

مدل سازی نقش پوشش و اندازه سنگریزه سطحی بر تولید رسوب با استفاده از روش پاسخ سطح

فرخ اسدزاده^{۱*}، محی‌الدین فقه‌حسن آقا^۲، حبیب خداوردیلو^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۰۲)

چکیده

سنگریزه سطحی عاملی مهم در کنترل مقدار فرسایش خاک به‌ویژه در اراضی شیب‌دار مناطق خشک و نیمه‌خشک است که مدل‌سازی نقش آن در فرسایش خاک، پیچیدگی‌های فراوانی دارد. هدف از این مطالعه مدل‌سازی تاثیر همزمان دبی جریان سطحی، پوشش و همچنین ابعاد سنگریزه‌های سطحی بر غلظت رسوب با استفاده از روش پاسخ سطح و بر مبنای طرح مرکب مرکزی بود. آزمایش‌ها در دو سری مجزا و در شیب ثابت ۵ درصد انجام شد. مدل بر اساس نتایج سری اول آزمایش‌ها ایجاد و با استفاده از نتایج آزمایش‌های سری دوم، اعتبارسنجی شد. یافته‌ها بیانگر کارآمدی بالای ($R^2 = 0/943$ و $RSME = 1/6 \text{ gl}^{-1}$) مدل طرح مرکب مرکزی در برآورد غلظت رسوب مشاهده‌ای از آزمایش‌های سری اول بود. اعتبارسنجی مدل نیز بیانگر کارایی بالای مدل ($R^2 = 0/895$ و $RSME = 3/6 \text{ gl}^{-1}$) برای دامنه تغییرات وسیعی از ویژگی‌های اولیه بود. بر مبنای نتایج آزمایش‌ها، افزایش درصد سنگریزه سطحی در محدوده‌ی صفر تا ۴۵ درصد سبب کاهش غلظت رسوب شد با این حال اثر سنگریزه‌های ریزتر در کاهش غلظت رسوب در مقایسه با سنگریزه‌های درشت‌تر بیشتر بود.

واژه‌های کلیدی: غلظت رسوب، سنگریزه سطحی، شبیه‌سازی رواناب، طرح مرکب مرکزی

۱- استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه (مکاتبه کننده)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه

۳- دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه

* پست الکترونیک: f.asadzadeh@urmia.ac.ir

مقدمه

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست محیطی در مناطق مختلف جهان و به‌ویژه نواحی خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود. فرآیند فرسایش خاک در نتیجه‌ی برهم‌کنش عواملی پرشمار است که در بیشتر مدل‌های برآورد فرسایش خاک در قالب دو مفهوم فرسایش‌پذیری و فرساینده‌گی بیان می‌گردد. بر پایه‌ی این رهیافت، ویژگی‌های ذاتی خاک و همچنین پوشش سطح آن نقشی موثر در تعیین مقدار فرسایش خاک و تولید رسوب دارند. از این رو، آگاهی از عوامل مؤثر در ایجاد رسوب عامل کلیدی در افزایش کارآمدی مدل‌های پیش‌بینی فرسایش خاک محسوب می‌شود.

سنگریزه سطحی از عواملی است که تأثیر آن در مدل‌های معمول برآورد فرسایش و رسوب کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Amin & Ahmadi, 2006; Chen *et al.*, 2011). با این حال، حضور سنگریزه سطحی در مقادیر و ابعاد متفاوت یکی از ویژگی‌های معمول اراضی زراعی و غیرزراعی مناطق شیب‌دار در نواحی خشک و نیمه‌خشک است (Poesen & Lavee, 1994; Tetegan & *et al.*, 2011). برای نمونه در مناطق مدیترانه‌ای پوشش سنگریزه در اغلب خاک‌ها بیش از ۶۰ درصد و یا در نواحی غرب اروپا پوشش سطحی سنگریزه در خاک‌ها به‌طور متوسط در حدود ۳۰ درصد است (Poesen & Lavee, 1994). در ایران نیز به رغم نبود آمار مشخص در زمینه خاک‌های دارای سنگریزه سطحی، مشاهدات صحرایی نشان می‌دهند که بخش وسیعی از خاک‌های مناطق کوهستانی و اراضی شیب‌دار مستعد فرسایش، از سنگریزه‌های با ابعاد گوناگون پوشیده شده است.

ویژگی‌های اصلی سنگریزه سطحی که در فرآیند فرسایش خاک موثر هستند شامل درصد پوشش سنگریزه سطحی، موقعیت سنگریزه‌ها در سطح خاک و همچنین اندازه‌ی سنگریزه‌ها می‌باشد (Bashari *et al.*, 2013; Figueiredo & Poesen, 1998). در زمینه ارتباط پوشش سنگریزه سطحی و فرسایش خاک و همچنین تأثیر آن بر پارامترهای هیدرولیکی جریان سطحی، پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است. آبراهامز و همکاران (Abrahams *et al.*, 2001) بیان نموده‌اند که نقش سنگریزه سطحی در قالب مواردی شامل حفاظت سطح خاک از برخورد قطرات باران، جلوگیری از جدا شدن ذرات

خاک توسط رواناب و کاهش سرعت جریان، قابل بررسی است. ریک‌زپ و همکاران (Rieke-Zapp *et al.*, 2007) با بررسی آزمایشگاهی تأثیر سنگریزه را در محدوده‌ی فراوانی صفر تا ۴۰ درصد بر فرسایش خاک گزارش کردند که سنگریزه سطحی سبب کاهش مقدار رسوب می‌گردد. میرزایی و همکاران (Mirzaee *et al.*, 2012) نیز در شرایط آزمایشگاهی، با اشاره بر نقش موثر سنگریزه سطحی در دامنه‌ی صفر تا ۳۰ درصد بر کاهش مقدار رسوب تولیدی، بیان داشتند که کاهش مقدار تلفات خاک با افزایش سنگریزه سطحی را می‌توان با یک تابع نمایی توصیف نمود. روحی‌پور و همکاران (Rouhipour *et al.*, 2005) گزارش نمودند که با افزایش پوشش سنگریزه سطحی تا مقادیر حدود ۲۰-۱۵ درصد، مقدار تولید رسوب افزایش یافته و از آن پس با افزایش سنگریزه سطحی تلفات خاک کاهش می‌یابد. این پژوهشگران افزایش رسوب با افزایش سنگریزه سطحی در محدوده‌ی صفر تا ۱۵ درصد را به افزایش تلاطم جریان رواناب نسبت داده‌اند. بشری و همکاران (Bashari *et al.*, 2013) نیز دریافتند که با افزایش سطوح سنگی مقدار رواناب تغییر چندانی نداشت اما با افزایش درصد سنگریزه سطحی در محدوده‌ی صفر تا ۲۵ درصد غلظت رسوب افزایش یافت و بیشترین غلظت رسوب مربوط به پوشش سنگریزه‌ای ۱۰ و ۲۰ درصد بود.

بررسی منابع گوناگون در زمینه ارتباط بین تلفات خاک و سنگریزه سطحی به روشنی نشان می‌دهد که به رغم پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، نتایج به‌دست آمده اغلب متفاوت هستند. به گونه‌ای که نتایج برخی از پژوهش‌ها بیان‌گر نقش مثبت افزایش سنگریزه سطحی در کاهش رسوب است (Mirzaee *et al.*, 2012; Zavala & Jordan., 2008; Mandal *et al.*, 2005; Figueiredo & Poesen, 1998). در حالی که گزارش‌هایی دیگر افزایش غلظت رسوب با افزایش درصد سنگریزه سطحی را نشان می‌دهند (Bashari *et al.*, 2013; Abrahams & Parsons, 1992; Valentin & Casenave, 1991). برخی از پژوهشگران نیز اشاره نموده‌اند که افزایش درصد سنگریزه سطحی تا یک حد بحرانی خاص از پوشش سطحی، سبب افزایش غلظت رسوب و پس از آن سبب کاهش غلظت رسوب می‌گردد (Rouhipour *et al.*, 2005). به‌نظر می‌رسد اختلاف در ویژگی‌هایی مانند دامنه‌ی

در علوم مهندسی و بیولوژی مورد استفاده قرار گرفته است (Mousavi *et al.*, 2013; Aghaeinejad-Meybodi *et al.*, 2015).

هدف از این مطالعه، مدل‌سازی اثر ویژگی‌هایی مانند دبی جریان، فراوانی پوشش سنگریزه‌ی سطحی و همچنین اندازه سنگریزه بر غلظت رسوب پایدار با استفاده از طرح مرکب مرکزی در روش پاسخ سطح است. همچنین در این پژوهش، کارایی این روش مدل‌سازی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به طیف نسبتا گسترده‌ای از متغیرهای مستقل نظیر دبی جریان، پوشش و اندازه سنگریزه آزموده شده است.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تهیه بستر آزمایش‌ها

در این پژوهش اثر ویژگی‌های سنگریزه بر فرآیند فرسایش در یک نمونه خاک لوم‌رس‌سیلتی^۵ بررسی گردید. آزمایش‌های مربوط به شبیه‌سازی رواناب در دانشگاه ارومیه و با استفاده از یک دستگاه فلوم شیب‌پذیر با ابعاد $6m \times 0.5m$ انجام شد. این فلوم مجهز به یک سامانه تامین رواناب است که می‌تواند دبی‌هایی با بزرگی ۳ تا ۳۰ لیتر در دقیقه تامین نماید (شکل ۱). تنظیم شیب در این فلوم با استفاده از جک هیدرولیکی و از صفر تا ۲۰ درصد امکان‌پذیر است.

شدت‌های رواناب و بارش مورد استفاده، دامنه درصد پوشش سنگریزه و همچنین اندازه و شکل سنگریزه‌ها از عوامل مؤثر در گوناگونی نتایج در این زمینه باشد (Jomaa *et al.*, 2013). افزون بر این، در بیشتر پژوهش‌ها مقدار فرسایش خاک تابعی از پوشش سنگریزه در نظر گرفته شده و به نقش توأمان پارامترهایی مانند ابعاد سنگریزه و همچنین اثر شدت جریان رواناب بر مقدار فرسایش کمتر توجه شده است. بر این اساس مدل‌سازی اثر سنگریزه‌ی سطحی با در نظر گرفتن اثر توأم این عوامل می‌تواند در آشکار شدن نقش سنگریزه‌ی سطحی کمک شایانی نماید. روش پاسخ سطح^۱ یک تکنیک ترکیبی از روش‌های آماری و ریاضی به‌منظور طراحی آزمایش‌ها^۲ با هدف ایجاد مدل ریاضی پیش‌بینی کننده است که توانایی ارزیابی میزان تاثیر تعدادی عامل به‌عنوان متغیرهای مستقل را بر روی یک پاسخ مطلوب به‌عنوان متغیر وابسته دارد (Myers & Montgomery, 2002). در حقیقت روش پاسخ سطح از اطلاعات کمی حاصل از تعداد مناسبی از آزمایش‌ها به‌طور هم‌زمان استفاده نموده و با تلفیق آن‌ها از طریق تحلیل معادلات چندپارامتری، متغیر پاسخ را پیش‌بینی و یا بهینه‌سازی می‌نماید. روش پاسخ سطح با استفاده از طرح‌های مختلف مانند باکس-بنکن^۳ و یا طرح مرکب مرکزی^۴ انجام‌پذیر است. با توجه به کارایی روش پاسخ سطح، در سال‌های اخیر این روش به‌عنوان ابزاری توانمند در پژوهش‌های مربوط به مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند

1- Response Surface Methodology (RSM)

2- Design of Experiments (DOE)

3- Box-Behnken

4- Central Composite Design (CCD)

5-Silty clay loam



شکل ۱- تصویری از فلوم آزمایشی مورد استفاده
Fig.1. General view of the experimental flume

بسته به پوشش مورد نظر و اندازه سنگریزه‌ها تلاش شد تا پوشش سنگریزه‌ها به صورت تصادفی و یکنواخت بر روی سطح خاک ایجاد گردد. تمامی آزمایش‌ها در شیب ثابت ۵ درصد انجام شد. آزمایش‌های مربوط به ترکیب پوشش، قطر سنگریزه و دبی جریان به دو سری آزمایش‌های مدل‌سازی طرح مرکب مرکزی و آزمایش‌های ترکیب تیمارها به شکل معمول تقسیم گردید.

آزمایش‌های طرح مرکب مرکزی

طراحی آزمایش‌های طرح مرکزی و تجزیه و تحلیل داده‌های آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار MINITAB 14 انجام شد. در این روش دامنه‌های متغیرهای مستقل شامل اندازه سنگریزه (۹-۳ سانتی‌متر)، پوشش سنگریزه (۴۵-۰ درصد) و دبی جریان (۵-۱۵ لیتر در دقیقه) به صورت مقادیر کدبندی شده در دامنه‌ی ۱ تا ۱- به نرم‌افزار معرفی شده و براساس طرح ترکیبی مرکزی، آزمایش‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی توسط نرم‌افزار پیشنهاد می‌گردد. در جدول ۱ متغیرهای مورد استفاده و دامنه‌ی آن‌ها به‌طور خلاصه ارائه شده است. در ادامه آزمایش‌های مربوط به طرح مرکب مرکزی تحت عنوان آزمایش‌های سری اول نامیده خواهند شد.

به‌منظور تهیه‌ی بستر آزمایش‌ها، ابتدا کف فلوم تا ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری با استفاده از سنگریزه‌هایی با قطر تقریبی ۱۵ میلی‌متر، به‌عنوان زهکش، پر شد. سپس این لایه سنگریزه با یک لایه گونی کتانی پوشیده شد. خاک مورد آزمایش که قبلاً از الک ۸ میلی‌متری عبور نموده بود به آرامی به درون فلوم بر روی لایه گونی کتانی منتقل و مسطح گردید. گفتنی است که افزودن خاک به درون فلوم به‌تدریج صورت گرفت و سطح آن پس از صاف شدن با یک غلطک دستی فلزی به‌طور مرتب صاف و متراکم شد به طوری که در نهایت برای هر آزمایش، یک بستر خاک با ارتفاع حدود ۲۰ سانتی‌متر و با چگالی ظاهری تقریباً برابر با $1/2 \text{ g cm}^{-3}$ آماده شد (Rieke-Zapp *et al.*, 2007).

در این پژوهش از سنگریزه‌هایی با قطر متوسط ۳ تا ۹ سانتی‌متر و در دامنه‌ای از پوشش سطحی از صفر تا ۴۵ درصد استفاده شد. دبی جریان رواناب سطحی ایجاد شده نیز از ۵ تا ۱۵ لیتر در دقیقه (دبی واحد معادل با $\text{cm}^3 \text{cm}^{-1} \text{min}^{-1}$ ۳۰۰-۱۰۰) بود. برای شروع هر آزمایش، خاک داخل فلوم به‌مدت ۸ ساعت از زیر اشباع و بعد از ۲۴ ساعت آزمایش اصلی بر روی نمونه خاک اشباع شده صورت گرفت (Nearing *et al.*, 1997). در هر آزمایش

جدول ۱- دامنه مقادیر آزمایشی متغیرهای مورد استفاده در مدل سازی
Table 1: Range of independent variables used in the modeling processes

دامنه و مقادیر (Range and values)			فاکتور (Factor)	متغیرهای مستقل (Independent variable)
-1	0	+1	X_i	
100	200	300	X_1	دبی (Flow rate) ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-1} \text{min}^{-1}$)
0	22.5	45	X_2	پوشش سنگریزه (Rock cover) (%)
3	6	9	X_3	قطر سنگریزه (Rock Diameter) (cm)

سانتی گراد به دست آمد. میانگین غلظت رسوب در سه نمونه‌ی انتهایی آزمایش که فرآیند فرسایش در آن به حالت پایدار رسیده بود به عنوان غلظت رسوب پایدار در نظر گرفته شده و به عنوان متغیر پاسخ وارد مراحل مدل سازی گردید. در این تحقیق یک نمونه خاک به عنوان بستر آزمایش مورد استفاده قرار گرفت که بافت آن به روش هیدرومتری تعیین شد. pH و هدایت الکتریکی در عصاره اشباع اندازه گیری شده و کربنات کلسیم معادل و ماده آلی خاک نیز به ترتیب با استفاده از روش های تیتراسیون و والکی-بلک اندازه گیری شدند.

نتایج و بحث

ویژگی های خاک و روند تغییرات غلظت رسوب

برخی از ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. براساس نتایج این جدول می توان گفت که خاک مورد استفاده در این تحقیق یک خاک لومرسیلیتی است. نمونه مورد استفاده یک خاک آهکی غیرشور و با مقدار سیلت نسبتا زیاد است.

آزمایش های معمول بر حسب ترکیب متداول تیمارها

در این آزمایش ها ۴ تیمار گوناگون پوشش سطحی شامل خاک بدون پوشش و خاک با پوشش های سطحی ۱۵، ۳۰، ۴۵ درصد با سه تیمار دبی جریان سطحی شامل دبی های ۵، ۱۰ و ۱۵ لیتر بر دقیقه و با سه اندازه مختلف سنگریزه شامل سنگریزه های با قطر متوسط ۳، ۶ و ۹ سانتی متر ترکیب شده و در مجموع ۳۰ آزمایش شبیه سازی رواناب انجام گردید. نتایج این آزمایش ها به منظور اعتبارسنجی مدل به دست آمده از روش طرح مرکب مرکزی مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه این آزمایش ها تحت عنوان آزمایش های سری دوم نامیده خواهند شد.

در تمامی آزمایش های سری اول و دوم، پس از تنظیم دبی جریان و شیب، رواناب سطحی از ابتدای فلوم به سطح خاک وارد شده و آزمایش به مدت ۳۰ دقیقه و تا حصول اطمینان از رسیدن غلظت رسوب خروجی به حالت پایدار ادامه یافت. در طول آزمایش، در زمان های مختلف از رواناب خروجی از فلوم نمونه برداری شده و غلظت رسوب نمونه ها از طریق خشک کردن در دمای ۱۰۵ درجه ی

جدول ۲- برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده
Table 2: Some physical and chemical properties of the soil used

بافت خاک Soil Texture	سیلت Silt	رس Clay	ماده آلی Organic matter	کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent	EC	pH
-			(%)		dSm^{-1}	-
Silty Clay loam	51	34	0.7	10.5	0.75	7.8

بالا بوده و با گذشت زمان غلظت رسوب اندکی کاهش یافته و تغییرات آن نیز ناچیز می گردد. به طوری که برای تمامی آزمایش های انجام شده ضریب تغییرات مربوط به غلظت رسوب در سه نمونه ی انتهایی آزمایش ها در دامنه ی

شکل ۲ روند تغییرات غلظت رسوب در مقابل زمان را برای تمامی آزمایش های مربوط به سری دوم نشان می دهد. در اغلب آزمایش ها روند کلی تغییرات غلظت رسوب به این شکل است که در زمان های ابتدایی آزمایش غلظت رسوب

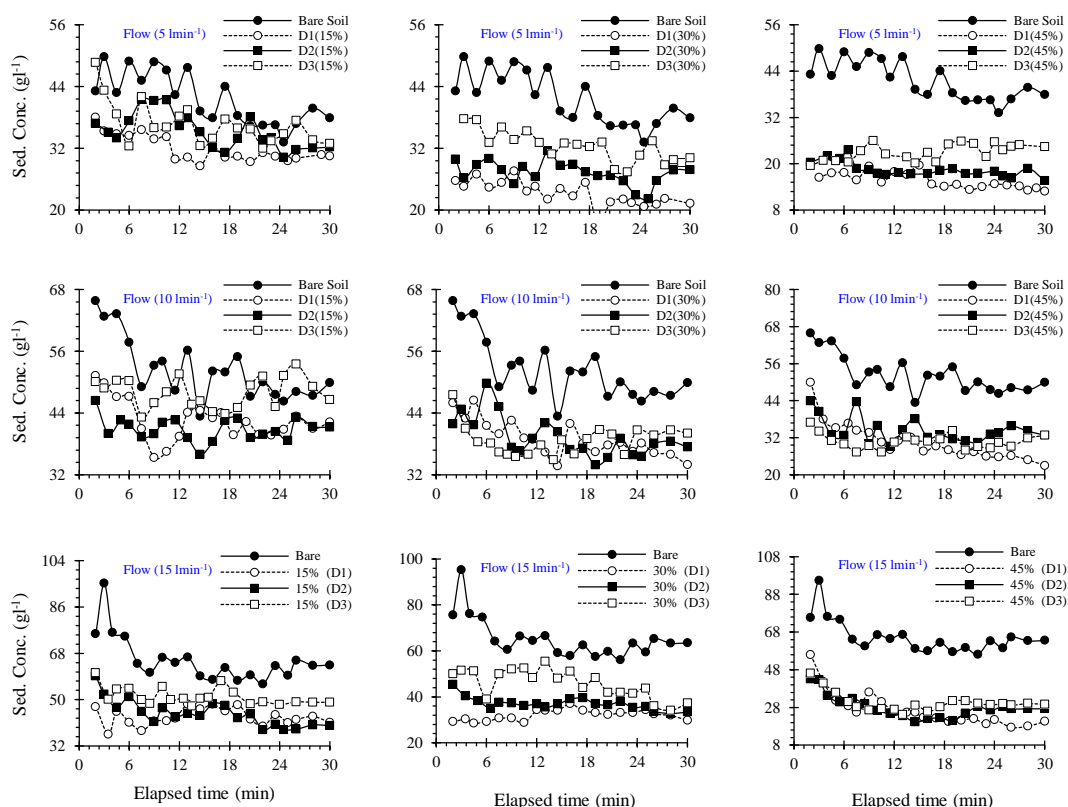
(D3) غلظت رسوب کمتری دارند. برای نمونه، غلظت رسوب در پوشش سنگریزه‌های ۳۰ درصد و دبی جریان ۵ لیتر در دقیقه برای قطر D3 تقریباً ۴۰ درصد بیش از غلظت رسوب در قطر D1 است. این اختلاف بین قطر D1 و D3 برای دبی ۱۵ لیتر در دقیقه و پوشش ۱۵ درصد سنگریزه در حدود ۳۳ درصد است.

به‌طور کلی براساس نتایج این بخش می‌توان دریافت که غلظت رسوب در آزمایش‌های مربوط به سنگریزه‌های ریز با پوشش سطحی بیشتر در مقابل سنگریزه‌های درشت و پوشش سطحی کم‌تر، افزایش نشان می‌دهد.

در این زمینه نتایج بنته و پواسن (Bunte & Poesen, 1994) نیز بیان‌گر تاثیر سنگریزه‌های درشت در افزایش تولید رسوب در مقایسه با سنگریزه‌های ریزتر است که در ادامه و در فرآیند مدل‌سازی مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱۰-۰/۱ درصد است. این امر نشان دهنده‌ی شرایط پایدار فرآیند فرسایش خاک است. بنابراین در ادامه از میانگین این سه نمونه به‌عنوان غلظت رسوب پایدار در مدل‌سازی استفاده شد.

در تمامی آزمایش‌ها غلظت رسوب نمونه‌های شاهد فاقد سنگریزه، بیش از نمونه‌های با پوشش سنگریزه است که این امر نشان دهنده‌ی تاثیر مثبت حضور سنگریزه‌های سطحی در کاهش غلظت رسوب است. میرزایی و همکاران (Mirzaee *et al.*, 2012) نیز بر نقش مثبت سنگریزه در کاهش نمایی غلظت رسوب و در نتیجه تلفات خاک اشاره نموده‌اند. قطرهای مختلف سنگریزه نیز براساس شکل ۲ تأثیر متفاوتی بر غلظت رسوب دارند. در اغلب موارد در پوشش سطحی و دبی برابر، سنگریزه‌های با قطر کوچک (D1) در مقایسه با سنگریزه‌های متوسط (D2) و درشت



شکل ۲- روند تغییرات غلظت رسوب در طول آزمایش برای پوشش‌های مختلف سنگریزه‌های با ابعاد مختلف

Fig.2. trend of sediment concentration for different fragment cover and sizes during each experiment

مدل سازی طرح مرکب مرکزی

در این مطالعه از طرح مرکب مرکزی بر پایه روش پاسخ سطح برای مدل سازی غلظت رسوب استفاده شده است. بر این اساس مجموع ۲۰ آزمایش با هفت نقطه‌ی مرکزی که معادل با مقادیر میانگین دامنه‌ی متغیرهای مورد استفاده

است، طراحی و اجرا گردید. دامنه‌ی تغییرات مقادیر هر کدام از متغیرها براساس مقادیر کد شده هر متغیر در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین در این جدول مقادیر مشاهده‌ای غلظت رسوب مربوط به آزمایش‌های سری اول نیز ارائه شده است.

جدول ۳- ماتریس مقادیر متغیرهای کد شده در مدل سازی روش طرح مرکب مرکزی

Table 3: Central composite design matrix for coded variables

مقادیر مشاهده‌ای غلظت رسوب (gl^{-1}) Observed sediment concentration	مقادیر کد شده متغیرها (Coded variables)			شماره آزمایش Run
	قطر سنگریزه (cm) Rock Diameter	پوشش سنگریزه (%) Rock cover	دبی ($lmin^{-1}$) Flow rate	
34.2	0.00	1.00	0.00	1
29.5	0.00	0.00	-1.00	2
39.9	0.00	0.00	0.00	3
30.2	0.59	0.59	-0.59	4
47.9	-0.59	-0.59	0.59	5
34.1	0.59	0.59	0.59	6
39.9	0.00	0.00	0.00	7
48.5	0.00	-1.00	0.00	8
38.2	-0.59	-0.59	-0.59	9
39.9	0.00	0.00	0.00	10
25.6	-0.59	0.59	-0.59	11
39.9	0.00	0.00	0.00	12
39.9	0.00	0.00	0.00	13
44.9	1.00	0.00	0.00	14
30.3	-0.59	0.59	0.59	15
38.8	-1.00	0.00	0.00	16
36.4	0.00	0.00	1.00	17
52.9	0.59	-0.59	0.59	18
40.2	0.59	-0.59	-0.59	19
39.9	0.00	0.00	0.00	20

همه متغیرها است، استفاده شد (Sheydaie et al., 2014).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_{0i} X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad i \neq j \quad (1)$$

۳ برای متغیرهای مستقل (دبی جریان، پوشش سنگریزه و اندازه سنگریزه) و متغیر پاسخ (غلظت رسوب) معادله‌ی ۲ برای پیش‌بینی غلظت رسوب به‌دست آمد. در این معادله X_1 ، X_2 و X_3 به‌ترتیب مربوط به مقادیر کد شده‌ی دبی جریان، پوشش سطحی سنگریزه و قطر سنگریزه‌ها می‌باشند.

در مدل سازی طرح مرکب مرکزی، از تابع چندجمله‌ای درجه دو کامل (معادله‌ی ۱) که شامل برهم‌کنش بین

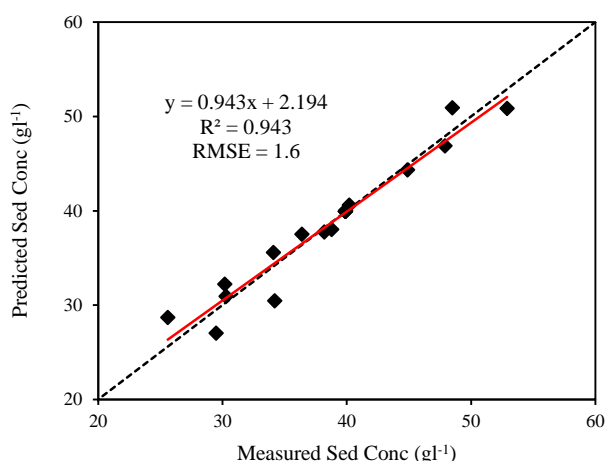
در این معادله؛ Y متغیر پاسخ (غلظت رسوب)، X_i و X_j متغیرهای مستقل کد شده، k تعداد متغیرهای مستقل، ε باقی‌مانده‌های مدل (اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده مدل) و β_0 ، β_i ، β_{ii} ، β_{ij} نیز به‌ترتیب نشان دهنده‌ی اثر عرض از مبدأ، اثر توابع خطی، درجه دو و برهم‌کنش بین متغیرها است. براساس ورودی‌های جدول

$$\begin{aligned} \text{Sed. Conc. (gl}^{-1}\text{)} &= 39.940 + 3.1195X_1 - \\ &6.081X_2 + 1.878X_3 - 2.714X_1^2 + \\ &0.255X_2^2 + 0.432X_3^2 - 1.725X_1X_2 + \\ &0.275X_1X_3 + 0.1753X_2X_3 \\ R^2 &= 94.3\% \quad R_{adj}^2 = 89.2\% \end{aligned} \quad (2)$$

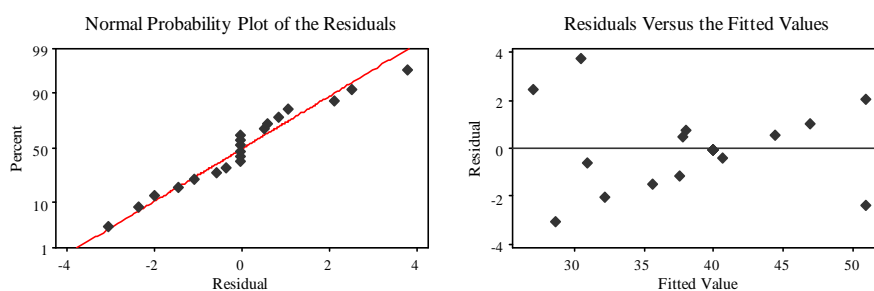
توسط این مدل قابل تبیین است. ریشه میانگین مربعات خطا برای مدل مذکور نیز برابر با ۱/۶ گرم در لیتر است. همچنین براساس شکل ۴ توزیع مقادیر باقی مانده‌ی مدل طرح مرکب مرکزی نیز نرمال بوده و براساس علامت (مثبت و یا منفی بودن) مقادیر باقی مانده‌ی مدل می‌توان نتیجه گرفت که مدل مذکور فاقد بیش‌برآوردی و یا کم‌برآوردی سیستماتیک بوده و جهت خطای آن تابعی از غلظت رسوب نبوده و حالت تصادفی دارد.

در شکل ۳ غلظت رسوب مشاهده شده در آزمایش‌های سری اول (طرح مرکب مرکزی) در مقابل غلظت رسوب محاسبه شده از روی مدل طرح مرکب مرکزی (معادله‌ی ۲) ترسیم شده است. مدل طرح مرکب مرکزی به‌طور مطلوبی غلظت رسوب مشاهده شده را برآورد نموده است (شکل ۳).

براساس مقدار ضریب تبیین مدل طرح مرکب مرکزی، می‌توان گفت که ۹۴/۳ درصد از تغییرات غلظت رسوب



شکل ۳- مقایسه بین غلظت رسوب مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل طراحی ترکیبی مرکزی
Fig.3. Comparison between predicted values for sediment concentration by the proposed CCD model and the experimental results



شکل ۴- توزیع باقی‌مانده‌های مدل طراحی ترکیبی مرکزی
Fig.4. Distribution of CCD model residuals

رسوب نیز در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. در این زمینه به‌منظور تفسیر بهتر نتایج مدل و رتبه‌بندی اثر پارامترهای مدل طرح مرکب مرکزی (معادله‌ی ۲)، درصد اثر هر یک

تجزیه واریانس مربوط به مدل طرح مرکب مرکزی در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج جدول ۴ بیان‌گر این مطلب است که که بخش خطی و درجه دو مدل دارای اثر معنی‌داری ($P < 0.0001$) بر نتایج مربوط به غلظت رسوب است از سوی دیگر اثر برهم‌کنش بین متغیرها بر غلظت

رسوب مشاهده‌ای دارند (شکل ۵). به طوری که درصد اثر این ۵ متغیر به ترتیب برابر با ۶۰/۶۷، ۱۵/۹۶، ۵/۷۹، ۱۲/۰۹ و ۴/۸۸ بوده و مجموع درصد اثرات این ۵ متغیر نیز برابر با ۹۹/۳۹ درصد است. بر این اساس و با توجه به سطح معنی‌داری ارائه شده در شکل ۵ برای ضرایب معادله‌ی ۲ می‌توان متغیرهایی را که تاثیر آن‌ها بر غلظت رسوب ناچیز بوده و از نظر آماری نیز معنی‌دار نیست از معادله‌ی ۲ حذف نموده و مدل طرح مرکب مرکزی خلاصه شده را به شکل معادله‌ی ۴ ارائه داد.

از این پارامترها با استفاده از تحلیل پارتو^۱ و با کاربرد معادله‌ی ۳ محاسبه گردید (Salari *et al.*, 2013).

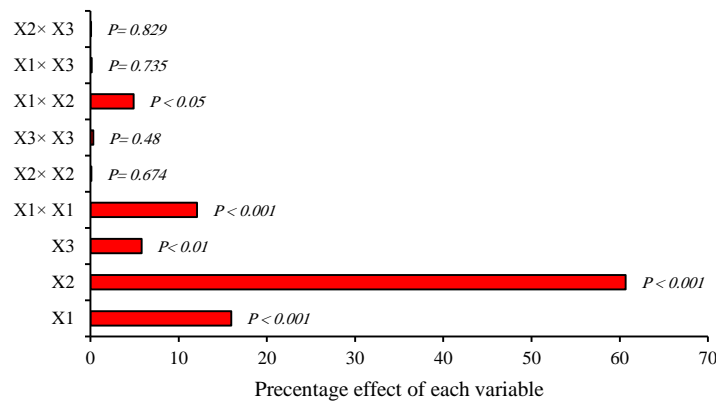
$$P_i = \left[\frac{\beta_i^2}{\sum \beta_i^2} \right] \times 100 \quad i \neq 0 \quad (3)$$

درصد اثر هر یک از پارامترهای مدل طرح مرکب مرکزی به همراه سطح معنی‌داری آن در شکل ۵ نشان داده شده است. از بین متغیرهای مستقل بررسی شده به ترتیب سطح پوشش سنگریزه، دبی جریان رواناب، اندازه سنگریزه‌ها، توان دوم دبی رواناب و نیز برهم‌کنش بین دبی جریان و پوشش سنگریزه بیشترین تأثیر را بر غلظت

$$\text{Sed. Conc. (gl}^{-1}\text{)} = 39.940 + 3.1195X_1 - 6.081X_2 + 1.878X_3 - 2.714X_1^2 - 1.725X_1X_2 \quad (4)$$

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس مدل طراحی ترکیبی مرکزی برای پیش‌بینی غلظت رسوب
Table 4: ANOVA results for central composite design of sediment concentration

غلظت رسوب Sediment concentration				منبع تغییرات Source of Variations
مقدار P P-value	آماره‌ی F F- value	میانگین مربعات خطا MSE	درجه‌ی آزادی DF	
0.000	18.40	91.92	9	رگرسیون (Regression)*
0.000	45.79	228.72	3	خطی (Linear)
0.006	7.77	38.83	3	درجه دو (Square)
0.041	1.65	8.22	3	برهم‌کنش (Interaction)
				$R^2 = 0.943 \quad R^2(\text{adj.}) = 0.892^*$



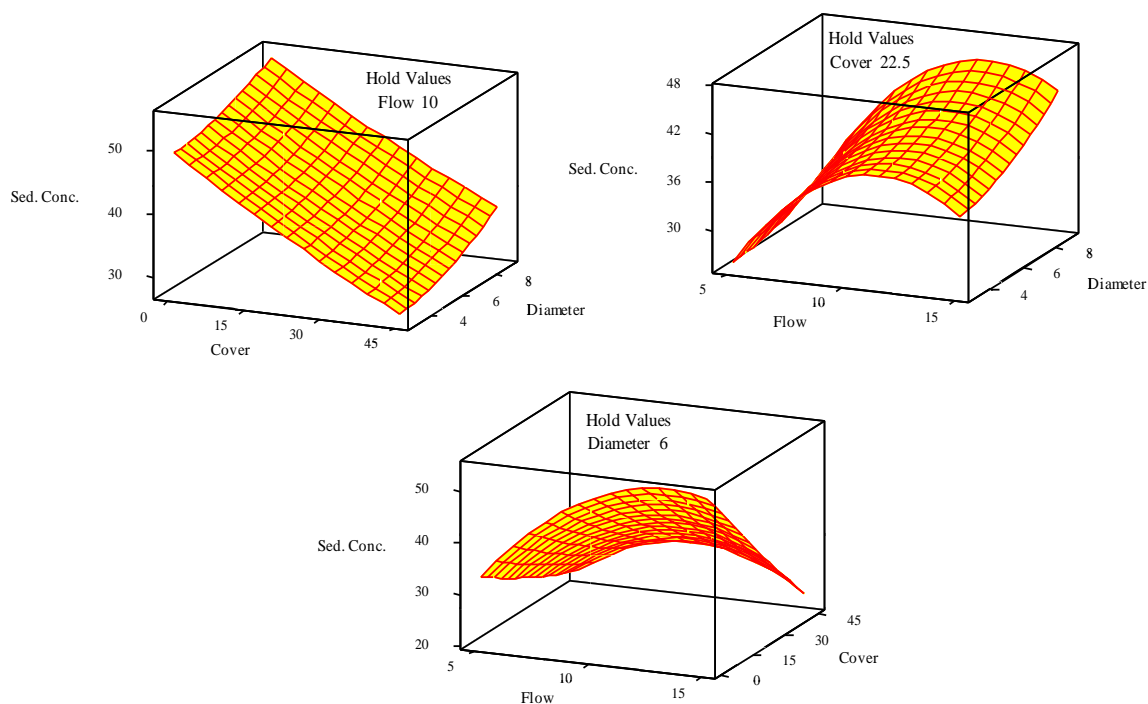
شکل ۵- نمودار پارتو برای تحلیل تأثیر متغیرهای مستقل بر غلظت رسوب
Fig.5. Pareto graph analysis for independent variables of sediment concentration

درصدی تلفات خاک می‌گردد. گو و همکاران (Guo *et al.*, 2010) نیز در شرایط صحرائی و با شبیه‌سازی رواناب، کاهش ۷۸ درصدی مقدار تلفات خاک با افزایش پوشش سنگریزه سطحی از صفر تا ۷۸ درصد را گزارش نمودند. به نظر می‌رسد که نقش سنگریزه سطحی در غلظت رسوب به دو عامل می‌تواند مربوط باشد؛ از یک سو افزایش درصد پوشش سنگریزه سطحی سبب کاهش سطح خاک در معرض جریان رواناب شده و در نتیجه مقدار تلفات خاک را کاهش می‌دهد (Jomaa *et al.*, 2013) ولی از سوی دیگر حضور سنگریزه سطحی می‌تواند تلاطم جریان رواناب سطحی به‌ویژه در کناره‌های سنگریزه‌ها را افزایش داده (Bunte & Poesen, 1994) و در نتیجه آبشستگی اطراف قطعات سنگی و در پی آن تلفات خاک را افزایش دهد. از این رو برآیند این دو اثر معکوس در نهایت می‌تواند تعیین کننده اثر سنگریزه بر فرسایش خاک باشد.

در رابطه با اندازه سنگریزه‌ها بر مقدار تلاطم موضعی و در نتیجه افزایش مقدار رسوب تولید شده، بنته و پواسن (Bunte & Poesen, 1994) نیز اشاره نموده‌اند که در سنگریزه‌های درشت، افزایش تلاطم جریان در مقایسه با سنگریزه‌های ریز بیشتر بوده و در نتیجه رسوب تولیدی نیز افزایش می‌یابد. این پژوهشگران در مقایسه دو اندازه متفاوت از سنگریزه در پوشش‌های سطحی مختلف دریافتند که تولید رسوب در سنگریزه‌های درشت در مقایسه با سنگریزه‌های ریز به‌ویژه در پوشش‌های بیش از ۳۰ درصد افزایش بیشتری دارد.

معادله‌ی ۴ که بر مبنای نتایج تحلیل آماری ضرایب مدل طرح مرکب مرکزی خلاصه شده است به‌روشنی بیان‌گر اثر افزایش سنگریزه‌ی سطحی (X_2) بر کاهش غلظت رسوب است از سوی دیگر بر مبنای ضرایب معادله‌ی ۴ می‌توان نتیجه‌گیری نمود که افزایش قطر سنگریزه سبب افزایش غلظت رسوب در یک پوشش سطحی برابر می‌گردد.

به‌عبارت دیگر براساس این مدل می‌توان بیان نمود که سنگریزه‌های کوچک نقش حفاظتی بیشتری در مقایسه با سنگریزه‌های بزرگ‌تر دارند. به‌منظور نشان دادن اثر ترکیبی متغیرها شامل دبی جریان، پوشش سنگریزه و قطر سنگریزه نمودار سه بعدی تغییرات غلظت رسوب برای این متغیرها به صورت دو به دو و بر اساس مدل طرح مرکب مرکزی ترسیم شده و در شکل ۶ ارائه شده است. با افزایش پوشش سطحی سنگریزه و کاهش قطر آن‌ها غلظت رسوب به‌شدت کاهش یافت (شکل ۶). به طوری که غلظت رسوب برای پوشش سطحی ۴۵ درصد با سنگریزه‌هایی با قطر ۳ سانتی‌متری در مقایسه با همان پوشش با سنگریزه‌های با قطر ۹ سانتی‌متری در حدود ۲۶ درصد کم‌تر است. بیشترین مقدار رسوب مشاهده شده نیز مربوط به سطح بدون پوشش با قطر و دبی ۱۵ لیتر در دقیقه که برابر با ۶۳ گرم بر لیتر می‌باشد. ریک‌زپ و همکاران (Rieke-Zapp *et al.*, 2007) نیز براساس مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی رواناب بر روی یک خاک لوم‌سیلتی دریافتند که افزایش پوشش سنگریزه سبب کاهش مقدار تلفات خاک می‌گردد. این پژوهشگران گزارش نموده‌اند که افزایش پوشش سنگریزه از صفر به ۳۰ درصد در دبی ۷/۵ لیتر در دقیقه سبب کاهش ۹۰



شکل ۶- نمایش سه بعدی تغییر غلظت رسوب در مقابل تغییر قطر سنگریزه‌ها (cm)، دبی جریان (lmin^{-1}) و پوشش سنگریزه (%)

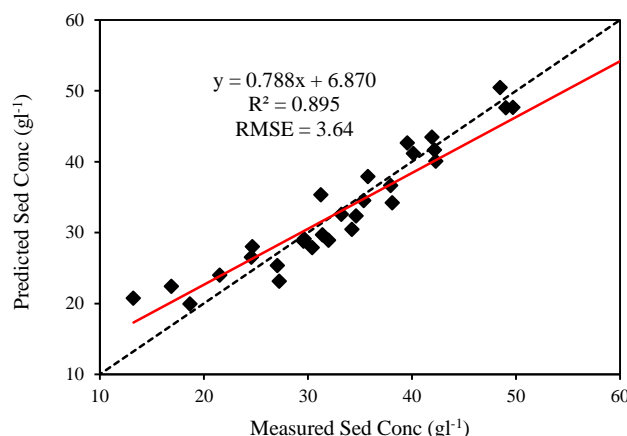
Fig.6. Response surface plots of the sediment concentration as function of flow rate (lmin^{-1}) rock fragment cover (%) and rock diameter (cm)

مدل ایجاد شده به‌طور مطلوبی توانست غلظت رسوب مشاهده‌ای آزمایش‌های سری دوم را نیز پیش‌بینی کند (شکل ۷) به طوری که این مدل قادر به تبیین ۸۹/۵ درصد از تغییرات مربوط به غلظت رسوب در آزمایش‌های سری دوم بوده و ریشه میانگین مربعات خطای مدل برای داده‌های سری دوم نیز برابر با ۳/۶۴ گرم در لیتر است. این نتیجه به‌روشنی مؤید این واقعیت است که در مطالعات فرسایش خاک که در آن‌ها به‌دلیل زیاد بودن تعداد متغیرها، تعداد تیمارها و آزمایش‌های مورد نیاز نیز فزونی می‌یابد با موفقیت می‌توان از مدل طرح مرکب مرکزی که قادر به کاهش تعداد آزمایش‌ها بوده و نتایج پیش‌بینی مطلوبی نیز دارد، استفاده نمود.

با توجه به کارایی مطلوب مدل طرح مرکب مرکزی (معادله ۴) در پیش‌بینی غلظت رسوب، این مدل با استفاده از داده‌های آزمایشی سری دوم مورد اعتبارسنجی قرار گرفت.

داده‌های سری دوم مربوط به آزمایش‌هایی هستند که در آن‌ها سه دبی جریان با تیمارهای پوشش سنگریزه‌ای و اندازه سنگریزه‌ها به‌طور کامل ترکیب شده و غلظت رسوب پایدار در آن‌ها اندازه‌گیری شده است.

به‌عبارت دیگر این داده‌ها مستقل از داده‌های سری اول بوده و از این‌ها برای توسعه مدل طرح مرکب مرکزی استفاده نشده است. نتایج مربوط به پیش‌بینی مدل طرح مرکب مرکزی برای این سری آزمایش‌ها در مقابل مقادیر غلظت رسوب مشاهده‌ای شده آن‌ها در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۷- اعتبارسنجی مدل طراحی ترکیبی مرکزی با استفاده از داده‌های آزمایشی سری دوم
Fig.7. Validation of the central composite design model using the results of second data set

از دیدگاه فرسایش خاک سبب افزایش تلفات خاک شده و در دراز مدت می‌تواند عملکرد محصولات را تحت تاثیر قرار دهد. مدل‌سازی اثر توأم متغیرهای دبی جریان، درصد پوشش و ابعاد سنگریزه براساس تعدادی آزمایش محدود با استفاده از طرح مرکب مرکزی موفقیت آمیز بوده و اعتبار سنجی مدل ایجاد شده با استفاده از داده‌های مستقل به عنوان داده‌های آزمون نیز حاکی از قابلیت بالای این روش در پیش‌بینی غلظت رسوب برای سطوح متفاوتی از متغیرهای مستقل است. مزیت اصلی مدل‌سازی به روش پاسخ سطح کاهش تعداد آزمایش‌ها بوده که در نتیجه‌ی آن هزینه‌های آزمایشگاهی و زمان لازم برای انجام پژوهش نیز کاهش می‌یابد. از این رو استفاده از این روش برای مطالعات مشابه که در آن‌ها بررسی اثر توأم تعداد زیادی متغیر مستقل بر روی یک متغیر پیوسته مدنظر است، می‌تواند مفید باشد.

نتیجه‌گیری کلی

هدف از این پژوهش بررسی قابلیت روش طرح مرکب مرکزی در مدل‌سازی اثر دبی جریان، پوشش سنگریزه‌ی سطح و همچنین اندازه سنگریزه‌ها بود. براساس نتایج این پژوهش، افزایش پوشش سنگریزه‌ی سطحی غلظت رسوب و در نتیجه تلفات خاک را کاهش می‌دهد. با این حال نقش سنگریزه‌های ریز در کاهش رسوب در مقایسه با سنگریزه‌های درشت‌تر بیش‌تر بود. از این رو حضور سنگریزه‌های با ابعاد ریز در سطح زمین می‌تواند در کاهش فرسایش خاک به‌ویژه در اراضی شیب‌دار کوهستانی سودمند باشد. این نتیجه از دیدگاه کاربردی می‌تواند حائز اهمیت باشد چرا که در اغلب اراضی زراعی دیم در مناطق شیب‌دار اقدام به جمع‌آوری سنگریزه‌ی سطحی به‌منظور تسهیل عملیات کاشت، می‌شود. بنابراین بایستی در نظر گرفت که این اقدام در عین سودمند بودن،

References

- Abrahams, A. D., & Parsons, A. J. (1991). Relation between infiltration and stone cover on a semiarid hillslope, southern Arizona. *Journal of Hydrology*, 122(1), 49-59.
- Abrahams, A. D., Li, G., Krishnan, C., & Atkinson, J. F. (2001). A sediment transport equation for interrill overland flow on rough surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(13), 1443-1459.
- Aghaeinejad-Meybodi, A., Ebadi, A., Shafiei, S., Khataee, A., & Rostampour, M. (2015). Degradation of antidepressant drug fluoxetine in aqueous media by ozone/H₂O₂ system: process optimization using central composite design. *Environmental technology*, 36(12), 1477-1488.
- Amanpour, J., Salari, D., Niaei, A., Mousavi, S. M., & Panahi, P. N. (2013). Optimization of Cu/activated carbon catalyst in low temperature selective catalytic reduction of NO process using response surface methodology. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 48(8), 879-886.

- Amin, S., & Ahmadi, S. H. (2006). Incorporating rock fragments in soil erosion models: a case study, the ANSWERS model. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 30(B4).
- Bashari, M., Moradi, H. R., Kheirkhah, M. M., & Jafari Khaledi, M. (2013). Simulation of the effect of soil surface rock fragments on runoff and sediment yield. *Watershed Engineering and Management*, 5(2): 104-114.
- Bunte, K., & Poesen, J. (1994). Effects of rock fragment size and cover on overland flow hydraulics, local turbulence and sediment yield on an erodible soil surface. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19(2), 115-135.
- Chen, H., Liu, J., Wang, K., & Zhang, W. (2011). Spatial distribution of rock fragments on steep hillslopes in karst region of northwest Guangxi, China. *Catena*, 84(1), 21-28.
- de Figueiredo, T., & Poesen, J. (1998). Effects of surface rock fragment characteristics on interrill runoff and erosion of a silty loam soil. *Soil and Tillage Research*, 46(1), 81-95.
- Guo, T., Wang, Q., Li, D., & Zhuang, J. (2010). Effect of surface stone cover on sediment and solute transport on the slope of fallow land in the semi-arid loess region of northwestern China. *Journal of Soils and Sediments*, 10(6), 1200-1208.
- JAVADI, P., Rouhipour, H., & Mahboubi, A. A. (2005). Effect of rock fragments cover on erosion and overland flow using flume and rainfall simulator.
- Jomaa, S., Barry, D. A., Heng, B. C. P., Brovelli, A., Sander, G. C., & Parlange, J. Y. (2013). Effect of antecedent conditions and fixed rock fragment coverage on soil erosion dynamics through multiple rainfall events. *Journal of Hydrology*, 484, 115-127.
- Mandal, U. K., Rao, K. V., Mishra, P. K., Vittal, K. P. R., Sharma, K. L., Narsimlu, B., & Venkanna, K. (2005). Soil infiltration, runoff and sediment yield from a shallow soil with varied stone cover and intensity of rain. *European Journal of Soil Science*, 56(4), 435-443.
- Martínez-Zavala, L., & Jordán, A. (2008). Effect of rock fragment cover on interrill soil erosion from bare soils in Western Andalusia, Spain. *Soil Use and Management*, 24(1), 108-117.
- Mirzaei, S., Gorji, M., & JAFARI, A. A. (2012). Effect of surface rock fragment cover on soil erosion and sediment using simulated runoff.
- Mousavi, S. M., Niaei, A., Salari, D., Panahi, P. N., & Samandari, M. (2013). Modelling and optimization of Mn/activate carbon nanocatalysts for NO reduction: comparison of RSM and ANN techniques. *Environmental technology*, 34(11), 1377-1384.
- Myers, R. H., & Montgomery, D. C. (2002). *Response Surface Methodology*, John Wiley&Sons. Inc., USA.
- Nearing, M. A., Norton, L. D., Bulgakov, D. A., Larionov, G. A., West, L. T., & Dontsova, K. M. (1997). Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research*, 33(4), 865-876.
- Poesen, J., & Lavee, H. (1994). Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena*, 23(1), 1-28.
- Rieke-Zapp, D., Poesen, J., & Nearing, M. A. (2007). Effects of rock fragments incorporated in the soil matrix on concentrated flow hydraulics and erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(7), 1063-1076.
- Sheydaei, M., Aber, S., & Khataee, A. (2014). Degradation of amoxicillin in aqueous solution using nanolepidocrocite chips/H₂O₂/UV: optimization and kinetics studies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 1772-1778.
- Tetegan, M., Nicoullaud, B., Baize, D., Bouthier, A., & Cousin, I. (2011). The contribution of rock fragments to the available water content of stony soils: Proposition of new pedotransfer functions. *Geoderma*, 165(1), 40-49.
- Valentin, C., & Casenave, A. (1992). Infiltration into sealed soils as influenced by gravel cover. *Soil Science Society of America Journal*, 56(6), 1667-1673.

Modeling of the effect of rock fragment cover and sizes on the sediment concentration using response surface method

Farrokh Asadzadeh ^{1*}, Mohiaddin Fegh-Hassan-Agha ², Habib Khodaverdiloo ³

(Received: December 2014

Accepted: September 2015)

Abstract

Surface rock fragment is one of the most important factors controlling soil erosion especially in hillslopes of arid and semiarid regions where, modeling of its effects on soil erosion has a great complexity. This study aims to model the interactive effects of surface runoff, rock fragment cover and rock fragments size on the sediment concentration using the response surface method according to the central composite design. Two sets of experiments were carried out on a fixed bed slope of 5 percent. The first set of experiments used to develop the predictive model based on central composite design and the second set of the experiments were applied to validate the model. The results of first data set indicated the high efficiency ($R^2= 0.934$ and $RMSE=1.6 \text{ gl}^{-1}$) of the predictive model of sediment concentration. The model validation with the second set of data also indicated a good agreement ($R^2= 0.895$ and $RMSE=3.6 \text{ gl}^{-1}$) between the predicted values of sediment concentration and the experimental values with a wide range of independent variables. From the modeling approach and experimental data it could be concluded that the sediment concentration decreases as the rock fragment cover at the soil surface increases in the range of 0 to 45 percent. However the efficiency of the small rock fragments in decreasing the sediment concentration is higher than the coarse rock fragments.

Keywords: Sediment concentration, Surface rock fragment, Run-on simulation, Central composite design

1- Assistant Professor, Department of Soil Science, Urmia University, Iran

2- M.Sc. Student, Department of Soil Science, Urmia University, Iran

3- Associate Professor, Department of Soil Science, Urmia University, Iran

* Corresponding author: f.asadzadeh@urmia.ac.ir