

فصلنامه پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران
جلد ۱۱ شماره ۳، پاییز ۱۳۸۳

بررسی رابطه برخی از شاخصهای پایداری خاکدانه با عامل فرسایش پذیری خاک با استفاده از شبیه‌سازی باران

حسن روحی پور^۱، هومن فرزانه^۲ و حسین اسدی^۳

چکیده

در حال حاضر برای تخمین میزان فرسایش و رسوب الگوهای زیادی متداول گردیده است که بعضی از آنها براساس فرایندهای فرسایش و برخی دیگر براساس معادلات تجربی استوار هستند. عامل فرسایش‌پذیری یا (*Erodibility*)، به‌عنوان یکی از خواص ذاتی خاک در هر دو دسته الگو کاربرد داشته و در برآورد میزان فرسایش از اهمیت زیادی برخوردار است. پژوهشگران متعددی تلاش کرده‌اند تا رابطه شاخص فرسایش‌پذیری خاک را با برخی از خواص فیزیکی- شیمیایی خاک مورد بررسی قرار داده و نقش مهم‌ترین خصوصیتی را که در حساسیت خاک به فرسایش وجود دارد تعیین نمایند. از آنجایی که بسیاری از خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک در پایداری خاکدانه‌ها متبلور است در این تحقیق تلاش شده تا ارتباط بین عامل فرسایش‌پذیری یا حساسیت ذاتی خاک به فرسایش در دو الگوی تجربی و فرایندی با برخی از شاخصهای پایداری خاکدانه‌ها مانند *WSA* و *MWD* مورد بررسی قرار گیرد. دو نوع الگو به نامهای *GUEST* از نوع فرایندی و دیگری *USLE* از نوع تجربی مشهور به معادله جهانی هدر رفت خاک انتخاب گردید. برای انجام آزمایش چهار نوع متفاوت خاک از نظر ساختار بافتی، از بافت سبک تا سنگین با درجه‌های مختلف از چند حوضه آبخیز کشور نمونه‌برداری و مورد بررسی قرار گرفت. عملیات شبیه‌سازی باران روی هر چهار نوع خاک در

تاریخ پذیرش: آبان ۱۳۸۳

E-mail: rouhi@rifr-ac.ir

تاریخ دریافت: اردیبهشت ۱۳۸۳

۱- عضو هیأت علمی مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد خاک‌شناسی واحد علوم و تحقیقات اهواز.

۳- دانشجوی دکترای خاک‌شناسی دانشگاه تهران.

آزمایشگاه فرسایش و رسوب مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع به عمل آمد. آزمایشهای شبیه سازی به مدت ۲۰ تا ۶۰ دقیقه بسته به نوع خاک در چهار شدت مختلف بارندگی (۲۵، ۳۵، ۵۰ و ۸۰ میلیمتر در ساعت) و در پنج شیب متفاوت (۳، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰) بر روی هر ۴ نمونه خاک انجام شد. عامل فرسایش پذیری در الگو فرایندی *GUEST* به نام عامل (β) و در الگو تجربی *USLE* به نام (*K*) با استفاده از نمودار ویشمایر و اسمیت محاسبه گردید. همچنین پایداری خاکدانه ها در شاخص *WSA* و *MWD* در هر ۴ نمونه توسط دستگاه الک مرطوب اندازه گیری شد. همبستگی بین این دو شاخص پایداری و عامل فرسایش پذیری محاسبه شده در هر دو الگو توسط نرم افزار *SPSS* مورد مقایسه آماری قرار گرفت. نتایج بدست آمده از این آزمایش نشان داد که میانگین وزنی قطر ذرات یا *MWD* با عامل فرسایش پذیری (β) در الگو فرایندی *GUEST* دارای همبستگی خطی معنی دار است، در حالی که با عامل فرسایش پذیری *K* از الگو جهانی فرسایش خاک این همبستگی معنی دار نیست. پایداری خاکدانه ها در معیار *WSA* نیز نشان داد که طبقه قطری بزرگتر از ۱۲۵/۱ میلیمتر بیشترین همبستگی معنی دار را با عامل فرسایش پذیری β در الگوی فرایندی داشته است.

واژه های کلیدی: الگو فرآیندی و تجربی، عامل فرسایش پذیری، شاخص پایداری خاکدانه،

شبیه ساز باران

مقدمه

به دلیل مشکلات و محدودیتهای موجود در روشهای مستقیم اندازه‌گیری فرسایش خاک و همین‌طور پیشرفت شایان توجهی که در درک مفاهیم و سازوکار فرآیند فرسایش حاصل شده، ابداع الگوهای مختلف در زمینه فرسایش و رسوب از سالها پیش مورد توجه قرار گرفته است. در حال حاضر شناخت نسبتاً جامعی از بسیاری عوامل مؤثر در فرایند فرسایش حاصل شده و روابط بین آنها به صورت معادلات ریاضی تعریف شده است. (مورگان، ۱۹۸۶). براساس این روابط الگوهای متنوعی تکامل یافته که الگوهای فرآیندی و تجربی از آن جمله هستند.

در این تحقیق، از بین الگوهای فرآیندی، الگو (Griffith University Erosion System Template) *GUEST* و از الگوهای تجربی، الگو جهانی هدر رفت خاک یا *USLE* انتخاب شده تا رابطه عامل فرسایش‌پذیری خاک در این دو الگو با پایداری خاکدانه‌ها مورد بررسی قرار گیرد. قبل از اینکه به موضوع فرسایش‌پذیری پرداخته شود لازم است تا حدودی برای آشنایی به مبانی این دو الگو اشاره شود.

الگو فرآیندی *GUEST*

این الگو براساس الگو رز (۱۹۸۳) و هیرسین و رز (۱۹۹۲) استوار است. در این الگو سه فرآیند؛ جدا شدن ذرات خاک توسط قطرات باران^۱، ترسیب ذرات^۲ و جدا شدن ذرات و حمل آنها^۳ توسط رواناب در نظر گرفته شده است. غلظت رسوب در رواناب حاصل برآیند این سه فرآیند است. ترسیب یا ته نشینی ذرات تحت اثر نیروی ثقل، فرآیندی است که به‌طور پیوسته در طول فرایند فرسایش صورت می‌گیرد. فرآیند ترسیب به شدت انتخابی بوده و شدت آن به توزیع اندازه ذرات خاکدانه‌ها بستگی

-
- 1- Rainfall detachment
 - 2- Sediment deposition
 - 3- Entrainment of sediment

دارد. برای ذرات شن و خاکدانه‌های درشت سریعتر و برای خاکدانه‌ها یا ذرات با اندازه رس خیلی آرام است. سرعت سقوط خاکدانه‌ها یا ذرات اولیه به اندازه، شکل و تراکم (غلظت) آنها بستگی دارد. فرض کنید که خاک به‌طور اختیاری به تعداد I طبقه سرعت سقوط^۱ با جرم برابر تقسیم‌بندی شده است. توزیع سرعت سقوط این ذرات، خصوصیات سرعت ته‌نشینی خاک را توصیف می‌نماید. چنانچه سرعت ته‌نشینی ذرات در طبقه قطری i را با v_i نشان دهیم، توان ترسیب‌پذیری مؤثر خاک که تقریباً برابر میانگین سرعت سقوط ذرات رسوب در آب است و با ϕ نشان داده می‌شود از رابطه زیر بدست می‌آید (روحی‌پور، ۱۳۸۰).

$$\phi = \sum_{i=1}^I \frac{v_i}{I} \quad (\text{m s}^{-1}) \quad (1)$$

در الگو GUEST میزان فرسایش ناشی از برخورد قطرات باران با استفاده از رابطه زیر برآورد می‌شود:

$$c = \frac{aP^p}{\varepsilon Q} \quad (\text{kg m}^{-3}) \quad (2)$$

که در آن:

$$\varepsilon = 1 + \frac{a\phi}{Qa_d} \quad (3)$$

در این روابط، c غلظت رسوب، α و α_d به ترتیب ضریب جدایش‌پذیری^۲ خاک اولیه و لایه ترسیب یافته در حین رویداد فرسایش است. P شدت بارندگی و p کوچک یک نمای بدون بعد برای شدت بارندگی است که تقریباً برابر عدد یک است. Q شدت روان‌آب در واحد سطح ($\text{m}^{-3} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) است.

1- Settling velocity class

2- Detachability

در الگو GUEST حداکثر غلظت رسوب ناشی از عمل رواناب برای جریان ورقه‌ای با روابط زیر برآورد می‌شود:

$$C_t = \frac{F\sigma S}{(\sigma/\rho - 1)\phi_e} \left(\frac{\sqrt{S}}{n} \right)^{3/5} L^{2/5} Q^{2/5} \quad (4)$$

که در آن؛ F بخشی از قدرت جریان است که برای انجام کار فرسایش در دسترس می‌باشد، $\phi = \sum v_i / I$ توان ترسیب‌پذیری مؤثر $(m \cdot s^{-1})$ ، S شیب $(m \cdot m^{-1})$ ، ρ دانسیته آب $(kg \cdot m^{-3})$ ، σ دانسیته مرطوب رسوب $(kg \cdot m^{-3})$ ، n ضریب زبری مانینگ، L طول شیب (m) و Q شدت روان‌آب $(m^2 \cdot s^{-1})$ است. مقدار F برای جریانهای متلاطم تقریباً برابر 0.1 است اما در قدرت جریانهای کمتر از 0.1 وات بر متر مربع به سمت 0.2 افزایش می‌یابد (Proffitt et al., 1993).

مطالعات متعدد نشان داده است که بین میزان واقعی بار رسوب (غلظت واقعی رسوب؛ c) و حداکثر حمل رسوب (c_t) رابطه‌ای نمایی به صورت زیر وجود دارد:

$$c = c_t^\beta \quad (kg \cdot m^{-3}) \quad (5)$$

در رابطه (۵)، β یک مؤلفه تجربی فرسایش‌پذیری است. β همبستگی زیادی با مؤلفه اصلی فرسایش‌پذیری، یا مقاومت خاک دارد (Rose, 1993). چنانچه مؤلفه فرسایش‌پذیر خاک (β) معلوم باشد با استفاده از الگو GUEST می‌توان غلظت رسوب را بر هر واقعه مجرد یا رگبارش محاسبه نمود.

برای برآورد عامل فرسایش‌پذیری β ، با برقراری یک رشته آزمایشهای کرتی ابتدا میانگین غلظت واقعی رسوب (c) در کرتها آزمایشی اندازه‌گیری شده و بعد حداکثر توان حمل C_t با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود. پس از اندازه‌گیری بار رسوب و محاسبه توان حمل، عامل β از رابطه زیر بدست می‌آید (روحی‌پور، ۱۳۸۰).

$$\beta = \frac{\ln c}{\ln c_t} \quad (6)$$

معادله جهانی هدر رفت خاک USLE

ویشمایر و اسمیت (۱۹۶۵) پس از سالهای طولانی پژوهش درباره فرسایش آبی، سرانجام با استفاده از آمار رسوب و رواناب بیش از ۱۰۰۰۰ (سال × پلات) در کرت‌های آزمایشی ۴۶ ایستگاه تحقیقاتی از ۲۶ ایالت مختلف آمریکا و ملاحظه یافته‌ها و نتایج بررسی دیگران، معادله‌ای را جهت تخمین مقدار فرسایش آبی خاک پیشنهاد کردند. در معادله جهانی هدر رفت خاک تأثیر هر کدام از عوامل مؤثر در فرسایش خاک به صورت یک کمیت، مشخص گردیده که از حاصلضرب آنها میزان تلفات خاک به صورت کمی بدست می‌آید. شکل کلی این معادله به صورت زیر است (رفاهی، ۱۳۷۶):

$$A = RKLSC \quad (7)$$

که در آن، A میزان خاک از دست رفته در واحد سطح، R عامل فرسایش باران، K عامل فرسایش پذیری خاک، L عامل طول شیب، S عامل درجه شیب، C عامل پوشش و مدیریت و P عامل عملیات حفاظتی می‌باشند. عامل فرسایش پذیری خاک، K با استفاده از نمودار ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) از روی برخی خصوصیات خاک تخمین زده می‌شود.

فرسایش پذیری خاک

فرسایش پذیری خاک در واقع بیان کمی حساسیت ذاتی آن نسبت به جدا شدن ذرات از بستر و انتقال آن توسط عوامل فرساینده (باران و رواناب) است. فرسایش پذیری به عنوان یک عامل در واقع حاصل تأثیر بسیاری از خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک و اثرات متقابل بین آنها است. به طور کلی خصوصیات از خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک آن مؤثرند عبارتند از: سرعت و ظرفیت نفوذ آب در خاک، بافت خاک، ساختمان و پایداری خاکدانه‌ها که خود نیز تحت تأثیر نوع و میزان مواد آلی و ترکیبهای مختلف شیمیایی قرار می‌گیرند. از میان این خواص، پایداری خاکدانه و مقاومت فیزیکی یا

مکانیکی خاک مؤثرترین عامل بر روی فرسایش و انتقال رسوب می‌باشد. در این تحقیق سعی شده تا به رابطه این خصوصیت با عامل فرسایش‌پذیری خاک پرداخته شود.

خاکدانه‌ها، چه از نظر شکل و چه از نظر پایداری بر دامنه وسیعی از فرآیندها اثر مستقیم دارد. خاک در واقع ترتیب قرار گرفتن مواد جامد (خاکدانه‌ها) و منافذ بین آنها بسیاری از خصوصیات فیزیکی خاک نظیر آب قابل دسترس گیاه، تهویه و دمای خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پایداری خاکدانه در واقع توانایی خاک در حفظ شکل ساختمانی خود در طول زمان در مقابل نیروهای خارجی از جمله تنش حاصل از بارندگی و روان آب است (بایبوردی، ۱۳۷۲).

در تحقیقات متعددی نقش پایداری خاکدانه‌ها بر روی هدر رفت خاک مورد بررسی قرار گرفته است که به برخی از آنها اشاره می‌شود. مواد آلی خاک به دلیل تولید خاکدانه‌های پایدار و بهبود ساختمان خاک، در کاهش هدر رفت خاک نقش به‌سزایی ایفاء می‌کنند. خاکهایی که کربن آلی در آنها از ۲ درصد کمتر باشد، جزو خاکهای قابل فرسایش بشمار می‌روند. ویشمایر و همکاران (۱۹۷۱) محدوده تأثیر مواد آلی را در ثبات ساختمان خاک بین ۰ تا ۴ درصد عنوان کرده و ذکر نمودند که در مقادیر بالاتر، کربن آلی تأثیر زیادی در افزایش ثبات خاکدانه‌ها ندارد. سینگر و همکاران (۱۹۸۲) نشان دادند که سدیم تبادلی خاک به دلیل اثرات منفی بر روی پایداری خاکدانه‌ها، در افزایش هدر رفت خاک نقش مهمی دارد. شاخصهای مختلف فرسایش‌پذیری در ارتباط با پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان خاک، نظیر شاخص هنین، شاخص ناپایداری، نسبت خاکدانه‌های سطحی، درصد خاکدانه‌های مقاوم (در آب) بزرگتر از ۰/۵ میلیمتر و غیره (مورگان، ۱۹۸۶)، خود مؤید این مطلب است.

برایان (۱۹۶۸) براساس مطالعاتی که درباره شاخصهای فرسایش‌پذیری خاک مؤثر بر فرسایش آبی بعمل آورد، مشاهده کرد که بهترین شاخص را می‌توان پایداری

خاکدانه‌ها بشمار آورد، وی درصد خاکدانه‌هایی را که قطر آنها از نیم میلی‌متر بزرگتر بوده و در مقابل آب پایدار می‌باشند به‌عنوان شاخص فرسایش‌پذیری در نظر گرفت. برایان و لاک (۱۹۸۱) نیز در مطالعه در مورد سه نوع خاک با درصدهای شن، سیلت و رس متفاوت از کانادا، خاصیت پایداری خاکدانه و همچنین اندازه خاکدانه‌ها را به همراه عامل زبری خاک مؤثرترین خواص بر روی رسوب جابه‌جا شده و یا فرسایش دانستند. آنها دریافتند که با کاهش معیار $0/5 \text{ mm} > WSA$ ، میزان فرسایش افزایش می‌یابد.

روش تحقیق

به منظور انجام آزمایشها چهار نوع خاک مختلف با تفرق بافتی سبک تا سنگین از دشتهای اشتهارد، مردآباد و ارتفاعات جنگلهای خلخال انتخاب و به میزان لازم (از هر نوع بیش از ۱۰۰ کیلوگرم) از قسمت سطحی خاک که معمولاً در معرض فرسایش قرار دارد نمونه‌برداری شد. نمونه‌های خاک مزبور بعد از خشک شدن در هوا، مورد تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی مورد نیاز از قبیل بافت، توزیع اندازه ذرات، کاتیونهای محلول، Fe و Al، ماده آلی، کربنات کلسیم معادل، pH و EC قرار گرفت. بافت به روش هیدرومتری، توزیع اندازه ذرات با روش الک مرطوب، pH و EC با استفاده از دستگاه pH متر و EC متر اندازه‌گیری شدند. شاخص پایداری^۱ ($C_{5.10}$) با استفاده از دستگاه کازاگراند برای هر چهار نمونه خاک مورد آزمایش، تعیین گردید. جرم مخصوص مرطوب (W.D) با استفاده از فرمول لوچ و رزول (۱۹۹۲) از روی درصد شن محاسبه گردید. برای تعیین عامل ترسیب‌پذیری مؤثر ϕ مورد استفاده در الگو GUEST نیز از نرم‌افزار GUDPRO (Lisle et al., 1997) و بهره‌گیری از داده‌های آزمایش الک مرطوب (Wet-Sieving)، جرم مخصوص مرطوب و عمق رواناب استفاده

1- Consistency index

شد. ضریب زبری مانینگ نیز از جدول مربوطه باتوجه به نوع بستر خاک مورد آزمایش استخراج گردید.

برای تعیین توزیع اندازه خاکدانه‌ها از روش الک تر، ۶ عدد الک با اندازه‌های ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵ و ۰/۰۷۵ میلیمتر مورد استفاده قرار گرفت. پس از تعیین جرم خشک مواد باقیمانده بر روی هر الک، توزیع اندازه ذرات (درصد خاکدانه‌های پایدار بزرگتر از هر اندازه) و همچنین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب (MWD) محاسبه گردید.

در این تحقیق از یک دستگاه شبیه‌ساز باران در مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع ساخت شرکت Delta lab استفاده گردید. (عکس شماره ۱) این بارانساز می‌تواند بارانهایی را با شدتهای مختلف از ۲۵ تا حدود ۲۰۰ میلیمتر در ساعت شبیه‌سازی نماید. آب مورد نیاز توسط یک تانک ۶۰۰ لیتری تأمین و به‌وسیله یک پمپ برقی به طرف یک نازل منفرد جارویی که در ارتفاع چهار متری از بستر خاک مورد آزمایش قرار دارد منتقل می‌گردد. فلوم شیب‌پذیر دستگاه بارانساز دارای پلاتی به ابعاد ۱×۱ متر است که بستر خاک مورد آزمایش را در بر می‌گیرد. نمونه‌های خاک پس از عبور از الک ۴/۷۵ میلیمتری در فلوم شیب‌پذیر قرار داده می‌شود. پس از اشباع تدریجی بستر خاک در طی مدت ۲۴ ساعت، شبیه‌سازی باران در ۴ شدت مختلف به ترتیب ۲۵، ۳۵، ۵۰ و ۸۰ میلیمتر در ساعت و ۵ شیب ۳، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد و هر کدام در مدت زمان ۲۰ دقیقه انجام گرفت. با جمع‌آوری رسوب و رواناب حاصله غلظت رسوب در طی هر فرایند فرسایش محاسبه گردید. میزان پاشمان ناشی از برخورد قطرات باران نیز به‌طور منفرد با استفاده از سینی پاشمان اندازه‌گیری شد. ابعاد این سینی ۳۰×۱۵ سانتیمتر است که در هنگام شبیه‌سازی باران در روی پلات اصلی قرار می‌گیرد.



عکس شماره ۱- دستگاه شبیه سازی باران مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع به انضمام
مخزن آب و دستگاه کنترل مرکزی

نتایج

برای شناخت کلی چهار نوع خاک انتخابی برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های مورد آزمایش در جدولهای شماره ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول شماره ۱- نتایج اندازه‌گیری برخی خصوصیات فیزیکی نمونه‌های مورد آزمایش

شماره نمونه	بافت	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	آهک (%)	چگالی تر (kg m^{-3})	ضریب زبری (n)
۱	Clay	۴۱	۲۷	۳۲	۹/۸	۱۵۹۲	۰/۰۱۸
۲	Loam	۲۶	۴۵	۲۹	۸/۹	۱۵۸۰	۰/۰۲
۳	Sandy loam	۱۸	۳	۷۹	۶/۲	۲۰۵۷	۰/۰۲۲۵
۴	Sandy loam	۱۸	۱	۸۱	۱/۸	۲۰۹۷	۰/۰۲۲۵

جدول شماره ۲- نتایج اندازه‌گیری برخی خصوصیات شیمیایی نمونه‌های مورد آزمایش

شماره نمونه	Fe2O3 (%)	AL2O3 (%)	ESP (%)	SAR	pH	EC (dS m^{-1})	O.M (%)
۱	۲/۵۱	۰/۹	۰/۱۲	۰/۵۸	۷/۹	۰/۹۲	۱/۰۵
۲	۲/۲۵	۱/۰۲	۱۸/۶	۲۳۶/۷۴	۸/۶	۱۰۳	۱/۵۸
۳	۱/۲۵	۰/۴۵	۰/۰۴	۰/۳۶	۸/۰	۱/۴۳	۰/۲۷
۴	۰/۷۵	۰/۶	۰/۰۲	۰/۱	۵/۸	۰/۴۹	۳/۶۵

نتایج جدولهای فوق نشان می‌دهد که چهار نمونه خاک انتخابی از نظر بسیاری از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در دامنه نسبتاً وسیعی قرار دارند. نمونه شماره ۱ دارای بافت سنگین و نمونه شماره ۴ دارای سبکترین بافت می‌باشد. نمونه شماره ۲ به دلیل اینکه از دشت اشتهارد و نزدیک دشت نمک برداشته شده دارای شوری بسیار زیاد است. نمونه شماره ۴ نیز به دلیل اینکه از خاک منطقه جنگلی حفاظت شده خلخال در استان گیلان برداشته شده دارای pH اسیدی می‌باشد.

مقادیر شاخص پایداری خاکدانه‌ها در معیار WSA و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها MWD برای چهار نمونه خاک مورد بررسی که با استفاده از دستگاه الک مرطوب اندازه‌گیری و محاسبه شده به‌عنوان شاخصهای پایداری خاکدانه‌ها در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

جدول شماره ۳- نتایج حاصل از اندازه‌گیری پایداری خاکدانه و شاخص پایداری

نمونه	%WSA >1	%WSA >0.5	%WSA >0.25	%WSA >0.125	%WSA >0.075	MWD (mm)	C ₅₋₁₀ (%)
۱	۴۲/۸	۴۵/۱	۴۷/۶	۵۲/۰	۵۶/۳	۰/۷۰	۴/۵۵
۲	۱۲/۹	۱۳/۹	۱۷/۳	۲۷/۳	۳۵/۰۴	۰/۲۶	۳/۱۵
۳	۳۶/۳	۵۳/۹	۷۰/۳	۸۴/۵	۸۹/۶	۰/۷۷	۱/۸۴
۴	۸۰/۱	۹۰/۹	۹۵/۹	۹۸/۶	۹۹/۸	۱/۳۱	۴/۳۷

نمونه شماره ۴ دارای خاکدانه‌های پایدارتر نسبت به نمونه‌های دیگر به ویژه نمونه شماره ۲ می‌باشد. این امر به دلیل تأثیر کربن آلی این نمونه در خاکدانه‌پذیری و پایداری خاکدانه‌ها می‌باشد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت رسوب جمع‌آوری شده در شدتهای مختلف بارندگی و در شبیه‌های مختلف برحسب گرم در لیتر برای چهار نوع خاک مورد بررسی در جدول شماره ۴ آورده شده است. در ستون آخر این جدول میزان غلظت رسوب اندازه‌گیری شده در سینی پاشمان نیز ارائه شده است.

جدول شماره ۴- میزان غلظت رسوب (gr/lit) در تیمارهای مختلف آزمایشی

شماره نمونه	شیب شدت بارندگی	٪۳	٪۵	٪۱۰	٪۱۵	٪۲۰	اثر باران (پاشمان)
	۲۵	۲/۷	۴/۸	۵/۹	۱۲/۶	۲۷	۴/۴
۱	۳۵	۵/۶	۷/۲	۱۰/۵۲	۲۲/۵	۴۲/۴	۵
	۵۰	۷/۲	۸/۳	۱۱/۴	۲۳/۵	۴۸/۲	۵/۲
	۸۰	۹/۲	۹/۳	۱۷/۱	۳۲	۵۵/۵	۵/۸
	۲۵	۵/۹	۱۲/۵	۱۷/۶	۷۲	۹۳/۵	۷/۸
۲	۳۵	۶/۸	۱۳/۹	۱۵/۵	۶۸	۹۷	۷/۸
	۵۰	۸	۱۴/۵	۴۴/۹	۹۳/۳	۱۱۵	۸
	۸۰	۱۲/۲	۱۵/۳	۵۶/۸	۹۵/۵	۱۲۳/۵	۸
	۲۵	۱/۵	۱/۸	۱/۹	۲/۵	۳/۱	۰/۱۲
۳	۳۵	۱/۶	۱/۹	۲/۲	۴	۵/۲	۰/۱۳
	۵۰	۱/۹	۲/۵	۳	۵/۲	۷	۰/۱۴
	۸۰	۱/۹	۳/۱	۵/۵	۷/۵	۸/۹	۰/۱۵
	۲۵	۱/۰۲	۱/۶۳	۱/۷	۲/۱	۲/۷	۰/۱۲
۴	۳۵	۱/۰۴	۱/۶۵	۱/۷۸	۲/۶	۲/۹	۰/۱۲
	۵۰	۱/۰۹	۱/۷	۱/۹۷	۲/۹	۳/۱	۰/۱۲
	۸۰	۱/۱	۱/۸	۲/۲	۴/۴	۵/۵	۰/۱۳

با استفاده از نمودار ویشمایر، فرسایش پذیری (K) از الگوی جهانی هدر رفت خاک براساس تخمین اول نمودار بدست آمد. فرسایش پذیری β با استفاده از فرمولهای ۱ و ۲ مربوط به الگوی فرآیندی و ضرایب فرسایش پذیری α و α_d با استفاده از روابط ۳ و ۴ محاسبه گردید. نتایج حاصل در جدول شماره ۵ ذکر شده است.

جدول شماره ۵- نتایج حاصل از محاسبه شاخصهای فرسایش پذیری

در دو الگوی فرایندی و تجربی

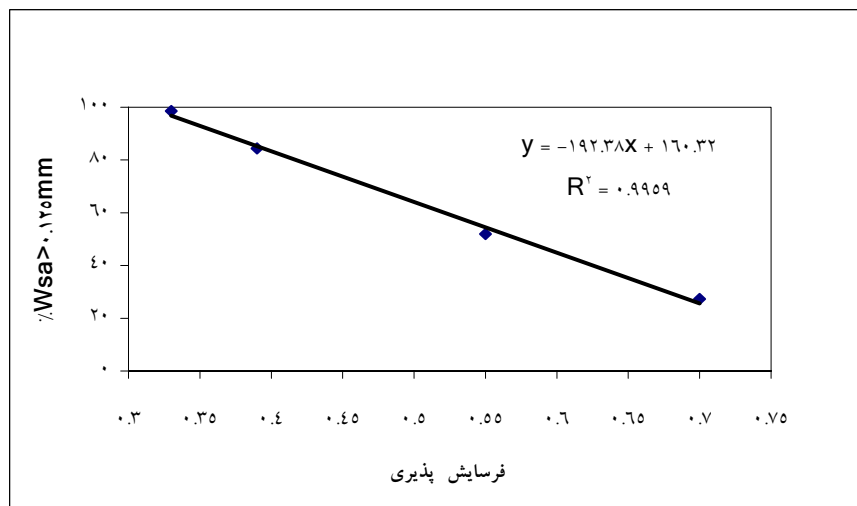
نمونه خاک	ضریب α_d	ضریب α	K	β
۱	۸۶۶۸	۴۷/۵	۰/۲۳	۰/۵۵
۲	۸۸۱۶	۷۲	۰/۳۴	۰/۷
۳	۵۵۱	۱/۲۶	۰/۲۱	۰/۳۹
۴	۹۵۱	۰/۹۶	۰/۱۶	۰/۳۳

در جدول شماره ۶ نتایج حاصل از رگرسیون بین عامل فرسایش پذیری β و K با میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)، درصد خاکدانه‌های بزرگتر از ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵ و ۰/۰۷۵ میلیمتر و ضرایب α و α_d آورده شده است. ضریب فرسایش پذیری β دارای همبستگی منفی معنی دار در سطح ۰/۵٪ با MWD است، در حالی که K محاسبه شده دارای همبستگی ضعیف تری با MWD می باشد. ضرایب فرسایش پذیری β و K هر دو دارای همبستگی منفی معنی دار با درصد خاکدانه‌های پایدار بزرگتر از ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۰۱ میلیمتر می باشند. در حالی که K دارای بالاترین همبستگی با درصد خاکدانه‌های پایدار بزرگتر از ۰/۲۵ میلیمتر است (تمامی اعداد کوچکتر از ۰/۰۵ مربوط به سطح احتمال بیانگر معنی دار بودن روابط بین دو متغیر می باشند).

جدول شماره ۶- میزان همبستگی و سطح احتمال شاخصهای مختلف فرسایش پذیری با میانگین وزنی قطر و درصد خاکدانه‌های پایدار (حاصل از نرم افزار SPSS)

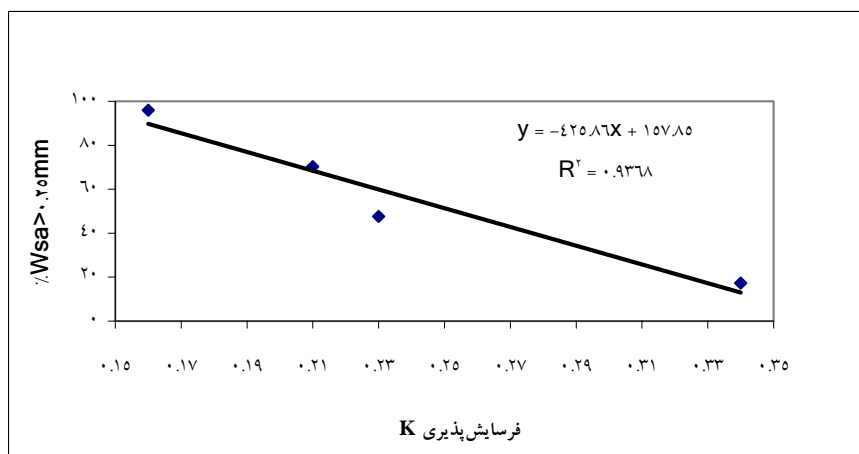
عامل فرسایش پذیری		α		β		K		مؤلفه‌های همبستگی
سطح احتمال	همبستگی	سطح احتمال	همبستگی	سطح احتمال	همبستگی	سطح احتمال	همبستگی	
								شاخص پایداری
								MWD
۰/۰۰۵	۰/۹۹۰	۰/۰۱	۰/۹۸۰	۰/۰۲	۰/۹۷۶	۰/۰۸۳	۰/۸۳۵	
۰/۱۹۴	۰/۶۱۱	۰/۱۳۵	۰/۷۲۹	۰/۱۳۴	۰/۷۳۲	۰/۰۵۷	۰/۸۸۵	%WSA > 1mm
۰/۱۱۵	۰/۷۶۹	۰/۰۶۷	۰/۸۶۵	۰/۰۳۲	۰/۹۳۶	۰/۰۲	۰/۹۶۰	%WSA > 0.5mm
۰/۰۶۶	۰/۸۶۸	۰/۰۲۸	۰/۹۴۵	۰/۰۰۷	۰/۹۸۵	۰/۰۱۶	۰/۹۶۸	%WSA > 0.25mm
۰/۰۳۵	۰/۹۲۹	۰/۰۰۸	۰/۹۸۴	۰/۰۰۱	۰/۹۹۸	۰/۰۲۹	۰/۹۴۳	WSA > 0.125mm
۰/۰۲۷	۰/۹۴۵	۰/۰۰۵	۰/۹۹۱	۰/۰۰۲	۰/۹۹۷	۰/۰۳۶	۰/۹۲۹	%WSA > 0.075mm

بالاترین همبستگی منفی بین β با درصد خاکدانه‌های بزرگتر از ۰/۱۲۵ میلیمتر وجود دارد که این همبستگی در سطح ۱ هزارم معنی‌دار است (نمودار شماره ۱). نمودار فوق نشان می‌دهد که بین پایداری خاکدانه‌ها و ضریب فرسایش‌پذیری الگوی فرایندی رابطه قوی منفی وجود دارد یعنی با افزایش درصد خاکدانه‌های پایدار فرسایش‌پذیری خاک کاهش می‌یابد و در عوض مقاومت خاک نسبت به فرسایش افزایش پیدا می‌کند.



نمودار شماره ۱- رابطه بین ضریب فرسایش پذیری β و درصد خاکدانه‌های پایدار بزرگتر از ۰/۱۲۵ میلیمتر

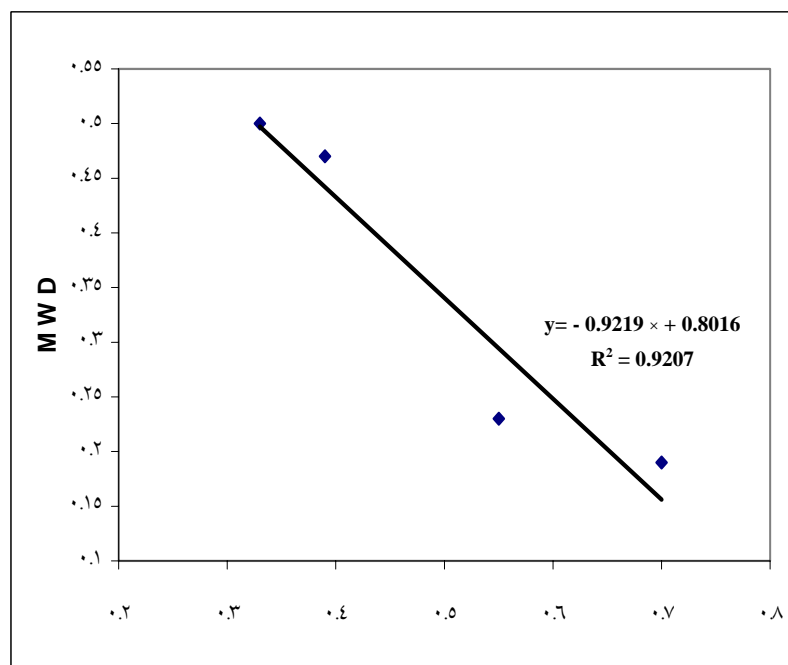
نمودار شماره ۲ نیز وجود یک رابطه قوی بین عامل فرسایش پذیری K در الگوی جهانی هدر رفت خاک را با درصد خاکدانه‌های پایدار بیش از ۰/۲۵ میلیمتر با علامت منفی نشان می‌دهد. در توضیح این مطلب می‌توان نتیجه‌گیری مشابهی نسبت به آنچه برای β ذکر شد بیان نمود، ولی با این تفاوت که این همبستگی برای خاکدانه‌های نسبتاً بزرگتر برقرار است.



نمودار شماره ۲- رابطه بین عامل فرسایش پذیری K و درصد خاکدانه‌های پایدار بزرگتر از ۰/۲۵ میلیمتر

نمودار شماره ۳ نیز وجود یک رابطه منفی قوی بین عامل فرسایش پذیری در الگوی فرآیندی را با شاخص MWD (میانگین وزنی قطر ذرات) نشان می‌دهد. همان‌گونه که در مورد شاخص WSA ذکر شد، این شاخص (MWD) نیز می‌تواند در جهت تعیین میزان حساسیت خاکدانه‌ها نسبت به فرسایش مورد استفاده قرار گیرد، اما عدم وجود رابطه معنی‌دار بین این شاخص و عامل فرسایش‌پذیری (K)، استفاده از این شاخص پایداری خاکدانه‌ها را کمی با تأمل مواجه می‌سازد.

نتایج همبستگی برای پایداری خاکدانه‌ها با حساسیت خاک نسبت به فرسایش ناشی از برخورد قطرات باران یا پاشمان که در الگوی فرآیندی با ضرایب فرسایش‌پذیری خاک که ناشی از (در حالت پاشمان) (α و α_d) نشان داده شده بیانگر تاثیر قوی پایداری خاکدانه در کمیت ضرایب مذکور و به ویژه بر روی ضریب α است. تأثیر پایداری خاکدانه‌ها بر روی ضرایب فوق در طبقات قطری ریزتر ($WSA > 0.125\%$ و $WSA > 0.075\%$) بیشتر و قویتر است. (جدول شماره ۶).



نمودار شماره ۳- رابطه بین MWD و عامل فرسایش پذیری (β) در الگوی فرایندی *GUEST*

بحث و نتیجه گیری

به نظر می‌رسد که درجه همبستگی بین پایداری خاکدانه‌ها و عامل فرسایش پذیری با کاهش اندازه خاکدانه‌های پایدار بیشتر می‌شود به عبارت دیگر هر چه از نظر قطر به حد پایین‌تر می‌رسیم، همبستگی با فرسایش پذیری قوی‌تر می‌شود، به طوری که شاخص $WSA > 0.125mm$ دارای حداکثر همبستگی ($R^2 = 0.99$) با عامل فرسایش پذیری β دارد. از آنجایی که اغلب خاکهای ایران به‌طور معمول از خاکدانه‌های با اندازه کوچک تشکیل شده و به‌علت کمبود مواد آلی خاکدانه‌های درشت و پایدار در مقابل آب به‌ندرت یافت می‌شود احتمالاً این نوع همبستگی با خاکدانه‌های ریزتر که دارای پایداری بیشتری هستند هماهنگ می‌باشد. هر چه این ذرات دارای پایداری بیشتری باشند، میزان فرسایش و رسوب کمتر می‌گردد. برایان (۱۹۶۸) این نوع

همبستگی را برای خاکدانه‌های بزرگتر از ۰/۵ میلی‌متر برای بسیاری از خاکهای مورد بررسی گزارش داده است. خاکدانه‌هایی در حد مذکور در این بررسی فاقد پایداری لازم در مقابل برخورد قطرات باران بوده و به‌سادگی متلاشی می‌شوند بنابراین فاقد یک همبستگی معنی‌دار با عامل فرسایش‌پذیری می‌باشند.

در نتیجه‌گیری مشابه، قوی‌ترین رابطه همبستگی ($R^2 = ۰/۹۳$) برای عامل فرسایش‌پذیری K از معادله جهانی هدر رفت خاک مربوط به شاخص $WSA > ۰/۲۵mm$ است که در یک طبقه قطری بالاتر از نتیجه مشابه برای فرسایش‌پذیری β قرار دارد. با توجه به نتایج بدست آمده که حاکی از ارتباط معنی‌دار بین هر دو شاخص پایداری خاکدانه با عامل فرسایش‌پذیری در دو الگو مورد بررسی است، می‌توان گفت که هر شاخصی که از نظر شاخص پایداری خاکدانه در حد بالاتری باشد نسبت به فرایند فرسایش مقاومتر بوده و ضریب فرسایش‌پذیری آن کمتر می‌باشد. البته باید توجه داشت که پایداری خاکدانه‌ها به نوبه خود به بسیاری از خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک مانند بافت خاک، مواد آلی، درصد سدیم تبادلی، اکسیدهای آهن و آلومینیوم و سایر خصوصیات بیولوژیکی خاک مرتبط می‌باشد که برای تعیین مهمترین خواص مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها به منظور معرفی یک شاخص مناسبتر مطالعات بیشتری پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

تحقیق حاضر با استفاده از امکانات و تسهیلات شبیه‌سازی باران که به‌طور مشترک از محل اعتبارات پروژه ۱۲۶۰ شورای پژوهش‌های علمی کشور و مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع تأمین شده به ثمر رسیده است. بدین‌وسیله نگارندگان مراتب سپاسگزاری خود را اعلام می‌کنند. انجام این تحقیق مدیون تلاش بسیاری از همکاران در بخش تحقیقات بیابان مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع و آقای مهندس افتخاری از مؤسسه تحقیقات خاک و آب کرج می‌باشد. بدین‌وسیله یاری آنها را ارج می‌نهیم.

منابع مورد استفاده

- ۱- بایبوردی، م.، ۱۳۷۰. فیزیک خاک، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه تهران.
- ۲- رفاهی، ح. ق.، ۱۳۷۶. فرسایش آبی و کنترل آن، مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تهران.
- ۳- روحی پور، ح.، ۱۳۸۰. کاربرد الگو فرآیندیابی *GUEST* در برآورد میزان فرسایش، مجموعه چکیده مقالات همایش ملی مدیریت اراضی - فرسایش خاک و توسعه پایدار، انتشارات مرکز تحقیقات منابع طبیعی و امور دام استان مرکزی - اراک، ص ۶۳-۹۰.
- ۴- مورگان، آر. پی. سی.، ۱۹۸۶. فرسایش و حفاظت خاک، ترجمه: امین علیزاده، ۱۳۶۸، انتشارات آستان قدس رضوی.
- 5- Bryan, R.B., 1968. The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. *Geoderma*, 2: 5-26.
- 6- Hairsine, P.B., and Rose, C.W., 1992a. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles, I. Sheet flow. *Water Resources Research*, 28: 237-243.
- 7- Hairsine, P.B., and Rose, C.W., 1992b. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles, II. Rill flow. *Water Resources Research*, 28: 245-250.
- 8- Lisle, I.G., Coughlan, K.J., and Rose, C.W., 1997. *GUDPRO User Manual*. Faculty of Environmental Science, Griffith University, Nathan, 411, Australia.
- 9- Rose, C.W., Williams, J.R., Sander, G.C., and Barry, D.A., 1983. A mathematical model of soil erosion and deposition processes, I. Theory for Plan Land Element. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47: 991-995.
- 10- Singer, M.J., Janitzky, P., and Blackand, J., 1982. Influence of exchangeable sodium percentage on soil erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46: 117-121.
- 11- Wischmeier, W.H., and Mannering, J.V., 1965. Effect of organic matter content of the soil infiltration. *J. Soil and Water Cons.*, 20.
- 12- Wischmeier, W.H., Johnson, C.B., and Cross, B.V., 1971. A soil erodibility monograph for farmland and construction sites. *J. Soil and water Cons.*, 26(5): 189-193.
- 13- Wischmeier, W.H., and Smith, B.D., 1978. Prediction Rainfall Erosion Losses. A Guide for Conservation Planning Agriculture. USDA. *Agriculture Handbook*. 537:58.