

## تغییرات دینامیک غلظت رسوب در فرسایش شیاری در آزمایش‌های مزرعه‌ای

حسین اسدی<sup>۱\*</sup>، محمد علی گلی کلرود<sup>۲</sup> و منوچهر گرجی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۳/۲۵)

DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.20.78.125

### چکیده

این مطالعه با هدف بررسی تغییرات دینامیک فرسایش شیاری و همچنین بررسی کارایی مدل Hairsine-Rose در برآورد غلظت رسوب انجام شده است. آزمایش‌ها در ایستگاه تحقیقات حفاظت خاک و آب دانشگاه تهران واقع در منطقه کوهین استان قزوین انجام شد. چهار دبی جریان در سه شیب مختلف در شیاریهایی دست‌ساز دوزنقه‌ای به طول ۳ متر و عرض کف ۵ سانتی‌متر مورد آزمون قرار گرفت. در هر آزمایش، رواناب خروجی در فواصل زمانی مختلف جمع‌آوری و برای تعیین غلظت رسوب به آزمایشگاه متقل گردید. تمام آزمایش‌ها دو بار و در فصل‌های پاییز و بهار انجام شد. نتایج بیانگر تغییرات دینامیک غلظت رسوب بود که تابعی از دبی جریان، شیب بستر و فصل بود. غلظت رسوب در دقایق اولیه آزمایش زیاد بود، اما با گذشت زمان کاهش یافته و به یک حالت کم و بیش پایدار رسید. اثر شدت جریان و شیب در شرایط ناپایدار اولیه آشکارتر از شرایط پایدار نهایی بود. همچنین غلظت رسوب در آزمایش‌های فصل پاییز بیش از آزمایش‌های فصل بهار بود، هرچند که روند تغییرات زمانی مشابه بود. مدل Hairsine-Rose در برآورد غلظت رسوب در قدرت جریان‌های کم بهتر عمل نمود، اما در کل دارای بیش برآوردی بسیار زیادی در تمام دامنه بود که بیانگر اشکال ساختاری مدل است.

واژه‌های کلیدی: اراضی دیم، فرسایش خاک، قدرت جریان، ضریب کارایی

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۲. گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: asadi@guilan.ac.ir , ho.asadi@ut.ac.ir

## مقدمه

فرسایش خاک و پیامدهای کوتاه و بلندمدت ناشی از آن، از مهم ترین مشکلات محیطی شناخته شده است. فرسایش خاک عامل اصلی تخریب اراضی و منبع اصلی آلودگی غیرمتمرکز منابع آب می باشد. بنابراین تخریب خاک و کاهش کیفیت و توان تولید آن، مشکلات ناشی از رسوب از جمله پر شدن مخازن و آبگیرهای طبیعی، گل آلودگی و آلودگی شیمیایی منابع آب و تأثیر بر چرخه کربن که مرتبط با موضوع تغییر اقلیم و گرمایش زمین است، از جمله پیامدهای ناخوشایند فرسایش خاک هستند (۳ و ۱۸). افزایش توجه به این نگرانی ها، انگیزه ای شدید برای اصلاح روش های حفاظت خاک ایجاد کرده که خود نیازمند شناخت و درک فرآیندهای فرسایش خاک و بهره گیری از مدل های پیش بینی و شبیه سازی هدر رفت خاک است (۲۰).

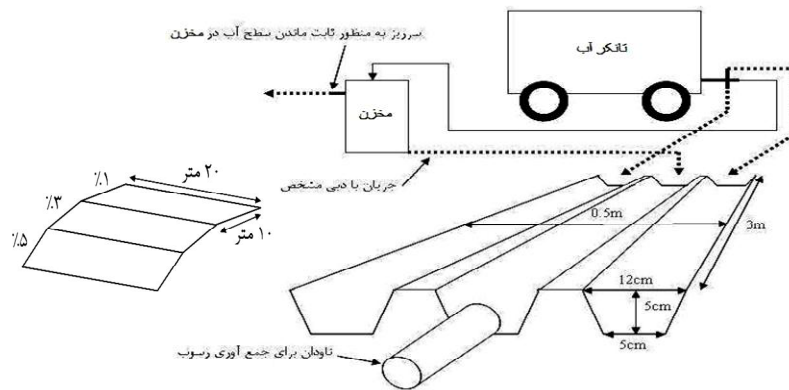
فرسایش خاک به شکل های گوناگون رخ می دهد و طی آن ذرات و اجزای تشکیل دهنده خاک تحت تأثیر یک عامل یا نیروی فرساینده از بستر اصلی خود جدا شده و به مکانی دیگر منتقل می گردند. فرسایش آبی تحت تأثیر بارندگی و رواناب رخ می دهد و بر این اساس در مطالعه این نوع فرسایش، فرآیندهای فرسایش به دو گروه فرآیندهای ناشی از بارندگی و فرآیندهای ناشی از جریان دسته بندی شده اند (۵). از سوی دیگر و برای اهداف مدل سازی نیز، فرسایش سطحی بر روی دامنه ها و در اراضی کشاورزی و مرتعی به دو نوع فرسایش شیاری و بین شیاری دسته بندی شده است (۱۷ و ۲۲). در فرسایش شیاری، جدا کردن ذرات از توده خاک و در نتیجه مقدار فرسایش و تلفات خاک، تابعی از قدرت فرسایندهای جریان و فرسایش پذیری خاک است. قدرت فرسایندهای جریان تابعی از شدت (دبی) جریان و شیب زمین است. البته در این مورد در مطالعات و مدل سازی فرسایش، معیارها و مدل های مفهومی مختلفی برای جداسازی در شیاریها در نظر گرفته شده است (۳۰). از جمله می توان روابط وابسته به شدت دبی جریان (۲۲)، تنش برشی هیدرولیکی (۲۷) و قدرت جریان (۲۸) را نام برد.

میانگین و بیشینه غلظت رسوب در شیب های تند بیشتر

است و با افزایش رواناب، تلفات خاک افزایش می یابد (۳۷). نتایج مطالعه فان و وو (۹) نیز نشان داد که افزایش فرسایش تا شیب های ۶۰ درجه است و بعد از آن مجدداً کاهش می یابد. علاوه بر این، مطالعات گوناگونی (۴، ۵، ۶، ۱۱، ۳۲، ۳۵، ۳۷ و ۳۹) نیز در خصوص تغییرات غلظت و توزیع اندازه ذرات رسوب و فرآیندهای فرسایشی ناشی از جریان ورقه ای و شیاری انجام شده است که در مواردی دارای نتایج متفاوت و متناقضی می باشد.

به طور کلی، غلظت رسوب در زمان های اولیه رخداد فرسایشی زیاد است و با گذشت زمان به سرعت کاهش یافته و به یک حالت کم و بیش پایدار می رسد (۶، ۱۴ و ۳۹). با استفاده از تئوری هیرساین و رز (۱۳) می توان غلظت رسوب را برای یک جریان شیاری برآورد نمود. بیزولینک و همکاران (۷) در حین ارزیابی مدل ساندر و همکاران (۳۶) که در آن براساس تئوری هیرساین و رز (۱۳) تنها فرآیند جهش - تعلیق در نظر گرفته شده است، دریافتند که احتمالاً فرآیندهایی نظیر چرخش نیز در فرسایش ناشی از جریان دخیل هستند. راه حل های تقریبی (۳۴) و تحلیلی (۳۹) تئوری فوق نیز بیانگر تفاوت در مقدار مشاهده شده با مقدار برآوردی است. مطالعات اسدی و همکاران (۴ و ۶) و شی و همکاران (۳۷) مؤید وجود دو نوع فرآیند انتقال به صورت جهش - تعلیق و انتقال به صورت بار بستر (با مکانیسم چرخش) بود. نتایج اسدی و همکاران (۴) نیز نشان داد که مدل پیشنهادی هیرساین و رز در برآورد غلظت رسوب در قدرت جریان های کم بهتر از برآورد آن در قدرت جریان های زیاد عمل می کند.

اغلب تحقیقات انجام شده در خصوص فرآیندهای فرسایشی ناشی از جریان و تغییرات غلظت رسوب در شرایط آزمایشگاهی بوده است و در بهترین حالت برای نزدیک شدن به شرایط طبیعت، از فلوم زهکش دار (۳۹) استفاده شده است. پژوهش حاضر با توجه به اهمیت و ضرورت مسئله و با فرض اینکه مقدار رسوب با شدت جریان و شیب زمین و در نتیجه فرآیندهای مؤثر در فرسایش رابطه دارد، با هدف بررسی اثر



شکل ۱. شمای کلی از قطعات شیب و سیستم اجرا شده بر روی زمین به منظور انجام آزمایش‌ها

ذرات اولیه خاک به روش هیدرومتری با قرائت کامل (۱۵)، چگالی ظاهری خاک با روش کلوخه، pH در سوسپانسیون خاک به محلول ۰/۰۱ مولار  $\text{CaCl}_2$  به نسبت ۱ به ۲/۵، EC در نسبت ۱ به ۲ خاک به آب مقطر، ماده آلی از روش والکی-بلاک (۲۹) و کربنات کلسیم معادل خاک به روش خنثی‌سازی با اسیدکلریدریک (۳۸) اندازه‌گیری شدند. نفوذپذیری خاک در صحرا و با روش استوانه‌های مضاعف (۱۲) اندازه‌گیری شد.

۲. آماده‌سازی بستر آزمایش: به منظور اجرای آزمایش‌ها، در هر شیب برای اعمال هر چهار دبی جریان، چهار کرت در مجاورت یکدیگر احداث گردید. در هر کرت بعد از انجام عملیات شخم و دیسک، تعداد سه شیار با طول ۳ متر و با مقطع دوزنقه‌ای به ابعاد عرض کف، عمق و عرض بالا به ترتیب ۵، ۵ و ۱۲ سانتی‌متر توسط قالب چوبی ایجاد شد (شکل ۱). این ابعاد براساس ابعاد شیار در مطالعات قبلی آزمایشگاهی (۴ و ۶) انتخاب شد. عملیات آماده‌سازی بستر در فصل بهار دوباره بر روی همان قطعات انجام شد.

۳. شبیه‌سازی جریان: قبل از انجام هر آزمایش، خاک با یک جریان آرام غیر فرساینده به مدت یک شب (حداقل ۱۲ ساعت) اشباع گردید. از خروجی تانکر آب، سه انشعاب گرفته شد که دو انشعاب از آن به شیارهای جانبی وارد می‌گردید. دو شیار جانبی به عنوان حامی عمل کرده و در هنگام عبور جریان از شیار وسط، از حرکت جانبی آب نفوذ یافته به طرفین جلوگیری

درجه شیب و دبی جریان بر تغییرات زمانی غلظت رسوب در آزمایش‌های کنترل شده و تحت شرایط طبیعی در اراضی زراعی دیم در ایستگاه تحقیقات حفاظت خاک و آب کوهین صورت پذیرفت.

## مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در ایستگاه تحقیقات حفاظت خاک و آب دانشگاه تهران، واقع در منطقه کوهین استان قزوین اجرا شد. بعد از نمونه‌برداری از خاک مناطق مختلف ایستگاه و تجزیه و تحلیل آن در آزمایشگاه، سه قطعه زمین در مجاورت یکدیگر که خاک آن دارای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی یکسان بودند، انتخاب شدند (شکل ۱). آنالیز واریانس و مقایسه میانگین ویژگی‌های خاک در بین قطعات به ترتیب در قالب طرح بلوک‌های تصادفی و LSD انجام شد. آزمایش‌ها با چهار دبی جریان ۰/۲۸، ۰/۰۸۳، ۰/۱۶۷ و ۰/۲ لیتر در ثانیه در سه شیب ۱، ۳ و ۵ درصد در دو فصل پاییز و بهار انجام شد. این ترکیب‌های تیماری (دبی جریان و شیب) براساس مطالعات پیشین (۴) و محدودیت‌های اجرایی و تکنیکی انتخاب شده‌اند. مراحل انجام آزمایش به صورت زیر بود:

۱. تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک: بعد از نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر از شیب‌های ۱، ۳ و ۵ درصد با سه تکرار و انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، توزیع اندازه

رسوب به صورت ادامه داری از منطقه آزمایش جریان داشته باشند) به عنوان ملاک حرکت اولیه آنها (۲۴ و ۳۳) استفاده شد. در آخرین مرحله و بعد از مشاهده شروع حرکت معنی دار ذرات، دبی جریان با سه تکرار اندازه گیری شد و قدرت جریان آستانه با رابطه (۳) تعیین گردید.

۶. تجزیه و تحلیل نتایج: در آزمایش های مختلف، غلظت رسوب خروجی از فلوم در زمان های مختلف تعیین شد و برای دبی های جریان و شیب های مختلف در هر دو فصل مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین غلظت رسوب اندازه گیری شده در شرایط پایدار با غلظت رسوب برآوردی با مدل هیرساین و رز مقایسه گردید. طبق مدل هیرساین و رز (۱۳) غلظت رسوب کل ( $c_t$ ) برحسب کیلوگرم بر مترمکعب برای یک جریان شیبی در حالت پایدار، با استفاده از رابطه زیر برآورد می شود:

$$c_t = \frac{F(\Omega - \Omega_s)}{v_{av}gD} \left( \frac{\delta}{\delta - \rho} \right) * \frac{W_b}{W_b + W_s} \quad [1]$$

که در آن؛  $(\Omega - \Omega_s)$  قدرت جریان مازاد ( $W m^{-2}$ )،  $F$  بخشی از قدرت جریان که صرف کنده شدن و کنده شدن مجدد ذرات می گردد و برابر  $0/2$  در نظر گرفته می شود،  $v_{av}$  میانگین سرعت ته نشینی مؤثر ذرات خاک ( $m s^{-1}$ )،  $g$  شتاب ثقل ( $m s^{-2}$ )،  $D$  عمق جریان ( $m$ )،  $\delta$  دانسیته ذره ( $kg m^{-3}$ )،  $\rho$  دانسیته سیال ( $kg m^{-3}$ )،  $W_b$  عرض شیار ( $m$ ) و  $W_s$  طول دیواره جانبی خیس شده ( $m$ ) است.

در تحقیق حاضر، قدرت جریان ( $\Omega$ )، قدرت جریان آستانه ( $\Omega_s$ ) و تنش برشی جریان ( $\tau$ ) با معادله (۲)، (۳) و (۴) برآورد شد:

$$\Omega = \rho g S q \quad (W m^{-2}) \quad [2]$$

$$\Omega_s = \rho g S q_s \quad (W m^{-2}) \quad [3]$$

$$\tau = \rho g S h \quad (N m^{-2}) \quad [4]$$

که در آن؛  $S$  شیب (سینوس زاویه شیب)،  $q$  شدت جریان آب در واحد عرض ( $s^{-1} m^2$ ) در هر آزمایش (از تقسیم دبی جریان بر عرض شیار)،  $h$  عمق جریان ( $m$ ) و  $q_s$  شدت جریان آب در واحد عرض ( $s^{-1} m^2$ ) در آزمایش تعیین آستانه حرکت

می نمایند. یک انشعاب باقی مانده به مخزن منتقل می شد. مخزن مورد نظر دارای دو خروجی یکی در بالا به عنوان سرریز و یکی در پایین به عنوان خروجی جریان به شیار اصلی مورد نظر در آزمایش بود. خروجی پایین دارای شیر قابل تنظیم برای اعمال دبی های معین بود. سرریز، سطح آب را ثابت نگه داشته تا دبی مورد نظر تحت بار آبی مشخص بدون افت فشار در طول آزمایش از خروجی پایین اعمال گردد. برای تنظیم دبی مورد نظر، شیر خروجی مخزن با گذراندن آزمون های متوالی واسنجی گردید.

۴. اندازه گیری ها: با شروع جریان در دبی و شیب مشخص، در زمان های ۱، ۲، ۳، ۵، ۷، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ دقیقه از شروع آزمون، نمونه رواناب برای تعیین غلظت رسوب تهیه شد. جرم نمونه ها بعد از انتقال به آزمایشگاه قبل و بعد از قراردادن در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس تعیین شد. در هنگام آزمایش، عمق جریان با خط کش به دقت اندازه گیری شد. سرعت جریان با سه تکرار با روش رنگ سنجی اندازه گیری شد. ۵. تعیین آستانه حرکت ذرات: در هر شیب، آزمون های متوالی برای تعیین آستانه حرکت ذرات (تنش برشی بحرانی و قدرت جریان آستانه) انجام شد. به این صورت که دبی از حالت حداقل به تدریج افزایش داده شد تا جریانی که موجب شروع حرکت ذرات می گردد، تعیین شود. برای این منظور شیارهایی با ویژگی شیارهای اصلی مورد استفاده در آزمایش در هر شیب احداث شد. بعد از حداقل ۱۰ ساعت اشباع شدن، آزمون با جریان آرام و غیر فرساینده شروع می شد. در هر مرحله بعد از چند دقیقه جریان به حالت پایدار می رسید که اگر در آن شرایط حرکت ذرات دیده نمی شد، دبی جریان مجدداً افزایش می یافت و این کار تا زمان شروع حرکت ذرات تکرار می شد. آزمایش در هفته های متوالی تکرار گردید. تشخیص اینکه چه لحظه ای را باید به عنوان شروع حرکت ذرات و در نتیجه تنش برشی بحرانی و یا قدرت جریان آستانه در نظر گرفت، کار مشکلی است. در این تحقیق از حرکت معنی دار ذرات (ذرات از موقعیت های مختلف شروع به حرکت کنند به طوری که ذرات

جدول ۱. میانگین برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی

CaCO <sub>3</sub> (%)	OM (%)	EC (μS cm <sup>-1</sup> )	pH	بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	ρ <sub>b</sub> (g cm <sup>-3</sup> )	درصد شیب
۱۱/۵	۰/۹	۵۵/۳ <sup>a</sup>	۷/۴	لوم سیلتی	۲۶	۵۲	۲۲	۱/۵ <sup>a</sup>	۱
۱۱/۶	۱/۰	۴۹/۶ <sup>b</sup>	۷/۴	لوم سیلتی	۲۶	۵۱	۲۳	۱/۲ <sup>b</sup>	۳
۱۱/۶	۰/۸	۴۶/۶ <sup>b</sup>	۷/۴	لوم سیلتی	۲۱	۵۴	۲۵	۱/۴ <sup>a</sup>	۵

ρ<sub>b</sub>: چگالی ظاهری خاک، pH: واکنش خاک، EC: هدایت الکتریکی خاک در عصاره اشباع، OM: ماده آلی، CaCO<sub>3</sub>: کربنات کلسیم معادل، هر داده میانگین سه تکرار است و حروف متفاوت نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد

ذرات در شیب مورد نظر است.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [9]$$

$$E_{\log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log O_i - \log P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\log O_i - \overline{\log O})^2} \quad [10]$$

در این معادله‌ها، O<sub>i</sub> و P<sub>i</sub> به ترتیب مقدار مشاهده شده و مقدار برآورد شده،  $\bar{O}$  و  $\bar{P}$  میانگین مقادیر مشاهده و برآورده شده، n تعداد داده‌ها، b شیب خط برازش شده به مقادیر برآورده هستند.

### نتایج و بحث

میانگین برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در سه قطعه شیب محل انجام آزمایش‌ها در جدول (۱) آمده است. اغلب ویژگی‌های خاک در هر سه شیب تقریباً یکسان می‌باشند. سه شیب تنها از نظر چگالی ظاهری و قابلیت هدایت الکتریکی عصاره خاک دارای تفاوت معنی‌دار هستند. قبل از انجام آزمایش‌ها، زمین شخم و دیسک خورده و سعی شد که این تفاوت‌ها نیز حداقل گردد. لازم به یادآوری است که آزمایش‌های فرسایش، بعد از اشباع خاک به مدت حداقل ۱۰ ساعت و همزمان با عبور جریان آب از شیارهای حامی انجام شد. میانگین برخی از ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در آزمایش‌های مختلف در جدول (۲) آمده است.

برای تعیین میانگین سرعت ته‌نشینی مؤثر ذرات (s<sup>-1</sup>m، v<sub>av</sub>)، ابتدا از معادله چنگ (۸) برای برآورد سرعت ته‌نشینی هر یک از کلاس‌های اندازه‌ای (v<sub>i</sub>) استفاده شد:

$$v_i = \frac{\gamma}{d} \left[ (25 + 1/2 d_*^2)^{0.5} - 5 \right]^{1.5} \quad [5]$$

$$d_* = d \left( \frac{(\delta - \rho)\rho g}{\eta^2} \right)^{1/3} \quad [6]$$

که در آن؛ γ ویسکوزیته سینماتیک آب (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) و d میانگین قطر کلاس اندازه‌ای مورد نظر (m) است. در نهایت با توجه به توزیع اندازه ذرات خاک (داده‌های الکتر) و عمق جریان در هر آزمایش، میانگین سرعت ته‌نشینی مؤثر ذرات برای آن آزمایش محاسبه شد.

به منظور ارزیابی کارایی مدل برای تخمین غلظت رسوب، از معیارهای ارزیابی ضریب تبیین (R<sup>2</sup>)، ضریب تبیین تعدیل شده (wR<sup>2</sup>)، ضریب کارایی ناش - ساتکلیف (E) و ضریب کارایی لگاریتمی (E<sub>log</sub>) استفاده شد (۱۶):

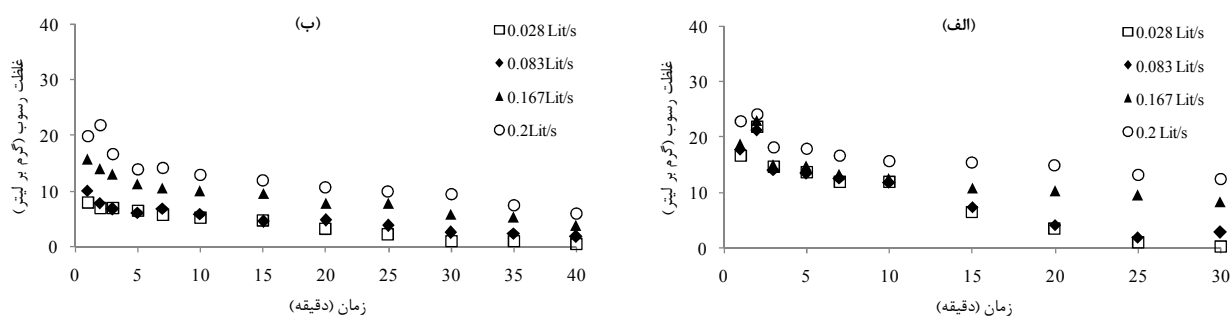
$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad [7]$$

$$wR^2 = \begin{cases} |b| \cdot R^2 & \text{for } b \leq 1 \\ |b|^{-1} \cdot R^2 & \text{for } b > 1 \end{cases} \quad [8]$$

جدول ۲. میانگین برخی از ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در آزمایش‌ها

$\omega$ ( $W m^{-2}$ )	$\tau$ ( $s^{-1} m^{-2} kg$ )	$q \times 10^3$ ( $s^{-1} m^2$ )	دبی جریان ( $L s^{-1}$ )	شیب ( $m m^{-1}$ )
۰/۰۵۰۷	۰/۱۹۶	۰/۵۶	۰/۲۷	۰/۰۲۸
۰/۱۴۵۰	۰/۲۳۹	۱/۶۶	۰/۵۲	۰/۰۸۳
۰/۲۸۶۶	۰/۳۴۲	۳/۳۴	۰/۸۹	۰/۱۶۷
۰/۳۳۷۳	۰/۳۹۱	۴/۰۰	۰/۹۳	۰/۲۰۰
۰/۱۵۵۰	۰/۴۴۰	۰/۵۶	۰/۳۶	۰/۰۲۸
۰/۴۵۱۱	۰/۵۸۷	۱/۶۶	۰/۸۰	۰/۰۸۳
۰/۸۸۳۱	۰/۷۹۲	۳/۳۴	۱/۱۷	۰/۱۶۷
۱/۰۴۸۱	۰/۸۸۰	۴/۰۰	۱/۲۶	۰/۲۰۰
۰/۲۶۳۴	۰/۴۸۹	۰/۵۶	۰/۵۵	۰/۰۲۸
۰/۷۶۶۰	۰/۷۳۴	۱/۶۶	۱/۰۷	۰/۰۸۳
۱/۵۱۲۷	۱/۰۷۶	۳/۳۴	۱/۴۵	۰/۱۶۷
۱/۷۷۸۷	۱/۲۲۳	۴/۰۰	۱/۵۲	۰/۲۰۰

q: دبی در واحد عرض جریان،  $\tau$ : تنش برشی جریان،  $\omega$ : قدرت جریان

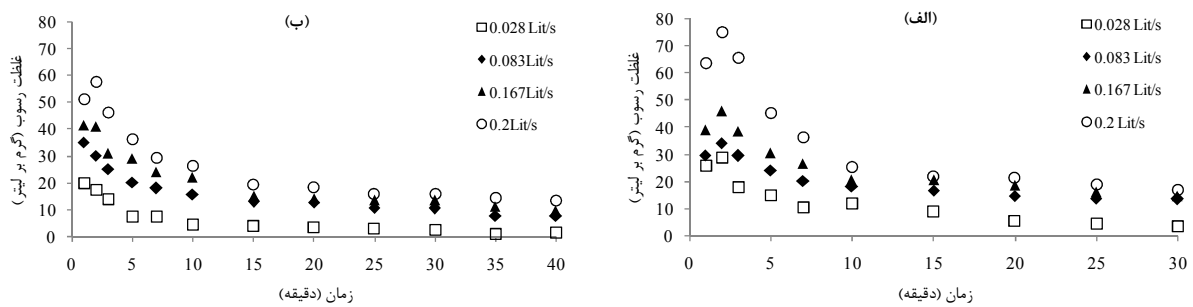


شکل ۳. تغییرات غلظت رسوب با زمان در شدت جریان‌های مختلف در شیب یک درصد در الف) پاییز و ب) بهار

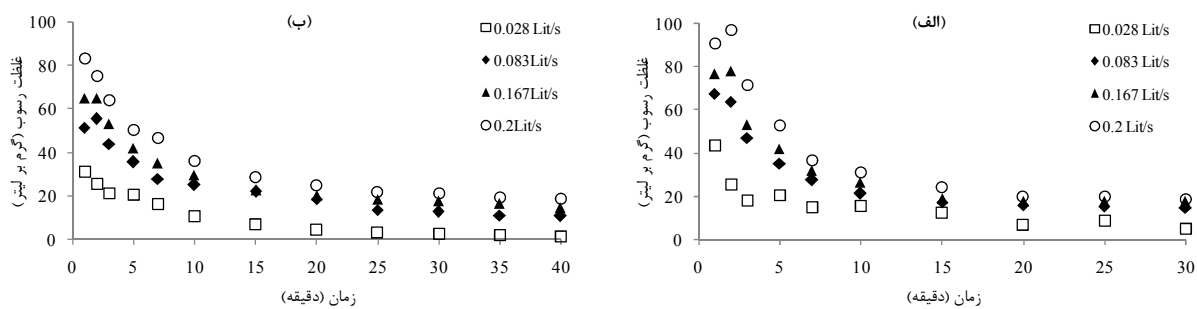
می‌یابد و در نهایت به یک حالت کم و بیش پایدار می‌رسد. البته در برخی از مطالعات (۱) که بر روی خاک‌های مستعد تشکیل اندوده سطحی و تحت بارندگی انجام شده است، تغییرات زمانی غلظت رسوب متفاوت از این روند عمومی است. دلیل بالاتر بودن غلظت رسوب در ابتدای آزمایش را می‌توان قرار داشتن جریان در حالت حداکثر توان حمل دانست، زیرا در این شرایط به دلیل عواملی چون شخم و دیسک‌زدن، فروکشی ناشی از مرطوب شدن ناگهانی خاک (۲۱ و ۲۵) و دوره خشکی طولانی تابستانه، محدودیتی از نظر جدایش ذرات وجود ندارد.

در شکل (۳) تا (۵) تغییرات غلظت رسوب با زمان در تیمارهای مختلف به ترتیب در سه شیب ۱، ۳ و ۵ درصد و در دو فصل پاییز و بهار آمده است. در جدول (۳) نیز میانگین کل و میانگین پایدار غلظت رسوب در شیب‌ها و شدت جریان‌های مختلف برای دو فصل پاییز و بهار آمده است. همان‌گونه که دیده می‌شود.

الف) همانند بسیاری از مطالعات پیشین (۶، ۱۱، ۲۳، ۳۱، ۳۲ و ۳۵)، به‌طور کلی غلظت رسوب در آغاز آزمایش (یک الی دو دقیقه اول)، ابتدا افزایش یافته و سپس با گذشت زمان کاهش



شکل ۴. تغییرات غلظت رسوب با زمان در شدت جریان‌های مختلف در شیب سه درصد در الف) پاییز و ب) بهار



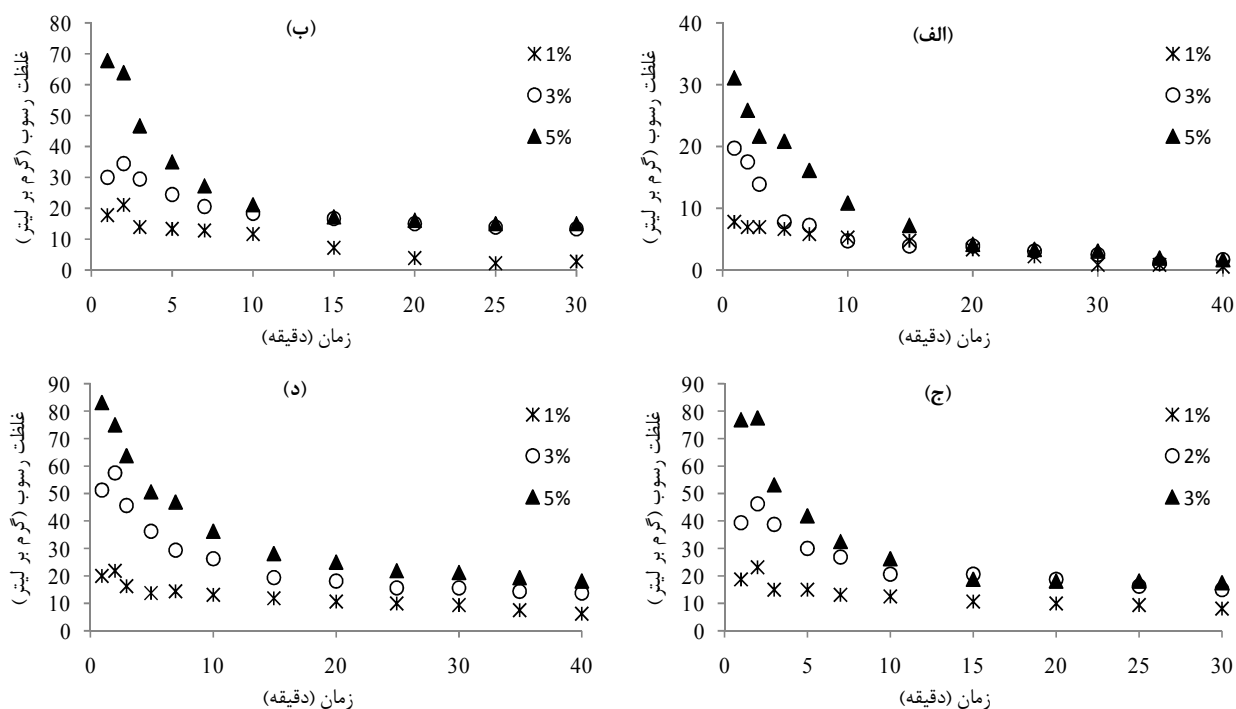
شکل ۵. تغییرات غلظت رسوب با زمان در شدت جریان‌های مختلف در شیب پنج درصد در الف) پاییز و ب) بهار

ابتدای آزمایش در حالت "حداکثر توان حمل" و در حالت پایدار در شرایط "محدودیت جدایش" باشد، این نتایج تا حدودی قابل توضیح است چرا که توان حمل جریان با تنش برشی به نمای  $1/5$  متناسب است در حالی که ظرفیت جداسازی جریان با تنش برشی به نمای یک متناسب (۱۰) می‌باشد.

دامنه تغییرات غلظت رسوب در زمان‌ها و شدت جریان‌های مختلف، در شیب یک درصد حداقل و بین  $0$  تا  $25$  گرم در لیتر و در شیب پنج درصد حداکثر و بین  $0$  تا  $100$  گرم در لیتر است. بررسی بیش‌تر داده‌ها (شکل ۶ و جدول ۳) نشان می‌دهد که اثر شیب بر غلظت رسوب تابعی از دبی جریان و فصل آزمایش است، به‌گونه‌ای که در دبی جریان حداقل ( $0/28$  لیتر بر ثانیه) تفاوت بین سه شیب از نظر غلظت رسوب به‌ویژه در شرایط پایدار چندان فاحش نیست. از سوی دیگر، هرچند که در پاییز تفاوت بین دو شیب ۳ و ۵ درصد در حالت پایدار کم است، اما در بهار، هر سه شیب دارای تفاوت محرز در تمام مدت آزمایش هستند.

به بیان دیگر، در ابتدای آزمایش به دلیل وفور ذرات ریز از قبل جدا شده، جریان می‌تواند در حد توان حمل خود ذره منتقل نماید. با گذشت زمان و کاسته شدن از ذرات از قبل جدا شده، شرایط جریان از حالت "حد توان حمل" خارج شده و در طی حدود  $10$  تا  $15$  دقیقه با اتمام ذرات از قبل جدا شده به شرایط محدودیت جدایش تغییر فاز می‌یابد که با توجه به توان کم و بیش ثابت جداسازی جریان این حد ثابت می‌ماند.

در هر شیب، با افزایش دبی جریان و به تبع آن تنش برشی و قدرت جریان (جدول ۲)، غلظت رسوب به میزان متفاوتی افزایش می‌یابد (شکل‌های ۳-۵ و جدول ۳). بررسی داده‌ها نشان داد که افزایش غلظت رسوب با افزایش دبی جریان در شرایط ناپایدار اولیه (سه دقیقه اول) بسیار بیشتر از شرایط پایدار است (به‌عنوان مثال، میزان افزایش غلظت رسوب در دبی  $0/2$  در مقایسه با دبی  $0/38$  لیتر در ثانیه در شرایط ناپایدار بین  $1/8$  تا  $4/5$  برابر میزان افزایش غلظت رسوب در شرایط پایدار است). تنها استثناء در این مورد نتایج مربوط به شیب ۱٪ در پاییز بود. چنانچه شرایط در



شکل ۶. اثر شیب بر تغییرات غلظت رسوب در (الف) شدت جریان ۰/۲۸ لیتر بر ثانیه در فصل بهار، (ب) شدت جریان ۰/۸۳ لیتر بر ثانیه در فصل پاییز، (ج) شدت جریان ۰/۱۶۷ لیتر بر ثانیه در فصل پاییز، و (د) شدت جریان ۰/۲ لیتر بر ثانیه در فصل بهار

جدول ۳. میانگین کل و میانگین پایدار غلظت رسوب (گرم در لیتر) در شیب‌ها و شدت جریان‌های مختلف

		۰/۱۶۷		۰/۸۳		۰/۲۸		شیب (%)	میانگین کل
دبی (لیتر در ثانیه)		بهار	پاییز	بهار	پاییز	بهار	پاییز		
۰/۲۰۰	بهار	۹/۶۷	۱۳/۷۳	۵/۳۸	۱۰/۸۲	۴/۴۰	۱۰/۲۹	۱	میانگین کل
	پاییز	۲۲/۴۱	۲۷/۳۹	۱۷/۴۳	۲۱/۶۵	۷/۳۳	۱۳/۳۷	۳	
	بهار	۳۳/۴۴	۳۸/۱۴	۲۷/۴۲	۳۲/۶۹	۱۲/۴۱	۱۷/۳۳	۵	
	پاییز	۲۱/۸۴	۲۶/۴۲	۱۶/۷۴	۲۱/۷۲	۸/۵	۱۳/۶۷	میانگین	
	بهار	۵/۱۷	۹/۵۲	۲/۳۰	۳/۷	۰/۸۹	۱/۷۱	۱	
	پاییز	۱۱/۷۶	۱۶/۸۲	۸/۹۸	۱۴/۲۰	۱/۸۴	۴/۵۲	۳	
	بهار	۱۶/۵۲	۱۷/۹۵	۱۱/۶۳	۱۵/۴۸	۲/۲۳	۷/۵	۵	
	پاییز	۱۱/۱۵	۱۴/۷۶	۷/۶۴	۱۰/۹۲	۱/۶۵	۴/۴۲	میانگین	

غیرمستقیم بیانگر اثر عوامل زیستی در افزایش مقاومت خاک در مقابل عوامل فرساینده باشد. علاوه بر این و به‌طور کلی، غلظت رسوب (و به‌بیان دیگر میزان تلفات خاک) در پاییز به‌طور مشخصی بیشتر از فصل بهار است (جدول ۳). گل‌آلودگی بالاتر رودخانه‌ها در فصل پاییز نسبت به فصل بهار مؤید این

(د) هرچند که روند کلی تغییرات غلظت رسوب در دو فصل پاییز و بهار مشابه است، اما دامنه تغییرات آن و برهمکنش شیب و شدت جریان در این دو فصل متفاوت است. دامنه تغییرات غلظت رسوب در فصل پاییز و به‌ویژه در شیب ۵ درصد بسیار بیشتر از فصل بهار است. این موضوع می‌تواند به‌طور



اما با یافته‌های نیرینگ (۲۶) مبنی بر اینکه مدل‌های فرسایش تمایل به بیش برآوردی مقادیر کم فرسایش و کم‌برآوردی مقادیر زیاد دارند و نیز نتایج ارزیابی معادله بین‌شیاری مدل WEPP توسط اسدی و همکاران (۲) متفاوت است. تفاوت چندانی بین نتایج مربوط به آزمایش‌های پاییز و بهار وجود ندارد. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، قدرت جریان در آزمایش‌های مربوط به شیب ۱ درصد در دامنه ۵/۵ تا ۳۳۷/۰ وات بر مترمربع و برای آزمایش‌های شیب ۳ و ۵ درصد از ۱۵۵/۰ تا ۱۷۷/۰ وات بر مترمربع تغییر می‌کند. بنابراین به‌نظر می‌رسد کارایی مدل هیرساین و رز (معادله ۱) در قدرت جریان‌های کم نسبتاً مناسب است اما با افزایش قدرت جریان توانایی تخمین صحیح میزان فرسایش (غلظت رسوب) را ندارد. اسدی و همکاران (۴) دلیل بیش برآوردی مدل را نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده، متفاوت بودن فرآیندهای فرسایشی و انتقال رسوب واقعی حاکم (شامل فرآیندهای جهش - تعلیق و چرخش) و فرآیندهای در نظر گرفته شده توسط مدل می‌دانند. اسدی و همکاران (۴ و ۶) نشان داده‌اند که در فرسایش شیاری دو نوع فرآیند جهش - تعلیق و چرخش فعال هستند و اهمیت نسبی فرآیند چرخش که مسئول انتقال ذرات درشت‌تر است با افزایش قدرت جریان افزایش می‌یابد. وجود دو نوع فرآیند جهش - تعلیق و چرخش توسط محققین دیگر (۳۷) نیز تأیید شده است. در مدل هیرساین و رز تنها فرآیند جهش - تعلیق در نظر گرفته شده است.

به‌منظور ارزیابی کمی و آماری نتایج، در جدول (۵) ضریب تبیین ( $R^2$ )، ضریب تبیین تعدیل شده ( $wR^2$ )، ضریب کارایی ناش - ساتکلیف (E) و ضریب کارایی لگاریتمی ( $E_{log}$ ) مدل برای تخمین غلظت رسوب در سه شیب مورد مطالعه و در دو فصل پاییز و بهار آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، براساس ضریب تبیین در اغلب موارد، مدل وضعیتی مناسب و براساس ضریب کارایی در همه موارد، مدل عملکرد غیر قابل قبولی دارد. ضریب تبیین در همه موارد به‌ویژه در شیب ۵ درصد بسیار بالا و معنی‌دار است. این بدان دلیل است که  $R^2$

موضوع است. هرچند به‌طور قطعی نمی‌توان در مورد تمام خاک‌ها و مناطق توضیح یکسانی ارائه داد، اما در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌دلیل خشکی بیش‌ازحد خاک در طول تابستان و به‌دنبال آن کاهش بسیاری از فعالیت‌های زیستی، معمولاً در فصل پاییز با اولین بارندگی‌ها دو اتفاق رخ می‌دهد. اول اینکه ذرات ریز جدا شده در طول چندین ماه (که به‌دلایل مختلفی از جمله خشکی، تردد دام، فعالیت جانوران)، با اولین بارندگی‌ها منتقل می‌شوند. دوم اینکه به‌دلیل مکش بسیار بالای خاک به‌ویژه در لایه سطحی با اولین بارندگی فروکشی شدید خاک دانه‌ها (که دلیل کمی آن ماده آلی پایین و در نتیجه پایداری کم خاکدانه‌ها است) رخ می‌دهد. نکته قابل توجه دیگر اینکه بخش اعظم گل‌آلودگی رودخانه (یعنی بار معلق ریزدانه) به‌ویژه در اوایل پاییز ناشی از فرسایش‌های سطحی است.

به‌نظر می‌رسد که با افزایش شیب، زمان رسیدن غلظت رسوب به حالت تقریباً پایدار طولانی‌تر می‌شود. اما در مورد اثر دبی جریان بر این زمان نمی‌توان به‌طور قطعی اظهار نظر نمود. همچنین در این تحقیق با توجه به نتایج فصل پاییز، آزمایش‌ها در بهار تا ۴۰ دقیقه نیز ادامه یافت و در برخی از آزمایش‌ها (دبی ۰/۳۸ و ۰/۸۳ لیتر بر ثانیه در شیب ۱ درصد در پاییز و دبی ۰/۱۶۷ و ۰/۲ لیتر بر ثانیه در شیب ۱ درصد در بهار)، نشانه‌هایی از وجود احتمالی سطوح تعادلی متفاوت دیده شد. بنابراین بررسی‌های بیشتر در این مورد ضروری به‌نظر می‌رسد. در شکل (۶) غلظت رسوب برآوردی از معادله ۱ با غلظت رسوب اندازه‌گیری شده در شرایط پایدار مقایسه شده است. همچنین در جدول (۴) عرض از مبدأ و شیب خط برازش شده بر داده‌ها آمده است. همان‌طور که در شکل (۶) دیده می‌شود، در شیب ۱ درصد، مقادیر برآوردی به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر است، اما در تمام دامنه و در هر دو فصل دارای بیش برآوردی است. با افزایش شیب به ۳ و ۵ درصد، مقادیر غلظت رسوب برآوردی به‌صورت فزاینده‌ای نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده، بیش برآوردی نشان می‌دهند. این نتایج با نتایج اسدی و همکاران (۴) در مورد همین مدل مطابقت دارد،

جدول ۴. عرض از مبدأ و شیب خط برازش شده به داده‌ها

شیب (%)		۱		۳		۵	
پاییز	بهار	پاییز	بهار	پاییز	بهار	پاییز	بهار
عرض از مبدأ (g L <sup>-1</sup> )							
۲/۷۱	۱/۸۲	۰/۴۴	۴/۵	۴/۵۹	۲۳/۱۳		
شیب خط							
۱/۲۶	۱/۷۷	۳/۹۴	۴/۱۷	۵/۳۸	۴/۲۲		

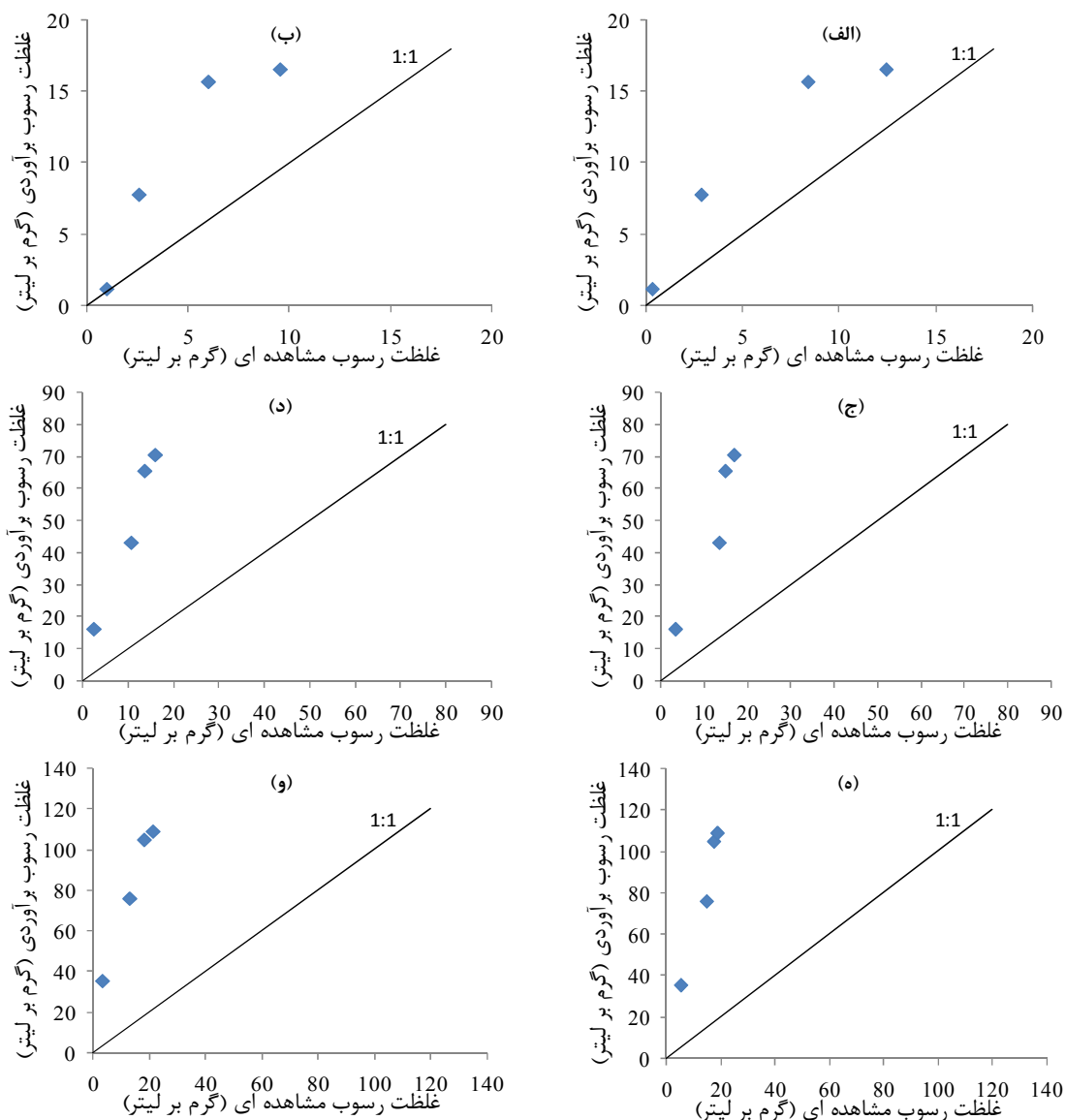
جدول ۵. خلاصه نتایج ارزیابی کارایی مدل برای تخمین غلظت رسوب تعادلی با معیارهای آماری مختلف

شیب (%)	ضریب تبیین		ضریب تبیین تعدیلی		ضریب کارایی		ضریب کارایی لگاریتمی	
	پاییز	بهار	پاییز	بهار	پاییز	بهار	پاییز	بهار
۱	۰/۹۱ <sup>ns</sup>	۰/۸۵ <sup>ns</sup>	۰/۷۲	۰/۴۸	-۰/۰۵	-۲/۹	۰/۶۱	۰/۱۶
۳	۰/۹۱ <sup>ns</sup>	۰/۹۷*	۰/۲۳	۰/۲۳	-۵۹/۴	-۶۶/۷	-۳/۹۷	-۳/۸۴
۵	۰/۹۶*	۰/۹۹**	۰/۱۸	۰/۲۳	-۱۷۶/۵	-۱۰۵/۵	-۱۰/۸۳	-۵/۳۴

\*, \*\*: به ترتیب معنی داری در سطح ۵ و ۱ درصد و ns عدم معنی داری

به منظور تکمیل ارزیابی مدل و روشن تر شدن بیشتر موضوع، درصد بیش برآوردی مدل در هر آزمایش محاسبه شد که نتایج آن در جدول (۶) آمده است. درصد بیش یا کم برآوردی می‌تواند معیاری از خطای مدل برای هر آزمایش به صورت جداگانه باشد و در نتیجه امکان بررسی ارتباط آن با شیب یا شدت جریان را فراهم می‌کند. نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد که برخلاف برداشت بیش برآوردی فزاینده مدل که از شکل (۴) و شیب معادله خط برازش شده به داده‌های برآوردی در مقابل داده‌های اندازه‌گیری شده (جدول ۴) استنباط شد، بیش برآوردی مدل در دبی ۰/۰۲۸ لیتر در ثانیه (با حداقل غلظت رسوب تعادلی) حداکثر بوده و با افزایش دبی (که به معنی افزایش غلظت رسوب است) کاهش می‌یابد. تنها استثناء در این مورد مربوط به آزمایش انجام شده در شیب ۱ درصد در فصل بهار است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که مدل در هر سه شیب مورد بررسی و هر دو فصل بهار به طور متوسط دارای خطای بیش از ۱۰۰ درصد است. درصد بیش برآوردی با افزایش شیب (یا به بیان دیگر افزایش میزان فرسایش) افزایش می‌یابد و این در تناقض با کاهش آن با

تنها معیاری از پراکندگی داده‌ها است و این یکی از اشکالات R<sup>2</sup> است زمانی که به تنهایی در نظر گرفته می‌شود. چنانچه یک مدل به طور سیستماتیک در تمام دامنه مورد بررسی بیش یا کم برآوردی داشته باشد، حتی اگر تمام تخمین‌ها نادرست باشند هنوز ممکن است R<sup>2</sup> نزدیک به یک باشد (۱۶). در مقابل، ضریب تبیین تعدیلی (WR<sup>2</sup>) که ترکیبی از ضریب تبیین و شیب خط برازش شده به داده‌ها است، معیار بهتری از ارزیابی نتایج مدل است. ضریب کارایی (E) نیز دارای اشکالاتی شبیه R<sup>2</sup> است، از آنجا که در محاسبه E اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی به توان دو می‌رسد، لذا نقش مقادیر بزرگ پررنگ‌تر شده و اثر مقادیر کوچک نادیده گرفته می‌شود (۱۹). اما در معیار E<sub>log</sub> با افزایش تأثیر مقادیر کوچک در مقایسه با مقادیر بزرگ، حساسیت این ضریب به بیش یا کم برآوردی سیستماتیک مدل افزایش می‌یابد و لذا معیار بهتری است. بنابراین و با توجه به دو معیار WR<sup>2</sup> و E<sub>log</sub> (جدول ۳)، مدل هیرساین و رز تنها در شیب ۱ درصد در آزمایش‌های انجام شده در فصل پاییز قادر بوده است که غلظت رسوب تعادلی را با دقت قابل قبولی برآورد نماید.



شکل ۴. مقایسه غلظت رسوب برآوردی با مشاهده‌ای در شیب الف و ب) یک درصد در پاییز و بهار، ج و د) سه درصد در پاییز و بهار، ه و و) پنج درصد در پاییز و بهار

جدول ۶. درصد بیش برآوردی غلظت رسوب تعادلی با مدل هیرساین- رز در آزمایش‌های مختلف

میانگین	۵		۳		۱		شیب (%) دبی (لیتر در ثانیه)
	بهار	پاییز	بهار	پاییز	بهار	پاییز	
۴۶۸	۱۰۷۷	۵۶۷	۵۲۸	۳۵۸	۱۷	۲۶۰	۰/۰۲۸
۲۹۸	۴۹۳	۴۰۶	۳۰۲	۲۱۸	۱۹۹	۱۷۱	۰/۰۸۳
۳۲۳	۴۸۱	۴۹۲	۳۷۹	۳۳۷	۱۶۱	۸۶	۰/۱۶۷
۲۷۵	۴۱۳	۴۷۳	۳۴۱	۳۱۵	۷۳	۳۳	۰/۲۰۰
۳۴۱	۶۱۶	۴۸۵	۳۸۷	۳۰۷	۱۱۲	۱۳۸	میانگین

افزایش دبی جریان است. دلیل این موضوع مشخص نیست و نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد.

### نتیجه‌گیری

تغییرات غلظت رسوب اندازه‌گیری شده در خروجی شیپار با زمان برای آزمایش‌های مزرعه‌ای انجام شده بر روی خاکی آهکی در سه شیب یک، سه و پنج درصد و در دو فصل پاییز و بهار، نشان داد که غلظت رسوب در زمان‌های اولیه آزمایش زیاد بوده و با گذشت زمان به سرعت کاهش یافته و حدود ۱۰ تا ۱۵ دقیقه بعد از شروع آزمایش به یک حالت کم و بیش پایدار می‌رسد. دلیل این امر می‌تواند تغییر فاز جریان از حداکثر توان حمل (محدودیت انتقال) به شرایط محدودیت جدایش باشد. نتایج همچنین نشان داد که افزایش غلظت رسوب با افزایش دبی جریان در شرایط ناپایدار اولیه (سه دقیقه اول) بسیار بیشتر از شرایط پایدار است. اثر شیب بر غلظت رسوب تابعی از دبی جریان و فصل آزمایش بود. روند کلی تغییرات غلظت رسوب در دو فصل پاییز و بهار مشابه، اما دامنه تغییرات آن و برهمکنش شیب و شدت جریان در این دو فصل متفاوت بود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که به‌ویژه در تحقیقات مرتبط با مدل‌سازی فرسایش، اولاً لازم است در اندازه‌گیری‌ها تغییرات زمانی نیز مدنظر قرار گیرد و دوم اینکه اندازه‌گیری‌ها در فصل‌های مختلف سال انجام شود.

مقایسه غلظت رسوب برآوردی با استفاده از مدل هیرساین

و رز با غلظت رسوب اندازه‌گیری شده نشان داد که در شیب ۱ درصد مقادیر برآوردی به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر است، اما در تمام دامنه و در هر دو فصل دارای بیش برآوردی است. با افزایش شیب به ۳ و ۵ درصد، مقادیر غلظت رسوب برآوردی به صورت فزاینده‌ای نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده، بیش برآوردی نشان دادند. ارزیابی مدل با استفاده از معیارهای مختلف بیانگر ارجحیت ضریب تبیین تعدیل شده ( $wR^2$ ) و ضریب کارایی لگاریتمی ( $E_{log}$ ) به ضریب تبیین ( $R^2$ )، و ضریب کارایی ناش-شادکلیف ( $E$ ) بود. با توجه به دو معیار  $wR^2$  و  $E_{log}$ ، مدل هیرساین و رز تنها در شیب ۱ درصد در آزمایش‌های انجام شده در فصل پاییز قادر بوده است که غلظت رسوب تعادلی را با دقت قابل قبولی برآورد نماید. محاسبه درصد بیش برآوردی مدل در هر آزمایش به صورت جداگانه و بررسی ارتباط آن با شیب و شدت جریان ضمن نشان دادن خطای بسیار زیاد مدل، برخلاف برداشت بیش برآوردی فزاینده مدل که از شکل و شیب معادله خط برازش شده به داده‌های برآوردی در مقابل داده‌های اندازه‌گیری شده استنباط شد، بیانگر کاهش درصد بیش برآوردی مدل با افزایش دبی جریان (که به معنی افزایش غلظت رسوب است) بود. بر این اساس ارزیابی یک مدل موضوعی بسیار پیچیده و چند مرحله‌ای است و در این میان ضروری است که از معیارهای آماری مناسب استفاده شود.

### منابع مورد استفاده

۱. اسدی، ح.، ش. محمودی، و ا. حیدری. ۱۳۸۶ الف. اثر تشکیل اندوده سطحی بر دینامیک فرسایش ورقه‌ای. مجموعه مقالات دهمین کنگره علوم خاک ایران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران ۴-۶ شهریور، کرج، ص ۱۱۴۸ تا ۱۱۴۹.
۲. اسدی، ح.، ح. روحی پور، ح. رفاهی و م. شرفا. ۱۳۸۶ ب. ارزیابی مدل WEPP برای برآورد فرسایش بین‌شیپاری در شرایط آزمایشگاهی. مجله علوم کشاورزی ایران ۳۸(۴): ۵۶۳-۵۵۳.
۳. رفاهی، ح. ۱۳۸۵. فرسایش آبی و کنترل آن. چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۷۲ ص.
4. Asadi, H., A. Moussavi, H. Ghadiri and C. W. Rose. 2011. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment. *J. Hydrol.* 406: 73-81.
5. Asadi, H., H. Ghadiri, C. W. Rose and H. Rouhipour. 2007a. Interrill soil erosion processes and their interaction on

- low slopes. *Earth Surf. Process. Landf.* 32: 711–724.
6. Asadi, H., H. Ghadiri, C. W. Rose, B. Yu and J. Hussein. 2007b. An investigation of flow-driven soil erosion processes at low streampowers. *J. Hydrol.* 342: 134-142.
  7. Beuselinck, L., P. B. Hairsine, G. C. Sander and G. Govers. 2002. Evaluating a multiclass net deposition equation in overland flow conditions. *Water Resour. Res.* 38(7): 14-1-14-11. DOI 10.1029/2001WR250.
  8. Cheng, N. S. 1997. Simplified settling velocity formula for sediment particle. *J. Hydraulic Eng.* 123(2): 149-152.
  9. Fan, J. C. and M. F. Wu. 2001. Effects of soil strength, texture, slope steepness and rainfall intensity on interrill erosion of some soils in Taiwan. *Sci. Content* 588-593.
  10. Foster, G. R., D. C. Flanagan, M. A. Nearing, L. J. Lane, M. Risse and S. C. Finkner. 1995. Hillslope erosion component. Chapter 11. *In*: D. C. Flanagan, and M. A. Nearing (Eds.), USDA-Water Erosion Prediction Project, Technical Documentation. NSERL. Report No. 10, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
  11. Fox D. M. and R. B. Bryan. 1999. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. *Catena* 38: 211-222.
  12. Gregory, J. H., M. D. Dukes, G. L. Miller and P. H. Jones. 2005. Analysis of double-ring infiltration techniques and development of a simple automatic water delivery system. *Online Applied Turfgrass Science*, 10.1094/ATS-2005-0531-01-MG.
  13. Hairsine, P. B. and C. W. Rose. 1992. Modeling water erosion due to overland flow using physical principals, 2. Rill flow. *Water Resour. Res.* 28(1): 245-250.
  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. *J. Hydrol.* 294: 229-240.
  15. Klute, A. 1986. *Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods.* Soil Science Society of America, Wisconsin, USA.
  16. Krause, P., D. P. Boyle and F. Base. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosci.* 5: 89-97.
  17. Laflen, J. M., L. J. Lane and G. R. Foster. 1991. WEPP: a new generation of erosion prediction technology. *J. Soil Water Conserv.* 46: 34-38.
  18. Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627.
  19. Legates, D. R. and Jr. McCabe. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.* 35(1): 233-241.
  20. Lei, T. W., Q. W. Zhang, L. J. Yan, J. Zhao and Y. H. Pan. 2008. A rational method for estimating erodibility and critical shear stress of an eroding rill. *Geoderma* 144: 628-633.
  21. Loch, R. J. 1994. A method for measuring aggregate water stability of dryland soils with relevance to surface seal development. *Aus. J. of Soil Res.* 32: 687-700.
  22. Meyer, L. D. and W. H. Wischmeier. 1969. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Trans. ASAE* 12: 754-758, 762.
  23. Misra R. K. and C. W. Rose. 1995. An examination of the relationship between erodibility parameter and soil strength. *Aus. J. of Soil Res.* 33: 332-715.
  24. Moody, J. A., J. D. Smith and B. W. Ragan. 2005. Critical shear stress for erosion of cohesive soils subjected to temperatures typical of wildfires. *J. Geophys. Res.* 110: 1-13.
  25. Morgan, R. C. P. 2005. *Soil Erosion and Conservation.* Third Edition, Blackwell Publishing, UK.
  26. Nearing, M. A. 1998. Why soil erosion models over-predict small soil losses and under-predict large soil losses. *Catena* 32: 15-22.
  27. Nearing, M. A., G. R. Foster, L. J. Lane and S. C. Finkner. 1989. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology. *Trans. ASAE* 32(5): 1587-1593.
  28. Nearing, M. A., L. D. Norton, D. A. Bulgakov, G. A. Larionov, L. T. West and K. M. Dontsova. 1997. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resour. Res.* 33(4): 865-876.
  29. Page, A. L., R. H. Miller and D. R. Keeny. 1982. *Methods of Soil Analysis, Part II, Chemical and Microbiological Properties* American Society of Agronomy. Inc. Soil Sci. Am. Madison, Wisconsin, USA.
  30. Polyakov, V. O. and M. A. Nearing. 2003. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions. *Catena* 51: 33-43.
  31. Proffitt, A. P. B. and C. W. Rose. 1991. Soil erosion processes: II. Settling velocity characteristics of eroded sediment. *Austr. J. Soil Res.* 29: 685-695.
  32. Proffitt, A. P. B., C. W. Rose, P. B. Hairsine. 1991. Rainfall detachment and deposition: experiments with low

- slopes and significant water depths. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 325-332.
33. Raei, B., H. Asadi, A. Moussavi and H. Ghadiri. 2015. A study of initial motion of soil aggregates in comparison with sand particles of various sizes. *Catena* 127: 279-286.
34. 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. *J. Hydrol.* 333: 449-458.
35. Rouhipour, H. 1997. Interaction Between Flow-Driven and Rainfall-Driven Soil Erosion Processes, PhD dissertation. Faculty of Environmental Science, Griffith University, Brisbane.
36. Sander, G. C., P. B. Hairsine, L. Beuselinck and G. Govers. 2002. Steady state sediment transport through an area of net depositions. *Water Resour. Res.* 38: doi:10.1029/2001WR323.
37. 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. *J. Hydrol.* 454-455: 123-130.
38. Sparks, D. 1996. *Methods of Soil Analysis. Part III. Chemical Methods.* SSSA book Series, No. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI.
39. 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 Resour. Res.* 44, W06401, doi:10.1029/2007WR006361.

## Dynamic Changes of Sediment Concentration in Rill Erosion at Field Experiments

H. Asadi<sup>1\*</sup>, M. Aligoli<sup>2</sup> and M. Gorji<sup>1</sup>

(Received: Nov. 6-2013; Accepted: June 14-2016)  
DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.20.78.125

### Abstract

This study aimed to investigate the dynamic changes of rill erosion and evaluate the ability of Hairsine-Rose model in estimation of sediment concentration. The experiments were carried out at the Soil and Water Conservation Research Station of Tehran University in Kuhin, Qazvin. Four flow rates were tested at three slopes in trapezoidal hand-made rills of 3 m long and 5 cm base width. Outflows were sampled periodically to determine changes in sediment concentration. The experiments were repeated in early autumn and mid spring. Sediment concentration showed a dynamic change with time which was affected by flow rate, slope and season. The sediment concentration was high in the first few minutes of the experiment but over time, dropped and finally reached a more or less stable state. The effects of flow rate and slope were more detectable on sediment concentration at the early unsteady conditions than at the final steady conditions. Though the temporal trends were similar, the sediment concentration was generally higher in autumn than in spring. Hairsine-rose model showed a better performance at lower flow stream powers but generally over predicted sediment concentration showing a systematic error probably due to model formulation.

**Keywords:** Efficiency coefficient, Rainfed lands, Soil erosion, Streampower.

---

1. Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric. Eng. and Technol., Univ. of Tehran, Karaj, Iran .

2. Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric. Sci., Univ. of Guilan, Rasht, Iran

\* Corresponding Author, Email; ho.asadi@ut.ac.ir, asadi@guilan.ac.ir