

بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش پذیری براساس رابطه جهانی فرسایش خاک در خاک‌های آهکی

*علیرضا واعظی^۱، حسینعلی بهرامی^۲، سیدحمیدرضا صادقی^۳ و محمدحسین مهدیان^۴

^۱دانشجوی دکتری گروه خاکشناسی دانشگاه تربیت مدرس، ^۲استادیار گروه خاکشناسی دانشگاه تربیت مدرس،
^۳دانشیار گروه آبخیزداری دانشگاه تربیت مدرس، ^۴استادیار پژوهش مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری

تاریخ دریافت: ۸۵/۸/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۶/۱۳

چکیده

در رابطه جهانی فرسایش خاک (USLE)، عامل فرسایش پذیری خاک (K) با استفاده از نمودار براساس پنج ویژگی خاک (شن درشت، شن خیلی ریز و سیلت، ماده آلی، ساختمان و نفوذپذیری) برآورد می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این عامل ممکن است تحت تأثیر سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قرار گیرد. این پژوهش در شهرستان هشترود واقع در جنوب استان آذربایجان شرقی طی سال ۱۳۸۴ انجام گرفت. خاک منطقه بیشتر با بافت لومی رسی دارای حدود ۱۳ درصد آهک است. برای انجام پژوهش محدوده‌ای مربعی شکل از خاک منطقه به ابعاد ۳۰×۳۰ کیلومتر انتخاب و به ۳۶ شبکه منظم مربعی جدا گردید. در هر شبکه ۳ تکرار کرت واحد با فاصله ۱/۲ متر ایجاد شد. در خاک‌های تحت بررسی ویژگی‌های مستقل (درصد شن، سیلت، رس، سنگریزه، ماده آلی، آهک و پتاسیم) و وابسته خاک (پایداری خاکدانه و نفوذپذیری) اندازه‌گیری شد. مقدار K، از نسبت مقدار رسوب بر مقدار عامل فرسایش باران اندازه‌گیری شد و با مقدار K برآوردی از نمودار مقایسه گردید. میانگین مقدار K اندازه‌گیری شده برابر با ۰/۰۴۲۵۸ مگاگرم ساعت بر مگاژول میلی‌متر بود که ۱۰/۹۸ برابر کمتر از مقدار برآوردی شد. این تفاوت در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد. همچنین اثر پایداری خاکدانه و نفوذپذیری بر مقدار K اندازه‌گیری شده معنی‌دار ($R^2=0/83$ ، $P<0/01$) بود. ویژگی‌های مستقل خاک با تأثیر بر پایداری خاکدانه و نفوذپذیری، بر فرسایش پذیری اثر گذاشتند. نتایج نشان داد که در خاک‌های آهکی مورد بررسی، آهک به عنوان یکی از ویژگی‌های مهم خاک، در افزایش پایداری خاکدانه و نفوذپذیری و در نتیجه کاهش فرسایش پذیری تأثیر قابل توجهی دارد. این تأثیر در نمودار USLE در نظر گرفته نشده است. در این خاک‌ها، فرسایش پذیری را از روی رابطه رگرسیونی ساده بر اساس سیلت، ماده آلی و آهک با اطمینان نسبتاً بالا ($R^2=0/74$) می‌توان برآورد کرد.

واژه‌های کلیدی: رابطه جهانی فرسایش خاک، فرسایش پذیری، خاک آهکی، عوامل مؤثر.

مقدمه

خاک به عنوان مهمترین منبع تولید مواد غذایی در جهان است. گزارش‌های جرارد (۲۰۰۰) نشان می‌دهد که بیش از ۹۷ درصد مواد غذایی جهان از خاک به دست می‌آید. گزارش‌های کیرکبای و مورگان (۱۹۸۰) نشان می‌دهد که فرسایش خاک به وسیله آب به عنوان یکی از مهمترین مشکلات کشاورزی در جهان است. براساس گزارش‌های رفاهی (۱۹۹۶)، کاهش حاصلخیزی خاک بر اثر فرسایش دلیل اصلی پایین آمدن تولید محصولات کشاورزی در خاک‌های ایران است. در این راستا شناخت و ارزیابی عوامل عمده موثر در فرسایش آبی نخستین گام در ارائه راهکاری مناسب برای کاهش فرسایش خاک است. بر اساس رابطه جهانی فرسایش خاک^۱ یا USLE یکی از عوامل شش‌گانه موثر در فرسایش آبی، فرسایش-پذیری خاک^۲ است. بر اساس تعریف ویه^۳ (۲۰۰۲) فرسایش‌پذیری خاک بیانگر حساسیت ذاتی خاک به فرسایش است و سهولت جدا شدن ذرات خاک بر اثر انرژی جنبشی قطرات باران و انتقال آنها به وسیله نیروی رواناب را نشان می‌دهد.

بررسی‌های گسترده‌ای توسط ویشمایر و اسمیت^۴ (۱۹۷۸) برای تعیین فرسایش‌پذیری خاک در ایالت‌های مختلف آمریکا انجام گرفت. بر این اساس مقدار واقعی عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) از راه تعیین مقدار خاک فرسایش یافته از کرت واحد^۵ در واحد شاخص فرسایش باران^۶ ($R=EI_{30}$) به دست می‌آید. بر اساس این بررسی‌ها، فرسایش‌پذیری خاک تحت تأثیر پنج ویژگی خاک شامل درصد شن، مجموع درصد سیلت و درصد شن‌خیلی‌ریز، درصد ماده آلی، ساختمان و نفوذپذیری نیمرخ خاک^۷ است. در این راستا این دو پژوهشگر نمودگرافی را برای برآورد فرسایش‌پذیری خاک

ارائه دادند. رابطه رگرسیونی این نمودگراف در سیستم بین‌المللی به صورت زیر است:

(۱)

$$K = 2.8 \times 10^{-7} M^{1.14} (12 - a) + 4.3 \times 10^{-3} (b - 2) + 3.3 \times 10^{-3} (c - 3)$$

که در آن: K عامل فرسایش‌پذیری خاک بر حسب $\frac{Mg \cdot h}{MJ \cdot mm}$ (مگاگرم ساعت بر مگاژول میلی‌متر)، M حاصلضرب مجموع درصد سیلت و شن خیلی‌ریز در (درصد رس - ۱۰۰)، a درصد ماده آلی، b گروه ساختمان خاک و c درجه نفوذپذیری نیمرخ خاک است.

پژوهش‌های زیادی در سراسر جهان تأثیر عوامل مختلف را بر فرسایش‌پذیری نشان می‌دهند. در گزارشی توسط کیرکبای و مورگان (۱۹۸۰) بیان شد که اثر ماده آلی در کاهش فرسایش‌پذیری خاک در بافت‌های شن‌ای بیشتر از سیلتی و آن هم بیشتر از رسی است. در پژوهشی مورفی^۸ (۱۹۸۴) برای برآورد فرسایش‌پذیری خاک‌های کشاورزی، طرحی را بر اساس پایداری ساختمان خاک، مقدار ماده آلی در سطح خاک، مقدار سزکوئی‌اکسیدها در خاک زیرسطحی و مقدار خاکدانه‌های پایدار در آب (با قطر کمتر از ۲ میلی‌متر) ارائه کرد. بر اساس گزارش‌های یانگ^۹ و همکاران (۱۹۹۰) حساسیت خاک به فرسایش به ویژگی‌های متعدد خاک از جمله فیزیکی و شیمیایی همراه با ویژگی‌های نیمرخ خاک مثل عمق خاک و تأثیر آن بر رشد گیاه بستگی دارد. بنابراین مفهوم فرسایش‌پذیری و ارزیابی آن پیچیده است.

بررسی‌های کاسترو و لوگان^{۱۰} (۱۹۹۱) نشان داد که آهک از یک سو با افزایش pH موجب می‌شود گروه‌های هیدروکسیل سطح رس‌ها بیشتر یونیزه شوند و در نتیجه بار منفی بیشتری تولید شود و از سوی دیگر وجود کاتیون کلسیم در هم‌آوری^{۱۱} رس‌ها و پایداری آنها موثر است. گزارش‌های چارمن و مورفی (۲۰۰۰) نشان داد که رس

1- Universal Soil Loss Equation

2- Soil erodibility

3- Veihe

4- Wischmeier and Smith

5- Unit plot

6- Rainfall erosivity index

7- Soil permeability

8- Murphy

9- Young

10- Castro and Logan

11- Flocculation

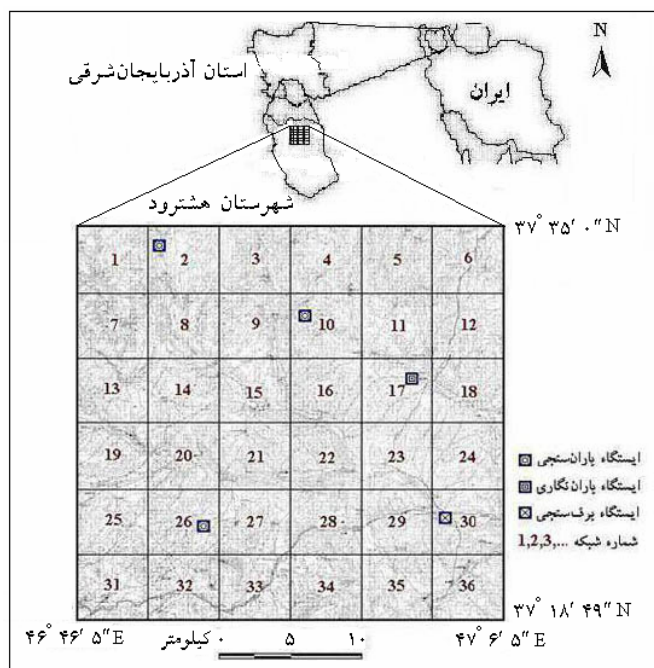
فرسایش پذیری خاک در واحدهای مختلف اراضی با افزایش نسبت رس به شن و سیلت افزایش یافت. به طور کلی بررسی پژوهش‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که فرسایش پذیری خاک تحت تأثیر عوامل مختلف از جمله ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قرار می‌گیرد در حالی که نمودار فرسایش پذیری **USLE** تنها بر اساس بخشی از ویژگی‌های خاک استوار است. بنابراین بررسی فرسایش پذیری در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک به منظور شناخت عوامل موثر بر فرسایش پذیری حائز اهمیت است. هدف از انجام این پژوهش آن است تا عوامل فیزیکی و شیمیایی موثر بر فرسایش پذیری در خاک‌های آهکی شناسایی گردد و دقت نمودار در برآورد فرسایش پذیری خاک‌های آهکی بررسی شود و در صورت نیاز روشی دقیق برای برآورد فرسایش پذیری خاک‌های آهکی ارائه شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: این پژوهش در شهرستان هشتگرد واقع در $36^{\circ} 47' 24''$ تا $37^{\circ} 33' 37''$ عرض شمالی و $46^{\circ} 29' 8''$ تا $47^{\circ} 41' 13''$ طول شرقی در جنوب استان آذربایجان شرقی طی سال ۱۳۸۴ انجام گردید. این منطقه دارای آب و هوای نیمه خشک سرد با میانگین بارندگی سالانه ۳۴۰ میلی‌متر است (شکل ۱). موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. خاک‌ها بیشتر در شیب‌های بین ۵ تا ۱۵ درصد قرار گرفته است و از نظر ویژگی‌های نیم‌رخ، عمیق تا بسیار عمیق با بافت لومرسی و نفوذپذیری متوسط بوده و اغلب مواد تشکیل دهنده آنها دارای حدود ۱۰ درصد آهک است. خاک‌ها همچنین دارای حدود ۱ درصد ماده آلی، اسیدیته (pH) بین ۷ تا ۸ و شوری حدود ۱ دسی‌زیمنس بر متر هستند و اغلب زیر کشت دیم گندم قرار دارند. در بسیاری از خاک‌ها فرسایش آبی شدید بوده به طوری که اجرای کارهای حفاظتی ضروری است (حکیمی، ۱۹۸۶).

معمولاً فرسایش پذیری خاک را کاهش می‌دهد. کاتیون کلسیم نقشی موثر در به هم آمدن کلوئیدهای خاک و کاهش فرسایش پذیری دارد. براساس گزارش‌های گوپتا (۲۰۰۲) نفوذپذیری و پایداری ساختمان خاک دو ویژگی بسیار مهم خاک هستند که بر عامل فرسایش پذیری (K) اثر می‌گذارند. آزمایش‌های انجام شده توسط سانتوس و همکاران (۲۰۰۳) نشان داد که خاک‌های دارای درصد بیشتری از ذرات شن، اثر ضربه قطرات باران را بهتر کاهش می‌دهند و به دلیل داشتن سرعت نفوذ آب بیشتر، رواناب کمتری تولید می‌کنند. در پژوهشی توسط اورندلیک و همکاران (۲۰۰۴) اثر کربن آلی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار کربن آلی خاک اثری مثبت بر تخلخل خاک و ظرفیت آب قابل استفاده گیاه دارد و فرسایش پذیری خاک را کاهش می‌دهد. در آزمایشی توسط زانگ و همکاران (۲۰۰۴) نشان داند که بین مقدار رس و عامل فرسایش پذیری خاک در **USLE** همبستگی معنی‌دار منفی وجود دارد.

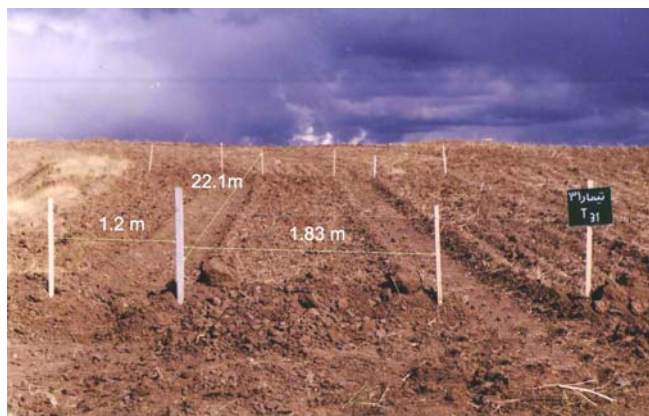
در ایران نیز پژوهش‌هایی در مورد عوامل موثر بر فرسایش پذیری خاک انجام گرفته است. در گزارشی رفاهی (۱۹۹۶) بیان کرد که نمودار فرسایش پذیری در خاک‌های تقریباً غیرآهکی ارائه گردیده است در حالی که در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک از جمله بیشتر نقاط ایران، آهک نقشی اساسی در پایداری خاکدانه‌ها دارد. افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌تواند فرسایش پذیری را کاهش دهد. بررسی‌های انجام گرفته توسط قاسمی و محمدی (۲۰۰۳) در حوزه آبخیز چغاخور در استان چهارمحال بختیاری نشان داد که با افزایش درصد رس و ماده آلی، فرسایش پذیری خاک کمتر و با افزایش درصد سیلت بیشتر می‌شود. قادری و قدوسی (۲۰۰۵) نیز فرسایش پذیری خاک را در حوزه تلوارچای استان کردستان مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه.

احداث کرت واحد و اندازه‌گیری رواناب و رسوب: در آغاز فصل بهار ۱۳۸۴ خاک‌های انتخاب شده در جهت شیب شخم و دیسک زده و بقایای گیاهی سطح آنها جمع‌آوری شد. در هر شبکه تعداد ۳ کرت به عرض ۱/۸۳ متر و به طول ۲۲/۱ متر با فاصله ۱/۲ متر و در کل به تعداد ۱۰۸ کرت واحد ایجاد گردید. برای جلوگیری از ورود و خروج رواناب، پیرامون کرت‌ها با پشته‌های خاکی به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر بسته شد. شکل ۲ نمایی از کرت‌های واحد مورد استفاده در پژوهش در منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد. در انتهای هر کرت لوله‌ای ۵ اینچی از جنس پلیکا برای انتقال رواناب و رسوب به داخل محفظه جمع‌آوری با حجم ۷۰ لیتر قرار داده شد و سطح محفظه با دربی پوشانده شد.

روش پژوهش: برای بررسی فرسایش‌پذیری بر اساس USLE، محدوده‌ای مربعی شکل از خاک‌های کشاورزی شهرستان هسترد به ابعاد ۳۰×۳۰ کیلومتر انتخاب و به ۳۶ شبکه به ابعاد ۵×۵ کیلومتر تقسیم شد. برای کاهش تأثیر شیب بر رطوبت اولیه خاک، نفوذپذیری و فرسایش‌پذیری، خاک‌های واقع در شیب‌های جنوبی انتخاب شدند. در این شیب‌ها برای از بین بردن اثر بقایای گیاهی بر فرسایش‌پذیری، خاک‌های زیر آیش در نظر گرفته شد. با استفاده از سیستم مکان‌یاب جهانی^۱، موقعیت جغرافیایی محل ایجاد کرت‌های فرسایشی مشخص شد. در این خاک‌ها کرت‌های فرسایشی بر اساس کرت واحد طراحی شد. در شکل ۱ موقعیت کرت‌های واحد و ایستگاه‌های بارندگی بر روی نقشه توپوگرافی منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمایی از کرت‌های واحد مورد استفاده در پژوهش در منطقه مورد بررسی.

که در آن: E انرژی جنبشی در واحد سطح به ازای ارتفاع باران ($\frac{J}{m^2 \cdot cm}$) یا ژول بر مترمربع در سانتی‌متر

باران) و I شدت بارندگی ($\frac{cm}{h}$ یا سانتی‌متر در ساعت)

است. از حاصلضرب انرژی جنبشی بر حسب $\frac{MJ}{ha}$

(مگاژول در هکتار) در بیشترین شدت ۳۰ دقیقه‌ای باران

بر حسب $\frac{mm}{h}$ ، شاخص فرساینده‌گی (EI_{30}) هر باران بر

حسب $\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h}$ تعیین شد. مقدار سالانه عامل

فرساینده‌گی (R) نیز از جمع EI_{30} ها در سال، بر

حسب $\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h \cdot year}$ به دست آمد. مقدار K یا عامل

فرسایش‌پذیری خاک ($\frac{Mg \cdot h}{MJ \cdot mm}$) از روش پیشنهادی

ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) با استفاده از رابطه (۱) برآورد

گردید. مقدار اندازه‌گیری شده K نیز از تقسیم مقدار

فرسایش خاک اندازه‌گیری شده در کرت واحد

($\frac{Mg}{ha \cdot year}$) بر مقدار عامل فرساینده‌گی باران

($\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h \cdot year}$) به دست آمد.

تجزیه و تحلیل آماری: برای تجزیه و تحلیل آماری،

شاخص‌های مختلف آماری (میانگین، کمترین، بیشترین،

انحراف معیار و فرض نرمال) برای کل داده‌ها و نیز

بررسی رابطه بین متغیرها با استفاده از نرم‌افزار SPSS

ویرایش ۱۳ انجام گرفت.

اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک: براساس بررسی منابع، در

کنار ویژگی‌های موثر بر فرسایش‌پذیری در نمودار،

برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک که ممکن بود

بیشترین تأثیر را بر فرسایش‌پذیری داشته باشند،

اندازه‌گیری شد. این ویژگی‌ها شامل ویژگی‌های مستقل

خاک (درصد ذرات، ماده آلی، آهک و سنگریزه) و

ویژگی‌های وابسته (پایداری خاکدانه‌ها و نفوذپذیری

خاک) بود. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های آزمایشگاهی، در

فروردین ماه ۱۳۸۴ نمونه‌های خاک از عمق ۳۰ سانتی‌متر

از ۳ نقطه در امتداد کرت‌ها به طور تصادفی برداشت و از

آن نمونه‌ای مرکب تهیه و به آزمایشگاه منتقل گردید.

ویژگی‌های مستقل با روش‌های رایج (۱) و پایداری

خاکدانه‌ها بر اساس میانگین وزنی قطر^۱ (MWD) با

روش الک‌تر در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. نفوذپذیری

نیمرخ خاک با روش استوانه‌های مضاعف براساس

سرعت نفوذ نهایی در مزرعه تعیین گردید.

تعیین عامل فرساینده‌گی باران و عامل فرسایش‌پذیری

خاک: مقدار بارندگی، از داده‌های باران ایستگاه‌های واقع

در شبکه‌های ۲، ۱۰، ۲۶ (باران‌سنجی) و ۱۷ (باران‌نگاری)

تعیین شد (شکل ۲). شاخص فرساینده‌گی باران

($R=EI_{30}$)، بر اساس داده‌های ایستگاه باران‌نگاری از

رابطه ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) به دست آمد:

$E = 11/87 + 8/73 \log_{10} I$ (۲)

نتایج و بحث

بر اساس نتایج تجزیه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، خاک‌ها بیشتر دارای بافت لوم رسی، با ماده آلی کم، آهکی و با نفوذپذیری متوسط و خاکدانه‌های نسبتاً ناپایدار بودند. جدول ۱ نتایج میانگین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اندازه‌گیری شده در خاک کرت‌های مختلف را نشان می‌دهد. بررسی مقدار بارندگی در ایستگاه‌های مختلف طی سال نشان داد که میانگین مقدار

بارندگی سالانه در منطقه برابر ۳۲۲ میلی‌متر است. در طی سال ۱۳۸۴ از ۵۵ مورد رخداد باران، ۲۳ رخداد بارندگی فرسایش‌زا بود. شدت بارندگی طی سال ۱۳۸۴ از ۰/۱ تا ۱۳/۸ میلی‌متر در ساعت به مدت ۰/۵ تا ۱۰/۵ ساعت تغییر کرد. مقدار سالانه شاخص فرسایش باران (R) نیز برابر ۴۳۸/۹۳۷۸ مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت سال بود.

جدول ۱- نتایج میانگین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اندازه‌گیری شده در خاک کرت‌های مختلف.

مقدار	S*	VFS	Si	Cl	Gr	OM	TNV	MWD	Ks
	(درصد)	(درصد)	(درصد)	(درصد)	(درصد)	(درصد)	(درصد)	(میلی‌متر)	(سانتی‌متر- ساعت)
کمترین	۲۴/۸۰	۸/۹۰	۲۰/۲۰	۲۰/۸۰	۵/۳۰	۰/۷۴	۱/۲۰	۰/۲۷	۱/۸
بیشترین	۴۸/۳۰	۲۴/۸۰	۴۶/۴۰	۴۲/۲۰	۱۷/۴۵	۲/۱۳	۱۸/۴۰	۱/۸۷	۶/۵
میانگین	۳۶/۴۰	۱۶/۶۰	۳۱/۵۰	۳۱/۵۰	۹/۹۱	۱/۰۹	۸/۶۵	۱/۰۶	۳/۳
انحراف معیار	۶/۶۹	۳/۷۷	۷/۴۸	۵/۶۸	۳/۱۰	۰/۲۶	۴/۳۳	۰/۴۴	۱/۳۰
فرض نرمال	۰/۶۲	۰/۹۸	۰/۷۵	۰/۹۳	۰/۳۱	۰/۳۹	۰/۹۲	۰/۹۵	۰/۷۷

* S، VFS، Si، Cl، Gr، OM، TNV، MWD و Ks به ترتیب شن، شن بسیار ریز، سیلت، رس، سنگریزه، ماده آلی، آهک، میانگین وزنی قطر خاکدانه و نفوذپذیری نهایی است.

میانگین مقدار باران‌های فرسایش‌زا در ایستگاه‌های بارندگی واقع در شبکه‌های ۲، ۱۰، ۱۷ و ۲۶ به ترتیب ۷/۱۵، ۶/۷۶، ۶/۹۷ و ۷/۰۸ میلی‌متر بود. بررسی مقدار باران فرسایش‌زا در ایستگاه‌های مختلف با روش آزمون غیرپارامتریک^۱ در نمونه‌های مستقل^۲ نشان داد که بارندگی در ایستگاه‌های بارندگی، تفاوتی معنی‌دار در سطح ۵ درصد ندارد و پراکنش بارندگی در سطح منطقه یکنواخت می‌باشد. بر اساس نتایج میانگین مقدار سالانه فرسایش-پذیری اندازه‌گیری شده و برآوردی (حاصلضرب مقدار فرسایش‌پذیری برآوردی و شاخص فرسایش‌پذیری

باران) به ترتیب برابر ۱/۸۷ و ۱۵/۷۹۶ مگاگرم در هکتار در سال بود. میانگین مقدار سالانه فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآوردی نیز به ترتیب برابر ۰/۰۰۴۲۵۸ و ۰/۰۳۵۹۸۸ مگاگرم ساعت بر مگاژول میلی‌متر بود که مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده حدود ۱۰/۹۸ برابر کمتر از مقدار برآوردی بود. جدول ۲ نتایج مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآوردی در منطقه مورد بررسی طی سال ۱۳۸۴ را نشان می‌دهد بر اساس آزمون t جفتی تفاوت بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و برآوردی بررسی شد. این تفاوت در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود.

جدول ۲- نتایج مقدار فرسایش پذیری اندازه‌گیری شده و برآوردی در منطقه مورد بررسی طی سال ۱۳۸۴.

شاخص آماری	فرسایش‌پذیری برآوردی (مگاگرم ساعت بر مگاژول میلی‌متر)	فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده (مگاگرم ساعت بر مگاژول میلی‌متر)
کمترین	۰/۰۲۵۳۷۱	۰/۰۰۰۸۱۲
بیشترین	۰/۰۴۹۲۳۳	۰/۰۰۷۳۳۱
میانگین	۰/۰۳۵۹۸۸	۰/۰۰۴۱۶۵
انحراف معیار	۰/۰۰۶۸۱۲	۰/۰۰۱۷۶۶
فرض نرمال	۰/۹۹۶	۰/۹۹۲

بر اساس نمودار فرسایش‌پذیری یا رابطه (۱) فرسایش‌پذیری برآوردی (K) تحت تأثیر مجموع درصد سیلت و شن خیلی ریز، درصد شن درشت، درصد ماده آلی، ساختمان و نفوذپذیری نیمرخ خاک قرار می‌گیرد. رابطه بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و شاخص‌های موجود در این رابطه شامل $3.3 \times 10^{-3}(c-3)$ ، $4.3 \times 10^{-3}(b-2)$ و $2.8 \times 10^{-7} M^{1.14}(12-a)$ نیز بررسی شد. بر اساس نتایج این رابطه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار و ضریب تبیین آن (R^2) ۰/۱۷ بود. از آنجا که تمامی خاک‌ها دارای ساختمان دانه‌ای یکسانی بودند، از این رو در تجزیه آماری اثر شاخص‌های نمودار بر فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده، ساختمان خاک مورد بررسی قرار نگرفت و شاخص $4.3 \times 10^{-3}(b-2)$ در تجزیه واریانس بیان نگردید. بر اساس نتایج، شاخص $2.8 \times 10^{-7} M^{1.14}(12-a)$ اثری افزایشی و شاخص $3.3 \times 10^{-3}(c-3)$ اثری کاهشی در فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده خاک داشتند. از بین شاخص‌های نمودار تنها اثر شاخص $2.8 \times 10^{-7} M^{1.14}(12-a)$ در مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های نمودار نمی‌توانند بیانگر مقدار واقعی (اندازه‌گیری شده) فرسایش‌پذیری در خاک‌های آهکی مورد بررسی باشند. به این دلیل اثر ویژگی‌های مستقل (درصد شن، سیلت، رس، ماده آلی، آهک و سنگریزه) و وابسته (پایداری خاکدانه و نفوذپذیری) بر فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده بررسی شد. جدول ۳ نتایج ماتریس همبستگی بین ویژگی‌های مستقل و وابسته و فرسایش‌پذیری خاک را نشان می‌دهد. نتایج جدول ماتریس همبستگی نشان داد که فرسایش‌پذیری خاک با شن، سیلت، ماده آلی، آهک، پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک همبستگی معنی‌دار دارد. پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک نیز به نوبه خود تحت تأثیر ویژگی‌های مستقل خاک قرار گرفتند. از آنجا که پایداری خاکدانه مقاومت ذرات در برابر جداشدن بر اثر ضربه قطرات باران را بیان می‌کند می‌توان آن را به عنوان معیاری از سهولت جداشدن ذرات خاک در نظر گرفت. از سوی دیگر نفوذپذیری خاک نیز به دلیل تأثیر رواناب، در انتقال ذرات نقش دارد. نتایج پژوهش‌های مختلف از جمله گوپتا (۲۰۰۲) نیز موید نقش اساسی پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک بر فرسایش‌پذیری است. بنابراین اثر این دو ویژگی بر فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده بررسی شد. نتایج جدول ماتریس همبستگی نشان داد که همبستگی بین آن دو در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نیست.

بر اساس نمودار فرسایش‌پذیری یا رابطه (۱) فرسایش‌پذیری برآوردی (K) تحت تأثیر مجموع درصد سیلت و شن خیلی ریز، درصد شن درشت، درصد ماده آلی، ساختمان و نفوذپذیری نیمرخ خاک قرار می‌گیرد. رابطه بین فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده و شاخص‌های موجود در این رابطه شامل $3.3 \times 10^{-3}(c-3)$ ، $4.3 \times 10^{-3}(b-2)$ و $2.8 \times 10^{-7} M^{1.14}(12-a)$ نیز بررسی شد. بر اساس نتایج این رابطه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار و ضریب تبیین آن (R^2) ۰/۱۷ بود. از آنجا که تمامی خاک‌ها دارای ساختمان دانه‌ای یکسانی بودند، از این رو در تجزیه آماری اثر شاخص‌های نمودار بر فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده، ساختمان خاک مورد بررسی قرار نگرفت و شاخص $4.3 \times 10^{-3}(b-2)$ در تجزیه واریانس بیان نگردید. بر اساس نتایج، شاخص $2.8 \times 10^{-7} M^{1.14}(12-a)$ اثری افزایشی و شاخص $3.3 \times 10^{-3}(c-3)$ اثری کاهشی در فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده خاک داشتند. از بین شاخص‌های نمودار تنها اثر شاخص $2.8 \times 10^{-7} M^{1.14}(12-a)$ در مقدار فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های نمودار نمی‌توانند بیانگر مقدار واقعی (اندازه‌گیری شده) فرسایش‌پذیری در خاک‌های آهکی مورد بررسی باشند. به این دلیل اثر ویژگی‌های مستقل (درصد شن، سیلت، رس، ماده آلی، آهک و سنگریزه) و وابسته (پایداری خاکدانه و نفوذپذیری) بر فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده بررسی شد. جدول ۳ نتایج ماتریس همبستگی بین ویژگی‌های مستقل و وابسته و فرسایش‌پذیری خاک را نشان می‌دهد. نتایج جدول ماتریس همبستگی نشان داد که فرسایش‌پذیری خاک با شن، سیلت، ماده آلی، آهک، پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک همبستگی معنی‌دار دارد. پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک نیز به نوبه خود تحت تأثیر ویژگی‌های مستقل خاک قرار گرفتند. از آنجا که پایداری خاکدانه مقاومت ذرات در برابر جداشدن بر اثر ضربه قطرات باران را بیان می‌کند می‌توان آن را به عنوان معیاری از سهولت جداشدن ذرات خاک در نظر گرفت. از سوی دیگر نفوذپذیری خاک نیز به دلیل تأثیر رواناب، در انتقال ذرات نقش دارد. نتایج پژوهش‌های مختلف از جمله گوپتا (۲۰۰۲) نیز موید نقش اساسی پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک بر فرسایش‌پذیری است. بنابراین اثر این دو ویژگی بر فرسایش‌پذیری اندازه‌گیری شده بررسی شد. نتایج جدول ماتریس همبستگی نشان داد که همبستگی بین آن دو در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نیست.

جدول ۳- نتایج ماتریس همبستگی بین ویژگی‌های مستقل و وابسته و فرسایش پذیری خاک.

ویژگی ^۱	S	Si	Cl	OM	TNV	Gr	MWD	Ks	K
S	۱								
Si	-۰/۶۷۰***	۱							
Cl	-۰/۳۷۹*	-۰/۴۰۰**	۱						
OM	۰/۰۶۱	-۰/۲۲۸	۰/۲۰۸	۱					
TNV	-۰/۲۶۹	-۰/۱۷۴	۰/۰۲۸	۰/۰۴۶	۱				
Gr	۰/۰۱۸	۰/۰۲۴	-۰/۰۵۸	۰/۱۶۵	-۰/۰۳۰	۱			
MWD	-۰/۴۵۷**	۰/۱۲۳	۰/۷۰۵***	۰/۲۹۳*	۰/۴۸۱**	-۰/۰۹۱	۱		
Ks	۰/۵۶۹***	-۰/۵۵۳***	-۰/۰۶۹	۰/۵۴۱***	۰/۲۹۵*	۰/۰۹۱	۰/۱۳۴	۱	
K	-۰/۴۷۰**	۰/۶۱۳***	-۰/۱۳۳	-۰/۴۷۸**	-۰/۴۱۰**	-۰/۱۵۷	-۰/۳۵۰*	-۰/۸۸۲***	۱

۱: S, Si, Cl, OM, TNV, Gr, MWD, Ks و K به ترتیب شن، سیلت، رس، ماده آلی، آهک، سنگریزه، میانگین وزنی قطر خاکدانه، نفوذپذیری نهایی و عامل فرسایش پذیری خاک است.

*: معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۵، **: معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۱، ***: معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۰۱

ویژگی موجب شد فرسایش پذیری خاک به طور قابل توجهی کاهش یابد. بر اساس جدول ۴ با توجه به ضریب تاثیرگذاری (t) و سطح معنی داری بیشتر نفوذپذیری نسبت به پایداری خاکدانه، اثر نفوذپذیری در کاهش فرسایش پذیری بیشتر از پایداری خاکدانه بود.

نتایج نشان داد که رابطه بین فرسایش پذیری خاک و دو ویژگی پایداری خاکدانه و نفوذپذیری در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار است و ضریب تبیین آن ۸۳ درصد ($R^2=0/83$) بود. جدول ۴ نتایج ضرایب رگرسیونی اثر پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک بر فرسایش پذیری اندازه گیری شده را نشان می دهد. هر دو

جدول ۴- نتایج ضرایب رگرسیونی اثر ویژگی‌های وابسته خاک بر فرسایش پذیری اندازه گیری شده.

معنی داری	t	ضرایب استاندارد		مدل
		Beta	انحراف معیار	
۰/۰۰۰	۲۰/۲۱۷		۰/۰۰۰۴۹	مقدار ثابت
۰/۰۰۲	-۳/۲۹۶	-۰/۲۳۶	۰/۰۰۰۲۹	پایداری خاکدانه
۰/۰۰۰	-۱۱/۸۷۱	-۰/۸۵۱	۰/۰۰۰۱۱	نفوذپذیری نیمرخ

خاک بر حسب سانتی متر در ساعت و K عامل فرسایش-پذیری خاک در USLE بر حسب مگاگرم ساعت بر مگاژول میلی متر است.

از آنجا که اندازه گیری پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک کاری زمان بر می باشد، برآورد فرسایش پذیری براساس این دو ویژگی نیز وقت گیر خواهد بود. بنابراین برای برآورد آسان فرسایش پذیری می توان از رابطه آن با ویژگی‌های مستقل خاک استفاده کرد. بررسی رگرسیونی

بر اساس نتایج جدول ۴ می توان مقدار فرسایش پذیری را بر اساس رابطه رگرسیونی زیر با اطمینان بالا ($R^2=0/83$) برآورد کرد:

(۳)

$$Ks = -0/00129 MWD - 0/00094 K$$

که در آن: MWD میانگین وزنی قطر خاکدانه در روش الک تر بر حسب میلی متر و Ks نفوذپذیری نیمرخ

چند متغیره خطی با روش Backward نشان داد که فرسایش پذیری خاک تحت تاثیر سه ویژگی سیلت، ماده آلی و آهک قرار می‌گیرد. جدول ۵ اثر ویژگی‌های مستقل

جدول ۵- اثر ویژگی‌های مستقل خاک بر فرسایش پذیری خاک.

معنی داری	t	ضرایب استاندارد		مدل
		Beta	انحراف معیار	
۰/۰۰۳	۳/۲۷۶		۰/۰۰۰۱۱۴	مقدار ثابت
۰/۰۰۰	۶/۷۱۱	۰/۶۳۰	۰/۰۰۰۰۲	سیلت
۰/۰۰۲	-۳/۳۵۷	-۰/۳۱۱	۰/۰۰۰۶۴	ماده آلی
۰/۰۰۰	-۵/۵۱۹	-۰/۵۰۵	۰/۰۰۰۰۳	آهک

اهمیت بیشتر نفوذپذیری در فرسایش پذیری، ویژگی‌هایی که بر نفوذپذیری تاثیر بیشتری دارند فرسایش پذیری را بیشتر تحت تاثیر قرار می‌دهند. شن با وجود کاهش پایداری خاکدانه موجب شد نفوذپذیری به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. به این دلیل شن فرسایش پذیری خاک را کاهش داد. اثر شن در کاهش فرسایش پذیری با یافته‌های سانتوس و همکاران (۲۰۰۳) مطابقت دارد. سیلت با وجود افزایش جزئی پایداری خاکدانه به دلیل کاهش چشمگیر نفوذپذیری خاک موجب شد فرسایش-پذیری به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. اثر سیلت در افزایش فرسایش پذیری نتایج پژوهش‌های ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) و قاسمی و محمدی (۲۰۰۳) را تایید می‌کند. رس با وجود افزایش معنی‌دار پایداری خاکدانه به دلیل کاهش نفوذپذیری موجب شد فرسایش پذیری خاک کاهش یابد. تاثیر منفی رس بر فرسایش پذیری با نظر چارمن و مورفی (۲۰۰۰) مطابقت دارد اما برخلاف یافته-های زانگ و همکاران (۲۰۰۴) این تاثیر معنی‌دار نبود. ماده آلی به‌طور چشمگیری موجب شد پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک افزایش یابد و به این دلیل باعث شد فرسایش پذیری خاک کاهش یابد. این نتیجه، نتایج پژوهش‌های قاسمی و محمدی (۲۰۰۳) و اورندلیک و همکاران (۲۰۰۴) را تایید می‌کند. آهک نیز به‌طور چشمگیری موجب شد پایداری خاکدانه و نفوذپذیری

بر اساس نتایج جدول ۵ می‌توان مقدار فرسایش پذیری خاک را در USLE از رابطه چندمتغیره خطی زیر طبق ویژگی‌های مستقل خاک با اطمینان نسبتاً بالا ($R^2=0.74$) به آسانی برآورد کرد:

(۴)

$$K \text{ factor} = 0.000373 + 0.00016 \text{ Silt} - 0.00216 \text{ OM} - 0.00017 \text{ TNV}$$

که در آن: Silt درصد سیلت، OM درصد مواد آلی و TNV درصد مواد خنثی شونده (آهک) است. جدول ۵ و رابطه (۴) نشان می‌دهد که ماده آلی و آهک به‌طور چشمگیری فرسایش پذیری را کاهش و سیلت به‌طور قابل ملاحظه‌ای آن را افزایش می‌دهد.

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک به‌عنوان دو ویژگی مهم موثر بر فرسایش پذیری خاک هستند. افزایش هر دو ویژگی موجب می‌شود فرسایش پذیری خاک به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. این نتیجه، گزارش‌های گوپتا (۲۰۰۲) در مورد اهمیت دو شاخص نفوذپذیری و پایداری ساختمان خاک در فرسایش پذیری را تایید می‌کند. در این پژوهش اثر کاهشی نفوذپذیری در فرسایش-پذیری بیشتر از پایداری خاکدانه بود. ویژگی‌های مستقل خاک نیز با تاثیر بر پایداری خاکدانه و نفوذپذیری بر فرسایش پذیری اثر می‌گذارند. بدیهی است با توجه به

خاک افزایش یابد و به این دلیل باعث شد فرسایش پذیری کاهش یابد. این نتیجه گزارش های کاسترو و لوگان (۱۹۹۱) و چارمن و مورفی (۲۰۰۰) را تایید می کند. اثر سنگریزه در کاهش پایداری خاکدانه و افزایش نفوذپذیری خاک قابل ملاحظه نبود.

به طور کلی می توان نتیجه گرفت که در خاک های آهکی مورد بررسی اختلاف مقدار فرسایش پذیری اندازه گیری شده با مقدار برآوردی از نمودار USLE بسیار زیاد بوده و این تفاوت در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار است. از این رو عوامل موثر در فرسایش پذیری بر اساس نمودار، دقت لازم در برآورد فرسایش پذیری خاک های آهکی مورد بررسی ندارند. نتایج نشان داد که در این خاک ها، فرسایش پذیری تحت تاثیر ویژگی های وابسته (نفوذپذیری و پایداری ساختمان خاک) و مستقل خاک (درصد ذرات معدنی، ماده آلی، آهک و سنگریزه) قرار می گیرد. نتایج نشان داد که مقدار فرسایش پذیری خاک در منطقه مورد بررسی را می توان از یک تابع رگرسیون خطی بر اساس دو ویژگی نفوذپذیری و پایداری ساختمان خاک با ضریب تبیین ۸۳ درصد برآورد کرد. افزایش این دو ویژگی موجب می شود فرسایش پذیری خاک به طور چشمگیری کاهش یابد. نتایج نشان داد که ویژگی های مستقل نیز با تاثیر بر پایداری ساختمان و نفوذپذیری

خاک، بر فرسایش پذیری اثر می گذارند. ویژگی هایی که تاثیر مثبت بر نفوذپذیری و پایداری ساختمان خاک داشتند، فرسایش پذیری خاک را کاهش دادند. از بین این ویژگی ها، آهک مانند ماده آلی با افزایش پایداری خاکدانه ها و نفوذپذیری خاک موجب می شود قابلیت جدا شدن ذرات از یکدیگر کاهش و سرعت نفوذ آب به خاک افزایش و در نتیجه فرسایش پذیری خاک کاهش پیدا کند. تاثیر آهک بر فرسایش پذیری در نمودار USLE در نظر گرفته نشده است. با توجه به اینکه اندازه گیری دو شاخص پایداری خاکدانه و نفوذپذیری نیمرخ خاک کاری مشکل و زمان بر است، فرسایش پذیری خاک های آهکی مورد بررسی را از رابطه رگرسیونی ساده تر بر اساس ویژگی های مستقل خاک (سیلت، ماده آلی و آهک) با اطمینان نسبتاً بالا ($R^2=0.74$) به آسانی می توان برآورد کرد.

سپاسگزاری

از اداره آبیاری شهرستان هشتگرد به خاطر ارائه آمار باران و از موسسه تحقیقات کشاورزی استان زنجان به دلیل فراهم ساختن امکان آزمایش پایداری خاکدانه قدردانی می شود.

منابع

1. Aliehiaee, M. 1996. Methods of soil analysis. Soil and Water Research Institute, Agriculture Ministry, Iran, Research Report, 893: 6-128.
2. Castro, C.F., and Logan, T.J. 1991. Liming effects on the stability and erodibility of some Brazilian oxisols. Soil Sci. Soc. Am. J. 55: 1407-1413.
3. Charman, P.E.V., and Murphy, B.W. 2000. Soils (their properties and management). Second edition, Land and Water Conservation, New South Wales, Oxford. Pp: 206-212.
4. Evrendliek, F., Celik, I., and Kilic, S. 2004. Changes in soil organic carbon and other physical soil properties along adjacent Mediterranean forests, grassland and cropland ecosystems. Journal of Arid Environment, 59: 743-752.
5. Gerrard, J. 2000. Fundamental of soils. Routledge Fundamentals of Physical Geography, London and New York. Pp: 177-200.
6. Ghaderi, N., and Ghoddosi, J. 2005. Study of soil erodibility in lands units from Telvarchai watershed. Proceedings of the Third National Conference of Erosion & Sediment (In Persian). Tehran. Iran. Pp: 367-372.
7. Ghasemi, A., and Mohammadi, J. 2003. Study of spatial variation of soil erodibility, a case study in Cheghakhor watershed in Chaharmahal-e-Bakhtiari province. Proceedings of the Eighth Soil Science Congress of Iran (In Persian). Rasht. Iran. Pp: 864-865.

8. Gupta, O.P. 2002. Water in relation to soils and plants. Agrobios, India. Pp: 31-34.
9. Hakimi, A. 1986. The briefly study of soil science in Hashtrood. Soil and Water Research Institute, Agriculture Ministry, Iran, Research Report, 767: 2-15.
10. Kirkby, M. J., and Morgan, R. P. 1980. Soil erosion. John Wiley & Sons, New York. Pp:150-179.
11. Murphy, B.W. 1984. A scheme for the field assessment of soil erodibility for water erosion, Technical Paper, Wellington Research Center, Soil Conservation Service of NSW, Sydney. Pp: 223-228.
12. Rafahi, H.G. 1996. Soil erosion by water and conservation (In Persian). Tehran University Publication, Pp: 141-147.
13. Santos, F.L., Reis, J.L., Martins, O.C., Castanheria, N.L., and Serralherio, R.P. 2003. Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigation soils. Biosystems Engineering, 86(3): 355-364.
14. Veihe, A. 2002. The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a study from northern Ghana. Geoderma, 106: 101-120.
15. Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. US Department of Agriculture, Washington DC.
16. Yuong, R.A., Romkens, M.J.M., and McCool, D.K. 1990. Temporal variations in soil erodibility. In: Bryan, R.B. (Ed.), Soil Erosion- Experiments and Models. Catena, supplement 17, Verlag, Cremlingen –Destedt, Pp: 101-111.
17. Zhang, K., Li, S., Peng, W., and Yu, B. 2004. Erodibility of agricultural soils and loess plateau of China. Soil & Tillage Research, 76: 157-165.

Study of factors affecting erodibility based on the universal soil loss equation in calcareous soils

***A.R. Vaezi¹, H.A. Bahrami², S.H.R. Sadeghi³, M.H. Mahdian⁴**

¹Ph.D. student, Dept. of Soil Science, Tarbiat Modares University, Iran, ²Assistant Prof. Dept. of Soil Science, Tarbiat Modares University, Iran, ³Associate Prof. Dept. of Watershed Management Tarbiat Modares University, Iran, ⁴Assistant Prof. (Research), Institute of soil conservation and watershed Management, Iran

Abstract

In the Universal Soil Loss Equation (USLE), soil erodibility (K) is estimated by nomograph that is based on particle size distribution, organic matter, and Soil permeability class and structure code. Many studies indicate that the soil erodibility may be affected by other physiochemical properties. This study was conducted in the Hashrud, located in the south part of East Azarbijan province of the Iran. The soils are mainly clay loam and having 13% Lime and with moderately permeability. In order to investigate erodibility, the square network with 900 km² area selected and separated to 36 regular grids 5×5km. In all grids, the plots designed based on unit plot at 3 replicates with 1.2 m spacing. Soil properties consisted of independent properties (sand, very fine sand, silt, clay, organic matter, lime and gravel) and dependent properties (aggregate stability and soil permeability) were measured in the plot soils. The soil erodibility was estimated by nomograph and measured based on soil loss amount per unit erosivity index. The results indicated that the average measured soil erodibility in the study area is 0.004258 Mg.h/MJ.mm that was 10.98 times higher than the measured soil erodibility and this difference was significant (P<0.01). Effect of the aggregate stability and soil permeability on the measured K was significant (R² = 0.83, P<0.01). The results indicated that effect of the independent properties on the soil erodibility is due to their influence on the aggregate stability and permeability. In the study calcareous soils, lime is an important factor in increasing the aggregate stability and soil permeability and in this reason decreases the soil erodibility. However, effect of lime on the erodibility has not been considered in the USLE nomograph. In the study soils, the soil erodibility can be estimated by a simple regression equation with an R²=0.74 based on silt, organic matter, lime and gravel.

Keywords: USLE; Soil erodibility; Calcareous soil; Effective factors.