

بررسی روند تغییرات مکانی غلظت رسوب در طول دامنه

- ❖ **علی گلکاریان***؛ استادیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد
- ❖ **حسن احمدی**؛ استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
- ❖ **علی سلاجقه**؛ استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
- ❖ **محمد جعفری**؛ استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
- ❖ **علی شهبازی**؛ دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

چکیده

فرسایش یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب خاک و کاهش حاصل‌خیزی است. از آنجایی که طول دامنه یکی از فاکتورهای مؤثر در شکل زمین و، در نتیجه، در میزان فرسایش است، در این تحقیق سعی شد تغییرات مکانی غلظت رسوب در طول دامنه تا رسیدن به ظرفیت حمل بررسی شود. بدین منظور، یک سیستم شبیه‌ساز دامنه طراحی و ساخته شد. این سیستم شامل ده فلوم پنج‌متری است که با سری کردن آن‌ها دامنه‌ای پنجاه‌متری ایجاد می‌شود. در این سیستم، به کمک پنجاه لوله‌آبده، که به فواصل یک‌متری بر روی فلوم‌ها نصب شده و آبدهی هر یک ۱۰۰ میلی‌لیتر است، جریان تجمعی ایجاد می‌شود. متغیرهای دیگر شامل دو نوع خاک است: یکی با بستر ماری و دیگری با بستر کنگلومرای از منطقه طالقان، و شیب در سه سطح ۱۵، ۲۲٫۵ و ۳۰ درصد است. برای هر تیمار سه تکرار و در مجموع ۱۸ بار آزمایش انجام گرفت. در هر آزمایش، از انتهای هر فلوم چهار نمونه گرفته شد و غلظت آن تعیین گردید. سپس، داده‌ها به صورت فاکتوریل و در قالب طرح‌های کاملاً تصادفی تجزیه و تحلیل آماری شد. همچنین، برای برازش یک منحنی مناسب بر داده‌های مشاهده‌ای از تابع ریچارد استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده معنی‌دار نبودن خاک‌ها و معنی‌دار شدن شیب و طول دامنه در غلظت رسوب است. از طرف دیگر، قرارگرفتن غلظت رسوب دو فلوم آخر در یک کلاس نمایانگر نزدیک‌شدن غلظت رسوب به ظرفیت حمل در این طول است. همچنین، از نتایج به‌دست‌آمده این‌گونه استنباط می‌شود که مدل ریچارد به‌خوبی می‌تواند روند تغییرات غلظت در طول دامنه را شبیه‌سازی نماید.

واژگان کلیدی: طول دامنه، ظرفیت حمل، غلظت رسوب، فرسایش

مقدمه

این زمینه نظریه‌ی الیسون است [۹]: یک مدل مفهومی اولیه درباره‌ی تأثیر غلظت رسوب در فرایندهای فرسایشی. در این مدل مفهومی، آب صاف دارای حداکثر توان حمل و حداقل توان کنش است؛ این موضوع باعث فرسایش‌دهندگی حداقلی این آب‌هاست. البته، برای بررسی اعتبار این مدل آزمایش‌ها و تحقیقات اندکی صورت گرفته است. در مخالفت با نظریه‌ی الیسون، هانگ و همکاران بیان کردند که آزمایش آن‌ها نشان می‌دهد که فرسایش در داخل شیارها به میزان بار رسوب بستگی دارد [۱۲].

برخی از محققان بیان کردند که جریان آب دارای انرژی مشخصی است که می‌تواند برای کنش ذرات خاک از خاک سطحی یا برای انتقال ذرات کنده‌شده از خاک صرف شود. بنابراین، هنگامی که بار رسوب به ظرفیت حمل نزدیک می‌شود، پتانسیل کنش توسط جریان آب می‌تواند تا حد صفر کاهش یابد [۹، ۱۵، ۳۱]. برخی تحقیقات نشان داد که بهترین راه بررسی اثر متقابل بار رسوب و کنش ناشی از جریان استفاده از داده‌های رسوب با توزیع مکانی مناسب است [۳۲]. در تحقیقی، در سال ۱۹۹۰، با استفاده از نتایج حاصل از ۴۰۰ آزمایش کرتی، نتایج نشان داد که ظرفیت انتقال در جریان‌های سطحی با اندازه‌ی ذرات حمل‌شده و یکی از دو عامل تنش برشی جریان یا توان جریان در واحد عرض بهترین همبستگی را دارد [۷]. در تحقیقی، چندین پارامتر مختلف هیدرولیکی آزمایش شد. نتایج نشان داد که قدرت جریان در طیف وسیعی از شرایط هیدرولیکی و مواد بستر بهترین همبستگی را با بار رسوب دارد [۲۲]. نتایج حاصل از مروری بر تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی ظرفیت انتقال جریان‌های سطحی نشان می‌دهد که ظرفیت انتقال رسوب را می‌توان با کمک فاکتورهای مختلفی از جمله تنش برشی، توان جریان، و توان جریان در واحد عرض برآورد کرد [۱]. همچنین، در بررسی ۹ رابطه‌ی انتقال رسوب، در سال ۱۹۸۱، رابطه‌ی یالین ۱۹۶۳ بهترین رابطه

فرسایش، به‌ویژه فرسایش‌های تشدیدشونده، یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب خاک و کاهش حاصل‌خیزی در خاک‌های زراعی و خاک‌های مرتعی و جنگلی است. عوامل متعددی در ایجاد و تشدید فرسایش نقش دارند؛ به همین دلیل، برآورد و پیش‌بینی فرسایش در شرایط مختلف کاری مشکل و همراه با عدم قطعیت نسبتاً زیادی است. از بین عوامل مهم تأثیرگذار در مقدار و مکان فرسایش، عوامل توپوگرافی از اهمیت خاصی برخوردارند. یکی از عوامل توپوگرافی عامل طول دامنه است. در هنگام وقوع رگبار، چنانچه شرایط بارش و شرایط دامنه‌تعبیری نکند، از بخش‌های بالایی به طرف پایین دامنه حجم روان آب زیاد می‌شود. در هر مکان بر روی دامنه جریان آب دارای انرژی مشخصی است که بخشی از آن صرف حمل مواد محموله می‌شود و مابقی صرف کنش ذرات خاک. با افزایش مواد محموله‌ی جریان، انرژی کمتری برای کنش باقی می‌ماند. با ادامه‌ی این روند، در مکانی از دامنه هیچ انرژی‌ای برای کنش باقی نمی‌ماند، یا مقدار انرژی باقی‌مانده کمتر از آستانه‌ی کنش ذرات خاک خواهد بود. در این مکان بار رسوب به ظرفیت حمل رسیده است [۶، ۲۱، ۳۲].

تاکنون تحقیقات اندکی در زمینه‌ی تأثیر طول دامنه در میزان فرسایش صورت پذیرفته است. از طرف دیگر، در اغلب تحقیقات انجام‌شده طول دامنه مورد مطالعه کمتر از ۲۰ متر بوده است. در سال ۱۹۹۶، در مطالعاتی که به جهت ارزیابی عوامل مؤثر در مدل GUEST انجام شد، عامل طول دامنه، پس از شیب و فرسایش‌پذیری، سومین عامل حساس مدل معرفی شد [۱۹]. در فاصله‌ی زمانی بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۸ برای بررسی تأثیر طول دامنه، مطالعاتی بر روی کرت‌های فرسایشی با طول‌های ۴، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۲٫۱، ۲۵، ۳۰، ۴۰، و ۵۰ متری انجام شد [۱۷، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۹].

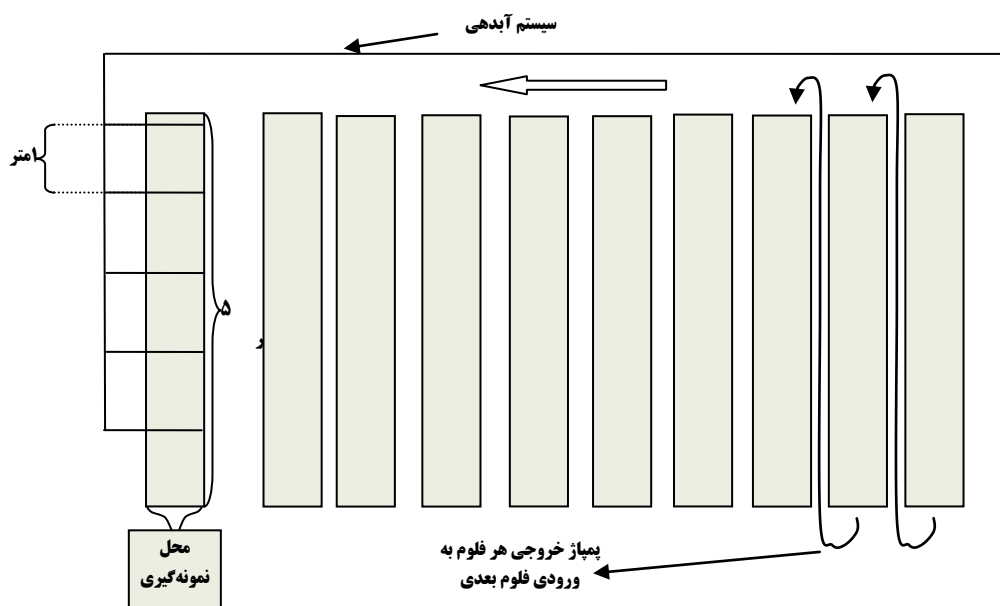
دیدگاه‌های مختلفی درباره‌ی رابطه‌ی بین بار رسوب و مقدار فرسایش وجود دارد. از نخستین نظریه‌ها در

کنگلومرایی (Ngc). خاک‌های مذکور از منطقه طالقان در یکصد کیلومتری شمال غربی کرج و از ۱۰ سانتی‌متری خاک سطحی تهیه شد. خاک‌هایی با بستر مارنی (gy_1) از نزدیکی روستای کرکبود به مختصات $33^{\circ} 11' 36''$ شمالی و $51^{\circ} 05' 50''$ شرقی و خاک‌هایی با بستر کنگلومرایی از حاشیه شمالی دریاچه سد طالقان به مختصات $36^{\circ} 11' 22/17''$ شمالی و $44^{\circ} 42' 50''$ شرقی جمع‌آوری شد. در آزمایش‌های انجام‌شده، حدود ۱۵ تن خاک استفاده شد. خاک‌های مذکور، پس از جمع‌آوری و انتقال به محل آزمایش، در فضای آزاد قرار گرفت و، پس از خشک‌شدن، از الک ۹/۵۲ میلی‌متری عبور داده شد. معمولاً، به منظور حفظ شرایط طبیعی، خاک مورد استفاده نباید از الک‌هایی با اندازه منافذ کوچک‌تر از ۱۰ میلی‌متر عبور داده شود [۴، ۳۱]. خاک‌ها، پس از الک‌شدن، به عمق ۱۰ سانتی‌متر در داخل فلوم ریخته شد. هر دو نوع خاک مورد آزمایش در این تحقیق ساختمان تحول‌یافته‌ای نداشتند و، برای نزدیک‌کردن شرایط خاک دست‌خورده به حالت طبیعی، وزن مخصوص ظاهری خاک ملاک عمل قرار گرفت. بدین منظور، پس از تسطیح خاک، سطح خاک به کمک پارچه پوشانده شد و تا حد اشباع آب به خاک اضافه گردید. خاک اشباع‌شده به مدت پنج تا هفت روز رها شد تا به صورت طبیعی خشک شود. با نمونه‌گیری از خاک داخل فلوم و بررسی کلوخه‌های طبیعی، تفاوت معنی‌داری بین وزن مخصوص ظاهری آن‌ها مشاهده نشد. پس از هر بار آزمایش، خاک سطحی تا محلی که تحت تأثیر قرار گرفته بود (سه تا پنج سانتی‌متر) تخلیه و مجدداً خاک جدید جایگزین شد. علاوه بر دو نوع خاک، فلوم‌ها در سه شیب مختلف ۱۵، ۲۲/۵، و ۳۰ درصد تنظیم و آزمایش شدند. با در نظر گرفتن سه تکرار برای هر تیمار در این تحقیق جمعاً ۱۸ بار آزمایش انجام شد.

برای محاسبه ظرفیت انتقال رسوب برای جریان‌های سطحی معرفی شد. در این تحقیق سعی شد تغییرات مکانی غلظت رسوب در طول دامنه تا رسیدن به ظرفیت حمل بررسی شود و تأثیر هر یک از متغیرهای موجود تعیین گردد [۲].

روش شناسی

برای اجرای این تحقیق، یک سیستم شبیه‌ساز دامنه در داخل یکی از آزمایشگاه‌های دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران طراحی و ساخته شد. سیستم طراحی شده شامل ۱۰ فلوم پنج‌متری با عرض و عمق ۲۰ سانتی‌متر است، که به صورت موازی در کنار یکدیگر قرار گرفتند. خروجی هر فلوم به گونه‌ای طراحی شد که هم امکان نمونه‌گیری در مقاطع پنج‌متری فراهم شود و هم همه جریان خروجی از هر فلوم توسط پمپ به ابتدای فلوم بعدی منتقل شود. بدین ترتیب و با انتقال جریان خروجی هر فلوم به ابتدای فلوم بعدی و با وجود ۱۰ فلوم پنج‌متری، در نهایت، یک دامنه پنجاه‌متری شبیه‌سازی شد. از آنجایی که در دامنه‌های طبیعی به هنگام بارندگی میزان جریان از بخش‌های بالایی دامنه به سمت پایین دست به صورت تجمعی افزایش می‌یابد، در تحقیق حاضر نیز از سیستم جریان تجمعی برای برقراری جریان بر روی خاک استفاده شد. برای دستیابی به چنین حالتی، به فواصل یک‌متری، بر روی فلوم‌ها پنجاه عدد لوله آبدار با سیستم غیر تحت فشار طراحی شد (شکل ۱). تنظیم و کالیبراسیون لوله‌ها به گونه‌ای انجام شد که میزان دبی جریان از هر لوله ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب در دقیقه باشد. در همه فلوم‌ها برای برقراری یک سیستم زه‌کشی مناسب از پنج سانتی‌متر پوکه معدنی به همراه ماسه استفاده شد. در تحقیق حاضر، از دو نوع خاک استفاده شد: یکی، با بستر مارنی (gy_1)؛ دیگری، با بستر



شکل ۱. تصویر و طرح شماتیکی از سیستم شبیه‌ساز دامنه

اجرای آزمایش و نمونه‌گیری

رسیدن آب فلوم اول به خروجی فلوم آخر نمونه‌گیری از انتهای دامنه آغاز شد. در هر آزمایش چهار سری نمونه‌گیری از فلوم آخر به اول انجام شد. در این تحقیق، با توجه به ماهیت تجمعی جریان، مقدار جریان در فلوم اول ۰/۵ لیتر بر دقیقه خواهد بود و با افزایش طول دامنه در فلوم‌های بعدی به ترتیب ۱، ۱/۵، ... و ۵ لیتر بر دقیقه خواهد بود. پس از هر آزمایش نمونه‌ها برای تعیین غلظت به آزمایشگاه منتقل شد.

پیش از هر آزمایش، برای یکسان‌سازی شرایط، به خاک‌های داخل فلوم‌ها تا رسیدن به حد اشباع آب اضافه شد. سپس، پارچه قرار داده شده بر روی فلوم‌ها جمع‌آوری گردید. در هنگام شروع آزمایش شیر مرکزی لوله‌های آبد به باز شد و جریان از هر لوله به دبی ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب در دقیقه از هر یک از لوله‌های آبد به برقرار گردید. مدت آزمایش ۳۲ دقیقه بود و پس از برقراری جریان در داخل کلیه فلوم‌ها و

نتایج

۱. خصوصیات خاک‌های مورد مطالعه

جدول ۱ برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. به دلیل اهمیت توزیع اندازه ذرات در فرایند فرسایش، در این مطالعه، علاوه بر بافت خاک، از سری الک نیز برای تعیین اندازه ذرات استفاده شد.

۲. بررسی تأثیر هر یک از متغیرها در غلظت رسوب

همان‌گونه که در بخش قبل نیز اشاره شد، تجزیه و تحلیل آماری این تحقیق به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. تیمارهای مورد بررسی عبارت بودند از: دو نوع خاک، شیب در سه سطح ۱۵، ۲۲٫۵ و ۳۰ درصد و طول دامنه در ده سطح ۵ تا ۵۰ متر. آزمون کلموگراف اسمیرنوف برای بررسی نرمال بودن باقی‌مانده‌ها استفاده شد؛ نتایج بیانگر نرمال بودن باقی‌مانده‌هاست.

با توجه به اطلاعات جدول ۲، تأثیر عامل خاک و اثر متقابل خاک و طول دامنه در میزان غلظت معنی‌دار نشد. سایر عوامل همچون شیب، طول دامنه، تأثیر متقابل شیب و خاک، تأثیر متقابل شیب، خاک و طول دامنه در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد.

با توجه به جدول ۳ و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن، هر سه سطح شیب با یکدیگر اختلاف معنی‌داری داشتند و هر یک در یک کلاس قرار گرفتند. کلیه طول‌ها غیر از طول دامنه ۴۵ و ۵۰ متر با یکدیگر اختلاف معنی‌داری داشتند و فقط غلظت در طول‌های ۴۵ و ۵۰ متر در یک کلاس قرار گرفتند.

تجزیه و تحلیل آماری این تحقیق به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با نرم‌افزار SPSS انجام شد. برای برازش یک مدل بر روند تغییرات غلظت و بررسی و توصیف الگوی حاکم بر تغییرات غلظت در طول دامنه از تابع ریچارد در نرم‌افزار SAS استفاده شد. از مدل ریچارد بیشتر برای بررسی الگوی رشد استفاده می‌شود. از آنجا که ماهیت تغییرات غلظت در طول دامنه همانند الگوی رشد دارای یک روند افزایشی تا رسیدن به سطحی نسبتاً ثابت (ظرفیت حمل) است، در این تحقیق می‌توان از تابع ریچارد استفاده کرد. تابع ریچارد، به دلیل دارا بودن پارامتر شکل، دارای انعطاف‌پذیری بسیار مناسبی است. شکل کلی آن به صورت تابع ۱ است:

تابع ۱

$$y_i = A(1 \pm b \exp^{-ki})^{1/n}$$

در این مدل

$$n > 1, n \neq 0, A \text{ \& } k > 0$$

در تابع ریچارد، y_L غلظت رسوب در طول دامنه است؛ A حداکثر غلظت هنگامی که $L \rightarrow \infty$ ؛ b ضریب ثابت تابع؛ k میزان تغییرات خطی تابع لگاریتمی غلظت در واحد زمان یا شاخص غلظت. این شاخص، در واقع، میزان دست‌یافتن به حداکثر غلظت را در منحنی غلظت برآورد می‌کند؛ n پارامتر شکل، که تعیین‌کننده جایگاه نقطه عطف در منحنی غلظت است. در این تابع غلظت (y^*) و طول دامنه (L^*) در نقطه عطف منحنی با روابط ذیل محاسبه می‌شود. نحوه برازش مدل به صورت غیرخطی (nlin) است.

$$y^* = \frac{A}{\sqrt[n]{n+1}}, L^* = -\frac{1}{k} \ln \left| \frac{n}{b} \right|$$

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

خصوصیات خاک	واحد	Ngc	gy ₁
بافت	شن	درصد	۵۶
	سیلت	درصد	۳۱
	رس	درصد	۱۳
	کلاس بافتی	-	لومی شنی
کربنات کلسیم	درصد	۸٫۱۵	۲۳٫۲۱
	-	۷٫۵۳	۷٫۵۸
pH	-	۰٫۵۱	۰٫۸۳
EC	Ms	۰٫۸۵	۰٫۰۸
ماده آلی	درصد	۱۷٫۸۷	۱٫۰۱
	<۶۲٫۵	درصد	۲۳٫۱۱
	۶۲٫۵-۱۲۵	درصد	۲۴٫۹۶
	۱۲۵-۲۵۰	درصد	۸٫۳۳
	۲۵۰-۵۰۰	درصد	۱۲٫۸۵
	۵۰۰-۱۰۰۰	درصد	۸٫۲۳
	۱۰۰۰-۲۰۰۰	درصد	۴٫۴۷
	۲۰۰۰-۴۰۰۰	درصد	۰٫۱۷
>۴۰۰۰	درصد	۰	

توزیع اندازه ذرات بر اساس نتایج الک خشک (میکرون)

جدول ۲. مقایسه غلظت رسوب در شیب، خاک، طول دامنه، و آثار متقابل آن‌ها

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات
شیب	۲	۳۵۸۱۱۲/۵۹۸ ^{***}
خاک	۱	۱۰۲۲/۴۵۸ ^{NS}
طول دامنه	۹	۵۹۵۹۹۶/۱۷۹ ^{***}
شیب * خاک	۲	۹۴۰۶۱/۳۵۲ ^{***}
شیب * طول دامنه	۱۸	۲۲۵۳۱/۳۷۱ ^{***}
خاک * طول دامنه	۹	۴۷۱/۵۳۹ ^{NS}
شیب * خاک * طول دامنه	۱۸	۵۷۶۳/۳۷۰ ^{***}

NS، ***: به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۰/۰۱

جدول ۳. مقایسه میانگین‌های اثر شیب و طول دامنه بر غلظت رسوب

منابع تغییر	سطح	غلظت (گرم بر لیتر)
	۱۵	۱۹۰/۹۵ ^a
شیب (درصد)	۲۲/۵	۳۰۳/۶۷ ^b
	۳۰	۳۳۸/۸۳ ^c
	۵	۱۳/۰۸ ^a
	۱۰	۴۹/۱۱ ^b
	۱۵	۱۰۵/۵۷ ^c
	۲۰	۱۸۲/۱۸ ^d
	۲۵	۲۶۹/۹۷ ^e
طول دامنه (متر)	۳۰	۳۳۳/۸۹ ^f
	۳۵	۳۹۵/۰۴ ^g
	۴۰	۴۴۶/۹۱ ^h
	۴۵	۴۸۱/۵۵ ⁱ
	۵۰	۵۰۰/۸۵ ⁱ

متری) وجود دارد. در خاک Ngc و در شیب ۲۲/۵ درصد جهش معنی‌داری مشاهده نشد، اما در فلوم سوم (طول ۱۵ متری) جهش ۸۵ گرم در لیتر دیده شد. از طرف دیگر، در این تیمار در فلوم دهم، مقدار اندک تغییر غلظت رسوب نسبت به فلوم قبل معنی‌دار شد، که این موضوع به معنی نزدیک شدن غلظت رسوب به ظرفیت حمل است. در خاک Ngc و در شیب ۳۰ درصد یک جهش غلظت در فلوم سوم (طول ۱۵ متری) مشاهده شد. در خاک gy₁ و در شیب ۱۵ درصد یک جهش غلظت در فلوم پنج (طول ۲۵ متری) مشاهده شد. در خاک gy₁ و در شیب ۲۲/۵ درصد یک جهش غلظت در فلوم چهارم (طول ۲۰ متری) مشاهده شد. در خاک gy₁ و در شیب ۳۰ درصد جهش خاصی مشاهده نشد، اما در این تیمار نیز در فلوم پنجم (طول ۲۵ متری) یک جهش در حدود ۱۲۱ گرم در لیتر وجود داشت.

۳. بررسی وجود یا فقدان تغییرات ناگهانی غلظت در طول دامنه

با بررسی روند تغییرات غلظت در آزمایش‌های مختلف مشخص شد که در برخی بخش‌های دامنه جهش قابل توجهی در غلظت رسوب وجود دارد. بر این اساس و برای تعیین معنی‌دار بودن این جهش‌ها، از آزمون F استفاده شد. برای اجرای این آزمون، میزان تغییر غلظت در فلوم‌های متوالی محاسبه (تفاضل دو فلوم متوالی و برای فلوم اول تغییر مقدار غلظت نسبت به صفر) شد و معنی‌دار بودن آن‌ها آزمون شد. در نهایت، با مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون دانکن مکان جهش‌های مذکور در هر تیمار مشخص شد. جدول ۴ نتایج آزمون دانکن را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۴، در خاک Ngc و در شیب ۱۵ درصد یک جهش غلظت در فلوم پنج (طول ۲۵

جدول ۴. مقایسه میانگین تغییرات غلظت در طول دامنه در تیمارهای مختلف

طول دامنه		تیمار								
۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵	
۲۶,۲۷	۳۶,۵۰	۳۴,۲۸	۲۷,۴۲	۱۵,۹۹	۷۱,۰۲	۱۵,۹۵	۲۰,۹۴	۳۹,۱۷	۱۵,۵۶	Ngc-15
a	a	a	a	a	b	a	a	A	a	
۱۰,۵۹	۸۲,۳۷	۶۳,۳۹	۴۹,۵۷	۴۷,۵۴	۵۳,۷۵	۷۶,۱۵	۸۵,۵۴	۵۱,۳۴	۱۵,۴۹	Ngc-22.5
a	c	bc	abc	abc	abc	c	c	Abc	ab	
۶,۷۵	۸,۵	۴۲,۹۱	۹۱,۸۳	۱۲۲,۹	۱۰۹,۶	۱۶۰,۸	۱۱۶,۴	۲۵,۵۵	۳,۲	Ngc-30
a	a	abc	abc	d	cd	d	d	Bc	a	
۱۹,۴۱	۳۱,۲۸	۳۸,۶۷	۴۰,۱۵	۷۱,۸۶	۷۸,۵۸	۳۳,۳۶	۴۷,۰۷	۳۳,۲۱	۱۲,۰۵	gy ₁ -15
a	ab	abc	abc	bc	c	ab	abc	Ab	A	
۱۲,۷۳	۳۷,۴۳	۷۱,۱۹	۵۶,۰۲	۴۹,۷۸	۹۰,۸۲	۱۱۴,۹	۴۵,۰۸	۵۹,۵۲	۱۶,۴۹	gy ₁ -22.5
a	ab	abc	abc	abc	bc	c	ab	Abc	a	
۳۸,۰۴	۴۷,۱۶	۳۶,۰۲	۹۶,۱۶	۷۳,۳۲	۱۲۰,۷	۶۰,۳۰	۵۷,۰۸	۱۵,۱۶	۱۶,۸	gy ₁ -30
ab	ab	ab	bc	abc	c	abc	ab	A	a	

در هر تیمار چنانچه میانگین‌ها حداقل دارای یک حرف مشترک باشند، بر اساس آزمون دانکن، در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری وجود ندارد.

۴. برازش مدل ریچارد بر داده‌های غلظت

در طول دامنه

توابع حاصل از برازش مدل ریچارد به میانگین داده‌های مربوط به هر تیمار، ضریب تبیین (R^2)، میانگین مربعات خطا، انحراف معیار خطای نسبی، غلظت و طول دامنه در نقطه عطف منحنی برازش در جدول ۵ و نمودارهای مربوط به هر تابع به همراه داده‌های مشاهده‌ای در شکل ۲ ارائه شده است. بررسی نرمال بودن باقی‌مانده‌ها در مورد هر شش تابع به کمک آزمون کلموگراف اسمیرنوف نمایانگر نرمال بودن باقی‌مانده‌هاست. با توجه به اینکه ضریب تبیین در توابع کلیه تیمارها بالای ۹۹ درصد است، می‌توان این‌گونه بیان کرد که بیش از ۹۹ درصد از تغییرات متغیر وابسته، که همان غلظت رسوب است، به واسطه متغیر مستقل، که همان طول دامنه است، توجیه می‌شود.

همان‌گونه که از جدول ۴ قابل استنباط است، در بسیاری از موارد، به رغم اختلاف قابل توجه در میانگین تغییرات غلظت رسوب، باز هم این مقادیر در یک دسته قرار گرفت و از نظر آماری معنی‌دار نشد. با بررسی بیشتر داده‌های خام مشخص شد که این موضوع به دلیل واریانس زیاد تکرارهای هر تیمار است. زیادبودن واریانس بدین معنی است که در تکرارهای مختلف مربوط به هر تیمار جهش‌ها در فلوم‌های متفاوتی اتفاق افتاده و این موضوع باعث زیادشدن واریانس هر فلوم می‌شود. دلیل تفاوت جهش در تکرارهای مختلف به نحوه جریان آب بر روی خاک بستگی دارد؛ بدین صورت که هر گاه جریان از حالت سطحی و غیرمتمرکز به سمت جریان‌های متمرکز تغییر حالت دهد، باعث ایجاد یک جهش در غلظت رسوب خواهد شد.

جدول ۵. نتایج حاصل از برازش تابع ریچارد بر داده‌های غلظت در طول دامنه

تیمار	تابع ریچارد	ضریب تبیین (R^2)	میانگین مربعات خطا	انحراف معیار خطای نسبی	غلظت در نقطه عطف	دامنه در نقطه عطف	طول
Ngc-15	$775.5[1 - 0.9975 \exp^{-0.0144z}]^{\frac{1}{0.7061}}$	۰/۹۹۷	۱۳۸/۴۱	۰/۰۷۹۴۰۸	۱۳۶/۹۰	۲۳/۹۹	
Ngc-22.5	$1250.8[1 - 1.0562 \exp^{-0.0134z}]^{\frac{1}{0.9392}}$	۰/۹۹۸	۲۳۳/۰۵	۰/۱۰۷۳۴۹	۶۴/۳۴	۸/۸۴	
Ngc-30	$698.8[1 + 1.06542 \exp^{-0.1273z}]^{\frac{1}{0.0573}}$	۰/۹۹۹	۳۱۵/۶۶	۰/۰۷۶۳۲	۲۶۴/۲۷	۱۹/۱۰	
gy ₁ -15	$435.5[1 + 4.1629 \exp^{-0.0985z}]^{\frac{1}{0.4009}}$	۰/۹۹۹	۷۳/۳	۰/۱۰۷۹۱	۱۸۷/۸۴	۲۳/۷۶	
gy ₁ -22.5	$633.7[1 - 0.8026 \exp^{-0.0623z}]^{\frac{1}{0.2468}}$	۰/۹۹۹	۲۰۸/۱۵	۰/۰۵۲۹۲۳	۲۰۰/۹۷	۱۸/۹۳	
gy ₁ -30	$591.4[1 + 3.6282 \exp^{-0.5143z}]^{\frac{1}{0.294}}$	۰/۹۹۹	۱۱۷/۲۶	۰/۱۲۸۲۵۱	۲۴۶/۱۲۳	۲۴/۴۲	

یک درصد است و مقدار شن در بافت خاک نیز ۵ درصد است. بر این اساس، در شیب‌های کم، به دلیل توان اندک جریان، میزان حمل ذرات خاک Ngc اندک است، اما با افزایش شیب و، در نتیجه، افزایش سرعت جریان توان لازم برای حمل ذرات حاصل می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به اندک بودن درصد رس در خاک Ngc (حدود ۱۳ درصد)، خاک چسبندگی اندکی داشته و جریان به راحتی قادر به کندن مواد بستر خواهد بود. اما در شیب‌های بالا و با افزایش توان جریان، خاک gy₁، به دلیل برخورداری از درصد رس قابل توجه، مقاومت بیشتری در مقابل فرسایش از خود نشان می‌دهد. این موضوع با نتایج تحقیقاتی که بیان می‌کند با افزایش شیب دامنه در خاک‌های مقاوم‌تر غلظت رسوب به صورت خطی و با شدت کم افزایش می‌یابد، در حالی که در خاک‌های حساس افزایش غلظت رسوب روند افزایشی غیرخطی شدیدتری با شیب دارد [۱۹] و

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی تأثیر هر یک از متغیرها در غلظت

رسوب

خاک

به رغم اینکه نتایج تحلیل آماری بیانگر عدم تفاوت بین دو خاک و تأثیر یکسان آن‌ها در میزان غلظت رسوب است، از لحاظ کمی، در شیب‌های پایین خاک Ngc دارای حداکثر غلظت کمتری نسبت به خاک gy₁ است و در شیب‌های بالا عکس این موضوع صادق است. این موضوع، با توجه به سرشت دو نوع خاک، توجیه‌شدنی است. خاک Ngc دارای حدود ۴/۵ درصد سنگ‌ریزه بین ۲ تا ۴ میلی‌متر است و درصد شن در بافت خاک حدود ۵۶ درصد است، در حالی که در خاک gy₁ ذرات بین ۲ تا ۴ میلی‌متر، که غالباً از کلوخه‌های ریز تشکیل می‌شود، کمتر از

نتایج تحقیقاتی که نشان می‌دهد خاک‌های لومی شنی بعد از خاک‌های سیلتی و لومی سیلتی حساس‌ترین خاک‌ها به فرسایش‌اند [۵] همخوانی دارد.

شیب دامنه

نتایج بیانگر آن است که با افزایش شیب دامنه اختلاف معنی‌داری در غلظت رسوب مشاهده می‌شود؛ به گونه‌ای که هر سه کلاس شیب ۱۵، ۲۲/۵، و ۳۰ درصد با یک اختلاف معنی‌دار روندی افزایشی را در غلظت رسوب نشان می‌دهند. این موضوع با نتایج برخی از محققان [۱۳، ۱۶، ۲۰، ۲۷، ۲۸، ۳۰] همخوانی دارد.

طول دامنه

در کلیه موارد، غلظت رسوب با افزایش طول دامنه افزایش می‌یابد که در همه فلوام‌ها، غیر از دو فلوام آخر، این افزایش معنی‌دار است. از آنجایی که در بررسی منابع موجود درباره تأثیر طول دامنه بر غلظت رسوب در جریانی با ماهیت تجمعی تحقیق درخور استنادی مشاهده نشد، مقایسه مستقیم این بخش از نتایج با سایر منابع امکان‌پذیر نیست. اما، از آنجایی که در این تحقیق با افزایش طول دامنه مقدار جریان و، به تبع آن، سرعت جریان افزایش می‌یابد، نتایج این بخش را می‌توان با تحقیقاتی که در آن‌ها تأثیر مقادیر مختلف جریان سطحی جزو متغیرهای مورد بررسی بوده مقایسه کرد. بر این اساس، نتایج حاصل از تحقیق حاضر در این بخش با نتایج [۳، ۶، ۱۱، ۳۳] همخوانی دارد.

تحلیل تغییرات ناگهانی غلظت در طول

دامنه

در بررسی روند تغییرات غلظت رسوب در طول دامنه در اغلب تیمارها یک جهش غلظت در طول ۱۵ تا ۲۵ متری مشاهده شد. دلیل اصلی این موضوع

احتمالاً تمرکز جریان در برخی از قست‌های سطح خاک بوده، که سبب تغییر وضعیت جریان از حالت ورقه‌ای به حالت انتقالی می‌شود (عبور عدد رینولز از ۱۰۰۰). این موضوع با نتایج [۳۱] همخوانی دارد. این موضوع همچنین با نتایج تحقیقی مبنی بر اینکه با انتقال جریان از حالت محدود به جداسدن به حالت محدود به انتقال بار رسوب افزایش درخور توجهی می‌یابد [۱۲] همخوانی دارد. از طرف دیگر، به غیر از تیمار Ngc-15، در مابقی تیمارها، با نزدیک شدن به انتهای دامنه، تغییرات غلظت و روند صعودی آن کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد. در این بخش‌ها، به دلیل نزدیک شدن مقدار بار رسوب به ظرفیت حمل، بخش درخور توجهی از توان جریان صرف حمل مواد محموله می‌شود و این امر میزان کنش بستر و افزایش بیشتر غلظت رسوب را محدود می‌کند. این موضوع با نظریه فوستر و میر به نقل از [۱۸] همخوانی دارد. همچنین، برخی از محققان فاصله از خط الرأس تا مکانی را که جریان به ظرفیت حمل رسوب می‌رسد طول بحرانی نامیده‌اند [۲۲، ۳۱]. این موضوع می‌تواند در تعیین مکان مناسب برای اقدامات حفاظتی بر روی دامنه و در برآورد میزان فرسایش و رسوب مفید باشد.

بررسی تغییرات زمانی غلظت رسوب

با توجه به نتایج به دست آمده، روند کلی تغییرات غلظت رسوب به گونه‌ای است که برداشت دوم (دقایق ۵ - ۸ پس از شروع نمونه‌گیری) دارای بیشترین مقدار غلظت رسوب است و تا برداشت چهارم (دقیقه ۱۶ پس از شروع نمونه‌گیری)، یعنی باگذشت زمان، غلظت رسوب سیر نزولی دارد. شاید مهم‌ترین علت این پدیده فرسوده شدن ذرات قابل فرسایش شامل خاک‌دانه‌های ناپایدار و احتمالاً ذرات مجزای اولیه در سطح خاک در شروع جریان بوده و

نظریه‌هایی را تأیید می‌کند که ثابت کرده‌اند پتانسیل کنش جریان آب هنگامی که بار رسوب به ظرفیت حمل نزدیک می‌شود کاهش می‌یابد [۱۴، ۱۵، ۱۸، ۳۲]. همچنین، تحقیق حاضر نظریه‌ای را تأیید می‌کند که می‌گوید بهترین راه بررسی اثر متقابل بار رسوب و کنش ناشی از جریان استفاده از داده‌های رسوب با توزیع مکانی است [۳۲].

مفهوم فیزیکی آنالیز آماری پارامترهای مدل ریچارد بدین صورت است که، با افزایش شیب، حداکثر غلظت رسوب و به عبارتی ظرفیت حمل رسوب افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، در اغلب موارد با افزایش شیب دامنه غلظت در نقطه عطف افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که شیب منحنی غلظت قبل از رسیدن به ظرفیت حمل در غلظت‌های بالاتری کاهش می‌یابد. در مورد طول دامنه در نقطه عطف با افزایش شیب روند یکنواختی وجود ندارد و شیب ۲۲/۵ دارای کمترین طول تا رسیدن به نقطه عطف است. از آنجایی که با افزایش شیب میزان حداکثر غلظت نیز افزایش می‌یابد، این موضوع می‌تواند به دو دلیل اتفاق بیفتد: اول اینکه در برخی تکرارها، به دلیل تغییر نوع جریان از حالت جریان‌های غیرمتمرکز به جریان‌های متمرکز، غلظت سریعاً افزایش و طول دامنه تا نقطه عطف کاهش می‌یابد؛ دوم اینکه ممکن است در این شیب خاک حساسیت بیشتری داشته باشد و نقطه عطف در فاصله کوتاه‌تری اتفاق بیفتد.

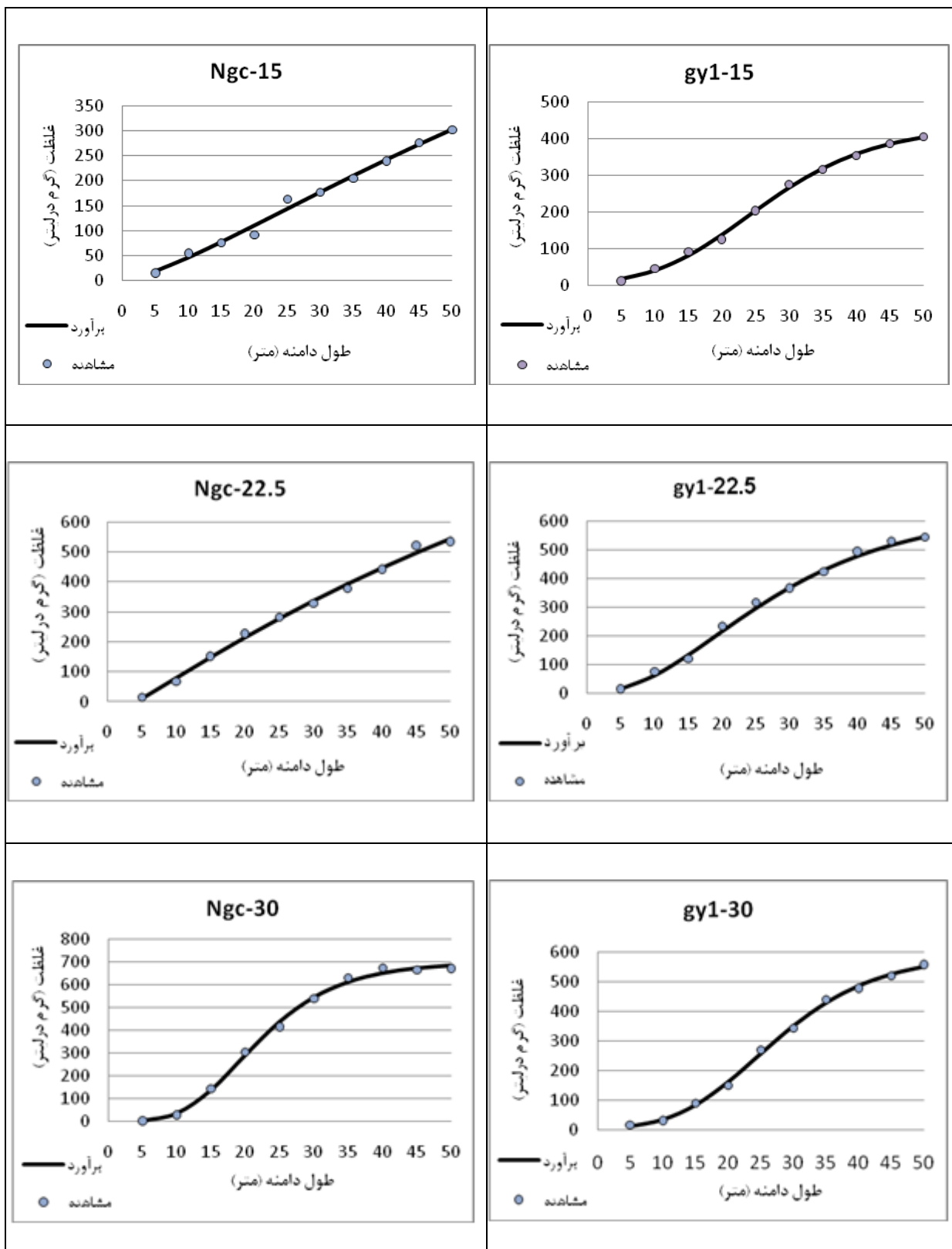
در مورد نوع خاک گفتنی است میزان غلظت و طول دامنه در نقطه عطف خاک gy_1 از خاک Ngc بیشتر است. از آنجایی که حداکثر غلظت در این دو نوع خاک تفاوت معنی‌داری ندارد، این موضوع بیانگر کنش تدریجی خاک تا فواصل بیشتری در خاک gy_1 است، اما در خاک Ngc شدت کنش در بخش‌های اولیه دامنه بیشتر است. دلیل این امر را نیز می‌توان در

با گذشت زمان و کاهش این ذرات میزان غلظت نیز کاهش می‌یابد. در مورد برداشت اول عدم اشباع خاک و نفوذ درصدی از آب باعث کاهش ارتفاع روان آب شده، که این امر مانع حداکثر شدن غلظت رسوب در این برداشت می‌شود. این نتیجه با نتایج تحقیقات [۱۶، ۱۹، ۲۶] تطابق دارد.

تحلیل نتایج حاصل از برازش مدل ریچارد بر داده‌های غلظت رسوب در طول دامنه

با نگاهی به اطلاعات جدول ۵ و شکل ۲، این موضوع قابل استنباط است که مدل ریچارد به خوبی می‌تواند روند تغییرات غلظت در طول دامنه را شبیه‌سازی کند و توابع حاصل از این مدل به خوبی بر داده‌های مشاهده‌ای برازش می‌یابد. در تیمارهایی که شیب منحنی غلظت رسوب در انتهای دامنه روند کاهشی را طی می‌کند و غلظت رسوب به ظرفیت حمل نزدیک می‌شود نقطه عطف توابع مشخص‌تر و منطقی‌تر از حالتی است که روند افزایشی غلظت به حالت خطی است و با ظرفیت حمل فاصله دارد. غیر از تیمار Ngc-22.5 نقطه عطف منحنی‌ها در فواصلی حدود ۱۸ تا ۲۵ متری و غلظت رسوب در نقطه عطف بین ۱۳۰ تا ۲۵۰ گرم در لیتر است. این موضوع با بررسی روند جهش‌ها در بخش قبل نیز همخوانی دارد. همچنین، در تیمارهای مختلف غیر از تیمار Ngc-22.5، با افزایش شیب، غلظت در نقطه عطف نیز افزایش می‌یابد. در کلیه تیمارها غیر از تیمار Ngc-22.5 مقدار ظرفیت حمل از روی توابع ریچارد و همچنین با استنباط از داده‌های مشاهده‌ای بین ۴۵۰ تا ۷۵۰ گرم در لیتر است که این نتیجه با نتایج مطالعات [۳۲] همخوانی دارد.

به طور کلی، در این تحقیق روند تغییرات غلظت به گونه‌ای است که نظریه‌هایی را که آب صاف را دارای حداقل توان کنش معرفی می‌کند رد و



شکل ۲. نمودارهای حاصل از برازش مدل ریچارد بر روی داده‌های غلظت در طول دامنه

دامنه، که میزان و سرعت جریان به حد کافی افزایش می‌یابد، مقداری از مواد بستر کننده می‌شود و وارد جریان می‌شود. در این خاک‌ها ذرات به دلیل درشت‌تر بودن تمایل بیشتری به ترسیب مجدد دارند. این دو موضوع سبب می‌شود که غلظت رسوب و طول دامنه در نقطه عطف کمتر باشد. بخشی از این موارد با نتایج تحقیقی درباره نحوه کنش و ترسیب مجدد ذرات خاک [۸] و همچنین با نتایج تحقیقی مبنی بر ترسیب مجدد ذرات درشت‌تر بر اثر نیروی ثقل [۱۰] همخوانی دارد.

ذرات تشکیل‌دهنده دو نوع خاک جست‌وجو کرد. در خاک gy_1 ، به دلیل ریزدانه بودن ذرات تشکیل‌دهنده و رس قابل توجه، با افزایش طول دامنه و، به تبع آن، افزایش میزان و سرعت جریان به تدریج توان جریان افزایش می‌یابد و با غلبه بر نیروی چسبندگی بین ذرات کنش و غلظت رسوب افزایش می‌یابد. در این خاک، به دلیل ریزدانه بودن ذرات، تمایل به ترسیب مجدد کمتر است، این دو موضوع سبب می‌شود که اولاً غلظت در نقطه عطف بیشتر شود و ثانیاً فاصله نقطه عطف از شروع دامنه طولانی‌تر شود. اما در خاک Ngc به دلیل درشت‌تر بودن ذرات تشکیل‌دهنده و عدم چسبندگی به دلیل رس پایین در بخشی از



References

- [1] Aksoy, H.L. and Kavvas, M. (2005). A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models, *Catena*, 64, 247-271.
- [2] Alonso, C.V., Neibling, W.H. and Foster, G.R. (1981). Estimating sediment capacity in watershed modeling, *Trans. ASAE*, 24, 1211-1220, 1226.
- [3] Bennett, S.J. (1999). Effect of Slope on the growth and migration of headcuts in rill, *Geomorphology*, 30, 273-290.
- [4] Bradford, J.M. and Foster, G.R. (1996). Interrill soil erosion and slope steepness factors. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 909-915.
- [5] Elliot, W.J., Laflen, J.M. and Foster, G.R. (1993). Soil erodibility nomographs for the WEPP model, paper No 932046, *presented at the 1993 Int. summer Meeting of ASAE and CSAE, Spokane, Washington*.
- [6] Flanagan, D.C. and Nearing, M.A. (ed.) (1995). USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation, NSERL Report No. 10. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS Nat. *Soil Erosion Research Lab*.
- [7] Flanagan, D.C. and Nearing, M.A. (ed.) (1995). USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation, NSERL Report No. 10. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS Nat. *Soil Erosion Research Lab*.
- [8] Govers, G. (1990). Empirical relationship for the transporting capacity of overland flow. In: Walling, D.E., Yair, A., Berckowicz, C. (Eds.), *Erosion, Transport, and Deposition Processes, Proceedings of the erusalem Workshop*, vol. 189. IAHS Pub., Wallingford, UK, pp. 45-64.
- [9] Harisin, 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] Harisine, P.B. and Rose, C.W. (1992). Modeling water erosion due to overland flow using physical principles, 2. Rill Flow. *Water Reso. Res.*, 28(1): 245-250.
- [11] Hogarth, W.L., Parlange, J.Y., Rose, C.W., Sander, G.C., Steenhuis, T.S. and Barry, A. (2004). Soil erosion due to rainfall impact with inflow: An Analytical solution with spatial and temporal effects, *J. Hydro.*, 295, 140-148.
- [12] Huang, C., Wells, L.K. and Norton, L. D. (1999). Sediment transport capacity and erosion processes: Model concepts and reality, *Earth Surf. Process. Landforms*, 24, 503-516.
- [13] Huang, C.-H., Bradford, J.M. and Laflen, J.M. (1996). Evaluation of the detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 734-739.
- [14] Lei, T.W., Nearing, M.A., Haghighi, K. and Bralts, V.F. (1998). Rill erosion and morphological evolution: A simulation model, *Water Reso. Res.*, 34, 3157-3168.
- [15] Lei, T.W., Zhang, Q.W., Zhao, J. and Nearing, M.A. (2006). Tracing sediment dynamics and sources in eroding rills with rare earth elements, *European J. Soil Sci.*, 57, 287-294.
- [16] Lei, T.W., Zhang, Q.W., Zhao, J., Xia, W.S. and Pan, Y.H. (2002). Soil detachment rates for sediment loaded flow in rills, *Transactions the ASAE*, 45, 1897-1903.
- [17] Mahmoodabadi, M., Rejahi, H.D. and Rouhipour, H. (2007). Study on interrill and rill erosion and related processes using rainfall and runoff simulation. *Ph.D. Thesis, Tehran University*, 256 p.
- [18] Marques, M.J., Bienes, R., Jimenez, L. and Perez-Rodriguez, R. (2007). Effect of Vegetal Cover on Runoff and Soil Erosion under Light Intensity Events, Rainfall Simulation over USLE Plots, *Science of the Total Environment*, 378, 161-165.
- [19] Merten, G.H. and Nearing, M.A. (2001). Effect of sediment load on soil detachment and deposition in rills, *Soil Sci.Soc. Am. J.*, 65, 861-868.
- [20] Misra, R.K. and Rose, C.W. (1996). Application and sensitivity analysis of process-based erosion model GUEST, *Eur. J. Soil Sci*, 47, 593-604.

- [21] Nearing, M.A., Bradford, J.M. and Parker, S.C. (1991). Soil detachment by shallow flow at low slopes, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 339-344.
- [22] 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, 1587-1593.
- [23] Nearing, M.A., Norton, L.D., Bulgakov, D.A., Larionov, G.A., West, L.T. and Dontsova, K.M. (1997). Hydraulics and erosion in eroding rills, *Water Resour. Res.*, 33(4): 865-876.
- [24] Polyakov, V.O. and Nearing, M.A. (2003). Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions, *USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN 47907-1196, USA*.
- [25] Rejman, J., Turski, R. and Paaluszek, J. (1998). Spatial and Temporal Variation in Erodibility of Loss Soil, *Soil and Tillage Research*, 46, 61-68.
- [26] Sadeghi, H.R., Bashari, M. and Rangavar, A.S. (2008). Comparing the sediment variation with hillside direction and plot length in storm wise soil erosion, *Soil & water* 22, number 2.
- [27] Shainberg, I., Goldstein, D. and Levy, G.J. (1996). Rill erosion dependence on soil water content aging and temperature. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 916-922.
- [28] Tayfur, G. (2002). Applicability of sediment transport capacity models for non-steady state erosion from steep slopes. *ASCE. J. Hydro. Eng.*, 7(3): 252-259.
- [29] Toy, T.J., Foster, G.R. and Reynard, K.G. (2002). *Soil Erosion Processes, Prediction, Measurement and Control*, John Wiley and Sons, New York, 338p.
- [30] Zachar, D. (1984). *Soil Erosion, Problems and Methods of Soil Erosion Research*, VEDA, Bratislava, 547p.
- [31] Zhang, G.H., Liu, B.Y., Nearing, M.A., Huang, C.H. and Zhang, K.L. (2002). Soil detachment by shallow flow, *Trans. ASAE.*, 45, 351-357.
- [32] Zhang, X.C., Li, Z.B. and Ding, W.F. (2005). Validation of WEPP sediment feedback relationships using spatially distributed rill erosion data, *Soil Science Society of America Journal*, 69, 1440-1447.
- [33] Zhang, X.C., Tingwu, Lei and Jun, Zhao (2008). Estimation of the detachment rate in eroding rills in flume experiments using an REE tracing method, *Geoderma*, 147, 8-15
- [34] Zheng, F.L., Huang, C.H. and Norton, L.D. (2000). Vertical hydraulic gradient and run-on water and sediment effects on erosion processes and sediment regimes, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 4-11.