیب هم‌سو بود. همچنین دقت در نتایج جدول مذکور بیان‌گر اختلاف معنی‌دار ($P < 0/01$) مقادیر شدت جریان در شیب‌های مختلف در سه شدت بارندگی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در شرایط ناپایدار در مقایسه با شرایط پایدار داشت که نشان‌دهنده تاثیرپذیری شدت جریان در شیب‌های مختلف پنج، ۱۵ و ۲۵ درصد داشت.

مقایسه تغییرپذیری مقادیر درصدی ذرات کوچک‌تر از دو میکرون و مولفه D_{10} که به‌نحوی متاثر از ذرات کوچک‌تر از دو میکرون می‌باشد. در شرایط مختلف جریان و در شیب‌های مختلف بیان‌گر اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد فقط در شیب پنج و ۱۵ درصد در شدت بارندگی ۶۰ میلی‌متر بر ساعت با خطای استاندارد به‌ترتیب ۱/۲۸ و ۱/۴ و ضریب تبیین ۰/۳۸ و ۰/۳۵ برای ذرات کوچک‌تر از دو میکرون و خطای استاندارد ۰/۰۸ و ۰/۱۱ و ضریب تبیین ۰/۲۷ و ۰/۵۷ برای مولفه D_{10} داشت. در همین راستا مقادیر درصدی ذرات کوچک‌تر از دو میکرون و مولفه D_{10} در شیب پنج درصد در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت نیز در سطح اطمینان ۹۵ درصد با ضریب تبیین به‌ترتیب ۰/۵۸ و ۰/۵۵ دارای اختلاف معنی‌دار بودند.

دقت در جدول ۱ همچنین دلالت بر تغییرپذیری مقادیر درصدی ذرات بین دو تا ۶۳ میکرون فقط در شیب پنج درصد و در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر بر ساعت با خطای استاندارد ۱/۶۶ و ضریب تبیین ۰/۱۷ در سطح اطمینان ۹۵ درصد در شرایط ناپایدار و پایدار جریان داشت و در شیب ۱۵ و ۲۵ درصد هیچ اختلافی در هیچ‌کدام از شدت‌های بارندگی مشاهده نشد.

مولفه D_{90} نیز در شرایط جریان ناپایدار و پایدار از شدت‌های مختلف بارندگی تاثیر نپذیرفت. در نهایت از مشاهده مولفه‌های توزیع اندازه ذرات رسوبی موثر در شکل ۲ می‌توان نتیجه‌گیری نمود که ذرات کوچک‌تر از دو میکرون که به‌نحوی در مولفه‌های D_{10} و D_{50} هم تاثیرگذار می‌باشند، تنها از شدت بارندگی ۶۰ میلی‌متر بر ساعت تاثیر پذیرفته‌اند و در شدت‌های ۳۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت تغییر معنی‌داری مشاهده نشد که دلیل آن می‌تواند ناشی از تاثیرگذاری شدت بارندگی ۶۰ میلی‌متر بر ساعت با توجه به دارا بودن قطر قطرات بزرگ‌تر نسبت به شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر بر ساعت و دوام بیشتر نسبت به شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت بر توزیع اندازه ذرات رسوبی در ذرات کوچک‌تر از دو میکرون باشد. همچنین دقت در شکل ۲ مربوط به اختلاف میانگین غلظت رسوب شرایط جریان ناپایدار و پایدار در شدت‌های مختلف نیز بیان‌گر عدم تاثیرپذیری غلظت رسوب از شدت‌های مختلف بارندگی داشت، ولی میانگین شدت جریان در همه شدت‌های بارندگی بین حالت ناپایدار و پایدار دارای اختلاف معنی‌دار ($P < 0/05$) بوده و نشان‌دهنده تاثیرپذیری زیاد شدت جریان از شدت بارندگی بود.

نتایج مقایسه مولفه‌های توزیع اندازه ذرات موثر رسوب با استفاده از تحلیل واریانس دو طرفه در شرایط جریان ناپایدار و پایدار در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی تحت مدل‌های خطی با استفاده از نرم‌افزار Rstudio در جدول ۱ ارائه شده است. مدل‌های خطی زیرمجموعه‌ای از مدل‌های خطی تعمیم یافته (GLM)^۱ محسوب می‌شوند. انجام تحلیل واریانس دو طرفه زیرمجموعه‌ای از مدل‌های خطی تعمیم یافته و در نتیجه خطی است که برای انجام آن می‌توان از کدهای مربوط به مدل خطی با توجه به ارائه متغیرهای بیشتر مثل ضریب تبیین و خطای استاندارد برای بیان ارتباط مولفه‌ها در شیب‌ها و شدت‌ها نیز بهره جست. دقت در نتایج جدول ۱ نشان داد که مقایسه مقادیر غلظت رسوب در شرایط ناپایدار و پایدار در شیب‌های مختلف در سه شدت بارندگی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت غیر از شیب پنج

¹ Generalized Linear Models

جدول ۱- نتایج تحلیل واریانس دو طرفه مولفه‌های توزیع اندازه ذرات رسوبی در مراحل ابتدایی و تکاملی جریان در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی با استفاده از مدل خطی

D ₉₀ میکرون	D ₅₀ میکرون	D ₁₀ میکرون	<۶۳ میکرون	۲-۶۳ میکرون	>۲ میکرون	غلظت رسوب (گرم بر لیتر)	شدت جریان (میلی‌متر بر ساعت)	مولفه‌ها	شیب (درصد)	شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت)
۳/۵۲	۰/۱۸	۰/۰۴	۱/۰۲	۱/۶۶	۱/۱۹	۰/۴۶	۳/۶۵	خطای استاندارد		
۰/۳۱	۰/۱۵	۰/۴۹	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۳۴	۰/۰۰	۰/۰۰	سطح معنی‌داری	۵	
۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۱۹	۰/۱۷	۰/۰۴	۰/۵۲	۰/۴۷	ضریب تبیین		
۹/۱۸	۱/۷۷	۰/۱۷	۸/۹۱	۱۰/۳	۶/۷۴	۱/۷۸	۳/۶۴	خطای استاندارد		
۰/۲۲	۰/۰۹*	۰/۹۶	۰/۸۵	۰/۵۴	۰/۲۴	۰/۰۰	۰/۰۰	سطح معنی‌داری	۱۵	۳۰
۰/۰۷	۰/۱۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۶۹	۰/۴۸	ضریب تبیین		
۷۲/۲۷	۱/۴	۰/۰۵	۵/۹۶	۴/۴۳	۱/۹۶	۱/۷۸	۳/۸۸	خطای استاندارد		
۰/۱۹	۰/۹۷	۰/۶۶	۰/۴۱	۰/۱۹	۰/۶۳	۰/۰۰	۰/۰۰	سطح معنی‌داری	۲۵	
۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۳۴	۰/۵۳	ضریب تبیین		
۱۶/۵۹	۰/۴۵	۰/۰۸	۲/۶۱	۳/۲۰	۱/۲۸	۰/۴۷	۷/۶۱	خطای استاندارد		
۰/۷۸	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۶۷	۰/۱۵	۰/۰۱	۰/۴۶	۰/۰۲	سطح معنی‌داری	۵	
۰/۰۰	۰/۴۲	۰/۲۷	۰/۰۱	۰/۱۴	۰/۳۸	۰/۰۵	۰/۳۹	ضریب تبیین		
۱۰۰/۴	۸/۰۷	۰/۱۱	۱۱/۲۴	۱۰/۳۳	۱/۴	۱/۸۸	۷/۱۱	خطای استاندارد		
۰/۱۷	۰/۳۲	۰/۰۰	۰/۵۶	۰/۳۲	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	سطح معنی‌داری	۱۵	۶۰
۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۵۷	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۳۵	۰/۶۳	۰/۵۲	ضریب تبیین		
۳۹/۷۷	۳/۴۵	۰/۱۱	۳/۹۹	۳/۴۹	۰/۷۴	۸/۶۱	۶/۳۷	خطای استاندارد		
۰/۳۴	۰/۰۹	۰/۵۳	۰/۲۳	۰/۱۷	۰/۹۷	۰/۰۳	۰/۰۱	سطح معنی‌داری	۲۵	
۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۰۰	۰/۳۵	۰/۴۶	ضریب تبیین		
۴/۹۳	۰/۷۴	۰/۰۴	۱/۰۴	۱/۱۸	۰/۸۱	۰/۵۶	۳/۶۵	خطای استاندارد		
۰/۱۴	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	سطح معنی‌داری	۵	
۰/۳۳	۰/۷۴	۰/۵۵	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۵۸	۰/۵۲	۰/۴۷	ضریب تبیین		
۶۴/۶۳	۳/۸۵	۰/۱۳	۷/۸۵	۶/۵۹	۱/۴۳	۱/۷۸	۳/۶۴	خطای استاندارد		
۰/۲۱	۰/۳۴	۰/۴۲	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۵۱	۰/۰۰	۰/۰۰	سطح معنی‌داری	۱۵	۹۰
۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۰۹	۰/۲۷	۰/۳۱	۰/۰۶	۰/۶۹	۰/۴۸	ضریب تبیین		
۲۹/۶۵	۶/۰۱	۰/۱۰	۴/۸۹	۴/۱۴	۰/۸۰	۱/۷۸	۳/۸۸	خطای استاندارد		
۰/۸۵	۰/۷۷	۰/۲۵	۰/۸۸	۰/۹۴	۰/۵۹	۰/۰۰	۰/۰۰	سطح معنی‌داری	۲۵	
۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۱۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۳۴	۰/۵۳	ضریب تبیین		

ذرات بزرگ‌تر از ۶۳ میکرون و مخصوصاً مولفه D_{90} که نشان‌دهنده خصوصیات ذرات با میانگین و انحراف معیار به ترتیب ۹۹/۴۳ و ۹۰/۲۴ میکرون در شرایط جریان ناپایدار و ۸۳/۰۷ و ۸۱/۰۳ میکرون در شرایط جریان پایدار مغایرت داشت.

نتیجه‌گیری

ذرات رسوبی ناشی از منطقه فرسایش یافته دارای توزیع اندازه‌های متفاوتی می‌باشند که دانش و درک و تفسیر توزیع اندازه آن‌ها حائز اهمیت زیادی در فهم فرایند جدایش، انتقال و رسوب‌گذاری رسوبات می‌باشد. در همین راستا در پژوهش حاضر به بررسی تغییرپذیری توزیع اندازه ذرات رسوبی در شرایط جریان ناپایدار و شرایط پایدار در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی در شرایط آزمایشگاهی پرداخته شد. نتایج نشان‌دهنده تاثیرپذیری بیشتر مقادیر غلظت رسوب از شیب‌های مختلف نسبت به شدت‌های مختلف بارندگی و تغییرپذیری مقادیر شدت جریان هم از شدت بارندگی و هم از شیب‌های مختلف بود. همچنین مقایسه مقادیر درصد ذرات کوچک‌تر از دو میکرون و مولفه D_{10} در شیب‌های مختلف بیان‌گر اختلاف معنی‌دار آن‌ها در شیب پنج درصد در شدت بارندگی ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر بر ساعت بود در صورتی که ذرات بین دو تا ۶۳ میکرون و بزرگ‌تر از ۶۳ میکرون فقط در شیب پنج درصد اختلاف معنی‌دار داشتند. در همین راستا مولفه D_{50} رفتار بسیار پیچیده‌ای در شیب‌ها و شدت‌های مختلف داشت ولی مولفه D_{90} از هیچ‌کدام از شیب‌ها و شدت‌ها تاثیر نپذیرفت. نتایج این مطالعه اهمیت بررسی و مطالعه توزیع اندازه ذرات رسوب در افزایش درک فرایندها، انتقال آن‌ها در شیب‌ها و شدت‌های مختلف و در شرایط جریان ناپایدار و پایدار به‌عنوان یک دانش لازم و ضروری برای فهم و شناخت عوامل مهم تاثیرگذار در فرایند فرسایش خاک و همچنین پیش‌بینی، اندازه‌گیری و مهار فرسایش خاک را نشان می‌دهد. در همین راستا می‌توان روش‌های بهینه حفاظت خاک و مدیریت صحیح برخورد با مشکلات ناشی از فرسایش خاک را با استفاده از تحلیل توزیع اندازه ذرات رسوب در شرایط مختلف پیش‌بینی نمود. اگرچه انجام

دلیل این امر را می‌توان خصوصیات ویژه ذرات دو تا ۶۳ میکرون از جمله عدم قابلیت انتخابی بودن آن‌ها در فرایندهای مختلف فرسایش و فرسایش‌پذیر بودن آن نسبت به ذرات کوچک‌تر از دو میکرون و بزرگ‌تر از ۶۳ میکرون نسبت داد (Shi و Wang، ۲۰۱۵). در همین راستا مقادیر درصدی ذرات بزرگ‌تر از ۶۳ میکرون در شیب‌های مختلف در مقایسه شرایط جریان ناپایدار نسبت به پایدار فقط در شیب پنج درصد و در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر بر ساعت دارای اختلاف معنی‌دار ($P < 0/03$) با خطای استاندارد ۱/۰۲ و ضریب تبیین ۰/۱۹ بود و در شیب‌های ۱۵ و ۲۵ درصد اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد که با یافته‌های Shi و همکاران (۲۰۱۲) و Shi و Wang (۲۰۱۵) مبنی بر انتقال ذرات بزرگ‌تر نسبت به ذرات کوچک‌تر با افزایش شیب به دلیل تاثیرپذیری آن‌ها از نیروی گرانشی زمین در راستای شیب در تحقیق حاضر در مورد ذرات بزرگ‌تر از دو میکرون در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر بر ساعت هم‌خوانی نداشت.

نتایج تحلیل واریانس دو طرفه مدل‌های خطی در شرایط جریان ناپایدار و پایدار در شیب‌ها و شدت‌های مختلف بارندگی برای مولفه D_{50} در جدول ۱ نیز بیان‌گر اختلاف معنی‌دار آن در سطح معنی‌داری ۰/۰۹ درصد در شیب پنج درصد و در شدت بارندگی ۳۰ میلی‌متر بر ساعت با خطای استاندارد ۱/۷۷ و ضریب تبیین ۰/۱۳ بود، در شدت بارندگی ۶۰ میلی‌متر بر ساعت دارای اختلاف معنی‌دار در شیب پنج و ۲۵ درصد با ضریب تبیین به ترتیب ۰/۴۲ و ۰/۱۶ در سطح معنی‌داری ۰/۰۰۱ و ۰/۰۹ درصد در مقایسه جریان ناپایدار و پایدار بود و در نهایت در شدت بارندگی ۹۰ میلی‌متر بر ساعت در شیب پنج درصد با ضریب تبیین ۰/۷۴ و خطای استاندارد ۰/۷۴ در سطح ۰/۰۰۱ درصد اختلاف معنی‌دار در شرایط مختلف جریان نشان داد. مقایسه مولفه D_{90} نیز در شرایط مختلف جریان بیان‌گر عدم تاثیرپذیری آن در شیب‌های مختلف و در شدت‌های مختلف بارندگی بود که با یافته‌های Shi و همکاران (۲۰۱۲) و Shi و Wang (۲۰۱۵) مبنی بر انتقال ذرات درشت‌تر در شرایط جریان پایدار در فرسایش شیاری نسبت به فرسایش بین‌شیاری با افزایش توان جریان و حذف عمل انتخابی در مورد

تحقیقات تکمیلی برای تحلیل‌های دقیق‌تر و جمع‌بندی‌های نهایی ضروری است.

منابع مورد استفاده

1. Agassi, M. and J. M. Bradford. 1999. Methodologies for interrill soil erosion studies. *Soil and Tillage Research*, 49(4): 277-287.
2. Armstrong, A., J.N. Quinton, B.C.P. Heng and J.H. Chandler. 2011. Variability of interrill erosion at low slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(1): 97-106.
3. 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(1): 73-81.
4. Asadi, H., H. Ghadiri, C.W. Rose and H. Rouhipour. 2007a. Interrill soil erosion processes and their interaction on low slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(5): 711-724.
5. Asadi, H., H. Ghadiri, C.W. Rose, B. Yu and J. Hussein. 2007b. An investigation of flow-driven soil erosion processes at low stream powers. *Journal of Hydrology*, 342(1): 134-142.
6. Assouline, S. and M. Ben-Hur. 2006. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. *Catena*, 66(3): 211-220.
7. Blott, S.S and K. Pye. 2001. Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediment. *Earth Surface Processes Land Forms*, 10(26): 1237-1248.
8. Chaplot, V. and Y. Le Bissonnais. 2000. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(2): 145-153.
9. Felix, D., I. Albayrak and R.M. Boes. 2013. Laboratory investigation on measuring suspended sediment by portable laser diffractometer (LISST) focusing on particle shape. *Geo-Marine Letters*, 33(6): 485-498.
10. Fox, D.M. and R.B. Bryan 1999. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. *Catena*, 38(3): 211-222.
11. Govers, G. 1992. Evaluation of transporting capacity formulae for overland flow. In: Parsons, A.J., Abrahams, A.D. (Eds.), *Overland Flow Hydraulics and Erosion Mechanics*. University College London Press London, 243-273.
12. Hawke, R.M., A.G. Price and R.B. Bryan. 2006. The effect of initial soil water content and rainfall intensity on near-surface soil hydrologic conductivity: a laboratory investigation. *Catena*, 65(3): 237-246.
13. Huang, J., P. Wu and X. Zhao. 2012. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments. *Catena*, 104: 93-102.
14. Khaledi Darvishan, A., S.H.R. Sadeghi, M. Homae and M. Arabkhedri. 2014. Measuring sheet erosion using synthetic color contrast aggregates. *Hydrological Processes*, 28(15): 4463-4471.
15. Kukal, S.S and M. Sarkar. 2011. Laboratory simulation studies on splash erosion and crusting in relation to surface roughness and raindrop size. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 59(1): 87-93.
16. Lane, P.W. 2002. Generalized linear models in soil science. *European Journal of Soil Science*, 53(2): 241-251.
17. Martinez-Mena, M., V. Castillo and J. Albaladejo. 2002. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain. *Geomorphology*, 45(3-4): 261-275.
18. Parsons, A.J. and P.M. Stone. 2006. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion. *Catena*, 67(1): 68-78.
19. Rienzi, E.A., J.F. Fox, J.H. Grove and C.J. Matocha. 2013. Interrill erosion in soils with different land uses: the kinetic energy wetting effect on temporal particle size distribution. *Catena*, 107: 130-138.
20. 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(2): 449-458.
21. Sadeghi, S.H.R and P. Saeidi. 2010. Reliability of sediment rating curves for a deciduous forest watershed in Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 55(5): 821-831.
22. Sadeghi, S.H.R., Z. Abdollahi and A.V. Khaledi Darvishan. 2013. Experimental comparison of some techniques for estimating natural rain drop size distribution in Caspian Sea southern coast, Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6): 1374-1382.
23. Shen, H., F. Zheng, L. Wen, J. Lu and Y. Jiang. 2014. An experimental study of rill erosion and morphology. *Geomorphology*, 231: 193-201.
24. Shi, Z.H., F.L. Yan, L. Li, Z.X. Li and C.F. Cai. 2010. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China. *Catena*, 81(3): 240-248.

25. Shi, Z.H., N.F. Fang, L. Wu, F.Z. 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. Walling, D.E. and J.C. Woodward. 2000. Effective particle size characteristics of fluvial suspended sediment transported by lowland British rivers. *IAHS Publication International Association of Hydrological Sciences*, 263: 129-139.
27. Walling, D.E. and P.W. Moorehead. 2004. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment: An Overview. *Hydrobiologia*, 176/177: 125-149.
28. Walling, D.E., P.N. Owens, B.D. Waterfall, G.J. Leeks and P.D. Wass. 2000. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment in the Humber and Tweed catchments, UK. *Science of the Total Environment*, 251: 205-222.
29. Wang, L. and Z.H. Shi. 2015. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes. *Soil Science Society of America Journal*, 79(3): 917-929.
30. Wang, L., Z.H. Shi, J. Wang, N.F. Fang, G.L. Wu and H.Y. Zhang. 2014. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: a case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 512: 168-176.
31. Williams, N.D., D.E. Walling and G.J.L. Leeks. 2004. The settling behavior of fine sediment particles: some preliminary results from LISST instruments. *IAHS publication*, 288: 283-290.
32. Woodward, J.C. and D.E. Walling. 2007. Composite suspended sediment particles in river systems: their incidence, dynamics and physical characteristics. *Hydrological Processes*, 21(26): 3601-3614.
33. Yan, F.L., Z.H. Shi, Z.X. Li and C.F. Cai. 2008. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of Ultisols in subtropical China. *Soil and Tillage Research*, 100(1): 34-41.
34. Zhang, G.H., G.B. Liu, G.L. Wang and Y.X. Wang. 2011. Effects of vegetation cover and rainfall intensity on sediment-bound nutrient loss, size composition and volume fractal dimension of sediment particles. *Pedosphere*, 21(5): 676-684.