



دانشگاه گسترده علمی و فناوری گیلان

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد هجدهم، شماره چهارم، ۱۳۹۰

<http://jwfst.gau.ac.ir>

بررسی روند تغییرات برخی شاخص‌های فرسایش‌پذیری و ترسیب با استفاده از شبیه‌ساز باران

*مجید محمودآبادی^۱ و حسن روحی‌پور^۲

^۱استادیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان،

^۲دانشیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، تهران

تاریخ دریافت: ۸۹/۵/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۳/۲۵

چکیده

حساسیت خاک در برابر فرسایش ناشی از باران با استفاده از ضرایب جدایش‌پذیری و جدایش‌پذیری مجدد بیان می‌شود. این در حالی است که رواناب حاصل از بارندگی نیز در شرایطی قادر است ذرات خاک را جدا و منتقل نموده و از این رو، روند تعیین فرسایش‌پذیری را تحت تأثیر قرار دهد. این پژوهش به بررسی تأثیر نحوه طراحی آزمایش‌های فرسایش ناشی از باران بر این ضرائب، در چهار سناریو بسته به مقادیر قدرت جریان و شرایط پایدار می‌پردازد. به این منظور با استفاده از شبیه‌سازی باران، ترکیب‌های مختلف شدت بارندگی و شیب فلووم بر روی سه نمونه خاک زراعی ایجاد گردید. نتایج نشان داد که در قدرت جریان‌های کمتر از آستانه و در شرایط پایدار، مقادیر ضریب جدایش‌پذیری مجدد در خاک‌های مورد مطالعه بین ۱۰۰ تا ۲۱۲ برابر ضریب جدایش‌پذیری آن‌ها می‌باشد. حال آن‌که با در نظر گرفتن تمام قدرت جریان‌ها این ارقام به ۶۲ تا ۱۲۲ برابر کاهش می‌یابد. همچنین بسته به نوع خاک، نتایج مربوط به شرایط پایدار و ناپایدار متفاوت از یکدیگر بود. با در نظر گرفتن تمام قدرت جریان‌ها به جای قدرت جریان‌های کمتر از آستانه، ضرائب جدایش‌پذیری بین ۲ تا ۴ برابر و ضرایب جدایش‌پذیری مجدد بین ۱/۲ تا ۲/۵ برابر بزرگ‌تر تعیین

* مسئول مکاتبه: mahmoodabadai@mail.uk.ac.ir

گردید که به نقش عامل رواناب در جدانمودن و انتقال ذرات مرتبط است. این یافته اهمیت طراحی صحیح و دقیق آزمایش‌ها را بر تعیین حساسیت خاک در برابر بارندگی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی باران، ضرایب جدایش‌پذیری، ترسیب‌پذیری، قدرت جریان آستانه

مقدمه

با پیشرفت تحقیقات در زمینه فرسایش، به‌منظور بررسی جداشدن و انتقال ذرات خاک در اثر بارندگی و یا رواناب، فرآیندهای بین‌شیاری و شیاری از یکدیگر تفکیک شده‌اند (فاستر و همکاران، ۱۹۸۱؛ زانگ و همکاران، ۱۹۹۸؛ شریدان و همکاران، ۲۰۰۰؛ والمیس و همکاران، ۲۰۰۵؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۶). در مدل‌های فرآیندی مانند گست (رز و همکاران، ۱۹۸۳؛ رز، ۱۹۸۵؛ هیرسین و رز، ۱۹۹۱؛ رز و همکاران، ۲۰۰۶) و وپ (نیرینگ و همکاران، ۱۹۸۹؛ فاستر و همکاران، ۱۹۹۵؛ لافلن و همکاران، ۱۹۹۷؛ یو و رزول، ۲۰۰۱؛ زانگ و همکاران، ۲۰۰۵؛ پیری و همکاران، ۲۰۰۷) فرسایش در حضور باران به‌ترتیب با عناوین فرسایش ناشی از باران و فرسایش بین‌شیاری بیان می‌شود. طراحی آزمایش‌ها در این شرایط به نوعی است که فرآیندهای ناشی از جریان رواناب حذف شده و یا اثر آن‌ها در مقایسه با بارندگی به حداقل رسد (ماس و گرین، ۱۹۸۳؛ کینل، ۱۹۹۳). به همین منظور، از سینی پاشمان و یا فلوم با سطح کوچک در شیب‌های ملایم استفاده می‌شود. در چنین شرایطی، جریان رواناب کارایی چندانی در جدا نمودن ذرات نداشته بنابراین، تمام یا عمده فرسایش در اثر باران رخ می‌دهد (هیرسین و رز، ۱۹۹۱؛ هیرسین و همکاران، ۱۹۹۹؛ هوگارت و همکاران، ۲۰۰۴b؛ روحی‌پور و همکاران، ۲۰۰۴ و روحی‌پور و همکاران، ۲۰۰۶).

تئوری‌های مدل گست با حل و بسط عددی و بررسی در شرایط آزمایشگاهی برای شرایط مختلف نظیر؛ حالت پایدار (ساندر و همکاران، ۲۰۰۲؛ رز و همکاران، ۲۰۰۶) و ناپایدار (ساندر و همکاران، ۱۹۹۶؛ هیرسین و همکاران، ۱۹۹۹) و نیز فرسایش ناشی از باران به تنهایی (هوگارت و همکاران، ۲۰۰۴b) و در حضور جریان (پروفیت و همکاران، ۱۹۹۳؛ هوگارت و همکاران، ۲۰۰۴a) (الف)، فرسایش ناشی از جریان ورقه‌ای (هیرسین و رز، ۱۹۹۲a) و جریان شیاری (هیرسین و رز، ۱۹۹۲b) توسعه داده شد. تخمین فرسایش در این مدل بر پایه مفهوم وقوع هم‌زمان فرسایش و رسوب‌گذاری استوار است (هیرسین و رز، ۱۹۹۲a؛ هیرسین و رز، ۱۹۹۲b). این مدل فرآیندهای

جداشدن و جداشدن مجدد ذرات توسط بارندگی و رواناب و رسوب‌گذاری ذرات را به صورت باهم و هم‌زمان، در نظر می‌گیرد. در شرایطی که قدرت جریان رواناب کمتر از قدرت جریان آستانه باشد، غلظت رسوب حاصل اثر فرآیندهای هم‌زمان جداشدن و جداشدن مجدد ذرات توسط باران و رسوب‌گذاری می‌باشد (میسرا و رز، ۱۹۹۵). براین اساس، پارامترهای حساسیت خاک در برابر عامل فرساینده با عناوین جدایش‌پذیری (α) ، جدایش‌پذیری مجدد (αd) و ترسیب‌پذیری (θ) ، ارتباط بین غلظت رسوب و فرآیندهای متأثر از بارندگی را برقرار می‌سازند (هیرسین و رز، ۱۹۹۱؛ هوگارت و همکاران، ۲۰۰۴b).

جدایش‌پذیری و جدایش‌پذیری مجدد به ترتیب بیانگر حساسیت ذرات خاک اصلی و لایه رسوب در برابر جداشدن توسط بارندگی می‌باشند. در این مدل فرض شده که این دو پارامتر در عمق‌های آب کمتر از یک عمق بحرانی، دارای مقداری ثابت و حداکثر بوده و در اعماق بیشتر، به صورت نمایی کاهش می‌یابند (پروفیت و رز، ۱۹۹۱؛ گائو^۴ و همکاران، ۲۰۰۳). پارامتر ترسیب‌پذیری نیز تقریباً برابر با میانگین سرعت سقوط ذرات خاک در نظر گرفته می‌شود (هیرسین و رز، ۱۹۹۱). در شرایطی که قدرت جریان کمتر از قدرت جریان آستانه باشد، جداشدن و جداشدن مجدد ذرات توسط بارندگی (و نه رواناب) انجام می‌شود. در غیاب فرآیندهای ناشی از رواناب و در حالت تعادل، معادله زیر برقرار است:

$$q \frac{dc_i}{dx} = e_i + e_{di} - d_i \quad (1)$$

که در آن؛ q شدت جریان در واحد عرض $(m^2 s^{-1})$ ، c غلظت رسوب $(kg m^{-3})$ ، x فاصله به سمت پایین دست جریان (m) و e_i ، e_{di} و d_i به ترتیب شدت جداشدن، جداشدن مجدد و ترسیب ذرات در هر کلاس قطری i $(kg m^{-2} s^{-1})$ است. برای تعیین جدایش‌پذیری مجدد (پروفیت و همکاران، ۱۹۹۱) و جدایش‌پذیری (میسرا و رز، ۱۹۹۶) به ترتیب از روابط زیر استفاده می‌شود:

-
- 1- Detachability
 - 2- Re-detachability
 - 3- Depositability
 - 4- Gao

$$\alpha_d = \frac{c\phi}{0/9P} \quad (kg\ m^{-3}) \quad (2)$$

$$\alpha = Q \left(\frac{P}{c} - \frac{\phi}{\alpha_d} \right)^{-1} \quad (kg\ m^{-3}) \quad (3)$$

که در آن‌ها؛ Q شدت رواناب در واحد سطح در واحد زمان ($m\ s^{-1}$)، P شدت بارندگی ($m\ s^{-1}$) و α ، α_d و ϕ به ترتیب ضرائب جدایش‌پذیری، جدایش‌پذیری مجدد و ترسیب‌پذیری، همگی بر حسب ($kg\ m^{-3}$) می‌باشد.

بسیاری از مدل‌های فرآیندی از جمله گست، در ابتدا برای شرایط پایدار توسعه پیدا کرده‌اند. شرایط پایدار مربوط به وضعیتی است که تغییرات دبی رسوب با زمان تقریباً ثابت باقی می‌ماند (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۱). این در حالی است که مقادیر پارامترهای جدایش‌پذیری، جدایش‌پذیری مجدد و ترسیب‌پذیری، در دو شرایط پایدار و ناپایدار متفاوت از یکدیگرند. همچنین در آزمایش‌های شبیه‌سازی باران بر سطوح کوچک و شیب‌های ملایم و در شرایطی که در سطح خاک شیاری مشاهده نگردد، فرسایش ناشی از باران و به‌عنوان فرسایش بین‌شیاری شناخته می‌شود. حال اگر قدرت جریان بیشتر از مقدار آستانه باشد، علاوه بر باران، رواناب نیز قادر است ذرات خاک را از بستر اصلی جدا نماید (ترومن و برادفورد، ۱۹۹۵؛ زنگ و همکاران، ۲۰۰۴)، حتی اگر جریان بصورت ورقه‌ای دیده شود. از طرفی، فرآیند جداشدن ذرات در جریان متأثر از برخورد قطرات باران با فرآیند جداشدن ناشی از برخورد مستقیم قطرات، متفاوت است (وان و السوایی ۱۹۹۹؛ کینل، ۲۰۰۵a، کینل، ۲۰۰۵b). با توجه به این‌که فرآیندهای فرسایش و نیز فرسایش‌پذیری خاک، به قدرت جریان آستانه بستگی دارد، هدف این پژوهش بررسی روند تغییرات برخی شاخص‌های فرسایش‌پذیری و ترسیب ذرات در برابر باران شبیه‌سازی شده در مقادیر مختلف قدرت جریان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های شبیه‌ساز باران: این پژوهش در آزمایشگاه فرسایش مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور و با استفاده از یک دستگاه شبیه‌ساز باران انجام شد. سیستم بارش متشکل از یک نازل

جارویی^۱ می‌باشد که روی چارچوب اصلی در ارتفاع ۴ متر نصب شده است (دلنالب، ۱۹۹۲). فلوم مورد استفاده به ابعاد یک متر در یک متر و دارای سیستم زهکش است که قابلیت تغییر و تنظیم شیب را نیز دارد. با استفاده از این شبیه‌ساز می‌توان باران‌هایی در دامنه شدت ۲۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر در ساعت ایجاد نمود. میانه حجمی قطر قطرات ۱/۵ میلی‌متر، ضریب یک‌نواختی شدت بارندگی بین ۹۰ تا ۹۶ درصد و سرعت سقوط نهایی و انرژی جنبشی باران به ترتیب ۵/۵۰ متر بر ثانیه و ۱۵/۱۲۵ ژول بر متر مربع در میلی‌متر باران است. لازم به ذکر است که تمام آزمایش‌های شبیه‌سازی باران در حالت خاک دارای زهکش انجام شد. به این ترتیب، رفتار خاک‌های مورد مطالعه در برابر فرآیندهای نفوذ و فرسایش به شرایط طبیعی شباهت بیشتری پیدا خواهد کرد.

آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها: با توجه به اهمیت نمونه‌برداری، سعی شد تا خاک‌هایی با خصوصیات کاملاً متفاوت، انتخاب گردد. انتخاب خاک بر مبنای توزیع اندازه ذرات (اولیه و ثانویه) و پایداری خاکدانه انجام، و نمونه‌برداری از عمق لایه شخم (۱۵ سانتی‌متر سطحی) اراضی زراعی انجام شد (ایوانز و همکاران، ۱۹۹۴). بر این اساس، سه نوع خاک به ترتیب از مزرعه‌ای زیر کشت گندم در روستا بختیار منطقه هشتگرد، مزرعه شخم‌خورده پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج و مزرعه آیش در روستا عباس‌آباد منطقه سهیلیه، نمونه‌برداری گردید. از این به بعد این سه نوع خاک به ترتیب با اسامی خاک‌های هشتگرد، دانشکده و سهیلیه ذکر می‌شوند. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و در معرض هوا خشک گردید و سپس از الک با چشمه ۱۰ میلی‌متر عبور داده شد. معمولاً برای گذراندن خاک از الک، از الک‌های با اندازه چشمه کوچک‌تر از ۱۰ میلی‌متر استفاده نمی‌شود تا خاک به شرایط طبیعی شبیه‌تر باشد (آقاسی و برادفورد، ۱۹۹۹؛ زانگ و همکاران، ۲۰۰۵).

شدت‌های مختلف بارندگی از ۲۰ تا ۷۵ میلی‌متر در ساعت در چهار شیب ۲/۵، ۵/۰، ۷/۵ و ۱۰/۰ درصد فلوم روی سه نمونه خاک زراعی ایجاد گردید. به این ترتیب که پس از انتقال نمونه‌ها به داخل فلوم، تسطیح و به آرامی از زیر اشباع می‌گردید. پس از ۲۴ ساعت و اطمینان از اشباع نمونه‌ها، آب ثقلی از طریق سیستم زهکش، تخلیه می‌شد. سپس فلوم در شیب موردنظر تنظیم و باران با شدت ثابت، ایجاد می‌گردید. در هر آزمایش با استفاده از کرنومتر و ظروف جمع‌آوری، از رواناب حاوی رسوب خروجی از انتها فلوم و در فواصل زمانی مشخص نمونه‌گیری می‌شد. فواصل زمانی

1- Oscillating nozzle

نمونه‌گیری از رواناب برای ۲ دقیقه ابتدا آزمایش هر ۳۰ ثانیه یک‌بار، تا دقیقه ۵، هر یک دقیقه یک‌بار و در ادامه تا پایان آزمایش هر ۵ دقیقه یک‌بار بود. مدت هر آزمایش بسته به زمان لازم برای رسیدن به حالت پایدار، بین ۳۰ تا ۵۰ دقیقه در نظر گرفته شد. سرعت جریان به‌روش رنگ‌سنجی و عمق رواناب در چند تکرار تعیین گردید. به این منظور، با استفاده از پرمنگنات پتاسیم محلولی پرننگ تهیه و پس از تزریق به جریان رواناب، زمان لازم برای طی مسیر یک متر طول فلوم در چندین تکرار اندازه‌گیری می‌شد. با داشتن دبی حجمی و سرعت رواناب، عمق جریان نیز محاسبه گردید. نمونه‌های رواناب حاوی رسوب، جمع‌آوری و پس از خشک نمودن در آون، شدت جریان و غلظت رسوب در زمان‌های مختلف رخداد تعیین شد.

اندازه‌گیری خصوصیات خاک‌ها: به‌منظور بررسی نقش خصوصیات خاک‌ها بر نتایج حاصل از آزمایش‌های شبیه‌سازی باران، ویژگی‌های مهم خاک‌ها تعیین گردید. بافت به‌روش هیدرومتری، توزیع اندازه ثانویه ذرات در حالت تر با استفاده از شیکر الک و سری الک، جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه اندازه‌گیری شد (پیچ و همکاران، ۱۹۹۲a). همچنین ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور^۱ و همکاران (۱۹۵۲)، درصد سدیم تبدلی^۲ از طریق اندازه‌گیری سدیم تبدلی با استفاده از فلیم‌فوتومتر و مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی تعیین گردید (پیچ و همکاران، ۱۹۹۲a). همچنین، واکنش خاک^۳ در گل اشباع، هدایت الکتریکی^۴ در عصاره اشباع، کربن آلی به‌روش والکی - بلاک^۵ (۱۹۳۴)، آهک به روش تیتراسیون و گچ به روش استون اندازه‌گیری شد (پانسو و گاتیرو، ۲۰۰۶).

به‌منظور تعیین توزیع اندازه ذرات ثانویه در ابتدا نمونه‌های خاک به آرامی از زیر اشباع شده و به مدت ۲۴ ساعت در شرایط اشباع نگهداری شدند. سپس هر نمونه به‌مدت سه دقیقه با فرکانس ۳۰ دور در دقیقه و دامنه ۲ سانتی‌متر با استفاده از الک‌هایی با اندازه‌های ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۲۵ میلی‌متر در آب تکان داده شد. پس از خشک نمودن خاکدانه‌های هر کلاس اندازه، توزیع اندازه ذرات در حالت تر تعیین گردید (کمپر و رزناو، ۱۹۸۶).

- 1- Bower
- 2- Exchangable Sodium Percentage (ESP)
- 3- pH
- 4- Electrical Conductivity (EC)
- 5- Walkley and Black

تعیین ترسیب پذیری، جدایش پذیری و جدایش پذیری مجدد: برای تعیین ضرائب جدایش پذیری مجدد و جدایش پذیری خاک‌های مورد مطالعه، به ترتیب معادلات ۲ و ۳ مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین براساس چگالی مؤثر و توزیع اندازه ذرات ثانویه (نتایج الکترون) و با استفاده از نرم افزار GUDPRO نسخه ۳/۱ (لیسلی و همکاران، ۱۹۹۶)، ترسیب پذیری ذرات محاسبه گردید. در این نرم افزار برای تعیین سرعت سقوط ذرات، از رابطه رابی- واتسون (دینگمن، ۱۹۸۴) استفاده می‌شود. چگالی مؤثر ذرات (σ) از رابطه زیر که توسط لاج و رزول (۱۹۹۲) ارائه شده، محاسبه شد:

$$\sigma = 1460 + 48(1/0326)^S \quad (kg\ m^{-3}) \quad (5)$$

که در آن؛ S درصد ذرات شن ($0/02$ تا 2 میلی‌متر) است. همچنین با استفاده از عمق آب در هر آزمایش، مقدار ترسیب پذیری مؤثر برآورد گردید.

در این پژوهش، به منظور بررسی شاخص‌های فرسایش پذیری و ترسیب و همچنین تأثیر نحوه اجرا آزمایش‌ها بر نتایج فرسایش، آزمایش‌ها در چهار سناریو شامل؛ (۱) استفاده از قدرت جریان‌های کمتر از آستانه ($0/008$ وات بر مترمربع) و شدت جریان و غلظت رسوب پایدار، (۲) استفاده از قدرت جریان‌های کمتر از آستانه و میانگین کل شدت جریان و غلظت رسوب، (۳) استفاده از تمام قدرت جریان‌ها و شدت جریان و غلظت رسوب پایدار و (۴) استفاده از تمام قدرت جریان‌ها و میانگین کل شدت جریان و غلظت رسوب، بررسی می‌شود. در ادامه براساس نتایج، دلیل انتخاب این سناریوها بیشتر تشریح می‌گردد.

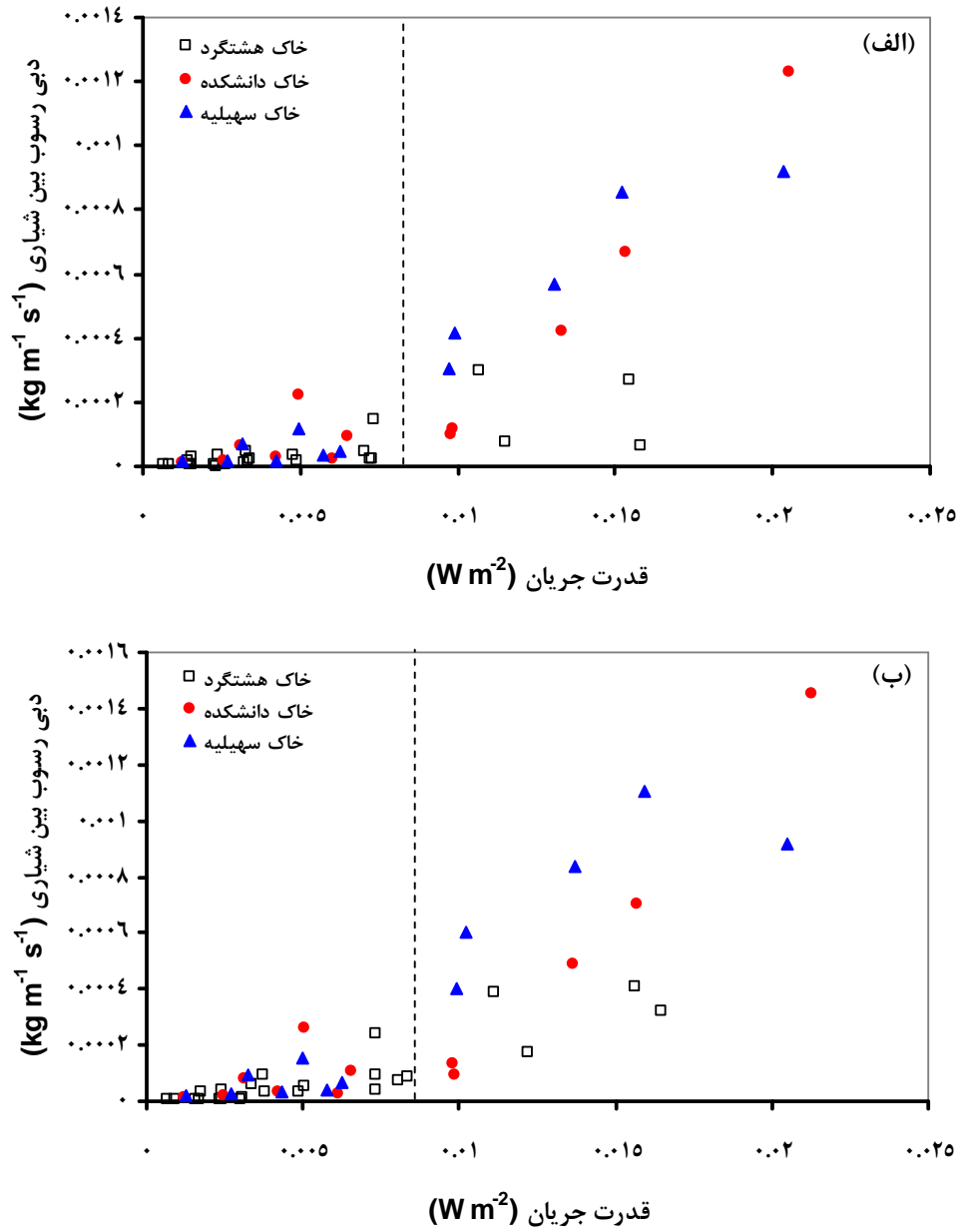
نتایج و بحث

خصوصیات خاک‌ها: جدول ۱ برخی خصوصیات خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. به رغم اندازه ریزتر ذرات اولیه در خاک هشتگرد، میانگین وزنی قطر برای این خاک ($0/77$ میلی‌متر) بزرگ‌تر از خاک‌های دانشکده و سهیلیه (به ترتیب با $0/33$ و $0/19$ میلی‌متر) بود. این روند عکس، در مورد دو خاک دیگر نیز وجود داشت. خاک‌های مورد مطالعه فاقد سنگریزه و گچ بوده و مقادیر کربن آلی که در پایداری خاکدانه عامل مهمی به حساب می‌آید، در خاک هشتگرد بیشتر و در خاک سهیلیه کمتر بود. درصد سدیم تبادلی و هدایت الکتریکی نیز کم و بیش در هر سه خاک کم و مقدار کربنات کلسیم در خاک هشتگرد بیش از دو خاک دیگر بوده است.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه.

خاک سهیلیه	خاک دانشکده	خاک هشتگرد	واحد	خصوصیت خاک
۶۱/۵	۴۹/۰	۳۴/۰	(/.)	شن
۲۳/۵	۳۲/۵	۴۴/۰	(/.)	سیلت
۱۵/۰	۱۸/۵	۲۲/۰	(/.)	رس
۰/۱۹	۰/۳۳	۰/۷۷	mm	میانگین وزنی قطر (تر)
۱/۷۲	۱/۶۴	۱/۶۱	$g\ cm^{-3}$	جرم مخصوص ظاهری
۱۳/۳	۱۴/۷	۲۵/۸	$meq\ 100g^{-1}$	ظرفیت تبادل کاتیونی
۱/۸۸	۱/۲۲	۱/۵۴	(/.)	درصد سدیم تبدلی
۸/۳	۸/۳	۸/۵	-	واکنش خاک (عصاره اشباع)
۰/۹۱	۱/۵۸	۱/۱۵	$dS\ m^{-1}$	هدایت الکتریکی (عصاره اشباع)
۰/۲۱	۰/۷۸	۱/۵	(/.)	کربن آلی
۸/۸	۵/۶	۱۹/۳	$meq\ L^{-1}$	کربنات کلسیم
۰	۰	۰	$meq\ L^{-1}$	گچ

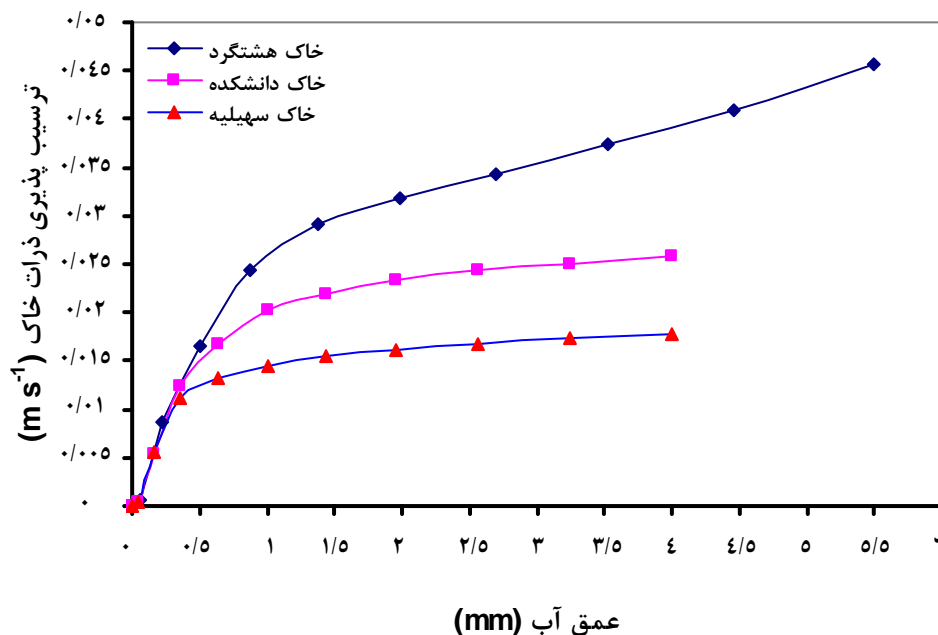
طراحی الگوهای فرسایش ناشی از باران: در هیچ یک از آزمایش‌های شبیه‌سازی باران، شیاری تشکیل نشد و بنابراین جریان از نوع ورقه‌ای و فرسایش ناشی از باران در نظر گرفته شد. با توجه به تغییرات زمانی شدت جریان و غلظت رسوب، هر رخداد را می‌توان به دو بخش تقسیم نمود. در ابتدای آزمایش، شدت جریان و غلظت رسوب نوسان زیادی دارند، ولی به تدریج به حد تقریباً پایداری می‌رسند. از داده‌های مربوط به بخش پایدار منحنی، میانگین‌گیری صورت گرفت و مقادیر پایدار آن‌ها برای هر آزمایش تعیین گردید. همچنین، با استفاده از حجم آب و جرم رسوب جمع‌آوری شده از انتها فلوم، مقادیر میانگین شدت جریان و غلظت رسوب برای کل مدت رخداد بارش محاسبه شد.



شکل ۱- تغییرات دبی رسوب با افزایش قدرت جریان رواناب حاصل از باران شبیه‌سازی شده برای (الف) میانگین داده‌ها در شرایط پایدار و (ب) میانگین کل رخداد بارش در سه خاک مورد مطالعه.

شکل ۱ مقادیر دبی رسوب در برابر قدرت جریان برای دو حالت پایدار و میانگین کل رخداد بارش را نشان می‌دهد که هر شکل به دو ناحیه قابل تفکیک است. با افزایش قدرت جریان در قدرت جریان‌های کمتر از حدود ۰/۰۰۸ وات بر متر مربع، برای هر سه خاک تغییرات تولید رسوب تقریباً ناچیز است. حال آن‌که در قدرت جریان‌های بیش از این حد، تولید رسوب با شیب تندتری افزایش می‌یابد. این آستانه برای هر سه خاک و برای هر دو حالت پایدار و میانگین کل رخداد، کم و بیش یکسان است. بنابراین به‌عنوان تقریبی از قدرت جریان آستانه مد نظر قرار گرفت. قبل از این نیز قدرت جریان آستانه حدود ۰/۰۱ وات بر متر مربع برای خاک‌های زراعی، توسط برخی محققان گزارش شده است (پروفیت و همکاران، ۱۹۹۳). در قدرت جریان‌های کمتر از آستانه، تنها فرآیندهای فرسایش ناشی از بارندگی فعال بوده و نقش رواناب ناچیز است. در قدرت جریان‌های بیشتر از این مقدار، علاوه بر عامل باران، جریان ورقه‌ای نیز قادر به جداسازی ذرات خاک می‌باشد و به همین دلیل، تولید رسوب به شدت افزایش یافته است. به‌عبارتی در قدرت جریان‌های بیشتر از آستانه، برهم‌کنش هم‌زمان بارندگی و رواناب، فرآیندهای فرسایش و تولید رسوب را کنترل می‌نماید. بر مبنای شرایط پایدار و ناپایدار و نیز قدرت جریان آستانه، چهار سناریویی که قبلاً ذکر گردید، تعریف شدند.

نتایج ارزیابی حساسیت خاک در برابر فرآیندهای ناشی از باران: شکل ۲ مقادیر ترسیب‌پذیری ذرات را برای سه خاک مورد آزمایش در برابر عمق جریان نشان می‌دهد. در یک عمق مشخص آب، خاک هشتگرد به دلیل داشتن خاکدانه‌های درشت‌تر و پایداری بیشتر (جدول ۱)، بالاترین میزان ترسیب‌پذیری را نشان می‌دهد (هیرسین و رز، ۱۹۹۱) و در مقابل خاک سهیلیه دارای کم‌ترین میزان است. همچنین با افزایش عمق آب، ترسیب‌پذیری ذرات افزایش می‌یابد.



شکل ۲- مقادیر ترسیب پذیری ذرات خاک (θ) در عمق‌های مختلف آب برای سه خاک مورد مطالعه.

نتایج مربوط به قدرت جریان‌های کمتر از آستانه: جدول ۲ نتایج مربوط به ضرایب جدایش پذیری، جدایش پذیری مجدد و نیز ترسیب پذیری مؤثر ذرات را در قدرت جریان‌های کمتر از آستانه در دو حالت پایدار و میانگین کل رخداد، برای سه خاک مورد مطالعه نشان می‌دهد. به دلیل این که در این قسمت تنها از داده‌های مربوط به آزمایش‌هایی استفاده شد که قدرت جریان آن‌ها کمتر از آستانه (۰/۰۰۸ وات بر متر مربع) بود، بنابراین در جدول ۲ تعداد آزمایش‌ها بسته به شرایط مختلف، متفاوت است. در شرایط پایدار، میانگین ضریب جدایش پذیری خاک‌های هشتگرد، دانشکده و سهیلیه به ترتیب ۱۴، ۵۴ و ۴۱ کیلوگرم بر مترمکعب و همچنین میانگین ضریب جدایش پذیری مجدد آن‌ها به ترتیب ۲۹۷۰، ۵۹۶۵، ۴۱۱۶ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. مقادیر ضرایب جدایش پذیری مجدد بسیار بیشتر از جدایش پذیری بود که دلیل آن حساسیت زیاد ناشی از نبود چسبندگی بین ذرات موجود در لایه رسوب است. ضریب جدایش پذیری مجدد در خاک‌های هشتگرد، دانشکده و سهیلیه به ترتیب ۲۱۲، ۱۱۰ و ۱۰۰ برابر ضریب جدایش پذیری آن‌ها می‌باشد. میسرا و رز (۱۹۹۵) در ارزیابی

این دو پارامتر نشان دادند که مقادیر پارامتر جدایش‌پذیری مجدد حدود ۱۰۰۰ مرتبه بزرگ‌تر از جدایش‌پذیری است.

مطابق جدول ۲ مقادیر مربوط به ضرایب جدایش‌پذیری و جدایش‌پذیری مجدد در شرایط پایدار کمتر از مقادیر آن‌ها برای میانگین کل رخداد بارش است. آزمون t در سطح ۱ درصد نشان داد که غیر از خاک هشتگرد، در دو خاک دیگر بین میانگین ضرایب یادشده در دو حالت پایدار و میانگین کل رخداد بارش، اختلاف معنی‌دار می‌باشد. تغییرات زمانی غلظت رسوب سه خاک مورد مطالعه بیانگر آن بود که تفاوت غلظت رسوب بین دو حالت پایدار و میانگین کل رخداد برای خاک هشتگرد کمتر از دو خاک دیگر است. به عبارتی، با توجه به این که ضرایب α_d و α به‌عنوان تابعی از غلظت رسوب (C) محاسبه می‌شوند، میزان اختلاف بین دو حالت پایدار و میانگین کل رخداد بارش، بر روند محاسبات تأثیر می‌گذارد و می‌تواند به عنوان یکی از دلایل اختلاف معنی‌دار در دو خاک دانشکده و سهیلیه مطرح باشد.

مطابق جدول ۲ مقادیر ترسیب‌پذیری مؤثر ذرات (ϕ_e) برای خاک‌های هشتگرد، دانشکده و سهیلیه به ترتیب ۰/۰۱۰، ۰/۰۱۱، ۰/۰۰۸ متر بر ثانیه به‌دست آمد. این پارامتر براساس عمق جریان و با استفاده از داده‌های ترسیب‌پذیری تعیین گردید. خاک دانشکده علاوه بر این که بیشترین حساسیت را در برابر فرآیندهای جداشدن و جداشدن مجدد نشان می‌دهد، دارای بیشترین میزان ترسیب‌پذیری مؤثر ذرات نیز می‌باشد. نتایج اندازه‌گیری عمق آب در هنگام آزمایش نشان داد که در مقایسه با دو خاک دیگر، بیشترین میانگین عمق آب در خاک دانشکده وجود دارد. در تعیین ترسیب‌پذیری مؤثر ذرات، نسبت بیشتری از خاکدانه‌های موجود در سطح، زیر آب قرار می‌گیرند. خاک هشتگرد با داشتن خاکدانه‌های به‌نسبت پایدار و درشت (جدول ۱)، نیاز به عمق‌های بیشتر آب برای زیر آب قرار گرفتن تمام آن‌ها دارد. همچنین به‌علت نفوذپذیری بیشتر آن، شدت تولید رواناب و در نتیجه عمق جریان کمتر از دو خاک دیگر است. در خاک سهیلیه علاوه بر عمق کمتر آب نسبت به خاک دانشکده، مقدار ترسیب‌پذیری آن (شکل ۲) نیز کمتر از دو خاک دیگر است. در نتیجه، پارامتر ترسیب‌پذیری مؤثر مربوط به خاک سهیلیه در کمترین مقدار قرار می‌گیرد. آزمون t در سطح یک درصد نشان داد که برای هر سه خاک، بین پارامتر ترسیب‌پذیری مؤثر ذرات در دو حالت پایدار و میانگین کل رخداد، تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. به عبارتی دو شرایط بالا، تأثیر معنی‌داری بر میزان پارامتر ϕ_e نداشته است.

جدول ۲- نتایج آماری ضرایب جدایش پذیری، جدایش پذیری مجدد و ترسیب پذیری مؤثر ذرات در خاک‌های مورد مطالعه برای رخدادهای بارش با قدرت جریان کمتر از آستانه در دو حالت: (الف) غلظت رسوب و شدت رواناب در حالت پایدار و (ب) میانگین کل غلظت رسوب و شدت رواناب.

پارامتر	خاک هشتگرد		خاک دانشکده		خاک سهیلیه	
	(الف)	(ب)	(الف)	(ب)	(الف)	(ب)
حالت آزمایش	۱۴	۱۳	۹	۹	۷	۷
تعداد آزمایش						
دامنه شدت بارندگی ($mm h^{-1}$)	۲۱-۷۲	۲۳-۷۳	۲۳-۷۳	۲۳-۷۳	۲۲-۷۳	۲۲-۷۳
جدایش پذیری ($kg m^{-3}$)	حداقل	۵	۷	۱۸	۲۵	۲۸
	حداکثر	۲۷	۳۳	۱۱۱	۱۲۷	۵۷
	میانگین	۱۴	۱۷	۵۴	۶۱	۴۱
	انحراف معیار	۷	۹	۲۸	۳۱	۱۳
جدایش پذیری مجدد ($kg m^{-3}$)	حداقل	۱۳۸۶	۱۸۵۴	۳۹۲۵	۴۶۵۸	۳۱۱۸
	حداکثر	۵۴۹۴	۶۲۰۰	۸۲۹۱	۹۴۵۸	۵۲۶۶
	میانگین	۲۹۷۰	۳۷۳۲	۵۹۶۵	۶۷۳۰	۴۱۱۶
	انحراف معیار	۱۳۴۷	۱۴۱۵	۱۵۶۳	۱۵۳۶	۸۱۷
ترسیب پذیری مؤثر ذرات ($m s^{-1}$)	حداقل	۰/۰۰۴	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵
	حداکثر	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸	۰/۰۱۴	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳
	میانگین	۰/۰۱۰	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۰۰۸
	انحراف معیار	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳

نتایج مربوط به تمام قدرت جریان‌ها: برای بهتر روشن شدن تأثیر طراحی و نحوه انجام آزمایش‌ها، بررسی تمام قدرت جریان‌ها (کمتر و بیشتر از آستانه) نیز انجام شد. مشابه با ارزیابی در حالت قبل، هر دو شرایط پایدار و میانگین کل رخداد بارش، مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۳ نتایج آماری مربوط به پارامترهای ترسیب پذیری، جدایش پذیری و جدایش پذیری مجدد ذرات را برای این شرایط نشان می‌دهد. در شرایط پایدار، میانگین پارامتر جدایش پذیری ذرات در خاک‌های هشتگرد، دانشکده و سهیلیه به ترتیب ۳۰، ۱۴۳ و ۱۶۷ کیلوگرم بر مترمکعب و میانگین ضریب جدایش پذیری مجدد آن‌ها به ترتیب ۳۶۷۰، ۱۰۷۲۴ و ۱۰۳۰۶ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین شد. در این شرایط، ضریب

جدایش‌پذیری مجدد در خاک‌های هشتگرد، دانشکده و سهیلیه به ترتیب ۱۲۲، ۷۵ و ۶۲ برابر ضریب جدایش‌پذیری آن‌هاست که این نسبت‌ها، در مقایسه با قدرت جریان‌های کمتر از آستانه، کمتر می‌باشد. خاک‌های دانشکده و هشتگرد به ترتیب بیشترین و کم‌ترین حساسیت را در برابر جداشدن مجدد ناشی از بارندگی نشان می‌دهند. همچنین پارامترهای α_d و α در شرایط مربوط به میانگین کل رخداد بارش، بیشتر از حالت پایدار به دست آمدند.

جدول ۳- نتایج آماری ضرایب جدایش‌پذیری، جدایش‌پذیری مجدد و ترسیب‌پذیری مؤثر ذرات در خاک‌های مورد مطالعه برای تمامی رخدادهای بارش (تمام قدرت جریان‌ها) در دو حالت: (الف) غلظت رسوب و شدت رواناب در حالت پایدار و (ب) میانگین کل غلظت رسوب و شدت رواناب.

پارامتر	خاک هشتگرد		خاک دانشکده		خاک سهیلیه	
	(الف)	(ب)	(الف)	(ب)	(الف)	(ب)
حالت آزمایش	۲۴	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
تعداد آزمایش	۲۴	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
دامنه شدت بارندگی ($mm h^{-1}$)	۲۱-۷۵	۲۳-۷۵	۲۳-۷۵	۲۳-۷۵	۲۲-۷۵	۲۲-۷۵
جدایش‌پذیری ($kg m^{-3}$)	۵	۷	۱۸	۲۵	۲۸	۳۷
حداقل	۵	۷	۱۸	۲۵	۲۸	۳۷
حداکثر	۱۵۷	۲۱۵	۵۹۴	۶۸۶	۴۴۳	۶۰۶
میانگین	۳۰	۵۵	۱۴۳	۱۶۰	۱۶۷	۲۱۳
انحراف معیار	۳۹	۶۱	۱۷۶	۲۰۰	۱۷۱	۲۱۲
جدایش‌پذیری مجدد ($kg m^{-3}$)	۱۳۸۲	۱۸۵۴	۳۹۲۵	۴۶۵۸	۳۱۱۸	۴۳۵۵
حداقل	۱۳۸۲	۱۸۵۴	۳۹۲۵	۴۶۵۸	۳۱۱۸	۴۳۵۵
حداکثر	۱۲۶۹۰	۱۶۵۳۲	۳۴۴۱۲	۳۹۹۰۷	۲۴۵۴۰	۳۰۱۲۰
میانگین	۳۶۷۰	۶۲۵۷	۱۰۷۲۴	۱۲۰۵۷	۱۰۳۰۶	۱۳۰۷۲
انحراف معیار	۲۸۶۴	۴۳۴۸	۹۴۰۲	۱۰۷۲۶	۸۲۹۹	۹۶۹۴
ترسیب‌پذیری مؤثر ذرات ($m s^{-1}$)	۰/۰۰۴	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵
حداقل	۰/۰۰۴	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵
حداکثر	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸	۰/۰۱۴	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳
میانگین	۰/۰۱۰	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹
انحراف معیار	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳

نسبت به قدرت جریان‌های کمتر از آستانه، مقدار ضریب جدایش‌پذیری با در نظر گرفتن تمام قدرت جریان‌ها، بین ۲ تا ۴ برابر و ضریب جدایش‌پذیری مجدد بین ۱/۲ تا ۲/۵ برابر بزرگ‌تر تعیین گردید. این در حالی است که پروفیت و همکاران (۱۹۹۱) دریافتند که پارامترهای جدایش‌پذیری و جدایش‌پذیری مجدد با افزایش عمق آب (در سه عمق آب ۲، ۵ و ۱۰ میلی‌متر)، کاهش می‌یابند. به نظر می‌رسد که عمق‌های مورد مطالعه توسط پروفیت و همکاران (۱۹۹۱) مربوط به عمق‌های بیش از عمق بحرانی باشد زیرا در مدل گسست فرض بر این است که پارامترهای α و ad در عمق‌های بیشتر از عمق بحرانی، کاهش می‌یابند (پروفیت و رز، ۱۹۹۱؛ گائو و همکاران، ۲۰۰۳). با این وجود، در مطالعات متعددی اثر عمق آب بر میزان جداسازن ذرات خاک توسط قطرات باران گزارش شده است (هیرسین و رز، ۱۹۹۱؛ کینل، ۱۹۹۳a؛ کینل، ۲۰۰۵b). در این مطالعه قدرت جریان‌های بیشتر از آستانه، از طریق افزایش شیب فلوم و یا عمق آب ایجاد گردید. با افزایش شیب به دلیل افزایش سرعت جریان، ذرات بیشتری منتقل شده و در نتیجه، مقدار پارامترهای α و ad بیشتر تعیین می‌شود. کینل (۱۹۹۳) بر این باور است که اگر رواناب بدون حضور باران قادر به جدانمودن ذرات خاک نباشد، تغییرات غلظت رسوب مستقل از سرعت جریان بوده از این رو، تغییرات غلظت رسوب از طریق عمق جریان قابل توجیه است. در این پژوهش عمق‌های جریان کمتر از عمق بحرانی بوده و همچنین در نظر گرفتن تمام قدرت جریان‌ها، با افزایش عمق آب همراه بوده است. افزایش عمق آب در عمق‌های کمتر از آستانه، می‌تواند منجر به افزایش شدت جداسازن و جداسازن مجدد ذرات شود. به‌طور مشابهی ماس و گرین (۱۹۸۳) نتیجه گرفتند که حداکثر شدت انتقال درون جریانی در عمق ۲ تا ۳ برابر قطر قطره اتفاق می‌افتد و بعد از آن شدت انتقال، به سرعت با افزایش عمق کاهش می‌یابد. این یافته تأثیر نحوه طراحی آزمایش‌ها را بر میزان تعیین ضرایب جدایش‌پذیری ناشی از بارندگی نشان می‌دهد. به‌عبارتی، اگر تمام قدرت جریان‌ها یعنی قدرت جریان‌های کمتر و بیشتر از آستانه همگی در محاسبات در نظر گرفته شوند، مقادیر غیرواقعی به‌دست خواهد آمد به‌ویژه این‌که در مورد ضریب جدایش‌پذیری بسته به خاک تا ۴ برابر مقدار واقعی، احتمال خطا وجود دارد. در قدرت جریان‌های کمتر از آستانه، فرآیندهای ناشی از باران تولید رسوب را کنترل می‌نمایند ولی با وارد کردن قدرت جریان‌های بیشتر از آستانه در محاسبات، اثر ترکیبی باران و رواناب و نه اثر منفرد باران در فرآیندها در نظر گرفته می‌شود. این موضوع می‌تواند به‌عنوان یکی از دلایل مهم در خطا برآورد مدل‌های فرآیندی مطرح باشد. روحی‌پور و همکاران (۲۰۰۴) در بررسی اثرات متقابل فرآیندهای

فرسایش ناشی از باران و رواناب سطحی در دو نوع خاک مختلف، نشان دادند که غلظت رسوب ناشی از هر یک از این فرآیندها به تنهایی و یا در ترکیب با یکدیگر، بستگی به خصوصیات خاک و شیب دارد. آن‌ها دریافتند که در شیب‌های ملایم، جریان رواناب متأثر از باران، فرساینده‌گی بیشتری نسبت به همان میزان جریان در غیاب بارندگی دارد.

پروفیت و رز (۱۹۹۱) با انجام شبیه‌سازی باران و رواناب در دو خاک مختلف دریافتند که در قدرت جریان‌های کمتر از $0/1$ و $0/3$ وات بر مترمربع، جداشدن ذرات ناشی از باران بوده و در قدرت جریان‌های بیشتر، عامل کنده‌شدن جریان رواناب است. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که در قدرت جریان‌های کمتر از $0/5$ وات بر مترمربع، ترکیب باران و رواناب باعث افزایش غلظت رسوب شده است (برهم‌کنش مثبت) حال آن‌که در قدرت جریان‌های بیشتر از $0/5$ وات بر مترمربع، عامل باران به علت صاف کردن شیارها، غلظت رسوب را کاهش داد. آن‌ها هر دو فرآیند جداشدن در اثر باران و کنده‌شدن توسط جریان در نواحی بین‌شیاری را در کنترل غلظت رسوب سهیم دانستند. زنگ و همکاران (۲۰۰۴) عنوان می‌کنند که در سطوح کوچک، عامل بارندگی ارتباط بهتری با فرساینده‌گی نشان می‌دهد درحالی که در ابعاد بزرگ‌تر، رواناب اهمیت بیشتری دارد. از طرفی، فرآیندهای جداشدن، انتقال و رسوب‌گذاری ذرات خاک، در اندازه‌های کوچک قابل تفکیک هستند، ولی در ابعاد بزرگ‌تر با رواناب ادغام شده و هم‌پوشانی پیدا می‌کنند (زنگ و همکاران، ۲۰۰۴). به همین دلیل در بررسی فرسایش ناشی از باران، طراحی آزمایش‌ها به نحوی است که فرآیندهای ناشی از جریان رواناب حذف شود (هیرسین و رز، ۱۹۹۱؛ هیرسین و همکاران، ۱۹۹۹؛ هوگارت و همکاران، ۲۰۰۴b). مطابق جدول ۳، مقادیر ترسیب‌پذیری مؤثر ذرات برای خاک‌های هشترگرد، دانشکده و سهیلیه در شرایط پایدار به ترتیب $0/010$ ، $0/011$ و $0/009$ متر بر ثانیه است که تفاوت چندانی با نتایج جدول ۲ ندارد. با در نظر گرفتن تمام قدرت جریان‌ها، به ترتیب پارامترهای جدایش‌پذیری، جدایش‌پذیری مجدد و ترسیب‌پذیری مؤثر، متحمل بیشترین خطا برآورد شدند. از جمله تفاوت‌های بین نتایج مربوط به دو دسته قدرت جریان، روند تغییرات دبی رسوب و ضرایب جدایش‌پذیری با افزایش عمق آب است.

مفاهیمی که در ارتباط با فرسایش ناشی از باران و یا فرسایش بین‌شیاری توسعه یافته‌اند، گاهی غیردقیق بوده که یک علت آن وابستگی فرآیندهای فرسایش به نحوه اندازه‌گیری یا روش کار و نیز اعمال سلیقه در نوع معادله مورد استفاده است (ترومن و برادفورد، ۱۹۹۵؛ آفاسی و برادفورد، ۱۹۹۹).

روش‌های آزمایشگاهی بررسی فرسایش، متأثر از سطح و حجم مورد آزمایش، شرایط مرزی کرت و روش آماده‌سازی خاک می‌باشد که این موارد بر نتایج به‌دست آمده اثر می‌گذارد. از این رو است که هیچ روش استاندارد برای تعیین یا اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری بین‌شیاری وجود ندارد (ترومن و برادفورد، ۱۹۹۵). در هنگام آزمایش ممکن است شیار قابل مشاهده‌ای تشکیل نشود و نیز با توجه به برخورد قطرات حاصل از بارندگی به‌ویژه در عمق‌های کم آب، شیارهای بسیار کوچکی که ایجاد می‌شود، پایدار نباشند. بنابراین معمولاً (بر اساس مشاهدات در هنگام آزمایش)، فرسایش از نوع بین‌شیاری در نظر گرفته می‌شود. این درحالی‌است که در واقع، تمرکز جریان در میکروریل‌ها یا پروتوریل‌ها (روحی‌پور و همکاران، ۲۰۰۶)، باعث تفاوت‌های چشم‌گیری در افزایش تولید رسوب از سطح مورد آزمایش می‌شود. تشخیص این‌که شیار تشکیل شده است یا خیر، با توجه به دینامیک فرسایش بسیار دشوار است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شاخص‌های فرسایش‌پذیری و ترسیب‌پذیری ذرات در چهار سناریو مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان از آن داشت که رواناب حاصل از باران تحت شرایطی قادر است ذرات خاک را جدا و یا منتقل نموده و از این رو، نتایج تعیین فرسایش‌پذیری را تحت تأثیر قرار دهد. در نظر گرفتن قدرت جریان‌های بیشتر از آستانه و یا شرایط ناپایدار، تعیین پارامترهای فرسایش‌پذیری را با خطا مواجه می‌سازد به‌طوری‌که با در نظر گرفتن تمام قدرت جریان‌ها به‌جای قدرت جریان‌های کمتر از آستانه، ضرایب جدایش‌پذیری بین ۲ تا ۴ برابر و ضرائب جدایش‌پذیری مجدد بین ۱/۲ تا ۲/۵ برابر بزرگ‌تر تعیین می‌گردد که به نقش عامل رواناب در جدانمودن و انتقال ذرات مرتبط است. همچنین برهم‌کنش هم‌زمان بارندگی و رواناب در قدرت جریان‌های بیشتر از آستانه، باعث پیچیدگی فرآیندهای فرسایش می‌شود. روش کار و مقیاس مورد مطالعه بر روند نتایج و تعیین پارامترهای مدل تأثیر می‌گذارند. عدم تشکیل شیار در سطح خاک و یا جریان ورقه‌ای به مفهوم عدم قابلیت رواناب در انتقال ذرات نبوده و ممکن است ذرات جدا شده توسط باران، به کمک رواناب حمل گردند. بنابراین در آزمایش‌هایی که با هدف بررسی فرسایش ناشی از باران انجام می‌شود، لازم است فرآیندهای متأثر از جریان رواناب بر مبنای قدرت جریان آستانه حذف گردد. این یافته نشان از

حساسیت بسیار بالای مقادیر اندازه‌گیری شده فرسایش‌پذیری خاک به نحوه طراحی و انجام آزمایش‌های ناشی از بارندگی و نیز قدرت جریان آستانه دارد.

سیاسگزاری

از مسئولان محترم مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور که امکان استفاده از آزمایشگاه فرسایش را فراهم نمودند، سپاس‌گزاری می‌گردد.

منابع

1. Agassi, M., and Bradford, J.M. 1999. Methodologies for interrill soil erosion studies. *Soil Tillage Res.* 49: 277-287.
2. Bower, C.A.R., Reitemeier, F., and Fireman, M. 1952. Exchangeable-cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Sci.* 73: 251-261.
3. Delta Lab. 1992. Technical manual: Rainfall simulator, EID 340. Voreppe, France, 17p.
4. Dingman, S. 1984. *Fluvial Hydro*, John Wiley and Sons, New York. 383 p.
5. Evans, K.G., Loch, R.J., Silburn, D.M., Aspinall, T.O., and Bell, L.C. 1994. Evaluation of the CREAMS model. IV. Derivation of interrill erodibility parameters from laboratory rainfall simulator data and prediction of soil loss under a field rainulator using the derived parameters. *Aust. J., Soil Res.* 32: 867-878.
6. Foster, G.R., Flanagan, D.C., Nearing, M.A., Lane, L.J., Risse, L.M., and Finkner, S.C. 1995. Hillslope erosion component. Chapter 11, 12 p. In: Flanagan, D.C., and M.A. Nearing, (eds.), *USDA-Water Erosion Prediction Project, Technical Documentation*. NSERL. Report No. 10, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
7. Foster, G.R., McCool, D.K., Renard, K.G., and Moldenhauer, W.C. 1981. Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI metric units. *J., Soil Water Conserv.* 36: 355-359.
8. Gao, B., Walter, M.T., Steenhuis, T.S., Parlange, J.Y., Nakano, K., Rose, C.W., and Hogarth, W.L. 2003. Investigating ponding depth and soil detachability for a mechanistic erosion model using a simple experiment. *J. Hydro.* 277: 116-124
9. Hairsine, P.B., and Rose, C.W. 1991. Rainfall detachment and deposition: Sediment transport in the absence of flow-driven processes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 320-324.
10. Hairsine, P.B., and Rose, C.W. 1992 a. modeling water erosion due to overland

- flow using physical principles, 1. Sheet Flow. *Water Reso. Res.* 28: 1. 237-243.
11. Hairsine, P.B., and Rose, C.W. 1992 b. modeling water erosion due to overland flow using physical principles, 2. Rill Flow. *Water Reso. Res.* 28: 1. 245-250.
12. Hairsine, P.B., Sander, G.C., Rose, C.W. Parlange, J.Y., Hogarth, W.L. Lisle, I., and Rouhipour, H. 1999. Unsteady soil erosion due to rainfall impact: A model of sediment sorting on the hillslope. *J. Hydro.* 199: 115-128.
13. Hogarth, W.L., Parlange, J.Y., Rose, C.W., Sander, G.C., Steenhuis, T.S., and Barry, A. 2004 a. Soil erosion due to rainfall impact with inflow: An Analytical solution with spatial and temporal effects. *J. Hydro.* 295: 140-148.
14. Hogarth, W.L., Rose, C.W., Parlange, J.Y., Sander, G.C., and Carey, G. 2004 b. Soil erosion due to rainfall impact with no inflow: A numerical solution with spatial and temporal effects of sediment settling velocity characteristics. *J. Hydro.* 294: 229-240.
15. Huang, C., Norton, L.D., and Zheng, F. 2001. Reply to comment on vertical hydraulic gradient and run-on water and sediment effects on erosion Processes and Sediment Regimes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 955-956.
16. Kemper, W.D., and Rosenau, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 425-442.
17. Kinnell, P.I. A. 1993. Interrill erodibilities based on the rainfall intensity- flow discharge erosivity factor. *Aust. J. Soil Res.* 31: 319-332.
18. Kinnell, P.I.A., 2005 a. Raindrop- impact- induced erosion processes and prediction: A review. *Hydro. Process.* 19: 2815-2844.
19. Kinnell, P.I.A., 2005 b. Sediment transport by medium to large drops impacting flows at subterminal velocity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 902-905.
20. Laflen, J. M., Elliot, W. J., Flanagan, D. C., Meyer, C. R., and Nearing, M. A. 1997. WEPP-Predicting water erosion using a process-based model. *J. Soil Water Conserv.* 52: 96-102.
21. Lisle, I.G., Coughlan, K.J., and Rose, C.W. 1996. GUDPRO 3. 1: A program for calculating particle size and settling characteristics. ENV Working Paper, 7.96, Faculty of Environmental sciences. Griffith University, Brisbane, Australia. 29 p.
22. Liu, Q.Q., Xiang, H., and Singh, V.P. 2006. A simulation model for unified interrill erosion and rill erosion on hillslopes. *Hydro. Process.* 20: 469-486.
23. Loch, R. J., and Rosewell, C. J. 1992. Laboratory methods for measurement of soil erodibilities (K factor) for the Universal Soil Loss Equation. *Aust. J. Soil Res.* 30: 233-248.
24. Misra, R.K., and Rose, C.W. 1995. An examination of the relationship between erodibility parameters and soil strength. *Aust. J. Soil Res.* 33: 715-732.
25. Misra, R.K., and Rose, C.W. 1996. Application and sensitivity analysis of process- based erosion model GUEST. *European J. Soil Sci.* 47: 593-604.

26. Moss, A.J., and Green, P. 1983. Movement of solids in air and water by raindrop impact. Effects of drop-size and water-depth variations. *Aust. J. Soil Res.* 21: 257-269.
27. Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.J., and Finkner, S.C. 1989. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology. *Trans. ASAE.* 32: 5. 1587-1593.
28. Page, A.L., Miller, R.H., and Jeeney, D.R. 1992 a. *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical properties.* SSSA Pub., Madison. 1750 p.
29. Page, A.L., Miller, R.H., and Jeeney, D.R. 1992 b. *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and mineralogical properties.* SSSA Pub., Madison. 1159 p.
30. Pansu, M., and Gautheyrou, J. 2006. *Handbook of Soil Analysis, Mineralogical, Organic and Inorganic Methods.* Springer. 993 p.
31. Pieri, L., Bittelli, M., Wu, J.Q., Dun, S., Flanagan, D.C., Pisa, P.R., Ventura, F., and Salvatorelli, F. 2007. Using the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model to simulate field-observed runoff and erosion in the Apennines mountain range, Italy. *J. Hydro.* 336: 84-97.
32. Proffitt, A.P.B., and Rose, C.W. 1991. Soil erosion processes: I., The relative importance of rainfall detachment and runoff entrainment. *Aust. J. Soil Res.* 29: 671-683.
33. Proffitt, A.P.B., Hairsine, P.B., and Rose, C.W. 1993. Modeling soil erosion by overland flow: Application over a range of hydraulic conditions. *Trans. ASAE.* 36: 6. 1743-1753.
34. Proffitt, A.P.B., Rose, C.W., and Hairsine, P.B. 1991. Rainfall detachment and deposition: Experiments with low slopes and significant water depths. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 325-332.
35. Rose, C.W., Yu, B., Ghadiri, H., Asadi, H., Parlange, J.Y., Hogarth, W.L., and Hussein, J. 2006. Dynamic erosion of soil in steady sheet flow. *J. Hydro.* 333: 449-458.
36. Rose, C.W. 1985. Development in soil erosion and deposition models. *Adv. Soil Sci.* 2: 2-63.
37. Rose, C.W., Williams, J.R., Sander, G.C., and Barry, D.A. 1983. A mathematical model of soil erosion and deposition processes: I. Theory for a plane land element. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 991-995.
38. Rouhipour, H., Ghadiri, H., and Rose, C.W. 2004. Interaction between flow-driven and rainfall-driven soil erosion processes using two contrasting soil types. Paper No. 992. 5 p. 13th International Soil Conservation Organisation (ISCO) Conference, Brisbane, Australia.
39. Rouhipour, H., Ghadiri, H., and Rose, C.W. 2006. Investigation of the interaction between flow-driven and rainfall-driven erosion processes. *Aust. J. of Soil Res.* 44: 503-514.
40. Sander, G.C., Hairsine, P.B., Rose, C.W., Cassidy, D., Parlange, J.Y., Hogarth,

- W.L., and Lisle, I.G. 1996. Unsteady soil erosion model, analytical solutions and comparison with experimental results. *J. Hydro.* 178: 351-367.
41. Sander, G.C., Hairsine, P.B., Beuselinck, L., and Govers, G. 2002. Steady state sediment transport through an area of net deposition: Multisizes class solution. *Water Reso. Res.* 38: 6. 1087, doi: 10.1029/2001WR000323.
42. Sheridan, G.J., So, H.B., Loch, R.J., Pocknee, C., and Walker, C.M. 2000. Use of laboratory-scale rill and interrill erodibility measurements for the prediction of hillslope- scale erosion on rehabilitated coal mine soils and overburdens. *Aust. J. Soil. Res.* 38: 285-297.
43. Truman, C.C., and Bradford, J.M. 1995. Laboratory determination of interrill soil erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 519-526.
44. Valmis, S., Dimoyiannis, D., and Danalatos, N.G. 2005. Assessing interrill erosion rate from soil aggregate instability index, rainfall intensity and slope angle on cultivated soils in central Greece. *Soil Tillage Res.* 80: 139-147.
45. Wan, Y., and El-Swaify, S.A. 1999. Runoff and soil erosion as affected by plastic mulch in a Hawaiian pineapple field. *Soil Tillage Res.* 52: 29-35.
46. Yu, B., and Rosewell, C.J. 2001. Evaluation of WEPP for runoff and soil loss prediction at Gunnedah, NSW, Australia. *Aust. J. Soil Res.* 39: 1131-1145.
47. Zhang, X.C., Li, Z.B., and Ding, W.F. 2005. Validation of WEPP sediment feedback relationships using spatially distributed rill erosion data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1440-1447.
48. Zhang, X.C., Nearing, M.A., Miller, W.P., Norton, L.D., and West, L.T. 1998. Modeling interrill sediment delivery. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 438-444.
49. Zheng, F., Merrill, S.D., Huang, C., Tanaka, D.L., Darboux, F., Liebig, M.A., and Halvorson, A.D. 2004. Runoff, soil erosion and erodibility of conservation reserve program land under crop and hay production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1332-1341.
50. Walkley, A., and Black, I.A. 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.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 18(4), 2011

<http://jwfst.gau.ac.ir>

Study on process changes in some indices of soil erodibility and depositability using rainfall simulator

***M. Mahmoudabadi¹ and H. Rohipoor²**

¹Assitant Prof., Dept. of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University, Kerman, ²Associate Prof., Research Institute Forestry and Rangeland, Tehran

Received: 2010-8-1; Accepted: 2011-6-15

Abstract

Susceptibility of soil to rain-induced erosion processes is assumed as detachability and re-detachability parameters. In some conditions, generated overland flow can entrain and transport soil particles therefore, affects on the erodibility results. This study was conducted to investigate the effect of process changes in rain- induced erosion experiments on these parameters using four scenarios. Different rain intensities and flume slopes were simulated by a rainfall simulator on 3 cropland soils. The results showed that including stream powers less than the critical values and considering steady state conditions, the re-detachability was 100-212 order of magnitude of the detachability, while considering all stream powers, this ratio was from 62 to 122. Depending on the soil properties, there are some differences between two conditions of steady and unsteady. Compared to the former status, taking into account all stream powers, detachability and re-detachability parameters were over calculated 2-4 and 1.2-2.5 times, respectively. This finding reveals the importance of experimental design on determination of susceptibilty to rain-induced erosion.

Keywords: Rainfall simulation; Detachability indicators; Depositability; Critical stream power

*Corresponding Author; Email: mahmoodabadai@mail.uk.ac.ir