



تحلیل روند و الگوی تغییرات رواناب و رسوب در مقادیر مختلف رس خاک و سطوح

سنگی

مهدی بشیری^۱، حمیدرضا مرادی^{۲*}، میرمسعود خیرخواه^۳، مجید جعفری خالدی^۴

^۱گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

^۲گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

^۳پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور

^۴گروه آمار، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۹۱/۰۷/۰۱

اصلاح: ۹۲/۱۱/۰۸

پذیرش: ۹۳/۰۲/۰۶

عوامل مختلفی بر فرآیند تولید رواناب و رسوب در طی رگبار اثرگذار هستند. از میان خصوصیات خاک، رس از مهم‌ترین عوامل در پیوند خاکدانه‌ها و نفوذپذیری است. بخش‌های سنگی نیز بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی اثر می‌گذارند، ولی این ارتباطات در مقادیر مختلف به صورت معکوس یا مستقیم نمایان می‌شود. لذا بررسی اثر رس و سطوح سنگی در فرسایش خاک ضرورت می‌یابد. همچنین مدل‌سازی رفتار رواناب و رسوب به دلیل محدودیت‌های اندازه‌گیری در راستای تقلیل خسارات ناشی از سیلاب و رسوب‌گذاری امری اجتناب‌ناپذیر است. لذا در پژوهش حاضر از شبیه‌ساز باران و کرت‌های آزمایشی استفاده گردید تا امکان اعمال تیمارها در حدود مورد نظر میسر شود. سپس در قالب طرح فاکتوریل، ۶ طبقه اختلاط با درصدهای مختلف رس درون خاک (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) و ۶ طبقه از سطوح نفوذناپذیر (۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد) در سه تکرار (جمعاً ۱۰۸ کرت آزمایشی) مورد تحلیل قرار گرفت. برای بررسی تغییرات زمانی رواناب و رسوب طی ۳۰ دقیقه شبیه‌سازی، نمونه‌برداری در فواصل ۲/۵ دقیقه‌ای انجام شد. آنالیز روند نشان داد که در تمامی تیمارهای مذکور رواناب افزایش معنی‌داری دارد ($p < 0.01$)، درحالی‌که روند تولید رسوب با افزایش محتوی رس کاهش یافت. همچنین در تولید رواناب و رسوب، رس نسبت به سطوح سنگی عامل تعیین‌کننده‌تری بوده‌است. نهایتاً مدل‌های معکوس و منحنی S بهترین برازش بر روند رواناب را دارا بودند. اما روند تولید رسوب و نیز معادلات رگرسیونی بین رواناب و رسوب عمدتاً از الگوی سه‌جمله‌ای تبعیت نمودند.

واژگان کلیدی:

تحلیل روند سطوح

سنگی؛ رس خاک؛

شبیه‌ساز باران؛ کرت

فرسایشی

یکی از اهداف مهم در مدیریت منابع آب، بهینه کردن منافع و کمینه کردن خسارات ناشی از جریان آب است. این کار با شناسایی، رفتارسنجی و تحلیل جریان آب میسر می‌گردد. کنترل و به حداقل رساندن خسارات وارده ناشی از سیلاب، رسوب-گذاری و فرسایش به آبراهه‌ها، اراضی کشاورزی، تاسیسات و ابنیه‌های آبی مستلزم این است که فرایند حرکت جریان، فرسایش بستر و انتقال رسوب مورد مطالعه کامل قرار گیرد (۴). امروزه محدودیت داده‌های اندازه‌گیری شده از یک سو و توسعه روش‌های مدل‌سازی از سوی دیگر، مدل‌سازی رفتار جریان و ظرفیت حمل رسوب را امری اجتناب‌ناپذیر کرده است. کمبود اطلاعات آماری راجع به توزیع زمانی رسوب طی جریان سیلاب‌ها از دیرباز جزء مشکلات قدیمی پروژه‌های حفاظت آب و خاک بوده و بدست آوردن چنین اطلاعاتی مستلزم صرف انرژی و هزینه می‌باشد. در این صورت تهیه مدل‌های مربوط به منحنی‌های تغییرات زمانی رسوب می‌تواند تا حدودی مشکل برآورد رسوبدهی حوزه‌های آبخیز را برطرف نماید. لذا با دانستن تغییرات زمانی رسوب در طول رگبارها امکان مدیریت بهتر و جامع‌تر حوزه‌های آبخیز مهیا می‌گردد (۳). یکی از روش‌های برآورد بار رسوبی، استفاده از داده‌های موجود و یافتن بهترین روش برآورد است که در این زمینه می‌توان از مدل‌های رگرسیونی استفاده نمود (۹).

با وجود مطالعات و تحقیقات زیادی که در دو دهه اخیر در مورد مسئله فرسایش خاک، حمل رسوب و ته‌نشست آنها به عمل آمده، اما هنوز راهی طولانی برای فهم کامل این پدیده‌ها باقی مانده است (۱۲). تغییرات میزان رسوب در حال انتقال در رودخانه‌ها اغلب در ارتباط با تغییرات دبی می‌باشد. اندازه‌گیری بار رسوب بر پایه اندازه‌گیری غلظت رسوب و دبی جریان روشی مطمئن است که مستلزم اندازه‌گیری پیوسته می‌باشد. این مهم معمولاً تنها برای رودخانه‌های مهم مقدور است، لذا با استفاده از معادلات می‌توان آن را برآورد کرد (۱۱). برآورد رواناب نیز یکی از مهمترین مسایل موجود در مدیریت آب و آبخیزهاست. تعیین رواناب در بسیاری از فعالیت‌ها مانند طرح‌های مقابله با سیلاب، حفاظت اراضی کشاورزی و ذخیره و توزیع آب ضروریست (۲۱).

عوامل مختلفی برای تشریح رفتارهای هیدرولوژیکی و فرسایشی خاک مورد توجه قرار گرفته‌اند. شاید از مهمترین خصوصیات خاک، بافت آن است که در آن رس عامل پیوند ذرات می‌باشد. رس همانند یک ماده سیمانی ذرات را در کنار هم نگه می‌دارد ولی با کاهش میزان نفوذ، می‌تواند باعث افزایش رواناب نیز بشود. اثر محتوی رس روی فرسایش خاک مبهم و پیچیده است و مشاهده گردیده که محتوی رس خاک می‌تواند باعث افزایش و یا کاهش فرسایش و میزان رواناب گردد (۱۸). پوشش قطعات سنگی نیز شدت فرآیندهای مختلف هیدرولوژیکی و تخریب خاک مانند نفوذ، تبخیر، تولید رواناب، تلفات انرژی رواناب و فرسایش آبی را تحت اثر قرار می‌دهد. قطعات سنگی در سطح خاک می‌توانند اثرات مثبت و منفی روی تولید رسوب داشته باشند و ارتباط بین سطوح سنگی و تولید رسوب بسته به ساختار خاک رویی و موقعیت و اندازه قطعات سنگی، می‌تواند مثبت یا منفی باشد (۲۵، ۲۶). لذا لازم است اثر بخش‌های سنگی و محتوی رس خاک در پاسخ‌های فرسایشی و هیدرولوژیکی تحت تاثیر بارش و تغییرات مشاهده‌ای در طول زمان مورد توجه قرار گیرد.

از میان مطالعات انجام شده در بررسی اثر سطوح سنگی در فرایندهای تولید رواناب و رسوب می‌توان به تحقیقات همکاران Figueiredo و Poesen (۱۹۹۸)، Poesen و همکاران (۱۹۹۸، ۱۹۹۹)، Chen و همکاران (۲۰۱۱) و Tetegan و همکاران (۲۰۱۱) اشاره نمود. در زمینه بررسی محتوی رس خاک نیز مطالعات Bruce-okine و Lal (۱۹۷۵)، Mbagwu

و Bazzoffi (۱۹۹۸) و Feng-Ling و همکاران (۲۰۱۰) قابل ذکر هستند. با مرور سوابق آشکار می‌شود که قطعات سنگی و رس خاک بر رفتارهای هیدرولوژیکی و فرسایشی خاک اثر می‌گذارند، اما مطالعات کمی درباره رفتار آنها بر تولید رواناب و رسوب گزارش شده است. در زمینه بررسی روند و الگوی تولید رواناب و رسوب نیز مطالعات Wang و Linker (۱۹۹۹) و Owusu-Asante و Stephenson (۲۰۰۶) در خارج از کشور و مساعدی و همکاران (۱۳۸۵)، تلوری و همکاران (۱۳۸۶)، خدشناس و همکاران (۱۳۸۷) و خوشرفتار و مازینی (۱۳۹۰) در داخل کشور قابل ذکرند که نتایج متفاوتی را گزارش نموده‌اند. لذا با توجه به آنچه ذکر گردید، اهداف مورد نظر در پژوهش پیش‌رو را می‌توان بررسی روند تغییر رواناب و رسوب تولیدی در طی رگبار و الگوهای که این تغییرات از آنها تبعیت می‌کنند، بررسی الگوهایی که بتوان رسوب را با توجه به رواناب تخمین زد و نهایتاً دقت الگوهای مذکور برشمرد.

۲- مواد و روش

۱،۲. عملیات آزمایشگاهی

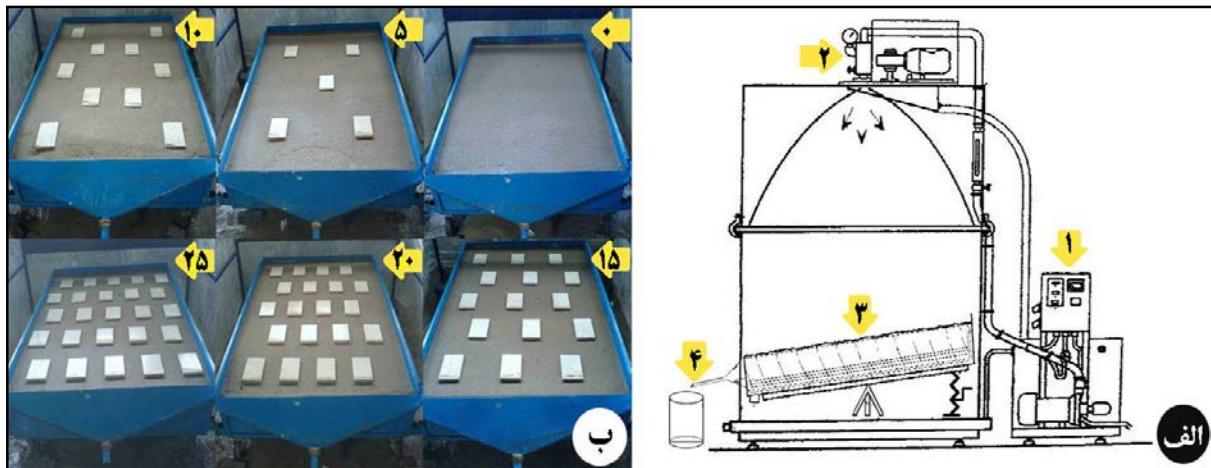
تحقیق حاضر در خلال پاییز ۱۳۹۰ در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور انجام گرفت. برای ایجاد خاک با محتوی مختلف رس، خاک رس با مقادیر ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد با خاک فاقد رس توسط مخلوط کن بتون، ترکیب گردید. برای بررسی سطوح نفوذناپذیر نیز قطعات سنگی با ابعاد ۱۵ در ۱۰ و ضخامت ۲ سانتی‌متر (هرقطعه سنگ برابر ۱ درصد سطح کرت فرسایشی) برش یافته و مقادیر ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد با الگوی زنجیره‌ای پیوسته^۱ و به حالت نیمه‌پوشیده^۲ در سطح خاک قرار گرفتند (۱۹).

جهت شبیه‌سازی بارش، از شبیه ساز بارش FEL3 ساخت شرکت آرمفیلد^۳ انگلستان استفاده گردید تا بارشی به مدت ۳۰ دقیقه و با شدت ۷۰ میلی‌متر بر ساعت را ایجاد نماید (۲۳). کرت‌ها نیز از ورق آهن گالوانیزه با ابعاد ۱/۵ و ۱ متر طول و عرض ساخته شده و در شیب ۹ درصد مستقر گردید (۲۷). شکل ۱ بخش‌های مختلف مجموعه شبیه‌سازی بارش و رواناب و الگوی پراکنش مقادیر مختلف سطوح نفوذناپذیر را نمایش می‌دهد.

¹ Running Bond Pattern

² Half Embedded

³ Armfield



شکل ۱: الف- بخش‌های شبیه‌ساز باران و فرسایش شامل (۱) تابلو کنترل سرعت چرخش نازل، (۲) نازل چرخان منفرد (۳) کرت فرسایشی با شیب ۹ درصد (۴) قیف انتهایی و مخزن جمع‌آوری رواناب، ب- الگوی پراکنش مقادیر مختلف سنگی در سطح کرت

در هر کرت، ۲۰ سانتی‌متر خاک مورد تحقیق روی ۷/۵ سانتیمتر فیلتر گراولی قرار گرفته و تسطیح گردید. سپس از طریق مجرای کف کرت اشباع شده و پس از ۲۴ ساعت رهاسازی مورد آزمایش بارش قرار گرفت (۲). طی بارش، در ۱۲ بازه زمانی به فاصله ۲/۵ دقیقه حجم کل رواناب خروجی از قیف انتهایی ثبت و اقدام به نمونه‌برداری رسوب گردید. در مرحله بعد نمونه‌های جمع‌آوری شده در طول هر رگبار پس از عبور از کاغذ صافی واتمن ۴۲، داخل آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت یک روز خشک و سپس وزن رسوب با ترازوی دقیق تعیین گردید (۲۸). ۶ ترکیب محتوی رس خاک و ۶ رده سطوح سنگی بصورت ترکیبی (جمعاً ۳۶ تیمار) مورد آزمون شبیه‌سازی بارش قرار گرفتند. هر تیمار نیز در سه تکرار و در قالب سه کرت آزمایشی ایجاد شد که مجموعاً ۱۰۸ کرت فرسایشی مورد آزمون قرار گرفتند و مقادیر میانگین مستخرج از آنها در هر بازه زمانی برای آنالیزهای آماری در محیط نرم افزاری PASW نسخه ۱۸/۰ مورد استفاده قرار گرفت.

۲.۲. تحلیل روند

ابتدا سری‌های زمانی موجود توسط آزمون کولموگروف-اسمیرنوف مورد آنالیز قرار گرفت که نشان داد داده‌ها توزیع نرمالی دارند. سپس برای بررسی روند تغییرات از روش غیرپارامتری کندال^۱ و دو روش پارامتری تحلیل رگرسیون و ضریب همبستگی پیرسون^۲ استفاده گردید که در ادامه تشریح شده‌اند.

۱- آزمون کندال: این روش بطور متداول و گسترده‌ای در تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی بکار گرفته می‌شود و یکی از روش‌های مهم برای آزمون روند سری‌های زمانی محسوب می‌شود (۱۳). ضریب همبستگی کندال مشخص می‌کند که تا چه میزان افزایش یا کاهش یک متغیر با افزایش یا کاهش متغیر دیگر همراه است (۱). اثر پذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی که در برخی از سری‌های زمانی مشاهده می‌گردند از مزایای این روش است (۱۰). آماره‌ی این آزمون به شرح رابطه (۱) است و در آن S مربوط به علامت‌های تفاوت مقادیر با یکدیگر (رابطه ۲) و Var (s) پراش S (رابطه ۳) است.

¹ Kendall

² Pearson

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\text{var}(s) = \frac{n - (n-1)(2n+5) - \beta}{18} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آنها n تعداد مشاهدات سری، x_j و x_k به ترتیب داده‌های j ام و k ام سری (مرتب شده به ترتیب وقوع)، $\text{sgn}(\cdot)$ تابع علامت (رابطه ۴) و β عاملی مربوط به تصحیح پراش در زمانی که داده‌های تکراری در اطلاعات وجود داشته باشد (رابطه ۵) می‌باشد.

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\beta = \sum_{i=1}^m t(t-1)(2t-5) \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این روابط t معرف تعداد داده‌های مشاهده‌ای و m معرف تعداد سری‌هایی است که در آنها حداقل یک تکراری وجود دارد. در یک آزمون دو دامنه‌ای برای روند سری داده‌ها، فرض صفر در حالتی پذیرفته می‌شود که رابطه (۶) برقرار باشد.

$$|Z| \leq Z_{\alpha/2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن α سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری α می‌باشد و با توجه به دو دامنه بودن آزمون، از $\alpha/2$ استفاده شده است. در صورتی که آماره Z مثبت باشد روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن روند نزولی می‌باشد.

۲- تحلیل رگرسیون: این روش، یک آزمون پارامتری است که فرض نرمال بودن داده‌ها باید برای آن وجود داشته باشد. یک رابطه رگرسیون خطی ساده برای به دست آوردن روند دراز مدت داده‌ها به صورت رابطه (۷) انتخاب می‌شود (۱۰).

$$Y = a + bX \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن، Y متغیر وابسته، X زمان و a و b ضرایب رگرسیون هستند که به روش کمترین مربعات محاسبه می‌شوند. با به دست آوردن مقدار T با درجه آزادی $n-2$ با استفاده از رابطه (۸) معنی‌داری شیب رگرسیون آزمون می‌شود که در آن MSE^1 میانگین مربعات خطا بوده و S_{xx} با رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$T = \frac{b}{\sqrt{\frac{MSE}{S_{xx}}}} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن X_i متغیر مورد نظر و \bar{X} میانگین متغیر مورد نظر می‌باشد. اگر $|T| < t_{\frac{\alpha}{2}, n-2}$ شود، شیب رگرسیون بی معنی تلقی می‌شود (فرض H_0 : شیب b برابر صفر می‌باشد) و اگر شیب b به طور معنی‌داری مخالف صفر شود، نشان دهنده وجود روند است.

۳- ضریب همبستگی پیرسون: از ضرایب مهم برای تعیین همبستگی بین دو متغیر با مقیاس‌های فاصله‌ای و نسبتی است که دارای توزیع نرمال نیز باشند. این ضریب با علامت r نمایش داده می‌شود و بین $+1$ و -1 تغییر می‌کند و علامت آن بیانگر جهت این رابطه است. برای محاسبه ضریب همبستگی پیرسون از رابطه (۱۰) استفاده می‌شود.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در آن، Y متغیر، \bar{Y} میانگین متغیر، X زمان، \bar{X} میانگین زمان و n تعداد سری‌های زمانی می‌باشد. برای تایید وجود روند در داده‌ها، لازم است آزمون معنی‌داری روی ضریب انجام شود. برای آزمون فرض، آماره t با درجه آزادی $n-2$ بصورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود (۱) و چنانچه t محاسبه شده از مقدار بحرانی بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده وجود روند است.

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

۳.۲. بررسی الگو

به منظور انجام تجزیه و تحلیل آماری و بررسی ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته شامل روند تغییرات حجم روانآب (میلی لیتر)، غلظت رسوب (گرم در لیتر) و روابط بین روانآب و رسوب در هر تیمار، از رگرسیون خطی و غیرخطی در محیط

¹Mean Squared Error

نرم افزاری PASW استفاده گردید. در رگرسیون‌گیری از مدل‌های شاخص موجود شامل خطی^۱، لگاریتمی^۲، معکوس^۳، درجه دوم^۴، درجه سوم^۵، مرکب^۶، توانی^۷، منحنی S^۸، رشد^۹ و نمایی^{۱۰} طبق روابط (۱۲) تا (۲۱) استفاده شد (۱۵).

رابطه (۱۷) مدل مرکب $Y = \beta_0 \beta_1^X$ رابطه (۱۲) مدل خطی $Y = \beta_0 + \beta_1 X$

رابطه (۱۸) مدل توانی $Y = \beta_0 X^{\beta_1}$ رابطه (۱۳) مدل لگاریتمی $Y = \beta_0 + \beta_1 \ln(X)$

رابطه (۱۹) مدل منحنی S $Y = \exp(\beta_0 + \frac{\beta_1}{X})$ رابطه (۱۴) مدل معکوس $Y = \beta_0 + \beta_1 / X$

رابطه (۲۰) مدل رشد $Y = \exp(\beta_0 + \beta_1 X)$ رابطه (۱۵) مدل درجه دوم $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2$

رابطه (۲۱) مدل نمایی $Y = \beta_0 e^{\beta_1 X}$ رابطه (۱۶) مدل درجه سوم $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3$

از آنجایی که شرط لازم برای اعتبار یک مدل تطابق نتایج به دست آمده با نتایج واقعی می‌باشد، به منظور انتخاب بهترین مدل برای هر متغیر وابسته، ابتدا مدل‌های با ضریب تبیین^{۱۱} معنی‌دار و بالاتر انتخاب شدند. ضریب تبیین نشان می‌دهد که بخشی از کل اختلافات متغیر وابسته توسط متغیر مستقل شرح داده شده است. لذا، مقدار آن برای قضاوت در برازش مدل رگرسیونی بر داده‌ها استفاده می‌شود (۲۴). سپس خطای نسبی (معادله ۲۲) برای تمامی روابط انتخابی محاسبه گردید.

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \times 100 \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

که در آن RE درصد خطای نسبی، O_i مقدار مشاهده‌ای، P_i مقدار تخمینی و n تعداد مشاهدات می‌باشد. برای بررسی کفایت و دقت مدل‌های رگرسیونی به دست آمده توسط مقایسه مقادیر برآورد شده و مشاهده شده با استفاده از رابطه (۲۳)، ضریب کارایی^{۱۲} برای تمام مدل‌های به دست آمده محاسبه شد.

¹ Linear

² Logarithmic

³ Inverse

⁴ Quadratic

⁵ Cubic

⁶ Compound

⁷ Power

⁸ S curve

⁹ Growth

¹⁰ Exponential

¹¹ Correlation Coefficient

¹² Coefficient of Efficiency

$$CE = 1 - \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{\sum (O_i - O_{\text{mean}})^2} \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

که در آن n تعداد مشاهدات، O_{mean} متوسط مقادیر مشاهده شده، O_i مقادیر مشاهده شده، P_i مقادیر تخمین زده شده می باشد (۲۰). مقدار CE از ۱ تا منفی بی نهایت تغییر می کند و نشان دهنده تغییرات اولیه محاسبه شده توسط مدل می باشد. هر چه مقدار CE به ۱ نزدیکتر باشد مدل دارای دقت و کفایت بیشتر است. مقادیر منفی CE بیانگر این مطلب هستند که مدل تغییراتی بیشتر از آنچه در واقعیت مشاهده شده ایجاد می کند و به عبارتی مدل دقیق نمی باشد (۶). نهایتاً شاخص جذر میانگین مربعات خطا نیز برای ارزیابی مدل های برازش یافته با توجه به معادله (۲۴) محاسبه گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

که در آن $RMSE$ جذر میانگین مربعات خطا، O_i مقدار مشاهده ای دبی، P_i مقدار تخمینی دبی و n : تعداد مشاهدات است (۷). نهایتاً نزدیکترین مقدار شاخص CE به عدد ۱ و نزدیکترین مقدار شاخص های $RMSE$ و RE به صفر و ضریب تبیین بالاتر، به عنوان بهترین معادله انتخاب گردید (۱۴).

۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات روانآب و رسوب مشاهده ای توسط آزمون های مربوطه در تیمارهای مختلف ترکیبی سطوح سنگی و محتوی رس خاک در جدول (۱) ارائه شده است. بهترین الگوی برازش یافته بر داده های روانآب و رسوب مشاهده ای طی رگبار همراه با شاخص های ارزیابی مدل های مذکور به ترتیب در جدول های (۲) و (۳) آورده شده است. جدول (۴) نیز الگوهای رگرسیونی منتخب در تخمین رسوب با توجه به روانآب مشاهداتی را همراه با شاخص های ارزیابی مدل نشان می دهد.

جدول ۱: تحلیل روند تغییرات رواناب و رسوب در سطوح مختلف سنگی و محتوی رس خاک با آزمون‌های مختلف

محتوی رس	سطوح سنگی											
	رواناب رسوب		رواناب رسوب		رواناب رسوب		رواناب رسوب		رواناب رسوب		رواناب رسوب	
%۰	%۱۰	%۲۰	%۳۰	%۴۰	%۵۰	%۰	%۱۰	%۲۰	%۳۰	%۴۰	%۵۰	
پیرسون	**	*	**	**	**	C	**	C	**	**	**	D*
رگرسیون	**	*	**	**	**	C	**	C	**	**	**	D*
کندال	**	*	**	**	**	C	**	D*	**	**	**	C
پیرسون	**	**	**	**	**	*	**	C	**	**	**	D**
رگرسیون	**	**	**	**	**	*	**	C	**	**	**	D**
کندال	**	**	**	**	**	*	**	C	**	**	**	D**
پیرسون	**	**	**	**	**	D*	**	**	**	**	**	D**
رگرسیون	**	**	**	**	**	D*	**	**	**	**	**	D**
کندال	**	**	**	**	**	C	**	**	**	**	**	D**
پیرسون	**	**	**	**	**	D**	**	C	**	**	**	D**
رگرسیون	**	**	**	**	**	D**	**	C	**	**	**	D**
کندال	**	**	**	**	**	D**	**	C	**	**	**	D**
پیرسون	**	**	**	**	**	D**	**	C	**	**	**	D**
رگرسیون	**	**	**	**	**	D**	**	C	**	**	**	D**
کندال	**	**	**	**	**	D**	**	C	**	**	**	D**
پیرسون	**	**	**	**	**	D**	**	**	**	**	**	D*
رگرسیون	**	**	**	**	**	D**	**	**	**	**	**	D*
کندال	**	**	**	**	**	D**	**	**	**	**	**	D**

۱: روند افزایشی، D: روند کاهش، C: بدون روند، *: سطح معنی‌داری ۰/۰۵، **: سطح معنی‌داری ۰/۰۱

بررسی روند تغییرات رواناب و رسوب طی رگبار با استفاده از آزمون‌های کندال و پیرسون و نیز تحلیل رگرسیون نشان داد که در هر سه روش مذکور و در تمامی تیمارهای مورد مطالعه، حجم رواناب مشاهده‌ای طی رگبار دارای روندی افزایشی و معنی‌دار می‌باشد. اما روند تغییرات غلظت رسوب مشاهده‌ای طی رگبار، در تیمارهای فاقد رس در سطوح مختلف سنگی افزایش معنی‌داری را از خود نشان می‌دهد و به تدریج با افزایش محتوی رس تیمارها، تغییرات غیرمعنی‌دار می‌شود و پس از آن به روندی کاهش‌ی تبدیل می‌گردد. این نکته بیانگر این است که سطوح سنگی تاثیر معنی‌داری بر غلظت رسوب نداشته و محتوی رس خاک عاملی تعیین‌کننده در بار رسوبی می‌باشد. لذا رابطه‌ای معکوس و معنی‌دار بین محتوی رس خاک و غلظت رسوب تولیدی وجود دارد. در این راستا حسینی و همکاران (۱۳۸۸) نیز بیان نمودند تیمارهای با رس بالا به دلیل جذب بیشتر آب، دیرتر اشباع می‌شوند ولی میزان رواناب همواره افزایش می‌یابد. همچنین در خاک‌های رسی، ذرات رس به خاطر چسبندگی بالا در برابر جدا شدن مقاوم هستند لذا رسوب به تدریج کاهش می‌یابد. Wang و Linker (۱۹۹۹) نیز در بررسی خود نشان دادند بین بار معلق و دبی جریان با زمان همبستگی وجود دارد. درحالی‌که خوشرفتار و مازینی (۱۳۹۰) نتیجه گرفتند با افزایش دبی بر میزان رسوب معلق آن افزوده می‌شود. همچنین نتایج آزمون کندال در برخی از تیمارها با دو روش دیگر اختلاف دارد.

جدول ۲: مدل برگزیده در بررسی روند تغییرات رواناب در تیمارهای مختلف و شاخص‌های ارزیابی آن

تاریخ تیمار رس سنگ	مدل	ضریب تبیین سطح معنی‌داری	خطای نسبی جذر میانگین ضریب کارایی (% مربعات خطا)	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶
۰	$R=3167/893-2063/792/T$	۰/۰۰۰	۱/۰۳۱	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	۲۹/۶۰۰	۰/۹۹۶
۵	$R= \exp(\lambda/0.39-1/232T)$	۰/۰۰۰	۲/۴۹۷	۰/۹۹۱	۰/۹۹۱	۶۱/۷۲۸	۰/۹۸۶
۱۰	$R= 144/343+90.0/998T-80/50VT2 +2/4T3$	۰/۰۰۰	۱/۷۷۳	۰/۹۹۶	۰/۹۹۶	۵۰/۱۱۰	۰/۹۹۶
۱۵	$R= \exp(\lambda/255-1/408T)$	۰/۰۰۰	۱/۷۱۶	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	۶۲/۸۰۹	۰/۹۹۲
۲۰	$R= \exp(\lambda/291-1/420T)$	۰/۰۰۰	۱/۷۵۴	۰/۹۹۶	۰/۹۹۶	۵۲/۶۹۸	۰/۹۹۴
۲۵	$R= \exp(\lambda/135-1/370T)$	۰/۰۰۰	۲/۰۱۴	۰/۹۹۵	۰/۹۹۵	۵۶/۵۶۰	۰/۹۹۱
۰	$R= \exp(7/963-1/541T)$	۰/۰۰۰	۰/۹۱۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۲۵/۵۵۴	۰/۹۹۷
۵	$R= \exp(7/932-1/390T)$	۰/۰۰۰	۱/۹۷۹	۰/۹۹۵	۰/۹۹۵	۴۸/۱۹۷	۰/۹۹۱
۱۰	$R= \exp(\lambda/0.70-1/445T)$	۰/۰۰۰	۱/۱۶۰	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۲۹/۷۵۳	۰/۹۹۷
۱۵	$R= \exp(7/991-1/274T)$	۰/۰۰۰	۱/۶۰۲	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	۳۶/۷۳۴	۰/۹۹۴
۲۰	$R= \exp(\lambda/0.24-1/312T)$	۰/۰۰۰	۱/۳۴۱	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	۳۱/۴۵۶	۰/۹۹۶
۲۵	$R= \exp(\lambda/0.48-1/0.6T)$	۰/۰۰۰	۰/۹۷۴	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۲۸/۰۶۶	۰/۹۹۶
۰	$R= \exp(\lambda/0.02-1/349T)$	۰/۰۰۰	۰/۸۰۳	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۱۹/۵۰۸	۰/۹۹۸
۵	$R= \exp(7/935-1/396T)$	۰/۰۰۰	۰/۷۶۷	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۱۸/۳۱۶	۰/۹۹۸
۱۰	$R=2687/882-1981/149/T$	۰/۰۰۰	۱/۷۷۶	۰/۹۹۴	۰/۹۹۴	۳۹/۵۹۰	۰/۹۹۳
۱۵	$R= \exp(7/931-0/911T)$	۰/۰۰۰	۲/۳۹۵	۰/۹۷۵	۰/۹۷۵	۸۸/۳۵۰	۰/۹۵۴
۲۰	$R= \exp(\lambda/0.16-1/0.19T)$	۰/۰۰۰	۱/۲۴۷	۰/۹۹۵	۰/۹۹۵	۳۶/۹۲۷	۰/۹۹۳
۲۵	$R=2637/218-1717/846/T$	۰/۰۰۰	۱/۵۴۳	۰/۹۹۴	۰/۹۹۴	۳۴/۸۴۶	۰/۹۹۳
۰	$R=2730/490-210/925/T$	۰/۰۰۰	۱/۷۸۶	۰/۹۹۵	۰/۹۹۵	۳۷/۴۰۶	۰/۹۹۵
۵	$R= \exp(7/971-1/263T)$	۰/۰۰۰	۱/۲۴۶	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۳۵/۰۲۴	۰/۹۹۵
۱۰	$R= \exp(7/957-1/235T)$	۰/۰۰۰	۱/۲۵۱	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	۲۹/۵۷۵	۰/۹۹۶
۱۵	$R= \exp(\lambda/0.08-1/162T)$	۰/۰۰۰	۱/۳۴۱	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	۳۵/۱۷۰	۰/۹۹۵
۲۰	$R= \exp(7/959-1/0.10T)$	۰/۰۰۰	۱/۴۴۰	۰/۹۹۴	۰/۹۹۴	۴۰/۰۸۱	۰/۹۹۱
۲۵	$R=2512/428-1720/518/T$	۰/۰۰۰	۱/۹۷۸	۰/۹۹۰	۰/۹۹۰	۴۲/۹۲۰	۰/۹۹۰
۰	$R=2712/402-1833/207/T$	۰/۰۰۰	۰/۵۹۷	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۱۷/۷۲۷	۰/۹۹۸
۵	$R=2742/823-1930/112/T$	۰/۰۰۰	۰/۸۷۷	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۲۲/۵۲۱	۰/۹۹۷
۱۰	$R=2836/599-1852/874/T$	۰/۰۰۰	۱/۲۶۰	۰/۹۹۶	۰/۹۹۶	۲۹/۳۶۳	۰/۹۹۶
۱۵	$R=2940/431-1972/205/T$	۰/۰۰۰	۱/۰۶۳	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	۲۵/۲۱۱	۰/۹۹۷
۲۰	$R=2909/387-1848/938/T$	۰/۰۰۰	۱/۴۰۷	۰/۹۹۲	۰/۹۹۲	۴۱/۱۹۹	۰/۹۹۲
۲۵	$R=2839/393-1795/979/T$	۰/۰۰۰	۱/۴۵۶	۰/۹۹۰	۰/۹۹۰	۴۳/۹۹۲	۰/۹۸۹
۰	$R=3033/370-1955/743/T$	۰/۰۰۰	۰/۸۸۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۲۳/۵۲۰	۰/۹۹۷
۵	$R= \exp(\lambda/0.39-1/0.60T)$	۰/۰۰۰	۰/۹۵۴	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۲۸/۲۱۵	۰/۹۹۶
۱۰	$R=2858/856-1891/461/T$	۰/۰۰۰	۰/۹۸۵	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۲۳/۷۲۱	۰/۹۹۷
۱۵	$R=2897/199-1943/0.60/T$	۰/۰۰۰	۰/۹۸۰	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۲۳/۸۴۱	۰/۹۹۷
۲۰	$R=3076/958-1891/741/T$	۰/۰۰۰	۰/۷۲۹	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	۲۶/۷۹۱	۰/۹۹۶
۲۵	$R=2891/263-1611/285/T$	۰/۰۰۰	۱/۲۴۳	۰/۹۹۳	۰/۹۹۳	۳۴/۲۰۲	۰/۹۹۲

R: رواناب (میلی‌لیتر)، T: زمان (دقیقه)

جدول ۳: مدل‌های منتخب در بررسی روند تغییرات رسوب در تیمارهای مختلف و شاخص‌های ارزیابی آن

ضرب تین سطح معنی داری خطای نسبی (%)		مربعات خطا		ضرب تین سطح معنی داری خطای نسبی (%)		مربعات خطا		مدل	ترکیب تیمار رس سنگ
۰/۴۳۷	۰/۴۱۰	۳/۶۷۹	۰/۰۱۹	۰/۴۳۷	۰/۴۱۰	۳/۶۷۹	۰/۰۱۹	$S=9/16+0/105T$	۰ ۰
۰/۹۱۲	۱/۱۵۵	۶/۳۷۹	۰/۰۰۰	۰/۹۱۲	۱/۱۵۵	۶/۳۷۹	۰/۰۰۰	$S=16/236-1/581T+0/600T^2-0/017T^3$	۵ ۰
۰/۹۸۷	۰/۷۱۹	۳/۲۹۶	۰/۰۰۰	۰/۹۸۷	۰/۷۱۹	۳/۲۹۶	۰/۰۰۰	$S=8/817+1/694T+0/168T^2-0/014T^3$	۱۰ ۰
۰/۹۴۹	۱/۱۶۰	۵/۱۱۵	۰/۰۰۰	۰/۹۴۹	۱/۱۶۰	۵/۱۱۵	۰/۰۰۰	$S=12/097-0/692T+0/244T^2-0/007T^3$	۱۵ ۰
۰/۹۸۰	۰/۷۰۴	۳/۳۳۳	۰/۰۰۰	۰/۹۸۱	۰/۷۰۴	۳/۳۳۳	۰/۰۰۰	$S=8/326+2/656T-0/135T^2+0/006T^3$	۲۰ ۰
۰/۹۹۲	۰/۳۹۵	۲/۶۷۳	۰/۰۰۰	۰/۹۹۲	۰/۳۹۵	۲/۶۷۳	۰/۰۰۰	$S=6/942+1/391T-0/072T^2+0/006T^3$	۲۵ ۰
۰/۳۸۶	۰/۹۳۲	۷/۶۶۴	۰/۰۳۱	۰/۳۸۷	۰/۹۳۲	۷/۶۶۴	۰/۰۳۱	$S=7/687+2/937/T$	۰ ۱۰
۰/۴۲۷	۰/۷۶۲	۷/۳۶۲	۰/۰۲۱	۰/۴۲۸	۰/۷۶۲	۷/۳۶۲	۰/۰۲۱	$S=8/770+2/614/T$	۵ ۱۰
۰/۹۳۸	۰/۳۴۴	۳/۱۱۷	۰/۰۰۰	۰/۹۳۸	۰/۳۴۴	۳/۱۱۷	۰/۰۰۰	$S=11/038-1/085T+0/161T^2-0/005T^3$	۱۰ ۱۰
۰/۹۵۶	۰/۱۳۵	۱/۳۸۰	۰/۰۰۰	۰/۹۵۶	۰/۱۳۵	۱/۳۸۰	۰/۰۰۰	$S=10/129-1/166T+0/126T^2-0/004T^3$	۱۵ ۱۰
۰/۸۰۷	۰/۳۱۵	۲/۹۵۰	۰/۰۰۳	۰/۸۰۷	۰/۳۱۵	۲/۹۵۰	۰/۰۰۳	$S=9/846-0/705T+0/650T^2+0/000T^3$	۲۰ ۱۰
۰/۹۰۹	۰/۳۳۷	۳/۲۲۴	۰/۰۰۰	۰/۹۱۰	۰/۳۳۷	۳/۲۲۴	۰/۰۰۰	$S=8/537-0/433T+0/070T^2-0/001T^3$	۲۵ ۱۰
۰/۹۲۶	۰/۲۶۷	۲/۵۸۶	۰/۰۰۰	۰/۹۲۶	۰/۲۶۷	۲/۵۸۶	۰/۰۰۰	$S=13/080-2/324T+0/310T^2-0/012T^3$	۰ ۲۰
۰/۸۸۸	۰/۳۱۹	۳/۱۹۶	۰/۰۰۰	۰/۸۸۸	۰/۳۱۹	۳/۱۹۶	۰/۰۰۰	$S=8/902-0/638T+0/074T^2-0/001T^3$	۵ ۲۰
۰/۸۹۷	۰/۳۱۴	۲/۷۷۳	۰/۰۰۰	۰/۸۹۸	۰/۳۱۴	۲/۷۷۳	۰/۰۰۰	$S=12/963-2/587T+0/379T^2-0/017T^3$	۱۰ ۲۰
۰/۹۵۱	۰/۲۱۴	۲/۵۸۲	۰/۰۰۰	۰/۹۵۲	۰/۲۱۴	۲/۵۸۲	۰/۰۰۰	$S=11/183-1/423T+0/155T^2-0/006T^3$	۱۵ ۲۰
۰/۹۴۸	۰/۲۰۱	۲/۲۵۴	۰/۰۰۰	۰/۹۴۹	۰/۲۰۱	۲/۲۵۴	۰/۰۰۰	$S=9/488-0/920T+0/070T^2-0/001T^3$	۲۰ ۲۰
۰/۹۳۵	۰/۲۶۶	۳/۲۵۱	۰/۰۰۰	۰/۹۳۶	۰/۲۶۶	۳/۲۵۱	۰/۰۰۰	$S=10/270-0/989T+0/637T^2-0/001T^3$	۲۵ ۲۰
۰/۷۱۳	۰/۵۵۸	۵/۸۵۲	۰/۰۱۵	۰/۷۱۳	۰/۵۵۸	۵/۸۵۲	۰/۰۱۵	$S=9/140+0/281T-0/130T^2+0/008T^3$	۰ ۳۰
۰/۹۲۷	۰/۴۵۸	۴/۵۹۸	۰/۰۰۰	۰/۹۲۷	۰/۴۵۸	۴/۵۹۸	۰/۰۰۰	$S=12/653-1/318T+0/079T^2-0/001T^3$	۵ ۳۰
۰/۹۴۳	۰/۳۵۲	۳/۵۷۵	۰/۰۰۰	۰/۹۴۳	۰/۳۵۲	۳/۵۷۵	۰/۰۰۰	$S=12/908-1/828T+0/185T^2-0/006T^3$	۱۰ ۳۰
۰/۸۸۰	۰/۴۶۶	۴/۵۱۵	۰/۰۰۰	۰/۸۸۱	۰/۴۶۶	۴/۵۱۵	۰/۰۰۰	$S=14/168-2/312T+0/281T^2-0/011T^3$	۱۵ ۳۰
۰/۸۱۰	۰/۵۲۹	۴/۶۱۷	۰/۰۰۳	۰/۸۱۱	۰/۵۲۹	۴/۶۱۷	۰/۰۰۳	$S=13/237-2/246T+0/266T^2-0/009T^3$	۲۰ ۳۰
۰/۹۵۷	۰/۲۳۸	۲/۸۶۰	۰/۰۰۰	۰/۹۵۷	۰/۲۳۸	۲/۸۶۰	۰/۰۰۰	$S=12/007-1/890T+0/230T^2-0/009T^3$	۲۵ ۳۰
۰/۹۷۶	۰/۷۹۹	۷/۰۳۱	۰/۰۰۰	۰/۹۷۷	۰/۷۹۹	۷/۰۳۱	۰/۰۰۰	$S=34/221-10/645T+1/353T^2-0/054T^3$	۰ ۴۰
۰/۹۵۷	۰/۴۰۴	۳/۲۹۰	۰/۰۰۰	۰/۹۵۷	۰/۴۰۴	۳/۲۹۰	۰/۰۰۰	$S=14/372-2/166T+0/187T^2-0/005T^3$	۵ ۴۰
۰/۹۵۳	۰/۳۲۲	۳/۳۲۳	۰/۰۰۰	۰/۹۵۴	۰/۳۲۲	۳/۳۲۳	۰/۰۰۰	$S=14/389-2/779T+0/315T^2-0/011T^3$	۱۰ ۴۰
۰/۹۵۸	۰/۴۳۹	۲/۸۸۵	۰/۰۰۰	۰/۹۵۹	۰/۴۳۹	۲/۸۸۵	۰/۰۰۰	$S=17/098-3/553T+0/388T^2-0/013T^3$	۱۵ ۴۰
۰/۹۸۲	۰/۲۱۵	۳/۰۳۷	۰/۰۰۰	۰/۹۸۳	۰/۲۱۵	۳/۰۳۷	۰/۰۰۰	$S=12/599-2/265T+0/246T^2-0/009T^3$	۲۰ ۴۰
۰/۳۵۲	۱/۷۷۱	۱۲/۴۳۴	۰/۰۲۹	۰/۳۹۴	۱/۷۷۱	۱۲/۴۳۴	۰/۰۲۹	$S=11/105T^{-0.215}$	۲۵ ۴۰
۰/۹۷۳	۰/۵۳۳	۴/۵۶۵	۰/۰۰۰	۰/۹۷۳	۰/۵۳۳	۴/۵۶۵	۰/۰۰۰	$S=24/660-7/180T+0/932T^2-0/038T^3$	۰ ۵۰
۰/۹۹۱	۰/۲۷۰	۲/۷۸۶	۰/۰۰۰	۰/۹۸۹	۰/۲۷۰	۲/۷۸۶	۰/۰۰۰	$S=18/504-4/294T+0/500T^2-0/019T^3$	۵ ۵۰
۰/۹۵۱	۰/۵۰۴	۴/۷۰۰	۰/۰۰۰	۰/۹۵۲	۰/۵۰۴	۴/۷۰۰	۰/۰۰۰	$S=17/451-4/013T+0/476T^2-0/018T^3$	۱۰ ۵۰
۰/۹۸۸	۰/۱۸۶	۱/۹۵۴	۰/۰۰۰	۰/۹۸۸	۰/۱۸۶	۱/۹۵۴	۰/۰۰۰	$S=15/197-3/122T+0/369T^2-0/014T^3$	۱۵ ۵۰
۰/۹۴۹	۰/۲۶۱	۲/۹۰۹	۰/۰۰۰	۰/۹۵۰	۰/۲۶۱	۲/۹۰۹	۰/۰۰۰	$S=11/398-1/512T+0/145T^2-0/004T^3$	۲۰ ۵۰
۰/۸۳۳	۰/۸۶۳	۷/۶۸۱	۰/۰۰۲	۰/۸۳۳	۰/۸۶۳	۷/۶۸۱	۰/۰۰۲	$S=16/299-3/850T+0/468T^2-0/018T^3$	۲۵ ۵۰

S: رسوب (گرم در لیتر)، T: زمان (دقیقه)

بطور کلی مدل‌های رگرسیونی برازش یافته به داده‌های رواناب و رسوب نشان می‌دهد که مدل‌های ساده‌ی خطی در برازش به داده‌ها ناکارآمد می‌باشند. تبیین ارتباطات غیرخطی بین متغیرهای رواناب و رسوب مطالعه شده با اظهارات Singh (۱۹۹۲) و Jalal و Hassan (۲۰۱۰) مبنی بر غالب بودن ارتباط غیرخطی بین متغیرهای هیدرولوژیکی تطابق دارد. Yu (۲۰۰۰) نیز رواناب را دارای طبیعتی غیرخطی می‌داند.

الگوهای مختلف برازش داده شده به داده‌های رواناب در ۱۲ بازه اندازه‌گیری شده نشان داد که مدل‌های منحنی S و معکوس بهترین کارایی را دارا هستند. همچنین با افزایش محتوی رس خاک، شکل معادلات از منحنی S به معکوس تغییر می‌یابد. در حالیکه افزایش درصد سطوح سنگی اثر مشخصی بر الگوی جریان ندارد و عامل تعیین کننده محتوی رس خاک می‌باشد. پس

از مدل منحنی S و معکوس، مدل‌های درجه سوم و لگاریتمی بهترین برازش را بر داده‌های رواناب حاصل از تیمارهای مختلف دارا هستند.

جدول (۴) مدل‌های منتخب در بررسی رابطه رگرسیونی رواناب و رسوب در تیمارهای مختلف و شاخص‌های ارزیابی آن

ضریب	ضریب تبیین	سطح خطای نسبی جذر میانگین	ضریب تبیین	مدل	ترکیب رس سنگ	
					مربعیات خطا	کارایی
۰/۵۹۳	۰/۰۱۷	۲/۸۴۵	۰/۰۱۷	$S = 12/896 - 0/005R + 1/224 \times 10^{-1}R^2$	۰	۰
۰/۹۰۱	۰/۰۰۰	۶/۱۱۵	۰/۹۰۱	$S = -23/639 + 0/074R - 6/599 \times 10^{-6}R^2 + 9/113 \times 10^{-9}R^3$	۵	۰
۰/۹۷۷	۰/۰۰۰	۳/۰۳۸	۰/۹۷۷	$S = 16/243 - 0/008R + 3/156 \times 10^{-1}R^2$	۱۰	۰
۰/۹۴۲	۰/۰۰۰	۴/۸۳۶	۰/۹۴۲	$S = 7/275 + 0/148R - 1/073 \times 10^{-6}R^2 + 2/356 \times 10^{-9}R^3$	۱۵	۰
۰/۹۸۰	۰/۰۰۰	۲/۸۰۸	۰/۹۸۰	$S = 7/162 + 0/09R - 7/452 \times 10^{-1}R^2 + 1/538 \times 10^{-9}R^3$	۲۰	۰
۰/۹۴۰	۰/۰۰۰	۵/۹۹۳	۰/۹۴۱	$S = -20/155 + 0/10R - 3/752 \times 10^{-6}R^2 + 7/334 \times 10^{-9}R^3$	۲۵	۰
۰/۳۸۹	۰/۰۳۰	۷/۸۰۰	۰/۳۹۰	$S = 7/157 + 2255/880/R$	۰	۱۰
۰/۷۵۲	۰/۰۰۸	۳/۶۹۶	۰/۷۵۲	$S = 18/535 - 0/12R + 4/567 \times 10^{-1}R^2 - 4/515 \times 10^{-1}R^3$	۵	۱۰
۰/۹۱۹	۰/۰۰۰	۲/۹۸۸	۰/۹۱۹	$S = -3/672 + 0/31R - 2/096 \times 10^{-6}R^2 + 4/216 \times 10^{-9}R^3$	۱۰	۱۰
۰/۶۸۴	۰/۰۰۶	۴/۱۳۱	۰/۶۸۴	$S = 11/166 - 0/02R + 0/000 + 1/469 \times 10^{-1}R^2$	۱۵	۱۰
۰/۷۷۶	۰/۰۰۶	۲/۹۷۳	۰/۷۷۶	$S = -8/183 + 0/38R - 2/383 \times 10^{-6}R^2 + 4/526 \times 10^{-9}R^3$	۲۰	۱۰
۰/۷۲۶	۰/۰۰۳	۵/۳۳۳	۰/۷۲۷	$S = 9/918 + 0/00R - 2/186 \times 10^{-1}R^2 + 7/682 \times 10^{-9}R^3$	۲۵	۱۰
۰/۹۰۸	۰/۰۰۰	۲/۷۵۸	۰/۹۰۸	$S = -4/476 + 0/36R - 2/486 \times 10^{-6}R^2 + 5/013 \times 10^{-9}R^3$	۰	۲۰
۰/۸۱۲	۰/۰۰۳	۳/۷۹۶	۰/۸۱۲	$S = -0/375 + 0/23R - 1/874 \times 10^{-6}R^2 + 4/076 \times 10^{-9}R^3$	۵	۲۰
۰/۸۲۲	۰/۰۰۲	۴/۱۳۱	۰/۸۲۳	$S = 8/695 + 0/06R - 5/782 \times 10^{-1}R^2 + 1/223 \times 10^{-9}R^3$	۱۰	۲۰
۰/۹۱۴	۰/۰۰۰	۳/۳۰۸	۰/۹۱۵	$S = 10/871 + 0/00R - 7/259 \times 10^{-6}R^2 + 4/336 \times 10^{-11}R^3$	۱۵	۲۰
۰/۹۲۱	۰/۰۰۰	۲/۹۶۷	۰/۹۲۱	$S = 8/772 + 0/01R - 6/533 \times 10^{-6}R^2$	۲۰	۲۰
۰/۸۸۹	۰/۰۰۰	۴/۵۰۴	۰/۸۹۰	$S = 8/534 + 0/02R - 1/170 \times 10^{-1}R^2$	۲۵	۲۰
۰/۷۷۳	۰/۰۰۶	۴/۶۲۹	۰/۷۷۴	$S = 2/989 + 0/12R - 7/316 \times 10^{-1}R^2 + 8/132 \times 10^{-1}R^3$	۰	۳۰
۰/۹۷۵	۰/۰۰۰	۲/۸۸۵	۰/۹۷۵	$S = -5/818 + 0/36R - 2/152 \times 10^{-6}R^2 + 3/709 \times 10^{-9}R^3$	۵	۳۰
۰/۹۴۴	۰/۰۰۰	۳/۳۱۱	۰/۹۴۴	$S = 11/612 + 0/00R - 9/496 \times 10^{-6}R^2$	۱۰	۳۰
۰/۸۵۱	۰/۰۰۰	۵/۲۳۷	۰/۸۵۲	$S = 14/283 - 0/02R - 7/578 \times 10^{-6}R^2$	۱۵	۳۰
۰/۶۳۲	۰/۰۱۱	۶/۴۷۷	۰/۶۳۳	$S = 15/766 - 0/05R + 0/00 + 2/210 \times 10^{-1}R^2$	۲۰	۳۰
۰/۹۳۴	۰/۰۰۰	۳/۱۴۶	۰/۹۳۵	$S = 11/161 + 0/00R - 1/116 \times 10^{-1}R^2 + 1/294 \times 10^{-1}R^3$	۲۵	۳۰
۰/۹۳۴	۰/۰۰۰	۱۰/۸۸۱	۰/۹۳۴	$S = 33/281 - 0/08R - 7/511 \times 10^{-6}R^2$	۰	۴۰
۰/۹۶۴	۰/۰۰۰	۳/۶۹۸	۰/۹۶۴	$S = 7/94 + 0/00R - 3/183 \times 10^{-1}R^2$	۵	۴۰
۰/۸۳۱	۰/۰۰۰	۵/۷۲۱	۰/۸۳۱	$S = 16/969 - 0/05R - 0/00R^2 + 1/644 \times 10^{-1}R^3$	۱۰	۴۰
۰/۸۷۶	۰/۰۰۰	۷/۵۲۹	۰/۸۷۶	$S = 15/131 + 0/00R - 1/369 \times 10^{-1}R^2 + 1/049 \times 10^{-1}R^3$	۱۵	۴۰
۰/۹۶۸	۰/۰۰۰	۳/۷۸۰	۰/۹۶۹	$S = 10/850 + 0/01R - 1/197 \times 10^{-1}R^2$	۲۰	۴۰
۰/۳۷۲	۰/۰۴۸	۱۳/۶۰۹	۰/۳۷۲	$S = 17/343 \times 1/000R$	۲۵	۴۰
۰/۹۷۱	۰/۰۰۰	۵/۵۴۷	۰/۹۷۲	$S = 30/764 - 0/11R + 0/00R^2 + 3/112 \times 10^{-1}R^3$	۰	۵۰
۰/۹۷۸	۰/۰۰۰	۳/۷۱۳	۰/۹۷۹	$S = 22/027 - 0/06R + 0/00R^2 + 1/118 \times 10^{-1}R^3$	۵	۵۰
۰/۸۹۹	۰/۰۰۰	۶/۶۵۰	۰/۸۹۹	$S = 15/300 + 0/00R - 1/557 \times 10^{-1}R^2 + 1/207 \times 10^{-1}R^3$	۱۰	۵۰
۰/۹۴۱	۰/۰۰۰	۴/۸۵۶	۰/۹۴۱	$S = 13/716 + 0/00R - 1/422 \times 10^{-1}R^2 + 1/751 \times 10^{-1}R^3$	۱۵	۵۰
۰/۹۵۴	۰/۰۰۰	۲/۸۶۸	۰/۹۵۴	$S = 6/234 + 0/05R - 1/750 \times 10^{-1}R^2$	۲۰	۵۰
۰/۸۰۵	۰/۰۰۱	۷/۵۳۴	۰/۸۰۶	$S = 15/216 + 0/00R - 1/075 \times 10^{-1}R^2$	۲۵	۵۰

R: رواناب (میلی لیتر)، S: رسوب (گرم در لیتر)

بررسی تغییرات غلظت رسوب طی زمان نیز نشان داد که مدل‌های درجه سوم بهترین کارایی را در تخمین رسوب طی رگبار دارند و پس از آن مدل‌های درجه دوم قرار دارند. مدل‌های برازش یافته بین مقادیر رواناب و رسوب مشاهده‌ای در هر تیمار نیز بیان‌گر این است که مدل‌های درجه سوم و پس از آن درجه دوم بهترین الگو برای تخمین رسوب بر اساس رواناب مشاهده‌ای می‌باشند. البته برخی تیمارها از این الگوها تبعیت نکرده و نمی‌توان الگویی کلی را برای تمامی تیمارها ارایه نمود. این در حالی است که در صورت نبود داده‌های غلظت، هیدرولوژیست‌ها از منحنی سنجه برای برآورد رسوب استفاده می‌کنند

که تمامی آنها از رابطه اداره احیای اراضی امریکا^۱ پیروی می‌کند که نوعی مدل توانی است (۱۴). نتایج دیگر محققان نیز حکایت از برازش الگوهای متفاوت بر داده‌های رواناب و رسوب دارد که امکان ارایه یک الگوی مشخص را سلب می‌کند، به طوری که مساعدی و همکاران (۱۳۸۵) معادلات توانی را در بررسی روابط دبی جریان و دبی رسوب به کار گرفتند ولی آن را کارآمد نمی‌دانند. تلوری و همکاران (۱۳۸۶) یک مدل گسسته خطی را برای شبیه‌سازی تغییرات زمانی رسوب معلق طی رویدادهای بارندگی بدست آورند و یا خداشناس و همکاران (۱۳۸۷) نشان دادند که داده‌های غلظت رسوب از توزیع لگاریتمی تبعیت می‌کند. خوشرفتار و مازینی (۱۳۹۰) نیز چهار روش رگرسیونی خطی، توانی، لگاریتمی و نمایی را استفاده نموده و رابطه بین بارش و دبی و بارش و رسوب را به صورت خطی و رابطه دبی و رسوب را به صورت توانی ارایه نمودند. **Owusu-Asante** و **Stephenson** (۲۰۰۶) در بررسی مدل‌های خطی، توانی و نمایی نشان دادند که مدل توانی تخمین‌گر بهتری برای رواناب و رسوب می‌باشد و نیز **Ahlawat** (۲۰۱۰) رابطه‌ای لگاریتمی را بین بارش و رواناب به دست آورد. به طور کلی با بررسی نتایج به دست آمده از مطالعات همسو با پژوهش حاضر، می‌توان به رفتار غیرخطی متغیرهای رواناب و رسوب طی زمان پی برد. ولی از بین الگوهای غیرخطی، بسته به ماهیت هر پژوهش و تیمارهای مورد بررسی در مطالعات، نمی‌توان به جمع‌بندی نهایی در تشخیص الگوی تغییرات دست یافت. لذا لازم است در مدیریت و کنترل متغیرهای رواناب و رسوب، این عکس‌العمل متفاوت و غیرخطی را مورد توجه قرار داد تا از خسارات و پیامدهای ناشی از طراحی ناصحیح پروژه‌های آبخیزداری مصون ماند.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به منظور تعیین روند تغییرات رواناب و رسوب طی رگبار و ارزیابی مدل‌های حاکم بر تولید رواناب و رسوب در مقادیر مختلف رس خاک و سطوح سنگی انجام پذیرفت. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه‌گیری نمود که محتوی رس خاک نسبت به سطوح سنگی عاملی موثرتر در تولید رواناب و رسوب می‌باشد. همچنین رواناب نسبت به رسوب از روندی همگون‌تر برخوردار است و مدل‌های غیر خطی درجه سوم برای تبیین روابط حاکم بر رواناب و رسوب بسیار کارآمد می‌باشند. لذا با توجه به نتایج به دست آمده و لزوم دستیابی به جمع‌بندی نهایی، انجام بررسی‌های بیشتر در زمینه روند و الگوهای حاکم بر تولید رواناب و رسوب در سایر عوامل موثر بر پدیده فرسایش خاک و نیز ترکیبی از عوامل مختلف، از پیشنهادات این تحقیق می‌باشد. علاوه بر آن، اجرای مطالعاتی مشابه با دوره‌های شبیه‌سازی بارش طولانی‌تر بسیار مفید می‌باشد، چرا که گمان می‌رود در وقایع طولانی مدت بارش، به مرور تغییرات به صورت خطی درآیند. نهایتاً با توجه به تعدد عوامل دخیل در تولید رواناب و رسوب، اجرای پژوهش در شرایط آزمایشگاهی تحت کنترل، با تیمارهای منفرد و شاخص مانند شیب، شدت بارش و ماده آلی پیشنهاد می‌گردند.

۵- فهرست منابع

۱. بی‌همتا، م.ر.، زارع چاهوکی، م.ع. ۱۳۸۷. اصول آمار در منابع طبیعی، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۰۰ ص.

¹ U.S. Bureau of Reclamation

۲. پیوسته، ف.، اسدی، ح.، عاکف، م. ۱۳۸۹. رابطه‌ی بین پایداری خاکدانه و تشکیل اندوده‌ی سطحی و اثر آن بر فرسایش خاک در شرایط آزمایشگاهی، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال چهارم. شماره ۱۰، ۸ ص.
۳. تلوری، ع.ر.، بیرویدیان، ن.، منوچهری، ا. ۱۳۸۶. مدلسازی تغییرات زمانی رسوب، مطالعه موردی: حوزه آبخیز گاران در استان کردستان، نشریه پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شماره ۷۵، ۶۴ - ۷۰.
۴. حسن‌زاده، ی.، کی‌نژاد، م.ع.، روشنگر، ک.، اعلمی، م.ت. ۱۳۸۹. ارایه مدل یک بعدی شبیه‌سازی جریان و رسوب، مطالعه موردی: رودخانه‌ی آندخوی، نشریه آب و فاضلاب، شماره ۱، ۴ - ۱۴.
۵. حسینی، س.ه.، فیض‌نیا، س.، پیروان، ح.ر.، زهتابیان، غ.ر. ۱۳۸۸. بررسی تولید رواناب و رسوب در سازندهای ریزدانه ثوژن با کمک بارنساز (مطالعه موردی: حوزه آبخیز طالقان)، نشریه مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۶۲، شماره ۲، ۲۱۵ - ۲۲۹.
۶. خداشناس، س.ر.، قهرمان، ب.، داوری، ک.، ناظریان، ح. ۱۳۸۷. ارایه مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره برآورد رسوب در حوضه‌های شمال استان خراسان، مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۲، شماره ۲، ۱۵۰ - ۱۶۴.
۷. خراسانی، ن.ا.، شهبازی، ا.، سرتاج، م.، نصرتی، ک. ۱۳۸۳. کاربرد مدل‌های رگرسیونی در برآورد بار آلودگی رواناب شهری، مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۵۷، شماره ۳، ۴۷۹ - ۴۹۰.
۸. خوشرفتار، ر.، مازینی، ف. ۱۳۹۰. بررسی آماری دبی و رسوب حوضه آبخیز قره‌سو (استان گلستان)، فصلنامه فضای جغرافیایی، سال یازدهم، شماره ۳۳، ۱۰۱ - ۱۲۱.
۹. داداش‌زاده‌اصل، ف.، محسنی‌ساروی، م.، احمدی، ح.، وروانی، ج. ۱۳۸۸. ارزیابی و توسعه منحنی‌های سنج رسوب در برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی (منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز قره‌چای)، نشریه پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، شماره ۸۴، ۲۸ - ۳۵.
۱۰. قهرمان، ن.، قره‌خانی، ا. ۱۳۸۹. بررسی روند تغییرات زمانی سرعت باد در گستره اقلیمی ایران، مجله آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۱، جلد ۴، ۳۱-۴۳.
۱۱. محمدی، ا.، مساعدی، ا.، حشمت‌پور، ع. ۱۳۸۶. تعیین مناسب‌ترین روش برآورد رسوب معلق در ایستگاه هیدرومتری قزاقلی رودخانه گرگانرود، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد چهاردهم، شماره ۴، ۹ ص.
۱۲. مساعدی، ا.، محمدی استادکلایه، ا.، نجفی‌نژاد، ع.، یغمایی، ف. ۱۳۸۵. بهینه‌سازی روابط دبی جریان و دبی رسوب معلق در ایستگاه‌های منتخب رودخانه گرگانرود، مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۵۹، شماره ۲، ۳۳۱ - ۳۴۲.
۱۳. میرعباسی‌نجف‌آبادی، ر.، دین‌پژوه، ی. ۱۳۸۹. تحلیل روند تغییرات آبدهی رودخانه‌های شمال غرب ایران در سه دهه اخیر، نشریه آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۴، ۷۵۷ - ۷۶۸.
۱۴. نجفی‌نژاد، ع.، مردیان، م.، وروانی، ج.، بردی‌شیخ، و. ۱۳۹۰. ارزیابی کارایی ضرایب اصلاحی در بهینه‌سازی منحنی سنج رسوب (مطالعه موردی: حوضه سد کمال‌صالح استان مرکزی)، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۱۸، شماره ۲، ۱۰۵ - ۱۲۲.

15. Ahlawat, R. (2010). Space-time variation in rainfall and runoff: Upper Betwa catchment. World Academy of Science. Engineering and Technology, 71:675-681.

16. Bruce-okine, E., & Lal, R. (1975). Soil erodibility as determined by a raindrop technique. *Soil Science*, 119: 149-159.
17. 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: 21–28.
18. Feng-Ling, Y., Zhi-Hua, SH., Chong-Fa, C., & Zhao-Xia, L. (2010). Wetting rate and clay content effects on interrill erosion in ultisols of southeastern China. *Pedosphere*, 20(1): 129–136.
19. Figueiredo, T., & Poesen, J. (1998). Effects of surface rock fragment characteristics on interrill runoff and erosion of a silty loam soil. *Soil & Tillage Research*, 46: 81-95.
20. Hall, M.J. (2001). How well does your model fit the data? *Journal of hydrology*, 03(1): 49-55.
21. Jalal, J., & Hassan, Sh. (2010). Monthly runoff estimation using artificial neural network. ICTT Conference 2010, College of Engineering, Trivandrum, Kerala State, India: 7pp.
22. Mbagwu, J.S.C., & Bazzoffi, P. (1998). Soil characteristics related to resistance of breakdown of dry soil aggregates by water-drops. *Soil and Tillage Research*, 45:133-145.
23. Nicolaisen, J.E., Gilley, J.E., Eghball, B., & Marx, D.B. (2007). Crop residue effects on runoff nutrient concentrations following manure application. *Transactions of the ASABE*, Vol. 50(3): 939–944.
24. Owusu-Asante, Y., & Stephenson, D. (2006). Estimation of storm runoff loads based on rainfall-related variables and power law models- Case study in Alexandria. *Water SA*, Vol. 32, No. 2: 7pp.
25. Poesen, J., De Luna, E., Franca, A., Nachtergaele, J., & Govers, G. (1999). Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content. *Catena*, 36: 315–329.
26. Poesen, J.W., Wesemael, B.V., Bunte, B., & Benet, A.S. (1998). Variation of rock fragment cover and size along semiarid hillslopes: a case-study from southeast Spain. *Geomorphology*, 23: 323–335.
27. Rimal, B.K., & Lal, R. (2009). Soil and carbon losses from five different land management areas under simulated rainfall. *Soil & Tillage Research*, 106: 62–70.
28. Seeger, M. (2007). Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations. *Catena*, 71: 56–67.
29. Singh, V.P. (1992). *Elementary hydrology*. Eastern Economy Edition, New Delhi, India: 973pp.
30. 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): 40-45.
31. Wang, P., and Linker, L.C. (1999). An alternative regression method for constituent loads from steams. USEPA, CBPO: 7pp.
32. Yu, B. (2000). A systematic over-estimation of flows. *Journal of Hydrology*, 233: 258-262.



Trend and pattern analysis of runoff and sediment in different soil clay contents and surface rock fragments

Bashiri, M.¹, Moradi, H.R.^{2*}, Kheirkhah, M.M.³, Jafari-Khaledi, M.⁴

¹ *Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Torbat Heydarieh*

² *Department of Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University*

³ *Soil Conservation and Watershed Management Research Institute*

⁴ *Department of Statistics, Faculty of Mathematical Sciences, Tarbiat Modares University*

Abstract

Different factors affect the runoff and sediment production during storm conditions. Among different soil properties, clay content is one of the most important bonding agents for aggregation and infiltration. Rock fragments also affect hydrological and erosional processes, but these relationships in various soil clay contents or surface rock fragments maybe positive or negative, thus examination of these effects is of importance in erosion process. Besides, runoff and sediment modeling is essential, because of the difficulties associated with measurements, for any sediment and flood remediation efforts. In this study, in order to have control on levels of variables for each treatment, a set of rainfall simulation system at experimental plots was utilized. In the next step, factorial design including 6 groups of clay treatments (0, 10, 20, 30, 40 and 50 percent) and 6 groups of impermeable surface treatments (0, 5, 10, 15, 20 and 25 percent), each in 3 replicates, (totally 108 experimental plots) was used. To study temporal variations of runoff and sediment, 30-minute rainfall simulations were run with sampling in 2.5-min intervals. Trend analysis showed that in all mentioned treatments, runoff volume increased significantly ($p < 0.01$) but sediment production trend decreased when soil clay content increase. Also, in runoff and sediment production, clay content had the main role when compared to surface rock fragments. Finally, Inverse and S-curve models had best fits on runoff trends. However, sediment production trend and regression models between runoff and sediment mainly both had cubic patterns

Article History:

Received:
22 Sept. 2012

Revised:
28 Jan. 2014

Accepted:
26 Apr. 2014

Keywords:

Trend Analysis
Surface Rock
Fragments
Soil Clay Content
Rainfall Simulator
Erosion Plot

* Corresponding Author Email: hrmoradi@modares.ac.ir