

## کاربرد طرح مرکب مرکزی برای پیش بینی تلفات خاک و سرعت رواناب سطحی

### در حضور سنگریزه‌ی سطحی

فرخ اسدزاده<sup>۱\*</sup>، محی‌الدین فقه‌حسن آقا<sup>۲</sup>، حبیب خداوردیلو<sup>۳</sup>

۱. استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۳. دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۳/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۵/۱۹)

### چکیده

اثر پوشش سنگریزه‌ی سطحی بر فرآیندهای فرسایش آبی، از موضوعات مهم و مورد توجه در تحقیقات فرسایش خاک در طول دو دهه‌ی اخیر محسوب می‌شود. اثرات گوناگون متغیرهای مربوط به سنگریزه‌ی سطحی نظیر پوشش، اندازه و موقعیت سنگریزه سبب پیچیدگی مدل‌سازی نقش آن در فرسایش خاک می‌گردد. هدف از این مطالعه، مدل‌سازی کمی اثر توأم پوشش سنگریزه‌ی سطحی، اندازه‌ی سنگریزه و دبی جریان بر تلفات خاک و سرعت رواناب سطحی با استفاده از روش پاسخ سطح و بر مبنای طرح مرکب مرکزی بود. برای این منظور آزمایش‌های شبیه‌سازی رواناب و فرسایش با استفاده از فلومی با ابعاد ۶×۰/۵ متر در دو سری طراحی و اجرا شد. دامنه‌ی پوشش سنگریزه‌ی سطحی برابر با ۰-۴۵ درصد، قطر متوسط سنگریزه‌ها برابر با ۳-۹ سانتی‌متر و دبی جریان برابر با ۵-۱/۶۷ سانتی‌مترمربع بر ثانیه در نظر گرفته شد. آزمایش‌های سری دوم برای مدل‌سازی با استفاده از طرح مرکب مرکزی مورد استفاده واقع شده و آزمایش‌های سری اول نیز برای اعتبارسنجی مدل توسعه داده شده از سری دوم به کار برده شدند. نتایج نشان داد که مدل طرح مرکب مرکزی توانایی بالایی در پیش‌بینی سرعت جریان آب ( $R^2 = 0/993$ ) و تلفات خاک ( $R^2 = 0/994$ ) دارد. نتایج اعتبارسنجی مدل بیانگر کارآمدی مدل در پیش‌بینی سرعت جریان رواناب ( $R^2 = 0/887$ ) و تلفات خاک ( $R^2 = 0/851$ ) برای آزمایش‌های سری دوم بود. پوشش سنگریزه، دبی جریان و قطر سنگریزه‌ها به ترتیب بیش‌ترین تاثیر را بر سرعت جریان و تلفات خاک داشته و بین پوشش سنگریزه و دبی جریان اثر متقابل وجود داشت. بین سرعت جریان و تلفات خاک یک رابطه‌ی خطی و معنی‌دار ( $R^2 = 0/504$ ) مشاهده شد.

**واژه‌های کلیدی:** پوشش سطح خاک، شبیه‌سازی رواناب، روش پاسخ سطح، فرسایش خاک، مدل‌سازی

### مقدمه

می‌شوند (Vaezi et al., 2016). بر این اساس، ویژگی‌های ذاتی خاک و همچنین پوشش سطح آن، به عنوان عواملی که مقاومت خاک در مقابل نیروهای فرساینده را تعیین می‌کنند، نقش مهمی در کنترل تلفات خاک دارند.

در رابطه با تاثیر ویژگی‌های ذاتی خاک و پوشش گیاهی بر میزان تلفات خاک، پژوهش‌های فراوانی صورت گرفته است. با این حال تاثیر متغیرهای مختلف مربوط به سنگریزه‌ی سطحی بر مقدار تلفات خاک کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. به گونه‌ای که در بیش‌تر مدل‌های پیش‌بینی فرسایش خاک نقش این عامل به روشنی در نظر گرفته نشده است (Mandal et al., 2005; Amin and Ahmadi, 2006). این در حالی است که در اغلب مناطق کوهستانی مربوط به نواحی خشک و نیمه‌خشک، سطح خاک با مقادیر مختلفی از سنگریزه‌های با ابعاد گوناگون پوشیده شده است (Chen et al., 2011; Li et al., 2011). برای

فرسایش خاک و پیامدهای زیست‌محیطی آن، از مهم‌ترین چالش‌های مرتبط با مناطق طبیعی محسوب می‌گردد. آسیب‌های درون منطقه‌ای و برون منطقه‌ای فرسایش آبی به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی قابل ملاحظه‌ای را وارد می‌نماید. آثار و پیامدهای منفی فرسایش آبی، کاربرد روش‌های علمی و دقیق در کنترل آن را اجتناب‌ناپذیر نموده است. قدم اول در تدوین راه‌کارهای کارآمد به منظور کنترل فرسایش خاک، شناخت دقیق و کمی عوامل تاثیرگذار بر فرسایش آبی و همچنین چگونگی برهمکنش این عوامل بر یکدیگر است. عوامل موثر بر فرسایش خاک به طور کلی در قالب دو مفهوم فرساینندگی و فرسایش‌پذیری طبقه‌بندی

نمونه گزارش‌ها نشان می‌دهد که در نواحی غرب اروپا پوشش سنگریزه در خاک‌ها به طور متوسط در حدود ۳۰ درصد است و یا در مناطق مدیترانه‌ای نیز در بیش از ۶۰ درصد خاک‌ها مقدار قابل توجهی از سنگریزه‌ی سطحی گزارش شده است (Poesen and Lavee, 1994). (Chen *et al.*, (2011) نیز مقادیر پوشش سنگریزه‌ای در مناطق شمال غرب چین را در محدوده‌ی ۴۰-۱۰ درصد گزارش نموده‌اند. در کشور ما نیز با وجود اینکه آمار مشخصی در زمینه گستره‌ی خاک‌های سنگریزه‌ای وجود ندارد، مشاهدات صحرایی و گزارش‌های پراکنده‌ی مطالعات میدانی نشان می‌دهد که بسیاری از اراضی شیب‌دار حاوی مقادیر مختلفی از سنگریزه‌های سطحی با اندازه‌های متنوع هستند.

حضور سنگریزه در سطح خاک می‌تواند اثرات گوناگونی بر خصوصیات هیدرولیکی و فرآیندهای مرتبط با فرسایش داشته باشد. سنگریزه‌ی سطحی با حفاظت از سطح خاک در برابر ضربه‌ی قطرات باران و تغییر در ویژگی‌های هیدرولیکی رواناب می‌تواند فرآیند فرسایش آبی را تحت تاثیر قرار دهد (Abrahams *et al.*, 2001). با وجود گستردگی وسیع خاک‌های حاوی سنگریزه، تاکنون مطالعات نسبتاً کمی در رابطه با نقش متغیرهای مختلف مربوط به سنگریزه در فرآیند فرسایش آبی صورت گرفته و بسیاری از جنبه‌های اثرگذار سنگریزه، به ویژه اثرهای متقابل آن با سایر عوامل دخیل در فرسایش خاک نظیر شدت جریان رواناب، هنوز ناشناخته هستند. مقدار پوشش سطحی، ابعاد و همچنین موقعیت قرارگیری سنگریزه‌ها در متن خاک به عنوان متغیرهای اصلی و تاثیرگذار در فرآیند فرسایش آبی شناخته می‌شوند (Figueiredo and Poesen, 1998; Bashari *et al.*, 2013) که در میان این متغیرها، اثر درصد پوشش سطحی بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته است.

(de Lima and de Lima (1990) با استفاده از شبیه‌سازی باران در یک فلوم کوچک آزمایشگاهی (۱×۰/۵ m) دریافتند که افزایش مقدار سنگریزه در محدوده‌ی ۰ تا ۴۰ درصد سبب کاهش نمایی مقدار تلفات خاک می‌گردد. پژوهشگران دیگری نیز تحت شرایط شبیه‌سازی باران نتایج تقریباً مشابهی را گزارش نموده‌اند (Poesen and Figueiredo, 1998; Mandal *et al.*, 2010; Zavala *et al.*, 2010; *al.*, 2005). براساس نتایج این پژوهش‌ها، به نظر می‌رسد در شرایط شبیه‌سازی باران در فلوم‌های کوچک آزمایشگاهی که در آن‌ها عموماً فرآیند فرسایش بین‌شیاری غالب است، نقش سنگریزه‌ها در کاهش انرژی قطرات باران و همچنین سطح قابل فرسایش بیش‌ترین تاثیر را کاهش فرسایش دارد. با این حال برخی دیگر از پژوهش‌گران به نتایج متفاوتی در این زمینه رسیده‌اند. برای نمونه (Javadi *et al.*, 2005) بررسی

اثر پوشش سنگریزه در محدوده‌ی پوشش‌های ۶۰-۰ درصد با استفاده از شبیه‌سازی باران دریافتند که با افزایش پوشش سنگریزه تا مقادیر ۱۵ درصد، مقدار تلفات خاک افزایش و پس از آن با اضافه شدن درصد پوشش سنگریزه مقدار فرسایش کاهش می‌یابد. این پژوهش‌گران اظهار نمودند که علاوه بر نقش حفاظتی سنگریزه‌ها در کاهش تلفات خاک، اثر سنگریزه‌ها در افزایش تلاطم جریان نیز می‌تواند عامل مهمی در تغییر تلفات خاک باشد. (Bashari *et al.*, (2013) با بررسی اثر پوشش سنگریزه‌ای در محدوده‌ی ۲۵-۰ درصد تحت شرایط شبیه‌سازی باران با شدت ۷۰ میلی‌متر در ساعت، دریافتند که افزایش پوشش سطحی سنگریزه‌ای سبب افزایش غلظت رسوب خروجی شده ولی مقدار رواناب را به طور معنی‌داری تغییر نمی‌دهد. این پژوهشگران حداکثر غلظت رسوب را در پوشش سنگریزه‌ای ۲۰ درصد مشاهده نمودند.

(Poesen *et al.*, (1994) بیان نمودند که چگونگی تاثیر سنگریزه‌ی سطحی بر تلفات خاک تابعی از مقیاس مطالعه است. نتایج این پژوهش‌گران بیانگر این واقعیت بود که در مقیاس کرت‌های کوچک و بسیار بزرگ، حضور سنگریزه‌ها باعث کاهش تلفات خاک می‌شود در حالی که تاثیر سنگریزه‌ها در مقیاس کرت‌های با ابعاد متوسط ( $10^2 - 10^3 m^2$ ) پیچیده بوده و به خوبی شناخته شده نیست. با این حال (Poesen *et al.*, (1999) در یک فلوم کوچک آزمایشگاهی (۲×۰/۱ m) کاهش نمایی تلفات خاک با افزایش درصد پوشش سنگریزه‌ی سطحی را مشاهده نمودند. هر چند نتایج این پژوهش‌گران موید این نکته بود که نقش حفاظتی سنگریزه‌ها با گذشت زمان و افزایش آب‌سستگی اطراف قطعات سنگریزه‌ها، کاهش می‌یابد.

به طور کلی بررسی منابع مختلف بیانگر این نکته است که اثر پوشش سنگریزه‌ای بر میزان تلفات خاک بسته به شرایط آزمایش نظیر دامنه‌ی پوشش سنگریزه‌ها، شبیه‌سازی باران و یا رواناب، دامنه‌ی شدت باران و دبی رواناب به کار رفته، اندازه سنگریزه‌ها و موقعیت آن‌ها در سطح خاک می‌تواند متفاوت باشد به گونه‌ای که نتایج برخی از پژوهش‌گران بیانگر اثر مثبت سنگریزه در کاهش فرسایش خاک است (Mirzaee *et al.*, 2012; Zavala *et al.*, 2010; Mandal *et al.*, 2005; Figueiredo and Poesen, 1998). در حالی که نتایج برخی از پژوهش‌ها نیز نشان دهنده‌ی افزایش تلفات خاک با افزوده شدن سنگریزه‌ی سطحی است (Bashari *et al.*, 2013; Abrahams and Parsons, 1991; Valentin and Casenave, 1992). دیگر از پژوهش‌گران نیز به اثر دوگانه‌ی سنگریزه‌ی سطحی اشاره نموده و بیان کرده‌اند که با افزایش پوشش سطحی تا یک حد مشخص مقدار فرسایش خاک افزایش و پس از آن با افزایش

طوری که در نهایت برای هر آزمایش، یک بستر خاک با ارتفاع حدود ۲۰ سانتی متر و با چگالی ظاهری تقریباً برابر با  $gcm^{-3}$  ۱/۲ آماده شد (Rieke-Zapp *et al.*, 2007).

پوشش سنگریزه‌ی سطحی در این پژوهش با استفاده از قطعات سنگی با ابعاد ۳ تا ۹ سانتی متر ایجاد شد. دامنه‌ی پوشش‌های سطحی نیز در محدوده‌ی ۴۵-۰ درصد بود. توزیع قطعات سنگریزه‌ای بر روی سطح خاک به صورت تصادفی و یکنواخت بود. در این پژوهش، دامنه‌ی دبی برای جریان‌های رواناب بین ۵ تا ۱۵ لیتر در دقیقه ( $cm^3cm^{-1}s^{-1}$  ۵-۱/۶۷) بود. برای شروع هر آزمایش، خاک داخل فلوم به مدت ۸ ساعت از زیر اشباع و بعد از ۲۴ ساعت آزمایش اصلی بر روی نمونه خاک اشباع شده صورت گرفت. 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. در شکل ۱ نمایشی از سطح فلوم در شرایط حضور و عدم حضور سنگریزه‌ی سطحی نشان داده شده است.

**آزمایش‌های معمول بر حسب ترکیب متداول تیمارها**  
در این آزمایش‌ها ۴ تیمار مختلف پوشش سطحی؛ شامل خاک بدون پوشش و خاک با پوشش‌های سطحی ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد با سه تیمار دبی جریان سطحی شامل دبی‌های ۱/۶۷، ۳/۳۴ و  $5 (cm^3cm^{-1}s^{-1})$  و با سه اندازه مختلف سنگریزه شامل سنگریزه‌های با قطر متوسط ۳، ۶ و ۹ سانتی‌متر ترکیب شده و در مجموع ۳۰ آزمایش شبیه‌سازی رواناب انجام گردید. نتایج این آزمایش‌ها به منظور اعتبارسنجی مدل به دست آمده از روش طرح مرکب مرکزی مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه این آزمایش‌ها تحت عنوان آزمایش‌های سری اول نامیده خواهند شد.

### آزمایش‌های طرح مرکب مرکزی

طراحی آزمایش‌های طرح مرکب مرکزی و تجزیه و تحلیل داده‌های آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار MINITAB 14 انجام شد. متغیرهای مستقل مورد آزمایش در این پژوهش شامل اندازه سنگریزه (قطر متوسط ۳-۹cm)، پوشش سنگریزه (۴۵-۰ درصد) و دبی جریان ( $cm^3cm^{-1}s^{-1}$  ۵-۱/۶۷) بود. طراحی آزمایش‌ها با ترکیب مقادیر مختلف هر یک از متغیرهای مستقل با استفاده از روش پاسخ سطح و بر مبنای طرح مرکب مرکزی انجام شد. در این روش مقدار هر یک از متغیرهای مورد نظر با استفاده از رابطه زیر کدبندی می‌شود (Zhu *et al.*, 2011; Long *et al.*, 2013).

$$X_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta x} \quad (\text{رابطه ۱})$$

پوشش سطحی مقدار فرسایش کاهش می‌یابد (Javadi *et al.*, 2005; Rouhipour *et al.*, 2005).

به نظر می‌رسد که در پژوهش‌های صورت گرفته شرایط آزمایش‌ها تاثیر قابل توجهی بر نتایج حاصله داشته و در اغلب پژوهش‌ها به اثر توأم ابعاد سنگریزه، ویژگی‌های جریان و همچنین پوشش سطحی کم‌تر توجه شده است. بررسی اثر توأم این عوامل با طرح‌های معمول آماری بسیار دشوار است چرا که ترکیب تعداد زیادی متغیر با دامنه‌های کمی متفاوت، تعداد واحدهای آزمایشی را به سرعت بالا برده و سبب افزایش هزینه و اتلاف وقت می‌گردد. طرح‌های مبتنی بر روش پاسخ سطح<sup>۱</sup> مانند طرح مرکب مرکزی<sup>۲</sup> با غلبه بر این محدودیت، امکان مدل‌سازی کمی ارتباط هم‌زمان چندین متغیر مستقل با یک و یا چند متغیر وابسته را با حداقل تعداد آزمایش‌های ممکن فراهم می‌آوردند (Zhu *et al.*, 2011; Álvarez *et al.*, 2015). روش پاسخ سطح یک تکنیک ترکیبی از روش‌های آماری و ریاضی است که با طراحی تعداد مناسبی آزمایش و تلفیق نتایج آن‌ها از طریق تحلیل معادلات چندپارامتری، متغیر پاسخ را پیش‌بینی و یا بهینه‌سازی می‌نماید (Gomez and Sartaj, 2014). بر این اساس هدف از مطالعه‌ی حاضر مدل‌سازی اثر توأم فراوانی و اندازه‌ی سنگریزه‌های سطحی در کنار دبی جریان رواناب بر میزان تلفات خاک و سرعت رواناب سطحی در شرایط آزمایشگاهی و با استفاده از طرح مرکب مرکزی است.

### مواد و روش‌ها

#### تهیه‌ی بستر آزمایش برای شبیه‌سازی رواناب

در این پژوهش از یک نمونه خاک آهکی با بافت لوم‌رس سیلتی به عنوان بستر آزمایش استفاده شد. شبیه‌سازی رواناب با استفاده از یک فلوم شیب‌پذیر با ابعاد  $6m \times 0.5m$  انجام شد. برای تهیه‌ی بستر آزمایش‌ها، ابتدا در کف فلوم یک لایه‌ی زهکش به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر از سنگریزه‌هایی با قطر ۱۵ میلی‌متر ایجاد شد. بر روی این لایه‌ی زهکش یک لایه گونی کتانی با هدف جلوگیری از مخلوط شدن خاک بستر آزمایش و لایه زهکش قرار گرفت. سپس نمونه خاک بستر آزمایش که قبلاً از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شده بود به آرامی بر روی لایه‌ی گونی کتانی ریخته شده و سطح آن صاف شد. اضافه کردن خاک به درون فلوم به تدریج انجام شده و سطح آن پس از صاف شدن با یک غلطک دستی فلزی که دارای ابعادی متناسب با عرض فلوم بود؛ به طور مرتب صاف و متراکم شد به

1. Response Surface Methodology (RSM)  
2. Central Composite Design (CCD)



شکل ۱- سطح آماده شده فلوم در شرایط حضور و عدم حضور سنگریزه‌ی سطحی

خاک و همچنین سرعت رواناب به عنوان متغیر پاسخ وارد مراحل مدل‌سازی گردید.

### نتایج و بحث

#### تلفات خاک و سرعت جریان در آزمایش‌های سری اول

در شکل ۲ نتایج مربوط به تغییرات سرعت جریان پایدار و همچنین تلفات خاک برای آزمایش‌های سری اول که در آنها تیمارهای مربوط به پوشش، اندازه و دبی جریان به صورت معمول با یکدیگر ترکیب شده‌اند، ارائه شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش پوشش سنگریزه‌ی سطحی سرعت جریان رواناب و همچنین مقدار تلفات خاک برای تمامی آزمایش‌ها کاهش می‌یابد. این امر نشان دهنده‌ی تاثیر مثبت سنگریزه‌های سطحی در کاهش سرعت جریان رواناب سطحی و در نتیجه تلفات خاک می‌باشد. *Mirzaee et al.*, (2012) نیز در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی مشابه در یک نمونه خاک لسی کاهش نمایی تلفات خاک را با افزایش پوشش سنگریزه‌ای گزارش نموده‌اند. البته بایستی توجه نمود که تغییرات سرعت جریان و تلفات خاک در دبی‌ها و قطرهای مختلف سنگریزه متفاوت است. برای نمونه در دبی  $1/67 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ، نسبت تلفات خاک در خاک بدون پوشش به خاک با ۴۵ درصد پوشش D1، برابر با ۲/۶۴ است در حالی که این نسبت برای دبی  $3/34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$  برابر با ۱/۷ است. همچنین نسبت سرعت جریان متناظر برای آزمایش‌های فوق به ترتیب برابر با ۲/۸۵ و ۲/۷ است. *Mandal et al.*, (2005) نیز در یک مطالعه‌ی صحرائی با استفاده از شبیه‌سازی باران دریافتند که تاثیر پوشش سنگریزه‌ی سطحی بر مقدار تلفات خاک از شدت باران تاثیر می‌پذیرد. قطرهای مختلف سنگریزه نیز تاثیر متفاوتی بر تلفات خاک دارند. به طوری که سنگریزه‌های با قطر بزرگ‌تر (D3) در مقایسه با سنگریزه‌های با قطر کوچک‌تر (D1)، تلفات خاک

جدول ۱. دامنه مقادیر آزمایشی متغیرهای مورد استفاده در مدل‌سازی

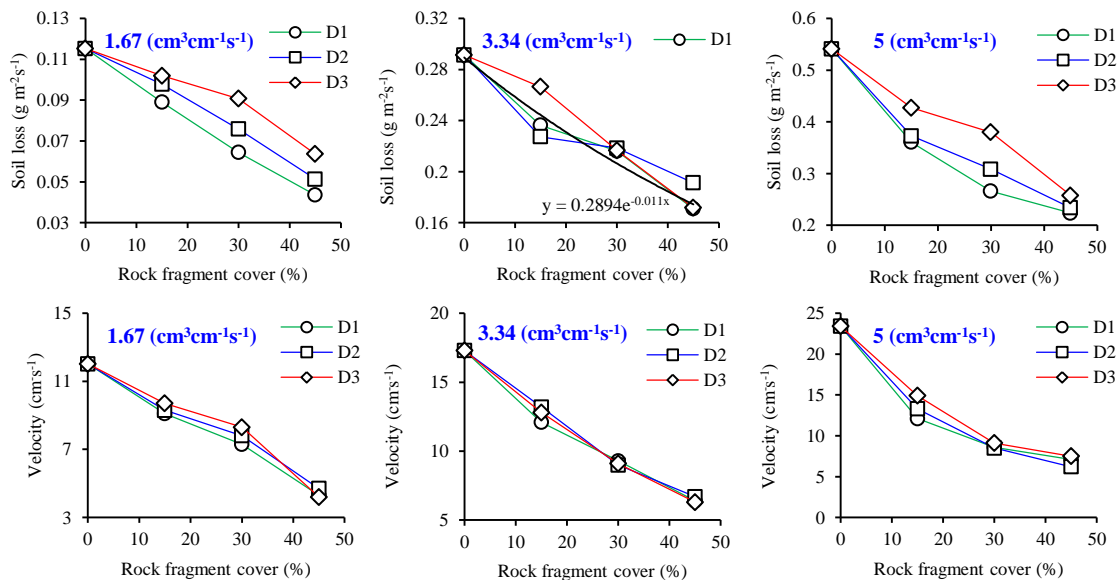
متغیرهای مستقل	فاکتور			دامنه و مقادیر
	$X_1$	۱	۰	
دبی جریان ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )	$X_1$	۵/۰۰	۳/۳۴	۱/۶۷
پوشش سنگریزه (%)	$X_2$	۴۵	۲۲/۵	۰
قطر سنگریزه (cm)	$X_3$	۹	۶	۳

در این رابطه  $X_0$ ،  $X_1$  و  $X_i$  به ترتیب نشان دهنده‌ی مقدار گذشته‌ی متغیر، مقدار واقعی هر متغیر و مقدار میانگین دامنه‌ی هر متغیر است.  $\Delta x$  نیز مقدار تغییر گام<sup>۳</sup> هر پارامتر است. براساس جدول ۱ مقدار  $X_0$  برای متغیرهای دبی جریان، پوشش سنگریزه و قطر سنگریزه، به ترتیب برابر با  $3/34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ، ۲۲/۵ درصد و ۶cm است. مقدار  $\Delta x$  نیز برای این متغیرها به ترتیب برابر با ۱/۶۶، ۲۲/۵ و ۳ در نظر گرفته شد. در ادامه آزمایش‌های مربوط به طرح مرکب مرکزی تحت عنوان آزمایش‌های سری دوم نامیده خواهند شد. جدول ۱ دامنه‌ی متغیرها با مقادیر واقعی و کدبندی شده برای سری دوم آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

در هر آزمایش پس از تنظیم دبی جریان و شیب، رواناب سطحی از ابتدای فلوم به سطح خاک وارد شده و آزمایش بهمدت ۳۰ دقیقه و تا حصول اطمینان از رسیدن غلظت رسوب خروجی به حالت پایدار ادامه یافت. در طول آزمایش، در زمان‌های مختلف از رواناب خروجی از فلوم نمونه‌برداری شده و غلظت رسوب نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. براساس غلظت رسوب پایدار، مقدار تلفات خاک ( $\text{gm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) محاسبه شد. همچنین در هر آزمایش سرعت جریان رواناب سطحی با استفاده از روش ردیابی ماده رنگی (*Abrahams et al.*, 1986) اندازه‌گیری شده و سرعت جریان پایدار برای هر آزمایش تعیین شد. مقدار تلفات

سنگریزه‌ی سطحی کاهش می‌یابد ولی مقدار این کاهش در دبی‌ها و سنگریزه‌های با قطر مختلف متفاوت است. که برای روشن شدن این موارد و برهمکنش بین این متغیرها در ادامه نتایج مربوط به آزمایش‌های سری دوم (طرح مرکب مرکزی) مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

بیش‌تری را ایجاد نموده‌اند. برای نمونه، تلفات خاک در پوشش سنگریزه‌ای ۳۰ درصد و دبی جریان  $5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ، برای قطر D1، ۴۲ درصد بیش از قطر D1 است. این اختلاف بین قطر D3 و D1 برای همان دبی و در پوشش ۱۵ درصد در حدود ۱۸ درصد است. به طور کلی نتایج این بخش بیانگر این واقعیت است که هر چند تلفات خاک و سرعت جریان با افزایش پوشش



شکل ۲. ارتباط بین تلفات خاک و سرعت جریان با پوشش سنگریزه سطحی برای دبی‌های مختلف و اندازه‌های متفاوت سنگریزه (D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده‌ی قطرهای متوسط ۳، ۶ و ۹ سانتی‌متر برای سنگریزه‌ها هستند)

درجه دو کامل (معادله‌ی ۲) که شامل برهمکنش بین همه متغیرها است، استفاده شد (Gomez and Sartaj, 2014; Álvarez et al., 2015).

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^k \alpha_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \alpha_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad i \neq j \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این معادله؛ Y متغیر پاسخ (سرعت جریان و یا تلفات خاک)، X<sub>i</sub> و X<sub>j</sub> متغیرهای مستقل کد شده، k تعداد متغیرهای مستقل، ε باقیمانده‌های مدل (اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده مدل) و α<sub>0</sub>، α<sub>i</sub>، α<sub>ii</sub>، α<sub>ij</sub> نیز به ترتیب نشان دهنده‌ی اثر عرض از مبدأ، اثر توابع خطی، درجه دو و برهمکنش بین متغیرها است.

براساس طرح مرکب مرکزی و ورودی‌های جدول ۲ برای متغیرهای مستقل (دبی جریان، پوشش سنگریزه و اندازه سنگریزه) و متغیرهای پاسخ شامل سرعت جریات و تلفات خاک، به ترتیب معادلات ۳ و ۴ برای پیش‌بینی سرعت جریان و تلفات خاک به دست آمدند. در این دو معادله X<sub>1</sub>، X<sub>2</sub> و X<sub>3</sub> به ترتیب مربوط به مقادیر کد شده‌ی دبی جریان، پوشش سطحی سنگریزه و قطر سنگریزه‌ها می‌باشند.

### مدل‌سازی سرعت جریان و تلفات خاک براساس طرح مرکب مرکزی

آزمایش‌های سری دوم بر مبنای طرح مرکب مرکزی طراحی و اجرا شدند. به این ترتیب براساس سه متغیر مستقل (دبی جریان، قطر سنگریزه و درصد پوشش سطحی سنگریزه)، ۲۰ آزمایش با شش نقطه‌ی مرکزی که معادل با مقدار میانگین دامنه‌ی متغیرهای مستقل بودند، طراحی شد. در روش پاسخ سطح طراحی تیمارهای آزمایشی بر مبنای مقادیر حداقل و حداکثر دامنه‌ی معرفی شده برای هر متغیر کمی صورت می‌گیرد و با توجه اهمیت بیشتر نقاط مرکزی در مدل‌سازی اثر متغیرها، در این روش نقاط مرکزی که همان مقادیر مربوط به میانه‌ی دامنه‌ی هر یک از متغیرهای کمی است، چندین بار تکرار می‌شوند که این امر در جدول ۲ برای مقادیر کد شده‌ی معادل با صفر قابل مشاهده است. مقادیر کد شده‌ی (با استفاده از معادله‌ی ۱) مربوط به هر یک از متغیرهای مستقل در تمامی ۲۰ آزمایش انجام شده به همراه مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی تلفات خاک و سرعت جریان در آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. در مدل‌سازی طرح مرکب مرکزی، از تابع چندجمله‌ای

جدول ۲. ماتریس مقادیر متغیرهای کد شده در مدل سازی روش طرح مرکب مرکزی

شماره آزمایش	مقادیر کد شده متغیرها					
	مقدار مشاهده‌ای متغیر پاسخ	سرعت جریان	تلفات خاک	قطر سنگریزه	پوشش سنگریزه (%)	دبی جریان
	( $gm^{-2}s^{-1}$ )	( $cms^{-1}$ )	( $gm^{-2}s^{-1}$ )	(cm)	(%)	( $cm^3cm^{-1}s^{-1}$ )
۱	۰/۱۹۱	۶/۷۰	۰	۰	۱	۰
۲	۰/۰۸۷	۸/۵۵	۰	۰	۰	-۱
۳	۰/۲۲۳	۱۱/۱۰	۰	۰	۰	۰
۴	۰/۱۲۶	۷/۲۱	۰/۵۹	۰/۵۹	۰/۵۹	-۰/۵۹
۵	۰/۳۶۲	۱۵/۸۶	-۰/۵۹	-۰/۵۹	-۰/۵۹	۰/۵۹
۶	۰/۲۶۷	۸/۰۹	۰/۵۹	۰/۵۹	۰/۵۹	۰/۵۹
۷	۰/۲۲۳	۱۱/۱۰	۰	۰	۰	۰
۸	۰/۲۹۱	۱۷/۳۰	۰	۰	-۱	۰
۹	۰/۱۶۳	۱۱/۹۵	-۰/۵۹	-۰/۵۹	-۰/۵۹	-۰/۵۹
۱۰	۰/۲۲۳	۱۱/۱۰	۰	۰	۰	۰
۱۱	۰/۱۱۷	۷/۰۴	-۰/۵۹	-۰/۵۹	۰/۵۹	-۰/۵۹
۱۲	۰/۲۲۳	۱۱/۱۰	۰	۰	۰	۰
۱۳	۰/۲۲۳	۱۱/۱۰	۰	۰	۰	۰
۱۴	۰/۲۴۲	۱۰/۹۵	۱	۱	۰	۰
۱۵	۰/۲۳۸	۷/۹۶	-۰/۵۹	-۰/۵۹	۰/۵۹	۰/۵۹
۱۶	۰/۲۲۶	۱۰/۷۰	-۱	-۱	۰	۰
۱۷	۰/۳۴۱	۱۰/۹۰	۰	۰	۰	۱
۱۸	۰/۳۸۱	۱۶/۵۶	۰/۵۹	۰/۵۹	-۰/۵۹	۰/۵۹
۱۹	۰/۱۷۰	۱۲/۱۸	۰/۵۹	۰/۵۹	-۰/۵۹	-۰/۵۹
۲۰	۰/۲۲۳	۱۱/۱۰	۰	۰	۰	۰

دارد به گونه‌ای که ۹۹ درصد از تغییرات سرعت جریان و تلفات خاک مربوط به ۲۰ آزمایش اول با استفاده از مدل طرح مرکب مرکزی قبل تبیین بوده و ریشه میانگین مربعات خطا برای تلفات خاک و سرعت جریان به ترتیب برابر با  $0.006 gm^{-2}s^{-1}$  و  $0.24 cms^{-1}$  به دست آمد.

تجزیه واریانس مربوط به بخش‌های مختلف مدل طرح مرکب مرکزی (معادلات ۳ و ۴) برای هر دو متغیر سرعت جریان و تلفات خاک در جدول ۳ ارائه شده است. براساس نتایج این جدول مشاهده می‌شود که هر سه بخش خطی، درجه دو و برهمکنش بین متغیرها اثر معنی‌داری بر سرعت جریان رواناب و تلفات خاک دارند. به عبارت دیگر می‌توان این گونه استنباط نمود که متغیرهای مستقل مورد بررسی دارای اثر متقابل با یکدیگر بوده و در نظر گرفتن این اثر متقابل در مدل‌سازی تلفات خاک و سرعت جریان سبب افزایش قابل توجه کارایی مدل شده است.

$$Velocity (cms^{-1}) = 11.099 + 1.028X_1 - 3.227X_2 + 0.819X_3 - 0.481X_1^2 + 0.322X_2^2 - 0.093X_3^2 - 0.811X_1X_2 + 0.053X_1X_3 - 0.08X_2X_3$$

(رابطه ۳)

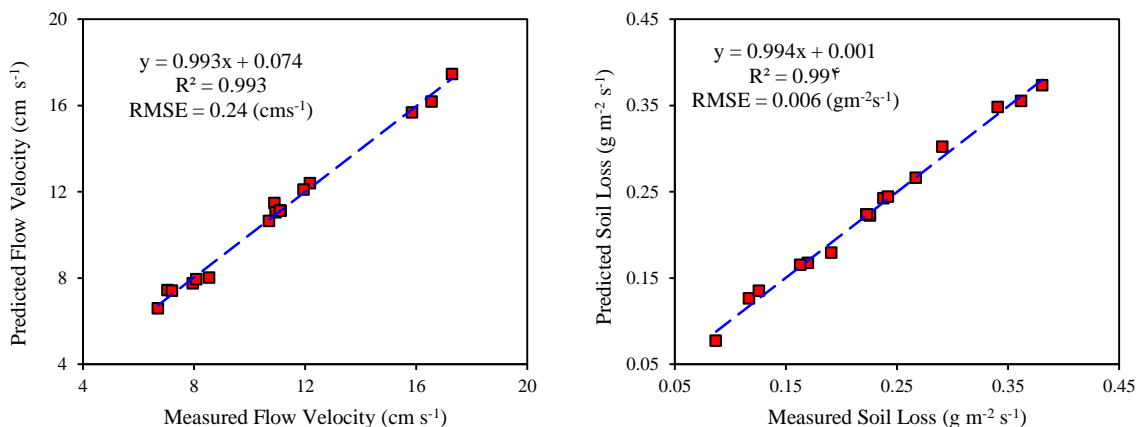
$$R^2 = 0.993 \quad R_{adj}^2 = 0.987$$

$$Soil Loss (gm^{-2}s^{-1}) = 0.2228 + 0.0803X_1 - 0.0365X_2 + 0.0065X_3 - 0.0036X_1^2 + 0.0061X_2^2 + 0.0035X_3^2 - 0.0185X_1X_2 + 0.004X_1X_3 + 0.0015X_2X_3$$

(رابطه ۴)

$$R^2 = 0.994 \quad R_{adj}^2 = 0.988$$

شکل ۳ مقدار تلفات خاک و همچنین سرعت جریان اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های سری دوم را در مقابل مقادیر محاسبه شده‌ی آن‌ها با استفاده از مدل طرح مرکب مرکزی (معادلات ۳ و ۴) نشان می‌دهد. این شکل به روشنی نشان می‌دهد که طرح مرکب مرکزی به خوبی توانایی برقراری ارتباط بین سه متغیر مستقل با سرعت جریان و مقدار تلفات خاک را



شکل ۳. مقایسه بین سرعت جریان و تلفات خاک مشاهده‌ای با مقادیر پیش‌بینی شده‌ی آن‌ها توسط مدل طرح مرکب مرکزی

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس مدل طراحی ترکیبی مرکزی برای پیش‌بینی سرعت جریان و تلفات خاک

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات خطا		آماره‌ی F		مقدار P
		تلفات خاک	سرعت جریان	تلفات خاک	سرعت جریان	
رگرسیون*	۹	۱۸/۶۲	۱۶۱/۰۳	۱۷۰/۵۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
خطی	۳	۵۲/۲۸	۴۵۲/۰۳	۴۹۳/۸۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
درجه دو	۳	۱/۸۱	۱۵/۶۶	۴/۴۰	۰/۰۰۰	۰/۰۳۲
برهمکنش	۳	۱/۸۷	۱۵/۴۰	۱۳/۳۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱

\* تلفات خاک:  $R^2 = ۰/۹۹۴$   $R^2(\text{adj.}) = ۰/۹۸۸$   
 سرعت جریان:  $R^2 = ۰/۹۹۳$   $R^2(\text{adj.}) = ۰/۹۸۷$

۱/۷۶ و ۰/۸۰ بوده و مجموع درصد اثرات این ۶ جزء معادل با ۹۹/۸۶ درصد بود. در رابطه با تلفات خاک نیز نتایج بیانگر این بود که اجزاء مدل طرح مرکب مرکزی شامل دبی جریان، پوشش سنگریزه، برهمکنش بین دبی و پوشش سنگریزه، قطر سنگریزه‌ها و توان دوم قطر پوشش سنگریزه تاثیر معنی‌داری بر تلفات خاک داشته و این پنج جزء به ترتیب ۷۸/۲۲، ۱۶/۱۳، ۴/۱۴، ۰/۵۲ و ۰/۴۵ و در مجموع ۹۹/۴۶ درصد از تغییرات تلفات خاک را می‌توانند به طور معنی‌داری تبیین نمایند. براساس شکل ۳ و بر مبنای سطح معنی‌داری ارائه شده برای هر یک از اجزاء مدل طرح مرکب مرکزی، می‌توان اجزائی از مدل را که دارای اثر معنی‌دار بر متغیر پاسخ نیستند از ساختار مدل حذف نموده و معادلات ۳ و ۴ را برای پیش‌بینی سرعت جریان رواناب و تلفات خاک به شکل دو معادله‌ی ۶ و ۷ ساده‌سازی نمود.

$$\begin{aligned} \text{Velocity (cms}^{-1}\text{)} = & 11.099 + 1.028X_1 - \\ & 3.227X_2 + \\ & 0.819X_3 - 0.481X_1^2 + 0.322X_2^2 - \\ & 0.811X_1X_2 \end{aligned} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$\begin{aligned} \text{Soil Loss (gm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)} = & 0.2228 + \\ & 0.0803X_1 - 0.0365X_2 \\ & + 0.0065X_3 - 0.0036X_1^2 - 0.0185X_1X_2 \end{aligned} \quad (\text{رابطه ۷})$$

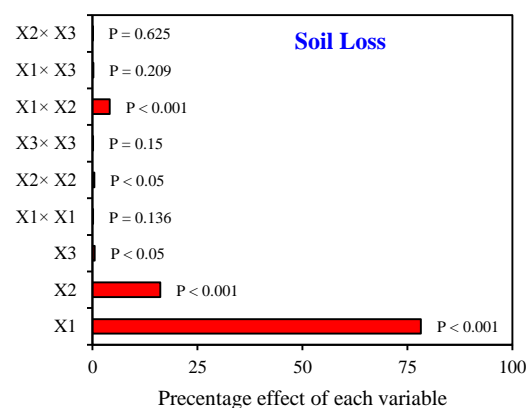
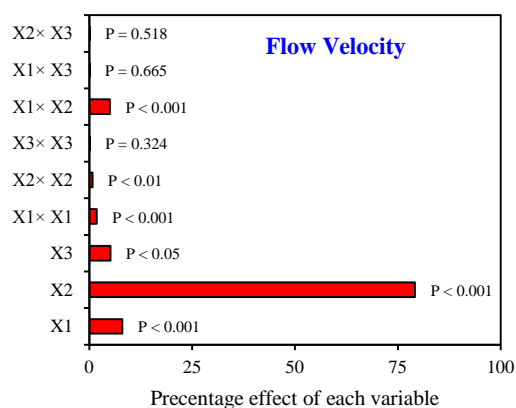
بایستی توجه نمود که نتایج جدول ۳ تنها نماینگر معنی‌داری کلی برای بخش‌های مختلف مدل طرح مرکب مرکزی (معادله‌ی ۲) بوده و با استفاده از اطلاعات این جدول نمی‌توان در رابطه با اثر تک تک اجزای مدل اظهار نظر نمود. بنابراین به منظور تفسیر بهتر نتایج مدل و رتبه‌بندی اثر هر یک از اجزای مدل طرح مرکب مرکزی (معادلات ۳ و ۴) درصد اثر هر یک از این اجزاء و همچنین سطح معنی‌داری هر کدام با استفاده از تحلیل پارتو مطابق با رابطه‌ی ۵ محاسبه شد (Silva et al., 2011; Amanpour et al., 2013).

$$P_i = \left[ \frac{\alpha_i^2}{\sum \alpha_i^2} \right] \times 100 \quad i \neq 0 \quad (\text{رابطه ۵})$$

در این رابطه  $P_i$  نشان دهنده‌ی درصد اثر هر یک از اجزاء و  $\alpha_i$  نشان دهنده‌ی ضریب مربوط به هر کدام از اجزاء مدل است. درصد اثر هر یک از اجزاء مدل طرح مرکب مرکزی به همراه سطح معنی‌داری آن‌ها برای هر دو متغیر سرعت جریان و تلفات خاک در شکل ۴ ارائه شده است. براساس نتایج شکل ۴ از بین متغیرهای مستقل به ترتیب پوشش سنگریزه، دبی جریان، اندازه سنگریزه‌ها، برهمکنش بین دبی و پوشش سنگریزه، توان دوم دبی و توان دوم پوشش بیش‌ترین تاثیر را بر سرعت رواناب داشته‌اند به گونه‌ای که درصد اثر این شش جزء بر سرعت جریان مشاهده‌ای به ترتیب برابر با ۷۹/۱۵، ۸/۰۳، ۵/۱۱، ۵/۰۰،

بر کاهش تلفات خاک است از سوی دیگر بر مبنای ضرایب معادله‌ی ۷ می‌توان استنباط نمود که افزایش قطر سنگریزه سبب افزایش تلفات خاک در یک پوشش سطحی برابر می‌گردد. این نتیجه به این مفهوم خواهد بود که سنگریزه‌های درشت‌تر در مقایسه با سنگریزه‌های ریزتر نقش حفاظتی کم‌تری در مقابل نیروهای فرساینده‌ی رواناب دارند. این امر می‌تواند با چگونگی اثر اندازه‌ی سنگریزه‌ها بر سرعت جریان مرتبط باشد چرا که مطابق با معادله‌ی ۶، سرعت جریان رواناب در حضور سنگریزه‌های درشت بیش‌تر است.

معادله‌ی ۶ که بر مبنای نتایج تحلیل آماری ضرایب مدل طرح مرکب مرکزی خلاصه شده است؛ نشان می‌دهد که افزایش دبی جریان ( $X_1$ ) و اندازه سنگریزه‌ها ( $X_3$ ) سبب افزایش سرعت جریان رواناب سطحی می‌شود در مقابل افزایش پوشش سنگریزه‌ی سطحی ( $X_2$ ) دارای اثری پیچیده بر سرعت جریان است به طوری که رابطه‌ی سرعت جریان با پوشش سنگریزه‌ی سطحی هم به شکل خطی و هم به شکل درجه دو معنی‌دار است از سوی دیگر این معادله بیانگر وجود برهمکنش بین دبی جریان با پوشش سطحی در رابطه با تعیین سرعت جریان است. معادله‌ی ۷ نیز به روشنی بیانگر اثر افزایش سنگریزه‌ی سطحی



شکل ۴. نمودار پارتو برای تحلیل تاثیر متغیرهای مستقل بر سرعت رواناب و تلفات خاک

نیز در شرایط صحرائی و با شبیه‌سازی رواناب، کاهش ۷۸ درصدی مقدار تلفات خاک با افزایش پوشش سنگریزه سطحی از صفر تا ۲۱ درصد را گزارش نمودند. به نظر می‌رسد که نقش سنگریزه سطحی در تغییر تلفات خاک به دو عامل می‌تواند مربوط باشد؛ از یک سو افزایش درصد پوشش سنگریزه‌ی 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 به ویژه در کناره‌های سنگریزه‌ها را افزایش داده (Rouhipour *et al.*, 2005; Bunte and Poesen, 1994) و در نتیجه آبشستگی اطراف قطعات سنگی و متعاقب 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 Bunte and Poesen (1994) نیز اشاره نموده‌اند که در سنگریزه‌های درشت افزایش تلاطم جریان در مقایسه با سنگریزه‌های ریز بیش‌تر بوده و در

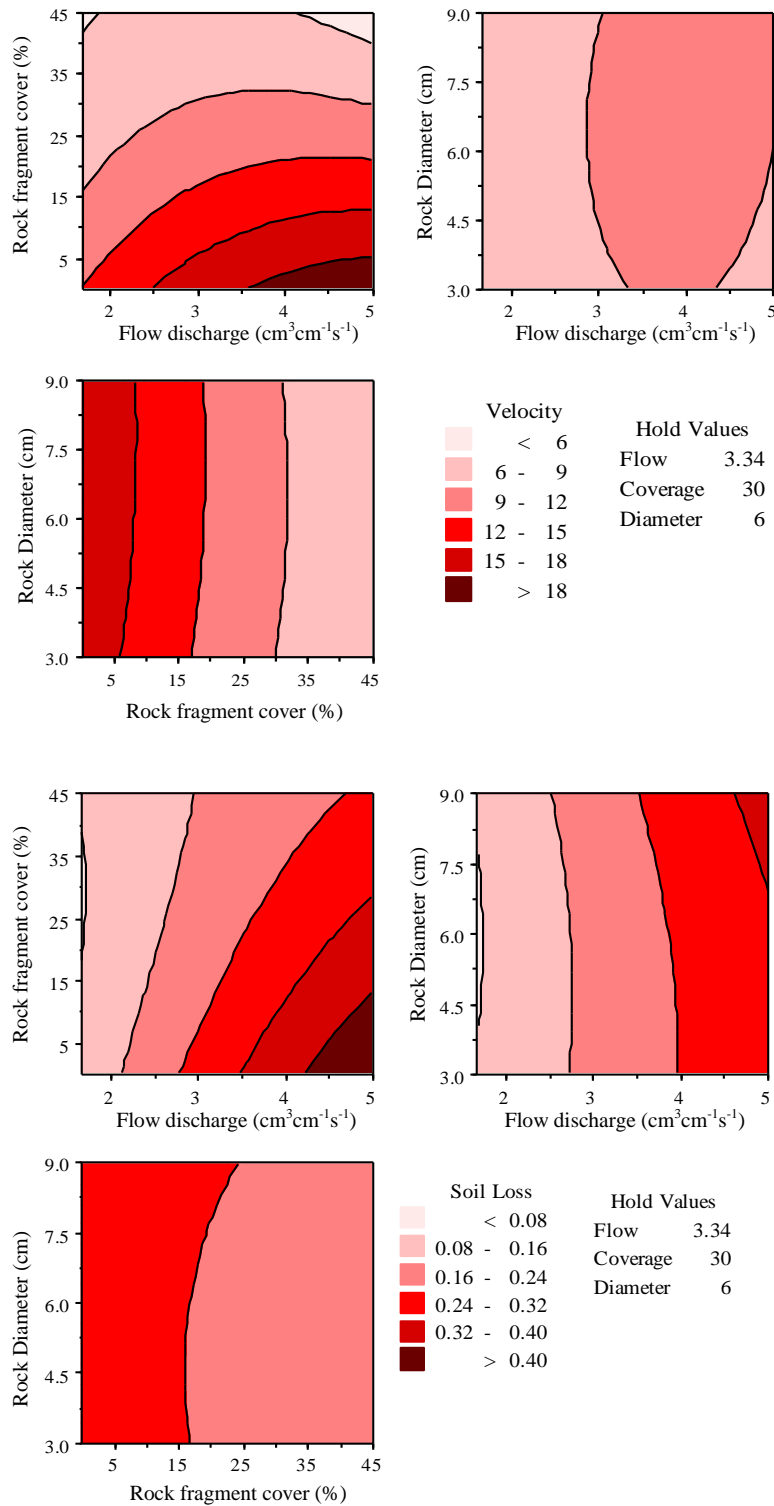
براین اساس به منظور نشان دادن اثر ترکیبی متغیرها شامل دبی جریان، پوشش سنگریزه و قطر سنگریزه نمودار سطحی<sup>۴</sup> تغییرات سرعت جریان و تلفات خاک برای این متغیرها به صورت دو به دو و براساس مدل طرح مرکب مرکزی ترسیم شده و در شکل ۵ ارائه شده است. براساس این شکل در یک پوشش سنگریزه‌ای ثابت، با افزایش دبی جریان و افزایش قطر سنگریزه‌ها تلفات خاک به شدت افزایش می‌یابد. به همین ترتیب مقدار تلفات خاک با افزایش پوشش سنگریزه، کاهش قطر سنگریزه‌ها و کاهش دبی جریان به طور مرتب کاسته می‌شود. (Rieke-Zapp *et al.*, 2007) نیز در شرایط 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 درصدی تلفات خاک می‌گردد. (Guo *et al.*, 2010)

4. Surface plot



درصد افزایش بیش‌تری دارد. در رابطه با سرعت جریان نیز نتایج کم و بیش در راستای تایید تغییرات تلفات خاک است. به طوری که سرعت جریان با افزایش قطر سنگریزه‌ها و دبی جریان و همچنین کاهش پوشش سطح افزایش می‌یابد.

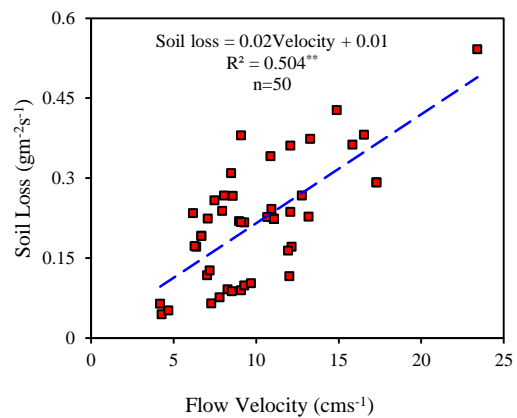
نتیجه رسوب تولیدی نیز افزایش می‌یابد. این محققین در مقایسه دو اندازه متفاوت از سنگریزه در پوشش‌های سطحی مختلف دریافتند که تولید رسوب در سنگریزه‌های درشت در مقایسه با سنگریزه‌های ریز به ویژه در پوشش‌های بیش از ۳۰



شکل ۵. نمایش سه بعدی تغییر غلظت رسوب در مقابل تغییر قطر سنگریزه‌ها (cm)، دبی جریان ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) و پوشش سنگریزه (%).

دیگر قابلیت مدل‌هایی که از آزمایش‌های سری دوم به دست آمده بودند، در پیش‌بینی تلفات خاک و سرعت جریان اندازه‌گیری شده از آزمایش‌های سری اول مورد سنجش قرار گرفت. مقادیر مربوط به پیش‌بینی سرعت جریان و تلفات خاک توسط مدل طرح مرکب مرکزی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده آن‌ها از آزمایش‌های سری اول در شکل ۷ ارائه شده است. براساس شکل ۷، مدل‌های توسعه داده شده (معادلات ۶ و ۷) به طور مطلوبی توانسته‌اند تلفات خاک و سرعت جریان مشاهده‌ای آزمایش‌های سری اول را نیز پیش‌بینی کنند. به طوری که مدل‌های مربوط به سرعت جریان (معادله ۶) و تلفات خاک (معادله ۷) به ترتیب قادر به تبیین ۸۷/۷ و ۸۵/۱ درصد از تغییرات مربوط به سرعت جریان و تلفات خاک در آزمایش‌های سری دوم بودند. ریشه‌ی میانگین مربعات خطا نیز برای مدل‌های فوق به ترتیب برابر با  $1/5 \text{ cms}^{-1}$  و  $0/05 \text{ gm}^{-2}\text{s}^{-1}$  است. نتایج مربوط به اعتبارسنجی مدل به روشنی نشان می‌دهد روش پاسخ سطح بر مبنای طرح مرکب مرکزی به خوبی قادر به برآورد تلفات خاک و سرعت جریان رواناب است. از این رو می‌توان گفت که در پژوهش‌های مربوط به مدل‌سازی فرسایش خاک که در آن‌ها به دلیل زیاد بودن تعداد عوامل تاثیرگذار، امکان بررسی همزمان تاثیر این عوامل به دلیل افزایش تصاعدی تعداد آزمایش‌ها امکان‌پذیر نیست، استفاده از روش‌های پاسخ سطح مانند طرح مرکب مرکزی در عین حالی که می‌تواند تعداد آزمایش‌ها را کاهش دهد، یک معادله‌ی کمی دقیق نیز به منظور پیش‌بینی متغیر پاسخ اعم از سرعت جریان و یا تلفات خاک ارائه دهد که با استفاده از آن می‌توان اثر توأم متغیرهای مستقل همراه با چگونگی برهمکنش آن‌ها با یکدیگر را نیز بررسی نمود.

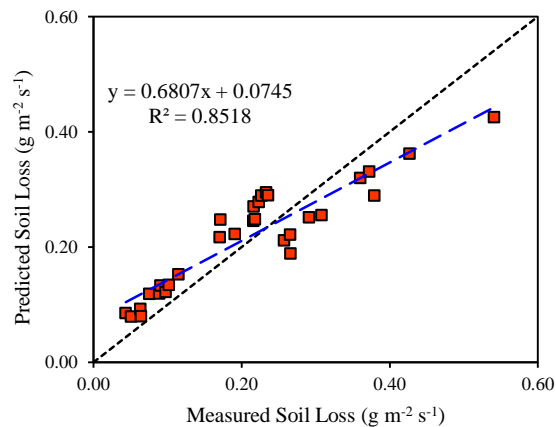
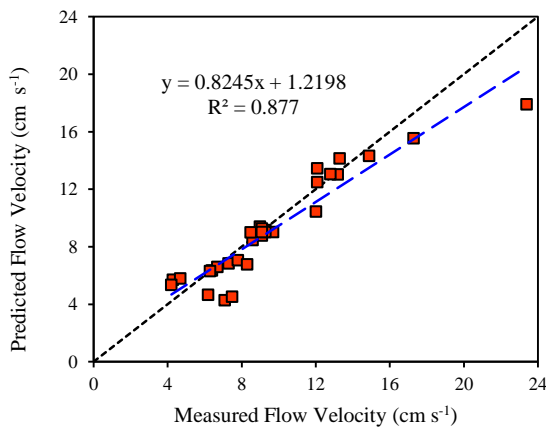
این نتایج به گونه‌ای موید این واقعیت است که بین سرعت جریان و مقدار تلفات خاک ارتباط مستقیمی وجود دارد که برای اثبات این امر ارتباط بین این دو متغیر برای مجموع داده‌های آزمایش‌های سری اول و دوم در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج به روشنی نشان می‌دهد که افزایش سرعت جریان رواناب سطحی به طور معنی‌داری ( $P < 0/01$ ) سبب افزایش تلفات خاک شده است. (Guo *et al.*, 2010) نیز به نتایج مشابهی دست یافته‌اند. این پژوهشگران دریافتند که افزایش سنگریزه‌ی سطحی از صفر تا ۲۱ درصد افزایش ضریب زبری مانینگ از ۰/۰۳ به ۰/۰۵۸ شده و در نتیجه سبب کاهش سرعت جریان رواناب سطحی و تلفات خاک می‌گردد.



شکل ۶. ارتباط بین سرعت جریان و تلفات خاک در آزمایش‌های سری اول و دوم

#### اعتبارسنجی مدل طرح مرکب مرکزی

با در نظر گرفتن این نکته که مدل طرح مرکب مرکزی (معادلات ۶ و ۷) بر اساس تعداد محدودی آزمایش مربوط به سری دوم توسعه داده شده است؛ به منظور اعتبار سنجی این مدل، از داده‌های آزمایشی سری اول استفاده شد. به عبارت



شکل ۷. اعتبارسنجی مدل طراحی ترکیبی مرکزی با استفاده از داده‌های آزمایشی سری اول

معنی‌دار بوده و در مجموع با افزایش پوشش سطحی، کاهش دبی و کوچکتر شدن اندازه‌ی سنگریزه‌ها سرعت جریان و به تبع آن تلفات خاک کاهش یافت. براین اساس می‌توان نتیجه گرفت که وجود سنگریزه‌های با ابعاد ریز در سطح زمین می‌تواند در کاهش فرسایش خاک در اراضی شیب‌دار مفید باشد. در کنار نتایج مربوط به مقادیر کمی تلفات خاک و سرعت جریان، نتایج این تحقیق نشان دهنده‌ی مزیت استفاده از روش طرح مرکب مرکزی در مطالعات فرسایش خاک است. به ویژه اینکه در این روش علاوه بر این اینکه تعداد آزمایش‌ها کمتر از روش معمول در ترکیب تیمارها است، یک مدل کمی پیش‌بینی کننده نیز که مبتنی بر تاثیر همزمان متغیرهای مستقل و برهمکنش آن‌ها است ارائه می‌شود.

## REFERENCES

Abrahams, A. D., Parsons, A. J. and Luk, S. H. (1986). Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing. *Earth surface processes and landforms*, 11(6), 653-657.

Abrahams, A.D. and Parsons, A. J. (1991). Relation between infiltration and stone cover on a semiarid hillslope, southern Arizona. *Journal of Hydrology*, 122, 49-59.

Abrahams, A.D., Li, G., Krishnan, C. and Atkinson, J.F. (2001). A sediment transport equation for interrill overland flow on rough surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 1443-1459.

Álvarez, L. M., Balbo, A. L., Mac Cormack, W. P., and Ruberto, L. A. M. (2015). Bioremediation of a petroleum hydrocarbon-contaminated Antarctic soil: Optimization of a biostimulation strategy using response-surface methodology (RSM). *Cold Regions Science and Technology*, 119, 61-67.

Amanpour, J., Salari, D., Niaei, A., Mousavi, S. M. and 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. and Ahmadi, SH. (2006). Incorporating rock fragments in soil erosion models: A case study, the ANSWERS model. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering*, 3(4), 527-539.

Bashari, M., Moradi, H.R., Kheirkhah, M.M. and 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. (In Farsi)

Bunte, K. and Poesen, J. (1994). Effects of rock fragment size and cover on overland flow

## نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق مدل‌سازی تاثیر همزمان دبی جریان، پوشش سنگریزه و اندازه‌ی سنگریزه‌ی سطحی بر میزان تلفات خاک و سرعت جریان رواناب با استفاده از روش پاسخ سطح و بر مبنای طرح مرکب مرکزی صورت گرفته و کارایی مدل‌های ایجاد شده با استفاده از داده‌های مستقل مورد اعتبار سنجی قرار گرفت. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که مدل‌های ایجاد شده توانایی بسیار مطلوبی در پیش‌بینی سرعت جریان و تلفات خاک دارند. از بین متغیرهای مستقل مورد بررسی دبی جریان و پوشش سنگریزه تاثیر بیشتری بر سرعت رواناب و تلفات خاک داشتند هر چند افزایش قطر سنگریزه‌ها نیز سبب افزایش سرعت جریان رواناب و در نتیجه افزایش تلفات خاک شد. برهمکنش مقدار پوشش سطحی و دبی جریان در تعیین سرعت و تلفات خاک

hydraulic, 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. and Zhang, W. (2011). Spatial distribution of rock fragments on steep hillslopes in karst region of northwest Guangxi, China. *Catena*, 84(1), 21-28.

De Lima, M. L. L. P. and De Liam, J. L. M. P. (1990). Water erosion of soils containing rock fragments. The Hydrological Basis for Water Resources Management (Proceedings of the Beijing Symposium, October 1990). IAHS Publ. no. 197, pp. 141-147.

Figueiredo, T. and Poesen, J. (1998). Effects of surface rock fragment characteristics on interrill runoff and erosion of a silty loam soil. *Soil and Tillage Research*, 46, 81-95.

Gomez, F. and Sartaj, M. (2014). Optimization of field scale biopiles for bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil at low temperature conditions by response surface methodology (RSM). *International Biodeterioration and Biodegradation*, 89, 103-109.

Guo, T., Wang, Q., Li, D. and 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. and Mahboubi, A. (2005). Effect of rock fragments cover on erosion and overland flow using flume and rainfall simulator. *Iranian Journal of Range and Desert Research*. 12(3): 287-310. (In Farsi)

Jomaa, S., Barry, D.A., Heng, B.C.P., Brovelli, A., Sander, G.C. and 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.
- Li, X. Y., Contreras, S., Solé-Benet, A., Cantón, Y., Domingo, F., Lázaro, R. and Puigdefábregas, J. (2011). Controls of infiltration–runoff processes in Mediterranean karst rangelands in SE Spain. *Catena*, 86(2), 98-109.
- Long, A., Zhang, H. and Lei, Y. (2013). Surfactant flushing remediation of toluene contaminated soil: Optimization with response surface methodology and surfactant recovery by selective oxidation with sulfate radicals. *Separation and Purification Technology*, 118, 612-619.
- Mandal, U.K., Rao, K.V., Mishra, P.K, Vittal, K.P.R., Sharma, K.L., Narsimlu, B. and Venkanna, K. (2005). Soil infiltration, runoff and sediment yield from ashallow soil with varied stone cover and intensity of rain. *European Journal of Soil Science*, 56, 435-443.
- Mirzaee, S., Gorji, M, and Jafari-Ardakani, A. (2012). Effect of surface rock fragment cover on soil erosion and sediment using simulated runoff. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 2(1), 141-154. (In Farsi)
- Poesen, J. W., Torri, D. and Bunte, K. (1994). Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review. *Catena*, 23(1), 141-166.
- Poesen, J. and Lavee, H. (1994). Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena*, 23, 1-28.
- Rieke-Zapp, D., Poesen, J. and 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, 1063-1076.
- Rouhipour, H., Javadi, P. and Mahboubi, A.A. (2005). Effect of rock fragments cover on erosion and sediment of two soil types using flume and rainfall simulator. 3rd Sediment National Conference, Tehran, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 6 pages (in Farsi).
- Silva, G. F., Camargo, F. L. and Ferreira, A. L. (2011). Application of response surface methodology for optimization of biodiesel production by transesterification of soybean oil with ethanol. *Fuel Processing Technology*, 92(3), 407-413.
- Vaezi, A. R., Hasanzadeh, H. and Cerdà, A. (2016). Developing an erodibility triangle for soil textures in semi-arid regions, NW Iran. *Catena*, 142, 221-232.
- Valentin, C. and Casenave, A. (1992). Infiltration into sealed soils as influenced by gravel cover. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 1667-1673
- Zavala, L. M., Jordán, A., Bellinfante, N. and Gil, J. (2010). Relationships between rock fragment cover and soil hydrological response in a Mediterranean environment. *Soil Science and Plant Nutrition*, 56(1), 95-104.
- Zhu, X., Tian, J., Liu, R. and Chen, L. (2011). Optimization of Fenton and electro-Fenton oxidation of biologically treated coking wastewater using response surface methodology. *Separation and Purification Technology*, 81(3), 444-450.